



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิง
จำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต

โดย ดร.พานิช อินต๊ะ

พฤษภาคม 2553

สัญญาเลขที่ MRG5180217

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิง
จำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต

ดร.พานิช อินต๊ะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ทิพย์วงศ์ จาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นักวิจัยที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาและ ข้อเสนอแนะต่างๆ รวมไปถึงตรวจสอบแก้ไขรายงานการงานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุน พัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2551

ดร. พานิช อินต๊ะ

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5180217

ชื่อโครงการ : โครงการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของ
อนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต

ชื่อนักวิจัย : ดร.พานิช อินต๊ะ

E-mail Address : panich_intra@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

โครงการวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะต้นแบบของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต โดยใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และเพื่อให้ได้เงื่อนไขของแบบเครื่องมือวัดที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์

เครื่องวิเคราะห์ต้นแบบนี้ ประกอบด้วย ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ชุดอัดประจุละอองลอยแบบโคโรนา ชุดดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์ ชุดตรวจวัดกระแสระดับต่ำ ชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล และระบบควบคุมการไหลของของไหล โดยระบบการไหลของเครื่องวิเคราะห์ จะถูกจ่ายและควบคุมโดยเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลกับเครื่องดูดสุญญากาศ การทำงานของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบนี้เริ่มต้นโดยการดูดตัวอย่างละอองลอยที่ต้องการวัดผ่านท่อเก็บตัวอย่าง และผ่านเข้าไปยังชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เพื่อคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าช่วงขนาดที่ต้องการวัดออกด้วยหลักการทางอากาศพลศาสตร์ และจากนั้นอนุภาคจะถูกใส่ประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการแพร่กระจายและสนามโดยชุดให้ประจุแบบโคโรนาเข้มข้นปลายแหลม จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังชุดดักจับไอออนเพื่อกำจัดไอออนอิสระที่มีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูงเกือบเท่ากับอนุภาคที่มีประจุออกก่อน เพื่อป้องกันการเจือปนสัญญาณทางไฟฟ้าของอนุภาคขณะทำการวัด เมื่ออนุภาคที่มีประจุออกจากชุดดักจับไอออนแล้วก็จะผ่านเข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ อนุภาคที่มีประจุทั้งหมดจะตกสะสมตัวบนแผ่นดักกรองประสิทธิภาพสูงแบบ HEPA บรรจุอยู่ในตัวจับยึดแผ่นกรองในลูกถ้วยฟาราเดย์ และเชื่อมต่อเข้ากับชุดวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าของ

อนุภาคที่ตกสะสมตัวบนแผ่นกรอง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จะสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่ผ่านเข้าไปยังฟาราเดย์คลับ โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น และแสดงผลข้อมูลออกมาในรูปแบบของกราฟ ที่แสดงถึงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการการศึกษาทั้งภาคทฤษฎีและการทดลองของส่วนประกอบย่อยต่างๆ ของเครื่องวิเคราะห์ขั้นต้นแบบนี้ ซึ่งประกอบด้วย ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ชุดอัดประจุละอองลอยแบบโคโรนา ชุดดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์ ชุดตรวจวัดกระแสระดับต่ำ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับเครื่องมือวัดมาตรฐานเพื่อยืนยันความถูกต้อง ในการทดสอบสมรรถนะการวิเคราะห์ ได้ทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายอนุภาคนาโนที่เกิดจากการเผาไหม้จากน้ำมัน ซึ่งจากผลการทดสอบสมรรถนะการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ ที่ได้พัฒนานี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนได้ในช่วงขนาด 10 นาโนเมตร ถึง 1,000 นาโนเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดได้อยู่ในช่วง 1 พิโคแอมป์ ถึง 250 พิโคแอมป์ จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคอยู่ในช่วง 1×10^{10} ถึง 1×10^{12} อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร เครื่องวิเคราะห์นี้ใช้เวลาในการวัดและประมวลผลประมาณ 1 วินาที

ในส่วนของการศึกษาวิจัยทั้งทฤษฎีและการทดลองต่อไปคือ (ก) ควรให้ความสนใจเกี่ยวกับผลของรูปร่างของอนุภาคที่มีต่อสมรรถนะการวิเคราะห์ (ข) ควรมีการปรับปรุงระบบให้มีขนาดที่เล็กลงเหมาะสำหรับการพกพาไปในสถานที่ต่างๆ ได้ (ค) ควรทดสอบการวัดในภาคสนามเพิ่มเติม และเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ของเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคฯ มาตรฐานอื่นๆ เช่น EAD SMPS EAS DMS และ EEPS เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือวัดมากยิ่งขึ้น

คำหลัก : อนุภาค ละอองลอย ไอออน นาโน ไฟฟ้าสถิต

Abstract

Project Code : MRG5180217

**Project Title : Development of a Nanometer Electrical Particle Analyzer using
Electrostatic Charge Measurement Technique**

Investigator : Dr. Panich Intra

E-mail Address : panich_intra@yahoo.com

Project Period : 2 Years

A nanometer electrical particle analyzer using electrostatic charge measurement technique was developed in this project. The aim of this project is to design, construct, and performance test the prototype of the analyzer by using materials and control system which is the development and domestic replacement parts from abroad in order to the terms of the instrumentation appropriate work rates and the adoption of commercial.

The developed particle analyzer consists of a size selective inlet, a particle corona charger, an ion trap, a Faraday cup, an electrometer, a data acquisition and processing system, and a fluid flow control system. The flow system of the analyzer was controlled and regulated by mean of mass flow controller and vacuum pump. In this system, a nanoparticle sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the particle corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the HEPA filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. Finally, time variation of particle number concentration was also shown.

In this project, both theoretical and experimental studies of the sub-components of the analyzer includes the size selective inlet, the particle corona charger, the ion trap, a Faraday cup, the electrometer, and the data acquisition and processing system were conducted. The combustion aerosol generator (CAG) was used to generate a polydisperse aerosol for the performance test of this analyzer. The results have been compared with the standard instruments to verify the accuracy. It was found from the results that the developed analyzer was capable of measuring number concentration of nanometer sized particles in the range of approximately 1×10^{10} to 1×10^{12} particles/m³ corresponding to the signal current in the range of approximately 1 to 250 pA. Time response of this analyzer was about 1 s.

Suggestions for further research on both the theoretical and experimental parts of this project: (a) further research should be focused on the effect of particle shape on the overall performance of the analyzer, (b) the analyzer should be improved to a smaller size for portability in field test, and (c) calibration and comparison of the analyzer with other particle measuring devices (e.g. SMPS, EAS, DMS, and ELPI) should be conducted further.

Keywords : Particle Aerosol ion Nanometer Electrostatic

Executive Summary

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) : โครงการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวน
ของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต
(ภาษาอังกฤษ) : Development of a Nanometer Electrical Particle Analyzer
using Electrostatic Charge Measurement Technique

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ (ภาษาไทย) : ดร. พานิช อินตะ
(ภาษาอังกฤษ) : Dr. Panich Intra
(ตำแหน่งวิชาการ) : อาจารย์

3. ระยะเวลาดำเนินงาน : 2 ปี - เดือน

4. เวลาทำงานวิจัยในโครงการประมาณสัปดาห์ละ 18 ชั่วโมง

5. สถานที่ติดต่อ :

ที่ทำงาน	วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300
โทรศัพท์	053-921-444
โทรสาร	053-213-183
e-mail	panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com

6. ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา (ภาษาไทย) : ดร. นคร ทิพย์าวงศ์
(ภาษาอังกฤษ) : Dr. Nakorn Tipayawong
(ตำแหน่งวิชาการ) : รองศาสตราจารย์

6.1 สถานที่ติดต่อ :

ที่ทำงาน	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เลขที่ 239 ถนนห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์	053-944-146
โทรสาร	053-944-145
e-mail	n.tipayawong@yahoo.com

7. ชื่ออธิการบดี หรือผู้รับมอบอำนาจให้ลงนามแทนอธิการบดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพัฒน์ เชื้อไทย

8. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ละอองลอย (aerosol) คืออนุภาค (particles) ที่เป็นของแข็ง (solid) หรือของเหลว (liquid) แขนงลอยอยู่ในอากาศหรือแก๊สและมีขนาดอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร (nm) ถึง 100 ไมโครเมตร (μm) (Hinds, 1999) ละอองลอยเหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชากร และการแผ่รังสีมายังโลกในบรรยากาศ ปัญหามลพิษทางอากาศในเมืองใหญ่ทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจเรื้อรัง และยิ่งไปกว่านั้นยังเพิ่มอัตราการเสียชีวิตของประชากร เนื่องจากการสูดหรือหายใจเอาอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (Hinds, 1999) นอกจากนี้ ปัญหาการปนเปื้อนของอนุภาคในระดับนาโนเมตร หรือ อนุภาคนาโน (nano-particles) ยังมีต่อระบบการผลิตในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์และสารกึ่งตัวนำ วัสดุกรรม และนาโนเทคโนโลยี เช่น การพัฒนาระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดจิ๋ว (nano-electromechanical systems) หรือ NEMs ซึ่งอนุภาคนาโนเหล่านี้จะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ ระบบ และผลิตภัณฑ์ การป้องกันสามารถทำได้โดย มีการตรวจสอบ วิเคราะห์ ควบคุมคุณภาพอากาศ และสิ่งปนเปื้อนจากอนุภาคนาโน ซึ่งจะบ่งชี้ปริมาณและแหล่งที่มาของอนุภาคเหล่านี้ได้ โดยพฤติกรรมและกลไกของอนุภาคเป็นฟังก์ชันของขนาด (size) จำนวน (number) และมวล (mass) (Intra and Tippayawong, 2003)

ในปัจจุบันมาตรฐานความเข้มข้นของอนุภาคจะอยู่บนพื้นฐานของมวลอนุภาค เช่น มาตรฐาน Particulate Matter 10 หรือ PM 10 (ปริมาณความเข้มข้นมวลของอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร) ของกรมควบคุมมลพิษ แต่ปัญหาของการวัดมวลของอนุภาคในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเกิดกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เพราะอนุภาคนาโนขนาดเล็กจำนวนมากอาจมีมวลเท่ากับมวลของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เพียงอนุภาคเดียว ตัวอย่างเช่น มวลอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตร จำนวน 1000 อนุภาค จะเท่ากับมวลของอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร เพียงอนุภาคเดียว ซึ่งจากรายงานการวิจัยพบว่าผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร มีแนวโน้มสูงกว่าอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร เพราะอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร สามารถทะลุทะลวงลงไปถึงบริเวณส่วนลึกที่สุดของปอดในการหายใจได้ (Hinds, 1999) ดังนั้นการวัดจำนวนของอนุภาคจึงมีความสำคัญและให้ความถูกต้องแม่นยำกว่าการวัดมวลของอนุภาค และการวัดจำนวนของอนุภาคสามารถที่จะแปลงผันไปเป็นมวลของอนุภาคได้ภายหลังได้

จากการสำรวจข้อมูลจากผู้ที่เกี่ยวข้องและเอกสารงานวิจัยต่างๆ พบว่าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคนาโน (nano-particles number concentration analyzer) ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Agrawal and Sem, 1980; Thermo-System Inc., 2002; Johnson et al., 2002; Kaufman et al., 2002; Wilson, et al., 2004; Thermo-System Inc., 2005; Park et al., 2005) และได้มีการผลิตออกมาเป็นเครื่อง

มาตรฐานเพื่อเชิงพาณิชย์ (Thermo-System Inc., 2002; 2005) เช่น CPC (Condensation Particle Counter) (Agrawal and Sem, 1980; Thermo-System Inc., 2002) หรือ EAD (Electrical Aerosol Detector) (Johnson et al., 2002; Kaufman et al., 2002; Wilson, et al., 2004; Thermo-System Inc., 2005) CPC เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับนับจำนวนอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 2.5 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ใน CPC อนุภาคถูกทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยการควบแน่นของไอโบทานอล (butanal vapor) และจากนั้นจะถูกตรวจนับและนับจำนวนโดยให้อนุภาคเคลื่อนที่ตัดผ่านเลเซอร์ไดโอด (laser diode) แต่ CPC มีขนาดใหญ่ เคลื่อนย้ายยากและมีราคาสูง สำหรับ EAD อนุภาคจะถูกอัดประจุโดยเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบแพร่กระจาย (diffusion charger) และอนุภาคที่มีประจุจะถูกสะสมตัวโดยการผ่านเข้าไปยังตัวดักกรองอนุภาคที่เป็นตัวนำ (conducting filter) กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคบนตัวดักกรองจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดกระแสต่ำ หรือ อิเล็กโทรมิเตอร์ (electrometer) และจากนั้นจะถูกแปลงผันเป็นความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีการผลิตที่เข้มแข็ง ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตวัตถุดิบและอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับการสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นทางด้านงานวิศวกรรม ขึ้นได้เองภายในประเทศ เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะในงานวิจัยหรืองานควบคุมคุณภาพ มีราคาสูงมากอยู่ในหลักหลายแสนบาท อีกทั้งยังต้องพึ่งพาการนำเข้าเครื่องมือและบริการจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด ซึ่งเป็นการเสียดุลทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากข้อจำกัดในงบประมาณค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องมือและครุภัณฑ์ดังกล่าว ทำให้การทำงานวิจัยและศึกษาที่ต้องใช้เครื่องมือเหล่านี้จึงมีอยู่น้อยในวงจำกัดหรือไม่มีเลย มีการพัฒนาและประยุกต์เครื่องมือเหล่านี้โดยใช้เทคโนโลยี และวัสดุที่เหมาะสมให้ทำงานได้จริงส่วนใหญ่ในประเทศจะทำให้มีราคาสมเหตุสมผล การทำงานการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องเทคโนโลยีอนุภาค จะทำได้แพร่หลายกว้างขวางมากยิ่งขึ้นในวงการวิชาการ สถาบันที่เกี่ยวข้องกับมลพิษอนุภาค และอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศ

จุดมุ่งหมายของโครงการนี้จะทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นเองภายในประเทศ จากการประยุกต์ใช้องค์ความรู้และเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในการตรวจสอบศึกษามลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนของอนุภาคในผลิตภัณฑ์ เทียบเคียงได้กับอุปกรณ์ที่มาจากต่างประเทศ และให้กะทัดรัด น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ทนทาน โดยจะใช้วัสดุอุปกรณ์ ฝีมือ และเครื่องจักรในการประกอบติดตั้งและสร้างจากภายในประเทศ เพื่อช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่าและสามารถแข่งขันได้กับของต่างประเทศ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการและอุตสาหกรรม ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดและควบคุมมลพิษทางอากาศ ไม่ว่าจะเป็นกรมควบคุมมลพิษ สถาบันวิจัยทางอนุภาคในบรรยากาศ งานทางสาธารณสุข ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สถานศึกษาที่มีการเรียนการสอนหรืองานวิจัยเกี่ยวกับศาสตร์และ

เทคโนโลยีอนุภาค ห้องสะอาด (clean room) ของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ ที่ต้องการการตรวจวัดปริมาณอนุภาคในอากาศอย่างต่อเนื่อง การตรวจวิเคราะห์อนุภาคไอเสียจากเครื่องยนต์และการเผาไหม้ และกลุ่มนักวิจัยหรือบริษัทที่พัฒนาเครื่องดักกรองผงฝุ่นและอนุภาคในอากาศ และบริษัทเครื่องปรับอากาศ

โดยหลักการหรือวิธีการใหม่ที่จะทำการศึกษาในโครงการที่เสนอนี้ คือ (ก) การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนไร้ทิศทางของอนุภาค (Brownian motion) ที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ภายในเครื่องมือวัด (ข) ผลของประจุค้าง (space charge effect) ภายในฟาราเดย์คัพ (ค) ลักษณะสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในเครื่องมือวัด (flow and electric fields) และ (ง) ความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด (electrode acentricity) ที่มีผลต่อการดีสชาร์จ (discharge) และการอัดประจุภายในเครื่องอัดประจุ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการทำงาน และความถูกต้องแม่นยำของเครื่องวิเคราะห์จำนวนอนุภาคในระดับนาโนเมตร โดยจะทำการศึกษทั้งภาคทฤษฎีและการทดลอง เพื่อสร้างนวัตกรรมนำไปสู่การตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติได้

9. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะต้นแบบของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคแบบใช้หลักการการวัดประจุไฟฟ้าสถิต โดยใช้ เครื่องมือวัสดุ อุปกรณ์ และระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และเพื่อให้ได้เงื่อนไขของแบบเครื่องมือวัดที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์

10. ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย แบ่งเป็น

10.1 สืบค้นรวบรวม ทบทวนเอกสารอ้างอิงทางวิชาการ และศึกษาทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

10.2 ศึกษาการทำงานที่เหมาะสมและปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานในระดับนาโน ทางทฤษฎี

10.3 ออกแบบอุปกรณ์ในแต่ละส่วนประกอบย่อยให้กะทัดรัด น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และทนทาน จัดทำรายละเอียดแบบร่าง ส่วนประกอบย่อยต่างๆ ได้แก่ ระบบควบคุมการไหลของของไหล (flow control system) ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (inertial impactor) เครื่องอัดประจุอองลอยแบบโคโรนา (corona charger) ฟาราเดย์คัพ (Faraday cup) ชุดตรวจวัดกระแสระดับต่ำ (electrometer) และชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล (data reduction and processing system)

10.4 จัดหาและจัดเตรียมวัสดุ เพื่อสร้างและประกอบ ในแต่ละส่วนประกอบย่อย

10.5 จัดหาและจัดเตรียมอนุภาคตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องมือวัด

10.6 ออกแบบชุดทดสอบอุปกรณ์ พัฒนา ปรับปรุงโปรแกรมควบคุมการทำงาน ตรวจสอบและประมวลผลข้อมูล

10.7 สร้าง ประกอบติดตั้ง และทดสอบการทำงานเบื้องต้น ของแต่ละส่วนประกอบย่อย

10.8 ทดสอบสมรรถนะการวัดจำนวนของเครื่องมือวัดกับอนุภาคตัวอย่างที่เตรียมไว้

10.9 เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดขนาดมาตรฐาน

10.10 วิเคราะห์ข้อมูล ปรับปรุงแก้ไข

10.11 วิจัย สรุปรายงานผล

10.12 ยื่นจดสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร เผยแพร่บทความวิชาการระดับนานาชาติและรายงานฉบับสมบูรณ์

11. แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการในแต่ละช่วง 6 เดือน

ระยะเวลาของโครงการวิจัย 24 เดือนแสดงไว้ดังตารางที่ 11.1

ตารางที่ 11.1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

แผนการดำเนินการวิจัย	ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย (เดือน)			
	1-6	7-12	13-18	19-24
1. สืบค้นรวบรวม ทบทวนเอกสารอ้างอิงทางวิชาการ และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←→			
2. ศึกษาการทำงานที่เหมาะสมที่สุดและปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานในระดับนาโนสเกล ทางทฤษฎี	←→	←→		
3. จัดหาและจัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และอนุภาคตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	←→	←→		
4. ออกแบบและสร้างต้นแบบ		←→	←→	
5. ทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบ			←→	
6. เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน			←→	
7. วิเคราะห์ข้อมูล ปรับปรุงแก้ไข			←→	←→
8. วิจัย สรุปรายงานผล				←→
9. บทความวิชาการ และรายงานฉบับสมบูรณ์				←→

12. ผลงานที่ได้รับจากโครงการ

12.1 ผลงานที่ได้จากการวิจัย

- ผลการสรุปและทบทวนเอกสารอ้างอิงทางวิชาการ และศึกษาทฤษฎี เทคโนโลยี สิทธิบัตร และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- ไดอะแกรมและหลักการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต
- แบบเชิงเทคนิคของอุปกรณ์ประกอบย่อยของระบบต้นแบบฯ
- อุปกรณ์ประกอบย่อย ได้แก่ ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดักจับไอออน ถ้วยฟาราเดย์ ชุดตรวจวัดกระแสระดับต่ำ และชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล
- ระบบต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต
- ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ฯ
- บทความวิจัยและรายงานฉบับสมบูรณ์

12.2 ผลงานที่ได้รับตีพิมพ์หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- Intra, P. and Tippayawong, N., "Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements", *Korean Journal of Chemical Engineering*, under review. (MS. ID: KJ2010-004) มี impact factor = 0.830 (JCR ปี 2008)
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer", *Journal of Electrostatics*, under review. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer", *Journal of Electrostatics*, 2010, in press, 10.1016/j.elstat.2010.01.008. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)
- Intra, P. and Tippayawong, N., "An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection", *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.17, Supplement, pp. s17 – s20, 2009. มี impact factor = 0.0
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review", *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No.4, pp. 605 – 615, 2009. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)

- O Intra, P. and Tippayawong, N., “Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer”, *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 110 – 119, 2009. ถูกบรรจุอยู่ใน Journal Citation Reports/Science Edition ตั้งแต่ปี 2008
- O Intra, P., “Investigation of a submicron-particle inertial impactor for size-selective inlet of the electrical mobility spectrometer”, *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 257 – 268, 2008. มี impact factor = 0.0

12.3 ผลงานที่ได้รับการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1) ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- O Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, Poster presentation, *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, Thailand, 24 – 25 July, 2008.

2) ประชุมวิชาการระดับชาติ

- O Intra, P. and Tippayawong, N., “A submicron electrical aerosol detection system with a Faraday cup electrometer”, Oral presentation, *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, Pathumthani, Thailand, 15 – 17 October, 2008.
- O Intra, P. and Tippayawong, N., “Analytical investigation of an electrostatic precipitator for excess ions removal after charging process of the electrical mobility spectrometer”, Oral presentation, *The 7th PSU-Engineering Conference*, 21 – 22 May, 2009.
- O Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrical detector for nanometer-sized aerosol particles detection: development of the equipment and preliminary results”, *The 9th TRF Academic Meeting*, Phetchaburi, Thailand, 15 – 17 October, 2009.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
Executive Summary	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ท
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ผ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและความต้องการในการพัฒนา	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม	3
1.3 โครงของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์	10
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	11
2.1 คุณสมบัติของละอองลอย	11
2.1.1 ขนาดของละอองลอย	11
2.1.2 การแจกแจงขนาดของละอองลอย	12
2.2 การเคลื่อนของอนุภาคในแก๊ส	13
2.2.1 ความหนืดของแก๊ส	13
2.2.3 ตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาค	14
2.2.4 กฎของสโตกส์และตัวชดเชยคันนิงแฮม	14
2.2.5 กลไกเชิงเฉื่อย	16
2.2.6 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนและการแพร่กระจาย	16
2.2.7 การเคลื่อนที่อนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า	18
2.3 ทฤษฎีการไหลของของไหล	19
2.3.1 สมการการไหลของของไหล	19
2.3.2 ตัวเลขเรย์โนลด์และรูปร่างความเร็วของการไหลในท่อ	20
2.4 สนามไฟฟ้า	20

2.5 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามการไหล	21
2.6 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในก๊าซและการไหลของกระแสไฟฟ้า	22
2.7 ทฤษฎีการอัดประจุอนุภาค	23
2.8 การวัดและการตรวจจับสัญญาณ	28
บทที่ 3 การออกแบบต้นแบบเครื่องวิเคราะห์	30
3.1 เป้าหมายในการออกแบบทั้งหมด	30
3.2 ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้า	31
3.2.1 ความต้องการในการออกแบบ	31
3.2.2 รายละเอียดในการออกแบบ	32
3.2.3 การวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดของอนุภาค	33
3.2.4 ประสิทธิภาพการสะสมตัวของอนุภาค	35
3.3 ชุดดักจับไอออน	35
3.3.1 ความต้องการในการออกแบบ	35
3.3.2 รายละเอียดในการออกแบบ	35
3.3.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของไอออนภายในชุดดักจับไอออน	36
3.3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับไอออน	39
3.4 ชุดให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคแบบโคโรนาเข็ม	39
3.4.1 ความต้องการในการออกแบบ	39
3.4.2 รายละเอียดในการออกแบบ	40
3.4.3 การประมาณค่าผลคูณ Nt ของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค	41
3.4.4 ความเข้มข้นจำนวนไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้า	43
3.4.5 การประมาณค่าการผ่านทะลุของอนุภาคของชุดให้ประจุไฟฟ้า	44
3.5 ลูกถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กทรอนิกส์	44
3.5.1 ความต้องการในการออกแบบ	44
3.5.2 รายละเอียดในการออกแบบ	45
3.6 ชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล	48
3.6.1 ความต้องการในการออกแบบ	48
3.6.2 รายละเอียดในการออกแบบ	49
บทที่ 4 ต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต	52
4.1 รายละเอียดและหลักการทำงาน	52
4.2 ส่วนประกอบของระบบต้นแบบ	54
4.2.1 โมดูลนอกอินพุตและเอาต์พุต	54

4.2.2	โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	54
4.2.3	โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ดีซี	55
4.2.4	ตัวแปลงผัน RS-485 ไปเป็น USB	57
4.2.5	ตัวควบคุมอัตราการไหลและเครื่องดูดสุญญากาศ	57
4.2.6	ตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง	58
4.3	ต้นแบบที่ประกอบรวมกัน	59
บทที่ 5	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	62
5.1	อุปกรณ์การทดลอง	62
5.1.1	ตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง	62
5.1.2	ระบบการจ่ายและวัดไฟฟ้าแรงดันสูง	62
5.1.3	อิเล็กทรอนิกส์มาตรฐาน	63
5.1.4	ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล	64
5.1.5	มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล	65
5.1.6	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	66
5.1.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	68
5.2	ระเบียบวิธีการทดลอง	68
5.2.1	การสร้างอนุภาคตัวอย่างสำหรับการทดสอบ	68
5.2.2	การทดสอบสมรรถนะของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่	71
5.2.3	การทดสอบสมรรถนะของชุดดักจับไอออน	72
5.2.4	การทดสอบสมรรถนะของชุดให้ประจุอนุภาค	74
5.2.5	การทดสอบสมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์	75
5.2.6	การทดสอบสมรรถนะการวัดของเครื่องวิเคราะห์ฯ	76
บทที่ 6	ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	77
6.1	สมรรถนะของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่	77
6.2	สมรรถนะของชุดดักจับไอออน	80
6.2.1	การเคลื่อนที่ของไอออน	80
6.2.2	ประสิทธิภาพการดักจับไอออน	82
6.3	สมรรถนะของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค	87
6.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค	87
6.3.2	กระแสไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค	87
6.3.3	ความเข้มข้นจำนวนของไอออนและการทะลุผ่านของไอออน	89
6.3.4	การวิเคราะห์จำนวนประจุของอนุภาค	95
6.3.5	การประมาณค่าการผ่านทะลุของอนุภาคที่มีประจุ	95

6.4	สมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์	97
6.5	สมรรถนะการวัดไอออนและอนุภาคของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบ	99
บทที่ 7	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	103
7.1	สรุปผลการวิจัย	103
7.1.1	สมรรถนะของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่	103
7.1.2	สมรรถนะของชุดดักจับไอออน	103
7.1.3	สมรรถนะของชุดให้ประจุไฟฟ้าของอนุภาค	104
7.1.4	สมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และระบบบันทึกและประมวลผลข้อมูล	104
7.1.5	สมรรถนะการวัดไอออนและอนุภาคของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบ	105
7.2	ข้อเสนอแนะและการพัฒนาต่อไปในอนาคต	105
	เอกสารอ้างอิง	107
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก: สรุปผลผลิตของโครงการ	111
	ภาคผนวก ข: สิ่งตีพิมพ์และผลงานอื่นๆจากโครงการนี้	116
	ภาคผนวก ค: แบบเชิงเทคนิคของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้น เชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต	229
	ประวัติคณะผู้วิจัย	244

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	เกณฑ์ในการออกแบบโดยรวมของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	31
5.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดดักจับไอออน	73
5.2	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค	75
6.1	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น	98

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 ลักษณะโครงสร้างของ DMA (Intra and Tippayawong 2008)	4
1.2 ลักษณะโครงสร้างของ CPC (Agrawal and Sem 1980)	5
1.3 ลักษณะโครงสร้างของ EAA (Lehtimaki 1983)	6
1.4 ลักษณะโครงสร้างของ EAD (Johnson et al. 2002)	7
1.5 ลักษณะโครงสร้างของ UPMS (Park et al. 2005)	8
1.6 ลักษณะโครงสร้างของ DCE (Fierz et al. 2002)	9
1.7 ลักษณะโครงสร้างของ Epiphaniometer (Hinds 1999)	9
2.1 ภาพถ่ายของอนุภาคระดับนาโนเมตร	12
2.2 การแจกแจงขนาดละอองลอยในบรรยากาศ	13
3.1 หลักการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต	32
3.2 ลักษณะโครงสร้างของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Intra, 2008)	33
3.3 รูปถ่ายของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้น (Intra, 2008)	33
3.4 ลักษณะโครงสร้างของชุดดักจับไอออน (Intra and Tippayawong, 2009)	36
3.5 รูปถ่ายของชุดดักจับไอออนที่สร้างขึ้น (Intra and Tippayawong, 2009)	36
3.6 หลักการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Intra and Tippayawong, 2009)	37
3.7 ไดอะแกรมลักษณะโครงสร้างของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค (Intra and Tippayawong, 2009)	41
3.8 รูปถ่ายของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคที่สร้างขึ้น (Intra and Tippayawong, 2009)	41
3.9 ลักษณะโครงสร้างของลูกถ้วยฟาราเดย์	45
3.10 รูปถ่ายของลูกถ้วยฟาราเดย์ที่สร้างขึ้น	45
3.11 ลักษณะโครงสร้างของวงจรอิเล็กทรอนิกส์	46
3.12 วงจรกรองความถี่แบบ RC low-pass	47
3.13 รูปถ่ายของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น	48
3.14 ไดอะแกรมของระบบการวัดและควบคุมของเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	49
3.15 โปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูลขณะทำการวัด	50
3.16 ไดอะแกรมกระบวนการทำงานของชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.1 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตนี้	53
4.2 รูปถ่ายของโมดูลนอกอินพุตและเอาต์พุตของ Advantech	55
4.3 รูปถ่ายของโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงโมเดล PMT-50CP	56
4.4 รูปถ่ายของโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ดีซี	56
4.5 รูปถ่ายของตัวควบคุมอัตราการของ Dwyer	57
4.6 รูปถ่ายของเครื่องดูดสูญญากาศแบบโรตารีของ Busch	58
4.7 รูปถ่ายของแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงแบบ HEPA	58
4.8 รูปถ่ายต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต	59
4.9 รูปถ่ายด้านหลังของเครื่องวิเคราะห์ที่แสดงถึงตำแหน่งของพอร์ต USB และจุดเชื่อมต่อไฟฟ้า 220 โวลต์	60
4.10 รูปถ่ายลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และการเชื่อมต่อสายสัญญาณและสายไฟฟ้ากำลังต่างๆ และท่อในระบบการไหล	61
5.1 รูปถ่ายของตัวกรองอนุภาคแบบ HEPA ที่ใช้ในการศึกษานี้	63
5.2 รูปถ่ายของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงของ Leybold Didactic โมเดล 521721	64
5.3 หัววัดไฟฟ้าแรงดันสูงของ Fluke โมเดล 80K-40	64
5.4 รูปถ่ายของอิลีกโทรมิเตอร์ของ Keithley โมเดล 6517A	65
5.5 รูปถ่ายของ Keithley โมเดล 6522	65
5.6 รูปถ่ายของสายสัญญาณของ Keithley โมเดล 237-ALG-2	66
5.7 รูปถ่ายของออสซิลโลสโคปของ RIGOL โมเดล DS1000	66
5.8 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลที่ใช้ในการทดสอบนี้	67
5.9 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Intra and Tippayawong, 2009)	67
5.10 รูปถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL JSM-6335F	68
5.11 ไดอะแกรมของเครื่องสร้างอนุภาคตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้ (Yawootti et al., 2010)	69
5.12 รูปถ่ายของเครื่องสร้างละอองลอยที่ใช้ในการศึกษานี้ (Yawootti et al., 2010)	69
5.13 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของอนุภาคตัวอย่าง (Yawootti et al., 2010)	70
5.14 การแจกแจงขนาดของอนุภาคของเครื่องสร้างอนุภาคที่พัฒนาขึ้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง EMS (Yawootti et al., 2010)	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
5.15 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุของอนุภาคตัวอย่างด้วย EDS (Yawootti et al., 2010)	71
5.16 ไดอะแกรมของการทดสอบสมรรถนะการสะสมตัวของอนุภาคภายในชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Intra, 2008)	72
5.17 ไดอะแกรมของการทดสอบสมรรถนะของชุดดักจับไอออน	73
5.18 ไดอะแกรมการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้า (Intra and Tippayawong, 2010)	74
5.19 ไดอะแกรมสำหรับการทดสอบการวัดเทียบอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละช่อง (Intra and Tippayawong, 2008)	76
5.20 ไดอะแกรมการทดสอบสมรรถนะการวัดของเครื่องวิเคราะห์ฯ	76
6.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมตัวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนที่อัตราการไหลของละอองต่างกัน (Intra, 2008)	77
6.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมตัวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเร่งต่างกัน (Intra, 2008)	78
6.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กทรอนิกส์กับอัตราการไหลของละอองลอยที่ทางเข้าและทางออกของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Intra, 2008)	79
6.4 การเปรียบเทียบค่าการผ่านทะลุของอนุภาคของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนกับอัตราการไหลละอองลอย (Intra, 2008)	79
6.5 รูปถ่ายของอนุภาคที่สะสมตัวบนพื้นผิวของแผ่นกระทบภายในชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อน (Intra, 2008)	80
6.6 การเปรียบเทียบเส้นโคจรของไอออนระหว่างโมเดลที่พัฒนาขึ้นกับโมเดลที่มีอยู่ (Intra and Tippayawong, 2009)	81
6.7 เส้นโคจรของไอออนภายในชุดดักจับไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เส้น ลวดอิเล็กทรอนิกส์ต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2009)	81
6.8 เส้นโคจรของไอออนภายในชุดดักจับไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2009)	82
6.9 เส้นโคจรของอนุภาคที่มีประจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร ที่ตำแหน่งรัศมีทางเข้าต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2009)	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.10 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นจำนวนของไอออนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านทางออกของชุดดักจับไอออนที่แรงดันและอัตราการไหลต่าง ๆ	84
6.11 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนทางด้านทางออกกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดที่อัตราการไหลของไอออนต่างๆ	85
6.12 การเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของชุดดักจับไอออนที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่างๆ	85
6.13 สัญญาณกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่วัดได้ที่ทางออกของชุดดักจับไอออนในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าและไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า	86
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค(Intra and Tipayawong, 2010)	88
6.15 การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไอออนกับแรงดันโคโรนาที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน (Intra and Tipayawong, 2010)	90
6.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นจำนวนไอออนกับแรงดันโคโรนาภายในพื้นที่อัดประจุของชุดให้ประจุ (Intra and Tipayawong, 2010)	91
6.17 กราฟความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันโคโรนา องค์ประกอบของหม้อขั้วอิเล็กโทรดเสริม และอัตราการไหลของอากาศ (Intra and Tipayawong, 2010)	92
6.18 การเปลี่ยนแปลงค่าการทะลุผ่านไอออนของปลายเข็มโคโรนาที่ 10 และ 20 องศา ที่แรงดันโคโรนาบวกและลบและที่อัตราการไหลต่างๆ	94
6.19 การเปลี่ยนแปลงค่าการทะลุผ่านไอออนของปลายเข็มโคโรนาที่ 10 และ 20 องศา ที่แรงดันโคโรนาบวกและลบและที่อัตราการไหลต่างๆ	96
6.20 ค่าการผ่านทะลุของอนุภาคของชุดให้ประจุเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	97
6.21 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้สร้างขึ้นกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A	98
6.22 สัญญาณกระแสไฟฟ้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้จากออสซิลอ스코ป	99
6.23 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นจำนวนของไอออนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์	100
6.24 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กับอัตราการไหลของอากาศ	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.25 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กับอัตราการไหลของอนุภาค	101
6.26 ค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดจากวงจร อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา	102

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์ละติน

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ผิว	m^2
B	ความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงกลของอนุภาค	$m^3/N.s$
C	ความความจุของตัวเก็บประจุ	F
C_c	ตัวชดเชยคั่นนิ่งแอม	-
D	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอนุภาค	m^2/s
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเร่ง	m
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลาง hydraulic ของพื้นที่การไหลแบบวงแหวน	-
D_i	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอออน	m^2/s
E	ประสิทธิภาพการสะสมตัวของอนุภาค	%
E	สนามไฟฟ้า	V/m
E_0	สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดการโคโรนาดีสชาร์จ	V/m
E_s	สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน	V/m
E_r	สนามไฟฟ้าในแนวรัศมี	V/m
E_z	สนามไฟฟ้าในแนวแกน	V/m
F	แรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนและอนุภาคที่มีประจุ	N
F_D	แรงเสียดลากเชิงอากาศพลศาสตร์	N
F_E	แรงไฟฟ้าสถิต	N
F_G	แรงโน้มถ่วงของโลก	N
I	กระแสไฟฟ้า	A
I_{in}	กระแสไฟฟ้าทางด้านทางเข้า	A
I_{in}	กระแสไฟฟ้าของไอออนภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค	A
I_p	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากอิเล็กโทรมิเตอร์	A
J	ฟลักซ์ของอนุภาค	-
K_E	ค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์	$N.m^2/C^2$
Kn	ตัวเลข Knudsen	-
L	ความยาว	m
M	จำนวนของ bin ขนาดอนุภาค	-

สัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
N	จำนวนรวมของอนุภาค	-
N_0	จำนวนความเข้มข้นของไอออนที่ทางด้านทางเข้า	ions/m ³
N_i	ความเข้มข้นของไอออน	ions/m ³
n_{in}	ความเข้มข้นของไอออนที่ทางเข้า	ions/m ³
n_{out}	ความเข้มข้นของไอออนที่ทางออก	ions/m ³
N_{in}	ความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางเข้า	particles/m ³
N_{out}	ความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางออก	particles/m ³
N_p	ความเข้มข้นของอนุภาค	particles/m ³
N_s	ความเข้มข้นของไอออนที่พื้นผิว	ions/m ³
P	ประสิทธิภาพการผ่านทะลุ	%
P_p	ประสิทธิภาพการผ่านทะลุของอนุภาค	%
P	ความดันของของไหล	bar
Q	อัตราการไหลของของไหล	L/min
Q_a	อัตราการไหลของละออง	L/min
Q_i	อัตราการไหลของชุดดักจับไอออน	L/min
R	ค่าความต้านทานตัวต้านทาน	Ω
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์	-
Re_p	ตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาค	-
R_f	ตัวต้านทานป้อนกลับ	Ω
S	ค่าคงที่การประมาณค่าพหุนามต่อเนื่องของ Sutherland	-
S	ระยะหยุดของอนุภาค	m
Stk	ตัวเลขสโตกส์	-
Stk_{50}	ตัวเลขสโตกส์ที่ประสิทธิภาพการสะสมตัว 50 เปอร์เซ็นต์	-
T	อุณหภูมิ	K
T_r	อุณหภูมิอ้างอิง	K
U	ความเร็วเฉลี่ยที่ผ่านช่องเร่ง	m/s
$\bar{U}$	ความเร็วเฉลี่ย	m/s
V	ความศักย์ไฟฟ้า	V
V	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลต่ออนุภาค	m/s
V_0	แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา	V
V_0	ความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคที่เวลาเท่ากับศูนย์	m/s

สัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
V_f	ความเร็วของของไหล	m/s
V_{in}	แรงดันอินพุต	V
V_{out}	แรงดันเอาต์พุต	V
V_p	ความเร็วของอนุภาค	m/s
V_s	แรงดันของแหล่งจ่าย	V
V_{TS}	ความเร็วการตกสุดท้ายของอนุภาค	m/s
V_{TE}	ความเร็วเชิงไฟฟ้าสถิตสุดท้ายของอนุภาคที่มีประจุ	m/s
Z_i	ความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของไอออน	m ² /V.s
Z_p	ความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของอนุภาค	m ² /V.s
a	ขนาดรัศมีของอนุภาค	m
$\bar{c}_i$	ความเร็วเชิงความร้อนเฉลี่ยของไอออน	m/s
d	ระยะห่าง	m
$\bar{d}$	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของจำนวนรวม	m
d_{50}	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาคที่ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์	m
d_c	ขนาดลักษณะเฉพาะของสิ่งกีดขวาง	m
d_g	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางเรขาคณิตเชิงจำนวน	m
d_p	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	m
e	ประจุของอิเล็กตรอนพื้นฐาน	C
f	ปัจจัยแรงเสียดทาน	-
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s ²
j	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	A/m ²
k	ค่าคงที่ของ Boltzmann's	J/K
$loss_{el}$	การสูญเสียเนื่องจากไฟฟ้าสถิต	%
m_p	มวลของอนุภาค	g
n_s	การอิมมิดีวของประจุที่อยู่นบนอนุภาค	-
n_i	จำนวนของอนุภาคในกลุ่ม i	-
n_p	ประจุของอนุภาค	-
r	ตำแหน่งในแนวรัศมี	m
r_1	รัศมีของอิเล็กโทรดทรงกระบอกด้านใน	m

สัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
r_2	รัศมีของอิเล็กโทรดทรงกระบอกด้านนอก	m
s	ความชันของเส้นโค้งประสิทธิภาพ	-
t	เวลาที่ใช้ในการอัดประจุ	s
u	ความเร็วของการไหล	m/s
u_r	ความเร็วของการไหลในแนวรัศมี r	m/s
u_z	ความเร็วของการไหลในแนวแกน z	m/s
u_θ	ความเร็วของการไหลในแนวแกน θ	m/s
$\bar{x}$	ระยะการเคลื่อนที่บราวเนียน	m
z	ตำแหน่งในแนวแกน	m

ตัวอักษรกรีก

β	สัมประสิทธิ์การรวมกันของไอออนกับอนุภาค	-
δ	รัศมีของรูปทรงกลมมีขอบเขต	-
δ	ความหนาแน่นสัมพัทธ์	-
ε	ค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค	F/m
ε_0	สภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง	F/m
ε_1	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุอนุภาค	F/m
ϕ	ความต่างศักย์เชิงไฟฟ้าสถิตของไอออน	-
γ	ความเป็นไปได้ของไอออนที่โอนย้ายประจุไปยังอนุภาค	-
η	ความหนืดของแก๊ส	Pa.s
η_r	ความหนืดของแก๊สอ้างอิง	Pa s
κ	สัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกด้านในต่อด้านนอก-	
λ	ค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของแก๊ส	m
λ_i	การเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของไอออน	m
λ_r	ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่อิสระของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน	m
μ	ความหนืดของแก๊ส	Pa.s
ρ	ความหนาแน่นของประจุ	C/m ³
ρ	ความหนาแน่นของแก๊ส	kg/m ³
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค	kg/m ³
σ_g	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต	-

สัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

อักษรย่อ

ADC	Analog to Digital Converter
CAG	Combustion Aerosol Generator
CPC	Condensation Particle Counter
DCE	Diffusion Charging Electrometer
DMA	Differential Mobility Analyzer
EAA	Electrical Aerosol Analyzer
EAD	Electrical Aerosol Detector
HEPA	High Efficiency Particulate Air
NEM	Nano Electromechanical System
PTFE	Polytetrafluoroethylene
SEM	Scanning Electron Microscope
TSI	Thermo-Systems Incorporated
UPMS	Ultrafine Particle Measurement System
WAA	Whitby Aerosol Analyzer

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและความต้องการในการพัฒนา

ละอองลอย (aerosol) คืออนุภาค (particles) ที่เป็นของแข็ง (solid) หรือของเหลว (liquid) แขนงลอยอยู่ในอากาศหรือแก๊สและมีขนาดอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร (nm) ถึง 100 ไมโครเมตร (μm) (Hinds 1999) ละอองลอยเหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชากร และการแผ่รังสีมายังโลกในบรรยากาศ ปัญหามลพิษทางอากาศในเมืองใหญ่ทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจเรื้อรัง และยิ่งไปกว่านั้นยังเพิ่มอัตราการเสียชีวิตของประชากรเนื่องจากการสูดหรือหายใจเอาอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (Hinds 1999) นอกจากนี้ ปัญหาการปนเปื้อนของอนุภาคในระดับนาโนเมตร หรือ อนุภาคนาโน (nano-particles) ยังมีต่อระบบการผลิตในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์และสารกึ่งตัวนำ เกสซกรรม และนาโนเทคโนโลยี เช่น การพัฒนาระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดจิ๋ว (nano-electromechanical systems) หรือ NEMs ซึ่งอนุภาคนาโนเหล่านี้จะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ ระบบ และผลิตภัณฑ์ การป้องกันสามารถทำได้โดย มีการตรวจสอบวิเคราะห์ ควบคุมคุณภาพอากาศ และสิ่งปนเปื้อนจากอนุภาคนาโน ซึ่งจะบ่งชี้ปริมาณและแหล่งที่มาของอนุภาคเหล่านี้ได้ โดยพฤติกรรมและกลไกของอนุภาคเป็นฟังก์ชันของขนาด (size) จำนวน (number) และมวล (mass) (Intra and Tippayawong, 2003)

ในปัจจุบันมาตรฐานความเข้มข้นของอนุภาคจะอยู่บนพื้นฐานของมวลอนุภาค เช่น มาตรฐาน Particulate Matter 10 หรือ PM 10 (ปริมาณความเข้มข้นมวลของอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร) ของกรมควบคุมมลพิษ แต่ปัญหาของการวัดมวลของอนุภาคในปัจจุบัน มักจะเกิดกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เพราะว่ามันทำให้อนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากมีมวลเท่ากับมวลของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น มวลอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตร จำนวน 1000 อนุภาค จะเท่ากับมวลของอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร เพียงอนุภาคเดียว ซึ่งจากรายงานการวิจัยพบว่าผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคระดับ 1 ไมโครเมตร มีแนวโน้มสูงกว่าอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร เพราะอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตร สามารถทะลุทะลวงลงไปถึงบริเวณส่วนลึกที่สุดของปอดในการหายใจได้ (Hinds 1999) ดังนั้นการวัดจำนวนของอนุภาคจึงมีความสำคัญและให้ความถูกต้องแม่นยำกว่าการวัดมวลของอนุภาค และการวัดจำนวนของอนุภาคสามารถที่จะแปลงผันไปเป็นมวลของอนุภาคได้ภายหลังได้

จากการสำรวจข้อมูลจากผู้ที่เกี่ยวข้องและเอกสารงานวิจัยต่างๆ พบว่าเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคนาโน (nano-particles number concentration analyzer) ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Agrawal and Sem 1980; Lehtimäki 1983; Johnson et al. 2002; Kaufman et al. 2002; Wilson et al. 2004; Park et al. 2005) และได้มีการผลิตออกมาเป็นเครื่องมาตรฐานเพื่อเชิงพาณิชย์ (Thermo-System Inc. 2002; Thermo-

System Inc. 2005) เช่น CPC (Condensation Particle Counter) (Agrawal and Sem 1980) หรือ EAD (Electrical Aerosol Detector) (Lehtimäki 1983; Johnson et al. 2002; Kaufman et al. 2002; Wilson et al. 2004) CPC เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับนับจำนวนอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 2.5 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ใน CPC อนุภาคถูกทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยการควบแน่นของไอโบทานอล (butanol vapor) และจากนั้นจะถูกตรวจนับและนับจำนวนโดยให้อนุภาคเคลื่อนที่ตัดผ่านเลเซอร์ไดโอด (laser diode) แต่ CPC มีขนาดใหญ่ เคลื่อนย้ายยากและมีราคาสูง สำหรับ EAD อนุภาคจะถูกอัดประจุโดยเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบแพร่กระจาย (diffusion charger) และอนุภาคที่มีประจุจะถูกสะสมตัวโดยการผ่านเข้าไปยังตัวดักกรองอนุภาคที่เป็นตัวนำ (conducting filter) กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคบนตัวดักกรองจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดกระแสต่ำ หรือ อิเล็กโทรมิเตอร์ (electrometer) และจากนั้นจะถูกแปลงผันเป็นความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีการผลิตที่เข้มแข็ง ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตวัตถุดิบและอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ สำหรับการสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นทางด้านงานวิศวกรรม ขึ้นได้เองภายในประเทศ เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยเฉพาะในงานวิจัยหรืองานควบคุมคุณภาพมีราคาสูงมากอยู่ในหลักหลายแสนบาท อีกทั้งยังต้องพึ่งพาการนำเข้าเครื่องมือและบริการจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด ซึ่งเป็นการเสียดุลทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากข้อจำกัดในงบประมาณค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องมือและครุภัณฑ์ดังกล่าว ทำให้การทำงานวิจัยและศึกษาที่ต้องใช้เครื่องมือเหล่านี้จึงมีอยู่น้อยในวงจำกัดหรือไม่มีเลย มีการพัฒนาและประยุกต์เครื่องมือเหล่านี้โดยใช้เทคโนโลยี และวัสดุที่เหมาะสมให้ทำงานได้จริงส่วนใหญ่ในประเทศจะทำให้มีราคาสมเหตุสมผล การทำงานการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องเทคโนโลยีอนุภาค จะทำได้แพร่หลายกว้างขวางมากยิ่งขึ้นในวงการวิชาการ สถาบันที่เกี่ยวข้องกับมลพิษอนุภาค และอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศ

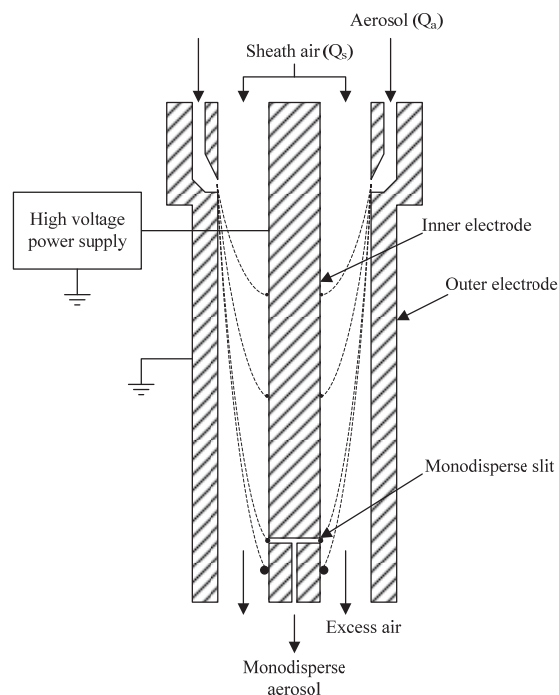
จุดมุ่งหมายของโครงการนี้ จะทำการพัฒนาต้นแบบเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นเองภายในประเทศ จากการประยุกต์ใช้องค์ความรู้และเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในการตรวจสอบศึกษามลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนของอนุภาคในผลิตภัณฑ์ เทียบเคียงได้กับอุปกรณ์ที่มาจากต่างประเทศ และให้กะทัดรัด น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ทนทาน โดยจะใช้วัสดุอุปกรณ์ ฝีมือ และเครื่องจักรในการประกอบติดตั้งและสร้างจากภายในประเทศ เพื่อช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่าและสามารถแข่งขันได้กับของต่างประเทศ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการและอุตสาหกรรม ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดและควบคุมมลพิษทางอากาศ ไม่ว่าจะเป็น กรมควบคุมมลพิษ สถาบันวิจัยทางอนุภาคในบรรยากาศ งานทางสาธารณสุข ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สถานศึกษาที่มีการเรียนการสอนหรืองานวิจัยเกี่ยวกับศาสตร์และเทคโนโลยีอนุภาค ห้องสะอาด (clean room) ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ ที่ต้องการการตรวจวัดปริมาณอนุภาคในอากาศอย่างต่อเนื่อง การตรวจ

วิเคราะห์อนุภาคไอเสียจากเครื่องยนต์และการเผาไหม้ และกลุ่มนักวิจัยหรือบริษัทที่พัฒนาเครื่องตรวจจับผงฝุ่นและอนุภาคในอากาศ

1.2 การทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาตัวอย่างเพื่อตรวจวัดขนาดและปริมาณของอนุภาคจุลสารในอากาศ มีอยู่อย่างแพร่หลาย เช่น (Chen et al. 1997; Balachandran et al. 2000; Tipayawong et al. 2002) ซึ่งมีการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของจำนวนและมวลต่อปริมาตรอากาศ และการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคขนาดเล็กด้วย ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวเนื่องกับการศึกษาคุณภาพอากาศและมลพิษ ขณะที่ตัวอย่างการควบคุมตรวจวัดจำนวนและขนาดอนุภาคเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นาโนเทคโนโลยี และเภสัชกรรม (King 1999) ในส่วนของงานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค มีอยู่ค่อนข้างแพร่หลาย เช่นโดย (Agrawal and Sem 1980; Lehtimäki 1983; Johnson et al. 2002; Kaufman et al. 2002; Wilson et al. 2004; Park et al. 2005) ซึ่งมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องยาวนาน (Flagan 1999) และได้มีการผลิตออกมาเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคเพื่อเชิงพาณิชย์ (Thermo-System Inc. 2002; Thermo-System Inc. 2005) และยังมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเรื่องการปรับปรุงความแม่นยำที่ขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร ความสามารถในการวัดและประมวลผลได้อย่างรวดเร็วด้วยเวลาจริง (real-time) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดปริมาณความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่มีอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่จะยกมากล่าวเฉพาะบางชนิดที่สำคัญมีการใช้อย่างแพร่หลายและบางอุปกรณ์อยู่ระหว่างการวิจัยพัฒนา ได้แก่ Differential Mobility Analyzer (DMA), Condensation Particle Counter (CPC), Electrical Aerosol Analyzer (EAA), Electrical Aerosol Detector (EAD), Ultrafine Particle Measurement System (UPMS), Diffusion charging electrometer (DCE) และ Epiphanimeter โดยรายละเอียดของเครื่องเหล่านี้มีดังนี้

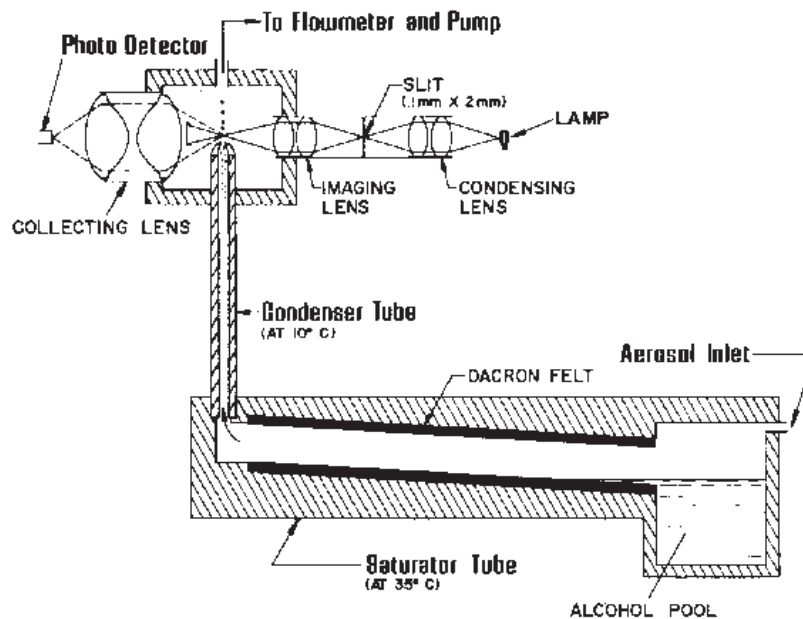
Differential Mobility Analyzer (DMA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า (Intra and Tipayawong 2008) คือเมื่ออนุภาคที่มีประจุเป็นลบหรือบวกผ่านเข้ามาในสนามไฟฟ้า จะทำให้อนุภาคที่เป็นบวกเคลื่อนที่โค้งเข้าหาขั้วลบและอนุภาคที่เป็นลบจะเคลื่อนที่โค้งเข้าหาขั้วบวก DMA เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกขนาดของอนุภาคที่กระจายอยู่ในอากาศ มีลักษณะโครงสร้าง และการทำงานแสดงไว้ดังรูปที่ 1.1 ลักษณะอุปกรณ์เป็นทรงกระบอกแกนร่วม (two concentric cylinders) ทรงกระบอกด้านในเป็นขั้วบวกและทรงกระบอกด้านนอกเป็นขั้วกราวด์ (ground) ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วบวกหรือทรงกระบอกด้านใน จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตรงบริเวณช่องว่างระหว่างทรงกระบอก ในการทำงานจะเริ่มต้นด้วยการอัดประจุลบให้กับอนุภาคตัวอย่าง ดังนั้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาในสนามไฟฟ้างดรูปจะเคลื่อนที่โค้งเข้าหาขั้วบวกซึ่งอยู่ตรงกลาง อนุภาคที่มีขนาดที่เหมาะสมกับแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคก็จะเคลื่อนที่เข้าช่องเก็บตัวอย่างซึ่งต่อกับเครื่องนับจำนวนอนุภาค (particle counter) ส่วน



รูปที่ 1.1 ลักษณะโครงสร้างของ DMA (Intra and Tippayawong 2008)

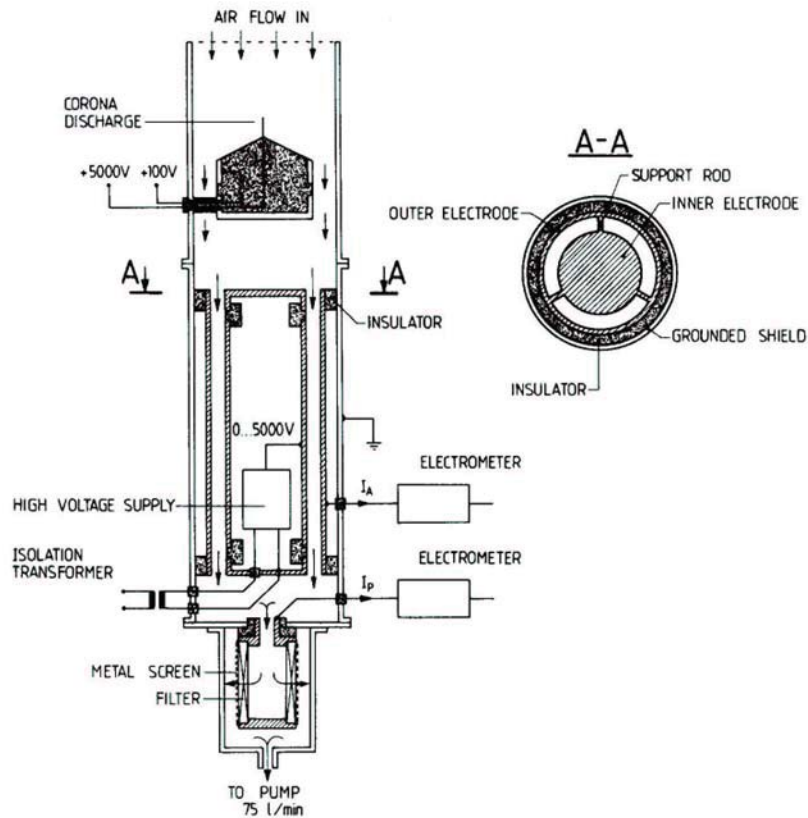
อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเร็ว ตกกระทบบที่ผิวขั้วบวกก่อนที่จะถึงช่องเก็บ ตัวอย่าง และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของตัวอนุภาคเองผ่านช่องเก็บ ตัวอย่างออกไปพร้อมกับอากาศสะอาด การคัดขนาดอนุภาคทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วบวก ทำให้แรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคเปลี่ยนไป ดังนั้นอนุภาคที่ผ่านเข้าช่องเก็บ ตัวอย่างจะมีขนาดที่ต่าง ๆ กัน แปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วบวกซึ่งสามารถนำข้อมูลมาประมวลผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและจำนวนของอนุภาคได้ ซึ่งเรียกว่า กราฟของการกระจายขนาดของอนุภาค

Condensation Particle Counter (CPC) (Agrawal and Sem 1980) เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบการควบแน่น โดยทั่วไปถูกใช้ป็นเครื่องมือสำหรับการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาครวมทั้งหมด โดยไม่คำนึงถึงขนาดอนุภาค ดังนั้นมันจึงไม่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดอนุภาค ลักษณะโครงสร้างของ CPC แสดงไว้ในรูปที่ 1.2 ขณะที่อนุภาคตัวอย่างเข้าไปใน CPC จะมีการเปลี่ยนสัญญาณเป็นความร้อนจ่ายให้กับอ่างแอลกอฮอล์ จนทำให้แอลกอฮอล์กลายเป็นไอลอยผ่านขึ้นไปยังท่อควบแน่น ไอระเหยแอลกอฮอล์จะเกาะตัวลงบนอนุภาคและควบแน่นเป็นหยดอิมัลชันที่มีขนาดประมาณ 12 ไมโครเมตร หยดของอนุภาคที่มีแอลกอฮอล์ควบแน่นอยู่จะถูกส่งให้เคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ และใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจายของแสงเพื่อนำไปแปลงค่าเป็นจำนวนของอนุภาคต่อไป ตัวอย่าง CPC ที่นิยมมากคือโมเดล TSI 3010 (Thermo-System Inc. 2002) สามารถ ตรวจสอบอนุภาคได้เล็กถึง 10 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 10^5 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนองเป็น 1 วินาที ด้วยเวลาการตอบสนองน้อยกว่า 5 วินาที CPC โมเดล 3010 จะมีราคาโดยประมาณ 40,000 เหรียญสหรัฐ



รูปที่ 1.2 ลักษณะโครงสร้างของ CPC (Agrawal and Sem 1980)

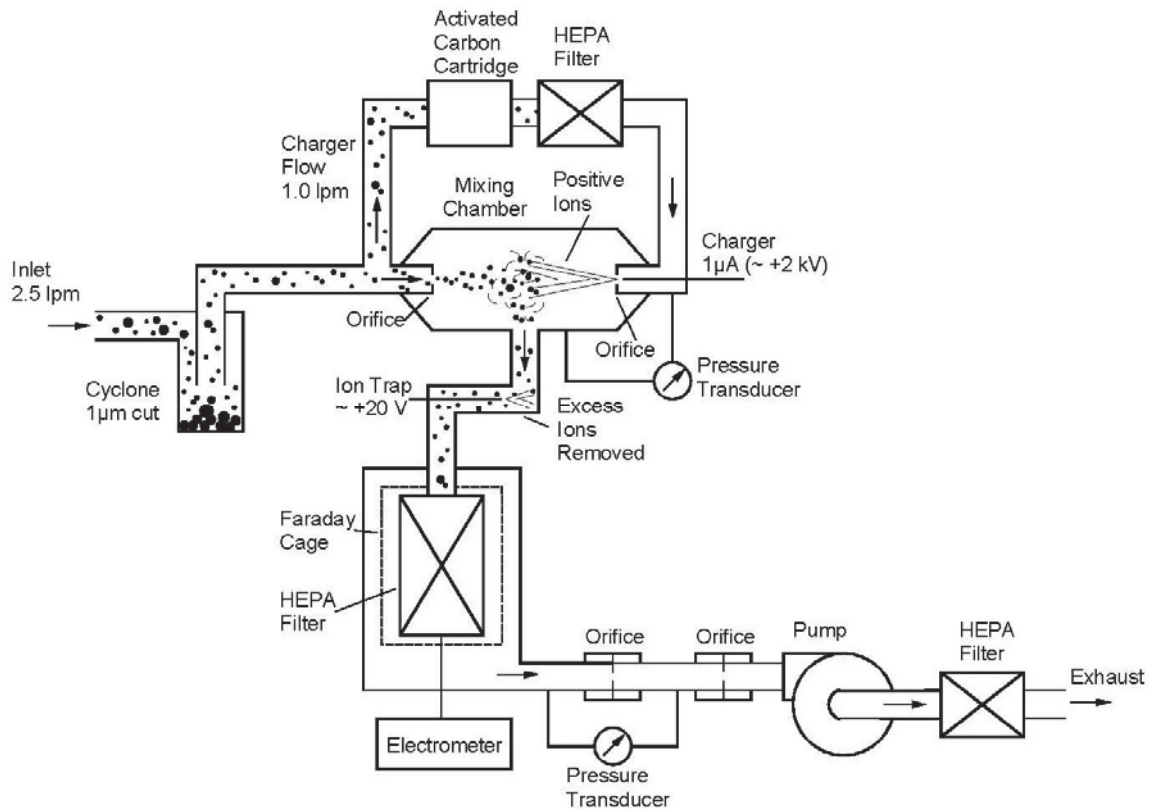
Electrical Aerosol Analyzer (EAA) เป็นเครื่องวิเคราะห์ละอองลอยด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ลักษณะเฉพาะของวิธีการนี้เป็นเทคนิคการวัดกระแสไฟฟ้า (Lehtimäki 1983) ที่ทำให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่สะสมตัวในเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวได้อย่างต่อเนื่อง ระบบการวัดนี้ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าอันดับศูนย์ (zeroth-order mobility analyzer) และเซนเซอร์กระแสไฟฟ้าอิเล็กโทรมิเตอร์ (conventional electrometer current sensor) หลักการของเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวอันดับศูนย์มีลักษณะคล้ายกับที่ใช้ในเครื่องวัดไอออน (ion meter) โครงสร้างของระบบวัดแสดงไว้ในรูปที่ 1.3 ระบบจะประกอบด้วยตัวใส่ประจุไฟฟ้าให้ละอองลอย (aerosol charger) ตัววิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า (mobility analyzer) และตัวสะสมประจุตัวกรอง (filter charge collector) ตัวใส่ประจุไฟฟ้าให้ละอองลอยมีลักษณะคล้ายกับที่ใช้ในเครื่องตรวจวัดละอองด้วยวิธีทางไฟฟ้า (electrical aerosol detector, EAD) ในตัวใส่ประจุไฟฟ้าให้ละอองลอยนี้ ไอออนอากาศถูกสร้างขึ้นโดยการโคโรนาดีสชาร์จที่อิเล็กโทรดเข็ม ที่ติดตั้งภายในทรงกระบอกที่มีรัศมี 3.8 เซนติเมตร ตัวสะสมประจุตัวกรองประกอบด้วยตัวกรองที่ถูกแยกออกจากไฟฟ้าและถูกต่อเข้ากับวงจรขยายอิเล็กโทรมิเตอร์ ตัววิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้ามีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้นที่มีรัศมีด้านใน 2.5 เซนติเมตร และด้านนอก 3.0 เซนติเมตร การไหลอากาศตัวอย่างที่อัตรา 75 ลิตรต่อนาที ผ่านเข้าไปในช่องระหว่างสองอิเล็กโทรด ตัววิเคราะห์การเคลื่อนตัวถูกติดตั้งอยู่ภายในท่อโลหะที่เป็นกราวด์ วงแหวนฉนวน PTFE (polytetrafluoroethylene) ถูกใช้เพื่อป้องกันตัววิเคราะห์จากความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงถูกติดตั้งอยู่ภายในอิเล็กโทรดด้านในที่มีความยาว 13 เซนติเมตร ระบบนี้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ต่ำถึง 0.01 พิโคแอมป์ (pA) และแรงดันการสะสมตัว (collecting voltage) สามารถปรับได้อยู่ในช่วง 0 – 5000 โวลต์



รูปที่ 1.3 ลักษณะโครงสร้างของ EAA (Lehtimaki 1983)

Electrical Aerosol Detector หรือ EAD (Johnson et al. 2002) เป็นเครื่องมือวัดจำนวนอนุภาคที่อาศัยการอัดประจุแบบแพร่กระจาย (diffusion charging) และตามด้วยการตรวจจับละอองลอยผ่านวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง ลักษณะโครงสร้างของ EAD แสดงไว้ในรูปที่ 1.4 โดยละอองลอยเข้าไปในเครื่องมือวัดด้วยอัตราการไหล 2.5 ลิตร ต่อ นาที การไหลจะถูกแยกผ่านไปยังตัวดักกรองและเครื่องสร้างไอออน (ionizer) 1 ลิตร ต่อ นาที และละอองลอย 1.5 ลิตร ต่อ นาที และการไหลทั้งหมดจะถูกรวมกันใหม่ในห้องผสม (mixing chamber) เมื่ออนุภาคในการไหลของละอองลอยถูกผสมกับไอออน ทำให้อนุภาคได้รับประจุ (charge state) จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังตัวดักไอออน (ion trap) เพื่อกำจัดไอออนที่มีความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าสูง (electrical mobility) ออกจากการไหล และเคลื่อนที่เข้าไปยัง ฟาราเดย์คัพ (Faraday cup) ทำให้อนุภาคถูกสะสมในตัวดักกรองที่เชื่อมต่อกับเครื่องวัดกระแสต่ำอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อการวัดประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าที่วัดได้จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค

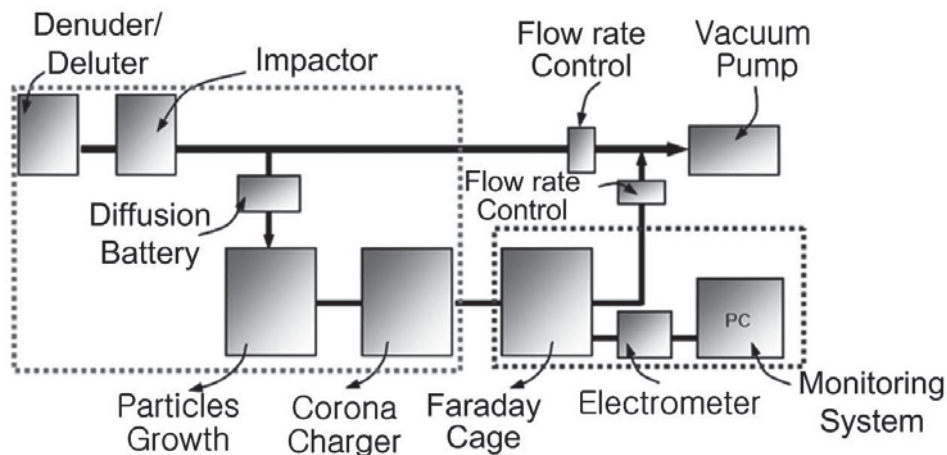
Ultrafine Particle Measurement System (UPMS) (Park et al. 2005) คือระบบการวัดอนุภาคระดับนาโนด้วยการใช้เทคนิคการควบแน่นร่วมการอัดประจุอนุภาค ซึ่งลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของ UPMS แสดงไว้ในรูปที่ 1.5 UPMS ประกอบด้วย 5 ส่วน คือส่วนคัดแยกขนาดอนุภาคทางเข้า (inlet/size separation part) ส่วน Particle Growth ส่วนประจุละออง (aerosol charge) ส่วนการสะสมตัวอนุภาค (particle collection) และส่วนการวัดกระแสไฟฟ้า (current



รูปที่ 1.4 ลักษณะโครงสร้างของ EAD (Johnson et al. 2002)

measurement) การทำงานของ UPMS เริ่มต้นโดยการคัดแยกช่วงขนาดของอนุภาคที่ต้องการวัด ก่อน จากนั้นอนุภาคจะถูกนำเข้าไปในส่วน Particles Growth เพื่อควบแน่นอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและอนุภาคจะถูกอัดประจุด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาค (particle charger) แบบโคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) อนุภาคที่มีประจุจะเข้าไปในส่วนของฟาราเดย์เคจ (Faraday cage) และแอมมิเตอร์ (ammeter) เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำประมาณ 10^{-13} แอมป์ ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยอนุภาคที่มีประจุสะสมตัวบนแผ่นดักกรองในฟาราเดย์เคจ และสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่จะถูกเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลข้อมูลอนุภาคในเวลาจริง โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำไปแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

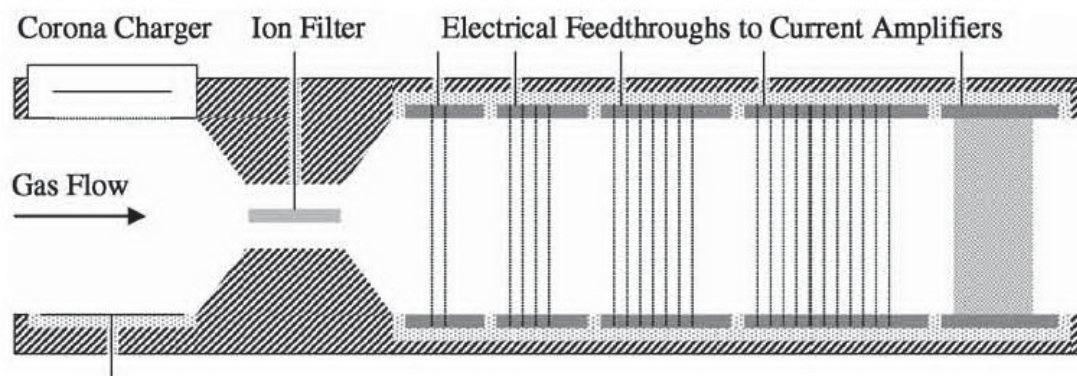
Diffusion charging electrometer (DCE) (Fierz et al. 2002) เป็นเครื่องมือวัดความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคอีกแบบหนึ่ง ข้อดีของ DCE เป็นอุปกรณ์ที่มีหลักการทำงานง่ายและมีราคาถูก ลักษณะโครงสร้างของ DCE แสดงไว้ดังรูปที่ 1.6 DCE ประกอบด้วยชุดใส่ประจุอนุภาค (particle charger) ตัวกรองไอออน (ion filter) และตัวกรองอนุภาคที่มีประจุ (charged particle filter) โดย DCE จะทำงานโดยอาศัยการใส่ประจุให้กับอนุภาคด้วยวิธีการโคโรนาดีสชาร์จ เมื่ออนุภาคได้รับการใส่ประจุจะถูกผ่านเข้าไปยังแผ่นกรองเพื่อวัดกระแสไฟฟ้า ที่ถูกสร้างขึ้นจากการสะสมตัวของอนุภาคบนแผ่นกรองโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่สะสมตัวอยู่บนแผ่นกรอง



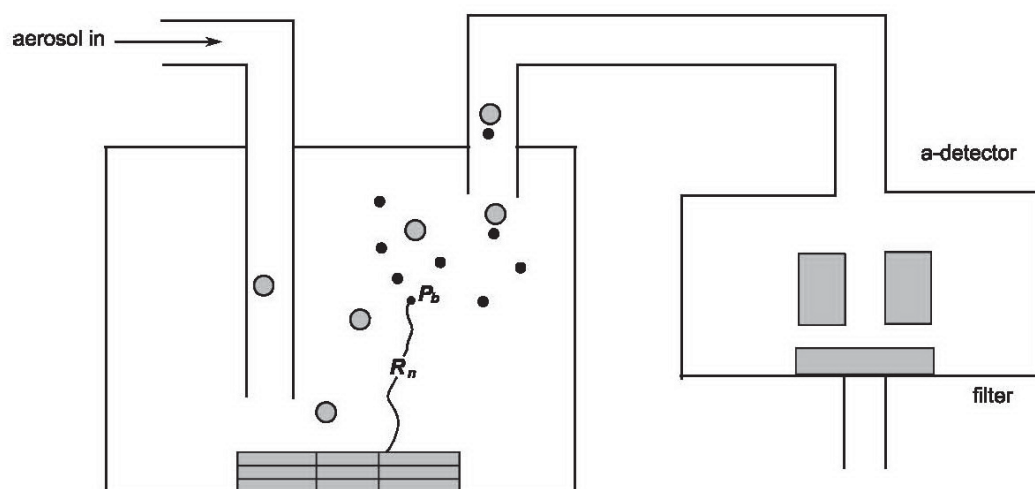
รูปที่ 1.5 ลักษณะโครงสร้างของ UPMS (Park et al. 2005)

Epiphaniometer (Hinds 1999) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความเข้มข้นของอนุภาค รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Epiphaniometer การทำงานของ Epiphaniometer จะขึ้นอยู่กับอัตราการเกาะติด (attachment rate) ของอะตอม ^{211}Pb ธรรมชาติบนพื้นผิวของอนุภาค โดยอะตอมของ ^{211}Pb ถูกสร้างขึ้นที่อัตราคงที่โดยการย่อยสลาย (decay) ของ short-lived radon isotope (^{219}Rn) ที่พุ่งออกจาก long-lived artificial actinium source (^{227}Ac) ที่ถูกวางในห้องการเกาะติด (attachment chamber) ของ Epiphaniometer อะตอมของ ^{211}Pb จะเกาะติดกับอนุภาคละอองลอยที่ถูกผ่านเข้าไป และผ่านเข้าไปยังตัวกรอง โดยอัตราการการเกาะติดจะหาได้โดย α -spectroscopy ผ่านการย่อยสลายของอะตอมของ ^{211}Pb ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนทั้งหมดของอะตอมที่เกาะติดบนพื้นผิวของอนุภาค

จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคระดับนาโนเมตร มีความสำคัญต่อการศึกษามลพิษทางอากาศและการวัดเพื่อควบคุมการปนเปื้อนของอนุภาคในผลิตภัณฑ์ และได้มีการพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์จำนวนอนุภาคได้อยู่ในช่วงขนาด 1 นาโนเมตร – 10 ไมโครเมตร แต่จากผลงานวิจัยที่ได้ทำการค้นคว้ามาแล้ว พบว่าเครื่องวิเคราะห์จำนวนอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน มีราคาสูงมากอยู่ในหลักหลายแสนบาท อีกทั้งยังต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด และยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเครื่องวิเคราะห์จำนวนอนุภาคในระดับนาโนเมตรที่ยังไม่มีความเด่นชัด เช่น ผลของประจุค้าง (space charge effect) พฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและลักษณะของสนามการไหลภายในเครื่องมือวัด (flow and electric fields) และความไม่สมมาตรของพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด (electrode acentricity) ภายในชุดใส่ประจุของอนุภาค ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จะทำการพัฒนาต้นแบบเครื่องมือวิเคราะห์จำนวนอนุภาคด้วยวิธีการวัดประจุไฟฟ้าสถิต และทดสอบสมรรถนะในการวัดจำนวนของอนุภาคเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อให้ได้เงื่อนไขของแบบเครื่องมือวัดที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์



รูปที่ 1.6 ลักษณะโครงสร้างของ DCE (Fierz et al. 2002)



รูปที่ 1.7 ลักษณะโครงสร้างของ Epiphaniometer (Hinds 1999)

1.3 โครงของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงสร้างของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้จะประกอบด้วย 6 บท คือ ในบทที่ 1 จะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและความต้องการพัฒนา การทบทวนวรรณกรรมของเครื่องวิเคราะห์ ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่มีอยู่ บทที่ 2 จะเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัย บทที่ 3 จะนำเสนอรายละเอียดในการออกแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบย่อยต่างๆ ของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ ได้แก่ ประกอบด้วย ระบบควบคุมการไหลของของไหล ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ชุดอัดประจุละอองลอยแบบโคโรนา ชุดดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์ ชุดตรวจวัดกระแสระดับต่ำ และชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงหลักการทำงานและต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ พร้อมทั้งนำเสนอเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเรียบวิธีการทดลองของส่วนประกอบย่อยต่างๆ และการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ ในบทที่ 5 บทที่ 6 จะเป็นการรายงานผลการวิจัยและวิจารณ์ผล อันได้แก่ ผลการวิจัยทั้งภาคทฤษฎีและการทดลองของอุปกรณ์ประกอบย่อยต่างๆ และการทดลองทั้งระบบของเครื่องวิเคราะห์ และในบทที่ 7 จะเป็นการสรุปผลการศึกษารวมไปถึงข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อในอนาคต ส่วนภาคผนวกจะประกอบด้วย สำเนาบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์หรือนำเสนอในวารสารวิชาการและประชุมวิชาการในระดับชาติและนานาชาติ ร่างบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการพิจารณา และแบบเทคนิคของอุปกรณ์ประกอบย่อยต่างๆของเครื่องวิเคราะห์

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติของละอองลอย

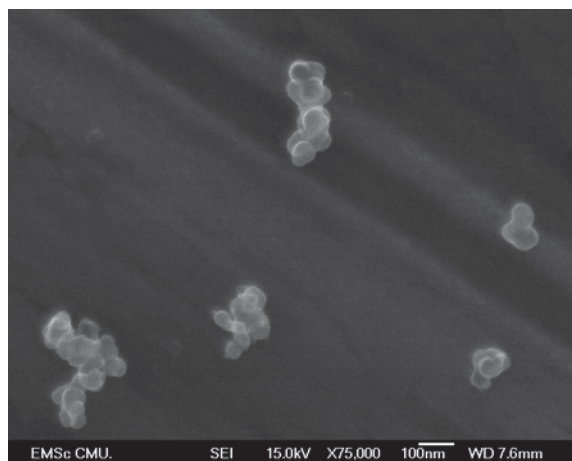
2.1.1 ขนาดของละอองลอย

ละอองลอย (aerosol) ถูกนิยามไว้คืออนุภาค (particle) ที่เป็นของแข็ง (solid) หรือของเหลว (liquid) หรือเป็นการรวมกัน (combination) ของทั้งสองที่แขวนลอยในแก๊สหรืออากาศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 นาโนเมตร (nm) และ 100 ไมโครเมตร (μm) (Hinds 1999) รูปที่ 2.1 แสดงภาพถ่ายของอนุภาคระดับนาโนเมตรโดยทั่วไป ขนาดอนุภาค (particle size) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดสำหรับการบ่งบอกถึงพฤติกรรม (behavior) ของละอองลอย โดยพฤติกรรม องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของอนุภาคละอองลอยเป็นฟังก์ชันของขนาดอนุภาค ละอองลอยโดยทั่วไปจะประกอบด้วยจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน ละอองลอยที่มีการแจกแจงขนาดเดียว (monodisperse aerosol) โดยการนิยามประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเหมือนกันทั้งหมด และสามารถสร้างได้ในห้องปฏิบัติการสำหรับใช้เป็นละอองลอยในการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ละอองลอยโดยทั่วไปจะมีลักษณะการแจกแจงขนาดหลากหลาย (polydisperse) ที่ช่วงความกว้างของขนาดอนุภาค และการวัดทางสถิติควรจะถูกนำมาใช้ในการบ่งบอกคุณลักษณะของขนาดอนุภาค การแจกแจงของขนาดอนุภาคภายในละอองลอย ถูกอ้างเป็นการแจกแจงขนาดของละออง (aerosol size distribution) โดยปกติแล้ว การแจกแจงขนาดของละอองลอยจะถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันการแจกแจงแบบ Lognormal (Lognormal distribution function) ซึ่งไม่มีหลักพื้นฐานทางทฤษฎีสำหรับการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการแจกแจงแบบ Lognormal ดังนั้นฟังก์ชันการแจกแจงแบบ Lognormal สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ (Hinds 1999)

$$df = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left(-\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d})^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right) d \ln d_p \quad (2.1)$$

เมื่อ d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค $\bar{d}$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของจำนวนรวม (count median diameter) และ σ_g คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต (geometric standard deviation) หาได้จาก

$$\sigma_g = \exp \left(\frac{\sum n_i (\ln d_i - \ln d_g)^2}{N-1} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายของอนุภาคระดับนาโนเมตร

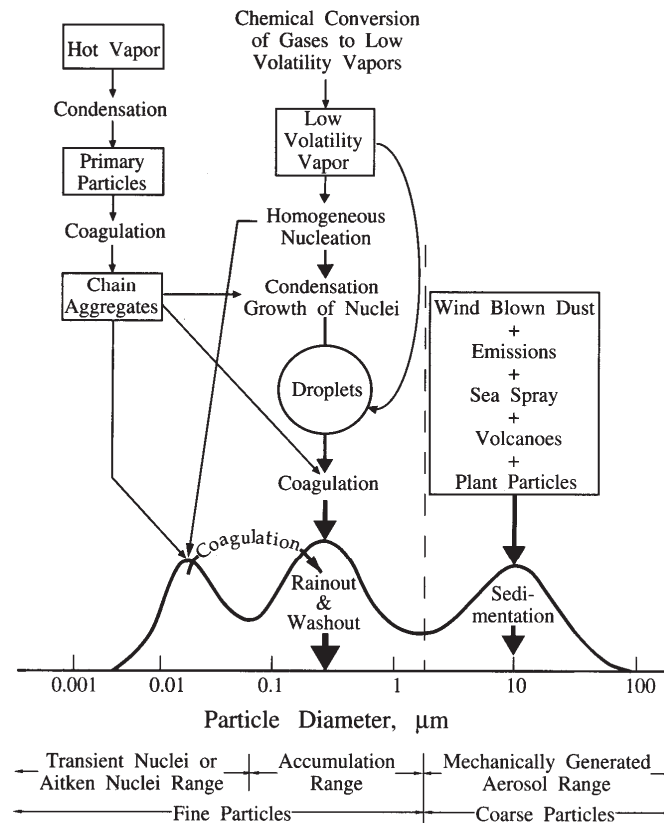
เมื่อ d_g คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางเรขาคณิตเชิงจำนวน (number weighted geometric mean diameter) หรือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของจำนวนรวมหาได้จาก (Hinds 1999)

$$d_g = \exp\left(\frac{\sum n_i \ln d_i}{N}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ n_i คือจำนวนของอนุภาคในกลุ่ม i ที่มีจุดกึ่งกลางของขนาด d_i และ N คือจำนวนรวมของอนุภาค (Hinds 1999)

2.1.2 การแจกแจงขนาดของละอองลอย

การแจกแจงขนาดของอนุภาคโดยทั่วไปแล้วสามารถอธิบายได้ 3 โหมด คือ โหมด Nuclei โหมด Accumulation และโหมด Coarse ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ในโหมด Nuclei ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร อนุภาคในโหมด Nuclei ถูกสร้างขึ้นจากการปล่อยออกมาจากแหล่งที่มาและอนุภาคที่เกิดในบรรยากาศโดยการเปลี่ยนแปลงจากแก๊สไปเป็นอนุภาค (gas-to-particle conversion) และกระบวนการควบแน่น (condensation processes) อนุภาคในโหมดนี้จะมีการแจกแจงขนาดของละอองลอยเชิงจำนวน (number weighted aerosol size distribution) เนื่องจากอนุภาคในโหมด Nuclei มีขนาดเล็กและมีมวลน้อยมากจึงทำให้ไม่มีการแจกแจงขนาดเชิงมวล (mass weighted size distribution) โหมด Accumulation ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงขนาดระหว่างประมาณ 100 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร เช่น ผลผลิตจากสารอินทรีย์ (organic product) อนุภาคควัน (smog particles) อนุภาคจากการเผาไหม้ (combustion particles) และ อนุภาคในโหมด Nuclei ที่มีการเกาะรวมตัวกันกับอนุภาคในโหมด Accumulation เนื่องจากอนุภาคในโหมดนี้ถูกสร้างขึ้น



รูปที่ 2.2 การแจกแจงขนาดละอองลอยในบรรยากาศ

โดยการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคในโหมด Nuclei จึงทำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าและมีจำนวนที่น้อยกว่าจึงมีการแจกแจงขนาดอนุภาคแบบเชิงมวล (mass weighted particle size distribution) สำหรับอนุภาคในโหมด Coarse ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร เช่น ฝุ่น (dust) อนุภาคเกลือ (sea-salt particle) อนุภาคที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องจักรกล เช่น การทำเกษตรกรรม การทำเหมืองแร่ ถึงแม้ว่าอนุภาคในโหมด Coarse จะมีมวลมาก แต่อนุภาคเหล่านี้จะมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคในโหมด Nuclei และ Accumulation ดังนั้น อนุภาคในโหมดนี้จึงไม่ให้ความสำคัญกับการแจกแจงขนาดทั้งเชิงจำนวนและมวล

2.2 การเคลื่อนของอนุภาคในแก๊ส

2.2.1 ความหนืดของแก๊ส

ความหนืด (viscosity) คือค่าคงที่ของสัดส่วนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) และความเร็วการเฉือน (velocity gradient) สำหรับลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน (Newtonian fluid) คือ

$$F \propto \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

ความหนืดจะมีค่าเท่ากับ 1.81×10^{-5} Pa.s. สำหรับอากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความหนืดยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัมพัทธ์ระหว่างค่าความหนืดอ้างอิง (reference viscosity) ที่อุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature) ได้ดังสมการต่อไปนี้ (Willeke and Baron 1993)

$$\eta = \eta_r \left(\frac{T_r + S}{T + S} \right) \left(\frac{T}{T_r} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ S คือค่าคงที่การประมาณค่าพหุนามต่อเนื่องของ Sutherland (Willeke and Baron 1993) จากสมการที่ 2.5 จะเห็นว่าความหนืดจะเป็นอิสระหรือไม่ขึ้นอยู่กับความดัน

2.2.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาค

ตัวแปร (parameter) ที่สำคัญที่ใช้ในการคัดแยกของพลศาสตร์ของอนุภาค (particle dynamic) คือตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาค (particle Reynolds number, R_{ep}) ที่อธิบายถึงคุณสมบัติเชิงอากาศพลศาสตร์ของอนุภาค ตัวเลขเรย์โนลด์คือจำนวนไร้มิติที่บ่งบอกถึงการไหลของของไหลผ่านท่อหรือล้อมรอบสิ่งกีดขวาง เช่น อนุภาค ซึ่งถูกนิยามเป็น (Hinds 1999)

$$R_{ep} = \rho \frac{V d_p}{\eta} \quad (2.6)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล V คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลต่ออนุภาค d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และ η คือค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล ตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาคคืออัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อย (inertial force) ต่อแรงเนื่องจากความหนืด (viscous force) หรือแรงเสียดทาน (frictional force) ที่กระทำบนอนุภาค ปกติแล้ว ถ้า $R_{ep} < 1$ การไหลล้อมรอบอนุภาคสามารถอธิบายเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ซึ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานในการศึกษา

2.2.3 กฎของสโตกส์และตัวชดเชยคันทิงแฮม

เมื่ออนุภาคละอองเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสุทธิ (net velocity) V_p ด้วยสัมพัทธ์กับแก๊สพา (carrier gas) ที่แขวนลอยอยู่ อนุภาคจะอยู่ภายใต้แรงเสียดลากเชิงอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic drag force) F_D แรงเสียดลากนี้หาได้จากกฎของสโตกส์ (Stoke's law) แสดงดังสมการที่ 2.7

$$F_D = 3\pi\mu V_p d_p \quad (2.7)$$

เมื่อ μ คือค่าความหนืดของแก๊ส โดยกฎของสโตกส์เป็นวิธีการจำเพาะของสมการ Navier-Stokes โดยการสมมุติให้แรงเนื่องจากความเฉื่อยมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเนื่องจากความหนืด มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของอนุภาคน้อยกว่าประมาณ 1 การเคลื่อนที่ที่คงที่ของอนุภาคที่มีรูปร่างแข็งไม่ยืดหยุ่นไม่มีผนังกันหรืออนุภาคอื่นๆใกล้เคียง เป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้และความเร็วของของไหลเป็นศูนย์ที่พื้นผิวของอนุภาค เมื่ออนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับระยะการเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของแก๊ส (gas mean free path) แรงต้านทานของแก๊สจะกระทำต่ออนุภาคอย่างไม่ต่อเนื่องและอนุภาคจะ “ลื่นไถล(slip)” ที่พื้นผิวระหว่างโมเลกุลของแก๊ส (ได้แก่ความเร็วของของไหลที่ล้อมรอบพื้นผิวอนุภาคจะไม่เป็นศูนย์) เพื่อทำการนับรวมสำหรับค่าลื่นไถลของพื้นผิวนี้นี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้ตัวชดเชย (correction factor) กับสมการของกฎของสโตกส์ เพื่ออธิบายความเร็วที่อนุภาคตกเร็วขึ้น ตัวชดเชยนี้มีชื่อเรียกว่า ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (Cunningham slip correction factor) C_c (Cunningham, 1910) แสดงดังสมการที่ 2.8 – 2.10

$$F_D = \frac{3\pi\mu V_p d_p}{C_c} \quad (2.8)$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.514 + 0.8 \exp\left(-0.55 \frac{d_p}{\lambda}\right) \right] \quad (2.9)$$

$$\lambda = \lambda_r \left(\frac{101.3}{P} \right) \left(\frac{T}{293.15} \right) \left(\frac{1 + 110/293.15}{1 + 110/T} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ C_c คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม λ คือค่าเฉลี่ยระยะการเคลื่อนที่อิสระของแก๊ส λ_r คือค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่อิสระของอากาศ (ที่สภาวะมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.0665 μm) P คือความดันของของไหล โดยความเร็วการตกสุดท้าย (terminal settling velocity) V_{TS} ของอนุภาคที่ลอยตัวในแก๊สหนึ่งสามารถหาได้โดยสมการแรงเสียดลากสโตกส์ (Stoke's drag force) ต่อแรงโน้มถ่วง ($F_D = F_G$) ความเร็วการตกสุดท้ายนี้ สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\mu} \quad (2.11)$$

เมื่อ ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2) ความเร็วการตกจะไม่มีผลสำคัญสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ความเร็วของอนุภาคจะแปรผันโดยตรงกับแรงที่กระทำต่ออนุภาค ตัวคงที่ที่ทำให้ความสัมพันธ์นี้เท่ากันมีชื่อเรียกว่าความสามารถในการเคลื่อนตัวของอนุภาค (particle mobility) B นิยามเป็นอัตราส่วนของความเร็วอนุภาคต่อแรงเสียดลากที่กระทำบนอนุภาค แสดงดังสมการที่ 2.12

$$B = \frac{C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.12)$$

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใช้เป็นของเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic diameter)

2.2.4 กลไกเชิงเฉื่อย

การไหลโค้งของกระแสน้ำสามารถปล่อยให้อนุภาคแขวนลอยไหลไปตามเส้นทางที่ผิดแผกจากเส้นทางไหลของแก๊สรอบๆ ได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะอนุภาคแขวนลอยมีความเฉื่อยมากกว่า จึงไม่อาจเลี้ยวโค้งได้ทันที ดังนั้น วัตถุที่วางขวางกันเส้นทางไหลของกระแสน้ำจะเก็บอนุภาคเหล่านี้ได้ ในการวิเคราะห์การเกาะจับของอนุภาคจากกระแสน้ำลงบนสิ่งกีดขวาง ถ้าทำการวิเคราะห์โดยถือว่าอนุภาคมีขนาดเล็กมากในกระแสแก๊ส แต่มีมวลมากกว่ามวลของแก๊ส กลไกการกำจัดอนุภาคนี้จะเรียกว่าการตกกระทบ (impaction) ในกรณีนี้คำนึงถึงขนาดอนุภาคและมีการคำนวณเส้นทางบินของอนุภาค (particle trajectory) รอบๆ สิ่งกีดขวางนั้น เพื่อดูว่าเกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคกับผิวของสิ่งกีดขวางหรือไม่ กลไกการกำจัดอนุภาคนี้เรียกว่าการสกัดกั้น (interception) ในบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงกลไกการตกกระทบและกลไกการสกัดกั้นพร้อมๆ กันในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค โดยประสิทธิภาพของอนุภาคถูกกำจัดออกจากกระแสน้ำไหลของละอองโดยการตกกระทบ จะเป็นฟังก์ชันของตัวเลขสโตกส์ (Stoke's number) Stk สามารถคำนวณได้จาก

$$Stk = \frac{S}{d_c} = \frac{\rho_p d_p^2 V_f C_c}{18\mu d_c} \quad (2.13)$$

$$S = m_p B V_0 \quad (2.14)$$

เมื่อ d_c คือขนาดลักษณะเฉพาะ (characteristic dimension) ของสิ่งกีดขวาง V_f คือความเร็วของของไหล S คือระยะหยุดของอนุภาค (stop distance of particle) m_p คือมวลของอนุภาค V_0 คือความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคที่เวลาเท่ากับศูนย์ เมื่อนิยามสโตกส์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคถูกใช้ จากการทดลองการสูญเสียเนื่องการตกกระทบจะเกิดขึ้นเฉพาะสำหรับอนุภาคที่มีตัวเลขสโตกส์มากกว่า 0.6 และการตกกระทบจะมีความสำคัญเฉพาะสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร)

2.2.5 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนและการแพร่กระจาย

อนุภาคใดๆ ที่แขวนลอยอยู่ในอากาศจะถูกชนอย่างต่อเนื่องโดยโมเลกุลของอากาศ ซึ่งเหตุการณ์ที่ไม่มีกฎเกณฑ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า อนุภาคมีการเคลื่อนที่อย่างไม่มีกฎเกณฑ์อย่าง

ต่อเนื่อง หรือการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนที่ใช้กับอนุภาคเดี่ยวเป็นกระบวนการในระดับโมเลกุล เมื่อระบบถูกสังเกตเป็นโครงสร้างที่เป็นกลุ่มก้อนใหญ่ กับจำนวนทั้งหมดของอนุภาคของการเปลี่ยนแปลงขนาด กระบวนการนี้ถูกเรียกว่าการแพร่กระจาย (diffusion) การเปรียบเทียบการกระจัดในระดับโมเลกุลของจำนวนทั้งหมดของอนุภาคที่เกิด โดยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนกับการแพร่กระจายถูกอธิบายโดยกฎของ Fick's ดังนี้

$$J = -D \cdot \frac{dn}{dx} \quad (2.15)$$

เมื่อ J คือฟลักซ์ของอนุภาค (particles flux) dn/dx คือเกรเดียนต์ความเข้มข้นของอนุภาค (particle concentration gradient) และ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion coefficient) D จะสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคดังนี้ (Hinds, 1999)

$$D = kTB = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.16)$$

ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าลดลงฟลักซ์การแพร่กระจายบราวเนียน (Brownian diffusional flux) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีการแพร่กระจายช้ากว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น อนุภาคขนาด 100 นาโนเมตร ภายใต้เงื่อนไขอากาศล้อมรอบจะมีความเร็วในการแพร่กระจายเฉลี่ยเท่ากับ 14 cm/sec ขณะที่อนุภาคขนาด 10 นาโนเมตร ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันจะมีความเร็วในการแพร่กระจายเฉลี่ยเท่ากับ 440 cm/sec ดังนั้นการแพร่กระจายบราวเนียนต้องนำมาคิดรวมกับการสูญเสียของอนุภาคในระบบการเตรียมตัวอย่างละเอียดด้วย

การเคลื่อนที่แบบแพร่ในการศึกษานี้ คือ ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคเมื่ออนุภาคถูกผลักด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตตลอดเส้นโคจร (trajectory) ระยะการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนจะนำไปสู่ระยะการเคลื่อนที่สุทธิตามแบบไร้ทิศทาง (random net displacement) ที่เสริมเข้าไปบนเส้นโคจรปกติเนื่องจากการเคลื่อนที่ไฟฟ้าสถิต โดยผลสุทธิของการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนที่เสริมขึ้นจะมีอิทธิพลต่อเส้นโคจรของอนุภาค โดยค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ของระยะการเคลื่อนที่บราวเนียน $\bar{x}$ ในช่วงคาบเวลา t หาได้จาก

$$\bar{x} = \sqrt{2Dt} \quad (2.17)$$

2.2.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า

เมื่ออนุภาคละอองที่มีประจุไฟฟ้าสถิตสุทธิ (net electrostatic charge) อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม E อนุภาคที่มีประจุจะได้รับแรงกระทำเชิงไฟฟ้าสถิตสุทธิ (net electrostatic force) F_E ที่กระทำต่ออนุภาคสามารถคำนวณได้จาก

$$F_E = n_p e E \quad (2.18)$$

เมื่อ n_p คือจำนวนประจุที่อยู่บนอนุภาค e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) และ E คือความเคียดสนามไฟฟ้า ถ้าไม่มีแรงภายนอกอื่นใดๆ มากระทำ (โดยทั่วไปแล้วสำหรับอนุภาคระดับนาโนเมตรแรงทางไฟฟ้าสถิตจะมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงคือ $F_E \gg F_G$) แรงทางไฟฟ้าสถิตจะสมดุลโดยแรงเสียดลากสโตกส์ F_D และมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของอนุภาคน้อยกว่าประมาณ 1 จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนย้ายของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าคือ

$$m_p \cdot \frac{dV_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} \cdot V_p + n_p e E \quad (2.19)$$

เมื่อ m_p คือมวลของอนุภาค และ V_p คือความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค สมมติให้อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมจะสามารถคำนวณหามวลของอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้จาก

$$m_p = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_p \cdot d_p^3 \quad (2.20)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.19 จะได้ความเร็วในการเคลื่อนย้ายเชิงไฟฟ้าสถิตขั้นปลาย (terminal electrostatic velocity) V_{TE} สามารถคำนวณหาได้จาก

$$V_{TE} = \frac{n_p e E C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสามารถในการเคลื่อนตัวอนุภาคเชิงกล (mechanical particle mobility) B แสดงได้โดย

$$V_{TE} = n_p e B \quad (2.22)$$

แนวโน้มนของอนุภาคที่ได้รับประจุเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ถูกเรียกว่าเป็นความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (electrical mobility) Z_p ($\text{m}^2/\text{V.s}$) และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชิงกล B แสดงดังสมการที่ 2.23

$$Z_p = \frac{V_{TE}}{E} = n_p e B = \frac{n_p e C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.23)$$

2.3 ทฤษฎีการไหลของของไหล

2.3.1 สมการการไหลของของไหล

การไหลของของไหล (fluid flow) ภายในเครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคในการศึกษาจะสมมติให้การไหลภายในเป็นการไหลแบบสมมาตรกับแกน (axisymmetric) แบบราบเรียบ (laminar) แบบรูปร่างของความเร็วจนพัฒนาไปจากเดิมอย่างเต็มที่ (fully developed) และแบบไม่ยุบตัวตามความดัน (incompressible) โดยสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการ Navier-Stokes แบบไม่ยุบตัวตามความดัน (incompressible Navier-Stokes equation) ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขของสนามการไหลภายในเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคนี้อย่างไร ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation, PDE) ในระบบพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate system) แบบ 2 มิติได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \quad (2.24)$$

สมการ Navier-Stokes:

สำหรับในแนวแกน (r)

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) - \mu \frac{1}{r^2} u_r \quad (2.25)$$

สำหรับในแนวแกน (z)

$$u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (2.26)$$

สำหรับในแนวแกน (θ)

$$u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) - \frac{2\mu}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) \quad (2.27)$$

เมื่อ u_x , u_y และ u_θ คือความเร็วของของไหลในแนวแกน x , y และ θ ตามลำดับ p คือความดันของของไหล และ μ คือความหนืดของของไหล (kinematic viscosity of air)

2.3.2 ตัวเลขเรย์โนลด์และรูปร่างความเร็วของการไหลในท่อ

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) คือตัวเลขไร้มิติ (dimensionless number) ที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะการไหลของของไหลผ่านท่อ ในการศึกษาการไหลของของไหลภายในเครื่องวิเคราะห์ถูกให้ทำงานที่เงื่อนไขการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow condition) ดังนั้นตัวเลขเรย์โนลด์จะต้องอยู่ในระบอบแบบราบเรียบ (laminar regime) สำหรับเครื่องวิเคราะห์ที่ใช้โดยปกติทั่วไป จะเป็นอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน (coaxially cylindrical electrodes) มีการไหลแบบวงแหวน (annular flow) และตัวเลขเรย์โนลด์ในรูปทรงเลขาคณิตแบบนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$Re = \frac{2r_2(1-\kappa)\rho\bar{U}}{\eta} \quad (2.28)$$

เมื่อ r_2 คือรัศมีของอิเล็กโทรดทรงกระบอกด้านนอก (outer) κ คือสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกด้านในต่อด้านนอก $\bar{U}$ คือความเร็วการไหลเฉลี่ย และ ρ คือความหนาแน่นของแก๊ส (gas density) ดังนั้นรูปร่างความเร็ว (velocity profile) ในเรขาคณิตการไหลแบบวงแหวนจะหาได้จาก

$$u(r) = \frac{r_2^2}{4\eta} \left(-\frac{dp}{dz} \right) \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} - \frac{1-\kappa^2}{\ln(\kappa)} \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) \quad (2.29)$$

เมื่อ dp/dz คือค่าคงที่ของความดันเกรเดียนต์ (pressure gradient)

2.4 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าและการไหลของกระแสไฟฟ้า (electric field and current flow) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell's ที่ครอบคลุมสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ของศักย์ไฟฟ้า V คือ (Chang et al. 1995)

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.30)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของประจุ (C/m^3) และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m ซึ่งสมการนี้ใช้ได้สำหรับแก๊สภายใต้สภาวะปกติ ดังนั้นจากสมการที่ 2.30 สามารถเขียนเป็นสมการของลาปลาซ (Laplace's equation) ในระบบพิกัดทรงกระบอกแบบ 2 มิติ คือ

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\rho(r, z)}{\epsilon_0} = 0 \quad (2.31)$$

ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้า (electric potential) ที่ได้ในแนวแกน z และแนวรัศมี r สามารถคำนวณได้จาก

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.32)$$

สมการของลาปลาซสำหรับความต่างศักย์ไฟฟ้า (สมการที่ 2.31 และ 2.32) ไม่สามารถที่จะคำนวณเชิงวิเคราะห์ (analytical method) ได้ในการศึกษานี้ เนื่องจากความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องวิเคราะห์ ดังนั้น ในการคำนวณสนามไฟฟ้าภายในเครื่องวิเคราะห์นี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เข้ามาช่วยในการคำนวณ

2.5 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามการไหล

แบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical model) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในเครื่องวิเคราะห์เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจถึงการทำงานของเครื่องวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น โดยแบบจำลองจะประกอบด้วยสองส่วน คือ แบบจำลองของสนามไฟฟ้า (electric field model) และแบบจำลองของสนามการไหล (flow field model) โดยสมมุติให้การไหลภายในท่อเป็นการไหลแบบสมมาตรกับแกน (axisymmetric) แบบราบเรียบ (laminar) แบบรูปร่างของความเร็วพัฒนาไปจากเดิมอย่างเต็มที่ (fully developed) และแบบไม่ยุบตัวตามความดัน (incompressible) และไม่มีผลของประจุในอวกาศว่าง ดังนั้นสมการ Navier-Stokes สองมิติแบบไม่ยุบตัวตามความดัน และสมการ Poisson's แบบสองมิติ (2D) จึงนำมาใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับสนามการไหลและสนามไฟฟ้า ตามลำดับ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CFDRCTM ที่ใช้ระเบียบวิธีการหาปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) หรือที่นิยมเรียกด้วยคำย่อกันว่า FVM ซึ่งเป็นโปรแกรมแก้ไขปัญหามทางด้านพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamic) พัฒนาขึ้นโดยบริษัท CFD Research Corporation สำหรับวิธีปริมาตรสืบเนื่องที่ใช้การคำนวณของโปรแกรม CFDRCTM เป็นระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณหาผลเฉลยของ

ปัญหาที่กำหนดมาให้ โดยการแบ่งโดเมน (domain) ปัญหาออกเป็นหลายเซลล์หรือที่เรียกว่า ปริมาตรควบคุม (control volume) ซึ่งมาขนาดต่างๆกัน แล้วสร้างสมการควบคุม (governing equation) ของแต่ละปริมาตรควบคุมให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ต่างๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำเอาสมการของแต่ละ ปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นมามีมาประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) และจึงทำการแก้ระบบสมการทั้งหมดโดยการอินทิเกรตเชิงตัวเลข ตลอดทั้งเซลล์หรือปริมาตรควบคุม ก่อให้เกิดผลเฉลยที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆของรูปร่าง ปัญหานั้น โปรแกรม CFDRTM ใช้วิธีการจัดตัวแปรที่อยู่ศูนย์กลางของเซลล์ที่ตั้งร่วมกัน (co-located cell-centered variable arrangement) ซึ่งหมายความว่าตัวแปรตาม (dependent variable) และคุณสมบัติของวัสดุ (material properties) ทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ที่จุดศูนย์กลางของ เซลล์ โดยค่าเฉลี่ยของจำนวนใดๆ ภายในปริมาตรควบคุมจะถูกส่งให้โดยค่าที่จุดศูนย์กลางของ เซลล์

2.6 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในก๊าซและการไหลของกระแสไฟฟ้า

โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) เป็นส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการอัด ประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาค เพราะเป็นกระบวนการที่สร้างไอออนที่ทำให้อนุภาคได้รับประจุ ปกติ แล้วจะแสดงในรูปของคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน (voltage-current characteristics) เมื่อ แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset voltage) กระแสโคโรนา (corona current) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันที่มีค่าสูงสุดจะสร้างประกายโคโร นา (sparkover corona) ดังนั้นเราจำเป็นต้องรู้สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการ ออกแบบเครื่องตกตะกอนเพื่อกำจัดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซ สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset field strength) E_0 สามารถคำนวณได้จากสมการของ Peek (1929)

$$E_0 = E_s \left(\delta + A \sqrt{\delta/r_1} \right) \quad (2.33)$$

$$\delta = \frac{T_r}{T} \frac{P}{P_r} \quad (2.34)$$

เมื่อ E_s คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (breakdown field) ในอากาศที่สภาวะปกติ (3.10×10^6 โวลต์ ต่อ เมตร สำหรับโคโรนาลบ (negative corona) และ 3.37×10^6 โวลต์ ต่อ เมตร สำหรับ โคโรนาบวก (positive corona) A คือค่าคงที่ ($0.0301 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาขั้วลบ และ $0.0266 \text{ m}^{1/2}$ สำหรับโคโรนาขั้วบวก) δ คือความหนาแน่นของอากาศที่ความดันบรรยากาศ T_r คือ อุณหภูมิห้องของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน T คืออุณหภูมิอากาศขณะทำงาน P_r คือความดัน บรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน และ P_r คือความดันบรรยากาศขณะทำงาน โดยสมการของ Peek's นี้สามารถใช้ได้เฉพาะเจาะจงกับรูปเรขาคณิตแบบทรงกระบอก (cylindrical geometry)

ถ้าเครื่องวิเคราะห์เป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันและไม่ได้คิดผลของประจุค้าง แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา V_0 สามารถคำนวณได้จาก

ค่า

$$V_0 = E_0 r_1 \ln(r_2 / r_1) \quad (2.35)$$

และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (average current density) j (A/m²) ที่พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก ที่มีหน่วยเป็น กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโคโรนาดิซซาร์จ สามารถคำนวณได้จาก (Parker, 1997)

$$j = \frac{4\varepsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^3 \ln(r_2 / r_1)} \quad (2.36)$$

เมื่อ Z_i คือค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (ion electrical mobility) มีค่าเท่ากับ 1.4×10^{-4} ตารางเมตรต่อโวลต์วินาที และ ε_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในสมการที่ 2.36 ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก ได้คือ

$$I = \frac{8\pi\varepsilon_0 Z_i V (V - V_0)}{r_2^2 \ln(r_2 / r_1)} \quad (2.37)$$

แรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนา (flashover voltage) ของโคโรนาขั้วลบที่อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) มากกว่า 5×10^{-2} เมตร จะมีค่าเท่ากับ 15d กิโลโวลต์ เมื่อ d มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และถ้าเป็นโคโรนาขั้วบวกจะประมาณครึ่งหนึ่งของโคโรนาลบ ปกติแล้วขั้วลบนิยมนำไปใช้งานมากเพราะว่าแรงดันการเกิดโคโรนาที่สูงกว่าจะให้ช่วงของแรงดันทำงานมากกว่า สำหรับการนำไปใช้งานภายในอาคารแล้ว จะนิยมใช้โคโรนาขั้วบวกเพราะขั้วบวกจะสร้างโอโซนต่ำกว่าขั้วลบ

2.7 ทฤษฎีการอัดประจุอนุภาค

เมื่ออนุภาคละอองลอยเข้าไปในกลุ่มของแก๊สไอออน (gaseous ions) จะทำให้เกิดการเกาะติดของไอออนบนอนุภาคขึ้นและนำไปสู่การอัดประจุไฟฟ้า (electrical charging) บนอนุภาค ขนาดของประจุจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค (particle size) ความหนาแน่นของไอออน (ion density) และเวลาที่อนุภาคลอยอยู่ในแก๊สไอออนหรือเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ (charging time) สำหรับในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าใดๆปรากฏ อนุภาคจะถูกอัดประจุแบบแพร่กระจาย (diffusion charging) โดยการเคลื่อนที่ไร้ทิศทางบราวเนียน (Brownian random motion) ของไอออนไปยังอนุภาค ในการอัดประจุแบบแพร่กระจายนี้ การชนกันระหว่างอนุภาคละอองลอยกับไอออนจะถูก

พิจารณาเป็น 3 ระบบ ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของตัวเลข Knudsen, $Kn = \lambda_i/a$ เมื่อ λ_i คือระยะการเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของไอออน (ion mean free path) และ a คือขนาดรัศมีของอนุภาค เมื่อตัวเลข Knudsen มีค่าน้อย ได้แก่ $Kn \ll 1$ คือกระบวนการจะถูกควบคุมด้วยการแพร่กระจาย โดยค่าสัมประสิทธิ์การรวมกัน (combination coefficient) จะได้มาจากการแก้ปัญหасмการการแพร่กระจายในระดับที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (macroscopic diffusion equation) สำหรับตัวเลข Knudsen ที่มีค่ามาก ($Kn \gg 1$) จะใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (kinetic theory of gases) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การรวมกัน อย่างไรก็ตาม ในช่วงตัวเลข Knudsen มีค่าเท่ากับ 1 ในกระบวนการนี้มีความซับซ้อนมากและมีการพัฒนาวิธีการทำนายขึ้นมาจำนวนมาก มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับไอออนและละอองลอยและได้มีการสร้างสมการกึ่งการทดลอง (semi-empirical expressions) ขึ้นมามากมายในช่วงก่อนปี 1950 สำหรับทำนายอัตราการเกาะติดของไอออนกับละอองลอย (rate of ion-aerosol attachment) ภายใต้การแพร่กระจายของไอออน โดย Fuchs (1947) เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกที่ได้พัฒนาทฤษฎีการอัดประจุแบบแพร่กระจายและต่อมาได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดย Bricard (1949) และ Gunn (1955) ต่อจากนั้นในปี 1962 ถึง 1963 Bricard (1962) และ Fuchs (1963) ได้พัฒนาทฤษฎีการอัดประจุต่อ โดยสมมติให้ไอออนมีการแพร่กระจายไปยังอนุภาคและทำการแก้ปัญหасмการการแพร่กระจายใกล้กับอนุภาค ในทฤษฎีของ Fuchs เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้คือฟลักซ์ (fluxes) เนื่องจากการแพร่กระจายและทฤษฎีจลน์เท่ากันที่รูปทรงกลมมีขอบเขต (limiting sphere) และที่ความหนาแน่นของไอออนไกลจากอนุภาคเป็นค่าอนันต์ ($n(\infty)$ จะเท่ากับความเข้มข้นของไอออนในปริมาตร) โดยในทฤษฎีนี้ได้รวมแรงจินตภาพทางไฟฟ้า (electrical image force) เข้าไปด้วย ต่อมาในปี 1985 Adachi และคณะ (Adachi *et al.* (1985)) ได้นำเสนอผลการทดลองที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดีกับทฤษฎีรูปทรงกลมมีขอบเขตของ Fuchs สำหรับอนุภาคในระบอบการส่งผ่าน (transition regime) ($Kn \approx 1$) เมื่อขนาดอนุภาคมีค่าเท่ากับขนาดของระยะการเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของไอออน โดยวิธีการแบบปกติสำหรับการแก้ปัญหการอัดประจุแบบแพร่กระจายในแก๊สไอออนแบบขั้วเดียว (unipolar) จะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี birth-and-death ที่ถูกนำเสนอโดย Boisdraon and Brock (1970) การประมาณการกระจายตัวของประจุบนอนุภาคที่มีขนาดเดียว (monodisperse particles) จะได้มาจากการแก้ปัญหасмการ Differential-Difference Equations (DDEs) ดังนี้ (Biskos 2004)

$$\frac{dN_{p,0}}{dt} = -\beta N_{p,0} N_i \quad (2.38)$$

$$\frac{dN_{p,1}}{dt} = \beta_0 N_{p,0} N_i - \beta_1 N_{p,1} N_i \quad (2.39)$$

$$\frac{dN_{p,n}}{dt} = \beta_{n-1} N_{p,n-1} N_i - \beta_n N_{p,n} N_i \quad (2.40)$$

เมื่อ $N_{p,n}$ คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคละอองลอยที่มีประจุ n N_i คือความเข้มข้นของไอออน และ β_n คือสัมประสิทธิ์การรวมกันของไอออนกับอนุภาคที่มีประจุ n สมการสำหรับสัมประสิทธิ์การรวมกัน (Adachi *et al.* 1985) อยู่บนพื้นฐานทฤษฎีการอัดประจุของอนุภาคโดย Fuchs (1963) คือ

$$\beta_n = \frac{J_n}{N_i} = \frac{\pi \gamma \bar{c}_i \delta^2 \exp\left(-\frac{\phi(\delta)}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\phi(\delta)}{kT}\right) \frac{\pi \gamma \bar{c}_i \delta^2}{4D_i a} \int_0^{a/\delta} \exp\left(\frac{\phi(a/x)}{kT}\right) dx} \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$x = a/r \quad (2.42)$$

$$\phi(r) = \int_r^\infty F(r) dr = \frac{pe^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 1} \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{a^3}{r^2(r^2 - a^2)} \quad (2.43)$$

$$\delta = \frac{a^3}{\lambda_i^2} \left[\frac{\left(1 + \frac{\lambda_i}{a}\right)^5}{5} - \frac{\left(1 + \frac{\lambda_i^2}{a^2}\right) \left(1 + \frac{\lambda_i}{a}\right)^3}{3} + \frac{2}{15} \left(1 + \frac{\lambda_i^2}{a^2}\right)^{5/2} \right] \quad (2.44)$$

$\phi(r)$ คือความต่างศักย์เชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic potential) ของไอออนที่ระยะรัศมี r จากจุดศูนย์กลางของอนุภาค $F(r)$ คือแรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนและอนุภาคที่มีประจุ δ คือรัศมีของรูปทรงกลมมีขอบเขต $J_n = dn/dt$ คือฟลักซ์ของไอออนไปยังอนุภาค γ คือความเป็นไปได้ของไอออนที่เข้าไปรูปทรงกลมเพื่อชนและโอนย้ายประจุของมันไปยังอนุภาค $\bar{c}_i$ คือความเร็วเชิงความร้อนเฉลี่ยของไอออน (ion mean thermal speed) D_i คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอออน (diffusion coefficient of ions) k คือค่าคงที่ของโบลทมานน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ 1.380658×10^{-23} J/K T คืออุณหภูมิทำงานของระบบ e คือค่าประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} C ϵ_0 คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของสุญญากาศ (dielectric constant of vacuum) ϵ_1 คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุอนุภาค (relative permittivity of particle material) โดยการแก้ไขปัญหาร่วมกันของระบบสมการข้างบนจะได้จำนวนประจุเฉลี่ย (average charge) และการกระจายตัวของประจุบนอนุภาค (charge distribution on particle) ในแต่ละขนาดตามเงื่อนไขการอัดประจุ

อย่างไรก็ตาม เราสามารถที่จะพิจารณากระบวนการของการอัดประจุแบบแพร่กระจายแบบวิธีอย่างง่ายและพัฒนาทฤษฎีเพื่อประมาณค่าประจุของอนุภาคได้ ซึ่งทำได้โดย White (1951, 1963) ซึ่งเป็นผู้สร้างทฤษฎีโมเลกุลอิสระ (free molecule theory) โดยการพิจารณา

ฟังก์ชันของไอออนที่ตกกระทบบนพื้นผิวอนุภาคและใช้การกระจายตัวของโบริทมานน์ (Boltzmann distribution) สำหรับการกระจายตัวของไอออนและสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเชิงวิเคราะห์ (analytic form) อย่างง่ายได้ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดรัศมีใหญ่กว่าระยะการเคลื่อนที่อิสระ การแพร่กระจายและการชนกันของไอออนกับอนุภาคละอองลอยจะถูกทำนายโดยทฤษฎีจลน์ อัตราการชนกัน (collision rate) หรือ อัตราการอัดประจุ (charging rate) เป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงความร้อน (thermal speed) และพื้นที่การจับตัวของอนุภาคละอองลอย ในทฤษฎีของ White's ไอออนจะถูกสมมติให้มีลักษณะเป็นแท่งต่ออนุภาคหลังจากการชนกัน ซึ่งฟังก์ชันของไอออน J ที่กระทบบนพื้นที่ผิวของอนุภาคสำหรับอนุภาคที่มีค่าเป็นกลาง (neutral particle) ที่ลอยอยู่ในกลุ่มควันของไอออนชั่วเดียวหาได้จาก

$$J = 4\pi a^2 \left(\bar{c}_i \frac{N_s}{4} \right) \quad (2.45)$$

เมื่อ N_s คือความเข้มข้นของไอออนเหนือพื้นผิว การกระจายตัวของไอออนจะหาได้จากการกระจายตัวของโบริทมานน์สำหรับสถานะสมดุล (equilibrium state) ถ้าไม่สนใจแรงจินตภาพ ปฏิกริยาระหว่างไอออนและอนุภาค โดยการกระจายตัวของโบริทมานน์ที่พื้นผิวของอนุภาคหาได้จาก

$$N_s = N_i \exp \left(-K_E \frac{n_p e^2}{akT} \right) \quad (2.46)$$

เมื่อ n_p คือประจุของอนุภาค และ $K_E = 1/4\pi\epsilon_0$ แทนสมการที่ 2.46 ลงในสมการที่ 2.45 จะได้

$$J = \pi a^2 \bar{c}_i N_i \exp \left(-K_E \frac{n_p e^2}{akT} \right) \quad (2.47)$$

โดยสมการที่ 2.45 เป็นสมการที่ถูกลำเสนอโดย White (1951, 1963) จากสมการที่ 2.47 สามารถอธิบายอัตราการอัดประจุโดยระบบของสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้

$$\frac{dn_p}{dt} = \pi a^2 \bar{c}_i N_i \exp \left(-K_E \frac{n_p e^2}{akT} \right) \quad (2.48)$$

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นคือ $n_p = 0$ ที่ $t = 0$ สำหรับการอัดประจุของละอองลอย ค่าประจุเฉลี่ยของอนุภาคสามารถทำการอินทิเกรตเชิงวิเคราะห์ดังนี้

$$\int_0^{n_p} \frac{dn_p}{\exp\left(-K_E \frac{n_p e^2}{akT}\right)} = \int_0^t \pi a^2 \bar{c}_i N_i dt \quad (2.49)$$

รูปแบบที่ถูกอินทิเกรตแล้วของสมการข้างบนถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการตีพิมพ์ลงในหนังสืออ่านมาตรฐาน (Willeke and Baron 1993; Hinds 1999) ดังนั้น ค่าประจุเฉลี่ย n_p ของการอัดประจุแบบแพร่กระจายในช่วงเวลา t และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค d_p สามารถหาได้จาก

$$n_p = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT} \right) \quad (2.50)$$

เมื่อ d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค โดยสมการที่ 2.50 จะใช้สำหรับอนุภาคในระบบคอนทินูอัม (continuum regime) ($Kn \ll 1$) และต่อมายังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้เหมาะสมเฉพาะระบบโมเลกุลอิสระ ($Kn \gg 1$) (Liu *et al.* 1967; Gentry and Brock 1967) อย่างไรก็ตาม Brock (1969, 1970) ได้รายงานว่ามีความผิดพลาดที่สำคัญเกิดขึ้นจากสมการที่ 2.50 เนื่องจากผลของแรงจินตภาพ ในการศึกษาต่อมา Liu *et al.* (1967) ได้ทำการปรับปรุงสมการของ White's ซึ่งได้รวมความโค้งของเส้นโคจรของไอออนที่เป็นผลจากประจุไฟฟ้าบนอนุภาค และ Gentry and Brock (1967) ก็ได้แก้ปัญหสมการการชนกันของโบริทมานน์ (Boltzmann's collision equation) เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการของ White's โดยให้ความสนใจที่ $Kn \rightarrow \infty$ อย่างไรก็ตาม การใช้การกระจายตัวของโบริทมานน์ในการหาการกระจายตัวของไอออนยังมีข้อเสีย เนื่องจากไม่มีการชนกันของโมเลกุลที่เป็นกลางกับไอออนในบริเวณใกล้เคียงอนุภาค ดังนั้น Fuchs and Sutugin (1971) ได้แนะนำว่าจะไม่มีการกระจายตัวของโบริทมานน์ โดยพวกเขาได้แนะนำว่าวิธีการของ Keefe *et al.* (1959) ดีกว่า โดยวิธีการของ Keefe *et al.* (1959) ได้พิจารณาเส้นโคจรของไอออนในสนามแรงที่ถูกสร้างโดยประจุของอนุภาค ต่อมา Pui (1976) ได้ทำการรวมฟังก์ชันไอออนที่ได้มาโดย Keefe *et al.* (1959) ในสมการและแสดงให้เห็นว่าสมการของพวกเขาให้ผลที่ตรงกันกับสมการของ White's สำหรับในกรณีของการอัดประจุแบบแพร่กระจายชั่วเดียว

สำหรับในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าปรากฏ ไอออนจะถูกโอนย้ายไปยังอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ตลอดเส้นสนามไฟฟ้า (field line) โดยเส้นสนามไฟฟ้าจะผลักประจุอนุภาคให้มีค่าสูงไปจนกระทั่งไม่มีเส้นสนามไฟฟ้าไปยังอนุภาคหรือที่เรียกว่าการอิ่มตัวของประจุ (charge saturation) การอัดประจุแบบนี้เรียกว่าการอัดประจุสนาม (field charging) โดยผลของสนามไฟฟ้ามีขอบเขตจำกัดที่ใช้ในพื้นที่การอัดประจุ (charging zone) สามารถประมาณค่าได้จากสมการการอัดประจุแบบสนามของ White's (White 1963) โดยการอิ่มตัวของประจุ n_s ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าหาได้จาก

$$n_s = \left(1 + \frac{2\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right) \left(\frac{Ea^2}{K_E e}\right) \quad (2.51)$$

เมื่อ ε คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค และ E คือความเข้มของสนามไฟฟ้า ดังนั้น อัตราการอัดประจุแบบสนามสามารถหาได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้

$$\frac{dn_p}{dt} = n_s K_E e Z_i n_i \left(1 - \frac{n_p}{n_s}\right)^2 \quad (2.52)$$

ถ้าอนุภาคเริ่มต้นมีค่าเป็นกลาง จำนวนประจุเฉลี่ยบนอนุภาคที่ได้มาในสนามไฟฟ้าเฉลี่ยจะสามารถหาได้จาก

$$n_p = \left(1 + \frac{2\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right) \left(\frac{Ea^2}{K_E e}\right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i n_i t}{1 + \pi K_E e Z_i n_i t}\right) \quad (2.53)$$

โดยสองเทอมแรกของสมการที่ 2.53 คือสถานะที่ประจุอิ่มตัว ในเทอมแรกจะอยู่บนพื้นฐานค่าคงที่ความเป็นฉนวนของวัสดุโดยมีค่าอยู่ในช่วง $1 - \infty$ ซึ่งค่าคงที่ความเป็นฉนวนมีค่าจาก 1 (อนุภาคที่เป็นฉนวน) ไปจนถึงค่า ∞ (อนุภาคที่เป็นตัวนำ) โดยส่วนมากแล้วค่าคงที่ความเป็นฉนวนของอนุภาคจะมีค่าอยู่ในช่วง $1 - 10$ ในเทอมที่สองของสมการที่ 2.53 จะอยู่บนพื้นฐานของความเข้มของสนามไฟฟ้าและพื้นที่ผิวของอนุภาค ส่วนในเทอมที่สามของสมการที่ 2.53 จะเป็นเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดประจุ ทั้งการอัดประจุแบบแพร่กระจายและสนามจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ดังนั้น จำนวนประจุของอนุภาคที่ได้ จะเป็นการรวมกันระหว่างจำนวนประจุที่ได้จากการอัดประจุแบบแพร่กระจายและสนาม (Liu and Kapadia 1975)

2.8 การวัดและการตรวจนับสัญญาณ

การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของอนุภาค (particle electrical measurement) ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในเครื่องวิเคราะห์ขนาดละอองลอย (aerosol size spectrometer) และในการตรวจสอบคุณสมบัติของแก๊สไอออนด้วยเทคนิคใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (electrometer circuit) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจนับและวัดค่าความเข้มข้น (concentration) ของไอออนและอนุภาคที่มีประจุที่ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการและในบรรยากาศ Whitby Aerosol Analyser (WAA) และ Electrical Aerosol Analyser (EAA) เป็นเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าเครื่องแรก ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์กรงฟาราเดย์ (Faraday-cage electrometer) ในการวัดกระแสไฟฟ้าจากอนุภาคที่มีประจุด้านล่างของเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค โดยการวัดกระแสไฟฟ้าจากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะถูกแปลงผันไปเป็น

ความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค N_p สำหรับอนุภาคละอองลอยแบบ Monodisperse ดังสมการต่อไปนี

$$N_p = \frac{I_p}{g(n_p, d_p) n_p e Q_a} \quad (2.54)$$

เมื่อ I_p คือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากอิเล็กโตรมิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์ $g(n, d_p)$ คือความเป็นไปได้ (probability) ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p ที่ได้รับประจุ n_p และ Q_a คืออัตราการไหลของละอองลอย สำหรับในกรณีของอนุภาคละอองลอยแบบ Polydisperse สมการความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคในสมการที่ 2.54 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$N_p(d_p) = \sum_{i=1}^M \frac{I_p}{g(n_{pi}(d_{pi}), d_{pi}) n_{pi}(d_{pi}) e Q_a} \Delta d_{pi} \quad (2.55)$$

เมื่อ M คือจำนวนของ bin ขนาดอนุภาค d_{pi} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยใน i ของ bin และ Δd_{pi} คือความกว้างของ bin ขนาดอนุภาค i ดังสมการที่ 2.54 และ 2.55 การใช้อิเล็กโตรมิเตอร์เพื่อวัดความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค มีข้อเสียคือการตอบสนองของตัวตรวจจับ (sensor) จะถูกจำกัดด้วยจำนวนประจุที่อนุภาคได้รับ ดังนั้น ความไวของอิเล็กโตรมิเตอร์ (electrometer sensitivity) จึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นตัวกำหนดช่วงของความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่เครื่องมือสามารถวัดได้ โดยปกติแล้ว อิเล็กโตรมิเตอร์ที่ใช้ในเครื่องมือวัดละอองลอยจะมีความไวอยู่ที่ประมาณ 10^{-15} แอมป์ (A) หรือ fA ซึ่งจะสอดคล้องกับความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ประมาณ 10^2 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับอัตราการไหลปกติที่ใช้ในเครื่องมือวัด

บทที่ 3

การออกแบบต้นแบบเครื่องวิเคราะห์

ในบทที่ 3 นี้จะได้นำเสนอเป้าหมายในการออกแบบและรายละเอียดในการออกแบบอุปกรณ์ประกอบย่อยในแต่ละส่วนของเครื่องวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้า ชุดดักจับไอออน ชุดให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคแบบโคโรนาเข็ม ลูกถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กทรอนิกส์ และชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 เป้าหมายในการออกแบบทั้งหมด

เป้าหมายในการออกแบบทั้งหมด (overall design goals) ของโครงการวิจัยนี้เพื่อศึกษาออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะต้นแบบของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคแบบใช้หลักการการวัดประจุไฟฟ้าสถิต โดยใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ และเพื่อให้ได้เงื่อนไขของแบบเครื่องมือวัดที่เหมาะสมต่อการทำงาน ราคา และการยอมรับของผู้ใช้เชิงพาณิชย์ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ เครื่องวิเคราะห์ที่จะทำการพัฒนาขึ้นดังกล่าวจะต้องสามารถวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค (particle number concentration) ได้ต่ำกว่า 10^{14} อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร และช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 10 ถึง 1,000 นาโนเมตร โดยสามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่สภาวะชั่วขณะ (transient) หรืออนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงทางพลศาสตร์อย่างรวดเร็วได้ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์หรือเตาเผา ซึ่งเป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เวลาการตอบสนองในการวัด (time response) ของเครื่องวิเคราะห์นี้ควรจะน้อยกว่า 1 วินาที และยังสามารถทำการวิเคราะห์และแสดงผลการวิเคราะห์ได้เป็นระยะเวลายาวนานไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง โดยไม่มีข้อบ่งชี้ หรือการถอดล้าง/เปลี่ยนอุปกรณ์ในขณะที่ทำการวัด เพื่อให้ใช้งานในระดับภาคสนามได้ ดังนั้นเครื่องวิเคราะห์นี้ควรมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทนทาน เคลื่อนย้ายได้ง่าย สามารถทำงานในที่ที่มีการสั่นหรือการเคลื่อนที่ได้ และมีราคาต้นทุนในการสร้างถูก ตารางที่ 3.1 แสดงเกณฑ์ในการออกแบบโดยรวมของเครื่องวิเคราะห์ที่จะทำการพัฒนา

จากการทบทวนวรรณกรรมของเครื่องวิเคราะห์ แบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตในบทที่ 1 จะทำให้ได้ระบบใหม่ที่ยง่าย ราคาถูก มีประสิทธิภาพ และมีความน่าเชื่อถือในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโน โดยอาศัยแนวความคิดพื้นฐานในรูปที่ 3.1 โดยขั้นตอนแรกอนุภาคจะถูกคัดแยกขนาดอนุภาคที่เกินช่วงขนาดที่ต้องการวัดออกก่อน จากนั้นอนุภาคจะถูกใส่ประจุให้ โดยวิธีการอัดประจุแบบผสมผสานระหว่างการแพร่และ

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์ในการออกแบบโดยรวมของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

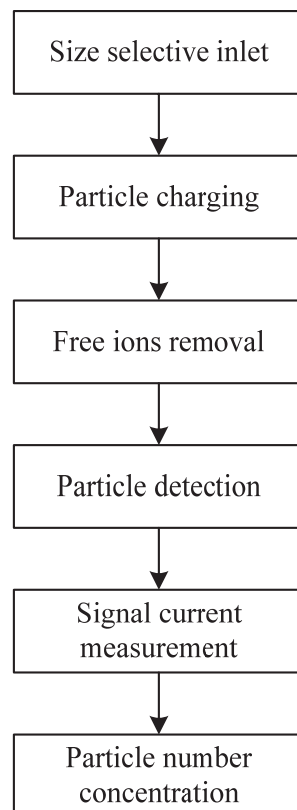
เกณฑ์ในการออกแบบ	คุณสมบัติ
เทคนิคการวิเคราะห์	หลักการทางไฟฟ้าสถิต
ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	10 ถึง 1,000 นาโนเมตร
ความเข้มข้นจำนวนอนุภาค	น้อยกว่า 10^{14} อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร
อัตราการไหลของอนุภาค	1 ถึง 10 ลิตรต่อนาที
เวลาการประมวลผล	น้อยกว่า 1 วินาที
ชนิดและองค์ประกอบของอนุภาค	สามารถวัดอนุภาคได้ทั้งที่เป็นของแข็ง (solid) และของเหลว (liquid)
ความสามารถในการวัดและแสดงผล	สามารถทำการวัดอนุภาคได้เป็นเวลายาวนานกว่า 1 ชั่วโมงโดยไม่มีการถอดล้างหรือถอดเปลี่ยนอุปกรณ์ในขณะทำการวัด
ขนาดของเครื่องมือ	สามารถเคลื่อนที่ง่ายเหมาะสำหรับงานภาคสนาม มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทนทาน สามารถทำงานในที่ที่มีการสั่นหรือการเคลื่อนที่ได้
การซ่อมบำรุง	ชั่วโมงในการทำงานอย่างน้อย 10 ชั่วโมง หลังจากทำความสะอาดแล้ว
ราคา	น้อยกว่า 200,000 บาท

สนามไฟฟ้า จากนั้นไอออนที่มีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูงซึ่งปะปนมากับอนุภาคที่มีประจุ จะถูกดักจับหรือกำจัดออกโดยใช้เทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation method) เพื่อป้องกันมิให้มีผลต่อสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัด จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะถูกดักกรองด้วยตัวกรองอนุภาคแบบประสิทธิภาพสูงภายในลูกถ้วยฟาราเดย์และกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของอนุภาคที่มีประจุซึ่งสะสมตัวอยู่บนตัวกรองอนุภาคจะถูกวัดโดยวงจรวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าระดับต่ำ โดยค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคจะถูกแปลงผันมาจากค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดจากวงจรวัดสัญญาณ โดยรายละเอียดของการออกแบบส่วนประกอบย่อยต่างๆ รวมไปถึงการวิเคราะห์จะได้นำเสนอในหัวข้อดังต่อไปนี้

3.2 ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้า

3.2.1 ความต้องการในการออกแบบ

ในเครื่องวิเคราะห์นี้ ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้า (size selective inlet) จะทำหน้าที่กำจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าช่วงขนาด (size range) ที่ต้องการวัดออก เนื่องจาก

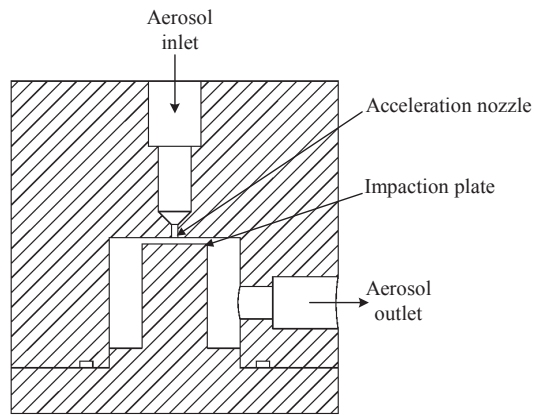


รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต

อนุภาคที่มีขนาดใหญ่เหล่านั้นจะประกอบด้วยประจุที่หลากหลาย (multiple-charged aerosol) โดยอนุภาคที่มีประจุหลากหลายเหล่านี้ จะมีจำนวนประจุเดียวกันกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งจะทำให้อนุภาคที่มีประจุหลากหลายเหล่านี้สามารถถูกวัดและตรวจนับสัญญาณได้พร้อมกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าได้ จึงทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นผลรวมระหว่างอนุภาคที่อยู่ในช่วงการวัดและนอกช่วงการวัด โดยแล้วช่วงขนาดอนุภาคที่ต้องการวัดของเครื่องวิเคราะห์นี้คือ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร ดังนั้นช่วงขนาดอนุภาคที่ต้องการกำจัดในการศึกษานี้คืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร

3.2.2 รายละเอียดในการออกแบบ

ลักษณะโครงสร้างของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้าที่พัฒนาขึ้นแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้าในการศึกษานี้ (Intra, 2008) ชุดคัดแยกนี้จะอาศัยหลักการของความเฉื่อยของการเคลื่อนที่ของอนุภาค โครงสร้างทำจากสแตนเลส (stainless steel) ประกอบด้วย ช่องเร่ง (acceleration nozzle) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร และแผ่นตกกระทบ (impaction plate) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร วางขวางตรงทางออกของช่องเร่ง โดยมีระยะห่างระหว่างช่องเร่งกับแผ่นกระทบเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Intra, 2008)



รูปที่ 3.3 รูปถ่ายของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้น (Intra, 2008)

เมื่ออนุภาคละอองลอยไหลผ่านเข้าช่องเร่ง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีความเฉื่อยสูงจะตกกระทบที่แผ่นกระแทกเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่อ้อมผ่านแผ่นกระแทกไปได้ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กพอจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกระแทกไปได้พร้อมกับกระแสการไหลของของไหล โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ถูกแยกออก เรียกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาค (particle cut-point diameter) ในการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาคมีค่าเท่ากับ 1.28 ไมโครเมตร ที่อัตราการไหลของละอองเท่ากับ 2.0 ลิตร ต่อ นาที รูปที่ 3.3 แสดงรูปถ่ายของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้น

3.2.3 การวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดของอนุภาค

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเร่งสามารถคำนวณได้จากตัวเลขสโตกส์ (Stokes number, Stk) ตัวเลขสโตกส์คือตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ที่อธิบายลักษณะการกระแทก สมการสโตกส์ คือ

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p C_c d_p^2 U}{9\eta D} \quad (3.1)$$

โดยที่ ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค C_c คือตัวชดเชยของคันทิ้งแฮม d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาค U คือความเร็วเฉลี่ยที่ผ่านช่องเร่ง η คือความหนืดของแก๊ส และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเร่ง โดยความเร็วเฉลี่ยที่ผ่านช่องเร่งสามารถคำนวณได้จาก

$$U = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3.2)$$

แทนสมการที่ 3.2 ลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$\text{Stk} = \frac{4\rho_p C_c d_p^2 Q}{9\pi\eta D^3} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 จะสามารถคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาคที่ประสิทธิภาพการสะสมตัว 50 เปอร์เซนต์ (d_{50}) (Hinds, 1999)

$$d_{50}\sqrt{C_c} = \sqrt{\frac{9\pi\eta D^3 \text{Stk}_{50}}{4\rho_p Q}} \quad (3.4)$$

เนื่องจากตัวชดเชยคันทิ้งแฮมเป็นฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สมการที่ 3.4 จึงไม่สามารถที่จะคำนวณโดยวิธีปกติได้ ดังนั้น d_{50} สามารถประมาณจาก $d_{50}\sqrt{C_c}$ โดยใช้สมการที่ได้การทดลอง (empirical equation) คือ (Hinds, 1999)

$$d_{50} = d_{50}\sqrt{C_c} - 0.078 \times 10^{-8} \quad \text{สำหรับ } d_{50} \text{ ในหน่วยเมตร} \quad (3.5)$$

สมการนี้มีความถูกต้องอยู่ที่ 2 เปอร์เซนต์ สำหรับ $d_{50} > 0.2$ ไมโครเมตร และความดันในช่วง 0.9 – 1 บาร์ (Hinds, 1999) ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเร่งหาได้จาก

$$D = \sqrt[3]{\frac{4\rho_p (d_{50}\sqrt{C_c})^2 Q}{9\pi\eta \text{Stk}_{50}}} \quad (3.6)$$

โดยที่ Stk_{50} คือตัวเลขโตกส์ของอนุภาคที่มีประสิทธิภาพการสะสมตัว 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 0.24 สำหรับสัดส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเร่งกับระยะห่างระหว่างช่องเร่งกับแผ่นกระทบเท่ากับ 1.0 (Marple and Willeke, 1976; Hinds, 1999)

3.2.4 ประสิทธิภาพการสะสมตัวของอนุภาค

ประสิทธิภาพการผ่านทะลุของอนุภาค (particle penetration efficiency) P ของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้าสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$P = (1 - E) \times 100 \quad (3.7)$$

โดยที่ E คือประสิทธิภาพการสะสมตัว (particle collection efficiency) ของเครื่องคัดแยกสิ่งปนเปื้อนนี้นี้หาได้จาก

$$E = \left(1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p} \right)^{2s} \right)^{-1} \quad (3.8)$$

โดยที่ s คือตัวแปรที่มีผลกระทบกับความชันของเส้นโค้งประสิทธิภาพการสะสมตัว ในการศึกษาี้สมมติให้มีค่าเท่ากับ 1.0

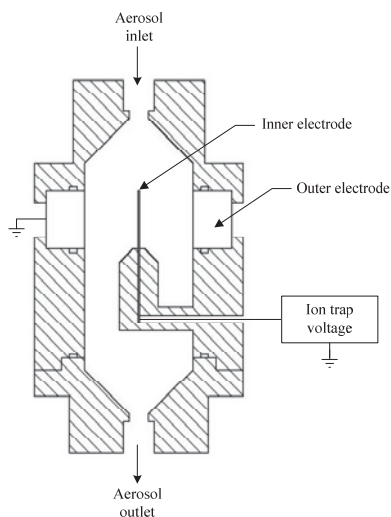
3.3 ชุดดักจับไอออน

3.3.1 ความต้องการในการออกแบบ

การไหลของอนุภาคที่มีประจุควรผ่านเข้าไปยังชุดดักจับไอออน (ion trap) เพื่อดักจับไอออนอิสระ (free ions) ที่มีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูงปนมากับอนุภาคที่มีประจุ ก่อนที่เข้าไปยังฟาราเดย์คัลลับริมิตเตอร์ เนื่องจากไอออนอิสระเหล่านี้จะตกสะสมตัวพร้อมกับอนุภาคที่มีประจุ และจะเจือปนกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่ต้องการวัดได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีชุดดักจับไอออนเพื่อกำจัดไอออนอิสระที่เจือปนมากับอนุภาคที่มีประจุ

3.3.2 รายละเอียดในการออกแบบ

ลักษณะโครงสร้างของชุดดักจับไอออนแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 โดยจะอาศัยหลักการการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation) ชุดดักจับไอออนจะประกอบด้วยเส้นลวดอิเล็กโทรดด้านใน (inner electrode) ที่วางแกนร่วมกับท่ออิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอก (outer electrode) ท่ออิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอกทำมาจากอลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร และยาว 15 มิลลิเมตร ส่วนเส้นลวดอิเล็กโทรดด้านในทำจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้น



รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างของชุดดักจับไอออน (Intra and Tippayawong, 2009)

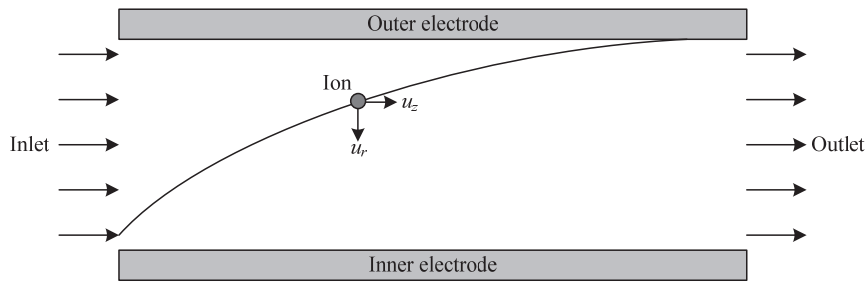


รูปที่ 3.5 รูปถ่ายของชุดดักจับไอออนที่สร้างขึ้น (Intra and Tippayawong, 2009)

ผ่านศูนย์กลาง 300 ไมโครเมตร และยาว 15 มิลลิเมตร โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบ กระแสตรงจ่ายเข้าที่เส้นลวดอิเล็กโทรดด้านใน ในขณะที่ท่ออิเล็กโทรดด้านนอกเป็นกราวด์เพื่อ สร้างสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าปกติอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 โวลต์ รูปที่ 3.5 แสดงรูปถ่ายของชุด ดักจับไอออนที่สร้างขึ้น

3.3.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของไอออนภายในชุดดักจับไอออน

รูปที่ 3.6 แสดงหลักการการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยการเคลื่อนที่ในแนวแกนจะ ได้รับอิทธิพลจากการไหลในแนวแกนของของไหล ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจะได้รับอิทธิพล จากแรงทางไฟฟ้าซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงกระทำอื่นๆ เมื่อไอออนเข้าไปยังสนามไฟฟ้างดรูป



รูปที่ 3.6 หลักการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Intra and Tippayawong, 2009)

ไอออนจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า และจะมีความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า โดยสมมุติให้สนามการไหลและไฟฟ้ามีความสมมาตรกับแกน (axisymmetric) และคงตัว (steady) มีการไหลผ่านในจะต้องราบเรียบ (laminar) มีการพัฒนารูปร่างจากเดิมอย่างเต็มที่ (fully developed) และไม่มีการอัดตัว (incompressible) และไม่ผลของประจุค้างภายใน (space charge effect) และการแพร่กระจายของอนุภาค (Brownian diffusion effect) ดังนั้น การเคลื่อนที่ของไอออนภายในชุดดักจับ จะสามารถอธิบายโดยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equation system) คือ

$$\frac{dr}{dt} = u_r + Z_i E_r \quad (3.9)$$

$$\frac{dz}{dt} = u_z + Z_i E_z \quad (3.10)$$

เมื่อ u_r และ u_z คือความเร็วในแนวรัศมีและแนวแกน E_r และ E_z คือสนามไฟฟ้าในแนวรัศมีและแนวแกน และ Z_i คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (electrical mobility of ions) โดยค่าเฉลี่ยของความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออนบวก (positive) และลบ (negative) ที่ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$ และ $2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$ ตามลำดับ (White, 1963) ถ้าสมมุติให้การสูญเสียของสนามไฟฟ้าที่ขอบมุมของขั้วอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมากๆ และสนามไฟฟ้าภายในท่อทรงกระบอกสม่ำเสมอ (uniform electric field) สนามไฟฟ้าจะหาได้จากความสัมพันธ์

$$E_r = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \quad \text{และ} \quad E_z \approx 0 \quad (3.11)$$

เมื่อ r_1 และ r_2 คือขนาดรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอก และ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านใน ดังนั้นความเร็วในแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบมีค่า

เท่ากับศูนย์ และความเร็วในแนวแกนเท่ากับความเร็วของของไหลในท่อทรงกระบอกชั้นแกนรวมคือ

$$u_r = 0 \quad \text{และ} \quad u_z(r) = Ar^2 + B \ln(r) + C \quad (3.12)$$

โดยที่

$$A = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz}, \quad B = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \right), \quad C = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r_1) - r_1^2 \right), \quad (3.13)$$

และ dp/dz คือค่าคงที่ของ Pressure gradient สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\rho \bar{U}^2 f}{2D_h} \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$D_h = 2r_2 \left(1 - (r_1/r_2) \right), \quad (3.15)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{1 + (r_1/r_2)^2}{(1 - (r_1/r_2))^2} + \frac{1 + (r_1/r_2)}{(1 - (r_1/r_2)) \ln(r_1/r_2)} \right)^{-1}, \quad (3.16)$$

$$\text{Re} = \frac{2r_2 (1 - (r_1/r_2)) \bar{U} \rho}{\mu}, \quad (3.17)$$

D_h คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Hydraulic สำหรับพื้นที่การไหลแบบทรงกระบอกชั้นแกนรวม f คือปัจจัยการเสียดทาน (friction factor) $\bar{U}$ คือความเร็วของการไหลในแนวแกนเฉลี่ย ρ คือความหนาแน่นของแก๊ส และ Re คือตัวเลขเรย์โนลด์ ทำการรวมสมการที่ 3.11 และ 3.12 ลงในสมการ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ จะได้สมการเส้นโคจรของไอออนคือ

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\frac{dr}{dt}}{\frac{dz}{dt}} = \frac{Z_i V}{r u_z(r) \ln(r_2/r_1)} \quad (3.18)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.18 จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ (migration path) ของไอออนคือ

$$\int_{r_{in}}^{r_2} r u_z(r) dr = \int_0^z \frac{VZ_i}{\ln(r_2/r_1)} dz \quad (3.19)$$

เมื่อ r_{in} คือตำแหน่งรัศมีที่ไอออนเข้าไปยังชุดดักจับไอออน ดังนั้น ถ้าไอออนเข้าไปในชุดดักจับไอออนที่ตำแหน่งรัศมี r_{in} จะมีเส้นโคจรไปยังตำแหน่งแนวแกน z คือ

$$z = -\frac{g(r_{in}) \ln(r_2/r_1)}{4VZ_i} \quad (3.20)$$

$$g(r_{in}) = \begin{pmatrix} Ar_2^4 - Ar_{in}^4 + Br_{in}^2 - Br_2^2 + 2Br_2^2 \ln(r_2) \\ -2Br_{in}^2 \ln(r_{in}) + 2Cr_2^2 - 2Cr_{in}^2 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

3.3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับไอออน

ประสิทธิภาพการดักจับหรือการตกตะกอน (removal or trapping efficiency) ของไอออน คือ อัตราการของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นทางด้านทางเข้าและทางออกของชุดดักจับไอออน โดยสมมุติให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทางเข้าชุดดักจับไอออน ดังนั้น ประสิทธิภาพการดักจับไอออน η สามารถประมาณค่าได้จากสมการของ Deutsch-Anderson คือ (Hinds, 1999)

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi r_2 LZ_i E}{Q_i}\right) \quad (3.22)$$

เมื่อ L คือความยาวของท่ออิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกของชุดดักจับไอออน E คือสนามไฟฟ้า และ Q_i คืออัตราการไหลของชุดดักจับไอออน ดังนั้น จำนวนความเข้มข้นของไอออนที่ทางด้านทางออกของชุดดักจับไอออน N_i จะหาได้จาก

$$N_i = N_0 - N_0 \eta \quad (3.23)$$

เมื่อ N_0 คือจำนวนความเข้มข้นของไอออนที่ทางด้านทางเข้า

3.4 ชุดให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคแบบโคโรนาเข็ม

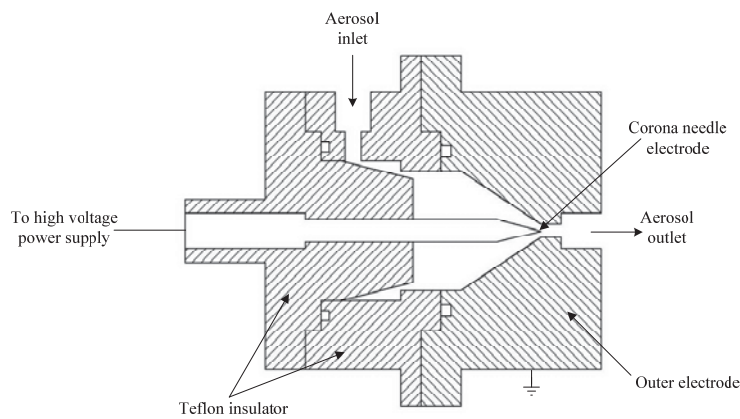
3.4.1 ความต้องการในการออกแบบ

หลักการทำงานพื้นฐานของชุดอัดหรือให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคแบบโคโรนา คือ การไหลของละอองลอยที่เข้ามาชนกับไอออนภายในชุดให้ประจุที่มีสนามไฟฟ้า ระหว่างกระบวนการชน (collision process) ไอออนบางตัวจะกระทบและสะสมบนพื้นผิวของอนุภาค

บนระดับมหภาค (macroscopic scale) จึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคได้รับประจุ เป้าหมายหลักในการออกแบบก็คือชุดให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคจะต้องมีประสิทธิภาพในการให้ประจุที่ค่อนข้างสูง โดยความต้องการพื้นฐานของการออกแบบชุดให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคแบบโคโรนาคือ ชุดอัดประจุควรมีประสิทธิภาพในการให้ประจุสูง (high charging efficiency) ในการให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคละอองลอยที่เข้ามา โดยประสิทธิภาพในการให้ประจุของอนุภาคละอองลอยสูงมีผลทำให้เครื่องวัดมีความไวสูง (high sensitivity) ตามไปด้วย ประสิทธิภาพในการให้ประจุกับอนุภาค จะถูกนิยามเป็นสัดส่วนของจำนวนอนุภาคที่ได้รับประจุทั้งหมดที่ทางออกของชุดให้ประจุ ซึ่งประสิทธิภาพนี้สามารถวัดได้โดยสองปัจจัยที่สำคัญ โดยปัจจัยแรกคือระดับประจุแท้จริง (actual charge level) ที่ถูกสร้างบนแต่ละอนุภาค ขณะที่ปัจจัยที่สองคือเปอร์เซ็นต์สุทธิ (net percentage) ของอนุภาคที่ได้รับประจุ โดยทั้งระดับประจุและเปอร์เซ็นต์สุทธิจะมีผลกระทบโดยตรงกับระดับสัญญาณกระแสไฟฟ้า (signal current) ที่เหนี่ยวนำโดยอนุภาคที่สะสมตัวบนตัวกรองภายในฟาราเดย์คลัมป์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งหมายความว่าถ้าระดับประจุไฟฟ้ามีค่าต่ำและมีเปอร์เซ็นต์สุทธิน้อยจะมีผลทำให้สัญญาณกระแสมีค่าต่ำตามไปด้วย และทำให้มีความยากในการวัดที่ต้องการความถูกต้อง ดังนั้น ในการออกแบบชุดให้ประจุจึงต้องการเทคนิคในการให้ประจุที่สูง ประกอบกับมีความเข้มข้นของไอออนที่สูงและค่อนข้างคงที่ โดยไม่ทำความเสียหายให้กับอนุภาคละอองลอย มีการสูญเสียของอนุภาค (particle losses) ภายในต่ำ ไม่มีการปนเปื้อน (contamination) เหมาะสำหรับอนุภาคระดับนาโน และสามารถทำงานที่ความดันต่ำ (low pressure) และแก๊สที่มีความแตกต่าง (different gases) ได้ เนื่องจากมีการให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (high voltage supply) จ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมที่อยู่ด้านในเพื่อสร้างสนามโคโรนา (corona field) ที่มีความเครียดสูงภายในชุดให้ประจุอนุภาค โดยอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำให้ลดลงได้โดยทำการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใดๆ ออกจากกัน และการใช้วัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้าและการลัดวงจรไฟฟ้า และนอกจากนี้ชุดอัดประจุอนุภาคที่ออกแบบจะต้องมีขนาดเล็กและทนทานเหมาะกับงานระดับภาคสนาม

3.4.2 รายละเอียดในการออกแบบ

ไดอะแกรมลักษณะโครงสร้างของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคในการวิจัยนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 โดยชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคนี้นี้จะมีลักษณะคล้ายกับในงานของ Hernandez-Sierra *et al.* (2003) และ Alonso *et al.* (2005) อย่างไรก็ตาม ชุดให้ประจุนี้มีความแตกต่างจากงานของ Hernandez-Sierra *et al.* (2003) และ Alonso *et al.* (2005) คือทางเข้าของละอองลอยมีลักษณะการไหลแบบเส้นสัมผัสวง (tangential aerosol inlet) เพื่อทำให้อนุภาคละอองลอยมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทางเข้าไป และสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศต่ำได้ ชุดให้ประจุไฟฟ้านี้ประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลม (needle electrode) ที่ทำมาจากแท่งสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และยาว 49 มิลลิเมตร ในการศึกษานี้ได้



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมลักษณะโครงสร้างของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค
(Intra and Tippayawong, 2009)



รูปที่ 3.8 รูปถ่ายของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคที่สร้างขึ้น (Intra and Tippayawong, 2009)

สร้างอิเล็กโทรดเข็มที่มีมุมของปลายแหลม 10 และ 20 องศา ขึ้นเพื่อศึกษาผลของมุมปลายแหลมต่อการดิสชาร์จภายใน ส่วนหัวอิเล็กโทรดด้านนอก (outer electrode) ของชุดให้ประจุนี้จะมีลักษณะเป็นทรงกรวยทำจากสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร และมีมุมของทรงกรวย 30 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับทางออกประมาณ 1.75 มิลลิเมตร โดยที่หัวของหัวอิเล็กโทรดเข็มต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงที่สามารถปรับค่าได้ (adjustable high voltage power supply) ขณะที่ส่วนที่เป็นท่อทรงกรวยด้านนอกต่อกับกราวด์ รูปที่ 3.8 แสดงรูปถ่ายของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคที่สร้างขึ้น

3.4.3 การประมาณค่าผลคูณ Nt ของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค

สนามไฟฟ้า (electric field) ระหว่างหัวอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมและหัวอิเล็กโทรดด้านนอกที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกรวยของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค สามารถอธิบายได้จากสมการพื้นฐานของทฤษฎีแมกซ์เวลล์ (Maxwell's theory) ที่ครอบคลุมสมการปัวซอง (Poisson's equation) ของศักย์ไฟฟ้า V คือ

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.24)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้า ρ คือความหนาแน่นประจุของอวกาศว่าง (space charge density) และ ϵ_0 คือสภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง (vacuum permittivity) (มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m) โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไอออน (ion current density) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$j = \rho Z_i E \quad (3.25)$$

และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไอออน ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าของไอออน (ion current) ที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวด้านใน (inner surface area) ของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคได้ดังนี้

$$\frac{I_{in}}{A} = \rho Z_i E \quad (3.26)$$

เมื่อ I_{in} คือค่ากระแสไฟฟ้าของไอออนภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคและ A คือพื้นที่ผิวด้านในของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค ปกติแล้วสมรรถนะการให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาคของชุดให้ประจุจะขึ้นอยู่กับผลคูณของ (product) ความเข้มข้นของไอออน (ion concentration) n_{in} ภายในชุดให้ประจุและเวลาที่ใช้ในการให้ประจุ (residence time) t ของอนุภาคกับไอออนภายในชุดให้ประจุ ดังนั้นค่า $n_{in}t$ จึงเป็นตัวแปรหลักในกระบวนการให้ประจุและจำเป็นต้องมีการประมาณค่า $n_{in}t$ ที่เกิดขึ้นภายในชุดให้ประจุภายใต้เงื่อนไขต่างๆ (แรงดันไฟฟ้า อัตราการไหลของอนุภาค และความดันทำงาน) ประจุของอวกาศว่างยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเข้มข้นของไอออน n_{in} คือ

$$\rho = n_{in} e \quad (3.27)$$

เมื่อ e คือ ค่าประจุพื้นฐานของอิเล็กตรอน (elementary charge) มีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19} C ทำการแทนสมการที่ 3.27 ลงในสมการที่ 3.26 จะได้ความเข้มข้นจำนวนของไอออนเฉลี่ยในชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคสำหรับกรณีที่ไม่มือนุภาคละอองคือ

$$n_{in} = \frac{I_{in}}{e Z_i E A} \quad (3.28)$$

ซึ่งค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนมีหน่วยเป็น ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร ถ้าสมมติให้ไม่มีผลของประจุของอวกาศว่างภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค ค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคสามารถประมาณค่าได้จากสมการอย่างง่ายคือ

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.29)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดเข็ม และ d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเข็มกับท่อทรงกรวย นำสมการที่ 3.29 แทนลงในสมการที่ 3.28 จะได้

$$n_{in} = \frac{I_{in}d}{eZ_iVA} \quad (3.30)$$

สำหรับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาคของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคนี้สามารถหาได้จาก

$$t = \frac{\pi(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2)L}{3Q} \quad (3.31)$$

เมื่อ r_1 คือรัศมีด้านในของท่อทรงกรวย r_2 คือรัศมีด้านนอกของท่อทรงกรวย L คือความยาวของท่อทรงกรวย และ Q คืออัตราการไหล จากสมการที่ 3.31 เวลาที่ใช้ในการอัดประจุของเครื่องอัดประจุนี้คือ 0.0814 วินาที ที่อัตราการไหลของละอองเท่ากับ 5 ลิตร ต่อ นาที และที่ความดันบรรยากาศ

3.4.4 ความเข้มข้นจำนวนไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้า

ความเข้มข้นจำนวนไอออนที่ทางออกของเครื่องให้ประจุไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากกระแสไฟฟ้าของไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้า คือ

$$n_{out} = \frac{I_{out}}{eQ} \quad (3.32)$$

เมื่อ n_{out} คือความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค และ I_{out} คือกระแสไอออนที่วัดได้ ดังนั้น ค่าการผ่านทะลุของไอออน (ion penetration) ของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค P_i สามารถคำนวณได้จาก

$$P_i = \frac{n_{out}}{n_{in}} \quad (3.33)$$

3.4.5 การประมาณการสูญเสียและค่าการผ่านทะลุของอนุภาค

ในการศึกษานี้การสูญเสียของอนุภาค (particle loss) หลักภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าจะเป็นการสูญเสียเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงที่เกิดขึ้น โดยการโคโรนาดิสชาร์จภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค สำหรับการสูญเสียอื่นๆ เช่น เนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational loss) ประจุค้าง (space charge) และการแพร่กระจาย (diffusion loss) ในการศึกษาถือว่ามีส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียเนื่องจากไฟฟ้าสถิต โดยการสูญเสียเนื่องจากไฟฟ้าสถิตได้ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่ทางออก N_{out} ต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ไม่ได้รับประจุไฟฟ้า (uncharged) ทั้งหมดที่ทางเข้า N_{in} ของชุดให้ประจุไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch-Anderson คือ (Hinds, 1999)

$$loss_{el} = \frac{N_{out}}{N_{in}} = 1 - P_p \quad (3.34)$$

เมื่อ P_p คือค่าการผ่านทะลุของอนุภาค (particle penetration) ของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค สามารถคำนวณได้จาก

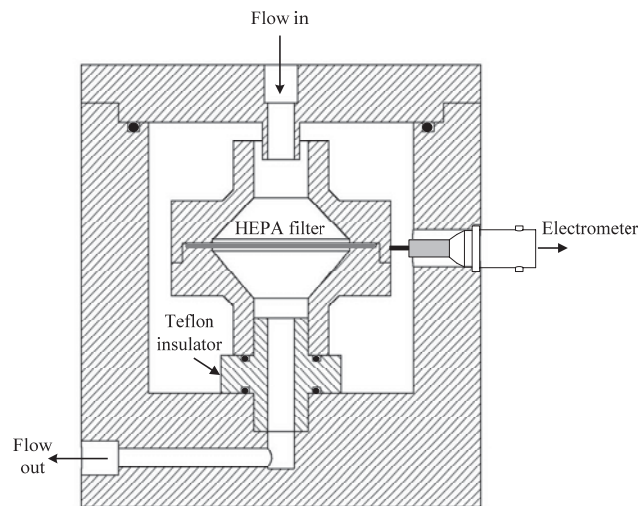
$$P_p = \exp\left(\frac{-Z_p EA}{Q}\right) \quad (3.35)$$

เมื่อ Z_p คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของอนุภาค

3.5 ลูกถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์

3.5.1 ความต้องการในการออกแบบ

ในการตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่ใช้ในการศึกษานี้ จะอาศัยหลักการพื้นฐานการวัดประจุไฟฟ้าสถิตของอนุภาคผ่านลูกถ้วยฟาราเดย์ (Faradya cup) โดยค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.54 การประมาณค่าอย่างง่ายจากสมการที่ 2.54 ที่ระดับสัญญาณกระแสไฟฟ้าในช่วง 10 เฟมโตแอมป์ (fA) ต่อ ความเข้มข้น 10^8 อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร สำหรับในศึกษานี้สนใจความเข้มข้นจำนวนอนุภาคน้อยกว่า 10^{14} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นความไวของอิเล็กโตรมิเตอร์เท่ากับ 500 เฟมโตแอมป์ ก็เพียงพอสำหรับการวัดนี้ นอกจากนี้ความไวในการวัดของอิเล็กโตรมิเตอร์ถูกจำกัดโดยระดับของสัญญาณรบกวนที่ยอมรับได้ (acceptable noise level) สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากอิเล็กโตรมิเตอร์จะต้องกำจัดจากสัญญาณรบกวนพื้นฐาน (background noise) ออก เวลาตอบสนองในการวัดของวงจรอิเล็กโตรมิเตอร์ควรจะเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ คุณสมบัติเป้าหมายน้อยที่สุดสำหรับเวลาในการตอบสนองของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคๆ นี้คือ 1 วินาที



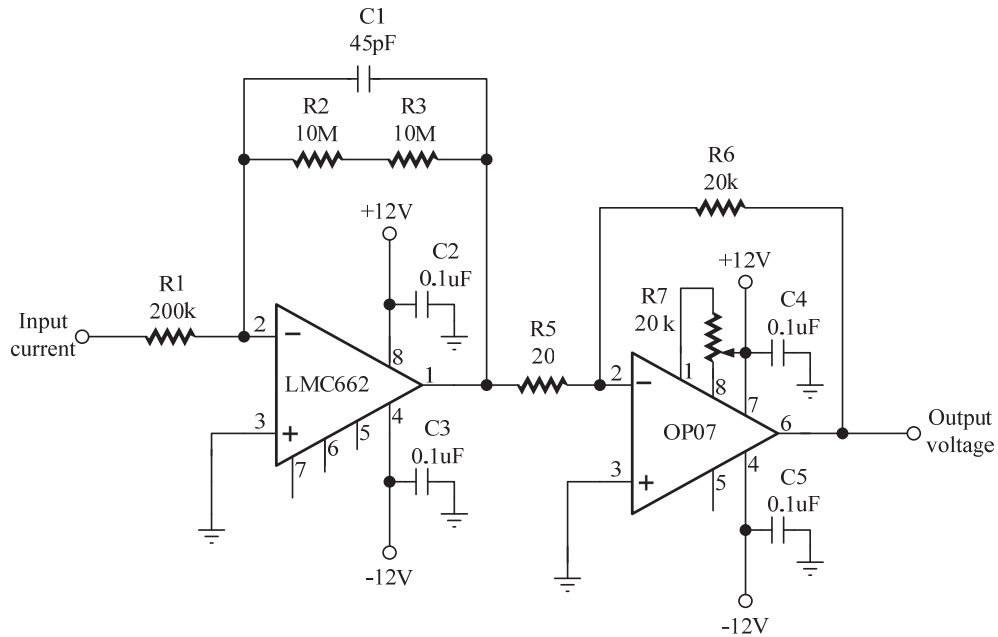
รูปที่ 3.9 ลักษณะโครงสร้างของลูกถ้วยฟาราเดย์



รูปที่ 3.10 รูปถ่ายของลูกถ้วยฟาราเดย์ที่สร้างขึ้น

3.5.2 รายละเอียดในการออกแบบ

รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะโครงสร้างของลูกถ้วยฟาราเดย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค ลูกถ้วยฟาราเดย์ประกอบด้วยแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงแบบ HEPA ที่วางอยู่ภายในตัวจับยึด (filter holder) ขนาด 47 มิลลิเมตรที่ทำจากสแตนเลส และบรรจุอยู่ในลูกถ้วยสแตนเลส ที่ถูกแยกออกจากกันทางไฟฟ้าจากลูกถ้วยด้วยฉนวนไฟฟ้าแบบ Teflon® โดยตัวเชื่อมต่อแบบ BNC จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับตัวจับยึดตัวกรองอนุภาคเพื่อส่งถ่ายประจุอนุภาคหรือไอออนที่สะสมบนตัวกรองไปยังอิเล็กโตรมิเตอร์ โดยรูปที่ 3.10 แสดงรูปถ่ายของลูกถ้วยฟาราเดย์ที่สร้างขึ้น สำหรับไดอะแกรมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขึ้นได้

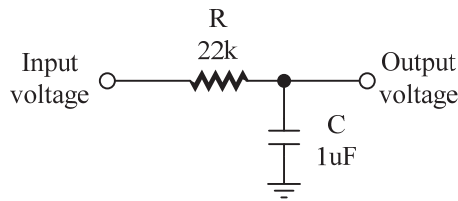


รูปที่ 3.11 ลักษณะโครงสร้างของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์

แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 ซึ่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบประกอบด้วยวงจรแปลงผันกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า (current-to-voltage converter circuit) โดยวงจรนี้ถูกสร้างขึ้นโดยวงจรขยายแบบป้อนกลับชั่วลบ (negative feedback amplifier) แบบสองชั้น สำหรับตัวเก็บประจุป้อนกลับ (feedback capacitor) C_1 ในวงจรจะทำหน้าที่ลดผลของคาปาซิแตนซ์ทางด้านอินพุต (input capacitance) ของวงจรโดยปกติทั่วไปแล้วออปแอมป์ (opamp) ที่ใช้สำหรับวงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงมากๆ หรือที่มีกระแสไบอัสอินพุตระดับต่ำมากๆ (ultra-low bias current input) จะมีราคาสูงมาก (ราคาประมาณ 2,000 ถึง 5,000 บาท) ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงในการสร้าง ในการศึกษานี้ได้เลือกออปแอมป์ที่นำมาใช้ในการสร้างวงจรนี้ซึ่งมีราคาถูกและเหมาะกับการใช้งาน โดยออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรนี้คือเบอร์ LMC662 และ OP07 ที่ถูกออกแบบมาสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำมากๆ โดยมีกระแสไบอัสอินพุตระดับต่ำมากๆ คือ 60 เฟมโตแอมป์ (fA) และสัญญาณรบกวนทางด้านอินพุตเนื่องจากการเหนี่ยวนำต่ำ (> 0.4 ไมโครแอมป์) ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรนี้ V_{out} สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{out} = I_{in} \frac{R_{f1} R_{f2}}{R_{i2}} \quad (3.36)$$

เมื่อ I_{in} คือกระแสไฟฟ้าทางด้านทางเข้า R_{f1} คือความต้านทานป้อนกลับของออปแอมป์ตัวที่ 1 R_{f2} คือความต้านทานป้อนกลับของออปแอมป์ตัวที่ 2 และ R_{i2} คือความต้านทานอินพุตของออปแอมป์ตัวที่ 2 จากสมการที่ 3.36 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรนี้คือ 10 มิลลิโวลต์ (mV) ต่อ 10 พิโคแอมป์ (pA)



รูปที่ 3.12 วงจรกรองความถี่แบบ RC low-pass

ในการศึกษานี้ใช้วงจรกรองความถี่แบบ RC low-pass เพื่อตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงและเพื่อป้องกันการแกว่งของเอาต์พุตของวงจรขยายดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 ซึ่งการตัดสัญญาณความถี่ (cut-off frequency) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Cut-off frequency} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.37)$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทานตัวต้านทาน และ C คือความจุของตัวเก็บประจุ จากวงจรในรูปที่ 3.12 ใช้ตัวต้านทานขนาด 22 กิโลโอห์ม และตัวเก็บประจุขนาด 1 ไมโครฟาร์ัด จะได้การตัดสัญญาณความถี่สูงที่ 7.23 เฮิรตซ์ สำหรับค่าคงตัวของเวลา (time constant) t ของวงจรนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$t = RC \quad (3.38)$$

ดังนั้น จากวงจรในรูปที่ 3.12 ค่าคงตัวของเวลาของวงจรนี้จะมีค่าประมาณ 22 มิลลิวินาที ซึ่งตามที่ได้กำหนดไว้ในความต้องการของการออกแบบวงจรเบื้องต้นคือ 1 วินาที ซึ่งเร็วกว่าที่กำหนดไว้

เนื่องจากระดับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดมีระดับต่ำมากๆ เทคนิคในการสร้างวงจรมาตรฐานยังไม่เพียงพอ ด้วยเหตุที่ว่ายังมีกระแสรั่ว (leakage current) ระหว่างแหล่งจ่ายกำลังของวงจรและด้านอินพุตของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ผ่านวัสดุที่ใช้ทำแผ่นพิมพ์วงจรเอง ซึ่งจะมีค่ามากกว่ากระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่จะทำการวัด และนอกจากนี้คราบน้ำมัน สิ่งสกปรกและการปนเปื้อนจากลายนิ้วมือหรือสารเคมีที่ใช้ในการเคลือบผิวของแผ่นวงจรพิมพ์ จะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าเส้นลายทองแดงของวงจร เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหากระแสรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้น ขาอินพุตของวงจรขยายจะถูกแยกออกจากกันทางไฟฟ้า (electrical isolation) จากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งขาเชื่อมต่อจะถูกวางบนฉนวน Teflon® และการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละขาเหล่านี้กับขาอินพุตของวงจรขยายจะถูกเชื่อมต่อให้ลอยอยู่ในอากาศ หรือเหนือแผ่นวงจรพิมพ์ โดยไม่มีการสัมผัสกับแผ่นวงจรพิมพ์ สำหรับการปนเปื้อนนั้นสามารถป้องกันได้โดยเทคนิคการสร้างด้วยความระมัดระวัง และโดยการทำความสะอาดส่วนประกอบของวงจร



รูปที่ 3.13 รูปถ่ายของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

ด้วยแอลกอธึม หรือ ultrasonic หลังจากการประกอบวงจรเสร็จ (Pease, 1993; Intra and Tippayawong, 2007) รูปที่ 3.13 แสดงรูปถ่ายของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

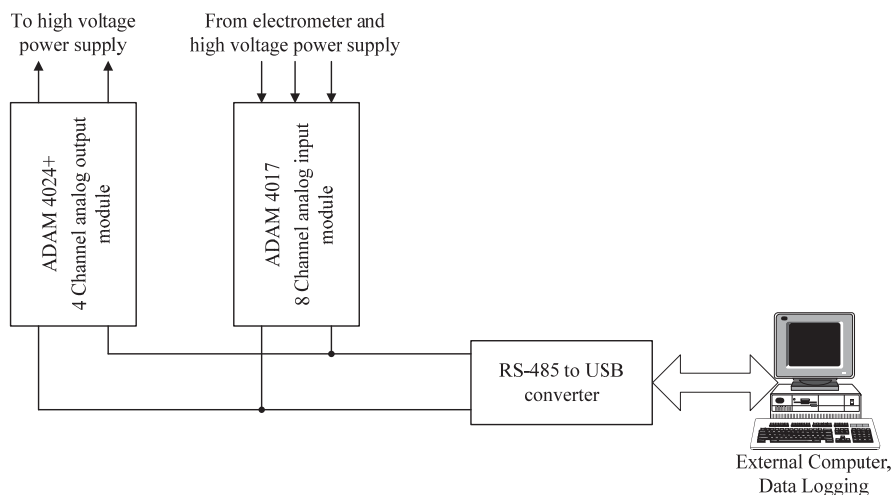
3.6 ชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล

3.6.1 ความต้องการในการออกแบบ

ชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล เป็นชุดโปรแกรมที่ทำหน้าที่วัด ควบคุม บันทึกข้อมูล และประมวลผลข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์แสดงผลค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค ให้อยู่ในรูปแบบของกราฟและตารางข้อมูลที่ใช้สามารถอ่านและเข้าใจได้ง่าย และยังสามารถบันทึกและเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์และสามารถทำการเปิดดูได้ภายหลัง จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาในข้างต้นสัญญาณไฟฟ้าที่รับมาจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ ซึ่งเป็นสัญญาณแบบอนาลอก (analog signal) ดังนั้นระบบจำเป็นต้องใช้ตัวแปลงผันสัญญาณอนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter) เพื่อส่งข้อมูลของสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาลอกที่วัดได้ไปยังโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูลบนคอมพิวเตอร์ โดยอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอนาลอกอินพุต หรือการแยกชัด (resolution) ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 5 มิลลิโวลต์ หรือ 0.5 พิกโอมป์ โดยค่าการแยกชัดของตัวแปลงผันสัญญาณอนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล R สามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{V_{in}}{2^n - 1} \quad (3.39)$$

เมื่อ V_{in} คือแรงดันทางด้าอินพุตเต็มสเกล และ n คือจำนวนบิตของตัวแปลงผันสัญญาณฯ เมื่อแรงดันทางด้าอินพุตเต็มสเกลของวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ และต้องการ

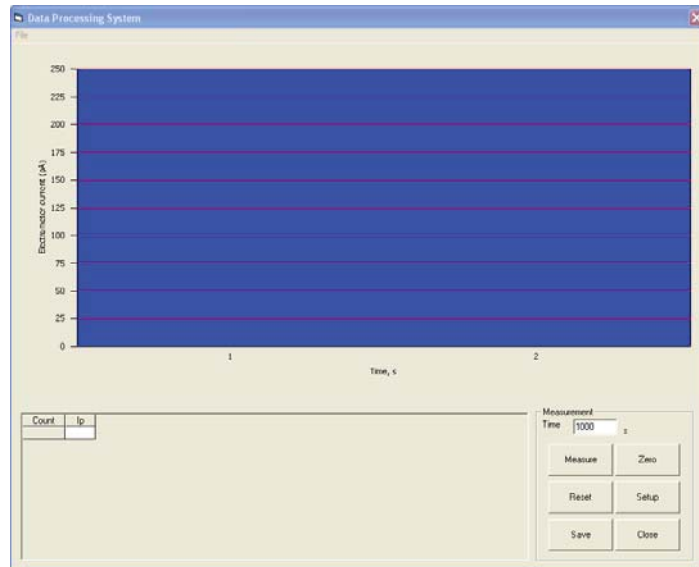


รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมของระบบการวัดและควบคุมของเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

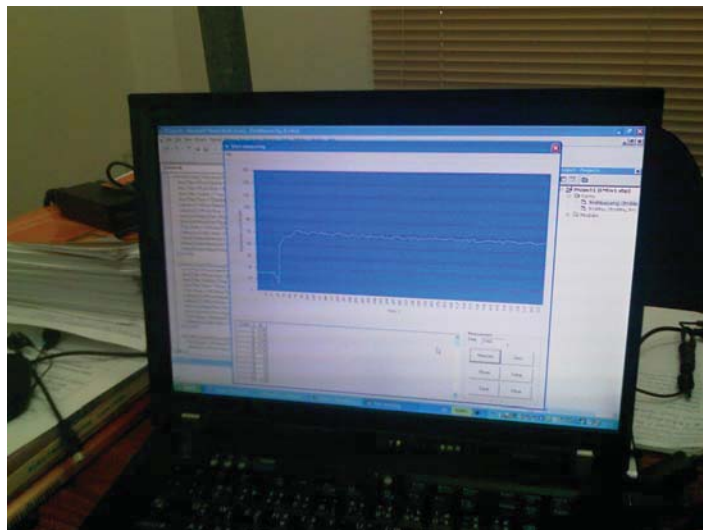
ค่าแยกชุดเท่ากับ 5 มิลลิโวลต์ ดังนั้น จากสมการที่ 3.39 จำนวนบิตของตัวแปลงผันสัญญาณจะต้องมีค่าตั้งแต่ 10 บิตขึ้นไป และต้องมีอัตราการเก็บตัวอย่าง (sampling rate) อยู่ในช่วง 30 ถึง 100 มิลลิวินาที ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าคงตัวของเวลาของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

3.6.2 รายละเอียดในการออกแบบ

รูปที่ 3.14 แสดงไดอะแกรมของระบบการวัดและควบคุมของเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น โดยระบบประกอบด้วยอนาลอกอินพุตโมดูล (analog input module) 8 ช่อง ของ ADAM โมเดล 4017 จำนวน 1 โมดูล สำหรับรับสัญญาณอนาลอกอินพุตจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์และจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจำนวน 3 อินพุต และอนาลอกเอาต์พุต (analog output module) 4 ช่อง ของ ADAM โมเดล 4024+ จำนวน 1 โมดูล สำหรับใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจำนวน 2 เอาต์พุต โดยทั้ง 2 โมดูลจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านตัวแปลงผันจากมาตรฐาน RS-485 ไปเป็นมาตรฐาน RS-232 เข้ากับพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยค่าแรงดันอินพุตอนาลอกจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้ จะถูกเก็บบันทึกไว้ในรูปของแฟ้มข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ผลให้อยู่ในรูปเชิงกราฟิกด้วยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานและฐานข้อมูลดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 แสดงไดอะแกรมกระบวนการทำงานของชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล โปรแกรมจะเริ่มทำงาน โดยการเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดให้ประจุและชุดดักจับไอออนก่อน จากนั้นโปรแกรมจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตซึ่งเป็นแรงดันจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แล้วทำการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ว่ามีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิโวลต์หรือไม่ ถ้ายังมีค่ามากกว่าก็ทำการวัดซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิโวลต์ ซึ่งในกระบวนการนี้ถือว่าเป็นการ Warm up ระบบ หลังจากนั้นเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิโวลต์ แล้วก็เข้าสู่กระบวนการวัดได้ โดยสามารถที่จะทำการปรับศูนย์ (zero offset)



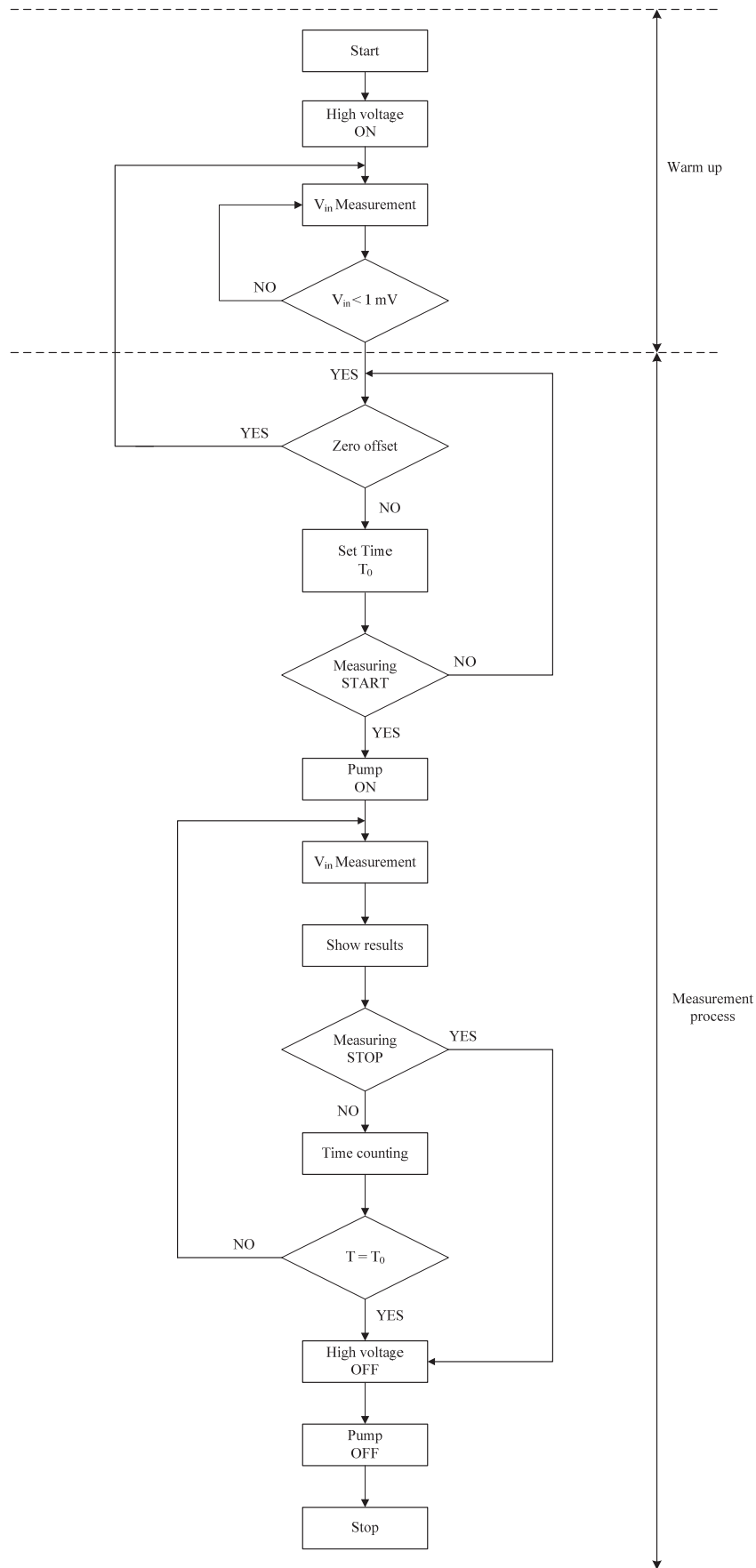
(ก) โปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูลที่พัฒนาขึ้น



(ข) โปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูลขณะทำงาน

รูปที่ 3.15 โปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูลขณะทำการวัด

และทำการตั้งค่าเวลาในการวัด และเมื่อสั่งให้เริ่มการวัดโปรแกรมก็จะส่งสัญญาณควบคุมไปที่ บีมสัญญาณการทำงานเพื่อูดอากาศเข้าไปในเครื่องวิเคราะห์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า อินพุตและแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปเป็นค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้วยสมการที่ 3.36 และ ค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคด้วยสมการที่ 2.54 พร้อมกับนำไปแสดงผลบนกราฟและ บันทึกลงตารางข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาทุกๆ 1 วินาที โปรแกรมก็จะทำการนับเวลา ระหว่างการไปจนกว่าจะครบเวลาการวัดที่กำหนด ก็สั่งให้หยุดการวัดโดยส่งสัญญาณควบคุม ให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและบีมสัญญาณกาให้หยุดทำงาน



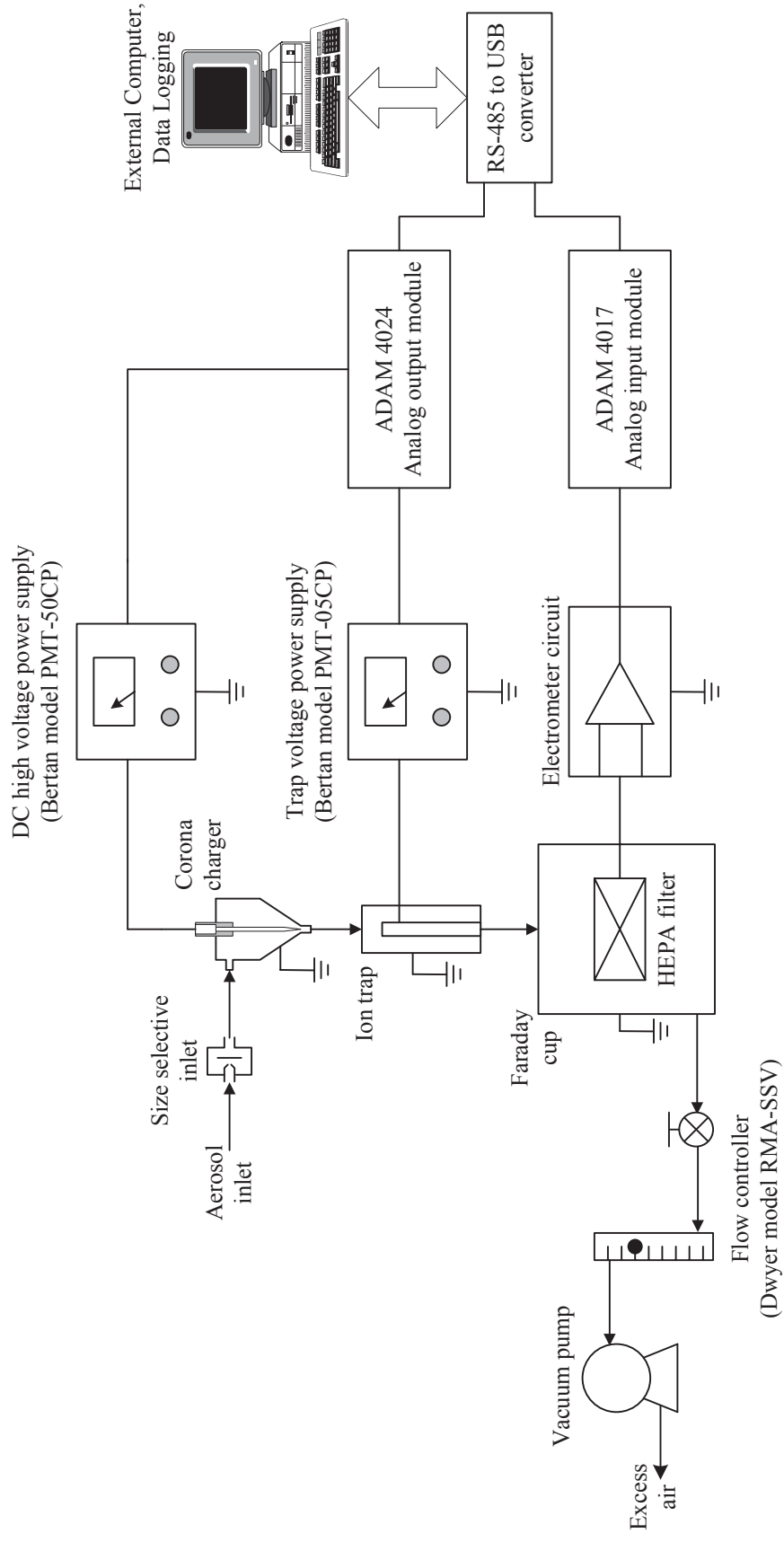
รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมกระบวนการทำงานของชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล

บทที่ 4

ต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโน แบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต

4.1 รายละเอียดและหลักการทำงาน

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะโครงสร้างและการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตนี้ ซึ่งประกอบด้วย ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ชุดอัดประจุละอองลอยแบบโคโรนา ชุดดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์ ชุดตรวจวัดกระแสระดับต่ำ ชุดโปรแกรมบันทึกและประมวลผลข้อมูล และระบบควบคุมการไหลของของไหล โดยระบบการไหลของเครื่องวิเคราะห์ฯ จะถูกจ่ายและควบคุมโดยตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล (Dwyer model RMA-SSV) กับเครื่องดูดสุญญากาศ (Busch โมเดล SV 1003) อยู่ในช่วง 0 ถึง 10 ลิตรต่อนาที การทำงานของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบนี้ เริ่มต้นโดยการดูดตัวอย่างละอองลอยที่ต้องการวัดผ่านท่อเก็บตัวอย่าง และผ่านเข้าไปยังชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เพื่อคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าช่วงขนาดที่ต้องการวัดออกด้วยหลักการทางอากาศพลศาสตร์ และจากนั้นอนุภาคจะถูกใส่ประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการแพร่กระจายและสนามภายในชุดให้ประจุแบบโคโรนาเข็มปลายแหลมที่จ่ายไฟฟ้าแรงสูงขนาด 3.5 กิโลโวลต์ ด้วยโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของ Bertan โมเดล PMT-50CP และถูกควบคุมแรงดันเอาต์พุตโดยโมดูลอนาล็อกเอาต์พุตของ ADAM โมเดล 4024 จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังชุดดักจับไอออนเพื่อกำจัดไอออนอิสระที่มีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูงเกือบเท่ากับอนุภาคที่มีประจุออกก่อน เพื่อป้องกันการเจือปนสัญญาณทางไฟฟ้าของอนุภาคขณะทำการวัด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าของชุดดักจับไอออนจะถูกจ่ายโดยโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของ Bertan โมเดล PMT-05CP ที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตโดยโมดูลอนาล็อกเอาต์พุตของ ADAM โมเดล 4024 เมื่ออนุภาคที่มีประจุออกจากชุดดักจับไอออนแล้วก็จะผ่านเข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ อนุภาคที่มีประจุทั้งหมดจะตกสะสมตัวบนแผ่นดักกรองประสิทธิภาพสูงแบบ HEPA ของ Whatman โมเดล EPM 2000 บรรจุอยู่ในตัวจับยึดแผ่นกรองในลูกถ้วยฟาราเดย์ และเชื่อมต่อเข้ากับชุดวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำหรือวงจรวัดกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่ตกสะสมตัวบนแผ่นกรอง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จะสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่ผ่านเข้าไปยังฟาราเดย์กลับ โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแปลงผันไปเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ เพื่อส่งไปยังตัวแปลงผันสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ในการศึกษานี้จะใช้โมดูลอนาล็อกอินพุตของ ADAM โมเดล 4017 เพื่อนำสัญญาณดิจิทัลที่ได้ไปประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น การแสดงผลข้อมูลของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จะออกมาในรูปแบบของกราฟและตารางข้อมูลที่แสดงถึงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม



รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตนี้

เวลา สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลอนาลอกอินพุตและเอาต์พุตและคอมพิวเตอร์จะใช้เวลาติดต่อโดยมาตรฐาน RS-485 ผ่านตัวแปลงผัน RS-485 ไปเป็น USB เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง (sampling time) ประมาณ 100 มิลลิวินาที ถึง 1 วินาที

4.2 ส่วนประกอบของระบบต้นแบบ

ในการสร้างและประกอบระบบต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้ใช้อุปกรณ์เชิงพาณิชย์ต่างๆ ในการประกอบเป็นระบบต้นแบบที่สมบูรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ประกอบเพิ่มเติมที่ใช้ในระบบต้นแบบประกอบด้วย โมดูลอนาลอกอินพุตและเอาต์พุต (analog input and output modules) โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage supply module) โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ดีซี (12 VDC power supply) ตัวแปลงผัน RS-485 ไปเป็น USB (RS-485 to USB converter) ตัวควบคุมอัตราการไหล (flow controller) และเครื่องดูดสุญญากาศ (vacuum pump) และแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้จะได้อธิบายในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.2.1 โมดูลอนาลอกอินพุตและเอาต์พุต

โมดูลอนาลอกอินพุต (analog input module) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับสัญญาณอนาลอกเอาต์พุตจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์และจากอนาลอกเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อการแสดงสถานะการทำงานและระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีแรงดันอนาลอกอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ โดยในการศึกษานี้จะใช้โมดูลอนาลอกอินพุต 8 ช่องของบริษัท Advantech โมเดล ADAM-4017 จำนวน 4 โมดูล มีค่าการแยกชัด (resolution) 16 บิต (bit) ความถูกต้องประมาณ ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ อัตราการสุ่มตัวอย่าง (sampling rate) 10 ตัวอย่าง ต่อ วินาที ค่า zero drift ประมาณ ± 6 ไมโครโวลต์ ต่อ องศาเซลเซียส และในการศึกษานี้ได้ใช้โมดูลอนาลอกเอาต์พุต (analog output module) จำนวน 4 ช่อง บริษัท Advantech โมเดล ADAM-4024 จำนวน 1 โมดูล ในการส่งสัญญาณอนาลอกเอาต์พุตสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับชุดให้ประจุไฟฟ้า และชุดดักจับไอออน ซึ่งโมเดล ADAM-4024 มีค่าการแยกชัด (resolution) 12 บิต (bit) แรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 10 โวลต์ ความถูกต้องประมาณ ± 0.2 เปอร์เซ็นต์ ค่า zero drift ประมาณ ± 30 ไมโครโวลต์ ต่อ องศาเซลเซียส และมีการติดต่อสื่อสารด้วยคำสั่ง ASCII ผ่านมาตรฐานการติดต่อสื่อสารแบบ RS-485 รูปที่ 4.2 แสดงรูปภาพของโมดูลอนาลอกอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการศึกษานี้

4.2.2 โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบปรับค่าได้ ได้ถูกนำมาใช้ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคและแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดดักจับไอออน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงของบริษัท Spellman รุ่น Bertan โมเดล PMT-50CP จำนวน 1 โมดูล สำหรับชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคซึ่งสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ในช่วง 0 ถึง 5 กิโล-



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายของโมดูลอนาลอกอินพุตและเอาต์พุตของ Advantech

โวลต์ และรุ่น Bertan โมเดล PMT-05CP จำนวน 1 โมดูล สำหรับชุดดักจับไอออนซึ่งสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ในช่วง 0 ถึง 500 โวลต์ โดยทั้งสองโมดูลมีกระแสไหลสูงสุดที่ 1 มิลลิแอมป์ และมีค่าความพลีของแรงดัน (ripple voltage) ประมาณ 200 มิลลิโวลต์ (Vp-p) โดยสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยสัญญาณอนาลอกอินพุต 0 ถึง 5 โวลต์ รูปที่ 4.3 แสดงรูปถ่ายของโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงโมเดล PMT-50CP สำหรับการเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกับชุดให้ประจุไฟฟ้าและชุดดักจับไอออน จะใช้สายไฟฟ้าแรงสูงในการเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นสายไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 15 กิโลโวลต์ ที่กระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 แอมป์

4.2.3 โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ดีซี

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ดีซี เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบต้นแบบ ในการศึกษาที่ใช้โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ดีซี ของบริษัท ACRO Engineering Inc. โมเดล AD1048-12FS (รูปที่ 4.4) มีกำลังไฟฟ้า 48 วัตต์ กระแสสูงสุด 3 แอมป์ และมีค่าความพลีของแรงดัน 100 มิลลิโวลต์ (Vp-p)



รูปที่ 4.3 รูปถ่ายของโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงโมเดล PMT-50CP



รูปที่ 4.4 รูปถ่ายของโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ดีซี

4.2.4 ตัวแปลงผืน RS-485 ไปเป็น USB

ตัวแปลงผืน RS-485 ไปเป็น USB เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงผืนมาตรฐานการติดต่อสื่อสารแบบ RS-485 ไปเป็นมาตรฐานการสื่อสาร USB จากโมดูลอนาล็อกอินพุต ADAM-4017 และโมดูลอนาล็อกเอาต์พุต ADAM-4024 เพื่อนำข้อมูลไปบันทึกและประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการศึกษาที่ใช้ตัวแปลงผืน RS-485 ไปเป็น USB ของบริษัท Inex Innovative Experiment โมเดล UCON-UART

4.2.5 ตัวควบคุมอัตราการไหลและเครื่องดูดสุญญากาศ

ระบบการไหลของละอองลอยและอากาศสะอาดภายในเครื่องวิเคราะห์นี้ จะถูกวัดและควบคุมด้วยตัวควบคุมการไหลแบบโรตารีเมตร (rota-meter) ทำงานร่วมกับเครื่องดูดสุญญากาศ ในการศึกษาที่ใช้ตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของบริษัท Dwyer โมเดล RMA-SSV สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ในช่วง 0 ถึง 50 ลิตร ต่อ นาที มีค่าความถูกต้องประมาณ ± 2 เปอร์เซ็นต์ ที่เต็มสเกล รูปที่ 4.5 แสดงรูปถ่ายของตัวควบคุมอัตราการไหลของ Dwyer เครื่องดูดสุญญากาศที่ใช้ในการศึกษาจะใช้แบบโรตารีของ Busch โมเดล SV 1003 มีอัตราการดูดเชิงปริมาตร (displacement volume rate) เท่ากับ 3 ลูกบาศก์เมตร ต่อ ชั่วโมง ที่มีความดัน 0.15 บาร์ โดยรูปถ่ายของเครื่องดูดสุญญากาศแบบโรตารีแสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 สำหรับท่อที่ใช้ในการเชื่อมต่อในระบบการไหลจะใช้ท่อแบบ polyethylene ขนาด 5×8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5 รูปถ่ายของตัวควบคุมอัตราการไหลของ Dwyer



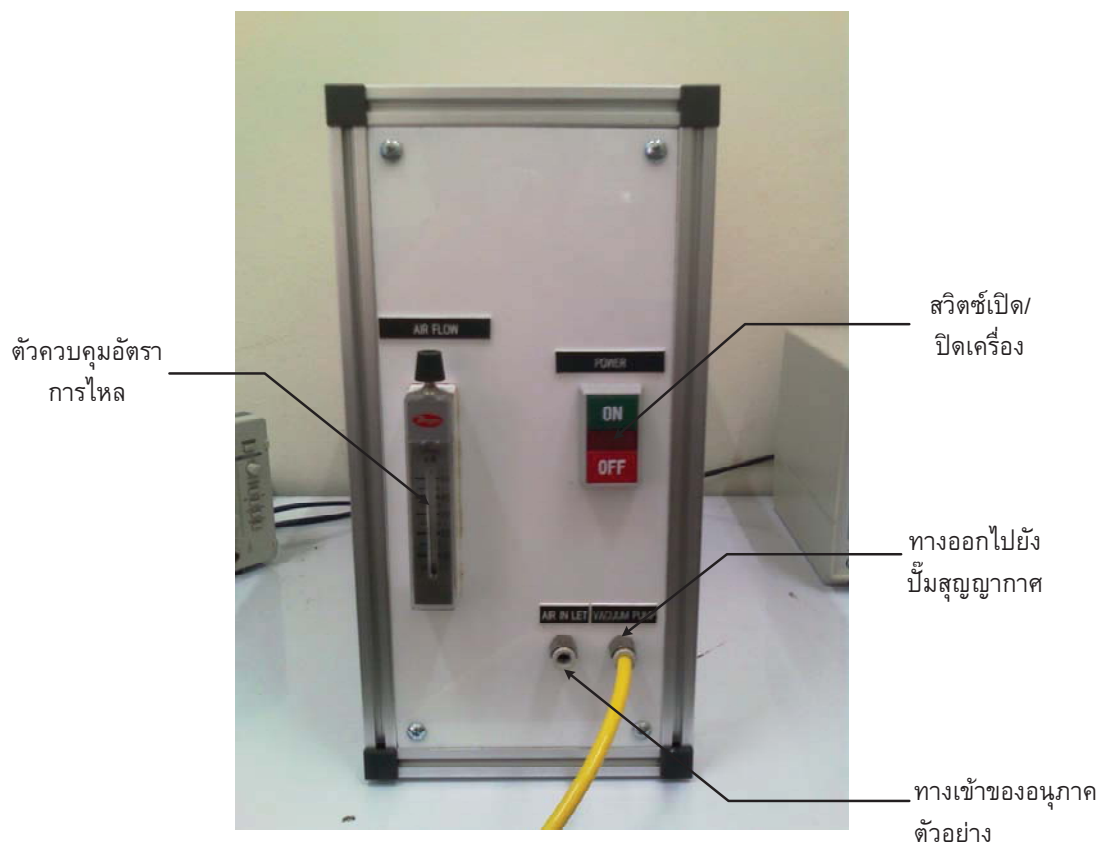
รูปที่ 4.6 รูปถ่ายของเครื่องดูดสูญญากาศแบบโรตารีของ Busch



รูป 4.7 รูปถ่ายของแผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงแบบ HEPA

4.2.6 แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง

แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (high efficiency particulate-free air filter) หรือที่เรียกว่า HEPA เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างอนุภาค สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจำนวนอนุภาคเชิงมวล โดยในการศึกษานี้ใช้แผ่นกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงแบบใยแก้ว (glass fiber) ของบริษัท Whatman โมเดล EPM 2000 (รูปที่ 4.7) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร หนา 330 ไมโครเมตร มีอัตราการในการกักเก็บอนุภาค (particle retention rating) ที่ 98 เปอร์เซ็นต์ และสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส

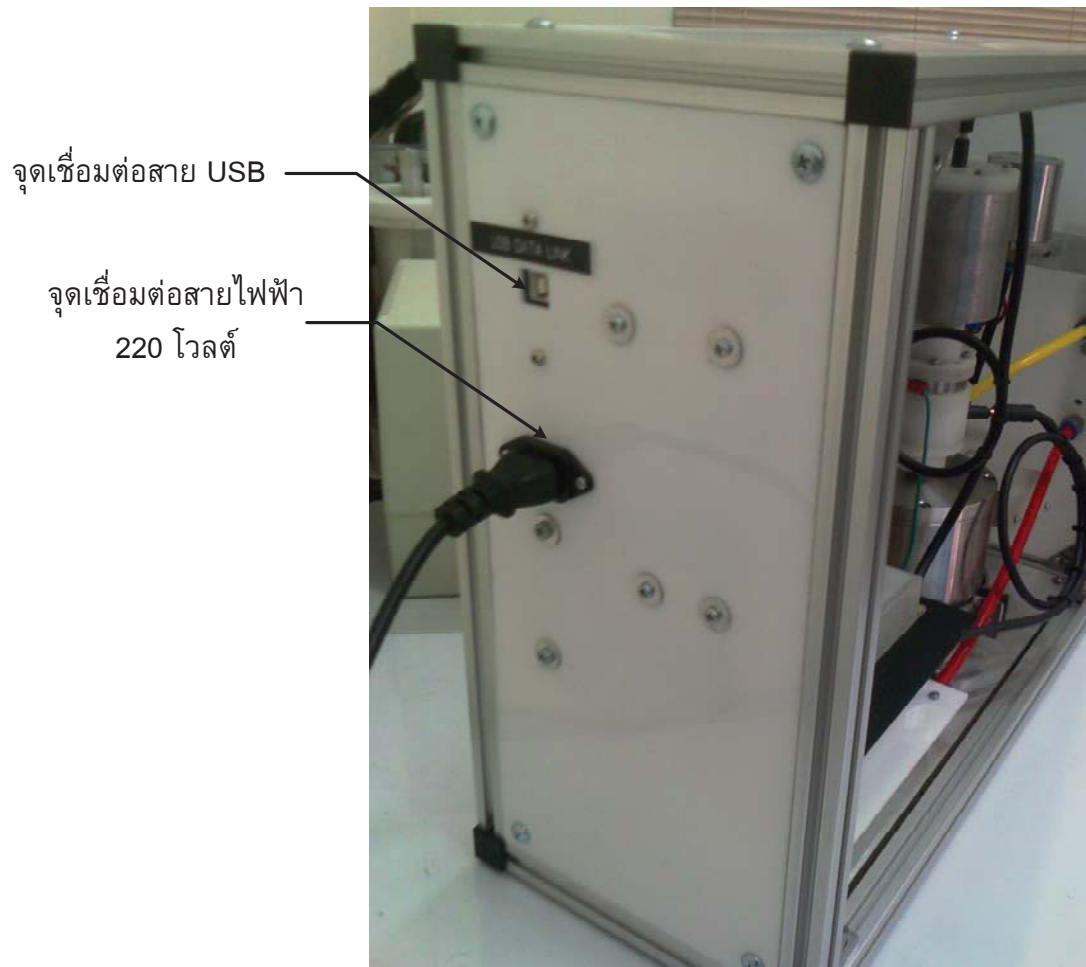


รูปที่ 4.8 รูปถ่ายต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต

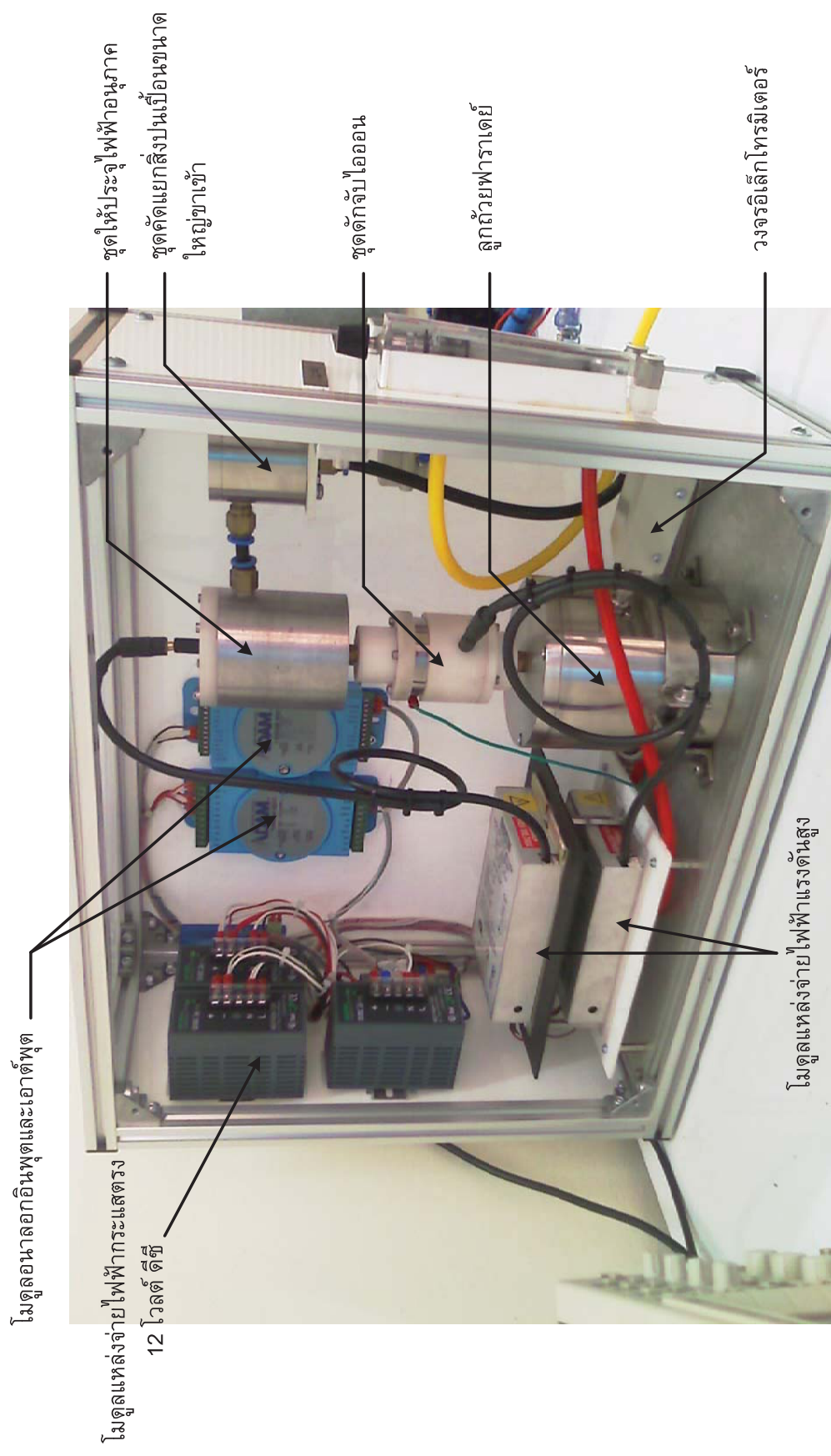
4.3 ต้นแบบที่ประกอบรวมกัน

รูปที่ 4.8 แสดงรูปถ่ายต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตที่ประกอบอุปกรณ์ต่างๆ รวมกันเสร็จสมบูรณ์ โครงสร้างของต้นแบบทำจากโครงสร้างอลูมิเนียม (aluminum profile) ขนาด 20×20 มิลลิเมตร โดยโครงสร้างของต้นแบบมีขนาดมิติเท่ากับ $160 \times 480 \times 360$ มิลลิเมตร ด้านหน้าของเครื่องวิเคราะห์แสดงการติดตั้งตัวควบคุมอัตราการไหล สวิตช์เปิด/ปิด ทางเข้าของอนุภาค และทางออกอนุภาค รูปที่ 4.9 แสดงด้านหลังของเครื่องวิเคราะห์ที่แสดงถึงตำแหน่งของพอร์ต USB และจุดเชื่อมต่อไฟฟ้า 220 โวลต์ รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และการเชื่อมต่อสายสัญญาณและสายไฟฟ้ามุ่งต่างๆ และท่อในระบบการไหลที่ด้านข้างของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบ โดยชุดคัตแยกส่งป้อนขนาดใหญ่เข้า ชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค ชุดดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไมโครเมตรจะติดตั้งและจับยึดให้อยู่ตรงกลางของโครงสร้างหลัก และเชื่อมต่อลงกราวด์ที่โครงสร้างอลูมิเนียมเพื่อป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูง โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ สำหรับโมดูลอนุภาคต่างๆและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไมโครเมตรจะติดตั้งที่ตำแหน่งบนของผนังด้านหลัง ซึ่งเป็นจุดที่มีความง่ายในการเชื่อมต่อสายไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ส่วนตำแหน่งการติดตั้งของโมดูลอนุภาคอินพุตและ

เอาต์พุตจะติดตั้งที่ผนังด้านข้างของโครงสร้าง โดยโมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจะถูกติดตั้งไว้ด้านล่างของโครงสร้าง เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากสนามไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และเชื่อมต่อด้วยสายไฟฟ้าแรงสูงไปยังชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคและชุดดักจับไอออน ติดตั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับลูกถ้วยฟาราเดย์ด้วยหัวต่อแบบ BNC เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวน และการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างลูกถ้วยฟาราเดย์กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และการเชื่อมต่อสัญญาณเอาต์พุตจากอิเล็กทรอนิกส์ไปยังโมดูลลอกลอกอินพุต จะใช้สายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ



รูปที่ 4.9 รูปถ่ายด้านหลังของเครื่องวิเคราะห์ที่แสดงถึงตำแหน่งของพอร์ต USB และจุดเชื่อมต่อไฟฟ้า 220 โวลต์



รูปที่ 4.10 รูปถ่ายลักษณะการจัดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และการเชื่อมต่อสายสัญญาณและสายไฟฟ้ากำลังต่างๆ และท่อในระบบการไหล

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลอง และกระบวนการที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ โดยในหัวข้อแรกจะอธิบายถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ระบบการจ่ายและวัดไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage measurement and supply system) อิเล็กโทรมิเตอร์มาตรฐาน (standard electrometer) ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (digital oscilloscope) มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (digital multimeter) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (electrical mobility spectrometer) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ในส่วนของกระบวนการสร้างอนุภาคตัวอย่างสำหรับการทดลอง รวมไปถึงการทดสอบสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ประกอบย่อยต่างๆ อันได้แก่ ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่เข้า ชุดดักจับไอออน ชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะได้อธิบายในหัวข้อสุดท้ายของบทนี้

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

5.1.1 ตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง

ตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (high efficiency particulate-free air filter) หรือที่เรียกว่าตัวกรองอนุภาคแบบ HEPA เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กออกจากกระแสการไหลของแก๊ส ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ Pall HEPA Capsule โมเดล 12144 ใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กสำหรับการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ประกอบย่อยต่างๆ ซึ่งตัวกรองอนุภาคนี้มีประสิทธิภาพการกรองประมาณ 99.97 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.3 ไมครอน สำหรับอากาศหรือแก๊ส รูปที่ 5.1 แสดงรูปถ่ายของตัวกรองอนุภาคแบบ HEPA

5.1.2 ระบบการจ่ายและวัดไฟฟ้าแรงดันสูง

ระบบการจ่ายและวัดไฟฟ้าแรงดันสูงจะใช้ในการทดลองต่างๆ ซึ่งจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบปรับค่าได้ (adjustable DC high voltage power supply) สายไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage cable) และหัววัดไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage probe) ในการทดลองนี้จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบบปรับค่าได้ของบริษัท Leybold Didactic โมเดล 521721 สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้อยู่ในช่วง 0 ถึง 25 กิโลโวลต์ ที่กระแสไหลสูงสุด 0.5 มิลลิแอมป์ และมีค่าความพลีวของแรงดันประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด รูปที่ 5.2 แสดง Leybold Didactic โมเดล 521721 ส่วนหัววัดไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นอุปกรณ์เสริมที่ใช้ต่อเข้ากับมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัลสำหรับวัดไฟฟ้าแรงดันสูง ในการศึกษาครั้งนี้ใช้หัววัดของ



รูปที่ 5.1 รูปถ่ายของตัวกรองอนุภาคแบบ HEPA ที่ใช้ในการศึกษานี้

Fluke โมเดล 80K-40 สามารถวัดไฟฟ้าแรงดันสูงได้ในช่วง 1 ถึง 40 กิโลโวลต์ มีค่าความถูกต้อง 1 เปอร์เซ็นต์ และ มีค่าความต้านทานทางด้านอินพุตเท่ากับ 1000 เมกกะโอห์ม รูปที่ 5.3 แสดง Fluke โมเดล 80K-40

5.1.3 อิเล็กทรอนิกส์มาตรฐาน

อิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าระดับต่ำ (low level) ของอนุภาคที่มีประจุและไอออนจากถูกด้วยฟาราเดย์หรือชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค ในการศึกษานี้ใช้อิเล็กทรอนิกส์ของบริษัท Keithley โมเดล 6517A ทำงานร่วมกับโมเดล 6522 โดยโมเดล 6517A เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระแสไบอัสอินพุต (input bias current) น้อยกว่า 3 เฟมโตแอมป์ และมีสัญญาณรบกวน 0.75 เฟมโตแอมป์ และสามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้อยู่ในช่วง 1 เฟมโตแอมป์ ถึง 20 มิลลิแอมป์ รูปที่ 5.4 แสดงรูปถ่ายของอิเล็กทรอนิกส์ Keithley โมเดล 6517A ส่วนโมเดล 6522 เป็นวงจรเรียงระดับสัญญาณจำนวน 10 ช่องวัด สำหรับการวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบหลายช่องวัดของอิเล็กทรอนิกส์โมเดล 6517A สำหรับโมเดล 6522 มีกระแสออฟเซต (offset current) แต่ละช่องวัดน้อยกว่า 1 พิโคแอมป์ และมีการแยกกันทางไฟฟ้า (electrical isolation) ในแต่ละช่องวัดสูง (มากกว่า 10^{15} โอห์ม) รูปที่ 5.5 แสดงรูปถ่ายของ Keithley โมเดล 6522 ในการศึกษานี้ได้ใช้สายสัญญาณเชื่อมต่อแบบแกนร่วมที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low-noise coaxial connection cable) เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนและการรบกวนของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสายสัญญาณนี้มีความต้านทานของฉนวนระหว่างแกนตัวนำถึงฉนวนประมาณ 10^{15} โอห์ม และมีความต้านทานของตัวนำน้อยกว่า 0.5 โอห์ม และสายสัญญาณรบกวนต่ำแบบ Triax โมเดล 237-AGL-2 ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค สำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าของการอัดประจุและไอออน รูปที่ 5.6 แสดงรูปถ่ายของสายสัญญาณของ Keithley โมเดล 237-ALG-2



รูปที่ 5.2 รูปถ่ายของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงของ Leybold Didactic โมเดล 521721



รูปที่ 5.3 หัววัดไฟฟ้าแรงดันสูงของ Fluke โมเดล 80K-40

5.1.4 ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล

รูปที่ 5.7 แสดงออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (digital oscilloscope) ของ Tektronix โมเดล TDS 210 ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ออสซิลโลสโคปในการวิเคราะห์ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าต่างๆ สำหรับการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และสัญญาณรบกวนต่างๆ โดยโมเดล TDS 210 มีช่องสัญญาณอนาล็อกจำนวน 4 ช่องวัด มีช่องความถี่ (bandwidth) 200 เมกะเฮิรตซ์ อินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) 1 เมกะโอห์ม และสามารถบันทึกข้อมูลผ่านพอร์ต USB ได้



รูปที่ 5.4 รูปถ่ายของอิเล็กโทรมิเตอร์ของ Keithley โมเดล 6517A



รูปที่ 5.5 รูปถ่ายของ Keithley โมเดล 6522

5.1.5 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล

มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล (digital multi-meter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าต่างๆในการทดลอง ในการศึกษานี้จะใช้ของ Digicon โมเดล DM-815 มีความถูกต้อง ± 2.5 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 5.8 แสดงมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลที่ใช้ในการทดสอบนี้



รูปที่ 5.6 รูปถ่ายของสายสัญญาณของ Keithley โมเดล 237-ALG-2



รูปที่ 5.7 รูปถ่ายของออสซิลโลสโคปของ RIGOL โมเดล DS1000

5.1.6 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

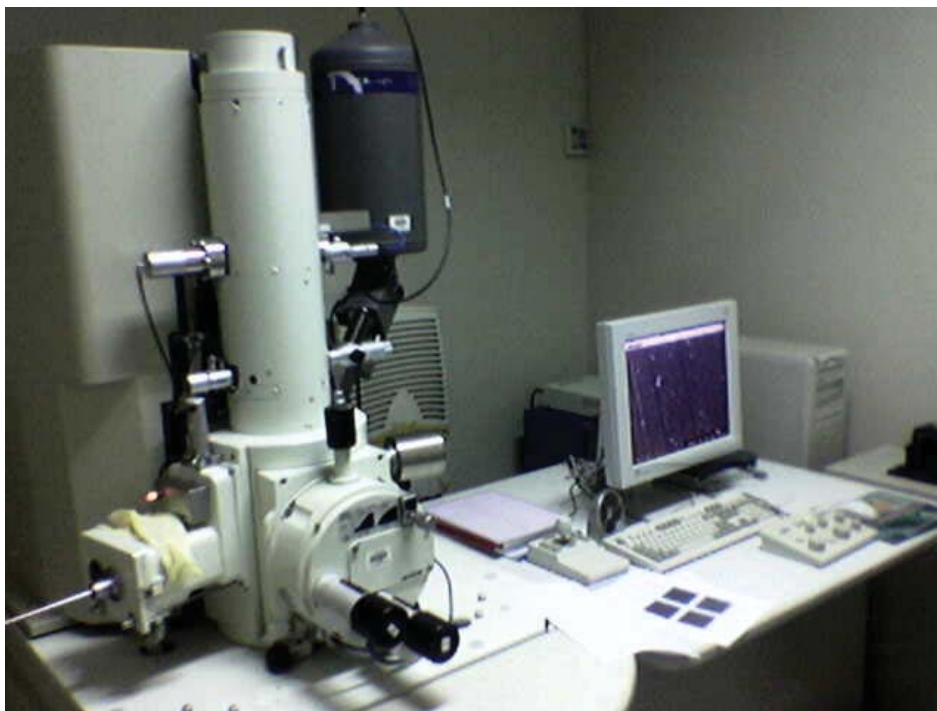
เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (electrical mobility spectrometer) หรือ EMS เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การแจกแจงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค EMS สามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคได้ในช่วง 10 ถึง 1,000 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นเชิงจำนวนน้อยกว่า 10^{14} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า 1 วินาที มีความถูกต้องในการวิเคราะห์ ± 5 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 5.9 แสดงรูปถ่ายของ EMS (Intra and Tippayawong, 2009)



รูปที่ 5.8 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลที่ใช้ในการทดสอบนี้



รูปที่ 5.9 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Intra and Tippayawong, 2009)



รูปที่ 5.10 รูปถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL JSM-6335F

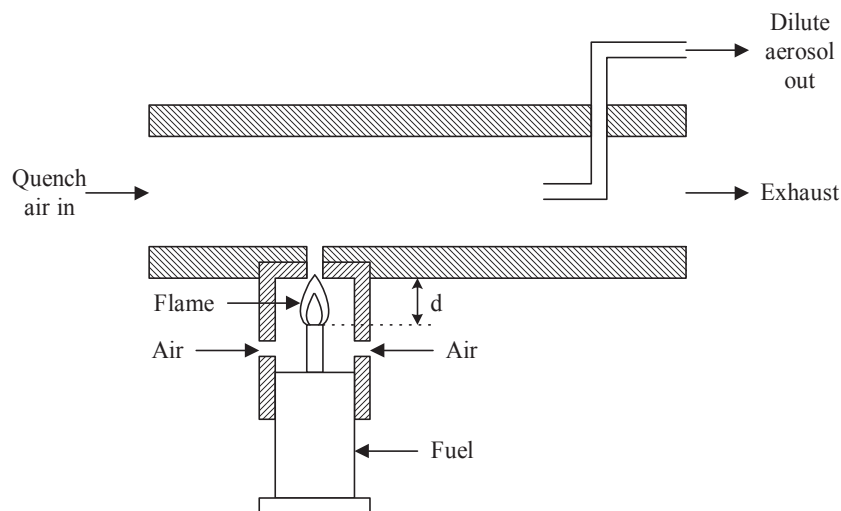
5.1.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในการศึกษานี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) หรือ SEM ของ JEOL โมเดล JSM-6335F เพื่อถ่ายภาพอนุภาคตัวอย่างจากแหล่งจ่ายอนุภาคที่สร้างขึ้น ซึ่งกล้องจุลทรรศน์นี้เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีการแยกชัดสูง โดยมีค่าการแยกชัดประมาณ 1.5 นาโนเมตร และมีกำลังขยายระหว่าง 10 เท่า ถึง 500,000 เท่า รูปที่ 5.10 แสดงรูปถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL โมเดล JSM-6335F

5.2 ระเบียบวิธีการทดลอง

5.2.1 การสร้างอนุภาคตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

รูปที่ 5.11 แสดงไดอะแกรมของการสร้างอนุภาคตัวอย่างสำหรับการทดลองนี้ โดยอนุภาคตัวอย่างจะถูกสร้างโดยการเผาไหม้แพร่กระจายแบบราบเรียบ (laminar diffusion burner) ด้วยน้ำมันก๊าดที่สภาวะก่อนการเป็นเขม่า (presooting condition) ภายใต้สภาวะนี้เขม่าจะถูกสร้างโดยเปลวที่กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งจะให้ความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ต่ำมากๆ โดยการไหลของอากาศที่ตัดผ่านปลายของเปลวไฟ จะช่วยในการสร้างอนุภาคที่มีความเข้มข้นสูงและอากาศยังช่วยพาอนุภาคให้เคลื่อนที่ออกจากห้องเผาไหม้ โดยไอเสียจากเปลวไฟจะถูกผสมกับอากาศอย่างรวดเร็วโดยการใช้เครื่องเป่าอากาศ เพื่อทำให้เกิดอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก การสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคจะใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบที่มีจลศาสตร์เท่ากัน (isokinetic sampling) โดยความเข้มข้นจำนวนและการแจกแจงขนาดของอนุภาคสามารถปรับเปลี่ยนได้

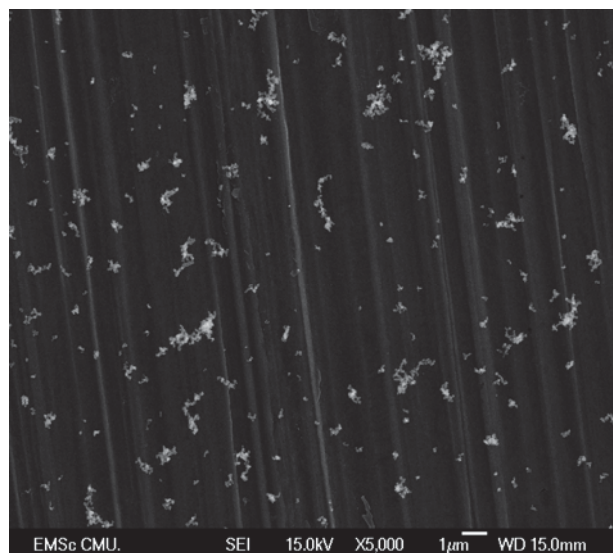


รูปที่ 5.11 ไดอะแกรมของเครื่องสร้างอนุภาคตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้
(Yawootti et al., 2010)

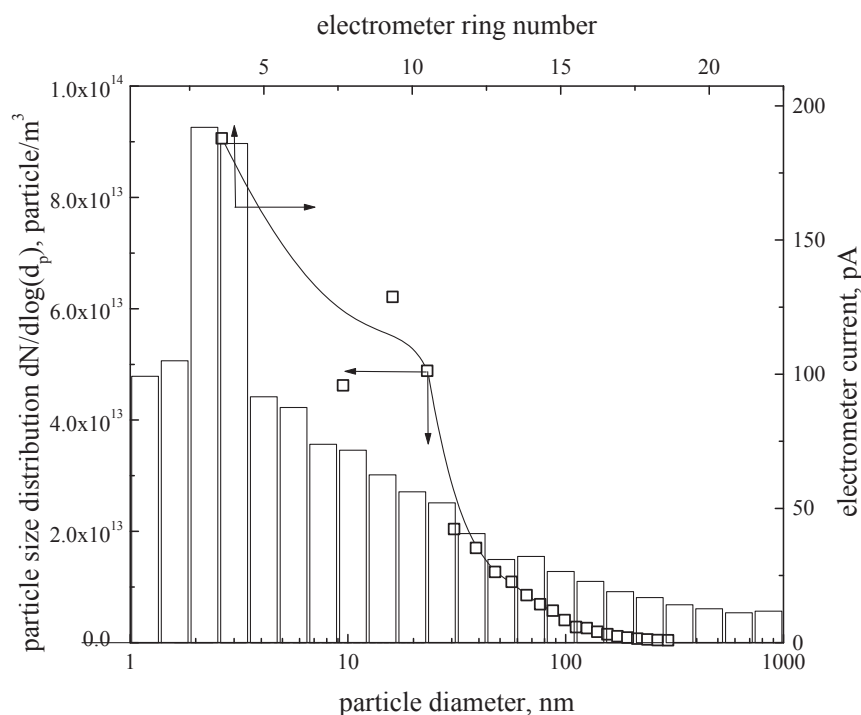


รูปที่ 5.12 รูปถ่ายของเครื่องสร้างละอองลอยที่ใช้ในการศึกษานี้ (Yawootti et al., 2010)

โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้และระดับของเปลวไฟ โดยปกติแล้ว ละอองลอยที่ได้จะมีความเข้มข้นจำนวนประมาณ 10^{14} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร รูปที่ 5.12 แสดงรูปถ่ายของเครื่องสร้างอนุภาคที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค โดยเฉลี่ย ที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะอยู่ในช่วงขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 แสดงการแจกแจงขนาดของอนุภาคของ เครื่องสร้างอนุภาคที่พัฒนาขึ้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง EMS จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคที่วิเคราะห์ได้ มีการแจกแจงขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับรูปถ่ายจาก SEM ในการศึกษานี้ยังได้นำอนุภาคตัวอย่างที่สร้างได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

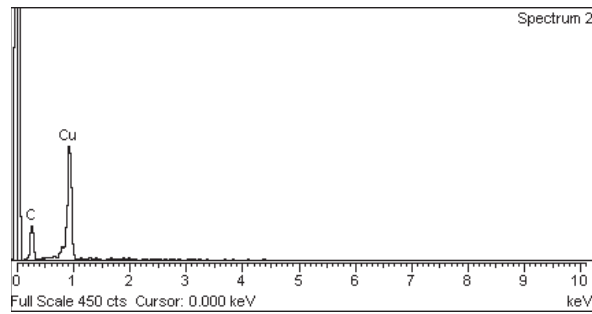


รูปที่ 5.13 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของอนุภาคตัวอย่าง (Yawootti et al., 2010)



รูปที่ 5.14 การแจกแจงขนาดของอนุภาคของเครื่องสร้างอนุภาคที่พัฒนาขึ้นที่วิเคราะหโดย
เครื่อง EMS (Yawootti et al., 2010)

โดยอนุภาคที่สร้างขึ้นจะถูกเก็บตัวอย่างไว้บนเทปทองแดงแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS (energy dispersive spectroscopy) รูปที่ 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของอนุภาคตัวอย่าง จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคที่ได้เป็นอนุภาคคาร์บอน (C) มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก (weight%) 41.36 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์ของอะตอม (atomic%) 78.86 เปอร์เซ็นต์ และจากรูปจะสังเกตได้ว่ามีธาตุที่เป็นทองแดง (Cu) นั่นคือแผ่นเทปทองแดงที่เก็บตัวอย่าง



รูปที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของอนุภาคตัวอย่างด้วย EDS
(Yawootti et al., 2010)

5.2.2 การทดสอบสมรรถนะของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่

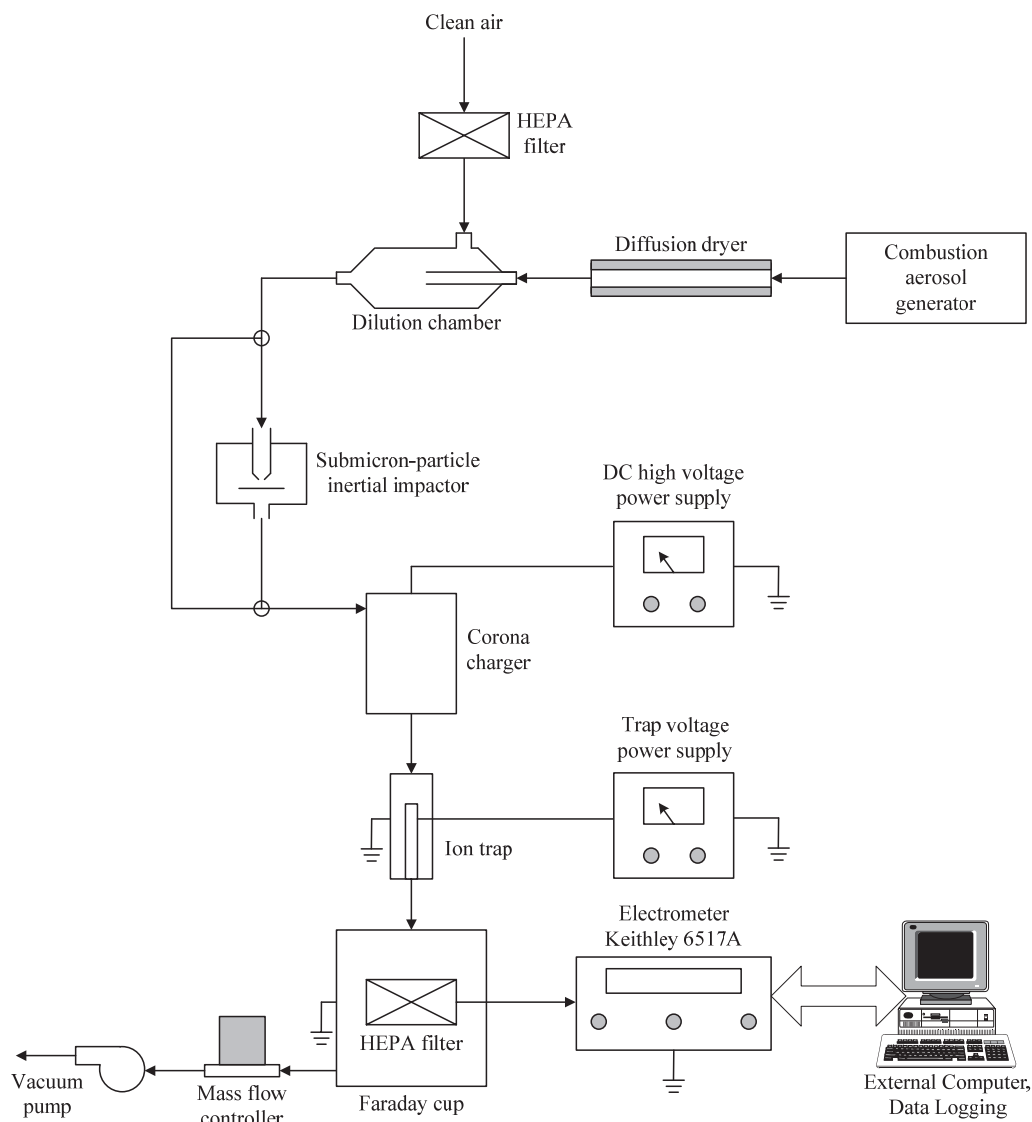
รูปที่ 5.16 แสดงไดอะแกรมของการทดสอบสมรรถนะการสะสมตัว (particle collection efficiency) ของอนุภาคภายในชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ในการทดสอบสมรรถนะการสะสมตัวเริ่มต้นโดยการดูดอนุภาคตัวอย่าง (อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.1) ผ่านท่อเก็บตัวอย่าง โดยอัตราการไหลของอนุภาคจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 5.0 ลิตร ต่อ นาที จากนั้นอนุภาคจะถูกกำจัดความชื้นโดยผ่านเข้าไปในตัวดักความชื้นแบบแพร่กระจาย (diffusion dryer) ก่อนและถูกทำให้เจือจางลงโดยผ่านชุดเจือจาง (dilution chamber) หลังจากนั้นอนุภาคตัวอย่างจะผ่านเข้าไปยังชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ที่ต้องการทดสอบ โดยความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ด้านทางเข้าและทางออกของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อน จะถูกวัดด้วยการวัดกระแสไฟฟ้าของประจุของอนุภาค (charged particle current) ด้วยลูกฟาราเดย์และอิเล็กโทรมิเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพการสะสมตัวของอนุภาคภายในชุดคัดแยก ซึ่งค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคสามารถคำนวณได้จาก

$$N_p = \frac{I_p}{n_p e Q_a} \quad (5.1)$$

เมื่อ N_p คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค I_p คือค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กโทรมิเตอร์ n_p คือจำนวนประจุที่อยู่บนอนุภาค e คือค่าประจุพื้นฐานของอิเล็กตรอน (Elementary charge) มีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19} C และ Q_a คืออัตราการไหลของอนุภาค ดังนั้นประสิทธิภาพการสะสมตัวของอนุภาคภายในชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนสามารถหาได้จาก

$$E = 1 - \frac{N_{p,out}}{N_{p,in}} \quad (5.2)$$

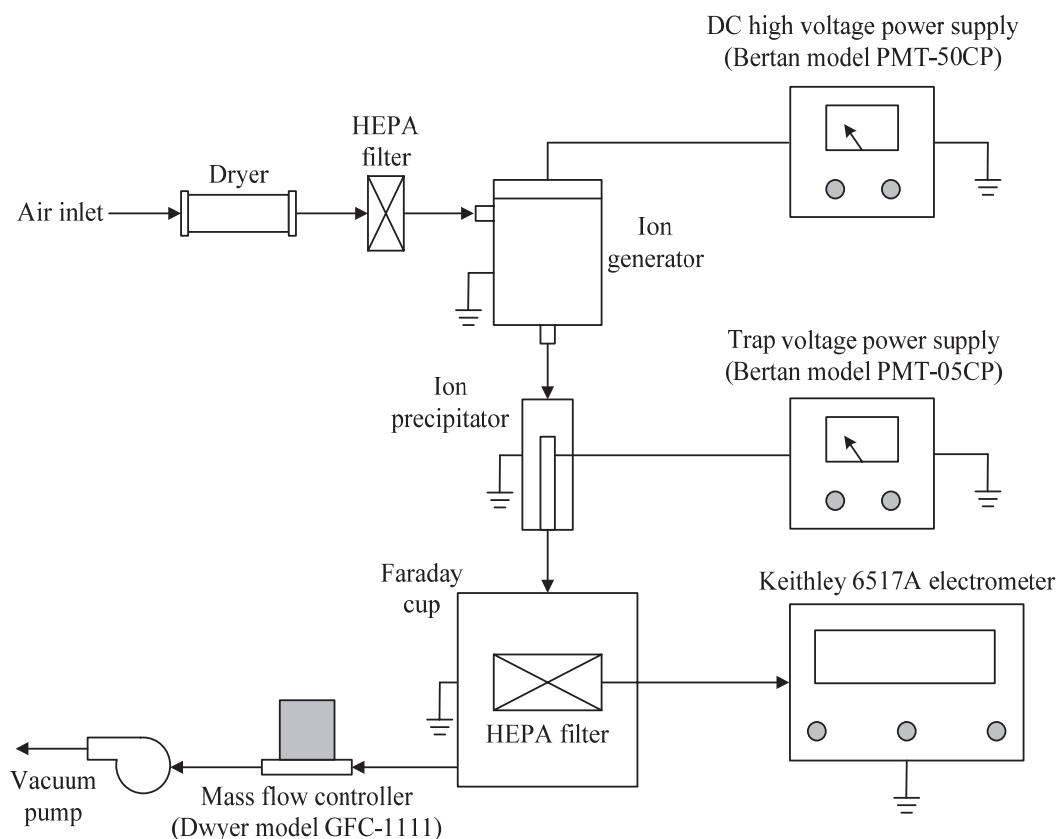
เมื่อ $N_{p,in}$ และ $N_{p,out}$ คือจำนวนความเข้มข้นของอนุภาคทางด้านทางเข้าและทางออกของชุดคัดแยก



รูปที่ 5.16 ไตอะแกรมของการทดสอบสมรรถนะการสะสมตัวของอนุภาคภายในชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Intra, 2008)

5.2.3 การทดสอบสมรรถนะของชุดดักจับไอออน

การทดสอบสมรรถนะการดักจับไอออนของชุดดักจับไอออน จะทำการทดสอบโดยการจ่ายไอออนที่รู้ค่าความเข้มข้นจำนวน (number concentration) เข้าไปในชุดดักจับไอออน แล้วหาประสิทธิภาพ จากสัดส่วนความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่วัดได้จากทางเข้าและทางออก ไตอะแกรมการทดสอบสมรรถนะของชุดดักจับไอออนแสดงไว้ดังรูปที่ 5.17 ในการศึกษาจะใช้ชุดให้ประจุอนุภาคแบบโคโรนาเข็มเป็นแหล่งจ่ายไอออน ซึ่งจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโคโรนาเข็มประมาณ 3.5 กิโลโวลต์ จะได้ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนเท่ากับ 3×10^{12} ไอออนต่อ ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบจะทำการดูดอากาศเข้ามายังระบบด้วยปั๊มสุญญากาศและควบคุมอัตราการไหลด้วยตัวควบคุมการไหล อากาศที่เข้ามาจะถูกทำกำจัดความชื้นโดยตัวทำความชื้น และถูกกรองอนุภาคที่ปะปนเข้ามาด้วยตัวกรองอนุภาคแบบ HEPA เมื่ออากาศจะผ่าน

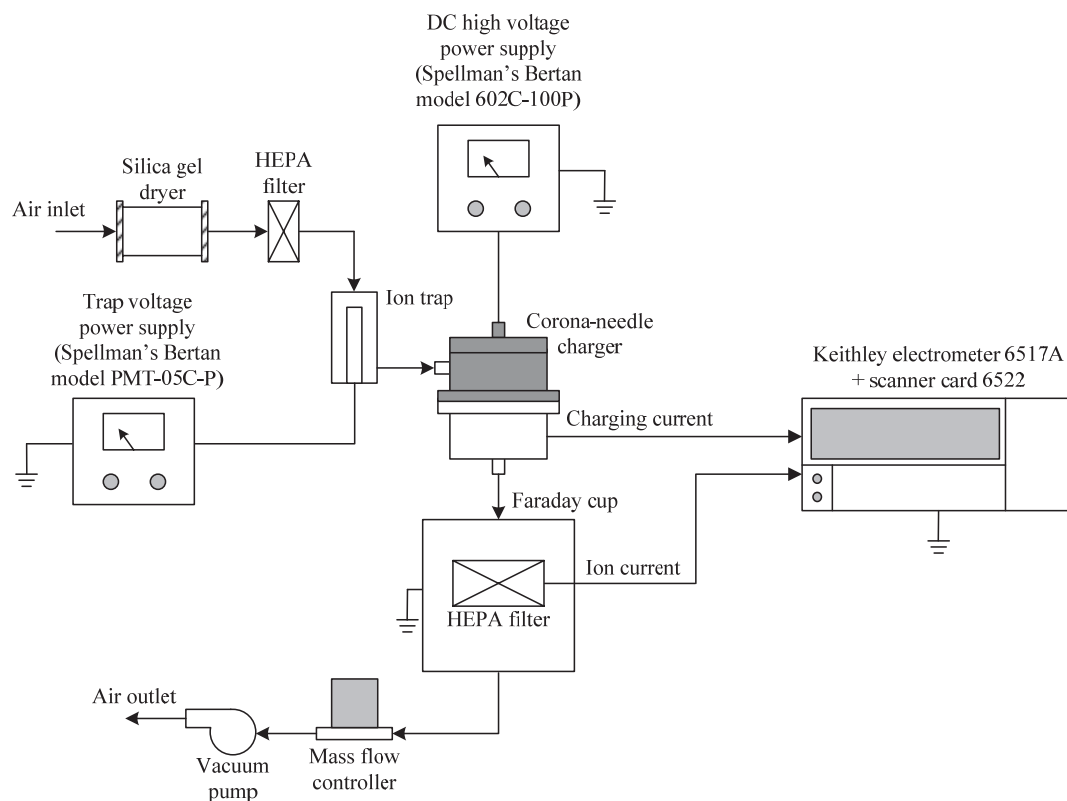


รูปที่ 5.17 ไดอะแกรมของการทดสอบสมรรถนะของชุดดักจับไอออน

เข้าไปยังชุดให้ประจุอนุภาคแล้วอากาศจะเป็นตัวนำพาไอออนออกมาพร้อมกัน อากาศที่มีไอออนปนอยู่จะเข้าไปยังชุดดักจับไอออน จากนั้นจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าของไอออน (ion current) ที่ทางเข้าและทางออกของชุดดักจับไอออนด้วยลูกถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโทรมิเตอร์ โดยค่ากระแสไฟฟ้าของไอออนจะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนไอออน และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.32 ในการทดลองนี้จะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรและเงื่อนไขการทำงานดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดดักจับไอออน

ตัวแปรและเงื่อนไขการทำงาน	ช่วงที่กำหนด
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด	10, 50, 100 และ 150 โวลต์
ขั้วของแรงดัน	บวก
อัตราการไหล	5, 10 และ 15 ลิตร ต่อ นาที
ชนิดแก๊ส	อากาศ
ขั้วของไอออน	ไอออนบวก (+)
ความดันทำงาน	1 บาร์



รูปที่ 5.18 ไดอะแกรมการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้า
(Intra and Tippayawong, 2010)

5.2.4 การทดสอบสมรรถนะของชุดให้ประจุอนุภาค

รูปที่ 5.18 แสดงไดอะแกรมการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้า ซึ่งสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของไอออนในพื้นที่ของการให้ประจุไฟฟ้า (charging zone) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสของไอออนจากขั้วอิเล็กโทรดเข็มโครนาด้านในกับอิเล็กโทรดด้านนอกของเครื่องอัดประจุ อากาศจะถูกกำจัดอนุภาคด้วยตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูงและนำเข้ามาในระบบ โดยผ่านการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลกับเครื่องดูดสูญญากาศ ซึ่งจะทำให้การควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 ลิตร ต่อ นาที ซึ่งอยู่ในช่วงการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคนี้อยู่ ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลม จะถูกจ่ายด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบปรับค่าได้ โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากทดสอบนั้น จะใช้อิเล็กโทรมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ประจุไฟฟ้า (charging current) และตรงทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้า โดยความเข้มข้นของไอออนภายในพื้นที่การให้ประจุไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องรู้เนื่องจากว่าเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมประสิทธิภาพการให้ประจุไฟฟ้าของอนุภาค กระแสไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าถูกวัดโดยวิธีการกรอง โดยอากาศตัวอย่างจะถูกส่งผ่านเข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ โดยกระแสของไอออนที่วัดได้จากอิเล็กโทรมิเตอร์จะถูกแปลงไปเป็นความเข้มข้นจำนวนไอออน ด้วยอัตราการไหลของอากาศทั้งหมดที่ไหลผ่านชุดให้ประจุไฟฟ้า ความ

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค

ตัวแปรและเงื่อนไขการทำงาน	ช่วงที่กำหนด
แรงดันไฟฟ้า	0 ถึง 10 กิโลโวลต์
ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด	1.75 มิลลิเมตร
มุมของขั้วอิเล็กโทรดเข็ม	10 และ 20 องศา
ชนิดไอออน	ไอออนบวก (+) และ ไอออนลบ (-)
ชนิดแก๊ส	อากาศ
อัตราการไหล	3, 5, และ 8 ลิตร ต่อ นาที
ความดันทำงาน	1 บาร์

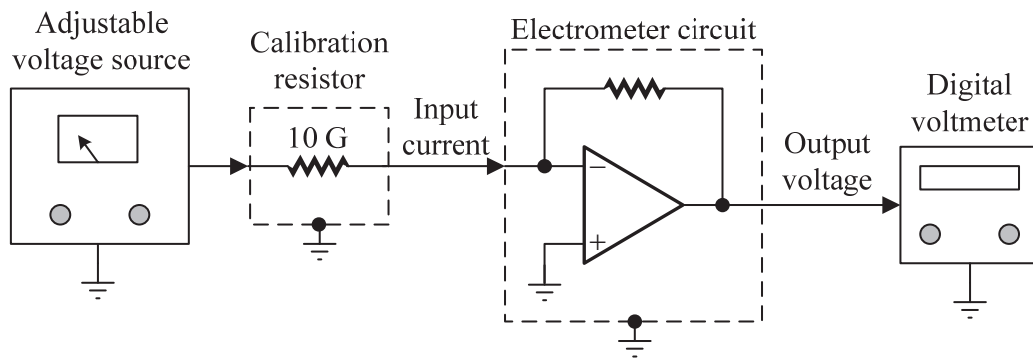
เข้มข้นจำนวนไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.32 ดังนั้นค่าการผ่านทะลุของไอออน (ion penetration) P ของชุดให้ประจุไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.33 ตารางที่ 5.2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค

5.2.5 การทดสอบสมรรถนะของวงจรวัดอิเล็กโทรมิเตอร์

รูปที่ 5.19 แสดงไดอะแกรมสำหรับการทดสอบสมรรถนะของวงจรวัดอิเล็กโทรมิเตอร์ ใน การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการวัดเทียบวงจรวัดอิเล็กโทรมิเตอร์ด้วยวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า (หรือ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง) ซึ่งวงจรมีประกอบด้วยตัวต้านทานมาตรฐานสูง ขนาด 10×10^9 โอห์ม มีค่าความผิดพลาดประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และค่าความไม่แน่นอนของ การวัด (measurement uncertainty) เท่ากับ 0.017×10^9 โอห์ม (วัดโดย Fluke โมเดล 8508A) และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความถูกต้องสูงสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ได้อยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ โดยกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้านี้ สามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) คือ

$$I = \frac{V_s}{R} \quad (5.3)$$

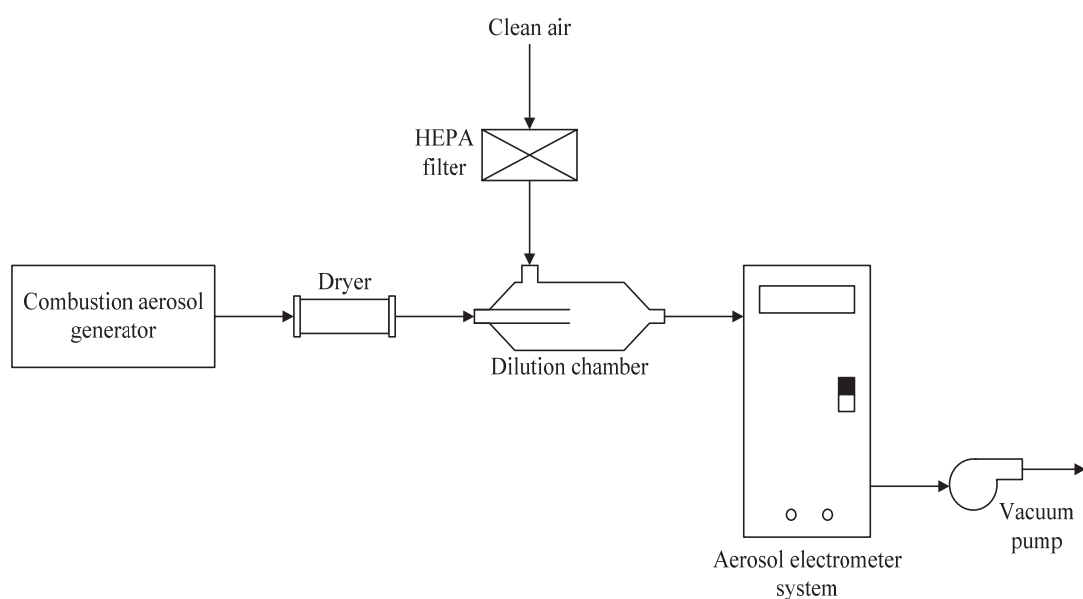
เมื่อ V_s คือแรงดันของแหล่งจ่าย และ R คือความต้านทานของตัวต้านทาน ดังนั้นค่า กระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 500 พิโคแอมป์ โดยแรงดันเอาต์พุตจาก วงจรวัดอิเล็กโทรมิเตอร์จะถูกวัดและบันทึกด้วยเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแบบดิจิตอล ที่มีค่าความ ถูกต้องแม่นยำสูงและแรงดันจะถูกแปลงไปเป็นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ และจะถูกนำไป เปรียบเทียบกับอิเล็กโทรมิเตอร์มาตรฐาน



รูปที่ 5.19 ไตอะแกรมสำหรับการทดสอบการวัดเทียบอิเล็กโตรมิเตอร์ในแต่ละช่อง
(Intra and Tippayawong, 2008)

5.2.6 การทดสอบสมรรถนะการวัดของเครื่องวิเคราะห์

รูปที่ 5.20 แสดงไตอะแกรมของการทดสอบการวัดของเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะประกอบด้วย แหล่งจ่ายอนุภาคตัวอย่างแบบเผาไหม้ ตัววัดความชื้นแบบแพร่กระจาย ตัวกรองอนุภาคแบบ HEPA และตัวเจือจางอากาศ โดยอัตราการไหลของละอองลอยจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ในช่วง 5 ถึง 15 ลิตร ต่อ นาที อนุภาคตัวอย่างจะผ่านเข้าไปยังเครื่องวิเคราะห์ เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเวลาของความเข้มข้นของอนุภาค ในการทดลองนี้จะทำการวัดซ้ำหลังจากที่อนุภาคผ่านเข้าไปยังเครื่องวิเคราะห์อย่างน้อย 5 นาที โดยจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล 4 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 ลิตร ต่อ นาที



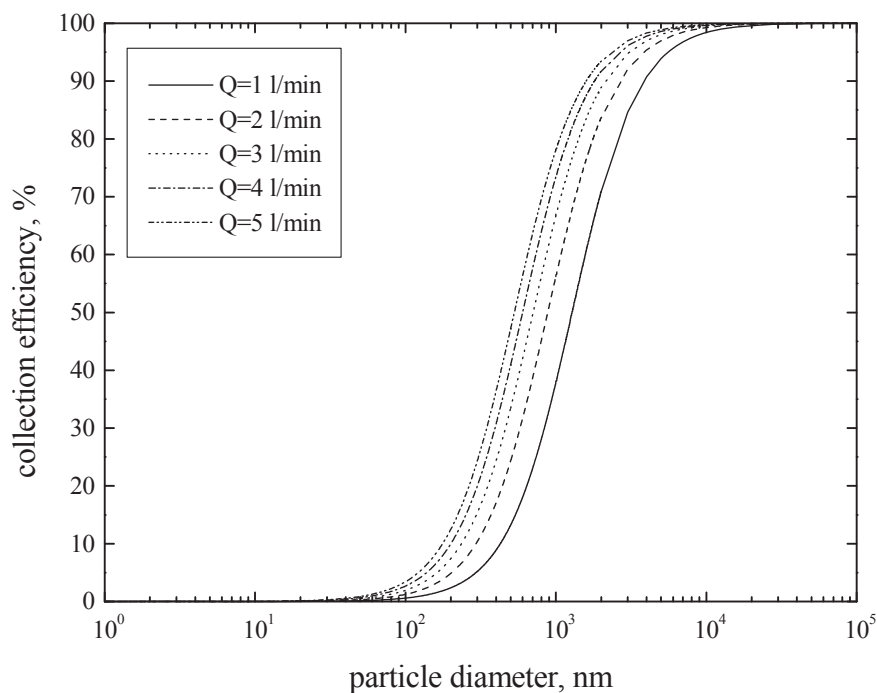
รูปที่ 5.20 ไตอะแกรมการทดสอบสมรรถนะการวัดของเครื่องวิเคราะห์

บทที่ 6

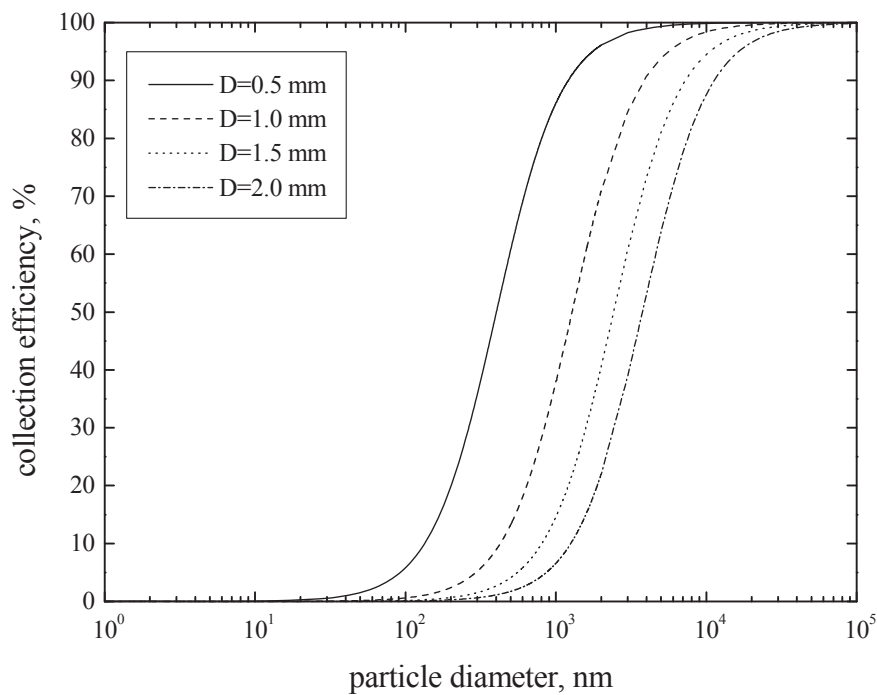
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

6.1 สมรรถนะของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่

รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบการทำนายประสิทธิภาพการสะสมตัวของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่อัตราการไหลของอนุภาค 1 ถึง 5 ลิตร ต่อ นาที จากรูปพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่จุดตัดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่จุดตัดจะอยู่ในช่วง 1.28 ถึง 0.53 ไมโครเมตร สอดคล้องกับอัตราการไหล 1 ถึง 5 ลิตร ต่อ นาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าทั้งความเร็วของของไหลและประสิทธิภาพการสะสมตัวจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอนุภาคเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเฉื่อย จากรูปแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการสะสมตัวเพิ่มขึ้นระหว่างอัตราการไหลในช่วง 1 ถึง 5 ลิตร ต่อ นาที เพราะว่าแรงเฉื่อยที่กระทำบนอนุภาคมีค่ามากที่อัตราการไหลสูง รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบการทำนายประสิทธิภาพการสะสมตัวของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเร่ง (D) ต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าประสิทธิภาพการสะสมตัวลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเร่งเพิ่มขึ้น



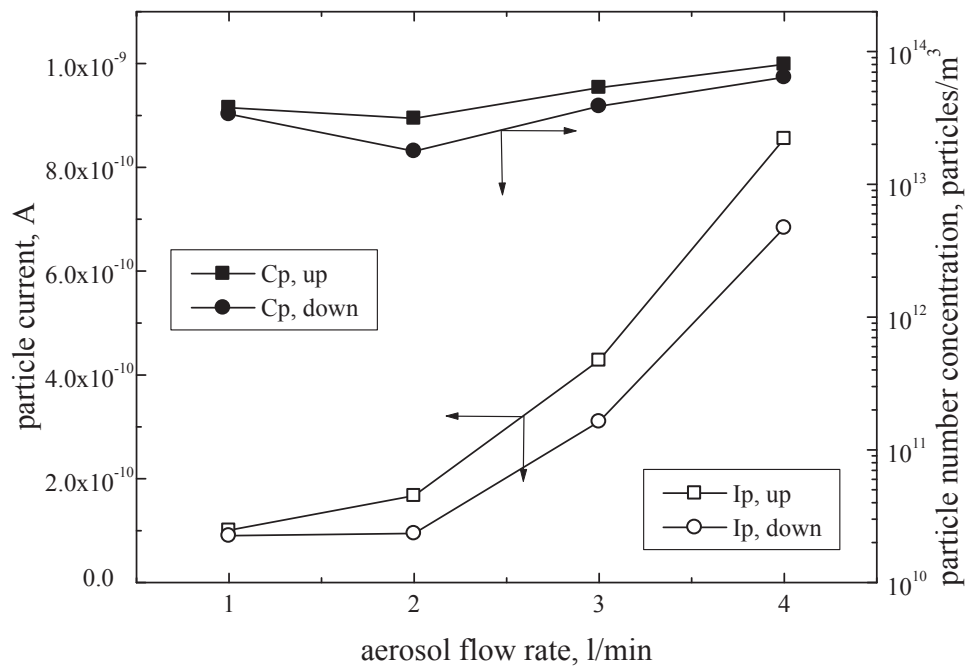
รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมตัวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนที่อัตราการไหลของละอองต่างกัน (Intra, 2008)



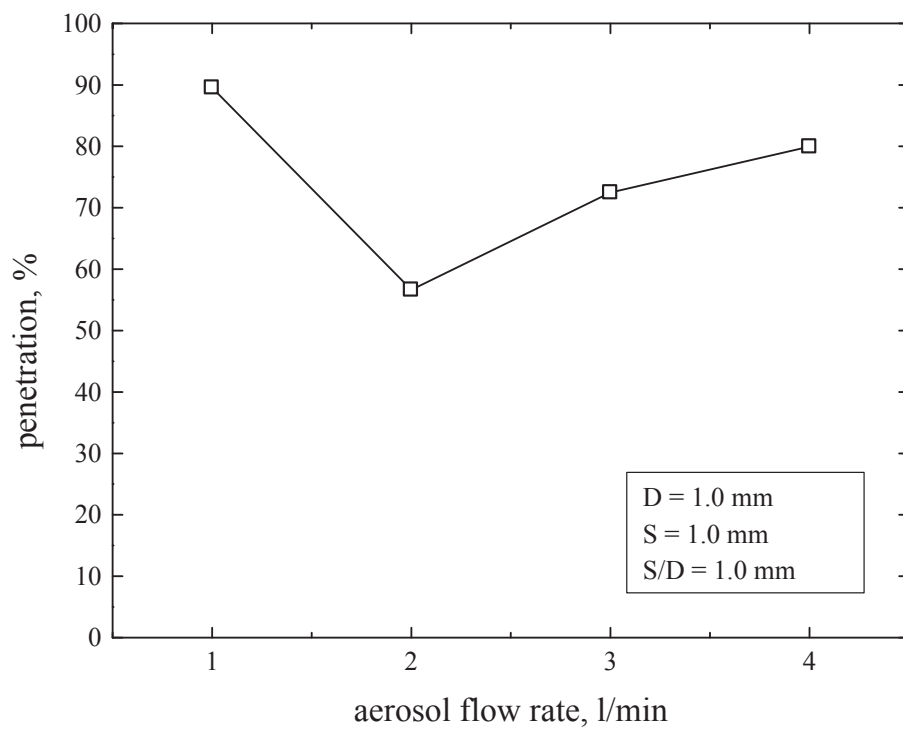
รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมตัวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเร้งต่างกัน (Intra, 2008)

สำหรับการศึกษาผลของอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเร้ง ที่มีผลต่อเส้นโค้งประสิทธิภาพ โดย Marple and Willeke (1976) ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคที่จุดตัดที่ 50 เปอร์เซ็นต์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ S/D สำหรับ S/D น้อยกว่า 1 สำหรับช่องเร้งที่มีลักษณะเป็นทอสี่เหลี่ยม และสำหรับ S/D น้อยกว่า 1/2 สำหรับช่องเร้งที่มีลักษณะเป็นทอกลม สำหรับอัตราส่วน S/D ที่มากกว่าค่าเหล่านี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดและรูปร่างของเส้นโค้งประสิทธิภาพจะคงที่ ดังนั้นในการออกแบบค่า S/D ควรจะมีค่าน้อยที่สุด

รูปที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กโตรมิเตอร์กับอัตราการไหลของละอองลอยที่ทางเข้าและทางออกของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ โดยค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคคำนวณจากสมการที่ 5.1 ค่ากระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์จะอยู่ในช่วง 1.5×10^{-10} ถึง 9×10^{-9} แอมป์ และ 3×10^{13} ถึง 3×10^{15} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่วัดได้ทั้งทางเข้าและทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลละอองลอย และจะสังเกตได้ว่าทั้งกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ทางเข้ามีค่าสูงกว่าที่ทางออก รูปที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการผ่านทะลุของอนุภาค (particle penetration) ของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนกับอัตราการไหลละอองลอย จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าการผ่านทะลุของอนุภาคที่อัตราการไหลของ



รูปที่ 6.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กโทรมิเตอร์กับอัตราการไหลของละอองลอยที่ทางเข้าและทางออกของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Intra, 2008)



รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบค่าการผ่านทะลุของอนุภาคของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนกับอัตราการไหลละอองลอย (Intra, 2008)



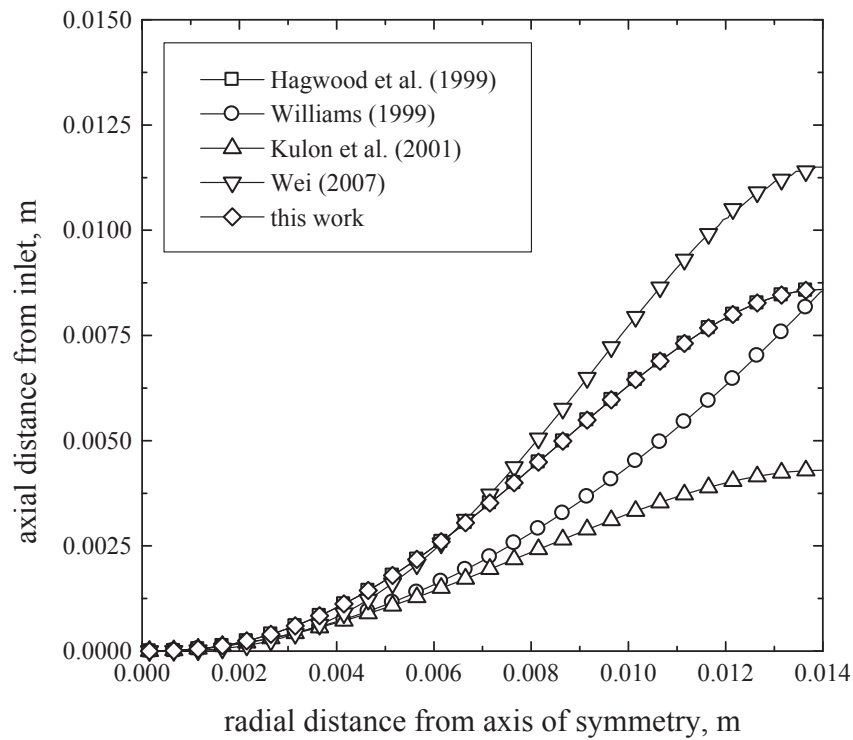
รูปที่ 6.5 รูปถ่ายของอนุภาคที่สะสมตัวบนพื้นผิวของแผ่นกระแทกภายในชุดตัดแยกสิ่งปนเปื้อน (Intra, 2008)

ละอองลอย 1, 2, 3 และ 4 ลิตร ต่อ นาที่ เท่ากับ 89, 56, 72 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าการผ่านทะลุของชุดตัดแยกสิ่งปนเปื้อนนี้มีค่าค่อนข้างสูงอยู่ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าการวัดอนุภาคทั้งหมดภายในลูกถ้วยฟาราเดย์นั้นได้สมมุติให้ประจุของอนุภาคเป็นประจุเดียว (singly charged) หรือ $n = 1$ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาในเรื่องการประมวลผลการวัดในส่วนนี้ด้วย รูปที่ 6.5 แสดงรูปถ่ายของอนุภาคที่สะสมตัวบนพื้นผิวของแผ่นกระแทกภายในชุดตัดแยกสิ่งปนเปื้อน โดยได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลละอองลอย 2 ลิตร ต่อ นาที่ เป็นเวลา 30 นาที จากรูปจะพบว่าอนุภาคได้มีการก่อดำอยู่บนพื้นผิวของแผ่นกระแทก และยังพบปัญหาการเด็น (bounce) และการเข้ามาใหม่ (re-entrainment) ของอนุภาคที่อัตราการไหลสูงอีกด้วย

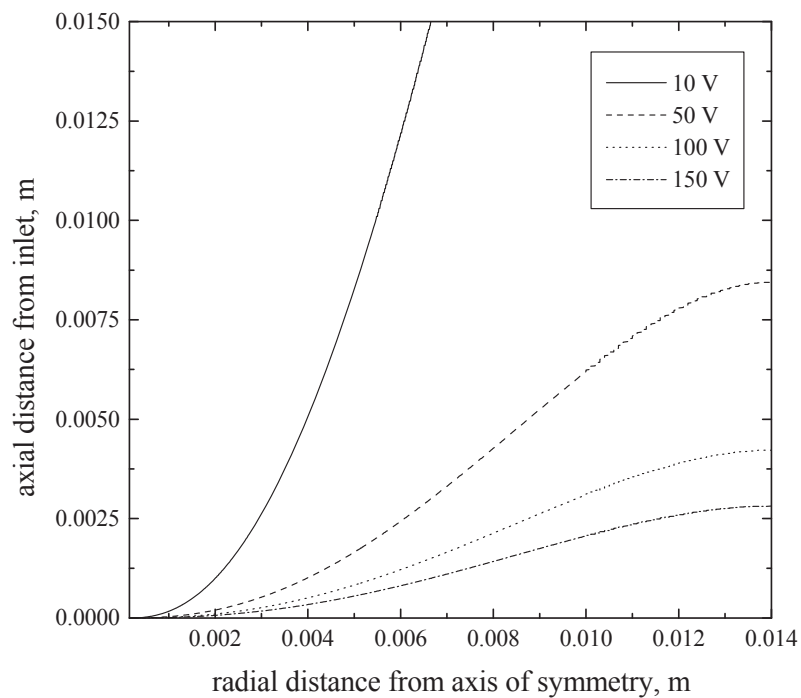
6.2 สมรรถนะของชุดดักจับไอออน

6.2.1 การเคลื่อนที่ของไอออน

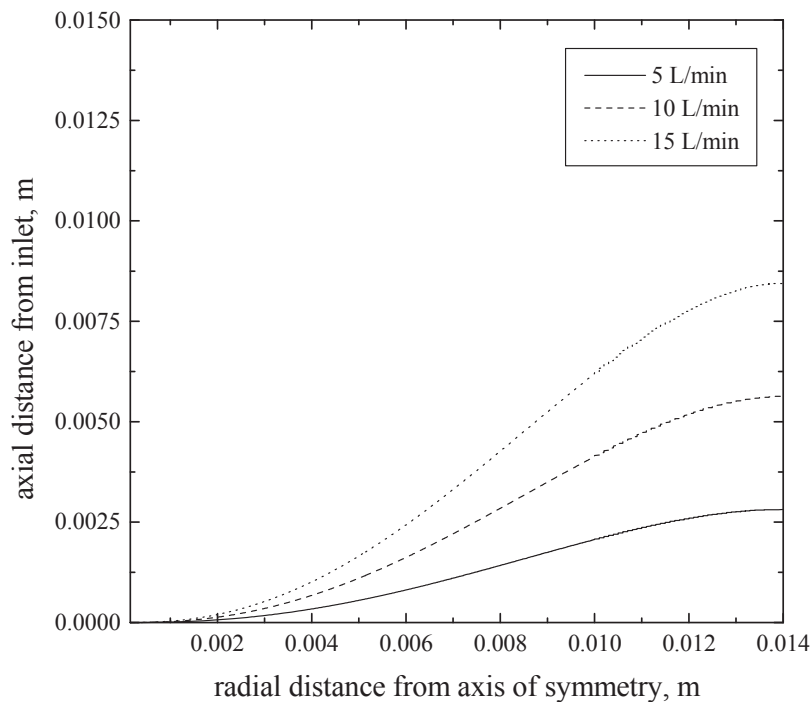
รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เส้นโคจรของไอออนระหว่างโมเดลที่พัฒนาขึ้นกับโมเดลที่มีอยู่ เงื่อนไขในการวิเคราะห์กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่เส้นลวดอิเล็กโทรด 10 โวลต์ และอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อ นาที่ จากรูปพบว่าเส้นโคจรของไอออนมีลักษณะใกล้เคียงกันมากกับโมเดลที่นำเสนอโดย Hagwood et al. (1999) และ Williams (1999) แต่อย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างโมเดลที่พัฒนาขึ้นกับโมเดลของ Kulon et al. (2001) และ Wei (2007) เนื่องมาจากโมเดลเหล่านั้นไม่ได้พิจารณาผลของค่าคงที่ของ pressure gradient เข้าไปในสมการรูปร่างความเร็วของการไหลอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ รูปที่ 6.7 แสดงเส้นโคจรของไอออนภายในชุดดักจับไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เส้นลวดอิเล็กโทรดในช่วง 10 ถึง 150 โวลต์ โดยไอออนจะถูกผลักดันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตเข้าหาพื้นผิวด้านในของท่ออิเล็กโทรดด้านนอก จากการเปรียบเทียบพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เส้นลวดอิเล็กโทรดจะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าขึ้น และแรงดันไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะการเคลื่อนที่ของไอออนคือ โดยที่แรงดันไฟฟ้าสูงไอออนจะมีระยะเส้นโคจรที่ใกล้กว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งหมายความว่าถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดักจับไอออนสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบเส้นโคจรของไอออนระหว่างโมเดลที่พัฒนาขึ้นกับโมเดลที่มีอยู่
(Intra and Tippayawong, 2009)



รูปที่ 6.7 เส้นโคจรของไอออนภายในชุดดักจับไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เส้น
ลวดอิเล็กโทรดต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2009)

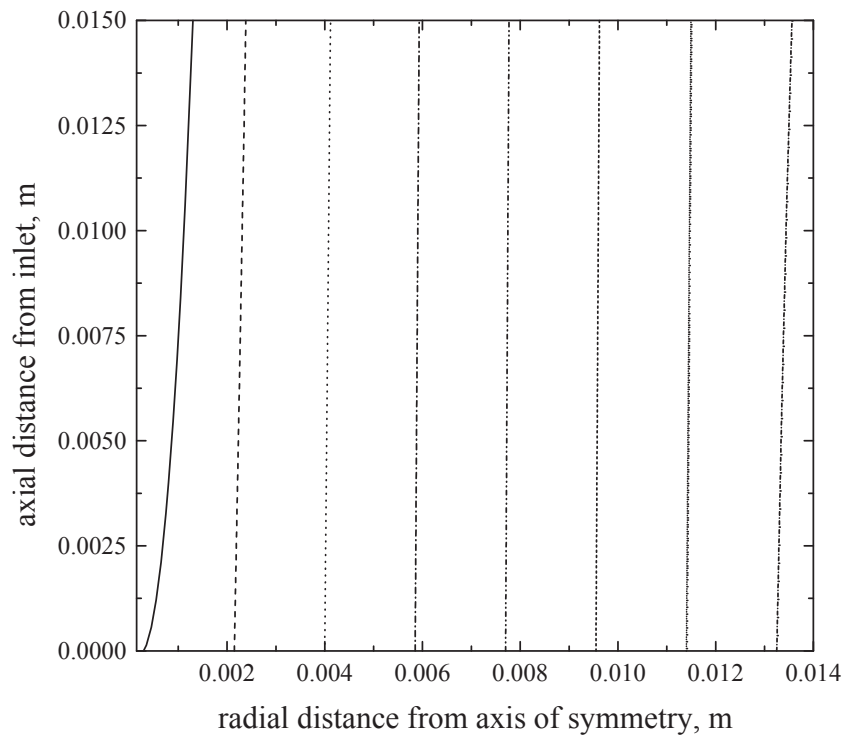


รูปที่ 6.8 เส้นโคจรของไอออนภายในชุดดักจับไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2009)

จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 6.7 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 100 โวลต์ หลังจากที่ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมแล้วจะทำการวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสม โดยรูปที่ 6.8 แสดงเส้นโคจรของไอออนภายในชุดดักจับไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในช่วง 5, 10 และ 15 ลิตร จากรูปจะพบว่าอัตราการไหลของของไหลแปรผันตรงกับระยะการเคลื่อนที่ของไอออนโดยที่อัตราการไหลต่ำๆ ระยะการเคลื่อนที่ของไอออนจากทางเข้าไปจนถึงท่ออิเล็กทรอนิกส์ทางด้านนอกจะใกล้กว่าที่อัตราการไหลที่สูงกว่า ในการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์นี้ได้กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ต้องการวัดได้คือ 10 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคนาโนขนาดเล็กนี้จะมีค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าค่อนข้างสูงซึ่งใกล้เคียงกับไอออน รูปที่ 6.9 แสดงเส้นโคจรของอนุภาคที่มีประจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร ที่ตำแหน่งรัศมีทางเข้าต่างกัน จากรูปพบว่าอนุภาคที่มีประจุขนาด 10 นาโนเมตร ที่เข้าไปในชุดดักจับอนุภาคสามารถผ่านทะลุออกไปได้ โดยไม่มีการตกตะกอนของอนุภาคที่พื้นผิวด้านในของท่ออิเล็กทรอนิกส์ทางด้านนอก

6.2.2 ประสิทธิภาพการดักจับไอออน

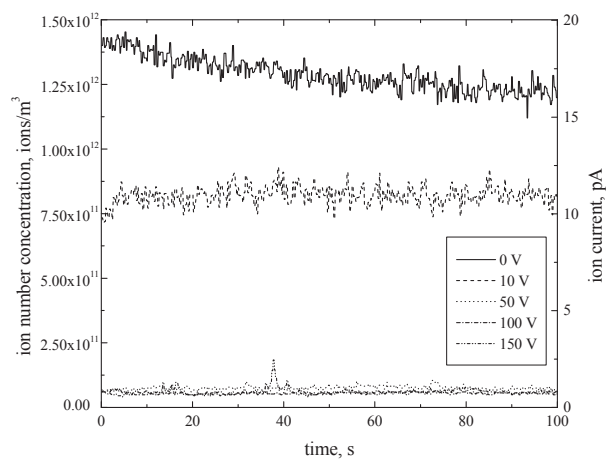
รูปที่ 6.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นจำนวนของไอออนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านทางออกของชุดดักจับไอออนที่แรงดันและอัตราการไหลต่างๆ กัน โดยค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนจะคำนวณจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้โดยสมการที่ 3.32 จากการทดลองพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ด้านทางออกของชุดดักจับไอออนจะอยู่ในช่วง 0



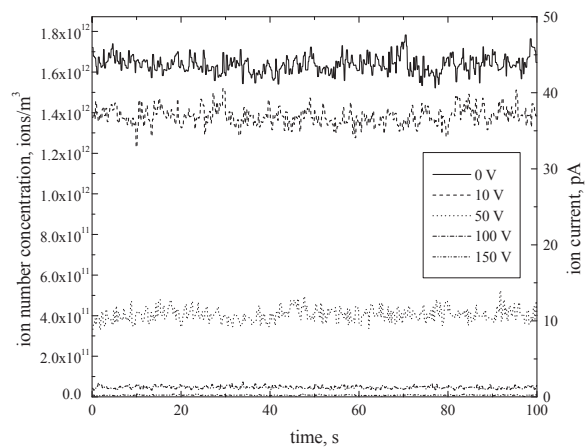
รูปที่ 6.9 เส้นโคจรของอนุภาคที่มีประจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร ที่ตำแหน่งรัศมีทางเข้าต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2009)

ถึง 100 พิโคแอมป์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนในช่วง 0 ถึง 2.5×10^{12} ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร จากการสังเกตพบว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นจำนวนและกระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้มีค่าลดลงตามไปด้วย และที่อัตราการไหลของของไหลสูงขึ้น จะมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นจำนวนและกระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนทางด้านทางออกกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดที่อัตราการไหลของไอออนต่างกันแสดงไว้ในรูปที่ 6.11 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของไอออนมีค่าต่ำและแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงจะทำให้ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่วัดได้ที่ด้านทางออกของชุดดักจับไอออนมีค่าลดลง โดยค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่วัดได้ที่ด้านทางออกจะลดลงเหลือ 0 ที่แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 150 โวลต์

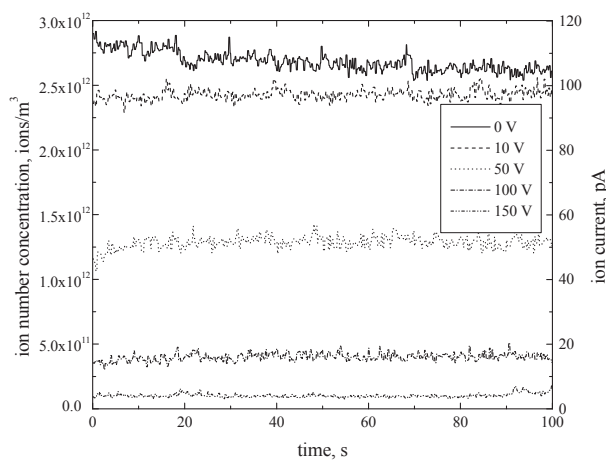
รูปที่ 6.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของชุดดักจับไอออนที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่าง ๆ กัน ซึ่งโดยปกติแล้วการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า จะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนของชุดดักจับไอออนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนของชุดดักจับไอออนจะมีค่าสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 100 โวลต์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.11 และ 6.12 สำหรับทุกๆ อัตราการไหล นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองยังได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์



(ก) 5 ลิตร ต่อ นาที

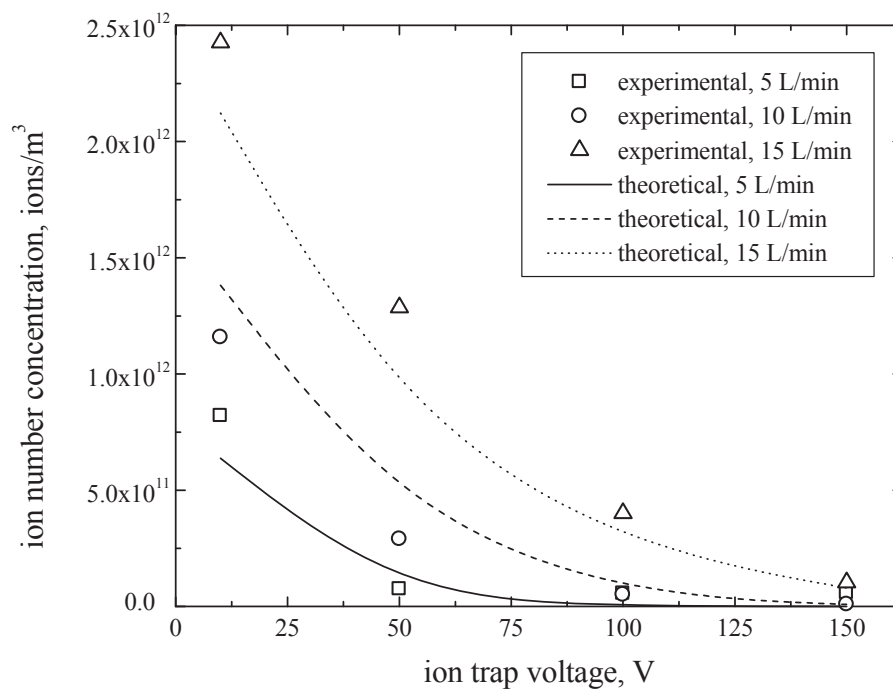


(ข) 10 ลิตร ต่อ นาที

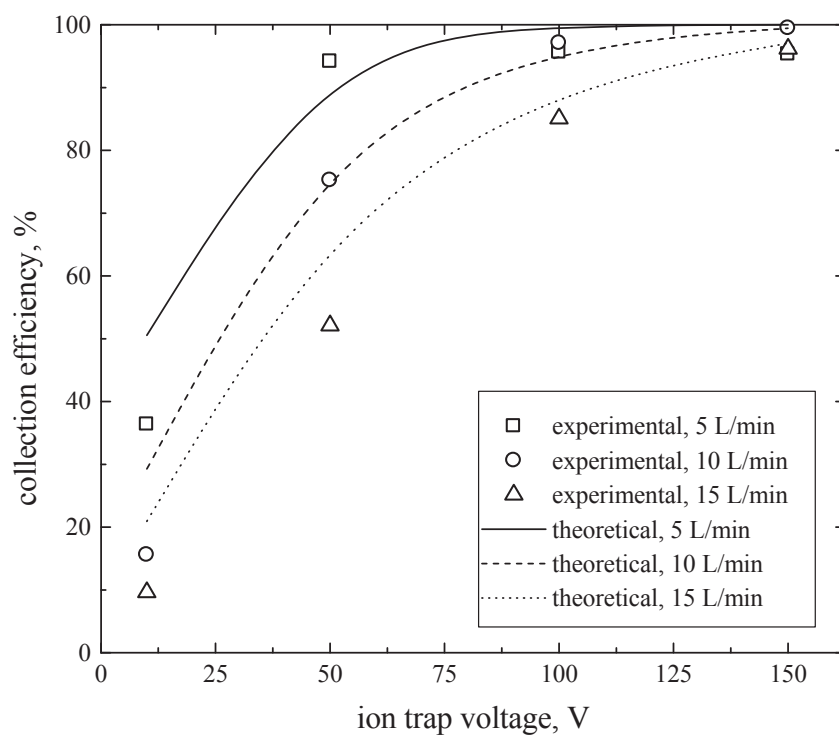


(ค) 15 ลิตร ต่อ นาที

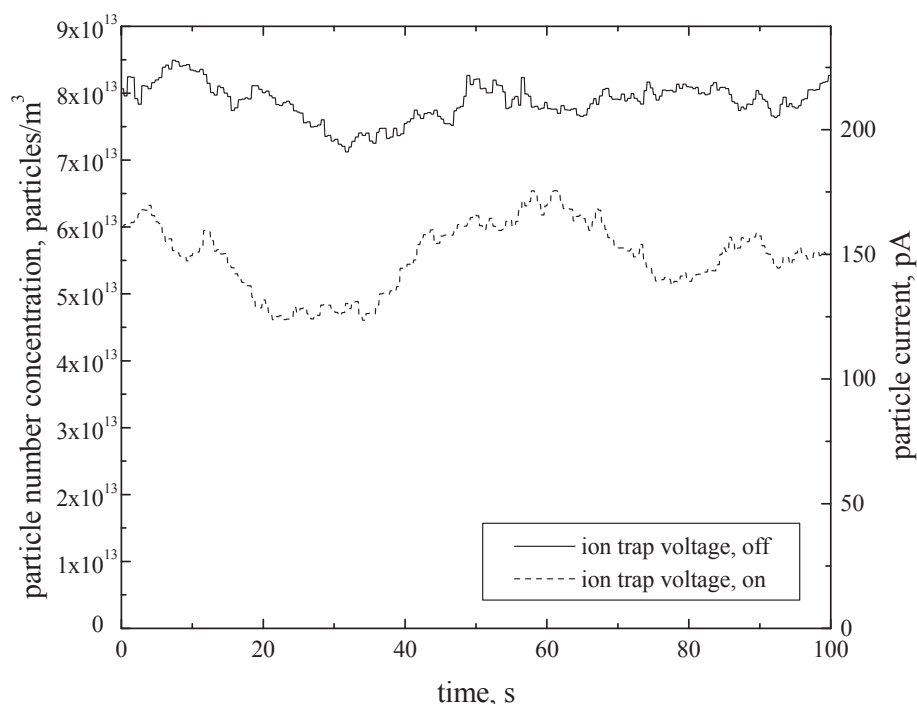
รูปที่ 6.10 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นจำนวนของไอออนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านทางออกของชุดดักจับไอออนที่แรงดันและอัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนทางด้านทางออกกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดที่อัตราการไหลของไอออนต่างๆ



รูปที่ 6.12 การเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของชุดดักจับไอออนที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 6.13 สัญญาณกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่วัดได้ที่ทางออกของชุดดักจับไอออนในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าและไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ในทางทฤษฎีด้วยสมการของ Deutsch-Anderson จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีความแตกต่างของข้อมูลระหว่างการทดลองและการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 100 โวลต์ ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากว่าสมการของ Deutsch-Anderson ไม่ได้คิดรวมผลของการผสมกันปั่นป่วน (turbulence mixing) โดยการพัดพาของสนามไฟฟ้า (electric wind) และการแพร่กระจายของไอออน (ion turbulent diffusion) จึงนำไปสู่ความแตกต่างกันได้

รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่วัดได้ที่ทางออกของชุดดักจับไอออนในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าและไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยในการศึกษานี้จะใช้แหล่งอนุภาคที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ในการทดสอบ กำหนดให้อัตราการไหล 10 ลิตร ต่อ นาที และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 150 โวลต์ จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่วัดได้ในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 5.57×10^{13} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร และในกรณีที่ไม่มีจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 7.87×10^{13} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะสอดคล้องกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือ 149.45 และ 211.27 พิโคแอมป์ ตามลำดับ โดยจะสามารถอธิบายได้ว่าในกรณีที่ไม่มีจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดดักจับไอออน ไอออนจะเข้าไปในชุดตรวจวัดไอออนและถูกวัดไปพร้อมกับอนุภาคที่มีประจุ และในทางตรงกันข้าม เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดดักจับไอออน ไอออน

จะถูกตกตะกอนภายในชุดดักจับไอออนจึงทำให้เฉพาะอนุภาคที่มีประจุสามารถผ่านออกไปได้ ดังนั้น สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงเป็นกระแสไฟฟ้าเฉพาะของอนุภาคที่มีประจุเท่านั้น

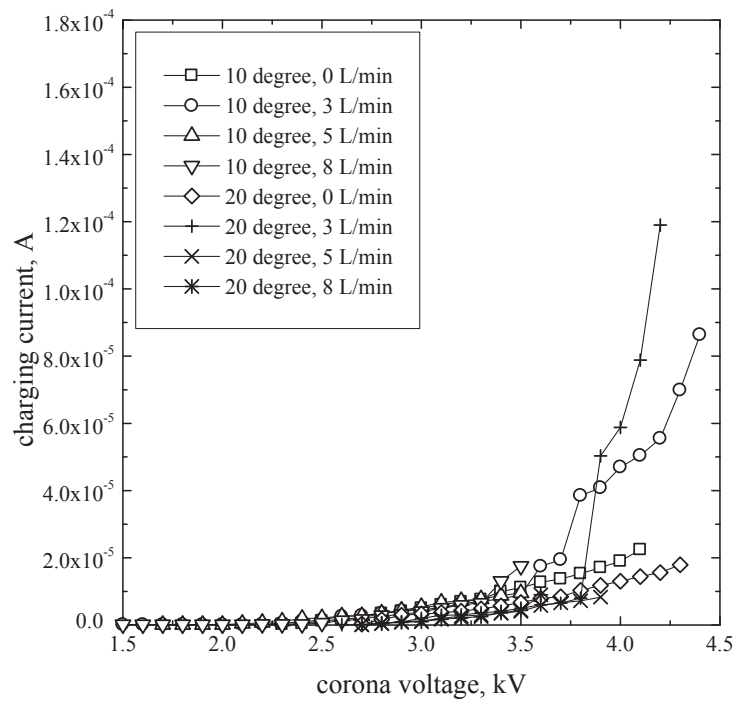
6.3 สมรรถนะของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค

6.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค

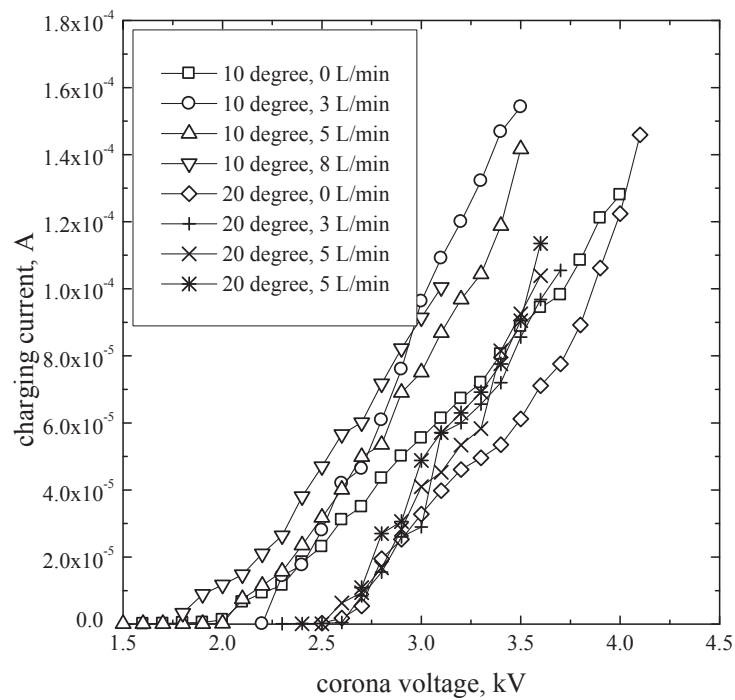
รูปที่ 6.14 แสดงกระแสของการให้ประจุ (charging current) ที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของแรงดันโคโรนาบวกและลบที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดเข็มโคโรนาของชุดให้ประจุ จากรูปที่ 6.14 พบว่าค่ากระแสของการให้ประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคโรนาเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อองศาของมุมอิเล็กโทรดเข็มเพิ่มขึ้นจาก 10 องศา เป็น 20 องศา ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากความเครียดของสนามไฟฟ้าภายในพื้นที่การให้ประจุไฟฟ้ามีค่าเล็กน้อยสำหรับองศาของมุมขั้วอิเล็กโทรดที่โตขึ้น โดยกระแสของการให้ประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสของการให้ประจุสำหรับอิเล็กโทรดเข็ม 10 องศา จะมีค่าสูงกว่าอิเล็กโทรดเข็ม 20 องศาที่แรงดันโคโรนาเดียวกัน จากรูปยังแสดงให้เห็นว่าเกิดประกายไฟ (spark over) ขึ้นที่แรงดันโคโรนาบวกที่สูงกว่า 4.1 กิโลโวลต์ และที่แรงดันโคโรนาลบที่สูงกว่า 4 กิโลโวลต์ สำหรับขั้วอิเล็กโทรดเข็ม 10 องศา และเกิดประกายไฟขึ้นที่แรงดันโคโรนาบวกที่สูงกว่า 4.3 กิโลโวลต์ และที่แรงดันโคโรนาลบที่สูงกว่า 4.1 กิโลโวลต์ สำหรับขั้วอิเล็กโทรดเข็ม 20 องศา โดยแรงดันโคโรนาที่สูงกว่าค่าเหล่านี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่สามารถควบคุมได้และไม่สามารถจะทำการวัดได้ และจากรูปที่ 6.14 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (corona onset voltage) สำหรับโคโรนาบวกมีค่าเท่ากับ 2.4 และ 2.7 กิโลโวลต์ ที่มุมของขั้วอิเล็กโทรดเข็ม 10 และ 20 องศา ตามลำดับ และสำหรับโคโรนาลบมีค่าเท่ากับ 2.0 และ 2.6 กิโลโวลต์ ที่มุมของขั้วอิเล็กโทรดเข็ม 10 และ 20 องศา ตามลำดับ ยังพบว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาเพิ่มขึ้นตามองศาของมุมอิเล็กโทรดเข็มที่เพิ่มขึ้น และยังสังเกตได้ว่าค่ากระแสของโคโรนาลบจะมีค่าค่อนข้างสูงกว่ากระแสของโคโรนาบวก เนื่องจากไอออนลบมีความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า (electrical mobility of ions) สูงกว่าไอออนบวก ค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของไอออนจะมีค่าเท่ากับ $1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$ สำหรับไอออนบวก และมีค่าเท่ากับ $1.425 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$ สำหรับไอออนลบ (Reischl et al., 1996) ดังนั้น ไอออนลบจะมีอัตราการตกกระทบและสะสมตัวเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิตอยู่บนขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกของชุดให้ประจุไฟฟ้ามากกว่าไอออนบวก

6.3.2 กระแสไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค

รูปที่ 6.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไอออนกับแรงดันโคโรนาที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน โดยจะทำการประเมินค่ากระแสไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าทั้งไอออนบวกและลบที่มุมของอิเล็กโทรดเข็ม 10 และ 20 องศา อัตราการไหล 3, 5 และ 8 ลิตร ต่อ นาที และแรงดันโคโรนาในช่วง 1 ถึง 5 กิโลโวลต์ จากรูปแสดงให้เห็นว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาที่โคโรนาบวกที่สูงกว่า 1.8 กิโลโวลต์ ที่อัตราการไหล 3



(ก) ไอออนบวก



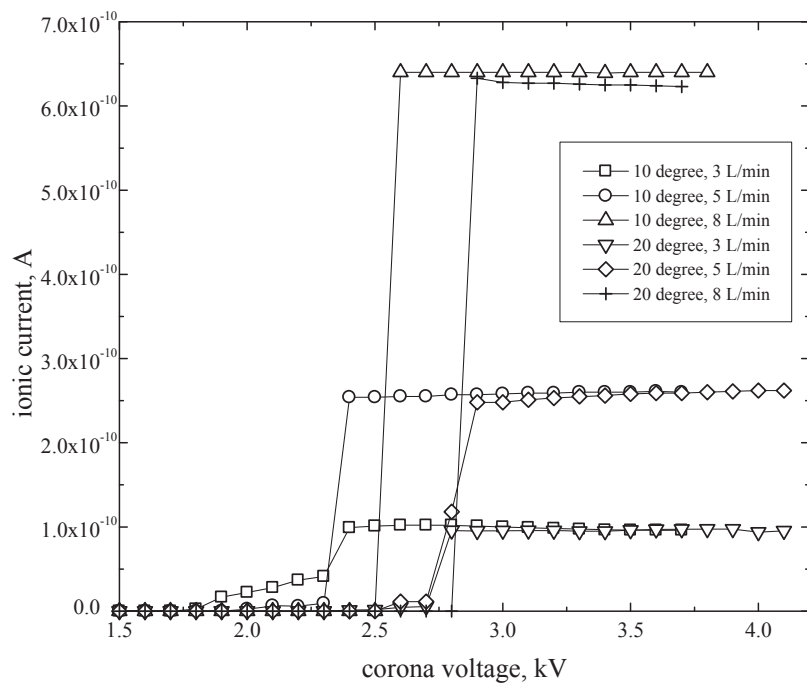
(ข) ไอออนลบ

รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาค
(Intra and Tippayawong, 2010)

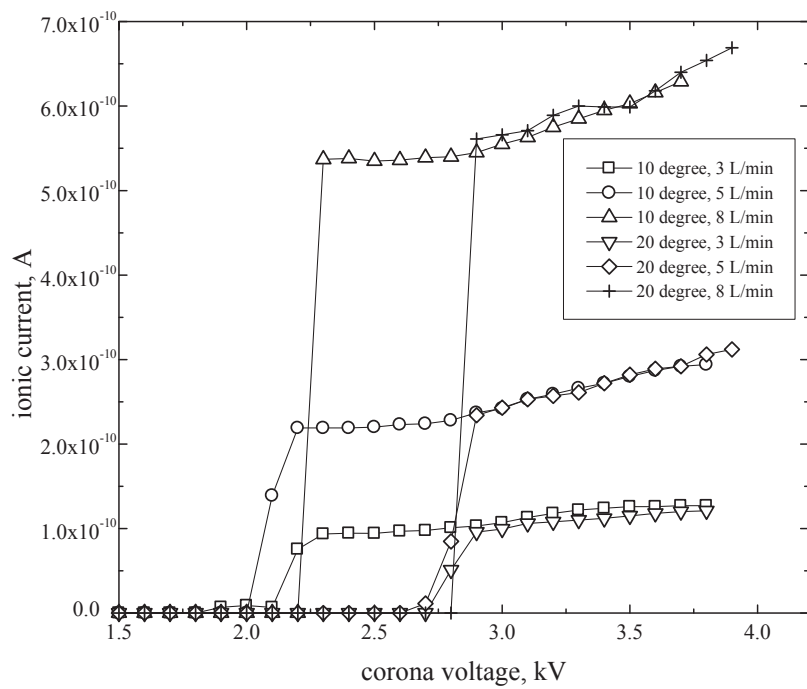
ลิตรต่อ นาที่ 2.0 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที่ 2.5 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที่ และสำหรับแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาลบที่สูงกว่า 1.8 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 3 ลิตร ต่อ นาที่ 2.0 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที่ 2.2 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที่สำหรับเข็มโครนา 10 องศา และจะเกิดประกายไฟขึ้นที่แรงดันโคโรนาบวกที่สูงกว่า 2.6 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 3 ลิตร ต่อ นาที่ 2.7 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที่ 2.8 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที่ และสำหรับแรงดันโคโรนาลบที่สูงกว่า 2.6 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 3 ลิตร ต่อ นาที่ 2.6 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที่ 2.8 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที่ สำหรับเข็มโครนา 20 องศา สำหรับแรงดันโคโรนาที่ต่ำกว่า 2 กิโลวัตต์ กระแสไอออนจะมีค่าต่ำมากซึ่งในช่วงนี้จะไม่เกิดการดิสชาร์จ และจากรูปจะเห็นว่ากระแสของไอออนที่ได้จากเข็มโครนาขนาด 10 องศา จะมีค่าค่อนข้างสูงกว่ากระแสของไอออนที่ได้จากเข็มโครนาขนาด 20 องศา ทั้งโคโรนาบวกและลบและที่อัตราการไหลสูงขึ้น กระแสของไอออนก็จะสูงขึ้นด้วย สำหรับในกรณีที่แรงดันเพิ่มขึ้น ค่ากระแสของไอออนบวกจะขึ้นอยู่กับแรงดันโคโรนาเฉพาะภายในช่วงของแรงดันที่จำกัด และที่แรงดันโคโรนาสูงกว่า ค่ากระแสของไอออนจะมีค่าคงที่เป็นอิสระจากแรงดันโคโรนา ในขณะที่เดียวกันค่ากระแสของไอออนลบจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแรงดันโคโรนาเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่าเมื่อแรงดันโคโรนาเพิ่มขึ้น ทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าและกระแสไอออนภายในชุดให้ประจุมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียของไอออน (ion loss) เนื่องจากไฟฟ้าสถิต (electrostatic loss) ภายในชุดให้ประจุมากขึ้น โดยการสูญเสียของไอออนเนื่องจากไฟฟ้าสถิตถูกนิยามไว้คืออัตราส่วนของค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุต่อค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่เกิดขึ้นภายในชุดให้ประจุ

6.3.3 ความเข้มข้นจำนวนของไอออนและการทะลุผ่านของไอออน

ประสิทธิภาพการให้ประจุของอนุภาค (charging efficiency) จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนภายในชุดให้ประจุ ซึ่งค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการให้ประจุสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนจะเป็นสัดส่วนกับกระแสของไอออน รูปที่ 6.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นจำนวนไอออนกับแรงดันโคโรนาภายในพื้นที่อัดประจุของชุดให้ประจุ จากรูปพบว่ากระแสไอออนเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มแรงดันโคโรนา โดยเมื่อแรงดันโคโรนาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนและความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่าอัตราการให้ประจุที่สูง ความเข้มข้นจำนวนของไอออนภายในชุดให้ประจุมีค่าลดลงเมื่อองศาของมุมอิเล็กโทรดเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่ 10 องศา มีค่าสูงกว่า 20 องศา ประมาณ 1.5 เท่า และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนลบมีค่าสูงกว่าไอออนบวก รูปที่ 6.17 แสดงกราฟความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันโคโรนาองศาของมุมหัวอิเล็กโทรดเข็ม และอัตราการไหลของอากาศ จากรูปพบว่าค่ากระแสของไอออนสูงสุดที่วัดได้จากลูกถ้วยพาราเจย์สำหรับอิเล็กโทรดเข็ม 10 องศา มีค่าเท่ากับ 6.4×10^{-10} และ

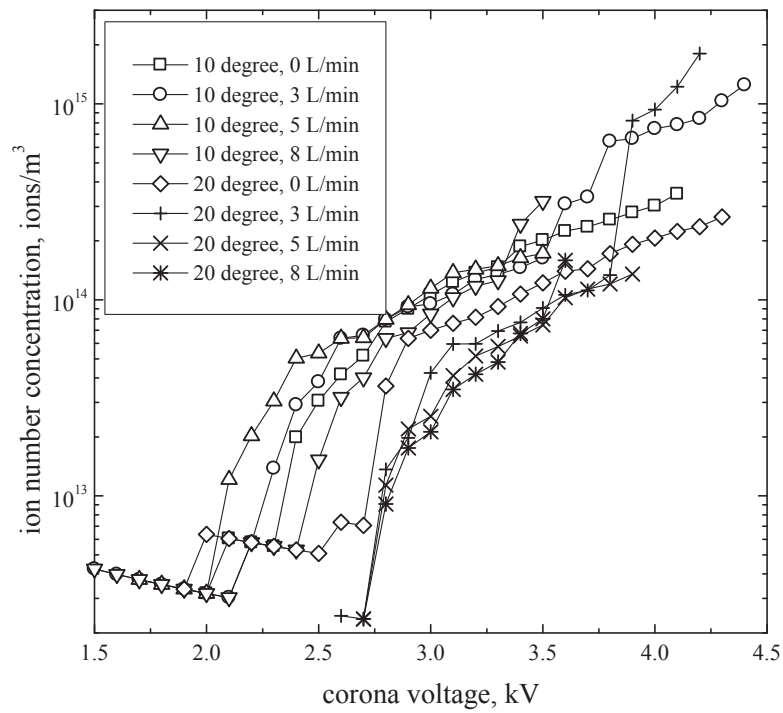


(ก) ไอออนบวก

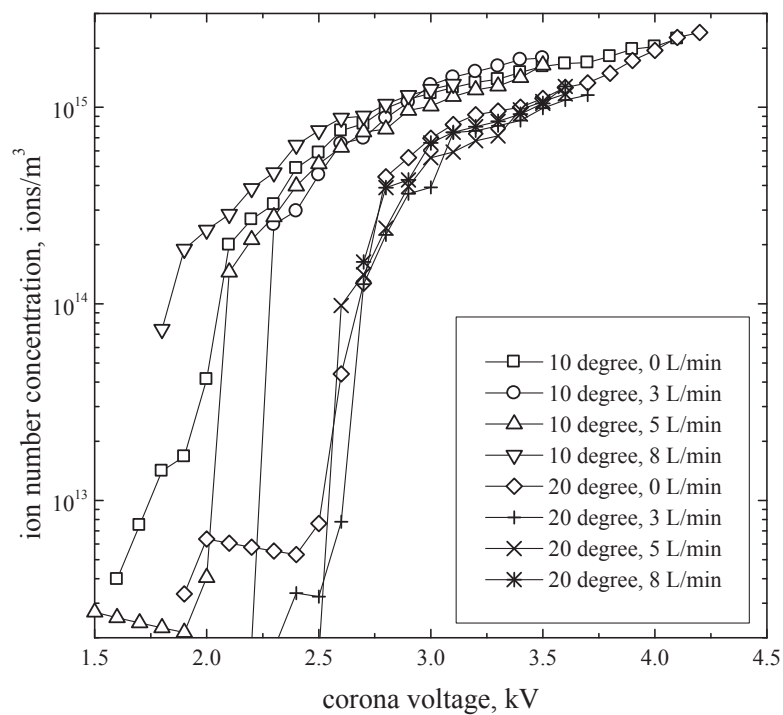


(ข) ไอออนลบ

รูปที่ 6.15 การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไอออนกับแรงดันโคโรนาที่ทางออกของชุดให้ประจุไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน (Intra and Tippayawong, 2010)

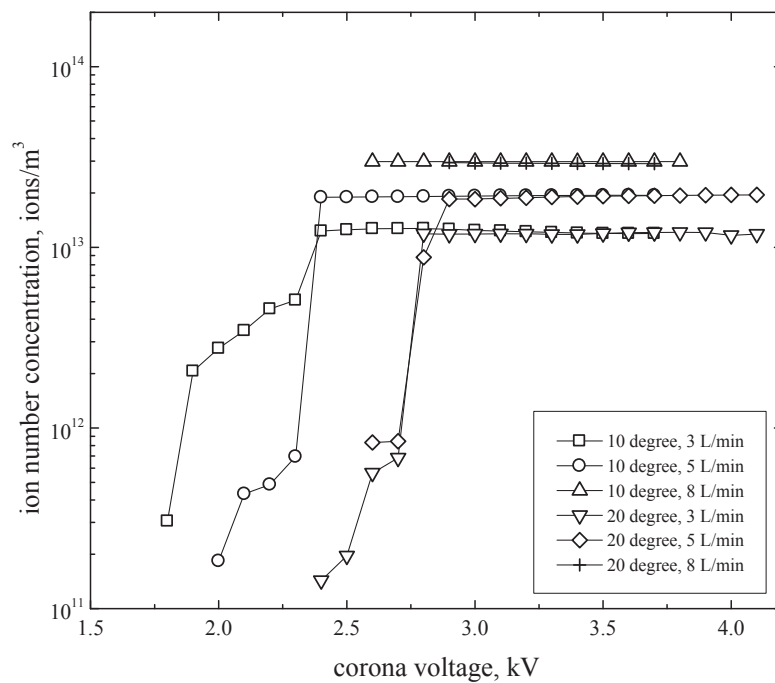


(ก) ไอออนบวก

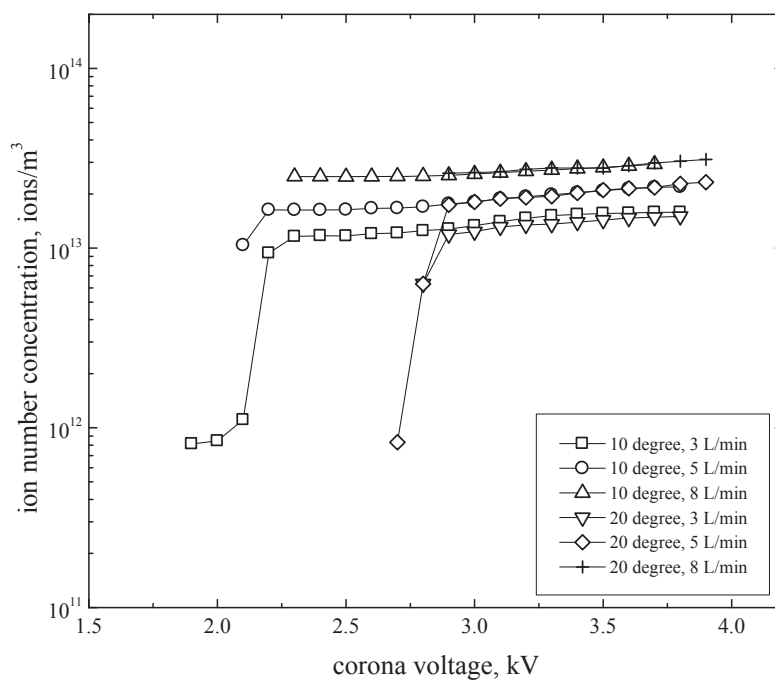


(ข) ไอออนลบ

รูปที่ 6.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นจำนวนไอออนกับแรงดันโคโรนาภายในพื้นที่อัด
ประจุของชุดให้ประจุ (Intra and Tippayawong, 2010)



(ก) ไอออนบวก

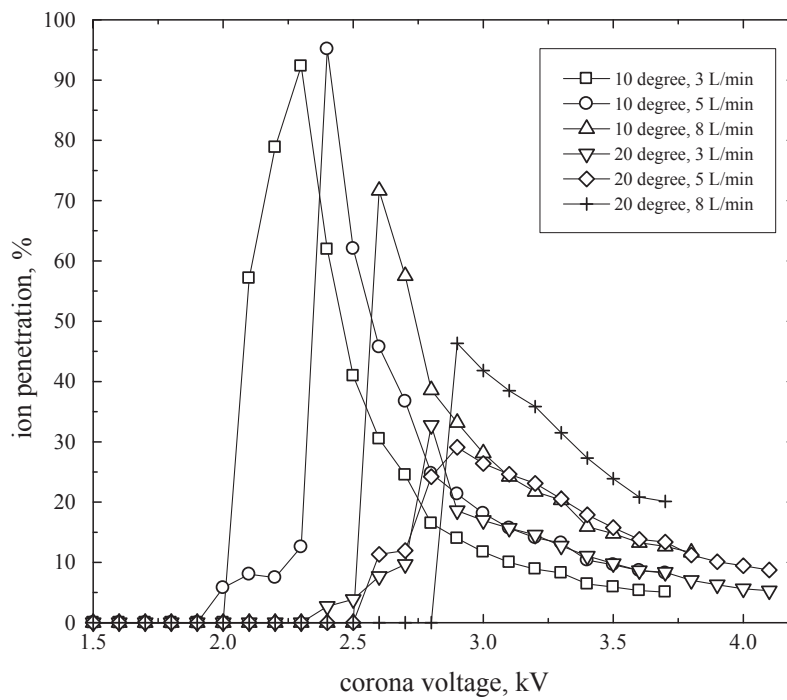


(ข) ไอออนลบ

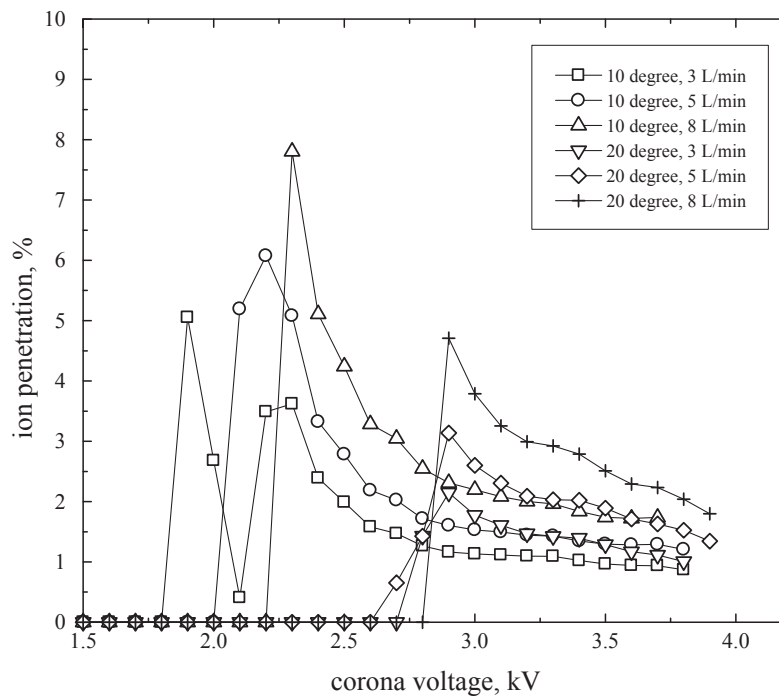
รูปที่ 6.17 กราฟความเข้มข้นจำนวนของไอออนที่ทางออกของชุดให้ประจุที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันโคโรนา องศาของมุมหัวอิเล็กโทรดเข็ม และอัตราการไหลของอากาศ (Intra and Tippayawong, 2010)

6.29×10^{-10} แอมป์ จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนเท่ากับ 2.98×10^{13} และ 2.93×10^{13} ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นที่แรงดันโคโรนา 2.9 และ 3.7 กิโลโวลต์ สำหรับสำหรับไอออนบวกและลบ และอัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที ตามลำดับ สำหรับอิเล็กโทรดเข็ม 20 องศา ค่ากระแสของไอออนสูงสุดที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 6.25×10^{-10} และ 6.69×10^{-10} แอมป์ และสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนเท่ากับ 2.92×10^{13} และ 3.11×10^{13} ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นที่แรงดันโคโรนา 3.4 และ 3.9 กิโลโวลต์ สำหรับสำหรับไอออนบวกและลบ และอัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ค่ากระแสของการให้ประจุของอิเล็กโทรดที่ 10 องศาที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกันจะมีค่าเท่ากับ 4.1×10^{-6} และ 9.82×10^{-5} แอมป์ จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนภายในชุดให้ประจุเท่ากับ 8.99×10^{13} และ 1.688×10^{15} ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร สำหรับไอออนบวกและลบ ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันกระแสของการให้ประจุของอิเล็กโทรดที่ 20 องศาที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกันจะมีค่าเท่ากับ 5.7×10^{-6} และ 1.06×10^{-4} แอมป์ จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนภายในชุดให้ประจุเท่ากับ 1.07×10^{14} และ 1.73×10^{15} ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร สำหรับไอออนบวกและลบ ตามลำดับ

รูปที่ 6.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการทะลุผ่านไอออนของปลายเข็มโคโรนาที่ 10 และ 20 องศา ที่แรงดันโคโรนาบวกและลบและที่อัตราการไหลต่างๆ พบว่าที่แรงดันโคโรนาบวกจะให้ค่าการทะลุผ่านไอออนได้สูงกว่าแรงดันโคโรนาลบของปลายเข็มโคโรนาทั้ง 10 และ 20 องศา ค่าการผ่านทะลุของไอออนมีค่าลดลงเมื่อแรงดันโคโรนามีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียของไอออนเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น และยังพบว่าที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นค่าการทะลุผ่านไอออนมีค่าค่อนข้างเพิ่มขึ้น เพราะว่าไอออนสามารถโอนย้ายจากชุดให้ประจุด้วยการไหลของอากาศได้ง่ายมาก และสามารถสรุปได้ว่าที่แรงดันโคโรนาบวกปลายเข็มโคโรนา 10 องศา ให้ค่าการทะลุผ่านของไอออนได้สูงสุดที่แรงดันโคโรนา 2.4 กิโลโวลต์ ที่อัตราการไหล 5 ลิตร ต่อ นาที และที่ปลายเข็มโคโรนา 20 องศา ให้ค่าการทะลุผ่านของไอออนได้สูงสุดที่แรงดันโคโรนา 2.9 กิโลโวลต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที และที่แรงดันโคโรนาลบ ปลายเข็มโคโรนา 10 องศา ให้ค่าการทะลุผ่านของไอออนได้สูงสุดที่แรงดันโคโรนา 2.3 กิโลโวลต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที และที่ปลายเข็มโคโรนา 20 องศา ให้ค่าการทะลุผ่านของไอออนได้สูงสุดที่แรงดันโคโรนา 2.9 กิโลโวลต์ ที่อัตราการไหล 8 ลิตร ต่อ นาที เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าสูงของไอออนลบ ทำให้ค่าการผ่านทะลุของไอออนบวกมีค่าสูงกว่าไอออนลบสำหรับหัวอิเล็กโทรดเข็ม 10 และ 20 องศา จากรูปที่ 6.18 จะพบว่าค่าการผ่านทะลุของไอออนสูงสุดที่อิเล็กโทรดเข็ม 10 องศา มีค่าเท่ากับ 95.1 และ 7.8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับไอออนบวกและลบ ตามลำดับ และค่าการผ่านทะลุของไอออนสูงสุดที่อิเล็กโทรดเข็ม 20 องศา มีค่าเท่ากับ 46.3 และ 4.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับไอออนบวกและลบ ตามลำดับ



(ก) ไอออนบวก



(ข) ไอออนลบ

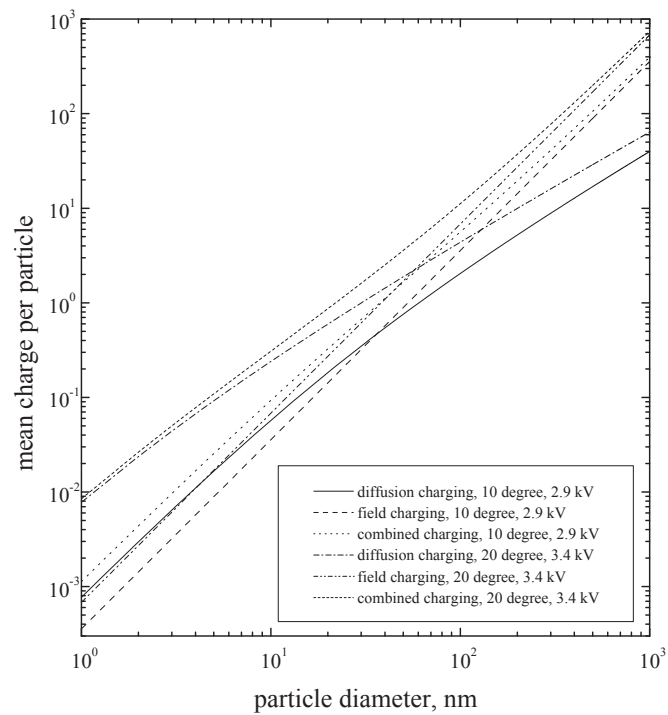
รูปที่ 6.18 การเปลี่ยนแปลงค่าการทะลุผ่านไอออนของปลายเข็มโคโรนาที่ 10 และ 20 องศา ที่แรงดันโคโรนาบวกและลบและที่อัตราการไหลต่างๆ

6.3.4 การวิเคราะห์จำนวนประจุของอนุภาค

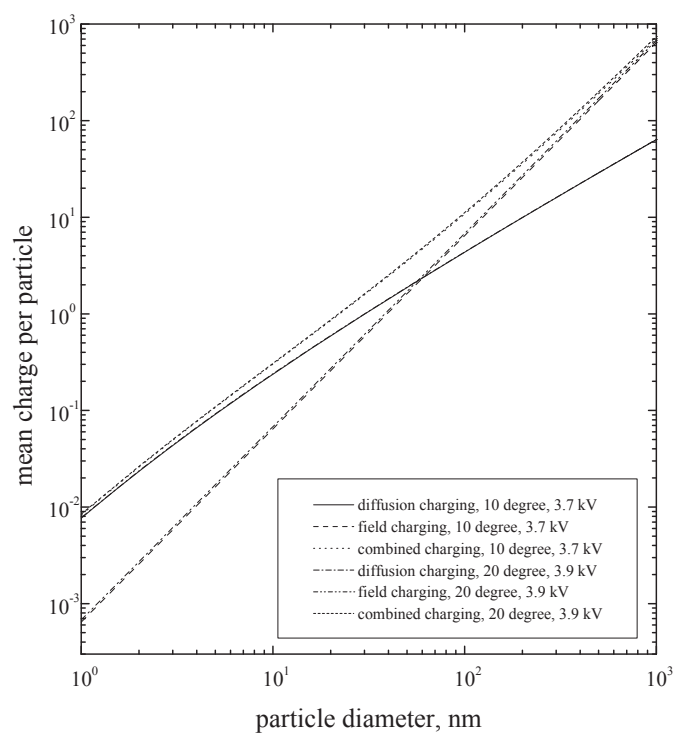
จากรูปที่ 6.18 จะเห็นว่าค่าการผ่านทะลุของไอออนสูงสุดของชุดให้ประจุไฟฟ้าสำหรับ ซีวีเล็กโทรดเข็ม 10 และ 20 องศา จะเกิดขึ้นที่แรงดันโคโรนา 2.9 และ 3.4 กิโลโวลต์ และ สอดคล้องกับกระแสการให้ประจุ 4.1×10^{-6} และ 5.7×10^{-6} แอมป์ ตามลำดับ สำหรับไอออนบวก และที่แรงดันโคโรนา 3.7 และ 3.9 กิโลโวลต์ จะสอดคล้องกับกระแสการให้ประจุ 9.82×10^{-5} และ 1.06×10^{-4} แอมป์ ตามลำดับ สำหรับไอออนลบ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่เหมาะสมและจะใช้ในการประมาณค่าจำนวนประจุของอนุภาคด้วยใช้สมการที่ 2.50 และ 2.53 รูปที่ 6.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประจุของอนุภาคกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับการให้ประจุแบบแพร่กระจาย สนาม และผสม โดยจะพิจารณาอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 1,000 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงขนาดที่ต้องการวัดสำหรับการออกแบบนี้ จากรูปแสดงให้เห็นว่าจำนวนประจุของการให้ประจุแบบแพร่กระจายและสนามเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยประจุที่ได้รับจะเป็นสัดส่วนกับฟังก์ชันแบบเส้นตรง (d) สำหรับการให้ประจุแบบแพร่กระจายและฟังก์ชันกำลังสอง (d²) สำหรับการให้ประจุแบบสนาม โดยจำนวนประจุของอนุภาคทั้งการแพร่กระจายและสนามจะมีค่าเท่ากันที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 100 นาโนเมตร และจากรูปยังสังเกตได้ว่าค่าจำนวนประจุทั้งการแพร่กระจาย สนาม และผสมของอนุภาคของซีวีเล็กโทรดเข็ม 10 องศา จะมีค่าสูงกว่าซีวีเล็กโทรดเข็ม 20 องศา เล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าซีวีเล็กโทรดเข็ม 10 องศา จะให้ประสิทธิภาพในการให้ประจุสูงกว่าซีวีเล็กโทรดเข็ม 20 องศา

6.3.5 การประมาณค่าการผ่านทะลุของอนุภาคที่มีประจุ

รูปที่ 6.20 แสดงค่าการผ่านทะลุของอนุภาคของชุดให้ประจุเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในช่วง 1 ถึง 1,000 นาโนเมตร จากรูปจะพบว่าค่าการผ่านทะลุจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าที่สูงกว่าของอนุภาคที่มีประจุลบ จึงทำให้อนุภาคที่มีประจุลบจะมีค่าการผ่านทะลุสูงกว่าอนุภาคที่มีประจุบวก ซึ่งหมายความว่าอนุภาคที่มีประจุลบจะมีค่าการสูญเสียภายในชุดให้ประจุไฟฟ้าสูงกว่าอนุภาคที่มีประจุบวก และจากรูปยังสังเกตได้ว่าค่าการผ่านทะลุของอนุภาคที่มีประจุสำหรับซีวีเล็กโทรดเข็ม 10 องศา จะมีค่าสูงกว่าซีวีเล็กโทรดเข็ม 20 องศา ทั้งอนุภาคที่มีประจุบวกและลบ ซึ่งหมายความว่าซีวีเล็กโทรดเข็ม 10 องศา จะให้ประสิทธิภาพการให้ประจุสูงกว่าซีวีเล็กโทรดเข็ม 20 องศา

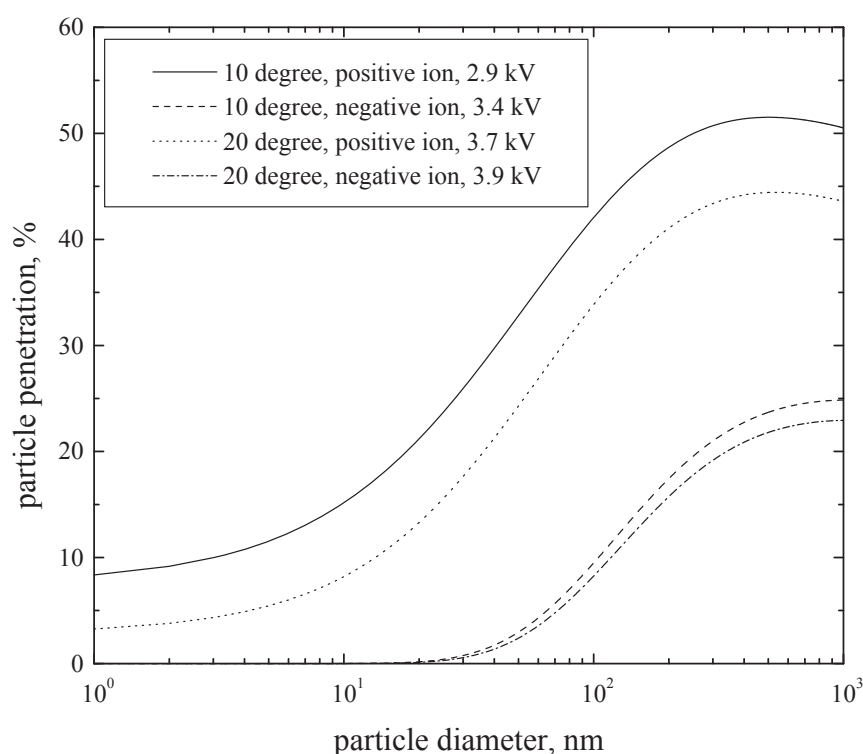


(ก) ไอออนบวก



(ข) ไอออนลบ

รูปที่ 6.19 การเปลี่ยนแปลงของจำนวนประจุของอนุภาคกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
สำหรับการให้ประจุแบบแพร่กระจาย สนาม และผสม



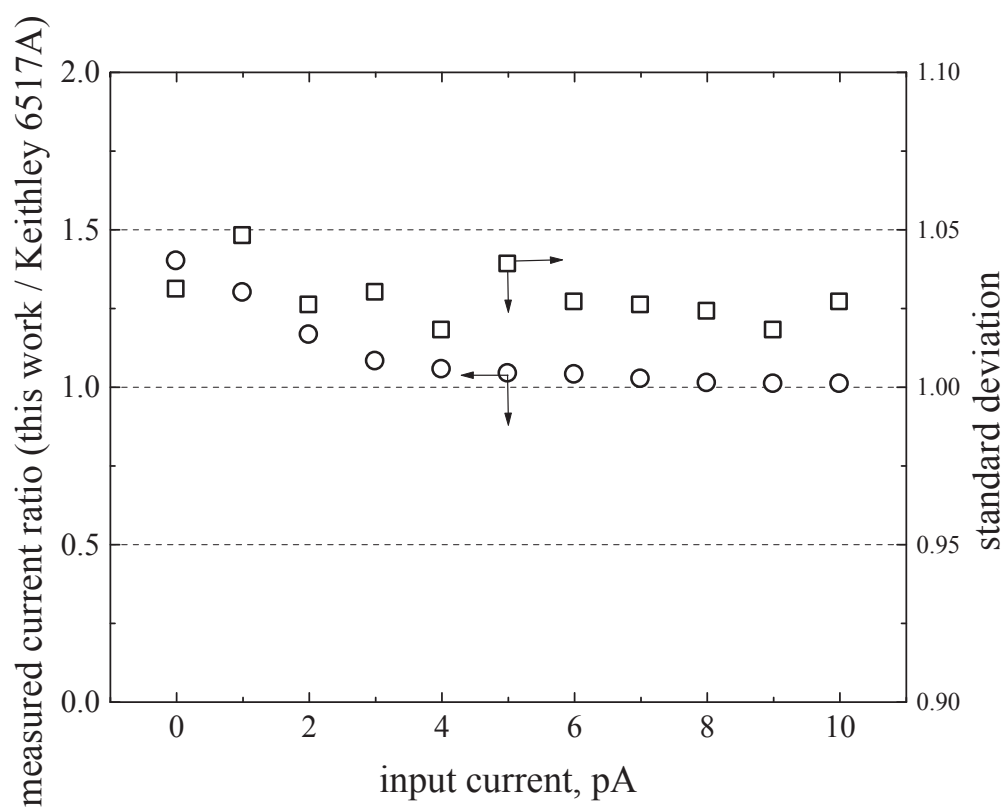
รูปที่ 6.20 ค่าการผ่านทะลุของอนุภาคของชุดให้ประจุเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

6.4 สมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในการศึกษานี้จะใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าระดับต่ำหรือวงจรอนุกรมดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ในการทดสอบสมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น เมื่อป้อนแรงดันอินพุตในช่วง 0 ถึง 100 มิลลิโวลต์ ให้กับวงจรจะได้กระแสไฟฟ้าที่ออกมาในช่วง 0 ถึง 10 พิโคแอมป์ โดยกระแสไฟฟ้านี้จะถูกจ่ายให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ได้ผลค่าต่ำสุด (Minimum) สูงสุด (Maximum) และค่าเฉลี่ย (Average) ของแรงดันเอาต์พุตของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ค่าอินพุตต่างๆ เมื่อนำมาแปลงเป็นกระแสอินพุต โดยพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของกระแสไฟฟ้าที่วัดจะอยู่ในช่วง 1.018 ถึง 1.048 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูงที่กระแสต่ำกว่า 5 พิโคแอมป์ (ตารางที่ 6.1) การเปรียบเทียบขึ้นกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวงจรพิโคแอมมิเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยรูปที่ 6.21 แสดงการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A โดยสัดส่วนระหว่างกระแสจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นต่ออิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A มีค่าอยู่ในช่วง 1.00 ถึง 1.40 ซึ่งความแตกต่างระหว่างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A จะอยู่ที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และรูปที่ 6.22 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้จากออส-

ตารางที่ 6.1 กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

Input current (pA)	Minimum current (pA)	Maximum current (pA)	Average current (pA)	Standard deviation
0	-0.136	0.500	0.174	1.031
1	0.801	1.392	1.133	1.048
2	1.626	1.923	1.756	1.026
3	2.304	2.699	2.455	1.030
4	3.324	3.608	3.453	1.018
5	4.600	5.180	4.852	1.039
6	5.584	5.870	5.748	1.027
7	6.587	6.874	6.723	1.026
8	7.523	7.769	7.648	1.024
9	8.411	8.625	8.523	1.018
10	9.655	9.909	9.786	1.027



รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A

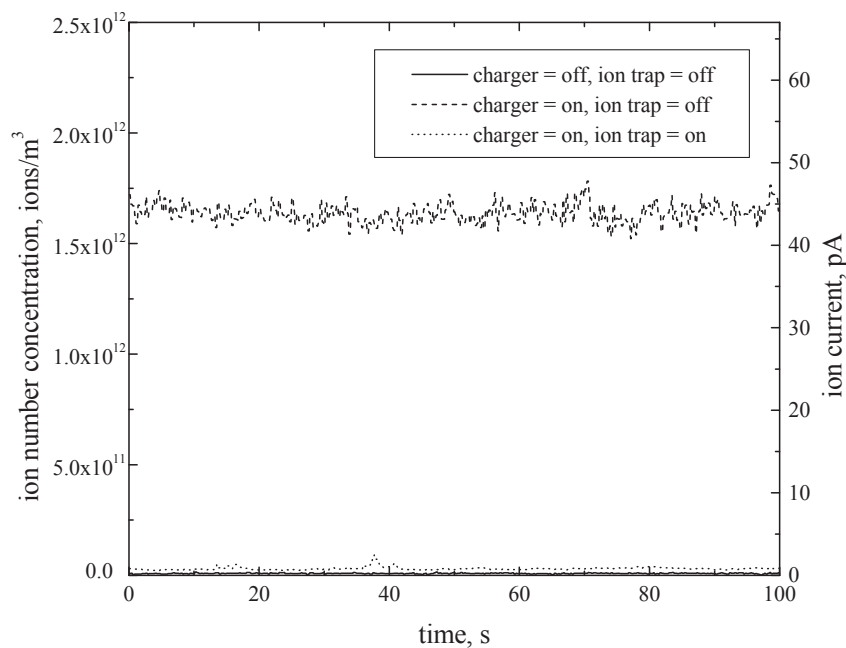


รูปที่ 6.22 สัญญาณกระแสไฟฟ้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้จากออสซิลอสโคป

ซิลอสโคปในกรณีที่ใส่และไม่ใส่ตัวกรองความถี่ต่ำ (ค่า Vdiv และ tdiv ของออสซิลอสโคปถูกตั้งค่าไว้ 5 มิลลิโวลต์และ 500 มิลลิวินาที) จากรูปที่ 6.22 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่วงจรไม่ได้ใส่ตัวกรองความถี่ต่ำ (กราฟด้านบน) สัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เมื่อใส่ตัวกรองความถี่ต่ำเข้าไปในวงจรพบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้มีความราบเรียบขึ้น (กราฟด้านล่าง) ซึ่งตัวกรองความถี่ต่ำจะช่วยลดสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการวัดได้

6.5 สมรรถนะการวัดโอออนและอนุภาคของเครื่องวิเคราะห์ชนิดแบบ

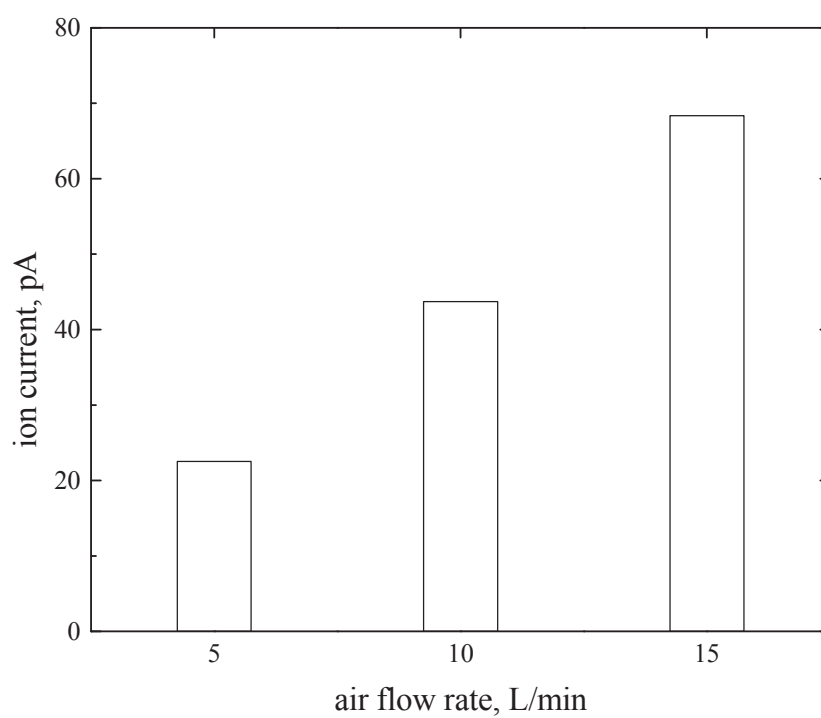
จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 เกี่ยวกับการทดสอบสมรรถนะการวัดของเครื่องวิเคราะห์ชนิดแบบ โดยจะได้ทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายอนุภาคที่สร้างขึ้น รูปที่ 6.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นจำนวนของโอออนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยพาราदैย์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยให้ระบบทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่ชุดให้ประจุไฟฟ้าเท่ากับ 3.5 กิโลโวลต์ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดดักจับโอออนเท่ากับ 150 โวลต์ อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตร ต่อ นาที และความดันบรรยากาศ 1 บาร์ และจากรูปที่ 6.23 ยังพบว่าไม่มีสัญญาณกระแสไฟฟ้าในกรณีที่ไม่ได้จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดให้ประจุไฟฟ้าและชุดดักจับโอออน และในกรณีที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดให้ประจุไฟฟ้าแต่ไม่ได้จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดดักจับโอออน พบว่ามีสัญญาณกระแสไฟฟ้าวัดได้จากลูกถ้วยพาราदैย์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 47 พิคโอแอมป์ และสอดคล้องกับความเข้มข้นจำนวนของโอออนเท่ากับ 1.6×10^{12} โอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร ในทางตรงกันข้าม เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดให้ประจุไฟฟ้าและชุดดักจับโอออนจะทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับศูนย์



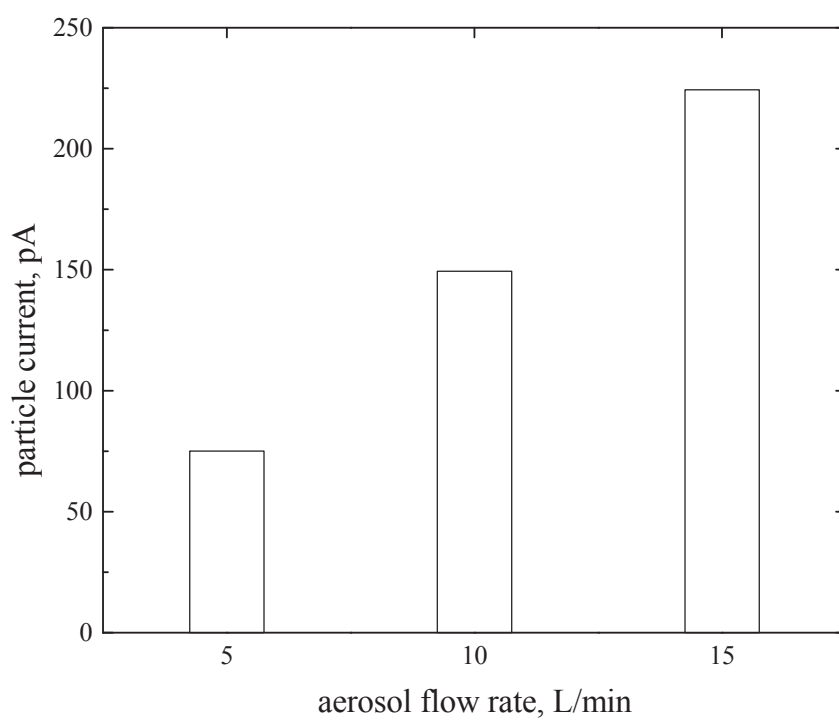
รูปที่ 6.23 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นจำนวนของไอออนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากลูกถ้วยพาราเคย์และวงจรถวลีกรโทรมิเตอร์

รูปที่ 6.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้จากวงจรถวลีกรโทรมิเตอร์กับอัตราการไหลของอากาศ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลจากตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลออยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 15 ลิตร ต่อ นาที จากรูปที่ 6.24 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้อยู่ในช่วง 22 ถึง 68 พิโคแอมป์ และสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนประมาณ 1.5×10^{12} ไอออน ต่อ ลูกบาศก์เมตร และยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลขึ้นจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าของไอออนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของของไหล จากผลการทดสอบการวัดไอออนพบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดกระแสไฟฟ้าของไอออน และความเข้มข้นจำนวนของไอออนได้

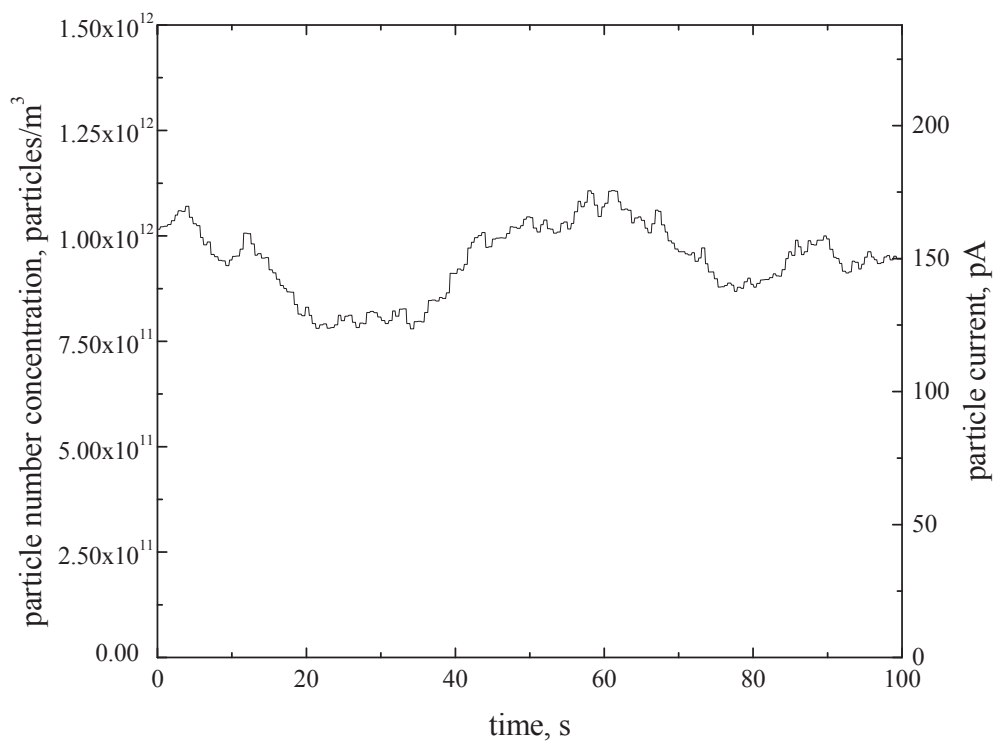
รูปที่ 6.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดได้กับอัตราการไหลของอนุภาค สัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดได้จากวงจรถวลีกรโทรมิเตอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง 75 ถึง 255 พิโคแอมป์ และจะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่ประมาณ 9.5×10^{11} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร และจากรูปเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลขึ้นจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดได้จากวงจรถวลีกรโทรมิเตอร์มีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากระแสไฟฟ้าของอนุภาคเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของของไหลเช่นเดียวกัน โดยอัตราการไหลของของไหลที่สูงขึ้น จะมีผลทำให้อนุภาคมีการตกสะสมตัวอยู่บนตัวกรองเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 6.26 แสดงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดจากวงจรถวลีกรโทรมิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่อัตราการไหล 10 ลิตร ต่อ นาที



รูปที่ 6.24 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของไอออนที่วัดได้จากวงจรวัดกระแสไฟฟ้ากับ อัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 6.25 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดได้จากวงจรวัดกระแสไฟฟ้ากับ อัตราการไหลของอนุภาค



รูปที่ 6.26 ค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนและสัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่วัดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์
โทรมิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากรูปที่ 6.26 ความเข้มข้นเชิงจำนวนและกระแสไฟฟ้าของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วง 0 ถึง 100 วินาที โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์เฉลี่ยเท่ากับ 150 พิโคแอมป์ และมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่ 176 และ 124 พิโคแอมป์ ตามลำดับ เมื่อสมมุติให้ อนุภาคมีประจุไฟฟ้าของอนุภาคเป็นแบบประจุเดียว ($n_p = 1$) จะได้ค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่ได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.5×10^{11} อนุภาค ต่อ ลูกบาศก์เมตร จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเครื่องวิเคราะห์ฯ ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคระดับนาโนเมตรได้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของบทนี้คือการสรุปผลการวิจัยที่ผ่านมาและให้ข้อเสนอแนะสำหรับการทำการวิจัยต่อไปในอนาคต โดยในหัวข้อแรกของบทนี้จะเป็นการสรุปผลการวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะของอุปกรณ์แต่ละส่วนของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบทั้งทฤษฎีและการทดลอง และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการทำการวิจัยในอนาคต ทั้งในส่วนของภาคทฤษฎีและการทดลอง

7.1 สรุปผลการวิจัย

7.1.1 สมรรถนะของชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่

ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบการทำงานต้นแบบชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ทั้งภาคทฤษฎีและการทดลอง โดยได้ทำการการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลักที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของชุดคัดแยกฯ เช่น อัตราการไหลของอนุภาค ระยะห่างระหว่างช่องเร่งกับแผ่นตกกระทบ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเร่ง โดยต้นแบบฯจะถูกทดสอบกับอนุภาคตัวอย่างเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการคัดแยกฯ และการสะสมตัวของอนุภาคบนแผ่นตกกระทบภายในชุดคัดแยกฯ จากผลการวิจัยพบว่าค่าประสิทธิภาพการคัดแยกฯ จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น และยังมีค่าลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเร่งลดลงอีกด้วย และได้นำเสนอและวิจารณ์ผลการทดลองของต้นแบบฯ และภาพถ่ายของอนุภาคที่สะสมตัวอยู่บนแผ่นตกกระทบ

7.1.2 สมรรถนะของชุดดักจับไอออน

ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดดักจับไอออนทั้งในส่วนภาคทฤษฎีและการทดลอง ในส่วนของภาคทฤษฎีได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายระยะการเคลื่อนที่ของไอออนและประสิทธิภาพการตกตะกอนของไอออนภายในชุดดักจับไอออน โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับแบบจำลองที่ได้มีการพัฒนาขึ้นโดยนักวิจัยหลายท่านซึ่งให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าสนใจ ในส่วนของภาคการทดลองได้ทำการทดลองโดยการชี้แหล่งจ่ายไอออนที่รู้ค่าจ่ายผ่านชุดดักจับไอออน เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของไอออนโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของไอออนที่ด้านทางเข้าและออกของชุดดักจับไอออน และได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน เช่น แรงดันไฟฟ้า อัตราการไหลของไหล และนอกนี้ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Deutsch-Anderson จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ

7.1.3 สมรรถนะของชุดให้ประจุไฟฟ้าของอนุภาค

ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบต้นแบบชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบโคโรนาเข็มที่ใช้หลักการการโคโรนาดีสชาร์จ โดยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าสถิตในเทอมของความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันภายในพื้นที่การให้ประจุของชุดให้ประจุไฟฟ้าทั้งแบบโคโรนาบวกและลบ โดยในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของมุมของอิเล็กโทรดเข็มที่ 10 และ 20 องศา ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของชุดให้ประจุอนุภาคโดยวิธีการหาค่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ได้นำเสนอวิธีการกึ่งการทดลองสำหรับการคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนภายในและทางออกของชุดประจุอนุภาคโดยอาศัยการวัดกระแสของไอออน และได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของของไหลและสนามไฟฟ้าภายในเครื่องอัดประจุด้วยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของเครื่องอัดประจุมากยิ่งขึ้น จากการวิจัยพบว่ากระแสการให้ประจุและความเข้มข้นของไอออนภายในชุดให้ประจุมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันโคโรนาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อค่าองศาของมุมอิเล็กโทรดเข็มเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 20 องศา และขนาดของกระแสของการให้ประจุสำหรับอิเล็กโทรดเข็ม 10 องศา จะมีค่าสูงกว่าอิเล็กโทรดเข็ม 20 องศาที่แรงดันโคโรนาเดียวกัน โดยค่าการผ่านทะลุของไอออนมีค่าลดลงเมื่อแรงดันโคโรนามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเครียดของสนามไฟฟ้าและกระแสไอออนภายในชุดให้ประจุมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียของไอออนเนื่องจากไฟฟ้าสถิตภายในชุดให้ประจุมากขึ้น และยังพบว่าที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นค่าการทะลุผ่านไอออนมีค่าค่อนข้างเพิ่มขึ้น เพราะว่าไอออนสามารถไถ่น้ำยาจากชุดให้ประจุด้วยการไหลของอากาศได้ง่ายมากเมื่อแรงดันโคโรนาเพิ่มขึ้น

7.1.4 สมรรถนะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และระบบบันทึกและประมวลผลข้อมูล

ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบต้นแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำของอนุภาค โดยวงจรต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นการผสมกันของวงจรแปลงผันกระแสไปเป็นแรงดันอย่างง่ายกับวงจรขยายแบบบิโอดกลับสองชั้น ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร โดยสมรรถนะโดยรวมของวงจรถูกทดสอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสระดับต่ำมาตรฐาน และเปรียบเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley โมเดล 6517A จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากวงจรต้นแบบมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน และได้ทำการพัฒนาระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูลอย่างง่าย เพื่อใช้ในการแปลงค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุไปเป็นค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค และยังใช้ในการควบคุมเครื่องวัดอัตราการไหลเชิงมวลและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ระบบจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านตัวแปลงผันจากมาตรฐาน RS-485 ไปเป็นมาตรฐาน RS-232 เข้ากับพอร์ตอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยค่าแรงดันอินพุตอนุภาคที่วัดได้จะสามารถเก็บบันทึกไว้ในรูปของแฟ้มข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ผลให้อยู่ในรูปเชิงกราฟิก ด้วยวิธีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยโปรแกรม Microsoft Visual Basic

7.1.5 สมรรถนะการวัดไอออนและอนุภาคของเครื่องวิเคราะห์ต้นแบบ

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะการวัดไอออนและอนุภาคของเครื่องวิเคราะห์ โดยใช้แหล่งจ่ายไอออนและแหล่งจ่ายอนุภาคนาโนตัวอย่างที่สร้างขึ้น เพื่อทดสอบสมรรถนะในการวัด โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลักๆที่มีผลต่อการวัดของเครื่องวิเคราะห์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลของของไหล จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลของของไหลมีผลต่อค่าของกระแสไฟฟ้าโดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลขึ้นจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และจากผลการทดสอบการวัดไอออนพบว่าเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนและอนุภาคได้ในช่วง 0 ถึง 10^{12} ไอออนหรืออนุภาค ต่อลูกบาศก์เมตร

7.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนาต่อในอนาคต

ในหัวข้อนี้จะให้ข้อเสนอแนะสำหรับการทำการวิจัยในอนาคตทั้งส่วนของทฤษฎี และการทดลอง โดยรายละเอียดมีดังนี้

7.2.1 สำหรับชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ ในการวิจัยนี้ใช้หลักการของการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยที่ให้ประสิทธิภาพการสะสมตัวที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้อจำกัดของหลักการนี้ก็คือมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจุดตัดบางส่วนสามารถผ่านออกไปได้ โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้จะได้รับประจุแบบหลายประจุ ซึ่งอนุภาคที่มีหลายประจุจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าเดียวกัน จึงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนั้น สำหรับการศึกษาดังกล่าวควรให้ความสนใจเกี่ยวกับผลของอนุภาคขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดบางส่วน ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องวิเคราะห์ ด้วยอนุภาคที่มีการกระจายขนาดเดียว

7.2.2 สมรรถนะการให้ประจุของชุดให้ประจุไฟฟ้าอนุภาคควรมีการทดสอบกับอนุภาคที่มีขนาดเดียว เพื่อหาการกระจายตัวของประจุขั้วเดียวสมดุล (equilibrium unipolar charge distribution) ของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องอัดประจุ และทำการทดสอบกับอนุภาคหลายๆชนิดที่ครอบคลุมช่วงขนาดทำให้เข้าใจถึงสมรรถนะของการอัดประจุ และควรมีการทดสอบเปรียบเทียบชุดให้ประจุไฟฟ้านี้กับการให้ประจุด้วยวิธีการอื่นๆ และควรมีการศึกษาและปรับปรุงสมรรถนะของชุดให้ประจุไฟฟ้าโดยการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในชุดให้ประจุไฟฟ้า เนื่องจากการให้ประจุแบบสนามสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่นี้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของความเป็นฉนวนของวัสดุ ซึ่งถ้าค่าคงที่ของความเป็นฉนวนแตกต่างจากค่าที่กำหนดไว้จะทำให้จำนวนประจุที่ได้มีค่าแตกต่างด้วย ดังนั้นในการวิจัยต่อไปควรมีการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับผลของค่าคงที่ของความเป็นฉนวนของอนุภาคต่อสมรรถนะการให้ประจุไฟฟ้าของอนุภาคของชุดให้ประจุนี้

7.2.3 อนุภาคในธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีลักษณะไม่เป็นทรงกลม ซึ่งรูปร่างของอนุภาคจะมีผลกระทบกับแรงเสียดลาก ความเร็วการตก และการได้รับประจุไฟฟ้า ซึ่งในการวิเคราะห์

ทฤษฎีของการทำวิจัยนี้ได้สมมุติให้อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรให้ความสนใจเกี่ยวกับผลของรูปร่างของอนุภาคที่มีต่อสมรรถนะโดยรวมของเครื่องวิเคราะห์ฯ

7.2.4 เพื่อให้สามารถวิเคราะห์จำนวนของอนุภาคที่มีค่าความเข้มข้นต่ำๆ และมีการตอบสนองในการวัดที่เร็วขึ้น ในการศึกษาต่อไปควรมีการปรับปรุงในเรื่องความละเอียดในการวัดและสัญญาณรบกวนต่างๆที่เกิดขึ้นในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

7.2.5 ในการศึกษาต่อไปควรมีการวัดและเปรียบเทียบผลของการวัดของเครื่องวิเคราะห์ฯ ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องวิเคราะห์อนุภาคมาตรฐานอื่นๆ เช่น SMPS EAS DMS และ EEPS เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือวัดมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Adachi, M., Kousaka, Y. and Okuyama, K., "Unipolar and bipolar diffusion charging of ultrafine aerosol particles", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 16, No.2, 109-123, 1985.
- Agrawal, J.K. and Sem, G.J., "Continuous Flow, Single-particle-counting Condensation Nucleus Counter", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 11, 343, 1980.
- Alonso, M., Martin, M.I. and Alguacil, F.J., "The measurement of charging efficiencies and losses of aerosol nanoparticles in a corona charger", *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, 203-214, 2006.
- Balachandran, S., Meena, B.R. and Khillare, P.S., "Particle size distribution and its elemental composition in the ambient air of Delhi", *Environment International*, Vol. 26, No. 1-2, 49-54, 2000.
- Biskos, G., "Theoretical and experimental investigation of the differential mobility spectrometer", Ph.D. Thesis, University of Cambridge, U.K., 2004.
- Boisdron, K. and Brock, J.R., "On the stochastic nature of the acquisition of electrical charge and radioactivity by aerosol particles", *Atmospheric Environment*, Vol. 4, 35-50, 1970.
- Bricard, J., "L'equilibre ionique de la basse atmosphere", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 54, No. 1, 39-52, 1949.
- Bricard, J., "La fixation des petits ions atmospheriques sur les aerosols ultra-fins", *Geofisica Pura e Applicata*, Vol. 51, 237, 1962.
- Chang, J., Kelly, A.J. and Crowley, J.M., *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.
- Chen, S-J., Liao, S-H., Jian, W-J. and Lin, C-C., "Particle size distribution of aerosol carbons in ambient air", *Environment International*, Vol. 23, No. 4, 475-488, 1997.
- Cunningham, E., "On the velocity of steady fall of spherical particles through fluid medium", *Proceeding of the Royal Society*, A-83, 357-365, 1910.
- Fierz, M., Scherrer, L. and Burtscher, H., "Real-time measurement of aerosol size distributions with an electrical diffusion battery", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 33, 1049 – 1060, 2002.
- Flagan, R. C., "History of Electrical Aerosol Measurement", *Aerosol Science Technology*, Vol. 28, 301-380, 1998.

- Fuchs, N.A., "On the charging of particles in atmospheric aerosols", *Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Serii Geograficheskaya i Geofizicheskaya*, Vol. 11, 341-348, 1947.
- Fuchs, N.A., "On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere", *Geofisica Pura e Applicata*, Vol. 56, 185-193, 1963.
- Fuchs, N.A. and Sutugin, A.G., "High-dispersed aerosols", *Topics in Current Aerosol Research*, Pergamon Press Inc., Elmsford, New York, Vol. 2, 1971.
- Gentry, J.W. and Brock, J.R., "Unipolar diffusion charging of small aerosol particles", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 47, 64-69, 1967.
- Gunn, R., "The statistical electrification of aerosols by ionic diffusion", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 10, 107-119, 1955.
- Hagwood, C., Sivathanu, Y. and Mulholland, G., "The DMA transfer function with Brownian motion a trajectory/Monte-Carlo approach", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 30, 40-61, 1999.
- Hernandez-Sierra, A., Alguacil, F.J. and Alonso, M., "Unipolar charging of nanometer aerosol particle in a corona ionizer", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, 733-745, 2003.
- Hinds, W.C., *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Particle size analyzers", *Journal of the Scientific and Technological Research Equipment Centre*, Vol. 11, 156-170, 2003.
- Intra, P., "Investigation of a submicron-particle inertial impactor for size-selective inlet of the electrical mobility spectrometer", *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 257 – 268, 2008.
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer", *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 110 – 119, 2009.
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer", *Journal of Electrostatics*, 2010, in press, 10.1016/j.elstat.2010.01.008.
- Johnson, T., Kaufman, S. and Medved, A., "Response of an Electrical Aerosol Detector based on a Corona Jet Charger", 6th Intl. ETH Conf. Nanoparticle Measurement, 19 - 21 August, Zurich, Switzerland, 2002.
- Kaufman, S.L. et al., "An Electrical Aerosol Detector based on the Corona-jet Charger", Poster P12-07, Abstract of 2002 AAAR, Charlotte, NC, 223, 2002.
- Keefe, D., Nolan, P.J. and Rich, T.Z., "Charge equilibrium in aerosols according to the Boltzmann law", *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 60A, 27-45, 1959.

- King, J. G., The Design of Cleanrooms for the Microelectronics Industry. in Cleanroom Design, edited by Whyte. W, John Wiley & Sons, Chichester, 1999.
- Kulon, J., Hrabar, S., Machowski, W. and Balachandran, W., "A Bipolar charge measurement system for aerosol characterization, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, 472-479, 2001..
- Lehtimäki, M., "Modified electrical aerosol detector", Aerosol in the mining and industrial work environments, Vol. 3 (edited by Marple, V.A., and Liu, B.Y.H.), Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, 1135 – 1143, 1983.
- Liu, B.Y.H. and Kapadia, A., "Combined field and diffusion charging of aerosol particles in the continuum regime", Journal of Aerosol Science, Vol. 9, 227-242, 1978.
- Liu, B.Y.H., Whitby, K.T. and Yu, H.H.S., "Diffusion charging of aerosol particles at low pressures", Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 4, 1592-1597, 1967.
- Marple, V. A. and Willeke, K., "Impactor design", Atmospheric Environment, Vol. 10, 891-896, 1976.
- Park, S.S., Lee, C.J. and Kim, S.W., "A Novel Ultrafine Particle Measurement System with an Electrometer", Proceedings of Circuits and Systems, 48th Midwest Symposium, Vol. 1, 227 – 230, 7 – 10 August, 2005.
- Parker, K.R., Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, New York, 1997.
- Peek, F. W., Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, McGraw Hill, New York, 1929.
- Pui, D.Y.H., "Experimental study of diffusion charging of aerosols", Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis, U.S.A., 1976.
- Thermo-System Inc., "Instruction Manual, Revision F, for Condensation Particle Counter, Model 3010", Minnesota, 2002.
- Thermo-System Inc., "Instruction Manual, Revision B, for Electrical Aerosol Detector, Model 3070A", Minnesota, 2005.
- Tippayawong, N., Vorayos, N., Suksamai, S. and Lee, A. L., "Sampling high concentration ambient particles", ESTECH 2002 (The IEST 48th Annual Technical Meeting and Exposition & the 16th ICCCS International Symposium on Contamination Control), 28 April - 1 May, Anaheim, California, USA, 2002.
- White, H.J., "Particle charging in electrostatic precipitation", AIEE Transaction, Vol. 70, 1186-1191, 1951.
- White, H.J., Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1963.

- Williams, P.I. 1999., "Construction and validation of a DMPS for aerosol characterization", Ph.D. Thesis, University of Manchester, U.K.
- Willeke, K. and Baron, P.A., Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- Wilson, W.E. et al., "Use of the Electrical Aerosol Detector as an Indicator for the Total Particle Surface Area Deposited in the Lung", Proceedings of 2004 ABWMA, paper #37, 2004.

ภาคผนวก ก

สรุปผลผลิตของโครงการ

ก.1. ผลผลิตของโครงการ

ผลผลิตส่งมอบของโครงการประกอบด้วย

ผลลัพธ์	ทางตรง (หน่วยนับ)	ทางอ้อม (หน่วยนับ)	ปีที่ได้
1. องค์ความรู้	1 เรื่อง		ปีที่ 2
2. กระบวนการใหม่			
3. เทคโนโลยีใหม่			
4. ต้นแบบ	1 ต้นแบบ		
• พร้อมใช้ (ผลิตภัณฑ์)			
• ต้องวิจัยและพัฒนาต่อ			
• ระดับห้องปฏิบัติการ	1		ปีที่ 2
5. คู่แข่งพาณิชย์			
6. ผู้สาธารณประโยชน์			
7. บทความทางวิชาการ	11 เรื่อง		
• ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ	5 (2 เรื่องอยู่ระหว่างการพิจารณา)		ปีที่ 2
• ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับภูมิภาค			
• ผลงานตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ			
• เอกสารประกอบการประชุม/สัมมนาระดับนานาชาติ	1		ปีที่ 1
• เอกสารประกอบการประชุม/สัมมนาระดับภูมิภาค			
• เอกสารประกอบการประชุม/สัมมนาในประเทศ	3		ปีที่ 1
• บทความในหนังสือพิมพ์และเอกสารอื่นๆ (เช่น จดหมายข่าว สื่อวิทยุ สื่อโทรทัศน์ การแถลงข่าว Media Forum นิทรรศการ/ การแสดงผลงาน)			
8. สิทธิบัตร/ลิขสิทธิ์/เครื่องหมายการค้า			
9. รางวัลและเกียรติบัตร			
10. การผลิตบุคลากร			

ผลลัพธ์	ทางตรง (หน่วยนับ)	ทางอ้อม (หน่วยนับ)	ปีที่ได้
● ประโยชน์เอก			
● ประโยชน์โท			
● ประโยชน์ตรี			
● อื่นๆ (โปรดระบุ).....			
11. เอกสารทางวิชาการ [Technical Paper]	1 เรื่อง		
● รายงานฉบับสมบูรณ์ [Final Report]	1		ปีที่ 2
● สรุปย่อทางเทคนิค[Technical Paper]			
12. หนังสือ/ตำราวิชาการ [Copyright]			
13. วิทยานิพนธ์			
14. จำนวนหลักสูตรการสอน			
15. จำนวนหลักสูตรการฝึกอบรม			
16. พัฒนาความสามารถของบุคลากรร่วมวิจัย			
● นักศึกษาร่วมโครงการ			
● นักวิจัยร่วมโครงการ			
● นักวิชาการ (วิศวกร/นักวิทยาศาสตร์/นักเศรษฐศาสตร์)			
● นักอุตสาหกรรม			

ก.2. รายละเอียดของผลผลิตสำคัญที่ได้

ก.2.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- Intra, P., "Investigation of a submicron-particle inertial impactor for size-selective inlet of the electrical mobility spectrometer", *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 257 – 268, 2008. มี impact factor = 0.0
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer", *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 110 – 119, 2009. ถูกบรรจุเข้าใน Journal Citation Reports/Science Edition ตั้งแต่ปี 2008 (<http://science.thomsonreuters.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi>)

- Intra, P. and Tippayawong, N., “Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No.4, pp. 605 – 615, 2009. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)
- Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.17, Supplement, pp. s17 – s20, 2009. มี impact factor = 0.0
- Intra, P. and Tippayawong, N., “Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer”, *Journal of Electrostatics*, 2010, in press, 10.1016/j.elstat.2010.01.008. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)
- Intra, P. and Tippayawong, N., “Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, under review. (MS. ID: KJ2010-004) มี impact factor = 0.830 (JCR ปี 2008)
- Intra, P. and Tippayawong, N., “Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer”, *Journal of Electrostatics*, submitted for publication. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)

ก.2.2 เอกสารประกอบการประชุม/สัมมนาระดับนานาชาติ

- Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, Poster presentation, *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, Thailand, 24 – 25 July, 2008.

ก.2.3 เอกสารประกอบการประชุม/สัมมนาในประเทศ

- Intra, P. and Tippayawong, N., “A submicron electrical aerosol detection system with a Faraday cup electrometer”, Oral presentation, *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, Pathumthani, Thailand, 15 – 17 October, 2008.
- Intra, P. and Tippayawong, N., “Analytical investigation of an electrostatic precipitator for excess ions removal after charging process of the electrical

mobility spectrometer”, Oral presentation, *The 7th PSU-Engineering Conference*, 21 – 22 May, 2009.

- Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrical detector for nanometer-sized aerosol particles detection: development of the equipment and preliminary results”, *The 9th TRF Academic Meeting*, Phetchaburi, Thailand, 15 – 17 October, 2009.

ภาคผนวก ข

สิ่งตีพิมพ์และผลงานอื่น ๆจากโครงการนี้

ภาคผนวก ข-1

Intra, P., "Investigation of a submicron-particle inertial impactor for size-selective inlet of the electrical mobility spectrometer", *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 257 – 268, 2008. มี impact factor = 0.0

Investigation of a Submicron-Particle Inertial Impactor for Size-Selective Inlet of the Electrical Mobility Spectrometer

Panich Intra*

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand

*Corresponding author, E-mail: panich_intra@yahoo.com

ABSTRACT

An inertial impactor is widely used for sampling, separating and measuring aerosol particles of aerodynamic size. In this study, a prototype of the submicron-particle inertial impactor for size selective inlet of the electrical mobility particle sizing instruments was designed, constructed and investigated. The effects of major design parameters on the cut-off diameter were analytically investigated including the aerosol flow rate, acceleration nozzle-to-impaction plate distance, and acceleration nozzle diameter. A prototype of the impactor was preliminarily tested experimentally to investigate the particle collection efficiency of the impactor and the deposited particles on the surface of the impaction plate inside the impactor. The combustion aerosol generator was used to generate a polydisperse carbonaceous diffusion flame aerosol in the size range of approximately 10 nm – 10 µm for this experiment. It was shown that the theoretical 50% cut-off diameter decreased with increasing aerosol flow rate and also decreased with decreasing acceleration nozzle diameter. Finally, the results of the preliminary experimental tests and the photograph of particle deposited on the surface of the impaction plate inside the impactor was presented and also observed in this paper.

Key words: Particle aerosol, Inertial impactor, Size-selective inlet, Electrical mobility Spectrometer

INTRODUCTION

Inertial impactors have been widely used for many years for sampling and separating airborne aerosol particles of aerodynamic size for further chemical analysis because they are simple in construction with high separation and collection capabilities (Hinds, 1999). It consists of an acceleration nozzle and a flat plate, called an impaction plate. In inertial impactor, particles with sufficient inertia are unable to follow the streamlines and will impact on the impaction plate. Smaller particles will follow the streamlines and not be collected on the impaction plate. The aerodynamic particle size at which the particles are separated is called the cut-point diameter. Numerous extensive studies had been carried out in the past (May, 1945; Ranz and Wong, 1952; Andersen, 1966; Lundgren, 1967; Cohen and Montan, 1967; Mercer and Chow, 1968; Mercer and Stafford, 1969; Marple, 1970; Marple and Liu,

1974; Marple and Willeke, 1976; Dzubay et al., 1976; Markowski, 1984). In a later work, inertial impactors have been used extensively for measurements of micron or super-micron aerosol particle size distribution by mass known as an electrical low pressure impactor (ELPI) (Keskinen, 1992; Keskinen et al., 1992; Marjamaki et al., 2000).

In the electrical mobility particle sizing instruments, inertial impactors were also used to remove submicron-sized particles outside the measurement size range upstream of the instruments due to their contribution to multiple-charged aerosols (TSI, 2002; Intra, 2006; Intra and Tippayawong, 2006a, 2006b). These multiple-charged aerosols have the same electrical mobility diameter, and may therefore be detected on the same sensor. Consequently, the signal measured at a given sensor will be due to particles of different physical sizes. Even though inertial impactors have been widely studied for micron or super-micron aerosol collection, separation and measurement, submicron-particle inertial impactor for size selective inlet of the electrical mobility particle sizing instruments have not yet been studied extensively. So far, studies on submicron size selective inlet impactors were not carried out enough.

Therefore, an inertial impactor for upstream separating submicron size aerosol particles for the electrical mobility particle sizing instruments was designed, and theoretically and experimentally investigated in this study. The effects of major design parameters on the cut-off diameter were theoretically investigated. The parameters included the aerosol flow rate, nozzle-to-impaction plate distance and acceleration nozzle diameter. A prototype of the impactor was built and preliminarily tested experimentally. Finally, preliminary test results are also presented.

IMPACTOR DESIGN

The most important characteristic of an inertial impactor is the collection efficiency curve which indicates the percent of particles of any size which is collected on the impaction plate as a function of the particle size. According to Marple and Willeke (1976), for conventional inertial impactor, the aerosol flow rate, the acceleration nozzle-to-impaction plate distance and the acceleration nozzle diameter are the important parameters governing the performance of the inertial impactor. A schematic diagram of the inertial impactor used in this study is shown in Figure 1. The design of the impactor is based on the inertial impactor configuration of Marple and Willeke (1976). It consists of an acceleration nozzle and an impaction plate. The acceleration nozzle and the impaction plate are made of a stainless steel. In the inertial impactor, the aerosol flow is accelerated through an acceleration nozzle directed at an impaction plate. The impaction plate deflects the flow streamlines to a 90° bend. The particles larger than the cut-off diameter of the impactor impact on the impaction plate while the smaller particles follow the streamlines and avoid contact to the impaction plate and exit the impactor. A picture of the impactor used in this study is shown in Figure 2.

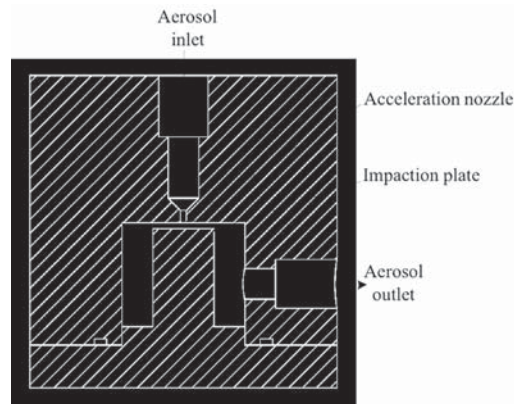


Figure 1. Schematic diagram of the submicron-sized particle inertial impactor.



Figure 2. A picture of the submicron-sized particle inertial impactor.

The acceleration nozzle diameter can be calculated from the Stokes number (Stk). The Stokes number is a dimensionless parameter that characterizes impaction, defined as the ratio of the particle stopping distance to the halfwidth or the radius of the impactor throat. The Stokes number equation for a round jet impactor is defined as (Hinds, 1999):

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p C_c d_p^2 U}{9\eta D}, \quad (1)$$

where ρ_p is the particle density, C_c is the Cunningham slip correction factor, d_p is the particle cut-off diameter, U is the mean velocity at the throat, η is the gas viscosity, and D is the acceleration nozzle diameter. Air density and viscosity are 1.225 kg/m^3 and $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m/s}$, respectively. Temperature of 294°K is used. For the round jet impactor, the expression of the average velocity within the round jets is given by the following equation

$$U = \frac{4Q}{\pi D^2}. \quad (2)$$

Substituting Equation 2 into Equation 1 gives

$$\text{Stk} = \frac{4\rho_p C_c d_p^2 Q}{9\pi\eta D^3} \quad (3)$$

Solving the above equation for the particle cut-off diameter at 50% collection efficiency, d_{50} , can be calculated by (Hinds, 1999)

$$d_{50}\sqrt{C_c} = \sqrt{\frac{9\pi\eta D^3 \text{Stk}_{50}}{4\rho_p Q}} \quad (4)$$

Because C_c is a function of d_{50} , Equation 4 cannot be conveniently solved for particle diameter. For conventional impactor, d_{50} can be estimated from $d_{50}\sqrt{C_c}$ using the following empirical equations (Hinds, 1999)

$$d_{50} = d_{50}\sqrt{C_c} - 0.078 \times 10^{-8}, \quad d_{50} \text{ is in m.} \quad (5)$$

This equation is accurate within 2% for $d_{50} > 0.2 \mu\text{m}$ and pressure from 0.9 – 1 atm (Hinds, 1999). Thus, the acceleration nozzle diameter is given by

$$D = \sqrt[3]{\frac{4\rho_p (d_{50}\sqrt{C_c})^2 Q}{9\pi\eta \text{Stk}_{50}}} \quad (6)$$

where Stk_{50} is the Stokes number of a particle having 50% collection efficiency. For the round jet impactor, Stk_{50} is 0.24, and the ratio of the acceleration nozzle diameter to the nozzle-to-plate distance is 1.0 (Marple and Willeke, 1976; Hinds, 1999). In this study, the 50% cut-off diameter $\geq 1 \mu\text{m}$ for the size selective inlet of the electrical mobility particle sizing instruments. The fractional particle penetration efficiency (P) of the impactor was determined as follows:

$$P(\%) = (1 - E) \times 100 \quad (7)$$

where E is the particle collection efficiency of the impactor, and it is determined from (Marjamaki et al., 2000)

$$E = \left[1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p} \right)^{2s} \right]^{-1} \quad (8)$$

where s is the parameter affecting the steepness of the collection efficiency curve. In the present study, $s = 1$ is arbitrarily assumed for the steepness of the collection efficiency curve.

PRELIMINARY EXPERIMENTAL TESTING

In order to measure the particle collection efficiency, it is necessary to measure the particle concentration both upstream and downstream of the impactor.

For each particle size, the particle collection efficiency of the impactor was defined as:

$$E = 1 - \frac{C_{p, \text{down}}}{C_{p, \text{up}}}, \quad (9)$$

where $C_{p, \text{up}}$ and $C_{p, \text{down}}$ are the particle number concentrations in upstream and downstream, respectively. Unfortunately, particle size distribution of both upstream and downstream of the impactor was not measured because no aerosol sizer was available at the time of the experimentation. Thus, only particle number concentrations of both upstream and downstream of the impactor were preliminarily investigated using unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles (Intra and Tippayawong, 2008). The deposited particles on the surface of the impaction plate inside the impactor were also observed. A schematic diagram of the preliminary experimental setup used to investigate the collection efficiency of particles of the impactor and the deposited particles inside the impactor is shown in Figure 3. The combustion aerosol generator was used to generate a polydisperse carbonaceous diffusion flame aerosol for this experiment. Stable polydisperse aerosols with particle number concentrations of approximately $10^{12} - 10^{14}$ particles/m³ were obtained (Cleary et al., 1992). The particle size obtained by scanning electron microscopy (SEM) was in the range between approximately 10 nm – 10 µm. Figure 4 shows the particle morphologies of agglomerates obtained from the scanning electron micrograph, taken with a JEOL JSM-6335F Field Emission Scanning Electron Microscope, operated at 15 kV and magnification of 5,000X. In this study, the sampling aerosol flow rate was regulated and controlled by means of mass flow meter and controller with a vacuum pump and the flow rate ranging from 1.0 to 5.0 l/min. The particles were first dried with the diffusion drier. Thus, any remaining water was removed. Before aerosol particles entering the impactor, the particles were diluted and mixed with clean air, which had been filtered through a HEPA filter, in the mixing chamber. In the impaction plate, impaction surface was coated with an adhesive collection substrate to prevent particle bounce. Particle number concentrations of both upstream and downstream of the impactor were measured. In the measurement system, aerosol sample first pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Finally, signal current is then recorded and processed by a data acquisition system (Intra and Tippayawong, 2008). The particle number concentration, C_p , is related to the signal current, I_p , at Faraday cup electrometer is given by

$$C_p = \frac{I_p}{peQ_a}, \quad (10)$$

where p is the number of elementary charge units, e is the elementary unit of charge (1.6×10^{-19} C), and Q_a is the volumetric aerosol sampling flow rate into a Faraday cup. To reduce errors due to time variations in the upstream aerosol concentrations,

repeat measurements were commenced at least 5 min after the introduction of the aerosol into the measurement system.

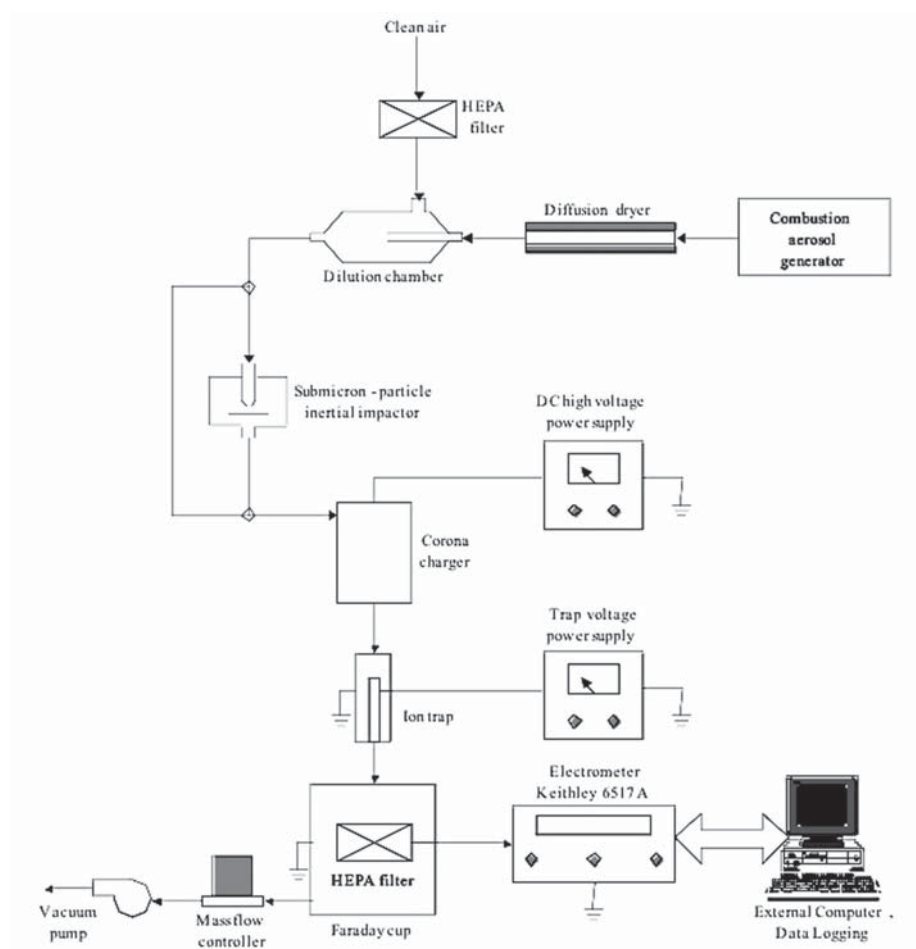


Figure 3. A schematic diagram of the preliminary experimental setup used to investigate the collection efficiency and the deposited particles inside the impactor.

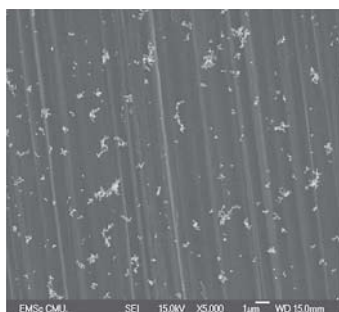


Figure 4. Scanning electron micrograph of sampling particle from the generator.

RESULTS AND DISCUSSION

The following parameters affecting the cut-off diameter were theoretically investigated in this study: the aerosol flow rate, acceleration nozzle-to-impaction plate distance and acceleration nozzle diameter. These calculations were carried out at varying aerosol flow rates between 1.0 to 5.0 l/min. An operating pressure was set at 1 bar. The acceleration nozzle diameter was varied from 0.5 to 2 mm. Figure 5 shows variation of theoretical impactor efficiency curves as a function of particle size at aerosol flow rates of 1, 2, 3, 4 and 5 l/min with the acceleration nozzle diameter of 1.0 mm. Calculations have been performed for particle size range from 10 nm to 10 μ m. It was found that the cut-off diameter decreased as the flow rate increased. With respect to the influence of the aerosol flow rate on the performance of the size selective inlet, the cut-off diameter corresponding to 1 and 5 l/min were 1.28 and 0.53 μ m, respectively. It is natural that both throat velocities and collection efficiencies increase as aerosol flow rates increase due to increased inertia. Thus, the impactor collection efficiency depends on aerosol flow rate, as shown in Figure 5. It is apparent that the collection efficiency increases between the aerosol flow rates of 1 and 5 l/min, because the inertial force acting on the particles is greater at the higher flow rate.

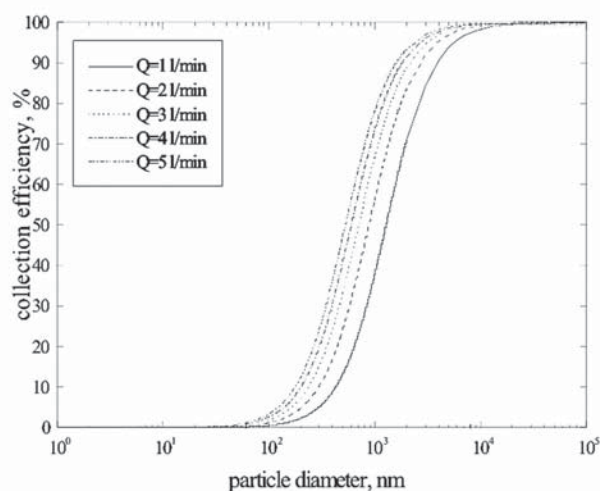


Figure 5. Variation of impactor collection efficiency with particle diameter at different operating aerosol flow rates.

For the study of the effect of the ratios of the acceleration nozzle diameter (D) to impaction plate distance (S) on the efficiency curve, Marple and Willeke (1976) showed that the 50% cut-off size $\sqrt{Stk_{50}}$ was strongly dependent upon S/D for $S/D < 1$ for rectangular impactors and for $S/D < 1/2$ for round impactors. For S/D ratios larger than these values, $\sqrt{Stk_{50}}$ and the shape of the efficiency curves are relatively constant. As design criteria, the values of S/D should be the minimum nozzle-to-plate distance used. Figure 6 shows variation of theoretical impactor efficiency curves as a function of acceleration nozzle diameter of 0.5, 1, 1.5, and 2

mm with the aerosol flow rate of 1.0 l/min, and operating pressure of 1 bar. It was found that the collection efficiency of impactor decreased when acceleration nozzle diameter decreased.

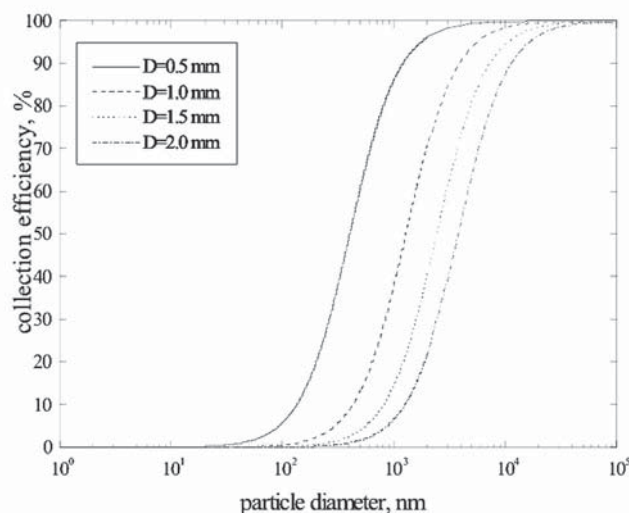


Figure 6. Variation of impactor collection efficiency with particle deiameter at different acceleration nozzle diameters.

Figure 7 shows variation of measured particle number concentration and current with aerosol flow rates of both upstream and downstream of the impactor. As shown in Figure 7, the measured particle current and concentration, particle number concentration is derived from the current by using Equation 10, of both upstream and downstream was in the range from 1.5×10^{-10} to 9×10^{-9} A and 3×10^{13} to 3×10^{13} particles/m³, respectively. It was shown that the particle currents of both upstream and downstream of the impactor increased with increasing aerosol flow rate. In the same way, the particle number concentrations of both upstream and downstream increased slightly with increasing aerosol flow rate. It was also evident that the upstream particle number concentrations and currents of the impactor were slightly higher than downstream. Variation of measured particle penetration through the impactor with aerosol flow rates is shown in Figure 8. It was shown the measured particle penetration through the impactor was about 89, 56, 72 and 79% for aerosol flow rates of 1, 2, 3 and 4 l/min, respectively. It can be seen that the particle penetration through the impactor is slightly high. This was expected because all particles captured on the Faraday cup are assumed to be singly charged ($p = 1$), data reduction is required. Thus, detailed reasons of this problem should be theoretically and experimentally discussed further.

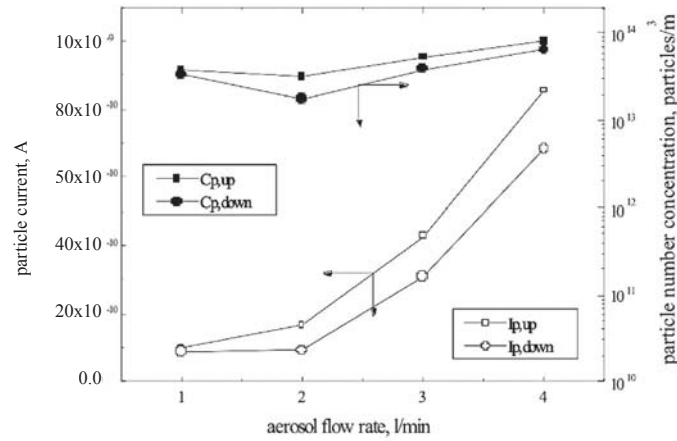


Figure 7. Variation of measured particle number concentration and current with aerosol flow rates of both upstream and ownstream of the impactor.

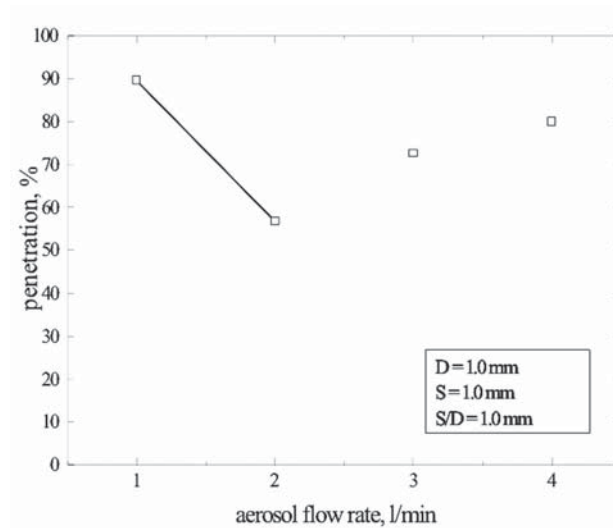


Figure 8. Variation of measured particle penetration through the impactor with aerosol flow rates.

The photograph of typical particles collected on the surface of the impaction plate inside of the impactor with sampling aerosol flow rate of 2 l/min for 30 minutes is shown in Figure 9. They were found to be agglomerated on the impaction plate. It was found inherent problems which were particle bounce and re-entrainment. The various problems in impactor use, such as the problem of particle bounce and re-entrainment, interstage wall losses and non-ideal collection characteristics of the impaction surface has been widely reported (Marple and Willeke, 1976). Particle bounce can be a severe problem in high velocity.



Figure 9. Photograph of typical particles collected on the impaction surface inside of the impactor.

CONCLUSION AND FUTURE WORK

The submicron-particle inertial impactor for size selective inlet of the electrical mobility particle sizing instruments has been designed, constructed and investigated. The design of the inertial impactor was based on the inertial impactor configuration of Marple and Willeke (1976). The effects of major design parameters on the cut-off diameter were analytically investigated, they were the aerosol flow rate, acceleration nozzle-to-impaction plate distance, and acceleration nozzle diameter. The impactor was preliminarily tested experimentally to observe the deposited particles on the surface of the impaction plate inside the impactor. The combustion aerosol generator was used to generate a polydisperse carbonaceous diffusion flame aerosol in the size range of approximately 10 nm – 10 μ m for this experiment. It was shown that the theoretical 50% cut-off diameter decreased as the flow rate increased and also decreased when acceleration nozzle diameter decreased. Finally, the results of the preliminary experimental tests and the photograph of typical particles collected on the surface of the impaction plate inside of the impactor was also shown and observed. Results obtained were very promising and was also found particles agglomerated on the impaction plate.

Therefore, future ongoing research will experiment on the effects of the design parameters on the impactor performance. The particle penetration efficiency of the impactor, particle size distribution both upstream and downstream of the impactor should be further theoretically and experimentally studied. One of the principal limitations of the inertial impaction method is that a significant fraction of the particles greater than the cut-point diameter (50% is from particle larger than the cut-point) that pass through the impactor contributed to multiple-charged aerosols. Therefore, further research should be also focused on this effect.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF), Contract no MRG5180217.

Asst. Prof Dr. Nakorn Tippagawang, Mechanical Engineering Department Chiang Mai University, is also thanked for valuable support and assistance during the preparation of this research paper.

REFERENCES

- Andersen, A.A. 1966. A sampler for respiratory health hazard assessment. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 27:160.
- Biswas, P., and R.C. Flagan. 1988. The particle trap impactor. *Journal of Aerosol Science* 19:113 – 121.
- Cleary, T.G., G.W. Mulholland, L.K. Ives, R.A. Fletcher and J.W. Gentry. 1992. Ultrafine Combustion Aerosol Generator. *Aerosol Science and Technology* 16:166-170.
- Cohen, J.J., and D.N. Montan. 1967. Theoretical considerations, design, and evaluation of a cascade impactor. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 28: 95 – 104.
- Dzubay, T.H., L.E. Hines, and R.K. Stevens. 1976. Particle bounce errors in cascade impactors. *Atmospheric Environment* 10:229 – 234.
- Hinds, W.C. 1999. *Aerosol Technology*. John Wiley & Sons, New York.
- Intra, P. 2006. *Aerosol Size Measurement System Using Electrical Mobility Technique*. Ph.D. Thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.
- Intra, P., and N. Tippayawong. 2006a. An electrical mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement. *International Conference on Technology and Innovation for Sustainable Development*, 25-27 January, Khon Kaen, Thailand.
- Intra, P., and N. Tippayawong. 2006b. Aerosol size distribution measurement using multi-channel electrical mobility sensor. *Journal of Aerosol Research Japan* 21: 329-340.
- Intra, P., and N. Tippayawong. 2008. An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection. *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, 24 - 25 July, Bangkok, Thailand.
- Keskinen, J. 1992. *Experimental study of real time aerosol measurement techniques*. Ph.D. Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Keskinen, J., K. Pietarinen, and M. Lehtimäki. 1992. Electrical low pressure impactor. *Journal of Aerosol Science* 23:353-360.
- Lundgren, D.A. 1967. An aerosol sampler for determination of particle concentration as a function of size and time. *Journal of Air Pollution Control Association* 17:225.
- Marjamäki, M., J. Keskinen, D.-R. Chen, and D.Y.H. Pui. 2000. Performance evaluation of the electrical low pressure impactor (ELPI). *Journal of Aerosol Science* 31:249 – 261.
- Markowski, D.R. 1984. Reducing blowoff in cascade impactor measurements. *Aerosol Science and Technology* 3:431 – 439.
- Marple, V.A. 1970. *A fundamental study of inertial impactors*. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, Minnesota.

- Marple, V.A., and B.Y.H. Liu. 1974. Characteristics of laminar jet impactors. *Environmental Science and Technology* 8:648 – 654.
- Marple, V.A., and K. Willeke. 1976. Impactor design. *Atmospheric Environment* 10:891-896.
- May, K.R. 1945. The cascade impactor: an instrument for sampling coarse aerosols. *Journal of Scientific Instruments* 22:187 – 195.
- Mercer, T.T., and H.Y. Chow. 1968. Impaction from rectangular jets. *Journal of Colloid and Interface Science* 27:75.
- Mercer, T.T., and R.G. Stafford. 1969. Impaction from round jets. *The Annals of Occupational Hygiene* 12:41.
- Ranz, W.E., and J.B. Wong. 1952. Impaction of dust and smoke particles. *Industrial and Engineering Chemistry* 44:1371.
- TSI Incorporated. 2002. Instruction Manual, Revision E, for Electrostatic Classifier, Model 3080, Minnesota.

ภาคผนวก ข-2

Intra, P. and Tippayawong, N., "Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer", *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 110 – 119, 2009. ถูกบรรจุไว้ใน Journal Citation Reports/Science Edition ตั้งแต่ปี 2008 (<http://science.thomsonreuters.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi>)



Measurements of Ion Current from a Corona-needle Charger Using a Faraday Cup Electrometer

Panich Intra^a [a], and Nakorn Tippayawong [b]

[a] College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiang Mai 50300, Thailand.

[b] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand.

*Author for correspondence; e-mail: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com

Received: 19 September 2008

Accepted: 17 December 2008.

ABSTRACT

Corona-needle charger is widely used to impose a known net charge distribution on the aerosol particles for the electrical mobility particle sizer. However, the corona discharge and charging processes in the corona-needle charger at different operating conditions is not well understood. In the present paper, measurement of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer was performed in order to optimize the corona-needle charger with respect to maximization of the ion number concentration. It was shown that the corona onset increased with increasing air flow rate. At higher air flow rate, the ion current and concentration were found to be relatively high for the same corona voltage. The highest ion current in the Faraday cup electrometer was found to be about 6.4×10^{-10} , and 6.29×10^{-10} A, corresponding to the ion number concentration of about 2.98×10^{13} , and 2.93×10^{13} ions/m³ occurring at the corona voltage of 2.9 and 3.7 kV for positive and negative coronas, and air flow rate at 8.0 L/min, respectively.

Keywords: corona discharge, faraday cup, electrometer, ion current.

1. INTRODUCTION

One of the most common techniques to produce high ion concentrations is corona discharge, defined as the low energy electrical discharge with non-thermal ionization that takes place in the vicinity of an electrode of sufficiently low radius of curvature in a medium the pressure of which is close to atmospheric [1]. Corona discharge is produced by a non-uniform electrostatic field such as that between a needle and plate or a concentric wire and a tube. Air and other gases can

undergo electrical breakdown when the electric field strength is high. For the case of wire and tube, the only place this breakdown can occur is in a very thin layer on the wire surface. In this corona region, energy is highly intense to knock electron from gas molecules creating positive ions and free electrons.

There have been numerous studies in corona discharge phenomena in the past [2] which are widely used in many industrial applications such as electrostatic coating and

precipitation [3 – 5]. Electrostatic charging of fine particles by the DC corona dischargers is also commonly employed in determining particle size distribution by electrical mobility technique both corona-wire and corona-needle chargers [6, 7]. Corona-needle charger is among the most commonly used to generate ions in aerosol diffusion chargers for the particle sizing instruments. Knowledge of the mechanism of the corona discharge attainable in a given charger is needed. The reason is that one has to know how particle charging depends on the ion concentration flowing through the charging zone, charging time, and the electric field inside it. The issue of corona discharge in the corona-needle charger has not been extensively studied in existing literature. Most papers concern about characteristics of corona discharge in wire to cylinder geometry. Only a few of them focus on the corona discharge in the needle to nozzle [8 – 11].

In the present paper, the ion current and number concentration of ions from the corona-needle charger were measured using a Faraday cup electrometer at different

operating air flow rates and corona voltages. The research is aimed at the optimization of the corona-needle charger with respect to maximization of the ion concentration. A detailed description of the operating principle of the Faraday cup electrometer was also presented.

EXPERIMENTAL APPARATUS

2.1 Corona-needle Charger

Figure 1 shows the schematic diagram of the corona-needle charger used in this study. The corona-needle charger geometrical configuration is similar to the charger used by Hernandez-Sierra *et al.* [9], Alonso *et al.* [10] and Intra and Tippayawong [11]. However, differences between the present charger and existing chargers are aerosol inlet geometry which was modified to ensure uniform particle distribution across the annular aerosol entrance to charging zone. This charger consists essentially of a coaxial needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered end. The needle electrode is made of a stainless steel rod, 6 mm in diameter ending in a sharp tip. The angle of the needle cone is

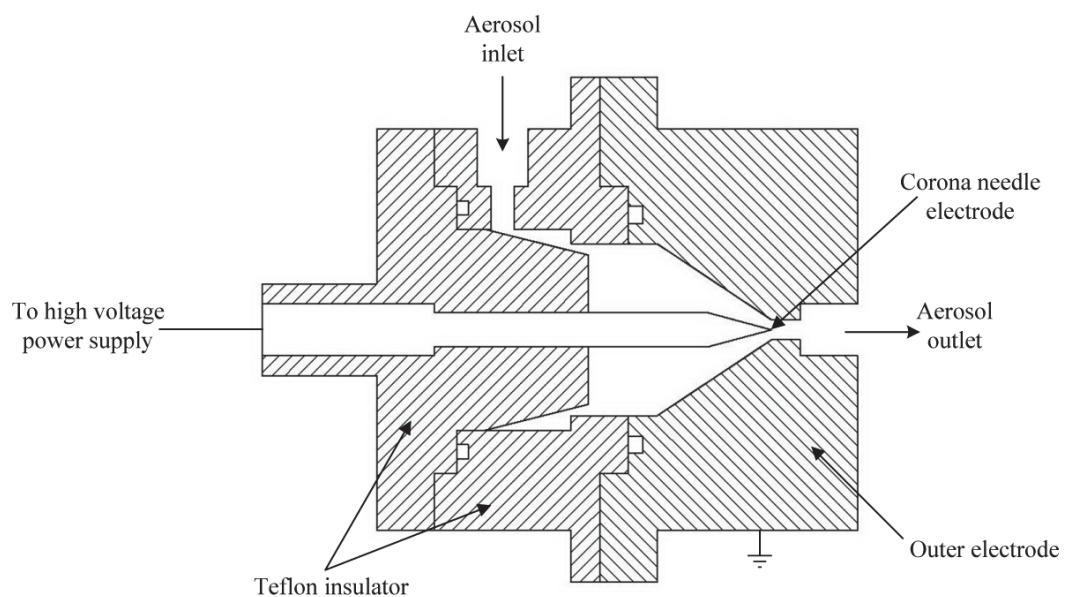


Figure 1. Schematic diagram of the corona-needle charger.

about 10° and the tip radius is about $50\text{ }\mu\text{m}$, as estimated under a microscope. The outer electrode is made of a stainless steel tube, 30 mm in diameter and 15 mm in length with conical shape. The orifice diameter is about 3.5 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 1.75 mm. The corona-needle electrode head is connected to an adjustable DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field towards the outer electrode wall.

2.2 Faraday Cup

The schematic diagram of the Faraday cup electrometer is shown in Figure 2. It consists of an outer housing, a High Efficiency Particulate Air (HEPA) filter, a filter holder, and a Teflon insulator.

To completely shield the HEPA filter collecting the air ions, outer housing is made of a stainless steel, HEPA filter was equipped with a fine collection metal grid, and was electrically isolated from the outer housing and ground with Teflon stand (a volume resistivity exceeding $10^{18}\text{ }\Omega\text{cm}$). The HEPA filter was used in this work, because the collection efficiency for small air ions was very high. The Faraday cup plays a role to prevent electric noise for measuring low electric signal current (in pA range) from accumulated charge of air ions on an internal HEPA filter inside the Faraday cup corresponding to the total number concentration of the ions. If the object of measurement is not shielded completely, noise which is 1000 times of resolutions is expected. To transfer charges gathered at the HEPA filter to an

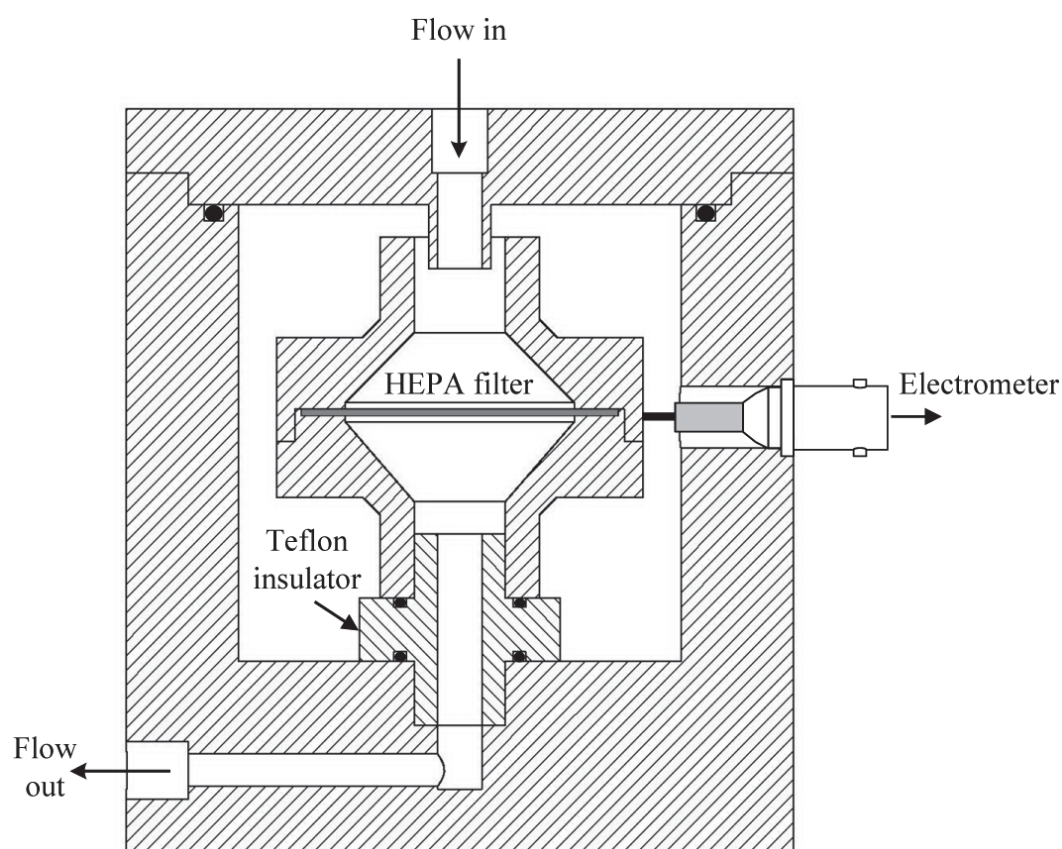


Figure 2. Schematic diagram of the Faraday cup.

electrometer circuit that is outside the Faraday cup, BNC connector is connected to HEPA filter. Because material of HEPA filter is conductive such as glass fiber, charges collected in the filter can move to the electrometer through the low noise cable and BNC connector without delay. In the case of existing electrometer air ions flow is curved at 90° while air is drifted from sampling probe to the filter. It can become the cause of charge loss. To solve this problem airflow into Faraday cup is straightened without changing the direction of the flow and loss the charge.

2.3 Electrometer Circuit

An electrometer circuit is used to measure the electric signal current, which are typically in the range 1 pA to 1 nA, from the Faraday cup. The schematic presentation of an electrometer circuit design for air ions detection system is shown in Figure 3. This circuit is a simple current-to-voltage converter, where the voltage drop caused by a current

flowing through a resistor is measured. The circuit adopted two cascaded negative feedback amplifiers. The extra component in this circuit is primarily for fine offset voltage adjustment and input/output protection. A $\pm 12\text{V}$ DC power supply capable of providing 100 mA is required. The feedback capacitor and RC low-pass filter were used to reduce high-frequency noise and to prevent oscillations of the amplifier output [12]. In order to avoid expensive construction, commercially-available low-cost monolithic operational amplifiers were used. The commercially-available operational amplifiers used in this circuit is the LMC662, which was designed for low current measurement and featured ultra-low input bias current (2 fA maximum) and low offset voltage drift ($1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) [13]. This circuit gives an output voltage of 10 mV per 1 pA of input signal current. The electrometer circuit was calibrated with a current injection circuit, high-impedance current source [12]. The performance of the

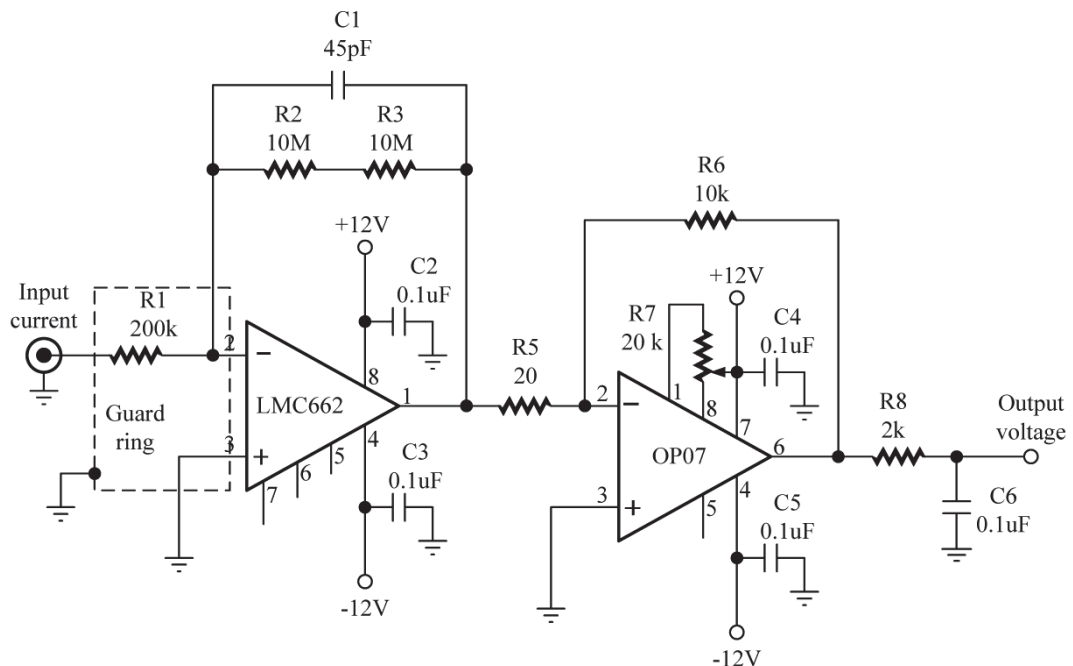


Figure 3. Schematic diagram of the sensitive electrometer circuit.

electrometer circuit used in this work was also evaluated and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A, and good agreement was found from the comparison [14].

EXPERIMENTAL SYSTEM AND PROCEDURE

The schematic diagram of the experimental system for measurement of ion number concentration from the corona-needle charger is shown in Figure 4. It consists of a corona-needle charger, a Faraday cup electrometer, a flow system, and a data acquisition and processing system. In our experiments, the Faraday cup is connected directly to the charger outlet via a very short connecting pipe. The air flow was regulated and controlled by means of a mass flow meter and controller with a vacuum pump, typically in the range between 3.0 – 8.0 L/min. A commercial adjustable DC high voltage power supply, a

Leybold Didactic model 521721, was used to maintain the positive and negative corona voltages difference in the charger, generally in the range between 1.0 – 5.0 kV. An air sample was first filtered through a HEPA filter, and was then drawn into the charger. The ions produced inside the charger are then entered the Faraday cup. In the Faraday cup, the ions were removed from the air stream by the filter and the resulting ion current flow was measured with the electrometer. It should be noted that the ion current was measured by the electrometer corresponding to the ion number concentration at the charger outlet. The output signal from the electrometer circuit is in the range of 0 to +10V. It is then sent to the ADAM-4017 analog input module, which is a 16-bit, 8 channel analog input module, controlled and data sampled by an external personal computer via RS-485 to RS-232 converter interface. Software running on an

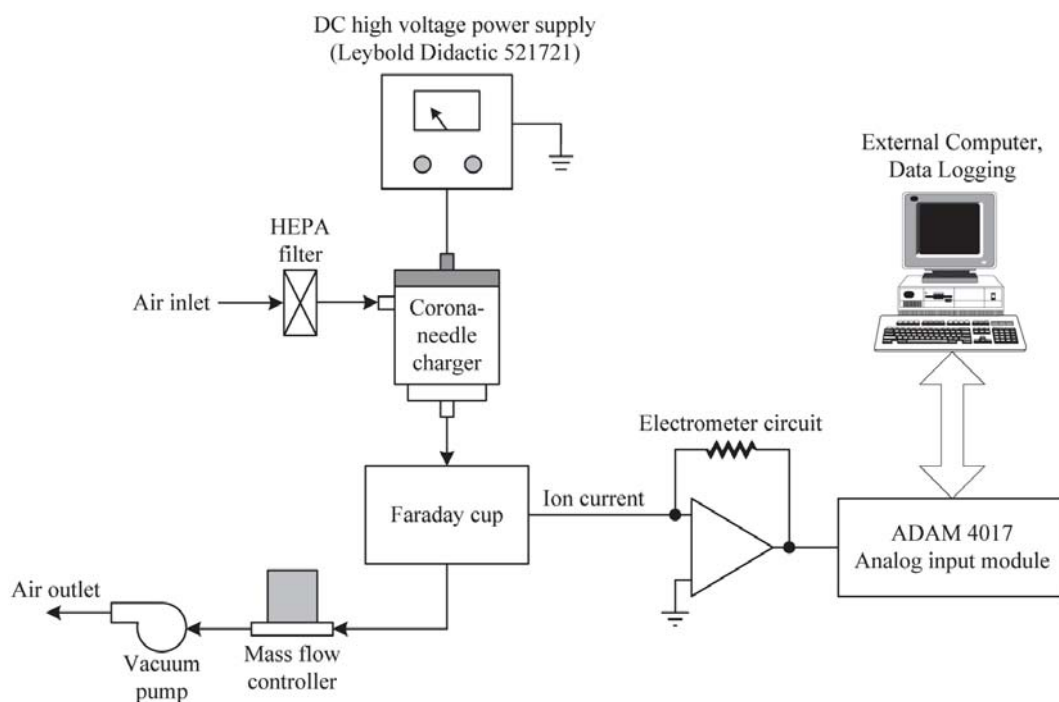


Figure 4. Schematic diagram of the experimental system for measurement of dc ion current from the corona-needle charger.

external computer was developed, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display the ion current and number concentration. The ion current measurements were translated into ion number concentrations given the total air flow rate through the charger. Thus, the total number concentration of the ion at the charger outlet, N_i , can be calculated from the expression [11]

$$N_i = \frac{I_i}{eQ_a} \quad (1)$$

where I_i is the ion current at the charger outlet, e is the elementary charge (1.6×10^{-19} C), and Q_a is the aerosol flow rate.

RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Current-voltage Characteristics of the Charger

The charging current from the corona-

needle electrode was measured directly with the micro-ammeter via the outer electrode of the charger. Figure 5 shows the current-voltage characteristics in the charging zone of the charger. In this charger, the corona onset was found to be about 2.4 kV, and 2.0 kV for positive and negative coronas, respectively. Increase in corona voltage produced a monotonic increase in charging current. It was shown that the spark-over phenomena occurred for both positive and negative corona voltages larger than about 4.2 kV. Above these values, the current was found to exhibit a fluctuation in an uncontrollable manner and no measurement could be made. Generally, the currents for negative ions were slightly higher than those for positive ions. This was expected because negative ions have higher electrical mobility than positive ions ($Z_i^+ = 1.15 \times 10^{-4}$ m²/V s, $Z_i^- = 1.425 \times 10^{-4}$ m²/V s, based on the work of Reischl

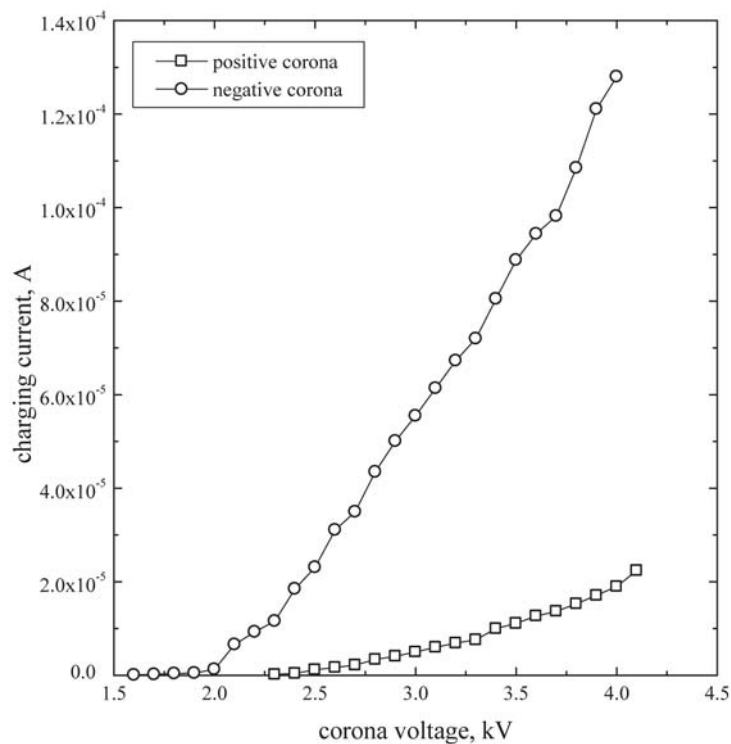


Figure 5. Current-voltage characteristics in the charging zone of the corona-needle charger.

et al. [15]). Thus, it was more likely to impact and deposit on the outer electrode wall of the charger. The ion concentration in the charging zone, N_i , of the charger was approximately proportional to the charging current. Thus, the high ion concentration in the charging zone of a charger is desirable for high particle charging efficiency. The ion concentration in the charging zone can be estimated from the relation

$$N_i = \frac{I}{eZ_iEA} \quad (2)$$

where Z_i is the electrical mobility of ions, E is the electric field, and A is the inner surface area of the outer electrode of the charger. This charging current increased with the electric field, hence applied voltage.

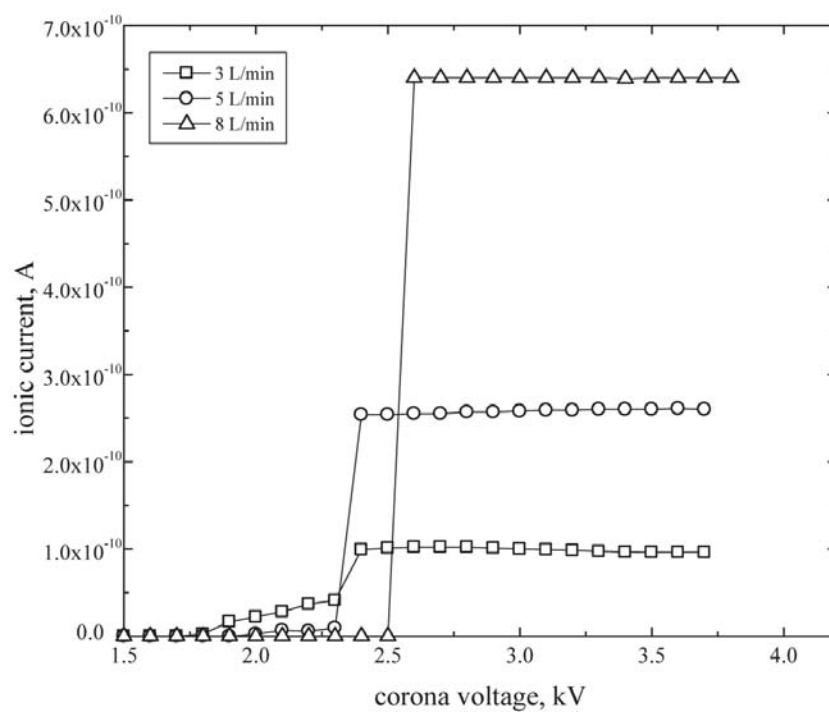
4.2 Ion Current and Concentration at the Charger Outlet

Figures 6 and 7 show the variations in the ion current and concentration of the charger outlet with corona voltage at different operating air flow rates for both positive and negative coronas. The resultant ion current and concentration of both positive and negative coronas were evaluated for 3.0, 5.0, and 8.0 L/min and 1.0 – 5.0 kV. The obtained results were expected for the effects of aerosol flow and corona voltage. As seen in Figure 6, the negative corona onset (i.e. negative ion generation) appeared at about 2.0, 2.1, and 2.3 kV for air flow rates of 3.0, 5.0, and 8.0 L/min, respectively, while the positive corona onset was observed at about 2.0, 2.3, and 2.5 kV for air flow rates of 3.0, 5.0, 8.0 L/min, respectively. For corona voltage less than 2.0 kV, the ion current was low. In this range, corona discharge was not present. It can be seen that the corona onset increase with increasing air flow rate. For both cases, at higher air flow rates, the ion current and concentration were found to be relatively high

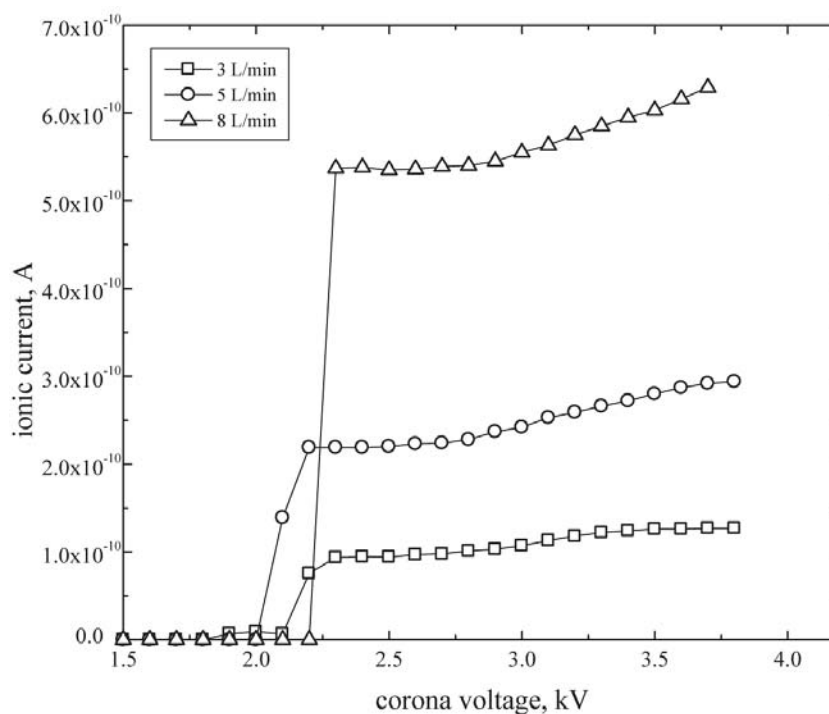
with the same corona voltage. This is because the ions can be more easily drawn off the charger by faster flowing air. In case of positive corona, the ion current and concentration appeared to depend on applied voltage only within a narrow voltage interval. For larger voltages, ion current and concentration of positive corona became practically constant, independent of the applied voltage. Meanwhile, ion current and concentration of negative corona slightly increases with increasing applied voltage. The reason for this may be due to greater degree of ion loss. It was evident that when the applied voltage increased, the charging current and electric field strength in the charging zone were found to increase. More ions have tendency to be electrostatically lost in the charging zone of the charger. The ion loss inside the charger due to electrostatic loss is defined as the ratio of the ion number concentration at the charger outlet, N_{out} , over the number concentration of ions inside the charger, N_{in} . The ion penetration, P , through the charger can be estimated by Deutsch-Anderson equation as [16]

$$P = \frac{N_{out}}{N_{in}} = \exp\left(\frac{-Z_iEA}{Q_a}\right) \quad (3)$$

Form Eq. (3) it can be calculated that the ion penetration was getting smaller with increasing electric field strength as a function of the corona voltage. It is commonly known that the ion current and concentration for positive corona of the charger was slightly higher than for negative corona. The highest ion current in the Faraday cup was found to be about 6.4×10^{-10} , and 6.29×10^{-10} A, corresponding to the ion number concentration of about 2.98×10^{13} , and 2.93×10^{13} ions/m³ occurring at the corona voltage of 2.9, and 3.7 kV for positive and negative coronas, and air flow rate at 8.0 L/min, respectively.

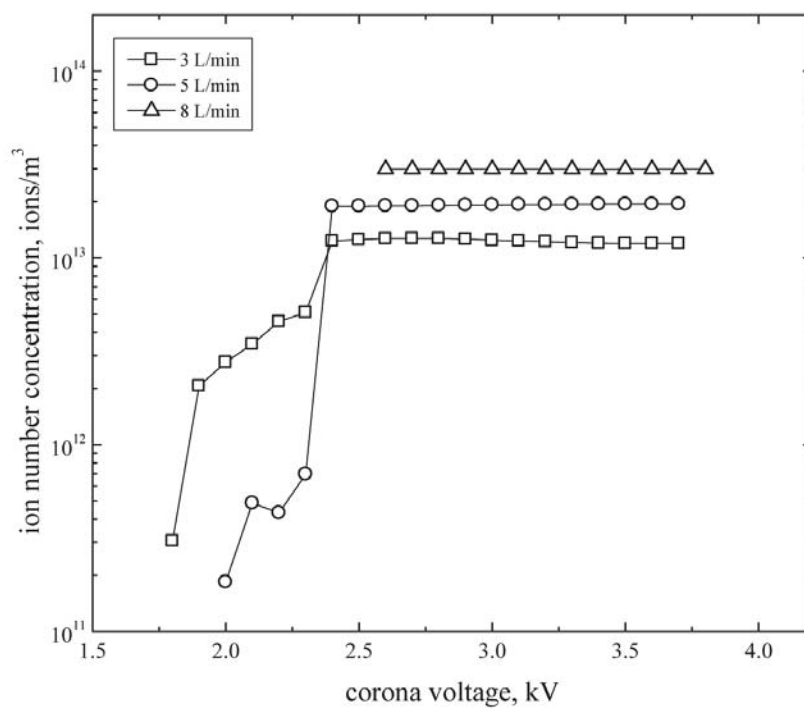


(a) Positive corona

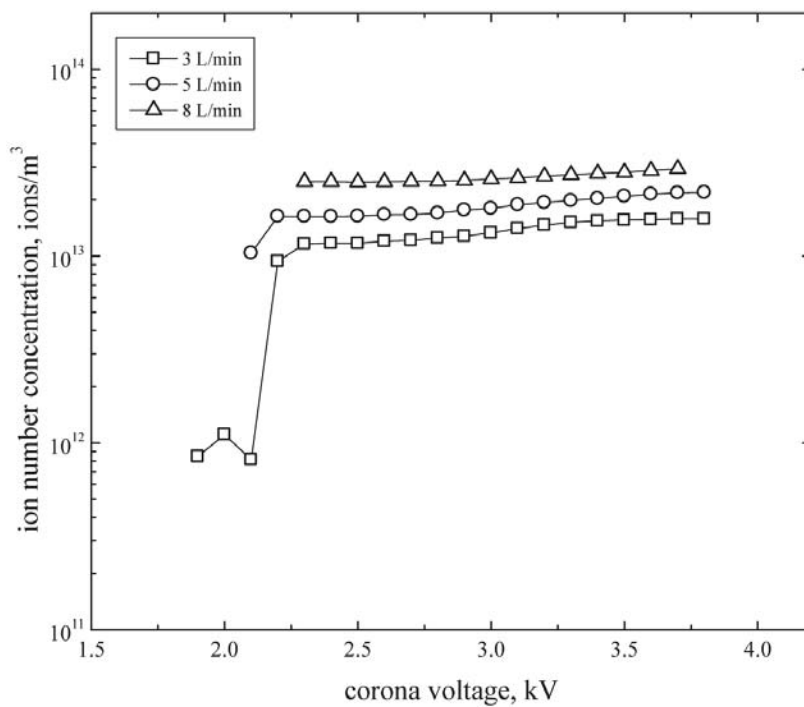


(b) Negative corona

Figure 6. Variation in ion current with corona voltage at the charger outlet.



(a) Positive corona



(b) Negative corona

Figure 7. Variation in ion number concentration with corona voltage at the charger outlet.

□ **CONC□UDIN□ REMAR□S**

In this paper, the Faraday cup electrometer was used to measure the DC ion current from the corona-needle charger in order to study the corona discharge inside it. A semi-empirical method based on current measurements was used to determine the total ion concentration at the outlet of the charger. It was found that the corona onset increased with increasing air flow rate. At higher air flow rate, the ion current and concentration were found to be relatively high for the same corona voltage. The effect of air flow rate was more significant than that of corona voltage. The negative corona was found to be in higher concentration than the positive corona. The highest ion current in the Faraday cup electrometer was found at the air flow rate of 8.0 L/min about 6.4×10^{-10} , and 6.29×10^{-10} A, for positive and negative coronas, respectively, corresponding to the ion number concentration is about 2.98×10^{13} , and 2.93×10^{13} ions/m³ occurring at the corona voltage of 2.9, and 3.7 kV for positive and negative coronas, respectively.

AC□NO□ ED□EMENT

Financial support from the Thailand Research Fund (TRF) is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] Beuthe T.G., and Chang J.S., *Gas Discharge Phenomena, Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker, New York, 1995.
- [2] Intra P., and Tippayawong N., An Overview of Unipolar Charger Development for Nano-Aerosols, *J. Chem. Eng. Japan.*, in press.
- [3] Parker K.R., *Applied Electrostatic Precipitation*, Blackie Academic & Professional, New York, 1997.
- [4] Lawless P. A., and Sparks L.E., Modeling Particulate Charging in ESPs, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 1988; 24(5): 922-925.
- [5] Tan X., and Shang J.K., Electric Field-Induced Intersections of 90° Domain Walls in Tetragonal Ferroelectric Crystals, *Chiang Mai J. Sci.*, 2005; 32(3): 245 - 252.
- [6] Intra P., and Tippayawong N., An Overview of Aerosol Particle Sensors for Size Distribution Measurement, *Mj. Int. J. Sci. Tech.*, 2007; 1(2): 120 - 136.
- [7] Intra P., and Tippayawong N., An Overview of Differential Mobility Analyzers for Size Classification of Nanometer-Sized Aerosol Particles, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 2008; 30(2): 243 - 256.
- [8] Whitby K.T., Generator for Producing High Concentration of Small Ions, *Rev. Sci. Instrum.*, 1961; 32(12): 1351-1355.
- [9] Hernandez-Sierra A., Alguacil F.J., and Alonso M., Unipolar Charging of Nanometer Aerosol Particle in a Corona Ionizer, *J. Aerosol Sci.*, 2003; 34: 733 - 745.
- [10] Alonso M., Martin M.I., and Alguacil F.J., The Measurement of Charging Efficiencies and Losses of Aerosol Nanoparticles in a Corona Charger, *J. Electrostatics*, 2006; 64: 203 - 214.
- [11] Intra P., and Tippayawong N., Corona Ionizer for Unipolar Diffusion Charging of Nanometer Aerosol Particles, *29th Electrical Engineering Conference*, Pattaya, Thailand, 2006; 9 - 10 November.
- [12] Intra P., and Tippayawong N., An Ultra-Low Current Meter for Aerosol Detection, *CMU. J. Nat. Sci.*, 2007; 6(2): 313 - 320.
- [13] National Semiconductor Corporation, LMC662 Data Sheet, 2003.
- [14] Intra P., and Tippayawong N., An Electrostatic Sensor for Nanometer-Sized Aerosol Particles Detection, *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, Thailand, 2008; 24 - 25 July.
- [15] Reischl G.P., Makela J.M., Harch R., and Necid J., Bipolar Charging of Ultrafine Particles in the Size Range below 10 nm, *J. Aerosol Sci.*, 1996; 27: 931 - 949.
- [16] Hinds W.C., *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1999.

ภาคผนวก ข-3

Intra, P. and Tippayawong, N., "Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review", *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No.4, pp. 605 – 615, 2009. มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)



Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review

Panich Intra^{a,*}, Nakorn Tippayawong^b

^a College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 November 2007

Accepted 24 December 2008

Available online 24 January 2009

Keywords:

Aerosol charger
Airborne particles
Corona discharge
Unipolar charging

ABSTRACT

Particle motion induced by electrical forces is the basis for important class of measuring instruments. Charging is important in aerosol size measurement. Unipolar charger is a crucial component in the aerosol particle sizing system by electrical mobility analysis. For an electrical mobility analyzer, the charging is aimed to impose a known net charge distribution on each aerosol size. The charger performance depends on the charging efficiency and stable operation. A well-designed unipolar charger should provide high charging efficiency and stability that can be accurately determined for any given operating conditions. This article presents and discusses progress on the development of existing unipolar aerosol chargers based on corona discharge technique. The operating principles as well as detailed physical characteristics of these chargers, including the corona-wire and corona-needle chargers, are described with extensive list of references.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Aerosol is a complex mixture of liquid and solid particles that exist in dynamic equilibrium with surrounding vapor phase. It has a wide range of physical, chemical and biological properties. Applications of aerosol have been found in diverse fields, including materials synthesis, biotechnology, semiconductor manufacturing, pharmaceutical products, emission control, health effects, instrumentation, and studies of fundamental transfer processes [1]. Their unique properties depend on their sources and processes undergone. Important physical properties of airborne particles are: size, shape, number, mass, surface area and density. Knowledge of the properties of aerosols is of great practical importance in aerosol science. Measurement capabilities are required to gain understanding of these particle dynamics.

Electrical mobility analysis is an important class of aerosol size measuring techniques. The most crucial step in the aerosol size measurement based on electrical technique is the particle charging mechanism. Charging mechanism is aimed to impose a known net charge distribution on the aerosol particles. Since particle size distribution is commonly classified by the electrical mobility, prediction of particle size requires the knowledge of the charge distribution for each particle size interval. The charger performance

depends on the charging efficiency, defined as the fraction of charged particles among all the particles present at the charger downstream. Thus, high charging efficiency of aerosol particles results in high precision of measurement. There are several mechanisms by which aerosol particles acquire net charge distributions; flame charging, static electrification, diffusion charging and field charging [1]. The most commonly used mechanism for charging particles in electrical measurement instruments is diffusion charging. Generally speaking, particles are allowed to collide with ions and the charge carried by these ions is transferred to the particles. This mechanism is so called due to the mechanism that ions travel in the gas and collide with the particles. Diffusion charging of particles can be unipolar or bipolar depending on the polarity of the ions colliding to the particles. Bipolar diffusion charging leads to a charge equilibrium which has low charging efficiencies, e.g. 3.3% for positively charged 10 nm particles and 5.7% for negatively charged particles, respectively [2,3]. Unipolar diffusion charging has advantages over bipolar diffusion charging as it does not reach an equilibrium charge distribution, therefore potentially enabling the attainment of a higher charging efficiency. There are three conventional methods to generate ions for unipolar diffusion charging in a gas; corona discharge, photoemission from UV-light radiation, and radiation from α -ray or β -ray sources. For the ionizing radiation, this produces a stable ion concentration, but the dynamic range in ion concentration is typically smaller compared to a corona discharge.

* Corresponding author.

E-mail addresses: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com (P. Intra).

Corona discharge is among the most common technique to produce high ion concentrations. There have been numerous studies in the past [4–8] and used in many industrial applications such as electrostatic coating and precipitation [9]. Electrostatic charging by the corona dischargers is also common in aerosol size determination by electrical mobility analysis. Corona discharge is produced by a nonuniform electrostatic field such as that between a needle and a plate or a concentric wire and a tube. Air and other gases can undergo electrical breakdown when the electric field strength is high. For the case of the wire and the tube, the only place this breakdown can occur is in a very thin layer at the wire surface. In this corona region, electrons have sufficient energy to knock an electron from gas molecules creating positive ions and free electrons. During this process, aerosol particles flow is directed across the corona discharge field and is then charged by attachment of ions produced by the corona discharge. Ions are transported by the electric field and/or by thermal diffusion. Particle charging due to the ions transported by electric field is called “field charging”. For supermicron particles ($>1 \mu\text{m}$), field charging is dominant. For ultrafine particles ($<0.1 \mu\text{m}$), thermal diffusion becomes dominant, and “diffusion charging” becomes important. For the size range in between, both mechanisms show varying degree of effect. The amount of ion deposition on the particle surface depends on resident time, particle radius and shape, electric field, etc. This technique has been applied successfully and several designs of aerosol corona charger are employed and described in the published literature, both corona-wire [4,6–8,10–16] and corona-needle chargers [17–24]. A number of particle sizing instruments employ unipolar corona chargers [25–38] as important upstream component to impart known charge to the aerosol system. Generally, the ideal charger would need to have (i) high ion concentration, (ii) no gas-to-particle conversion and low coagulation between charged particles, (iii) low particle losses, (iv) no contamination, (v) applicability to nanoparticles, and (vi) ability to work at various conditions.

In the present article, its main purpose is to present and discuss progress on the state-of-the-art unipolar charger for airborne particles, based on corona discharging. These chargers are either commercially available or still remain as laboratory prototypes. A detailed description of the operating principles, physical characteristics of the corona-wire and corona-needle chargers are presented.

2. Particle charging theory

During exposition to gaseous ions, aerosol particle captures the ions, resulting in an electrical charge on the particle. The charging level is dependent on the size and shape of the particle, the unipolar ion density, the particle residence time, and the external electric and magnetic fields. The process of ion collisions can be further divided in two different subcategories, diffusion and field charging. In the absence of electric field, this particle will be diffusionally charged by the Brownian motion of the ions. This diffusion charging, first characterized by White [5] and more recently modified by Pui [8], can be expressed in a convenient analytic form. For an initially neutral particle immersed in a unipolar ion cloud, the flux of ions impinging on the particle surface area is $j = \pi a^2 \bar{c}_i n$, where a is the particle radius, n is the concentration of ions above the surface and $\bar{c}_i$ is the mean thermal speed of the ions. The spatial distribution of ions is given by the classical Boltzmann distribution for the equilibrium state. Neglecting the image force attraction between the ions and the particle, the Boltzmann distribution at the particle surface is given by [8]

$$n = n_i \exp\left(-K_E \frac{q_p e^2}{akT}\right) \quad (1)$$

where n_i is the ion concentration at infinity, q_p is the particle charge, e is the elementary unit of charge, $K_E = 1/4\pi\epsilon_0$ with the vacuum permittivity, k is the Boltzmann's constant ($1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), and T is the operating temperature of the system. Thus, the ion flux to the particle is:

$$j = \pi a^2 \bar{c}_i n_i \exp\left(-K_E \frac{q_p e^2}{akT}\right) \quad (2)$$

The above equation was originally derived by White [5]. This is valid for spherical particles and free molecular regime ($\text{Kn} \gg 1$), where Kn is the Knudsen number ($=\lambda_i/a$; λ_i is the mean free path of the ion). The charging rate expression can be described by a system of differential equation as

$$\frac{dq_p}{dt} = \pi a^2 \bar{c}_i n_i \exp\left(-K_E \frac{q_p e^2}{akT}\right) \quad (3)$$

With the initial condition that $q_p = 0$ at $t = 0$ for the charging of an aerosol (initially neutral), the average charge of particle can be integrated analytically to give

$$\int_0^{q_p} \exp\left(-K_E q_p e^2 / akT\right)^{-1} dq_p = \int_0^t \pi a^2 \bar{c}_i n_i dt \quad (4)$$

Thus, the average charge, $q_{\text{diffusion}}$, caused by the diffusion charging in a time period, t , by a particle radius can be found from

$$q_{\text{diffusion}} = \frac{akT}{K_E e^2} \ln\left(1 + \frac{\pi K_E a \bar{c}_i e^2 n_i t}{kT}\right) \quad (5)$$

In field charging, ions are transported to suspended particles along the field lines. The field lines are repelled as the particle charge becomes high, and finally no electric field line reaches the particle. This condition causes charge saturation. The effect of the finite electric field used in the charging region can be estimated by a classical field charging equation derived by White [5], the saturation charge, n_s , of a particle (radius, a , and dielectric constant, ϵ) in an electric field E is given by

$$n_s = \left(1 + \frac{2\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \left(\frac{Ea^2}{K_E e}\right) \quad (6)$$

The charging rate expression, dq_p/dt , is given by the following differential equation

$$\frac{dq_p}{dt} = n_s K_E e Z_i n_i \left(1 - \frac{q_p}{n_s}\right)^2 \quad (7)$$

If the particle is initially neutral, the average number of the elementary units of charge on a particle, n_{field} , acquired in an average electric field E is given by

$$q_{\text{field}} = \left(1 + \frac{2\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \left(\frac{Ea^2}{K_E e}\right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i n_i t}{1 + \pi K_E e Z_i n_i t}\right) \quad (8)$$

where ϵ is the particle dielectric constant. The first two terms in Equation (8) represent the saturation charge situation, the first term is dependent on the dielectric constant of material, and it may have values from 1 to ∞ as the ϵ can have values from 1 (insulating particle) to ∞ (conductive particle). For most materials the ϵ varies from 1 to 10. The second term in Equation (8) is dependent on the electric field strength and the surface area of the particle. The third

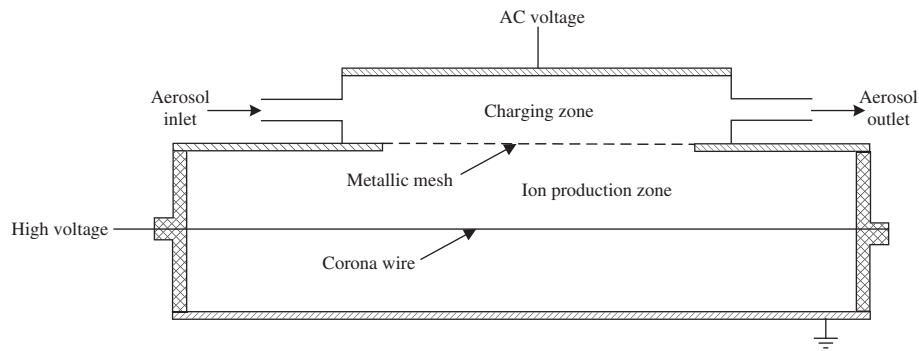


Fig. 1. Schematic diagram of the corona-wire charger developed by Hewitt [4].

term in Equation (8) represents the time dependence of the charging process. Both diffusion and field occur at the same time. This is known as continuum charging where particle charge is the sum of the contributions from diffusion and field charge [40].

3. Designs of unipolar corona chargers

Different designs of unipolar corona charger have been developed and reported in the literature. They can be classified as: (i) corona-wire charger and (ii) corona-needle charger. The following paragraphs give a brief overview of different designs, and a comparison based on the reported $N_t t$ product, product of the ion concentration, the mean residence time of the particles to the ions in the charger, and charging efficiencies.

3.1. Corona-wire chargers

Hewitt [4] was one of the first to develop a corona-wire diffusion charger to investigate the charging process in the electrostatic

precipitators. The Hewitt charger, shown schematically in Fig. 1, consisted of a cylinder with a concentric corona wire along the axis. Attached to the inner surface of the cylinder, a small path was formed to carry the aerosol flow. The main corona discharge volume and the aerosol flow region were separated by a metallic mesh. An alternating voltage (AC) difference was applied between this mesh and the outer electrode of the charger to reduce particle losses. The particles flowing through the charger undergo oscillations but are not deflected to the electrodes. Experiments were conducted for particle in the size range between 60 and 700 nm. Hewitt reported that the perpendicular electric field strength used to direct the ions causes high-mobility nanoparticles with diameter as small as 70 nm to be deposited on the outer cylinder wall. Several subsequent researchers have used similar designs to investigate diffusion charging of aerosol particles. Liu et al. [6] subsequently studied the diffusion charging of monodispersed dioctyl phthalate aerosols by unipolar ions at low pressure of 0.03–0.96 bar. The procedure involved exposing a monodispersed aerosol to unipolar ions produced by a high voltage corona discharge, and measuring the

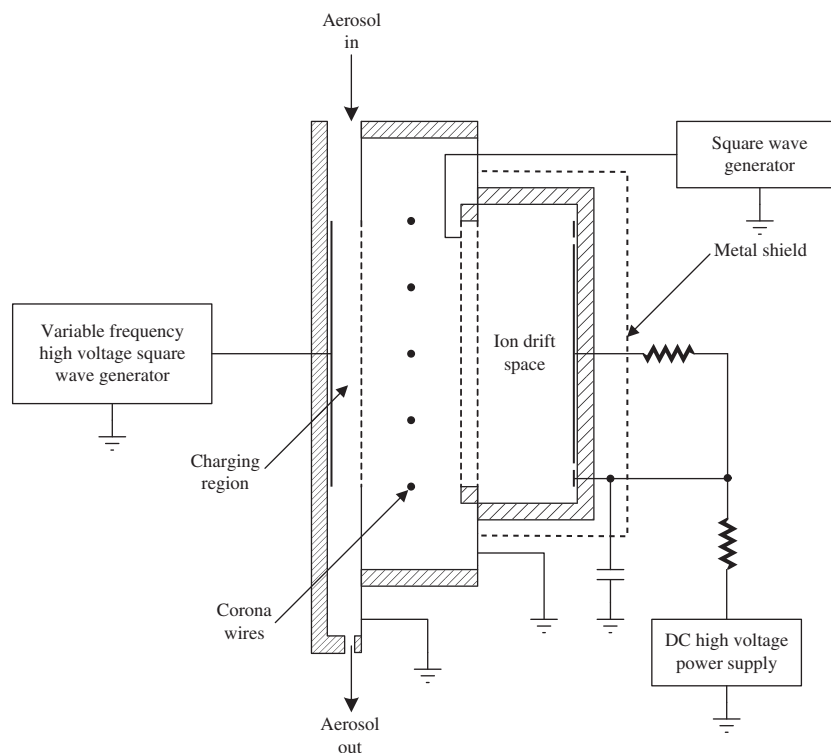


Fig. 2. Schematic diagram of the diffusion charger developed by Liu et al. [6].

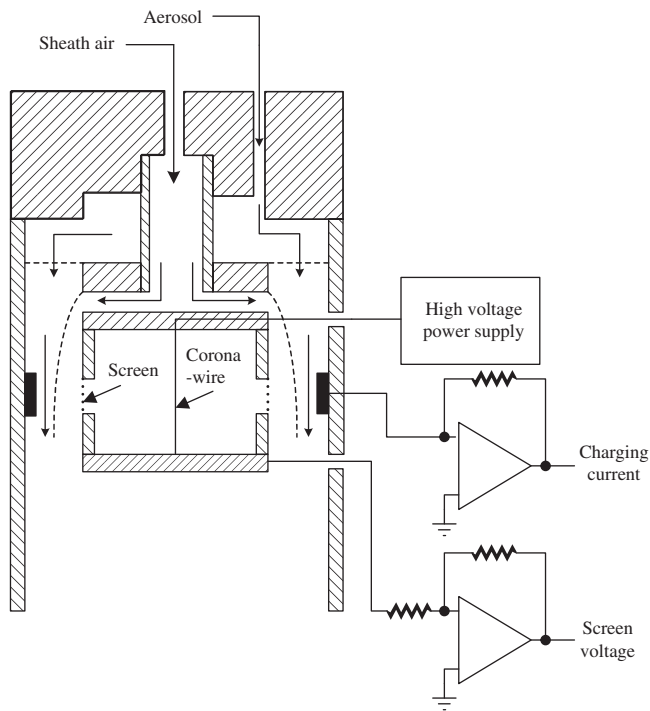


Fig. 3. Schematic diagram of the diffusion charger developed by Liu and Pui [7] and Pui [8].

electrical mobility and charge of the aerosol in a straight-through, dynamic flow system. The schematic diagram of the diffusion charger used is presented in Fig. 2. It is similar to the charger, first described by Hewitt [4]. In Liu et al. charger, the aerosol was exposed

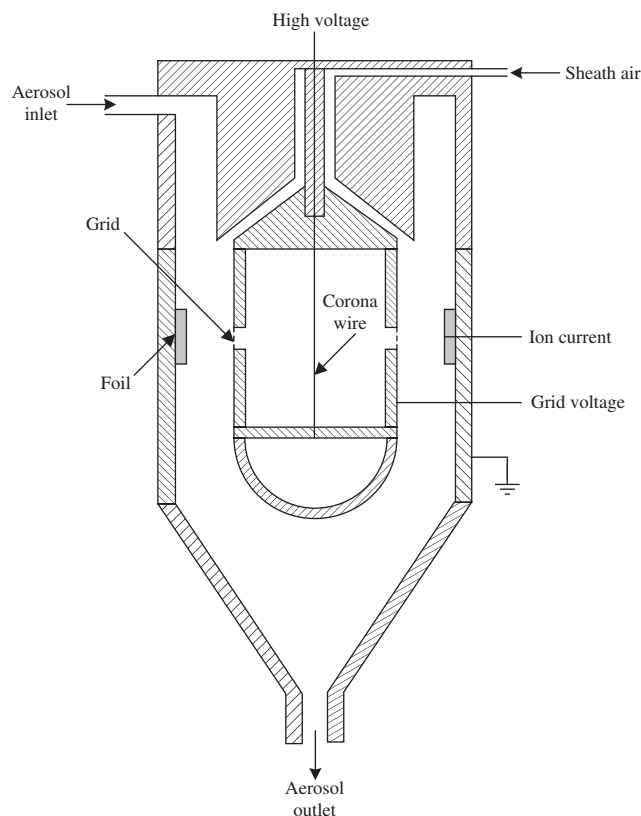


Fig. 4. Schematic diagram of the square-wave charger developed by Buscher et al. [10].

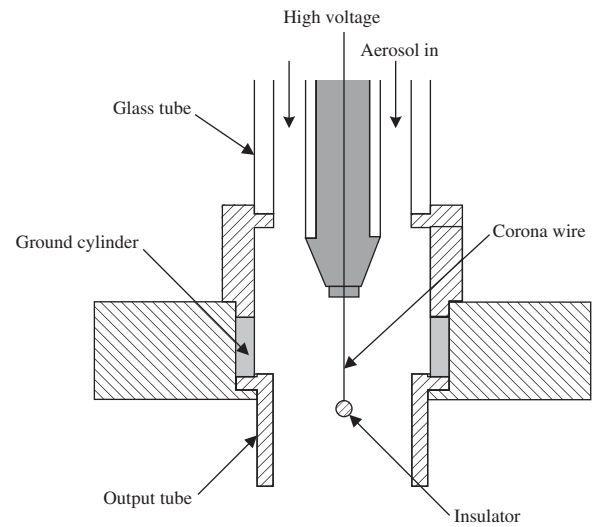


Fig. 5. Schematic diagram of the wire-cylinder corona charger developed by Unger et al. [11].

to positive ions in the charging region bounded on one side by a solid electrode and on the other by a screen through which the positive ions flow. An AC square-wave voltage was used to minimize the aerosol loss occurring in the charging process. The 10–60 Hz frequency of the AC square-wave voltage was used. The amplitude of the square wave was kept low to approximate as closely as possible the condition of pure diffusion charging. In pure diffusion charging, the charge acquired by an aerosol of a given size at a given pressure was a function of the number concentration of small ions in the charging region and the charging time or the time during which the aerosol was exposed to ions. The number concentration of small ions in the charging region was measured by substituting a DC voltage for the AC square-wave voltage and measuring the corresponding DC current which flowed through the screen into the charging region. The current was on the order of 10^{-9} – 10^{-6} A. Good agreement between the experimental data and White's equation [5] was reported. Similar design concept of Hewitt [4] and Liu et al. [6] has been adopted and improved by Liu and Pui [7] and later by Pui [8] for monodisperse aerosols in the size range between 75 nm and 5.04 μm . A schematic diagram of the diffusion charger is shown in Fig. 3. The charger consisted of two concentric metal cylinders with a 25 μm diameter tungsten wire positioned along the axis of the cylinders. A positive high voltage was applied to produce a corona discharge field. The ions were either collected by the inner cylinder or flowed through the screen to the annular gap outside. In the annular gap, collisions between the ions and the aerosol particles occurred, causing the latter to become charged. The total flow through the Liu and Pui charger was fixed at 5 L/min (4 L/min aerosol + 1 L/min sheath air). The residence time of the charger was 0.217 s. A sheath air flow was used adjacent to the inner cylinder. This arrangement was intended to displace the aerosol stream away from the screen and to prevent aerosol particles from entering the high intensity corona discharge region within the inner cylinder. It was reported that the nominal $N_t t$ product was adjustable over a range from less than 1×10^6 to over 3×10^7 ions/ cm^3 s.

Buscher et al. [10] pointed out that the high particle losses were associated with corona-wire diffusion chargers. Subsequently, Buscher and coworkers proposed the square-wave diffusion charger for ultrafine particles. In the Buscher et al. charger shown in Fig. 4, its geometrical configuration was similar to the one used in the TSI EAA 3030 [7]. However, the surfaces in contact with the aerosol were conductive and connected to ground to avoid particle

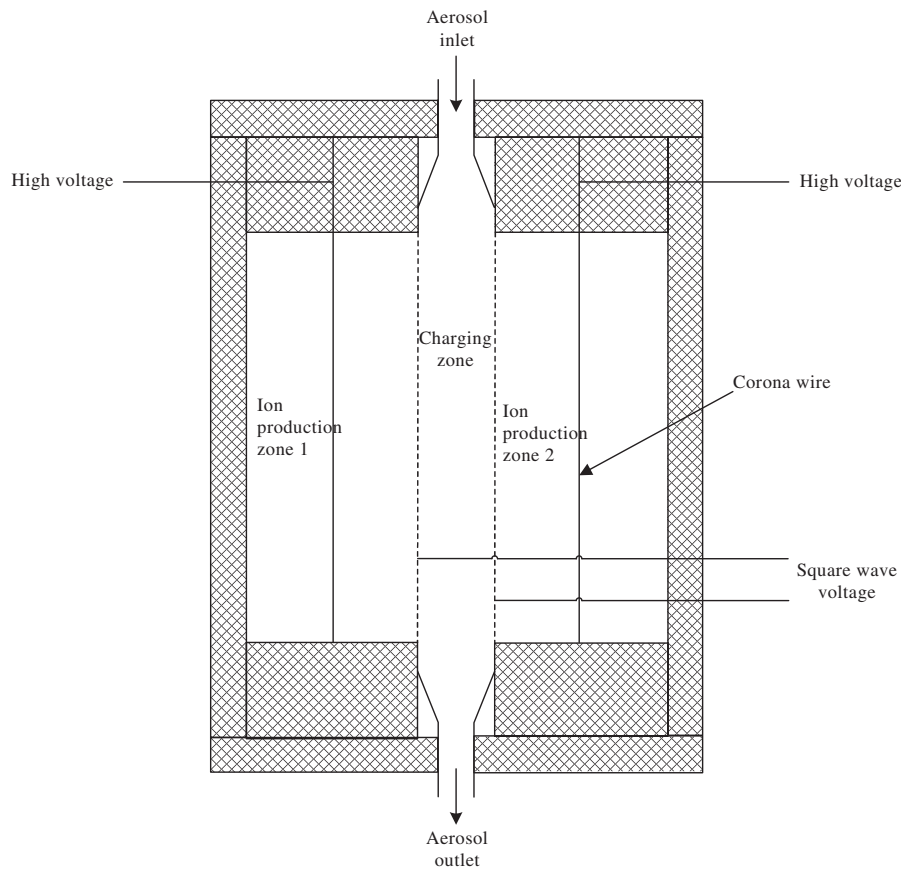


Fig. 6. Schematic diagram of the twin Hewitt charger developed by Kruis and Fissan [12].

losses due to insulator charging. The inlet tubes for aerosol and sheath air were arranged to achieve a high particle penetration and laminar flow inside the charger. A 4.5 kV corona discharge from a wire along the axis of the two concentric metal cylinders (radii $r_i = 1.65$ cm and $r_a = 3.0$ cm) generated ions. A positive voltage was applied to the inner cylinder, a grid with width of 1.17 cm allowed ions from the discharge zone to reach the aerosol. The aerosol flowed into the annular gap between the cylinders. The aerosol flow was 2 L/min and sheath air flow was 0.5 L/min. The sheath air surrounded the inner cylinder with the grid, preventing aerosol particles from entering the corona discharging zone. A square-wave voltage was applied to the grid in the charging zone, guaranteeing minimum particle losses due to electrostatic force. The particles flowing through the charging zone underwent oscillations without precipitating on the charger walls. In the Buscher et al. charger, the square-wave voltage was in the range of ± 75 V to ± 300 V corresponding to the frequency of 25–70 Hz. An isolated foil on the inner side of the outer cylinder, opposite to the grid, was connected to an electrometer amplifier to measure the ion current. In Buscher et al. work, an evaporation nucleation generator was employed to generate polydisperse sodium chloride particles. A Differential Mobility Analyzer (DMA) type 3/150 was used downstream of the generator to separate monodisperse samples from the polydisperse particles in the size range between 5 and 35 nm in diameter. Particle losses and charging efficiencies of the charger were determined by measuring particle concentrations at the inlet and outlet of the charger. Monodisperse sodium chloride particles in the size range between 5 and 35 nm in diameter were used. The monodisperse aerosol was bipolarly charged in a neutralizer. The charged particles were removed in a subsequent electrostatic precipitator. The number concentration of particles entering the

charger was measured by the first Condensation Particle Counter (CPC). The particle concentration leaving the charger was measured by the second CPC. It was found that the particle penetration, the ratio of output concentration to input concentration of particle, decreased towards small particles where diffusion losses were highest, and the N_{it} product was approximately 1.1×10^7 ions/cm³ s for the charger. It was also reported that for the ion concentrations greater than 10^6 ions/cm³, space charge had to be considered for the spatial dependence of the N_{it} product.

Unger et al. [11] proposed another type of the unipolar corona-wire charger to induce a stable negative corona discharge in flowing air with insulating material nearby the discharge gap. The downstream part dealt with the influence of the aerosol concentration and flow rate on the evolution of the discharge current related to the

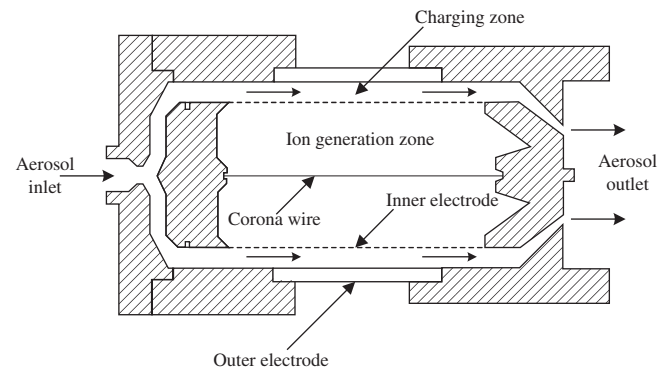


Fig. 7. Schematic diagram of the unipolar corona-wire diffusion charger developed by Biskos et al. [13–15].

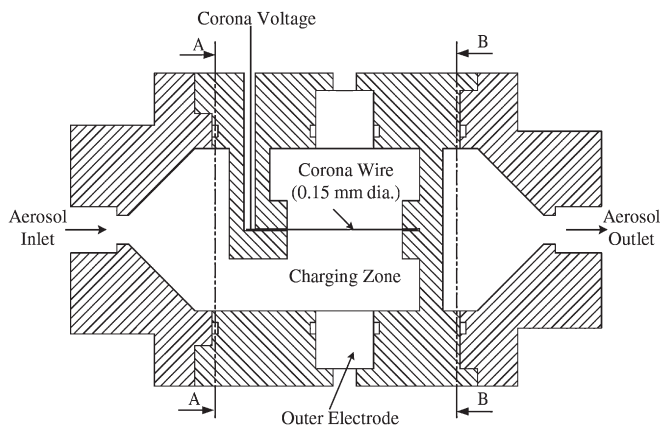


Fig. 8. Schematic diagram of the unipolar corona charger developed by Intra and Tippayawong [16].

particles deposition on both the wire and the cylinder. Fig. 5 shows the wire–cylinder corona charger. The wire diameter was 330 μm , and the grounded cylinder had an internal diameter of 14 mm for a length of 3 mm. With this electrode system, and with a voltage of -8.5 kV, the discharge current was about -30 μA , leading to ion densities in the range of 10^{10} ions/ cm^3 . The electrical measurements were obtained by oscilloscope connected to the cylinder for the discharge current and to a metallic foam for the charged particles output current. The tested aerosol was produced with a nebulizer and dried with a silica-gel diffusion dryer. Granulometric characterization was achieved by DMA coupled with a CPC 3022. It was found that an increase of the relative humidity implied a reduction of the discharge current by reduction of the ion mobilities leading to space charge accumulation in the discharge gap, lowering the electric field. The lifetime of the charger and the charged particles current at the output of the charger were a function of the flow rate and the aerosol concentration. High flow rate resulted in reduced particle losses in the charger and with nearly constant charging efficiency, whereas lower flow rate resulted in a lower output current and a higher time of life.

An improvement on the corona-wire chargers based on Hewitt's original design has been carried out by Kruis and Fissan [12]. It was called the twin Hewitt charger. Fig. 6 shows the schematic diagram of the developed twin Hewitt charger. The aerosol flow is introduced via a short inlet section into a square charging zone of 16 mm wide and 10 mm high. The charging zone is separated from the two ion production zones by metal wire meshes to prevent the aerosol expand into the corona discharge zone. These wire screens are

connected to two square-wave generators with opposite phase and a maximal voltage difference of 600 V. The top and bottom of the charging zone are electrically isolated. Positive ions are produced by corona discharge of 25 μm thick Au wire in the center of metal cylinder. There is a slit of length 150 mm and height 10 mm at one side. This slit is positioned towards the charging zone. The wire was fixed to a needle inserted through the openings at the end of the cylinder. Its electrical contact was made by means of a drop of silver paste. In the authors' work, the operation parameters of the charger were experimentally investigated at standard conditions with the goal to optimize the extrinsic charging efficiency in N_2 carrier gas. It was reported that there exists an optimal length of the charging channel for each gas flow rate through the charger which minimizes losses of charged particles and at the same time having a sufficiently large $N_i t$ product and the extrinsic charging efficiencies of the charger as high as about 30% for particles with a diameter of 10 nm.

Biskos et al. [13–15] later developed and investigated the electrostatic properties of a Hewitt-type corona charger analytically and numerically at different operating conditions. Fig. 7 shows a schematic layout of the unipolar corona-wire diffusion charger. It was composed of two concentric electrodes, 50 and 74 mm in diameter, respectively, with a corona wire along the axis. A tungsten wire of 16 μm diameter was used to produce the corona discharge. The generated ions migrated to the inner electrode due to the high electric field in the region. The inner electrode was made of a metallic mesh in order to allow ions to flow in the charging zone. An AC voltage was applied on the outer electrode forcing ions to enter the charging region without causing charged particles to precipitate on the charger walls, while the perforated inner electrode was connected to ground. Laminar flow of the aerosol stream was maintained. Sheath air flowed in the ion-generation area with the same axial pressure gradient of the aerosol and sheath flow streams. The aerosol flow passed through the annulus formed by the two cylinders, where the active charging region had a total length of 60 mm. The ammeter built into the high voltage power supply (Bertan series 230) was used to measure the current from the corona-wire electrode in the range of 0–10 mA. The 50 Hz AC voltage was coupled to the outer electrode via an isolating transformer. The other end of the secondary winding was connected to ground through an electrometer in parallel with a 1 kHz high pass filter to allow measurement of the average charging ion current. Average and spatial distributions of ion concentrations for the two zones of the charger were calculated by a semi-empirical method based on ion current measurements. It was emphasized that neglecting the space charge effect can lead to significant errors when the ion concentration in the charger is greater than 5×10^{13} ions/ m^3 .

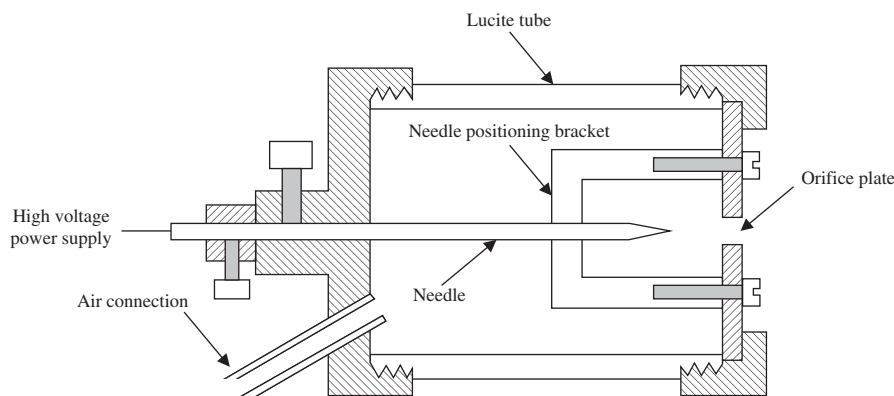


Fig. 9. Schematic diagram of the sonic jet ion generator developed by Whitby [17].

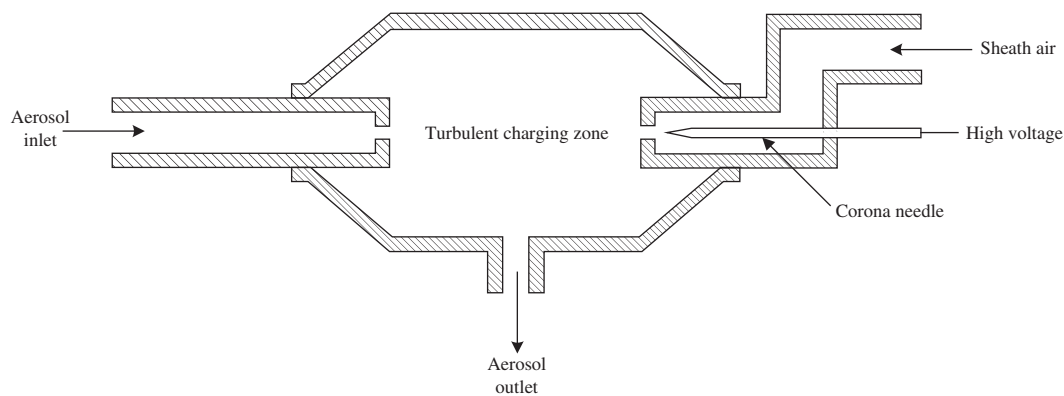


Fig. 10. Schematic diagram of the corona jet charger developed by Medved et al. [18].

Estimation of ion penetration levels through the inner electrode showed better agreement with the experimental results at sub-atmospheric pressures of about 250 mbar. The average $N_i t$ product appeared to increase with pressure, despite the fact that the ionic concentration was significantly lower.

For a recent attempt, Intra and Tippayawong [16] developed and tested a unipolar corona charger at different operating conditions. Schematic diagram of the corona charger is shown in Fig. 8. Its configuration is similar to the charger used by Unger et al. [11]. It consists of coaxial corona-wire electrode placed along the axis of a metallic cylinder (28 mm in diameter and 10 mm in length). The wire electrode is made of stainless steel, 150 μm in diameter and 10 mm long. DC high voltage is employed to produce the corona discharge on the wire electrode while the outer metallic cylinder is grounded. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field ($>10^5$ V/m) towards the outer electrode wall. A semi-empirical method was also adopted to determine the electrostatic characteristics of the unipolar corona aerosol charger. It was reported that the results from mathematical model were in agreement with those from

experimental investigation. The space charge effect was significant and must be taken into account, especially at high ion number concentration and low flow rate.

3.2. Corona-needle chargers

Whitby [17] developed the first needle-type corona charger which was capable of converting the corona current into free small ions with 100% efficiency. A schematic of the sonic jet ion generator is shown in Fig. 9. It consisted of an arrangement of a sharp needle held at high potential upstream of a small sonic orifice to generate the ions within a non-conductive housing which is capable of forcing nearly all of the ions generated in the corona at the needle tip through the orifice and hence free of the electric field. Clean air entered at inlet and then passed through the orifice plate. Positive, negative, or AC voltages on the needle electrode with respect to orifice plate were used to produce positive, negative, or a mixture of positive and negative ions. The ion generator was reported to produce unipolar or mixed positive and negative ion concentration of up to 10^{11} ions/ cm^3 in the charging zone and total ion outputs of

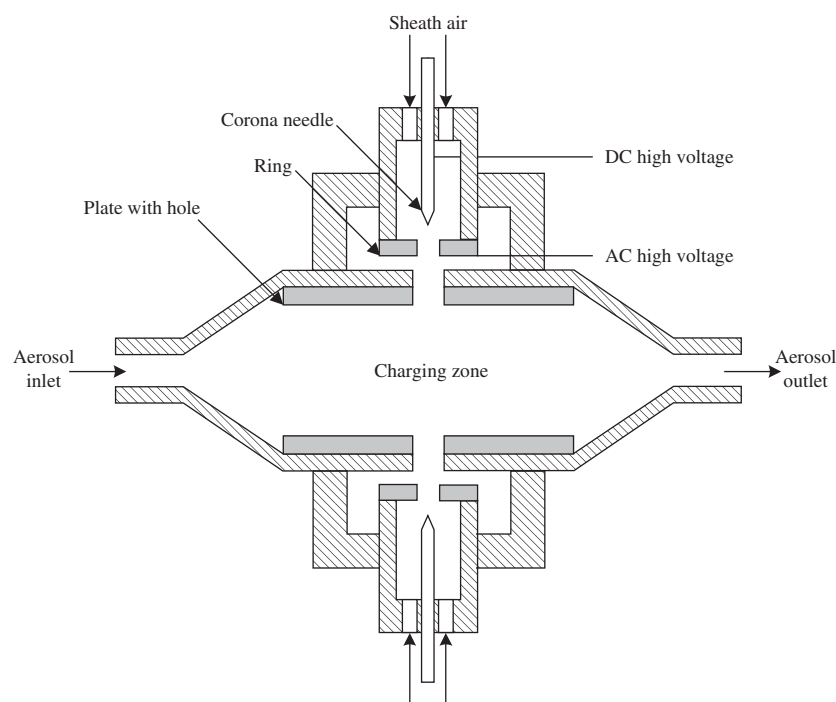


Fig. 11. Schematic diagram of the twin corona module charger developed by Marquard et al. [19].

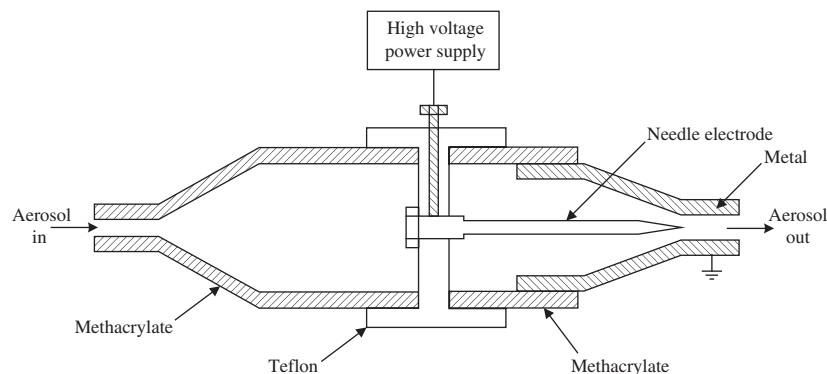


Fig. 12. Schematic diagram of the unipolar corona ionizer developed by Hernandez-Sierra et al. [20].

10^{14} /s had been achieved using 70 L/min of free air at 2 bar through a 1.59 mm orifice diameter.

Another type of the corona-needle charger for aerosol particles was proposed by Medved et al. [18]. A schematic diagram of the new corona jet charger is shown in Fig. 10. It is currently employed by the commercial Electrical Aerosol Detector (EAD) (model TSI 3070A, Thermo-Systems, Inc., 2500 N. Cleveland Ave., St. Paul, MN 55113, USA) [39]. Generation of ions occurs at a corona-needle tip in a small ion-generation chamber connected to a mixing chamber via an orifice. An air flow transferred the ions into the mixing chamber, and an opposing aerosol flow promoted mixing of the aerosol and the ions. Because the aerosol-ion mixture was not subjected to an applied electric field, the only field being a negligible one was from the ion space charge itself. It was reported that particles were more efficiently charged, compared to corona-wire chargers due to better turbulent mixing. In a subsequent work by Marquard et al. [19], a twin corona-needle charger was developed. A schematic diagram of this charger is shown in Fig. 11. It consisted of a $70 \times 90 \times 120$ mm chamber made of polyethylene with two charging modules on opposing sides perpendicular to the main flow. Within these modules, ions were generated in a point-ring corona configuration (1 cm gap, ring diameter 15 mm) based on the ion gun concept of Whitby [17] and transported by humidified air (50% RH; 1, 10 or 20 L/min, respectively) through the ring into the particle charging chamber. Inside the charger, additional metallic plates were placed around the corona module holes. Particle residence times were between 3 and 10 s. Dilution ratios resulting from the corona flows were $1.1 < f < 1.9$. The device was reported to have high charging efficiencies for sub-100 nm particles.

A simple corona-needle charger for high efficiency unipolar charging of nanometer-sized aerosol particles was proposed by Hernandez-Sierra et al. [20]. Fig. 12 shows the schematic diagram of the unipolar corona ionizer. The design was a cylindrical tube with tapered ends, and divided into three sections. The first and second (from left to right in the drawing) were made of methacrylate, and the third (outlet section) of aluminum. A circular piece made of Teflon, placed between the two methacrylate sections, contained a series of orifices through which the aerosol flows. This central piece served to hold a stainless steel needle electrode, ending in a sharp tip, coaxial with the external cylinders. The electrode head was connected to a DC high voltage power supply. The outlet metallic section was grounded. It was reported that the charging efficiencies of positive and negative corona were high, about 30% for 10 nm particles. The charging efficiency was also found to increase with particle size, corona voltage and mean aerosol residence time in the charger. At high corona voltage, the electrostatic deposition of charged particles within the charger was relatively high. An improvement of the Hernandez-Sierra et al. charger was

made by Alonso et al. [21]. Corona-needle charger, annular aerosol inlet geometry as well as the manner of holding the discharge electrode of the previous charger were modified. Fig. 13 shows a schematic diagram of the Alonso et al. corona-needle charger. It consists of an inner stainless steel electrode ending in a sharp tip, to which a DC high voltage is applied. The electrode is coaxial with a grounded metal cylinder whose inner wall has a conical shape. The distance between the electrode tip and the cone apex is 1.75 mm. The neutral aerosol enters the charger through the annular gap. The annular gap can be adjusted between 0 and 6 mm in 1 mm step. Diffusion losses in the charger were about 25% and 7% for 3 nm and 10 nm particles, respectively. It was reported that the attainable extrinsic charging efficiency for nanometer-sized particles is about one order of magnitude higher than that of commercially available bipolar chargers. It was also shown that no additional new particles are formed by the corona discharge under certain conditions: clean charger without dirtiness operating in the appropriate voltage range, and aerosol not containing contaminants (such as organics) which might undergo a gas-to-particle conversion process. Similarly, Intra and Tippayawong [22,23] constructed and evaluated a corona-needle charger, shown in Fig. 14, for unipolar diffusion charging of nanoparticles. The corona-needle charger is similar to the ionizer used by Hernandez-Sierra et al. [20] and Alonso et al. [21]. Notable differences are (i) a tangential aerosol inlet, and (ii) low operating pressure. It consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered end. The needle electrode is made of a stainless steel rod, 3 mm in diameter and 49 mm in length, ending in a sharp tip. The angle of the needle cone is about 9° and the tip radius is about 50 μm , as estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of an aluminum tube, 30 mm in diameter and 25 mm in

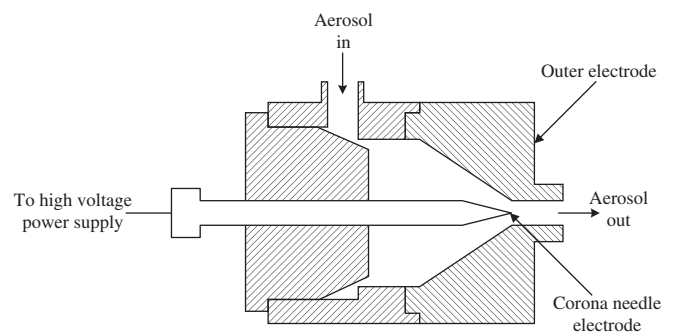


Fig. 13. Schematic diagram of the corona-needle charger developed by Alonso et al. [21].

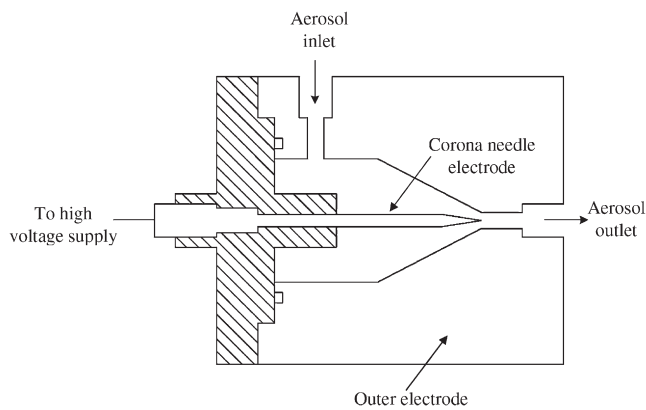


Fig. 14. Schematic diagrams of the corona-needle charger developed by Intra and Tippayawong [22,23].

length with conical shape. The angle of the cone is about 30° and the orifice diameter is about 4 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 2 mm. The corona-needle electrode head is connected to an adjustable DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. In the authors' work, the electrical discharge characteristics of a corona charger based on current measurements for positive and negative coronas were investigated and discussed. The charging current from the corona-needle electrode was measured directly with the sensitive electrometer via the outer electrode. A semi-empirical method, relying to some extent on observation or experiment, was used to determine the ion concentrations in the charging zone and at the outlet of the charger. It was reported that the charging current and ion concentration in the charging zone were found to increase with corona voltage. The ion number concentration at the outlet for positive corona of the ionizer was higher than for negative corona at the same voltage. Electric field distribution in the charging zone of the charger was also analyzed via numerical computation. Strong electric field strength zone was identified and led to high charging. It was also reported that particle loss inside this charger was smaller than the corona-wire charger from the authors' previous work [16].

Recently, design concept of the corona jet charger has been utilized in the unipolar diffusion charger by Park et al. [24]. A new unipolar diffusion charger, shown schematically in Fig. 15, consists of a corona discharge zone, mixing zone and ion trap zone.

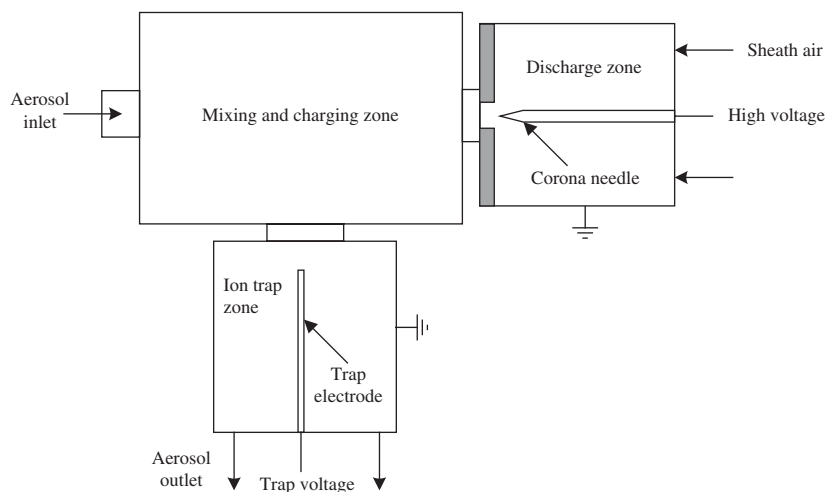


Fig. 15. Schematic diagram of the unipolar diffusion charger developed by Park et al. [24].

main body of the charger was made of Duralumin (also called duraluminum, duraluminium or dural). Two bottom covers, each of which was connected to the needle electrode, were made of Teflon. A tungsten needle tip of 0.25 mm diameter and 29 mm long was used as the needle electrode. The surface area of the ground electrode was 0.005 m^2 . The distance between the needle and the ground electrode was 3 mm. The volume of the mixing and charging zones was 95.5 cm^3 . Aerosol and clean air flow rates were both 5 L/min, respectively. The positive DC voltage was applied to the needle electrode of the discharge zone in the range of 3–6 kV. For the performance evaluation of this charger, NaCl particles smaller than $0.1 \mu\text{m}$ in diameter, and dioctyl sebacate particles of $0.1\text{--}0.7 \mu\text{m}$ were used. It was reported that the total particle losses inside the mixing and charging zones were below 15%. The number of charges was almost linearly related to the particle diameter.

4. Summary and future design needs

Corona discharge is one of the most common techniques to produce great number concentration of ions in a gas, and is also employed in determining the aerosol size distribution by electrical mobility analysis. This paper has summarized a current status of literature of the available unipolar corona chargers' developments for airborne particles. A brief outline focuses on the unipolar charger based on corona discharge. It has covered the operating principles as well as detailed physical characteristics of these chargers, including the corona-wire and corona-needle chargers. The main purpose of these chargers is to charge the particles efficiently with minimal losses. Table 1 summarizes different designs of the unipolar aerosol charger for airborne particle reported. The charger performance is dependent on the charging efficiency which is a function of particle size, corona voltage, and aerosol flow rate. The charging efficiency increases with particle diameter and decreases with increasing aerosol flow rate. Typically, corona discharge used in a charger has poor charging efficiencies in the ultrafine particle size range ($d_p < 20 \text{ nm}$) due to high particle losses. Because the high ion concentration needed for efficient diffusion charging requires a high electric field to charge aerosol, a fraction of the particle losses is unavoidable in unipolar diffusion chargers. Works towards improving the performance of these chargers by reducing particle losses inside the chargers have been ongoing. This can be carried out by

Table 1

Comparison of different unipolar corona aerosol chargers.

Reference	Corona electrode	Inner electrode diameter	Outer electrode diameter	Aerosol flow rate	Sheath air flow rate	Electrode voltage range	Polarity	$N_t t$ product	Aerosol/ion direction	Charging efficiency
Hewitt [4]	Wire	n/a	n/a	n/a	No	n/a	n/a	n/a	Perpendicular	n/a
Liu et al. [6]	Wire	n/a	n/a	n/a	No	n/a	Positive	n/a	Perpendicular	n/a
Liu and Pui [7]	Wire	25 μm	n/a	4 L/min	1 L/min	n/a	Positive	1×10^6 – $3 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Perpendicular	1.3% at 6 nm
Buscher et al. [10]	Wire	n/a	30 mm	2 L/min	0.5 L/min	4.5 kV	Positive	$1.1 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Perpendicular	4% at 5 nm
Unger et al. [11]	Wire	330 μm	14 mm	2–6 L/min	No	8.5 kV	Negative	n/a	Perpendicular	n/a
Kruis and Fissan [12]	Wire	25 μm	16 mm	n/a	No	n/a	Positive	1 – $8 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Perpendicular	30% at 10 nm
Biskos et al. [13–15]	Wire	16 μm	74 mm	5 L/min	n/a	2–9 kV	Positive	$3 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Perpendicular	60% at 20 nm
Intra and Tippayawong [16]	Wire	300 μm	28 mm	1–5 L/min	No	5–10 kV	Positive	1.5 – $4 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Perpendicular	n/a
Whitby [17]	Needle	n/a	n/a	70 L/min	No	0–9 kV	Positive/negative	n/a	Perpendicular	n/a
Medved et al. [18]	Needle	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Positive	n/a	Perpendicular	40% at 10 nm
Marquard et al. [19]	Needle	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Positive	n/a	Perpendicular	n/a
Hernandez-Sierra et al. [20]	Needle	3 mm	4 mm	0–10 L/min	No	2.5–4 kV	Positive/negative	n/a	Perpendicular	30% at 10 nm
Alonso et al. [21]	Needle	n/a	3.5 mm	0–10 L/min	No	3.1–3.7 kV	Positive	1 – $4 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Circular	55% at 13.6 nm
Intra and Tippayawong [22,23]	Needle	3 mm	4 mm	0–5 L/min	No	3–5 kV	Positive	2 – $8 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Circular	n/a
Park et al. [24]	Needle	0.25 mm	n/a	5 L/min	5 L/min	3.5–5 kV	Positive	1 – $7 \times 10^7 \text{ s/cm}^3$	Perpendicular	n/a

n/a: information not available.

- introduction of surrounding sheath air flows at the boundary between the aerosol stream and the wall to allow more space for the charged particles to flow through the charger without precipitating on the charger walls [7,8,10,12–15],
- use of a turbulent jet of unipolar ions in a mixing chamber [18,19,24],
- application of a sinusoidal or square-wave voltage to the electrode instead of DC voltage [6,10,12–15]. The AC voltage was shown to produce high charging efficiencies due to lower particle losses because the charged particles flowing through the charger undergo oscillations without precipitating in the electrode.

Additionally, aerosol charging is a function of the ion concentration N_i and the mean residence time t of the particles within the ion zone, t . For this reason, a well-designed corona charger should provide a stable $N_t t$ product that can be accurately determined for any given operating conditions. Further research in the unipolar charger design should be focused on:

- the particle shape effects on the unipolar diffusion charging for non-spherical particles. Most particles, such as asbestos fibers, soot aggregates, and bioaerosols are non-spherical. The shape of a particle affects the drag force, settling velocity and electrical mobility. Non-spherical particles were also expected to play important role in the unipolar diffusion charging because highly charged particles cause a great deal of electrostatic force between charged particles and ions, which is comparable with pure diffusion force.
- the effect of particle dielectric constant and conductivity on the charging performance should be explored. Because the diffusion charging is independent of particle material, it can be concluded that for particles smaller than 0.2 μm particle material is irrelevant considering the charging process. For larger particles, charging is dependent on the dielectric constant and conductivity of material. However, if the dielectric constant and conductivity of particle material differ significantly from calibration values, great difference can be expected.

Acknowledgement

The authors wish to express their deepest gratitude to the Thailand Research Fund (TRF) for the financial support, contract no. MRG5180217.

References

- [1] W.C. Hinds, Aerosol Technology, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [2] A. Wiedensohler, An approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron size range, *Journal of Aerosol Science* 19 (3) (1988) 387–389.
- [3] M. Adachi, Y. Kousaka, K. Okuyama, Unipolar and bipolar diffusion charging of ultrafine aerosol particles, *Journal of Aerosol Science* 16 (2) (1985) 109–123.
- [4] G.W. Hewitt, The charging of small particles for electrostatic precipitation, *AIEE Transactions* 76 (1957) 300–306.
- [5] H.J. White, Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, MA, 1963.
- [6] B.Y.H. Liu, K.T. Whitby, H.H.S. Yu, Diffusion charging of aerosol particles at low pressures, *Journal of Applied Physics* 38 (4) (1967) 1592–1597.
- [7] B.Y.H. Liu, D.Y.H. Pui, On the performance of the electrical aerosol analyzer, *Journal of Aerosol Science* 6 (1975) 249–264.
- [8] D.Y.H. Pui, Experimental study of diffusion charging of aerosols, Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1976.
- [9] P.A. Lawless, L.E. Sparks, Modeling particulate charging in ESPs, *IEEE Transactions on Industry Applications* 24 (5) (1988) 922–925.
- [10] P. Buscher, A. Schmidt-Ott, A. Wiedensohler, Performance of a unipolar “Square Wave” diffusion charger with variable $N_t t$ -product, *Journal of Aerosol Science* 25 (4) (1980) 651–663.
- [11] L. Unger, D. Boulaud, J.P. Borra, Unipolar field charging of particles by electric discharge: effect of particle shape, *Journal of Aerosol Science* 35 (2004) 965–979.
- [12] F.E. Kruis, H. Fissan, Nanoparticle charging in a twin Hewitt charger, *Journal of Nanoparticle Research* 3 (2001) 39–50.
- [13] G. Biskos, E. Mastorakos, N. Collings, Monte-Carlo simulation of unipolar diffusion charging for spherical and non-spherical particles, *Journal of Aerosol Science* 35 (2004) 707–730.
- [14] G. Biskos, K. Reavell, N. Collings, Electrostatic characterization of corona-wire aerosol charges, *Journal of Electrostatics* 63 (2005) 69–82.
- [15] G. Biskos, K. Reavell, N. Collings, Unipolar diffusion charging of aerosol particles in the transition regime, *Journal of Aerosol Science* 36 (2005) 247–265.
- [16] P. Intra, N. Tippayawong, Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement, *KIEE International Transactions on Electrophysics and Applications* 5-C (5) (2005) 196–203.
- [17] K.T. Whitby, Generator for producing high concentration of small ions, *Review of Scientific Instruments* 32 (12) (1961) 1351–1355.

- [18] A. Medved, F. Dorman, S.L. Kaufman, A. Pocher, A new corona-based charger for aerosol particles, *Journal of Aerosol Science* 31 (2000) s616–s617.
- [19] A. Marquard, M. Kasper, J. Meyer, G. Kasper, Nanoparticle charging efficiencies and related charging conditions in a wire-tube ESP at DC energization, *Journal of Electrostatics* 63 (2005) 693–698.
- [20] A. Hernandez-Sierra, F.J. Alguacil, M. Alonso, Unipolar charging of nanometer aerosol particle in a corona ionizer, *Journal of Aerosol Science* 34 (2003) 733–745.
- [21] M. Alonso, M.I. Martin, F.J. Alguacil, The measurement of charging efficiencies and losses of aerosol nanoparticles in a corona charger, *Journal of Electrostatics* 64 (2006) 203–214.
- [22] P. Intra, N. Tippayawong, Corona ionizer for unipolar diffusion charging of nanometer aerosol particles, in: 29th Electrical Engineering Conference, Pattaya, Thailand, 9–10 November, 2006.
- [23] P. Intra, N. Tippayawong, Comparative study on electrical discharge and operation characteristics of needle and wire–cylinder corona chargers, *Journal of Electrical Engineering & Technology* 1 (4) (2006) 520–527.
- [24] D. Park, M. An, J. Hwang, Development and performance test of a unipolar diffusion charger for real-time measurements of submicron aerosol particles having a log-normal size distribution, *Journal of Aerosol Science* 38 (4) (2007) 420–430.
- [25] M. Lehtimäki, New current measuring technique for electrical aerosol analyzers, *Journal of Aerosol Science* 18 (1987) 401–407.
- [26] A. Mirme, Electric aerosol spectrometry, Ph.D. thesis, University of Tartuensis, Tartu, Estonia, 1994.
- [27] H. Tammet, A. Mirme, E. Tamm, Electrical aerosol spectrometer of Tartu University, *Journal of Aerosol Science* 29 (1998) s427–s428.
- [28] H. Tammet, A. Mirme, E. Tamm, Electrical aerosol spectrometer of Tartu University, *Atmospheric Research* 62 (2002) 315–324.
- [29] J. Kulon, W. Balachandran, The measurement of bipolar charge on aerosols, *Journal of Electrostatics* 51–52 (2001) 552–557.
- [30] J. Kulon, S. Hrabar, W. Machowski, W. Balachandran, A bipolar charge measurement system for aerosol characterization, *IEEE Transactions on Industry Applications* 37 (2001) 472–479.
- [31] K. Reavell, Fast response classification of fine aerosols with a differential mobility spectrometer, in: Proceedings of the 13th Annual Conference of the Aerosol Society, Lancaster, 2002.
- [32] G. Biskos, Theoretical and experimental investigation of the differential mobility spectrometer, Ph.D. thesis, University of Cambridge, UK, 2004.
- [33] G. Biskos, K. Reavell, N. Collings, Description and theoretical analysis of a differential mobility spectrometer, *Aerosol Science and Technology* 39 (2005) 527–541.
- [34] TSI Incorporated, Operation and Service Manual, Revision B, for Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer, Model 3090, Minnesota, 2004.
- [35] P. Intra, N. Tippayawong, An electrical mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement, in: International Conference on Technology and Innovation for Sustainable Development, 25–27 January, Khon Kaen, Thailand, 2006.
- [36] P. Intra, Aerosol size measurement system using electrical mobility technique, Ph.D. thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2001.
- [37] P. Intra, N. Tippayawong, Aerosol size distribution measurement using multi-channel electrical mobility sensor, *Journal of Aerosol Research* 21 (2006) 329–340.
- [38] P. Intra, N. Tippayawong, Brownian diffusion effect on nanometer aerosol classification in electrical mobility spectrometer, *Korean Journal of Chemical Engineering* 26 (1) (2009) 269–276.
- [39] TSI Incorporated, Operation and Service Manual, Revision B, for Electrical Aerosol Detector™ Spectrometer, Model 3070, Minnesota, 2004.
- [40] B.Y.H. Liu, A. Kapadia, Combined field and diffusion charging of aerosol particles in the continuum regime, *Journal of Aerosol Science* 9 (1975) 249–264.

ภาคผนวก ข-4

Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.17, Supplement, pp. s17 – s20, 2009. มี impact factor = 0.0

An Electrostatic Sensor for Nanometer-Sized Aerosol Particles Detection

P. Intra¹ and N. Tippayawong²

¹College of Integrated Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand

In this study, an electrostatic sensor was developed for detecting the number concentration of nanometer-sized aerosol particles. It consists of a size selective inlet, a corona charger, an ion trap, a Faraday cup, an electrometer, a signal conditioning and processing system, and an I/O control and human-computer interface. In the present sensor, aerosol flow is regulated and controlled by means of mass flow meters and controllers with a vacuum pump. An aerosol sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Finally, signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. A detailed description of the operating principle of the system as well as main components was presented. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work was also evaluated and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A, and good agreement was found from the comparison.

Key Words: aerosol, nanoparticle, electrostatic, electrometer, sensor.

1. Introduction

Nanometer-sized aerosol particles, defined as aerosols with particle diameters less than $0.1\ \mu\text{m}$, suspended in air have significant effects on the human health, global climate, air quality and processes in various industries such as food, pharmaceutical and medical, electronic and semiconductor industries [1]. Detection and measurement of nanometer-sized aerosol particles have become an important issue. For this purpose, nanoparticle sensors were developed to monitoring indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry. There are several commercial instruments using various methods of detecting particle number concentration. Available instruments include a SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) using electrical mobility of particles, a CPC (Condensation Particle Counter) which uses particle growth and optical property, an EAD (Electrical Aerosol Detector) which uses electrostatic charge measurement technique, and an ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) using inertia impaction of particles under low pressure [2].

These commercial instruments are widely used for measuring airborne ultra fine particles and provide high-resolution measurement, but they are very expensive and large sizes. In addition, the CPC should be carefully moved in caution to protect the optics contamination from working fluid like alcohol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) [3]. The movability of instruments should be considered in monitoring airborne aerosol particles.

To avoid this problem, an inexpensive sensor was developed in this study, suitable for detection of particle number concentration in the nanometer size range. This sensor is based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. A detailed description of the operating principle of the sensor was presented. The sensor performance also was evaluated and compared with a commercial instrument.

2. Description of the Sensor

Fig. 1 shows the schematic diagram of the electrostatic sensor for detecting nanometer-sized aerosol particles was developed in this study. The sensor system is composed of a flow system is regulated and controlled by means of mass flow controllers with a vacuum pump, a size selective inlet to remove the particle outside the measurement range, a particle charger using corona discharge tec-

Correspondence: P. Intra, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand.
email: panich_intra@yahoo.com

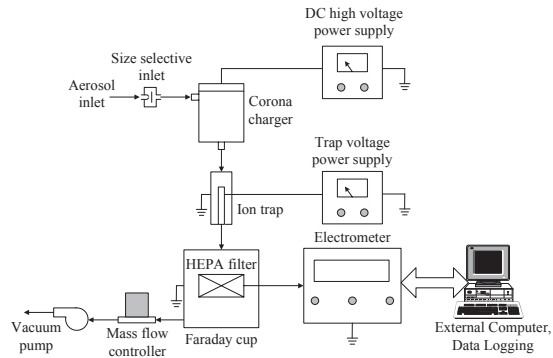


Fig. 1 Schematic diagram of the electrostatic sensor.

unique, an ion trap to remove the high electrical mobility of free ions after charger, a Faraday cup to collect charged particles, an electrometer for measuring signal current from the Faraday cup, and a computer controlled data acquisition and management system.

2.1 Size selective inlet

The inertial impactor was used to remove particles larger than a known aerodynamic size, upstream of the system. The aerodynamic particle size at which the particles are separated is called the cut-point diameter. In the impactor, the aerosol flow is accelerated through a nozzle directed at a flat plate. The impaction plate deflects the flow streamlines to a 90° bend. Particles with sufficient inertia are unable to follow the streamlines and impact on the plate. Smaller particles are able to follow the streamlines and avoid contact with the plate and exit the impactor.

2.2 Unipolar corona charger

The particle charger in the present study consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered ends [4]. The needle electrode is made of a stainless steel rod 3 mm in diameter and 49 mm in length, ended in a sharp tip. The angle of the needle cone was approximately 9° and the tip radius was approximately 50 μm, as estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of aluminum tube 30 mm in diameter and 25 mm in length with conical shape. The angle of the cone was approximately 30° and the orifice diameter was approximately 4 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 2 mm. The corona electrode head is connected to a DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded.

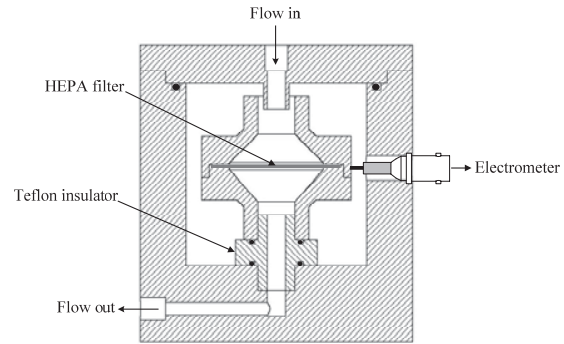


Fig. 2 Schematic diagram of the Faraday cup.

An adjustable DC high voltage power supply is used to maintain the corona voltage difference, typically of the order of 3.0 kV. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field toward the outer electrode wall. Aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions via diffusion charging and field charging mechanisms.

2.3 Ion trap

The ion trap was used to remove the high electrical mobility of free ions after the charger. As the free ions can potentially reach the detector and ruin the measurement, a trap field is introduced just after the corona charger. The trap field is across the aerosol flow and has a 200 V.

2.4 Faraday cup

Fig. 2 shows the schematic diagram of the Faraday cup used in this study. It consists of an outer housing, a HEPA (High Efficiency Particulate Air) filter, a filter holder, and a Teflon insulator. To completely shield the filter holder collecting the charged particles, the outer housing is made of a stainless steel, and filter holder is electrically isolated from the outer housing with Teflon insulator stand, while the outer housing is grounded. The Faraday cup plays a role to prevent electric noise for measuring ultra-low electric signal current (pA) from collected charged particles on an internal HEPA filter inside the Faraday cup corresponding to the total number concentration of the particles. If the filter holder is not shielded completely, noise which is 1000 times of resolutions to be expected. To transfer charges gathered at the HEPA filter to an electrometer circuit that is outside the Faraday cup, BNC connector is connected to HEPA filter.

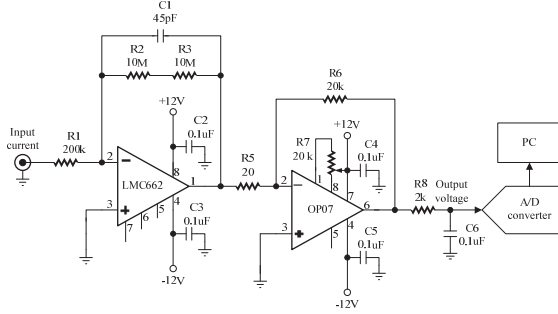


Fig. 3 Schematic diagram of the sensitive electrometer circuit.

Because material of HEPA filter is a conductor such as glass fiber, charges collected in the filter can move to the electrometer via the BNC connector and low noise cable without delay. In the case of existing aerosol electrometer airflow is curved at 90° while air is drifted from sampling probe to the filter. It can become the cause of charge loss. To solve this problem airflow into Faraday cup is straightened not to change the direction of the flow and loss the charge. The particle number concentration, N_p , is related to the signal current, I , at HEPA filter is given by

$$N_p = \frac{I}{peQ_a} \quad (1)$$

where p is the number of elementary charge units, e is the elementary unit of charge (1.6×10^{-19} C), and Q_a is the volumetric aerosol sampling flow rate into a Faraday cup.

2.5 Sensitive electrometer

A sensitive electrometer is used to measure the electric signal current, which are typically in the range 1 to 10 pA, from the Faraday cup. The schematic presentation of an electrometer circuit design for aerosol detection system is shown in Fig. 3. This circuit is a simple current-to-voltage converter, where the voltage drop caused by a current flowing through a resistor is measured. The circuit adopted two cascaded negative feedback amplifiers. The extra component in this circuit is primarily for fine offset voltage adjustment and input/output protection. A 12V power supply capable of providing 100 mA is required. The feedback capacitor and RC low-pass filter were used to reduce high-frequency noise and to prevent oscillations of the amplifier output [5]. In order to avoid expensive construction, commercially-

available low-cost monolithic operational amplifiers were used. The commercially-available operational amplifiers used in this circuit is the LMC662, which was designed for low current measurement and featured ultra-low input bias current (2 fA maximum) and low offset voltage drift ($1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) [6]. The output voltage, V_o , of this circuit is given by the following equation:

$$V_o = I_i R_1 \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} \frac{R_6}{R_5} \right) \quad (2)$$

where I_i is the input current, R_1 and R_5 are the input resistors of the first and second amplifiers, respectively, R_2 and R_3 are the feedback resistors of the first amplifier, and R_6 is the feedback resistors of the second amplifier. This circuit gives an output voltage of 10 mV per 1 pA of input signal current.

2.6 Data acquisition and processing system

The output voltage of the electrometer circuit in the range of 0 to +5V was connected to a unipolar 12-bit analog to digital converter (ADC), controlled by I²C bus from the external personal computer via RS-232 serial port interface. The digital ADC signal was processed by computer software, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display the particle number concentration.

3. Electrometer Calibration and Testing

The electrometer circuit is one of the most important parts influencing accurate particle number concentration measurement corresponding to signal current in the sensor system. In the present paper, a laboratory test facility was developed and constructed to evaluate performance of a prototype electrometer circuit. Fig. 4 shows the experimental setup used to evaluate the fabricated electrometer circuit performance. In this study, the electrometer circuit was calibrated with a current injection circuit, high-impedance current source [4]. This circuit consists of an appropriately high-standard resistor (10 G) and a highly-accurate adjustable voltage source in the range between 0 to +5 V. The output current of this circuit can simply be calculated from the Ohm's law. The range of the output current is from 1 pA to 10 pA. It should be noted that the electrometer circuit input was operated at virtual ground potential during calibration and subsequent current measurement. The output voltage from the

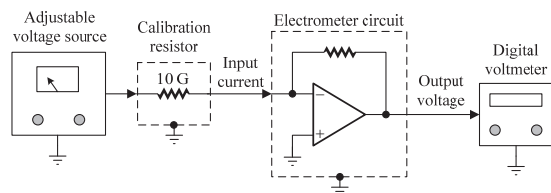


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for the electrometer test.

electrometer circuit was measured and recorded by a highly-accurate digital voltmeter. The voltage reading was then translated into the current measurement.

Fig. 5 provides comparison of measured current from this work and a commercial electrometer, Keithley model 6517A, with a high-accuracy current source. It can be found that the measured current was rising linearly as input current increased. Generally, the currents measured from this work were found to agree very well with those measured by the Keithley model 6517A. A very small difference of about 5 % was obtained. It is worthy to point out that there were some interferences on the connector at small potentials. Additionally, leakage of currents through the body of the connector can potentially impair the performance of the electrometer significantly. A detailed investigation of this problem may be improved and experimental studied further [5].

4. Conclusion and Future Work

The electrostatic sensor for detecting nanometer-sized aerosol particles developed at Rajamangala University of Technology Lanna and Chiang Mai University has been presented and described in this paper. The detecting method was based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. It was able to detect particle number concentration in the nanometer size range. A prototype of the prototype electrometer circuit has been constructed, evaluated, and compared against a commercial electrometer, Keithley model 6517A. The results obtained were very promising. It was demonstrated that the electrometer can be used successfully in detecting the signal current corresponding the particle number concentration.

Among the various techniques and devices exist for producing aerosol samples to testing and calibration of any instrument that measures aerosol particles. One of the most widely used techniques of

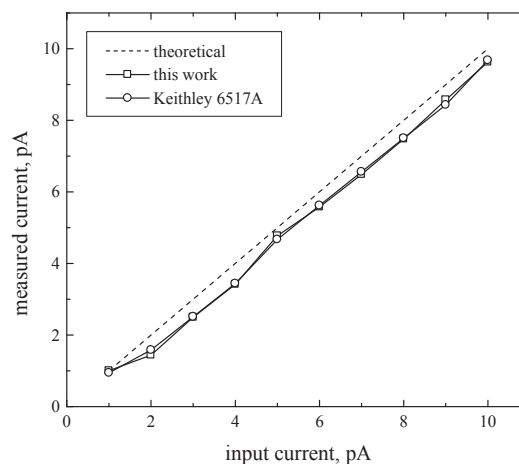


Fig. 5 Performance comparison between the prototype and commercial electrometer.

generating monodisperse aerosol particles is by using a Tandem DMA method. The main advantage of this method is the wide range of particle sizes it can generate. Further research, may involve a Tandem DMA method. Finally, calibration and comparison of the instrument with other particle measuring devices (e.g. SMPS, CPC, EAD, and ELPI) should be conducted further.

Acknowledgment

The authors wish to express their deepest gratitude to the Thailand Research Fund (TRF) for the financial support, contract no. MRG5180217.

References

- [1] W. C. Hinds, *Aerosol Technology*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1999.
- [2] P. Intra, and N. Tippayawong, "An overview of aerosol particle sensors for size distribution measurement," *Mj. Int. J. Sci. Tech.*, Vol. 1, No. 2, pp. 120 – 136, 2007.
- [3] TSI Incorporated, *Instruction Manual for Condensation Particle Counter Model 3010*. Revision F, Minnesota, USA, 2006.
- [4] P. Intra, and N. Tippayawong, "Corona ionizer for unipolar diffusion charging of nanometer aerosol particles," *Proceeding of 29th Electrical Engineering Conference*, pp. 1177 – 1180, Pattaya, Thailand, 9 – 10 November, 2006.
- [5] P. Intra, and N. Tippayawong, "An ultra-low current meter for aerosol detection", *CMU. J. Nat. Sci.*, Vol. 6, No. 2, pp. 313 – 320, 2007.
- [6] National Semiconductor Corporation, *LMC662 data sheet*. 2003.

ภาคผนวก ข-5

Intra, P. and Tippayawong, N., “Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer”, *Journal of Electrostatics*, 2010, in press, 10.1016/j.elstat.2010.01.008.

มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Electrostatics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/elstat

Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer

Panich Intra^{a,*}, Nakorn Tippayawong^b^a College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 December 2008

Received in revised form

8 June 2009

Accepted 19 January 2010

Available online xxx

Keywords:

Aerosol

Corona discharge

Ionizer

Unipolar charging

ABSTRACT

In this study, the corona-needle ionizer was designed, constructed, and characterized. Experimental characterizations of the electrostatic discharge in terms of current–voltage relationships of the corona ionizer, including the effects of discharge electrode cone angle and air flow rate were presented. It was found that the charging current and ion concentration in the charging zone increased monotonically with corona voltage. Conversely, discharge currents decreased with increasing angle of the needle cone. The negative corona was found to have higher current than the positive corona. At higher air flow rates, the ion current and concentration were found to be relatively high for the same corona voltage. The effect of air flow rate was more pronounced than the corona voltage. It was also shown that the ion penetration through the ionizer decreased with increasing corona voltage, and increased with increasing air flow rate. The highest ion penetration through the ionizer of the 10° needle cone angle was found to be about 93.7 and 7.7% for positive and negative coronas, respectively. The highest ion penetration for the needle cone angle of 20° was found to be 96.6 and 6.1% for positive and negative coronas, respectively.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Corona discharge is a low-power electrical discharge with non-thermal ionization that takes place at or near atmospheric pressure in a region of non-uniform high electric field intensity such as a sharp metal point held at several kilovolts [1]. The corona discharge is one of the most common techniques to generate high number concentration of ions. There have been numerous extensive studies in the past. Corona ionization is widely used in the semiconductor manufacturing industry to reduce the damage of sensitive circuit elements by electrostatic discharge, and to reduce electrostatic enhanced deposition of particulate contaminants on silicon wafers [2]. Another application of corona ionizers is in charging of particles in aerosol sizing based on electrical mobility analysis to impose a known net charge distribution on the particles because prediction of particle size distribution requires the knowledge of the charge distribution for every particle sizes [3].

There are several designs of corona ionizer employed and described in the published literature, both corona-wire and corona-needle ionizers [4]. A widely used ionizer is a corona-needle dischargers because of its simplicity and capability to provide high

number concentrations of ions [5]. There have been numerous studies and developments on the corona-needle ionizer, both ac and dc sources. Recently, Asano et al. [6] reported the ac ion current measurement from an alternating corona-needle ionizer using Faraday cage at the different frequencies and operating pressures. It is well known that the performance of these corona-needle ionizers depends on the ion number concentration in the discharge zone of the ionizer. A well designed corona ionizer should provide high magnitude of ion number concentration and stability that can be accurately determined for any given operating conditions. The magnitude of the ion number concentration in the discharge zone depends, however, on the ionizer geometry, i.e., the distance between discharge electrode and the plane or nozzle, and also on the angle of discharge electrode cone. To our knowledge, the issue of corona discharge in the needle to nozzle geometry has not been extensively studied in literature. Most of published papers concern merely characteristics of corona discharge in wire to cylinder, wire to plane, and point to plane geometries [4]. Only a few of them discuss the corona discharge in needle to nozzle [7–11]. The influence of the discharge electrode cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer is important for corona discharge due to the presence of different electric field profiles and space-charge effects in the discharge zone of the ionizer. Therefore, the aim of this paper was to design, construct, and characterize a unipolar corona-needle ionizer. The

* Corresponding author.

E-mail addresses: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com (P. Intra).

results of the experimental characterizations of the electrostatic discharge in terms of current–voltage relationships of the corona ionizer on the effects of discharge electrode cone angle and air flow rate (or residence time) in dc electric field were experimentally studied and discussed. A detailed description of the operating principle as well as physical characteristic of the ionizer was also presented.

2. Materials and methods

2.1. Unipolar corona-needle ionizer

Fig. 1 shows the schematic diagram of the corona-needle ionizer employed in this study. The ionizer's geometrical configuration is similar to the ionizer used by Hernandez-Sierra et al. [8], Alonso et al. [9], and Intra and Tippayawong [10, 11]. However, differences between the present ionizer and existing ionizers are air inlet geometry which was modified to ensure uniform distribution across the annular entrance to discharge zone. This ionizer consists essentially of a coaxial needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered end, and divided into three sections. The first and second sections (from left to right in the drawing) are made of Teflon, and the third (outlet section) of stainless steel tube. The needle electrode is made of a stainless steel rod, 6 mm in diameter, ending in a sharp tip. The tip radius is about 50 μm , as estimated under a microscope. In this work, experiments have been performed with the needle cone at two different angles, 10° and 20°, respectively. The diameter of the outer electrode was 30 mm, its length 15 mm with conical shape. The orifice diameter is about 3.5 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 1.75 mm. The needle electrode head is connected to a positive high voltage, while the outer electrode is grounded.

2.2. Electric field inside the ionizer

In this study, a numerical model was developed to investigate the distribution of electric field in the discharge zone of the ionizer to give a better understanding on the operating of the ionizer for both needle cone angle of 10° and 20°, respectively. The Poisson's equation for the electric potential can be used:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

where V is the applied voltage, ρ is the space-charge density, and ϵ_0 is the vacuum permittivity (8.854×10^{-12} F/m). For the present ionizer configurations, the resulting Laplace's equation in the 2-D, axisymmetric, cylindrical coordinates is given as:

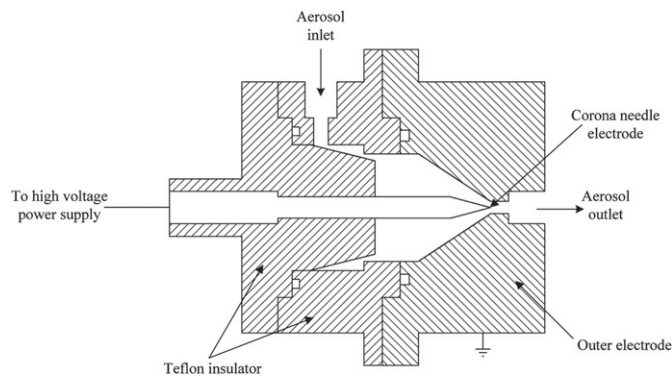


Fig. 1. Schematic diagram of the corona-needle ionizer.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\rho(r, z)}{\epsilon_0} = 0 \quad (2)$$

Once the electric potential is obtained, the electric field strength in the r - and z -directions can be calculated by the following equations:

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (3)$$

The Laplace's equation (Equations (2) and (3)) for electric potential cannot be solved analytically in this study, especially for the complex geometry of the present ionizer. Numerical simulation has to be performed in order to obtain the solutions. The commercial computational fluid dynamic software package, CFDRC™ is employed in this study. This software was based on finite volume method (FVM). With respect to the boundary conditions used, constant potentials are applied to the corona-needle electrode ($V = \text{corona voltage}$), the outer electrode ($V = 0$), and the zero gradient conditions is applied to the boundaries with out walls.

2.3. Experimental system

The schematic diagram of the experimental setup for the electrostatic discharge characterization of the present ionizer is shown in Fig. 2. Air flow was regulated and controlled by means of a mass flow controller (Dwyer model GFC-1111) with a vacuum pump, typically in the range between 1.0 and 8.0 L/min. The air was first dried with the diffusion dryer, any remaining water was removed, and then filtered through a high efficiency particulate-free air (HEPA) filter, Pall HEPA capsule model 12144 with filtration efficiency of 99.97% and retention of 0.3 μm for air/gas, to remove any particles and then enter the ion trap to remove the air ions. A commercial adjustable DC high voltage power supply (Spellman's Bertan model 602C-100P) was used to maintain the positive high voltage difference in the ionizer, generally in the range between 1.0 and 5.0 kV. The discharge current from the corona-needle electrode was measured directly with a Keithley 6517A electrometer incorporating a Keithley 6522 scanner card. The electrometer is capable of autoranging and has a 1 fA resolution. The rate of discharging is proportional to the mean ion number concentration in the discharge zone. Therefore, the mean number concentration of ions, n_{in} , in the discharge zone of the ionizer in the absence of aerosol particles can be estimated from the discharge current using the expression:

$$n_{\text{in}} = \frac{I_{\text{in}}}{eZ_iEA} \quad (4)$$

where I_{in} is the current deposited on the grounded conical-shaped wall, e is the elementary charge, Z_i is the electrical mobility of the ions, E is the electric field inside the discharge zone, and A is the inner surface area of the metallic cone (charger outlet) where the discharge current is collected. The ion number concentration has units of ions/ m^3 .

In this study, the ion current at the ionizer outlet was measured by filtration method. An air sample was drawn into a shielded Faraday cup with a HEPA filter through which all the air passed. A Faraday cup was devised using a stainless steel 47 mm filter holder in a 70 mm diameter stainless steel container. The filter was equipped with a fine collection metal grid, and was electrically isolated with Teflon from the container and ground. In the Faraday cup, the 99.99% of ions were removed from the air stream by the filter and the resulting ion current flow was measured with the electrometer. Thus, the total number concentration of ions at the ionizer outlet, n_{out} , can be calculated from the ion current by the following equation:

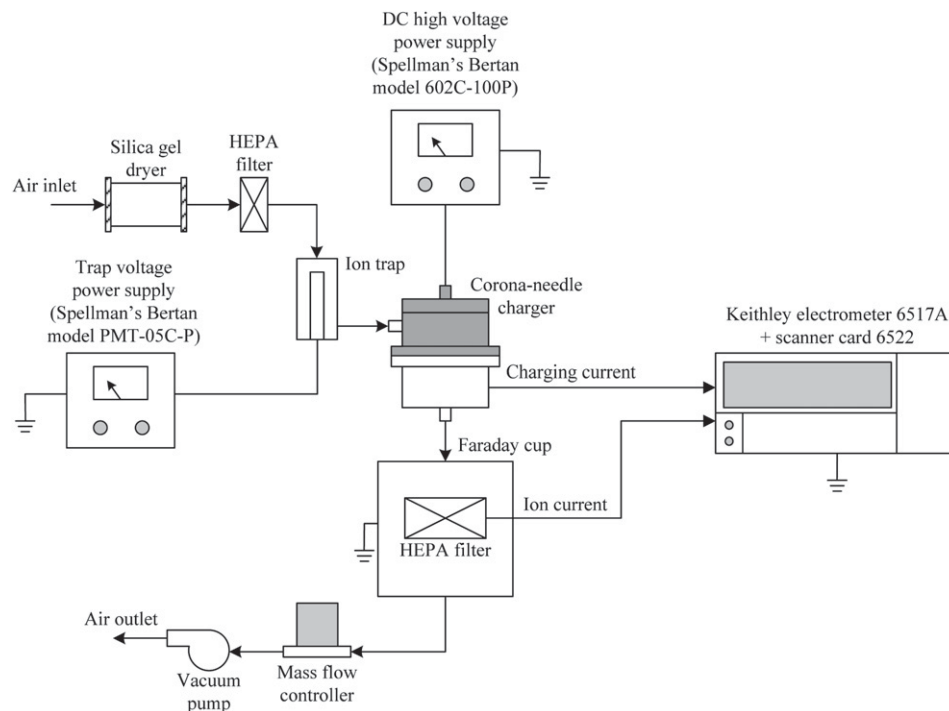


Fig. 2. Experimental setup for the characterization of the corona-needle ionizer.

$$n_{\text{out}} = \frac{I_{\text{out}}}{eQ} \quad (5)$$

where I_{out} is the ion current at the ionizer outlet was measured by the Faraday cup electrometer, and Q is the volumetric air flow through the Faraday cup. The ions penetration, P , through the ionizer is defined as the ratio of the number concentration of ions at the ionizer outlet over the number concentration of ions in the discharge zone of the ionizer, and can be estimated from the relation

$$P = \frac{n_{\text{out}}}{n_{\text{in}}} \quad (6)$$

As shown in Table 1, several sets of experiments were carried out at varying corona polarity and voltage, aerosol flow rates, and angle of the needle electrode cone. For each set of operating conditions, measurements were repeated at least three times.

3. Results and discussion

3.1. Current–voltage characteristics

Fig. 3 shows the corona discharge current–voltage characteristics of the positive and negative coronas in the discharge zone of the ionizer at different needle cone angles and operating air flow rates. The discharge currents were found to increase monotonically

Table 1
Limits of variables investigated.

Variable	Range
Corona voltage	0–10 kV
Orifice diameter	3.5 mm
Needle cone angle	10°, 20°
Ion generated	Positive ion (+), negative ion (–)
Ionized gas	Air
Gas flow rate	3, 5, and 8 L/min
Pressure	1 bar

with an increase in the corona voltage, and decrease with increasing angle of the needle cone. This was due to a weaker electric field strength in the discharge zone for the more obtuse needle cone angle (as evident in Fig. 4). This discharge current increased with the electric field strength, hence applied voltage. At the same corona voltage, magnitude of the discharge current was markedly higher for the 10° needle cone angle, compared to cone angle of 20°. The corona onset voltages were also found to increase with the increasing angle of the needle cone. For the needle cone angle of 10°, the onset of positive corona was found to be about 2.4 kV, and negative corona was about 2.0 kV. For the needle cone angle of 20°, the onset of positive corona was found to be about 2.7 kV, and negative corona was about 2.5 kV. In the case of the needle cone angle of 10°, the spark-over phenomena occurred for the positive corona at voltages larger than 4.0 kV and negative corona at voltages larger than 3.9 kV. In the case of the needle cone angle of 20°, the spark-over phenomena occurred for the positive corona at voltages larger than 4.3 kV and negative corona at voltages larger than 4.0 kV. The spark-over phenomena were observed to release higher charging currents, but it was undesirable because it interfered with the detector circuitry. Above these values, the current was found to exhibit a fluctuation in an uncontrollable manner and no measurement could be made. For both cases, the currents for negative ions were slightly higher than those positive ions. This was expected because negative ions have higher electrical mobility than positive ions ($Z_i^+ = 1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$, $Z_i^- = 1.425 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$, based on the work of Reischl et al. [12]). Thus, it was more likely to impact and deposit on the outer electrode wall of the ionizer due to the electrostatic force. For a given needle cone angle, the discharge current was also increased with the air flow rate, hence space-charge effect.

3.2. Ion current at the ionizer outlet

Variation in ion currents of the positive and negative ions at the ionizer outlet with corona voltage at different needle cone angles

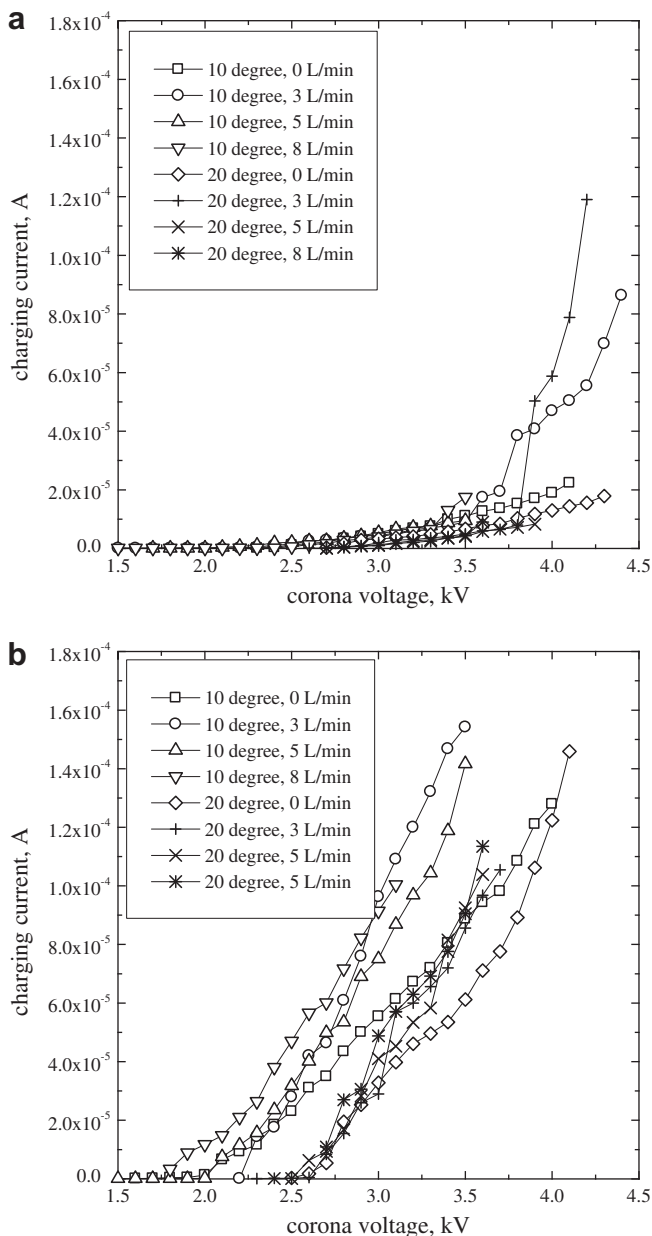


Fig. 3. Current–voltage characteristics in the charging zone of the ionizer, (a) positive ion, (b) negative ion.

and operating air flow rates is shown in Fig. 5. The resultant ion currents at the ionizer outlet of both positive and negative coronas were evaluated for 10° and 20°, 3.0, 5.0, and 8.0 L/min, and 1.0–5.0 kV. As seen in Fig. 5, the positive corona onset (i.e. positive ion generation) of the 10° needle cone angle appeared to occur at about 2.3, 2.4, and 2.5 kV for air flow rates of 3.0, 5.0, and 8.0 L/min, respectively, while the negative corona onset was observed at about 2.3, 2.2, and 2.3 kV for 3.0, 5.0 and 8.0 L/min, respectively. The positive corona onset of the 20° needle cone angle appeared to occur at about 2.8, 2.9, and 2.8 kV for 3.0, 5.0, and 8.0 L/min, respectively, while the negative corona onset was observed at about 2.8, 2.9, and 2.8 kV for air flow rates of 3.0, 5.0 and 8.0 L/min, respectively. For corona voltages less than 2.0 kV, the ion current was relatively low. In this range, corona discharge did not occur. For the air flow effect, the results showed that increase in air flow rate resulted in an increase of the ion current at a fixed corona voltage.

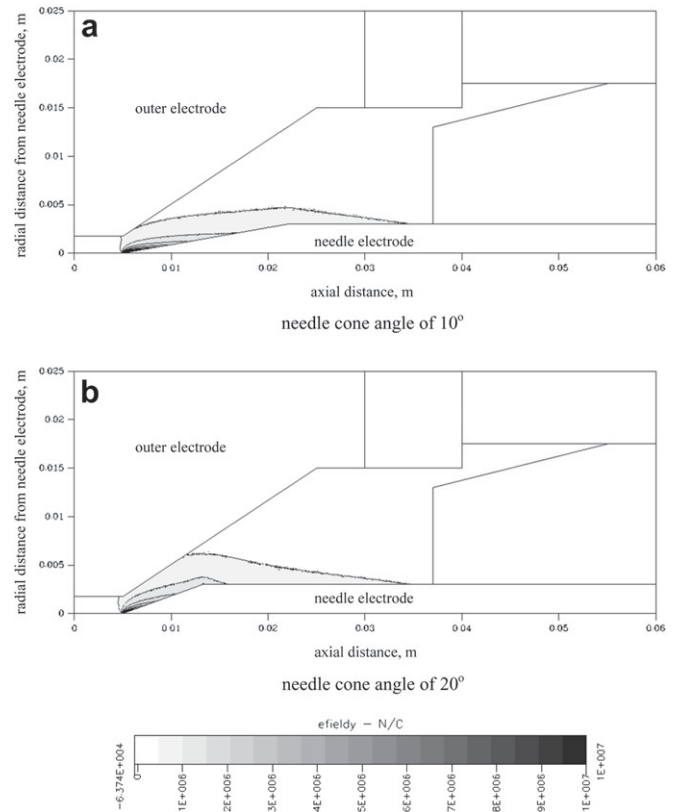


Fig. 4. Distributions of electric field strength inside the ionizer, (a) needle cone angle of 10°, (b) needle cone angle of 20°.

In both needle cone angles, the positive ion current was found to depend only on corona voltage within a narrow interval. At larger voltages, positive ion currents practically become constant, independent of the corona voltage. Meanwhile, negative ion currents increased slightly with increasing corona voltage. This may be explained by the fact that higher degree of ion loss was inevitable when a great number of ions were densely populated. It was evident that when the applied voltage increased, the discharge current and electric field strength in the discharge zone were found to increase. Many more ions have tendency to be electrostatically lost in the discharge zone of the ionizer. The ion loss inside the ionizer due to electrostatic loss is defined as the ratio of the ion number concentration at the ionizer outlet over the number concentration of ions inside the ionizer. At the same corona voltage, magnitude of the ion current was slightly higher for the needle cone angle of 10°, compared to cone angle of 20°. It was also found that the ion current at the ionizer outlet for positive corona was slightly higher than for negative corona, presumably because negative ions, having higher electrical mobility, are electrostatically lost within the ionizer to a higher extent.

3.3. Ion number concentration and penetration

Fig. 6 shows the variation in ion number concentration with corona voltage in the discharge zone of the ionizer at different needle cone angles and air flow rates. The ion number concentration in the discharge zone was calculated based on measurements and the method presented in Section 2.2. The number concentration of ions was approximately proportional to the discharge current. As seen in the plot, the ion number concentration in the discharge zone increased with increasing corona voltage. According

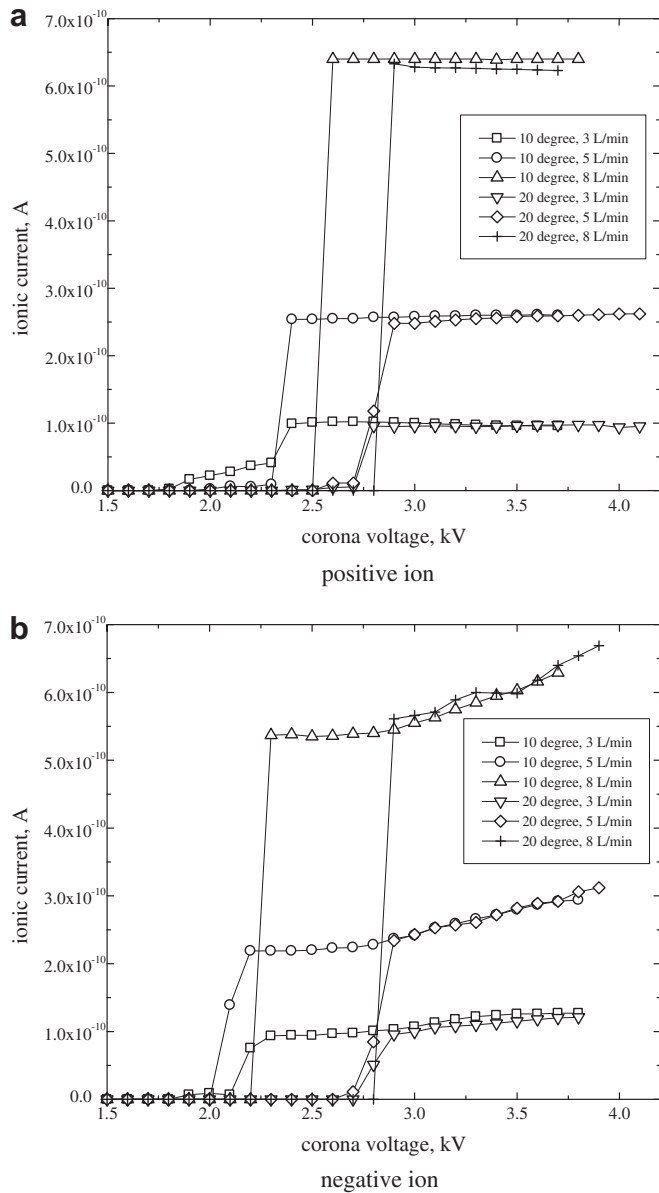


Fig. 5. Variation in ion current with corona voltage at the ionizer outlet, (a) positive ion, (b) negative ion.

to the discharge currents, the ion number concentration in the discharge zone was found to decrease with increasing angle of the needle cone. The ion concentrations from the 10° needle cone angle were 1.5 times larger than those from the 20° needle cone angle. It is commonly known that the number concentration of negative ion is generally larger than positive ion, in a range well above corona onset.

The plots of the ion number concentration at the ionizer outlet as a function of the corona voltage at different needle cone angles and air flow rates are shown in Fig. 7. For the needle cone angle of 10° , the highest ion current in the Faraday cup was found to be about 6.4×10^{-10} , and 6.29×10^{-10} A, corresponding to the ion number concentration of about 2.98×10^{13} , and 2.93×10^{13} ions/m³ occurring at the corona voltage of 2.9, and 3.7 kV for positive and negative coronas, and air flow rate at 8.0 L/min, respectively. For the needle cone angle of 20° , the highest ion current in the Faraday cup was found to be about 6.25×10^{-10} , and 6.69×10^{-10} A,

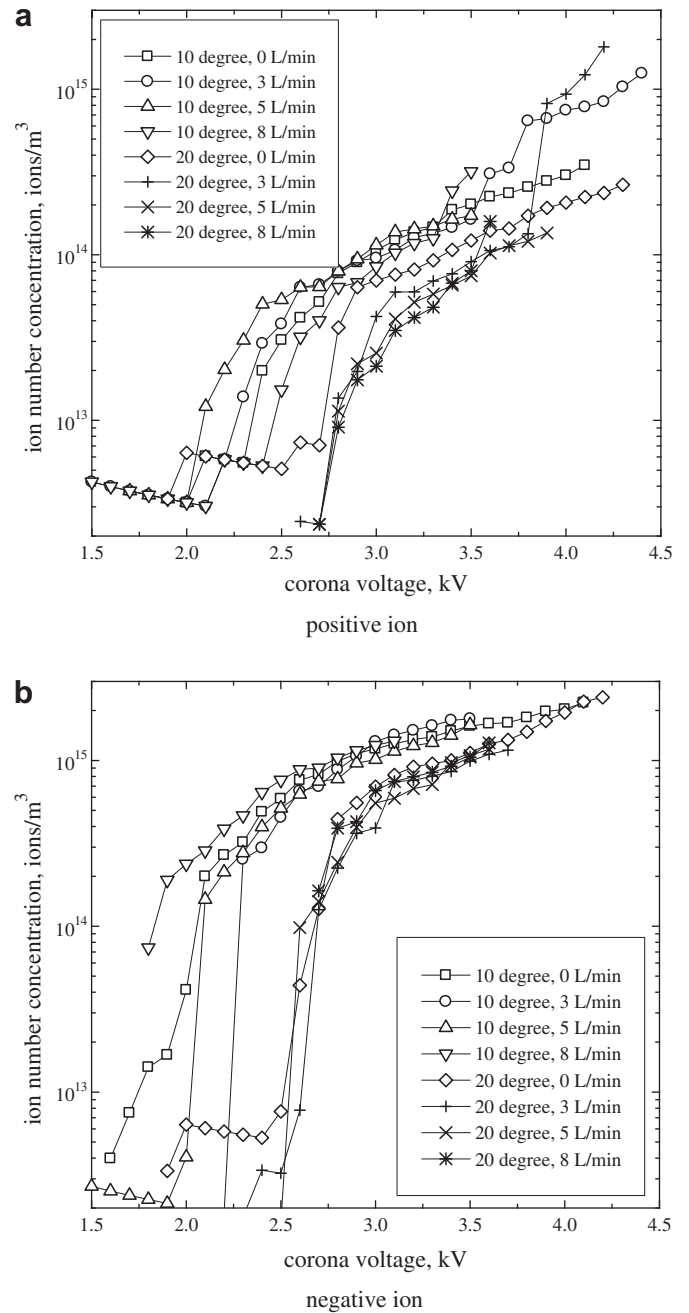


Fig. 6. Variation in ion number concentration with corona voltage in the charging zone of the ionizer, (a) positive ion, (b) negative ion.

corresponding to the ion number concentration of about 2.92×10^{13} , and 3.11×10^{13} ions/m³ occurring at the corona voltage of 3.4, and 3.9 kV for positive and negative coronas, and air flow rate at 8.0 L/min, respectively. Conversely, the discharge current of 10° needle cone angle under the same conditions was about 4.1×10^{-6} , and 9.82×10^{-5} A, corresponding to the ion number concentration in the discharge zone of about 8.99×10^{13} , and 1.688×10^{15} ions/m³ for positive and negative coronas, respectively. Meanwhile, the discharge current for the 20° needle cone angle was about 5.7×10^{-6} , and 1.06×10^{-4} A, corresponding to the ion number concentration in the discharge zone of about 1.07×10^{14} , and 1.73×10^{15} ions/m³ for positive and negative coronas, respectively.

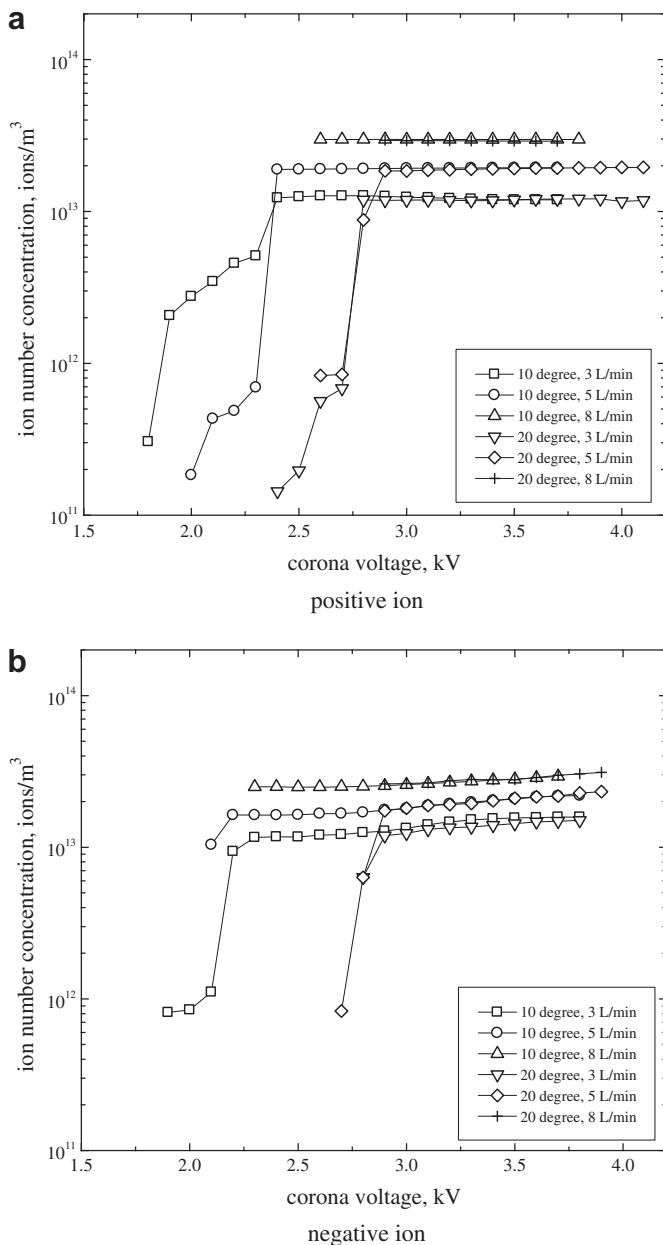


Fig. 7. Variation in ion number concentration with corona voltage at the ionizer outlet, (a) positive ion, (b) negative ion.

Fig. 8 shows variation of ion penetration with corona voltage at needle cone angles of 10° and 20° and different operating flow rates for positive and negative coronas. It can be seen that after corona onset of both cases, the ion penetration gradually decreased with increasing corona voltage as a function of the electric field strength inside the ionizer. This was expected. When the corona voltage increased, the discharge current and the electric field strength in the discharge zone were found to increase, hence, more ions loss due to electrostatic deposition on the inner surface of the outer electrode inside the ionizer. When the air flow rate increased, the ion penetration through the ionizer was found to slightly increase. This is because the ions can be transported from the charger more easily by faster flowing air. Due to high electrical mobility of negative ion, the penetration of positive ions was found to be higher than negative ions for both needle cone angles. As it can be

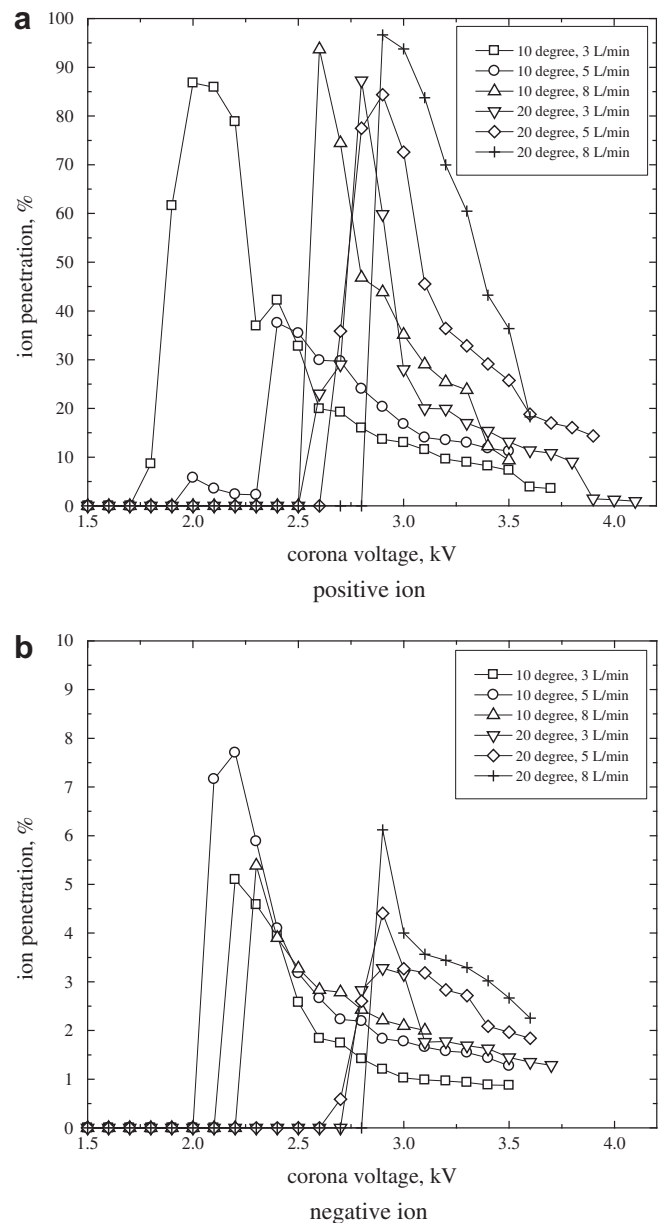


Fig. 8. Variation of ion penetration with corona voltage at different needle cone angles and operating flow rates, (a) positive ion, (b) negative ion.

seen from **Fig. 8**, the highest ion penetration through the ionizer of the needle cone angle of 10° was found to be about 93.7%, and 7.7% for positive and negative coronas, respectively. Meanwhile, the highest ion penetration for the needle cone angle of 20° was found to be about 96.6%, and 6.1% for positive and negative coronas, respectively.

4. Concluding remarks

Electrostatic discharge characteristics of corona-needle ionizer were investigated and presented in this work. Discharge current, ion number concentration, and ion penetration as a function of corona voltage, aerosol flow rate, and needle cone angle were evaluated. The results showed that the discharge current and ion concentration in the charging zone increased with increasing corona voltage. Conversely, discharge currents decreased with

increasing angle of the needle cone. The negative corona was found to have higher current than the positive corona. At higher air flow rate, the ion current and concentration were found to be relatively high for a fixed corona voltage. The effect of air flow rate was more significant than that of corona voltage. It was also shown that the ion penetration through the ionizer decreased with increasing corona voltage, and increased with increasing air flow rate. The highest ion penetration through the ionizer of the 10° needle cone angle was found to be about 93.7%, and 7.7% for positive and negative coronas, respectively. Meanwhile, the highest ion penetration for the 20° needle cone angle was found to be about 96.6%, and 6.1% for positive and negative coronas, respectively.

Acknowledgment

The authors wish to express their deepest gratitude to the Thailand Research Fund for the financial support of this project, contract no. MRG5180217.

References

- [1] T.G. Beuthe, J.S. Chang, "Gas Discharge Phenomena", Handbook of Electrostatic Processes. Marcel Dekker, New York, 1995.
- [2] P.C.D. Hobbs, V.P. Gross, K.D. Murray, Reviewing clean corona discharge, laser-produced plasma ionization technologies. *Microcontamination* 9 (1991) 19–26.
- [3] P. Intra, N. Tippayawong, An overview of aerosol particle sensors for size distribution measurement. *Maejo International Journal of Science and Technology* 1 (2) (2007) 120–136.
- [4] P. Intra, N. Tippayawong, Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: a literature review. *Journal of Electrostatics* 67 (4) (2009) 605–615.
- [5] P. Intra, N. Tippayawong, Comparative study on electrical discharge and operation characteristics of needle and wire-cylinder corona chargers. *Journal of Electrical Engineering & Technology* 1 (4) (2006) 520–527.
- [6] K. Asano, Y. Fukada, T. Yasukawa, Measurement of ac ion current from a corona ionizer using a Faraday cage. *Journal of Electrostatics* 66 (2008) 275–282.
- [7] K.T. Whitby, Generator for producing high concentration of small ions. *Review of Scientific Instruments* 32 (12) (1961) 1351–1355.
- [8] A. Hernandez-Sierra, F.J. Alguacil, M. Alonso, Unipolar charging of nanometer aerosol particle in a corona ionizer. *Journal of Aerosol Science* 34 (2003) 733–745.
- [9] M. Alonso, M.I. Martin, F.J. Alguacil, The measurement of charging efficiencies and losses of aerosol nanoparticles in a corona charger. *Journal of Electrostatics* 64 (2006) 203–214.
- [10] P. Intra, N. Tippayawong, "Corona ionizer for unipolar diffusion charging of nanometer aerosol particles", in: 29th Electrical Engineering Conference, Pattaya, Thailand, 9–10 November, 2006.
- [11] P. Intra, N. Tippayawong, "Current-voltage characteristics of unipolar corona-needle charger for nanoparticles", in: 31st Electrical Engineering Conference, Nakhon Nayok, Thailand, 29–31 October, 2008.
- [12] G.P. Reischl, J.M. Makela, R. Harch, J. Neced, Bipolar charging of ultrafine particles in the size range below 10 nm. *Journal of Aerosol Science* 27 (1996) 931–949.

ภาคผนวก ข-6

Intra, P. and Tippayawong, N., "Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements", *Korean Journal of Chemical Engineering*, under review. (MS. ID: KJ2010-004) มี impact factor = 0.830 (JCR ปี 2008)



● Korean Journal of Chemical Engineering

Step 4 - Confirmation of Input Data

Corresponding author [EDIT](#)

Name Panich Intra

Affiliation Rajamangala University Of Technology Lanna

Contact **E-mail:** panich_intra@yahoo.com, **Tel:** +66-089-755-1985

Manuscript [EDIT](#)

Manuscript Title in English Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements

Keywords(semi-colon separated) Aerosol; Ion; Faraday cup; Electrometer

Section for Submission Environmental Engineering

Manuscript Type Research Paper

Potential Reviewers

Name	Affiliation	E-Mail	Phone
Jaan Salm	Institute Of Physics, University Of Tartu, Tartu, Estonia	Jaan.Salm@ut.ee	-
Yoshi Otani	Department Of Chemistry And Chemical Engineering, Kanazawa University, Kanazawa, Japan	otani@t.kanazawa- u.ac.jp	-
Wiwut Tanthapanichkoon	National Nanotechnology Center (Nanotec), National Science And Technology Development Agency, Thailand	wiwut@nanotec.or.th	-

Uploaded Files [EDIT](#)

Revision	Type	Name	Size	Uploaded
Original	Manuscript	Rev[0] File[7846] Type[Manuscript].pdf	282 KB	2010-01-05
	Manuscript	Rev[0] File[7848] Type[Manuscript].pdf	282 KB	2010-01-05
	Cover letter	Rev[0] File[7845] Type[Cover letter].pdf	37 KB	2010-01-05

[PRINT](#)

[SUBMIT TO EDITORIAL OFFICE](#)

[PREVIOUS](#)



College of Integrated Science and Technology

Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300
Tel. 0-5392-1444, Fax. 0-5321-3183

The Editor-in-Chief,
Korean Journal of Chemical Engineerings
5F, 34-1, 5-ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 135-075, Korea

5 January 2010

Dear the Editor-in-Chief

Enclosed are the typed original and the complete paper files of a manuscript by Panich Intra and Nakorn Tippayawong titled “**Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements**” which is being submitted for consideration and possible publication in the *Korean Journal of Chemical Engineerings*.

This manuscript is new, is not being considered elsewhere and reports the results of an ongoing research at our department. Any suggestion for improvement of the manuscript is welcomed.

Yours sincerely,

Dr. Panich Intra

Correspondence for manuscript, please contact:

Dr. Panich Intra

College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna,

Chiang Mai 50300, Thailand

Phone: 0-5392-1444, Fax: 0-5321-3183

e-mail: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com

Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements

Panich Intra* and Nakorn Tippayawong**

*College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiang Mai 50300, Thailand

**Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: panich_intra@yahoo.com

Abstract – In this study, an aerosol electrometer system for measuring ion and aerosol charge using electrostatic detection technique was developed and presented. It consists of a size selective inlet, a particle charger, an ion trap, a Faraday cup, an electrometer, and a data acquisition and processing system. In this system, an aerosol sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 1 pA induced by ion and aerosol charge collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of ion and aerosol. Signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. A detailed description of the operating principle of the system as well as main components was presented. Performance of the prototype aerosol electrometer circuit used in this work was evaluated and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A. Good agreement was found from the comparison. Finally, experimental testing results of ion and aerosol charge measurements were shown and discussed.

Keywords: Aerosol, Ion, Faraday cup, Electrometer

INTRODUCTION

Detection and measurement of ion and aerosol charges have become an important topic in atmospheric pollution monitoring and source characterization. In recent years, considerable interest has been shown to submicron-sized aerosol particles, defined as aerosols with diameter less than 1 μm , for two main reasons. First, such particles have been associated with adverse health effects in areas of high concentrations, and second, aerosols are believed to have a significant influence on atmospheric quality, climate at a local and global scale and processes in various industries such as food, pharmaceutical and medical, electronic and semiconductor industries [1]. Ion and aerosol charge detectors have been developed to monitor indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry for this purpose. A widely used instrument capable of detecting ion and aerosol charge is an electrical aerosol detector (EAD). A typical EAD consists of two key components: one for aerosol charging, and the other for measurement of the current or charges on charged aerosols with an electrometer. Readout of an EAD depends strongly on the charging technique used. There have been numerous studies and developments on the EAD. Recent developments were reviewed by Intra and Tippayawong [2]. Many previous studies concern about nanoparticle number and surface area concentration measurement [3 – 5], ambient ion and aerosol charge measurement [6 – 7], aerosol integral parameter measurement [8], and nanoparticle size distribution measurement [9]. Available commercial instruments designed to measure net charge on aerosol particles is the TSI Model 3070A Electrical Aerosol Detector [10]. An alternative instrument that can also be used to detect aerosol particles is a condensation particle counter (CPC) which uses particle growth and optical property [11 – 12]. These commercial instruments are widely used for detecting airborne ultra fine particles and provide high-resolution measurement, but they are very expensive and large in size. A CPC does not operate in ambient temperatures outside the control range of 10 to 34°C, and the pump and flow sensor of the CPC cannot control the flow when the pressure at the aerosol inlet, the make up air inlet, or the pump exhaust is too high or too low. The CPC must be carefully moved in caution to protect the optics from contamination with working fluid like alcohol. In addition, the CPC have a size dependent counting efficiency, with low detection efficiency for particle size less than ~30 nm [12].

The movability of instruments should be considered in monitoring ion and airborne aerosol particles. To avoid this problem, an inexpensive detector, suitable for detection of ion and aerosol number concentrations, was developed and experimentally tested in this study. This system is based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charges. A detailed description of the operating principle of the sensor was presented. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work as well as the preliminary

experimental testing results of ion and aerosol charge were also introduced and discussed.

AEROSOL ELECTROMETER SYSTEM

Fig. 1 shows the schematic diagram of the aerosol electrometer system, developed in this study. The system is composed of a size selective inlet, a particle charger, an ion trap, a Faraday cup, an electrometer circuit, and a data acquisition and management system. In this study, a flow system is regulated and controlled by means of mass flow controllers with a vacuum pump. Sampled aerosols are first passed through a size selective inlet to remove particles with diameter larger than 1.0 μm . Sampled aerosol are then directly introduced into the particle corona charger to charge the particles. Charged particles exiting from the charger are passed through an ion trap, with the voltage set at 150V to remove excess ions. The electrical charges carried by particles are measured in a Faraday cup electrometer downstream of the ion trap. The readout of the system has shown a relationship between the time and the number concentration of particles by a data acquisition and processing system. The following paragraphs give a detailed description of main components of the aerosol electrometer system.

1. Size Selective Inlet

In this study, the inertial impactor was used to remove the particle outside the measurement range, 1.0 μm , based on their aerodynamic diameter upstream of the system. The design of this impactor is based on the inertial impactor configuration of Intra [13]. It consists of an acceleration nozzle and an impaction plate. The acceleration nozzle in the diameter of 1 mm and the impaction plate are made of a stainless steel. The distance between the acceleration nozzle and the impaction plate was 1 mm. In the impactor, the aerosol flow is accelerated through an acceleration nozzle directed at an impaction plate. The impaction plate deflects the flow streamlines to a 90° bend. The particles larger than the cut-off diameter of the impactor impact on the impaction plate while the smaller particles follow the streamlines and avoid contact to the impaction plate and exit the impactor.

2. Particle Charger

The corona-needle charger used in the present study consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered ends [14]. The needle electrode is made of a stainless steel rod 3 mm in diameter and 49 mm length, ended in a sharp tip. The angle of the needle cone was about 9°

and the tip radius was about 50 μm , estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of stainless steel tube 30 mm in diameter and 25 mm length with conical shape. The angle of the cone was about 30° and the orifice diameter was about 4 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 2 mm. The corona electrode head is connected to a DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. An adjustable DC high voltage power supply module, a Bertan model PMT-50CP, is used to maintain the corona voltage difference, typically of 3.5 kV. The output voltage of the Bertan model PMT-50CP was controlled by the ADAM-4024 analog output module. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field toward the outer electrode wall. Aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions via diffusion charging and field charging mechanisms.

3. Ion Trap

In this study, the ion trap was used to remove the high electrical mobility of free ions after the charger. As the free ions can potentially reach the detector and ruin the measurement, a trap field is introduced just after the corona charger. Ion trap has a geometrical configuration similar to the unipolar corona-wire charger and the wire-cylinder electrostatic precipitator [15]. It consists of a coaxial wire electrode placed along the axis of a metallic cylinder tube. The outer electrode is made of stainless steel tube 28 mm in diameter and 15 mm in length. The wire electrode is made of stainless steel wire 300 μm in diameter and 15 mm in length. DC voltage supply module, a Bertan model PMT-05CP, was applied to the wire electrode, typically of 150 V, while the outer metallic electrode is grounded. The output voltage of the Bertan model PMT-05CP was controlled by the ADAM-4024 analog output module. The most important topic while operating the ion precipitator is about setting a proper voltage to deposit the ions. This voltage will ensure that all ions can be removed but most charged particles are not influenced.

4. Faraday Cup

Fig. 2 shows schematic diagram of the Faraday cup. This device is basically an open-ended Faraday cup with a filter to collect the charges. It consists of an external case, a filter holder, HEPA (high efficiency particulate air) filter, and BNC connector. To completely shield the filter collecting the charged particles, external case is made of a stainless steel, and filter is electrically isolated from the external case with Teflon stand. In the filter holder, the filter was placed on the top of a rigid stainless-steel net. The Faraday cup plays a role to prevent electric noise to measure very low current caused by charges, which are collected by an internal

filter. If the object of measurement is not shielded completely, noise which is 1000 times of resolutions to be expected. To transfer charges gathered at the filter to an electrometer that is outside the faraday cage, BNC connector is connected to filter holder. Because material of filter holder is conductor, charges collected in the filter can move to the electrometer through the low noise cable and BNC connector without delay. In the case of existing aerosol electrometer airflow is curved at 90 degrees while air is drifted from sampling probe to the filter. It can become the cause of charge loss. To solve this problem airflow into faraday cage is straightened in such a way that the change in direction of the flow and loss the charge do not occur. Thus, the signal current, I_p , of collected charges on the filter in the Faraday cup can be calculated by [14]

$$I_i = N_i e Q \quad (1)$$

where N_i is the total ion number concentration, e is the elementary unit of charge (1.6×10^{-19} C), and Q is the volumetric air flow rate into a Faraday cup. In the case of aerosol charge, the signal current equation, I_p , has to be rewritten as [16]:

$$I_p = n_p (d_p) N_p e Q \quad (2)$$

where N_p is the total particle number concentration, and n_p is the mean charge level of aerosol particles as a function of particle diameter.

5. Electrometer Circuit

The schematic diagram of an electrometer circuit design for the system is shown in Fig. 3. This circuit is a simple current-to-voltage converter, where the voltage drop caused by a current flowing through a resistor is measured. The circuit adopted two cascaded negative feedback amplifiers. Extra component in this circuit is primarily for fine offset voltage adjustment and input/output protection. A 12V power supply capable of providing 100 mA is required. The feedback capacitor and RC low-pass filter were used to reduce high-frequency noise and to prevent oscillations of the amplifier output [16]. In order to avoid expensive construction, commercially-available low-cost monolithic operational amplifiers were used. The commercially-available operational amplifiers used in this circuit is the LMC662, which was designed for low current measurement and featured ultra-low input bias current (2 fA maximum) and low offset voltage drift ($1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) [17]. The zero

offsets are temperature-dependent, and therefore the electrometers are temperature-stabilized to about 32°C, eliminating offset drift. This circuit gives an output voltage of 20 mV per 1 pA of input signal current. The electrometer circuit was calibrated with a current injection circuit, high-impedance current source [16]. It consists of an appropriately high standard resistor (10 GΩ) and an adjustable voltage source in the range between 0 – 5 V. The output current of this circuit can simply be calculated from the Ohm's law. The range of the output current is from 1 pA to 10 pA. It should be noted that the electrometer circuit input was operated at virtual ground potential during calibration and subsequent current measurement. The output voltage from the electrometer circuit was measured and recorded by a highly accurate digital voltmeter. The voltage reading was then translated into the current measurement as shown in Table 1. The ratio and standard deviation of measured current from this work and a commercial electrometer, Keithley model 6517A, with high-accuracy current source is shown in Fig. 4. It was found that the measured current ratio was found in the range of 1.00 – 1.40 corresponding to the standard deviation in the range of 1.018 – 1.048. As shown in Fig. 4, the measured current ratio and the standard deviation of this work was increased when input current smaller than 5 pA. Generally, the currents measured from this work were found to agree very well with those measured by the Keithley model 6517A. Very small difference (<5%) was obtained.

6. Data Acquisition and Processing System

The output signal from the electrometer circuit is in the range of 0 to +10V. It is then sent to the ADAM-4017 analog input module, which is a 16-bit, 8 channel analog input module, controlled and data sampled by an external personal computer via RS-485 to USB converter interface. Software running on an external computer was developed, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display the ion current and number concentration with a time response of approximately 1 s.

PERFORMANCE EVALUATION

In the case of ion measurement, high number concentration of ions was generated by corona discharge with corona-needle charger, typically larger than 3×10^{12} ions/m³. An air sample was first dried with the dryer. Thus, any remaining water was removed. Dried air sample was filtered through a HEPA filter, and was then drawn into the charger. In the case of aerosol charge measurement, the schematic diagram of the experimental setup is shown in Fig. 5. It consists of a combustion aerosol generator (CAG), a dryer, a dilution chamber, a HEPA filter, and a vacuum pump. The CAG was used to generate polydisperse, carbonaceous diffusion flame

aerosols for this experiment [18]. The particle size distribution of polydisperse aerosols obtained by the electrical mobility spectrometer (EMS) was in the range between approximately 50 nm to 500 nm with particle number concentrations of approximately $10^{11} - 10^{12}$ particles/m³ [19]. Fig. 6 shows typical particle size distribution from the CAG with the geometric mean diameter of 208 nm and the geometric standard deviation of 1.084. During the measurement, the vacuum pump was switched on and the aerosol sample was sucked into the system using an isokinetic sampling system. The aerosol particles were first dried with the dryer. Before aerosol particles entering the system, the particles were diluted and mixed with clean air, which had been filtered through a HEPA filter, in the mixing chamber. The system was operated at aerosol flow rate in the range of 5.0 – 15.0 L/min. To reduce errors due to time variations in the aerosol concentrations, repeat measurements were commenced at least 5 min after the introduction of the aerosol into the measurement system.

Fig. 7 shows time variation of ion number concentration and signal current from the Faraday cup electrometer. The system was operated at charger voltage of 3.5 kV, ion trap voltage of 150 V, air flow rate of 10 L/min, and operating pressure of 1 atm. In the case of the charger and ion trap voltages were off, there was no ion. Measured signal current from Faraday cup was 0 pA. The number concentration of ions was calculated from measured signal current by the Equation 1. It was shown that ion number concentration was found to be about 1.6×10^{12} ions/m³, corresponding to measured signal current of about 47 pA when the charger voltage was on, and the ion trap voltage was off. On the other hand, when both charger and ion trap voltages were on, most ions were removed inside the ion trap. For the effect of air flow rate, variation of measured ion current from Faraday cup electrometer with air flow rates is shown in Fig. 8. Three different operating conditions of the aerosol flow rates were tested. Variation of flow rate was carried out by adjusting the outlet mass flow controller in the range between 5.0 – 15.0 L/min. Ion current was found to be in the range of approximately 22 – 68 pA, corresponding to the ion number concentration of about 1.5×10^{12} ions/m³. It was also shown that increasing the flow rate resulted in the increase in ion current. This may be attributed to the fact that the ion current was proportional to the air flow rate. At higher flow rates, ion current was relatively high.

In the case of aerosol charge measurement, Fig. 9 shows variation of measured particle current with aerosol flow rates. Signal current was measured to be in the range of about 75 – 225 pA, corresponding to the mean particle number concentration of approximately 9.5×10^{11} particles/m³. It was found that an increase in the aerosol flow rate resulted in an increase in measured signal current. This was because the signal current was approximately proportional to the aerosol flow rate. The larger aerosol flow rates led to more collected charged particles, giving rise to a larger induced current. In addition, high particle number concentration may lead to

large signal current due to that the fact that more particles had chances to be collected in this situation. Time variation of measured particle number concentration and signal current from the Faraday cup electrometer at aerosol flow rate of 10.0 L/min were also shown in Fig. 9.

ADVANTAGES AND LIMITATIONS

1. Advantages

- The system was simple, low cost, efficient and reliable to detect ion and aerosol charge. Overall dimensions and weight were such that it was easy to handle and move around.
- Rather than diffusion charging, the instrument employed unipolar corona discharge (diffusion and field) charging method.
- The system was capable of measuring both ion and aerosol charge. Collected aerosol particles in the filter can be also further analysis for physical and chemical properties e.g. electron microscopy, or mass spectrometry.

2. Limitations

- The detection limit is more pronounced for smaller particles because they carry less charge, and it is lower for slower sampling rates where the longer averaging time reduces the noise.
- The time response depends on two factors; the fluid time response and the electrical time response. For the fluid time response, simple improvement may be done by using high sample flow rate inside the system. For the electrical time response, sensitivity of the Faraday cup electrometer depends on the electrometer circuit sensitivity.
- Use of electrometer in the system limits the sensitivity of the instrument when detecting samples with low concentrations. This sensitivity was limited by signal to noise ratio.

CONCLUSIONS

The simple system for measuring ion and aerosol charge with a Faraday cup electrometer has been developed and evaluated in this paper. The detecting method was based on unipolar corona-needle charging and electrostatic detection of highly charges. The performance of the prototype aerosol electrometer circuit used in this work was evaluated and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A, and good agreement was found from the comparison. Experimental evaluation of the system was also carried out by the

corona discharge charger and the combustion aerosol. Experimental testing results of ion and aerosol charge measurements obtained were very promising. It was demonstrated that the system can be used in detecting the number concentration of ion and aerosol charge of approximately 0 to 2×10^{12} per m^3 , corresponding to signal current of approximately $0 - 250$ pA with a time resolution of less than 1 s.

ACKNOWLEDGMENT

This research was financially supported by the Thailand Research Fund (TRF), contract no. MRG5180217.

REFERENCES

1. W. C. Hinds, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, USA (1999).
2. P. Intra and N. Tippayawong, *Mj. Int. J. Sci. Tech.*, **1**, 120 (2007).
3. T. Johnson, S. Kaufman and A. Medved, *6th Int. ETH Conference Nanoparticle Measurement*, Zurich, Switzerland, 19 - 21 August (2002).
4. J. Wei, *Development of a method for measuring surface area concentration of ultrafine particles*, D. Eng. Thesis, University of Duisburg-Essen, Germany (2007).
5. P. Intra and N. Tippayawong, *J. Japan Soc. Applied Electromagnet. Mech.*, **17**, s17 (2009).
6. M. Murtomaa, P. Pekkala, T. Kalliohaka and J. Paasi, *J. Electrostat.*, **63**, 571 (2005).
7. F.O. J-Fatokun, L. Morawska, M. Jamriska and E.R. Jayaratne, *Atmos. Environ.*, **42**, 8827 (2008).
8. L. Li, D.R. Chen and P.J. Tsai, *J. Electrostat.*, **67**, 765 (2009).
9. L. Li, D.R. Chen and P.J. Tsai, *J. Nanopart. Res.*, **11**, 111 (2009).
10. TSI Incorporated, *Instruction Manual for Electrical Aerosol Detector Model 3070A*, Minnesota, USA (2002).
11. J.K. Agrawal and G.J. Sem, *J. Aerosol Sci.*, **11**, 343 (1980).
12. TSI Incorporated, *Instruction Manual for Condensation Particle Counter Model 3010*, Minnesota, USA (2002).
13. P. Intra, *CMU. J. Nat. Sci.*, **7**, 257 (2008).
14. P. Intra and N. Tippayawong, *Chiang Mai J. Sci.*, **36**, 110 (2009).
15. P. Intra and N. Tippayawong, *7th PSU-Engineering Conference*, Songkla, Thailand, 21 – 22 May (2009).
16. P. Intra and N. Tippayawong, *CMU. J. Nat. Sci.*, **6**, 313 (2007).

17. National Semiconductor Corporation, *LMC662 CMOS Dual Operational Amplifier Data Sheet*, (2003).
18. T.G. Cleary, G.W. Mulholland, L.K. Ives, R.A. Fletcher and J.W. Gentry, *Aerosol Sci. Tech.*, **16**, 166 (1992).
19. P. Intra and N. Tippayawong, *Korean J. Chem. Eng.*, **26**, 1770 (2009).

Table 1. Measured signal current from the electrometer circuit.

Input current (pA)	Minimum current (pA)	Maximum current (pA)	Average current (pA)	Standard deviation
0	-0.136	0.500	0.174	1.031
1	0.801	1.392	1.133	1.048
2	1.626	1.923	1.756	1.026
3	2.304	2.699	2.455	1.030
4	3.324	3.608	3.453	1.018
5	4.600	5.180	4.852	1.039
6	5.584	5.870	5.748	1.027
7	6.587	6.874	6.723	1.026
8	7.523	7.769	7.648	1.024
9	8.411	8.625	8.523	1.018
10	9.655	9.909	9.786	1.027

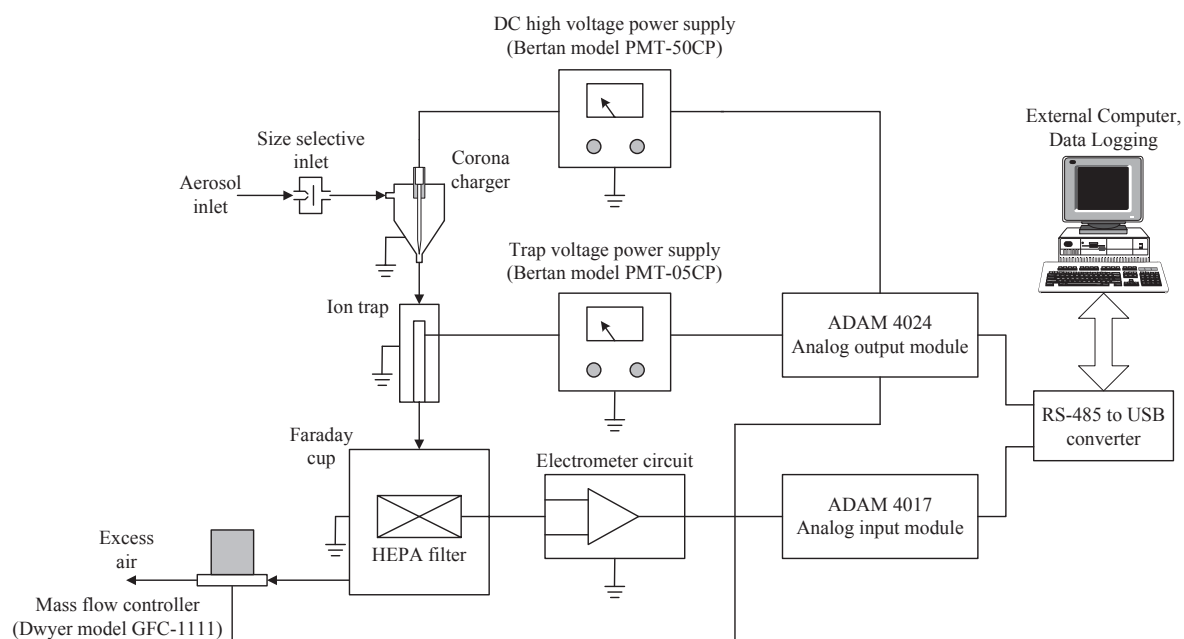


Fig. 1. Schematic diagram of the aerosol electrometer system.

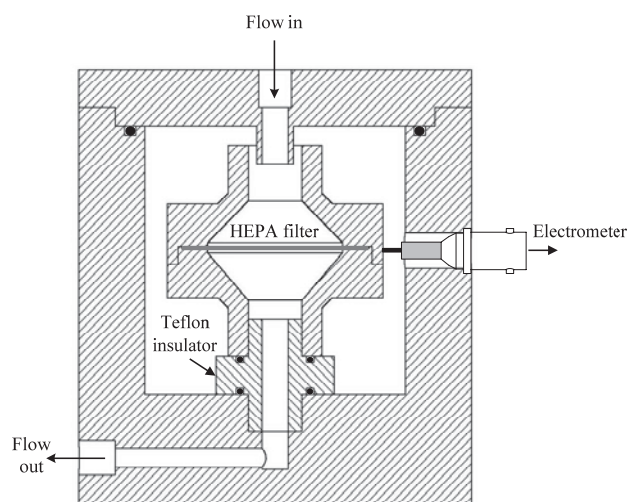


Fig. 2. Schematic diagram of the Faraday cup.

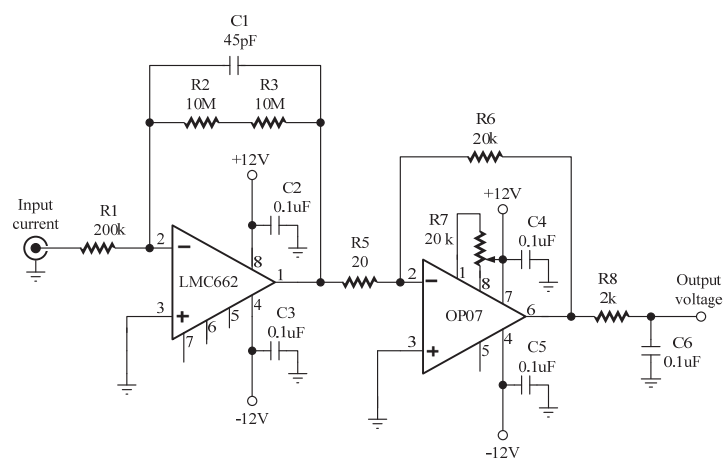


Fig. 3. Schematic diagram of the sensitive electrometer circuit.

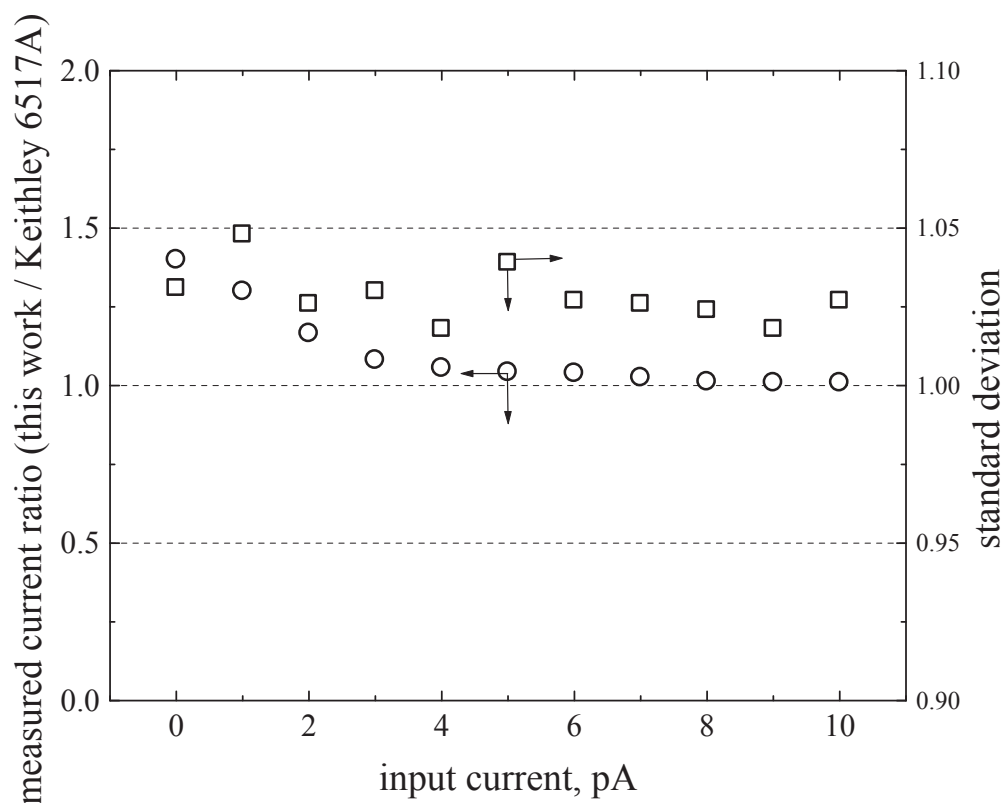


Fig. 4. Performance comparison between the prototype and commercial electrometer

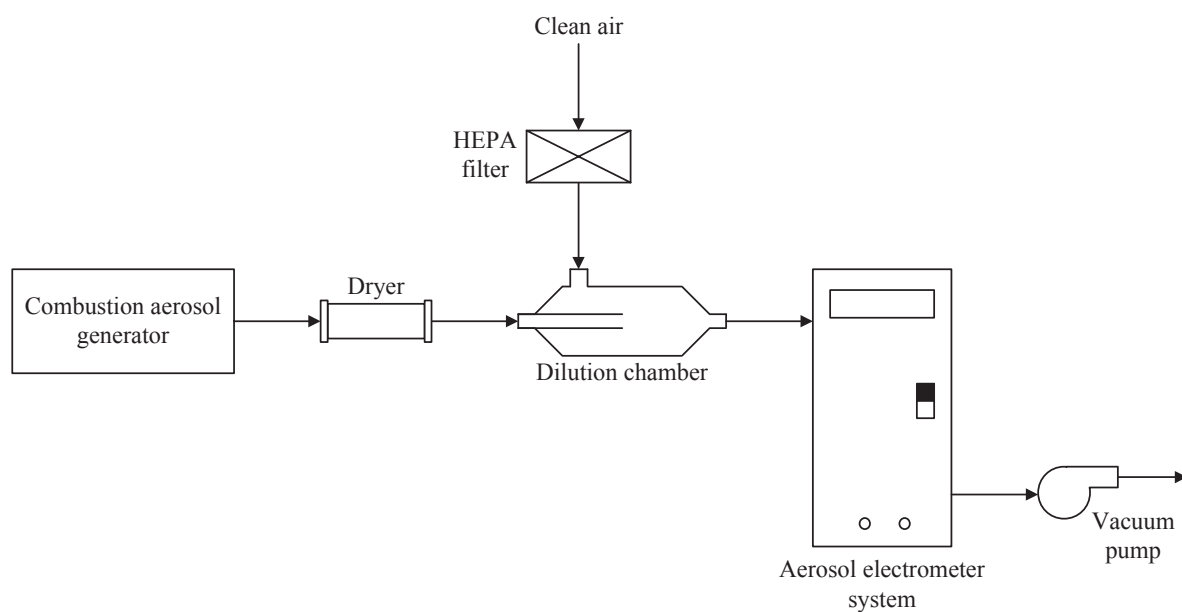


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental setup for preliminary testing of the aerosol electrometer system.

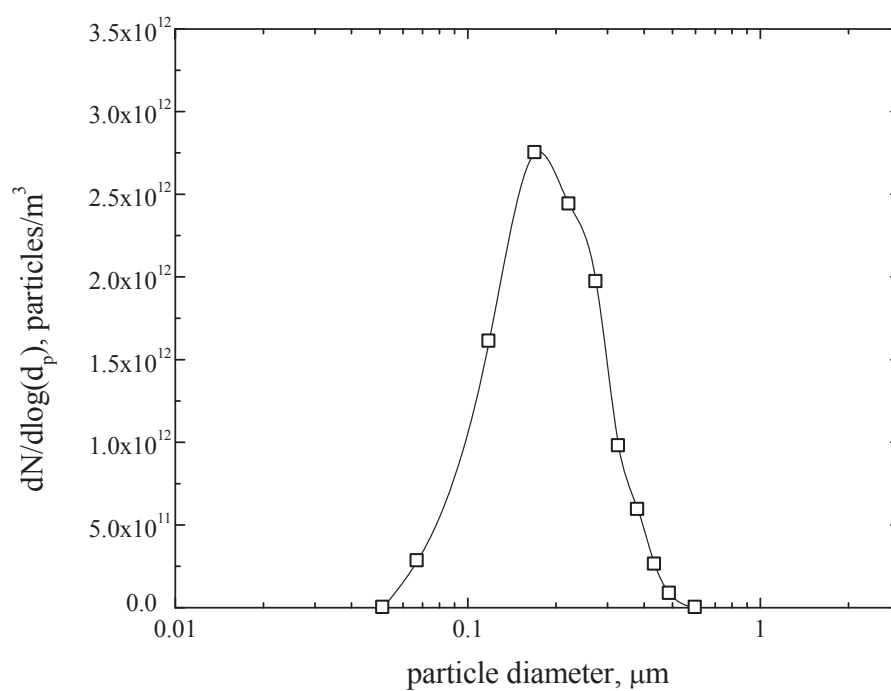


Fig. 6. Typical particle size distribution from the CAG.

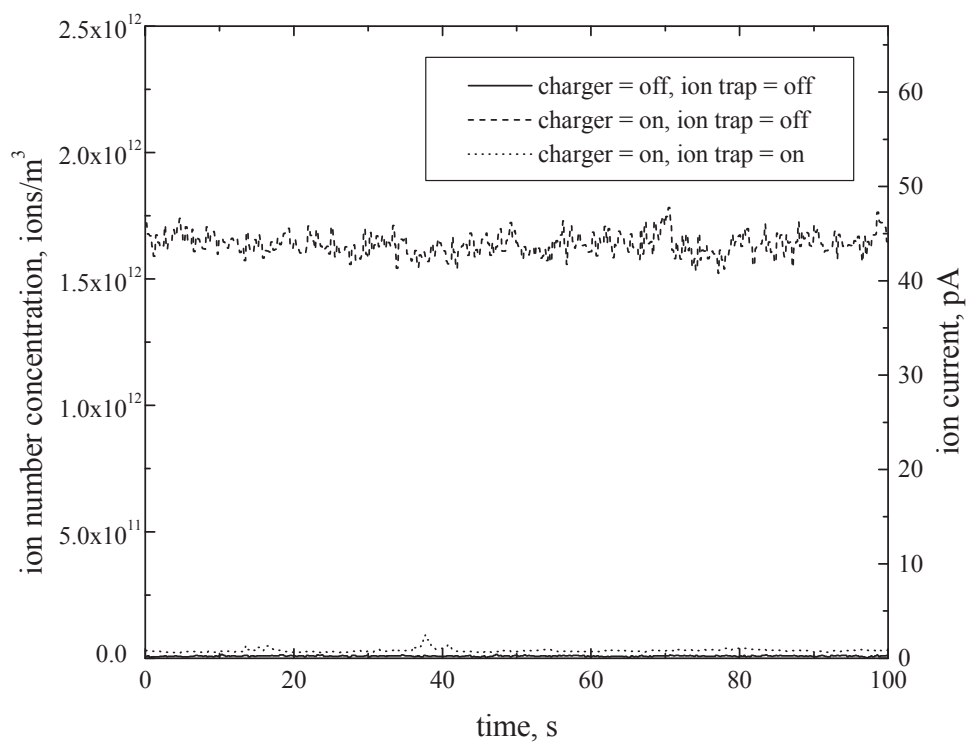


Fig. 7. Time variation of measured ion number concentration and signal current.

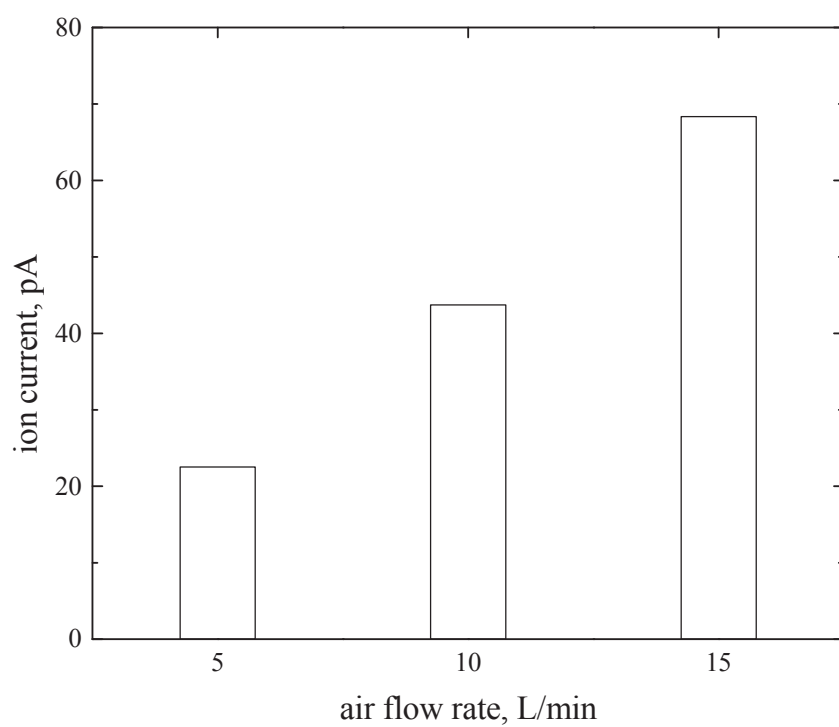


Fig. 8. Variation of measured ion current with air flow rates.

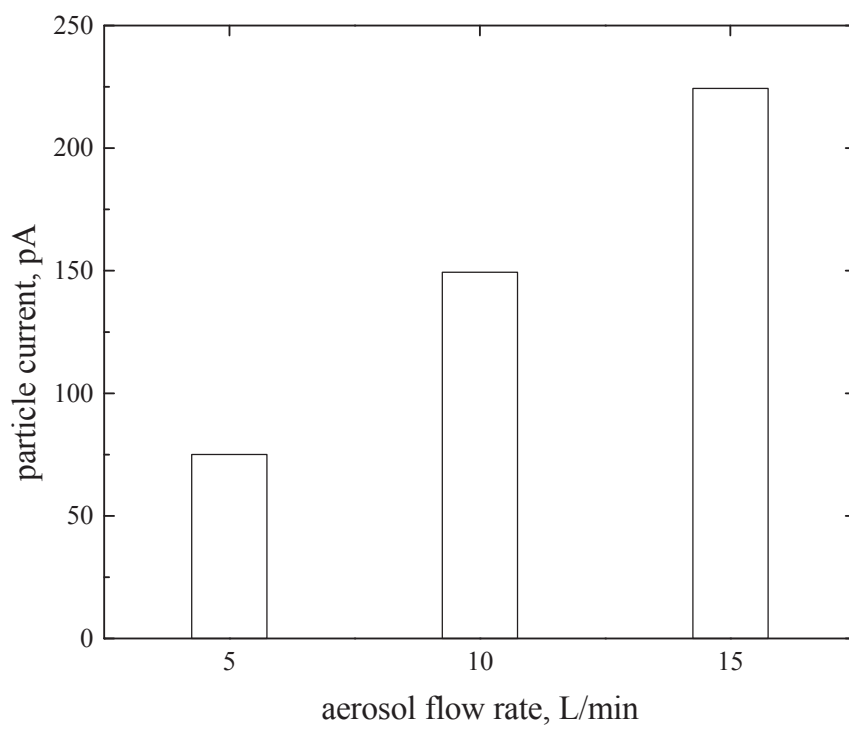


Fig. 9. Variation of measured particle current with aerosol flow rates.

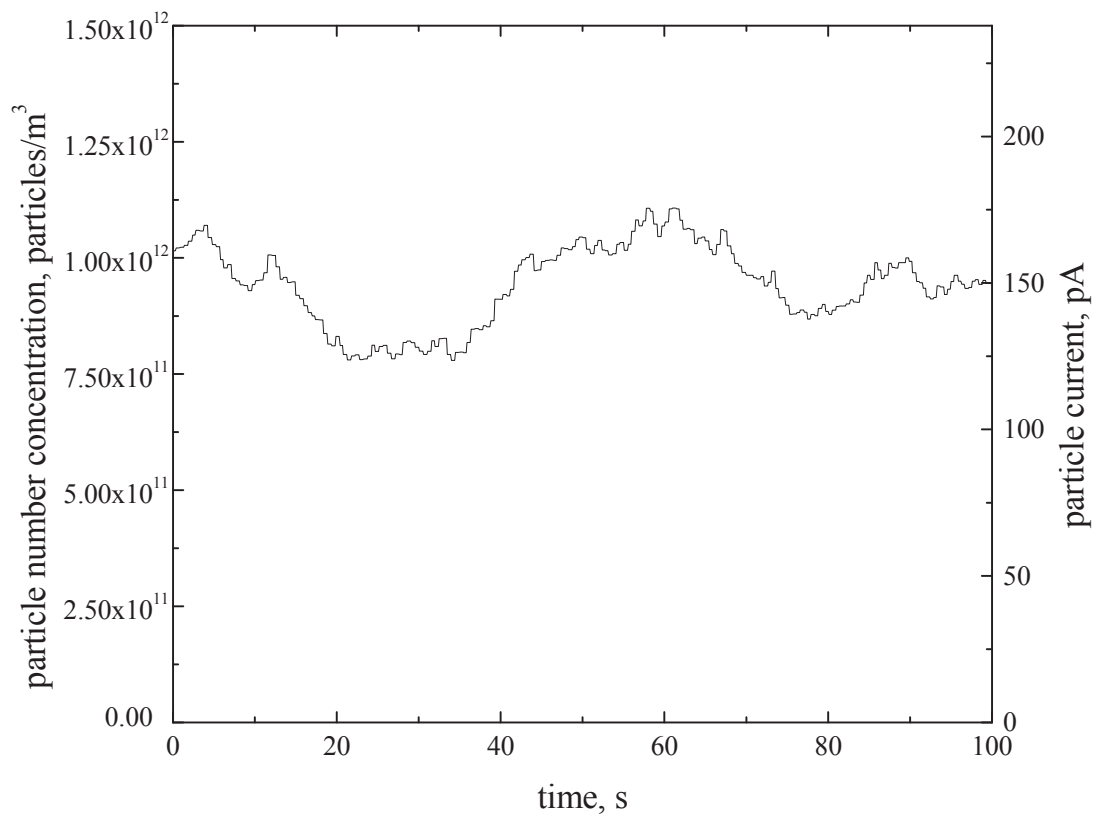


Fig. 10. Time variation of measured particle number concentration and signal current.

ภาคผนวก ข-7

Intra, P. and Tippayawong, N., "Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer", *Journal of Electrostatics*, submitted for publication.

มี impact factor = 1.240 (JCR ปี 2008)

Manuscript Number:

Title: Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer

Article Type: Full Length Article

Keywords: ion trap; electrostatic precipitator; electrical mobility; spectrometer

Corresponding Author: Dr. Panich Intra, Ph.D.

Corresponding Author's Institution: Rajamangala University of Technology Lanna

First Author: Panich Intra, Ph.D.

Order of Authors: Panich Intra, Ph.D.; Nakorn Tippayawong, Ph.D.

Abstract: In this paper, the ion precipitator for the electrical mobility spectrometer was designed, constructed, and analytical and experimental evaluated. It was found that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. Conversely, faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream. Collection efficiency of the ion precipitator was found to increase to about 99% at the ion trap voltage larger than 100 V for all ion flow rates. The experimental data was compared against theoretical prediction. It was found that the experimental data were in a good agreement with the Deutsch-Anderson model.

Suggested Reviewers: Chin-Chieh Chen

Institute of Occupational Medicine and Industrial Hygiene, College of Public Health, National Taiwan University
ccchen@ccms.ntu.edu.tw

Manuel Alonso

National Center for Metallurgical Research (CSIC)
malonso@cenim.csic.es



College of Integrated Science and Technology

Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300

Tel. 0-5392-1444, Fax. 0-5321-3183

The Editor,
Journal of Electrostatics

31 March 2010

Dear the Editor

Enclosed are the typed original and the complete paper files of a manuscript by Panich Intra and Nakorn Tippayawong titled “**Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer**” which is being submitted for consideration and possible publication in the *Journal of Electrostatics*.

This manuscript is new, is not being considered elsewhere and reports the results of an ongoing research at our department. Any suggestion for improvement of the manuscript is welcomed.

Yours sincerely,

Dr. Panich Intra

Correspondence for manuscript, please contact:

Dr. Panich Intra

College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna,

Chiang Mai 50300, Thailand

Phone: 0-5392-1444, Fax: 0-5321-3183

e-mail: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com

Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer

Panich Intra^{1*}, Nakorn Tippayawong²

¹College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiang Mai 50300 Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200 Thailand

*Corresponding author, E-mail: panich_intra@yahoo.com

Abstract

Electrostatic precipitation technique is adopted to remove excess ions mixing with the charged particles prior to charged particle collection in an electrical mobility analyzer. In this paper, the ion precipitator for the electrical mobility spectrometer was designed, constructed, and evaluated. An analytical model was developed to investigate ion transport inside the ion precipitator in this study. Experimental investigations were carried out for positive ions, positively applied voltage at the wire electrode between 10 and 150 V, ion flow rate of 5 and 15 L/min, operating pressure of 1 atm and radial distance of the inlet between 0.15 and 14 mm at a fixed separation between wire and outer electrodes. It was found from the calculations that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. Conversely, faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream. All charged particles of 10 nm in diameter can pass through the ion precipitator smoothly without precipitated at the outer electrode. Collection efficiency of the ion precipitator was found to increase to about 99% at the ion trap voltage larger than 100 V for all ion flow rates. The experimental data was compared against theoretical prediction. It was found that the experimental data were in a good agreement with the Deutsch-Anderson model.

Keywords: ion trap, electrostatic precipitator, electrical mobility, spectrometer

1. Introduction

Fine aerosols are generally referred to airborne particles of diameter in submicron or nanometer size range. Measurement and characterization of these particles is very important in understanding and controlling their dynamics. The most efficient and widely used technique suitable for measuring these submicron particles is essentially electrical mobility determination. Many electrical mobility determination instruments have been developed and used widely [1]. Charging is the basis of these instruments in which a known net charge distribution is imposed on to the particles. High ion concentrations are usually generated to ensure high charging efficiency. An aerosol charger is always positioned upstream of an electrical mobility analyzer, with an ion trap to remove excess ions. The aim of the ion trap for the electrical mobility analyzer was to remove the high electrical mobility of the excess free ions mixing with the charged particles prior to charged particle collection [2], as the free ions can potentially reach the detector and contaminate the signal current to be measured.

It is well known that electrostatic precipitators (ESP) are widely used for removing particles from gas streams in various industrial processes and room air-conditioning system [3 – 5]. Typically, it consists of a discharge electrode placed along the axis of the collecting electrode. A DC high electrical voltage is applied to the discharge electrode, while the collecting electrode is grounded. The high voltage produces an electric field and a flow of electric charges (ions) from discharge electrode to the collecting electrode. Dirty gas containing particulate pollutants is introduced into ESP. The particulates are bombarded by monopolar ions from the discharge electrode and are strongly charged; they are driven by electrostatic force toward the collecting electrode and are deposited in its inner surface. In this way the outgoing gas flow would become particle-free. Although ESPs are initially designed to precipitate particles, they are also suitable for depositing ions under certain conditions. This is because ions are, just like the charged particles, carrying charges. Therefore they can be precipitated with an electric field. The key in adopting an ESP into an ion precipitator lies in applying a proper voltage to the ESP such that only ions are precipitated while charged particles can pass through smoothly. There have been numerous studies and developments on the wire-cylinder-type ESP as the particle charger in a number of electrical mobility analyzers [6]. To our knowledge, the

issue of design and performance evaluation of the ion trap has not been extensively studied and reported in the literature [7 – 11].

In the present study, a simple and efficient electrostatic precipitator was developed as an ion trap for an electrical mobility spectrometer. Analytical investigation of the design was carried out to predict the ion trajectory inside the ion precipitator. Experimental evaluation of the ion precipitator performance was carried out for positive ions, positively applied voltage at the wire electrode between 10 to 150 V, total flow rate of 5 to 15 L/min, operating pressure of 1 atm and radial distance of the inlet between 0.15 to 14 mm at a fixed separation between wire and outer electrodes. A detailed description of the ion precipitator design was also presented in this paper.

2. Design of the Ion Precipitator

2.1 Description

A schematic diagram of the ion precipitator used in this study is shown in Fig. 1. It has a geometrical configuration similar to the unipolar corona-wire charger and the wire-cylinder ESP. It consists of a coaxial wire electrode placed along the axis of a metallic cylinder tube. The outer electrode is made of aluminum tube 28 mm in diameter and 15 mm in length. The wire electrode is made of stainless steel wire 300 μ m in diameter and 15 mm in length. DC voltage supply was applied to the wire electrode, typically in the range between 10 – 150 V, while the outer metallic electrode is grounded. The most important topic while operating the ion precipitator is setting a proper voltage to deposit the ions. This voltage will ensure that all ions can be removed but most charged particles are not influenced.

2.2 Ions transport

The transportation of ions and charged particles inside the electrostatic precipitator and the differential mobility analyzer have been studied and presented in the published literature [11 – 15]. As shown in Fig. 2, the axial motion of ion was influenced by the fluid velocity profile in the axial flow. The radial motion of ion is due to electric force which is by far greater than other forces. When the ions introduced into the ion precipitator, any ions under the influence of an electric field will have an

electrical mobility. It is assumed that the flow and electric fields are axisymmetric and steady, the flow in the precipitator is laminar, fully developed and incompressible, the space charge effect is negligible, and Brownian diffusion effects are negligible. For the particular case of annular geometries where the ions enters the precipitator on an axial flow and the ions migrate along the radial direction of electric field, motion of the ions within the precipitator can be described by the system of differential equations as [12]

$$\frac{dr}{dt} = u_r + Z_i E_r \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = u_z + Z_i E_z \quad (2)$$

where r and z are the radial and axial dimensions of the classifier, u_r and u_z are the radial and axial components of the air flow velocity. Similarly, E_r and E_z are the radial and axial components of the electric field and Z_i is the electrical mobility of ions, which is a complicated function of the gas density, electric field strength, and the constituent species of the gas. Based on the work of Reischl et al. [17], the average value for the positive ion electrical mobility at atmospheric pressure was $Z_i = 1.425 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$. Typically, ions and charged particles have quite different electrical mobility in magnitude, electrical mobility of ions is in general much higher than that of particles. When a uniform electric field is established between the two electrodes of the precipitator, the electric field components are given by the following relations: $E_r = V / r \ln(r_2 / r_1)$ and $E_z \approx 0$ where r_1 and r_2 are the radii of the wire and outer electrodes, respectively. Assuming that the radial velocity component for a laminar annular flow is zero ($u_r = 0$) and combining the above equations, the ions trajectories can be described by

$$\frac{dr}{dt} = \frac{Z_i V}{r \ln(r_2 / r_1)} \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = u_z(r) \quad (4)$$

Using Equations (3) and (4), the trajectory of the ions is given by

$$\frac{dr}{dz} = \frac{Z_i V}{r u_z(r) \ln(r_2 / r_1)} \quad (5)$$

where:

$$u_z(r) = ar^2 + b \ln(r) + c, \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz}, \quad (7)$$

$$b = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \right), \quad (8)$$

$$c = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r_1) - r_1^2 \right), \quad (9)$$

dp/dz denotes the constant pressure gradient is given by the following equations

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\rho \bar{U}^2 f}{2D_h} \quad (10)$$

where:

$$D_h = 2r_2 \left(1 - (r_1/r_2) \right), \quad (11)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{1 + (r_1/r_2)^2}{(1 - (r_1/r_2))^2} + \frac{1 + (r_1/r_2)}{(1 - (r_1/r_2)) \ln(r_1/r_2)} \right)^{-1}, \quad (12)$$

$$\text{Re} = \frac{2r_2 (1 - (r_1/r_2)) \bar{U} \rho}{\mu}, \quad (13)$$

D_h is the hydraulic diameter for an annular flow area, f is the friction factor, $\bar{U}$ is the mean axial flow velocity, ρ is the gas density and Re is the Reynolds number in the annular flow. Substituting Equation (6) into Equation (5) and Integrating Equation (5), the migration paths of the ions can be determined as

$$\int_{r_{in}}^{r_2} ar^3 + b \ln(r^2) + cr dr = \int_0^z \frac{VZ_i dz}{\ln(r_2/r_1)} \quad (14)$$

where r_{in} is the radial position at which the ions enters the precipitator. Therefore, the ions entering the precipitator at a radial position of r_{in} has trajectory taking it to an axial position of z , which can be obtained as

$$z = -\frac{g(r_{in}) \ln(r_2/r_1)}{4VZ_i} \quad (15)$$

$$g(r_{in}) = \begin{pmatrix} ar_2^4 - ar_{in}^4 + br_{in}^2 - br_2^2 + 2br_2^2 \ln(r_2) \\ -2br_{in}^2 \ln(r_{in}) + 2cr_2^2 - 2cr_{in}^2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

2.3 Ion trapping efficiency

Removal or trapping efficiency is defined as the ratio of the difference between inlet and outlet concentrations to the inlet concentration. Assuming uniform ion distribution across the cylindrical tube, the ion removal efficiency of the precipitator, η , can be estimated by Deutsch-Anderson equation as [18]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi r_2 LZ_i E}{Q_i}\right) \quad (17)$$

where L is the length of the outer electrode of the precipitator, and Q_i is the ion flow rate. Therefore, the number concentration of ions, N_i , at the outlet of the precipitator is given by

$$N_i = N_0 - N_0\eta \quad (18)$$

where N_0 is the number concentration of ions at the inlet of the precipitator

3. Experimental Setup

The schematic diagram of the experimental system for performance evaluation of ion precipitator is shown in Fig. 3. It consists of an ion generator, a DC high voltage power supply, a Faraday cup, an electrometer, and a flow system. In this study, high number concentration of ions was generated by corona discharge with the corona-needle generator [19], typically larger than 3×10^{12} ions/m³. In our experiments, the ion precipitator is connected directly to the ion generator outlet via a very short connecting pipe. The air flow was regulated and controlled by means of a mass flow meter and controller (a Dwyer model GFC-1111) with a vacuum pump, typically in the range between 5.0 – 15.0 L/min. A commercial adjustable DC high voltage power supply, a Bertan model PMT-50CP, was used to maintain the positive corona voltages difference in the charger, generally 3.5 kV. An air sample was first dried with the dryer. Thus, any remaining water was removed. Dried air sample was filtered through a high efficiency particulate-free air (HEPA) filter (Pall HEPA capsule model 12144

with filtration efficiency of 99.97 % and retention of 0.3 µm for air/gas), and was then drawn into the charger. The ions produced inside the charger are then entered the ion precipitator. A commercial adjustable DC high voltage power supply, a Bertan model PMT-05CP, was used to maintain the positive trap voltages difference in the precipitator, generally in the range between 10 – 150 V. After the precipitator, ions were then entered the Faraday cup. In the Faraday cup, the ions were removed from the air stream by the filter and the resulting ion current flow was measured with the Keithley 6517A electrometer. It should be noted that the ion current was measured by the electrometer corresponding to the ion number concentration at the charger outlet. The ion current measurements were translated into ion number concentrations given the total air flow rate through the charger. Thus, the total number concentration of the ion at the charger outlet, N_i , can be calculated from the expression [20]

$$N_i = \frac{I_i}{eQ_i} \quad (19)$$

where I_i is the ion current at the charger outlet, and e is the elementary charge (1.6×10^{-19} C).

4. Results and Discussion

4.1 Ions transport

An analytical model was developed to investigate the ions transport inside the ion precipitator to give a better understanding on the operation of the ion precipitator. Calculations have been performed for positive ions and charged particles. These calculations were carried out at varying positively applied voltage at the wire electrode between 10 and 150 V, total air flow rate between 5 and 15 L/min, and the radial distance of the inlet between 0.15 to 14 mm at a fixed radial of wire and outer electrodes ($r_1 = 0.15$ mm and $r_2 = 14$ mm). The parameters and operating conditions used are shown in Table 1. Air density and viscosity were 1.225 kg/m^3 and $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m/s}$, respectively. Operating temperature and pressure were 294 K and 1 atm, respectively. In this study, the flow conditions inside the ion precipitator were assumed to be steady, incompressible and laminar. The electric field distribution inside the ion precipitator was also assumed to be uniform in the axial direction. The ion and particle trajectories were calculated using Equations (15) and (16) with

Microsoft Visual Basic programming. In our previous work [21], comparison of ion trajectories along the precipitator between the existing models and the present model was introduced. Intra and Tippayawong [21] reported that the ion trajectory of the present model agreed very well with that proposed by Hagwood et al. [13] and Williams [14]. However, large difference between this model and the models developed by Kulon et al. [15] and Wei [11] was also observed. This may be due to the fact that Kulon and Wei models did not take into account the constant pressure gradient effect on the annular flow velocity profile which could result in significant errors.

Fig. 4 shows a number of trajectories of the positively ions as a function of wire electrode voltage. The ions were deflected radially toward the inner surface of the outer electrode of the precipitator. It was found that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. This was expected because the motion of ions was mainly influenced by the applied electrical force. Increase in applied voltage resulted in the increase of the ions collecting efficiency. It was clear that the optimal wire electrode voltage was about 100 V. After the optimal wire electrode voltage was found, the optimal total flow rate through the precipitator was determined. Fig. 5 shows variation of ion trajectories along the precipitator with total flow rate. It was shown that faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream.

It is still necessary to prove that the chosen voltage has barely minimum influence on the charged particles. This can be easily done by calculating particle trajectories with the ion precipitator at the identical voltage. In the calculations, particle governing equations are identical to ion governing Equation (15) with the only exception of the ion electrical mobility Z_i in the Equation (15), which should be replaced by particle electrical mobility Z_p . The electrical mobility of particle can be calculated as [17]:

$$Z_p = \frac{n_p e C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (20)$$

where n_p is the net number of elementary charges on the particle, e is the value of elementary charge on an electron, C_c is the Cunningham slip correction factor, μ is the gas viscosity, and d_p is the particle diameter. When an extreme case in which a particle diameter of 10 nm (the lower limit of particle size in the electrical mobility spectrometer) is singly charged was considered, the particle

tended to have the largest electrical mobility. Fig. 6 illustrates the charged particle trajectories within the ion precipitator, starting from different initial locations. It was shown that all charged particles can pass through the ion precipitator smoothly without deposition onto the outer electrode.

4.2 Ion trapping

Fig. 7 shows time variation of ion number concentration and signal current of the precipitator outlet at different operating ion flow rate and trap voltage. Number concentration of ions was calculated from the measured ion current by Equation (19). Measured current of ions at the precipitator outlet was found to be from 0 to 100 pA, corresponding to the ion number concentration of 0 to 2.5×10^{12} ions/m³. It can be seen that increasing the trap voltage resulted in the decrease of ion number concentration and signal current at the precipitator outlet. At higher ion flow rates, the ion number concentration and signal current were relatively high. Variation of outlet ion number concentration with ion trap voltage at different operating ion flow rate is shown in Fig. 8. It was shown that low ion flow rate and high trap voltage resulted in a decrease in the number concentration of ions at the precipitator outlet. The ion number concentration at the precipitator outlet decreased to about 0 at the ion trap voltage greater than 150 V for all ion flow rates considered.

Fig. 9 shows variation of collection efficiency of the precipitator as a function of ion trap voltage at different operating ion flow rate. Generally, an increase in ion trap voltage produced an increase in ion collection efficiency of the precipitator. For all ion flow rates, the collection efficiency of the precipitator increased to about 99% at the ion trap voltage larger than 100 V. As shown in Figs. 8 and 9, the experimental data of the ion precipitator was also compared with theoretical prediction of the Deutsch-Anderson model. It was observed that the experimental data was in good agreement with the model. However, the Deutsch-Anderson model underestimated or overestimated the collection efficiency of the precipitator at the trap voltage lower than 100 V. This was attributable to the fact that the model did not take into account the effect of turbulence mixing by electric wind and ion turbulent diffusion, leading to significant error [22].

Measured particle number concentration and signal current with and without the ion trap voltage of the precipitator is shown in Fig. 10. In this study, a combustion aerosol generator (CAG)

was used to generate a polydisperse aerosol for this experiment. The particle size distribution from the CAG was in the range between approximately 10 nm to 400 nm [23]. Aerosol sampling was carried out using an isokinetic sampling system. The aerosol particles were first dried with the diffusion drier. Thus, any remaining water was removed. Due to the high particle concentration in the particle stream flow rate of the exhaust, before aerosol particles entering the ion generator, the particles were diluted and mixed with clean air, which had been filtered through a HEPA filter, in the mixing chamber. The aerosol particles were charged by corona discharge in the ion generator. This experimental system was operated at aerosol flow rate of 10 L/min and ion trap voltage of 150 V. It was found that the average number concentrations of particles with and without the ion trap voltage of the precipitator were 5.57×10^{13} particles/m³ and 7.87×10^{13} particles/m³, respectively, corresponding to the measured signal currents of 149.45 pA and 211.27 pA, respectively. When the ion trap voltage was off, ions entered the Faraday cup and was measured together with the charged particles. On the other hands, when the ion trap voltage was on, most ions were removed. Hence, only charged particles can pass through the precipitator. Thus, the measured signal current was only derived from charged particles.

5. Conclusion

A wire-cylinder ion precipitator for the electrical mobility spectrometer was designed, constructed, and investigated in this paper. An analytical model was developed to investigate the ions transport inside the ion precipitator. The experimental study was carried out for positive ions, positively applied voltage at the wire electrode between 10 and 150 V, total flow rate of 5 and 15 L/min, operating pressure of 1 atm and radial distance of the inlet between 0.15 and 14 mm at a fixed radial of wire and outer electrodes. It was found that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. Conversely, faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream. All charged particles of 10 nm in diameter can pass through the ion precipitator smoothly without precipitated at the outer electrode was found at the ion flow rate of 5 L/min and the trap voltage of 100 V. An increase in ion trap voltage produced an increase in ion collection efficiency of the precipitator. For all ion flow rate, the collection efficiency of the precipitator increased to about 99% at the ion trap voltage larger than 100 V. Experimental data was found to be in good agreement

with the analytical model. The precipitator proved to be particularly useful in removing excess ions in the electrical mobility analyzer.

Acknowledgments

This research was financially supported by the Thailand Research Fund (TRF), contract no. MRG5180217.

References

- [1] P. Intra and N. Tippayawong, An overview of aerosol particle sensors for size distribution measurement. *Maejo International Journal of Science and Technology* 1 (2007) 120-136.
- [2] P. Intra and N. Tippayawong, An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection. *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics* 17 (2009) s17 – s20.
- [3] H.J. White, “Industrial Electrostatic Precipitation”, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, 1963.
- [4] K.R. Parker, “Applied Electrostatic Precipitation”, Blackie Academic & Professional, New York, USA, 1997.
- [5] A. Joworek, A. Krupa and T. Czech, Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. *Journal of Electrostatic* 65 (2007) 133 – 155.
- [6] P. Intra and N. Tippayawong, Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review. *Journal of Electrostatics* 67 (2009) 605 – 615.
- [7] J. Keskinen, K. Pietarinen and M. Lehtimäki, Electrical low pressure impactor. *Journal of Aerosol Science* 23 (1992) 353-360.
- [8] A. Medved, F. Dorman, S. L. Kaufman and A. Pocher, A new corona-based charger for aerosol particles. *Journal of Aerosol Science* 31 (2000) s616 – s617.
- [9] TSI Incorporated, “Operation and Service Manual, Revision B, for Electrical Aerosol Detector™ Spectrometer Model 3070”, Minnesota, USA, 2004.
- [10] D. Park, M. An and J. Hwang, Development and performance test of a unipolar diffusion charger

- for real-time measurements of submicron aerosol particles having a log-normal size distribution. *Journal of Aerosol Science* 38 (2007) 420 – 430.
- [11] J. Wei, “Development of a Method for Measuring Surface Area Concentration of Ultrafine Particles”, D.Eng. Thesis, University of Duisburg-Essen, Germany, 2007.
- [12] E.O. Knutson, and K.T. Whitby, Aerosol classification by electric mobility: apparatus, theory, and applications. *Journal of Aerosol Science* 6 (1975) 443-451.
- [13] C. Hagwood, Y. Sivathanu and G. Mulholland, The DMA transfer function with Brownian motion a trajectory/Monte-Carlo approach. *Aerosol Science and Technology* 30 (1999) 40-61.
- [14] P.I. Williams, “Construction and Validation of a DMPS for Aerosol Characterization”, Ph.D. Thesis, University of Manchester, UK, 1999.
- [15] J. Kulon, S. Hrabar, W. Machowski and W. Balachandran, A bipolar charge measurement system for aerosol characterization. *IEEE Transactions on Industry Applications* 37 (2001) 472-479.
- [16] G.P. Reischl, J.M. Makela, R. Harch and J. Neced, Bipolar charging of ultrafine particles in the size range below 10 nm. *Journal of Aerosol Science* 27 (1996) 931 – 949.
- [17] P. Intra and N. Tippayawong, Analytical investigation of aerosol transport under electric field, *STAA Annual Conference*, Bangkok, Thailand, March 27 – 30, 2005. (in Thai)
- [18] W.C. Hinds, “Aerosol Technology”, John Wiley & Sons, New York, USA, 1999.
- [19] P. Intra and N. Tippayawong, Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer. *Journal of Electrostatics* (2010), in press, 10.1016/j.elstat.2010.01.008.
- [20] P. Intra and N. Tippayawong, Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer. *Chiang Mai Journal of Science* 36(1) (2009) 110 – 119.
- [21] P. Intra and N. Tippayawong, Analytical investigation of an electrostatic precipitator for excess ions removal after charging process of the electrical mobility spectrometer, *SE Engineering Conference*, Songkla, Thailand, May 21 – 22, 2009.
- [22] S.H. Kim and K.W. Lee, Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. *Journal of Electrostatics* 48 (1999) 3 – 25.
- [23] A. Yawootti, P. Intra and N. Tippayawong, A combustion aerosol generator for submicron

aerosol production. rd *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Nong Khai, Thailand, March 4 – 6, 2010.

Table 1 Model parameter and operating condition values

Parameter and operating conditions	Values
Diameter of wire electrode, r_w (mm)	0.15
Diameter of outer electrode, r_o (mm)	14
Length of precipitator, L (mm)	15
Wire electrode voltage, V (V)	10, 50, 100, 150
Total flow rate, (L/min)	5, 10, 15
Nature of flow	Laminar
Operating temperature, T (K)	294
Operating pressure, P (atm)	1
Gas density, (kg/m ³)	1.225
Gas viscosity, μ (kg/m/s)	1.7894×10^{-5}
Polarity of ions	Positive
Electrical mobility of ion, μ_i (m ² /V/s)	1.425×10^{-4}
Particle diameter, d_p (nm)	10

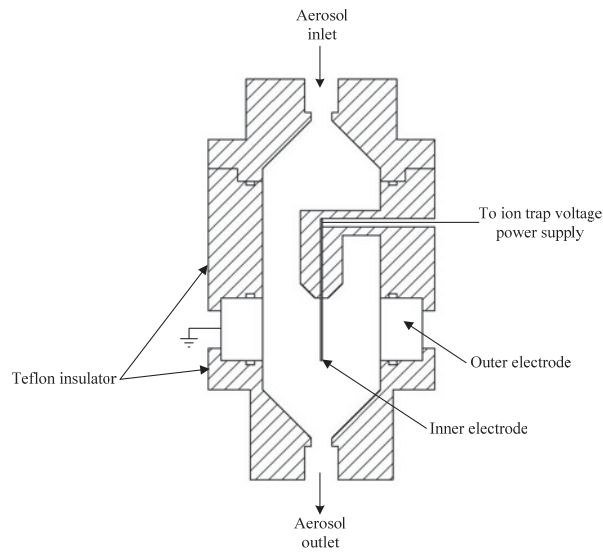


Fig. 1 Schematic diagram of the ion precipitator

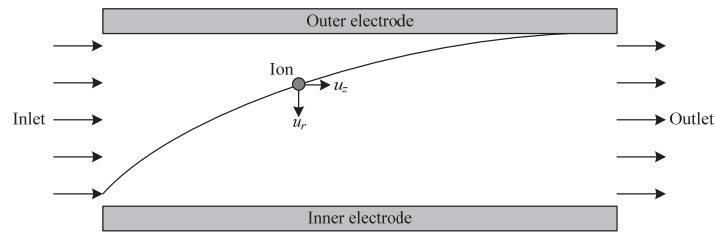


Fig. 2 ion transport in the precipitator

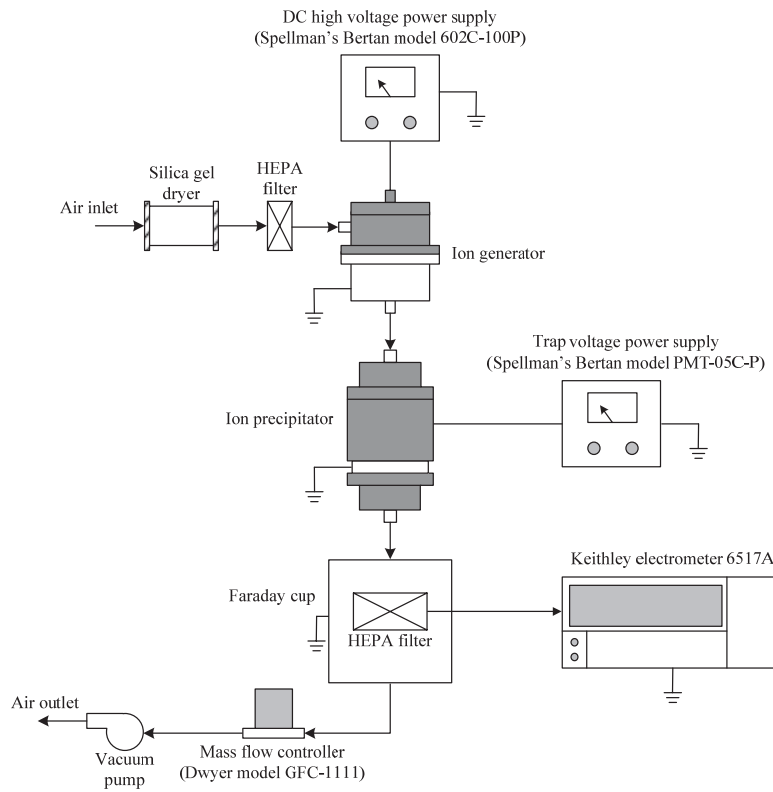


Fig. 3 Experimental setup for ion precipitator performance evaluation

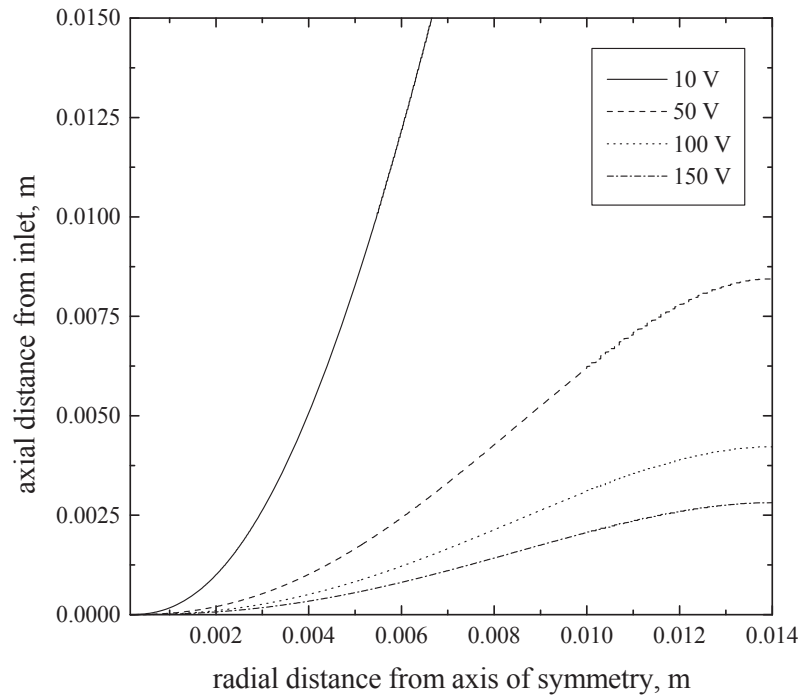


Fig. 4 Variation of ion trajectories along the precipitator with wire electrode voltage (5 L/min total flow rate)

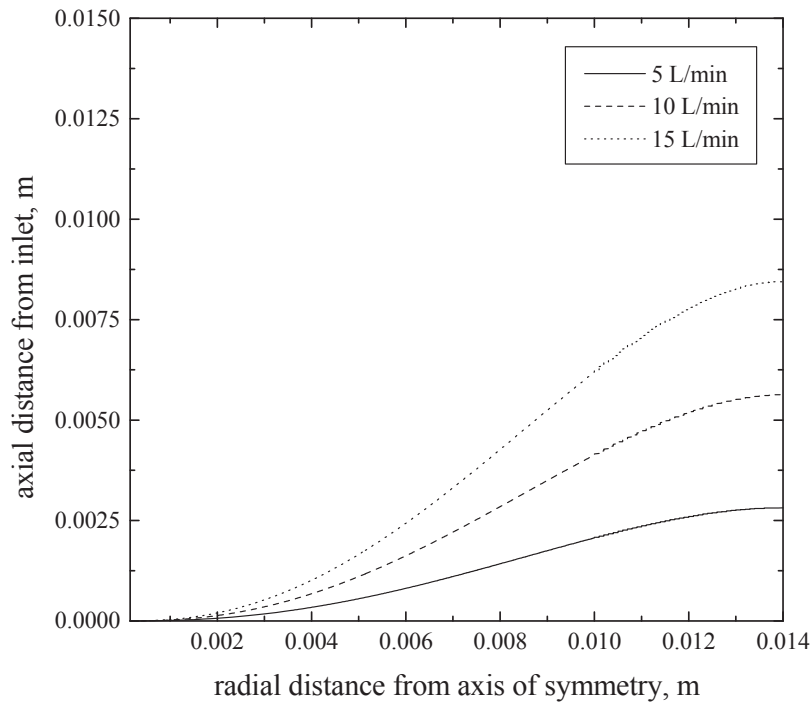


Fig. 5 Variation of ion trajectories along the precipitator with total flow rate (150 V wire electrode voltage)

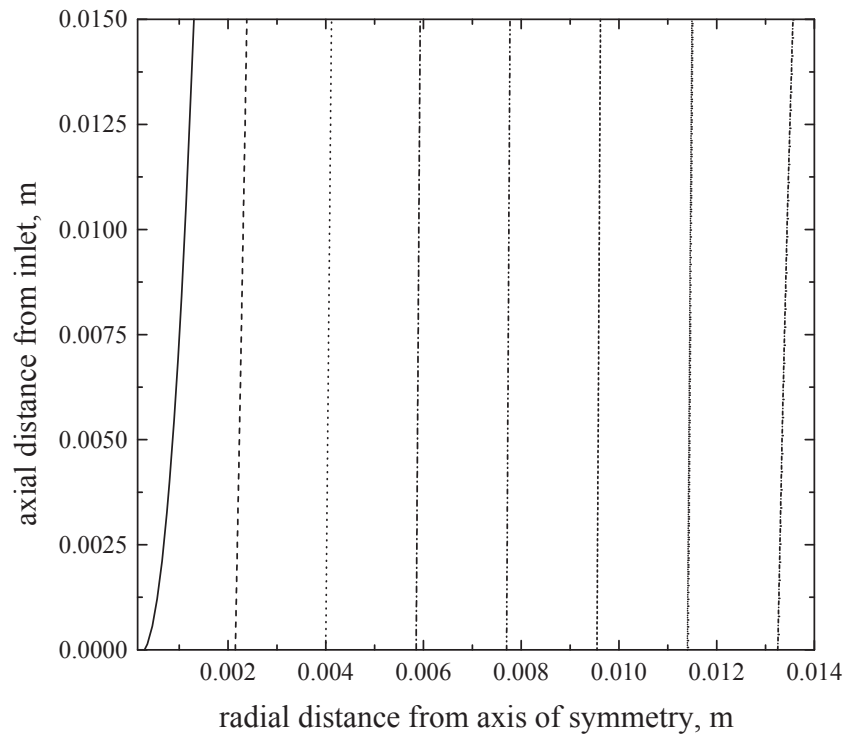
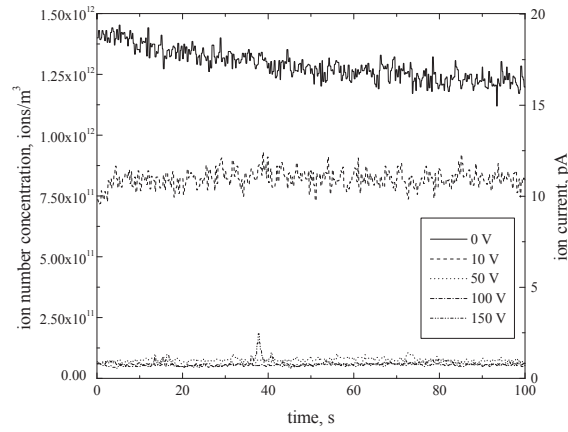
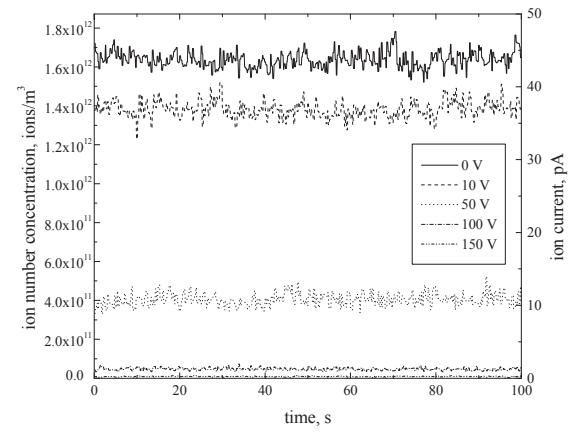


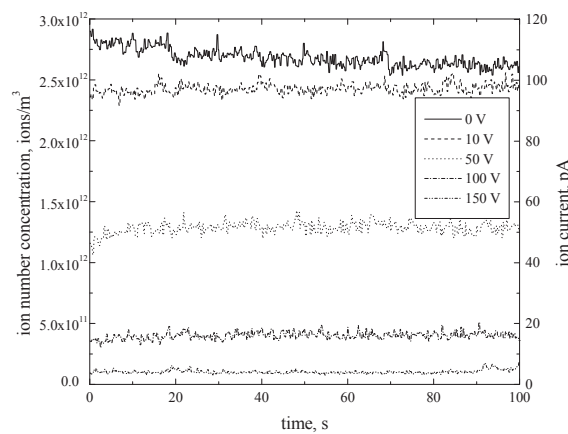
Fig. 6 Variation of charged particle trajectories along the precipitator with inlet radial distance (100 V wire electrode voltage, 10 nm particle diameter, and 5 L/min total flow rate)



(a) 5 L/min



(b) 10 L/min



(c) 15 L/min

Fig. 7 Time variation of outlet ion number concentration and signal current with trap voltage at different operating ion flow rate

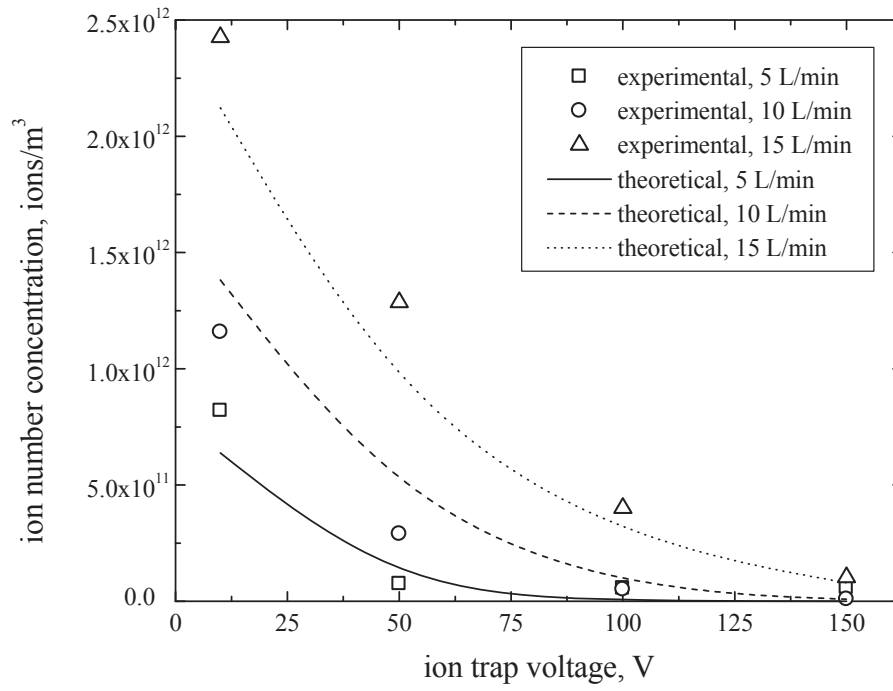


Fig. 8 Variation of outlet ion number concentration with ion trap voltage at different operating ion flow rate

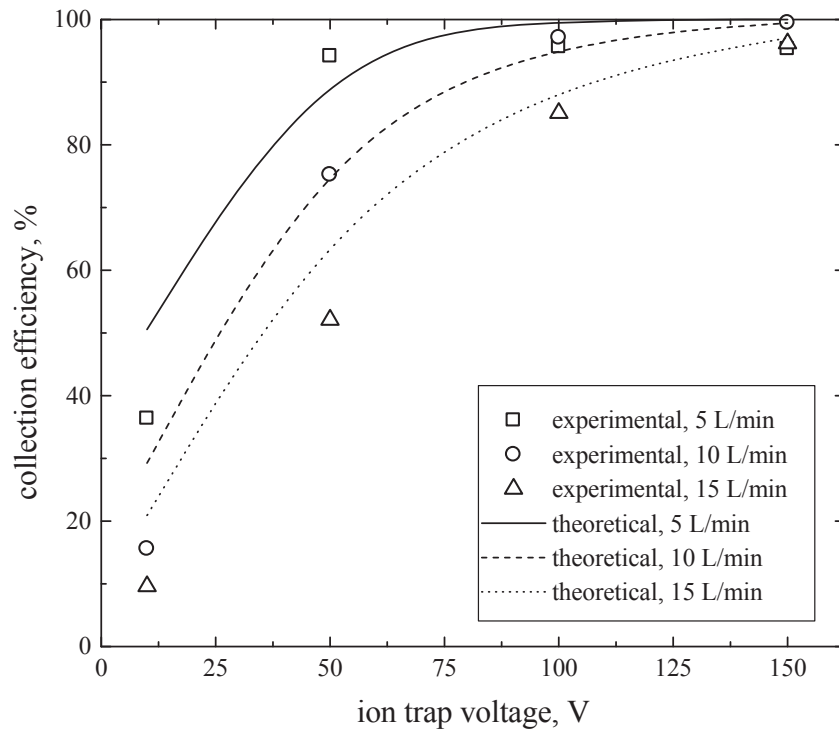


Fig. 9 Variation of collection efficiency with ion trap voltage at different operating ion flow rate

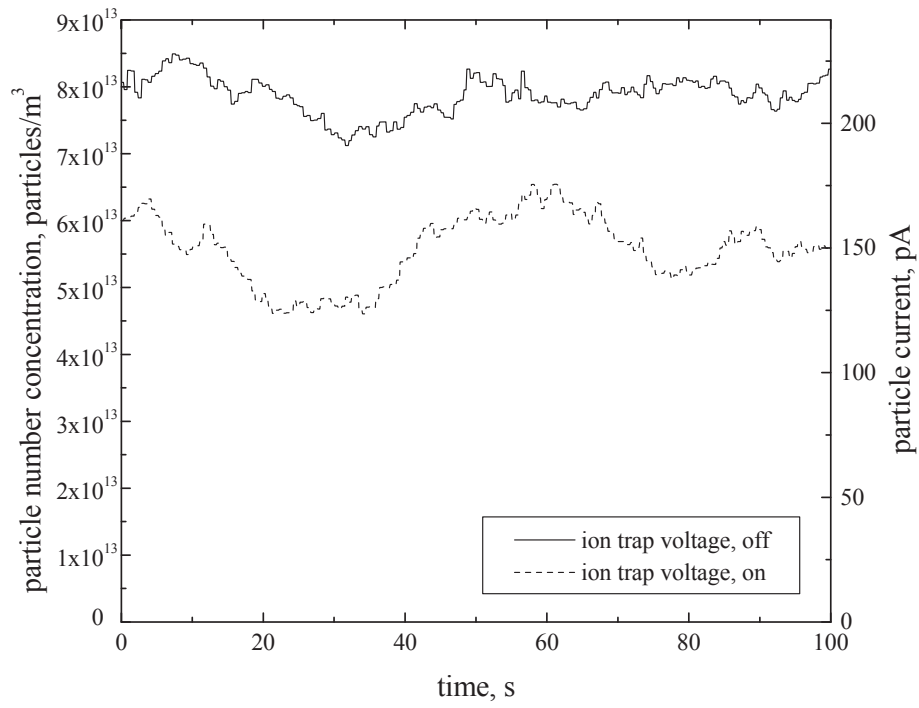


Fig. 10 Time variation of particle number concentration and current with and without the ion trap voltage

ภาคผนวก ข-8

Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, Poster presentation, *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, Thailand, 24 – 25 July, 2008.

An Electrostatic Sensor for Nanometer-Sized Aerosol Particles Detection

P. Intra¹ and N. Tippiyawong²

¹ College of Integrated Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand

² Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand

In this study, an electrostatic sensor was developed for detecting the number concentration of nanometer-sized aerosol particles. It consists of a size selective inlet, a corona charger, an ion trap, a Faraday cup, an electrometer, a signal conditioning and processing system, and an I/O control and human-computer interface. In the present sensor, aerosol flow is regulated and controlled by means of mass flow meters and controllers with a vacuum pump. An aerosol sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Finally, signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. A detailed description of the operating principle of the system as well as main components was presented. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work was also evaluated and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A, and good agreement was found from the comparison.

Keywords: aerosol, nanoparticle, electrostatic, electrometer, sensor.

1. INTRODUCTION

Nanometer-sized aerosol particles, defined as aerosols with particle diameters less than $0.1 \mu\text{m}$, suspended in air have significant effects on the human health, global climate, air quality and processes in various industries such as food, pharmaceutical and medical, electronic and semiconductor industries [1]. Detection and measurement of nanometer-sized aerosol particles have become an important issue. For this purpose, nanoparticle sensors were developed to monitoring indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry. There are several commercial instruments using various methods of detecting particle number concentration. Available instruments include a SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) using electrical mobility of particles, a CPC (Condensation Particle Counter) which uses particle growth and optical property, an EAD (Electrical Aerosol Detector) which uses electrostatic charge measurement technique, and an ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) using inertia impaction of particles under low pressure [2]. These commercial instruments are widely used for measuring airborne ultra fine particles and provide high-resolution measurement, but they are very expensive and large sizes. In addition, the CPC should be carefully moved in caution to protect the optics contamination from working fluid like alcohol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) [3]. The movability of instruments should be considered in monitoring airborne aerosol particles.

To avoid this problem, an inexpensive sensor was developed in this study, suitable for detection of particle

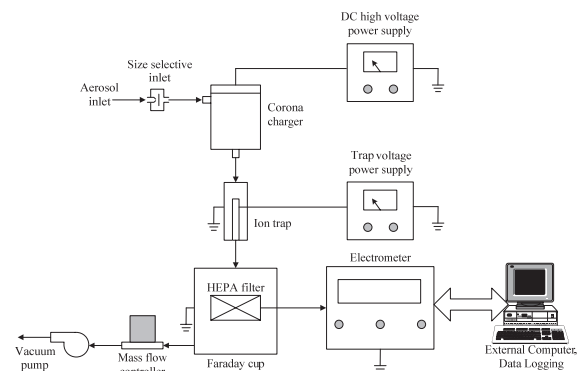


Fig. 1 Schematic diagram of the electrostatic sensor.

number concentration in the nanometer size range. This sensor is based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. A detailed description of the operating principle of the sensor was presented. The sensor performance also was evaluated and compared with a commercial instrument.

2. DESCRIPTION OF THE SENSOR

Figure 1 shows the schematic diagram of the electrostatic sensor for detecting nanometer-sized aerosol particles was developed in this study. The sensor system is composed of a flow system is regulated and controlled by means of mass flow controllers with a vacuum pump, a size selective inlet to remove the

particle outside the measurement range, a particle charger using corona discharge technique, an ion trap to remove the high electrical mobility of free ions after charger, a Faraday cup to collect charged particles, an electrometer for measuring signal current from the Faraday cup, and a computer controlled data acquisition and management system.

2.1 Size Selective Inlet

The inertial impactor was used to remove particles larger than a known aerodynamic size, upstream of the system. The aerodynamic particle size at which the particles are separated is called the cut-point diameter. In the impactor, the aerosol flow is accelerated through a nozzle directed at a flat plate. The impaction plate deflects the flow streamlines to a 90° bend. Particles with sufficient inertia are unable to follow the streamlines and impact on the plate. Smaller particles are able to follow the streamlines and avoid contact with the plate and exit the impactor.

2.2 Unipolar Corona Charger

The particle charger in the present study consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered ends [4]. The needle electrode is made of a stainless steel rod 3 mm in diameter and 49 mm in length, ended in a sharp tip. The angle of the needle cone was approximately 9° and the tip radius was approximately 50 µm, as estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of aluminum tube 30 mm in diameter and 25 mm in length with conical shape. The angle of the cone was approximately 30° and the orifice diameter was approximately 4 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 2 mm. The corona electrode head is connected to a DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. An adjustable DC high voltage power supply is used to maintain the corona voltage difference, typically of the order of 3.0 kV. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field toward the outer electrode wall. Aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions via diffusion charging and field charging mechanisms.

2.3 Ion Trap

The ion trap was used to remove the high electrical mobility of free ions after the charger. As the free ions can potentially reach the detector and ruin the measurement, a trap field is introduced just after the corona charger. The trap field is across the aerosol flow and has a 200 V.

2.4 Faraday Cup

Figure 2 shows the schematic diagram of the Faraday cup used in this study. It consists of an outer housing, a HEPA (High Efficiency Particulate Air) filter, a filter holder, and a Teflon insulator.

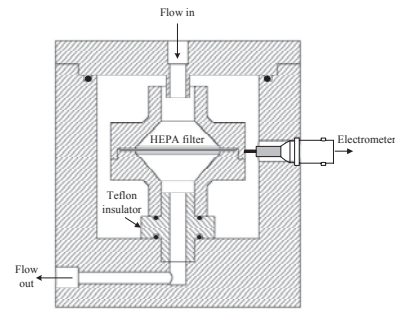


Fig. 2 Schematic diagram of the Faraday cup.

To completely shield the filter holder collecting the charged particles, the outer housing is made of a stainless steel, and filter holder is electrically isolated from the outer housing with Teflon insulator stand, while the outer housing is grounded. The Faraday cup plays a role to prevent electric noise for measuring ultra-low electric signal current (pA) from collected charged particles on an internal HEPA filter inside the Faraday cup corresponding to the total number concentration of the particles. If the filter holder is not shielded completely, noise which is 1000 times of resolutions to be expected. To transfer charges gathered at the HEPA filter to an electrometer circuit that is outside the Faraday cup, BNC connector is connected to HEPA filter. Because material of HEPA filter is a conductor such as glass fiber, charges collected in the filter can move to the electrometer via the BNC connector and low noise cable without delay. In the case of existing aerosol electrometer airflow is curved at 90° while air is drifted from sampling probe to the filter. It can become the cause of charge loss. To solve this problem airflow into Faraday cup is straightened not to change the direction of the flow and loss the charge. The particle number concentration, $\square_p$, is related to the signal current, I , at HEPA filter is given by

$$\square_p = \frac{I}{pe\square_a} \quad (1)$$

where p is the number of elementary charge units, e is the elementary unit of charge (1.6×10^{-19} C), and $\square_a$ is the volumetric aerosol sampling flow rate into a Faraday cup.

2.5 Sensitive Electrometer

A sensitive electrometer is used to measure the electric signal current, which are typically in the range 1 to 10pA, from the Faraday cup. The schematic presentation of an electrometer circuit design for aerosol detection system is shown in Figure 3. This circuit is a simple current-to-voltage converter, where the voltage drop caused by a current flowing through a resistor is measured. The circuit adopted two cascaded negative feedback amplifiers. The extra component in this circuit is primarily for fine offset voltage adjustment and input/output protection. A 12V power supply capable of

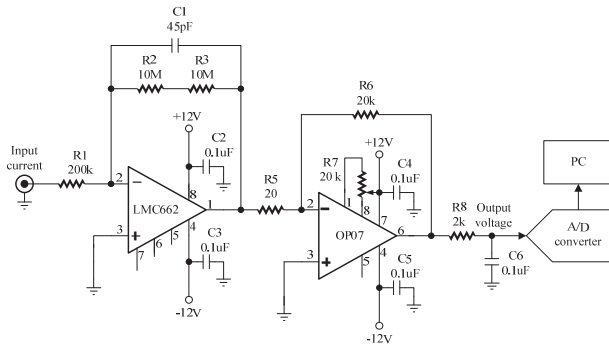


Fig. 3 Schematic diagram of the sensitive electrometer circuit.

providing 100 mA is required. The feedback capacitor and RC low-pass filter were used to reduce high-frequency noise and to prevent oscillations of the amplifier output [5]. In order to avoid expensive construction, commercially-available low-cost monolithic operational amplifiers were used. The commercially-available operational amplifiers used in this circuit is the LMC662, which was designed for low current measurement and featured ultra-low input bias current (2 fA maximum) and low offset voltage drift (1.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) [6]. The output voltage, V_o , of this circuit is given by the following equation:

$$V_o = I_i R_1 \left(\frac{R_2 + R_3 \frac{R_6}{R_5}}{R_4} \right) \quad (2)$$

where I_i is the input current, R_1 and R_3 are the input resistors of the first and second amplifiers, respectively, R_2 and R_4 are the feedback resistors of the first amplifier, and R_5 is the feedback resistors of the second amplifier. This circuit gives an output voltage of 10 mV per 1 pA of input signal current.

2.6 Data Acquisition and Processing System

The output voltage of the electrometer circuit in the range of 0 to +5V was connected to a unipolar 12-bit analog to digital converter (ADC), controlled by I²C bus from the external personal computer via RS-232 serial port interface. The digital ADC signal was processed by computer software, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display the particle number concentration.

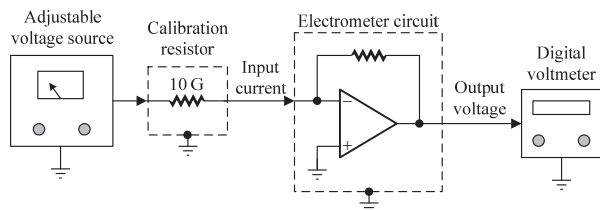


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for the electrometer test.

3. ELECTROMETER CALIBRATION AND TESTING

The electrometer circuit is one of the most important parts influencing accurate particle number concentration measurement corresponding to signal current in the sensor system. In the present paper, a laboratory test facility was developed and constructed to evaluate performance of a prototype electrometer circuit. Figure 4 shows the experimental setup used to evaluate the fabricated electrometer circuit performance. In this study, the electrometer circuit was calibrated with a current injection circuit, high-impedance current source [4]. This circuit consists of an appropriately high-standard resistor (10 G) and a highly-accurate adjustable voltage source in the range between 0 to +5 V. The output current of this circuit can simply be calculated from the Ohm's law. The range of the output current is from 1 pA to 10 pA. It should be noted that the electrometer circuit input was operated at virtual ground potential during calibration and subsequent current measurement. The output voltage from the electrometer circuit was measured and recorded by a highly-accurate digital voltmeter. The voltage reading was then translated into the current measurement.

Figure 5 provides comparison of measured current from this work and a commercial electrometer, Keithley model 6517A, with a high-accuracy current source. It can be found that the measured current was rising linearly as input current increased. Generally, the currents measured from this work were found to agree very well with those measured by the Keithley model 6517A. A very small difference of about 5% was obtained. It is worthy to point out that there were some interferences on the connector at small potentials. Additionally, leakage of currents through the body of the connector can potentially impair the performance of the electrometer significantly. A detailed investigation of this problem may be improved and experimental studied further [5].

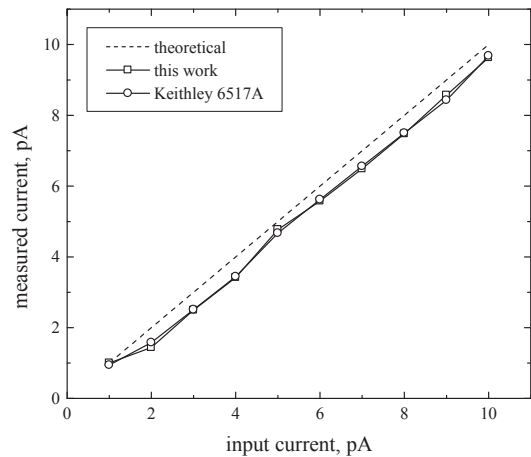


Fig. 5 Performance comparison between the prototype and commercial electrometer

4. CONCLUSION AND FUTURE WORK

The electrostatic sensor for detecting nanometer-sized aerosol particles developed at Rajamangala University of Technology Lanna and Chiang Mai University has been presented and described in this paper. The detecting method was based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. It was able to detect particle number concentration in the nanometer size range. A prototype of the prototype electrometer circuit has been constructed, evaluated, and compared against a commercial electrometer, Keithley model 6517A. The results obtained were very promising. It was demonstrated that the electrometer can be used successfully in detecting the signal current corresponding the particle number concentration.

Among the various techniques and devices exist for producing aerosol samples to testing and calibration of any instrument that measures aerosol particles. One of the most widely used techniques of generating monodisperse aerosol particles is by using a Tandem DMA method. The main advantage of this method is the wide range of particle sizes it can generate. Further research, may involve a Tandem DMA method. Finally, calibration and comparison of the instrument with other particle measuring devices (e.g. SMPS, CPC, EAD, and ELPI) should be conducted further.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Financial support from the Thailand Research Fund (TRF) is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] W. C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, New York (1999).
- [2] P. Intra and N. Tippayawong, "An Overview of Aerosol Particle Sensors for Size Distribution Measurement", *Mj Int J Sci Tech* **1(2)**, 120 (2007).
- [3] TSI Incorporated, "Instruction Manual, Revision F, for Condensation Particle Counter, Model 3010", Minnesota (2006).
- [4] P. Intra and N. Tippayawong, "Corona Ionizer for Unipolar Diffusion Charging of Nanometer Aerosol Particles", *Proceeding of 11th Electrical Engineering Conference*, Pattaya, Thailand, 9 – 10 November, 1177 (2006).
- [5] P. Intra and N. Tippayawong, "An Ultra-Low Current Meter for Aerosol Detection", *Mat Sci* **6(2)**, 313 (2007).
- [6] National Semiconductor Corporation, "LMC662 data sheet", (2003).



AN ELECTROSTATIC SENSOR FOR NANOMETER-SIZED AEROSOL PARTICLES DETECTION

P. Intra¹* and N. Tippayawong²

¹ College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand

² Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

*Email: panich_intra@yahoo.com, panich.intra@hotmail.com



ABSTRACT

In this study, an electrostatic sensor was developed for detecting the number concentration of nanometer-sized aerosol particles. It consists of a size selective inlet, a corona charger, an ion trap, a Faraday cup, an electrometer, a signal conditioning and processing system, and an I/O control and human-computer interface. In the present sensor, aerosol flow is regulated and controlled by means of mass flow meters and controllers with a vacuum pump. An aerosol sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Finally, signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. A detailed description of the operating principle of the system as well as main components was presented. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work was also evaluated and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A, and good agreement was found from the comparison.

INTRODUCTION

Nanometer-sized aerosol particles suspended in air have significant effects on the human health, global climate, air quality and processes in various industries such as food, pharmaceutical and medical, electronic and semiconductor industries [1]. Detection and measurement of nanometer-sized aerosol particles have become an important issue. For this purpose, nanoparticle sensors were developed to monitoring indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry. There are several commercial instruments using various methods of detecting particle number concentration. Available instruments include a SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) using electrical mobility of particles, a CPC (Condensation Particle Counter) which uses particle growth and optical property, an EAD (Electrical Aerosol Detector) which uses electrostatic charge measurement technique, and an ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) using inertia impaction of particles under low pressure [2]. These commercial instruments are widely used for measuring airborne ultra fine particles and provide high-resolution measurement, but they are very expensive and large sizes. To avoid this problem, an inexpensive sensor was developed in this study, suitable for detection of particle number concentration in the nanometer size range based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. A detailed description of the operating principle of the sensor was presented. The sensor performance also was evaluated and compared with a commercial instrument.

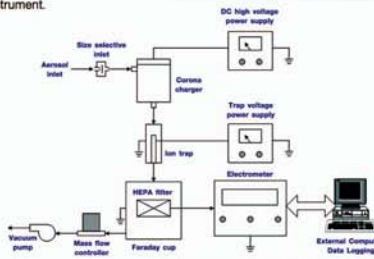


Figure 1: Schematic diagram of the electrostatic sensor.

DESCRIPTION OF THE SENSOR

Figure 1 shows the schematic diagram of the electrostatic sensor for detecting nanometer-sized aerosol particles was developed in this study. The sensor system is composed of a flow system is regulated and controlled by means of mass flow controllers with a vacuum pump, a size selective inlet to remove the particle outside the measurement range, a particle charger using corona discharge technique, an ion trap to remove the high electrical mobility of free ions after charger, a Faraday cup to collect charged particles, an electrometer for measuring signal current from the Faraday cup, and a computer controlled data acquisition and management system.

Size Selective Inlet

The inertial impactor was used to remove particles larger than a known aerodynamic size, upstream of the system. The aerodynamic particle size at which the particles are separated is called the cut-point diameter. In the impactor, the aerosol flow is accelerated through a nozzle directed at a flat plate. The impactation plate deflects the flow streamlines to a 90° bend. Particles with sufficient inertia are unable to follow the streamlines and impact on the plate. Smaller particles are able to follow the streamlines and avoid contact with the plate and exit the impactor.

Unipolar Corona Charger

The particle charger in the present study consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered ends [4]. The needle electrode is made of a stainless steel rod 3 mm in diameter and 49 mm in length, ended in a sharp tip. The angle of the needle cone was approximately 9° and the tip radius was approximately 50 μm, as estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of aluminum tube 30 mm in diameter and 25 mm in length with conical shape. The angle of the cone was approximately 30° and the orifice diameter was approximately 4 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 2 mm. The corona electrode head is connected to a DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field toward the outer electrode wall. Aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions via diffusion charging and field charging mechanisms.

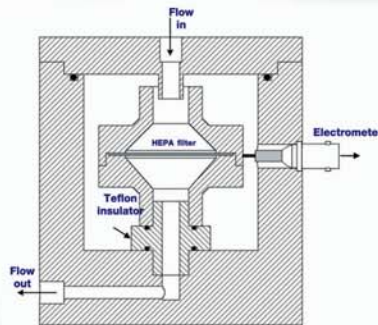


Figure 2: Schematic diagram of the Faraday cup.

Ion Trap

The ion trap was used to remove the high electrical mobility of free ions after the charger. As the free ions can potentially reach the detector and ruin the measurement, a trap field is introduced just after the corona charger. The trap field is across the aerosol flow and has a 200 V.

Faraday Cup

Figure 2 shows the schematic diagram of the Faraday cup used in this study. It consists of an outer housing, a HEPA (High Efficiency Particulate Air) filter, a filter holder, and a Teflon insulator. To completely shield the filter holder collecting the charged particles, the outer housing is made of a stainless steel, and filter holder is electrically isolated from the outer housing with Teflon insulator stand, while the outer housing is grounded. The Faraday cup plays a role to prevent electric noise for measuring ultra-low electric signal current (pA) from collected charged particles on an internal HEPA filter inside the Faraday cup corresponding to the total number concentration of the particles. To transfer charges gathered at the HEPA filter to an electrometer circuit that is outside the Faraday cup, BNC connector is connected to HEPA filter. Because material of HEPA filter is a conductor such as glass fiber, charges collected in the filter can move to the electrometer via the BNC connector and low noise cable without delay. The particle number concentration, N_p , is related to the signal current, I , at HEPA filter is given by

$$N_p = \frac{I}{peQ_a}$$

where p is the number of elementary charge units, e is the elementary unit of charge (1.6×10^{-19} C), and Q_a is the volumetric aerosol sampling flow rate into a Faraday cup.

Sensitive Electrometer

A sensitive electrometer is used to measure the electric signal current, which are typically in the range 1 to 10 pA, from the Faraday cup. The schematic presentation of an electrometer circuit design for aerosol detection system is shown in Figure 3. This circuit is a simple current-to-voltage converter, where the voltage drop caused by a current flowing through a resistor is measured. The circuit adopted two cascaded negative feedback amplifiers. The extra component in this circuit is primarily for fine offset voltage adjustment and input/output protection. The feedback capacitor and RC low-pass filter were used to reduce high-frequency noise and to prevent oscillations of the amplifier output [5]. In order to avoid expensive construction, commercially-available low-cost monolithic operational amplifiers were used. The commercially-available operational amplifiers used in this circuit is the LMC662, which was designed for low current measurement and featured ultra-low input bias current (2 fA maximum) and low offset voltage drift ($1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) [6]. The output voltage, V_o , of this circuit is given by the following equation:

$$V_o = I_i R_1 \left(\frac{R_2 R_3 R_6}{R_4 R_5} \right)$$

where I_i is the input current, R_1 and R_5 are the input resistors of the first and second amplifiers, respectively, R_2 and R_3 are the feedback resistors of the first amplifier, and R_6 is the feedback resistors of the second amplifier. This circuit gives an output voltage of 10 mV per 1 pA of input signal current.

Data Acquisition and Processing System

The output voltage of the electrometer circuit in the range of 0 to +5V was connected to a unipolar 12-bit analog to digital converter (ADC), controlled by PC bus from the external personal computer via RS-232 serial port interface. The digital ADC signal was processed by computer software, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display the particle number concentration.

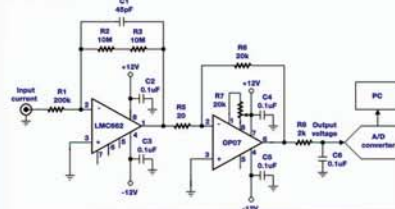


Figure 3: Schematic diagram of the sensitive electrometer circuit.

ELECTROMETER CALIBRATION AND TESTING

The electrometer circuit is one of the most important parts influencing accurate particle number concentration measurement corresponding to signal current in the sensor system. In the present paper, a laboratory test facility was developed and constructed to evaluate performance of a prototype electrometer circuit. Figure 4 shows the experimental setup used to evaluate the fabricated electrometer circuit performance. In this study, the electrometer circuit was calibrated with a current injection circuit, high-impedance current source [4]. This circuit consists of an appropriately high-standard resistor (10 G) and a highly-accurate adjustable voltage source in the range between 0 to +5 V. The output current of this circuit can simply be calculated from the Ohm's law. The range of the output current is from 1 pA to 10 pA. The output voltage from the electrometer circuit was measured and recorded by a highly-accurate digital voltmeter and was then translated into the current measurement.

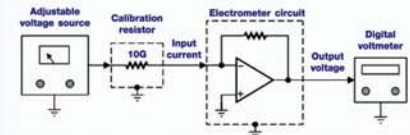


Figure 4: Schematic diagram of the experimental setup for the electrometer test.

Figure 5 provides comparison of measured current from this work and a commercial electrometer, Keithley model 6517A, with a high-accuracy current source. It can be found that the measured current was rising linearly as input current increased. Generally, the currents measured from this work were found to agree very well with those measured by the Keithley model 6517A. A very small difference of about 5% was obtained. It is worthy to point out that there were some interferences on the connector at small potentials. Additionally, leakage of currents through the body of the connector can potentially impair the performance of the electrometer significantly. A detailed investigation of this problem may be improved and experimental studied further [5].

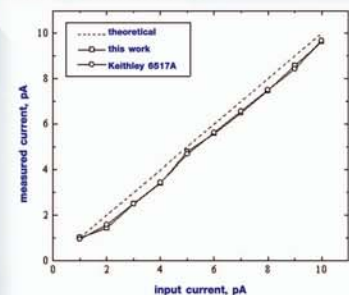


Figure 5: Performance comparison between the prototype and commercial electrometer

CONCLUSION AND FUTURE WORK

The electrostatic sensor for detecting nanometer-sized aerosol particles developed at Rajamangala University of Technology Lanna and Chiang Mai University has been presented and described in this paper. The detecting method was based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. It was able to detect particle number concentration in the nanometer size range. A prototype of the prototype electrometer circuit has been constructed, evaluated, and compared against a commercial electrometer. The results obtained were very promising. It was demonstrated that the electrometer can be used successfully in detecting the signal current corresponding the particle number concentration. There are various techniques and devices exist for producing aerosol samples to testing and calibration of any instrument that measures aerosol particles. One of the most widely used techniques of generating monodisperse aerosol particles is by using the Tandem DMA method. The main advantage of this method is the wide range of particle sizes it can generate. Further research, may involve the Tandem DMA method. Finally, calibration and comparison of the instrument with other particle measuring devices (e.g. SMPS, CPC, EAD, and ELPI) should be conducted further.

REFERENCES

- [1] W. C. Hinds, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, New York (1999).
- [2] P. Intra and N. Tippayawong, "An Overview of Aerosol Particle Sensors for Size Distribution Measurement", *Mj. Int. J. Sci. Tech.* 1(2), 120 (2007).
- [3] TSI Incorporated, "Instruction Manual, Revision F, for Condensation Particle Counter, Model 3010", Minnesota (2006).
- [4] P. Intra and N. Tippayawong, "Corona Ionizer for Unipolar Diffusion Charging of Nanometer Aerosol Particles", *Proceeding of 29th Electrical Engineering Conference, Pattaya, Thailand*, 9 - 10 November, 1177 (2006).
- [5] P. Intra and N. Tippayawong, "An Ultra-Low Current Meter for Aerosol Detection", *CMU. J. Nat. Sci.* 6(2), 313 (2007).
- [6] National Semiconductor Corporation, "LMC662 data sheet", (2003).

ACKNOWLEDGMENTS

Financial support from the Thailand Research Fund (TRF) is gratefully acknowledged.



ภาคผนวก ข-9

Intra, P. and Tippayawong, N., "A submicron electrical aerosol detection system with a Faraday cup electrometer", Oral presentation, *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, Pathumthani, Thailand, 15 – 17 October, 2008.

A Submicron Electrical Aerosol Detection System with a Faraday Cup Electrometer

Panich Intra^{1*}, and Nakorn Tipayawong²

¹ College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50300, Thailand

Tel: 0-5392-1444, Fax: 0-5321-3183, *E-mail: panich.intra@hotmail.com, panich_intra@yahoo.com

² Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University,

Chiang Mai 50200, Thailand

Tel: 0-5394-4146, Fax: 0-5394-4145, E-mail: n.tipayawong@yahoo.com

Abstract

Submicron-sized aerosol particles, defined as aerosols with particle diameters less than 1 μm , suspended in air have significant effects on the human health, global climate, air quality and processes in various industries such as food, pharmaceutical and medical, electronic and semiconductor industries. Automotive engines have long been recognized as a major source of submicron-sized aerosol particles. Development of aerosol detection and size distribution measurement methods has been primarily motivated by the need to find better means of monitoring and controlling indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry. In this study, a submicron electrical aerosol detection system for measuring particle number concentration in the size range between 1 nm – 1 μm using electrostatic charge measurement technique was developed. It consists of a size selective inlet, a particle charging system, an ion trap, a Faraday cup electrometer, a signal conditioning and processing system, and an I/O control and human-computer interface. In this system, an aerosol sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. A detailed description of the operating principle of the system as well as main components was presented. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work was evaluated and compared with a commercial electrometer and good agreement was found from the comparison. Finally, the preliminary experimental testing results were also shown and discussed.

Keywords: aerosol, particle, Faraday cup, electrometer

1. Introduction

Detection and measurement of aerosol particles have become an important topic in atmospheric pollution monitoring and source characterization. In recent years considerable interest has been shown to submicron-sized aerosol particles, defined as aerosols with particle diameters less than 1 μm , for two main reasons. First, such particles have been associated with adverse health effects in areas of high concentrations, and second, aerosols are believed to have a significant influence on atmospheric quality, climate at a local and global scale and processes in various industries such as food, pharmaceutical and medical, electronic and semiconductor industries [1]. A submicron-sized aerosol particle instruments have been developed to monitoring indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry for this purpose [2, 3].

There are several commercial instruments using various methods of detecting and measuring the size distribution and number concentration of particles. Available instruments include a Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) using electrical mobility of particles [4], a Condensation Particle Counter (CPC) which uses particle growth and optical property [5, 6], an Electrical Aerosol Detector (EAD) which uses electrostatic charge measurement technique [7], and an Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) using inertia impaction of particles under low pressure [8]. These commercial instruments are widely used for measuring airborne ultra fine particles and provide high-resolution measurement, but they are very expensive and large sizes. According to the instruction manual for CPC (Model 3010, TSI Inc), a CPC does not operate in ambient temperatures outside the control range of 10°C to 34°C, and the pump and flow sensor of a CPC cannot control the flow when the pressure at the aerosol inlet, the make up air inlet, or the pump exhaust is too high or too low [6]. In addition, the CPC should be carefully moved in caution to protect the optics contamination from

working fluid like alcohol (C₄H₉OH) [6].

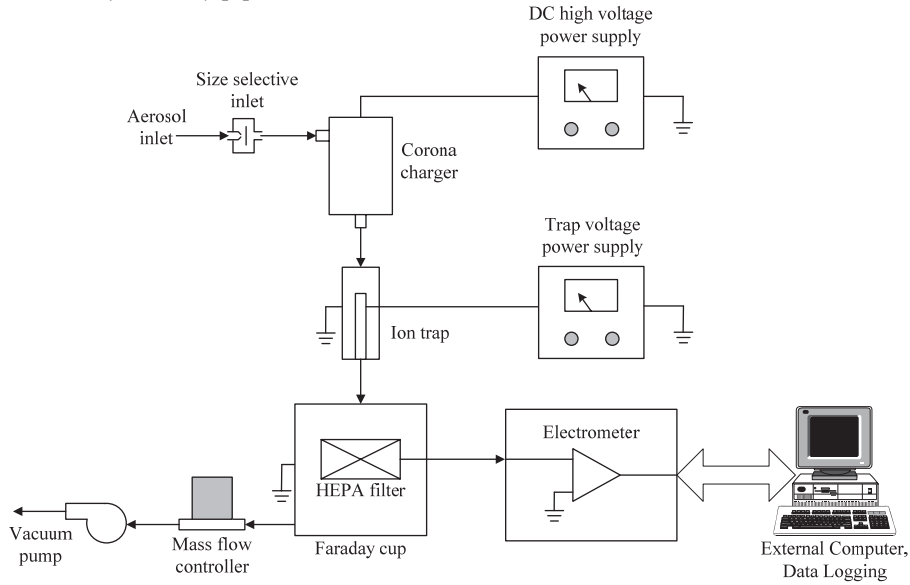


Figure 1. Schematic diagram of the submicron electrical aerosol detection system.

The movability of instruments should be considered in monitoring airborne aerosol particles. To avoid this problem, an inexpensive detector, suitable for detection of particle number concentration in the submicron size range, was built and experimentally tested in this study. This system is based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. A detailed description of the operating principle of the sensor was presented. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work as well as the preliminary experimental testing results were also shown and discussed.

2. A Submicron Electrical Aerosol Detection System

The following paragraphs give a detailed description of main components of the detection system. Figure 1 shows the schematic diagram of the submicron electrical aerosol detection system, developed in this study. The system is composed of a flow system is regulated and controlled by means of mass flow controllers with a vacuum pump, a size selective inlet to remove the particle outside the measurement range, a particle charger using corona discharge technique to charge the particles, an ion trap to remove the high electrical mobility of free ions after charger, a Faraday cup to collect charged particles, an electrometer for measuring signal current from the Faraday cup, and a computer controlled data acquisition and management system.

2.1 Size Selective Inlet

The inertial impactor was used to remove particles larger than a known aerodynamic size, upstream of the system. The aerodynamic particle size at which the particles are separated is called the cut-point diameter. In the impactor, the aerosol flow is accelerated through a nozzle directed at a flat plate. The impaction plate deflects the flow streamlines to a 90° bend. Particles with

sufficient inertia are unable to follow the streamlines and impact on the plate. Smaller particles are able to follow the streamlines and avoid contact with the plate and exit the impactor. The particle collection efficiency of the impactor, E , is determined from [9]

$$E = \left[1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p} \right)^{2s} \right]^{-1} \quad (1)$$

where d_p is the particle diameter, and d_{50} is the particle cut-off diameter at 50% collection efficiency can be calculated by [1]

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\pi\eta\dot{V}_a^3\text{Stk}_{50}}{4\rho_p\dot{V}_a\dot{V}_c}} \quad (2)$$

where $\dot{V}_c$ is the Cunningham slip correction factor, η is the gas viscosity, $\dot{V}_a$ is the acceleration nozzle diameter, Stk_{50} is the Stokes number for the particle cut-off diameter at 50% collection efficiency, ρ_p is the particle density, and $\dot{V}_a$ is the aerosol flow rate.

2.2 Particle Charger

The corona-needle charger used in the present study consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered ends [10]. The needle electrode is made of a stainless steel rod 3 mm in diameter and 49 mm length, ended in a sharp tip. The angle of the needle cone was about 9° and the tip radius was about 50 μm, as estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of aluminum tube 30 mm in diameter and 25 mm length with conical shape. The angle of the cone was about 30° and the orifice diameter was about 4 mm. The distance between the needle electrode

and the cone apex is 2 mm.

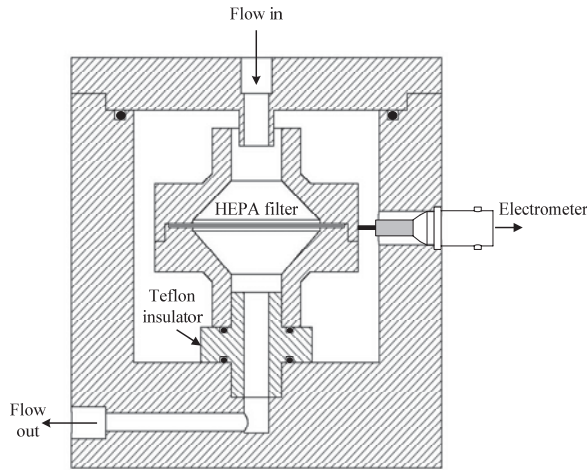


Figure 2. Schematic diagram of the Faraday cup.

The corona electrode head is connected to a DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. An adjustable DC high voltage power supply is used to maintain the corona voltage difference, typically of the order of 1.0 – 5.0 kV. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field toward the outer electrode wall. Aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions via diffusion charging and field charging mechanisms.

2.3 Ion Trap

The ion trap was used to remove the high electrical mobility of free ions after the charger. As the free ions can potentially reach the detector and ruin the measurement, a trap field is introduced just after the corona charger. The trap field is across the aerosol flow and has a 200 V, and the trap penetration, α_{trap} is given by [1]

$$\alpha_{trap} = 1 - \frac{2\pi\mu_i\alpha\alpha}{\alpha_a \ln(r_2/r_1)} \quad (3)$$

where μ_i is the mobility of ion (equal to 0.00014 m²/V.s for the positive ion), α is the trap voltage, α is the trap length, and r_1 and r_2 are the inner and outer radii of the electrode, respectively.

2.4 Faraday Cup

Figure 2 shows schematic diagram of the Faraday cup. To completely shield the HEPA (high efficiency particulate air) filter collecting the charged particles, external case is made of a stainless steel, and HEPA filter is electrically disconnected from the external case with Teflon stand. The Faraday cup plays a role to prevent electric noise to measure very low current caused by charged particles, which are collected by an internal HEPA filter. If the object of measurement is not shielded completely, noise which is 1000 times of resolutions to

be expected. To transfer charges gathered at the HEPA filter to an electrometer that is outside the faraday cage, BNC connector is connected to HEPA filter. Because material of HEPA filter is conductor such as glass fiber, charges collected in the filter can move to the electrometer through the low noise cable and BNC connector without delay. In the case of existing aerosol electrometer airflow is curved at 90 degrees while air is drifted from sampling probe to the filter. It can become the cause of charge loss. To solve this problem airflow into faraday cage is straighten not to change the direction of the flow and loss the charge. The particle number concentration, α_p , is related to the signal current, I_p , at HEPA filter is given by [11]

$$\alpha_p = \frac{I_p}{n_p(d_p)e\alpha_a} \quad (4)$$

where n_p is the number of elementary charge units, e is the elementary unit of charge (1.6×10^{-19} C), and α_a is the volumetric aerosol sampling flow rate into a Faraday cup. The average number of elementary charges carried by particles with diameter, d_p , and is given by following equation [1]

$$n_p(d_p) = \frac{d_p\alpha T}{2\alpha_e e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi\alpha_e d_p \bar{c}_i e^2 \alpha_i t}{2\alpha T} \right] \quad (5)$$

where $\bar{c}_i$ is the mean thermal speed of the ions (240 m/s), α is the Boltzmann's constant (1.380658×10^{-23} J/K, for air), T is the temperature, α_e is the constant of proportionality, α_i is the ion concentration, and t is the residence time of the particle charger. For the corona-needle charger, an approximate expression for the $\alpha_i t$ product can be derived [10]:

$$\alpha_i = \frac{I_i d}{\pi(r_1 + r_2)\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + \alpha^2} e\alpha} \quad (6)$$

where I_i is the charging current, d is the distance between the electrode tip and the cone apex, r_1 and r_2 are the inner and outer radii of a conical frustum, respectively, α is the length of the charging zone, and α is the corona voltage.

2.5 Sensitive Electrometer

The schematic presentation of an electrometer circuit design for aerosol detection system is shown in Figure 3. This circuit is a simple current-to-voltage converter, where the voltage drop caused by a current flowing through a resistor is measured. The circuit adopted two cascaded negative feedback amplifiers. Extra component in this circuit is primarily for fine offset voltage adjustment and input/output protection. A 12V power supply capable of providing 100 mA is required. The feedback capacitor and RC low-pass filter were used to reduce high-frequency noise and to prevent oscillations of the amplifier output [12]. In order to avoid expensive

construction, commercially-available low-cost monolithic operational amplifiers were used.

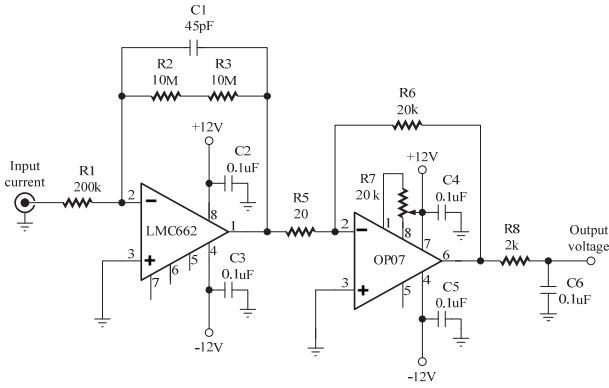


Figure 3. Schematic diagram of the sensitive electrometer circuit.

The commercially-available operational amplifiers used in this circuit is the LMC662, which was designed for low current measurement and featured ultra-low input bias current (2 fA maximum) and low offset voltage drift ($1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) [13]. The output voltage, V_o , of this circuit is given by the following equation:

$$V_o = I_i \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} \right) \quad (7)$$

where I_i is the input current, R_1 and R_2 are the input resistors of the first and second amplifiers, respectively, R_3 and R_4 are the feedback resistors of the first amplifier, and R_5 is the feedback resistors of the second amplifier. This circuit gives an output voltage of 10 mV per 1 pA of input signal current. The electrometer circuit was calibrated with a current injection circuit, high-impedance current source [12]. It consists of an appropriately high-standard resistor (10 G Ω) and an adjustable voltage source in the range between 0 – 5 V. The output current of this circuit can simply be calculated from the Ohm's law.

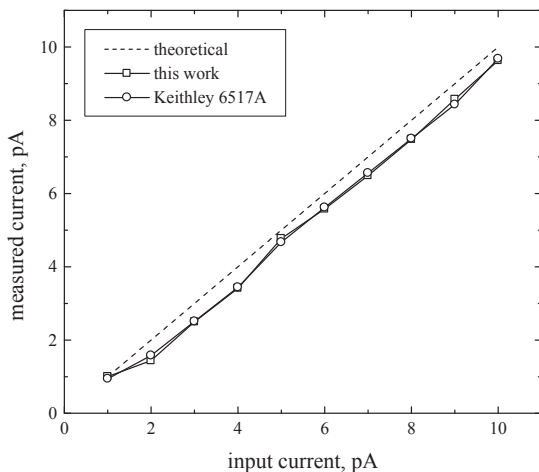


Figure 4. Performance comparison between the prototype and commercial electrometer.

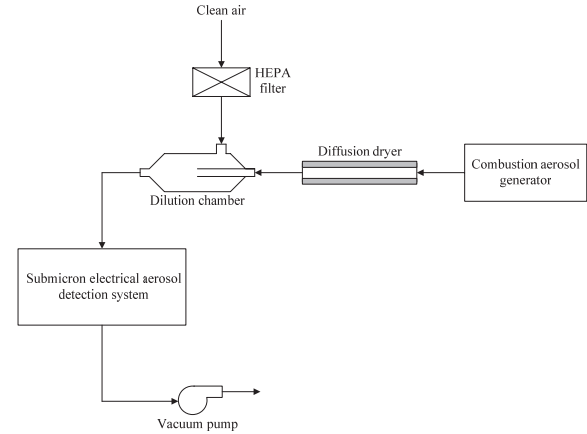


Figure 5. Schematic diagram of the experimental setup for preliminary testing of the submicron electrical aerosol detection system.

The range of the output current is from 1 pA to 10 pA. It should be noted that the electrometer circuit input was operated at virtual ground potential during calibration and subsequent current measurement. The output voltage from the electrometer circuit was measured and recorded by a highly-accurate digital voltmeter. The voltage reading was then translated into the current measurement. The comparison of measured current from this work and a commercial electrometer, Keithley model 6517A, with high-accuracy current source is shown in Figure 4. It was shown that the measured current was rising linearly as input current increased. Generally, the currents measured from this work were found to agree very well with those measured by the Keithley model 6517A. Very small difference about 5% was obtained.

2.6 Data Acquisition and Processing System

The measurement is controlled and data sampled by an external personal computer via RS-232 serial port cable. Software running on an external computer was developed, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display the particle number concentration.

3. Preliminary Experimental Testing

Figure 5 shows the schematic diagram of the experimental setup for preliminary testing of the submicron electrical aerosol detection system. The combustion aerosol generator was used to generate a polydisperse carbonaceous diffusion flame aerosol for this experiment. Stable polydisperse aerosols with particle number concentrations of approximately 10^{12} – 10^{14} particles/ m^3 were obtained [14]. The particle size obtained by scanning electron microscopy (SEM) was in the range between approximately 10 nm – 10 μm . Figure 6 shows the particle morphologies of agglomerates obtained from the scanning electron micrograph, taken with a JEOL JSM-6335F Field Emission Scanning

Electron Microscope, operated at 15 kV and magnification of 5,000X.

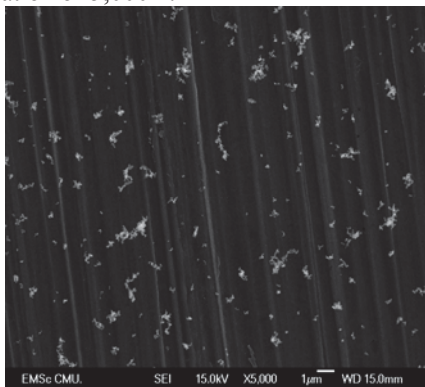


Figure 6. Scanning electron micrograph of sampling particle from the generator.

The particles were first dried with the diffusion drier. Thus, any remaining water was removed. Before aerosol particles entering the system, the particles were diluted and mixed with clean air, which had been filtered through a HEPA filter, in the mixing chamber. The system was operated at aerosol flow rate in the range of 1.0 – 4.0 L/min. To reduce errors due to time variations in the aerosol concentrations, repeat measurements were commenced at least 5 min after the introduction of the aerosol into the measurement system.

In this paper, four different operating conditions of the aerosol flow rate were preliminary experimental tested on the particle number concentration measurements of the system. Variation of aerosol flow rate was carried out by adjusting the inlet mass flow controller in the range of 1.0 to 4.0 l/min and the operating pressure was about 1000 mbar. Figure 7 shows variation of measured particle number concentration and signal current with aerosol flow rates. The measured signal current and the particle number concentration were found in the range of approximately 90 – 700 pA and $3 - 7 \times 10^{13}$ particles/m³, respectively. It was found that an increase in the aerosol flow rate resulted in an increase in measured signal current corresponding to the particle number concentration because the signal current was approximately proportional to the aerosol flow rate.

4. Conclusions and Future Work

The system for detecting the number concentration of submicron-sized aerosol particles with a Faraday cup electrometer has been presented and described in this paper. The detecting method was based on unipolar corona charging and electrostatic detection of highly charged particles. It was able to detect particle number concentration in the submicron size range. A prototype of the system has been constructed and evaluated. Preliminary experimental testing results obtained were very promising. It was demonstrated that the system can be used in detecting the number concentration of the particles.

The following paragraphs give specific recommendations for further research work on both the

theoretical and experimental parts of the detector development.

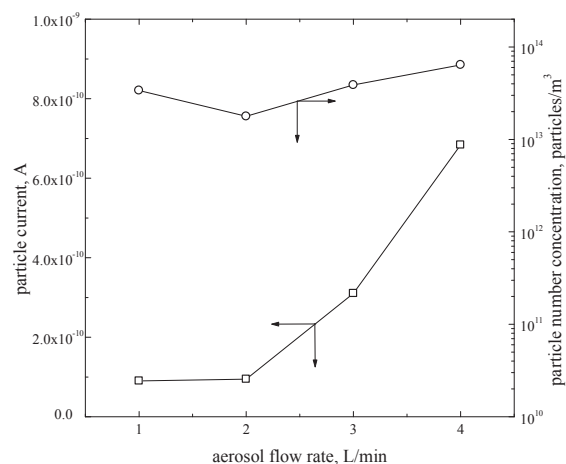


Figure 7. Variation of measured particle number concentration and current with aerosol flow rates.

- There are various techniques and devices exist for generating aerosol samples to testing and calibration of any instrument that measures aerosol particles. One of the most widely used techniques of generating monodisperse aerosol particles is by using the Tandem DMA method. The main advantage of this method is the wide range of particle sizes it can generate. Further research, may involve the Tandem DMA.
- Calibration and comparison of the instrument with other particle measuring devices such as SMPS, CPC, EAD, and ELPI should be conducted further.
- In order to measure transient behavior of airborne particles, such as those found in automotive exhaust gas, the time response of the instrument should be further improved.

Acknowledgment

Financial support from the Thailand Research Fund (TRF) is gratefully acknowledged.

References

1. Hinds, W. C., 1999. Aerosol Technology, John Wiley & Sons, New York.
2. Intra, P. and Tippayawong, N., 2003. Particle Size Analyzers. Journal of the Scientific & Technological Research Equipment Centre, Vol. 11, 156-170. (in Thai)
3. Intra, P. and Tippayawong, N., 2007. An Overview of Aerosol Particle Sensors for Size Distribution Measurement. Maejo International Journal of Science and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 120 - 136.
4. TSI Incorporated, 2006. Operation and Service Manual, Revision L, for Scanning Electrical Mobility SizerTM (SMPSTM) Spectrometer, Model 3936, Minnesota.

5. Agrawal, J.K. and Sem, G.J., 1980. Continuous Flow, Single-particle-counting Condensation Nucleus Counter. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 11, 343 - 357.
6. TSI Incorporated, 2002. Instruction Manual, Revision F, for Condensation Particle Counter, Model 3010, Minnesota.
7. Johnson, T., Kaufman, S. and Medved, A., 2002. Response of an Electrical Aerosol Detector based on a Corona Jet Charger, 6th International. ETH Conference Nanoparticle Measurement, 19 - 21 August, Zurich, Switzerland.
8. Keskinen, J., Pietarinen, K. and Lehtimäki, M., 1992. Electrical Low Pressure Impactor. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 23, pp. 353-360.
9. Intra, P., 2008. An Inertial Impactor for Submicron-Particle Separation. *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, under 1st review.
10. Intra, P., and Tippayawong, N., 2006. Corona Ionizer for Unipolar Diffusion Charging of Nanometer Aerosol Particles, Proceeding of 29th Electrical Engineering Conference, Pattaya, Thailand, 9 - 10 November, pp. 1177 - 1180.
11. Intra, P. and Tippayawong, N., 2008. An Electrostatic Sensor for Nanometer-Sized Aerosol Particles Detection, Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 24 - 25 July, Bangkok, Thailand.
12. Intra, P., and Tippayawong, N., 2007. An Ultra-Low Current Meter for Aerosol Detection. *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 313 - 320.
13. National Semiconductor Corporation, 2003. LMC662 CMOS Dual Operational Amplifier Data Sheet.
14. Cleary, T.G., Mulholland, G.W., Ives, L.K., Fletcher, R.A. and Gentry, J.W., 1992. Ultrafine Combustion Aerosol Generator. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 16, pp. 166-170.

ภาคผนวก ข-10

Intra, P. and Tippayawong, N., “Analytical investigation of an electrostatic precipitator for excess ions removal after charging process of the electrical mobility spectrometer”, Oral presentation, *The 7th PSU-Engineering Conference*, 21 – 22 May, 2009.

Analytical Investigation of an Electrostatic Precipitator for Excess Ions Removal after Charging Process of the Electrical Mobility Spectrometer

Panich Intra^{1*} Nakorn Tippiyawong²

¹College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiang Mai 50300

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200

E-mail: panich.intra@hotmail.com, panich_intra@yahoo.com*

Abstract

An electrostatic precipitator (ESP) is widely used to work as an ion precipitator for removing the excess ions mixing with the charged particles after charging process of the electrical mobility spectrometer. In this paper, the ion precipitator for the electrical mobility spectrometer was designed, constructed, and analytical investigated. An analytical model was developed to investigate the ions transport inside the ion precipitator to give a better understanding on the operation of the ion precipitator in this study. The analysis was carried out for positive ions, positively applied voltage at the wire electrode between 10 and 100 V, total flow rate of 1 and 5 L/min, operating pressure of 1000 mbar and radial distance of the inlet between 0.15 and 14 mm at a fixed radial of wire and outer electrodes. It was found that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. Conversely, faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream. It was shown that all charged particles of 10 nm in diameter can pass through the ion precipitator smoothly without precipitated at the outer electrode. It can be concluded that the prediction of ion and particle trajectories was particularly useful in the ion precipitator design.

Keywords: Ion, Electrostatic Precipitator, Electrical Mobility

1. Introduction

The ion precipitator is one of the most important components in the aerosol particle sizing and measurement system by the electrical mobility technique [1]. The aim of the ion precipitator for the electrical mobility spectrometer was to remove the high electrical mobility of the excess free ions mixing with the charged particles after the particle charging process. As the free ions can potentially reach the detector and ruin the measurement, an ion precipitator is introduced just after the particle charger.

It is well known that ESPs are widely used for removing particles from gas streams in various industrial processes and room air-conditioning system [2 – 4]. Figure 1 shows the basic principle of a typical ESP. It consists of a discharge electrode placed along

the axis of the collecting electrode. A dc high electrical voltage is applied to the discharge electrode, while the collecting electrode is grounded. The high voltage produces an electric field and a flow of electric charges (ions) from discharge electrode to the collecting electrode. Dirty gas containing particulate pollutants is introduced into ESP. The particulates are bombarded by monopolar ions from the discharge electrode and are strongly charged; they are driven by electrostatic force toward the collecting electrode and are deposited in its inner surface. In this way the outgoing gas flow would become particle-free. Although ESPs are initially designed to precipitate particles, they are also proper for depositing ions under certain conditions. This is because ions are, just like the charged particles, carrying charges, therefore they can be precipitated within an electric field. The key to changing an ESP into an ion precipitator lies in applying a proper voltage to the ESP, such only ions are precipitated while charged particles can pass through smoothly.

The aim of the present paper is to develop the mathematical model to predict the ion trajectory inside the ion precipitator. The analysis was carried out for positive ions, positively applied voltage at the wire electrode between 10 to 100 V, total flow rate of 1 to 5 L/min, operating pressure of 1000 mbar and radial distance of the inlet between 0.15 to 14 mm at a fixed radial of wire and outer electrodes. A detail description of the ion precipitator design was also presented in this paper.

2. Description of the Ion Precipitator

A schematic diagram of the ion precipitator used in this study is shown in Figure 2. It has a geometrical configuration similar to that used by Lethtimaki [5],

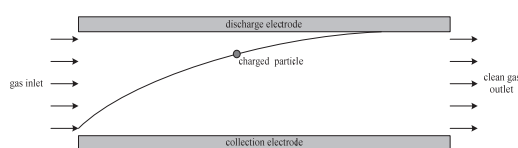


Figure 1. Basic principle of a typical ESP

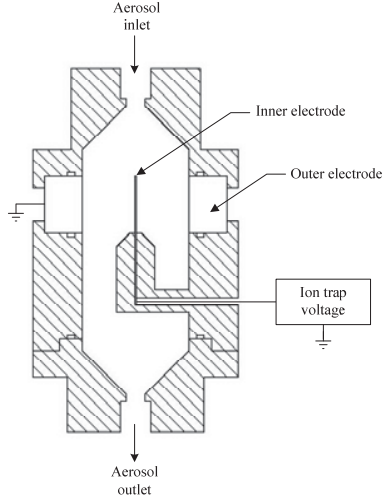


Figure 2. Schematic diagram of the ion precipitator

and Keskinen et al. [6]. It consists of a coaxial wire electrode placed along the axis of a metallic cylinder tube. The outer electrode is made of aluminum tube 28 mm in diameter and 15 mm in length. The wire electrode is made of stainless steel wire 300 μm in diameter and 15 mm in length. DC voltage supply was applied to the wire electrode, typically in the range between 10 – 100 V, while the outer metallic electrode is grounded.

3. Modeling of Ions Transport inside the Ion Precipitator

The transportation of ions and charged particles inside the electrostatic precipitator have been studied and presented in the published literature [7 – 12]. As shown in Figure 1, the axial motion of ion was influenced by the fluid velocity profile in the axial flow. The radial motion of ion is due to electric force which is by far greater than other forces. When the ions introduced into the ion precipitator, any ions under the influence of an electric field will have an electrical mobility. It is assumed that the flow and electric fields are axisymmetric and steady, the flow in the precipitator is laminar, fully developed and incompressible, the space charge effect is negligible, and Brownian diffusion effects are negligible. For the particular case of annular geometries where the ions enters the precipitator on an axial flow and the ions migrate along the radial direction of electric field, motion of the ions within the precipitator can be described by the system of differential equations as [7]

$$\frac{dr}{dt} = u_r + \mu_i E_r \quad (1)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = u_\mu + \mu_i E_\mu \quad (2)$$

where r and μ are the radial and axial dimensions of the classifier, u_r and u_μ are the radial and axial components of the air flow velocity. Similarly, E_r and E_μ are the radial and axial components of the electric field and μ_i is the electrical mobility of ions. Based on the work of Reischl et al. [13], the average value for the positive ion electrical mobility at atmospheric pressure was $\mu_i = 1.425 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$. When a uniform electric field is established between the two electrodes of the precipitator, the electric field components are given by the following relations

$$E_r = \frac{\mu}{r \ln(r_2/r_1)} \quad \text{and} \quad E_\mu \approx 0 \quad (3)$$

where r_μ and r_μ are the radii of the wire and outer electrodes, respectively. Assuming that the radial velocity component for a laminar annular flow is zero ($u_r = 0$) and combining the above equations, the ions trajectories can be described by [11]

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\mu \mu}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = u_\mu(r) = Ar^2 + \mu \ln(r) + \mu \quad (5)$$

where:

$$A = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{d\mu}, \quad (6)$$

$$\mu = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{d\mu} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \right), \quad (7)$$

$$\mu = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{d\mu} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r_1) - r_1^2 \right), \quad (8)$$

$dp/d\mu$ denotes the constant pressure gradient is given by the following equations

$$\frac{dp}{d\mu} = -\frac{\rho \bar{\mu}^2 f}{2\mu_h} \quad (9)$$

where:

$$\mu_h = 2r_2(1 - (r_1/r_2)), \quad (10)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{1 + (r_1/r_2)^2}{(1 - (r_1/r_2))^2} + \frac{1 + (r_1/r_2)}{(1 - (r_1/r_2)) \ln(r_1/r_2)} \right)^{-1}, \quad (11)$$

$$\text{Re} = \frac{2r_2(1-(r_1/r_2))\bar{u}\rho}{\mu}, \quad (12)$$

$\bar{u}_h$ is the hydraulic diameter for an annular flow area, f is the friction factor, $\bar{u}$ is the mean axial flow velocity, ρ is the gas density and Re is the Reynolds number in the annular flow. Using Equations (4) and (5), the trajectory of the ions is given by

$$\frac{dr}{d\bar{u}} = \frac{dr}{d\bar{u}} = \frac{\bar{u}_i}{ru_{\bar{u}}(r) \ln(r_2/r_1)} \quad (13)$$

Integrating Equation (13), the migration paths of the ions can be determined as

$$\int_{r_{in}}^{r_2} ru_{\bar{u}}(r) dr = \int_0^{\bar{u}_i} \frac{\bar{u}_i}{\ln(r_2/r_1)} d\bar{u} \quad (14)$$

where r_{in} is the radial position at which the ions enters the precipitator. Therefore, the ions entering the precipitator at a radial position of r_{in} has trajectory taking it to an axial position of $\bar{u}$ which can be obtained as

$$\bar{u} = -\frac{g(r_{in}) \ln(r_2/r_1)}{4\bar{u}_i} \quad (15)$$

$$g(r_{in}) = \left(Ar_2^4 - Ar_{in}^4 + \bar{u}_{in}^2 - \bar{u}_2^2 + 2\bar{u}_2^2 \ln(r_2) \right) / \left(-2\bar{u}_{in}^2 \ln(r_{in}) + 2\bar{u}_2^2 - 2\bar{u}_{in}^2 \right) \quad (16)$$

4. Calculation Procedure

An analytical model was developed to investigate the ions transport inside the ion precipitator to give a better understanding on the operation of the ion precipitator. Calculations have been performed for positive ions and charged particles. These calculations were carried out at varying positively applied voltage at the wire electrode between 10 and 100 V, total air flow rate between 1 and 5 L/min, and the radial distance of the inlet between 0.15 to 14 mm at a fixed radial of wire and outer electrodes ($r_{\bar{u}} = 0.15$ mm and $r_{\bar{u}} = 14$ mm). The parameters and operating conditions used are shown in Table 1. Air density and viscosity are 1.225 kg/m³ and 1.7894×10^{-5} kg/m/s, respectively. Operating temperature and pressure are 294 K and 1000 mbar, respectively. In this study, the flow conditions inside the ion precipitator are assumed to be steady, incompressible and laminar. The electric field distribution inside the ion precipitator is also assumed to be uniform in the axial direction. The ion and particle trajectories were calculated using Equations (15) and (16) with Microsoft Visual Basic programming.

Table 1 Model parameter and operating condition values

Parameter and operating conditions	Values
Diameter of wire electrode, $r_{\bar{u}}$ (mm)	0.15
Diameter of outer electrode, $r_{\bar{u}}$ (mm)	14
Length of precipitator, $\bar{u}$ (mm)	15
Wire electrode voltage, $\bar{u}$ (V)	10, 50, 100
Total flow rate, (L/min)	1, 3, 5
Nature of flow	Laminar
Operating temperature, T (K)	294
Operating pressure, $\bar{u}$ (atm)	1
Gas density, (kg/m ³)	1.225
Gas viscosity, μ (kg/m/s)	1.7894×10^{-5}
Polarity of ions	Positive
Electrical mobility of ion, $\bar{u}$ (m ² /V/s)	1.425×10^{-4}
Particle size range, d_p (nm)	10

5. Results and Discussion

Comparison of ion trajectories along the precipitator between the existing models and the present model is shown in Figure 3. The operating conditions of these models were: 10 V wire electrode voltage and 1 L/min total flow rate. It was shown that the ion trajectory of the present model agreed very well with that proposed by Hagwood et al. [8] and Williams [9]. However, it was also observed that the large difference between this model and the models that developed by Kulon et al. [10] and Wei [12]. It was expected to point out that their models were not taken into account the constant pressure gradient into the annular flow velocity profile which can result in significant errors. Figure 4 shows a number of trajectories of the positively ions as a function of wire electrode voltage. The ions were deflected radially toward the inner surface of the outer electrode of the precipitator. It was found that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. This was expected because the motion of ions was mainly influenced by the applied electrical force. Increase in applied voltage resulted in the increase of the ions collecting efficiency. It is clear from the Figure that the optimal wire electrode voltage was about 100 V. After the optimal wire electrode voltage was found, the optimal total flow rate through the precipitator was determined. Figure 5 show variation of ion trajectories along the precipitator with total flow rate. It was shown that faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream (Figure 5).

It is still necessary to prove that the chosen voltage has barely minimum influence on the charged particles. This can be easily done by calculating particle trajectories with the ion precipitator at the identical voltage. In the calculations, particle governing equations are identical to ion governing Equations (15) with the only exception of the ion electrical mobility $\bar{u}$ in the Equation (15), with should be replaced by particle electrical mobility $\bar{u}_p$. The electrical mobility of particle can be calculated as [14]:

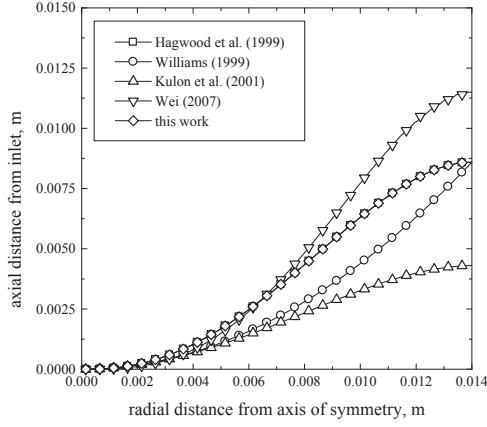


Figure 3. Comparison of ion trajectories along the precipitator between the existing models and the present model (10 V wire electrode voltage, and 1 L/min total flow rate)

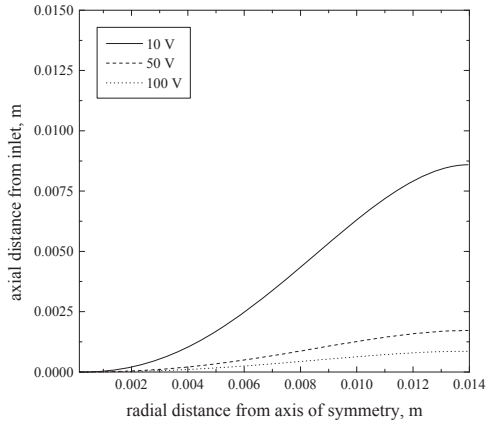


Figure 4. Variation of ion trajectories along the precipitator with wire electrode voltage (1 L/min total flow rate)

$$\square_p = \frac{n_p e \square_c}{3\pi\mu d_p} \quad (17)$$

where n_p is the net number of elementary charges on the particle, e is the value of elementary charge on an electron, $\square_c$ is the Cunningham slip correction factor, μ is the gas viscosity, and d_p is the particle diameter. Consider an extreme case in which a particle diameter of 10 nm (the lower limit of particle size in this study) is singly charged, thus the particle tends to have the largest electrical mobility. Figure 6 plots the charged particle trajectories within the ion precipitator, starting from different initial radial locations. It was shown that all charged particles can pass through the ion precipitator smoothly without precipitated at the outer electrode.

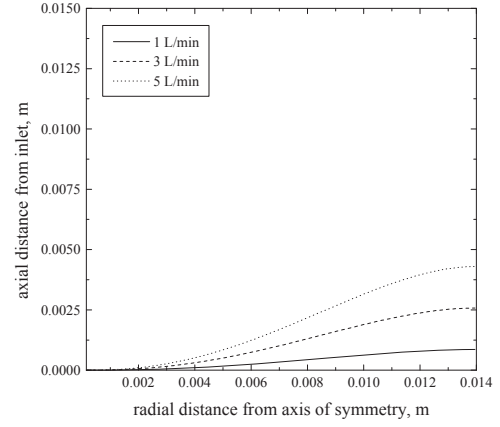


Figure 5. Variation of ion trajectories along the precipitator with total flow rate (100 V wire electrode voltage)

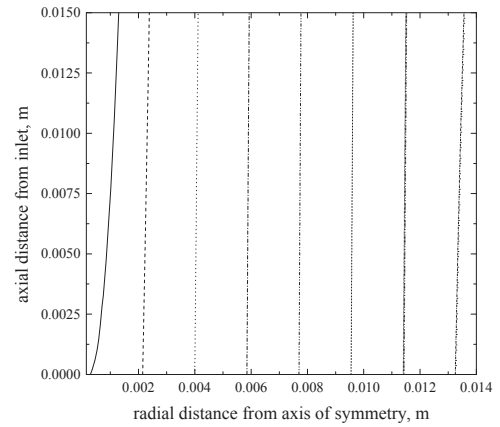


Figure 6. Variation of charged particle trajectories along the precipitator with inlet radial distance (100 V wire electrode voltage, 10 nm particle diameter, and 5 L/min total flow rate)

6. Conclusion

The ion precipitator for the electrical mobility spectrometer was designed, constructed, and analytical investigated in this paper. In this study, an analytical model was developed to investigate the ions transport inside the ion precipitator to give a better understanding on the operation of the ion precipitator. The analysis was carried out for positive ions, positively applied voltage at the wire electrode between 10 and 100 V, total flow rate of 1 and 5 L/min, operating pressure of 1000 mbar and radial distance of the inlet between 0.15 and 14 mm at a fixed radial of wire and outer electrodes. It was found that higher applied wire electrode voltage caused ions to deposit closer to the entrance. Conversely, faster flow rate forced ions to impact the wall further downstream. It was shown that all charged particles of

10 nm in diameter can pass through the ion precipitator smoothly without precipitated at the outer electrode.

Future ongoing research will experiment on the effects of the design parameters on the ion precipitator performance. The particle penetration efficiency of the precipitator downstream of the precipitator should be further theoretically and experimentally studied.

Acknowledgments

This research was financially supported by the Thailand Research Fund (TRF), contract no. MRG5180217.

References

- [1] Intra P. and Tippayawong N. 2008. An Electrostatic Sensor for Nanometer-Sized Aerosol Particles Detection, Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Bangkok, Thailand, July 24 – 25.
- [2] White, H.J. 1963. Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- [3] Parker K.R. 1997. Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, New York, USA.
- [4] Joworek, A., Krupa, A. and Czech, T. 2007. Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning: A Brief Review. *Journal of Electrostatic*, 65: 133 – 155.
- [5] Lehtimäki, M. 1986. Studies of Aerosol Measuring Techniques, Ph.D. Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- [6] Keskinen, J., Pietarinen, K. and Lehtimäki, M. 1992. Electrical Low Pressure Impactor. *Journal of Aerosol Science*, 23: 353-360.
- [7] Knutson, E.O. and Whitby, K.T. 1975. Aerosol Classification by Electric Mobility: Apparatus, Theory, and Applications. *Journal of Aerosol Science*, 6: 443-451.
- [8] Hagwood, C., Sivathanu, Y. and Mulholland, G. 1999. The DMA Transfer Function with Brownian Motion a Trajectory/Monte-Carlo Approach. *Aerosol Science and Technology*, 30: 40-61.
- [9] Williams, P.I. 1999. Construction and Validation of a DMPS for Aerosol Characterization, Ph.D. Thesis, University of Manchester, U.K.
- [10] Kulon, J., Hrabar, S., Machowski, W. and Balachandran, W. 2001. A Bipolar Charge Measurement System for Aerosol Characterization, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37: 472-479.
- [11] Intra, P. and Tippayawong, N. 2005. Analytical Investigation of Aerosol Transport under Electric Field, NSTDA Annual Conference, Bangkok, Thailand, March 27 – 30. (in Thai)
- [12] Wei, J. 2007. Development of a Method for Measuring Surface Area Concentration of Ultrafine Particles, D.Eng. Thesis, University of Duisburg-Essen, Germany.
- [13] Reischl G.P., Makela J.M., Harch R. and Necid, J. 1996. Bipolar Charging of Ultrafine Particles in the Size Range below 10 nm. *Journal of Aerosol Science*, 27: 931 – 949.
- [14] Hinds W.C. 1999. *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.

ภาคผนวก ข-11

Intra, P. and Tippayawong, N., “An electrical detector for nanometer-sized aerosol particles detection: development of the equipment and preliminary results”,
The 9th TRF Academic Meeting, Phetchaburi, Thailand, 15 – 17 October, 2009.

An Electrical Detector for Nanometer-Sized Aerosol Particles Detection: Development of the Equipment and Preliminary Results

Intra, P.^{1*}, Tippayawong, N.²

¹College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology, Rajabhat
Chiang Mai, Chiang Mai, Thailand
²Department of Mechanical Engineering, Rajabhat Chiang Mai University,
Chiang Mai, Thailand

Abstract

An electrical detection system for measuring number concentration of nanometer-sized aerosol particles in the size range between 1 nm – 1 μ m using electrostatic charge measurement technique was developed in this study. It consists of a size selective inlet, a particle charging system, an ion trap, a Faraday cup electrometer, a signal conditioning and processing system, and an I/O control and human-computer interface. In this system, an aerosol sample first passes through the size selective inlet to remove particles outside the measurement size range based on their aerodynamic diameter, and then pass through the unipolar corona charger that sets a charge on the particles and enter the ion trap to remove the free ions. After the ion trap, the charged particles then enter the Faraday cup electrometer for measuring ultra low current about 10^{-12} A induced by charged particles collected on the filter in Faraday cup corresponding to the number concentration of particles. Signal current is then recorded and processed by a data acquisition system. The performance of the prototype electrometer circuit used in this work was evaluated and compared with a commercial electrometer and good agreement was found from the comparison. Finally, the preliminary experimental testing results were also shown and discussed.

Keywords: aerosol, particle, electrostatic, Faraday cup, electrometer

Outputs

1. Intra P, Tippayawong N. *Measurements of ion current from a corona needle charger using a Faraday cup electrometer*. Chiang Mai Journal of Science 2009; 36(1): 110 – 119.
2. Intra P, Tippayawong N. *An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection*. Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics 2009; 17: accepted for publication.

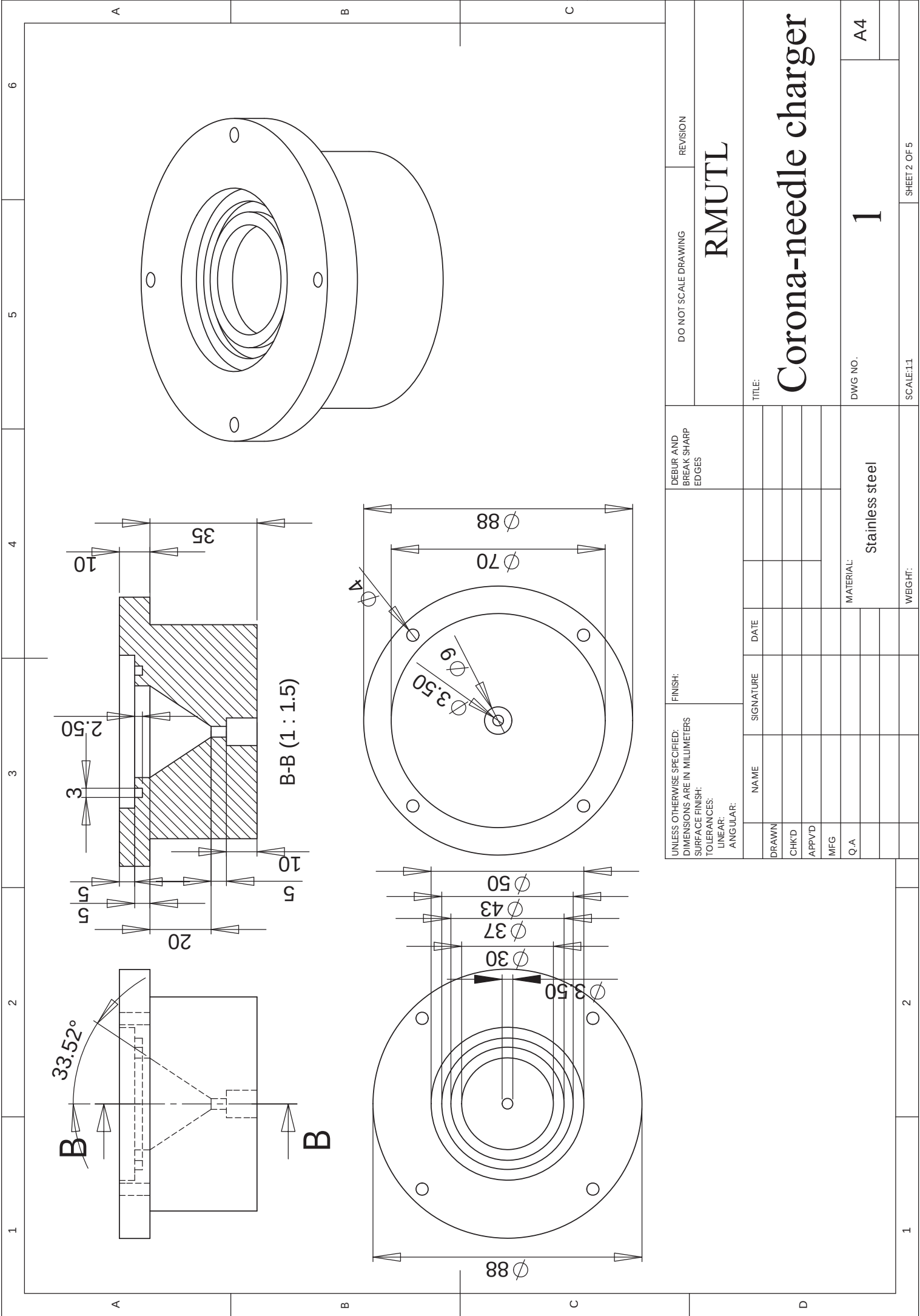
*Corresponding author.

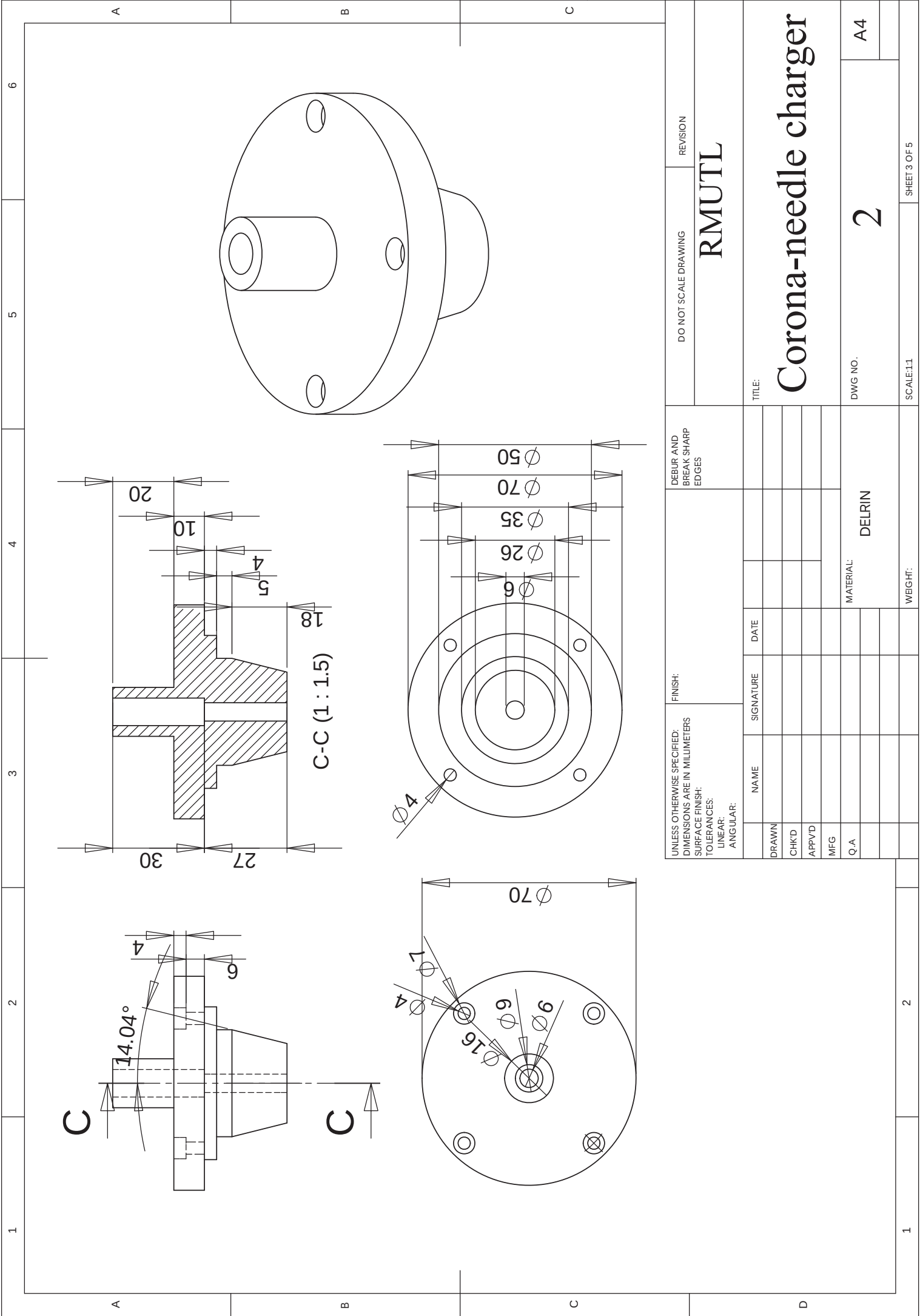
Tel.: 0-5392-1444; Fax: 0-5321-3183

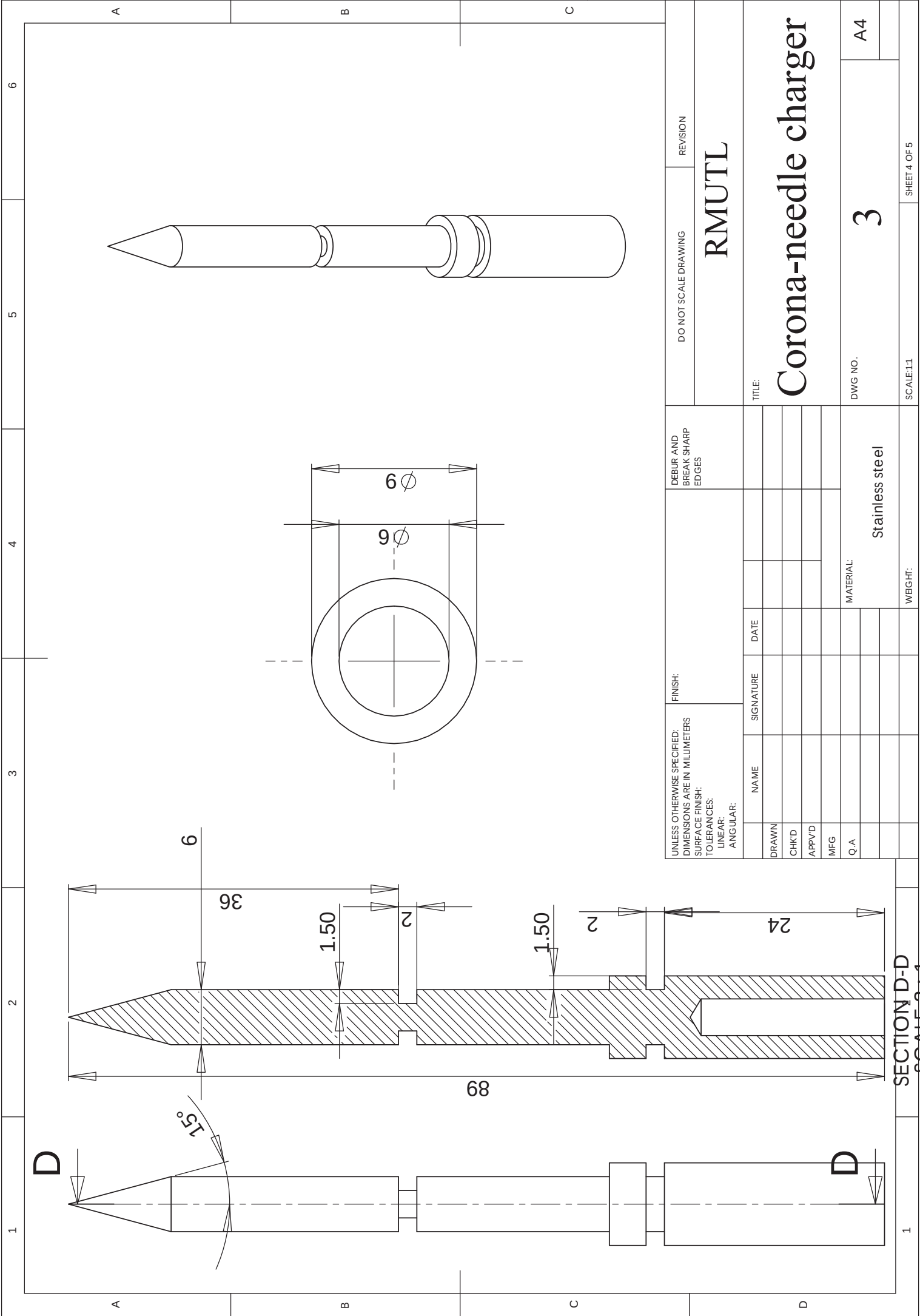
E-mail: panich_intra@yahoo.com

ภาคผนวก ค

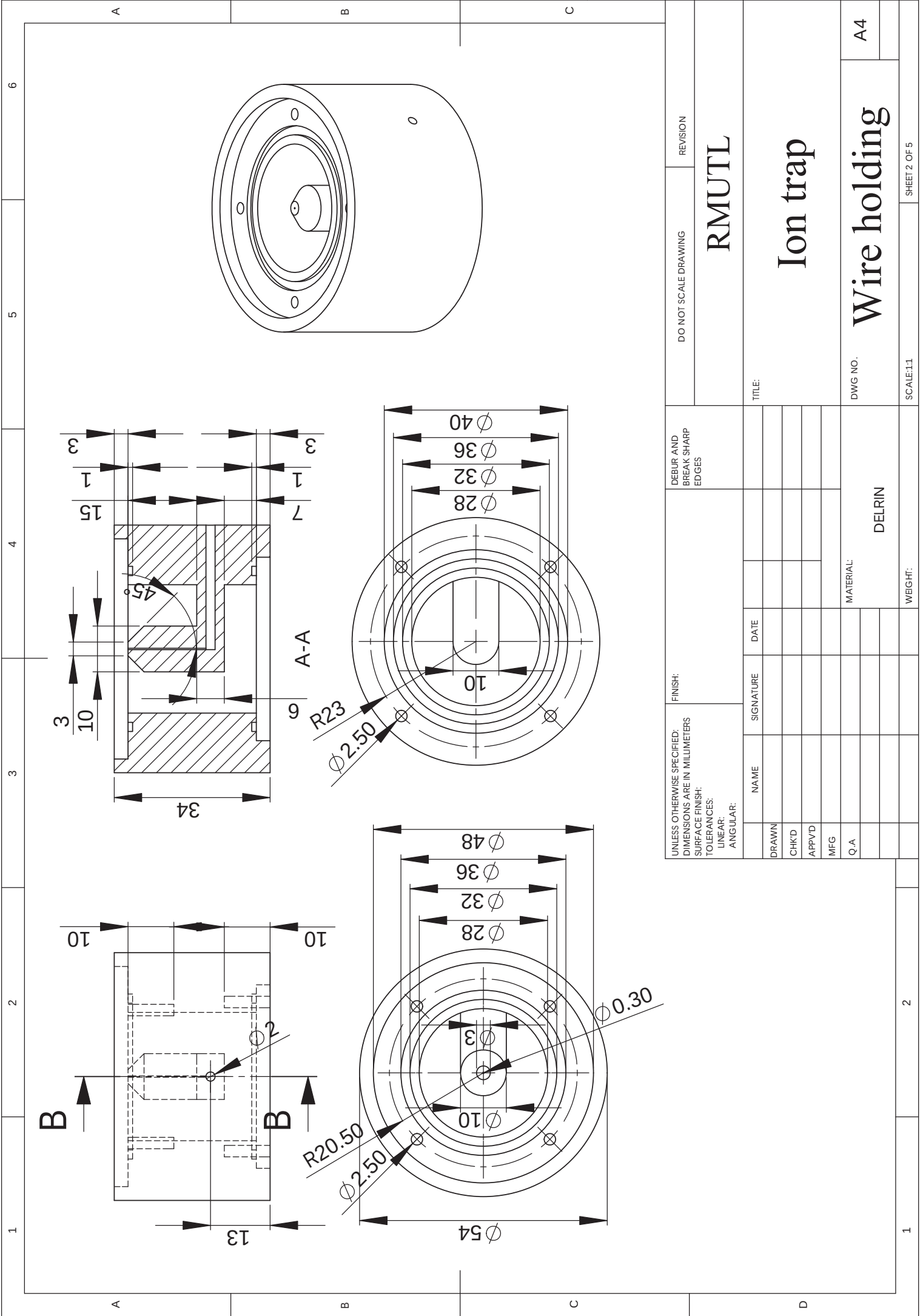
แบบเชิงเทคนิคของต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค
นาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต



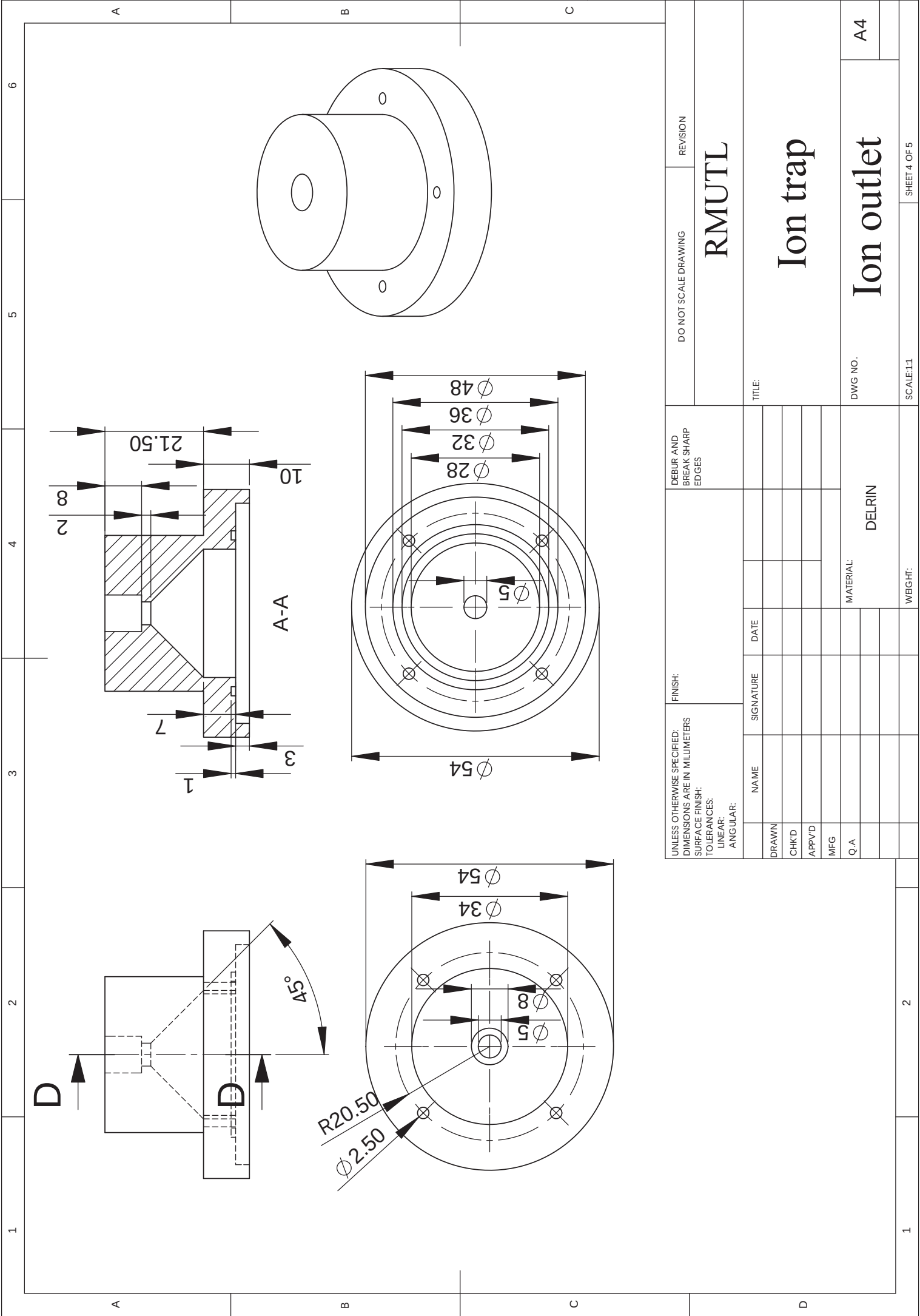


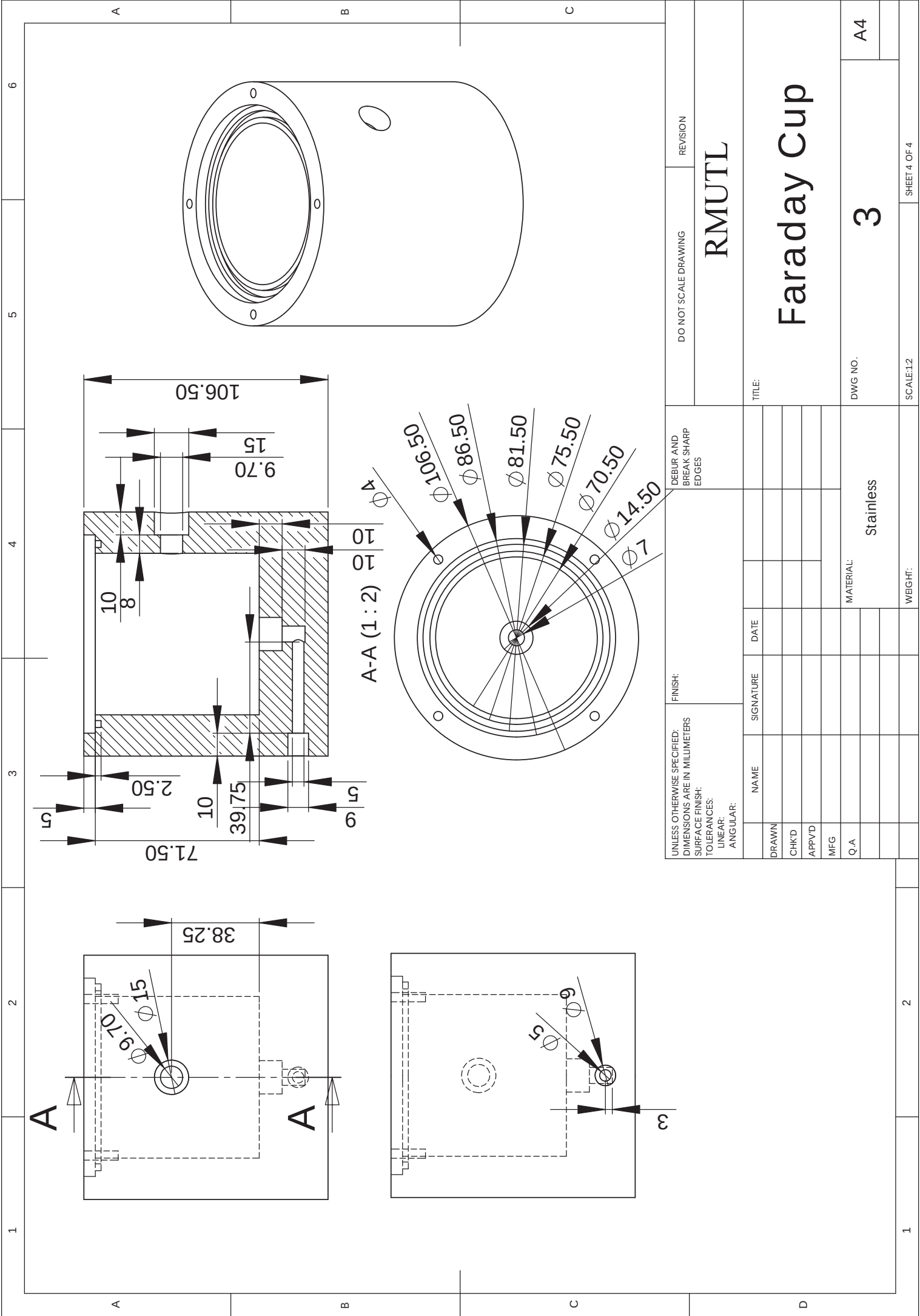


SECTION D-D
SCALE 2 : 1



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
RMUTL		TITLE:	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		ION trap	
FINISH: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DWG NO.	
NAME		SIGNATURE	
DATE		MATERIAL:	
DRAWN		DELIRIN	
CHK'D		Q.A.	
APP'D		SCALE:1:1	
MFG		SHEET 2 OF 5	
Q.A.		Wire holding	
A4		Ion trap	





ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อและนามสกุล (ภาษาไทย) นาย พานิช อินตะ
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Panich Intra

วันที่เกิด 4 เดือน กันยายน พ.ศ. 2521 เพศ ชาย ปัจจุบันอายุ 31 ปี
เชื้อชาติ ไทย สัญชาติ ไทย ศาสนา พุทธ

2. ที่อยู่ทำงาน วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เลขที่ 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

รหัสไปรษณีย์ 50300 โทรศัพท์ 0-5392-1444 โทรสาร 0-5321-3183

Email address: panich.intra@rmutl.ac.th Home page: <http://college.rmutl.ac.th>

3. ที่อยู่ที่บ้าน เลขที่ 77 หมู่ที่ 13 ตำบลหนองตอง อำเภอหางดง จังหวัด เชียงใหม่

รหัสไปรษณีย์ 50340 โทรศัพท์ 08-9755-1985, 08-6919-3185 โทรสาร -

E-mail address: panich_intra@yahoo.com Home page: -

4. ประวัติการศึกษาระดับอุดมศึกษา

สถาบันศึกษาระดับอุดมศึกษา	ช่วง พ.ศ. ที่ศึกษา	ระดับ	สาขาวิชา	เกรด เฉลี่ย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2546 – 2549	ปริญญาเอก (Ph.D.)	วิศวกรรมเครื่องกล	-
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2544 – 2546	ปริญญาโท (M.Eng.)	วิศวกรรมพลังงาน	3.43
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ	2541 – 2544	ปริญญาตรี (BS.Tech.Ed.)	วิศวกรรมไฟฟ้า	3.21

5. ความรู้พิเศษและความชำนาญเชิงวิชาการ

- การวัดขนาดอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า (Nanoparticles size measurement using electrical mobility technique)
- การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitation)

- ระบบเครื่องมือวัด เซ็นเซอร์ ทรานสดิวเซอร์ และการควบคุมอัตโนมัติ (Instrumentation sensor transducer and automation control)
- การเขียนโปรแกรม การจำลองการทำงาน และการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับเซ็นเซอร์ และทรานสดิวเซอร์ และอุปกรณ์ภายนอก (Computer programming, computer simulation, and computer interfacing)
- การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนในอาคาร (Electrical and thermal energy analysis in building)

6. แนวทางของงานวิจัยที่สนใจ

- การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าระดับการทดสอบภาคสนาม
- การพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต
- การพัฒนาและออกแบบเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำมากๆ (10^{-15} A) สำหรับการวัดประจุของอนุภาคนาโน
- การพัฒนาและออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการควบคุมอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล
- การพัฒนาและออกแบบระบบการให้น้ำพืชที่จุดเหมาะสมด้วยวิธีการควบคุมความชื้นในดิน
- การพัฒนาและออกแบบเครื่องวัดอัตราการไหลเชิงมวลแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวของไอออน

7. งานอดิเรกหรือความสนใจ

อ่านหนังสือ ค้นคว้า ศึกษาหาความรู้และเทคโนโลยีใหม่ๆ และเขียนบทความทางวิชาการ เผยแพร่ลงในวารสารวิชาการด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรมวิจัย

8. ประสบการณ์ทำงาน

- พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน ผู้ร่วมวิจัย: การพัฒนาระบบกำจัดฝุ่นควันจากเตาเผาขยะชุมชน ขนาดไม่เกิน 1 ตันต่อวัน ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ
- พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน หัวหน้าโครงการ: การพัฒนาเครื่องวิเคราะห์และเก็บตัวอย่างสำหรับอากาศและฝุ่นละอองลอยขนาดเล็ก PM 2.5 ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ

- พ.ศ. 2551 – ปัจจุบัน หัวหน้าโครงการ: การพัฒนาระบบกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวลด้วยเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เครือข่ายภาคเหนือ
- พ.ศ. 2551 – ปัจจุบัน หัวหน้าโครงการ: โครงการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคนาโนแบบใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิตได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่)
- พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน อาจารย์: วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน ผู้ร่วมวิจัย: โครงการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าระดับการทดสอบภาคสนาม ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยระบบตรวจวัดสิ่งแวดล้อม จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- พ.ศ. 2549 – 2550 นักวิจัย: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- พ.ศ. 2547 – 2549 ผู้ช่วยวิจัย: โครงการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยระบบตรวจวัดสิ่งแวดล้อม จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

9. กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

- กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นายสายชล สิทธิพงศ์ รหัส 4626140 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในหัวข้อเรื่อง “การออกแบบระบบควบคุมการทำงานสำหรับสแต็กเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน”
- กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นายพงศกร ชูพันธ์ รหัส 4626054 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในหัวข้อเรื่อง “การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดประจุโครโนแบบเพิ่มสำหรับการวัดขนาดละอองลอย”
- กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นายปริญญา คงกระพันธ์ รหัส 490631111 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในหัวข้อเรื่อง “การพัฒนาหัวเผาพลาสมาความร้อนสำหรับการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์”

- กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นายภาสกร อินธาสาน รหัส 500631057 นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในหัวเรื่อง “การสลายน้ำมันดินเบาโดยวิธีทางพลาสมา”

10. ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย

- วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- International Journal of Environmental Engineering
- African Journal of Environmental Science and Technology

11. ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ชื่อโครงการ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	ปีที่ได้- สิ้นสุด	หัวหน้า / ผู้ร่วม วิจัย	จำนวน นักวิจัย
โครงการพัฒนาเครื่อง วิเคราะห์ขนาดอนุภาค แขวนลอยในอากาศแบบใช้ หลักการเคลื่อนตัวทาง ไฟฟ้า	ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ	1,696,700	2547 – 2549	ผู้ร่วม วิจัย	2 คน
โครงการการจัดทำแผน พลังงาน 80 ชุมชนสนอง พระราชดำริ “เศรษฐกิจ พอเพียง”	สำนักงาน พลังงานภูมิภาค ที่ 9 สำนักงาน ปลัดกระทรวง พลังงาน กระทรวง พลังงาน	3,000,000	2550	ผู้ร่วม วิจัย	10 คน
โครงการพัฒนาและ ปรับปรุงเครื่องวิเคราะห์ ขนาดอนุภาคแขวนลอยใน อากาศแบบใช้หลักการ เคลื่อนตัวทางไฟฟ้าระดับ การทดสอบภาคสนาม	ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ	1,379,950	2550 – 2552	ผู้ร่วม วิจัย	2 คน

11. ทุนวิจัยที่เคยได้รับ (ต่อ)

ชื่อโครงการ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	ปีที่ได้- สิ้นสุด	หัวหน้า / ผู้ร่วม วิจัย	จำนวน นักวิจัย
โครงการพัฒนาเครื่อง วิเคราะห์ปริมาณความ เข้มข้นเชิงจำนวนของ อนุภาคนาโนแบบใช้ หลักการวัดประจุไฟฟ้าสถิต	สำนักงานกองทุน สนับสนุนการวิจัย (ทุนพัฒนา ศักยภาพในการ ทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่)	480,000	2551 – 2553	หัวหน้า	1 คน
โครงการพัฒนาระบบกำจัด อนุภาคแขวนลอยจาก เตาเผาชีวมวลด้วยเทคนิค การตกตะกอนเชิงไฟฟ้า สถิต	สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี แห่งชาติ เครือข่าย ภาคเหนือ	200,000	2551 – 2552	หัวหน้า	3 คน
การพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ และเก็บตัวอย่างสำหรับ อากาศและฝุ่นละอองลอย ขนาดเล็ก PM 2.5	สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี แห่งชาติ เครือข่าย ภาคเหนือ	200,000	2552 – 2553 (อยู่ ระหว่าง ดำเนินการ วิจัย)	หัวหน้า	4 คน
การพัฒนาระบบกำจัดฝุ่น ควันจากเตาเผาขยะชุมชน ขนาดไม่เกิน 1 ตันต่อวัน	สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี แห่งชาติ เครือข่าย ภาคเหนือ	200,000	2553 – 2554 (อยู่ ระหว่าง ดำเนินการ วิจัย)	ผู้ร่วม วิจัย	4 คน

12. รางวัลด้านวิชาการหรือด้านวิจัยที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	หน่วยงานที่ให้
2544	รางวัลชมเชย ประเภท 12: โปรแกรมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้ (ระดับนักศึกษา) โครงการโปรแกรมจำลองการทำงานของเครื่อง พี แอล ซี ในการแข่งขันพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 ประจำปี 2544	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
2549	รางวัลวิทยานิพนธ์ดีเด่นระดับดุษฎีบัณฑิต วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เรื่องระบบการวัดขนาดละอองลอยในอากาศโดยใช้เทคนิคการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า	สาขา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

13. หนังสือหรือตำรา

- พานิช อินต๊ะ และ โกศล โอพารไพโรจน์, “เรียนรู้การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกด้วย Visual Basic”, สำนักพิมพ์ *The Knowledge Center*, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2550.

14. บทความการวิจัยระดับนานาชาติ

14.1 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement”, *KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications*, Vol. 5-C, No. 5, pp. 196 – 203, 2005.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Comparative study on electrical discharge and operation characteristics of needle and wire-cylinder corona chargers”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 520 – 527, 2006.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Aerosol size distribution measurement using multi-channel electrical mobility sensor”, *Journal of Aerosol Research Japan*, Vol. 21, No. 4, pp. 329 – 340, 2006.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “An overview of aerosol particle sensors for size distribution measurement”, *Maejo International Journal of Science and Technology*, Vol.1, No. 2, pp. 120 – 136, 2007.

- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “An ultra-low current meter for aerosol detection”, *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 313 – 320, 2007.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “An overview of differential mobility analyzers for size classification of nanometer-sized aerosol particles”, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 243 – 256, 2008.
- **Intra, P.**, “Investigation of a submicron-particle inertial impactor for size-selective inlet of the electrical mobility spectrometer”, *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 257 – 268, 2008.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Brownian diffusion effect on nanometer aerosol classification in electrical mobility spectrometer”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 269 – 276, 2009.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer”, *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 110 – 119, 2009.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: A literature review”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 4, pp. 605 – 615, 2009.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.17, Supplement, pp. s17 – s20, 2009.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Experimental characterization of a short electrical mobility spectrometer for aerosol size classification”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 1770 – 1777, 2009.
- **Intra, P.**, Lasman, P. P., and Tippayawong, N., “Numerical computation of fluid flow and aerosol transport in a long electrical mobility spectrometer”, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, No. 1, pp. 16 – 26, 2010.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer”, *Journal of Electrostatics*, 2010, in press, 10.1016/j.elstat.2010.01.008.

- **Intra, P.**, Limueadphai, P. and Tippayawong, N., “Particulate emission reduction from biomass burning in small combustion systems with a multiple tubular electrostatic precipitator”, *Particulate Science and Technology*, 2010, in press.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, under review. (MS. ID: KJ2010-004)
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Development of a fast-response, high-resolution electrical mobility spectrometer”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, under review. (MS. ID: KJ2010-039)
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Use of electrostatic precipitation for excess ion trapping in an electrical aerosol analyzer”, *Journal of Electrostatics*, submitted for publication.

14.2 ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Numerical simulation of flow and electric fields in an electrical mobility spectrometer”, *International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution*, Bangkok, Thailand, 12 - 14 January, 2005.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “An electrical mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement”, *International Conference on Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Khon Kaen, Thailand, 25 - 27 January, 2006, pp. 358 – 362.
- **Intra, P.**, Limueadphai, P. and Tippayawong, N., “Removal of exhaust particulate matter from biomass furnace using a multiple-tube electrostatic trap”, *World Renewable Energy Congress 2009 – Asia*, BITEC, Bangkok, Thailand, 19 – 22 May, 2009.
- Inthasan, P., Tippayawong, N. and **Intra, P.**, “Design of a gliding arc plasma reactor for light tar cracking”, Oral presentation, *International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education*, Chiang Mai, Thailand, 23 – 28 August, 2009.
- Wongchingchai, P., **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Air flow velocity measurement using ion electrical mobility technique”, Oral presentation, *International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education*, Chiang Mai, Thailand, 23 – 28 August, 2009.

- Yawootti, A., **Intra P.**, and Tipayawong N., “Measurement of unipolar charged aerosol particles using a long electrical mobility spectrometer”, Oral presentation, *International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009*, Chiang Rai, Thailand, 2 – 4 December, 2009, accepted for oral presentation.
- Yawootti, A., **Intra, P.** and Tipayawong, N., “A combustion aerosol generator for submicron aerosol production”, Oral presentation, *3rd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Nong Khai, Thailand, 4 – 6 March, 2010.

14.3 โปสเตอร์นำเสนอในประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- **Intra, P.** and Tipayawong, N., “An electrostatic sensor for nanometer-sized aerosol particles detection”, *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, Thailand, 24 - 25 July, 2008.

15. บทความการวิจัยระดับชาติ

15.1 วารสารวิชาการระดับชาติ

- **พานิช อินต๊ะ** และ ประเสริฐ ฤกษ์เกรียงไกร, “ระบบการจัดทำรายงานการตรวจวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารแบบกึ่งอัตโนมัติ”, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1 – 2, หน้า 90 – 95, มกราคม – สิงหาคม 2546.
- **พานิช อินต๊ะ** และ นคร ทิพย์วงศ์, “เครื่องวิเคราะห์อนุภาคจุลสารในอากาศ”, *วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, หน้า 156 – 170, ธันวาคม 2546.
- **พานิช อินต๊ะ** และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, “คุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสำหรับการกำจัดอนุภาคที่ปล่อยออกจากเตาเผาชีวมวล”, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 29 – 39, มกราคม – เมษายน 2550.
- **พานิช อินต๊ะ** และ นคร ทิพย์วงศ์, “การวัดการกระจายขนาดละอองลอยจากเครื่องยนต์ดีเซลด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 4, หน้า 649 – 658, ตุลาคม – ธันวาคม 2550.

15.2 ประชุมวิชาการระดับชาติ

- พานิช อินต๊ะ และ นคร ทิพย์าวงศ์, “การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า”, *การประชุมประจำปี สวทช. 2548*, ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย, ปทุมธานี, 28 - 30 มีนาคม 2548.
- **Intra, P. and Tippayawong, N.**, “Corona ionizer for unipolar diffusion charging of nanometer aerosol particles”, *29th Electrical Engineering Conference*, Pattaya, Thailand, 9 – 10 November, 2006, pp. 1177 – 1180.
- พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, “ศักยภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวลด้วยเทคนิคการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต”, *การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 6*, เชียงใหม่, 15 – 16 มีนาคม 2550.
- พานิช อินต๊ะ และ นคร ทิพย์าวงศ์, “การวัดการกระจายขนาดละอองลอยจากเครื่องยนต์ดีเซลด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า”, *การประชุมวิชาการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุครั้งที่ 1*, กรุงเทพฯ, 31 สิงหาคม 2550.
- พานิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, “การทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่นสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวล”, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21*, ชลบุรี, 17 – 19 ตุลาคม 2550.
- **Intra, P.**, “Effect of an electric field strength on aerosol size distribution measurement of an electrical mobility spectrometer”, *30th Electrical Engineering Conference*, Kanchanaburi, Thailand, 25 – 26 October, 2007, pp. 1277 – 1280.
- **Intra, P.**, “Experimental results on the influence of aerosol flow rate on particle size distribution and number concentration measurements of an electrical mobility spectrometer”, *2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Khon Kaen, Thailand, 28 – 29 January, 2008, pp. 417 – 421.
- พานิช อินต๊ะ, “ตัวเซ็นเซอร์สมัยใหม่สำหรับการวัดความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคระดับนาโน”, *การประชุมวิชาการราชมณฑลวิชาการวิศวกรรม ครั้งที่ 1*, เชียงใหม่, 23 – 25 เมษายน 2551.
- **Intra, P. and Tippayawong, N.**, “A submicron electrical aerosol detection system with a Faraday cup electrometer”, *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, Pathumthani, Thailand, 15 – 17 October, 2008.

- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Current-voltage characteristics of unipolar corona-needle charger for nanoparticles”, *31st Electrical Engineering Conference*, Nakhon Nayok, Thailand, 29 – 31 October, 2008.
- **พานิช อินต๊ะ**, “การคำนวณเชิงตัวเลขของสนามการไหลและสนามไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นบาง”, *การประชุม 10 ปีวิชาการแม่ฟ้าหลวง*, เชียงราย, 26 – 28 พฤศจิกายน 2551.
- **พานิช อินต๊ะ** ประวิทย์ ลีหมือดภัย และ นคร ทิพย์าวงศ์, “ทฤษฎีและการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการกำจัดอนุภาคแขวนลอยจากเตาเผาชีวมวล”, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5*, พิษณุโลก, 29 เมษายน – 1 พฤษภาคม 2552.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “Analytical investigation of an electrostatic precipitator for excess ions removal after charging process of the electrical mobility spectrometer”, *The 7th PSU-Engineering Conference*, 21 – 22 May, 2009.
- Yawootti, A., **Intra P.**, and Tippayawong N., “Development and performance evaluation of a picoammeter for measurement of charged airborne particles”, Oral presentation, *32nd Electrical Engineering Conference*, Prachinburi, Thailand, 28 – 30 October, 2009.
- **Intra, P.** and Tippayawong, N., “An electrical detector for nanometer-sized aerosol particles detection: development of the equipment and preliminary results”, *The 9th TRF Academic Meeting*, Phetchaburi, Thailand, 15 – 17 October, 2009.
- อาทิตย์ ยาวุธฒิ และ **พานิช อินต๊ะ**, “การคำนวณเชิงตัวเลขของสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในชุดอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบโคโรนาเข็มของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8*, ตอรับบทความ.
- มงคล ไชยวงศ์ วิสูตร อาสนวิจิตร อาทิตย์ ยาวุธฒิ และ **พานิช อินต๊ะ**, “การวิเคราะห์ผลของค่าคงที่ความเป็นฉนวนของอนุภาคชนิดต่างๆต่อการอัดประจุไฟฟ้าภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม”, *การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6*, ตอรับบทความ.

15.3 โปสเตอร์นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

- **พานิช อินต๊ะ** และ นคร ทิพย์าวงศ์, “การพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, *โปสเตอร์นำเสนอในการประชุมประจำปี*

สวทช. 2548, ณ ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย, ปทุมธานี, 28 - 30 มีนาคม 2548.

- พานิช อินต๊ะ และ นคร ทิพย์าวงศ์, “เครื่องวิเคราะห์ขนาดละอองลอยโดยหลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, *โปสเตอร์นำเสนอในงานประกวดผลงานประดิษฐ์คิดค้นประจำปีงบประมาณ 2550*, ณ อาคารจักรพันธ์เพ็ญศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, กรุงเทพมหานคร, 1 - 2 กันยายน 2549.
- พงศกร ชูพันธ์ พานิช อินต๊ะ และนคร ทิพย์าวงศ์, “ผลของมุมของขั้วอิเล็กโทรดต่อการโคโรนาดีสชาร์จภายในเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบโคโรนาเข็มปลายแหลม”, *การประชุม 10 ปีวิชาการแม่ฟ้าหลวง*, เชียงราย, 26 – 28 พฤศจิกายน 2551.
- พานิช อินต๊ะ และ นคร ทิพย์าวงศ์, “เครื่องวิเคราะห์ความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าแบบหลายช่องวัดสำหรับการวัดการแจกแจงขนาดของอนุภาคละอองลอยในระดับนาโนเมตร”, *วันวิชาการมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ครั้งที่ 4*, เชียงใหม่, 19-20 ธันวาคม 2551.
- นคร ทิพย์าวงศ์ และ พานิช อินต๊ะ, “เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, *การประชุมวิชาการและนิทรรศการของเนคเทค ประจำปี 2552*, ปทุมธานี, 23-25 กันยายน 2552.
- วิสูตร อาสนวิจิตร มงคล ไชยวงศ์ อาทิตย์ ยาวุฑฒิ และ พานิช อินต๊ะ, “การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงแรงสูงในการสร้างโคโรนาและพลาสมาไอออนไนเซชัน”, *การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6*, ตอบรับบทความ.

16. บทความทางวิชาการอื่นๆ

- พานิช อินต๊ะ, “โปรแกรมจำลองการทำงานของเครื่อง PLC”, *วารสาร Electrical & Control*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 15, หน้า 61 – 65, กันยายน – ตุลาคม 2547.
- พานิช อินต๊ะ, “วิเคราะห์และจัดทำรายงานการใช้พลังงานในอาคารด้วยโปรแกรม BEA 1.0”, *วารสาร Industrial Technology Review*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 131, หน้า 165 – 169, พฤศจิกายน 2547.
- พานิช อินต๊ะ และ นคร ทิพย์าวงศ์, “เครื่องวิเคราะห์อนุภาคจุลสารในอากาศ”, *วารสาร Technic Magazine*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 243, หน้า 142 – 152, ธันวาคม 2547.
- พานิช อินต๊ะ, “การวัดขนาดอนุภาคฝุ่นแขวนลอยในอากาศ”, *วารสาร Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 133, หน้า 100 – 105, มกราคม 2548.
- พานิช อินต๊ะ, “การวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติด้วย Maxwell 9.0”, *วารสาร Electrical & Control*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 17, หน้า 60 – 65, มกราคม – กุมภาพันธ์ 2548.

- พาณิช อินต๊ะ, “อุปกรณ์และเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจุลสาร”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 134, หน้า 102 – 107, กุมภาพันธ์ 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์และจัดทำรายงานการใช้พลังงานในอาคาร”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 18, หน้า 60 – 65, มีนาคม – เมษายน 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “หลักการของเครื่องวัดขนาดอนุภาคฝุ่นแบบใช้วิธีการทางไฟฟ้า”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 135, หน้า 102 – 106, มีนาคม 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “การวัดขนาดฝุ่นละอองลอยในอากาศด้วยวิธีการทางไฟฟ้าสถิต”, วารสาร *Technic Magazine*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 248, หน้า 113 – 120, เมษายน 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “หลักการกำจัดอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 136, หน้า 96 – 100, เมษายน 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “การสูมตัวอย่างและการวัดความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 137, หน้า 99 – 102, พฤษภาคม 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (1)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 19, หน้า 76 – 81, พฤษภาคม – มิถุนายน 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “วิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติด้วยโปรแกรม Maxwell 9.0”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 138, หน้า 118 – 122, มิถุนายน 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “หลักการตรวจวิเคราะห์และจัดทำรายงานการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในอาคาร (ตอนที่ 1)”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 138, หน้า 164 – 170, มิถุนายน 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (2)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 20, หน้า 45 – 50, กรกฎาคม – สิงหาคม 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “หลักการตรวจวิเคราะห์และจัดทำรายงานการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในอาคาร (ตอนจบ)”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 139, หน้า 167 – 172, กรกฎาคม 2548.
- พาณิช อินต๊ะ, “เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการควบคุมมลภาวะทางอากาศจากอุตสาหกรรม”, วารสาร *Technic Magazine*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 252, หน้า 109 – 122, สิงหาคม 2548.

- พานิช อินต๊ะ, “การพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 140, หน้า 108 – 111, สิงหาคม 2548.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (3)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 21, หน้า 47 – 53, กันยายน – ตุลาคม 2548.
- พานิช อินต๊ะ, “เครื่องวัดการกระจายขนาดของละอองระดับนาโนเมตรแบบใช้วิธีการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 143, หน้า 129 – 137, ตุลาคม 2548.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (4)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 22, หน้า 37 – 46, พฤศจิกายน – ธันวาคม 2548.
- พานิช อินต๊ะ, “พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 145, หน้า 113 – 118, ธันวาคม 2548.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (5)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 23, หน้า 61 – 67, มกราคม – กุมภาพันธ์ 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (6)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 24, หน้า 49 – 59, มีนาคม – เมษายน 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (7)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 25, หน้า 43 – 51, พฤษภาคม – มิถุนายน 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (8)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 26, หน้า 53 – 58, กรกฎาคม – สิงหาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (9)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 27, หน้า 57 – 61, กันยายน – ตุลาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CFDRC”, วารสาร *Mechanical Technology Magazine*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 62, หน้า 57 – 61, ตุลาคม 2549.

- พานิช อินต๊ะ, “การติดต่อสื่อสารข้อมูลของเครื่อง PLC”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 157, หน้า 110 – 113, ตุลาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “ต้นแบบระบบการตรวจวัดขนาดล่องลอยระดับนาโนด้วยเทคนิคการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า”, วารสาร *Engineering Today*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 46, หน้า 50 – 55, ตุลาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม CFDRC”, วารสาร *Technic Magazine*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 268, หน้า 122 – 126, พฤศจิกายน 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “โปรแกรมสนับสนุนการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่อง PLC ด้วยภาษาแลดเดอร์ไดอะแกรม”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 158, หน้า 125 – 130, พฤศจิกายน 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (10)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 28, หน้า 41 – 46, พฤศจิกายน – ธันวาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงระดับต่ำ”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 159, หน้า 111 – 114, ธันวาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครื่อง PLC ผ่านพอร์ต RS-232C ด้วยโปรแกรม Visual Basic”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 159, หน้า 120 – 124, ธันวาคม 2549.
- พานิช อินต๊ะ, “การวัดขนาดล่องลอยจากไอเสียของเครื่องยนต์ด้วย EMS และ ELPI”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 160, หน้า 122 – 125, มกราคม 2550.
- พานิช อินต๊ะ, “ระบบการวัดขนาดล่องลอยในอากาศ”, วารสาร *Technic Magazine*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 270, หน้า 132 – 141, มกราคม 2550.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (11)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 29, หน้า 41 – 51, มกราคม – กุมภาพันธ์ 2550.
- พานิช อินต๊ะ, “เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคไอเสียจากเครื่องยนต์และการเผาไหม้”, วารสาร *LAB.TODAY*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 39, หน้า 27 – 32, กุมภาพันธ์ 2550.
- พานิช อินต๊ะ, “การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (12)”, วารสาร *Electrical & Control*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 30, หน้า 30 – 38, มีนาคม – เมษายน 2550.
- พานิช อินต๊ะ, “การคำนวณเชิงตัวเลขสนามไฟฟ้าสถิตด้วยโปรแกรม CFDRC”, วารสาร *Technic Magazine*, ปีที่ 24, ฉบับที่ 275, หน้า 121 – 127, พฤษภาคม 2550.

- พาณิช อินต๊ะ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี, “ระบบการควบคุมเพื่อการจัดการพลังงาน ตอนที่ 1”, วารสาร *Industrial Technology Review*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 165, หน้า 162 – 166, พฤษภาคม 2550.