



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ "การปรับปรุงห้องรมยางของสหกรณ์กองทุนสวนยางในภาคใต้ให้มี
ประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยการกรองแก๊สร้อนก่อนให้ไหลผ่านแผ่นยางโดยตรง"

โดย

รศ.ดร.พีระพงศ์ ทีฆสกุล และคณะ

กุมภาพันธ์ 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ "การปรับปรุงห้องรมยางของสหกรณ์กองทุนสวนยางในภาคใต้ให้มีประสิทธิภาพสูง
ขึ้นโดยการกรองแก๊สร้อนก่อนให้ไหลผ่านแผ่นยางโดยตรง"

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. รศ.ดร.พีระพงศ์ ทีฆสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ดร.สุรจิตร ทีฆสกุล	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการ "การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา"

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยร่วมกับกลุ่มเกษตรกร คือสหกรณ์กองทุนสวนยาง ซึ่งเป็นฐานผลิตยางแผ่นรมควันชั้นนำของประเทศ สหกรณ์กองทุนสวนยางทั่วทั้งประเทศมีทั้งสิ้นกว่า 700 โรง ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ สหกรณ์เหล่านี้ผลิตทั้งยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheets หรือ RSS) และยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheets หรือ ADS) โดยมีศักยภาพที่จะผลิตยางแผ่นชั้นดีได้เนื่องจากผลิตตั้งแต่ต้นน้ำคือรับน้ำยางสดจากสมาชิก ในกระบวนการรมควันแผ่นยางนั้นจะใช้ฟืนไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงต่ำ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการรมควันแผ่นยาง ผู้ประกอบการใช้วิธีระบายแก๊สร้อน (พร้อมควัน) ส่วนใหญ่ซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงออกจากท่อระบายที่ซึ่งออกแบบไว้ใช้สำหรับผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง ปริมาณของแก๊สร้อน ส่วนที่เข้าห้องรมมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับส่วนที่ระบายทิ้ง ซึ่งเท่ากับว่ามีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงมาก สาเหตุหนึ่งที่ต้องทำเช่นนี้ก็คือนักให้แก๊สร้อนนี้เข้าห้องรมมากเกินไปแผ่นยางจะสัมผัสกับควันที่มาด้วยทำให้มีสีคล้ำ ราคาตก ทั้งนี้เนื่องจากควันของแก๊สร้อนประกอบไปด้วยอนุภาคของเขม่ามากมายซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เพราะใช้ไม้ฟืนสดที่มีค่าความชื้นค่อนข้างสูงเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นหากต้องการนำแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ทั้งหมดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงต้องทำการกำจัดหรือลดปริมาณอนุภาคเขม่าเหล่านี้เสียก่อน โครงการนี้มีความต้องการที่จะลดปริมาณของอนุภาคของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ฟืนเพื่อให้สามารถนำแก๊สร้อนทั้งหมดมาใช้โดยไม่ทำให้แผ่นยางมีสีคล้ำ โดยมีเป้าหมายคือลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลง และทำการปรับปรุงการไหลในห้องรมเพื่อให้คุณภาพยางแผ่นที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยในการปรับปรุงได้เลือกใช้โรงรมรุ่นปี 2537 เป็นตัวอย่างเนื่องจากเป็นรุ่นแรกจึงมีประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ การลงทุนปรับปรุงต้องใช้งบประมาณต่ำเพื่อให้สหกรณ์สามารถลงทุนได้โดยไม่ต้องพึ่งหน่วยงานของรัฐ

ในการศึกษาได้เริ่มจากการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณอนุภาคเขม่าเพื่อหากรรมวิธีในการลดปริมาณของอนุภาคเหล่านี้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าอนุภาคเขม่ามีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของไม้ฟืน โดยเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าความชื้น ในโครงการนี้ได้พิจารณาเลือกอุปกรณ์ดักจับอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตย์เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอนุภาคขนาดเล็กและมีความดันสูญเสียที่ต่ำ โดยทำการออกแบบเองเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพเหมาะสมแก่การใช้งาน

ในส่วนของการปรับปรุงการไหลของแก๊สร้อนในห้องรมได้ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลโดยใช้โปรแกรม FloVent จำลองแนวโน้มการไหลในห้องรมเปล่าที่ยังไม่ได้ปรับปรุง พบว่าการไหลวนของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องรมทางบานระบายความชื้น และมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณหน้าห้อง และหลังห้องสูง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงการไหล ซึ่งได้ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการหารูปแบบห้องรมที่เหมาะสม โดยไม่ต้องปรับปรุงมากนัก พบว่าการเพิ่มจำนวนช่องระบายความชื้นบนเพดานจะช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของห้องรมที่ใช้อยู่ทำให้ไม่เกิดความแตกต่างที่เด่นชัด

การทดลองการรมยางในห้องรมที่ปรับปรุงแล้วได้แบ่งเป็น 2 การทดลองคือการทดลองโดยไม่ไดติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาค และการทดลองที่ติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาค พบว่าการรมยางด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาคจะได้แผ่นยางที่มีสีใสมากกว่ายางที่รมจากวิธีปกติ และยางจากการรมโดยไม่ไดติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาคมีสีคล้ำกว่าการรมโดยวิธีปกติเล็กน้อยแต่สามารถขายได้ในราคาปกติคืออย่างชั้น 3

ส่วนปริมาณการใช้ไม้พื้ลดลงจากเดิมที่ใช้ 856 กิโลกรัมต่อตันยาง เหลือเพียง 586 กิโลกรัมต่อตันยาง หรือลดลง 31.5% ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงได้ถึงประมาณ 1 แสนบาทต่อปี สำหรับ สหกรณ์ที่มีกำลังผลิต 500 ตันต่อปี (คิดราคาไม้พื้ที่ 80 สตางค์ต่อกิโลกรัม) และคุณภาพของแผ่นยางดีกว่าการรมโดยวิธีปรกติในห้องรมที่ไม่ได้ปรับปรุง นอกจากนี้การปรับปรุงห้องรมยังลดความเสี่ยงของสุขภาพพนักงานเนื่องจากควันจากการรมยางจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศภายนอกไม่ไหลเข้าสู่บริเวณทำงานของพนักงาน หากมีการปรับปรุงทุกห้องในโรงรมจะมีระยะคืนทุน 3.5 ปี

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	1
บทคัดย่อ	2
Abstract	3
1. ที่มาของปัญหาและแนวทางการทำวิจัย	4
2. โรงรมยางและกระบวนการผลิต	7
2.1 โรงรมยาง	7
2.2 กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน	8
3. การกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน	15
4. ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นตาข่ายสแตนเลส	21
5. ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator)	25
5.1 ทฤษฎีเครื่องดักอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์	25
5.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ	30
5.3 ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ	33
5.4 การทดลองภาคสนาม	36
5.5 ผลการทดลองภาคสนาม	40
6. การกระจายของอุณหภูมิและการไหลและการใช้ไม้พินของห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง	42
6.1 การกระจายของอุณหภูมิในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง	42
6.2 การจำลองการไหลในห้องรมยางโดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล	46
6.3 ผลการจำลองการไหล	50
6.4 ปริมาณการใช้ไม้พินและคุณภาพแผ่นยาง	61
7. การปรับปรุงห้องรมยางและผลการทดลอง	67
7.1 การปรับปรุงการไหลในห้องรมยาง	67
7.2 ห้องรมปรับปรุง	80
7.3 การกระจายของอุณหภูมิในห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว	85
7.4 ปริมาณการใช้ไม้พิน	87
7.5 คุณภาพแผ่นยางในห้องที่ปรับปรุงโดยไม่ได้ติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์	90
7.6 คุณภาพแผ่นยางในห้องที่ปรับปรุงโดยติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์	93
8. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	96
8.1 สรุปผล	96
8.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะและทางเลือก	97
9. เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก	
ก แบบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์	102
ข อุณหภูมิในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง	108
ค แบบของห้องรมปรับปรุงแล้ว	113

ง	อุณหภูมิในห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว	121
จ	ผลงานนำเสนอ	129
ฉ	การแสดงผลงาน มอ.วิชาการ 2547	136
ช	ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ	138

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณผู้มีส่วนร่วมทำให้โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดีดังนี้

1. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการนี้ทั้งหมด
2. สหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา ที่เอื้อเพื่อให้เก็บข้อมูล ให้ใช้ห้องรมสำหรับตัดแปลง ปรับปรุง และให้ความร่วมมือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกจนโครงการสำเร็จลุล่วง
3. สหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา ที่เอื้อเพื่อให้เก็บข้อมูล
4. ผศ.ดร.ประการ คุณหงษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำปรึกษาระบบไฟฟ้าสถิตย์แรงดันสูง
5. ผศ.ดร.ยุทธนา ภูริระวินัยกุล ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่อนุเคราะห์เครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง
6. คุณนนุช พฤษเมธากุล เจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยจัดทำบัญชี และเอกสารของโครงการ

บทคัดย่อ

สหกรณ์สวนยางทั่วทั้งประเทศมีทั้งสิ้นกว่า 700 โรง ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ สหกรณ์เหล่านี้ผลิตยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheets หรือ RSS) โดยใช้ฟืนไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงต่ำ จากการศึกษาพบว่าในการรมควันแผ่นยาง ผู้ประกอบการใช้วิธีระบายแก๊สร้อน (พร้อมควัน) ส่วนใหญ่ซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงออกจากท่อดราฟท์ ปริมาณของแก๊สร้อนส่วนที่เข้าห้องรมมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับส่วนที่ระบายทิ้ง ซึ่งเท่ากับว่ามีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงมาก สาเหตุหนึ่งที่ต้องทำเช่นนี้ก็คือหากให้แก๊สร้อนนี้เข้าห้องรมมากเกินไป แผ่นยางจะสัมผัสกับอุณหภูมิความร้อนที่มากเกินไปทำให้มีสีดำขายไม่ได้ราคา ดังนั้นหากต้องการนำแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ทั้งหมดจึงต้องทำการกำจัดหรือลดจำนวนอนุภาคเหล่านี้เสียก่อน โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของอนุภาคของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ฟืนเพื่อให้สามารถนำแก๊สร้อนทั้งหมดมาใช้โดยไม่ทำให้แผ่นยางมีสีดำ ซึ่งจะทำให้ลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง โดยในการปรับปรุงจะเลือกใช้โรงรมรุ่นปี 2537 เป็นตัวอย่างและการลงทุนต้องใช้งบประมาณต่ำ ในการศึกษาได้เริ่มจากการวิเคราะห์ขนาดและปริมาณอนุภาคเขม่า ซึ่งจากการทดลองพบว่าอนุภาคเขม่ามีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคขึ้นอยู่กับความชื้นของไม้ฟืน ในโครงการนี้ได้พิจารณาเลือกอุปกรณ์ดักจับอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตย์เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอนุภาคขนาดเล็กและมีความดันสูญเสียที่ต่ำ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพเหมาะแก่การใช้งาน ในการปรับปรุงการไหลของแก๊สร้อนในห้องรมได้ใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลโดยใช้โปรแกรม FloVent จำลองแนวโน้มการไหลเพื่อหารูปแบบห้องรมที่เหมาะสม โดยไม่ต้องปรับปรุงมากนัก พบว่าการเพิ่มจำนวนช่องระบายความชื้นบนเพดานจะช่วยให้การไหลและการกระจายของอนุภาคมีสมาเสมอขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของห้องรมที่ใช้อยู่ทำให้ไม่เกิดความแตกต่างที่เด่นชัด การทดลองการรมยางในห้องรมที่ปรับปรุงแล้วได้แบ่งเป็น 2 การทดลองคือการทดลองโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาค และการทดลองที่ติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาค พบว่าการรมยางด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาคจะได้แผ่นยางที่มีสีใสมากกว่ายางที่รมจากวิธีปกติ และยางจากการรมโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาคมีสีดำน้อยกว่ายางที่รมจากวิธีปกติเล็กน้อยแต่สามารถขายได้ในราคาปกติ ส่วนปริมาณการใช้ไม้ฟืนลดลงจากเดิมที่ใช้ 856 กิโลกรัมต่อตันยาง เหลือเพียง 586 กิโลกรัมต่อตันยาง หรือลดลง 31.5% ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงได้ถึงประมาณ 1 แสนบาทต่อปี สำหรับ สหกรณ์ที่มีกำลังผลิต 500 ตันต่อปี (คิดราคาไม้ฟืนที่ 80 สตางค์ต่อกิโลกรัม) และคุณภาพของแผ่นยางดีกว่าการรมโดยวิธีปกติในห้องรมที่ไม่ได้ปรับปรุง นอกจากนี้การปรับปรุงห้องรมยังลดความเสี่ยงของสุขภาพพนักงานเนื่องจากควันจากการรมยางจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศภายนอกไม่ไหลเข้าสู่บริเวณทำงานของพนักงาน หากมีการปรับปรุงทุกห้องในโรงรมจะมีระยะคืนทุน 3.5 ปี

คำสำคัญ ยางแผ่นรมควัน การรมควัน อนุภาคเขม่า โรงรมยาง

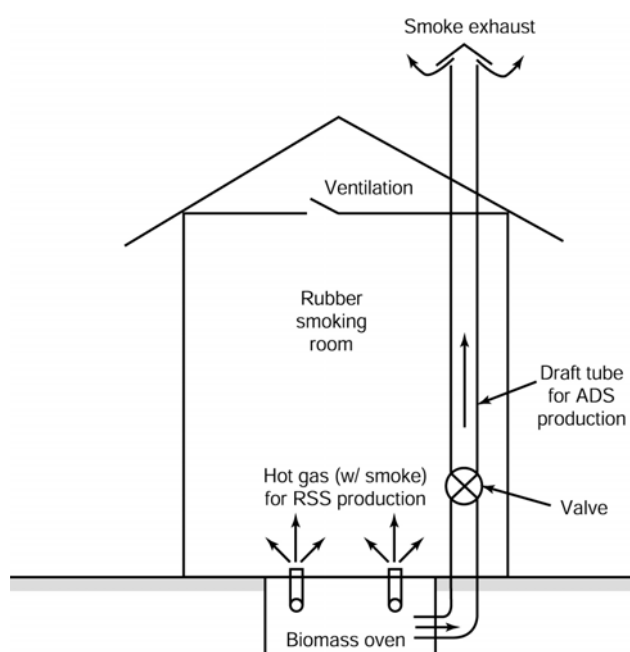
Abstract

Major of 700 rubber cooperatives in Thailand reside in the south. These cooperatives produce ribbed smoked sheets (RSS) using fuelwood as a source of heat supply. From preliminary study, it was found that these cooperatives used the fuelwood inefficiently. Heat from the wood combustion was largely drained through a draft tube as it contained a large amount of smoke particles which were thought to darken the rubber sheets and, hence, devalue the price. This resulted in a huge loss of energy. If the loss is to reduce, a means of removing or reducing the smoke particles needs to be investigated so that all the combusted gas can be used without excessive darkening of the rubber sheets. This is the main objective of this research project. A rubber smoking room built in year 1994, so-called 1994 model, was selected as a model for modification. The modification cost must be minimized, otherwise the rubber smoking operators are not able to afford it. In the first step of this research, smoke particle size distribution and concentration were experimentally determined. It was found that major of the particles was in the 1-micron range and the concentration depended strongly on moisture content of the wood. A self-designed wire-cylinder electrostatic precipitator (ESP) was selected to be the collection device as it had high efficiency and low pressure drop. Gas flow in the current empty smoking room was modeled by FloVent, a CFD package. Modification of the smoking room was also carried out by FloVent modelling. It was found that increasing number of ventilating lids on the ceiling helped improvement of gas flow and temperature distribution in the room. Nevertheless, the improvement was not utterly clear as the flow depended strongly on the gas outlets on the floor which were left untouched. Two experiments in the modified room, with and without ESPs, were carried out. Results showed that the color of the rubber sheets dried in the room equipped with ESPs was clearer than normally dried rubber sheets. The rubber sheets dried in the room without ESPs was, however, slightly darker but it could still be sold as 3rd-grade RSS without price devaluation. Fuel consumption was reduced from 856 kg per ton of dry sheet to 586 kg per ton of dry sheet, or 31.5%. This would save the fuel cost of about 100,000 Baht per year for the production capacity of 500 ton per year (calculated using fuel price at 0.80 Baht per kilogram). Quality of the dried sheets is improved as well. An indirect benefit of the modified room is the reduction of health risk of worker as all the exhaust gas is now drained to the ambient outside of the factory without any leakage to the workplace environment. The payback period is 3.5 years if all rooms are to be modified.

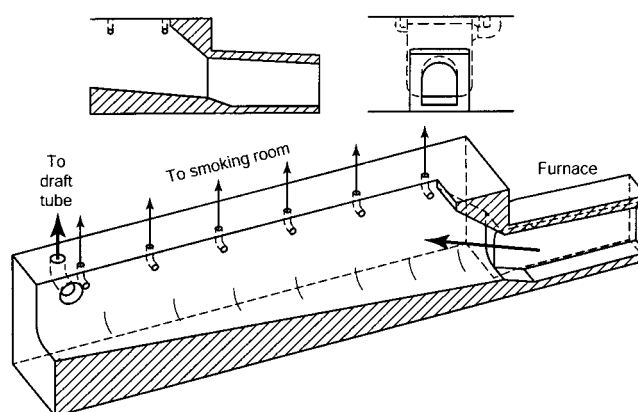
Keywords: Ribbed smoked sheet, RSS, Rubber smoking, Smoke particle, Rubber smoking industry

1. ที่มาของปัญหาและแนวทางการทำวิจัย

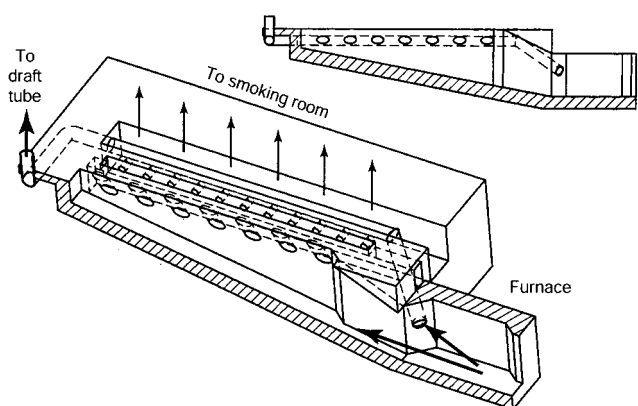
สหกรณ์สวนยางทั่วทั้งประเทศมีทั้งสิ้นกว่า 700 แห่ง จัดตั้งขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2537 – 2538 ตามโครงการจัดตั้งสหกรณ์ในกลุ่มผู้ผลิตยางพาราและโครงการพัฒนาการผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง/รมควัน โดยกรมส่งเสริมสหกรณ์ การดำเนินงานจะรับน้ำยางดิบจากสมาชิกแล้วแปรรูปเป็นยางแผ่น โรงรมยางของสหกรณ์เหล่านี้ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้จะใช้ฟืนไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงต่ำ โรงรมของสหกรณ์สวนยางถูกออกแบบให้สามารถผลิตได้ทั้งยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet หรือ RSS) และยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet หรือ ADS) แต่ไม่สามารถผลิตพร้อมกันได้ทั้ง 2 อย่างในเวลาเดียวกัน โดยส่วนใหญ่แล้วสหกรณ์จะผลิตยางแผ่นรมควันแทบทั้งสิ้น หลักการทำงานของห้องรมนี้แสดงให้เห็นในรูปที่ 1.1 เตาเผาไม้ฟืนจะอยู่ด้านหลังห้อง โดยอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าพื้นห้อง ควันและความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สามารถไหลเข้าห้องรมตามแนวท่อที่วางไว้ใต้พื้นห้อง นอกจากนี้สามารถบังคับให้ไหลผ่านทางท่อดราฟท์ขนาดใหญ่ (draft tube) ซึ่งมีลิ้นควบคุมการเปิด-ปิดอยู่ ท่อนี้เดินจากห้องรมตรงขึ้นข้างบนทะลุออกทางฝ้าเพดานและหลังคา ในกรณีที่ต้องการทำยางแผ่นรมควันจะปิดลิ้นนี้โดยให้ควันเข้าสู่ห้องรมเพียงอย่างเดียว และให้ไหลออกจากห้องรมผ่านช่องบนเพดาน ซึ่งควบคุมการเปิด-ปิดด้วยกลไก แต่ถ้าต้องการทำยางแผ่นผึ่งแห้งก็จะปิดปากท่อควันในห้องรมทั้งหมดและเปิดลิ้นควบคุมให้แก๊สร้อนไหลผ่านท่อดราฟท์นี้เพียงอย่างเดียว ใช้เพียงความร้อนจากการแผ่รังสีจากท่อนี้ รายละเอียดของกระบวนการรมยางและการใช้เชื้อเพลิงหาอ่านได้เพิ่มเติมจาก Prasertsan (1993)



รูปที่ 1.1 แผนผังการทำงานของห้องรมยางของสหกรณ์กองทุนสวนยางรุ่นปี 2537



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.2 แผนผังการทำงานของระบบให้ความร้อนแก่ห้องรม (ก) ห้องรมรุ่นปี 2537 (ข) ห้องรมรุ่นปี 2538

ห้องรมของสหกรณ์สวนยางที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่ 2 รุ่น คือรุ่นปี 2537 และรุ่นปี 2538 ห้องรมรุ่นปี 2537 มีจำนวนห้องทั้งหมด 7 ห้อง แต่ละห้องจะมีเตาเป็นของตัวเอง ห้องรมมีความจุประมาณ 50 ลบ.ม. สามารถใช้ผลิตยางแผ่นรมควันได้สูงสุดครั้งละประมาณ 1,500 กก. ยางแห้ง ทิศทางของการไหลของแก๊สร้อนใต้ห้องรมรุ่นนี้แสดงให้เห็นในรูปที่ 1.2(ก) โดยในห้องมีท่อขนาด 4 inch ให้แก๊สร้อน (พร้อมควัน) ไหลเข้าทั้งหมด 12 ท่อ และมีท่อระบายน้ำ ขนาด 8 inch ซึ่งใช้ทำยางแผ่นผึ่งแห้ง 1 ท่อ ลักษณะของเตาก่อด้วยอิฐทนไฟ ด้านบนก่อเป็นทรงโค้ง บานประตูทำด้วยเหล็กมีช่องให้อากาศไหลเข้าเตาด้านล่าง ส่วนห้องรมปี 2538 มีจำนวนห้องทั้งหมด 4 ห้อง แต่ละห้องมีเตาเป็นของตัวเอง ห้องรมมีความจุประมาณ 100 ลบ.ม. หรือ 2 เท่าของห้องรมปี 2537 แต่ใช้เตาขนาดใกล้เคียงกัน ลักษณะของการไหลใต้ห้องรมจะซับซ้อนกว่ารุ่นปี 2537 ดังแสดงในรูปที่ 1.2(ข) ควันที่เข้าสู่ห้องรมจะผ่านปอดักเขม่า ซึ่งช่วยดักอนุภาคเขม่าขนาดใหญ่ได้บางส่วนก่อนไหลเข้าห้องรม ท่อระบายน้ำจะแยกออกเป็น 2 ท่อในแต่ละด้านก่อนที่จะมาบรรจบกัน ณ กึ่งกลางห้อง ห้องรมรุ่นปี 2538 สามารถใช้ผลิตยางแผ่นรมควันได้สูงสุดครั้งละประมาณ 3,000 กก. ยางแห้ง

ในการรมควันยางแผ่นนั้น ใช้เวลาประมาณ 3-4 วันต่อครั้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการรมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 49-63°C โดยในวันแรกจะรมที่อุณหภูมิประมาณ 49-52°C และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าเร่งอุณหภูมิในวันแรก

สูงเกินก็จะเกิดยางฟองขึ้น เช่นเดียวกันในวันต่อมาหากใช้อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดก็จะเกิดยางฟองได้ ในทางปฏิบัติเมื่ออุณหภูมิในห้องรมให้ได้อุณหภูมิประมาณ 49°C แล้วนำแผ่นยางดิบที่ผ่านการรีดน้ำและตากแห้งประมาณ 2-3 ชั่วโมงเข้าห้องรมจะทำให้อุณหภูมิในห้องรมลดต่ำลงเกือบ 10°C และใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจนเข้าสภาวะเกือบคงที่ประมาณ 15 ชั่วโมง ปัญหานี้มาจากการใช้เวลาตากยางน้อยเกินไปทำให้มีความชื้นในแผ่นยางสูง วิธีแก้สามารถทำได้โดยการเพิ่มเวลาในการตากแห้งโดยสร้างโรงตากยางขึ้นมาซึ่งขึ้นอยู่กับทุนของแต่ละสหกรณ์ว่ามีเพียงพอหรือไม่ นอกจากนี้การปรับปรุงช่องระบายความชื้นโดยการให้ความชื้นในห้องรมระบายออกให้เร็วขึ้นก็สามารถช่วยลดเวลาช่วงเริ่มต้น (startup) นี้ได้ และจะนำไปสู่การลดเวลาในการผลิตด้วย ในการรมควันยางแผ่นนั้นจะต้องใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืนเท่านั้นเนื่องจากในควันไฟมีกรดฟีนอลิก (phenolic acid) ซึ่งจะไปเคลือบแผ่นยางสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ โดยทั่วไปสหกรณ์จะใช้เชื้อเพลิงจากไม้ยางพาราเนื่องจากหาได้ง่ายในท้องถิ่นและต้นทุนไม่สูงนัก

จากการที่ได้เข้าไปศึกษาปัญหาของการรมยางของสหกรณ์สวนยางจำนวน 14 แห่ง ใน 4 จังหวัดภาคใต้ (พัทลุง สงขลา ปัตตานี และยะลา) ในโครงการเร่งรัดปรับปรุงประสิทธิภาพการประกอบธุรกิจของสหกรณ์สวนยาง ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่าในการรมควันยาง ผู้ประกอบการใช้วิธีระบายแก๊สร้อน (พร้อมควัน) ซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงออกทางท่อดราฟท์เป็นส่วนใหญ่ ปริมาณของแก๊สร้อนส่วนที่เข้าห้องรมมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับส่วนที่ระบายทิ้ง ซึ่งเท่ากับว่ามีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงมาก สาเหตุหนึ่งที่ต้องทำเช่นนี้ก็คือหากให้แก๊สร้อนนี้เข้าห้องรมมากจนเกินไปแผ่นยางจะสัมผัสกับควันที่มากกับแก๊สร้อนมากจนเกินไปทำให้มีสีคล้ำมากขายไม่ได้ราคา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงในการรมยางเพื่อให้สหกรณ์สามารถแข่งขันในตลาด และยืนอยู่ได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องรับการช่วยเหลือจากรัฐ นอกจากนี้การกระจายของลมร้อนในห้องรมควันยังไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะห้องรมรุ่นปี 2537 ซึ่งมีท่อควันขนาด 4 inch จำนวน 12 ท่อ สำหรับให้ความร้อนและควันเข้าสู่ห้องรม (แต่พนักงานจะปิดกันช่องไว้เกือบหมดไม่ให้ความร้อนเข้าห้องรม) และมีช่องระบายควันบนเพดานจำนวน 2 จุด (ซึ่งพนักงานจะเปิดในวันแรกที่มีการระบายความชื้นเท่านั้น) การปรับปรุงให้การกระจายของแก๊สร้อน มีความสม่ำเสมอมากขึ้นก็จะช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนในห้องรมสูงขึ้น ช่วยให้แผ่นยางสุกเท่ากันอย่างทั่วถึงในเวลาทีลดลง วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพจะต้องลงทุนไม่สูงนัก และมีความสะดวกในการใช้งาน

หัวใจของโครงการนี้คือการออกแบบ และทดสอบตัวดักจับอนุภาคของเขม่าควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของฟืนจากไม้ยางพารา และนำแก๊สร้อนนี้มาให้ความร้อนกับแผ่นยางโดยตรงเพื่อให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพมากที่สุด ระเบียบวิธีวิจัยมีดังนี้

- การศึกษาถึงคุณลักษณะของแก๊สร้อนในแง่ของการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน (size distribution) โดยใช้ Andersen air sampler
- การออกแบบตัวกรองหรือตัวดักจับอนุภาคที่จะใช้ในการกรองแก๊สร้อนโดยใช้ตาข่ายสแตนเลสอย่างละเอียด หรือตัวดักจับชนิดอื่นที่เหมาะสม
- การทดลองเพื่อศึกษาถึงสมรรถนะในการดักจับอนุภาคของอุปกรณ์ โดยศึกษาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคและความดันสูญเสีย
- การเลือกตัวดักจับอนุภาคที่เหมาะสม แล้วทำการออกแบบรูปร่างและขนาดเพื่อใช้งานในห้องรม รวมทั้งออกแบบการไหลของแก๊สร้อนและปล่องควันของห้องรม
- ทำการทดสอบการทำงานและปรับปรุงระบบเพื่อให้ใช้งานได้ประสิทธิภาพสูงสุด

2. โรงมยางและกระบวนการผลิต

2.1 โรงมยาง

ในที่นี้จะกล่าวถึงโรงมยางของสหกรณ์กองทุนสวนยางเท่านั้น โดยจะไม่กล่าวถึงโรงมของโรงงานยางแผ่นรมควันทั่วไปซึ่งมีขนาดใหญ่ โรงมของสหกรณ์กองทุนสวนยางเป็นโรงมขนาดเล็ก ห้องรมรุ่นที่สนใจในโครงการนี้เป็นห้องรมรุ่น พ.ศ.2537 เนื่องจากเป็นห้องรมที่มีประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ รายละเอียดขนาด และความจุของห้องรมได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงสภาพทั่วไปของโรงมที่จะทำการศึกษาปรับปรุง ซึ่งเป็นโรงมของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน จำกัด เลขที่ 28/2 หมู่ที่ 8 ต.ปริก อ.สะเดา จ.สงขลา (รูปที่ 2.1) ได้รับจดทะเบียนสหกรณ์ เมื่อวันที่ 18 มีนาคม พ.ศ. 2537 ได้รับความช่วยเหลือก่อสร้างโรงมยางจากรัฐบาลในวงเงินประมาณ 3,500,000 บาท การดำเนินการมีผลกำไร 548,923 บาทในปี 2547 (สหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านหัวถนน, 2547) มีรายได้จากการขายยางแผ่นรวม 14,517,581 บาท โดยมีต้นทุนวัตถุดิบค่าใช้จ่ายเฉพาะในการผลิต และรายได้จากการขายยางแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปต้นทุนวัตถุดิบ ค่าใช้จ่ายเฉพาะในการผลิต และรายได้จากการขายยางแผ่นของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน จำกัดในปี 2547

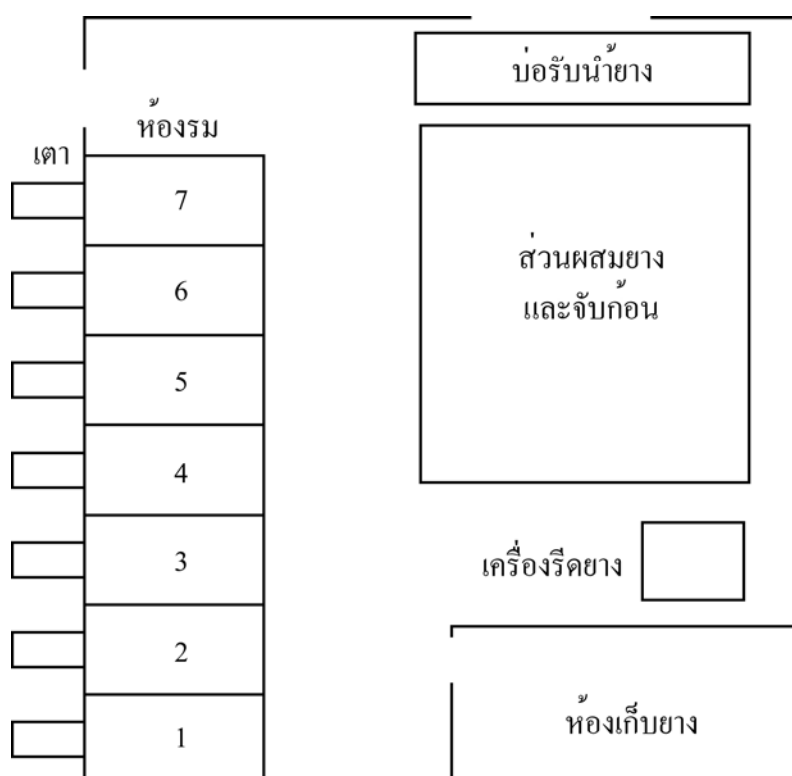
รายการ	จำนวนเงิน
ซื้อน้ำยางสด	12,823,982
ค่าสารเคมีในการผลิต	95,750
ค่าไม้ฟืน	331,950
ค่าวัสดุโรงงาน	11,290
ค่าไฟฟ้า	20,356
ค่าซ่อมเครื่องจักรและอุปกรณ์	12,060
ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรและอุปกรณ์	5,982
รวมค่าใช้จ่ายในการผลิต	477,388



รูปที่ 2.1 โรงมยางสหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านหัวถนน ต.ปริก อ.สะเดา จ.สงขลา

จากตารางจะเห็นได้ว่าต้นทุนที่สูงที่สุดในการผลิตคือค่าไม้พิน ซึ่งคิดเป็น 69.5% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด แนวโน้มราคาของไม้พินซึ่งใช้ไม้ยางพาราจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ในการสำรวจเบื้องต้นพบว่าสหกรณ์มีค่าเฉลี่ยการใช้เชื้อเพลิงประมาณ 1,000 -1,200 กก ต่อตันยางดังนั้นต้นทุนในส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นอีกหากยังไม่มีมาตรการในการประหยัดการใช้เชื้อเพลิงจึงเป็นที่มาของโครงการนี้ ซึ่งหากสามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้ก็จะทำให้สหกรณ์มีกำไรมากขึ้น

แผนผังของโรงรมยางของสหกรณ์แสดงในรูปที่ 2.2 โดยในโรงงานประกอบไปด้วยบอร์รับน้ำยางซึ่งอยู่ด้านหน้า ส่วนผสมยางและจับก้อนซึ่งประกอบไปด้วยตะก่งจำนวนมาก เครื่องรีดยาง ห้องรมจำนวน 7 ห้อง และเตาประจำห้อง และห้องค้ทึงและเก็บยางแห้งเพื่อเตรียมส่งขาย



รูปที่ 2.2 แผนผังภายในโรงรมยาง

2.2 กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน

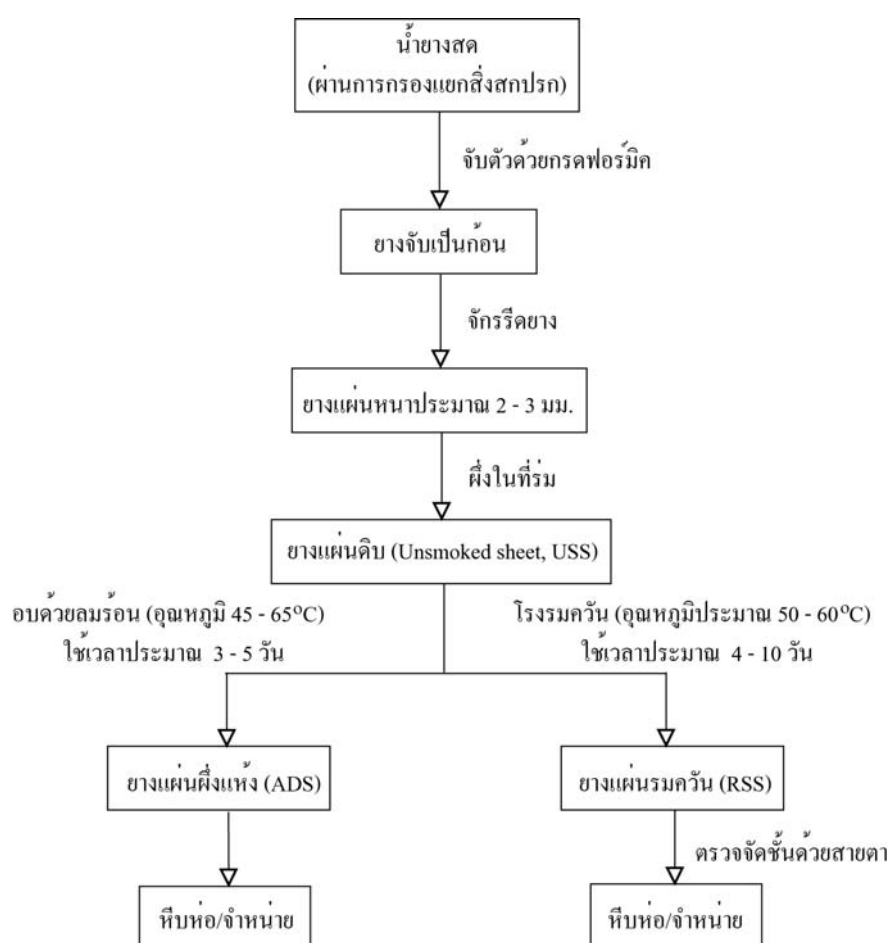
การรมควันยางแผ่น คือการอบแห้งยางแผ่นโดยให้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไม้พินไหลเข้าสัมผัสยางแผ่นโดยตรง เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ป้องกันการเกิดราและทำให้ยางแผ่นแห้งและสุกเพื่อรักษาคุณภาพของยาง การแห้งของยางแผ่นสังเกตได้จากการไม่มีส่วนชุ่มฉ่ำในยางแผ่น ยางแผ่นรมควันที่มีคุณภาพดีจะไม่มีการแตก และฟองอากาศในเนื้อยางแผ่น การรมควันยางแผ่นเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งของการผลิต ที่มีผลต่อคุณภาพของยางแผ่นรมควันและต้นทุนการผลิต ขั้นตอนทั้งหมดในการผลิตยางแผ่นจนกระทั่งได้ยางแผ่นรมควันมีดังนี้ (รูปที่ 2.3)

ขั้นที่ 1 การทำให้น้ำยางจับตัว

น้ำยางสดที่สมาชิกนำมาส่งจะผ่านการกรองแยกสิ่งสกปรกและนำมาผสมรวมกันในบ่อรับน้ำยาง จากนั้นจะนำน้ำยางมาผสมกับน้ำสะอาด และกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วนที่เหมาะสมในตะกวด แล้วทำการกวนด้วยไม้พายให้ทุกส่วนผสมเข้ากัน และทำการกวาดฟองออก จากนั้นนำแผ่นกันเสียบใส่ช่องในตะกวด (รูปที่ 2.4) ได้ตะกวดละ 50 แผ่น ยางจะจับตัวในตะกวดมีลักษณะเป็นแผ่นนิ่มคล้ายก้อนเต้าหู้โดยมีความหนาเท่ากับระยะระหว่างแผ่นเสียบ (ประมาณ 1 inch) จากนั้นจะลำเลียงแผ่นยางเหล่านี้เข้าสู่เครื่องรีดผ่านช่องทางน้ำซึ่งเป็นอ่างยาวเพื่อป้องกันยางเกาะติดกัน

ขั้นที่ 2 การรีดยาง

แผ่นยางจะถูกรีดด้วยเครื่องรีดยางซึ่งมีลูกรีดจำนวน 5 คู่ โดยระยะระหว่างลูกรีดแต่ละคู่จะค่อย ๆ ลดลง ลูกรีด 2 คู่สุดท้ายจะทำลายสลับกันบนแผ่นยาง พร้อมทั้งพิมพ์รหัสของสหกรณ์บนแผ่นยางด้วย โดยแผ่นยางที่ผ่านการรีดแล้วจะมีความหนาประมาณ 2-3 mm ยางที่ผ่านการรีดแล้วจะมีความชื้นประมาณ 60% ฐานแห้ง จากนั้นจะนำมาผึ่งบนราวของรถเข็นยางประมาณ 1 คืน เพื่อให้ น้ำบางส่วนระเหย (รูปที่ 2.5) จนมีความชื้นประมาณ 40% ฐานแห้ง แล้วจึงนำเข้าห้องรมเพื่อทำการรมต่อไปในกรณีทำยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheets, RSS) หรือทำการอบแห้งในกรณีทำยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheets, ADS)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตยางแผ่นรมควัน



รูปที่ 2.4 ภายในโรงรมยางแสดงตะกงที่ใช้ผสมน้ำยาง



รูปที่ 2.5 ยางแผ่นดิบที่ผ่านการรีดแล้วรอเข้าห้องรม

ขั้นที่ 3 การรมยาง

ในกรรมวิธีการทำยางแผ่นรมควันนั้นจะรมในห้องรมควัน (รูปที่ 2.6) ซึ่งแต่ละห้องมีเตา (รูปที่ 2.7) เป็นของตัวเองอยู่ด้านล่างและหลังห้อง ทางสหกรณ์ใช้วิธีการให้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไม้ฟืนไหลเข้าสัมผัสกับแผ่นยาง ทำให้ยางแผ่นแห้งและสุก เพื่อรักษาคุณภาพของยางแผ่นและป้องกันการเกิดรา โดยการแห้งของยางแผ่นสังเกตได้จากการไม่มีส่วนชุ่มน้ำในเนื้อยางแผ่น ซึ่งยางแผ่นรมควันที่มีคุณภาพดีในเนื้อยางแผ่นจะไม่มีสิ่งสกปรกและฟองอากาศ ปกติในการรมควันของสหกรณ์ส่วนยางแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 3-4 วัน แต่ถ้าหากมีปัญหาห้องรมเกิดการสูญเสียความร้อนมาก ระยะเวลาในการรมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการรมควันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 49 ถึง 63°C โดยในวันแรกจะรมยางที่อุณหภูมิประมาณ 49 ถึง 52°C และจะค่อยเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะถ้าแรงอุณหภูมิในวันแรกสูงเกินไปก็จะเกิดยางฟองขึ้น เช่นเดียวกันในวันต่อมาหากใช้อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดก็จะเกิดยางฟองได้ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิต้องเพิ่มอย่างช้าๆ โดยการใส่ไม้ฟืนอย่างสม่ำเสมอ 2 ถึง 3 ชั่วโมงต่อครั้ง เพื่อควบคุมให้ห้องรมควันร้อนอยู่ประมาณ 50 ถึง 70°C อุณหภูมิสูงสุดต้องควบคุมให้ไม่เกิน 70°C มิฉะนั้นจะทำให้ยางแผ่นเหลวและมีการยืดตัว สำหรับยางแผ่นดิบที่มีความหนา 3 mm ควรควบคุมอุณหภูมิห้องรมดังนี้ (Prasertsan, 1993)

วันที่ 1	อุณหภูมิ 49-52°C
วันที่ 2	อุณหภูมิ 52-57°C
วันที่ 3	อุณหภูมิ 57-60°C
วันที่ 4	อุณหภูมิ 60-63°C

โดยทั่วไปการรมควันของสหกรณ์จะหยุดใส่เชื้อเพลิงไม้ฟืนในวันสุดท้าย และห้องรมจะมีอุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 50°C

การรมควันยางแผ่นนั้นจะต้องใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืนเท่านั้น เนื่องจากในควันไฟมีกรดฟีนอลิก (phenolic acid) ที่จะไปเคลือบแผ่นยางสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ โดยทั่วไปทางสหกรณ์จะใช้เชื้อเพลิงจากไม้ยางพารา เนื่องจากหาได้ง่ายในท้องถิ่นและต้นทุนไม่สูงนัก (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2545)

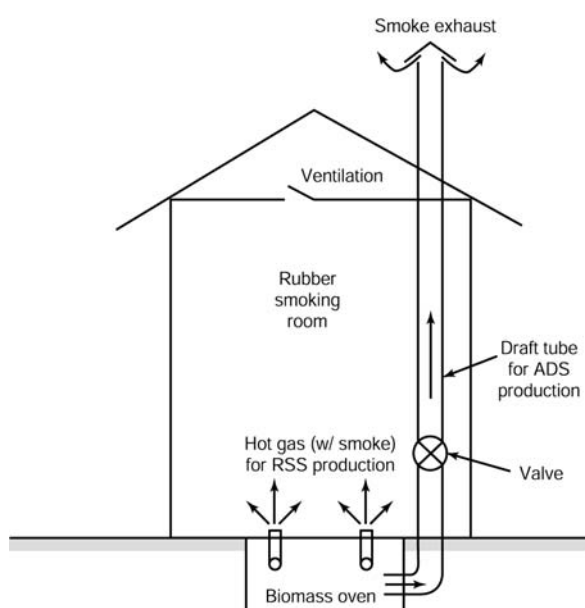


รูปที่ 2.6 ห้องรมยางเรียงเป็นแถวจำนวน 7 ห้อง



รูปที่ 2.7 เตาเผาฟืน

ห้องรมของสหกรณ์ รุ่ในปี 2537 ซึ่งเป็นห้องขนาด $2.5 \times 6.0 \times 3.5$ เมตร บรรจุยางได้ 3 รถเขว่น หรือ สูงสุดประมาณ 1500 แผ่น ในห้องรมมีท่อระบายควันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 inch (draft tube) จำนวน 1 ท่อ ใช้สำหรับให้ก๊าซร้อนไหลผ่านและเป็นท่อระบายควันในกรณีที่เกิดอย่างฉับพลัน (ADS) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ท่อควันดังกล่าวมีวาล์วเปิด - ปิด 1 ตัว สำหรับควบคุมการระบายควัน พื้นห้องรมมีวิธีการกระจายแก๊สร้อน ด้วยการให้ท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inch กระจายความร้อน 12 ท่อต่อห้อง แบ่งเป็น 2 แถว ๆ ละ 6 ท่อ เพดานห้องรมมีช่องระบายความชื้นห้องละ 2 ช่อง ซึ่งควบคุมการเปิด - ปิด โดยเชือกที่ด้านหลังห้องบริเวณเตาเผาที่ต่อไปบังคับบานระบายความชื้น



รูปที่ 2.8 แผนผังการทำงานของห้องรมยาง

ยางที่รมเสร็จแล้วจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในการรมอาจจะมียางที่ไม่สุกเนื่องจากขอบหนาซึ่งอาจเกิดจากการพับของแผ่นยางขณะรีด โดยยางเหล่านี้จะเรียกว่ายางคัทตั้งซึ่งขายได้ราคาต่ำกว่า แต่ถ้ายางไม่สุกทั้งแผ่นก็จะนำเข้ารมใหม่ หากอุณหภูมิในการรมสูงเกินยางก็จะเกิดเป็นฟองใหญ่ แต่ถ้าน้ำยางมีน้ำฝนผสมอยู่ก็จะเกิดเป็นฟองเล็ก ๆ ทั่วทั้งแผ่น ยางเหล่านี้จะขายได้ราคาต่ำเช่นเดียวกัน ในปัจจุบันไม่ว่าทางสหกรณ์จะผลิตได้คุณภาพดีเพียงใดก็จะขายได้ในราคาของยางชั้น 3 เท่านั้น เนื่องจากกลไกของตลาด ดังนั้นจึงไม่มีแรงจูงใจให้ทางสหกรณ์ผลิตยางชั้นสูง ยางที่แห้งและผ่านการคัทตั้งแล้วจะถูกนำมารวมไว้ที่ห้องรวบรวมยางก่อนนำไปขาย การจำแนกชั้นยางแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 ยางแผ่นที่ผ่านการรมควันแล้ว



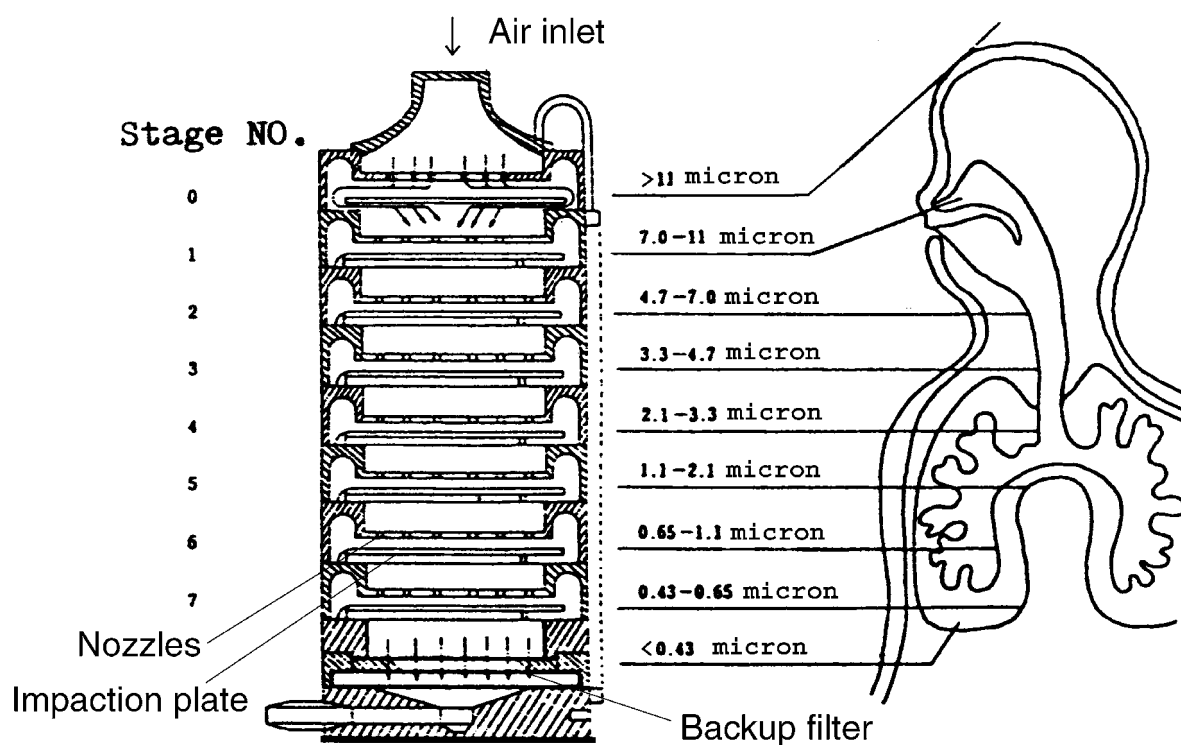
รูปที่ 2.10 ห้องคัทตั้งและเก็บแผ่นยาง

ตารางที่ 2.2 การจัดชั้นยางแผ่นรมควัน

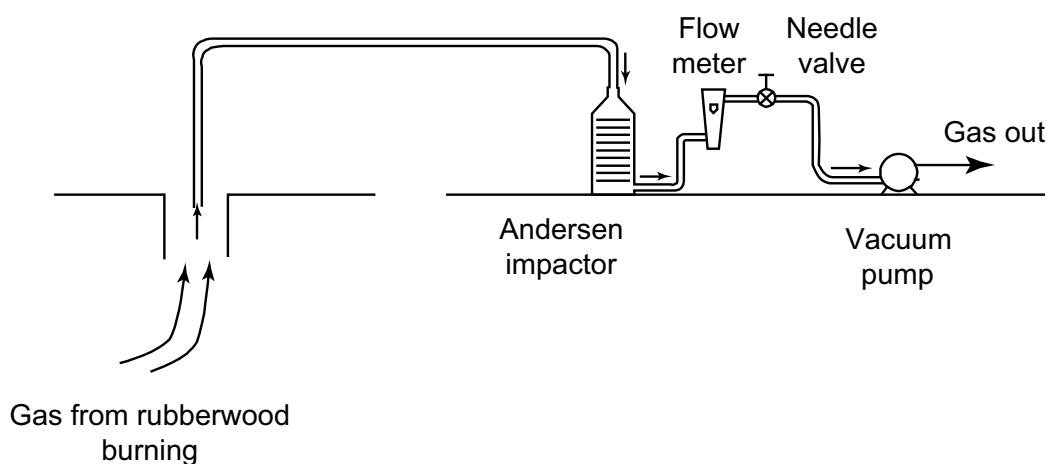
ชั้นยาง	การหีบห่อ	ยางเสียปลอมปน	คุณสมบัติยางแผ่น
ชั้น 1 พิเศษ (NO.1 RSS XL)	แต่ละก้อนต้องไม่มีรา แต่ขณะส่งมอบ อนุญาตให้มีราแห้ง จำนวนเล็กน้อยบนผิว ก้อนที่ติดกับแผ่นยาง ที่ห่อได้	ต้องไม่มียางที่รอยไหม้ เป็นจุดๆ หรือเป็นแถบๆ ไม่มียางย่อยหรือยางเยิ้ม ไม่มียางอ่อนรม ไม่มียาง แกร่ง ไม่มียางขุ่นมัว ไม่มี ยางไหม้	แผ่นยางต้องแห้งสนิท สะอาด และดูแข็งแรงคงทนปราศจากข้อ ตำหนิใดๆ อันได้แก่ สิ่งปลอม แปลงเจือปน ราชนิม ยางพอง ดินหรือทราย สิ่งสกปรกเจือปน อื่นๆ อนุญาตให้มีฟองอากาศ ขนาดปลายเข็มได้
ชั้น 1 (NO.1 RSS)	เหมือนชั้น 1 พิเศษ	เหมือนชั้น 1 พิเศษ	เหมือนชั้น 1 พิเศษ ต่างกันที่ อนุญาตให้มีตำหนิเปลือกไม้และ ฟองอากาศได้เล็กน้อย
ชั้น 2 (NO.2 RSS)	อนุญาตให้มีราชนิม หรือราแห้งได้ไม่เกิน 5%	เหมือนชั้น 1 พิเศษ และ ชั้น 1	เหมือนชั้น 1
ชั้น 3 (NO.3 RSS)	อนุญาตให้มีราชนิม หรือราแห้งได้ไม่เกิน 10%	เหมือนชั้น 1 พิเศษ ชั้น 1 และชั้น 2	เหมือนชั้น 1 พิเศษ ชั้น 1 และ ชั้น 2 แต่ยินยอมให้ยางแผ่นดูไม่ ค่อยสะอาดขึ้นเล็กน้อย
ชั้น 4 (NO.4 RSS)	อนุญาตให้มีราชนิม หรือราแห้งได้ไม่เกิน 20%	เหมือนชั้น 1 พิเศษ ชั้น 1 ชั้น 2 และชั้น 3	เหมือนชั้น 3 และอนุญาตให้มี ตำหนิ เปลือกไม้ ฟองอากาศ สิ่ง เจือปนโปร่งแสงเหนียวเล็กน้อย ยางแกร่งได้
ชั้น 5 (NO.5 RSS)	อนุญาตให้มีราชนิม หรือราแห้งได้ไม่เกิน 20%	จะต้องไม่มียางที่มีรอย ไหม้เป็นจุดๆ หรือเป็น แถบๆ ไม่มียางย่อยหรือ ยางเยิ้ม ไม่มียางไหม้ อนุญาตให้มียางอ่อนรม ได้เล็กน้อย อนุญาตให้มี ยางแกร่งได้เล็กน้อย	ยางแผ่นต้องแห้งสนิท อนุญาต ให้มีตำหนิ เปลือกไม้ ฟอง อากาศ ยางพองได้เล็กน้อย

3. การกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน

ขั้นตอนแรกของงานวิจัยนี้คือการศึกษาคูณลักษณะของอนุภาคเขม่าควันจากการเผาไม้พิน โดยจะศึกษาการกระจายของขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคเพื่อหาแนวทางในการลดปริมาณอนุภาคเขม่าเหล่านี้ ในการหาการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควันเราใช้ Andersen air sampler (Andersen, AN-200) เป็นอุปกรณ์ในการดักจับและแบ่งแยกอนุภาคในช่วงขนาดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใน Andersen air sampler จะประกอบไปด้วยแผ่นกระຈกจำนวน 8 แผ่นวางเรียงเป็นชั้น ๆ โดยแต่ละชั้นสามารถแยกขนาดของอนุภาคที่ไหลผ่าน แบ่งเป็นช่วง ๆ ตั้งแต่ต่ำกว่า 0.43 micron ถึง สูงกว่า 11 micron โดยใช้หลักการแยกอนุภาคโดยวิธี aerodynamic impaction แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยแผ่นเจาะรูขนาดเล็กวางอยู่เหนือแผ่นกระຈกทำหน้าที่เป็นหัวฉีดเร่งความเร็วของแอโรซอล โดยชั้นบนสุด (ชั้นที่ 0) จะมีขนาดรูใหญ่ที่สุดดังนั้นความเร็วอากาศที่ไหลผ่านจะมีค่าต่ำที่สุด ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ (>11 micron) จะถูกดักในชั้นนี้ ในชั้นถัด ๆ ไปขนาดรูจะเล็กลงตามลำดับ ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นและอนุภาคขนาดเล็กจะถูกดักเป็นชั้น ๆ ข้างใต้ชั้นสุดท้ายจะมีแผ่นกรอง (backup filter) สำหรับดักอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.43 micron รูปที่ 3.2 แสดงชุดการทดลองวัดการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน โดยการต่อท่อเพื่อดูดเขม่าจากช่องควันใต้พื้นห้องรมผ่าน Andersen air sampler ด้วยปั้มสุญญากาศ ท่อนำเขม่าควันและ Andersen air sampler จะถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันการควบแน่น อัตราการไหลสำหรับอุปกรณ์ชุดนี้ตั้งไว้ที่ 28.3 ลิตรต่อนาที แต่ละครั้งใช้เวลา 10 นาทีในการเก็บตัวอย่าง ส่วนรูปที่ 3.3 แสดงภาพในการทดลองเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 Andersen sampler



รูปที่ 3.2 ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สเพื่อวัดการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายการเก็บตัวอย่างเพื่อวัดการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน

ผลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 7 ครั้งแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.4 - 3.6 รวมทั้งตารางที่ 3.1 โดยในรูปที่ 3.4 แสดงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคในแต่ละชั้นของ Andersen sampler ที่ดักได้ ส่วนรูปที่ 3.5 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคซึ่งจะเห็นได้ว่าเขม่าควันมีปริมาณอนุภาคหนาแน่นในช่วงตั้งแต่ต่ำกว่า 0.43 micron จนถึง 3.3 micron ขนาดของอนุภาควัดเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic diameter) ซึ่งมีนิยามคือเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมที่มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีความเร็วตกตะกอน (settling velocity) เท่ากับอนุภาคนั้น รูปที่ 3.6 เป็นกราฟ Log-probability ของค่าสะสมของสัดส่วนมวลของแต่ละชั้นของ sampling plates ใน Andersen air sampler โดยแกนตั้งมีสเกลเป็นการกระจายแบบปกติ (normal distribution) กราฟของแต่ละครั้งสามารถ fit เป็นเส้นตรงได้เนื่องจากการ

กระจายเกือบเป็นการกระจายแบบปกติในแกน log เรียกการกระจายชนิดนี้ว่าการกระจาย log-normal ค่า mass median aerodynamic diameter (MMAD) เป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50% ของค่าสะสมของสัดส่วนมวล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 micron ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.1 ดังนั้นอนุภาคเขม่าจะหนาแน่นในช่วงใกล้ 1 micron ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเชิงเรขาคณิต (Geometric standard diameter, GSD) นิยามโดย

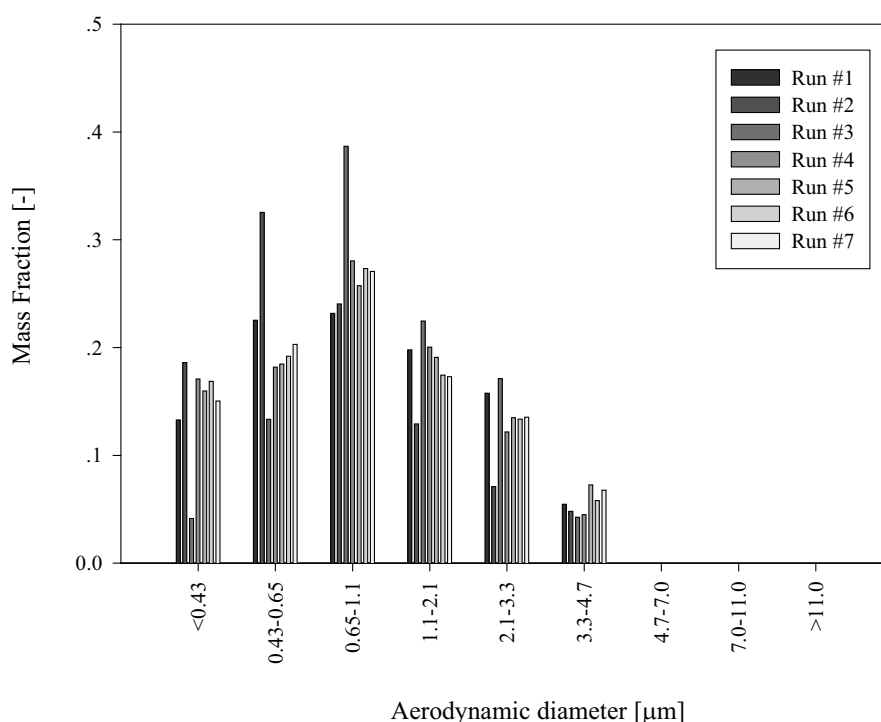
$$GSD = \frac{d_{84.1\%}}{d_{50\%}} = \frac{d_{50\%}}{d_{15.9\%}} \quad (3.1)$$

โดยที่ $d_{15.9\%}$, $d_{50\%}$ และ $d_{84.1\%}$ คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่าสะสมของสัดส่วนมวลเท่ากับ 15.9%, 50% และ 84.1% ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, σ) ของขนาดคือ

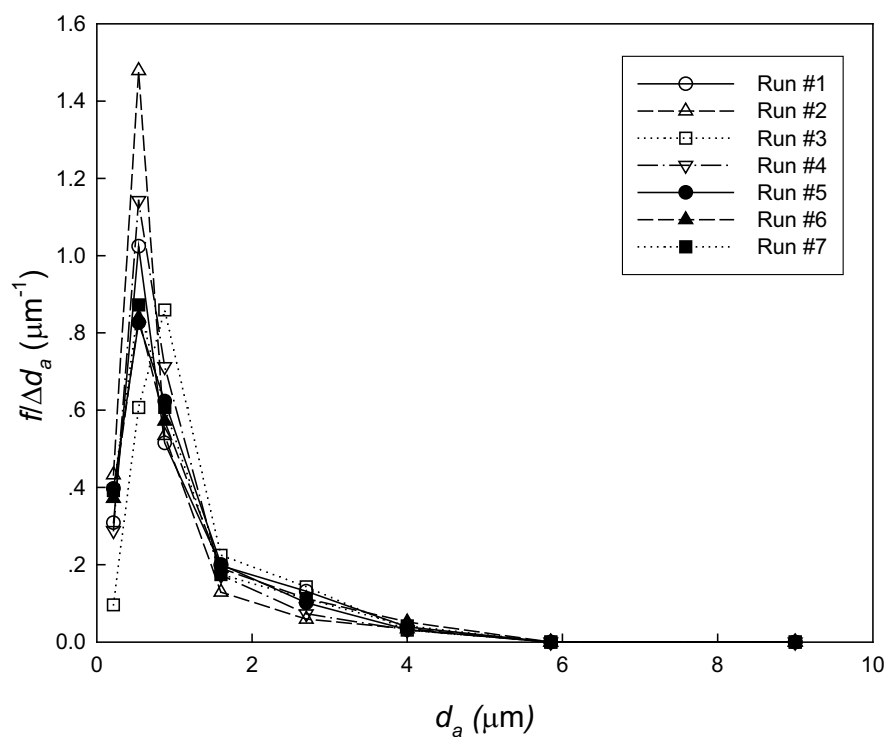
$$\begin{aligned} \sigma &= d_{84.1\%} - d_{50\%} \\ &= d_{50\%} - d_{15.9\%} \end{aligned} \quad (3.2)$$

สำหรับตัวอย่างที่เก็บมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเชิงเรขาคณิตเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 นอกจากนี้ความเข้มข้นของอนุภาคทั้งหมดจากการเผาไหม้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 358 mg/m^3 ของแก๊ส

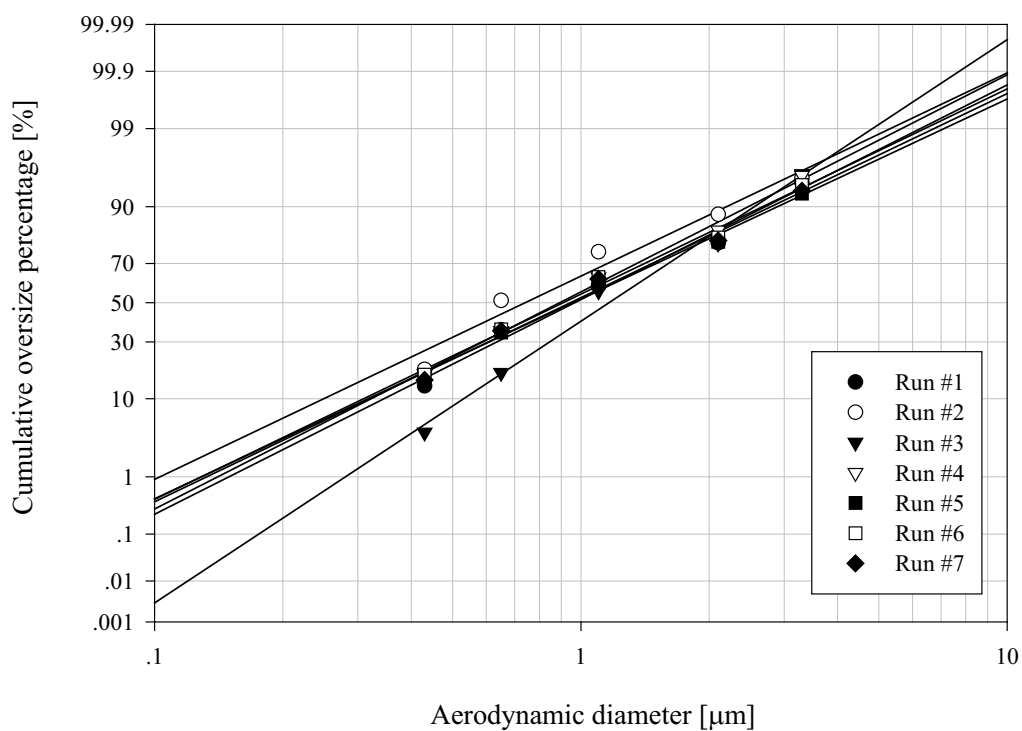
ส่วนรูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอนุภาคเขม่าและค่าความชื้นของไม้ฟืน จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของอนุภาคเขม่าจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความชื้นของไม้ฟืนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการมองด้วยตาเปล่า ทั้งนี้ไม้ฟืนที่มีความชื้นสูงจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้สูง และทำให้เกิดเขม่าปริมาณมาก



รูปที่ 3.4 สัดส่วนมวลของขนาดอนุภาคเขม่าควันในช่วงขนาดต่าง ๆ จากการวัดทั้งหมด 7 ครั้ง



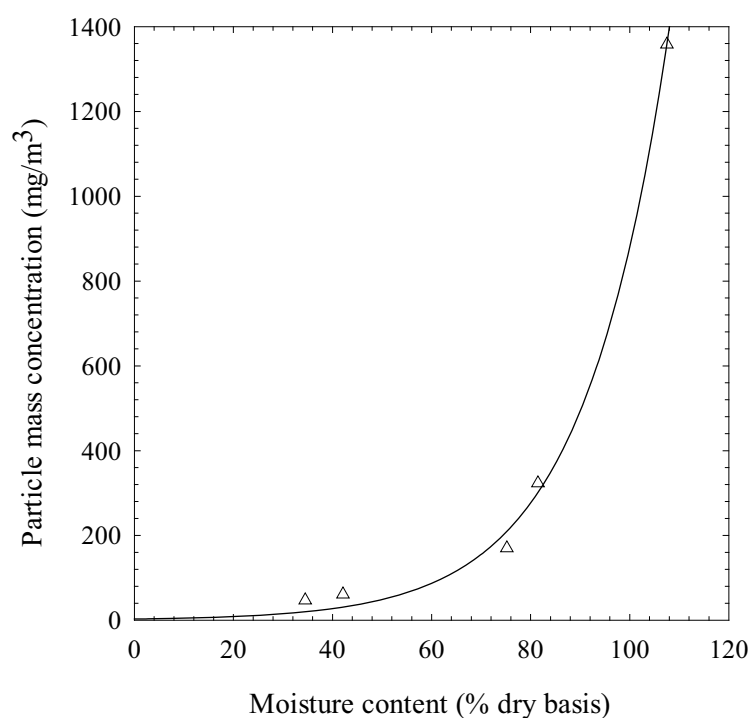
รูปที่ 3.5 การกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควันจากการวัดทั้งหมด 7 ครั้ง



รูปที่ 3.6 กราฟ Log-probability ของ Cumulative oversize percentage ของอนุภาคเขม่าควัน

ตารางที่ 3.1 สรุปผลการทดลองหาการกระจายของอนุภาคเขม่าควัน

ตัวอย่าง ที่.	ค่าความชื้นของ ไม้ฟืน (% ฐานแห้ง)	มวลรวมของ อนุภาค (มิลลิกรัม)	ความเข้มข้น ของอนุภาค (มก/ลบ.ม.)	MMAD (micron)	GSD
1	-	76.8	271	1.0	2.50
2	-	79.0	279	0.7	2.86
3	107.5	384.3	1358	1.2	2.00
4	81.5	91.3	323	0.9	2.44
5	75.2	48.2	170	1.0	2.50
6	42.1	17.2	61	0.9	2.56
7	34.5	13.3	47	0.95	2.74
เฉลี่ย	-	101.4	358	0.95	2.51



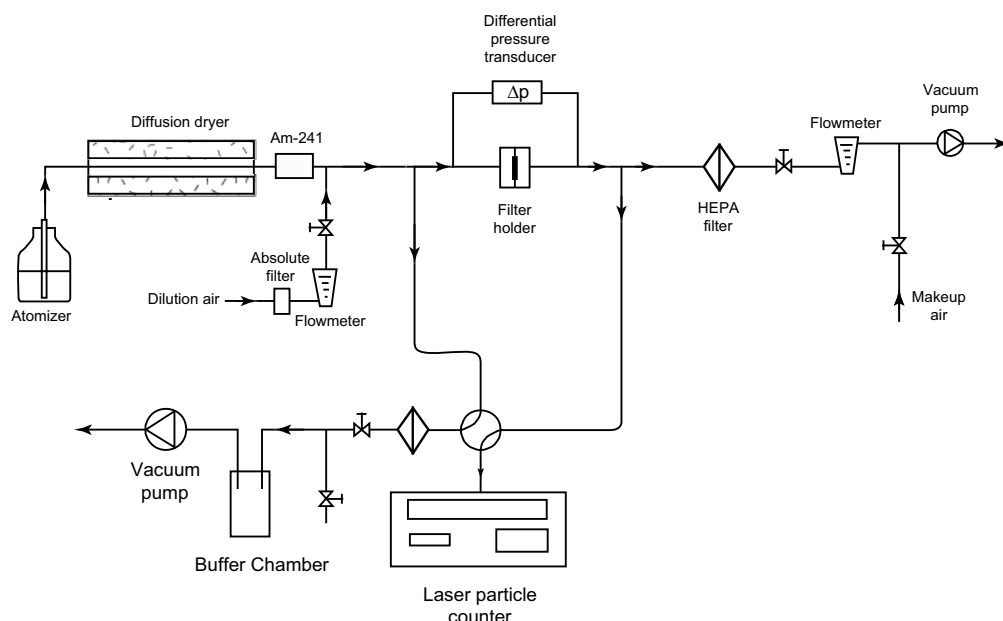
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคเขม่าควันเริ่มต้นกับค่าความชื้นไม้ฟืน

จากผลการทดลองการกระจายขนาดอนุภาคเขม่าพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 0.95 micron ซึ่งเป็นขนาดเล็กมาก วิธีที่เป็นไปได้ในการดักอนุภาคเหล่านี้สำหรับโรงรมยางมีอยู่ 2 วิธีคือการกรองด้วยตัวกรอง และการใช้กระแสไฟฟ้าสถิตในการดักจับ เนื่องจากแก๊สจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิที่สูงมาก (100-200°C ที่ปากปล่องเข้าห้องรม) ดังนั้นหากจะใช้ตัวกรองจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่ทนความร้อนสูง ซึ่งในที่

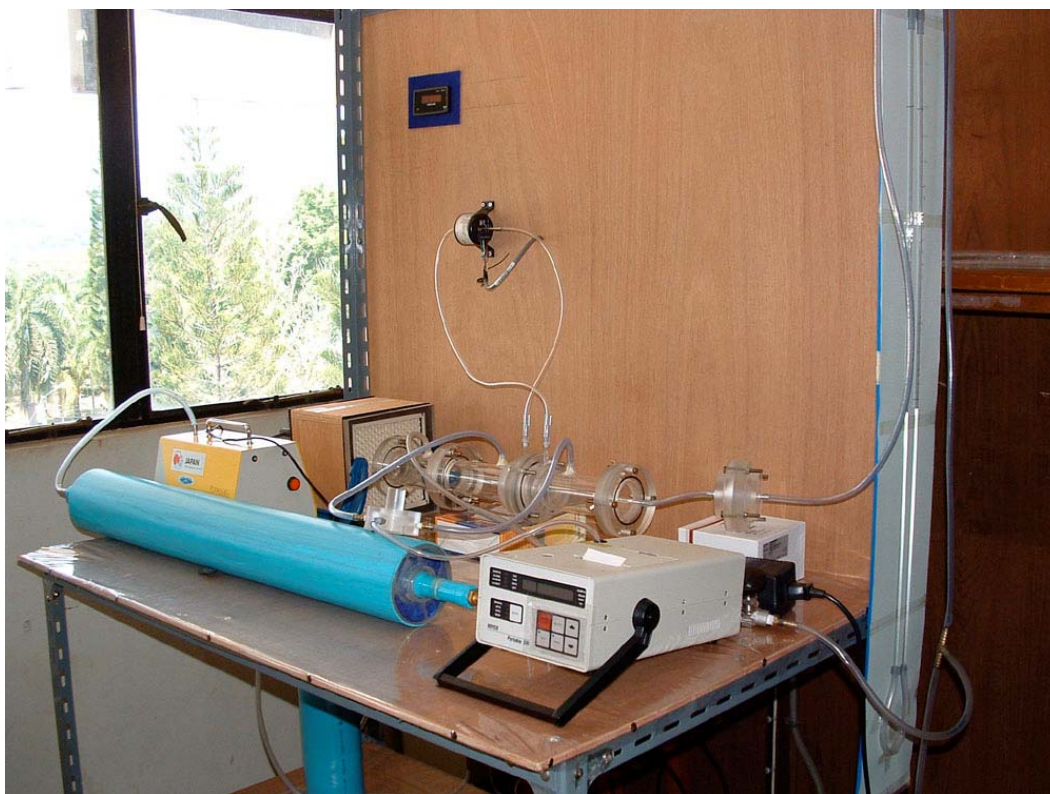
นี้จะทำการศึกษาสมรรถนะการดักจับอนุภาคโดยใช้แผ่นตาข่ายสแตนเลสละเอียดในบทที่ 4 และจะศึกษาสมรรถนะการดักจับอนุภาคของอุปกรณ์ดักจับอนุภาคโดยใช้กระแสไฟฟ้าสถิตย์ในบทที่ 5

4. ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นตาข่ายสแตนเลส

ในงานวิจัยนี้วัตถุประสงค์หลักคือหาตัวกรองหรือตัวดักจับที่เหมาะสมสำหรับดักจับเขม่าควันดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทั้งประสิทธิภาพการกรอง (collection efficiency) และความดันสูญเสีย (pressure drop) ของตัวกรองที่เหมาะสม ซึ่งในเบื้องต้นได้ทำการเลือกแผ่นตาข่ายสแตนเลสละเอียดเป็นตัวกรองเนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนความร้อนสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ชุดทดลองสำหรับวัดประสิทธิภาพการกรอง และความดันสูญเสียของตัวกรอง แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 ส่วนภาพถ่ายของชุดทดลองจริงแสดงในรูปที่ 4.2 ชุดทดลองนี้ใช้เครื่องทำละออง aerosol atomizer (Topas, ATM 225) สำหรับการให้กำเนิดอนุภาคขนาดต่าง ๆ โดยจะใช้อนุภาคโพลีสไตลีน (polystyrene, PSL) ทรงกลมชนิดขนาดเดี่ยว (monodisperse) แขนงลอยในน้ำกลั่น หลังจากผ่านเครื่องทำละอองแล้วอนุภาคโพลีสไตลีนและอนุภาคหยดน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ดักหยดน้ำ (diffusion dryer) ทำให้แอโรซอลที่ผ่านออกมามีเพียงอนุภาคโพลีสไตลีนขนาดที่ต้องการอย่างเดียว อนุภาคเหล่านี้จะถูกทำการกำจัดประจุโดยให้ไหลผ่านสารกัมมันตรังสี Am-241 ในการทดลองนี้จะใช้อุณหภูมิขนาด 1.0 micron ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคเขม่าควันที่มีปริมาณมากที่สุดที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว จากนั้นแอโรซอลจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นตาข่ายซึ่งวางเรียงซ้อนกัน (10, 20, 30 และ 40 แผ่น) ปริมาณอนุภาคในช่วงก่อนเข้าและหลังจากผ่านแผ่นตาข่ายจะถูกบันทึกด้วย อุปกรณ์นับอนุภาค laser particle counter หรือ LPC (Royco, Portable 330B) เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณของอนุภาคที่ถูกกรองโดยตัวกรองและคำนวณประสิทธิภาพการกรองได้ ส่วนความดันสูญเสียสามารถวัดได้โดยใช้ differential pressure transducer (MKS, Baratron pressure transducer Type 223) ชุดทดลองนี้ได้ดัดแปลงเล็กน้อยจากชุดทดลองที่เสนอในข้อเสนอโครงการโดยใช้ LPC เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณอนุภาคแทนการใช้ Andersen air sampler เนื่องจาก LPC สามารถอ่านค่าได้ทันที ส่วนการใช้ Andersen air sampler จะต้องซั้ง plates แต่ละชั้นทั้งก่อนและหลังทำการทดลองแต่ละครั้ง อีกทั้งยังต้องใช้ปริมาณอนุภาคในจำนวนที่สูงจึงสามารถอ่านค่าได้ทำให้ต้องใช้เวลามาก ในการทดลองนี้ใช้ปั๊มสุญญากาศ (Gast, Model 0211-Y45F-G230CX) ในการดูดแอโรซอลให้ไหลผ่านระบบ



รูปที่ 4.1 ชุดการทดลองวัดสมรรถนะของตัวกรองอนุภาคเขม่าควัน

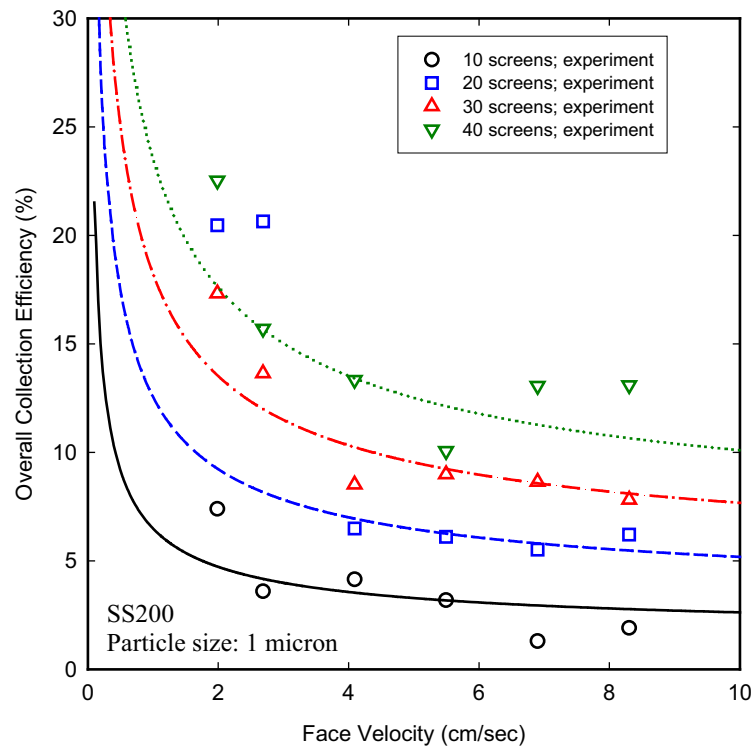


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชุดการทดลองวัดสมรรถนะของตัวกรองอนุภาคเขม่าควัน

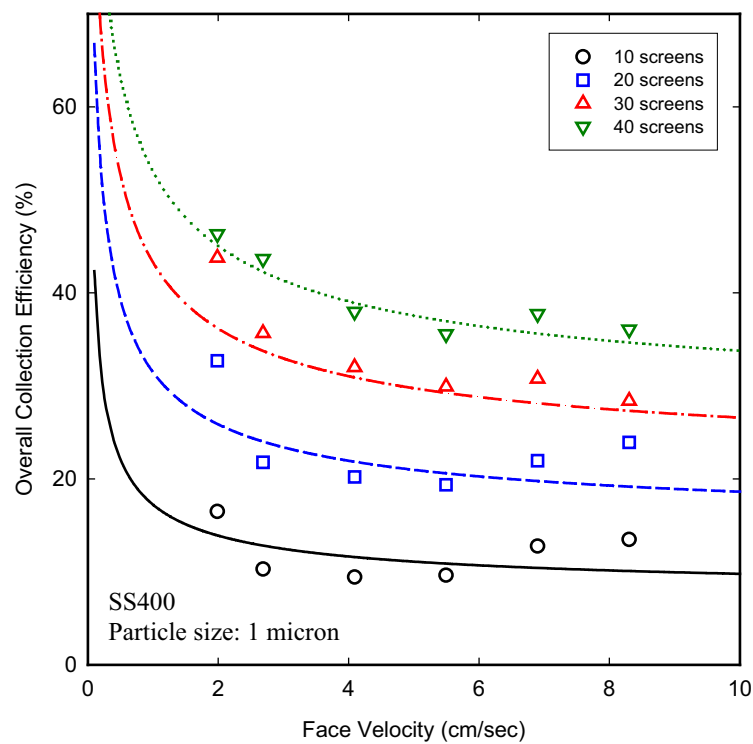
ในการทดลองได้ใช้แผ่นตาข่ายสแตนเลสอย่างละเอียดขนาด mesh #200 (SS200) และ mesh #400 (SS400) ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 4.1 วางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นตาข่ายสแตนเลสสามารถทนกรดได้ดีและทนอุณหภูมิได้ค่อนข้างสูง ผลการทดลองหาสมรรถนะการกรองอนุภาคขนาด 1.0 micron ของแผ่นตาข่ายสแตนเลสจำนวน 10, 20, 30 และ 40 ชั้น แสดงในรูปที่ 4.3 – 4.6 โดยที่รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการกรองของตาข่าย mesh #200 และ mesh #400 ตามลำดับ ส่วนที่รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความดันสูญเสียของตาข่าย mesh #200 และ mesh #400 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกรองของแผ่นตาข่ายสแตนเลสมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับตาข่าย mesh #200 ประสิทธิภาพที่ความเร็วสูงกว่า 5 cm/sec มีค่าต่ำกว่า 15% (ตาข่าย 40 ชั้น) ขณะที่ความดันสูญเสียสูงกว่า 30 Pa ส่วนตาข่าย mesh #400 ประสิทธิภาพที่ความเร็วสูงกว่า 5 cm/sec มีค่าประมาณ 40% (ตาข่าย 40 ชั้น) แต่ความดันสูญเสียมีค่าสูงกว่า 100 Pa ดังนั้นสรุปได้ว่าตาข่ายสแตนเลสไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กรองเขม่าเนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำและความดันสูญเสียสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ดักจับอนุภาคชนิดอื่น

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติตาข่ายที่ใช้ในการทดลอง

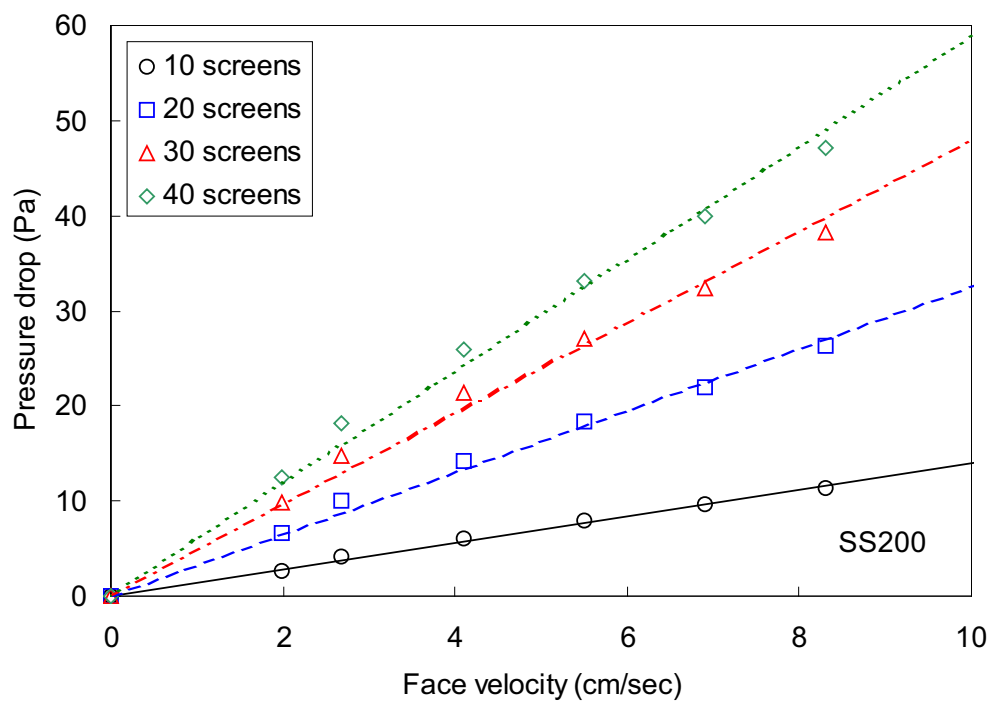
คุณสมบัติ	SS200	SS400
รัศมีเส้นลวด (micron)	25.5	15.0
ความหนาของแผ่นตาข่าย (micron)	115.0	62.0
สัดส่วนเส้นลวดต่อปริมาตรแผ่นตาข่าย	0.27	0.35



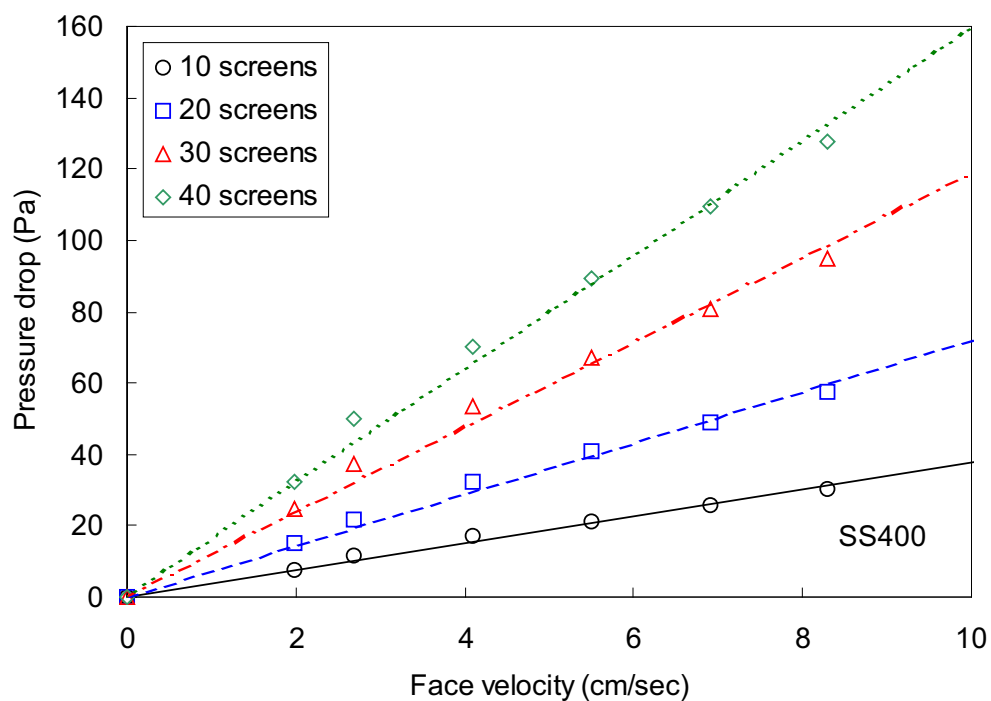
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดักจับของตัวกรองตาข่ายสแตนเลสขนาด 200 เส้นต่อinch เรียงซ้อนกัน 10, 20, 30 และ 40 ชั้น สำหรับอนุภาคขนาด 1.0 micron



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการดักจับของตัวกรองตาข่ายสแตนเลสขนาด 400 เส้นต่อinch เรียงซ้อนกัน 10, 20, 30 และ 40 ชั้น สำหรับอนุภาคขนาด 1.0 micron



รูปที่ 4.5 ความดันสูญเสียของตัวกรองตาข่ายสแตนเลสขนาด 200 เส้นต่อinch เรียงซ้อนกัน 10, 20, 30 และ 40 ชั้น



รูปที่ 4.6 ความดันสูญเสียของตัวกรองตาข่ายสแตนเลสขนาด 400 เส้นต่อinch เรียงซ้อนกัน 10, 20, 30 และ 40 ชั้น

5. ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator)

เนื่องจากประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของตาข่ายละเอียดมีค่าต่ำ และความดันสูญเสียมีค่าสูง ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการใช้งานในกรณีนี้ อุปกรณ์ที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ดักจับอนุภาคเขม่าที่มีขนาดเล็กที่อุณหภูมิสูง โดยมีประสิทธิภาพสูงและความดันสูญเสียที่ต่ำคือเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

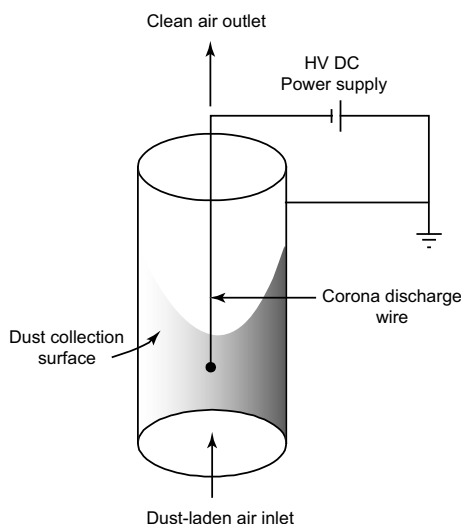
5.1 ทฤษฎีเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

ในการกรองหรือดักจับอนุภาคเขม่าควันที่สนใจ จะอาศัยหลักการของการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งเป็นการกำจัดอนุภาคแอโรซอล (อนุภาคของแข็งหรือของเหลว) ออกจากแก๊ส โดยอาศัยแรงที่เกิดขึ้นกับประจุไฟฟ้าสถิตย์ในสนามไฟฟ้า ข้อดีหรือลักษณะพิเศษของวิธีการนี้ คือ มีประสิทธิภาพในการดักจับที่สูง และมีค่าความดันสูญเสียของแก๊สที่ต่ำ ซึ่งจะช่วยให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องที่ต่ำกว่าการทำความสะอาดแก๊สด้วยวิธีการอื่น

กระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์เป็นการกำจัดอนุภาคของแข็งหรือของเหลวออกจากแก๊ส โดยอาศัยแรงที่เกิดขึ้นกับประจุไฟฟ้าสถิตย์ในสนามไฟฟ้า ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ชนิดท่อและเส้นลวด (wire-cylinder) เท่านั้น เนื่องจากมีรูปร่างที่เหมาะสมนำไปใช้ในโรงงานได้ หลักการทำงานแสดงในรูปที่ 5.1 ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการใส่ประจุไฟฟ้ากระแสสถิตย์แก่อนุภาค และขั้นตอนการเก็บอนุภาค การใส่ประจุไฟฟ้ากระแสสถิตย์แก่อนุภาคทำได้โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความดันสูงระหว่างเส้นลวดและผนังทรงกระบอก โดยทั่วไปผนังทรงกระบอกจะต่อลงดิน ส่วนเส้นลวดที่มีลูกตุ้มห้อยอยู่จะเป็นขั้วลบทำหน้าที่ปล่อยโคโรนาไฟฟ้า (corona discharge) สร้างประจุแก่อนุภาคที่วิ่งผ่าน เมื่ออนุภาคได้รับประจุก็จะวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเคลื่อนที่เข้าขั้วเก็บซึ่งเป็นขั้วตรงข้ามหรือพื้นผิวทรงกระบอกนั่นเอง อนุภาคของแข็งจะเกาะติดขั้วเก็บด้วยแรงไฟฟ้า แรงกล และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ก่อตัวเป็นก้อนเค้ก (cake) ซึ่งต้องมีกลไกในการกวาดทำความสะอาดอยู่เสมอ ถ้าอนุภาคเป็นของเหลวก็จะรวมตัวกันเป็นหยดหรือฟิล์มแล้วไหลลงข้างล่างได้เอง สมรรถนะของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของประจุ ความแรงของสนามไฟฟ้า และระดับการหลุดลอยหนีใหม่ (re-entrainment) ของอนุภาค

กลไกการเกิดโคโรนา (Mechanisms of the Corona Formation)

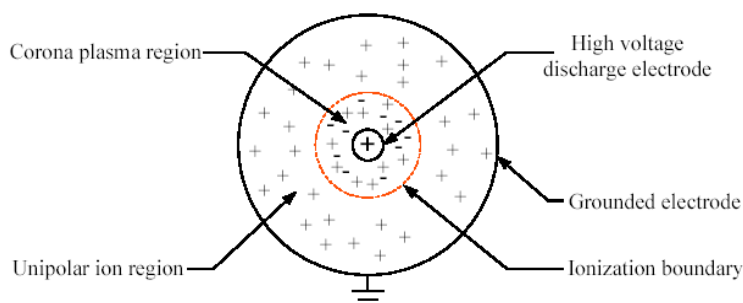
การปล่อยโคโรนาไฟฟ้า (corona discharge) เป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการของการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ เพราะอ็อกซิเจนจะถูกสร้างขึ้นเพื่อทำให้อนุภาคต่าง ๆ มีประจุ เพื่อให้มีการปล่อยโคโรนาไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอหรือมีเสถียรภาพจำเป็นต้องมี 2 ขั้วอิเล็กโตรด (ขั้ว discharge electrode และ ขั้ว passive electrode) โดยขั้วหนึ่งจะต้องมีรัศมีมีความโค้งน้อยกว่าอีกขั้วหนึ่งมาก ๆ และช่องว่าง (gap) ระหว่าง 2 ขั้วอิเล็กโตรด จะต้องกว้างหรือมากกว่ารัศมีของขั้วอิเล็กโตรดที่เล็กกว่า ในระบบของเส้นลวด-แผ่นถาด (wire-plate) และเส้นลวด-ผนังทรงกระบอก (wire-cylinder) ขั้วอิเล็กโตรดสามารถมีรูปร่าง (geometry) ได้หลายแบบ ขณะที่มีการเกิดศักย์ไฟฟ้า (electrical potential) ระหว่าง 2 ขั้วอิเล็กโตรด แก๊สหรืออากาศที่อยู่ในบริเวณใกล้ ๆ เส้นลวดจะถูกทำให้เป็นอ็อกซิเจนโดยทันที โคโรนาจะอยู่ในเทอมของขั้วบวก (positive) หรือขั้วลบ (negative) ก็ได้ ตามลักษณะทางไฟฟ้าของอิเล็กโตรด



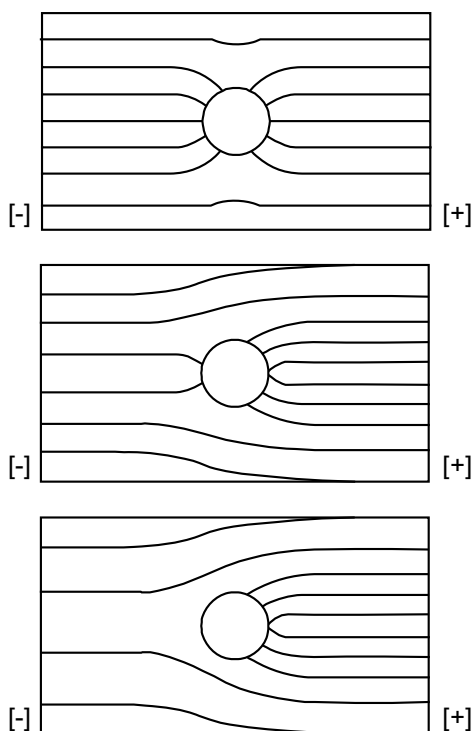
รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์ชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

การปล่อยโคโรนาไฟฟ้าบวก (positive corona discharge) จะต่างจากการปล่อยโคโรนาไฟฟ้าลบ (negative corona discharge) ไม่เฉพาะแต่ในลักษณะรูปแบบโครงสร้าง (morphology) เท่านั้น แต่ยังแตกต่างกันในกลไกหรือขั้นตอนการเกิดอีกด้วย โดยทั่วไปการปล่อยโคโรนาไฟฟ้าบวกมักจะเป็นการแพร่ (diffuse) และการเปล่งแสงสม่ำเสมอ (uniform glow) ในขณะที่การปล่อยโคโรนาไฟฟ้าลบการปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดให้อยู่ในวง จากอิเล็กโตรดแรงดันสูง (high voltage electrode)

ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่มีการปล่อยโคโรนาเกิดขึ้น เรียกว่า “breakdown” หรือ “threshold” potential ค่าที่แท้จริงของค่านี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเล็กโตรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด และองค์ประกอบของแก๊ส ลักษณะหรือรูปแบบการปล่อยโคโรนาไฟฟ้าจะประกอบด้วยบริเวณของ corona plasma และบริเวณของ unipolar ion ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เฉพาะกระบวนการทำให้เกิดเป็นไอออน (ionization) เท่านั้นที่เกิดขึ้นในบริเวณของ corona plasma region ภายนอกบริเวณ plasma region ความเข้มของสนามไฟฟ้าไม่มากพอที่จะเกิดการไอออนไนเซชัน และ unipolar ion จะลอย (drift) มารวมกันภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (Davidson, 2000)



รูปที่ 5.2 แสดงการปล่อยโคโรนาไฟฟ้าบวก (positive DC corona discharge) ในระบบของเส้นลวด-ผนังทรงกระบอก



รูปที่ 5.3 แสดงเส้นของสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำอนุภาคในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (แหล่งกำเนิดอ็อนลบอยู่ด้านซ้าย) (ก) อนุภาคไม่มีประจุ (ข) อนุภาคมีประจุบางส่วน (ค) อนุภาคมีประจุอิ่มตัว

กลไกการเกิดประจุ (Charging Mechanisms)

กลไกที่ทำให้อนุภาคแอโรซอลมีประจุ ได้แก่ flame charging, static electrification, diffusion charging, และ field charging โดย 2 กลไกหลังจะใช้ unipolar ions ที่เกิดขึ้น (โดยปกติแล้วจะสร้างขึ้นจากการปล่อยโคโรนาไฟฟ้า หรือ corona discharge) ในการทำให้อนุภาคแอโรซอลมีประจุ ในระบบของ ESP การมีหรือการเกิดประจุของอนุภาคจะเกิดผ่านกลไกแบบ diffusion charging และ field charging โดย field charging จะเป็นกลไกหลักที่สำคัญในการทำให้อนุภาคแอโรซอลมีประจุ (Hinds, 1999)

Field charging เป็นการทำให้อนุภาคมีประจุโดยอาศัย unipolar ions ที่เกิดขึ้นในที่ที่มีสนามไฟฟ้าสูง เมื่ออนุภาคทรงกลม (spherical particle) ที่ไม่มีประจุถูกวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform electric field) ที่มีแหล่งกำเนิดอ็อนลบวางอยู่ด้านใดด้านหนึ่งและด้านตรงข้ามต่อลงดิน (ground) อนุภาคที่ไม่มีประจุนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าบิดเบือน (distort) แบบสมมาตรรอบ ๆ ตัวมันเอง ดังแสดงในรูปที่ 5.3(ก) โดยเส้นของสนามไฟฟ้า (electric field lines) จะแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของอ็อนลบ เมื่ออ็อนลบที่เคลื่อนที่ในทิศทางตามเส้นของสนามไฟฟ้าสูงอันนี้เกิดการชนกันกับอนุภาคก็จะเกิดการถ่ายเทประจุของมันให้แก่อนุภาคทำให้อนุภาคมีประจุ (ประจุลบ) และผลักกับอ็อนลบตัวอื่น ๆ ที่วิ่งเข้าหาตัวมัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3(ข) จนได้รับประจุจากอ็อนลบอิ่มตัว กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การอิ่มตัวของประจุ (saturation charge) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่มีเส้นของสนามไฟฟ้าวิ่งเข้าหาอนุภาคและอ็อนลบไม่สามารถมาถึงอนุภาคได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 5.3(ค)

Diffusion charging เป็นกลไกที่เกิดขึ้นเมื่ออ็อนเกิดการชนและติดอยู่บนอนุภาคทำให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างอ็อนกับอนุภาค อนุภาคจึงมีประจุ และเป็นกลไกที่ไม่จำเป็นต้องใช้หรืออาศัยแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกในการทำให้เกิดการชนกันระหว่างอ็อนกับอนุภาค การชนกันของอ็อนกับอนุภาคจะเกิดขึ้นใน

บริเวณของ unipolar ions โดยจะเป็นการชนกันแบบสุ่มเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ของไอออนและอนุภาค ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก กลไกนี้จะเป็นกลไกเด่นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 0.1 micron

ประสิทธิภาพการดักจับ (Davidson, 2000)

ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์จากการทดลองสามารถหาได้จาก

$$E_{\text{exp}} = 1 - \frac{C_{\text{exit}}}{C_{\text{inlet}}} \quad (5.1)$$

โดยที่ C_{exit} และ C_{inlet} คือ ความเข้มข้นของอนุภาคขาออกและขาเข้าตามลำดับ

ในทางทฤษฎีการหาประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsh-Anderson โดยสมมติว่าเมื่ออนุภาคสัมผัสกับผนังของขั้วเก็บ (collection surface) แล้วจะติดอยู่บนผนังของขั้วเก็บนั้น ไม่มีการหลุดลอยหนีใหม่ (re-entrainment) นั่นคือ

$$E_{\text{calc}} = 1 - \exp(-V_{TE} A_C / Q) \quad (5.2)$$

โดยที่ A_C คือพื้นที่ของขั้วเก็บอนุภาค (collection surface)

Q คืออัตราการไหล (volumetric flow rate)

V_{TE} คือความเร็วเชิงตกตะกอนทางไฟฟ้า (Terminal electric velocity) ซึ่งหาได้จาก

$$V_{TE} = \frac{neEC_c}{3\pi\eta d} \quad (5.3)$$

โดยที่ n คือจำนวนของอิเล็กตรอน

e คือประจุของอิเล็กตรอน $= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ [$4.8 \times 10^{-10} \text{ stC}$]

η คือความหนืดของอากาศ (air) ที่ 293 K $= 1.8134 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ [$1.8134 \times 10^{-4} \text{ Poise}$]

C_c คือตัวประกอบคันทิงแฮม (Cunningham correction factor) หาได้จาก

$$C_c = 1 + \left(\frac{2.52\lambda}{d} \right) \quad \text{for } d > 0.1 \mu\text{m} \quad (5.4)$$

ในที่นี้ d คือ ขนาดของอนุภาค

λ คือ mean free path ของโมเลกุลอากาศ

E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในท่อทรงกระบอก (cylinder tube) สามารถคำนวณได้จาก

$$E = \frac{\Delta W}{R \ln(d_t / d_w)} \quad (5.5)$$

โดยที่ ΔW คือความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างเส้นลวดกับท่อ

d_t คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

d_w คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด

R คือระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับผนังทรงกระบอก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zukeran และคณะ (1997) ได้ออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพในการดักจับของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitator, ESP) สำหรับ ultrafine particle หรือ submicron particle ให้สูงขึ้น โดยอาศัยการเพิ่มหรือติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า quadrapole cold precharger (QCPC) ลงใน ESP และทำการวัดประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคในทอมของเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่าน (% penetration) เทียบกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับ ESP ที่ต่อกับ QCPC จะถูกเปรียบเทียบการทดลองอื่น ๆ คือ ESP อย่างเดียว และ ESP ที่ต่อกับ quadrapole precharger (QPC) พบว่าในกรณีของ ESP ที่ต่อกับ QCPC ให้ค่าการทะลุผ่านของอนุภาคต่ำกว่า นั่นคือมีประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของอนุภาคที่มีประจุ (particle chargings) ที่ผ่านเข้าสู่ corona discharge มีมากขึ้น

Kim and Lee (1999) ได้ทำการออกแบบเครื่องดักจับอนุภาคชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์แบบ single-state ในการทดลองจะหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการดักจับสูงสุด โดยทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นถาด (plate) รัศมีของเส้นลวด ความเร็วของอากาศ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ และ turbulence intensity พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นถาดที่เล็กหรือน้อยกว่า จะให้ประสิทธิภาพในการดักจับที่สูงกว่า

Jedrusik และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองหาสมรรถนะในการดักจับอนุภาคของเถ้าลอย (fly ash particles) ในเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่มี corona electrode ที่แตกต่างกันหลายแบบ คือ barb plate, barb tube, wire และ spike band การดักจับอนุภาคจะถูกกำหนดโดยอาศัยการวัดความเร็วเชิงตกตะกอนทางไฟฟ้า (electric migration velocity) เทียบกับขนาดของอนุภาคที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า (applied voltage) ต่าง ๆ กัน จากการทดลองพบว่า wire และ barb plate electrode ให้ค่าความเร็วเชิงตกตะกอนทางไฟฟ้าสูงสุด ในขณะที่ spike band และ barb tube electrode ให้ค่าที่ต่ำกว่าในช่วงของขนาดอนุภาคเดียวกัน และพบว่า wire electrode ให้ค่าที่ดีกว่า barb plate electrode เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้มีความเท่ากัน

Laskin และ Cowin (2002) ได้ทำการทดสอบโดยการปล่อยอากาศผสมอนุภาคไปยังท่อ ซึ่งมี electrode ทำหน้าที่ถ่ายเทประจุให้กับอนุภาค และมีช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกกับแผ่นถาด (plate) 1 cm ซึ่งวางอยู่ด้านล่างทำหน้าที่เก็บอนุภาค จากการทดลองพบว่า เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์เหมาะสำหรับดักจับอนุภาคที่มีขนาด 0.1-2.0 micron และในการทดลองมีประสิทธิภาพการดักจับสูงถึง 80-90% แต่ถ้านำไปใช้งานจริงมักมีประสิทธิภาพประมาณ 50%

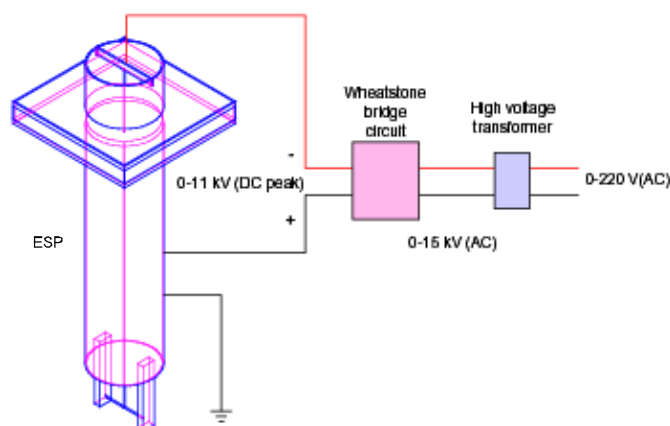
Jedrusik และคณะ (2003) ได้ทำการออกแบบอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ แทนอิเล็กโตรดแบบเดิมคือ spike band electrode เพื่อให้มีความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) ที่สูงกว่า และมีอายุการใช้งานที่นานกว่า โดยให้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า (electric field parameters) และประสิทธิภาพในการดักจับที่เหมือนกันกับ spike band electrode โดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์แบบ single-state ยาว 2 m สูง 0.45 m และมีระยะห่างภายในระหว่างอิเล็กโตรด 0.4 m ในการทดสอบ พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับจะสูงที่สุดเมื่อใช้อิเล็กโตรดแบบ pipe electrode และ double spike electrode

จากการสำรวจเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ จะเห็นว่าการดักจับอนุภาคแอโรซอลโดยอาศัยวิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ เป็นวิธีที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้

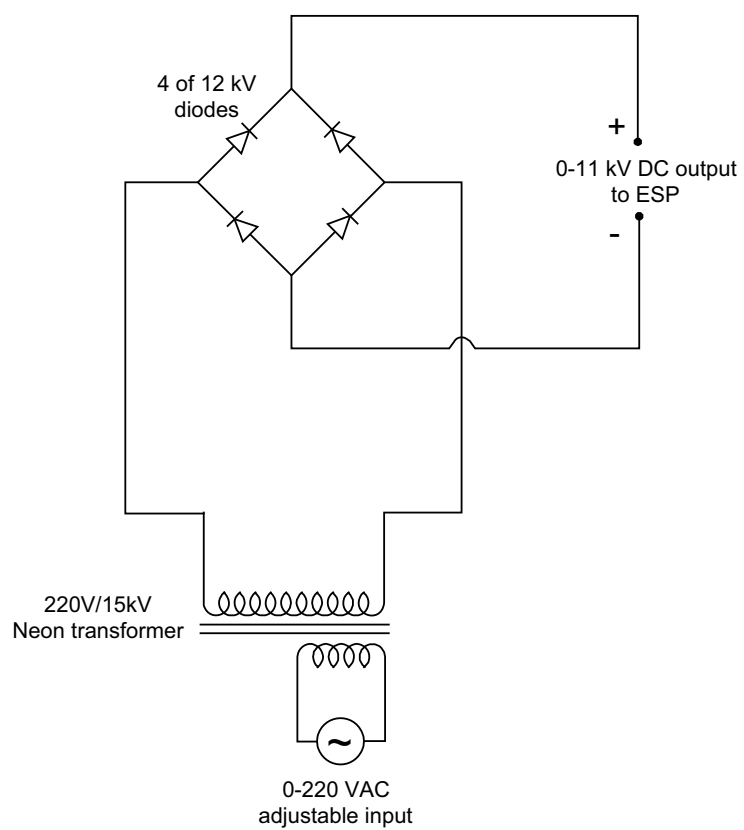
5.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะเส้นลวดและท่อ (wire-cylinder type) ท่อทรงกระบอกสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm สูง 25 cm ทำหน้าที่เป็นขั้วเก็บอนุภาคซึ่งต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟความดันสูง ขนาดท่อทรงกระบอกสแตนเลสนี้ถูกจำกัดโดยความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องปล่อยแก๊สในห้องรม ส่วนขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟต่อเข้ากับเส้นลวดทองแดงซึ่งถูกขึงเป็นแกนกลางของท่อ ทำหน้าที่เป็นขั้วปลดปล่อยโคโรนาไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.4 หม้อแปลงไฟฟ้าความดันสูงทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 0-220 V เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความดันสูง 0-11 kV วงจร Wheatstone bridge (รูปที่ 5.5) จะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากวงจรที่ใช้เป็นวงจร Wheatstone bridge อย่างง่ายดังนั้นกระแสไฟฟ้าขาออกจะไม่เป็นกระแสตรงอย่างราบเรียบแต่จะมีลักษณะเป็นคลื่นดังแสดงในรูปที่ 5.6 และความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า (กระแสสลับ) และจุดยอดของขาออก แสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้น และที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า 220 VAC จะให้กำลังไฟฟ้าขาออกประมาณ 11 kV ซึ่งต่ำกว่ากำลังขยายของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง (15 kV)

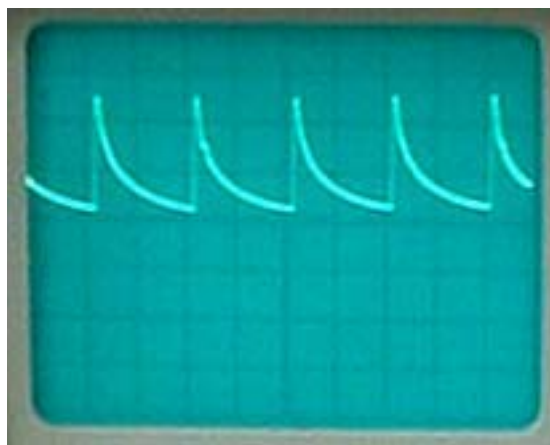
ชุดทดลองศึกษาประสิทธิภาพการดักจับ (collection efficiency) และความดันสูญเสีย (pressure drop) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ในห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.8 ส่วนภาพถ่ายของชุดทดลองจริงแสดงในรูปที่ 5.9 ชุดทดลองนี้ใช้ atomizer (Topas, ATM 225) สำหรับการให้กำเนิดอนุภาคขนาดต่าง ๆ โดยจะใช้อนุภาค polystyrene (PSL) ทรงกลมชนิด monodisperse ในการทดลองนี้จะใช้อนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ 1.0 micron อุปกรณ์วัดปริมาณอนุภาคชนิด laser particle counter หรือ LPC (Royco, Portable 330B) ใช้เพื่อทำการสุ่มตัวอย่างอากาศ ทั้งก่อนและหลังผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ แล้วทำการคำนวณหาปริมาณของอนุภาคที่ถูกดักจับ ส่วนความดันสูญเสียสามารถวัดได้โดยการใช้ differential pressure transducer (MKS, Baratron pressure transducer Type 223) โดยอุปกรณ์ในการทดลองนี้จะเหมือนกับในหัวข้อที่แล้วยกเว้นเฉพาะอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบเปลี่ยนจากแผ่นตาข่ายสแตนเลสเป็นเครื่องดักอนุภาคชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ การทดลองในห้องปฏิบัติการนี้จะใช้ Variac สำหรับปรับกระแสไฟฟ้าเข้า เพื่อปรับความดันไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ โดยมีความดันสูงสุด 11 กิโลโวลต์ จากกระแสไฟฟ้าเข้า 220 โวลต์ เพื่อศึกษาผลของความดันไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค



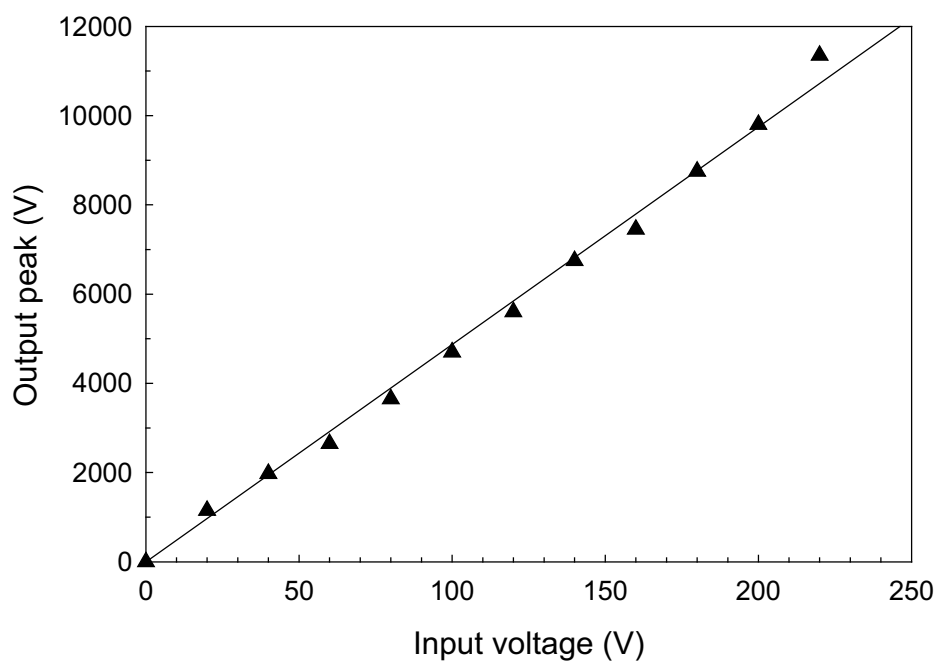
รูปที่ 5.4 อุปกรณ์ชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้ในการทดลอง



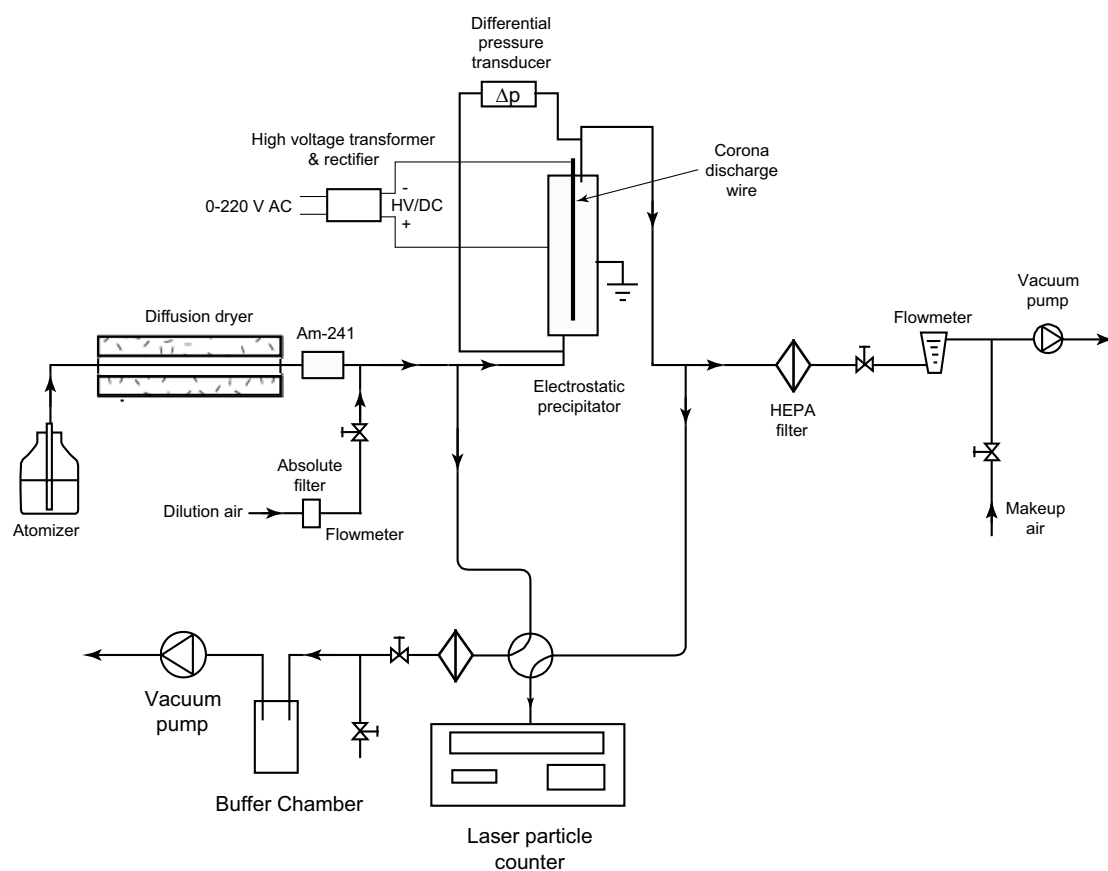
รูปที่ 5.5 วงจรไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.6 ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าขาออกของวงจรไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าและจุดยอดของความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกจากวงจรไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 5.8 ชุดการทดลองวัดสมรรถนะของตัวดักจับอนุภาค

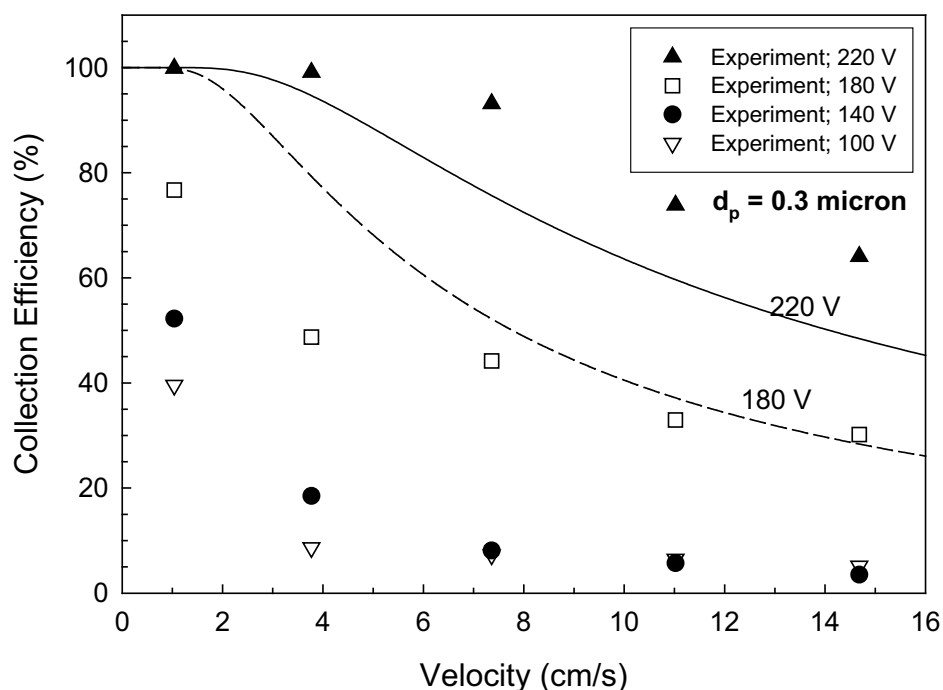


รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายชุดการทดลองวัดสมรรถนะของตัวดักจับอนุภาค

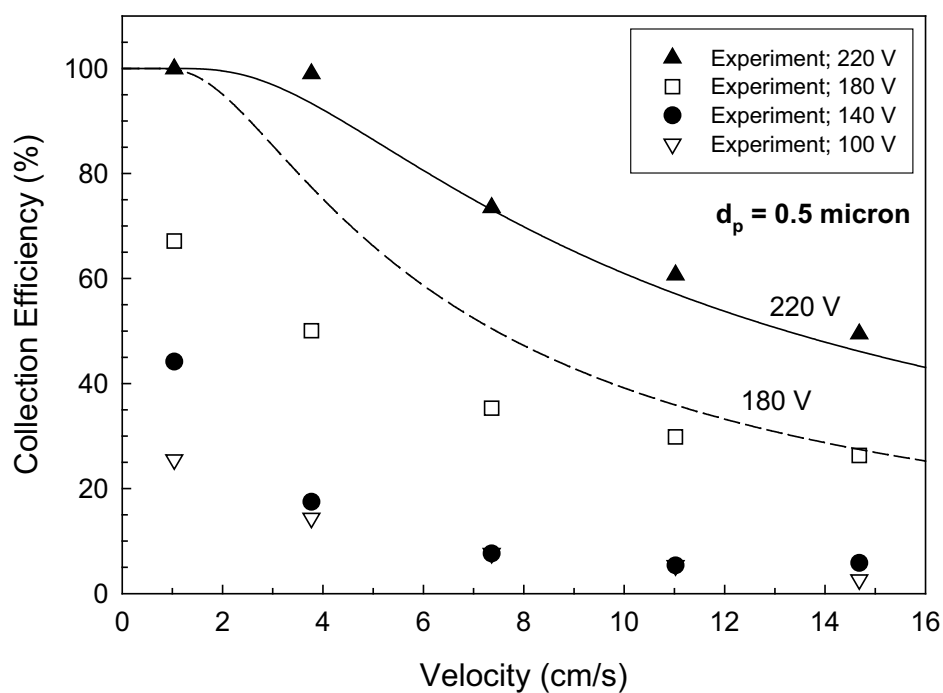
5.3 ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ผลการวัดประสิทธิภาพของการดักจับของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.10 ถึง 5.12 สำหรับอนุภาคขนาด 0.3, 0.5 และ 1.0 micron ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีจากสมการที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้มีประสิทธิภาพสูงมากสำหรับความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด 220 V หรือความต่างศักย์ขาออก 11 kV และจะมีค่าลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่า 98% ในช่วงความเร็ว 0-4 cm/sec และมีประสิทธิภาพสูงกว่า 40% ที่ความเร็วไม่เกิน 16 cm/sec โดยค่าที่ได้จากการทดลองจะสูงกว่าค่าจากทฤษฎีเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของแอโรซอลที่ค่อนข้าง

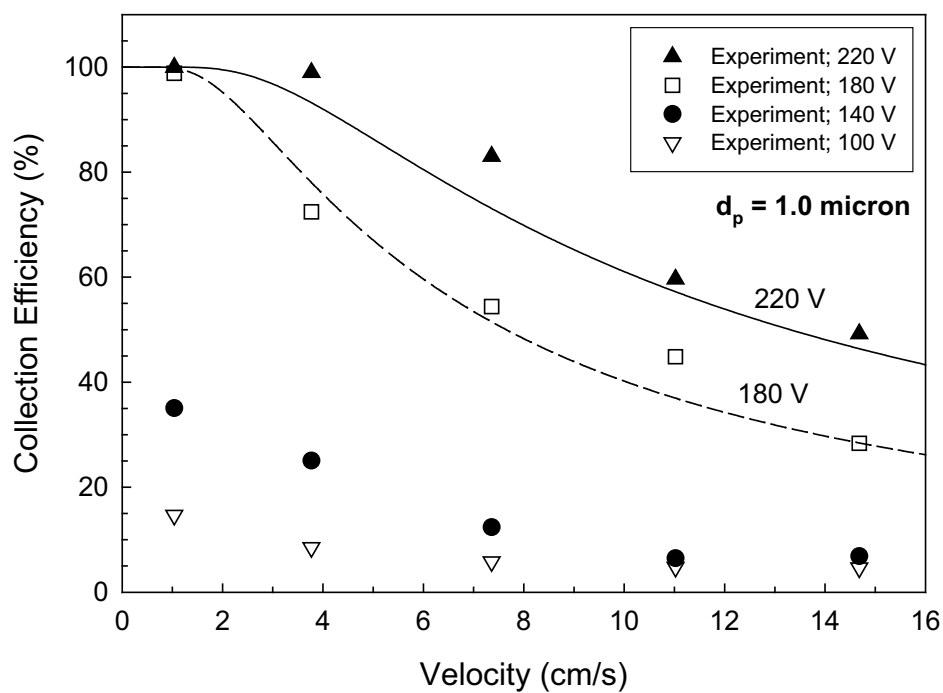
ข้างต่ำคือ 5.3×10^7 particles/m³ หรือ 0.025 mg/m³ (สำหรับอนุภาคขนาด 1 micron) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงประสิทธิภาพจะลดลงตาม ค่าทางทฤษฎีที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าต่ำกว่า 180 V ไม่ได้แสดงให้เห็นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความสามารถของเครื่องวัดที่สามารถอ่านได้อย่างแม่นยำ รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าและกระแสปลดปล่อย (discharge current) จากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งวัดจากกระแสที่ไหลจากขั้วเก็บอนุภาคลงสู่ดิน (ground) สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่สะอาดและเครื่องที่ผ่านการใช้งานในเตาเผาฟีนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่สะอาดจะเห็นได้ว่าการปลดปล่อยโคโรนาเกิดขึ้นที่ความต่างศักย์เข้าสูงกว่า 160 V สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ผ่านการใช้งานในเตาเผาฟีนจะกล่าวในหัวข้อ ดังนั้นสรุปได้ว่าสามารถใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ได้โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าสูงสุด 220 VAC หรือความต่างศักย์กระแสตรงที่เข้าสู่เครื่อง 11 kVDC สำหรับการดักอนุภาคเขม่าควัน โดยในการออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและความสะดวกในการทำงาน



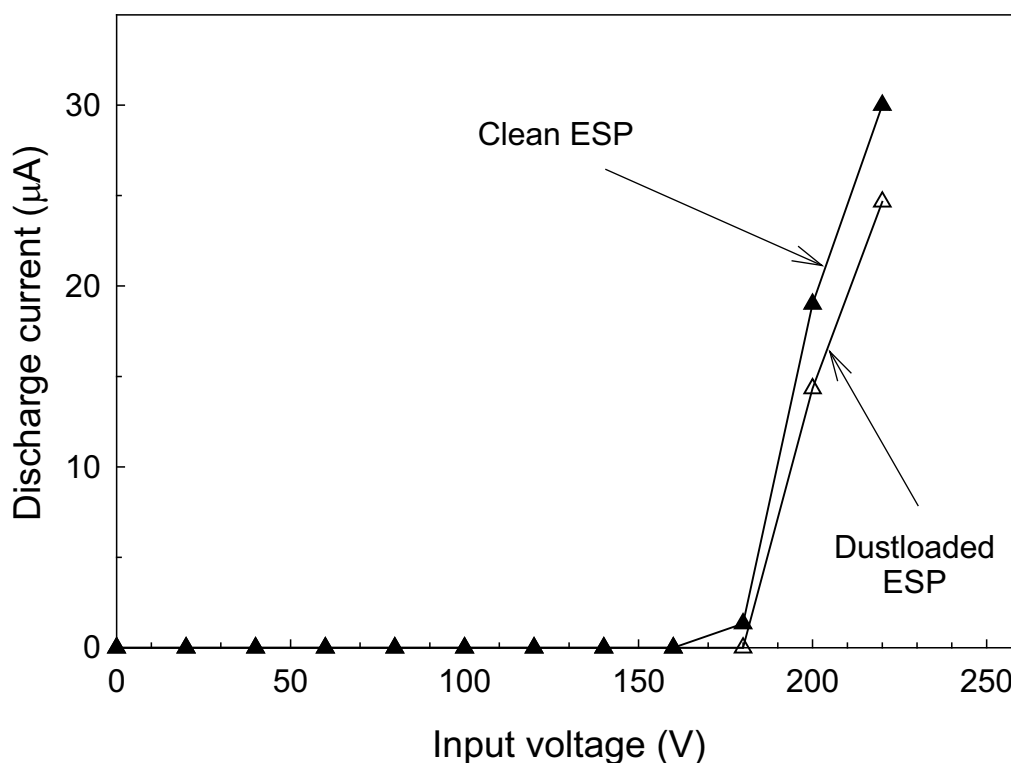
รูปที่ 5.10 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ความเร็วต่าง ๆ และความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าต่าง ๆ กัน สำหรับอนุภาคขนาด 0.3 micron



รูปที่ 5.11 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ความเร็วต่าง ๆ และความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าต่าง ๆ กัน สำหรับอนุภาคขนาด 0.5 micron



รูปที่ 5.12 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ความเร็วต่าง ๆ และความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าต่าง ๆ กัน สำหรับอนุภาคขนาด 1.0 micron



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าและกระแสปลดปล่อยที่วัดได้จากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

5.4 การทดลองภาคสนาม

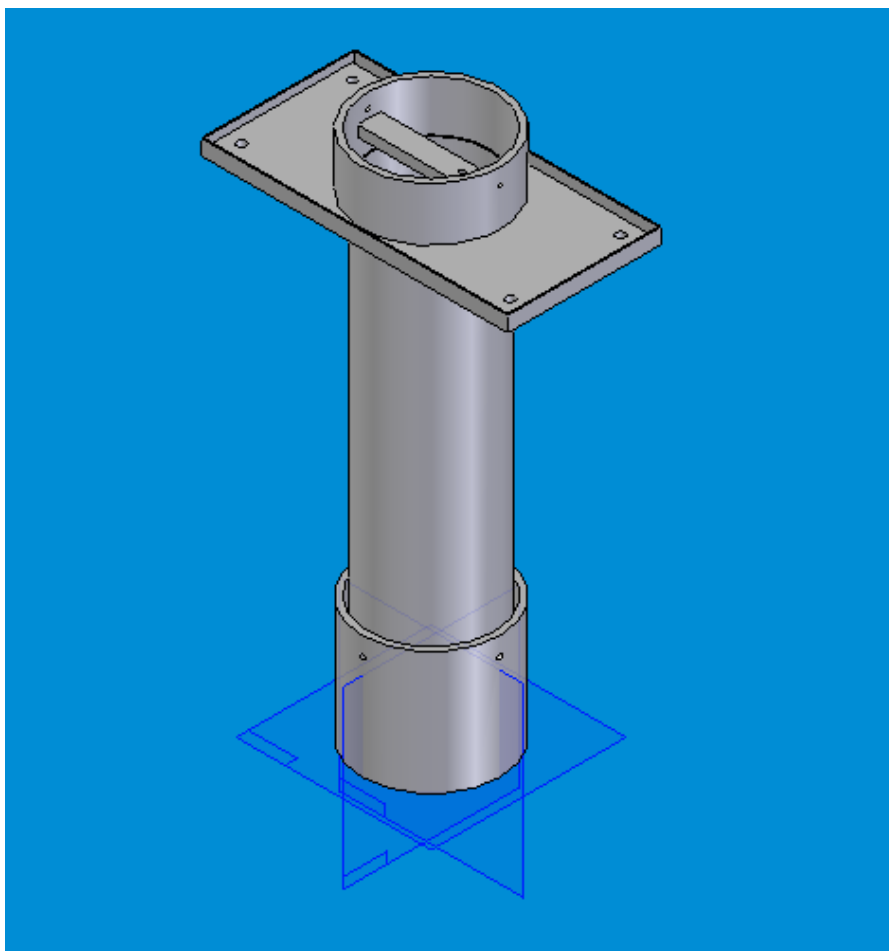
ผลการทดลองในหัวข้อที่แล้วเป็นผลในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้อุณหภูมิห้องและอนุภาคสังเคราะห์โพลิสไตรีน และอนุภาคแอโรซอลมีความเข้มข้นต่ำในระดับ 5.3×10^7 particles/m³ หรือ 0.025 mg/m³ (สำหรับอนุภาคขนาด 1 micron) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของอนุภาคจากเขม่าควันในการเผาไหม้พื้ในช่วงเริ่มต้นซึ่งมีค่าเฉลี่ย 358 mg/m³ ดังแสดงในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของอนุภาคในสภาวะจริงมีค่าสูงกว่าในระดับห้องปฏิบัติการมากกว่า 10,000 เท่า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ที่ออกแบบในการใช้งานสภาวะจริง

แบบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้งานจริงแสดงในรูปที่ 5.14 โดยมีขนาดของขั้วเก็บเท่ากับตัวที่ทดลองในห้องปฏิบัติการและทำด้วยสแตนเลสเช่นเดียวกัน ชั้นส่วนด้านบนและด้านล่างที่ใช้ซึ่งลวดทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นขั้วปลดปล่อยโคโรนา ทำด้วยวัสดุเซรามิก ซึ่งสั่งทำพิเศษ สาเหตุที่เลือกใช้เซรามิกเนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและทนความร้อนสูงได้ โดยแก๊สร้อนที่ออกจากปล่องมีอุณหภูมิสูงถึง 100-200°C รายละเอียดของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์แสดงในภาคผนวก ก

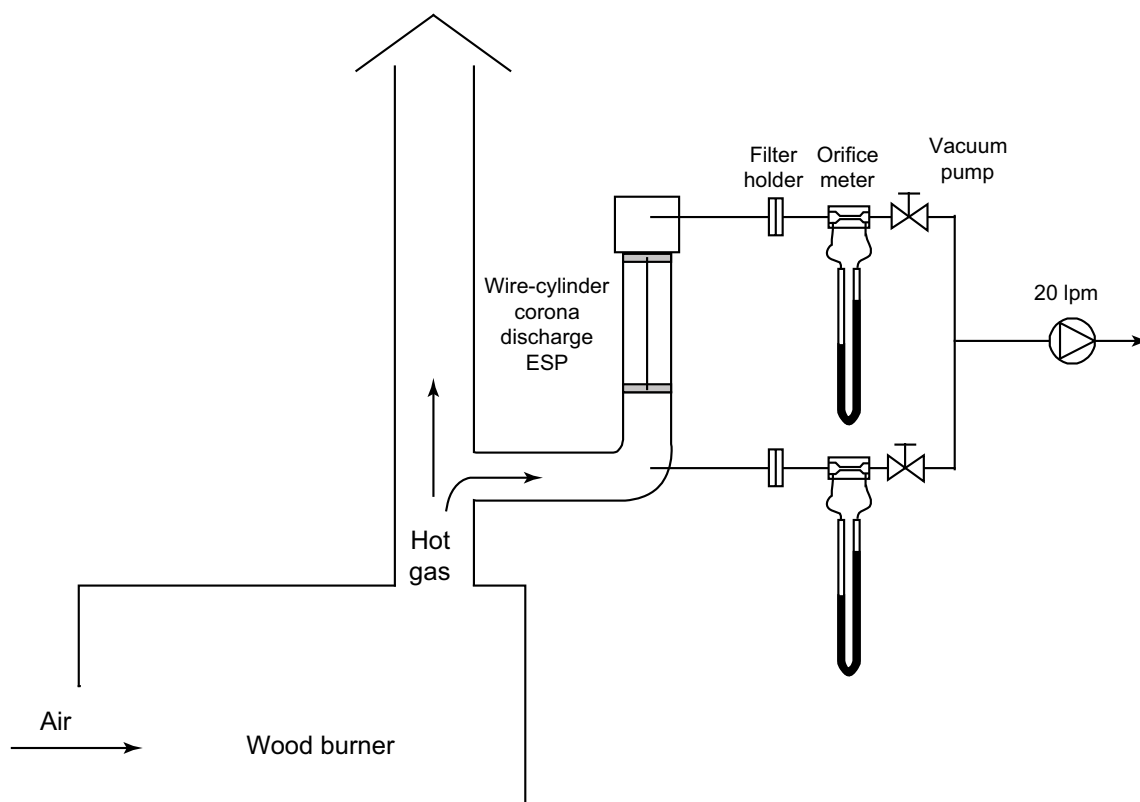
ผังการทดลองในสภาวะจริงเพื่อวัดประสิทธิภาพแสดงในรูปที่ 5.15 โดยทำการติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ บนท่อแยกจากปล่องระบายแก๊สของเตาเผาพื้ การวัดประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคทำโดยการดูดตัวอย่างแก๊สทั้งก่อนเข้าและหลังจากผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ให้ผ่านแผ่นกรองแยกชุดด้วย

ปั๊มสุญญากาศ (Gast, Model 0211-Y45F-G230 CX) และทำการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในทั้ง 2 ชุดให้เท่ากันโดยใช้วาล์วเข็ม (needle valve) และอ่านค่าอัตราการไหลด้วย orifice meter ที่ทำการปรับเทียบแล้ว น้ำหนักที่ต่างกันของแผ่นกรองทั้ง 2 ชุดจะนำไปคำนวณประสิทธิภาพการดักจับจากสมการที่ 5.1 แผ่นกรองที่ใช้จะทำการอบแห้งในชุดควบคุมบรรยากาศที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง เครื่องชั่งที่ใช้เป็นเครื่องชั่งชนิดวิเคราะห์ 4 ตำแหน่งของกรัม (Mettler, AB204-S) โดยการชั่งแผ่นกรองจะทำในห้องที่มีอุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% เพื่อให้น้ำหนักที่อ่านได้มีค่าเที่ยงตรงมากที่สุด ในการทดลองนี้ปรับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 20 lpm ทำการเก็บตัวอย่างครั้งละ 30 นาที และทำการทดลองทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง (20 ครั้ง)

รูปที่ 5.16 แสดงภาพถ่ายขณะทำการทดลองเก็บตัวอย่าง ส่วนรูปที่ 5.17 แสดงเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ก่อนการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์หลังการทดลอง 10 ชั่วโมง (รูปที่ 5.18) พบว่ามีความแตกต่างเป็นอย่างมาก โดยที่เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีอนุภาคเขม่าและน้ำมันทาร์ (tar) เกาะที่ขั้วเก็บอนุภาคจนมีสีดำคล้ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดักจับอนุภาค



รูปที่ 5.14 แบบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ที่ใช้งานจริง



รูปที่ 5.15 ผังการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์



รูปที่ 5.16 ภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์



รูปที่ 5.17 เครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ยังไม่ได้ใช้งาน

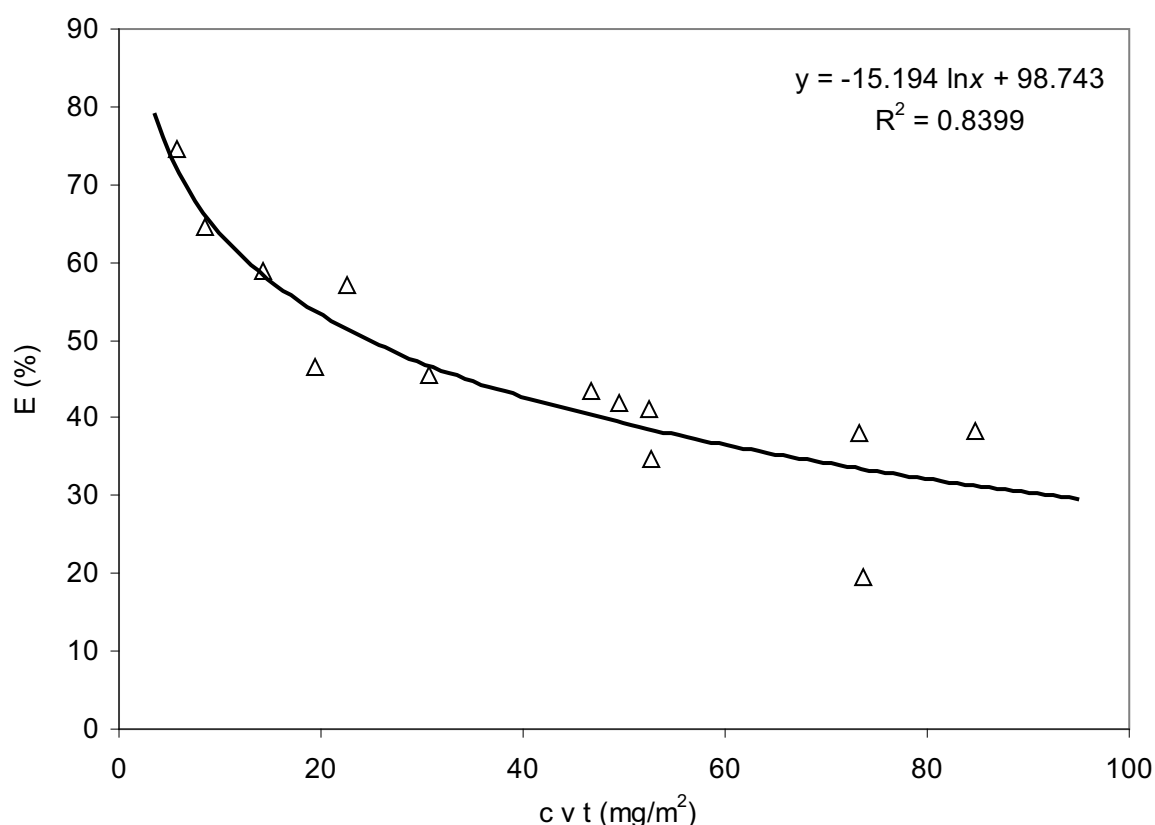


รูปที่ 5.18 เครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ผ่านใช้งาน 10 ชั่วโมง

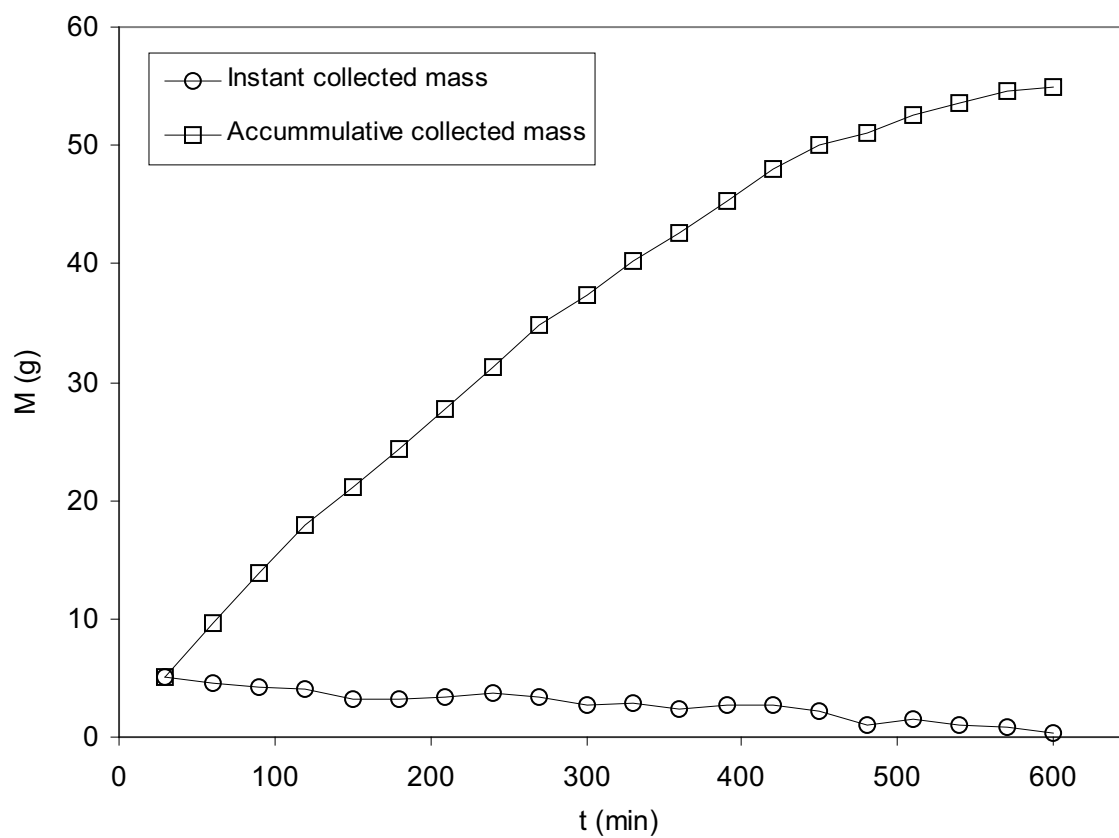
5.5 ผลการทดลองภาคสนาม

ประสิทธิภาพของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ ในสภาวะที่มีการสะสมของอนุภาคที่ผิวขั้ว (dust-loaded) จากการทดลอง 10 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 5.19 จากรูปแทนว่าเป็นผลคูณของความเข้มข้น ความเร็ว และเวลา ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณการสะสมของอนุภาคที่ขั้วเก็บ จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นประสิทธิภาพการดักจับมีค่าประมาณ 75% และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการสะสมของอนุภาคที่ขั้วเก็บเพิ่มขึ้น จนมีค่าลดลงเหลือ ประมาณ 35% เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง ประสิทธิภาพโดยรวมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 49% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ทดลองในห้องปฏิบัติการทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของเขม่ามีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของอนุภาคที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ทำให้อนุภาคส่วนหนึ่งเล็ดลอดผ่านไปได้โดยไม่ถูกดัก นอกจากนี้การสะสมของอนุภาคที่ขั้วเก็บยังทำให้ประสิทธิภาพลดลงด้วยซึ่งจะเห็นได้จากกระแสไฟพลดปล่อยที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.13

ส่วนน้ำหนักของอนุภาคที่เกาะบนขั้วเก็บซึ่งหาได้จากการชั่งเครื่องดักจับอนุภาคทุก ๆ ครั้งที่เก็บตัวอย่างเสร็จ (30 นาที) ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่าปริมาณการเกาะใหม่ที่ขั้วจะลดลงตามเวลาที่ใช้งาน และการสะสมของอนุภาคจะทำให้มีอนุภาคเพิ่มขึ้นดังรูป



รูปที่ 5.19 ประสิทธิภาพของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ในสภาวะที่มีการสะสมของอนุภาคที่ผิวขั้ว (dust-loaded) จากการใช้งาน 10 ชั่วโมง



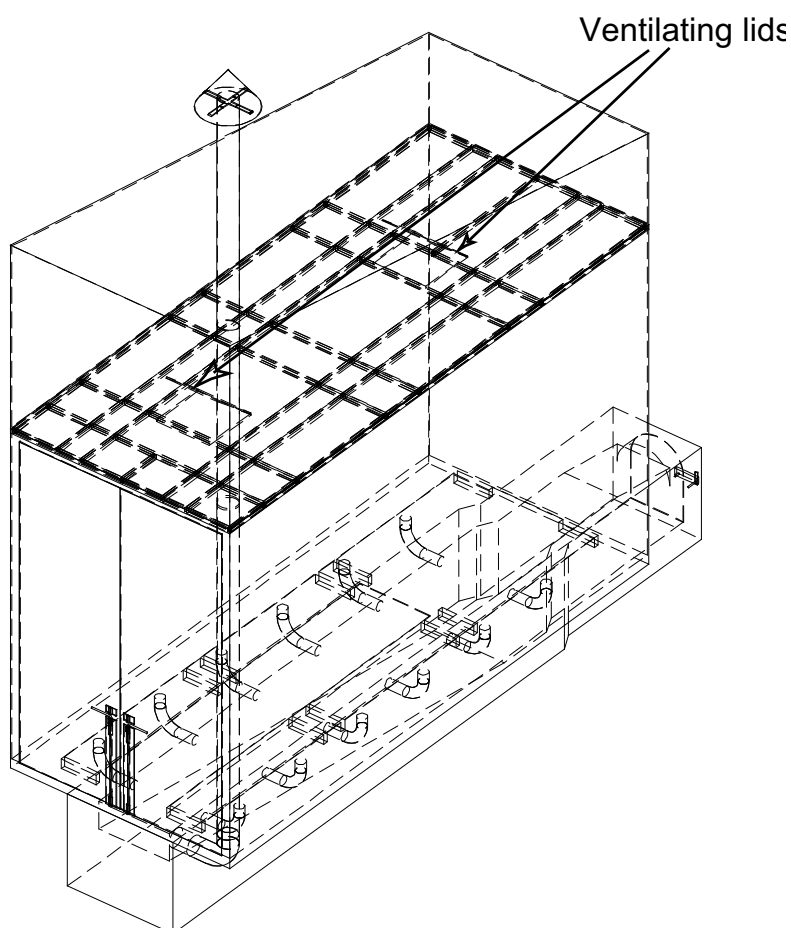
รูปที่ 5.20 น้ำหนักอนุภาคเขม่าที่เกาะบนผิวขั้วเก็บของเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์
จากการใช้งาน 10 ชั่วโมง

6. การกระจายของอุณหภูมิและการไหลและการใช้ไม้พื้นของห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

6.1 การกระจายของอุณหภูมิในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

การทดลองชุดนี้เป็นการทดลองเพิ่มเติมที่ไม่ได้เสนอในข้อเสนอโครงการ แต่เห็นว่าจำเป็นต้องมีข้อมูลการกระจายของอุณหภูมิและประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงของห้องรมสำหรับการรรมยางปกติ ที่ยังไม่มีมีการปรับปรุง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับใช้เปรียบเทียบกับห้องรมที่จะทำการปรับปรุงต่อไป

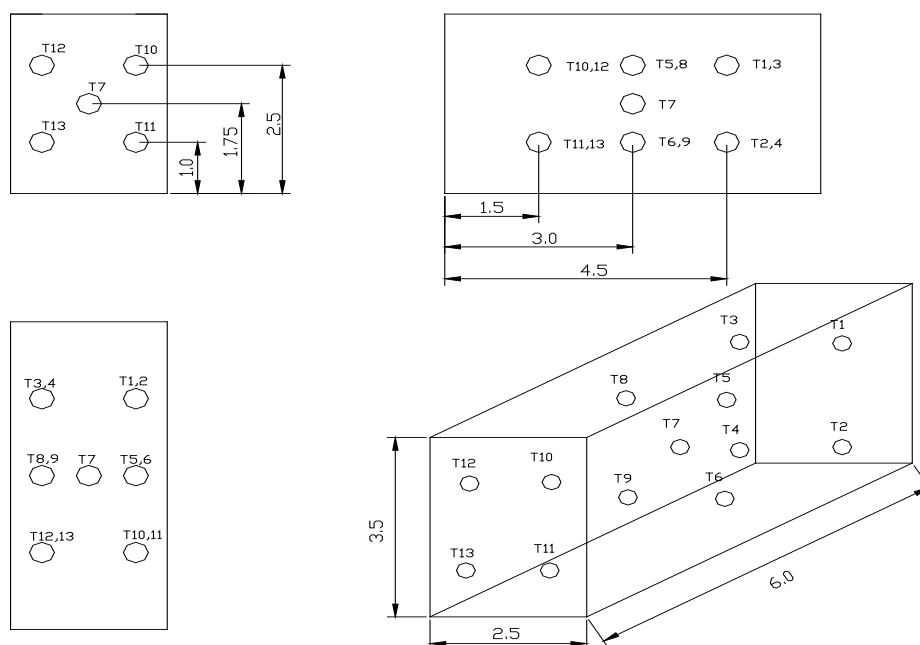
ห้องรมที่ใช้เป็นตัวอย่างครั้งนี้เป็นห้องรมรุ่นปี 2537 จำนวน 2 ห้อง ของสหกรณ์สวนยางบ้านทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2.5 ม. x 6.0 ม. x 3.5 ม. และมีลักษณะเหมือนกับห้องรมยางรุ่นเดียวกันของสหกรณ์อื่น ดังแสดงในรูปที่ 6.1 การวัดอุณหภูมิในห้องรมใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ติดที่ตำแหน่งต่าง ๆ จำนวน 13 จุด ในห้อง ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ใช้สวิตช์เลือกอุณหภูมิ (Digicon, TS84HT และ TS85H) สำหรับอ่านค่าครั้งละจุดด้วยเครื่องอ่านดิจิตอล (Primus, CM-006) การอ่านค่าอุณหภูมิจะอ่านทุก ๆ 3 ชั่วโมง



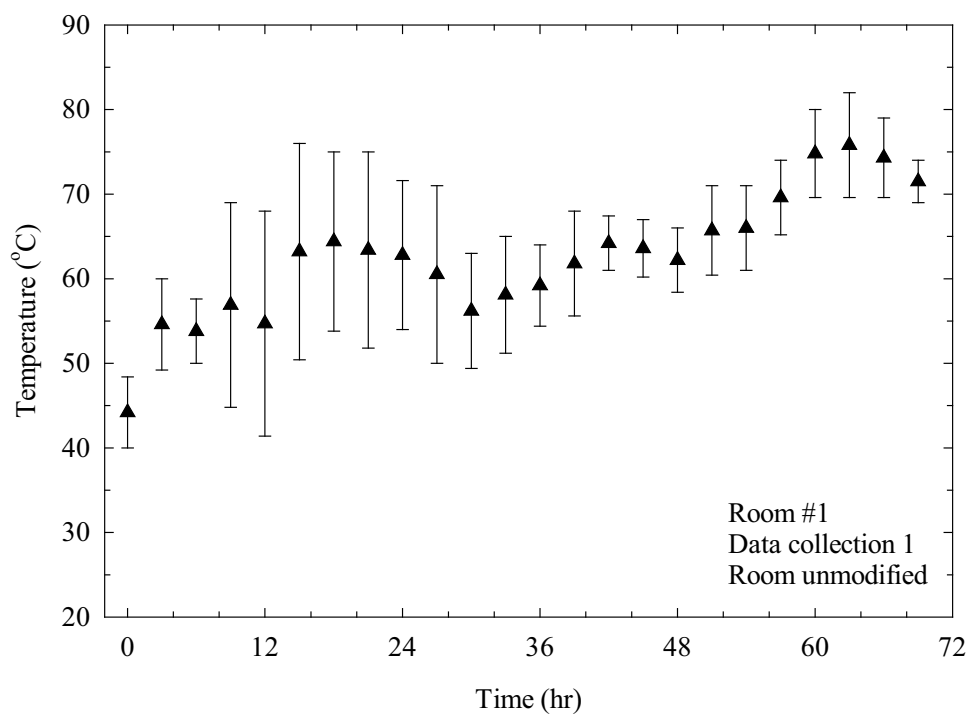
รูปที่ 6.1 แผนผังห้องรมยางที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

ผลของการวัดอุณหภูมิทั้ง 2 ห้อง ๆ ละ 2 ชุด แสดงในรูปที่ 6.3 ถึง 6.6 โดยค่าที่แสดงเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทั้ง 13 จุด ณ เวลาใด ๆ นอกจากนี้ในกราฟยังแสดงค่าขอบเขต (bound) ของอุณหภูมิซึ่งหมายถึงค่าสูงสุด-ต่ำสุด ณ เวลานั้น ๆ ไว้ด้วย ส่วนรูปที่ 6.7 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิจากการวัดทั้ง 4 ครั้ง ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิในห้องรมมีการกระจายค่อนข้างสูง ไม่สม่ำเสมอ โดยมีความแตกต่างสูงสุดมากกว่า 20°C โดยเฉพาะในวันแรก (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข) หากพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิพบว่าในวันแรกมีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเกิน 8°C และจะลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาการรม ทั้งนี้เนื่องจากในวันแรกของการรมจะต้องเริ่มอุ่นห้องและต้องเปิดบานระบายความชื้นสุดเพื่อให้สามารถระบายความชื้นจากแผ่นยางซึ่งมีค่าสูง (ค่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นยางก่อนการรมมีค่าประมาณ 40% ฐานแห้ง) ส่วนในวันที่ 2-4 จะปิดบานระบายความชื้นเหล่านี้ การไหลที่ไม่ทั่วถึงทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ มีผลต่อการแห้งของแผ่นยาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการกระจายของอุณหภูมิให้สม่ำเสมอกว่านี้ อีกทั้งในการรมแต่ละครั้งการควบคุมอุณหภูมิยังไม่เหมือนกัน เนื่องจากพนักงานรมยางไม่ได้อ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์แต่ใช้มือสัมผัสประตูเพื่อบอกความรู้สึกว่าเมื่อใดควรเติมฟืน

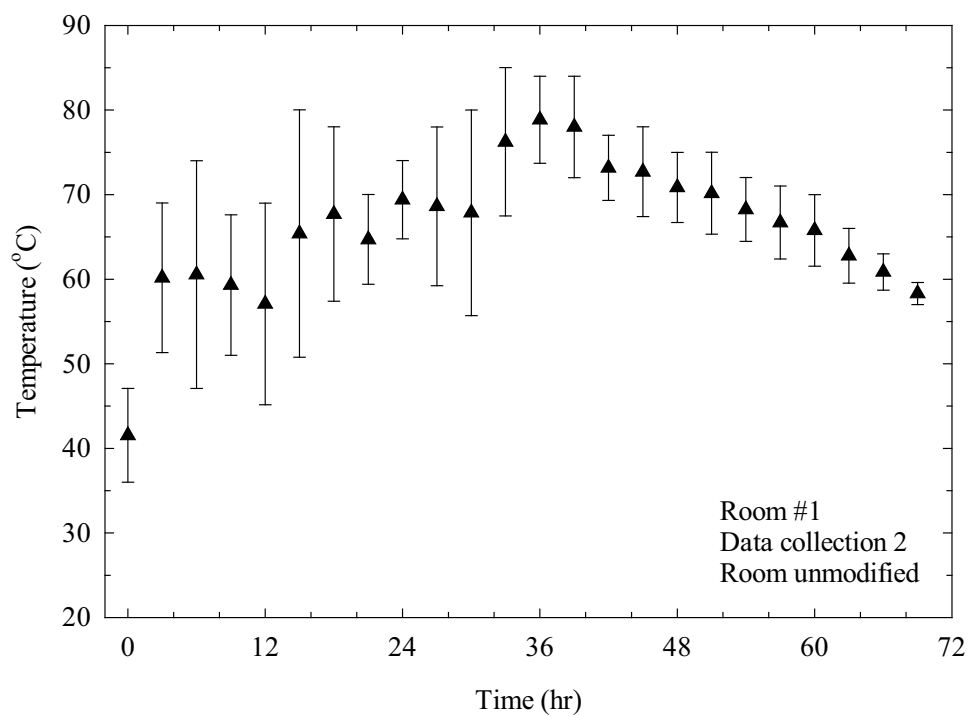
การปรับปรุงการไหลในห้องรมเป็นสิ่งที่โครงการนี้ให้ความสนใจเนื่องจากมีผลต่อการแห้งของแผ่นยาง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในโครงการนี้จะใช้การคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป เพื่อช่วยในการออกแบบเพื่อปรับปรุงการไหลในห้องรมยางให้มีความทั่วถึงมากขึ้น โดยในโครงการนี้จะศึกษาเฉพาะแนวโน้มการไหลในห้องรมเปล่าที่ไม่มีแผ่นยางเท่านั้น เนื่องจากการจำลองการไหลในสภาวะที่มีแผ่นยางค่อนข้างซับซ้อน และเกินขอบเขตของโครงการนี้



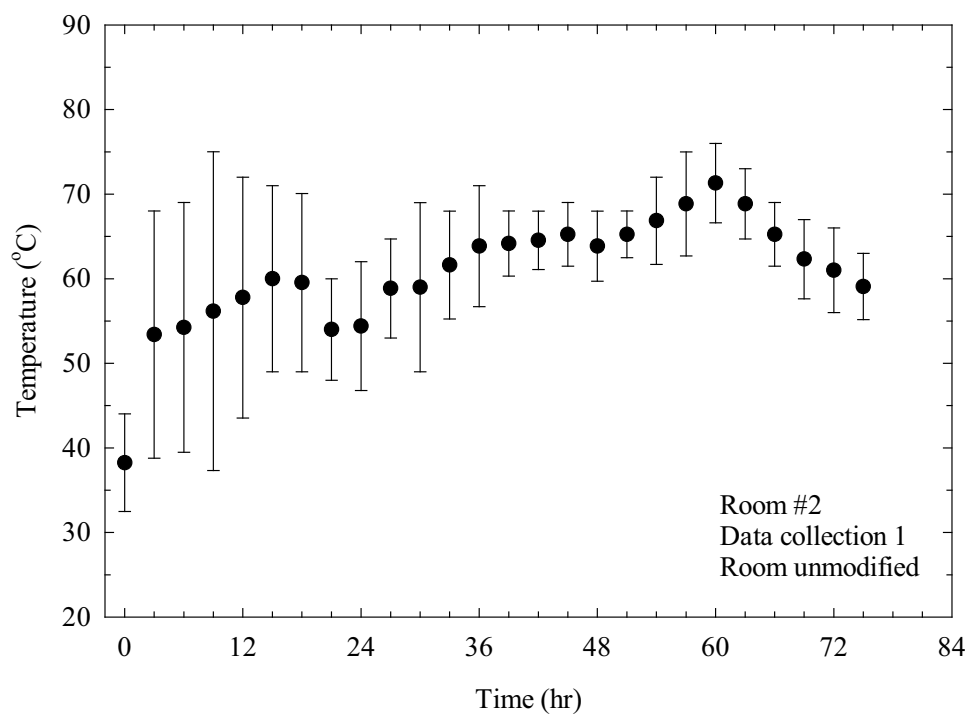
รูปที่ 6.2 ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิในห้องรม



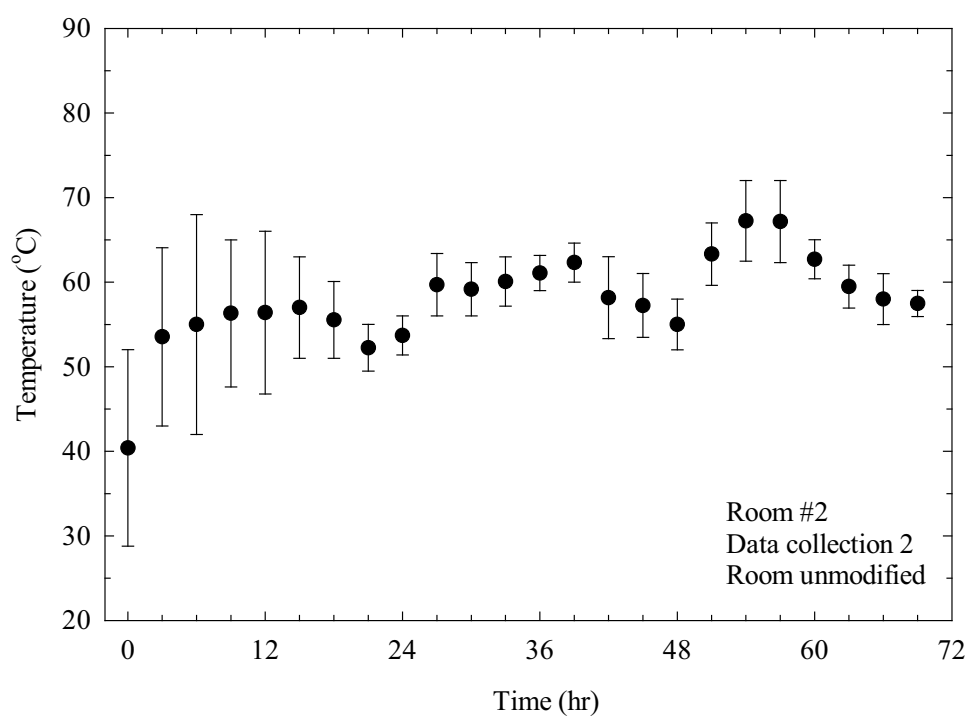
รูปที่ 6.3 อุณหภูมิในห้องรยางสำหรับห้องรตั่วอย่างหมายเลข 1 ครั้ที่ 1



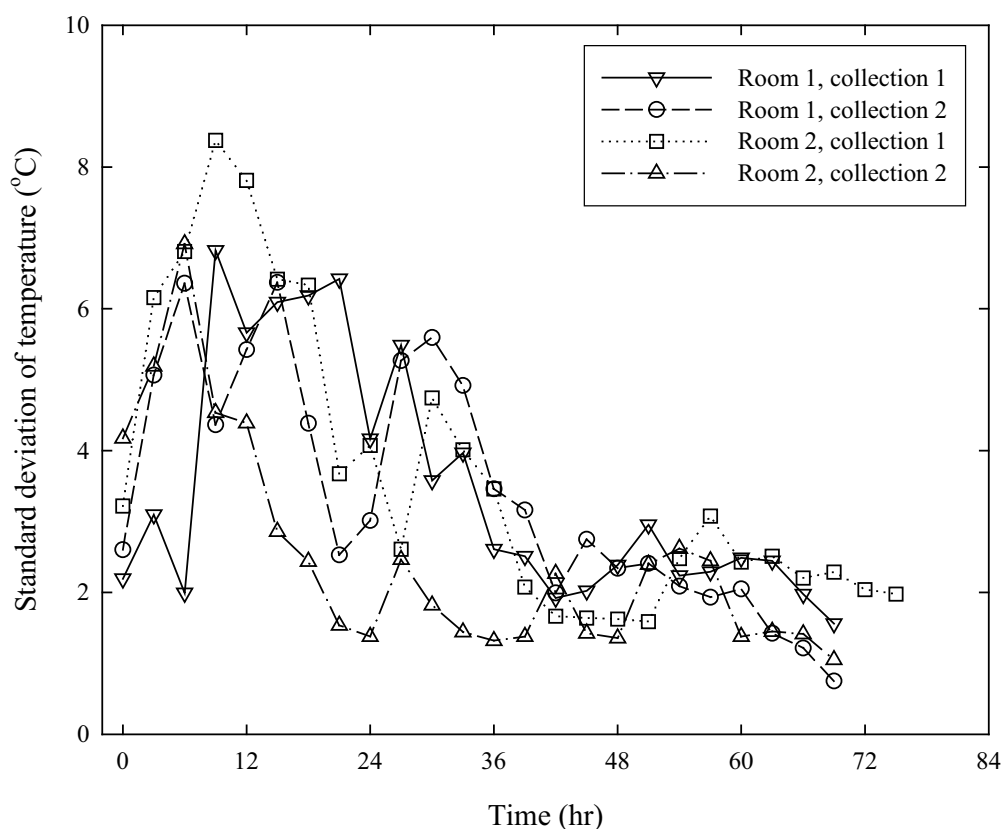
รูปที่ 6.4 อุณหภูมิในห้องรยางสำหรับห้องรตั่วอย่างหมายเลข 1 ครั้ที่ 2



รูปที่ 6.5 อุณหภูมิในห้องรยางสำหรับห้องรตั่วอย่างหมายเลข 2 ครั้งที่ 1



รูปที่ 6.6 อุณหภูมิในห้องรยางสำหรับห้องรตั่วอย่างหมายเลข 2 ครั้งที่ 2



รูปที่ 6.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิในห้องรวมจากการวัดอุณหภูมิทั้ง 4 ครั้ง

6.2 การจำลองการไหลในห้องรวมโดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษากการไหลในห้องรวมแบบเปิดเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนด้วยวิธีการเชิงพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ด้วยโปรแกรม FloVent ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป

6.2.1 วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม FloVent

ในการศึกษาการไหลมีสมการที่สำคัญ 3 สมการ คือสมการต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) สำหรับการไหลหนืดชนิดอัดตัวไม่ได้ และสมการพลังงาน (Energy equation) สมการทั้ง 3 ในโคออร์ดิเนตแบบคาร์ทีเซียน (cartesian coordinates) สามารถเขียนดังนี้

สมการต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์

แกน x

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6.2ก)$$

แกน y

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6.2ข)$$

แกน z

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (6.2ค)$$

สมการพลังงาน

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = -p(\nabla \cdot \mathbf{V}) + k \nabla^2 T + \Phi \quad (6.3)$$

โดยที่

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

และ

$$\begin{aligned} \Phi = \mu & \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

ในที่นี้ u , v และ w คือ ความเร็วของของไหลในทิศ x , y และ z ตามลำดับ p คือความดัน ρ คือความหนาแน่นของของไหล μ คือความหนืดของของไหล g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง k คือค่าการนำความร้อนของของไหล และ T คืออุณหภูมิ

ในโครงการนี้จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FloVent ในการคำนวณการกระจายของความเร็วและอุณหภูมิ โดยโปรแกรม FloVent จะทำการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ย่อย (6.1) - (6.3) ให้เป็นสมการอินทิกรัล และใช้วิธีไฟไนต์โวลุ่มในการแปลงสมการให้อยู่ในรูปสมการไม่ต่อเนื่อง (discretized) สำหรับการคำนวณคุณสมบัติ (ความเร็ว ความดัน หรือ อุณหภูมิ) ในแต่ละจุดในขอบเขตของการไหล โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดวิธีไฟไนต์โวลุ่มดูจาก Versteeg and Malalasekera (1995) และ คู่มือการใช้ FloVent (Flomerics, 2003)

6.2.2 รายละเอียดห้องรมยาง

ห้องรมยางที่ใช้ศึกษาเป็นห้องรมมาตรฐานรุ่นปี พ.ศ. 2537 (รูปที่ 6.8) มีรายละเอียดวัสดุและคุณสมบัติขององค์ประกอบแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของส่วนประกอบของห้องรมยางของสหกรณ์สวนยางรุ่นปี พ.ศ. 2537

ชื่อส่วนประกอบ	วัสดุ	ขนาด	คุณสมบัติ		
			ค่าการนำความร้อน (W/mK)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kgK)
ผนังห้องรมยาง	อิฐฉาบผิวเรียบ	2.6x3.5 (กxยxส) m	0.62	1700	800
เพดานห้องรมยาง	กระเบื้องแผ่นเรียบ	หนา 4 mm	0.056	380	1000
ประตูด้านหน้า	เหล็ก	หนา 3 mm	63	7860	420
ปล่องระบายแก๊ส	เหล็ก	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 inch	63	7860	420
ช่องระบายความชื้น	กระเบื้องแผ่นเรียบ	0.6x0.6 (กxย) m	63	7860	420
พื้นห้อง	คอนกรีต	2.6x6 (กxย) m	1.1	2100	837
พื้นเอียงในห้องส่งแก๊สร้อน	กรวดฉาบผิวด้วยคอนกรีต	1.8x6x 0.9 (กxยxส) m	0.36	1840	840
เตาเผา	อิฐฉาบผิวเรียบ	1x1.9x 1.3 (กxยxส) m	1.1	2100	837

หมายเหตุ ภายในห้องรมยางมีช่องปล่อยแก๊สร้อนขนาด 4 inch จำนวน 12 ช่อง โดยแบ่งเป็น 2 แถว ๆ ละ 6 ช่อง ระยะห่างของช่องปล่อยแก๊สร้อนเท่ากับ 0.9 m ดังแสดงในรูปที่ 6.8

เงื่อนไขของสภาวะการทำงานของห้องรมยางมีดังนี้

- อุณหภูมิบรรยากาศ 30°C
- ความดันบรรยากาศ 1 atm
- แหล่งความร้อน (heat source) มีขนาด 20 kW ที่ทำให้อุณหภูมิในห้องเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 60°C

6.2.3 ขั้นตอนการศึกษาโดยใช้โปรแกรม FloVent

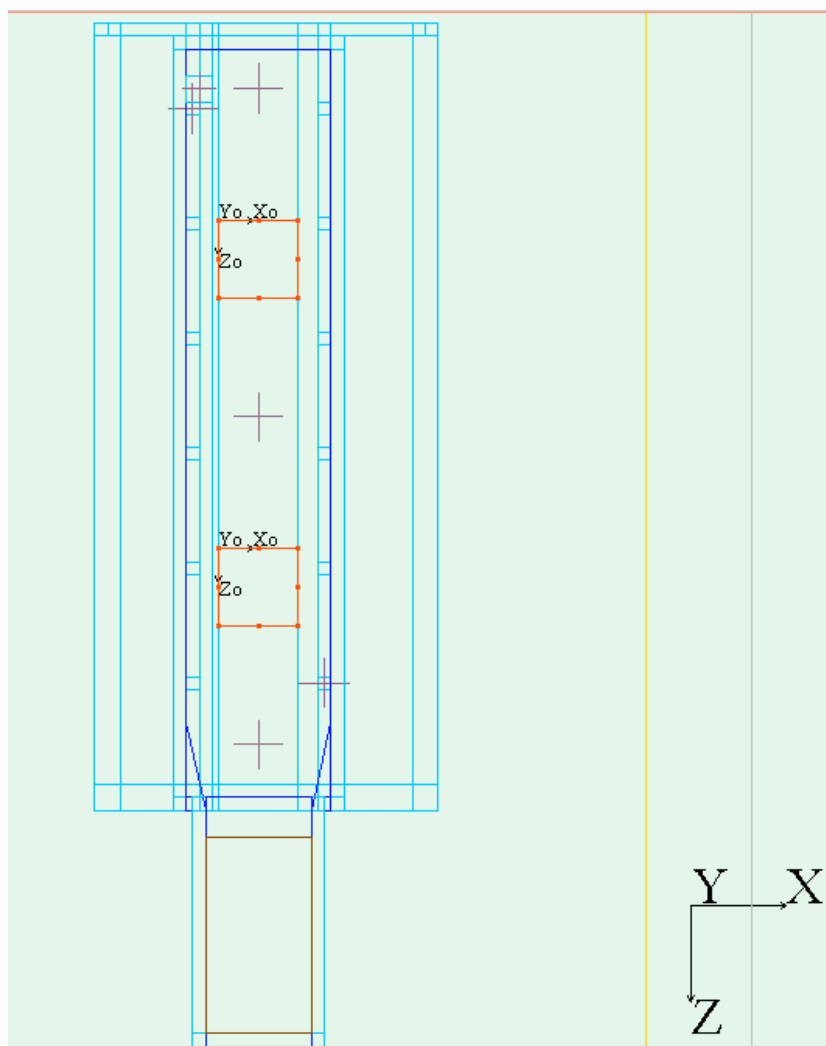
ขั้นตอนการศึกษาโดยใช้โปรแกรม FloVent มีดังนี้

- กำหนดค่าขอบเขตของสิ่งที่ศึกษา
- เปิดช่องปล่อยแก๊สร้อนขนาด 4 inch และช่องระบายแก๊สขนาด 8 inch สุด
- กำหนดค่าแรงโน้มถ่วงของโลกและสภาวะอากาศ
- กำหนดค่าของความดัน อุณหภูมิ การแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนของขอบเขตที่ศึกษา
- สร้างห้องรมพร้อมทั้งกำหนดชนิดของวัสดุและค่าของการนำความร้อนตามรูปข้างต้น

- สร้างเตาเผาพร้อมทั้งกำหนดชนิดของวัสดุ ค่าของพลังงานความร้อน (กำหนดเป็น Heat source โดยใช้ปริมาณความร้อนของไม้ฟืนที่ป้อน) และค่าของการนำความร้อน

- กำหนดค่าของ Grid เพื่อใช้ในการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์โวลุ่ม และใช้ turbulent model ชนิด $k - \varepsilon$

- กำหนด Iteration ในการคำนวณ
- ให้โปรแกรมคำนวณในสภาวะคงตัว (steady state)
- การไหลเป็นแบบธรรมชาติ (naturally-induced flow)
- แสดงผลที่ได้โดยการเขียนกราฟ
- นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัดอุณหภูมิภายในห้องรมเป่า
- ทดลองเปลี่ยนค่าของพลังงานความร้อน (Heat source) ของเตาเผาโดยแปลงจากค่าพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้ฟืน (ให้พลังงานจาก Combustion source มีค่าเท่ากับพลังงานจาก Heat source)
- ทำการคำนวณซ้ำเพื่อให้ได้ค่าการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนภายในห้องรมเป่า



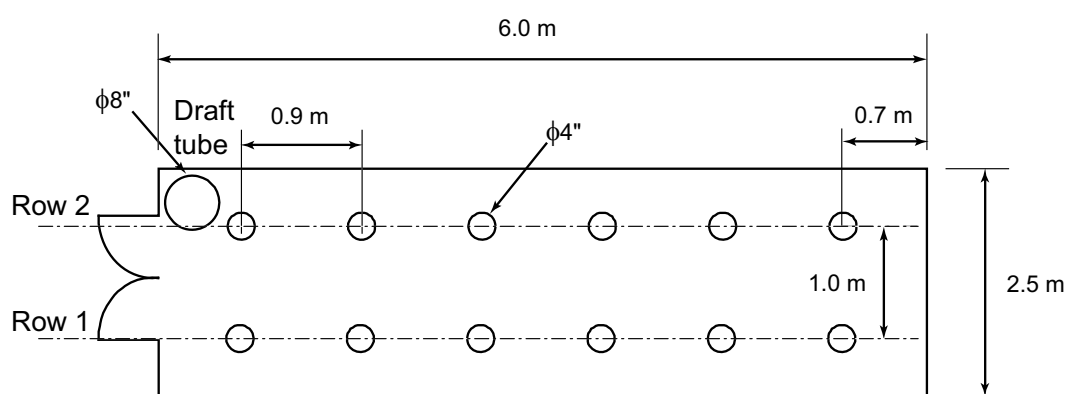
รูปที่ 6.8 การจำลองห้องรมยางด้วยโปรแกรม FloVent

6.3 ผลการจำลองการไหล

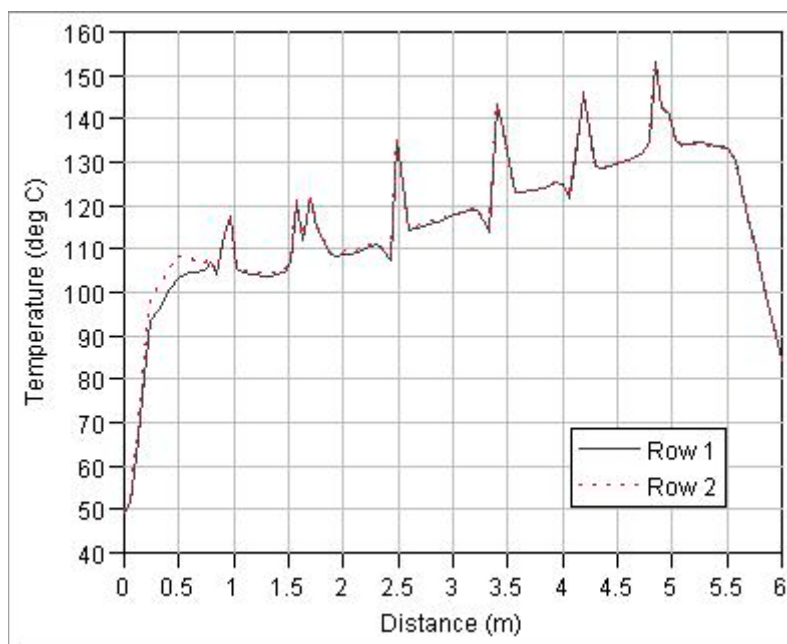
6.3.1 ผลการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งของช่องปล่อยแก๊สร้อน

ตำแหน่งของช่องปล่อยแก๊สร้อนขนาด 4 inch และช่องระบายแก๊สขนาด 8 inch แสดงในรูปที่ 6.9 เนื่องจากแก๊สร้อนไหลเข้าห้องรมผ่านช่องปล่อยแก๊สร้อนเหล่านี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลของช่องปล่อยแก๊สร้อน ต่ออุณหภูมิในห้องรมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวช่องเหล่านี้

ผลการจำลองอุณหภูมิที่ตำแหน่งของช่องปล่อยแก๊สร้อนในห้องรมยางเหนือช่อง 5 cm แสดงในกราฟรูปที่ 6.10 จากรูปจะเห็นตำแหน่งที่เป็นยอดแหลมของกราฟคือตำแหน่งของช่องปล่อยแก๊สร้อนซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น โดยที่อุณหภูมิบริเวณหลังห้องจะมีค่าสูงกว่าบริเวณหน้าห้องถึง 30°C เนื่องจากตำแหน่งของเตาเผาอยู่หลังห้อง



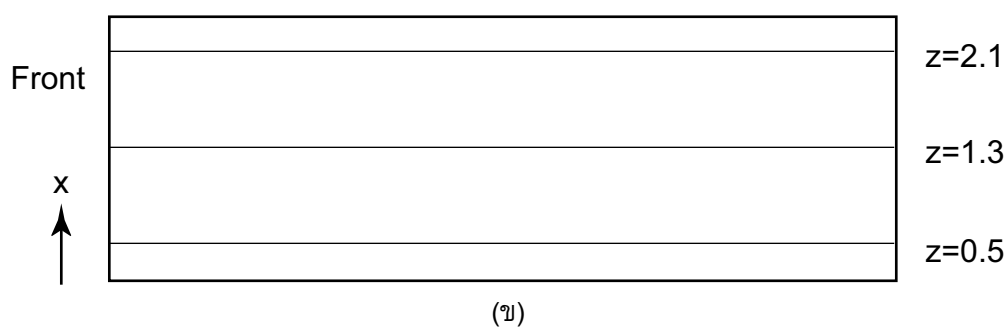
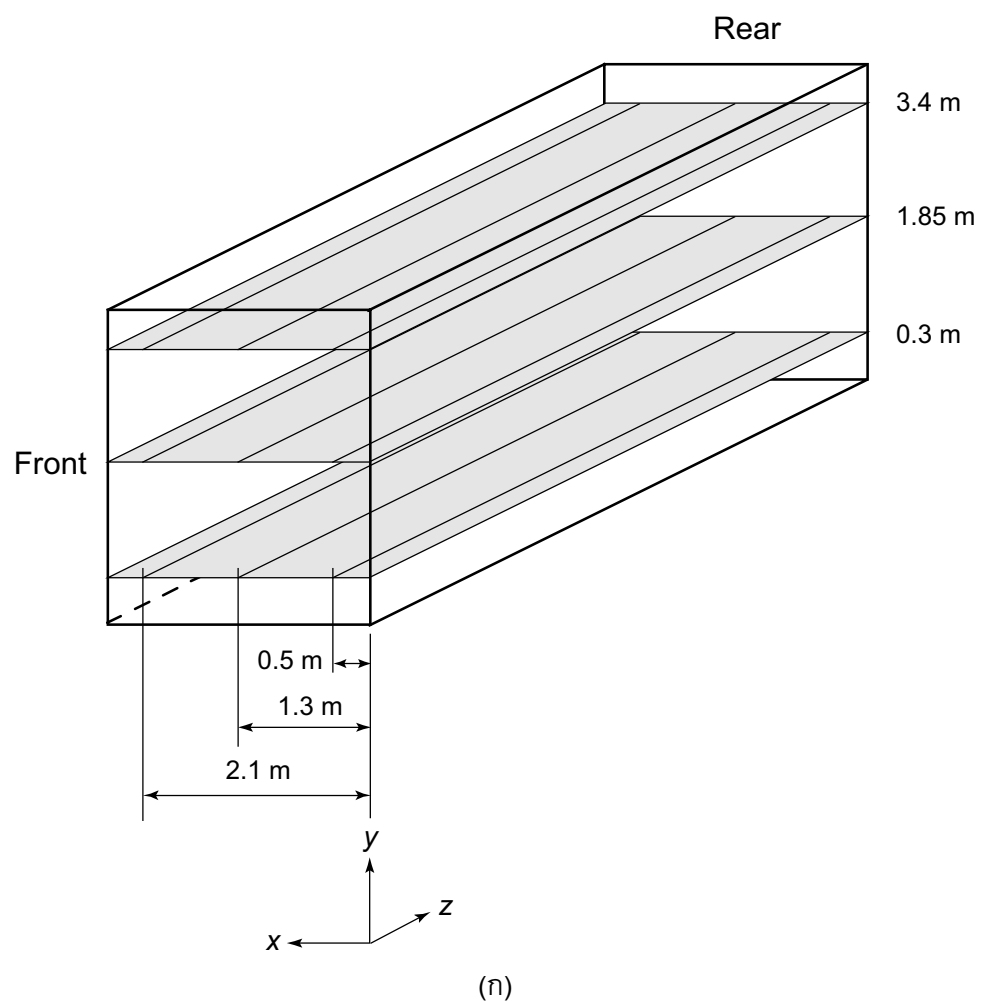
รูปที่ 6.9 ช่องปล่อยแก๊สร้อนและปล่องระบายแก๊สร้อนภายในห้องรมยาง



รูปที่ 6.10 อุณหภูมิของแก๊สร้อนที่แนวช่องปล่อยแก๊สร้อนแถวที่ 1 และ 2

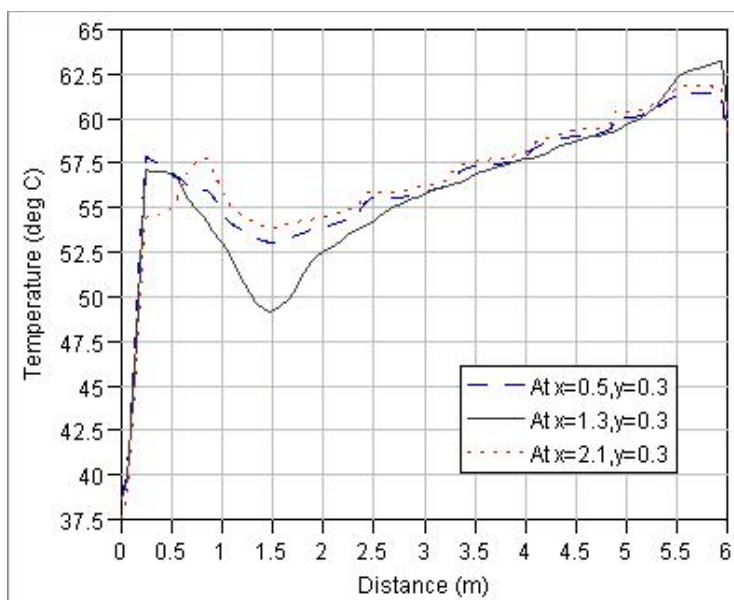
6.3.2 ผลการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ความต่ำแหน่งต่าง ๆ

การกระจายของอุณหภูมิตามความยาวของห้องจะพิจารณาที่ 3 ระนาบความสูงของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 6.11 โดยที่แต่ละระนาบจะพิจารณาที่ 3 แนว คือแนวที่ตรงกับช่องระบายแก๊ส และแนวกลางห้อง



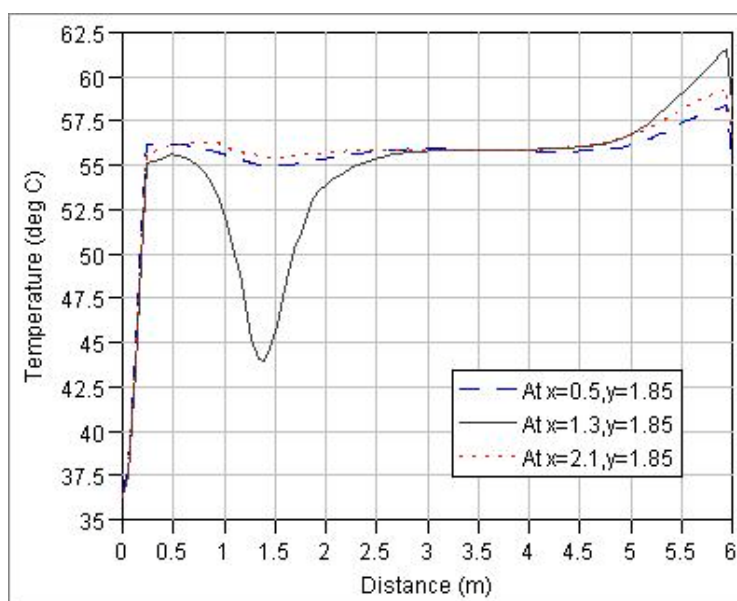
รูปที่ 6.11 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องรมยาง (ก) ภาพแสดงตำแหน่งในแนวตั้ง (ข) ภาพจากด้านบน

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 0.3 m แสดงในรูปที่ 6.12 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณด้านหลังห้องสูงกว่าด้านหน้าห้องประมาณ 10°C ส่วนอุณหภูมิในแนวกลางห้อง จะมีค่าต่ำลง ณ ความลึก 1.5 m ประตูห้อง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ตรงกับบานระบายความชื้น



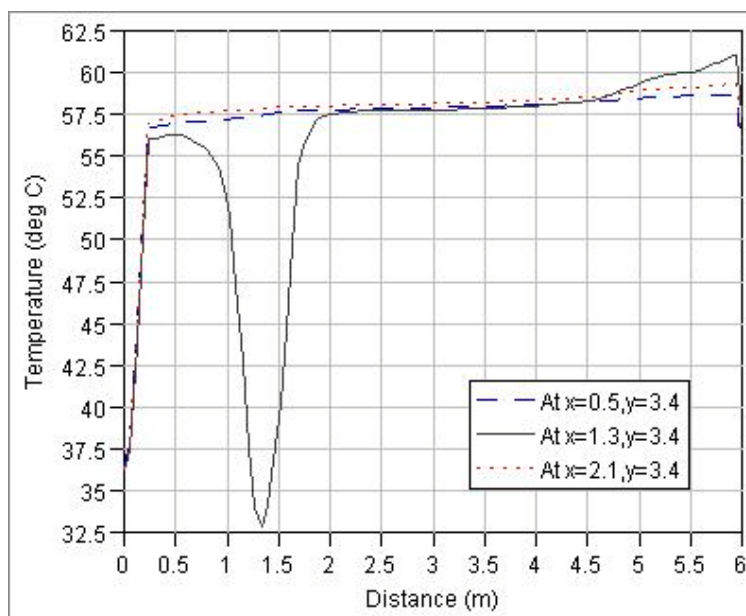
รูปที่ 6.12 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 0.3 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1.85 m แสดงในรูปที่ 6.13 จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเหมือนกับที่ระดับความสูง 0.3 m แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่หน้าห้องและหลังห้องจะลดลง ส่วนอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกับบานระบายความชื้นจะลดลงต่ำกว่า



รูปที่ 6.13 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1.85 m

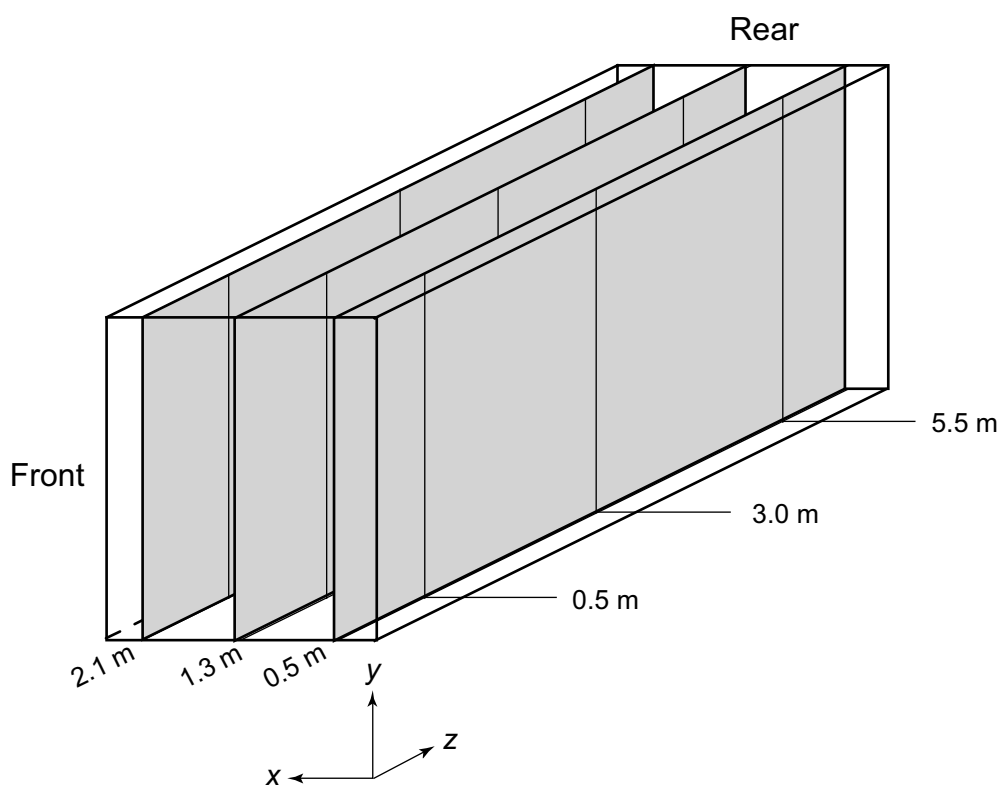
ส่วนอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 3.4 m แสดงในรูปที่ 6.14 พบว่าอุณหภูมิโดยส่วนใหญ่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าที่ระดับต่ำกว่า ยกเว้นที่ตำแหน่งตรงกับบานระบายความชื้นอุณหภูมิจะลดลงต่ำกว่าถึง 25°C ทั้งนี้ ณ ความสูง 3.4 m อยู่ต่ำกว่าบานระบายความชื้นเพียง 10 cm เท่านั้น จึงทำให้มีอิทธิพลจากบานระบายความชื้นสูงมาก



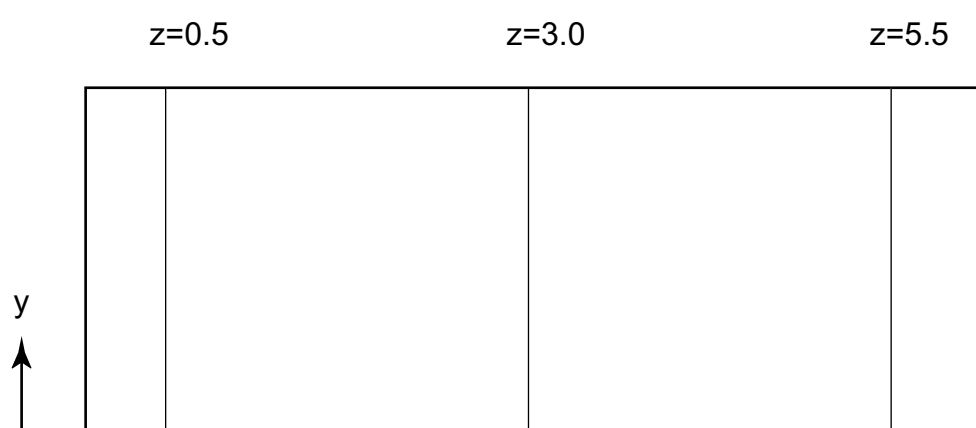
รูปที่ 6.14 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 3.4 m

6.3.3 ผลการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ตำแหน่งต่าง ๆ

การกระจายของอุณหภูมิตามความสูงของห้องจะพิจารณาที่ 3 ระนาบความกว้างของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 6.15 โดยที่แต่ละระนาบจะพิจารณาที่ 3 แนวความลึก คือแนวหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง



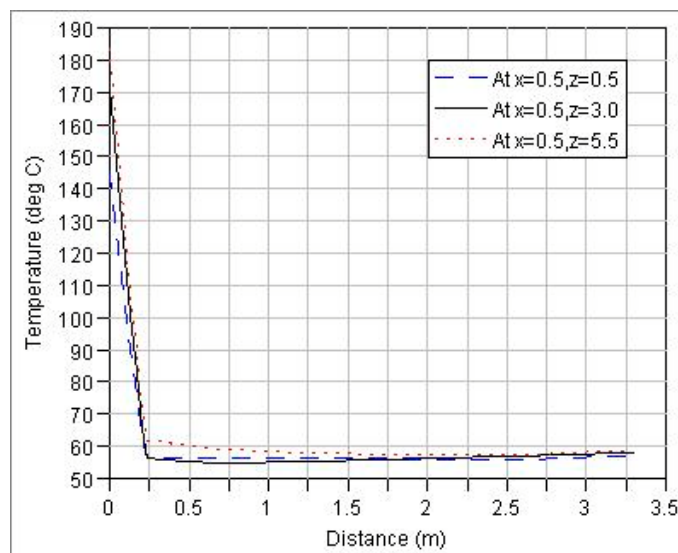
(ก)



(ข)

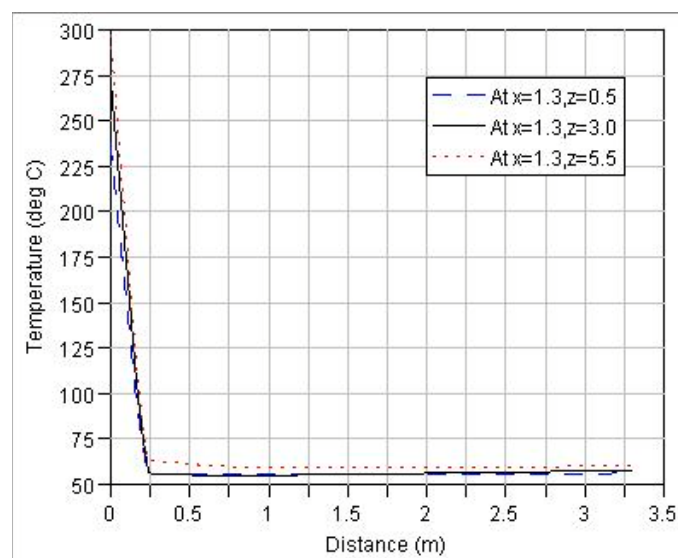
รูปที่ 6.15 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องรมยาง (ก) ภาพแสดงตำแหน่งในแนวกว้างของห้อง (ข) ภาพจากด้านข้าง

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้อง ณ ระนาบด้านขวาของห้อง ($x=0.5$ m) แสดงในรูปที่ 6.16 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณด้านล่างของห้องจะมีค่าสูงมาก และจะลดลงเหลืออุณหภูมิในช่วง $50-60^{\circ}\text{C}$ เมื่อตำแหน่งสูงกว่าพื้นเกิน 25 cm จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิตามความสูงของห้องรวมจะค่อนข้างคงที่ ส่วนตำแหน่งด้านหลังห้องจะมีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งหน้าห้องประมาณ 5°C



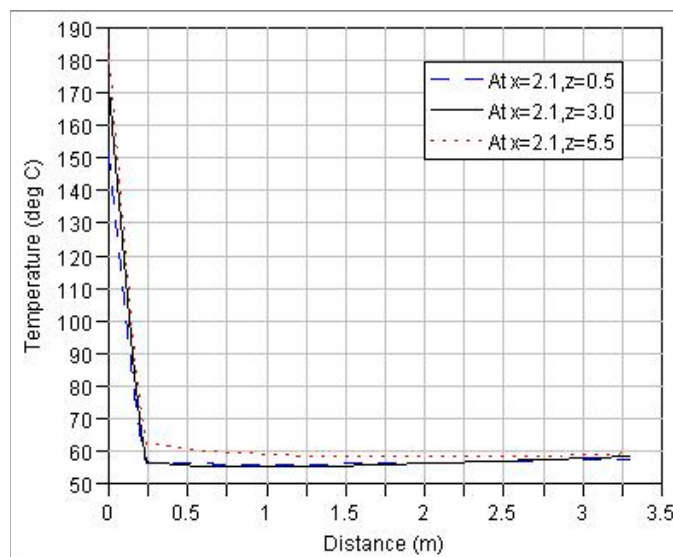
รูปที่ 6.16 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ระยะห่างจากผนังห้อง 0.5 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้อง ณ ระนาบกลางห้อง ($x=1.3$ m) แสดงในรูปที่ 6.17 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณด้านล่างของห้องจะมีค่าสูงมากและสูงกว่าในระนาบด้านขวาของห้อง และจะลดลงเหลืออุณหภูมิในช่วง $50-60^{\circ}\text{C}$ เมื่อตำแหน่งสูงกว่าพื้นเกิน 25 cm เช่นเดียวกัน แนวโน้มทั่วไปจะเหมือนกัน



รูปที่ 6.17 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ระยะห่างจากผนังห้อง 1.3 m

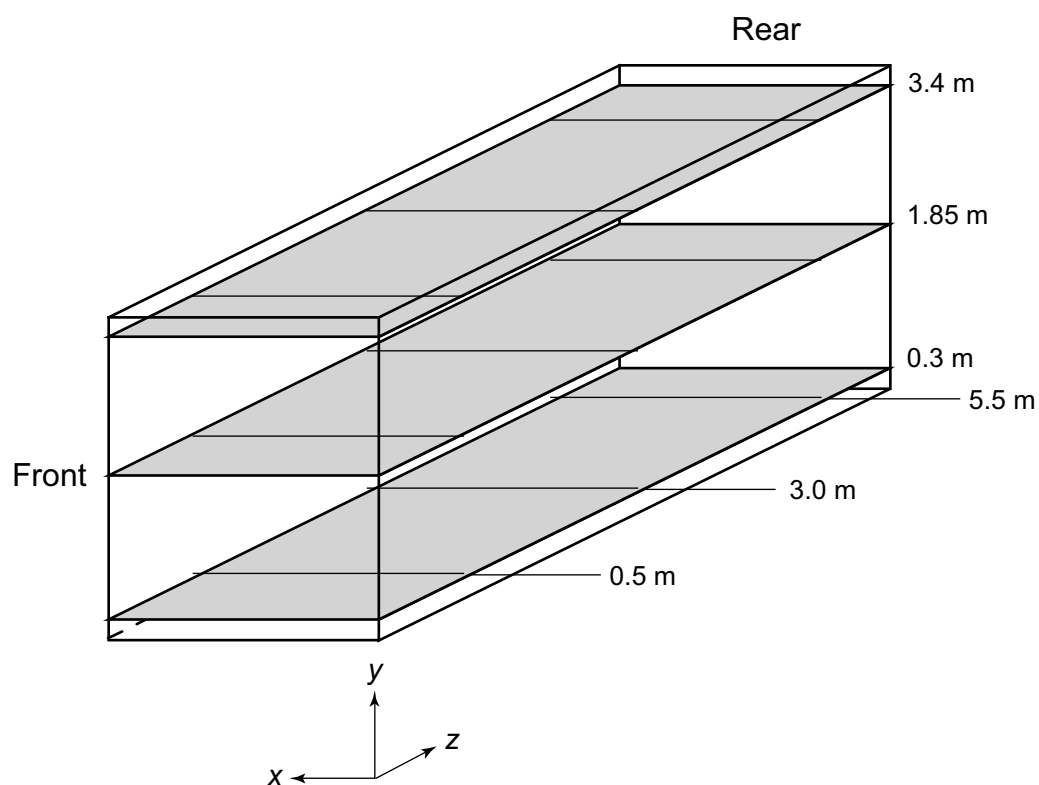
อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้อง ณ ระนาบด้านซ้ายของห้อง ($x=2.1$ m) แสดงในรูปที่ 6.18 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับกรณีด้านขวาของห้อง เนื่องจากลักษณะของห้องเกือบสมมาตรตามความกว้างของห้อง ยกเว้นมีท่อระบายแก๊สร้อนข้างใต้พื้นห้อง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการที่มีท่อระบายแก๊สร้อนอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของห้องไม่ทำให้มีผลต่อความสมมาตรของห้องมากนัก



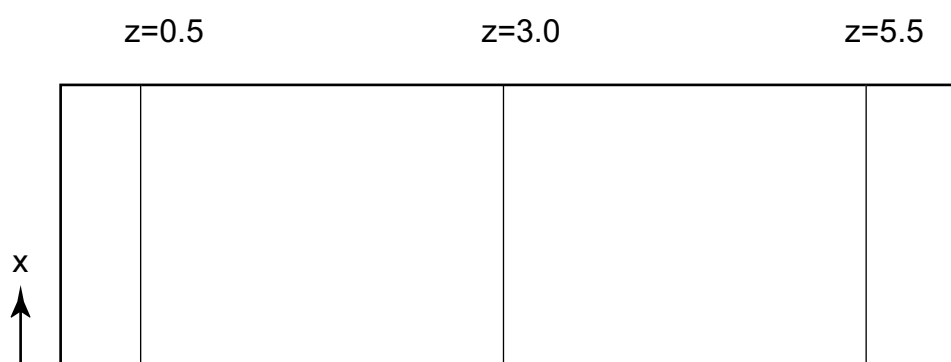
รูปที่ 6.18 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ระยะห่างจากผนังห้อง 2.1 m

6.3.4 ผลการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ตำแหน่งต่าง ๆ

การกระจายของอุณหภูมิตามความกว้างของห้องจะพิจารณาที่ 3 ระบายความสูงของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 6.19 โดยที่แต่ละระดับจะพิจารณาที่ 3 แนวความลึก คือแนวหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง



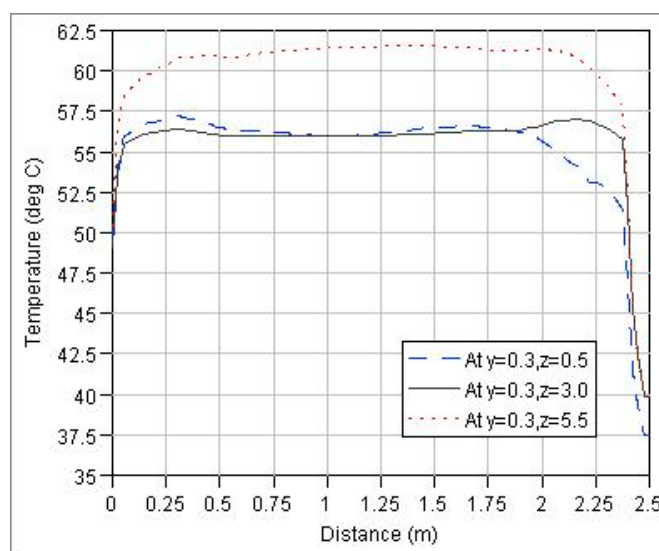
(ก)



(ข)

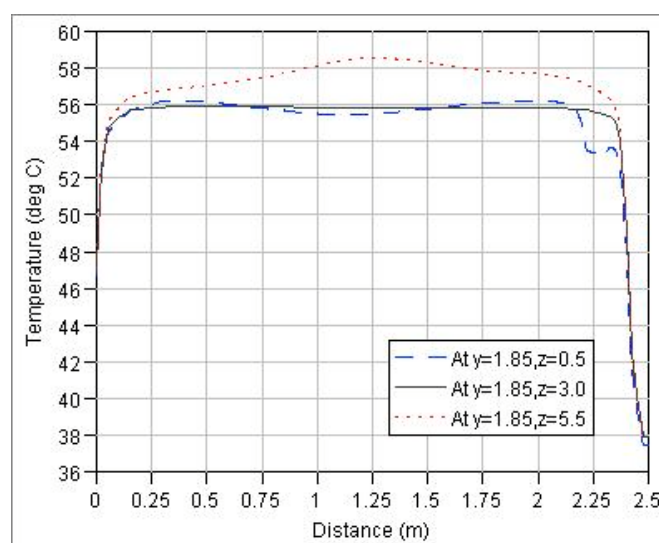
รูปที่ 6.19 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องรมยาง (ก) ภาพแสดงตำแหน่งในแนว ยาวของห้อง (ข) ภาพจากด้านบน

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้อง ณ ระนาบต่ำสุดของห้อง ($y = 0.3$ m) แสดงในรูปที่ 6.20 พบว่าโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่กระจายตามความกว้างของห้องมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นบริเวณใกล้ผนัง และเมื่อพิจารณาในแนวความลึกพบว่าบริเวณด้านหน้าและกลางห้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ แต่ในแนวด้านหลังห้องมีอุณหภูมิที่สูงกว่าประมาณ 5°C



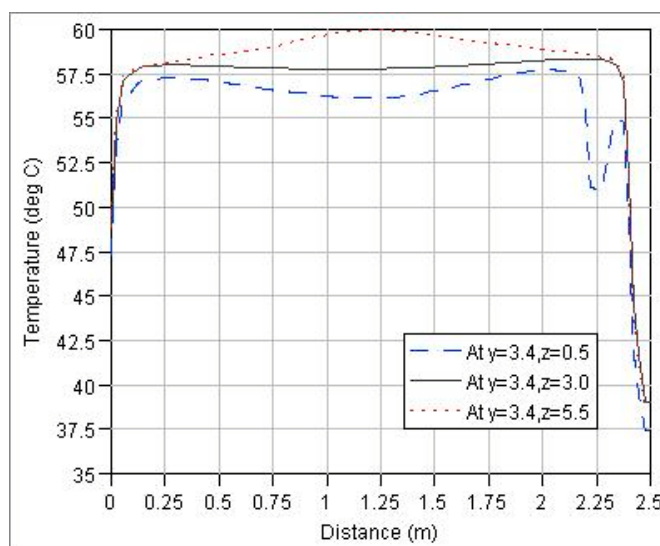
รูปที่ 6.20 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 0.3 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้อง ณ ระนาบความสูงตรงกลางของห้อง ($y = 1.85$ m) แสดงในรูปที่ 6.21 พบว่าโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่กระจายตามความกว้างของห้องมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นบริเวณใกล้ผนังเช่นเดียวกับกรณีด้านล่าง และเมื่อพิจารณาในแนวความลึกพบว่าบริเวณด้านหน้าและกลางห้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ แต่ในแนวด้านหลังห้องมีอุณหภูมิที่สูงกว่าประมาณ 3°C



รูปที่ 6.21 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1.85 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้อง ณ าระนาบความสูงตรงกลางของห้อง ($y=3.4$ m) แสดงในรูปที่ 6.22 พบว่าโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่กระจายตามความกว้างของห้องมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นบริเวณใกล้ผนังเช่นเดียวกับทั้ง 2 กรณีก่อนหน้านี้ โดยที่ระนาบกลางห้องมีการกระจายที่สม่ำเสมอที่สุด ส่วนอีก 2 ะนาบจะต่างกันทางตรงข้าม นั่นคือที่ระนาบน้าห้อง ($z=0.5$ m) อุณหภูมิจะลดต่ำลงที่ตำแหน่งกลางห้อง ส่วนที่ระนาบหลังห้อง ($z=5.5$ m) อุณหภูมิจะสูงขึ้นที่ตำแหน่งกลางห้อง โดยในแนวระนาบด้านหลังห้องมีอุณหภูมิที่สูงกว่าประมาณ 4°C

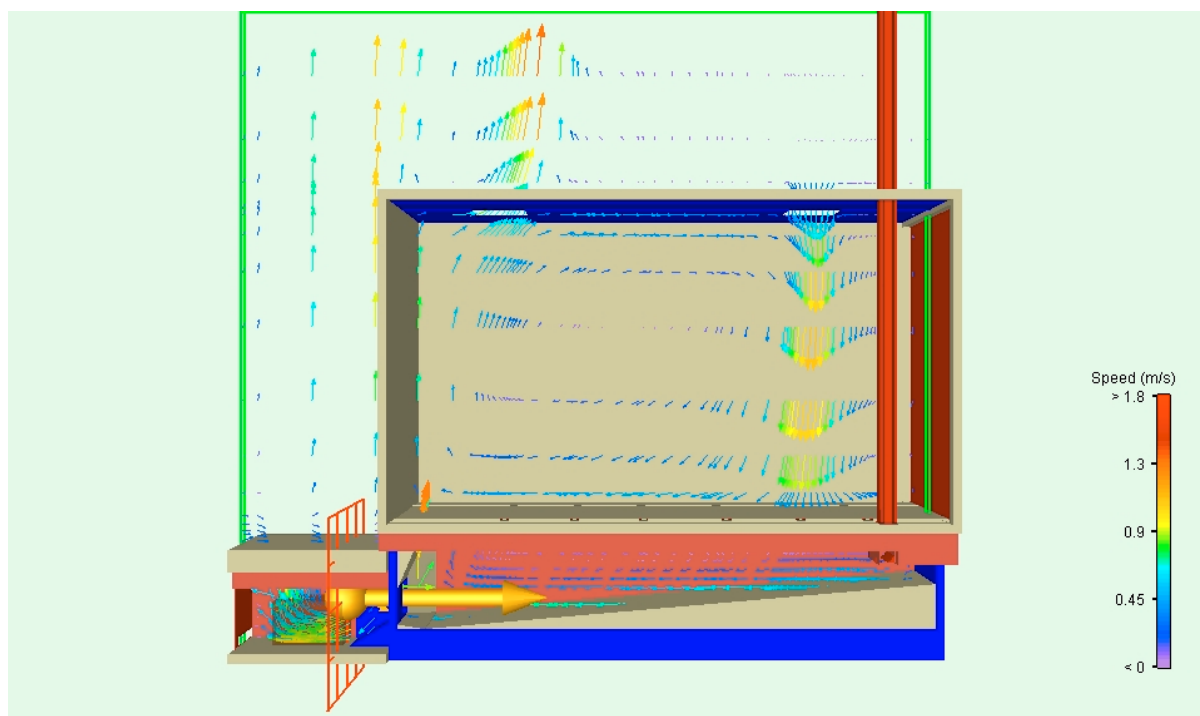


รูปที่ 6.22 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 3.4 m

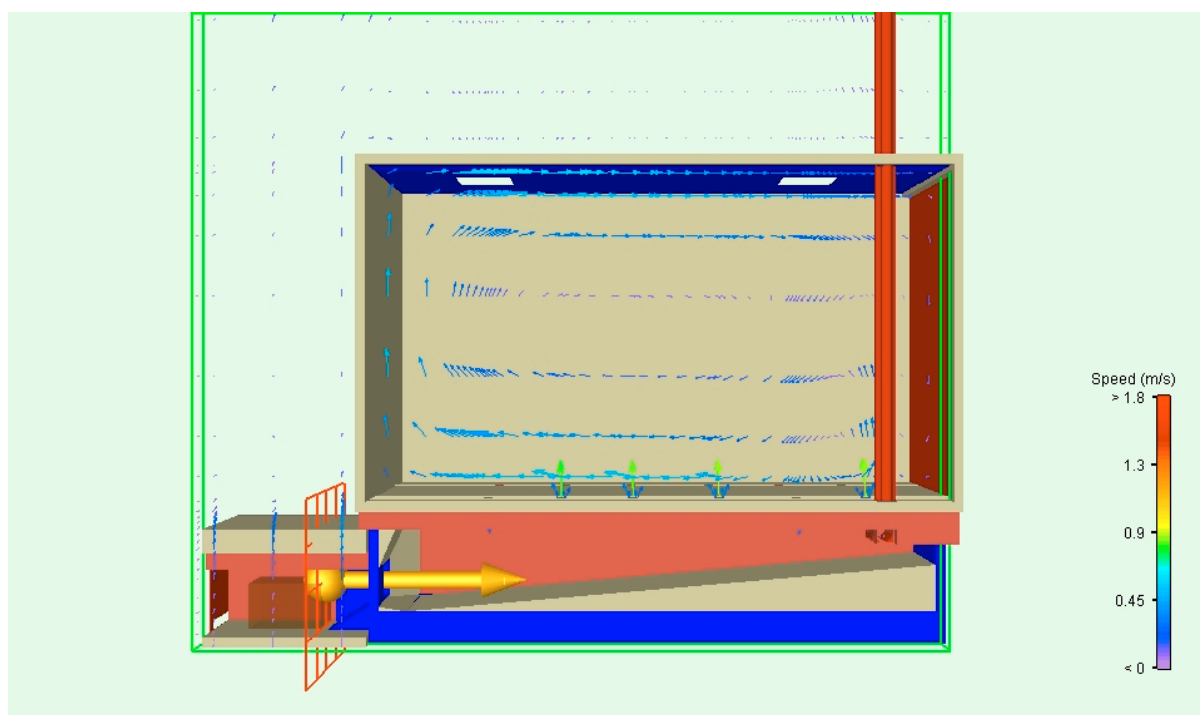
6.3.5 ผลการกระจายความเร็ว

นอกจากอุณหภูมิแล้วความเร็วของแก๊สก็มีความสำคัญต่อการแห้งของแผ่นยาง ในที่นี้ได้แสดงเวกเตอร์ความเร็วในระนาบตามความยาวของห้อง รูปที่ 6.23 แสดงการไหลของแก๊สในห้องที่ระนาบกลางห้องตามความกว้างซึ่งเป็นระนาบที่ผ่านกลางบานระบายความชื้น พบว่ามีการไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ห้องรวมทางบานระบายความชื้นด้านหน้าห้องซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนอย่างมาก จำเป็นต้องมีการปรับปรุงส่วนรูปที่ 6.24 แสดงการไหลของแก๊สในห้องที่ระนาบช่องปล่อยแก๊ส พบว่ามีการไหลของแก๊สที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

จากผลการจำลองสรุปได้ว่าการไหลและการกระจายของอุณหภูมิยังไม่สมำเสมอนักโดยเฉพาะบริเวณหลังห้องที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูงกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงการไหลของแก๊สในห้องเพื่อให้มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมากขึ้น ข้อมูลการกระจายของอุณหภูมิในห้องรวมเปล่านั้นจะถูกนำไปใช้ปรับปรุงแนวโน้มนการไหลของแก๊สร้อนในห้องรวมในบทต่อไป เพื่อให้การแห้งตัวของแผ่นยางมีความสม่ำเสมอมากขึ้น



รูปที่ 6.23 การไหลของแก๊สในห้องที่ระนาบกลางห้องตามความกว้าง



รูปที่ 6.24 การไหลของแก๊สในห้องที่ระนาบช่องปล่อยแก๊ส

6.4 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนและคุณภาพแผ่นยาง

การวัดปริมาณการใช้ไม้ฟืนและคุณภาพแผ่นยางของห้องรมสหกรณ์สวนยางที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงได้ทำการศึกษาโดยใช้สหกรณ์ตัวอย่าง 2 แห่ง คือ

1. สหกรณ์สวนยางบ้านทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา
2. สหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา

6.4.1 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนและคุณภาพแผ่นยางของสหกรณ์สวนยางบ้านทุ่งโพธิ์

จากตารางที่ 6.2 ซึ่งแสดงปริมาณยางและปริมาณการใช้ไม้ฟืนของห้องรมยางตัวอย่างของสหกรณ์สวนยางบ้านทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา ในช่วงเดือน ธค. 2545 - มิย. 2546 พบว่า ปริมาณไม้ฟืนที่ใช้เฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 10 ครั้ง มีค่าประมาณ 1,226 กิโลกรัมต่อตันยางรวม หรือ 1.226 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมยางรวม ปริมาณยางรวมที่ได้ในการรมยางแต่ละครั้งห้องรมประมาณ 1077 กิโลกรัม ซึ่งได้เป็นยางดีเฉลี่ย 751 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 70 % ของยางรวม ส่วนที่เหลือเป็นยางคัทตึงเฉลี่ย 132 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 12 % ของยางรวม และยางฟองเฉลี่ย 194 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 18 % ของยางรวม ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการรมยางทั้งหมดคือ 3 วัน ข้อมูลจากสหกรณ์นี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น ไม่ถูกนำไปเปรียบเทียบกับห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว เนื่องจากไม่ได้เป็นสหกรณ์เป้าหมายที่จะปรับปรุงห้องรม

ตารางที่ 6.2 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนและปริมาณยางในการรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา ในช่วงเดือน ธค. 2545 - มิย. 2546 -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง

ครั้งที่	ห้องรมที่	จำนวนวัน	ยางดี (กก)	ยางคัทตึง (กก)	ยางฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	ปริมาณยางรวม (กก)	ปริมาณไม้ฟืน (กก)	ปริมาณไม้ฟืนต่อปริมาณยาง (กก ไม้ฟืนต่อตันยาง)
1	2	3	748	123	118	0	0	988	1418	1434
2	2	3	946	175	46	0	0	1167	1314	1125
3	2	3	941	96	11	0	0	1047	1363	1301
4	2	3	649	101	213	0	0	963	1167	1212
5	2	3	373	154	525	0	0	1052	1076	1023
6	7	3	883	80	76	0	0	1039	1630	1569
7	7	3	768	159	250	0	0	1177	1249	1062
8	7	3	831	147	126	0	0	1104	1205	1092
9	7	3	526	150	538	0	0	1214	1547	1274
10	7	3	841	137	40	0	0	1019	1236	1214
เฉลี่ย			751	132	194	0	0	1077	1320	1226
% ยาง			70	12	18	0	0	100		

6.4.2 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนและคุณภาพแผ่นยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน

เนื่องจากสหกรณ์บ้านหัวถนนเป็นสหกรณ์เป้าหมายที่จะปรับปรุงห้องรม ดังนั้นข้อมูลจากสหกรณ์นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว จากตารางที่ 6.3 ซึ่งแสดงปริมาณยางและปริมาณการใช้ไม้ฟืนของห้องรมยางตัวอย่างของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา ในช่วงเดือน มิ.ย. 2547 ซึ่งเป็นช่วงเปิดกรีดยาง และมีฝนตก พบว่า ปริมาณไม้ฟืนที่ใช้เฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 6 ครั้ง มีค่าประมาณ 1,647 กิโลกรัมต่อตันยางรวม หรือ 1.647 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมยางรวม ซึ่งมีค่าสูงมาก และระยะเวลาที่ใช้ในการรมยางทั้งหมดเฉลี่ย 7.7 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ยาวนานมาก ซึ่งสาเหตุอาจมาจากการเป็นยางจากการเปิดกรีดยางใหม่ และมีฝนตกชุกทำให้อากาศชื้นและไม้ฟืนเปียก นอกจากนี้พบว่ายางที่รีดในช่วงนี้มีความหนาประมาณ 4 mm ซึ่งหนากว่าปกติ (2-3 mm) เนื่องจากลูกกรีดยางของเครื่องรีดอยู่ค่อนข้างห่าง ส่วนปริมาณยางรวมที่ได้ในการรมยางแต่ละครั้งในช่วงเดือน มิ.ย. 2547 - กค. 2547 แสดงในตาราง 6.4 ซึ่งส่วนหนึ่งได้จากการเก็บข้อมูลเองในตาราง 6.3 และอีกส่วนหนึ่งได้จากการเก็บข้อมูลของทางสหกรณ์ซึ่งไม่ได้เก็บระยะเวลาการรมและปริมาณไม้ฟืนที่ใช้ จากการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 25 ครั้ง พบว่าปริมาณยางรวมมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1,174 กิโลกรัม ซึ่งได้เป็นยางดีเฉลี่ย 1,035 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 88% ของยางรวม ส่วนที่เหลือเป็นยางคัททิ้งเฉลี่ย 38 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 3% ของยางรวม ยางฟองเฉลี่ย 47 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 4% ของยางรวม และยางดิบเฉลี่ย 54 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 5% ของยางรวม

ตารางที่ 6.3 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนและปริมาณยางในการรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา ในช่วงเดือน มิ.ย. 2547 -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง

ครั้งที่	ห้องรมที่	จำนวนวัน	ยางดี (กก)	ยางคัททิ้ง (กก)	ยางฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	ปริมาณยางรวม (กก)	ปริมาณไม้ฟืน (กก)	ปริมาณไม้ฟืนต่อปริมาณยาง (กก ไม้ฟืนต่อตันยาง)
1	1	7	161	149	562	17	0	889	1924	2164
2	5	8	747	110	402	0	0	1259	1782	1415
3	4	6	886	100	258	10	0	1254	1708	1362
4	3	8	1250	30	15	0	0	1295	2253	1740
5	6	10	1090	33	38	120	0	1281	2520	1967
6	1	7	1113	124	23	34	0	1294	1791	1384
เฉลี่ย		7.7	875	91	216	30	0	1212	1996	1647
% ยาง			72	8	18	2	0	100		

ส่วนตารางที่ 6.5 แสดงปริมาณยางและปริมาณการใช้ไม้ฟืนของห้องรมยางตัวอย่างของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 พบว่า ปริมาณไม้ฟืนที่ใช้เฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 8 ครั้ง มีค่าประมาณ 856 กิโลกรัมต่อตันยางรวม หรือ 0.856 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมยางรวม และระยะเวลาที่ใช้ในการรมยางทั้งหมดเฉลี่ย 4 วัน ส่วนปริมาณยางรวมที่ได้ในการรมยางแต่ละครั้งห้องรมประมาณ 1,310 กิโลกรัม ซึ่งได้เป็นยางดีเฉลี่ย 1,171 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 89% ของยางรวม ส่วนที่เหลือเป็นยางคัททิ้งเฉลี่ย 51 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 4% ของยางรวม ยางฟองเฉลี่ย 47 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 4% ของยางรวม และยางดิบเฉลี่ย 42 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 3% ของยางรวม ยางดิบที่รมในช่วงนี้มีความหนาประมาณ

3 mm จากการปรับเครื่องรีดยาง ส่วนปริมาณยางรวมที่ได้ในการมยางแต่ละครั้งในช่วงเดือน มค. 2548 จากข้อมูลของสหกรณ์ แสดงในตาราง 6.6 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณยางฟองสูงถึง 13% ส่วนยางดีมีเพียง 80% ซึ่งมีต่ำ่มาก กราฟปริมาณการเติมไม้พินในช่วงเวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 6.25 ส่วนกราฟปริมาณการใช้ไม้พินสะสมแสดงในรูปที่ 6.26 จะเห็นได้ว่าอัตราการใช้ไม้พินค่อนข้างคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงอัตราการเติมพินในช่วง 2-4 วันสุดท้ายอัตราการใช้เชื้อเพลิงควรลดลงเนื่องจากเนื้อยางมีความชื้นต่ำและบานระบายความชื้นในห้องรมถูกปิดหมด การเติมเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างคงที่นี้สาเหตุหลักคือการปล่อยแก๊สร้อนทิ้งผ่านปล่องระบายแก๊สนั่นเอง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการมยางในปัจจุบันของ สกย. สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในปริมาณสูง และคุณภาพยางแผ่นไม่สม่ำเสมอ โดยมีสัดส่วนยางดีต่ำกว่า 90%

ตารางที่ 6.4 ปริมาณยางในการมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน มิย. 2547 - กค. 2547 -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง

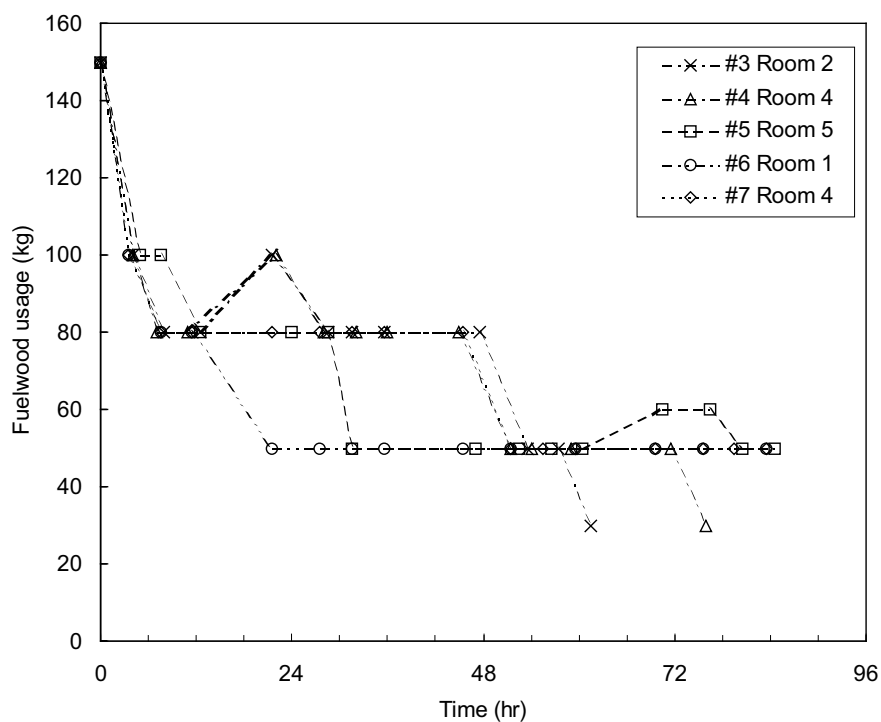
ห้องรมที่	ยางดี (กก)	ยางกัสดึง (กก)	ยางฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	รวม (กก)
1	161	149	562	17	0	889
5	747	110	402	0	0	1259
4	886	100	258	10	0	1254
3	1250	30	15	0	0	1295
6	1090	33	38	120	0	1281
1	1113	124	23	34	0	1294
4	1143	48	101	168	0	1460
3	1027	35	15	51	0	1128
6	1180	27	36	0	0	1243
2	996	36	33	60	0	1125
5	660	23	70	5	0	758
1	1025	48	80	2	0	1155
3	1078	25	27	128	0	1258
4	1194	39	120	63	0	1416
5	692	58	176	50	0	976
1	1184	25	62	0	0	1271
2	837	10	0	0	0	847
4	1055	44	57	55	0	1211
3	803	30	60	0	0	893
5	1277	46	15	62	0	1400
1	1269	34	0	0	0	1303
4	1145	44	0	0	0	1189
5	650	26	19	157	0	852
3	1210	84	0	102	0	1396
2	1238	32	16	130	0	1416
เฉลี่ย	1035	38	47	54	0	1174
% ยาง	88	3	4	5	0	100

ตารางที่ 6.5 ปริมาณการใช้ไม้พื้นและปริมาณยางในการมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง

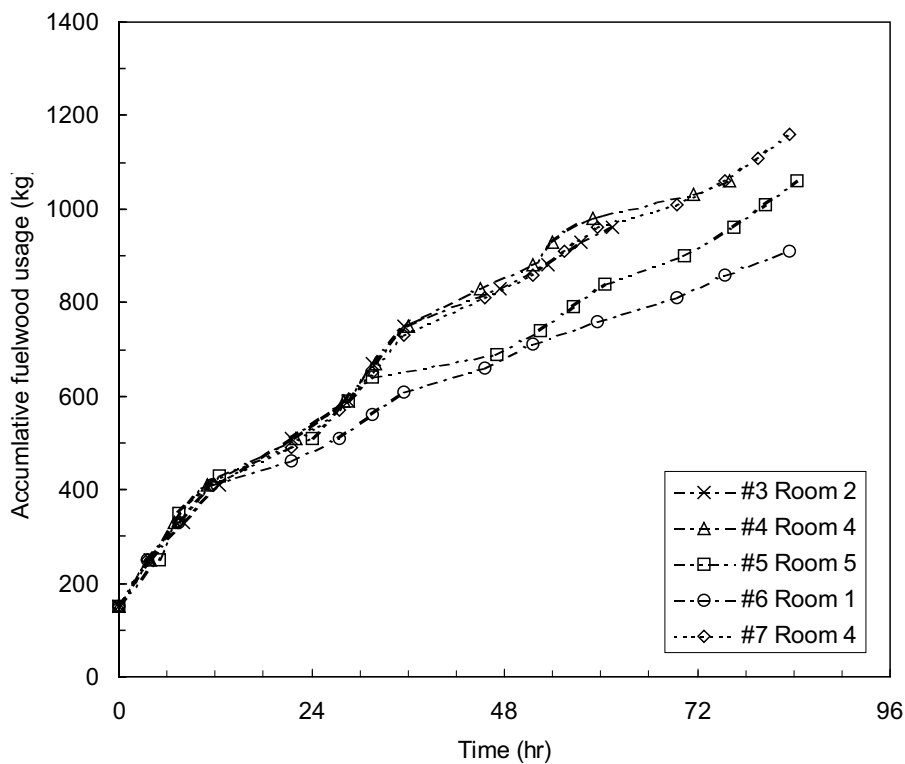
ครั้งที่	ห้องรมที่	จำนวนวัน	ยางดี (กก)	ยางคัท ตั้ง (กก)	ยาง ฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	ปริมาณ ยางรวม (กก)	ปริมาณ ไม้พื้น (กก)	ปริมาณไม้พื้นต่อ ปริมาณยาง (กก ไม้พื้นต่อตันยาง)
1	-	5	1233	46	9	150	0	1438	1340	932
2	4	4	817	46	0	43	0	906	1120	1236
3	5	5	1028	79	126	103	0	1336	1275	954
4	2	3	1067	68	47	0	0	1182	960	812
5	4	4	1370	66	0	0	0	1436	1060	738
6	5	4	1300	48	47	0	0	1395	1060	760
7	1	4	1250	51	0	0	0	1301	1250	961
8	4	4	1300	0	145	43	0	1488	910	612
เฉลี่ย		4	1171	51	47	42	0	1310	1122	856
% ยาง			89	4	4	3	0	100		

ตารางที่ 6.6 ปริมาณยางในการมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน มค. 2548 -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง

ห้องรมที่	ยางดี (กก)	ยางคัทตั้ง (กก)	ยางฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	รวม (กก)
4	1300	43	145	55	0	1543
2	1150	47	300	0	0	1497
3	801	92	650	0	0	1543
1	1409	83	57	16	0	1565
4	1210	44	0	130	0	1384
2	1210	53	50	60	0	1373
เฉลี่ย	1180	60	200	44	0	1484
% ยาง	80	4	13	3	0	100



รูปที่ 6.25 ปริมาณการเติมไม้ฟืนในช่วงเวลาต่าง ๆ ในการรรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 จำนวน 5 ครั้ง -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง



รูปที่ 6.26 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนสะสมในการรรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 จำนวน 5 ครั้ง -- ห้องรมยังไม่ได้ปรับปรุง

รูปที่ 6.27 แสดงภาพถ่ายของยางแผ่นที่แห้งแล้วจากการรมในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุงในช่วงเดือนมค. 2548 จะเห็นว่าสีของแผ่นยางค่อนข้างคล้ำ สีของแผ่นยางจะนำไปเปรียบเทียบกับแผ่นยางที่รมในห้องรมที่ปรับปรุงแล้วในบทต่อไป



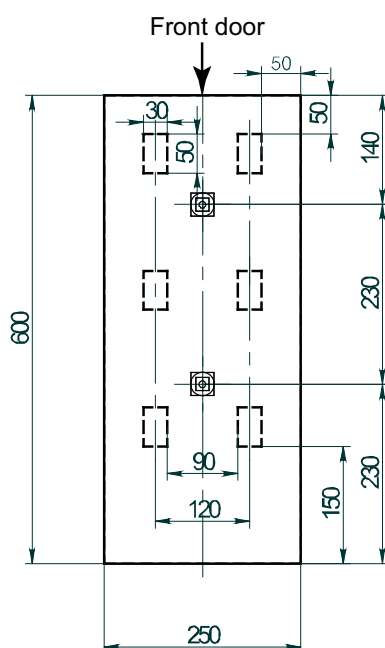
รูปที่ 6.27 ยางดีจากการรมโดยห้องที่ยังไม่ได้ปรับปรุง (ยางเข้า มค. 2548)

7. การปรับปรุงห้องรมยางและผลการทดลอง

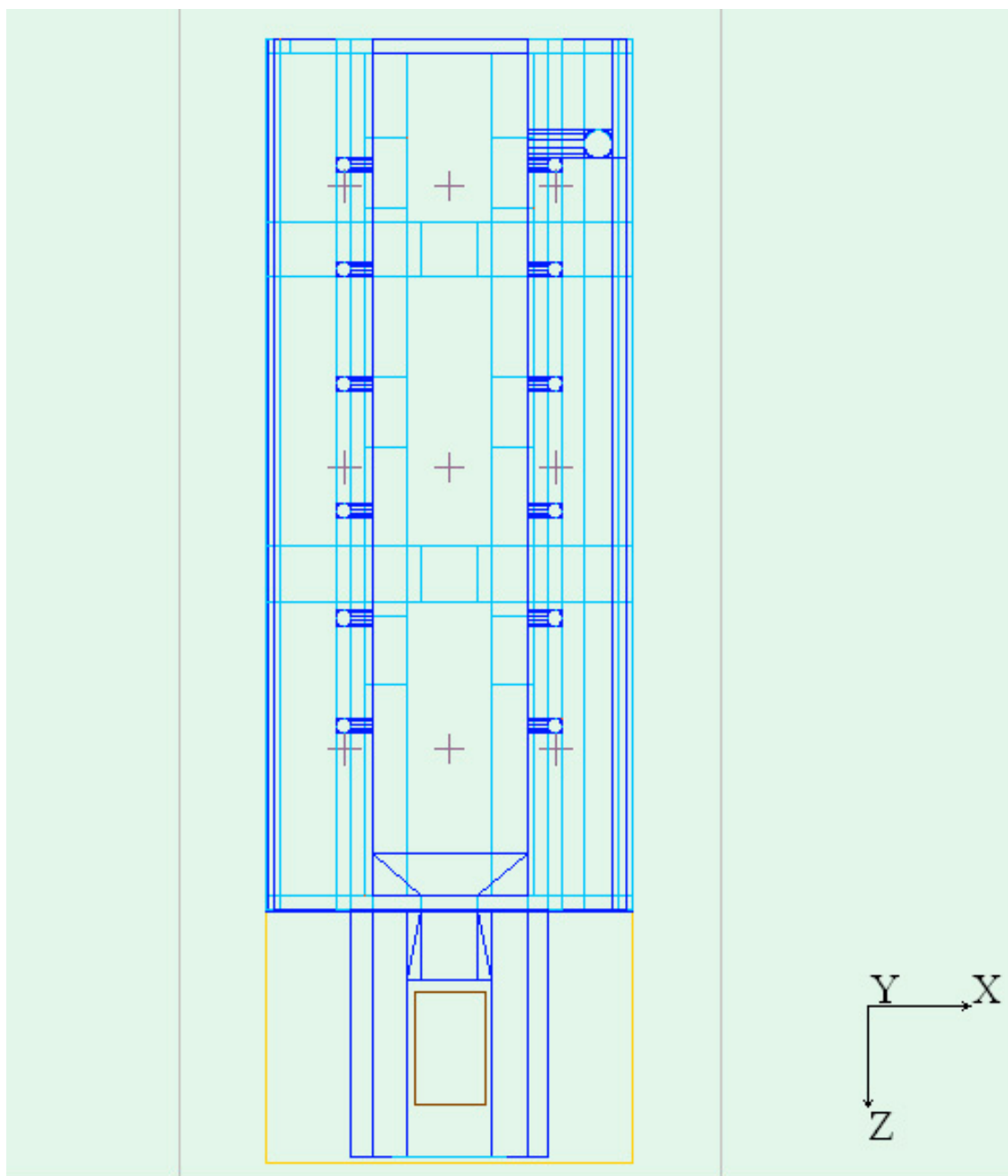
จากผลการทดลองในบทที่ผ่านมาพบว่ากรรมในห้องรมปกติของสหกรณ์โรงรม มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไม่พื้ที่สู่มาก เนื่องจากการปล่อยแก๊สร้อนทิ้งทางท่อระบาย เพื่อเป็นตัวนำให้แก๊สส่วนหนึ่งไหลเข้าห้องรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงห้องรมให้มีการใช้เชื้อเพลิงที่ลดลง โดยวิธีการหลักคือการนำแก๊สทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้เข้าสู่ห้องรม แต่เพื่อลดปริมาณเขม่าที่จะทำให้ยางมีสีคล้ำมากจึงได้ออกแบบตัวดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนในห้องรมโดยการออกแบบให้แก๊สร้อนมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ยางสุกอย่างทั่วถึงในเวลาที่ลดลงและยางที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้น จึงจำเป็นต้องออกแบบการไหลในห้องรมใหม่โดยเน้นการปรับเปลี่ยนที่ลงทุนน้อยที่สุด การออกแบบจะจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม FloVent เพื่อศึกษาตำแหน่ง ขนาด และจำนวนบานระบายความชื้นที่เหมาะสม ห้องรมที่ปรับปรุงแล้วจะให้แก๊สร้อนไหลเข้าห้องรมทั้งหมดโดยการปิดท่อระบายและทำการติดตั้งเครื่องดักจับอนุภาคแบบตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ ที่ช่องทางเข้าของแก๊สร้อนที่พื้นห้องรมจำนวน 12 ตัว

7.1 การปรับปรุงการไหลในห้องรมยาง

จากการจำลองการไหลในห้องรมเปล่าจำนวน 20 ครั้งพบว่าลักษณะของบานระบายความชื้นที่ทำให้มีการกระจายอุณหภูมิที่ดีที่สุดแสดงในรูปที่ 7.1 โดยมีบานระบายความชื้นขนาด 30 cm x 50 cm จำนวน 6 บาน และรอบ ๆ เพดานด้านบนทำการปิดรอบด้าน ส่วนหลังคาจะมีช่องระบายแก๊ส ขนาดและตำแหน่งบานระบายความชื้นบนเพดาน แสดงในรูปที่ 7.1 ส่วนแผนผังห้องรมที่ปรับปรุงจากการจำลองด้วยโปรแกรม FloVent แสดงในรูปที่ 7.2 คุณสมบัติของห้องรมที่ปรับปรุงแล้วจะเหมือนในตารางที่ 6.1 ส่วนวัสดุที่ใช้ปิดด้านบนรอบเพดานคือกระเบื้องแผ่นเรียบหนา 4 mm



รูปที่ 7.1 ขนาดและตำแหน่งบานระบายความชื้นบนเพดาน



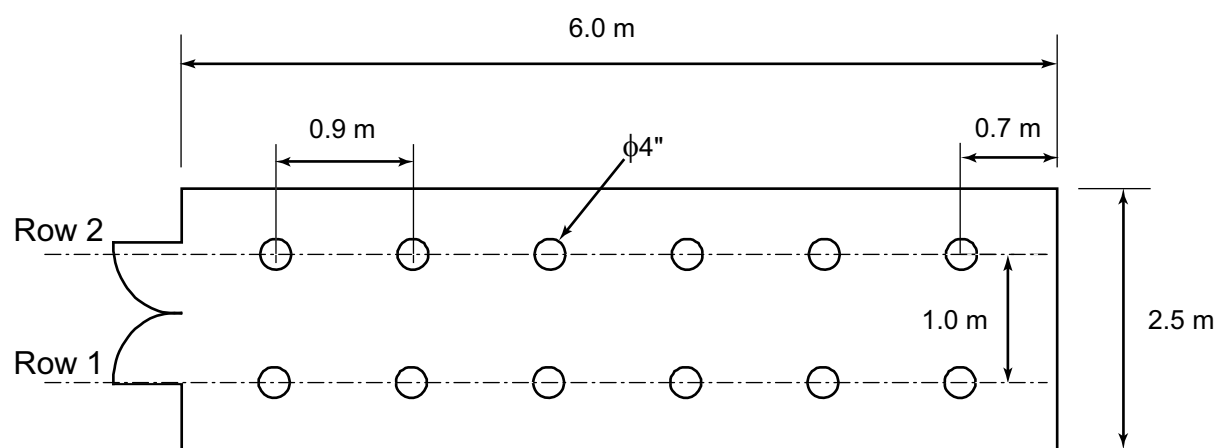
รูปที่ 7.2 แผนผังห้องรมยางปรับปรุงซึ่งจำลองด้วยโปรแกรม FloVent

7.1.1 ผลการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งของช่องปล่อยแก๊สร้อน

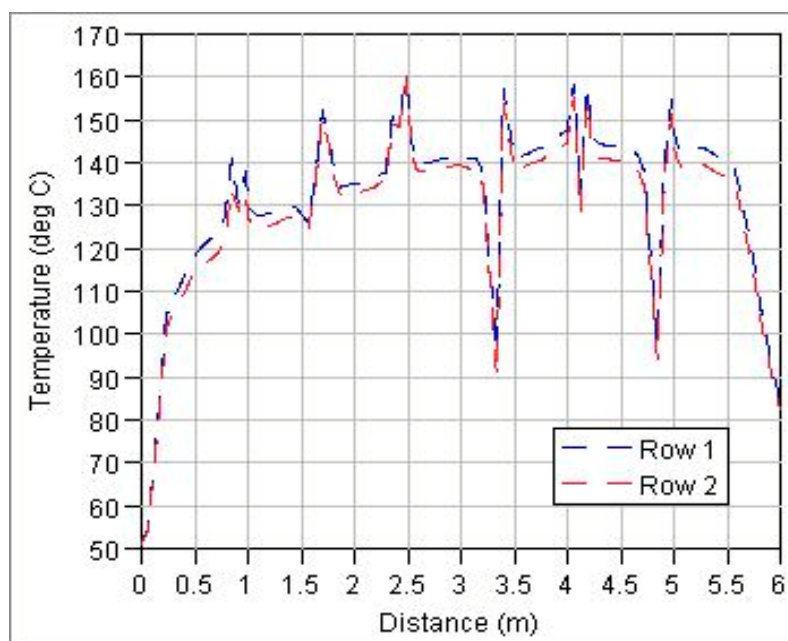
ตำแหน่งของช่องปล่อยแก๊สร้อนขนาด 4 inch เหมือนของห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุงดังแสดงในรูปที่ 7.3 โดยห้องรมที่ทำการปรับปรุงจะปิดท่อระบายแก๊ส แต่ไม่ได้ทำการรื้อออก

ผลการจำลองอุณหภูมิที่ตำแหน่งตามแนวของช่องปล่อยแก๊สร้อนในห้องรมยางเหนือช่อง 5 cm แสดงในกราฟรูปที่ 7.4 ผลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับห้องรมที่ไม่ได้ปรับปรุง แต่อุณหภูมิระหว่างหน้าห้องและหลัง

ห้องต่างกันประมาณ 20°C ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้ปรับปรุงประมาณ 5°C ส่วนความแตกต่างเล็กน้อยระหว่าง 2 แนวเกิดเนื่องจากในห้องยังมีท่อระบายแก๊สอยู่ เพียงแต่ปิดไว้ไม่ให้อากาศไหลออกเท่านั้นจึงเกิดความไม่สมมาตรขึ้น



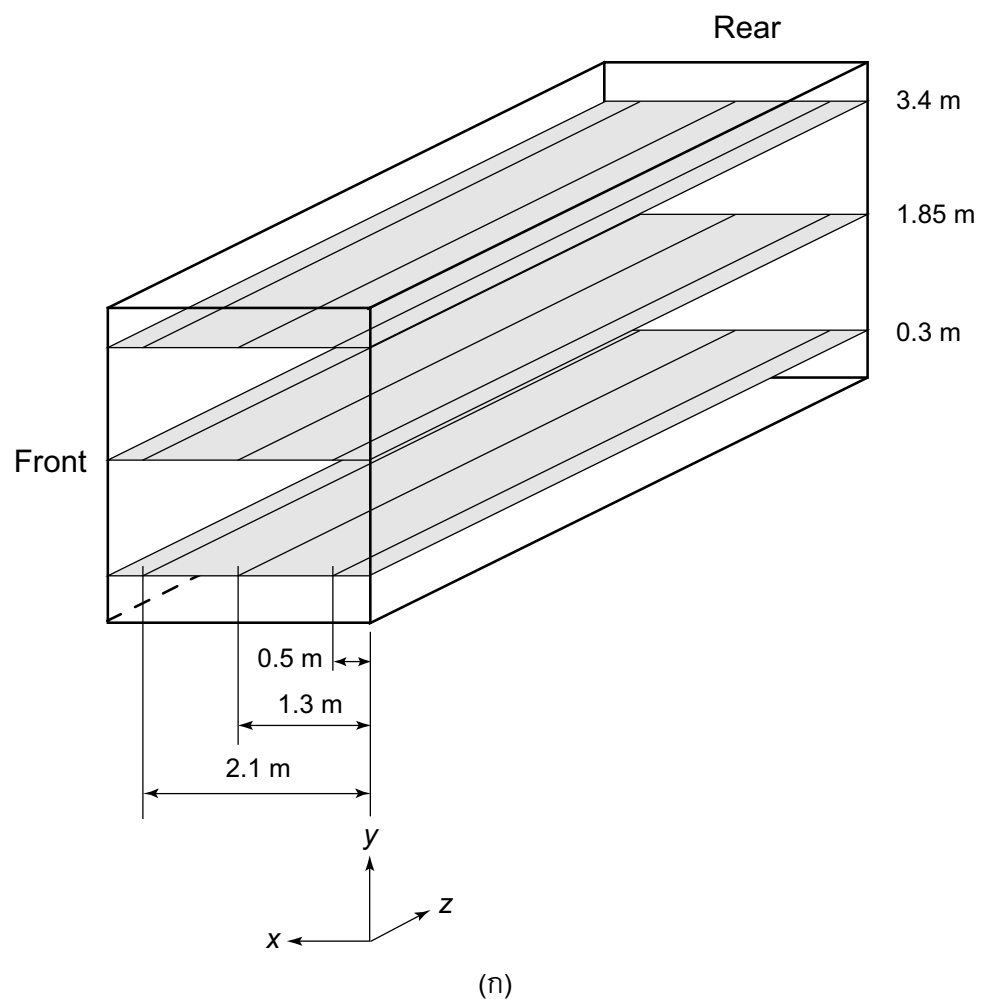
รูปที่ 7.3 ช่องปล่อยแก๊สร้อนและปล่องระบายแก๊สร้อนภายในห้องรมยาง



รูปที่ 7.4 อุณหภูมิของแก๊สร้อนที่แนวช่องปล่อยแก๊สร้อนแถวที่ 1 และ 2

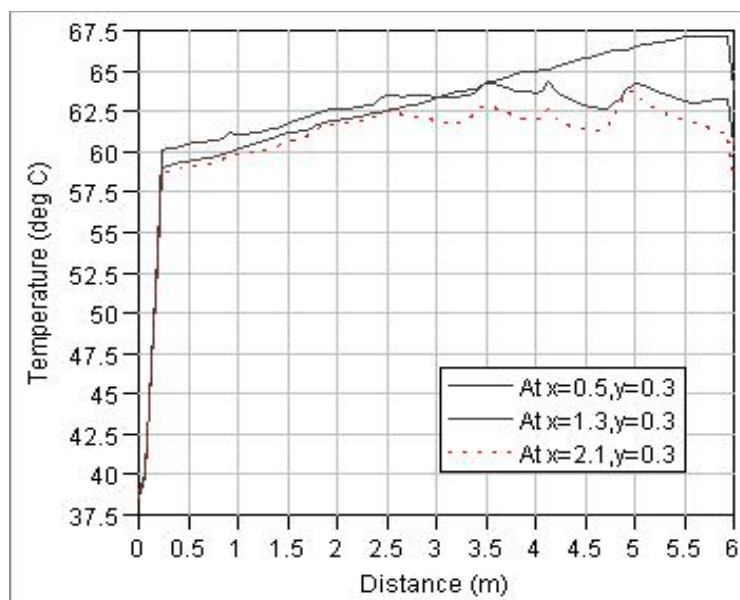
7.1.2 ผลการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ความต่ำแหน่งต่าง ๆ

การกระจายของอุณหภูมิตามความยาวของห้องจะพิจารณาที่ 3 ระนาบความสูงของห้องเหมือนของห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 7.5 โดยที่แต่ละระนาบจะพิจารณาที่ 3 แนว คือแนวที่ตรงกับช่องระบายแก๊ส และแนวกลางห้อง



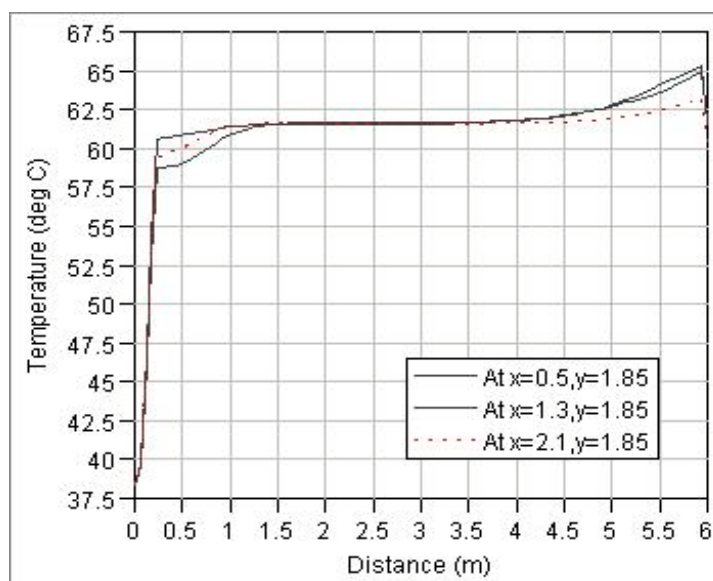
รูปที่ 7.5 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องรมยาง (ก) ภาพแสดงตำแหน่งในแนวตั้ง (ข) ภาพจากด้านบน

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 0.3 m แสดงในรูปที่ 7.6 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณด้านหลังห้องสูงกว่าด้านหน้าห้องประมาณ $2-8^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากหน้าห้องไปหลังห้อง ไม่มีผลของบานระบายความชื้นเหมือนในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง



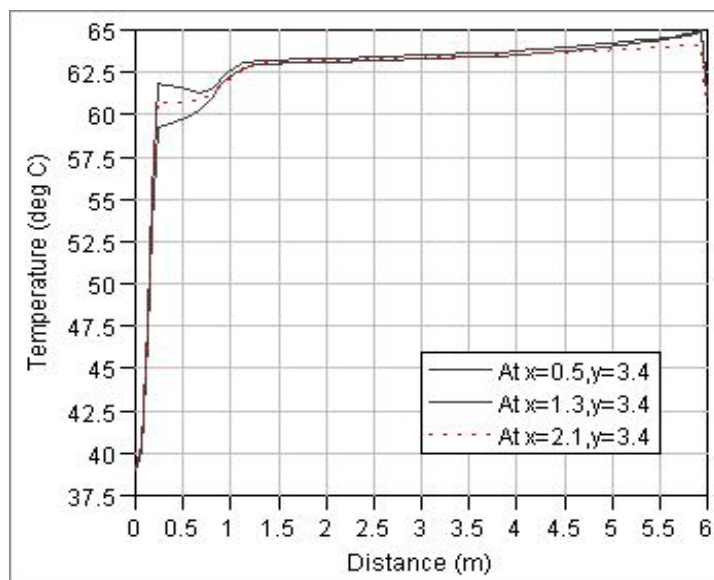
รูปที่ 7.6 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 0.3 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1.85 m แสดงในรูปที่ 7.7 จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเหมือนกับที่ระดับความสูง 0.3 m แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างหน้าห้องและหลังห้องจะลดลงเหลือประมาณ 5°C



รูปที่ 7.7 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1.85 m

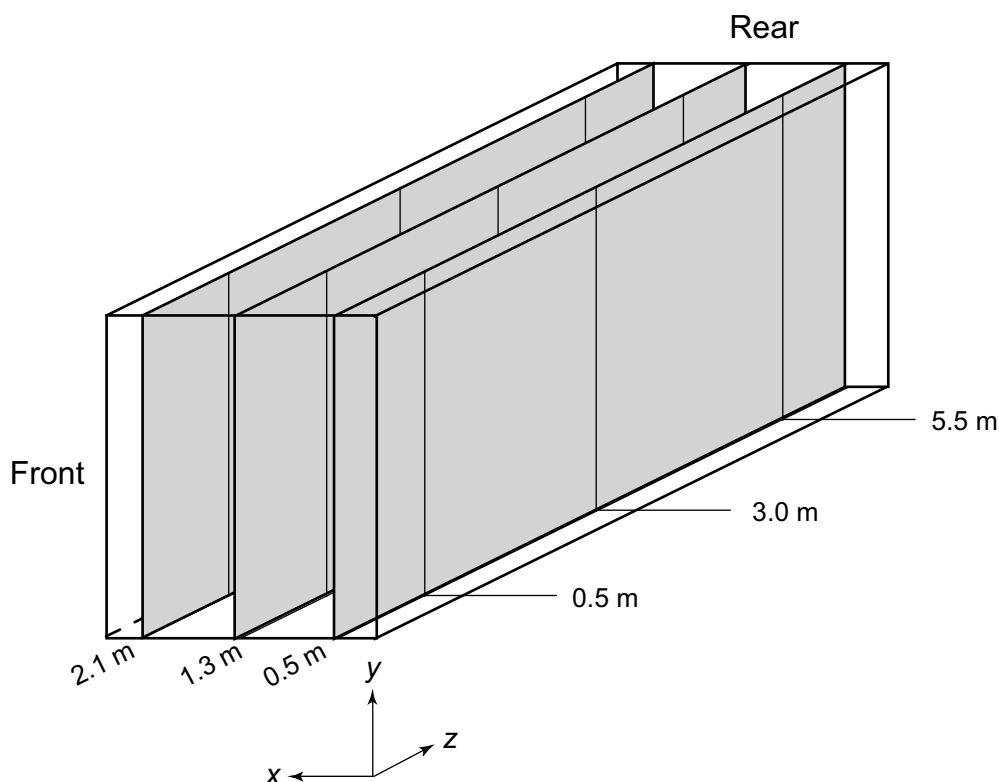
ส่วนอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 3.4 m แสดงในรูปที่ 7.8 พบว่าอุณหภูมิโดยส่วนใหญ่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นที่ตำแหน่งตรงกับบานระบายความชื้นอุณหภูมิจะลดลงต่ำลงเล็กน้อย



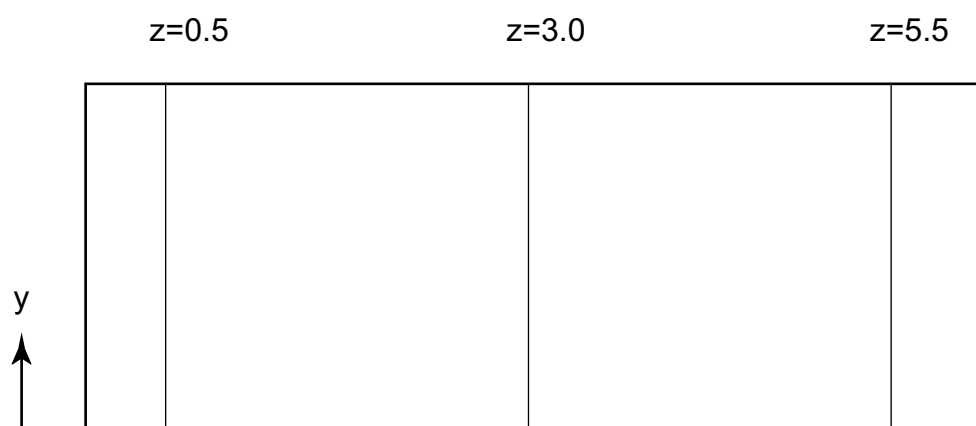
รูปที่ 7.8 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความยาวของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 3.4 m

7.1.3 ผลการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ตำแหน่งต่าง ๆ

การกระจายของอุณหภูมิตามความสูงของห้องจะพิจารณาที่ 3 ระบายความกว้างของห้องเหมือนของห้องที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 7.9 โดยที่แต่ละระดับจะพิจารณาที่ 3 แนวความลึก คือแนวหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง



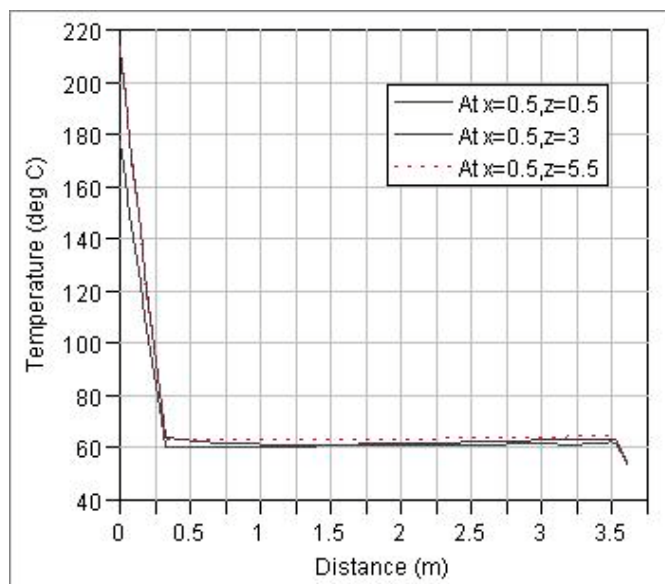
(ก)



(ข)

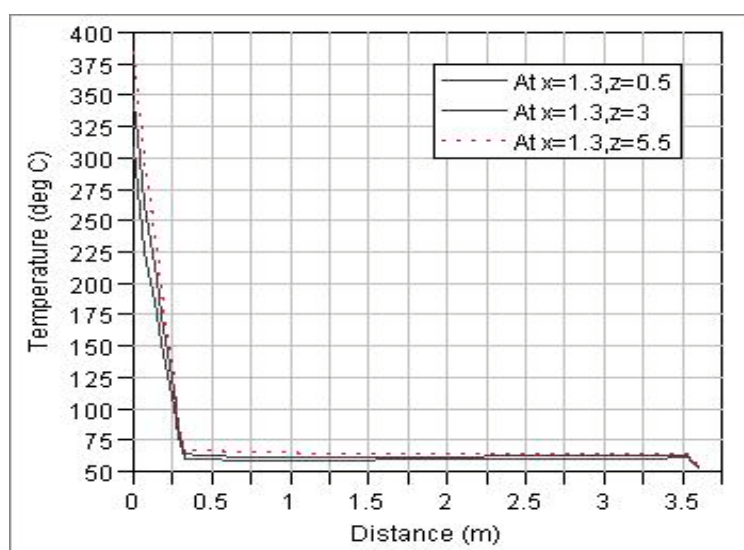
รูปที่ 7.9 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องรมยาง (ก) ภาพแสดงตำแหน่งในแนว กว้างของห้อง (ข) ภาพจากด้านข้าง

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้อง ณ ระนาบด้านขวาของห้อง ($x=0.5$ m) แสดงในรูปที่ 7.10 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณด้านล่างของห้องจะมีค่าสูงมากเหมือนของห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง และจะลดลงเหลืออุณหภูมิประมาณ 60°C ซึ่งค่อนข้างจะคงที่ อุณหภูมิใกล้เคียงกันมากแตกต่างกันเพียง $2-3^{\circ}\text{C}$



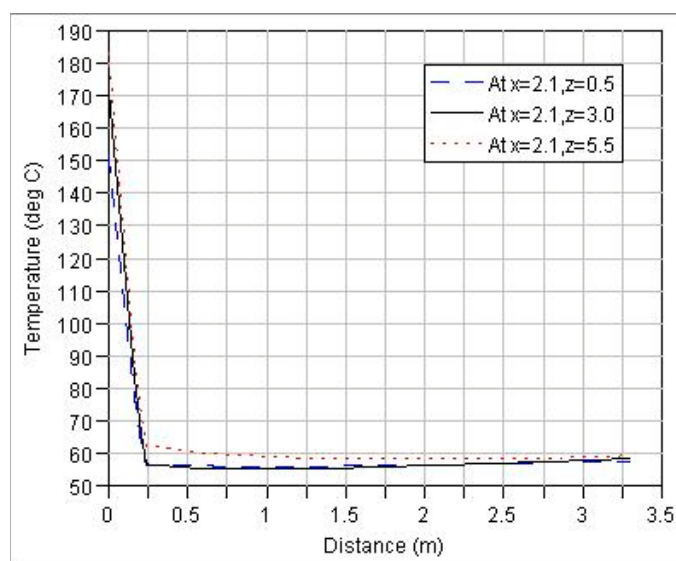
รูปที่ 7.10 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ระยะห่างจากผนังห้อง 0.5 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้อง ณ ระนาบกลางห้อง ($x=1.3$ m) แสดงในรูปที่ 7.11 พบว่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณด้านล่างของห้องจะมีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน และจะลดลงเหลืออุณหภูมิประมาณ 60°C ซึ่งค่อนข้างจะคงที่เช่นเดียวกัน



รูปที่ 7.11 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ระยะห่างจากผนังห้อง 1.3 m

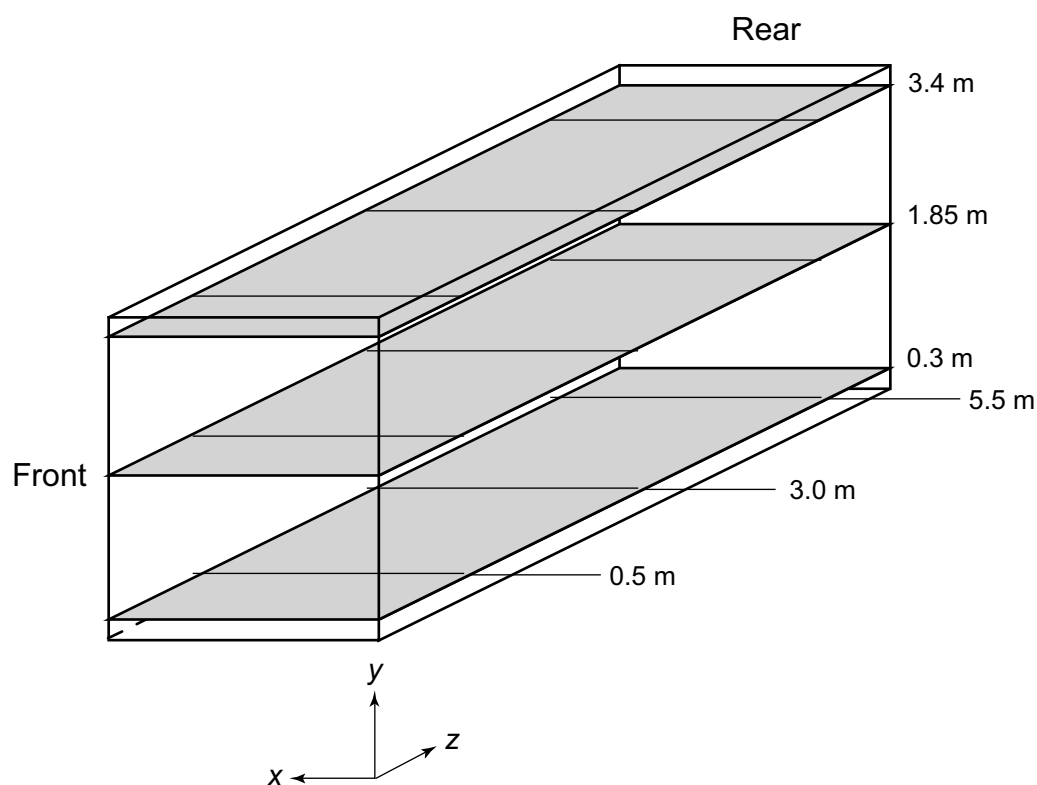
อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้อง ณ ระนาบด้านซ้ายของห้อง ($x = 2.1$ m) แสดงในรูปที่ 7.12 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับกรณีที่ผ่านมา



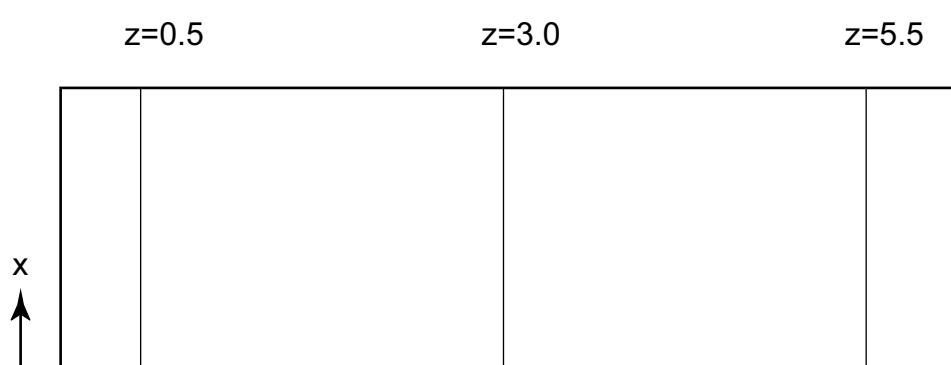
รูปที่ 7.12 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความสูงของห้องที่ระยะห่างจากผนังห้อง 2.1 m

7.1.4 ผลการกระจายอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ตำแหน่งต่าง ๆ

การกระจายของอุณหภูมิตามความกว้างของห้องจะพิจารณาที่ 3 ระบายความสูงของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 7.13 โดยที่แต่ละระดับจะพิจารณาที่ 3 แนวความลึก คือแนวหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง



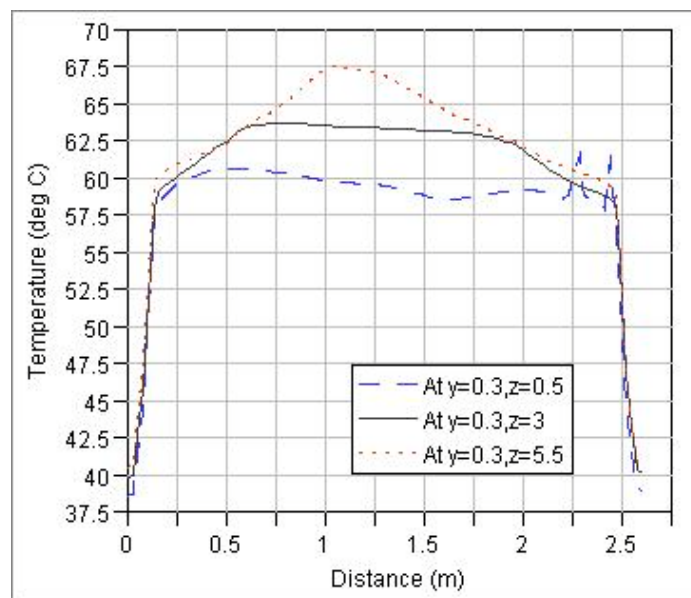
(ก)



(ข)

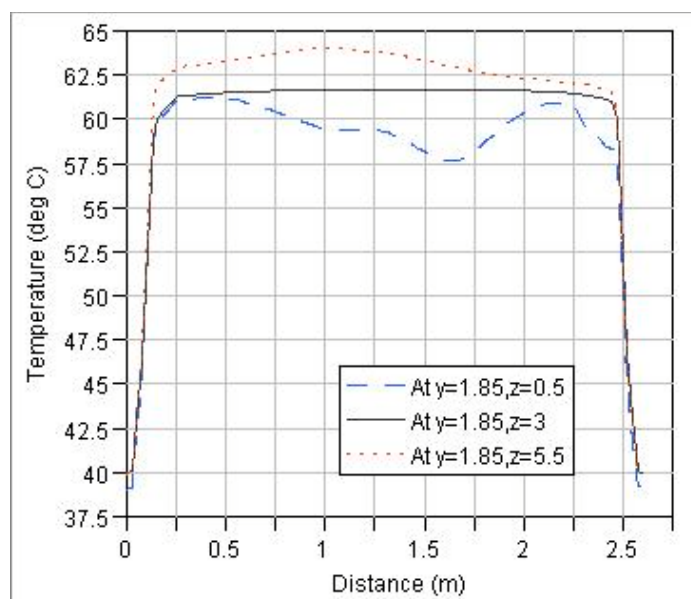
รูปที่ 7.13 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องรมยาง (ก) ภาพแสดงตำแหน่งในแนว ยาวของห้อง (ข) ภาพจากด้านบน

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้อง ณ ระนาบต่ำสุดของห้อง ($y = 0.3$ m) แสดงในรูปที่ 7.14 พบว่าโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่กระจายตามความกว้างของห้องมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นบริเวณกลางห้อง และเมื่อพิจารณาในแนวความลึกพบว่าบริเวณด้านหลังห้องมีอุณหภูมิสูงสุด



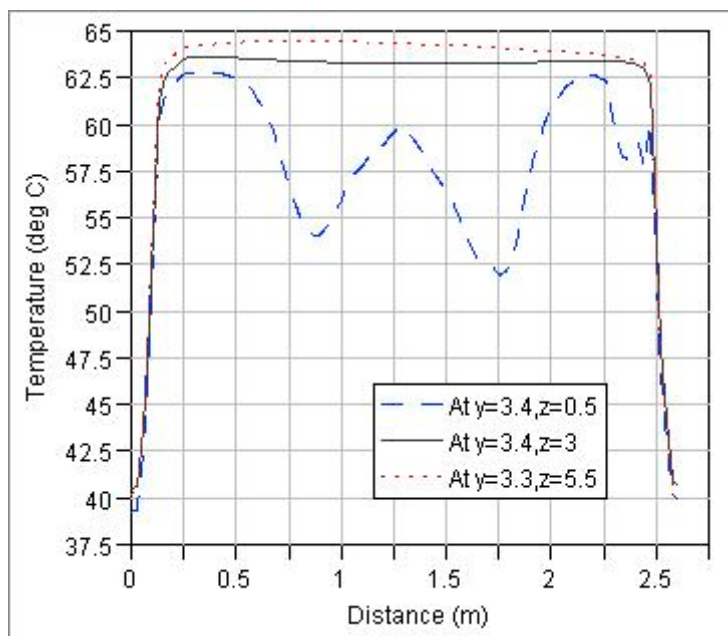
รูปที่ 7.14 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 0.3 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้อง ณ ระนาบความสูงตรงกลางของห้อง ($y = 1.85$ m) แสดงในรูปที่ 7.15 พบว่าโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่กระจายตามความกว้างของห้องมีค่าใกล้เคียงกันต่างกันไม่เกิน 5°C



รูปที่ 7.15 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1.85 m

อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้อง ณ าระนาบความสูงตรงกลางของห้อง ($y = 3.4$ m) แสดงในรูปที่ 7.16 พบว่าโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่กระจายตามความกว้างของห้องมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นที่ าระนาบหน้าห้อง ($z = 0.5$ m) อุณหภูมิจะลดต่ำลงที่ตำแหน่งใกล้บานระบายความชื้น ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

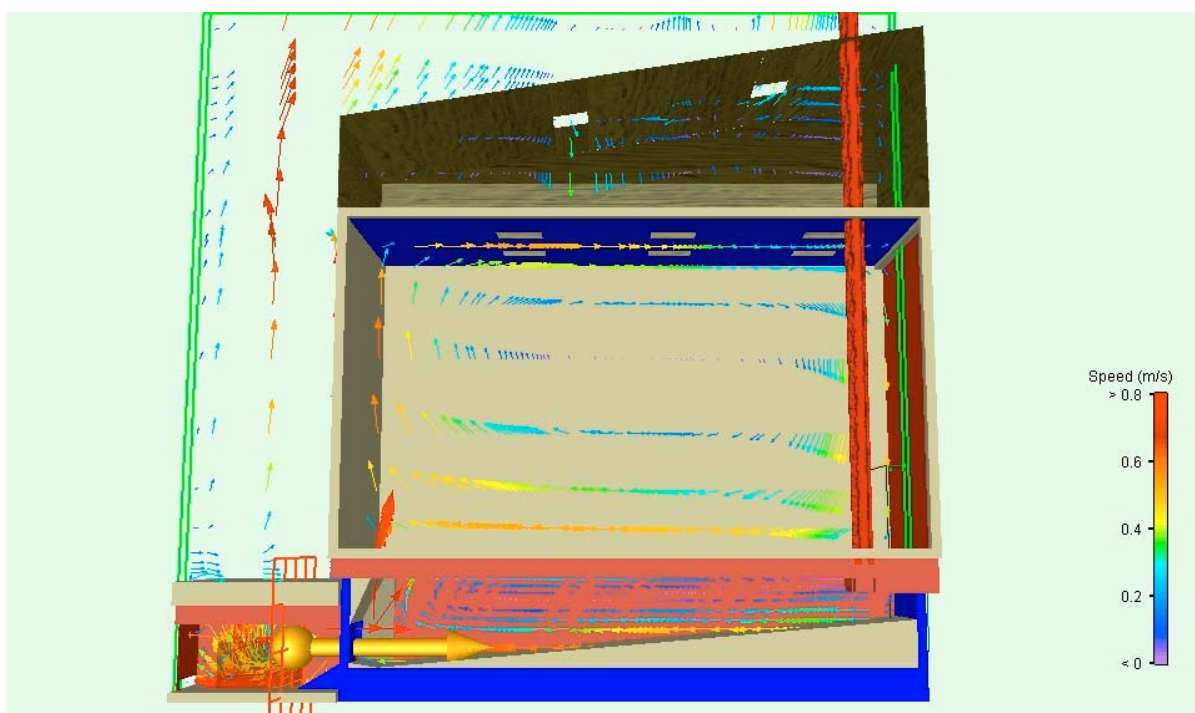


รูปที่ 7.16 อุณหภูมิของแก๊สร้อนตามความกว้างของห้องที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 3.4 m

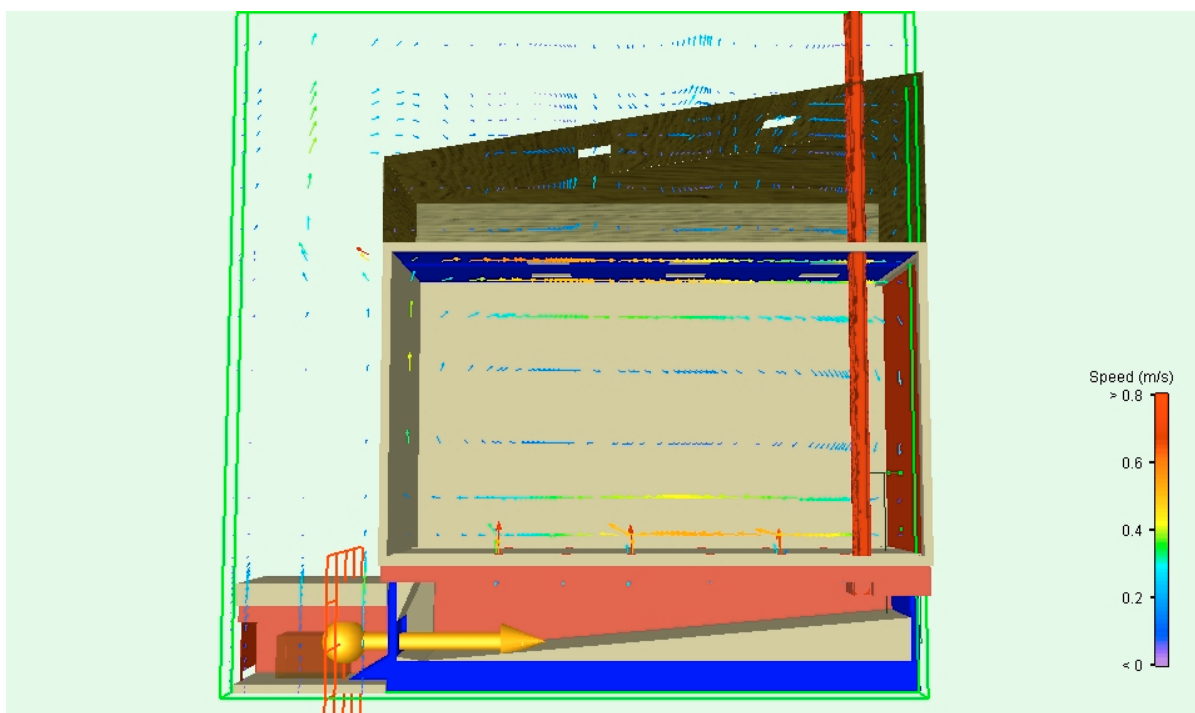
7.1.5 ผลการกระจายความเร็ว

เวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่าง ๆ ของห้องรมที่ปรับปรุง แสดงในรูปที่ 7.17-7.19 จะเห็นได้ว่าการไหลเวียนในห้องได้ดีพอสมควร แต่ยังมีการไหลของอากาศจากภายนอกเข้าสู่บานระบายความชื้นแต่ไม่มากนัก การปรับปรุงตามรูปแบบนี้น่าจะทำให้การไหลเวียนในห้องรมดีขึ้น

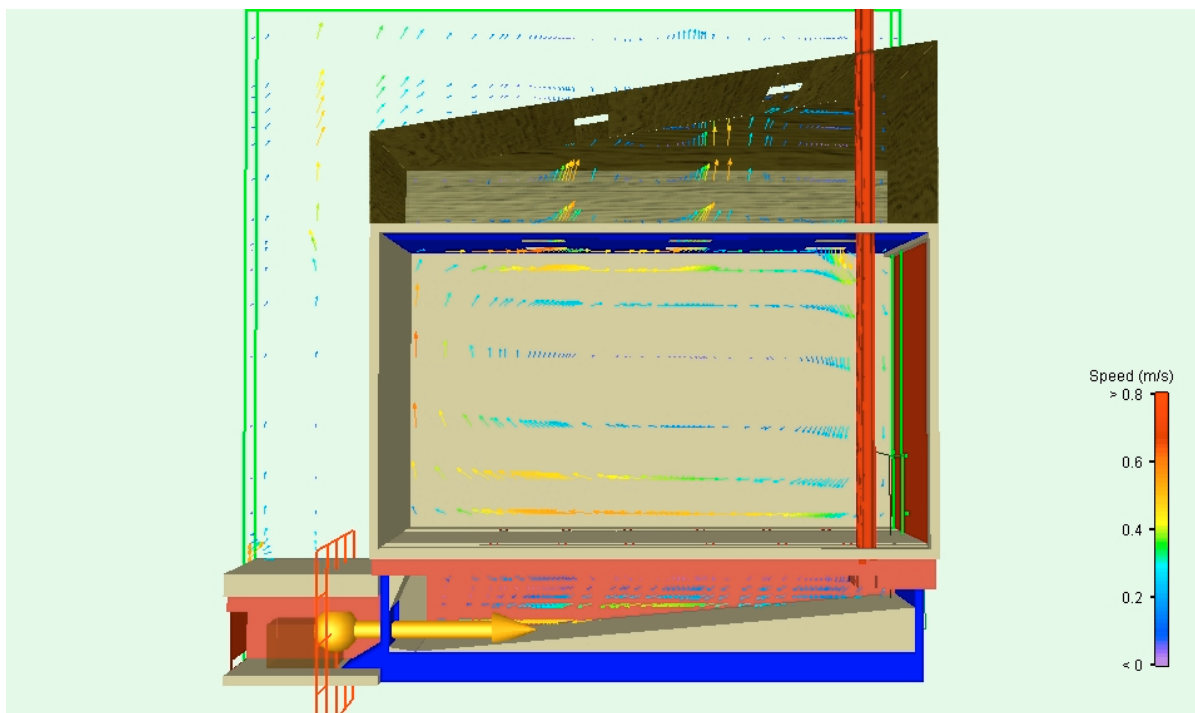
จากผลการปรับปรุงโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล พบว่าการเพิ่มจำนวนบานระบายความชื้น ทำให้มีการกระจายอุณหภูมิและความเร็วสม่ำเสมอมากขึ้น แม้ว่าบางจุดจะมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากจุดอื่นค่อนข้างสูง แต่เป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากถ้าต้องการให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอมากขึ้น ต้องออกแบบห้องใหม่ทั้งหมดซึ่งต้องลงทุนสูง ไม่เหมาะกับสภรณ์ที่มีทุนไม่สูงนัก นอกจากนี้ในการจำลองห้องที่ปรับปรุงแล้วต้องลดกำลังของแหล่งความร้อนลงจาก 20 kW เหลือ 15 kW เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิในห้องไว้ที่ประมาณ 60°C มิฉะนั้นอุณหภูมิจะสูงเกิน 70°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่จะประหยัดพลังงานได้ถึง 25% เนื่องจากการจำลองนี้พิจารณาเฉพาะห้องรมเปล่าและไม่ได้พิจารณาความชื้นซึ่งเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม ดังนั้นการไหลในห้องรมจริงจะแตกต่างจากการจำลองนี้ค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามการปรับปรุงตามผลการจำลองนี้น่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นโดยรวม



รูปที่ 7.17 การไหลของแก๊สในห้องที่ระบายกลางห้องตามความกว้าง



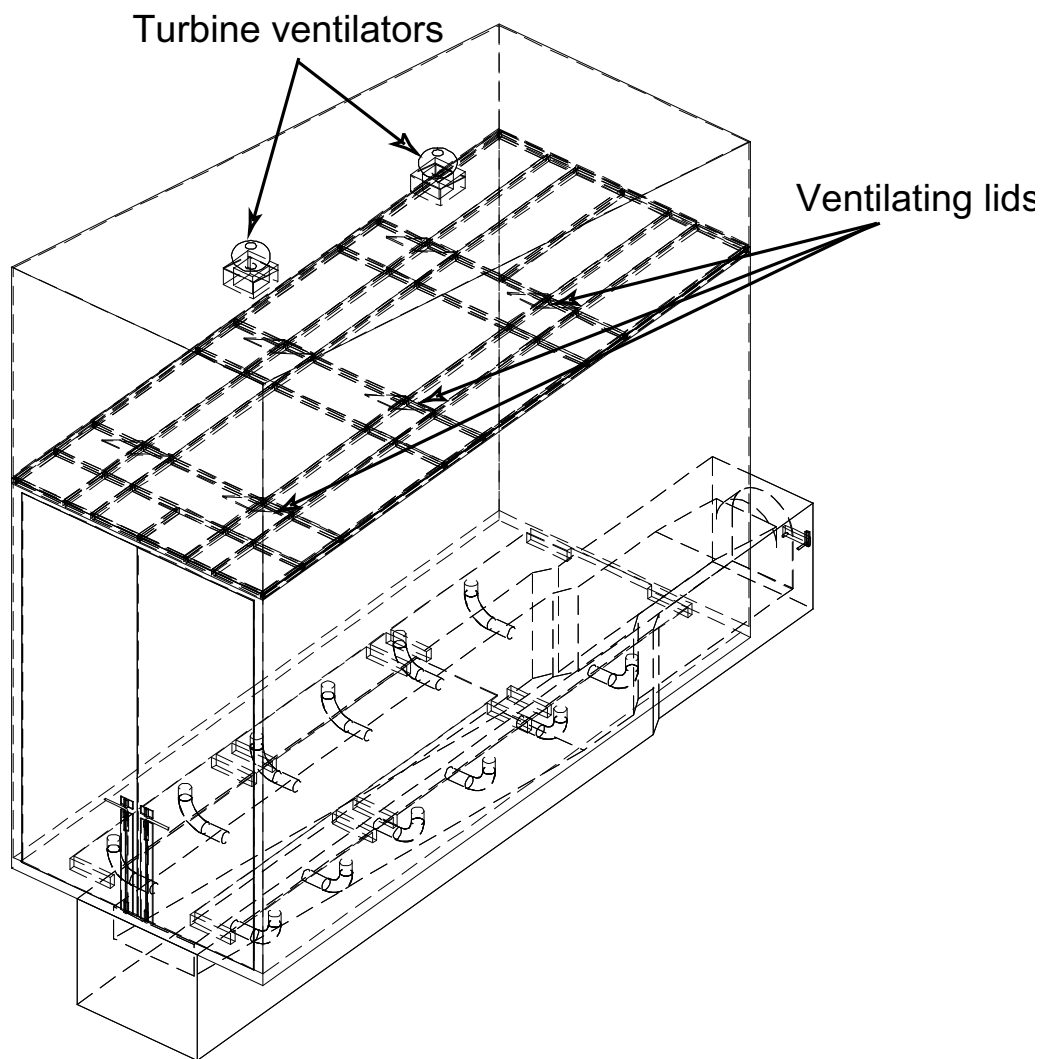
รูปที่ 7.18 การไหลของแก๊สในห้องที่ระบายช่องปล่อยแก๊ส



รูปที่ 7.19 การไหลของแก๊สในห้องที่ระบายผ่านบานระบายความชื้น

7.2 ห้องรมปรับปรุง

จากผลการจำลองการไหลในห้องรมได้นำมาสู่การปรับปรุงห้องรมตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 7.20 โดยมีบานระบายความชื้นขนาด 30 cm x 50 cm จำนวน 6 บาน และทำการปิดรอบด้านบนของเพดานด้วยกระเบื้องแผ่นเรียบ ซึ่งนอกจากช่วยให้มีการกระจายอุณหภูมิที่ดีขึ้นแล้วยังช่วยป้องกันไม่ให้ควันไหลเข้าสู่บริเวณที่พนักงานทำงานซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพระยะยาว ส่วนหลังคาจะติดตั้งพัดลมดูดชนิดหมุนได้ด้วยตัวเอง (turbine ventilator) จำนวน 2 ตัวแทนช่องระบายแก๊ส เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการระบายความชื้นในการรมวันแรก รายละเอียดของแบบห้องรมที่ปรับปรุงแล้วอยู่ในภาคผนวก ค



รูปที่ 7.20 แผนผังห้องรมยางที่ทำการปรับปรุงแล้ว

ภาพถ่ายประตูห้องตัวอย่างของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน ที่ทำการปรับปรุงแล้วแสดงในรูปที่ 7.21 โดยทางสหกรณ์ได้เอื้อเฟื้อห้องรมหมายเลข 7 ให้ใช้ปรับปรุงและทดสอบ เนื่องจากประตูห้องรมเป็นบานเหล็กขนาดใหญ่มากจึงได้ทำการบุผนังด้านในด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2 inch เพื่อลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านประตู รูปที่ 7.22 แสดงภาพถ่ายรอบ ๆ ด้านบนของเพดานซึ่งถูกหุ้มปิดหมดด้วยกระเบื้องแผ่นเรียบ รูปที่ 7.23 แสดงตำแหน่งของบานระบายความชื้นบนเพดานซึ่งควบคุมการเปิด-ปิดด้วยการดึงเส้นลวดซึ่งอยู่ด้านหลังห้อง ส่วนพัดลมดูดอากาศชนิดหมุนได้ด้วยตัวเองแสดงในรูปที่ 7.24 รูปที่ 7.25 แสดงพื้นห้องรมยางที่ทำการปรับปรุงแล้วและได้ติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาคนิวเคลียสจากตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ ในช่องปล่อยแก๊สทั้ง 12 ช่อง ส่วนที่เป็นแนวอิฐนั้นทำหน้าที่เป็นทางเดินสายไฟ (ข้างใน) และเป็นตัวป้องกันความร้อนจากแก๊สร้อนที่จะทำให้สายไฟเสื่อมรวมทั้งทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าด้วย สายไฟที่ใช้เป็นสายไฟหุ้มเทียมนรถจักรยานยนต์ซึ่งทนศักย์ไฟฟ้าแรงสูงได้มากกว่า 15 kV แต่มีข้อเสียคือทนอุณหภูมิได้เพียง 90°C ดังนั้นสายไฟบางส่วนที่อยู่ใกล้ปล่องปล่อยแก๊สจะเสื่อมสภาพค่อนข้างเร็ว (2-3 เดือน) แผนผังการเดินสายไฟในห้องรมแสดงในรูปที่ 7.26 ส่วนรูปแสดงเตาเผาฟืนที่ทำการปรับปรุงเรียบร้อยแล้วแสดงในรูปที่ 7.27



รูปที่ 7.21 ประตูห้องรมยางที่ทำการปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 7.22 ด้านบนรอบห้องรมยางที่ทำการปรับปรุงแล้ว



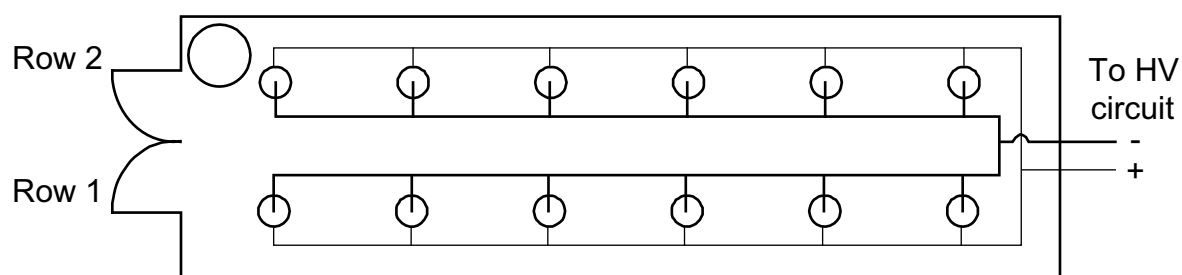
รูปที่ 7.23 เพดานห้องรมยางที่ทำการปรับปรุงแล้วแสดงตำแหน่งบานระบายความชื้น



รูปที่ 7.24 พัดลมดูดอากาศบนหลังคาห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 7.25 พื้นห้องรมยางที่ทำการปรับปรุงแล้วโดยแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ดักจับอนุภาค



รูปที่ 7.26 แผนผังการเดินสายไฟในห้องรม



รูปที่ 7.27 เตาเผาฟีนที่ทำการปรับปรุงแล้ว

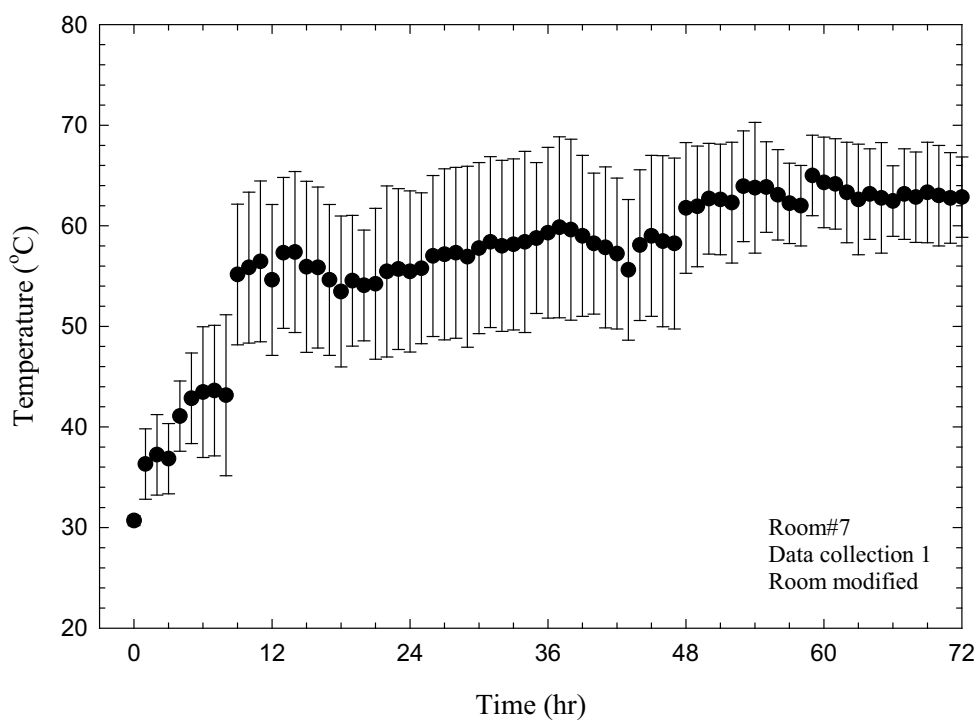
ต้นทุนในการปรับปรุงห้องรมแสดงในตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงเฉพาะห้องรมเพียงอย่างเดียวลงทุนไม่เกิน 54,300 บาท แต่ถ้าติดตั้งระบบดักอนุภาคต้องลงทุนเพิ่มอีกประมาณ 22,300 บาท

ตารางที่ 7.1 ต้นทุนในการปรับปรุงห้องรมแต่ละห้อง

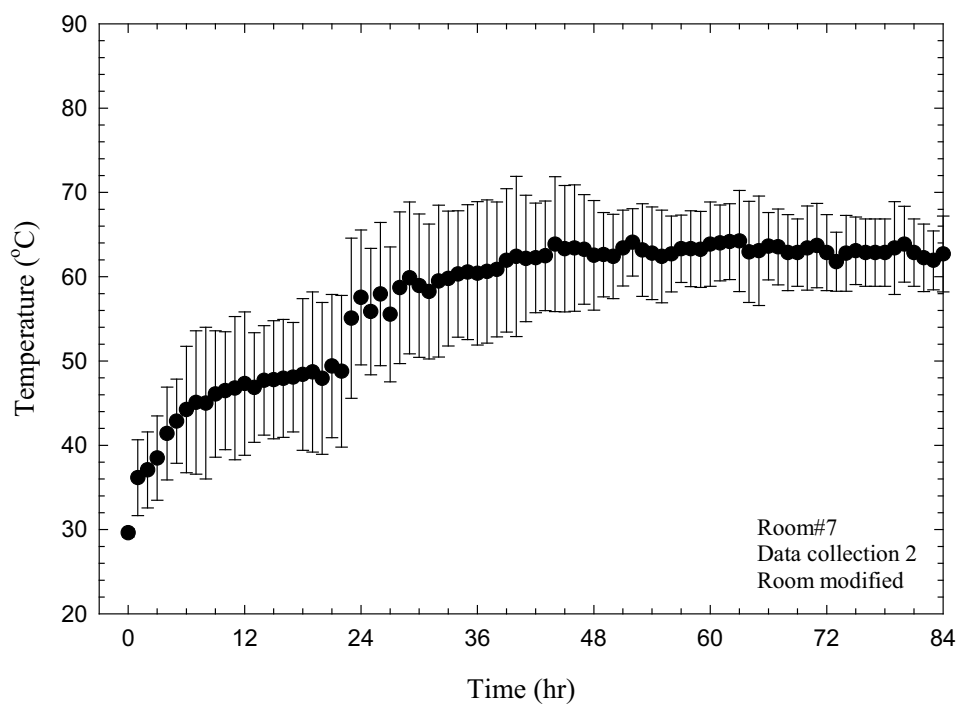
รายการ	ราคา (บาท)
1. ห้องรม	
เพดานและรอบห้องรม	44,000
พัดลมดูดชนิดหมุนด้วยตัวเอง 2 ตัว	4,300
แผ่นเหล็กพูน	6,000
รวม	54,300
2. ชุดดักเขม่า	
อุปกรณ์ดักเขม่า 12 ชุด	8,400
วงจรไฟฟ้าแรงสูง	3,700
Variac	4,200
สายไฟ	1,000
ค่าติดตั้ง	5,000
รวม	22,300
รวมทั้งสิ้น	76,600

7.3 การกระจายของอนุภาคนิวตรอนในห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว

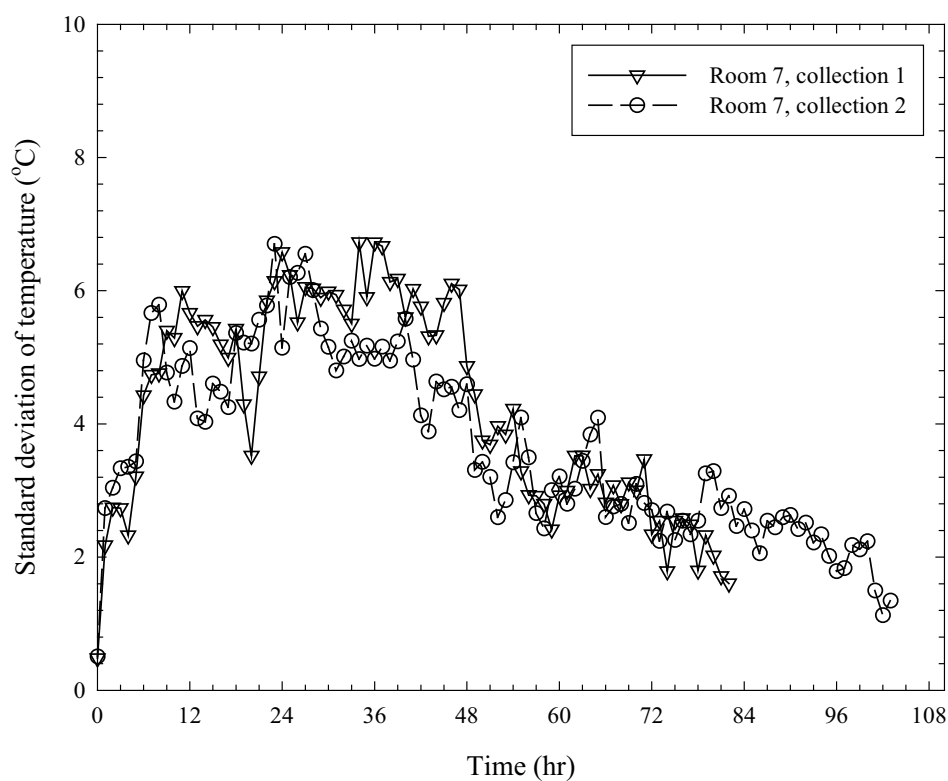
เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงต่อการกระจายอนุภาคนิวตรอนในห้องรมได้ทำการวัดอนุภาคนิวตรอนในห้องรมจำนวน 13 จุดโดยมีตำแหน่งการวัดเช่นเดียวกับในบทที่ 6 โดยใช้อุปกรณ์วัดชุดเดิมแต่ทำการวัดทุก ๆ ชั่วโมง ผลของการวัดอนุภาคนิวตรอนจำนวน 2 ครั้ง แสดงในรูปที่ 7.28 และ 7.29 โดยค่าที่แสดงเป็นอนุภาคนิวตรอนเฉลี่ยทั้ง 13 จุด ณ เวลาใด ๆ และค่าขอบเขต (bound) ของอนุภาคนิวตรอนซึ่งหมายถึงค่าสูงสุด-ต่ำสุด ณ เวลานั้น ๆ ส่วนรูปที่ 7.30 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาคนิวตรอนจากการวัดทั้ง 2 ครั้ง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการควบคุมอนุภาคนิวตรอนเทียบกับเวลาดีกว่ากรณีห้องที่ยังไม่ได้ปรับปรุง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของอนุภาคนิวตรอนในแต่ละจุดยังมีค่าสูง แต่เมื่อพิจารณาอนุภาคนิวตรอนเป็นจุด ๆ ในภาคผนวก ก พบว่าบริเวณกลางห้องจะมีอนุภาคนิวตรอนสูงกว่าบริเวณอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาคนิวตรอนพบว่าการรบกวนแรกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่สูงเท่ากรณีที่ยังไม่ได้ปรับปรุงห้อง แต่โดยรวมแล้วไม่ได้แตกต่างกันมากนัก สาเหตุหนึ่งที่ทำให้อนุภาคนิวตรอนยังไม่สม่ำเสมอเกิดเนื่องจากพนักงานยังไม่คุ้นเคยกับการป้อนฟืนเพื่อควบคุมอนุภาคนิวตรอนในห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว หากพนักงานมีความคุ้นเคยกับการรมในห้องใหม่นี้คาดว่าจะการกระจายอนุภาคนิวตรอนจะสม่ำเสมอมากขึ้น ในการรมควันได้ปรับขนาดช่องปล่อยแก๊สเข้าห้องรมโดยไม่ได้เปิดสุด เนื่องจากความร้อนจะสูงเกินไปหากเปิดสุด ในกรณีนี้อาจจะเนื่องจากขนาดช่องปล่อยแก๊สบริเวณตำแหน่งกลางห้องใหญ่เกินไป จึงต้องปรับลดอีก โดยในการรมครั้งหลังได้ปรับลดขนาดช่องปล่อยแก๊สบริเวณกลางห้องให้เล็กลงดังแสดงในรูปที่ 7.31 พบว่าการสุกของยางแผ่นทั่วถึงมากขึ้นและปริมาณยางดีเพิ่มสูงขึ้นมากจากการรม 2 ครั้งสุดท้าย (ดูหัวข้อถัดไป)



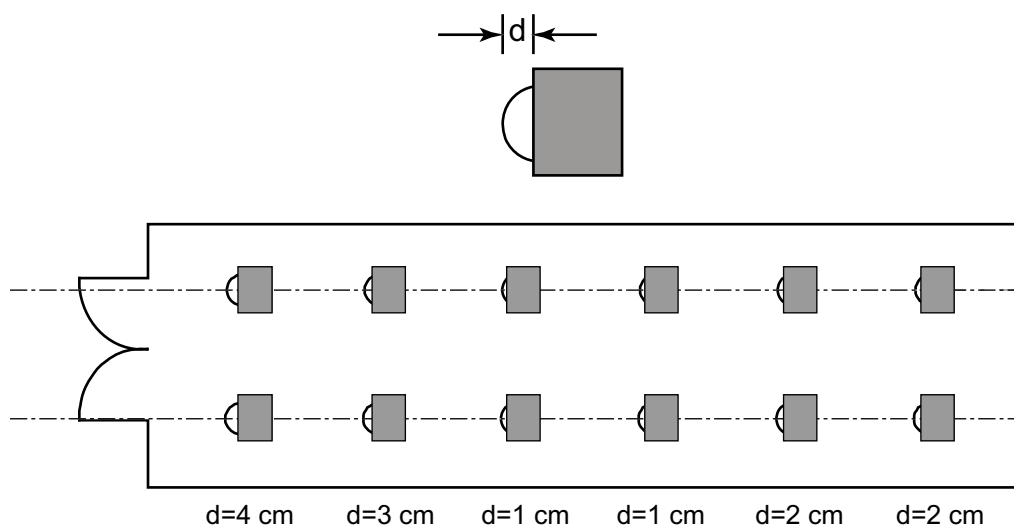
รูปที่ 7.28 อุณหภูมิในห้องรมยางสำหรับห้องรมปรับปรุงหมายเลข 7 ครั้งที่ 1



รูปที่ 7.29 อุณหภูมิในห้องรมยางสำหรับห้องรมปรับปรุงหมายเลข 7 ครั้งที่ 2



รูปที่ 7.30 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิในห้องรมจากการวัดอุณหภูมิทั้ง 2 ครั้ง



รูปที่ 7.31 ขนาดการเปิดช่องปล่อยแก๊สที่พื้นห้องรม

7.4 ปริมาณการใช้ไม้พิน

จากตารางที่ 7.2 ซึ่งแสดงปริมาณยางและปริมาณการใช้ไม้พินของห้องรมยางตัวอย่างของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ที่ทำการปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องดักอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (ESP) ในช่วงเดือน มิ.ย. 2547 - พ.ย. 2547 ซึ่งเป็นช่วงเปิดกรีตหน้ายาง มีฝนตก และยางแผ่นดิบหนาประมาณ

4 mm เช่นเดียวกับข้อมูลในตารางที่ 6.3 พบว่า ปริมาณไม้พินที่ใช้เฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 4 ครั้ง มีค่าประมาณ 701 กิโลกรัมต่อตันยางรวม หรือ 0.701 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมยางรวม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าห้องรมที่ไม่ได้ปรับปรุงถึง 57.4% และระยะเวลาที่ใช้ในการรมยางทั้งหมดเฉลี่ย 4.4 วัน ลดลงจากการรมในห้องรมที่ไม่ได้ปรับปรุงถึง 42.8% ส่วนปริมาณยางรวมที่ได้ในการรมยางแต่ละครั้งห้องรมประมาณ 1,277 กิโลกรัม ซึ่งได้เป็นยางดีเฉลี่ย 1,148 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 90% ของยางรวม ส่วนที่เหลือเป็นยางคัทตั้งเฉลี่ย 41 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 3% ของยางรวม ยางฟองเฉลี่ย 67 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 5% ของยางรวม และยางดิบเฉลี่ย 21 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 2% ของยางรวม จะเห็นได้ว่าคุณภาพของยางดีใกล้เคียงกับการรมในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

ส่วนตารางที่ 7.3 แสดงปริมาณยางและปริมาณการใช้ไม้พินของห้องรมยางตัวอย่างของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา ที่ทำการปรับปรุงแล้วโดยการทดลองมีทั้งการทดลองที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งเครื่องดักอนุภาคเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (ESP) ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 พบว่า ปริมาณไม้พินที่ใช้เฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 8 ครั้ง มีค่าประมาณ 586 กิโลกรัมต่อตันยางรวม หรือ 0.586 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมยางรวม ซึ่งลดลงจากการรมในห้องรมที่ไม่ได้ปรับปรุงในช่วงเวลาเดียวกันถึง 31.5% และระยะเวลาที่ใช้ในการรมยางทั้งหมดเฉลี่ย 4 วัน ส่วนปริมาณยางรวมที่ได้ในการรมยางแต่ละครั้งห้องรมประมาณ 1,319 กิโลกรัม ซึ่งได้เป็นยางดีเฉลี่ย 1,192 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 90% ของยางรวม ส่วนที่เหลือเป็นยางคัทตั้งเฉลี่ย 54 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 4% ของยางรวม ยางฟองเฉลี่ย 63 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 5% ของยางรวม และยางดิบเฉลี่ย 10 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 1% ของยางรวม จะเห็นได้ว่าคุณภาพของยางดีโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับการรมในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากห้องรมนี้เป็นห้องรมใหม่ดังนั้นในช่วงแรกพนักงานจำเป็นต้องปรับวิธีการป้อนพินใหม่ เมื่อพิจารณาการรม 2 ครั้งสุดท้ายพบว่าสามารถลดปริมาณยางคัทตั้ง และยางฟองลงได้ค่อนข้างมาก และมีสัดส่วนยางดีถึง 96% ยางคัทตั้ง 3% ยางฟองและยางดิบอย่างละ 1% เท่านั้น ดังนั้นสรุปได้ว่าการปรับปรุงการไหลในห้องรมสามารถช่วยให้คุณภาพของยางในการรมสม่ำเสมอมากขึ้น

กราฟปริมาณการเติมไม้พินในช่วงเวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 7.32 ส่วนกราฟปริมาณการใช้ไม้พินสะสมแสดงในรูปที่ 7.33 พบว่ามีอัตราการเติมพินที่ต่ำกว่าห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง โดยเฉพาะในวันที่ 2-4 ซึ่งกราฟจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นแต่จะชันน้อยลงเรื่อย ๆ

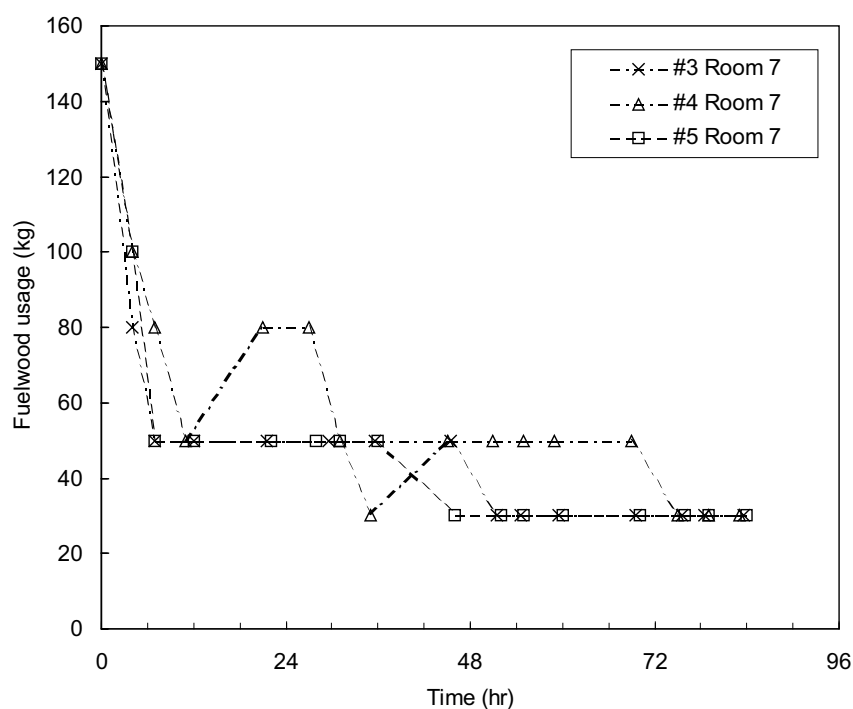
ตารางที่ 7.2 ปริมาณการใช้ไม้พินและปริมาณยางในการรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเตา จ.สงขลา ในช่วงเดือน กค. 2547 - พย. 2547 -- ห้องรมปรับปรุงแล้ว

ครั้งที่	ห้องรมที่	จำนวนวัน	ยางดี (กก)	ยางคัทตั้ง (กก)	ยางฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	ปริมาณยางรวม (กก)	ปริมาณไม้พิน (กก)	ปริมาณไม้พินต่อปริมาณยาง (กก ไม้พินต่อตันยาง)	หมายเหตุ
1	7	4	995	29	70	31	0	1125	621	552	ไม่ได้ใช้ ESP
2	7	4	1105	50	59	0	0	1214	850	700	ไม่ได้ใช้ ESP
3	7	5	1264	40	25	52	0	1381	1015	735	ฝนตกหลังคารั่ว
4	7	4.5	1228	46	112	0	0	1386	1094	789	ฝนตกหลังคารั่ว
เฉลี่ย		4.4	1148	41	67	21	0	1277	895	701	
% ยาง			90	3	5	2	0	100			

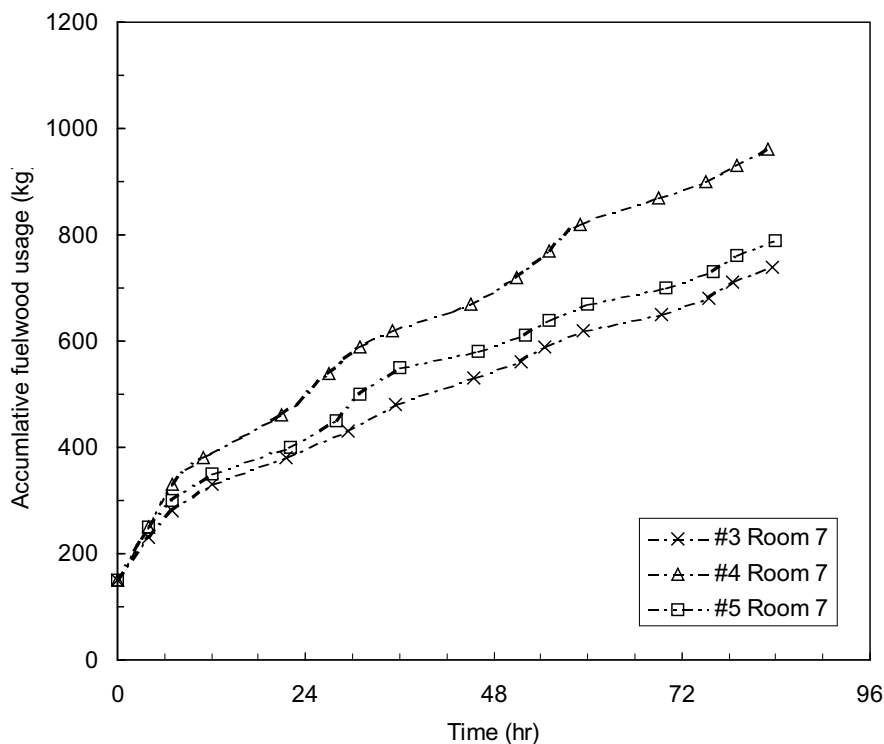
ตารางที่ 7.3 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนและปริมาณยางในการรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 -- ห้องรมปรับปรุงแล้ว

ครั้งที่	ห้องรม ที่	จำนวน วัน	ยางดี (กก)	ยางคัท ตั้ง (กก)	ยาง ฟอง (กก)	ยางดิบ (กก)	เศษยาง (กก)	ปริมาณ ยางรวม (กก)	ปริมาณ ไม้ฟืน (กก)	ปริมาณไม้ฟืนต่อ ปริมาณยาง (กก ไม้ฟืนต่อตันยาง)	หมายเหตุ
0*	7	4.5	1228	46	112	0	0	1386	1094	789	ใช้ ESP
1	7	3.5	950	71	70	0	0	1091	633	580	ใช้ ESP
2	7	4.5	1029	62	20	13	0	1124	742	660	ใช้ ESP
3	7	4	1148	58	200	20	0	1426	740	519	ไม่ได้ใช้ ESP
4	7	4	1400	45	0	15	0	1460	960	658	ไม่ได้ใช้ ESP
5	7	4	1434	35	26	0	0	1495	790	528	ไม่ได้ใช้ ESP
เฉลี่ย		4	1192	54	63	10	0	1319	773	586	
% ยาง			90	4	5	1	0	100			

หมายเหตุ * ข้อมูลชุดนี้ไม่ได้นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยเนื่องจากบานระบายความชื้นในห้องรมไม่สามารถปิดได้ 1 บานทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้



รูปที่ 7.32 ปริมาณการเติมไม้ฟืนในช่วงเวลาต่าง ๆ ในการรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 จำนวน 3 ครั้ง -- ห้องรมปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 7.33 ปริมาณการใช้ไม้ฟืนสะสมในการรรมยางของสหกรณ์สวนยางบ้านหัวถนน อ.สะเดา จ.สงขลา ในช่วงเดือน พย. 2547 - มค. 2548 จำนวน 3 ครั้ง -- ห้องรรมปรับปรุงแล้ว

7.5 คุณภาพแผ่นยางในห้องที่ปรับปรุงโดยไม่ได้ติดตั้งเครื่องตากตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

คุณภาพของแผ่นยางในที่นี้พิจารณาเฉพาะสีเท่านั้น ซึ่งสีของแผ่นยางรมควันจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่นคุณภาพน้ำที่ใช้ (ถ้า น้ำไม่สะอาดสีของยางก็จะไม่ใส) ระยะเวลาที่ผึ่งรมก่อนรมควัน (ถ้าผึ่งรมเกิน 2 วันยางจะมีสีคล้ำ และอาจเกิดรา) เขม่าจากการเผาไหม้ไม้ฟืน (ถ้าเขม่ามากสียางก็จะคล้ำ) และตัวแปรอื่น ๆ ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะเขม่าจากการเผาไหม้ไม้ฟืน โดยตัดตัวแปรอื่นออก เนื่องจากใช้แหล่งน้ำเดียวกัน และควบคุมการผึ่งยางไว้ที่ 1 วัน (ประมาณ 16 ชั่วโมง) การทดลองของห้องที่ปรับปรุงแล้วจะทดลอง 2 ลักษณะ คือการรมควันที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่า และการรมควันที่ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่า ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการทดลองโดยไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่า ยางตัวอย่างที่สุ่มมา 3 แผ่นจากการรม 3 ครั้ง แสดงในรูปที่ 7.34 - 7.36 พบว่าสีไม่ต่างจากยางที่รมได้โดยวิธีปรกติมากนักจากการสังเกตด้วยตาเปล่า เนื่องจากไม่มีมาตรฐานการวัดสี โดยรวมแล้วมีสีคล้ำกว่าเล็กน้อย แต่ยังขายได้ราคาเดิมคือยางชั้น 3



รูปที่ 7.34 ยางดีจากการรมโดยห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งติดตั้งเครื่องตากตะกอนเชิงไฟฟ้าสฤติย์
(ยางเข้า 18 มค. 2548)



รูปที่ 7.35 ยางดีจากการรมโดยห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งติดตั้งเครื่องตากตะกอนเชิงไฟฟ้าสฤติย์
(ยางเข้า 24 มค. 2548)



รูปที่ 7.36 ยางดีจากการรมโดยห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์
(ยางเข้า 31 มค. 2548)

7.6 คุณภาพแผ่นยางในห้องที่ปรับปรุงโดยติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

สำหรับการทดลองโดยการติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่าจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะเปิดเครื่องให้ทำงานเฉพาะช่วง 30 นาทีแรกของการเติมฟืนเนื่องจากเป็นช่วงที่มีเขม่ามาก ยางตัวอย่างจากการรรมวันทั้ง 3 ครั้ง แสดงในรูปที่ 7.37 - 7.39 จะเห็นได้ว่ามีสีที่ค่อนข้างใสเมื่อเทียบกับยางที่รรมจากห้องที่ไม่ได้ปรับปรุงหรือห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่า จากการเทียบสีด้วยมาตรฐาน Lovibond ซึ่งใช้เทียบสีของยางแท่ง (ทดลองวัดโดยห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยยางสงขลา) พบว่ายางที่รรมในห้องรรมปรับปรุงแล้วและติดตั้งเครื่องดักเขม่ามีค่าสีเท่ากับ 8.0 (ดังแสดงในตารางที่ 7.4) ซึ่งใสกว่ายางที่รรมโดยไม่ได้ติดตั้งเครื่องดักเขม่าซึ่งมีค่าสีอยู่ระหว่าง 10.0 จนถึงสูงกว่า 16.0 (ค่าสียิ่งต่ำสีจะยิ่งใส) อนึ่งค่าสีของยางที่อบในตู้อบก๊าซซึ่งไม่มีควันมีค่าสีเท่ากับ 5.0 ในรูปที่ 7.39 ได้แสดงตัวอย่างของยางฟองเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไปในบางจุดในการรรม สรุปได้ว่าการใช้อุปกรณ์ดักเขม่าช่วยให้ยางสีใสขึ้น อย่างไรก็ตามสีของยางจากการรรมในห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งตัวดักเขม่าไม่ได้คล้ำไปกว่ายางจากการรรมโดยวิธีปรกติมากนัก

รูปที่ 7.40 แสดงภาพถ่ายของแผ่นยางจากการรรม 3 วิธีคือ ในรูป 7.40 (ก) เป็นยางจากการรรมโดยวิธีปรกติในห้องรรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง รูป 7.40 (ข) เป็นยางจากการรรมในห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ และรูป 7.40 (ค) เป็นยางจากการรรมในห้องที่ปรับปรุงแล้วและติดตั้งติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์



รูปที่ 7.37 ยางดีจากการรรมโดยห้องที่ปรับปรุงแล้วและติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์
(ยางเข้า 20 พย. 2547)



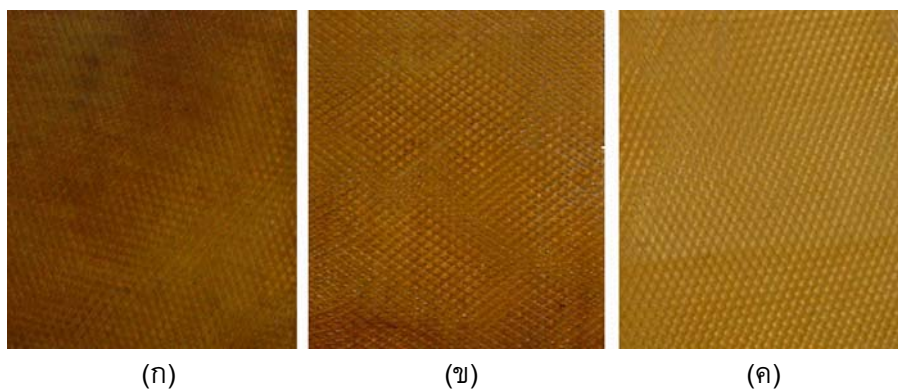
รูปที่ 7.38 ยางดีจากการรมโดยห้องที่ปรับปรุงแล้วและติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์
(ยางเข้า 3 ธค. 2547)



รูปที่ 7.39 ยางฟองจากการรมโดยห้องที่ปรับปรุงแล้วและติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์
(ยางเข้า 28 พย. 2547)

ตารางที่ 7.4 ค่าสีของยางแผ่นตามมาตรฐาน Lovibond

เงื่อนไขการยางรม	ค่าสีตามมาตรฐาน Lovibond
อบก๊าซ	5.0
ห้องรมไม่ได้ปรับปรุง	10.0 to >16.0
ห้องรมปรับปรุง -- ไม่ได้ติดตั้งตัวดักเขม่า	12.0
ห้องรมปรับปรุง -- ติดตั้งตัวดักเขม่า	8.0



รูปที่ 7.40 ยางจากการรม (ก) ปกติ (ข) ห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (ค) ห้องที่ปรับปรุงแล้วและติดตั้งติดตั้งเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

8. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

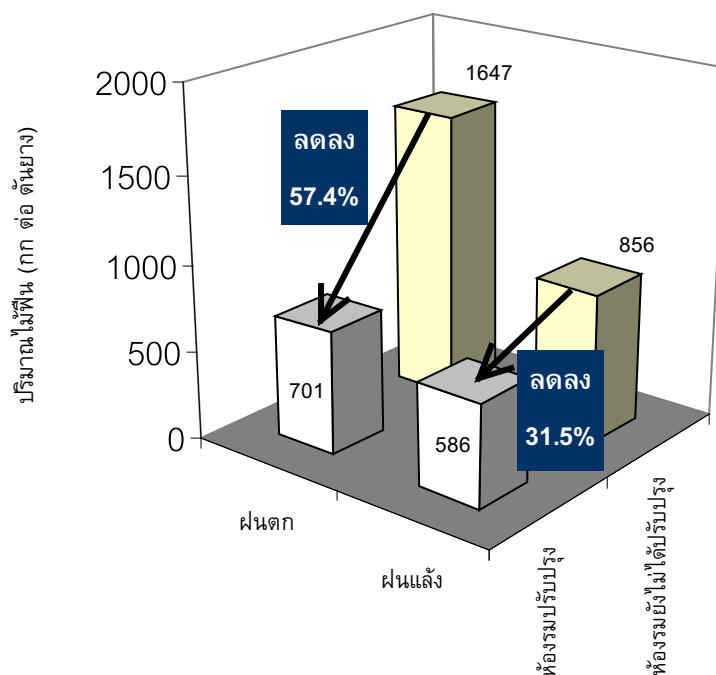
8.1 สรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ที่ต้องการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืน และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนในห้องรมโดยการนำแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ทั้งหมดมาใช้และออกแบบให้แก๊สร้อนมีการไหลที่สม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งจะช่วยให้อย่างสุกอย่างทั่วถึงในเวลาที่ลดลง และยางที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้นนั้น วิธีการวิจัยประกอบไปด้วยการศึกษาการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควันเพื่อออกแบบระบบดักจับอนุภาคเขม่าควันที่เหมาะสมดังนั้นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดจะถูกนำไปใช้รมยางโดยที่ยางที่ได้มีสีไม่คล้ำสามารถขายได้ในราคาปกติ และการปรับปรุงการไหลของแก๊สร้อนในห้องรมเพื่อให้การไหลในห้องสม่ำเสมอมากขึ้นโดยที่เป้าหมายคือเพิ่มสัดส่วนยางดีจากการรมและลดระยะเวลาการรม ผลของการวิจัยสรุปได้ดังนี้

การกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน จากการสุ่มตัวอย่างของแก๊สในห้องรมด้วยเครื่องเก็บตัวอย่าง Andersen sampler พบว่าค่า mass median aerodynamic diameter (MMAD) ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50% ของค่าสะสมของสัดส่วนมวล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 micron หรือกล่าวได้ว่าอนุภาคเขม่าจะหนาแน่นในช่วงใกล้ 1 micron โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเชิงเรขาคณิตเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 ส่วนความเข้มข้นของเขม่าจะเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นของไม้ฟืนที่ใช้ เนื่องจากไม้ฟืนที่มีความชื้นสูงจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้สูง และทำให้เกิดเขม่าปริมาณมาก

การดักจับอนุภาค ในการศึกษาหลักการดักจับอนุภาคเขม่าซึ่งมีขนาดเล็กมากเบื้องต้นได้พิจารณาการกรองโดยใช้ตาข่ายสแตนเลสละเอียดขนาด mesh #200 และ 400 วางเรียงซ้อนกันหลายชั้น จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพที่ต่ำและมีความดันสูญเสียที่สูงไม่เหมาะแก่การใช้งาน เนื่องจากแก๊สจะไม่สามารถไหลผ่านด้วยการไหลแบบธรรมชาติแต่ต้องใช้การดูดให้อากาศไหลผ่านซึ่งสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นจึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กลไกการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์มาใช้ดักจับอนุภาค จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าประสิทธิภาพการดักจับสูงมากและความดันสูญเสียที่ต่ำ และจากการทดสอบในสภาพใช้งานจริงซึ่งมีความเข้มข้นของอนุภาคสูงพบว่ามีประสิทธิภาพการดักจับโดยรวมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 49% จากการใช้งาน 10 ชั่วโมง ซึ่งน่าจะเหมาะสมในการรมควันยางแผ่นที่ไม่ต้องการประสิทธิภาพที่สูงมากเนื่องจากไม่ต้องการกำจัดอนุภาคทั้งหมด

การปรับปรุงห้องรมยาง จากการจำลองการไหลในห้องรมเปล่าพบว่าการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ และมีความแตกต่างของอุณหภูมิค่อนข้างสูง เมื่อใช้วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลในการหารูปแบบที่เหมาะสมพบว่า การเพิ่มบานระบายความชื้นและการปิดรอบห้องเหนือฝ้าเพดานช่วยให้ความเร็วและอุณหภูมิสม่ำเสมอมากขึ้น จากการทดสอบห้องรมที่ปรับปรุงแล้วเทียบกับห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพบว่าปริมาณการใช้ไม้ฟืนลดลง โดยในช่วงเปิดกรีดและมีฝนตกสามารถลดการใช้ไม้ฟืนได้ถึง 57.4% ดังรูปที่ 8.1 และลดเวลาการรมจาก 7.7 วัน เหลือ 4.4 วัน หรือ 42.8% ส่วนในช่วงฝนแล้งสามารถลดการใช้ไม้ฟืนได้ 31.5% และระยะเวลาการรมไม่เปลี่ยนแปลงคือ 4 วัน จะเห็นได้ว่าสามารถลดปริมาณการใช้ไม้ฟืนได้ตามเป้าหมายคือมากกว่า 30% ส่วนเวลาการรมขึ้นอยู่กับฤดูกาลด้วย การทดลองในห้องรมที่ปรับปรุงได้ทดลองทั้งติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่าและไม่ได้ติดตั้ง และไม่ได้เปิดท่อระบายควันดังนั้นจึงไม่ได้มีผลต่อปริมาณการใช้ไม้ฟืน แต่มีผลต่อสีของแผ่นยางโดยสีของแผ่นยางที่ผ่านการรมในห้องที่ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่าจะมีสีที่ใสกว่าแผ่นยางที่รมโดยวิธีปกติในห้องที่ไม่ได้ปรับปรุง อย่างไรก็ตามแผ่นยางที่รมในห้องที่ปรับปรุงแล้วแต่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่ามีสีคล้ำกว่าเล็กน้อยแต่สามารถขายได้ในราคาปกติคืออย่างชั้น 3



รูปที่ 8.1 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของห้องรมที่ปรับปรุงแล้วและยังไม่ได้ปรับปรุง

8.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะและทางเลือก

อุปสรรคของโครงการและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้เป็นโครงการวิจัยที่แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ทำในภาคสนามในโรงรม ในส่วนการทดลองในห้องปฏิบัติการไม่มีอุปสรรคมากนัก สามารถควบคุมการทดลองได้เป็นอย่างดี ในส่วนที่ทำในโรงรมได้รับความร่วมมือจากประธานสหกรณ์เป็นอย่างดีในการเอื้อเฟื้อสถานที่ และความสะดวกต่าง ๆ แต่มีอุปสรรคดังนี้

1. ความเข้าใจของพนักงานโรงรม ซึ่งในระยะแรกพนักงานไม่ค่อยเข้าใจและไม่ได้รับความร่วมมือเท่าที่ควร แต่เมื่อได้คลุกคลีและอธิบายให้เข้าใจถึงวัตถุประสงค์ก็สามารถทำความเข้าใจได้ดีขึ้นและได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดี ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชุมชนโดยเฉพาะคน จะต้องมีความอดทน และพยายามทำความเข้าใจ รวมทั้งให้เขาเข้าใจว่าเรามาทำเพื่อประโยชน์โดยตรงของเขา

2. วัตถุดิบ คือน้ำยาง ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาลเป็นอย่างมาก บางครั้งวางแผนการทดลองเป็นอย่างดีแต่เกิดฝนตก เกษตรกรไม่สามารถกรีดยางได้เนื่องจากน้ำยางที่มีน้ำฝนผสมเมื่อผลิตเป็นยางแผ่นจะเกิดฟองเล็ก ๆ มากมาย จึงต้องยกเลิกการทดลอง ส่วนในช่วงหน้าแล้งยางผลัดใบ ทำให้ไม่มีน้ำยางป้อนสหกรณ์จะต้องหยุดดำเนินการเป็นเวลาประมาณ 2 เดือน นอกจากนี้น้ำยางที่ได้จากสมาชิกมีคุณภาพไม่คงที่ทำให้เกิดความลำบากในการควบคุมตัวแปร อุปสรรคด้านวัตถุดิบเป็นสิ่งที่ยากต่อการแก้ไข โดยเฉพาะลมฟ้าอากาศ ที่ไม่สามารถแก้ไขได้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้โครงการนี้ล่าช้า

3. สถานที่ คือโรงรมที่อยู่ค่อนข้างห่างไกล ประมาณ 40 กิโลเมตร จากสถานที่ทำงาน จึงขาดความสะดวก และสิ้นเปลืองค่าเชื้อเพลิงในการเดินทางค่อนข้างสูง แต่โรงรมนี้เป็นโรงรมที่มีศักยภาพมากที่สุดในขณะ

นั้นและสหกรณ์ก็มีความกะตือรือร้นในการร่วมโครงการวิจัย ดังนั้นหากเป็นไปได้ควรหาโรงรมที่อยู่ใกล้ที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ต้องพิจารณาความกะตือรือร้นในการร่วมโครงการวิจัยของสหกรณ์ด้วย

4. วัสดุฉนวนของอุปกรณ์ดักเขม่าชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ ที่ต้องใช้เซรามิก เนื่องจากต้องการทนความร้อนสูงด้วย จึงต้องออกแบบและสร้างพิเศษ ช่างทำเซรามิกไม่มีความชำนาญ และเป็นงานปริมาณน้อยจึงใช้เวลานานในการสร้าง

5. การใช้ไฟฟ้าแรงสูงในห้องรม สำหรับใช้กับอุปกรณ์ดักเขม่าทำให้เกิดปัญหาพอสมควร ทำให้โครงการเกิดความล่าช้า เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าแรงสูงในห้องรมต้องใช้สายไฟฟ้าทนแรงดันสูง และสามารถทนอุณหภูมิในห้องรมได้ด้วย ซึ่งมีราคาแพงมาก ในที่นี้ได้ใช้สายไฟหุ้มเทียมนรตจักรยานยนต์ซึ่งมีราคาถูกหาได้ทั่วไป สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิเกิน 100°C จึงทำให้สายไฟบริเวณใกล้ช่องปล่อยแก๊สซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C เสื่อมเร็วต้องคอยเปลี่ยนทุก ๆ 2-3 เดือน แต่สายไฟที่ใช้มีราคาถูกมาก จึงไม่มีความสิ้นเปลืองในแง่การลงทุน

6. การสะสมของเขม่า จากการทดลองพบว่า มีทั้งเขม่า และทาร์ (tar) เกาะติดบนผนังข้าวเก็บอนุภาค ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้อย่างต่อเนื่องหากมีระบบทำความสะอาดอัตโนมัติ เช่นระบบกวาดเชิงกล หรือระบบฉีดน้ำ เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้มีประสิทธิภาพในการดักอนุภาคสูงอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ออกแบบในการทดลองนี้ไม่มีระบบทำความสะอาดเนื่องจากมีข้อจำกัดของพื้นที่ ซึ่งไม่เพียงพอกับการติดตั้งระบบทำความสะอาด ดังนั้นหากใช้งานเสร็จแต่ละครั้งจะต้องทำความสะอาดด้วยการฉีดน้ำและใช้แปรงขัดให้สะอาดก่อนการใช้งานครั้งต่อไป

ทางเลือกในการปรับปรุงห้องรม

จากผลการวิจัยขอเสนอแนวทางในการปรับปรุงห้องรม 2 ทางเลือกดังนี้

1. การปรับปรุงห้องรมแต่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่า เหมาะสำหรับสหกรณ์ทั่วไปเนื่องจากยางที่ได้แม้จะมีสีคล้ำกว่ายางที่รมโดยวิธีปรกติเล็กน้อยแต่สามารถขายได้ในราคาปรกติ ชั้น 3 เนื่องจากลงทุนไม่สูงนัก การปรับปรุงทำเฉพาะการเปลี่ยนเพดานให้มีบานระบายความชื้นจำนวน 6 บาน ทำการปิดรอบห้องเหนือเพดาน บุฉนวนที่ประตูเตา และติดตั้งพัดลมดูดอากาศชนิดหมุนด้วยตัวเองจำนวน 2 ตัว บริเวณใต้รถแขวนยางปูด้วยเหล็กพรมขนาด $1/4$ inch ค่าลงทุนห้องละ 54,300 บาท ถ้าปรับปรุงทั้ง 7 ห้องต้องลงทุนทั้งหมด 380,100 บาท เมื่อคิดสำหรับสหกรณ์ที่มีกำลังผลิต 500 ตันต่อปี และราคาไม้ฟืน 80 สตางค์ต่อกิโลกรัม จะสามารถประหยัดได้ 108,000 บาทต่อปี (คิดที่ลดปริมาณการใช้ไม้ฟืนได้ 31.5% หรือ 270 กกต่อตันยาง) ดังนั้นระยะคืนทุนเท่ากับ 3.5 ปี

2. การปรับปรุงห้องรมและติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่า เหมาะสำหรับอนาคตที่ต้องการควบคุมสียาง การลงทุนเพิ่มเติมจากข้อ 1 คือชุดอุปกรณ์ดักเขม่า 12 ชุด วงจรไฟฟ้าแรงสูง variac และสายไฟ ค่าลงทุนห้องละ 76,600 บาท ถ้าปรับปรุงทั้ง 7 ห้องต้องลงทุนทั้งหมด 536,200 บาท เมื่อคิดสำหรับสหกรณ์ที่มีกำลังผลิตเท่ากัน ระยะคืนทุนเท่ากับ 5 ปี อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้อุปกรณ์ดักเขม่าควรปรับเปลี่ยนการดักเขม่าแก๊สร้อนด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ดักเขม่าหลังจากผ่านเตาเผาและก่อนเข้าห้องรม เพื่อให้สะดวกต่อการควบคุม ต้นทุนจะสูงขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์ดักเขม่าจะมีขนาดใหญ่ (1 ตัว) และต้องรื้อเตาเผาและสร้างใหม่

คำแนะนำแก่โรงรมยางของสหกรณ์กองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง

1. การปรับปรุงห้องรม เนื่องจากการรมยางของสหกรณ์ในปัจจุบัน ยังไม่ถูกวิธีนัก โดยทางสหกรณ์ไม่ได้ควบคุมการทำงานของพนักงานทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้ได้พยายามปรับปรุงให้การใช้ห้องรมมีประสิทธิภาพมาก โดยการปรับการไหลของแก๊สร้อนให้ไหลเข้าในห้องเพียงอย่างเดียว อาจจะติดตั้งตัวดักเขม่าหากต้องการให้ยางแผ่นมีสีใสขึ้น แต่อย่างไรก็ตามต้องอาศัยความร่วมมือของพนักงานให้ทำงานอย่างถูกวิธีเพื่อลดการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง กล่าวคือป้อนไม้พินครั้งละน้อย ๆ ประมาณ 40 – 50 กก ต่อครั้ง ยกเว้น ในวันแรกอาจจะต้องใส่ไม้พินสูงถึง 100 กก การใช้ห้องรมอย่างต่อเนื่องจะช่วยลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพราะไม่จำเป็นต้องอุ่นห้องให้ร้อนทุกครั้ง

2. การบำรุงรักษา เมื่อใช้ห้องรมไปเป็นเวลานานหนึ่ง ห้องรมจะเกิดการชำรุด ดังนั้นการบำรุงรักษาที่ดีจะช่วยยืดอายุการใช้งานของห้องรม และช่วยให้ประสิทธิภาพในการรมสูงอยู่ตลอดเวลา และเมื่อเกิดการชำรุดจะต้องซ่อมแซมทันทีเพื่อไม่ให้ชำรุดมากขึ้น ตัวอย่างเช่น รอยร้าวที่เตา จำเป็นต้องซ่อมเพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากการเผาไม้พิน รอยร้าวที่เพดานก็เช่นเดียวกันหากไม่มีการซ่อมแซมจะทำให้สูญเสียความร้อนอย่างมาก โดยเฉพาะในฤดูฝนซึ่งอาจเกิดการรั่วซึมเข้าสู่ห้องรม การหุ้มฉนวนที่ประตูจะช่วยทำให้สามารถลดการสูญเสียความร้อนผ่านบานประตูได้เป็นอย่างมาก

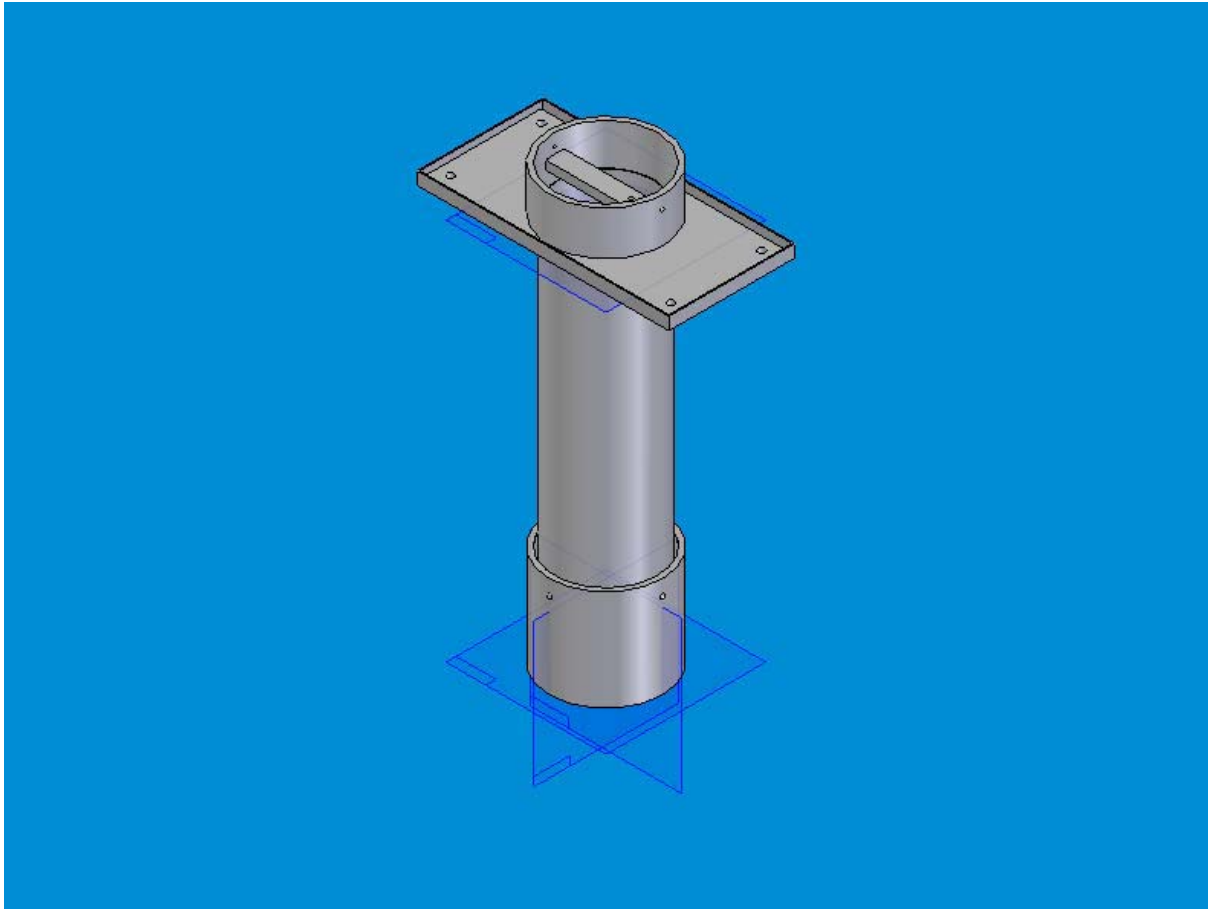
9. เอกสารอ้างอิง

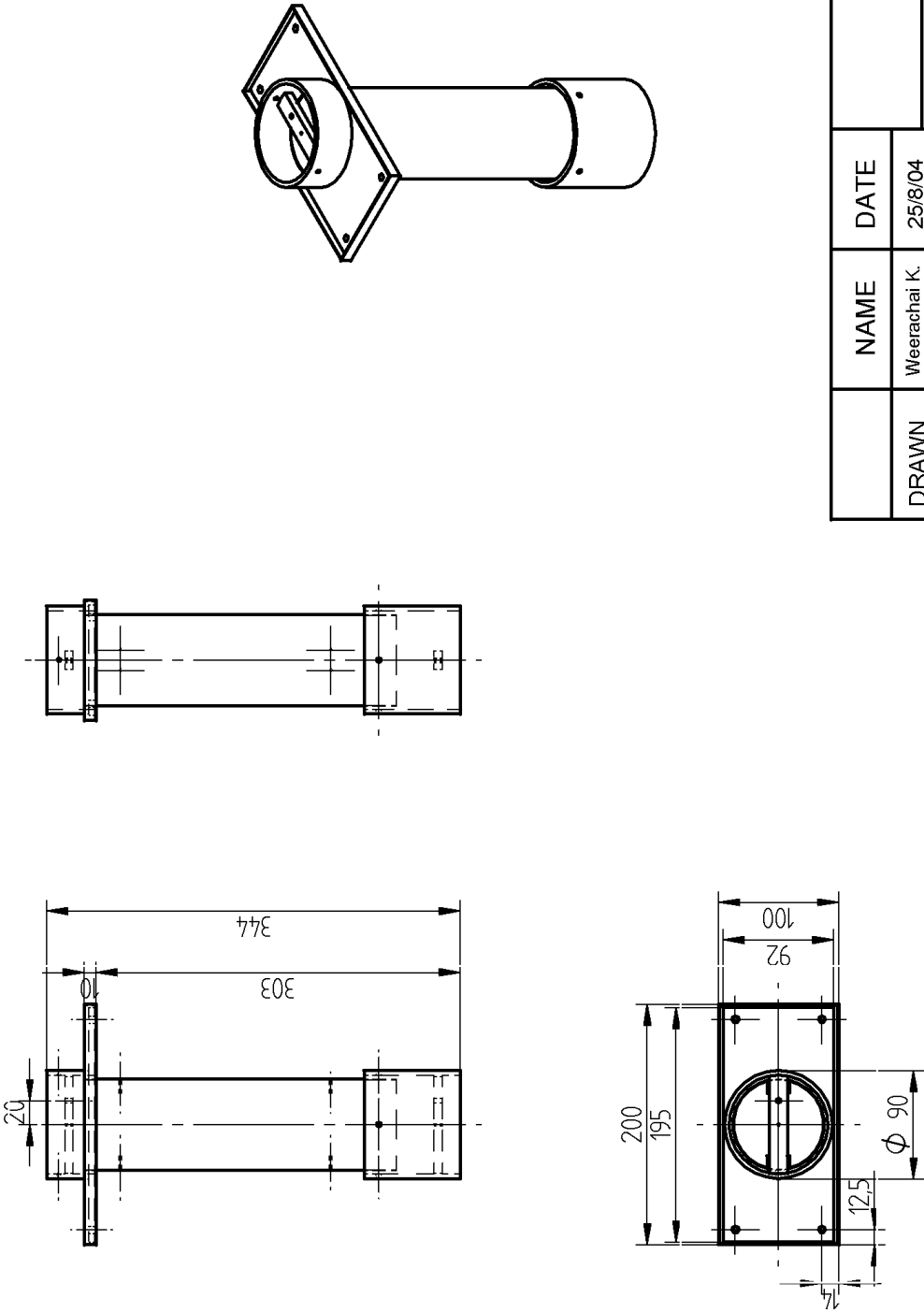
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2545) *คู่มือการรมยางแผ่น*.
- สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร (2545) *ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทยแยกตามประเภท ปี พ.ศ. 2544*.
- สหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านหัวถนน (2547) *รายงานประจำปี พ.ศ. 2547*.
- ศิริกัลยา สุวจิตตนนท์ วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ชีดาโอะ คานาโอกะ และจุฑามาศ เกตุทัต (2542) *มลภาวะอากาศ* สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์วิจัยยางสงขลา สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร *คู่มือการผลิตยางแผ่นรมควัน* พ.ศ. 2529.
- Davidson, H. J. (2000). *Electrostatic Precipitation*. Document No. ME 5115., Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, USA, pp. 2-15.
- Flomerics (2003) *FloVent Manual* version 4.2, Singapore
- Kim, S. H. and Lee, K. W. (1999). Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models, *J. Electrostatics.*, **48**, 3-25.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Jedrusik, M.; Gajewski, J.B.and Swierczok, A.J. (2001). Effect of the particle diameter and corona electrode geometry on the particle migration velocity in electrostatic precipitators, *J. Electrostatics.*, **51-52**, 245-251.
- Jedrusik, M.; Swierczok, A.and Teisseyre, R. (2003). Experimental study of fly ash precipitation in model electrostatic precipitator with discharge electrodes of different design, *Power Tech.*, **135-136**, 295-301.
- Kalasee, W.; Tekasakul, S.; Otani, Y.and Tekasakul, P. (2003). Characteristics of soot Particles Produced from Rubberwood Combustion. *Proceedings of the 2nd Asian Particle Technology Symposium*, Penang, Malaysia, **Vol. 2**, 103-108.
- Kim, S.H.and Lee, K.W. (1999). Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models, *J. Electrostatics.*, **48**, 3-25.

- Laskin, A. and Cowin, J.P. (2002). On deposition efficiency of point-to-plate electrostatic precipitator, *J. Aerosol Sci.*, **33**, 405-553.
- Prasertsan, S. (1993). Energy conservation in rubber smoking industry. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand.
- Versteeg H. K. and Malalasekera W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. Longman, London.
- Zukeran, A.; Looy, P.C.; Berezin, A.A.; Chang, Jeh-Shih. and Ito, T. (1997). Enhancement of electrostatic precipitator ultrafine particle collection efficiency by precharge, *J. Aerosol Sci.*, **28**, 281-282.

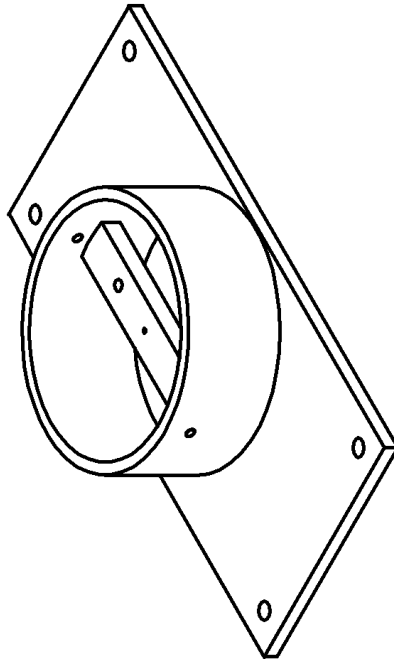
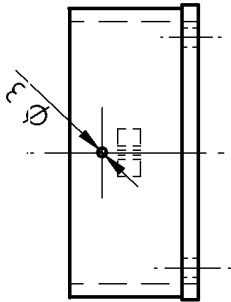
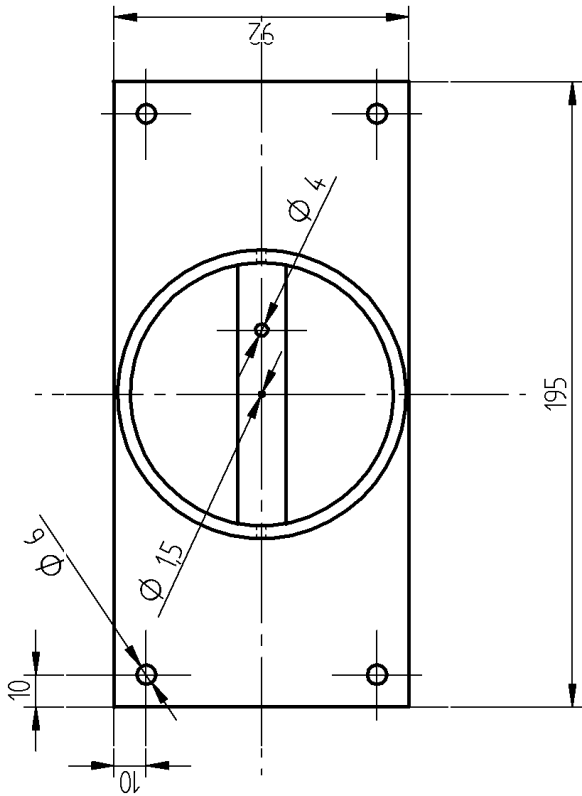
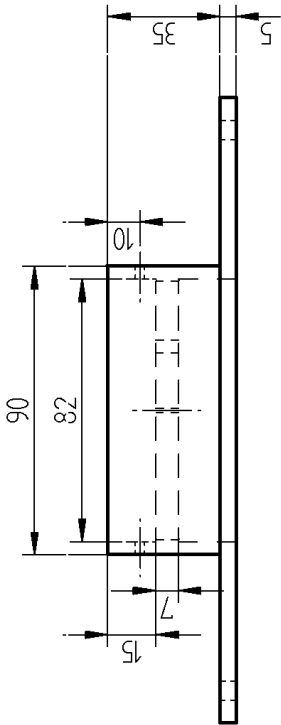
ภาคผนวก ก

แบบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์

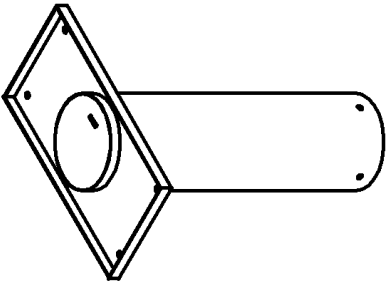
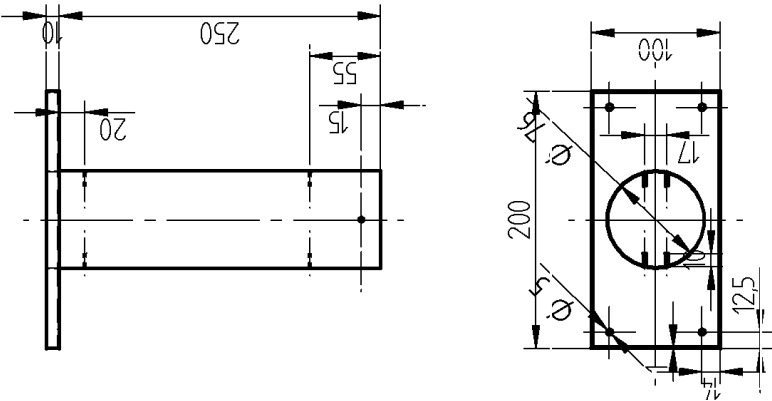




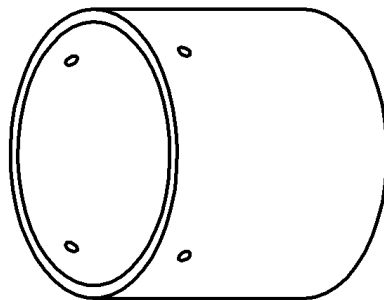
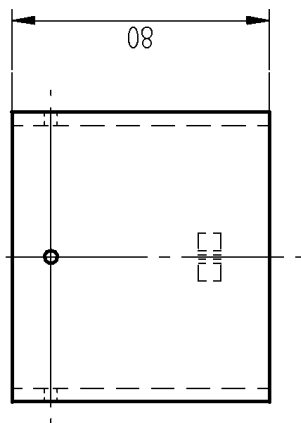
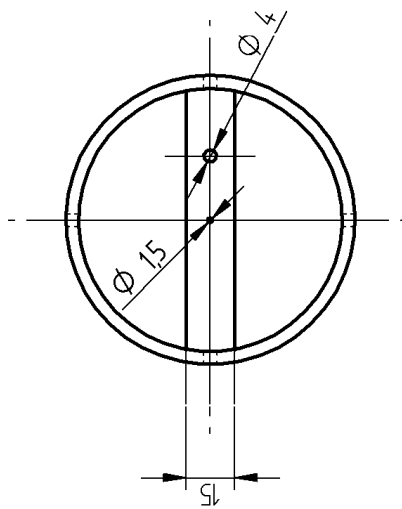
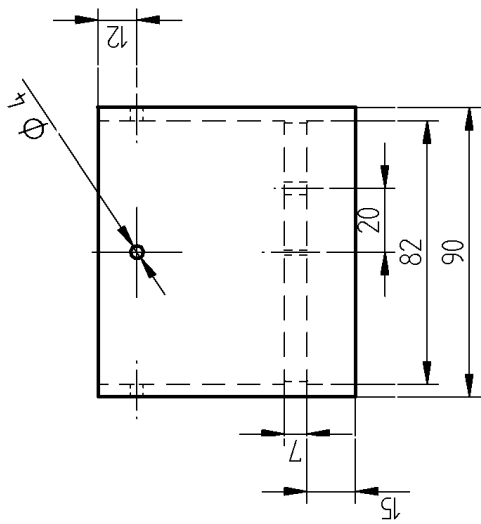
	NAME	DATE	PSU	
DRAWN	Weerachai K.	25/8/04	TITLE	
CHECKED	Peerapong T.	Unit: mm	Electrostatic-Middle	
MATERIAL : Stainless			SCALE 1:5	



	NAME	DATE	PSU	
DRAWN	Weerachai K.	25/8/04	TITLE Electrostatic - Top	
CHECKED	Peerapong T.	Unit: mm		
MATERIAL : Ceramics			SCALE	1:2



	NAME	DATE	PSU	
DRAWN	Weerachai K.	24/8/04	TITLE Electrostatic-Middle	
CHECKED	Peerapong T.	Unit: mm		
MATERIAL : Stainless			SCALE	1:5



	NAME	DATE	PSU	
DRAWN	Weerachai K.	24/8/04	TITLE Electrostatic-Bottom	
CHECKED	Peerapong T.	Unit: mm		
MATERIAL :		Ceramics		SCALE 1:2

ภาคผนวก ข

อุณหภูมิในห้องรมที่ยังไม่ได้ปรับปรุง

ตารางบันทึกอุณหภูมิห้องรมยาง ห้อง 1 ครั้งที่ 1

สภ.บ้านทุ่งโพธิ์	ห้องรมปี 37	ห้องรมหมายเลข 1
มีการตากแห้ง 12 ชม.	ยางดิบ 1879.2 kg.	ยางดี 946 kg.
ยางคัดตึง 175.2 kg.	ยางฟอง/สีคล้ำ 46 kg.	ปริมาณไม้ฟืน 1313.6 kg.
		ค่าความชื้นไม้ฟืน 61.2 %

เวลา (hr)	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องรมยาง (°C)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	45	40	44	41	44	42	44	45	44	47	45	48	45
3	54	51	52	52	58	60	52	56	60	55	52	55	53
6	50	57	55	55	54	54	52	55	53	55	53	56	51
9	53	49	54	52	63	65	52	69	68	55	52	56	52
12	53	50	53	52	56	56	51	64	68	54	48	56	50
15	61	54	60	57	65	69	60	67	76	68	59	67	58
18	63	56	59	58	68	75	61	66	75	68	60	68	60
21	61	56	57	56	69	72	60	70	75	65	59	65	59
24	64	54	61	56	66	66	63	62	68	66	61	67	62
27	59	50	58	53	62	62	59	69	70	63	59	63	59
30	53	51	54	51	58	57	56	61	63	59	55	57	55
33	56	52	57	52	60	60	55	64	65	60	57	60	57
36	58	55	58	56	59	60	59	64	64	60	58	60	58
39	60	58	60	59	64	68	62	62	62	63	62	63	61
42	63	61	63	62	63	64	66	65	63	67	67	65	66
45	62	61	62	61	62	64	65	65	62	66	67	65	65
48	60	59	60	60	61	62	63	62	61	65	66	64	66
51	64	62	64	63	64	63	67	67	63	70	71	68	68
54	65	63	65	64	65	64	71	67	64	68	68	67	67
57	69	67	69	67	68	67	71	70	68	73	74	71	71
60	74	72	73	72	73	73	75	76	73	78	80	77	76
63	74	73	74	74	76	74	82	77	74	76	77	78	77
66	73	71	73	72	74	74	79	75	74	75	75	76	75
69	70	69	70	70	71	72	74	72	73	72	71	74	71

ตารางบันทึกอุณหภูมิห้องรมยาง ห้อง 1 ครั้งที่ 2

สภ.บ้านทุ่งโพธิ์	ห้องรมปี 37	ห้องรมหมายเลข 1
มีการตากแห้ง 12 ชม.	ยางดิบ 2106 kg.	ยางดี 648.8 kg.
ยางคัดทิ้ง 101.2 kg.	ยางฟอง/สีคล้ำ 213.2 kg.	ปริมาณไม้ฟืน 1167 kg.
		ค่าความชื้นไม้ฟืน 61.9 %

เวลา (hr)	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องรมยาง (°C)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	44	36	43	40	45	41	40	44	44	42	41	42	38
3	69	68	62	64	58	63	52	57	60	60	58	58	53
6	71	74	64	64	57	60	54	58	59	59	60	55	52
9	64	61	63	64	58	63	51	57	62	59	60	58	51
12	66	69	58	57	55	53	51	56	58	57	55	58	49
15	76	80	66	65	64	61	60	64	66	65	61	66	56
18	74	78	69	67	66	66	64	66	69	68	64	68	61
21	68	70	66	67	64	63	63	65	61	65	63	64	62
24	74	72	73	72	67	70	65	68	72	69	67	68	65
27	78	78	73	74	66	64	64	66	64	67	68	66	64
30	78	80	71	70	65	63	62	65	64	66	68	64	66
33	85	85	80	82	73	73	72	73	75	74	74	73	72
36	81	82	84	84	76	75	76	77	83	78	78	76	75
39	79	82	83	84	78	75	76	75	77	77	78	75	75
42	73	76	77	76	74	72	72	73	72	72	72	71	71
45	76	75	76	78	71	70	70	73	73	71	72	70	70
48	73	74	73	75	70	69	69	71	72	69	70	68	68
51	74	71	73	75	69	68	68	70	70	69	69	68	68
54	72	72	67	68	68	67	67	70	70	67	67	66	66
57	70	71	65	66	67	66	66	68	67	65	66	65	65
60	69	70	64	66	66	65	65	67	67	64	65	64	63
63	65	66	61	61	63	63	63	63	63	62	62	62	62
66	62	63	59	59	62	62	61	61	61	61	60	60	60
69	58	59	57	57	59	59	59	58	59	59	58	58	58

ตารางบันทึกอุณหภูมิห้องรมยาง ห้อง 2 ครั้งที่ 1

สภ.บ้านทุ่งโพธิ์	ห้องรมปี 37	ห้องรมหมายเลข 2
มีการตากแห้ง 12 ชม.	ยางดิบ 2138.4 kg.	ยางดี 525.9 kg.
ยางคัดทิ้ง 150 kg.	ยางฟอง/สีคล้ำ 538 kg.	ปริมาณไม้ฟืน 1546.6 kg.
		ค่าความชื้นไม้ฟืน 62.9 %

เวลา (hr)	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องรมยาง (°C)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	39	34	35	36	42	42	44	42	36	37	36	37	37
3	51	44	50	52	63	68	51	54	50	56	54	51	50
6	67	69	56	50	53	50	50	53	48	58	52	52	47
9	69	75	60	62	53	50	51	53	48	58	52	52	47
12	69	72	66	66	55	51	55	54	50	58	53	54	48
15	70	71	62	64	61	54	59	57	51	64	57	60	50
18	66	69	66	66	60	54	58	57	49	63	56	60	50
21	58	59	58	56	54	50	55	52	49	57	51	55	48
24	59	62	56	57	56	50	54	52	50	57	53	54	47
27	60	59	60	62	59	56	60	59	56	63	59	59	53
30	67	69	59	62	58	55	60	56	55	60	58	55	53
33	66	68	67	67	60	58	59	59	58	63	60	59	57
36	67	67	71	68	63	61	60	62	61	65	63	62	60
39	65	66	68	66	66	63	61	64	63	65	63	63	61
42	65	66	68	64	66	64	63	65	63	66	64	63	62
45	64	65	69	66	66	65	63	65	65	67	66	64	63
48	65	68	62	63	65	63	63	64	63	65	64	63	62
51	65	67	63	64	66	65	68	67	64	66	66	64	63
54	65	65	65	66	72	69	67	67	68	69	68	66	62
57	67	66	65	68	72	75	66	68	73	71	70	67	67
60	70	69	68	70	72	74	68	71	76	74	73	71	71
63	66	67	66	67	72	73	67	68	73	70	70	68	68
66	63	63	63	64	67	69	63	65	69	67	66	64	65
69	60	60	60	61	65	67	61	61	65	64	63	61	62
72	59	59	59	60	62	66	60	60	63	63	61	60	61
75	57	57	57	58	61	63	58	58	62	60	60	58	59

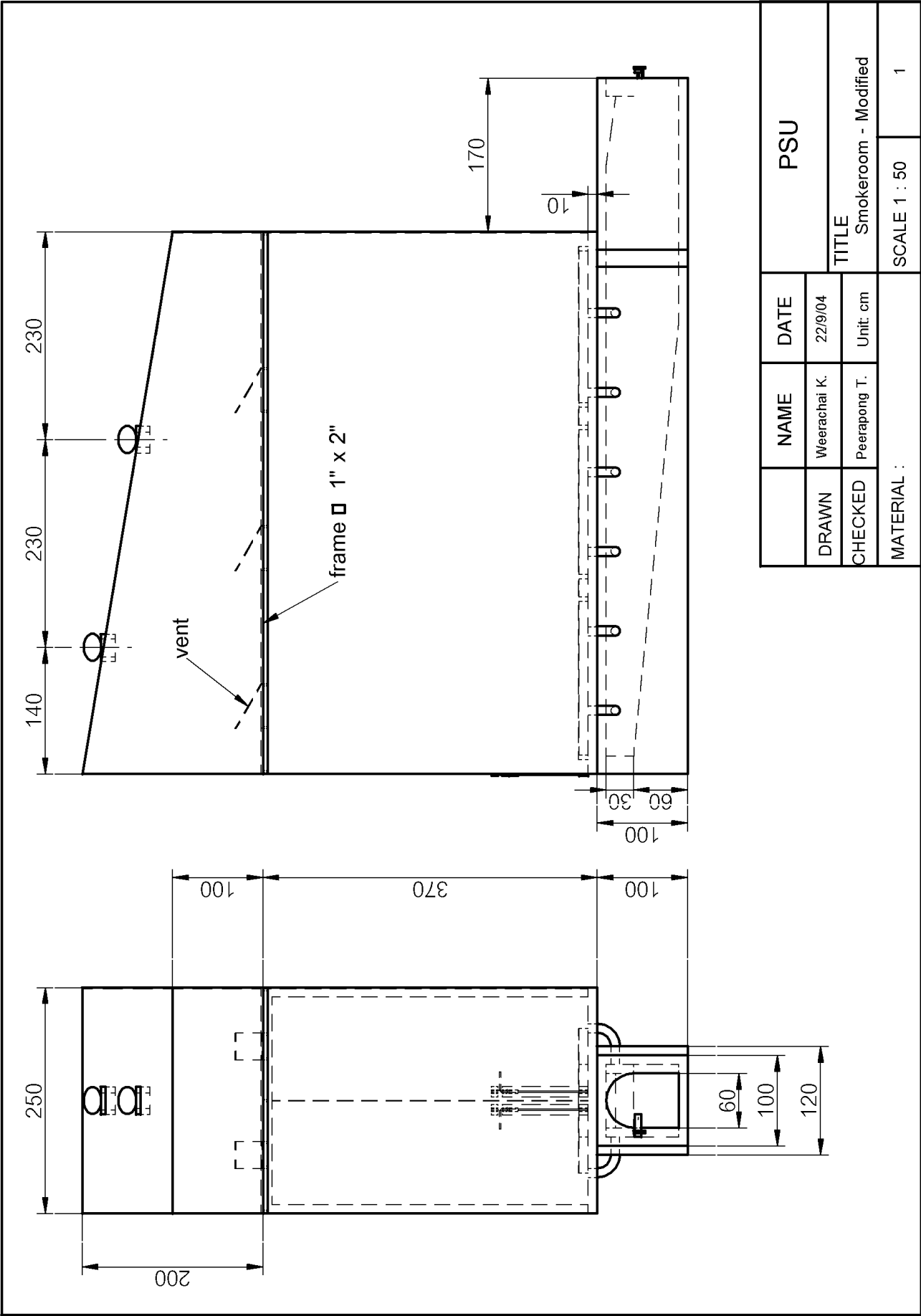
ตารางบันทึกอุณหภูมิห้องรมยาง ห้อง 2 ครั้งที่ 2

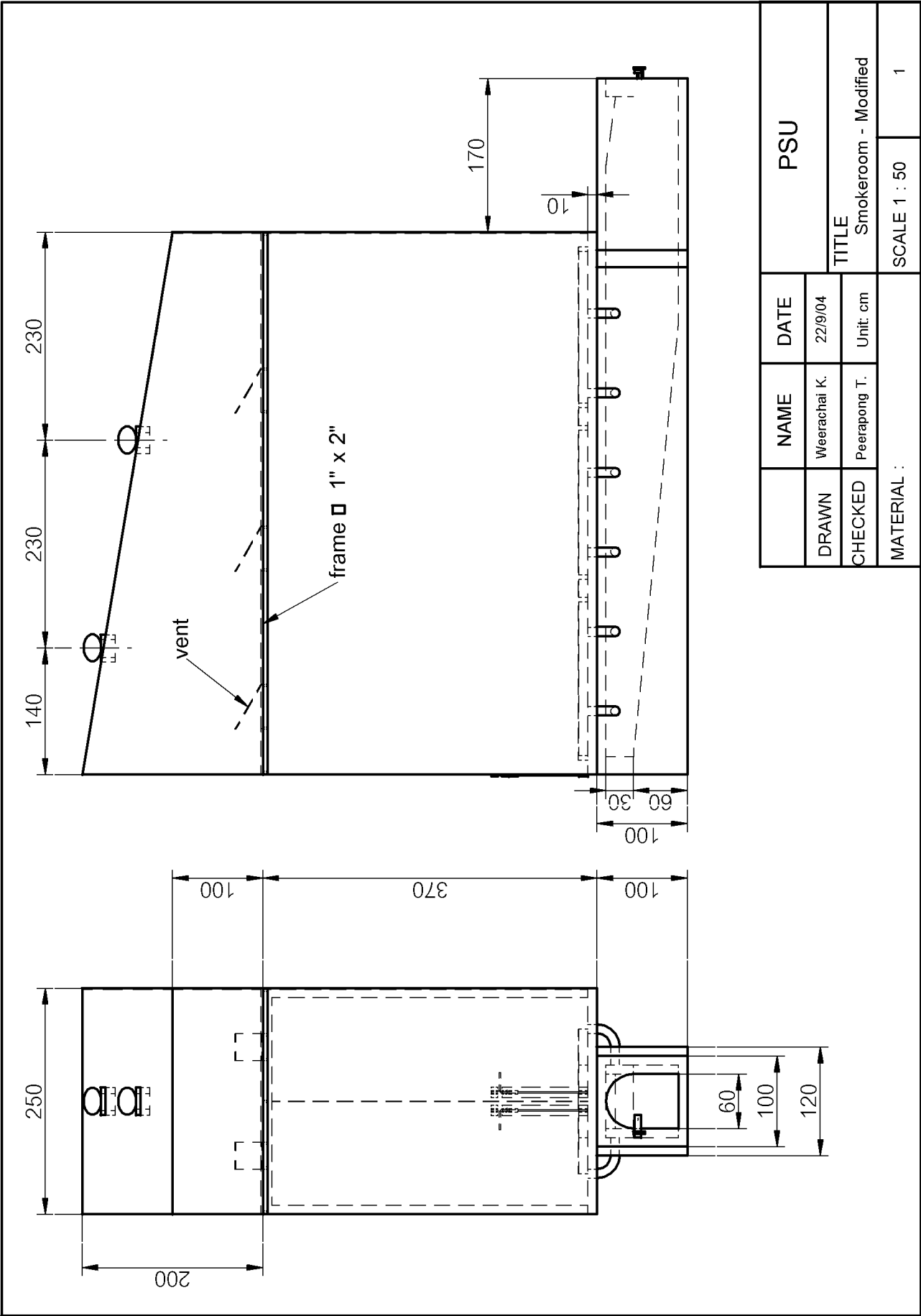
สภ.บ้านทุ่งโพธิ์	ห้องรมปี 37	ห้องรมหมายเลข 2
มีการตากแห้ง 12 ชม.	ยางดิบ 2008.8 kg.	ยางดี 841.4 kg.
ยางคัดทิ้ง 137.2 kg.	ยางฟอง/สีคล้ำ 40.2 kg.	ปริมาณไม้ฟืน 1236 kg.
		ค่าความชื้นไม้ฟืน 64.2 %

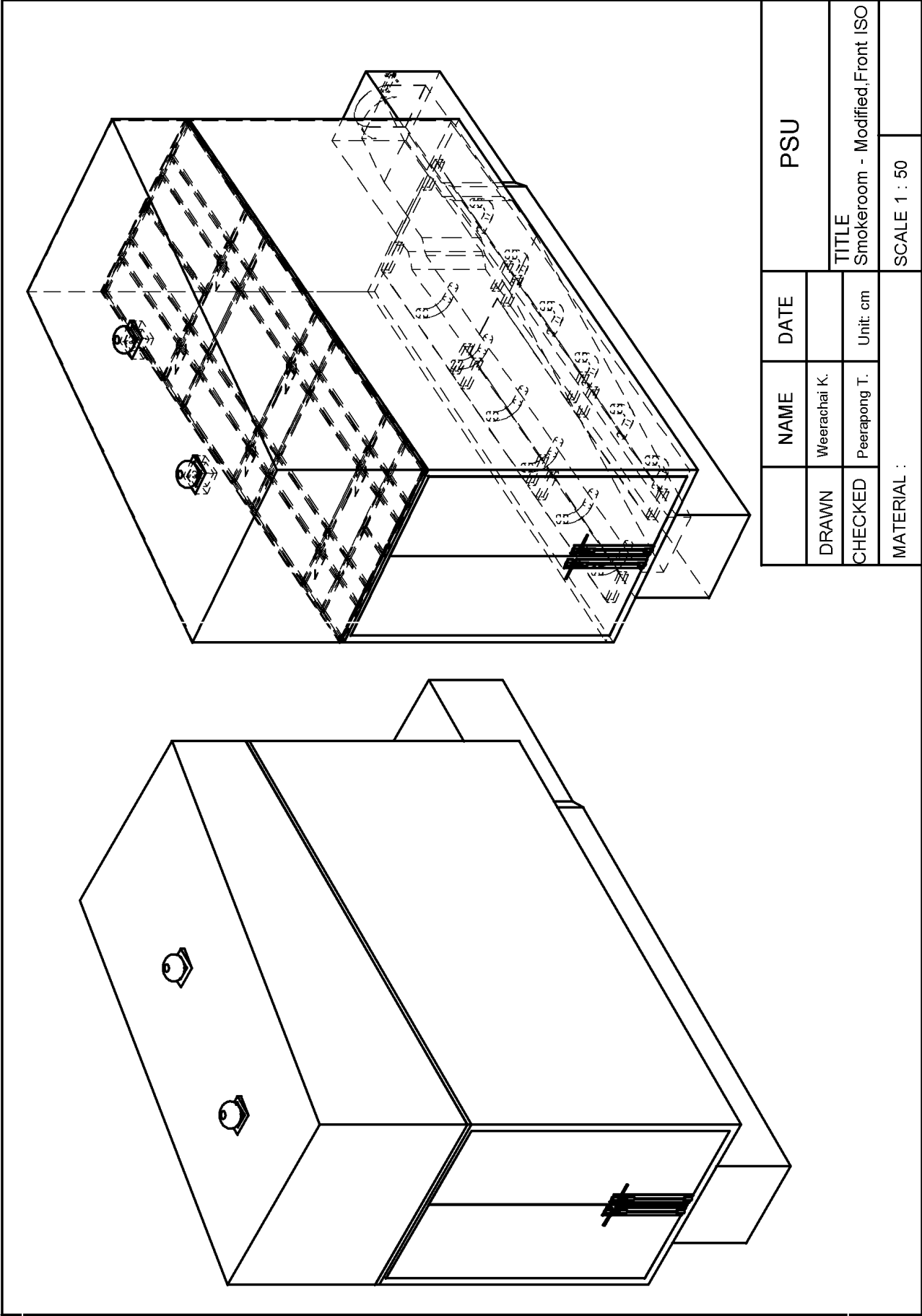
เวลา (hr)	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องรมยาง (°C)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	40	39	38	36	40	41	44	52	43	39	37	39	37
3	55	64	54	54	54	53	43	45	56	57	56	53	52
6	61	68	60	59	58	52	44	44	52	55	60	52	50
9	55	62	53	52	56	53	50	59	61	59	65	55	52
12	61	66	59	61	54	52	54	54	54	57	57	54	50
15	60	59	60	59	57	53	56	56	55	59	60	56	51
18	59	59	58	57	55	51	54	55	55	57	55	55	52
21	55	54	54	53	52	50	51	51	52	53	52	52	50
24	54	52	56	56	54	53	53	52	53	55	54	54	52
27	57	57	57	56	60	60	60	62	63	63	62	61	58
30	59	59	58	56	59	58	58	61	62	62	60	60	57
33	62	63	60	59	60	59	59	60	59	62	60	60	58
36	61	62	61	59	61	61	60	63	62	63	62	60	59
39	63	64	61	60	63	63	64	61	61	64	63	62	61
42	62	63	57	59	60	56	57	57	58	58	57	56	56
45	59	61	57	57	58	57	56	57	57	57	56	56	56
48	57	58	55	54	56	56	54	54	54	55	54	54	54
51	62	60	63	60	62	64	66	64	61	67	66	66	62
54	66	64	66	64	67	69	72	67	65	71	70	68	65
57	65	65	66	65	69	71	72	66	65	69	68	67	65
60	62	62	62	61	65	65	64	62	62	64	63	62	61
63	62	62	59	58	61	60	59	58	58	60	59	59	58
66	60	61	57	56	59	59	58	57	57	58	58	57	57
69	58	59	57	56	59	58	58	57	56	58	58	57	56

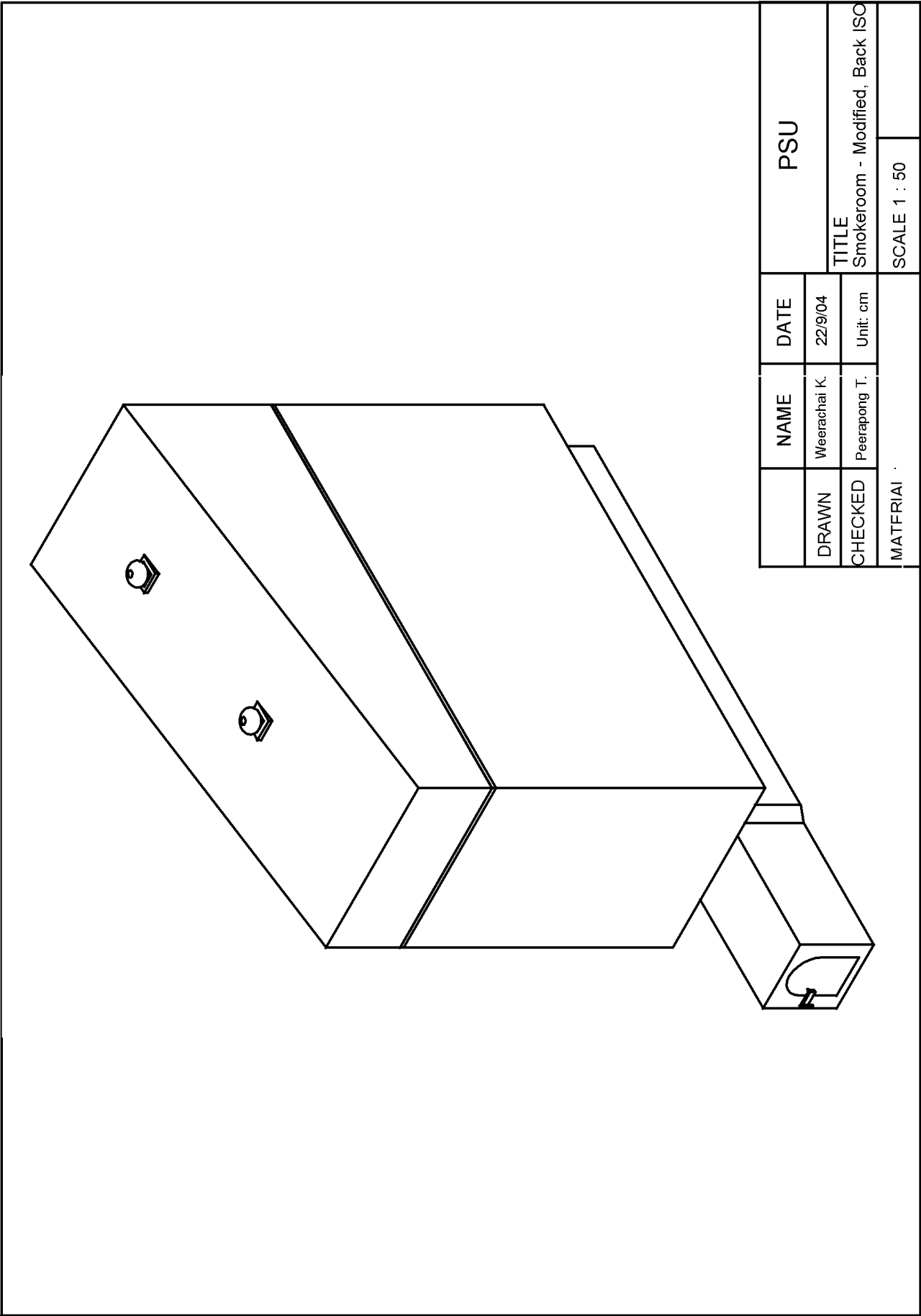
ภาคผนวก ค

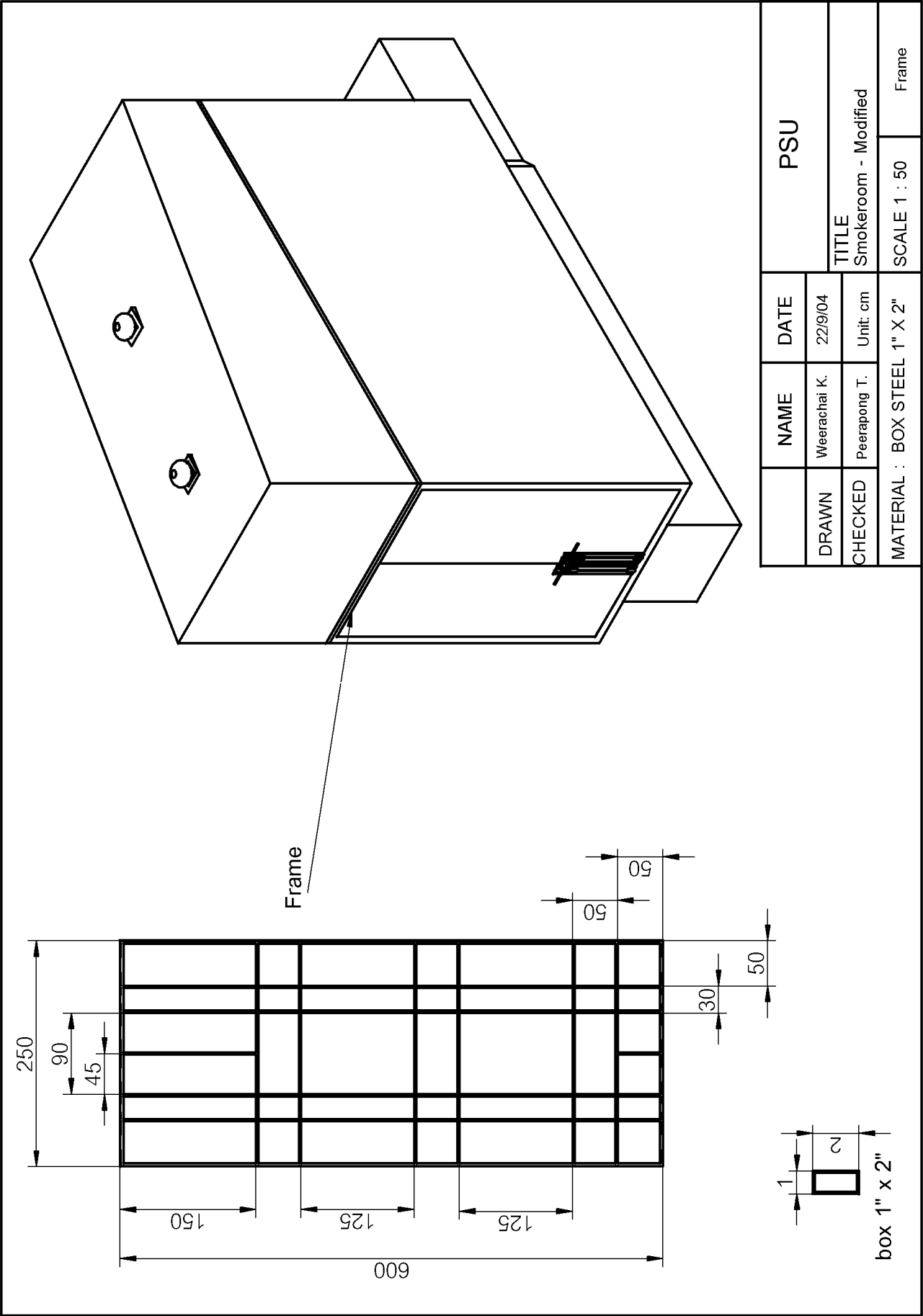
แบบของห้องรมปรับปรุงแล้ว

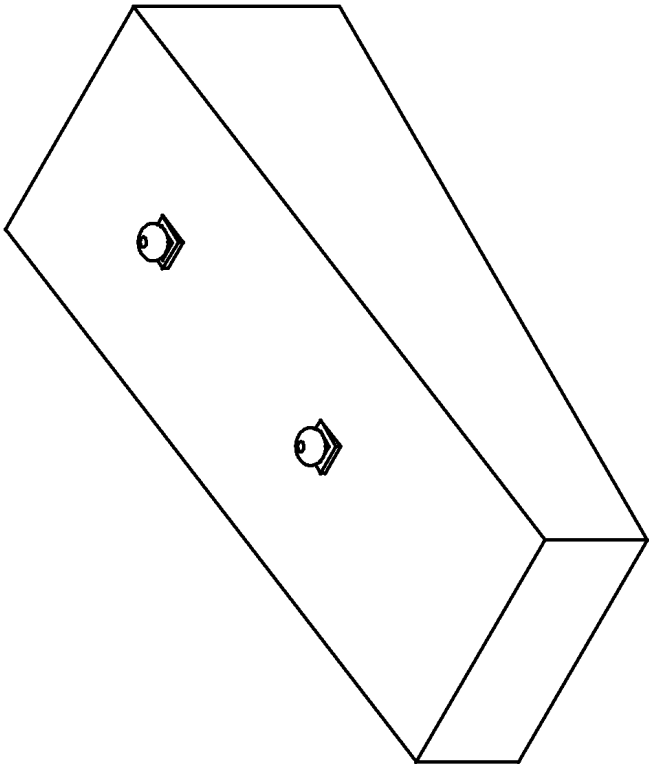
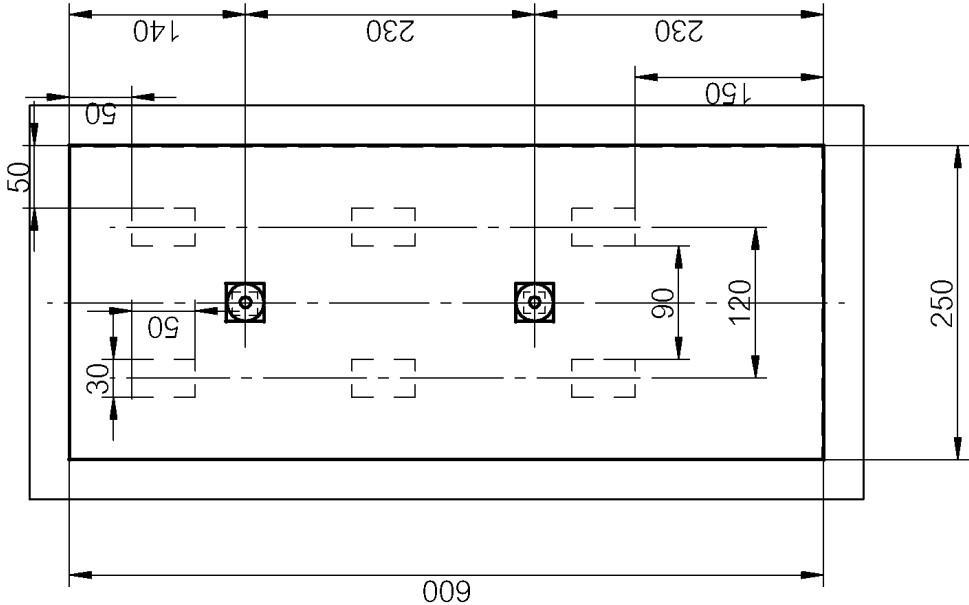




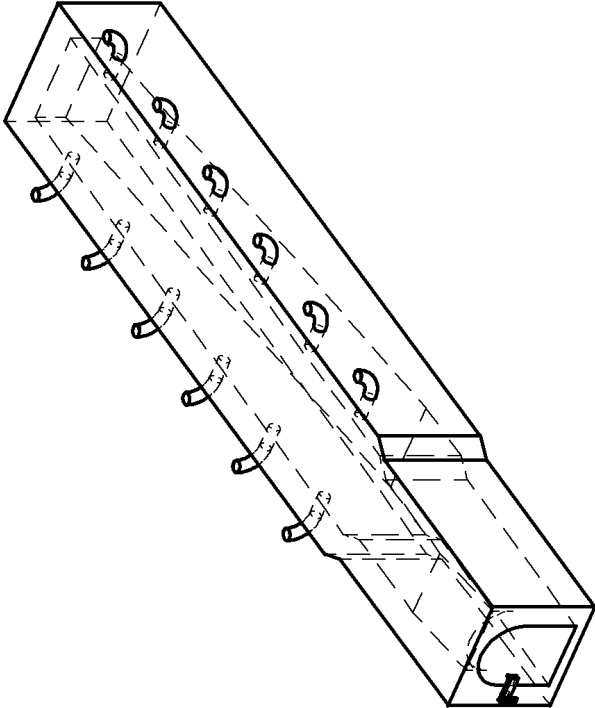
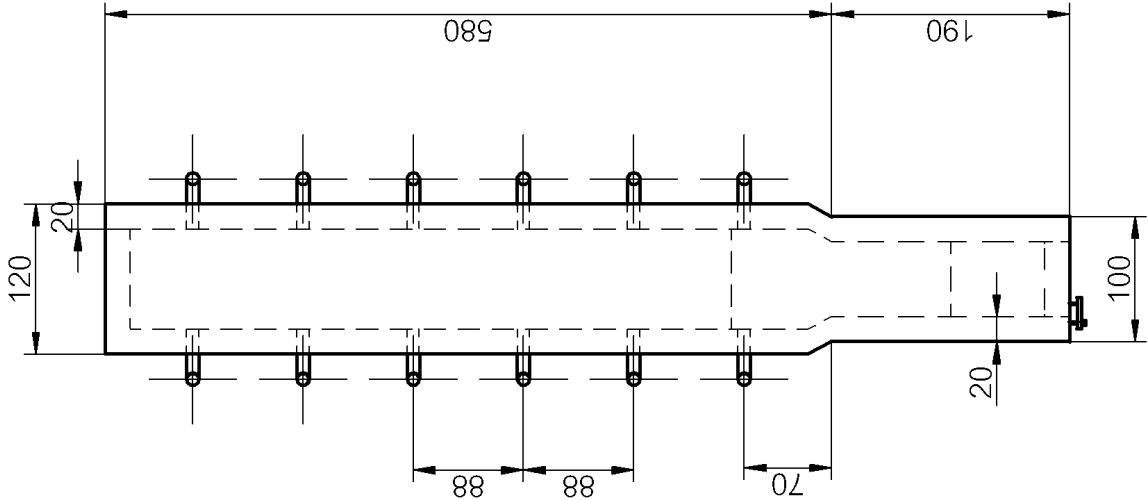








	NAME	DATE	PSU	
DRAWN	Weerachai K.	22/9/04		
CHECKED	Peerapong T.	Unit: cm	TITLE Smokeroom - Modified	
MATERIAL :		SCALE 1 : 50		Roof



	NAME	DATE	PSU	
DRAWN	Weerachai K.	22/9/04	TITLE	
CHECKED	Peerapong T.	Unit: cm	Smokerroom - Modified	
MATERIAL :		SCALE		Furnace / 2

ภาคผนวก ง

อุณหภูมิในห้องรมที่ปรับปรุงแล้ว

ตารางบันทึกอุณหภูมิห้องรมยาง ห้อง 7 ครั้งที่ 1

สภ.บ้านหัวถนน	ห้องรมปี 37	ห้องรมหมายเลข 7
มีการตากแห้ง 12 ชม.	ยางดิบเข้า 1429 kg.	ยางดี 950 kg.
ยางคัตตึง 71 kg.	ยางฟอง/สีคล้ำ 70 kg.	ยางดิบ 0 kg.
		ปริมาณไม้ฟืน 633 kg.

เวลา (hr)	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องรมยาง (°C)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	หน้าห้อง
0	31	31	31	31	30	31	30	30	31	30	31	31	31	29
1	36	35	35	36	37	38	38	41	39	35	34	34	34	33
2	36	36	36	36	40	40	40	42	40	35	35	34	34	34
3	35	35	36	36	39	39	40	41	41	35	34	34	34	35
4	39	40	40	41	42	43	43	46	44	39	39	39	39	39
5	41	41	41	41	46	46	46	48	47	41	41	39	39	39
6	41	41	40	40	46	46	47	52	51	41	41	39	40	38
7	40	40	40	40	47	47	47	53	51	41	41	40	40	38
8	42	40	42	41	46	47	45	53	50	40	40	37	38	37
9	54	54	51	51	61	60	61	62	63	52	50	49	49	49
10	54	54	52	52	62	61	61	62	64	53	52	49	50	47
11	55	55	51	51	63	63	63	64	64	53	53	51	48	47
12	53	52	52	51	60	61	62	62	61	50	51	47	48	45
13	56	55	54	54	64	62	63	65	64	55	52	50	51	48
14	56	54	53	54	63	63	61	67	65	53	54	52	51	49
15	57	56	54	54	61	60	59	63	64	54	50	47	48	45
16	54	55	53	54	60	60	60	63	64	55	52	48	48	45
17	53	53	53	52	60	59	58	62	61	54	51	47	47	44
18	53	52	51	51	59	59	59	60	60	51	50	45	45	43
19	55	53	54	54	60	60	60	57	56	54	52	47	47	48
20	56	53	51	51	55	57	55	59	61	54	51	50	50	49
21	54	51	48	49	58	58	58	59	63	55	53	50	49	48
22	55	51	50	50	60	60	61	63	66	54	53	49	49	49
23	54	50	50	51	60	62	62	65	65	53	53	50	49	49
24	53	52	52	51	54	64	65	65	65	50	51	50	49	46
25	53	52	52	51	58	63	64	65	65	51	51	50	50	46

26	56	55	56	52	54	64	64	67	63	55	53	51	51	47
27	56	56	53	53	54	65	64	67	66	54	54	50	51	47
28	56	54	55	52	57	65	64	68	65	55	52	51	51	47
29	56	54	54	52	57	64	64	68	63	55	53	50	50	46
30	56	55	55	52	61	65	64	68	65	54	54	51	51	51
31	57	54	54	54	60	66	63	69	67	56	54	52	53	51
32	56	56	55	52	61	65	62	69	65	55	53	53	52	51
33	57	57	55	53	60	64	64	68	65	56	53	53	51	51
34	56	54	53	53	63	66	64	70	68	55	53	52	52	51
35	58	53	54	54	64	64	65	68	67	57	53	53	54	50
36	57	54	54	54	65	66	65	71	69	54	54	54	54	54
37	57	56	55	54	66	63	65	72	71	56	55	54	54	54
38	58	58	56	53	66	65	64	71	67	55	54	54	54	54
39	57	55	53	53	66	63	65	69	68	56	54	54	54	54
40	56	57	53	53	65	64	63	67	65	54	54	53	53	53
41	58	55	53	51	65	63	64	67	65	53	54	52	52	51
42	58	54	52	52	63	62	63	66	65	54	53	51	51	49
43	57	52	50	51	61	60	60	63	64	52	52	50	51	49
44	59	55	56	52	63	62	63	67	65	55	53	53	52	52
45	58	56	56	55	65	64	63	68	68	56	54	52	52	52
46	58	54	55	53	64	63	64	69	67	56	52	53	52	52
47	57	55	54	53	62	62	64	69	68	55	53	52	53	52
48	60	57	59	58	67	66	65	70	69	59	59	57	57	55
49	62	59	59	58	67	66	65	69	68	59	59	57	57	55
50	64	60	62	61	66	67	64	68	68	60	60	57	58	55
51	63	61	61	60	66	66	64	69	68	60	60	58	58	55
52	63	61	61	60	67	65	63	69	68	59	60	57	57	54
53	64	62	62	61	68	67	66	70	70	61	61	59	60	54
54	63	61	63	62	68	67	66	71	70	61	60	58	59	56
55	64	61	62	62	67	67	67	68	69	62	61	60	60	58
56	63	62	60	61	66	64	65	69	67	61	62	60	60	59
57	63	60	60	61	64	64	65	67	67	60	60	59	59	58
58	63	60	60	60	63	65	64	67	66	60	60	59	59	58
59	64	63	65	65	66	67	66	69	69	64	64	61	62	58
60	64	64	64	62	66	67	67	69	68	63	62	60	60	58

61	65	63	64	62	66	68	65	69	68	62	62	60	60	57
62	63	62	62	61	66	68	65	69	68	61	60	59	59	56
63	62	62	63	62	65	67	64	67	68	60	59	57	58	56
64	63	63	63	62	64	66	65	68	68	61	60	59	59	56
65	63	62	63	62	65	66	64	67	68	60	60	57	59	56
66	62	62	61	62	65	66	65	66	66	60	59	59	59	56
67	63	61	63	63	65	67	65	67	68	61	60	59	59	55
68	63	61	62	62	65	65	64	67	68	61	60	60	59	56
69	62	62	63	63	65	66	66	68	68	62	60	58	60	56
70	63	62	63	62	64	64	66	69	67	60	60	59	60	56
71	62	60	61	60	66	68	66	66	68	61	60	59	59	56
72	63	62	63	61	65	64	64	66	67	61	62	60	59	56
73	63	61	63	63	64	65	65	67	66	61	61	59	59	56
74	63	63	63	62	64	64	64	65	65	63	60	60	60	55
75	62	61	63	60	63	65	66	66	67	63	62	59	60	55
76	60	63	63	60	63	63	63	67	65	62	61	58	58	56
77	61	60	62	59	62	62	64	65	65	61	60	57	58	56
78	59	57	60	59	61	61	60	63	62	60	59	57	58	55
79	57	58	59	59	61	62	62	63	62	56	58	58	57	55
80	60	58	60	58	61	62	62	62	60	58	58	57	56	55
81	57	57	58	57	60	60	62	60	60	59	57	57	57	55
82	58	57	57	57	59	59	60	61	60	57	58	56	56	55

ตารางบันทึกอุณหภูมิห้องรมยาง ห้อง 7 ครั้งที่ 1

สกลย.บ้านหัวถนน	ห้องรมปี 37	ห้องรมหมายเลข 7
มีการตากแห้ง 12 ชม.	ยางดิบเข้า 1517 kg.	ยางดี 1029 kg.
ยางคัดทิ้ง 62 kg.	ยางฟอง/สีคล้ำ 20 kg.	ยางดิบ 13 kg.
		ปริมาณไม้ฟืน 742 kg.

เวลา (hr)	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องรมยาง (°C)													หน้าห้อง
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
0	29	29	30	30	29	30	30	29	30	30	29	30	30	29
1	35	33	35	34	38	37	36	42	41	36	35	34	34	31
2	39	35	36	34	39	41	40	42	39	36	34	33	34	31
3	39	34	35	36	42	42	42	44	41	37	36	36	36	33
4	43	41	39	40	41	45	44	48	45	39	38	37	38	36
5	43	41	42	41	45	46	47	48	47	41	40	38	38	36
6	44	44	43	41	47	46	49	53	52	40	39	39	38	37
7	45	45	43	43	48	48	51	55	53	40	39	38	38	36
8	45	44	43	42	49	48	51	55	53	40	40	37	38	38
9	45	44	44	45	49	48	52	55	52	43	42	40	40	40
10	46	45	44	46	50	48	50	55	52	44	42	41	41	40
11	46	46	45	46	50	50	50	57	52	43	40	41	42	39
12	46	46	45	47	51	51	53	57	52	44	42	41	40	39
13	45	46	47	43	48	48	51	55	53	45	43	43	42	40
14	47	48	46	45	51	50	51	55	53	45	44	43	42	39
15	46	46	46	45	50	52	51	56	55	46	44	42	42	39
16	49	47	46	44	49	52	50	56	55	46	45	42	42	40
17	47	47	45	44	50	52	52	56	54	46	45	43	44	40
18	48	47	45	44	49	50	52	61	56	47	44	43	43	40
19	48	48	46	47	50	50	51	61	56	47	44	43	42	40
20	46	45	44	46	48	51	50	60	56	47	45	43	42	39
21	47	48	46	44	52	52	55	60	58	48	45	44	43	40
22	46	48	46	44	51	54	53	60	57	47	44	42	42	41
23	46	50	50	51	60	62	62	65	65	53	53	50	49	40
24	54	56	55	53	60	57	61	68	67	57	55	52	53	49
25	54	52	52	51	58	63	64	65	65	51	51	50	50	48

26	58	57	53	52	57	68	68	67	61	56	54	51	51	47
27	54	52	52	51	54	64	65	65	65	50	51	50	49	47
28	56	57	54	54	64	66	65	68	64	58	56	51	50	46
29	60	59	58	59	65	65	66	69	62	56	56	51	52	50
30	58	58	59	57	65	63	64	67	62	56	56	51	50	48
31	58	58	55	56	63	62	63	66	62	57	56	50	51	49
32	60	58	60	59	62	64	64	69	62	57	55	52	51	49
33	57	60	56	59	64	65	67	69	62	56	56	53	53	51
34	57	61	59	58	67	66	65	68	62	58	56	54	53	50
35	58	59	59	58	67	66	65	69	64	59	57	53	53	51
36	58	60	62	61	63	63	66	69	64	59	55	52	53	51
37	57	62	61	60	66	66	64	69	64	57	56	54	52	50
38	58	62	61	60	67	65	63	69	64	60	56	53	53	50
39	60	62	62	61	68	67	66	70	65	60	57	54	53	52
40	62	65	63	62	68	67	66	71	65	59	57	54	52	51
41	62	65	63	64	65	65	67	69	65	60	55	54	54	51
42	61	63	62	64	64	64	68	69	65	59	58	56	56	52
43	60	62	63	64	65	65	67	69	65	60	59	57	56	52
44	63	62	62	69	67	67	68	71	65	63	61	57	55	52
45	62	62	59	67	66	67	68	70	66	63	61	57	55	51
46	63	62	60	68	66	66	69	70	65	63	60	57	55	52
47	60	65	61	68	66	67	67	69	64	61	61	57	56	52
48	60	62	58	68	67	66	67	68	65	61	60	56	55	52
49	60	62	59	64	66	67	65	68	64	62	60	59	58	54
50	63	62	59	62	67	65	65	68	65	59	60	58	58	54
51	63	63	59	63	66	67	68	68	65	61	62	60	59	55
52	64	64	62	63	67	66	68	67	66	63	63	60	60	55
53	62	63	62	64	66	64	66	69	64	61	62	60	58	53
54	62	60	59	65	66	65	67	69	63	61	62	59	58	55
55	60	59	60	59	66	67	67	69	67	61	60	58	58	53
56	60	60	59	62	66	68	67	66	67	61	60	59	60	54
57	64	62	60	62	66	66	66	68	65	62	60	61	61	54
58	64	62	61	62	62	65	65	70	64	63	62	62	61	55
59	61	60	60	63	65	64	67	69	67	63	62	61	60	55
60	60	59	65	66	67	66	67	69	65	63	62	61	60	55

61	63	62	62	66	67	67	65	69	66	62	62	61	60	54
62	63	62	62	66	68	65	68	69	66	63	61	61	60	55
63	63	62	61	66	68	65	68	71	66	63	62	61	59	54
64	62	60	59	58	67	66	66	70	67	62	62	60	59	55
65	63	60	59	58	67	66	67	71	67	61	62	59	60	56
66	63	63	62	61	66	67	65	69	65	63	61	61	61	56
67	64	65	61	60	66	66	65	69	65	62	62	60	61	56
68	63	61	62	62	65	65	64	67	68	61	60	60	59	56
69	62	62	63	63	65	66	66	65	65	62	60	58	60	55
70	63	62	62	62	66	66	65	68	68	63	62	59	58	56
71	64	63	64	64	65	65	65	68	68	62	62	60	58	56
72	62	62	63	61	65	65	65	67	66	63	61	59	58	54
73	60	60	62	61	62	64	65	63	66	60	62	59	59	56
74	61	60	62	62	63	66	65	65	68	64	61	59	60	55
75	64	63	63	62	64	64	64	65	68	63	60	60	60	57
76	62	61	63	60	63	65	66	66	67	63	62	59	60	58
77	63	62	63	61	65	64	64	66	67	61	62	60	59	57
78	63	61	63	63	64	65	65	67	66	61	61	59	59	56
79	63	63	63	62	65	67	66	69	67	61	60	58	60	57
80	64	61	62	62	67	67	67	68	69	62	61	60	60	56
81	63	61	60	61	65	64	65	68	67	61	62	60	60	56
82	63	60	60	61	64	64	65	67	67	60	60	59	59	56
83	63	60	60	61	61	64	66	66	64	62	60	59	59	56
84	64	61	59	63	62	66	65	68	65	61	61	60	60	57
85	63	63	60	62	65	64	65	65	61	60	59	59	59	56
86	63	64	61	60	62	64	65	64	60	60	60	59	60	56
87	64	65	59	60	64	64	64	65	62	60	59	59	59	55
88	62	62	63	63	65	66	65	67	64	60	60	60	60	56
89	60	62	61	61	61	63	62	66	65	59	59	57	58	55
90	64	65	60	61	64	64	65	66	66	60	60	60	59	55
91	63	60	59	60	62	64	64	65	66	61	61	59	59	55
92	63	61	62	62	64	65	65	67	67	61	63	60	59	56
93	65	65	62	60	63	64	63	65	67	62	64	60	60	56
94	63	62	63	61	65	64	64	66	67	61	62	60	59	55
95	64	62	60	62	63	64	65	66	62	61	61	61	59	55

96	63	63	63	62	64	64	64	65	65	63	60	60	60	55
97	61	62	63	60	63	64	64	64	65	62	62	59	60	55
98	61	61	63	59	63	64	64	66	63	61	62	59	59	55
99	62	61	64	62	65	63	62	65	64	62	61	59	58	54
100	61	59	62	60	63	62	62	64	65	60	59	58	58	53
101	58	56	59	57	58	61	60	59	59	58	57	56	57	53
102	60	58	57	57	59	59	61	58	59	59	58	58	58	53
103	60	59	57	57	59	59	60	62	59	59	58	58	58	53

ภาคผนวก จ

ผลงานนำเสนอ

Kalasee, W.; Tekasakul, S.; Otani, Y. and Tekasakul, P. (2003). Characteristics of soot Particles Produced from Rubberwood Combustion. *Proceedings of the 2nd Asian Particle Technology Symposium*, Penang, Malaysia, **Vol. 2**, 103-108.

CHARACTERISTICS OF SOOT PARTICLES PRODUCED FROM RUBBERWOOD COMBUSTION

Wachara Kalasee¹, Surajit Tekasakul², Yoshio Otani³, Perapong Tekasakul¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkla 90112, Thailand

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University
Hat Yai, Songkla 90112, Thailand

³Department of Chemistry and Chemical Engineering, Kanazawa University
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667, Japan

Keywords: size distribution, mass concentration, Andersen impactor

ABSTRACT

Characteristics of soot particles resulting from combustion of rubberwood has been experimentally investigated. Rubberwood is widely used as a single fuel source in rubber smoking industry, particularly in southern Thailand. Exposure to excessive soot concentration of workers can result in health problem. An eight-stage Andersen impactor was used to characterize the size distribution and total mass concentration of the soot particles sampled from the rubber smoking rooms. It was found that the size of the particles deposited ranges from less than 0.43 micron to 4.7 micron. The results show that the average mass median aerodynamic diameter (MMAD) from seven samplings is 0.95 micron while the average geometric standard deviation is 2.51. The particle mass concentration of the particles depends strongly on the moisture content of the wood. It increases exponentially as the moisture content increases while its average value is 358 mg/m³.

INTRODUCTION

Biomass is a major renewable energy source in Thailand (Bhattacharya et al., 2000), particularly in the south where rubberwood has been extensively used both in industrial and community levels. Exhaust from the wood burning contains combustion gases, smoke and soot particles, and water vapor. As moisture

content of the wood is increased, a larger amount of water vapor is present. Smoke is composed of small particles resulting from incomplete combustion. These particles contain, mainly, carbon and other combustible materials which are present in sufficient quantity. Soot is an agglomeration of carbon particles impregnated with tar. It also results from incomplete combustion of carbonaceous materials (Ndiema et al., 1998). Excessive amount of soot particles in the gas can cause health problem to the workers who operate the smoking room in rubber smoke industry and need to enter the room periodically. Moreover, this can make the rubber sheets being dried darker than market requirement. This results in the downgrade of the rubber sheets and, hence, the price drop. In order to handle the soot particles properly, study of their characteristics is essential.

Studies of smoke and soot particle characteristics, especially the size distribution are rare for wood combustion; none has been done on the rubberwood in particular. Osán et al. (2002) investigated physical and chemical characteristics of combustion particles from a 400-kW boiler using wood as fuel. They used the method of single-particle electron probe microanalysis (EPMA). Most of particles sampled from the stack gas were found to be in the respirable size range (PM_{2.5}). Hedberg et al. (2002) characterized the emissions of chemical compounds emitted from birch wood combustion in a wood stove. Cyclone was used to remove particles larger than 2.5 micron. A differential mobility particle sizer (DMPS) was used to determine particle size distribution. The collected aerosols ranged between 3 and 920 nm; largest mass was found in particle around 500 nm. Average number concentration without dilution was about 10^8 cm^{-3} . Naeher et al. (2000) measured total suspended particulates (TSP) for both PM_{2.5} and PM₁₀ emitted from cookstove using wood as fuel. It was found that TSP for PM_{2.5} and PM₁₀ are 528 and 836 microgram/m³, respectively.

In this work, characteristics of soot particles resulting from rubberwood combustion have been studied. These include particle size distribution, and influence of moisture content of wood on the exhaust particle mass concentration.

SAMPLING METHOD

In the present work, we define soot particles as all particles emitted from the combustion. Soot particles from combustion of rubberwood was sampled at the rubber smoking room of a ribbed smoked sheet (RSS) rubber production plant in a village in Songkla province. Four identical rooms were selected for the sampling. There are total of seven smoking rooms in the plant. Rubberwood was burnt as received in a stove and hot gas was then naturally drawn into the smoking room from the floor where wet rubber sheets were hung on movable carts. Sampling was performed at the tube inlet that bring the combustion gas into the room. An eight-stage Andersen impactor (Dylec, Model AN-200) with

the cut-size of 0.43, 0.65, 1.1, 2.1, 3.3, 4.7, 7.0, 11.0 micron was used throughout the experiment. A backup filter was used to collect particles smaller than 0.43 micron. This is similar to the method used by Allouis et al. (2003) in the study of the distribution mode of particles from the combustion of power generation plant using heavy fuel oil. The sampling flow rate was set at 28.3 lpm according to its guideline. The sampling plates were cleaned in an ultrasonic bath, dried overnight in a desiccator, and weighed in an analytical balance prior to sampling. Each sampling was taken for ten minutes. After sampling, the plates containing particles were carefully placed in a desiccator prior to weighing in the same analytical balance in order to determine the mass of collected particles. The sampling gas temperature was ranging between 100-200°C, then Andersen impactor and tubing were insulated with glass fiber to prevent condensation. Total of seven samplings were performed.

RESULTS AND DISCUSSION

Particle mass size distributions of seven samplings are shown and compared in Figure 1. Each curve has the same trend where most of the particles are concentrated in the size range of <0.43 to 3.3 micron. Mass median aerodynamic diameter (MMAD) defined as the aerodynamic diameter at 50% cumulative oversize percentage of the particles was determined for each measurement and is shown in Table 1. The average value of 0.95 micron indicates that major amount of particles lies in the neighborhood near 1 micron. The geometric standard deviation (GSD) of the particles is defined as

$$GSD = \frac{d_{84.1\%}}{d_{50\%}} = \frac{d_{50\%}}{d_{15.9\%}} \quad (1)$$

TABLE 1 Summary of Measurements

Run #	Wood Moisture content (% dry basis)	Particle concentration (mg/m ³)	MMAD (μm)	GSD
1	-	271	1.0	2.50
2	-	279	0.7	2.86
3	107.5	1358	1.2	2.00
4	81.5	323	0.9	2.44
5	75.2	170	1.0	2.50
6	42.1	61	0.9	2.56
7	34.5	47	0.95	2.74

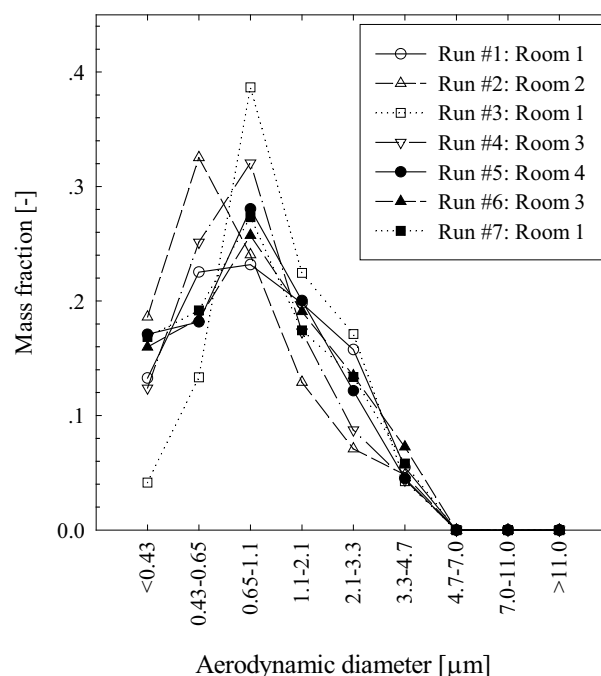


FIGURE 1 Size Distribution of Soot Particles from Seven Measurements

Here $d_{15.9\%}$, $d_{50\%}$ and $d_{84.1\%}$ are the diameters where the cumulative oversize percentage of the particles are 15.9, 50, and 84.1%, respectively. This value is shown in Table 1 for each measurement. Its average value is 2.51. Particle mass concentration is also shown in Table 1. It can be seen that for run #3, the particle concentration is very high. This results from a considerably high value of the moisture content of the wood that absorbed water from the rain since it was stored outdoor. The calculated value of average mass concentration is about 358 mg/m³ which is very high and can be detrimental to the health of the workers who operate in-and-out of the smoking room periodically. MMAD values are close to 1 in most cases and it increases when particle concentration is very high.

Influence of wood moisture on the particle mass concentration of the emission is shown in Figure 2. Moisture content of the wood was determined by drying several pieces of samples in an oven until totally dried. The mass concentration is enhanced exponentially as the moisture content of the wood is increased. This is not unexpected since the presence of water in the wood retards completeness of the combustion. As the water amount in the fuel is increased, combustion effectiveness is reduced as more heat is needed to vaporize the water. This water vapor may help the agglomeration of smoke particles to form soot. In general, moisture content of the fuelwood is lower than 60% (dry basis) but in some case

it can escalate due to the rainfall since most of the industries store fuelwood outdoor. The excessive amount of soot particles not only overdarkens the rubber sheet which results in a drop of price, but also risks the health of workers in the industries since soot particles contain carcinogenic substances, i.e. polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) (Ndiema et al. 1998, and Venkataraman, et al. 2002).

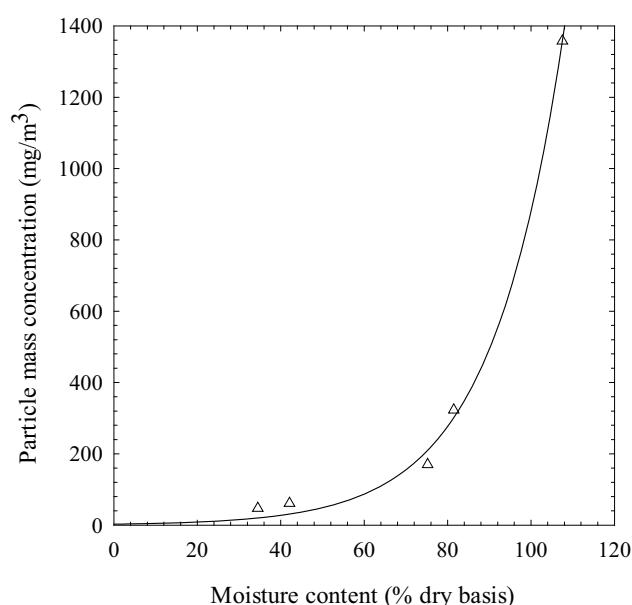


FIGURE 2 Particle Mass Concentration as a Function of Moisture Content

CONCLUSION

The concentration of the soot particles was found to be high and it is significantly enhanced as the moisture content of the wood is higher. This results from incomplete combustion. The emission level is well above value allowed for human exposure. Workers who must enter the smoking room need to protect themselves properly in order to avoid health problem. Particle size distribution is nearly normal with GSD of around 1 micron. If removal mechanism is being designed, this must be taken into account so that the soot particles can be removed effectively.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) through grant RDG4550051.

REFERENCES

- Allouis, C., Beretta, F. and D'Alessio, A. 2003. Structure of Inorganic and Carbonaceous Particles Emitted from Heavy Oil Combustion, *Chemosphere*, **51** (10): 1091-1096.
- Bhattacharya, S.C., Salam, P.A. and Sharma, M. 2000. Emissions from Biomass Energy Use in Some Selected Asian Countries, *Energy*, **25** (2): 169–188.
- Hedberg, E., Kristensson, A., Ohlsson, M., Johansson, C., Johansson, P., Swietlicki, E., Vesely, V., Wideqvist, U. and Westerholm, R. 2002. Chemical and Physical Characterization of Emissions from Birch Wood Combustion in a Wood Stove, *Atmos. Environ.*, **36** (30): 4823-4837.
- Naeher, L.P., Leaderer, B.,P. and Smith, K.R. 2000. Particulate matter and carbon monoxide in highland Guatemala: indoor and outdoor levels from traditional and improved wood stoves and gas stoves, *Indoor Air*, **10** (3): 200-205.
- Ndiema, C.K.W., Mpendazoe, F.M. and Williams, A. 1998. Emission of Pollutants from a Biomass Stove, *Energy Convers. Mgmt.*, **39** (13): 1357-1367.
- Osán, J., Alföldy, B., Török, S. and Grieken, R.V. 2002. Characterisation of Wood Combustion Particles Using Electron Probe Microanalysis, *Atmos. Environ.*, **36** (13): 2207-2214.
- Venkataraman, C., Negi, G., Sardar, S.B. and Rastogi, R. 2002. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosol emissions from biofuel combustion, *J. Aerosol Sci.*, **33** (3): 503-518.

ภาคผนวก จ

การแสดงผลงาน มอ.วิชาการ 2547



ภาคผนวก ช

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่
ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์

เป้าหมาย	ผลที่ได้
1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไม่พื้น ในการรมยางของสหกรณ์สวนยางด้วยการลงทุนที่ต่ำและสะดวกต่อการใช้งาน โดยให้แกสร้อนที่ผ่านการกรองเขม่าบางส่วนแล้วแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงกับแผ่นยาง	1. ได้ต้นแบบห้องรมยางที่ปรับปรุงจากห้องรมเดิม สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ 31.5% โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งตัวดักเขม่า
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนในห้องรมโดยการออกแบบให้แกสร้อนมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ยางสุกอย่างทั่วถึงในเวลาที่ย่ลดลง และยางที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้น	2. เวลาในการรมเท่าเดิมแต่ปริมาณยางดีเพิ่มขึ้น

กิจกรรม

แผน	ผลการดำเนินการ
1. ทำการทดลองวัดการกระจายของขนาดอนุภาคเขม่าควัน	1. สำเร็จ
2. สร้างชุดทดลองวัดสมรรถนะของตัวกรอง	2. สำเร็จ
3. สร้างหรือจัดหาตัวกรองชนิดต่าง ๆ	3. สำเร็จ
4. ทำการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของตัวกรองเหล่านั้นในห้องทดลอง	4. สำเร็จ
5. เลือกตัวกรองที่เหมาะสมแล้วออกแบบรูปร่างของตัวกรองที่นำไปใช้งานในโรงรม	5. สำเร็จ - อุปกรณ์ชนิดตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์
6. ปรับปรุงห้องรมพร้อมติดตั้งตัวกรองและทดสอบการใช้งาน ณ โรงรมที่ร่วมโครงการ	6. สำเร็จ
7. แลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับ สกย. ที่ร่วมโครงการและรายงานความก้าวหน้าของการวิจัยให้ สกย. ทราบ	7. ได้แลกเปลี่ยนความคิดเห็นอย่างสม่ำเสมอ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป้าหมาย	ผลที่ได้
1. ได้ต้นแบบห้องรมควันที่พัฒนาจากห้องรมเดิมของสหกรณ์กองทุนสวนยางจำนวน 1 ห้อง	1. ได้ต้นแบบห้องรมควันที่พัฒนาจากห้องรมเดิมของสหกรณ์กองทุนสวนยางจำนวน 1 ห้อง
2. ลดการใช้เชื้อเพลิงให้ได้ไม่ต่ำกว่า 30% และลดเวลาการรมได้ประมาณ 10-15% ยางที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น	2. ลดการใช้เชื้อเพลิงได้ 31.5% เวลาการรมเท่าเดิมยกเว้นในช่วงฤดูฝนลดได้ 57.4% และยางที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น เวลาการรมในฤดูฝนลดได้ 42.8% ในฤดูแล้งเวลาการรมเท่าเดิม
3. ห้องรมยางที่ได้จะเป็นต้นแบบให้ห้องรมยางของสหกรณ์กองทุนสวนยางอื่นกว่า 700 โรงทั่วประเทศนำไปปรับปรุงการรมยางเพื่อลดต้นทุนต่อไป	3. ต้องมีการประชาสัมพันธ์ให้ สกย.อื่น ๆ ได้รับความรู้ อย่างไรก็ตามขณะนี้ทาง สกย. ที่ร่วมโครงการ กำลังจะปรับปรุงห้องที่เหลือทั้งหมด 6 ห้องเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง นอกจากนี้มีสกย. จากจังหวัดนครศรีธรรมราชได้มาดูห้องต้นแบบแล้ว

ผลที่ได้เพิ่มเติม

1. การนำเสนอผลงาน 2 ครั้ง

1.1 วรช กาลาสี ยุทธภูมิ พงศ์ปริยวาที วชิรพันธ์ ดัณฑประภา สุทธิรัตน์ สุวรรณจรัส ไพโรจน์ คีรีรัตน์ และพีระพงศ์ ทิมสกุล “การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงจากไม้พื้ในกระบวนการผลิตยางแผ่นรมควันของสหกรณ์สวนยางภาคใต้” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ปราณบุรี, ตุลาคม 2546, หน้า 560-564.

1.2 Kalasee, W., Tekasakul, S., Otani, Y. and Tekasakul, P. " Characteristics of soot particles produced from rubberwood combustion " Proceedings of the Second Asian Particle Technology Symposium, Penang, Malaysia, December 17-19, 2003, Pages 103-108.

2. มีนักศึกษาระดับปริญญาโทในโครงการ 2 คน กำลังจะจบการศึกษาในเร็ว ๆ นี้

2.1 นายวรช กาลาสี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2.2 นายไมตรี ดันติเชาวนันทน์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์