



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์
ด้วยวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า

โดย

ดร. คุณยุต เอี่ยมสะอาด และคณะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

กุมภาพันธ์ 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การตรวจสอบรูปร่างของถุงมือยางทางการแพทย์
ด้วยวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า

โดย

1. ดร. คุณยุต เอี่ยมสะอาด
2. ดร. ชนะ รัชศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์ด้วยวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า

(ภาษาอังกฤษ) Pin Hole Inspection of Medical Latex Glove by Current Leakage Detection

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด **ที่อยู่** หมายเลขโทรศัพท์ **โทรสารและ email**

ชื่อ-สกุล คุณยุต เอี่ยมสะอาด

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อยู่ 50 ถนน พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์/โทรสาร 0-2942-7188/0-2942-7189 E-mail: fengssr@ku.ac.th

ระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน

ปัญหาที่ทํารว้จยและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมถุงมือยางนับเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ทั้งในแง่ของการสร้างมูลค่าเพิ่ม การจ้างงาน เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานเข้มข้น โดยเฉพาะในขั้นตอนของการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งนับเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และยังต้องใช้แรงงานในการบรรจุหีบห่ออีกด้วย ซึ่งจากการเปรียบเทียบอุตสาหกรรมถุงมือยางของประเทศไทยและมาเลเซีย โดยสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (พ.ศ.2546) สรุปได้ว่าไทยมีความได้เปรียบมาเลเซียอยู่เพียงด้านเดียวคือวัตถุดิบ เนื่องจากไทยสามารถผลิตน้ำยางข้นได้เกินความต้องการในประเทศ และเป็นประเทศที่ส่งออกน้ำยางข้นมากที่สุดในโลก ในขณะที่มาเลเซียยังผลิตน้ำยางได้ไม่พอความต้องการใช้ในประเทศ แต่จากรายงานพบว่าไทยเสียเปรียบมาเลเซียในหลายด้าน อันได้แก่ ด้านแรงงาน ระดับของเทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรม การบริหารจัดการ การวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมสนับสนุน และที่สำคัญคือการสนับสนุนจากภาครัฐ

จากการสอบถามผู้ประกอบการในเบื้องต้น พบว่า**การตรวจสอบคุณภาพของสินค้าเป็นสิ่งสำคัญที่สุด**ที่จะสร้างความน่าเชื่อถือในการเลือกซื้อสินค้าจากผู้ผลิต โดยเฉพาะสินค้าประเภทถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าราคาก็มีใช้ปัจจัยสำคัญที่สุดในการแข่งขัน

อันที่จริงแล้วมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพถุงมือยางนั้นได้ถูกกำหนดไว้จากหลายสถาบันซึ่งโดยมากใช้การทดสอบการรั่วซึมของน้ำในเวลาที่กำหนด วิธีการทดสอบนั้นไม่ยากเพียงแค่นำถุงมือยางลงและบรรจุน้ำปริมาณ 1000 มิลลิลิตรลงในถุงมือยางแล้วจับเวลาเท่านั้น แต่จากการสอบถามผู้ประกอบการพบว่าผู้ประกอบการส่วนมากไม่ใช่วิธีการนี้ในการตรวจสอบ เนื่องจากการตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะทำให้ถุงมือยางเปื่อยซึ่งหลังจากการตรวจสอบจะต้องนำถุงมือยางดังกล่าวไปเข้าตู้อบเพื่อทำให้แห้งซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานและเวลาอย่างมากซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการ

ผลิตสูงยิ่งขึ้นไปอีกวิธีการตรวจสอบถุงมือยางที่ผู้ประกอบการเลือกใช้คือการให้แรงงานคนใส่ลมเข้าถุงมือยางด้วยการโบกถุงมือยางให้พองลมจากนั้นใช้มือไล่ตามนิ้วของถุงมือ หากถุงมือยางรั่วผู้ที่ตรวจสอบจะใช้ความชำนาญเช่นจากเสียงลมที่รั่วหรือจากลมที่กระทบใบหน้า เป็นการบ่งบอกว่าถุงมือยางนั้นรั่วหรือไม่ ยิ่งกว่านั้นวิธีการนี้มิใช่การตรวจสอบ 100 % หากแต่เป็นเพียงสุ่มตรวจเท่านั้น อีกทั้งเทคโนโลยีการผลิตที่ล้ำสมัยกว่าประเทศคู่แข่งยิ่งทำให้ถุงมือยางที่ผลิตได้มีร้อยละการรั่วซึมต่อถุงมือยางทั้งหมดสูง เมื่อผนวกกับการตรวจสอบคุณภาพที่ไม่ได้มาตรฐานเช่นนี้ยิ่งทำให้เกิดปัญหาสินค้าถูกตีกลับเนื่องจากถุงมือยางรั่วซึมไม่ได้มาตรฐานมีจำนวนมาก

จากที่กล่าวถึงการตรวจสอบคุณภาพถุงมือยางที่ผู้ประกอบการเลือกใช้จะเห็นได้ว่าการตรวจสอบคุณภาพที่ไม่ได้มาตรฐานและการตรวจสอบแบบสุ่มนั้นส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของถุงมือยางจากประเทศไทยอย่างมาก คณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงปัญหานี้ที่ภาคอุตสาหกรรมประสบอยู่จึงได้คิดที่จะหาวิธีการที่รวดเร็วและแม่นยำที่สุดในการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นเพียงการหาวิธีการตรวจสอบที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบถุงมือยางเท่านั้น แต่คณะผู้วิจัยได้วางแผนที่จะนำวิธีการที่วิจัยได้นี้มาสร้างเครื่องต้นแบบและเครื่องจักรที่สามารถใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตข้างหน้า

จากการสืบค้นสิทธิบัตรพบว่ามี 1 สิทธิบัตรที่ไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากถุงมือยางจะต้องจุ่มอยู่ในน้ำซึ่งไม่ตรงกับความต้องการของผู้ผลิต อีกสิทธิบัตรนั้นใช้แสงเป็นตัวกลางในการตรวจสอบซึ่งจากการวิเคราะห์ของคณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่าทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากมากที่จะทำให้กระบวนการตรวจสอบไม่มีแสงลอดเข้าไปในระหว่างตรวจสอบ หรือสิทธิบัตรที่ใช้หลักการความดันแตกต่างก็เช่นเดียวกันกับการใช้แสงคือในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากมากที่จะทำให้กระบวนการตรวจสอบไม่มีอากาศแสงลอดเข้าไปในระหว่างตรวจสอบ ดังนั้นวิธีที่คณะผู้วิจัยมีความเห็นว่าน่าจะเป็นไปได้ในการตรวจสอบรูรั่วได้รวดเร็วและแม่นยำที่สุดคือวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของประจุไฟฟ้านั่นเอง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า

ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

1. ศึกษาวิธีการทางเลือกโดยการใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง
 - 1.1 ศึกษาการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า
 - 1.2 ออกแบบระบบไฟฟ้าของเครื่อง
 - 1.3 สร้างต้นแบบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบ
 - 1.4 ทดสอบต้นแบบแบบจำลอง
 - 1.5 สร้างแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่ว
 - 1.6 ทดสอบแบบจำลองด้วยแผ่นยางเจาะรู
 - 1.7 ทดสอบแบบจำลองด้วยถุงมือจากโรงงาน
 - 1.8 ประกอบแบบจำลองเข้ากับเครื่องพีแอลซี
2. ศึกษาวิธีการทางเลือกโดยการใช้แท่งเหล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในถุงมือยาง

สิ่งที่คาดว่าจะได้

แนวทางในการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. แบบระบบไฟฟ้าแรงดันสูง แบบระบบควบคุมแบบปิดระหว่างเครื่องมือวัดและ PLC	1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า	นำไปสู่การพัฒนาระบบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์
ผลการทดลองแบบจำลองต้นแบบอุปกรณ์พบว่าอุปกรณ์ตรวจสอบสามารถตรวจสอบได้	1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า	นำไปสู่การพัฒนาระบบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์
อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วแบบอัตโนมัติ	1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า	นำไปสู่การพัฒนาระบบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์
อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วแบบอัตโนมัติสามารถแยกแยะถุงมือยางที่รั่วและไม่รั่วได้ถูกต้อง	1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า	นำไปสู่การพัฒนาระบบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของประจุไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์

ความสอดคล้องกับเป้าประสงค์และยุทธศาสตร์ของฝ่าย 5

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาหาแนวทางในการตรวจสอบรู้ตัวของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรู้ไหลของประจุไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยาง ดังนั้นเพื่อเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้กับอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางขนาดเล็กและขนาดกลาง ให้สามารถแข่งขันได้ด้วยการลดต้นทุนในการผลิตถุงมือยางในส่วนของการตรวจสอบการรั่วซึมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรที่ใช้ในการตรวจสอบการรั่วของถุงมือยางแบบอัตโนมัติ รวมถึงการสร้างองค์ความรู้ให้แก่นักวิจัยและผู้ประกอบการ นอกจากนี้สามารถนำความรู้ที่ได้ไปถ่ายทอดให้กับผู้ที่อยู่ในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างความเข้มแข็งให้กับอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยางโดยรวมของประเทศต่อไป

บทคัดย่อ

โรงงานผู้ผลิตถุงมือยางมีความต้องการที่จะตรวจสอบรูรั่วที่เกิดขึ้นบนถุงมือยางโดยการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าแทนการใช้ตาเปล่าและความชำนาญของพนักงานในการตรวจสอบ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์ด้วยวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า โดยการสร้างสนามไฟฟ้าของช่องว่างระหว่างอุปกรณ์ทดสอบและผิวของถุงมือยาง ถ้าในกรณีที่มีการรั่วของถุงมือยางจะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามช่องว่างนั้น ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจสอบรูรั่วที่ขนาด 500 ไมครอนขึ้นไป ซึ่งรูรั่วขนาดนี้เป็นขนาดรูที่เล็กกว่ารูรั่วเฉลี่ยที่เกิดบนถุงมือยาง และจากผลการทดลองในการวิจัยสรุปได้ว่าอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านี้สามารถตรวจสอบรูรั่วได้ที่ความถูกต้อง 100% โดยมีข้อแม้ว่าจะต้องลากอุปกรณ์ตรวจสอบให้ทั่วบริเวณถุงมือยางที่ต้องการตรวจสอบและถุงมือยางจะต้องแนบสนิทกับแม่แบบรูปมือโลหะ ในการทดสอบถุงมือยางแต่ละชิ้นแล้วใช้เวลาเฉลี่ย 2 นาที จากการศึกษาเบื้องต้นนี้คณะผู้วิจัยมีความคาดหวังให้ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางต้นแบบหรือพัฒนาไปสู่แบบอัตโนมัติต่อไป

Abstract

At the present, the medical latex glove pin hole inspection are done by opearator. The automatic system for pin hole inspection are studied due to the limitation of capacities and cost of manual inspection. The objective of this research are the possibility study to applied current leakage detection system for medical latex glove pin hole inspection. The steel positive electrode latex glove shape is weared by latex glove which apply 1,800 VDC high voltage and detection copper electrode with negative porality is scaned along latex glove with constant gap. The spark occur after detection copper electrode meet pin hole location and current leakage are measured by cuurent sensor. The experiments show propose system can detect pin hole size up to 500 micron which smaller than real average pin hole and 100% accurate pin hole checking are shown in experimental results. The cycle time for pin hole inspection is 2 minute which enough for line productions. The experiment results show that this propose system can applied to medical latex glove pin hole inspection with 100 % accurate check and this system can be developed to automatic system for next research.

การตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์ด้วย วิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า

Pin Hole Inspection of Medical Latex Glove by Current Leakage Detection

คำนำ

ยางพาราถือเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่สามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศอีกทั้งช่วยสร้างความมั่นคงด้านอาชีพให้แก่เกษตรกรชาวสวนยางเนื่องจากเป็นพืชที่ให้ผลผลิตสม่ำเสมอตลอดปี โดยมีอายุผลผลิตนานถึง 20 ปี ปัจจุบันประเทศไทยส่งออกยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยในปี 2548 ประเทศไทยมีผลผลิตยางธรรมชาติสูงถึง 2,832,500 ตัน และมีมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางในปีเดียวกันถึง 94,350.67 ล้านบาท ผลิตภัณฑ์ยางที่มีการส่งออกมากที่สุดคือ อุตสาหกรรมยางรถยนต์และอันดับสองรองลงมาคืออุตสาหกรรมถุงมือยาง

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดรายได้กลับสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้ประกอบการจึงมีต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในตลาดได้ จากการศึกษากระบวนการผลิตถุงมือยางทั้งหมดจุดหนึ่งที่มีปัญหาเรื่องคอดอยู่คือกระบวนการตรวจสอบรูรั่ว (pin hole) กระบวนการตรวจสอบรูรั่วนั้นใช้แรงงานคนในการตรวจสอบรูรั่วโดยใช้ตาเปล่าและความชำนาญของพนักงานยังผลให้เกิดปัญหาถุงมือยางที่ผลิตไม่ได้มาตรฐานและยากต่อการควบคุมคุณภาพของสินค้า ดังนั้นหากมีเครื่องจักรอัตโนมัติเข้ามาช่วยในกระบวนการนี้ก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตทำให้ขีดความสามารถในการแข่งขันในตลาดเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์ด้วยวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของประจุไฟฟ้า ซึ่งได้ผลการวิจัยอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจสอบรูรั่วที่ขนาด 500 ไมครอน เป็นต้นไป ซึ่งรูรั่วขนาดนี้เป็นขนาดรูที่เล็กกว่ารูรั่วเฉลี่ยที่เกิดบนถุงมือยาง และจากผลการทดลอง สรุปได้ว่าอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านี้สามารถตรวจสอบรูรั่วได้ด้วยความถูกต้อง 100% โดยมีข้อแม้ว่าจะต้องลากแท่งนำไฟฟ้าไปให้ทั่วถุงมือยางและถุงมือยางจะต้องแนบสนิทกับแม่แบบรูปมือ ในการทดสอบถุงมือยางแต่ละชิ้นเฉลี่ยแล้วใช้เวลา 2 นาที ในทางตรงกันข้ามวิธีการใช้แรงงานคนที่โรงงานใช้อยู่ในปัจจุบันใช้เวลาเพียง 15 วินาทีต่อคู่ สาเหตุที่การใช้อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าใช้เวลามากกว่ามากคือ ผู้ทดสอบจะต้องเสียเวลาจัดถุงมือยางให้แนบสนิทกับแม่แบบพอดี อีกทั้งการลากแท่งนำไฟฟ้าให้รอบถุงมือยางก็เสียเวลาพอสมควร สาเหตุสำคัญอีกประการคือเมื่อทดสอบเสียหนึ่งข้างจะต้องทำการคายประจุเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับผู้ทดสอบอีกด้วย จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวทั้งนี้คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาวิธีการทางเลือกอื่นซึ่งมีอยู่ 3 วิธีการ ได้ข้อสรุปว่าวิธีการทางเลือกทั้ง 3 วิธีการคือ การใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง การใช้แท่งเหล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในถุงมือยาง และการใช้แม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์เคลือบสารนำไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำไปใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมที่จะต้องใช้ในการตรวจสอบถุงมือยางจำนวนมากแล้ววิธีการเหล่านี้เป็น

วิธีการที่เสียเวลาในการทดสอบมากและเสียค่าใช้จ่ายมากอีกด้วย อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยได้พบอีกหนึ่งวิธีขอเสนอแนะในที่นี้คือสิทธิบัตรในปี 2007 เลขที่ US 7,174,772 B2 ชื่อเรื่อง SYSTEM AND METHOD FOR LEAK DETECTION โดยมีเนื้อหา กล่าวถึงการตรวจสอบรูรั่วของถังมือยางโดยใช้วิธีการตรวจสอบความดันแตกต่างซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะแก้ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ได้ จากการศึกษาเบื้องต้นนี้คณะผู้วิจัยมีความคาดหวังให้ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถังมือยางต้นแบบหรือพัฒนาไปสู่แบบอัตโนมัติเพื่อใช้ปฏิบัติงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจสอบรูรั่วของถังมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

ขอบเขตงานวิจัย

อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถังมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถตรวจสอบรูรั่วที่ขนาด 500 ไมครอนเป็นต้นไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เดือนที่	Output ข้อที่	Output	ตอบสนองวัตถุประสงค์ข้อที่
1-2	1	ศึกษาการรื้อไหลของกระแสไฟฟ้าจากบริษัท Ansell Suretex (Thailand) พบว่าวิธีนี้ใช้งานได้ดี	1
2-3	1	ศึกษาการออกแบบระบบแรงดันสูง แบบระบบควบคุมแบบปิดระหว่างเครื่องมือวัดและ PLC	1
3-5	1	สร้างต้นแบบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบ	1
6	1	ทดสอบต้นแบบแบบจำลองพบว่าอุปกรณ์ตรวจสอบสามารถตรวจสอบได้ดี	1
6-7	1	สร้างแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่ว	1
8	1	ทดสอบแบบจำลองด้วยแผ่นยางเจาะรูพบว่าอุปกรณ์ตรวจสอบสร้างตรวจสอบได้ดี	1
8-9	1	ทดสอบแบบจำลองด้วยถุงมือจากโรงงานพบว่าอุปกรณ์ตรวจสอบสามารถตรวจสอบรูรั่วได้เล็กกว่ารูที่ใช้คนตรวจ	1
10-13	1	ประกอบแบบจำลองเข้ากับเครื่องพีแอลซีเพื่อใช้ตรวจสอบรูรั่วแบบอัตโนมัติ	1
13-15	1	สรุปผลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพอุปกรณ์พบว่าอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วแบบอัตโนมัติสามารถแยกแยะถุงมือยางที่รั่วและไม่รั่วได้ถูกต้อง	1
16-17	1	ศึกษาการใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยในถุงมือยางพบว่าวิธีนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง	1
18-19	1	ศึกษาแท่งเหล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าถุงมือพบว่าวิธีนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง	1
20-21	1	ศึกษาแม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์ผลการศึกษาพบว่าวิธีนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง	1
22-24	1	สรุปผลการศึกษาพบว่าวิธีทั้ง 3 วิธีไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง	1

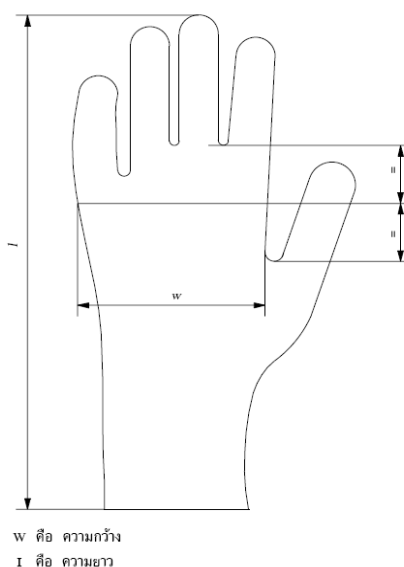
การตรวจเอกสาร

1 คุณสมบัติทั่วไปของถุงมือสำหรับการตรวจโรคชนิดใช้ครั้งเดียว

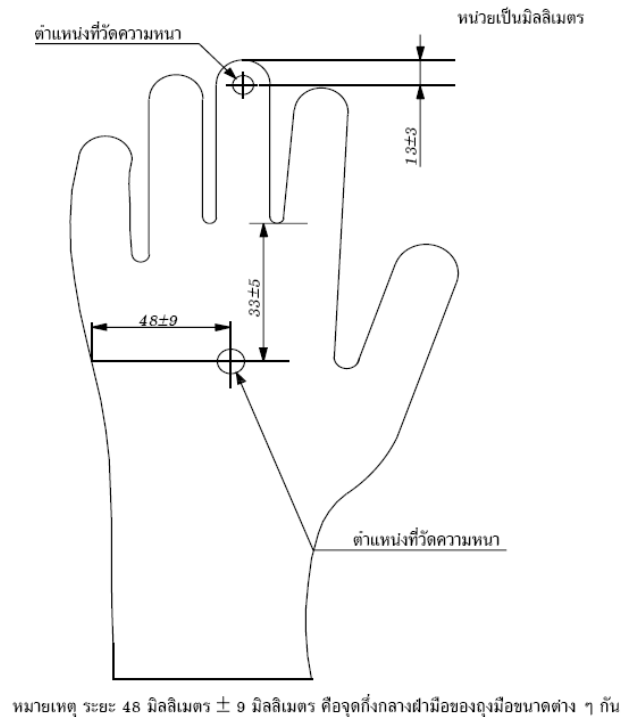
ถุงมือสำหรับการตรวจโรคชนิดใช้ครั้งเดียวมีเกณฑ์กำหนดสำหรับถุงมือที่ทำจากน้ำยางหรือสารละลายยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1056 2548 ISO 11193 1 : 2002 ในที่นี้จะกล่าวถึงเกณฑ์ความหนาของถุงมือยางซึ่งเป็นเกณฑ์หนึ่งที่อยู่ในมาตรฐานนี้

โดยตำแหน่งความกว้างและความยาวของถุงมือวัดในตำแหน่งดังรูป 1 ส่วนวิธีวัดความหนาให้เป็นไปตาม ISO 4648 โดยวัดความหนาถุงมือเต็มรูป (intact glove) ทั้ง 2 ชั้น ใช้ความดันที่ตัวกดของเครื่องมือวัด 22 กิโลพาสคัลบวกลบ 5 กิโลพาสคัล ที่ตำแหน่งตามรูปที่ 2 คือ ตำแหน่งที่อยู่ต่ำกว่าปลายนิ้วกลางลงมา 13 มิลลิเมตรบวกลบ 3 มิลลิเมตร และตำแหน่งกึ่งกลางฝ่ามือโดยประมาณ ความหนาชั้นเดียว ของถุงมือที่ต้องรายงานเป็นค่าครึ่งหนึ่งของความหนา 2 ชั้น ที่วัดได้และต้องเป็นไปตามมิติที่กำหนดในตารางที่ 1 ถ้าหากตรวจพินิจแล้วพบจุดที่มีเนื้อบางให้วัดแบบความหนาชั้นเดียว ความหนาที่บริเวณพื้นผิวเรียบและพื้นผิวไม่เรียบของถุงมือชั้นเดียว ต้องไม่น้อยกว่า 0.08 มิลลิเมตร และ 0.11 มิลลิเมตร ตามลำดับ

หมายเหตุ ความหนาของขอบถุงมือที่วัดตาม ISO 4648 ไม่ควรเกิน 2.50 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง และความยาว



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่วัดความหนา

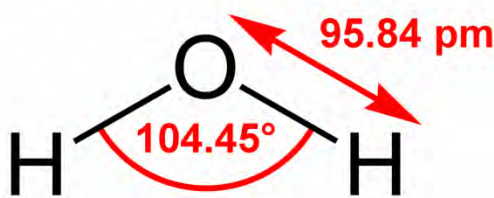
ตารางที่ 1 มิติ และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

รหัสขนาด	ขนาดระบุ	ความยาว ต่ำสุด (มิติ w ตาม รูปที่ 2.9) mm	ความยาวต่ำสุด (มิติ / ตามรูป ที่ 2.9) mm	ความหนา ต่ำสุด (ที่ตำแหน่งดังแสดง ในรูปที่ 2.10) mm	ความหนา สูงสุด (ที่ประมาณจุดกึ่งกลาง ของฝ่ามือ) mm
6 และ เล็กกว่า 6	เล็กพิเศษ (X-S)	± 80	220	สำหรับทุกขนาด : บริเวณผิวเรียบ : 0.08 บริเวณผิวไม่เรียบ : 0.11	สำหรับทุกขนาด : บริเวณผิวเรียบ : 2.00 บริเวณผิวไม่เรียบ : 2.03
6 1/2	เล็ก (S)	80 ± 5	220		
7	กลาง (M)	85 ± 5	230		
7 1/2		95 ± 5	230		
8	ใหญ่ (L)	100 ± 5	230		
8 1/2		110 ± 5	230		
9 และ ใหญ่กว่า 9	ใหญ่พิเศษ (X-L)	±110	230		

2.การตรวจสอบรูรั่วบนถุงมือยาง

วิธีการทดสอบรูรั่วบนถุงมือยางนั้นมีหลากหลายวิธี แต่ตามมาตรฐาน ASTM D5151 - 06 Standard Test Method for Detection of Holes in Medical Gloves แล้วกำหนดให้ใช้น้ำในการทดสอบ กล่าวคือใช้วิธีการทดสอบการรั่วซึมของน้ำตามรูรั่วบนถุงมือยางนั่นเอง

น้ำมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก($<4\cdot10^{-10}$ m) ดังรูปที่ 3 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเชื้อโรคมากเช่น เชื้อ HIV (90 to 130 nm) , เริม (Herpes) มีขนาด 0.3 micron , เชื้อ Treponema Pallidum ที่ทำให้เกิดโรคซิฟิลิสมีขนาด 6 microns เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงนั้นน้ำไม่สามารถรั่วซึมผ่านรูขนาดเล็กมากได้ เนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำนั้นมีค่ามากพอที่ต้านไม่ให้เกิดการซึมผ่านที่รูรั่วนั้นได้ ที่รูรั่วนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ไมครอน (micron) สามารถพิจารณาได้ว่าไม่มีการรั่วซึมของน้ำ ในทางทฤษฎีการใช้น้ำในการตรวจสอบหารูรั่วสามารถตรวจสอบรูรั่วนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 ไมครอน แต่ในทางปฏิบัติเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสุดที่สามารถตรวจสอบได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ไมครอน



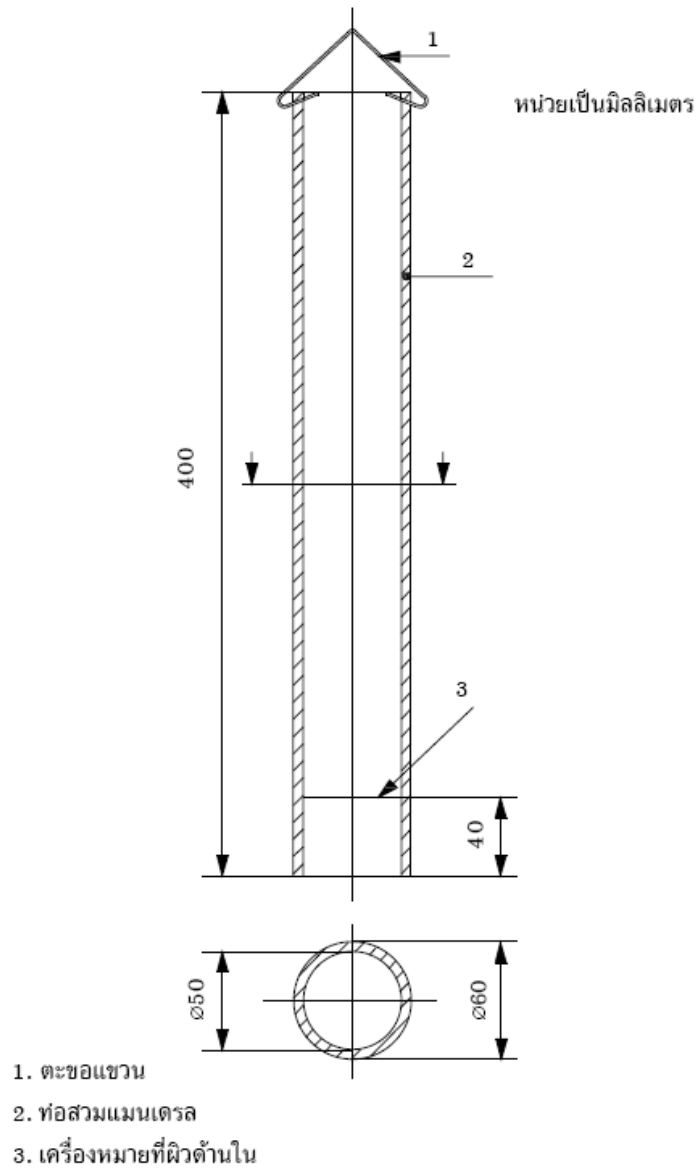
รูปที่ 3 ขนาดโมเลกุลของน้ำ

น้ำเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก วิธีการทดสอบไม่ยุ่งยาก ที่สำคัญในทางทฤษฎีแล้วการทดสอบด้วยวิธีนี้มีความถูกต้องสูงมาก ดังนั้นวิธีการทดสอบการรั่วซึมของน้ำจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน โดยมีมาตรฐานการทดสอบดังนี้

2.1 เครื่องมือทดสอบการรั่วซึมน้ำ

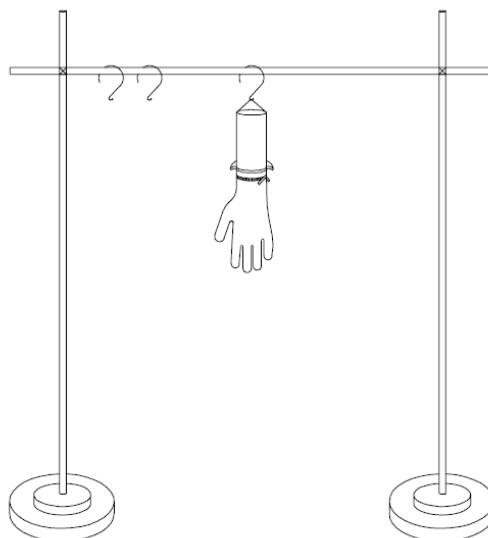
- ท่อสวมแมนเดรลมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกระบุ 60 มิลลิเมตร มีความยาวเพียงพอสำหรับให้ถุงมือสวมและบรรจุน้ำ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวอย่างท่อสวมแมนเดรล ดังรูปที่ 4

หมายเหตุ ถ้าใช้ท่อสวมแมนเดรลชนิดโปรงใสจะดีกว่า



รูปที่ 4 ท่อสวมแมนเดรล

- อุปกรณ์ใช้แขวน สำหรับแขวนท่อสวมแมนเดรลที่สวมถุงมือและบรรจุน้ำแล้วในแนวตั้ง ดังรูปที่ 5
- กระบอกตวง ความจุไม่น้อยกว่า 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรืออุปกรณ์อื่นที่สามารถจ่ายน้ำได้ครั้งละ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



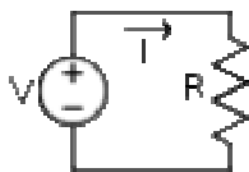
รูปที่ 5 อุปกรณ์ใช้แขวน

2.2. วิธีทดสอบการรั่วซึมน้ำ

สวมถุงมือตัวอย่างกับท่อสวมแมนเดรลแล้วยึดด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น วงแหวน (O-ring) โดยไม่ให้ขอบของถุงมือตัวอย่างสูงกว่าปลายท่อสวมแมนเดรลเกิน 40 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 และ 4 เติมน้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 36 องศาเซลเซียส ปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรบวกลบ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในอุปกรณ์ที่เตรียมไว้ เช็ดน้ำที่กระเซ็นเปียกบนถุงมือ หากระดับน้ำสูงไม่ถึงระยะ 40 มิลลิเมตร จากขอบถุงมือให้ยกถุงมือขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่าทุกส่วนของถุงมือได้รับการทดสอบ ยกเว้นส่วน 40 มิลลิเมตรจากขอบถุงมือ ตรวจสอบนิทน์ว่ามีน้ำรั่วซึมออกจากถุงมือตัวอย่างหรือไม่ ถ้าไม่มีการรั่วซึม ให้แขวนไว้ 2 นาที ถึง 4 นาที นับจากเท่านั้นลงในถุงมือ ตรวจสอบการรั่วซึมน้ำอีกครั้งหนึ่ง รอยรั่วซึมในระยะ 40 มิลลิเมตร จากขอบถุงมือไม่ถือเป็นข้อบกพร่อง อาจเติมสีที่ละลายน้ำได้ลงในน้ำเพื่อให้สังเกตการรั่วซึมได้ชัดเจน

3. กฎของโอห์ม (Ohm ' s Law)

ขณะที่อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ผ่านไปในตัวนำ จะเกิดการชนกับอะตอมของตัวนำแล้วสูญเสียพลังงานจลน์ (Kinetic energy) บางส่วนออกไปในรูปของความร้อน แรงแดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปจะเป็นการเพิ่มพลังงานและความเร็วของอิเล็กตรอน แต่การชนกันอีกก็จะทำให้ความเร็วลดต่ำลง การเพิ่มและลดของความเร็วนี้จะเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่อง เมื่อเคลื่อนที่ไประหว่างอะตอมของตัวนำ ความต้านทานเป็นคุณสมบัติของโลหะที่ขัดขวางหรือต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้ต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าไปเพื่อให้มีกระแสไหล หน่วยเอสไอของความต้านทานเป็นโอห์ม(ohm) มีสัญลักษณ์ซึ่งเป็นอักษรกรีกตัวพิมพ์ใหญ่ Ω อ่านว่าโอเมกา สัญลักษณ์ปริมาณของความต้านทานจะใช้เป็น R ในโลหะและตัวนำอื่นๆการไหลของวงจรไฟฟ้ามีลักษณะ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง

กระแสจะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มเป็นสองเท่าก็ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นสองเท่าหรือแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสามเท่ากระแสก็จะเพิ่มขึ้นสามเท่าเป็นต้น ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปเป็น V และกระแสที่ไหลในตัวนำเป็น I มีทิศทางสังสรรค์กันจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I ว่า

$$I = \frac{V}{R}$$

4.การสปาร์ค (Spark)

การสปาร์ค ในทางไฟฟ้าหมายถึงการการคายประจุไฟฟ้าระหว่างสองสิ่งที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันในระยะเวลานั้นๆ ข้ามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดหรือสปาร์คแก๊ป (Spark gap) ซึ่งเป็นตัวกลางที่ปกติเป็นฉนวน โดยที่ปรากฏการณ์ที่ฉนวนสามารถถูกกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้นี้เรียกว่า Avalanche breakdown

การสปาร์คจะเริ่มก่อตัวขึ้นเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า หน่วยโวลต์/ความยาว มีความสูงชันมากพอที่เร่งอิเล็กตรอนอิสระไปชนอะตอมอื่นให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระมากพอที่ทำให้ตัวกลางนั้นนำไฟฟ้าได้ ซึ่งค่า ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้ตัวกลางแต่ละชนิดนำไฟฟ้าได้นั้นแตกต่างกัน เช่น การสปาร์คที่เกิดขึ้นในอากาศอากาศแห้งที่ อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) ที่เกิดระหว่างอิเล็กโทรดทรงกลม ต้องให้ ความเข้มสนามไฟฟ้าถึงประมาณ 3 MV/m (the dielectric field strength of air) ส่วนเซรามิค ต้องให้ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าถึงประมาณ 40 MV/m ซึ่งเป็นสาเหตุให้จำนวนอิเล็กตรอนและไอออนอิสระเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อากาศสามารถนำไฟฟ้าได้ชั่วคราวซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การเบรคดาวนของตัวกลางระหว่างชั่วไฟฟ้า (dielectric breakdown) ในอุปกรณ์ที่ใช้ก๊าซ หรือของเหลวเป็นตัวกลาง การเปลี่ยนกลับของเงื่อนไขโดยตัวเองเกิดขึ้นได้ เมื่อความต่างศักย์ ลดลงต่ำกว่าจุดวิกฤต แต่อุปกรณ์ที่บรรจุหรือต่อกับชั่วไฟฟ้า ถ้าเป็นของแข็ง การเบรคดาวนจะทำให้ผลเสียหายอย่างถาวรดังตัวอย่างการสปาร์คในธรรมชาติ ได้แก่ การเกิดฟ้าผ่า ดังรูปที่ 10.7 ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน ฟ้าแลบซึ่งเกิดจากความต่างศักย์

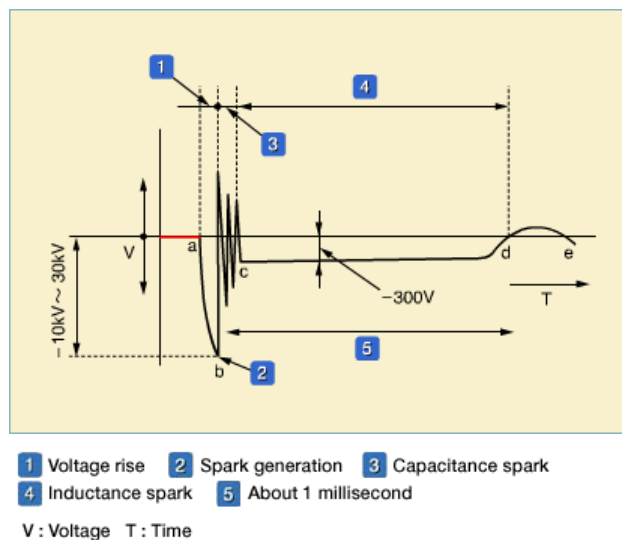
ระหว่างกันเมฆกับก้อนเมฆ ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์นับล้านโวลต์



รูปที่ 7 การเกิดเบรกดาวนของอากาศในธรรมชาติ

4.1 ลักษณะการคายประจุแรงดันไฟฟ้า

การที่แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้เกิดการเบรกดาวนของวัตถุที่เป็นฉนวนที่เรียกว่าการสปาร์คนี้ มีกระบวนการเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นการคายประจุ แรงดันไฟฟ้าขนาด 10-30 kV.



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและเวลาขณะเกิดการสปาร์ค

จากรูป 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและเวลาขณะเกิดการสปาร์คสามารถอธิบายกระบวนการสปาร์คที่ตำแหน่งต่างๆได้ดังต่อไปนี้

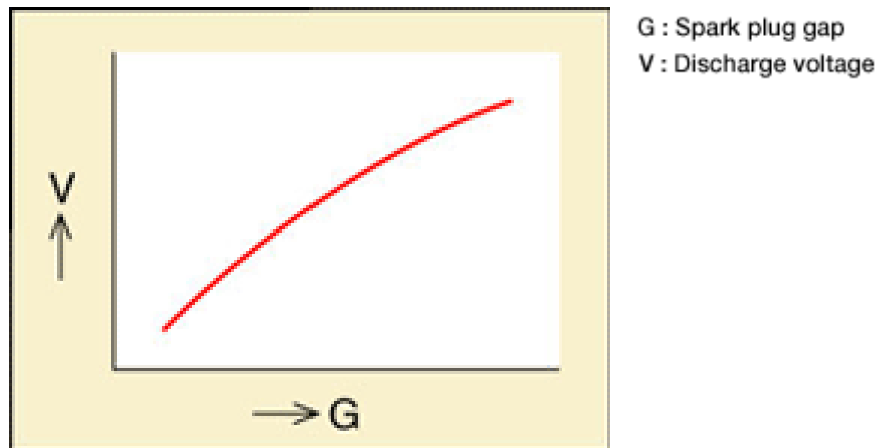
1. ที่ตำแหน่ง “A” ไฟฟ้าสถิตจะมีถูกเพิ่มแรงดัน
2. ที่ตำแหน่ง “B” จะเริ่มการคายประจุไฟฟ้า ซึ่งก็คือการที่ไฟฟ้าเกิดการกระโดด จาก อิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอิเล็กโทรดหนึ่ง
3. ระหว่างตำแหน่ง “B” และ “C” คือช่วงเวลาในการสปาร์ค ซึ่งเราเรียกว่า “Capacitance Spark”
4. ระหว่างตำแหน่ง “C” และ “D” จะเกิดการคายประจุที่ยังหลงเหลืออยู่ในขดลวด ซึ่งจะใช้เวลาเพียง 1/1,000 วินาที

4.2 สภาพที่ส่งผลต่อการคายประจุแรงดันไฟฟ้า

สภาพที่ส่งผลต่อการคายประจุไฟฟ้านั้นมีปัจจัยหลักอยู่ทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด รูปร่างของอิเล็กโทรด ความดันและอุณหภูมิ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด

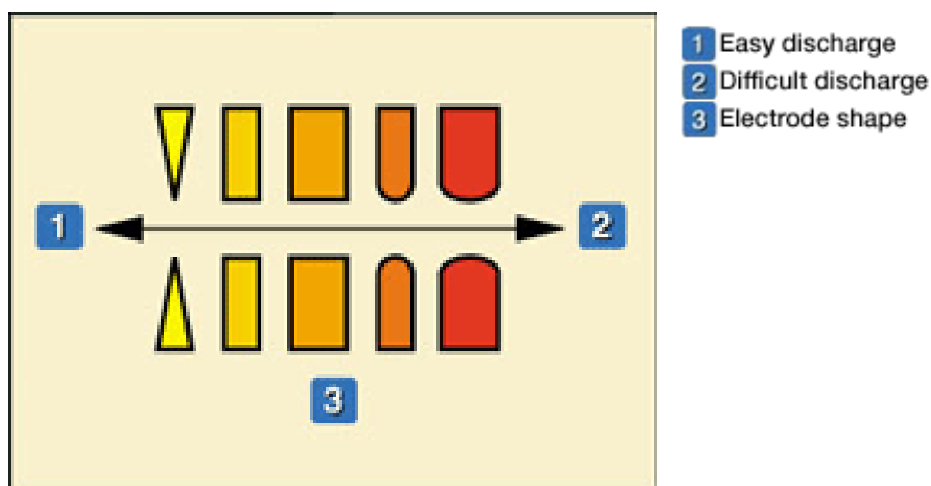
การคายประจุแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ยิ่งระยะช่องว่างนี้ ห่างมากขึ้นเท่าไร ก็จำเป็นต้องอาศัยแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะระหว่างอิเล็กโทรดกับแรงดัน

2. รูปร่างของอิเล็กโทรด

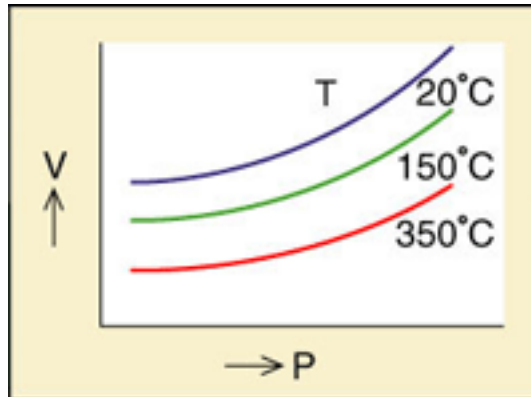
แม้ว่าช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเท่ากัน แต่ถ้าความคมและเหลี่ยมมุมของอิเล็กโทรดอันหนึ่งมีมากกว่าอีกอันหนึ่งการคายประจุจะทำได้ง่ายกว่า ดังรูปที่ 10



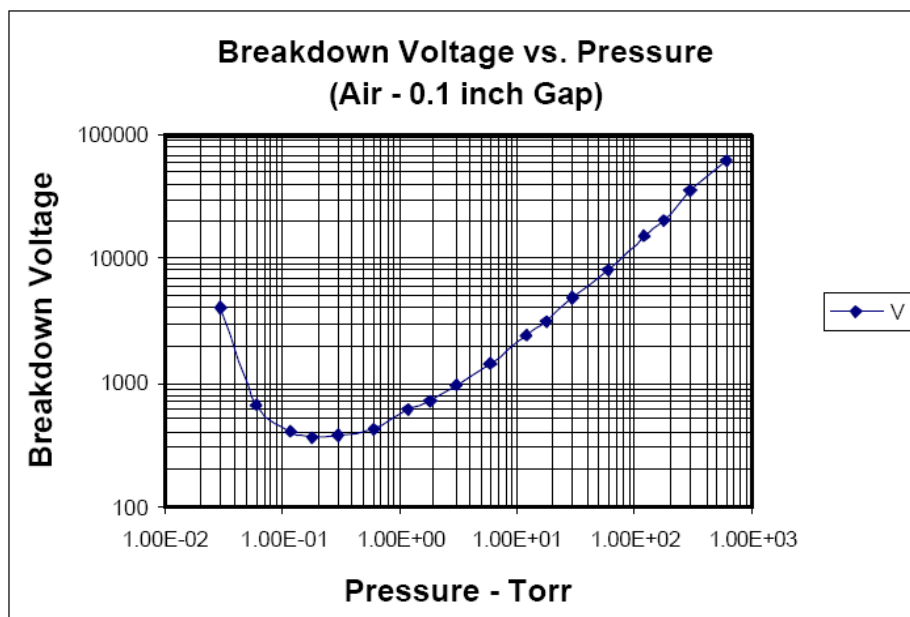
รูปที่ 10 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของอิเล็กโทรดกับความยากง่ายต่อการเกิดการสปาร์ค

3. ความดันอากาศและอุณหภูมิ

ที่อุณหภูมิคงที่ระยะระหว่างอิเล็กโทรดคงที่แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสปาร์คจะเพิ่มขึ้นแปรผันตามความดันที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 12 Paschen Curve (Breakdown Voltage vs. Pressure) [3]

Pashen Curve นี้ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับความดันบรรยากาศระหว่าง 3×10^{-2} Torr – 760 Torr ของอากาศโดยวางอิเล็กโทรดทองแดงรูปร่างแบนวางขนานห่างกัน 0.1 นิ้ว

5. วงจรที่ใช้สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (Generation of High DC Voltage)

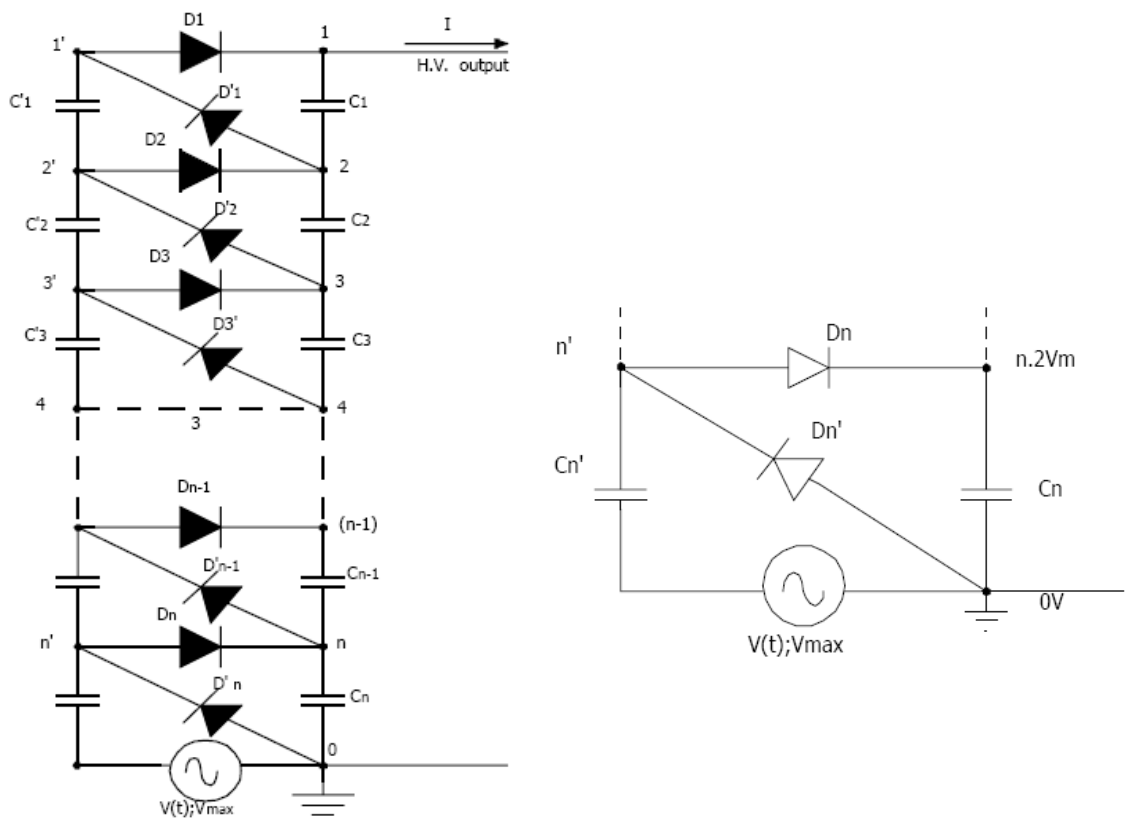
การจัดสร้างวงจรที่ใช้ในการขยายแรงดันให้เป็นไฟกระแสตรงแรงดันสูงกระทำได้โดยใช้ ไดโอด (Diode) เป็นตัวกลับไฟฟ้า (rectifier) ซึ่งมีวงจรพื้นฐาน 4 แบบ

- วงจรกลับไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น (Half wave)
- วงจรกลับไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full wave)
- วงจรกลับไฟฟ้าแบบแรงดัน 2 เท่า (Voltage double rectifier)
- วงจรกลับไฟฟ้าแบบขั้นบันได (Cascade circuit for dc. High Voltage)

วงจรพื้นฐานทั้งสี่สามารถใช้จ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงได้เหมือนกัน แต่ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำเลือกใช้วงจรกลับไฟฟ้าแบบขั้นบันได ซึ่งในกรณีที่ต้องการศักดาไฟฟ้ากระแสตรงสูงมาก การจัดทำจะเลือกใช้วงจรพื้นฐานของวงจรแรงดันกลับไฟฟ้าแบบสองเท่านำมาต่อกันเป็นแบบขั้นบันได ซึ่งนิยมใช้อยู่ 2 ชนิด คือ แบบ Cockcroft Walton และแบบแบบแรงดันกระแสตรงแรงสูงโดยใช้หม้อแปลงต่อเป็นขั้นบันได

5.1 วงจรสร้างแรงดันแบบ Cockcroft Walton

ใช้หลักการของ n-stage single phase cascade ดังรูปที่ 13 ซึ่งเป็นการทำงานของวงจรแบบ Cockcroft Walton



รูปที่ 13 วงจรแบบ Cockcroft Walton n-stage

จากผังวงจร Cockcroft Walton n-stage ในรูปที่ 13 ประกอบด้วย

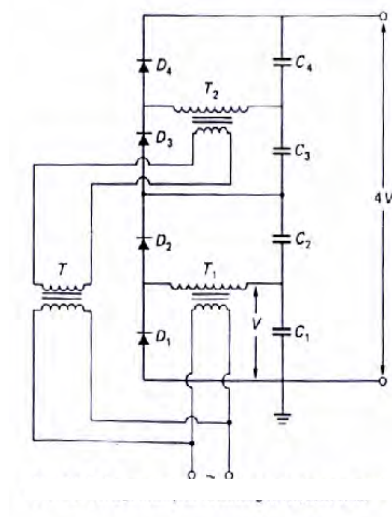
- ไดโอด 2 ตัว
- ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวแรกเป็นตัวเก็บพักประจุ ตัวที่ 2 ทำหน้าที่เป็น filter
- ตัวเก็บประจุ ที่ทำหน้าที่ชาร์ตประจุได้แก่ C_1' , C_2' , C_3' , C_4' ,
- ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_4 ทำหน้าที่ตัวกรองไฟเรียบ
- ไดโอด D_1' , D_2' , D_3' , D_4' ทำหน้าที่นำกระแสในช่วงคลื่นบวก
- ไดโอด D_1 , D_2 , D_3 , D_4 ทำหน้าที่นำกระแสในช่วงคลื่นลบ

แรงดันขาออกแต่ละครั้งจะสร้างแรงดันเป็น 2 เท่า ของค่าแรงดันขาเข้าสูงสุดเป็น 2 Vm เมื่อเทียบกับกราวด์ ดังนั้นแรงดันคร่อมที่จุด b = 2Vm จุด c = 4 Vm , จุด d = 6 Vm, จุด e = 8 Vm ขณะไม่มีโหลด (no load) วงจรขั้นบันไดของ Cockcroft Walton จะมีแรงดันขาออกเป็น 2 เท่าของค่าแรงดันสูงสุดที่ใส่เข้ามาคูณด้วยจำนวนชั้น แต่เมื่อต่อโหลดจะมีแรงดันตกคร่อมและไดโอดทำให้แรงดันขาออก มีค่าน้อยกว่า $2.n.V_{max}$ ซึ่งโดยสรุปแล้ววงจรแบบ Cockcroft Walton จะประกอบไปด้วยไดโอด และตัวเก็บประจุ

5.2. การสร้างแรงดันกระแสตรงแรงสูงโดยใช้หม้อแปลงต่อเป็นขั้นบันได

(Voltage multiplier with cascade transformation)

เนื่องจากวงจรของ Cockcroft Walton มีข้อเสีย คือ เมื่อนำมาต่อกันหลายชั้น ทำให้แรงดันเอาต์พุต (output) ตก ซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดเพียง 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อต่อจำนวนชั้นมากๆ แรงดันยิ่งตกลงอีก เนื่องจากเกิดแรงดันตกคร่อมไดโอด และตัวเก็บประจุและยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับ แหล่งจ่ายหม้อแปลงตัวเดียว Allibone จึงได้แก้ไขใหม่โดยใช้วงจร ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 วงจรแบบ Allibone

ในแต่ละชั้นประกอบด้วยหม้อแปลงแรงสูงต่อผ่านไปยังไดโอด D_1 และ D_2 ซึ่ง กลับไฟฟ้า เป็นแบบครึ่งคลื่นต่อไปยังตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ทำให้แรงดันไฟฟ้าคร่อม C_1 และ C_2 มีขนาดเท่ากับ V_m แต่เนื่องจาก C_1 และ C_2 ต่ออนุกรมกันจึงทำให้แรงดันที่จุด ก มีขนาดเป็น $2V_m$ สำหรับชั้นที่ 2 นั้น ประกอบด้วยหม้อแปลง T ซึ่งจ่ายให้กับ T_2 และ ไดโอด D_3, D_4 , ตัวเก็บประจุ C_3, C_4 จึงทำให้แรงดันที่จุด ข เมื่อต่ออนุกรมกับชั้นแรกแล้ว ได้แรงดันเป็น $4V_m$ วงจร Allibone ประกอบไปด้วย

- หม้อแปลง T, T_1, T_2
- ไดโอด D_1, D_2, D_3, D_4
- ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3, C_4

ข้อเสียของ Allibone คือ จะต้องมีการจ่ายไฟจากหม้อแปลง T ไปเข้าหม้อแปลง T_2 จึงทำให้เปลืองหม้อแปลงเพิ่มขึ้นอีกตัวในแต่ละชั้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์วงจรขยายแรงดันจาก 220V เป็น 3kV

1.1 ตัวเก็บประจุ 0.01 uF 1kV	จำนวน	5 ตัว
1.2 ตัวเก็บประจุ 0.01 F 2kV	จำนวน	1 ตัว
1.3 ไดโอด 1A 1kV	จำนวน	6 ตัว
1.4 หม้อแปลงสลับจาก 220V เป็น 500 V	จำนวน	3 หม้อแปลง
2. อุปกรณ์กรองไฟเรียบ

2.1 ตัวเก็บประจุ 0.01F 2kV	จำนวน	54 ตัว
----------------------------	-------	--------
3. อุปกรณ์ในการติดตั้งและบรรจุวงจร เช่น แผ่นปรินต์, กอลิ่ง, โบว์ริงโพส, สวิตช์ เป็นต้น
4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเช่น ถุงมือยาง, แผ่นฟลอยด์ relay 24V, PLC Omron CPM2A, IC PC817, IC UA741, IC LF411 เป็นต้น
5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า คือ Fluke 199C scope meter color

วิธีการ

1. การศึกษาการตรวจสอบรูรั่วด้วยวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาวิธีอื่นแต่ยังคงแนวทางเดิมไว้นั้นคือการใช้ไฟฟ้า และเมื่อคณะผู้วิจัยได้มีโอกาสไปเยี่ยมชมศึกษาดูงานที่บริษัท Ansell Suretex (Thailand) ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี (ดังรูปที่ 15) ซึ่งทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ที่ทางบริษัทนำโดยคุณฮาซัน สาและ ได้ให้การต้อนรับและให้ข้อมูลกับทางคณะผู้วิจัยเป็นอย่างดี บริษัท Ansell เป็นบริษัทผู้ผลิตถุงยาง ถุงมือยางต่างๆ ซึ่งโรงงาน Ansell Suretex (Thailand) ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานีนั้นจะทำการผลิตในส่วนของถุงยางและนำออกจำหน่ายไปทั่วโลก



รูปที่ 15 คณะผู้วิจัยเข้าเยี่ยมชมโรงงาน Ansell Suretex (Thailand) ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ในโอกาสนี้คณะผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้าไปศึกษาดูงานตั้งแต่ต้นกระบวนการผลิตไปจนถึงกระบวนการตรวจสอบคุณภาพและบรรจุหีบห่อ กระบวนการที่คณะผู้วิจัยให้ความสนใจเป็นพิเศษคือขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ โดยมีเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 16



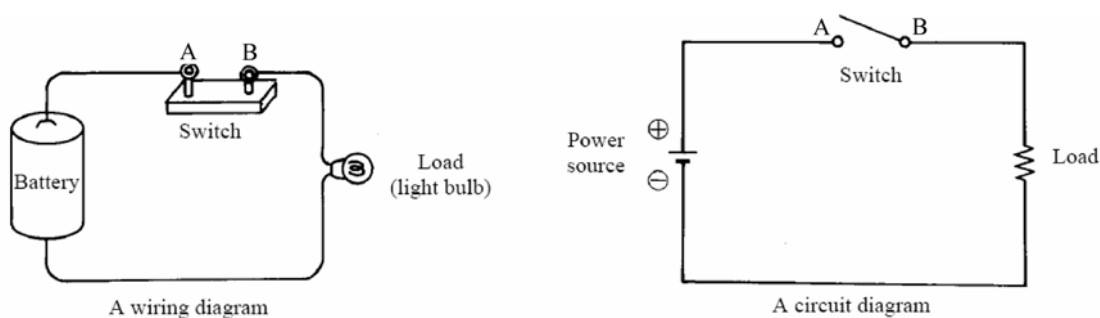
รูปที่ 16 เครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางโดยการตรวจสอบการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

เครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ชิ้นคือ แท่งสวมถุงยาง (A) และฟู่ยางนำไฟฟ้า (B) เท่านั้น ดังรูปที่ 17 ซึ่งในการทำการตรวจสอบจะใช้แรงงานคนในการสวมถุงยางเข้ากับแท่งสวมถุงยางและเครื่องจะหมุนแท่งสวมถุงยางที่มีถุงยางสวมอยู่เข้าไปสัมผัสกับฟู่ยางนำไฟฟ้าที่หมุนตลอดเวลา จากนั้นเครื่องจักรจะทำการตรวจสอบถุงยางว่ามีการรั่วซึมหรือไม่ หากไม่มีรูรั่วเครื่องจะรูดถุงยางออกและดูดถุงยางเก็บเข้าไปในช่องเก็บถุงยางดี ในทางตรงข้ามหากถุงยางมีรูรั่วเครื่องก็จะรูดถุงยางออกและดูดถุงยางเก็บเข้าไปในช่องเก็บถุงยางเสียอย่างอัตโนมัติ



รูปที่ 17 แท่งสวมถุงยางและพุยงานนำไฟฟ้า

เครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางนี้ใช้หลักการจากทฤษฎีวงจรไฟฟ้า (Electric circuit theory) ซึ่งนิยามของวงจรไฟฟ้าคือ การเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electric Elements) ที่มีเส้นทางการส่งผ่านพลังงานจากอุปกรณ์แหล่งจ่ายไปยังอุปกรณ์การะดังรูปที่ 18 โดยกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังขั้วลบ หากนำทฤษฎีดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางนั้นคือ แท่งสวมถุงยางหมายถึงจุด A และพุยงานนำไฟฟ้าหมายถึงจุด B ของวงจรในรูปที่ 18 นั่นเอง



รูปที่ 18 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า

เครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางจะทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังแท่งสวมถุงยาง (A) เชื่อมต่อกับพุยงานนำไฟฟ้า (B) ผ่านโหลด (Load ในรูปที่ 18) กลับเข้าสู่ขั้วลบเป็นอันครบวงจรไฟฟ้า ดังนั้นหากมีการสวมถุงยางซึ่งเป็นวัสดุชนิดฉนวนไฟฟ้าเข้าที่แท่งสวมถุงยางจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่จากแท่งสวมถุงยางไปยังพุยงานนำไฟฟ้าได้ ผลที่ได้คือกระแสไฟฟ้าไหลไม่ครบวงจรหรือไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจร

จากแนวคิดข้างต้นจึงนำมาสู่การวิเคราะห์หาวิธีรั่วของถุงยาง นั่นคือ หากถุงยางไม่มีรูรั่วก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลไปยังโหลดแต่หากถุงยางมีรูรั่วกระแสไฟฟ้าก็จะสามารถไหลไปยังโหลดได้ ซึ่งโหลดของเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยาง

คือ อินพุต (Input) เข้าสู่ PLC (Programmable Logic Control) ซึ่ง PLC จะนำสัญญาณที่ได้นี้ไปวิเคราะห์ว่าถูกต้องหรือเสียควรนำมาเก็บที่ช่องใดอีกขั้นตอนหนึ่งต่อไป

2 การออกแบบระบบไฟฟ้าของเครื่องตรวจสอบการรั่วไหลกระแสไฟฟ้า

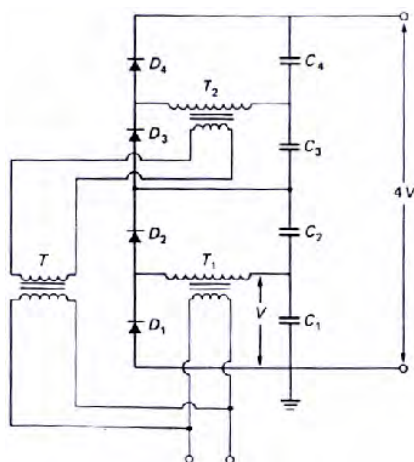
การตรวจสอบรูรั่วของด้วยการวิเคราะห์การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านี้มีหลักการอย่างง่ายคือ เมื่อถุงมือยางมีรูรั่วเกิดกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ครบวงจร ซึ่งในที่นี้จะทำการแสดงผลผ่านหน้าจอออสซิลโลสโคปให้เห็นถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในวงจร อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้กระแส ไฟฟ้าไหลครบวงจรได้โดยผ่านรูรั่วของถุงมือยางนั้นจะต้องอาศัยหลักการสปาร์ค (Spark) ผ่านช่องว่างของอากาศซึ่งต้องใช้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) สูงอย่างมากเพื่อให้ประจุไฟฟ้าข้ามผ่านช่องว่างนี้ได้

นอกจากแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าสูง แล้วเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางนี้จะต้องมีกระแสไฟฟ้าต่ำอีกด้วย ด้วยเหตุผล 2 ประการคือการที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้ถุงมือยางใหม่ได้ส่งผลให้ผลการตรวจสอบผิดพลาดนั้นคือถุงมือยางอาจจะไม่มีรูรั่วแต่กระแสไฟฟ้าที่สูงนี้ทำให้เกิดรอยไหม้เครื่องจึงตรวจสอบว่าถุงมือยางมีรูรั่ว เหตุผลอีกประการคือเพื่อความปลอดภัยของผู้ตรวจสอบหากกระแสไฟฟ้าสูงอาจทำอันตรายกับผู้ตรวจสอบได้

โดยสรุปแล้วการออกแบบระบบไฟฟ้าของเครื่องตรวจสอบการรั่วไหลกระแสไฟฟ้าจะต้องเป็นเครื่องที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงกว่า 1,000 VDC และมีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 20 mA.

2.1 ทฤษฎีการออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

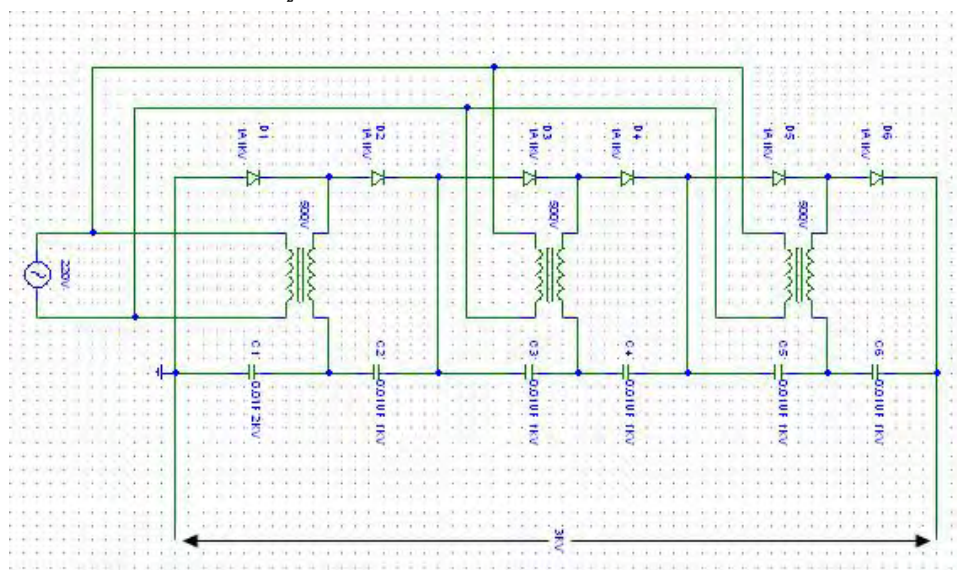
การออกแบบวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้วงจรแบบ Allibone เป็นต้นแบบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยใช้หม้อแปลงต่อเป็นขั้น บันได ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 วงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง Allibone

ในแต่ละชั้นประกอบด้วยหม้อแปลงแรงสูงต่อผ่านไปยังไดโอด D1 และ D2 ซึ่ง rectifier เป็นแบบ half wave ต่อไปยัง ตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ทำให้แรงดันไฟฟ้าคร่อม C1 และ C2 มีขนาดเท่ากับ V_m แต่เนื่องจาก C1 และ C2 ต่ออนุกรมกันจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จุด ก มีขนาดเป็น $2V_m$ สำหรับขั้นที่ 2 นั้นประกอบด้วยหม้อแปลง T ซึ่งจ่ายให้กับ T2 และไดโอด D3, D4, ตัวเก็บประจุ C3, C4 จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จุด ข เมื่อต่ออนุกรมกับ stage แรกจึงได้แรงดันไฟฟ้าเป็น $4V_m$ ข้อเสียของ Allibone คือ จะต้องมีการจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลง T ไปเข้าหม้อแปลง T2 จึงทำให้สิ้นเปลืองหม้อแปลงเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งหม้อแปลงในแต่ละชั้น

เมื่อศึกษาและเลือกทฤษฎีที่จะใช้ในการออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงได้แล้ว จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 แผนผังวงจรแบบ Allibone 3 ชั้น ที่ออกแบบเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 3,000 VDC

2.2 การจัดทำวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงในรูปที่ 20 เป็นวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงต้นแบบที่จะนำมาทดสอบแนวคิดที่คณะผู้วิจัยได้เปลี่ยนวิธีการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์จากการวิเคราะห์การรั่วไหลของประจุไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าว่าสามารถตรวจสอบได้จริงหรือไม่ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงจัดทำวงจรดังกล่าวอย่างชั่วคราวหากการทดสอบมีแนวโน้มว่าวิธีการนี้สามารถตรวจสอบรูรั่วได้จริง คณะผู้วิจัยจะจัดทำทำให้มีความปลอดภัยและสวยงามในภายหลัง วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงต้นแบบมีรายการอุปกรณ์ดังนี้

2.2.1 กล่องหม้อแปลงไฟฟ้า

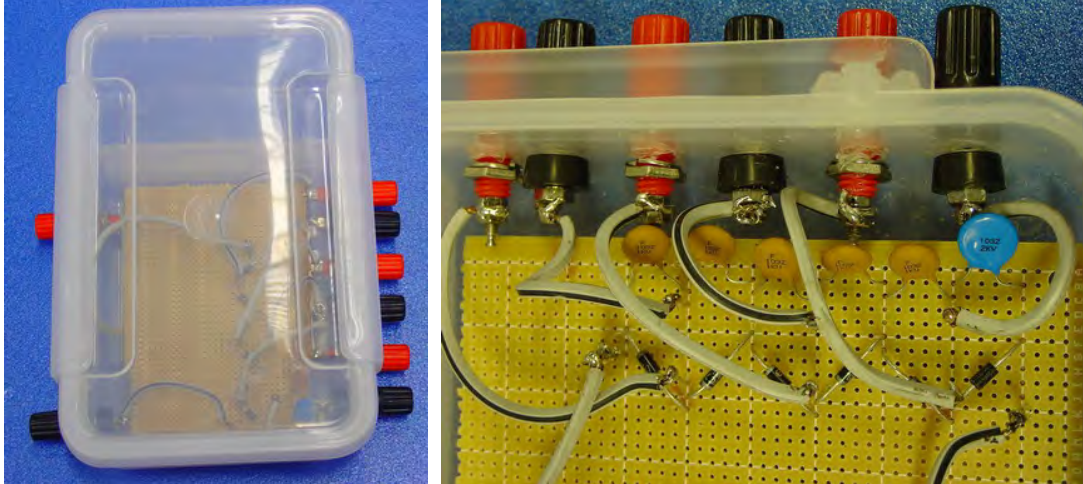
บรรจุหม้อแปลงแปลงแรงดันไฟสลับ 220V เป็น 500 V จำนวน 3 หม้อแปลง เต้าเสียบ สวิตช์เปิดปิดวงจรและโบริ่งโพส 6 ตัว เป็นช่องสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงทั้ง 3 หม้อแปลง ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 กล่องหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2.2 กล่องวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบ Allibone

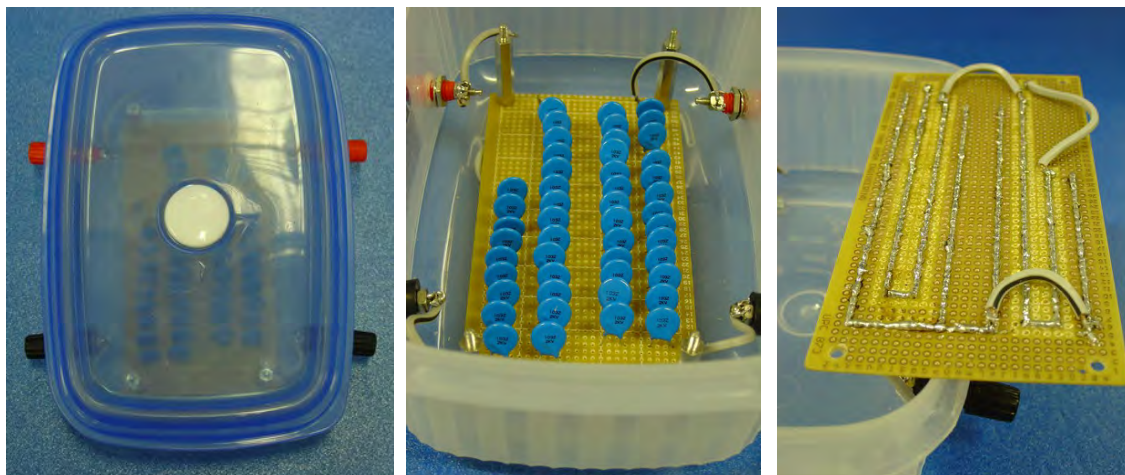
บรรจุวงจรสร้างแรงดันแบบ Allibone และโบริงโพล จำนวน 8 ตัว โดย 6 ตัว รับสัญญาณจากหม้อแปลง 3 หม้อแปลง และอีก 2 ตัว สำหรับจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกับกราวด์ ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 กล่องวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบ Allibone

2.2.3 กล่องตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้าเรียบ

บรรจุตัวเก็บประจุ 0.01F 2 kV จำนวน 54 ตัว ต่อขนานกัน รวมได้เป็น 0.54F 2 kV และโบริงโพล จำนวน 4 ตัว สำหรับต่อขนาวงจร ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 กล่องตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้าเรียบ

3 การสร้างต้นแบบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูปร่างของถุงมือยาง

เมื่อได้วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงต้นแล้ว จากนั้นมาถึงขั้นตอนออกแบบต้นแบบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูปร่างของถุงมือยาง ซึ่งได้ออกแบบต้นแบบมา 2 ลักษณะ ดังนี้

3.1 แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางแบบใช้แปรงกลิ้งทดสอบ

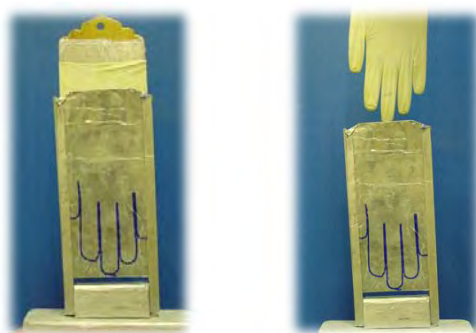
จากแนวคิดของเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางซึ่งประกอบด้วยแท่งสวมถุงยางและพู่ยางนำไฟฟ้า แบบจำลองนี้จึงใช้วิธีที่คล้ายกับเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงยางแต่เปลี่ยนรูปแบบให้ง่ายขึ้น นั่นคือประกอบด้วยแปรงเป็นฟลอยด์อลูมิเนียมที่นำมาตัดเป็นเส้นต่อกันเป็นแปรงเนื่องจากอลูมิเนียมมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าจึงนำมาใช้แทนพู่ยางนำไฟฟ้า ซึ่งหายากและราคาแพง ส่วนแม่แบบรูปมือถูกแทนด้วยอิเล็กโทรดรูปมือใช้แผ่นไม้ฉลุลือเป็นรูปมือติดกับอลูมิเนียมฟลอยด์ ดังรูปที่ 24 วิธีทดสอบคือหมุนแปรงไปตามตัวอิเล็กโทรดรูปมือ หากมีรูรั่วจะเกิดการสปาร์คขึ้น



รูปที่ 24 แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางแบบใช้แปรงกลิ้งทดสอบ

3.2 แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางแบบสวม

แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางแบบสวมนี้เป็นอีกรูปแบบที่คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่าน่าจะแนวทางทางที่ง่ายในการทดลอง ซึ่งมี 2 ส่วนคือ ส่วนแม่แบบรูปมือถูกแทนด้วยอิเล็กโทรดรูปมือใช้แผ่นไม้ฉลุลือเป็นรูปมือติดกับอลูมิเนียมฟลอยด์เช่นเดียวกับแบบใช้แปรงกลิ้งทดสอบและตัวอิเล็กโทรดที่เป็นตัวฐานสวมรับกับอิเล็กโทรดรูปมือได้พอดี ดังรูปที่ 25 วิธีทดสอบคือใส่อิเล็กโทรดรูปมือลงในฐานรับ เปิดสวิตช์หากมีรูรั่วจะเกิดการสปาร์คขึ้นทำให้หลอดไฟติด



รูปที่ 25 แบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางแบบสวม

4 การทดสอบต้นแบบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยาง

การทดสอบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางจากต้นแบบแบบจำลองนั้นกระทำเพื่อทดสอบแนว คิดที่คณะผู้วิจัย ได้เปลี่ยนวิธีการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์จากการวิเคราะห์การรั่วไหลของประจุไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์ การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าว่าสามารถตรวจสอบได้จริงหรือไม่ ดัง นั้นผลการทดลองจะมีได้กล่าวถึงร้อยละความแม่นยำ หรือความเสถียรใดๆ แต่จะพิจารณาเพียงแนวคิดการวิเคราะห์การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านั้นถูกต้องหรือไม่ นั่นคือผลการ ทดลองจะแสดงเพียงแต่ว่าสามารถทดสอบได้หรือไม่เท่านั้น

วิธีการทดสอบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางจากต้นแบบแบบจำลองนั้นกระทำโดยการเจาะรูที่ถุงมือยางที่จะ ใช้ทดสอบในตำแหน่งต่างแบบสุ่ม และได้ผลการทดสอบการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางจากต้นแบบแบบจำลองทั้งแบบใช้ แปรงบ่งชี้ทดสอบและแบบสวมสามารถตรวจสอบได้ถูกต้อง นั่นคือถุงมือยางที่ไม่มีรูรั่วจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ส่วนถุงมือ ยางที่มีรูรั่วจะมีกระแสไฟฟ้าไหล ถูกต้องตามแนวคิดใหม่ทุกประการ

5 การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยาง

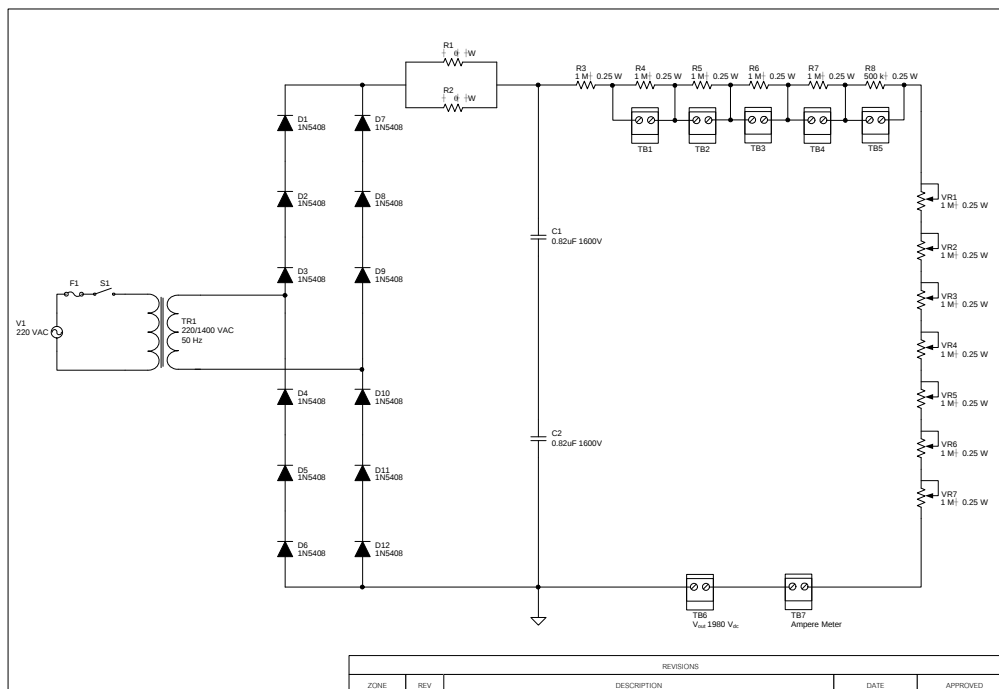
เมื่อคณะผู้วิจัยได้พิสูจน์แล้วว่าแนวคิดที่คณะผู้วิจัยได้เปลี่ยนวิธีการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์ จากการวิเคราะห์การรั่วไหลของประจุไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านั้นสามารถตรวจสอบรูรั่วได้จริง คณะผู้วิจัยจึงย้อนกลับมาทำในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้งนั่นคือการออกแบบวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงให้ มีความเที่ยงตรงและเสถียรมากกว่าวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงต้นแบบซึ่งจากการคำนวณในภาคผนวก ก. ได้ข้อสรุปคุณสมบัติวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงดังต่อไปนี้

1. รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 Vac 50Hz
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1,980 Vdc.
3. จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ต่ำสุด (Min) = 0.1584 mA

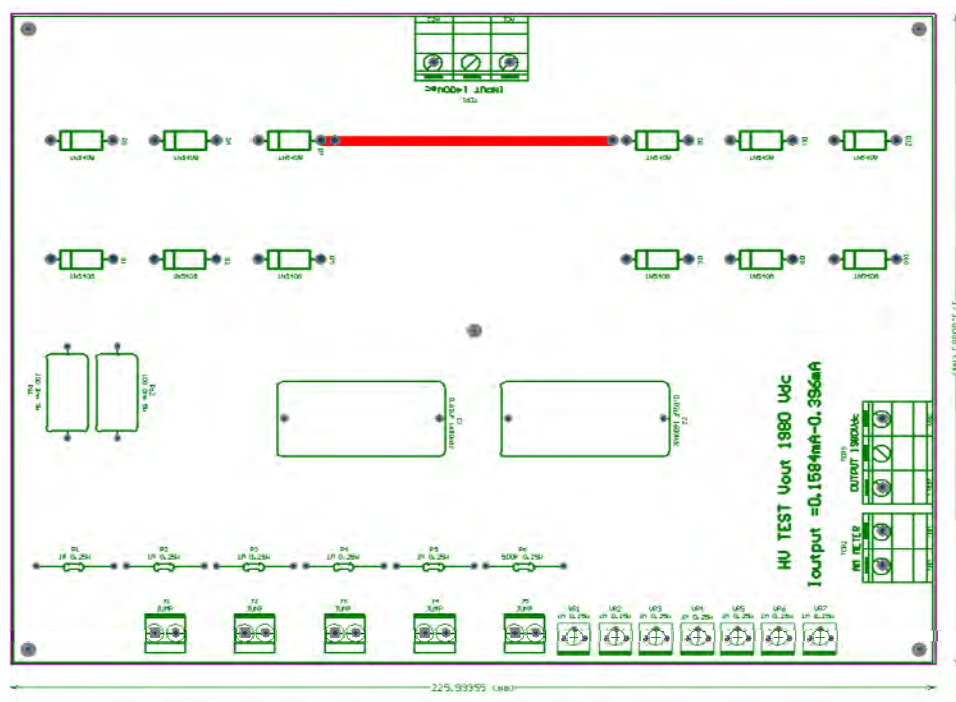
จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด (Max) = 0.396 mA

และสามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0.1584 mA – 0.396 mA

เมื่อถึงขั้นตอนนี้ทางคณะผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาออกแบบการวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 26 และ 27



รูปที่ 26 วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

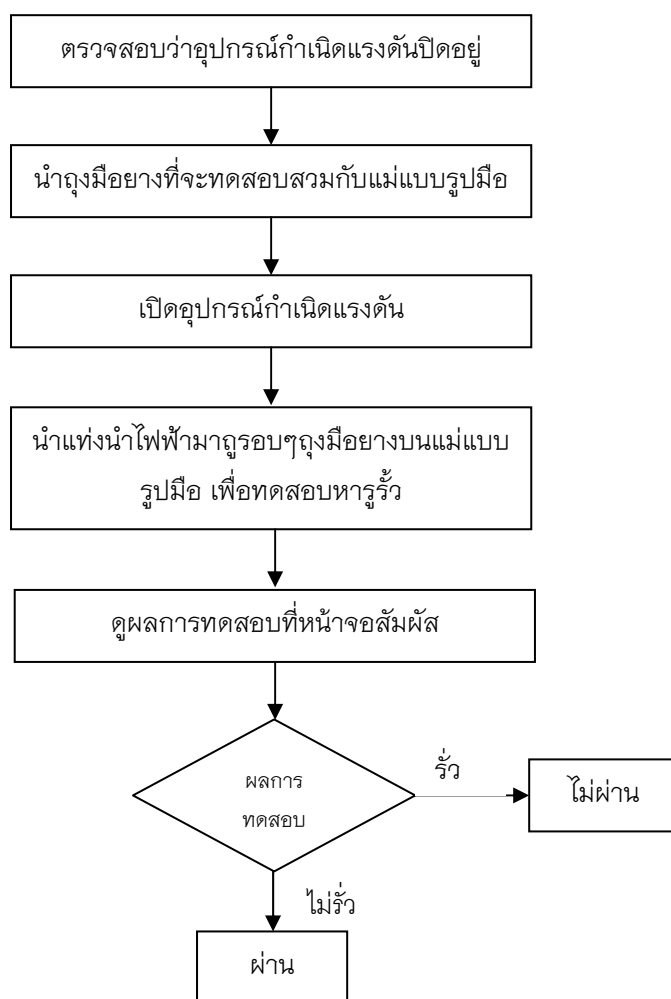


รูปที่ 27 วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง Layout Default Print

6. อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติ

อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติมีส่วนประกอบหลักดังนี้

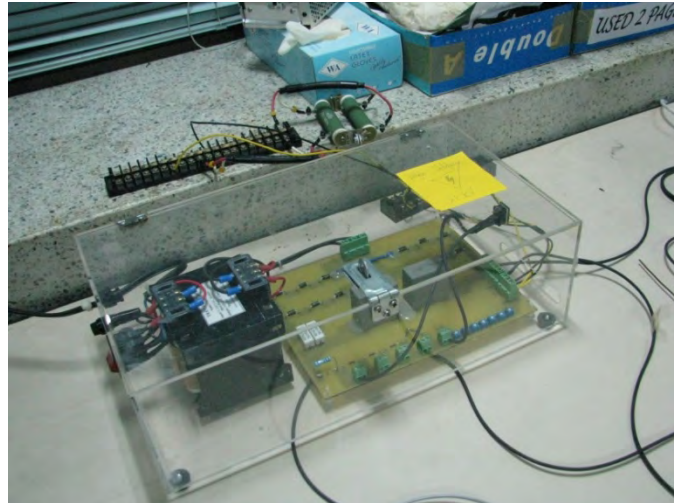
- 1) แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง
- 2) แม่แบบรูปมือ
- 3) อุปกรณ์แปลงจากกระแสไฟฟ้าต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน และ 4) เครื่องควบคุมวงจรตรรกะ ซึ่งจะมีขั้นตอนการทำงานตามไดอะแกรมดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 ไดอะแกรมอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์

6.1 การจัดสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์

จากผลงานในหัวข้อที่ 29 จะเห็นว่าคณะผู้วิจัยได้ทำการคำนวณคุณสมบัติต่างของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงและออกแบบการวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ โดยรวมของเซอร์กิตบอร์ดเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนนี้คณะผู้วิจัยจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาจัดทำแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงซึ่งสุดท้ายมีลักษณะดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

อุปกรณ์ชิ้นที่สอง คือแม่แบบรูปมือ วัสดุอย่างที่จะทำการทดสอบจะต้องถูกสวมเข้ากับแม่แบบนี้อย่างแนบติดกับแม่แบบพอดี ดังนั้นแม่แบบนี้จะต้องมีขนาดที่ไม่ใหญ่เกินไปจนวัสดุมือยางใส่ไม่ได้ และไม่เล็กเกินไปจนทำให้วัสดุมือยางย่น คณะผู้วิจัยเลือกใช้หลักการขึ้นรูปเนื่องจากเหล็กนำไฟฟ้าได้ดี และคุณสมบัติสุดท้ายคือแม่แบบจะต้องเรียบเพื่อไม่ให้เกิดแม่แบบทำความเสียหายกับวัสดุอย่าง ดังนั้นเมื่อขึ้นรูปแม่แบบเสร็จจะต้องนำแม่แบบมาขัด แม่แบบรูปมือมีลักษณะดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 แม่แบบรูปมือ

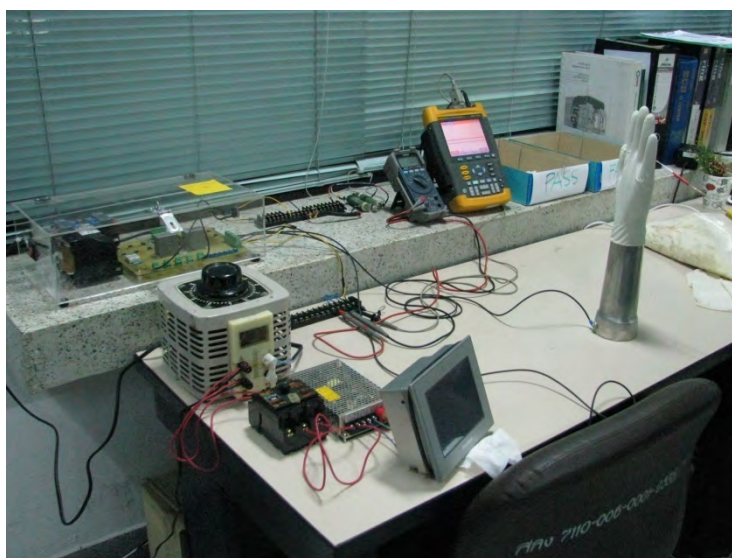
อุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญมากในชุดอุปกรณ์ตรวจสอบรูปร่างของวัสดุอย่างทางการแพทย์ คืออุปกรณ์แปรจากกระแสไฟฟ้าต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน เนื่องจากอุปกรณ์นี้เป็นอุปกรณ์ที่จะบอกได้ว่าวัสดุอย่างรู้หรือไม่ โดยจะส่งรับสัญญาณกระแสไฟฟ้าซึ่งมีค่าต่ำมากจากการตรวจสอบวัสดุอย่าง จากนั้นนำมาแปรเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานนำเข้าสู่การประมวลผล หากอุปกรณ์แปรจากกระแสไฟฟ้าต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานนี้ทำงานไม่ถูกต้องก็จะส่งผลให้ความถูกต้องของชุดอุปกรณ์ตรวจสอบรูปร่างของวัสดุอย่างทางการแพทย์ผิดพลาดไปด้วย

อุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดในระบบคือ เครื่องควบคุมวงจรตรรกะซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์แปรจากกระแสไฟฟ้าต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานมาประมวลผลสุดท้าย เพื่อให้ระบบทราบว่าถุงมือยางนั้นรั่วหรือไม่ โดยผลจะแสดงผ่านหน้าจอสัมผัส ชุดเครื่องควบคุมวงจรตรรกะมีลักษณะดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 เครื่องควบคุมวงจรตรรกะและหน้าจอสัมผัส

หลังจากคณะผู้วิจัยได้จัดหาอุปกรณ์ต่างที่มีคุณสมบัติตามต้องการได้แล้ว จึงนำอุปกรณ์เหล่านี้มาประกอบกันเป็นชุดอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์โดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติ

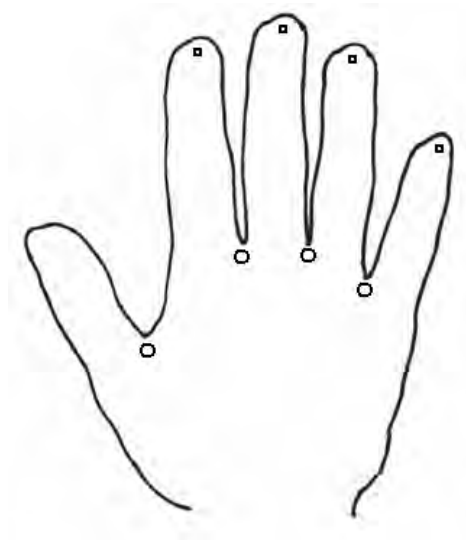
6.2 ผลการทดสอบและประสิทธิภาพการตรวจสอบถุงมือยางโดยอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่ว

เมื่อทำการจัดสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์ดังรูปที่ 35 จากนั้นนำมาทดสอบโดยแบ่งการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) การทดลองหาขนาดของรูรั่วที่สามารถตรวจสอบกระแสไฟฟ้าได้

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือการหาขนาดที่เล็กที่สุดที่สามารถตรวจสอบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- นำถุงมือยาง 1 คู่มาเจาะรูที่บริเวณปลายนิ้ว 4 นิ้ว ดังรูปที่ 33 ด้วยเข็มขนาด 720, 630, 570 และ 530 ไมครอน ซึ่งเป็นเข็มที่มีขนาดเล็กที่สุดในท้องตลาดทั่วไป



รูปที่ 33 ตำแหน่งเจาะรูด้วยเข็มโดยจุดสี่เหลี่ยมคือการทดลองที่ 1 และวงกลมคือการทดลองที่ 2

- จากนั้นนำมาทดลองตรวจสอบกระแสไฟฟ้ารั่วไหล โดยจะผ่านพู่ไฟฟ้า 30 ครั้ง กำหนดให้แหล่งจ่ายไฟฟ้า 1,800 VDC บันทึกผลลงในตารางที่ 11.1

ตารางที่ 2 ผลการทดลองจำนวนครั้งในการตรวจสอบพบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรูที่ปลายนิ้วมือ

ขนาดเข็มที่ใช้เจาะรู (ไมครอน)	ขนาดรูที่ถูกเข็มเจาะ (ไมครอน)	จำนวนครั้งที่กระแส ไฟฟ้าไหล	ร้อยละจำนวนครั้งที่ กระแสไฟฟ้าไหล
720	790	30	100
630	680	26	86.6
570	685	27	96.6
530	598	29	90

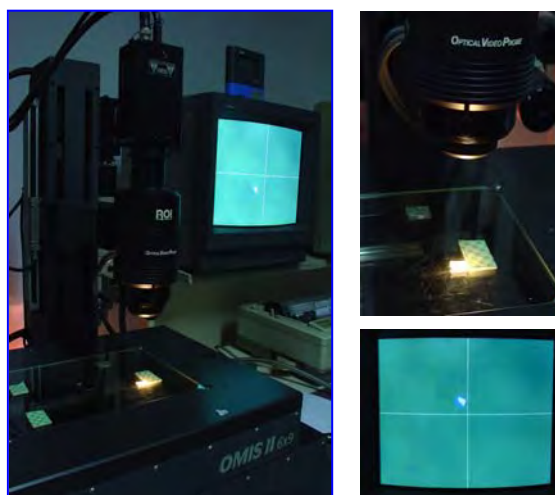
การทดลองข้างต้นเป็นการเจาะรูที่ปลายนิ้วซึ่งเป็นส่วนที่ตึงที่สุดของถุงมือยางเมื่อสวมเข้ากับแม่แบบรูปมือ ส่งผลให้ขนาดของรูใหญ่กว่าขนาดเข็มที่เจาะ การทดลองต่อไปจึงกระทำในบริเวณที่ย่นที่สุดของถุงมือยาง คือบริเวณง่ามนิ้ว ดังรูปที่ 33 โดยมีขั้นตอนการทดลองเหมือนการทดลองข้างต้น ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองจำนวนครั้งในการตรวจสอบพบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรูที่ง่ามนิ้วมือ

ขนาดเข็มที่ใช้เจาะรู (ไมครอน)	ขนาดรูที่ถูกเข็มเจาะ (ไมครอน)	จำนวนครั้งที่กระแส ไฟฟ้าไหล	ร้อยละจำนวนครั้งที่ กระแสไฟฟ้าไหล
720	620	19	63.3
630	542	15	50
570	491	14	46.6
530	456	8	50

การทดลองในส่วนที่เป็นง่ามนิ้วนี้ได้มีการวัดขนาดรูที่ถูกเข็มเจาะเนื่องจากยางในบริเวณนั้นไม่มีความตึงยึดเหมือนส่วนปลายนิ้วในทางตรงข้ามกลับหดย่นอีกด้วยทำให้รูดังกล่าวมีขนาดหดเล็กลงจากขนาดเข็มที่ถูกเจาะ ดังนั้นคณะผู้วิจัยต้องการทราบขนาดรูที่หดเล็กลงนี้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองตารางที่ 2 จากการพิจารณาผลการทดลองทั้ง 2 ครั้ง สรุปได้ว่าหากรูรั่วที่ใหญ่กว่าขนาดรูรั่วที่เข็มขนาด 720 ไมครอนเจาะกระแสไฟฟ้าจะสามารถตรวจพบได้ร้อยละ 100

อย่างไรก็ตามจากการสังเกตรูรั่วที่ถุงมือยางและสัมภาษณ์กับคนงานที่ชำนาญในการตรวจสอบรูรั่วบนถุงมือยางด้วยตาเปล่าส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าหรือการใส่ลมเข้ามาเล็กน้อยเพื่อขยายรูรั่วให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อนำรูรั่วของถุงมือยาง 50 คู่ มาวัดขนาดด้วยเครื่องเครื่องโปรไฟล์โปรเจ็คเตอร์โดยตัดมาวัดเพียงส่วนที่มีรูรั่วดังรูปที่ 34 ได้ขนาดรูเฉลี่ยอยู่ที่ 1527 ไมครอน



รูปที่ 34 การวัดขนาดรูรั่วของถุงมือยางที่เกิดจากการผลิตผิดพลาด

จากผลการทดลองในตารางที่ 11.1 และ 11.2 และค่าเฉลี่ยขนาดรูรั่วเฉลี่ยที่เกิดจากการผลิตผิดพลาดซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าร้อยละ 720 ไมครอนที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้ร้อยละ 100 สรุปได้ว่าอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะสามารถตรวจสอบรูรั่วที่เกิดขึ้นบนถุงมือยางได้อย่างสมบูรณ์หากถุงมือที่สวมลงบนแม่แบบรูปมือตึงแนบสนิทกัน

6.3 การทดลองหาประสิทธิภาพในการตรวจสอบรูรั่วเปรียบเทียบระหว่างวิธีกระแสไฟฟ้าและน้ำ

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือการหาประสิทธิภาพในการตรวจสอบรูรั่วจากการผลิตจริงโดยจะเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของน้ำผ่านรูรั่ว ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการตามมาตรฐาน ASTM D 5151 ดังนั้นขั้นตอนการทดลองจึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

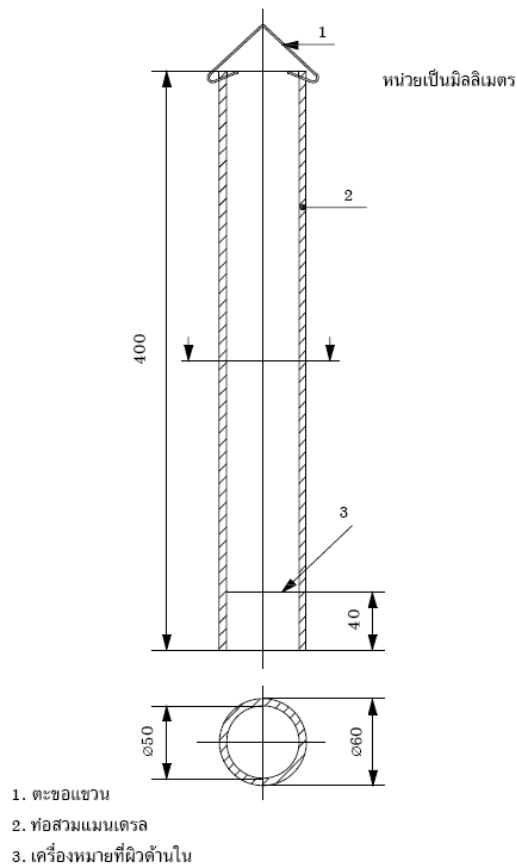
ก. การทดลองหาประสิทธิภาพในการตรวจสอบรูรั่วด้วยการทดสอบการรั่วซึมน้ำ

การตรวจหารูรั่วของถุงมือด้วยวิธีการสังเกตการรั่วซึมของน้ำเป็นวิธีการตามมาตรฐาน ASTM D 5151 โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้ นำถุงมือยางที่ผ่านขั้นตอนการผลิตจนถึงขั้นตอนสุดท้ายก่อนเข้ารับการตรวจสอบด้วยคนงานมาจากผู้ประกอบการด้วยวิธีการสุ่มจำนวน 100 คู่ ดังนั้นถุงมือยางเหล่านี้จะเป็นถุงมือยางที่มีทั้งที่รั่วและไม่รั่ว ดังรูปที่ 35



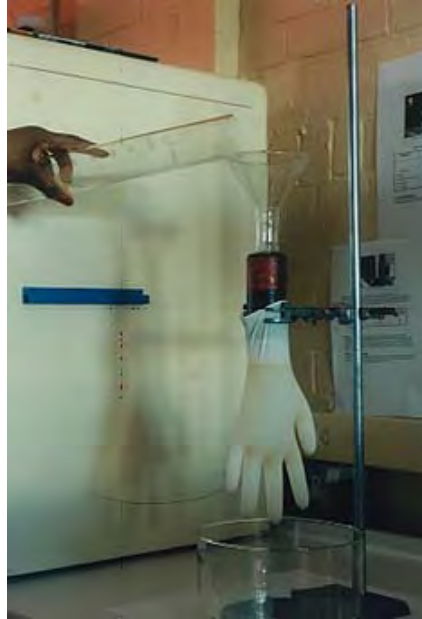
รูปที่ 35 ถุงมือยางก่อนเข้ารับการตรวจสอบรูรั่วจำนวน 100 คู่

สวมถุงมือยางที่ท่อเมนเดรล ซึ่งตามมาตรฐานแล้วควรมีขนาดและรูปร่างตามแบบในรูปที่ 36 แต่เนื่องจากทางคณะผู้วิจัยทำการทดลองเพียงเพื่อใช้ยืนยันผลการตรวจสอบรูรั่วด้วยวิธีการกระแสไฟฟ้า จึงขอจัดทำเมนเดรลอย่างง่ายขึ้นมีคุณสมบัติเพียงแค่มิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเพียงพอสำหรับสวมถุงมือยางได้เท่านั้น



รูปที่ 36 แบบท่อแมนเดรลตามมาตรฐาน ASTM D 5151

- การสวมถุงมือยางเข้ากับท่อแมนเดรลนั้นจะต้องไม่ให้ขอบของถุงมือยางสูงกว่าปลายท่อแมนเดรลเกินกว่า 40 มิลลิเมตร จากนั้นยึดด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น วงแหวน เมื่อยึดถุงมือยางแน่นดีแล้วให้นำมาแขวนในแนวตั้ง ดังรูปที่ 5
- ตวงน้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 36 องศาเซลเซียส ปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรบวก 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เทน้ำลงในแมนเดรลเข้าสู่ถุงมือยาง เช็ดน้ำส่วนเกินบนถุงมือยาง อุปกรณ์ในการตรวจสอบด้วยน้ำนี้ ผู้วิจัยอุปกรณ์ที่หาได้ในห้องปฏิบัติการภาพโดยรวม มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 37



รูปที่ 37 ลักษณะการตรวจหารั่วรั่วของถุงมือยางด้วยการทดสอบการรั่วซึมน้ำ

- ตรวจพินิจทันทีว่ามีน้ำรั่วซึมออกจากถุงมือยาง หากไม่มีการรั่วซึมให้แขวนไว้ 2-4 นาที แล้วใช้ผ้าแห้งชนิดซับน้ำได้ดีเช็ดรอบๆ ถุงมือยางแล้วสังเกตรอยเปื้อนน้ำ หากมีรอยหมายความว่าถุงมือยางรั่ว หากไม่มีรอยหมายความว่าถุงมือยางไม่รั่ว บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 11.3 และทำเครื่องหมายระบุด้วยว่าถุงมือยางนั้นๆ รั่วหรือไม่

ข. การทดลองหาประสิทธิภาพในการตรวจสอบรูรั่วด้วยการทดสอบการรั่วไหลกระแสไฟฟ้า

- นำถุงมือยางที่ผ่านการตรวจสอบด้วยการทดสอบการรั่วซึมน้ำทั้ง 100 ถุง มาอบให้แห้งสวมถุงมือยางลงบนแม่แบบรูปมือโดยพยายามสวมให้ถุงมือยางแนบแม่แบบที่สุด ดังรูปที่ 38 จากนั้นต่อพ่วงอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางให้ครบ โดยตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าไว้ที่ 1,800 VDC



รูปที่ 38 แสดงการสวมถุงมือยางลงบนแม่แบบรูปมือ

รู้

เมื่อทุกอย่างต่อพ่วงแล้ว แขนงนำไฟฟ้าไปผูกให้รอบถุงมือยาง ดังรูปที่ 39 เพื่อตรวจหากระแสไฟฟ้าที่จะรั่วไหลผ่านรู้

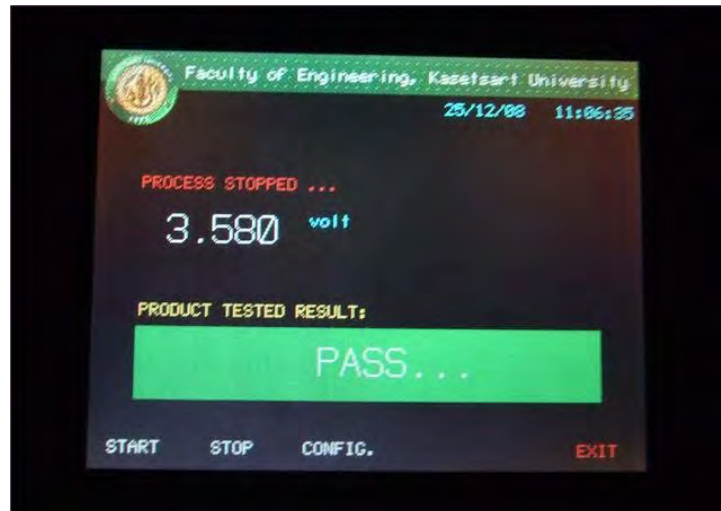


รูปที่ 39 แสดงการผูกแขนงนำไฟฟ้าเพื่อตรวจหาการรั่วบนถุงมือยาง

- สังเกตผลการทดสอบบนหน้าจอสัมผัสที่ได้เขียนโปรแกรมรับค่าการประมวลผลด้วย PLC โดยที่หน้าจอสัมผัสจะเขียนการแสดงผลเพียงแค่ว่าดังรูปที่ 40 หรือไม่ว่าดังรูปที่ 41 ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจผลมาก



รูปที่ 40 หน้าจอสัมผัสแสดงผลการทดลองระบุว่าถุงมือยางรั่ว



รูปที่ 41 หน้าจอแสดงผลผลการทดลองระบุว่าถูกต้องอย่างไร้ข้อผิดพลาด

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม คือออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อให้สามารถทราบได้ถึงกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงขณะตรวจพบรูรั่ว นั่นคือ ขณะที่ไม่มีรูรั่วกราฟกระแสไฟฟ้าจะอยู่ที่ 0 μA แต่เมื่อตรวจพบรูรั่วกราฟกระแสไฟฟ้าจะอยู่ที่ 68 μA อย่างไรก็ตามวิธีการที่ง่ายที่สุดในการสังเกตผล คือการสังเกตผลการทดลองด้วยตาเปล่า โดยจะเห็นเป็นแสงวาบที่แท่งนำไฟฟ้า



รูปที่ 42 แสดงการแสดงผลที่ออสซิลโลสโคป

- เมื่อตรวจพบรูรั่วผู้วิจัยได้ทำเครื่องหมายรอบจุดที่รั่ว ดังรูปที่ 43



รูปที่ 43 การทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งรูรั้วที่ตรวจสอบพบ

- ข้อควรระวัง คือ เมื่อการทดสอบแต่ละครั้งเสร็จให้นำแท่งนำไฟฟ้าไปสัมผัสกับแม่แบบรูปมือเพื่อเป็นการคายประจุไฟฟ้าออกจากแม่แบบรูปมือ
- เมื่อทำการทดลองด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจนครบ 100 คู่ จะได้ถุงมือยางที่แยกประเภทแล้ว ดังรูปที่ 44 บันทึก
- จำนวนถุงมือยางในตารางที่ 4



รูปที่ 44 ถุงมือยางที่ถูกแยกประเภทด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4 ตารางแสดงปริมาณถุงมือยางที่ตรวจสอบจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าและน้ำ

วิธีการตรวจสอบ	ปริมาณถุงมือยางรั่ว	ปริมาณถุงมือยางไม่รั่ว
การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า	59 (รวม 36 ข้างของการตรวจด้วยน้ำ)	41
การรั่วไหลของน้ำ	36	64

เหตุผลที่ทำให้การทดลองตรวจสอบรั่วด้วยวิธีการทดสอบการรั่วซึมน้ำก่อน คือการตรวจสอบด้วยกระแสไฟฟ้าจะทำให้รั่วของถุงมือยางใหม่ส่งผลให้รั่วที่เดิมที่มีขนาดเล็กมากจนตาเปล่ามองไม่เห็นกลับขยายเป็นจุดที่ชัดเจนขึ้น ในทางตรงข้ามการทดสอบจากการรั่วซึมของน้ำไม่ส่งผลใดๆ กับรั่วเพียงแต่เสียเวลาในการอบถุงมือยางให้แห้งก่อนนำมาทำการทดลองการตรวจสอบด้วยกระแสไฟฟ้าเท่านั้น

การทดสอบรั่วของถุงมือยางโดยใช้วิธีการทดสอบด้วยกระแสไฟฟ้าในส่วนของปริมาณถุงมือยางที่รั่วนั้นตรงกับปริมาณถุงมือยางที่ถูกตรวจสอบด้วยวิธีทดสอบด้วยน้ำคือ 36 ข้าง แล้วส่วนที่เหลืออีก 23 ข้างที่สามารถตรวจพบรั่วด้วยกระแสไฟฟ้าได้ เนื่องจากจุดที่กระแสไฟฟ้าตรวจพบเป็นส่วนของยางบางมากแต่ไม่ขาดออกจากกัน ซึ่งยางบางเหล่านี้ น้ำจะไม่รั่วไหลออกมาทำให้วิธีการตรวจสอบด้วยน้ำไม่สามารถตรวจพบได้ แต่กระแสไฟฟ้าสามารถทำให้ยางบางนี้ไหม้จนเกิดรูขึ้นส่งผลให้เครื่อง PLC ตรวจพบว่าถุงมือยางนี้รั่ว

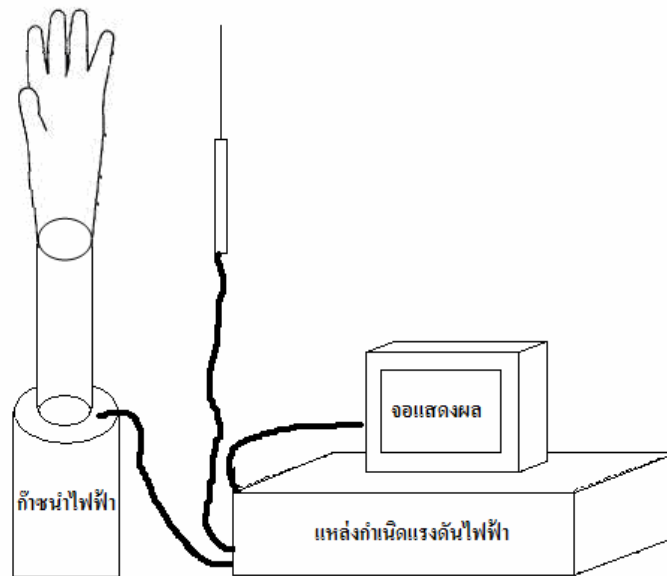
ถุงมือยางที่มีบริเวณที่เป็นยางบางผิดปกตินั้นเกิดจากการการผลิตที่ผิดพลาด ซึ่งถุงมือยางจะถูกคัดออกอยู่แล้ว ดังนั้นการที่กระแสไฟฟ้าจะทะลุยางบางจนทำให้ถุงมือยางนั้นต้องถูกคัดออกจึงไม่ใช่เรื่องเสียหาย ในทางตรงข้ามกลับเป็นผลดีที่ทำให้ถุงมือยางที่จะเข้าสู่กระบวนการบรรจุเป็นถุงมือยางที่สมบูรณ์

7. ผลการศึกษาวิธีการทางเลือกที่ใช้ในการตรวจสอบรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์

อ้างถึงการประชุมรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 เมื่อวันที่พฤหัสบดีที่ 24 กรกฎาคม 2551 ณ ห้องประชุม 2 ชั้น 14 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นถึงปัญหาเรื่องความยากลำบากในการสวมถุงมือยางเข้า-ออกจากแม่พิมพ์รูปมือ ดังนั้นผู้ทรงคุณวุฒิจึงแนะนำให้ศึกษาความเป็นไปได้ในวิธีการทางเลือกอื่นเพิ่มเติมอีก 3 วิธีการ ซึ่งจากการค้นคว้าข้อมูลได้ข้อสรุปดังนี้

7.1 ผลการศึกษาวิธีการทางเลือกโดยการใช้ก๊าซนำไฟฟ้าไปปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง

วิธีการทางเลือกนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าหากใช้ก๊าซที่นำไฟฟ้าได้ปล่อยเข้าไปในถุงมือยางเพื่อทำให้ถุงมือยางพองแทนการสวมถุงมือยางลงบนแม่แบบรูปมือจะช่วยแก้ปัญหาความยากลำบากในการสวมและถอดถุงมือยางจากแม่แบบรูปมือได้ โดยแม่แบบในวิธีการนี้จะเหลือเพียงแท่งตรงที่สามารถส่งถ่ายก๊าซนำไฟฟ้าได้เท่านั้น ไม่ต้องมีนิ้วของนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดกับถุงมือยางขณะสวมเข้า-ออกอีกด้วย จากสมมุติฐานแบบจำลองควรมีลักษณะอย่างง่าย ดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 ลักษณะแบบจำลองวิธีการใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง

จากการศึกษาการนำไฟฟ้าของก๊าซพบว่าที่ความดันปกติก๊าซจะไม่นำไฟฟ้า ดังนั้นการทำให้ก๊าซนำไฟฟ้าจะต้องทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าหรือที่เรียกอีกอย่างว่าก๊าซพลาสมา พลาสมาเป็นเหมือนกับสถานะที่สี่ของสสาร คือภาวะของก๊าซที่มีประจุไฟฟ้าอิสระทั้งบวกและลบโดยเฉลี่ยแล้วเท่ากันส่งผลให้ก๊าซมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากก๊าซในภาวะปกติ ก๊าซทุกชนิดเมื่อเปลี่ยนสถานะกลายเป็นพลาสมา ก็จะเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ สสารทุกชนิดทำให้เป็นพลาสมาโดยการรับพลังงานในรูปแบบต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ความร้อน คลื่นวิทยุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สสารและธาตุยิ่งหนักยิ่งทำให้เป็นพลาสมาได้ยากขึ้น วิธีที่นิยมใช้คือการใช้ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อทำให้ก๊าซกลายเป็นพลาสมาจะส่งผลให้ความต้านทานของก๊าซลดลงเพียงพอที่จะทำให้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบ นั่นคือการเกิดกระแสไฟฟ้านั่นเอง

การทำให้ก๊าซนำไฟฟ้านั้นนอกจากจะต้องถูกกระตุ้นด้วยความต่างศักย์ที่สูงเป็นหลายหมื่นโวลต์แล้วจะต้องอยู่ในสภาวะที่มีความดันต่ำหรือใกล้เคียงสุญญากาศ ยิ่งความดันอากาศต่ำเท่าใดก็จะยิ่งใช้ความต่างศักย์ที่ใช้ในการกระตุ้นน้อยลงเท่านั้นและจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการตรวจ สอบไม่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามความต่างศักย์ที่จะต้องใช้ก็เป็นหลักหมื่นอยู่ดีซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบมากพอที่จะทำให้ถุงมือยางไหม้ก่อนที่จะทำการทดสอบเสียอีก

ก๊าซที่มักจะนำมาทำให้กลายเป็นพลาสมาเป็นพวกก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน นีออน ฮีเลียมไฮโดรเจน เป็นต้น ก๊าซเหล่านี้จัดเป็นก๊าซอันตรายทำอันตรายประเภทก๊าซที่แทนที่ออกซิเจน (O_2) ทำให้ขาดอากาศ (asphyxiant gases) กลไกการเกิดพิษ คือก๊าซในปริมาณมากจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในอากาศ ผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในอากาศน้อยลงจนไม่พอในการหายใจ ดังนั้นความรุนแรงของโรค จะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนที่เหลือ

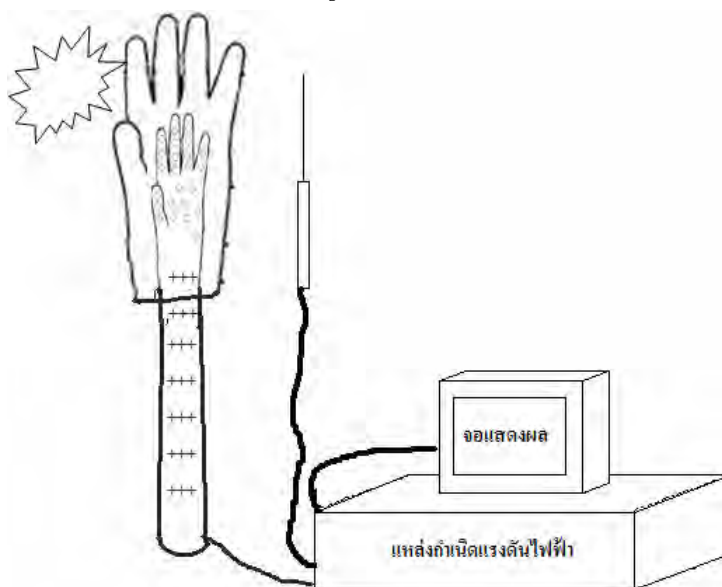
จากข้อมูลข้างต้นคณะผู้วิจัยได้ข้อสรุปคือวิธีการใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยางแทนการสวมถุงมือยางบนแม่แบบรูปมือนั้นเป็นไปได้ โดยมีเหตุผลดังนี้

- 1) ไม่สามารถสร้างกล่องปิดเพื่อสร้างระบบสุญญากาศหรือทำให้ระบบมีความดันต่ำที่สุดที่จะสามารถทำให้ก๊าซนำไฟฟ้าได้

- 2) ก๊าซที่จะใช้เพื่อทำให้กลายเป็นก๊าซพลาสมาเป็นก๊าซที่ทำอันตรายกับผู้ทดสอบ
- 3) ความต่างศักย์ที่ใช้ในการทำให้ก๊าซกลายเป็นก๊าซพลาสมานั้นสูงมากจนกระทั่งทำให้ถุงมือยางไหม้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าในระบบ

7.2 ผลการศึกษาวิธีการทางเลือกโดยการใช้แท่งเหล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในถุงมือยาง

วิธีการทางเลือกนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าหากแม่แบบรูปมือมีขนาดเล็กกว่าขนาดถุงมือยางจะช่วยให้การสวมถุงมือยางเข้า-ออกจะทำได้ง่ายขึ้น โดยกำหนดให้แม่แบบรูปมือขนาดเล็กนี้ต้องถูกเจาะรูให้ทั่วเพื่อให้ปล่อยลมที่มีอิเล็กตรอนอยู่เข้าไปทำให้ถุงมือยางพอง จากนั้นจึงตรวจสอบกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่รั่วผ่านรูของถุงมือยางจากสมมุติฐานแบบจำลองควรมีลักษณะอย่างง่าย ดังรูปที่ 46



รูปที่ 46 ลักษณะแบบจำลองวิธีการใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง

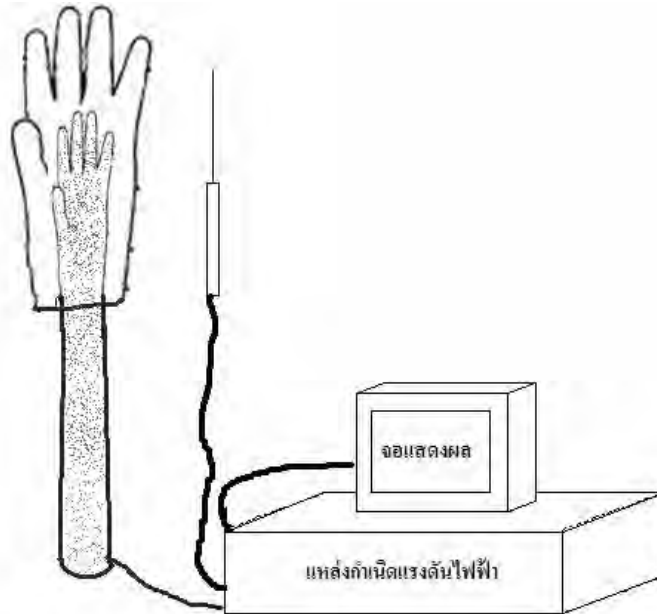
อย่างไรก็ตามแม้ว่าแหล่งกำเนิดไอออนจะสามารถให้กำเนิดอิเล็กตรอนได้จำนวนมากแต่ในอากาศก็มีอิเล็กตรอนไม่ว่าจะเป็นประจุบวกหรือลบอิสระที่ลอยอยู่และพร้อมที่จะจับตัวรวมเข้ากับประจุที่แหล่งกำเนิดไอออนสร้างขึ้นในเวลาเพียงเสี้ยววินาทีด้วย โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่รั่วไหลผ่านรูรั่วออกมามีจำนวนน้อยมากด้วยแล้วยิ่งเพิ่มโอกาสให้ประจุในอากาศที่มีอยู่จำนวนมากรวมเข้ากับประจุที่รั่วออกมา การรวมกันของประจุบวกและลบจะเกิดสภาวะเป็นกลางทำให้ไม่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งส่งผลให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในระบบ การป้องกันไม่ให้ประจุอิสระที่อยู่ในอากาศรวมตัวเข้ากับประจุที่เกิดจากแหล่งกำเนิดไอออน คือการทำให้ในระบบไม่มีอากาศ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือทำให้ระบบเป็นสุญญากาศนั่นเอง

จากข้อมูลข้างต้นคณะผู้วิจัยได้ข้อสรุปคือวิธีการใช้แม่แบบรูปมือเหล็กขนาดเล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในถุงมือยางแทนการสวมถุงมือยางบนแม่แบบรูปมือนั้นไม่เหมาะสมอย่างยิ่ง โดยมีเหตุผลดังนี้

- 1) ไม่สามารถสร้างกล่องปิดเพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนของอากาศเข้ามาจับกับอิเล็กตรอนที่แหล่งกำเนิดไอออนสร้างขึ้นได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือไม่สามารถทำให้ระบบเป็นระบบสุญญากาศได้
- 2) แหล่งกำเนิดไอออนไม่สามารถให้กำเนิดปริมาณอิเล็กตรอนเพียงพอที่จะทำให้ประจุบวกและประจุลบเคลื่อนที่จนเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลออกมาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเป็นการตรวจวัดในระบบเปิด

7.3 ผลการศึกษาวิธีการทางเลือกโดยการใช้แม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์เคลือบสารนำไฟฟ้า

วิธีการทางเลือกนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่คล้ายคลึงกับในข้อที่ 7.2 คือหากแม่แบบรูปมือมีขนาดเล็กกว่าขนาดถุงมือยางจะช่วยให้การสวมถุงมือยางเข้า-ออกจะทำได้ง่ายขึ้น โดยกำหนดให้แม่แบบรูปมือขนาดเล็กนี้ทำจากพอลิเมอร์ที่สามารถยืดหยุ่นได้และเคลือบผิวด้านนอกด้วยสารตัวนำไฟฟ้า เมื่อสวมถุงมือยางบนแม่แบบรูปมือเรียบร้อยแล้วเครื่องตรวจสอบรูรั่วจะปล่อยลมอัดเข้าไปในแม่แบบรูปมือเพื่อทำให้แม่แบบขยายแนบพอดีกับถุงมือยาง จากนั้นจึงตรวจสอบกระแสไฟฟ้าที่รั่วผ่านรูของถุงมือยางเช่นเดิม จากสมมุติฐานแบบจำลองควรมีลักษณะอย่างง่าย ดังรูปที่ 47



รูปที่ 47 ลักษณะแบบจำลองวิธีการใช้ก้านนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง

ผู้วิจัยได้ทดลองนำถุงมือยางทั่วไปที่ใช้กับช่างไฟฟ้าทำมาจากโพลีเมอร์ซึ่งมีลักษณะแข็งกว่าถุงมือยางโดยจัดทำให้มีขนาดเล็กกว่าถุงมือยาง เมื่อนำมาทำการทดลองโดนนำถุงมือดังกล่าวมาทำเป็นแม่แบบจากนั้นสวมถุงมือยางทับลงไปแล้วเป่าอากาศเข้าไปในแม่แบบรูปมือเพื่อทำให้แม่แบบรูปมือขยาย พบว่าส่วนนิ้วทั้ง 5 ของแม่แบบรูปมือไม่สามารถขยายเข้าไปแนบพอดีกับถุงมือยาง

จากข้อมูลข้างต้นคณะผู้วิจัยได้ข้อสรุปคือวิธีการใช้แม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์เคลือบสารนำไฟฟ้าแทนการสวมถุงมือยางบนแม่แบบรูปมือเหล็กนั้นไม่เหมาะสมอย่างยิ่ง โดยมีเหตุผลดังนี้

- 1) ไม่สามารถทำให้แม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์เคลือบสารนำไฟฟ้าขยายแนบพอดีกับถุงมือยางได้ เนื่องจากทิศทางการขยายที่ควบคุมได้ยาก ส่งผลให้ถุงมือบางจุดยื่นจนไม่สามารถตรวจสอบการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าได้
- 2) สารตัวนำไฟฟ้าที่เคลือบบนแม่แบบรูปมือที่ทำจากโพลีเมอร์จะแยกเป็นรอยแตกเมื่อแม่แบบรูปมือขยาย ส่งผลให้การตรวจสอบการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าในบางจุดที่ตรงกับรอยแยกไม่สามารถตรวจสอบได้

ผลและวิจารณ์

คณะผู้วิจัยขอสรุปผลการทดสอบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วจากถุงมือยางโดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักดังนี้

1.ผลการวิจัยอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถตรวจสอบรูรั่วที่ขนาด 500 ไมครอน เป็นต้นไป ซึ่งรูรั่วขนาดนี้เป็นขนาดรูที่เล็กกว่ารูรั่วเฉลี่ยที่เกิดบนถุงมือยาง และจากผลการทดลองในตารางที่ 11.3 สรุปได้ว่าอุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถตรวจสอบรูรั่วได้ที่มีความถูกต้อง 100% โดยมีข้อแม้ว่าจะต้องลากแท่งนำไฟฟ้าไปให้ทั่วถุงมือยางและถุงมือยางจะต้องแนบสนิทกับแม่แบบรูปมือ

ในการทดสอบถุงมือยางแต่ละชิ้นเฉลี่ยแล้วใช้เวลา 2 นาที ในทางตรงกันข้ามวิธีการใช้แรงงานคนที่โรงงานใช้อยู่ในปัจจุบันใช้เวลาเพียง 15 วินาทีต่อคู่ สาเหตุที่การใช้อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าใช้เวลามากกว่ามากคือ ผู้ทดสอบจะต้องเสียเวลาจัดถุงมือยางให้แนบสนิทกับแม่แบบพอดี อีกทั้งการลากแท่งตัวนำไฟฟ้าให้รอบถุงมือยางก็เสียเวลาพอสมควร สาเหตุสำคัญอีกประการคือเมื่อทดสอบเสียหนึ่งข้างจะต้องทำการคายประจุเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับผู้ทดสอบอีกด้วย

2.ผลการศึกษาวิธีการทางเลือกที่ใช้ในการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์

วิธีการทางเลือกทั้ง 3 วิธีการคือ การใช้ก๊าซนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง การใช้แท่งเหล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในถุงมือยางและการใช้แม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์เคลือบสารนำไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำไปใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมที่จะต้องใช้ในการตรวจสอบถุงมือยางจำนวนมากแล้ววิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่เสียเวลาในการทดสอบมากและเสียค่าใช้จ่ายมากอีกด้วย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมถึงวิธีการทางเลือกอื่นที่เหมาะสมกว่าดังกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อข้อเสนอแนะ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

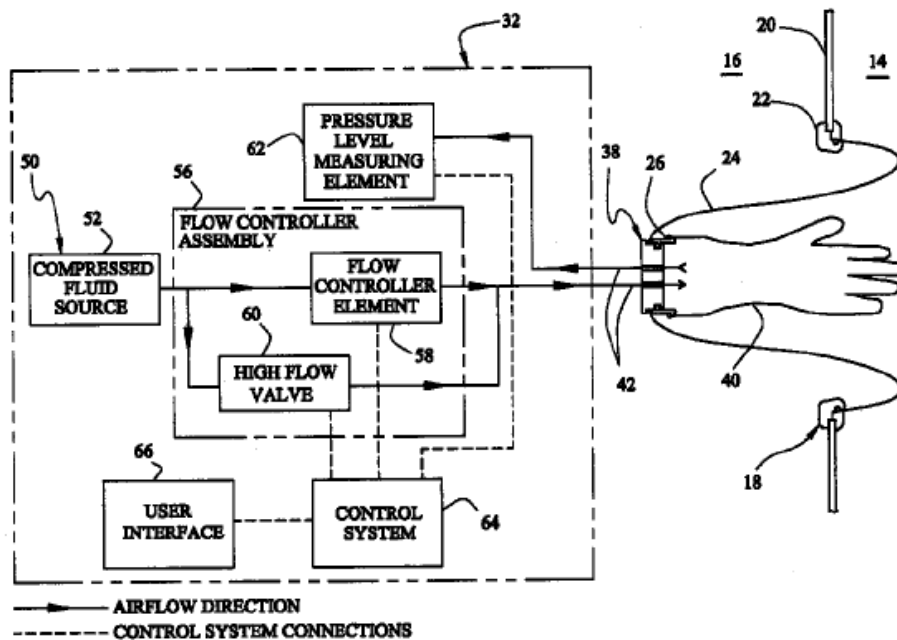
สรุปผล

อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถตรวจสอบรูรั่วได้ด้วยความถูกต้อง 100% โดยมีข้อแม้ว่าจะต้องลากแท่งนำไฟฟ้าไปให้ทั่วถุงมือยางและถุงมือยางจะต้องแนบสนิทกับแม่แบบรูปมือ ในการทดสอบถุงมือยางแต่ละชิ้นเฉลี่ยแล้วใช้เวลา 2 นาที ในทางตรงกันข้ามวิธีการใช้แรงงานคนที่โรงงานใช้อยู่ในปัจจุบันใช้เวลาเพียง 15 วินาทีต่อคู่ สาเหตุที่การใช้อุปกรณ์ตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางโดยอาศัยการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าใช้เวลามากกว่ามากคือ ผู้ทดสอบจะต้องเสียเวลาจัดถุงมือยางให้แนบสนิทกับแม่แบบพอดี อีกทั้งการลากแท่งนำไฟฟ้าให้รอบถุงมือยางก็เสียเวลาพอสมควร สาเหตุสำคัญอีกประการคือเมื่อทดสอบเสียหนึ่งข้างจะต้องทำการคายประจุเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายกับผู้ทดสอบอีกด้วย จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวทั้งนี้คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาวิธีการทางเลือกอื่นซึ่งมีอยู่ 3 วิธีการ ได้ข้อสรุปว่าวิธีการทางเลือกทั้ง 3 วิธีการคือ การใช้ก้านนำไฟฟ้าปล่อยเข้าไปในถุงมือยาง การใช้แท่งเหล็กเจาะรูปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในถุงมือยางและการใช้แม่แบบรูปมือที่ทำมาจากโพลีเมอร์เคลือบสารนำไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำไปใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมที่จะต้องใช้ในการตรวจสอบถุงมือยางจำนวนมากแล้ววิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่เสียเวลาในการทดสอบมากและเสียค่าใช้จ่ายมากอีกด้วย อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยได้พบอีกหนึ่งวิธีข้อเสนอแนะในที่นี้คือสิทธิบัตรในปี 2007 เลขที่ US 7,174,772 B2 ชื่อเรื่อง SYSTEM AND METHOD FOR LEAK DETECTION โดยมีเนื้อหากล่าวถึงการตรวจสอบถุงมือยางโดยใช้วิธีการตรวจสอบความดันแตกต่าง ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะแก้ปัญหาก็พบในงานวิจัยนี้ได้ จากการศึกษาเบื้องต้นนี้คณะผู้วิจัยมีความคาดหวังให้ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางต้นแบบหรือพัฒนาไปสู่แบบอัตโนมัติเพื่อใช้ปฏิบัติงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยมีความเห็นว่าวิธีการตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางทางการแพทย์จากการวิเคราะห์การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านั้นสามารถตรวจสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามหากนำวิธีการนี้มาใช้งานในโรงงานจริงคณะผู้วิจัยเห็นว่ายังมีความไม่เหมาะสมหลายประการ

อีกทั้งเมื่อทำการสืบค้นข้อมูลจากสิทธิบัตรในปี 2007 พบสิทธิบัตรเลขที่ US 7,174,772 B2 ชื่อเรื่อง SYSTEM AND METHOD FOR LEAK DETECTION โดยมีเนื้อหากล่าวถึงการตรวจสอบถุงมือยางโดยใช้วิธีการตรวจสอบความดันแตกต่าง ซึ่งมีแบบจำลองการทำงานดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 แบบจำลองการทำงานเครื่องตรวจสอบรูรั่วของถุงมือยางในสิทธิบัตร

US 7,174,772 B2

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะวิธีการทางเลือกนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการตรวจสอบรูปร่างของถุงมือยางทางการแพทย์ เพื่อนักวิจัยได้ทำการศึกษาต่อไป

อุปสรรคหรือปัญหา

อุปสรรคในการวิจัยเกิดจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงมาก ส่งผลให้ขณะทำการทดสอบเกิดปัญหาบางประการดังนี้

- เกิดการไหม้ขึ้นที่ถุงมือยาง เนื่องจากระบบมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงมากส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าในระบบสูงตามไปด้วย
- เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าภายในแท่งนำไฟฟ้าอาจทำให้เกิดอันตรายได้
- การใส่-ถอดถุงมือยางจากแม่แบบรูปมือทำได้ยาก เนื่องจากรูปร่างของแม่แบบใหญ่กว่าขนาดของถุงมือยาง และที่สำคัญคือที่แม่แบบรูปมือมีกระแสไฟฟ้าค้างในแท่งนำไฟฟ้า

แนวทางในการแก้ไขอุปสรรคหรือปัญหา

แนวทางแก้ไขปัญหาและอุปสรรคของการทดสอบแบบจำลองอุปกรณ์ตรวจสอบรูปร่างของถุงมือยาง มีดังนี้

- การไหม้ของถุงมือยาง แก้ไขโดยปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าให้น้อยลง
- เมื่อทดสอบเสร็จแต่ละครั้งให้นำแท่งนำไฟฟ้าไปสัมผัสกับแม่แบบรูปมือเพื่อเป็นการคายประจุไฟฟ้าออกจากแม่แบบรูปมือ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2530. กระบวนการผลิตยาง: กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง. ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- [2] Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology Limited, United Kingdom.
- [3] M. A. Hassouba, F. F. Elakshar, A. A. Garamoon, A Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol 11 (2002), p 81–90
- [4] US Patent No. 7,174,772 B2, SYSTEM AND METHOD FOR LEAK DETECTION
- [5] <http://www.enersol.com.au>
- [6] K.F. Sander Wokingham, Electric circuit analysis: principles and applications, Addison–Wesley, 1992
- [7] James W. Nilsson, Susan A. Electric circuits, Riedel Upper Saddle, River, N.J., Pearson, Prentice Hall, 2008

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การออกแบบวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

การออกแบบวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

การออกแบบวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงให้มีความเที่ยงตรงและเสถียรมากกว่าวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงต้นแบบซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. 1 ขอบเขตวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

1. รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 Vac 50Hz
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1,400 Vac ซึ่งสามารถแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้
 $V_{dc} = 1.414V_{ac} = 1.414 \times 1,400$ นั่นคือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1,980 Vdc.
3. จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ต่ำสุด (Min) = 0.16 mA
จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด (Max) = 0.35 mA
และสามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0.16 mA – 0.35 mA

ก.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

กรณีที่ 1

จากขอบเขตวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงข้อที่ 2 กำหนดให้วงจรนี้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1,980 Vdc นอกจากนั้นข้อที่ 3 ยังกำหนดให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ต่ำสุด 0.16 mA อีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดจึงนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานดังนี้

จากกฎของโอห์ม

$$R = \frac{V}{I}$$

จะได้

$$R = \frac{1980}{0.16} = 12.375 M\Omega \quad (R_{mzx})$$

อย่างไรก็ตามค่าความต้านทาน 12.375 $M\Omega$ ไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกค่าความต้านทานที่มากกว่าคำนวณนั้นคือ 12.5 $M\Omega$ แล้วนำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดได้ดังนี้

จากกฎของโอห์ม

$$I = \frac{V}{R}$$

จะได้

$$I = \frac{1980}{12.5} = 0.1584 mA$$

จากการคำนวณข้างต้นสรุปว่าวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ต่ำสุด 0.1584 mA

กรณีที่ 2

จากขอบเขตวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงข้อที่ 2 กำหนดให้วงจรนี้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1,980 Vdc นอกจากนั้นข้อที่ 3 ยังกำหนดให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 0.35 mA อีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดจึงนำมาคำนวณค่าความต้านทานดังนี้

จากกฎของโอห์ม

$$R = \frac{V}{I}$$

จะได้

$$R = \frac{1980}{0.35} = 5.657 M\Omega \quad (R_{\min})$$

อย่างไรก็ตามค่าความต้านทาน 5.657 $M\Omega$ ไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกค่าความต้านทานที่น้อยกว่าค่านวนั้นคือ 5.5 $M\Omega$ แล้วนำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ดังนี้

จากกฎของโอห์ม

$$I = \frac{V}{R}$$

จะได้

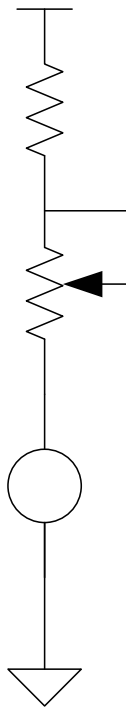
$$I = \frac{1980}{5.5} = 0.396 mA$$

จากการคำนวณข้างต้นสรุปว่าวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 0.396 mA

ก.3 การออกแบบวงจรปรับค่ากระแสไฟฟ้าจากค่าความต้านทานที่คำนวณได้

จากการคำนวณค่าความต้านทานข้างต้นสรุปว่าเพื่อให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่าง 0.1584 mA (ใช้ค่าความต้านทานขนาด 12.5 $M\Omega$) ถึง 0.396 mA (ใช้ค่าความต้านทานขนาด 5.5 $M\Omega$) จะต้องใช้ค่าความต้านทานขนาด 5.5 $M\Omega$ ต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานปรับค่าได้ขนาด 7 $M\Omega$

เหตุที่ใช้ค่าความต้านทานปรับค่าได้ 7 $M\Omega$ เนื่องจากหากปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ไปอยู่ที่ตำแหน่ง 0 $M\Omega$ จะทำให้ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมมีค่าเท่ากับ 5.5 + 0 = 5.5 $M\Omega$ นั่นคือวงจรจะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 0.396 mA ($I_{\max}$) ในทางตรงข้ามหากปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ไปอยู่ที่ตำแหน่ง 7 $M\Omega$ จะทำให้ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมมีค่าเท่ากับ 5.5 + 7 = 12.5 $M\Omega$ นั่นคือวงจรจะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 0.1584 mA ($I_{\min}$) วงจรปรับค่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การออกแบบค่าความต้านทานปรับค่าได้เพื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้า

ในการจัดสร้างวงจรปรับค่ากระแสไฟฟ้านั้นใช้ค่าความต้านทานขนาด $1M\Omega$ $0.25W$ จำนวน 5 ตัวและ $500\ k\Omega$ จำนวน 1 ตัว นำมาต่ออนุกรมซึ่งเมื่อรวมกันแล้วจะได้ค่าความต้านทานขนาด $5.5\ M\Omega$ ในส่วนของค่าความต้านทานปรับค่าได้ $7\ M\Omega$ ถูกออกแบบให้ใช้ค่าความต้านทานปรับค่าได้ขนาด $1M\Omega$ $0.25W$ จำนวน 7 ตัว นำมาต่ออนุกรมซึ่งเมื่อรวมกันแล้วจะได้ค่าความต้านทานปรับค่าได้ขนาด $7\ M\Omega$ ตามตามการคำนวณ

ก.4 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

การคำนวณหาขนาดค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อป้องกันแรงดันกระเพื่อม

ในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงจะต้องเกิดแรงดันกระเพื่อมที่เอาต์พุตของเรกติไฟเออร์ ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไม่เรียบเท่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องมีการใส่ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าไปในวงจรซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ดังนี้

จากสูตรการคำนวณ

$$C = \frac{I_e \cdot \Delta t}{\Delta V_{ripple}}$$

โดยที่ I_e คือ ค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรกติไฟเออร์
 Δt คือ ช่วงเวลาที่ C คายประจุ (มีค่าครึ่งหนึ่งของคาบเวลา)
 ΔV_{ripple} คือ ค่ายอดถึงยอดของแรงดันกระเพื่อมที่เอาต์พุตเรกติไฟเออร์
 (คิดจาก 1% ของ 1,980Vdc)

ดังนั้นสรุปค่าต่างได้ดังนี้คือ $I_e = 0.35\text{mA}$, $\Delta t = 10\text{ms}$ และ $\Delta V_{ripple} = 19.80\text{V}$ ซึ่งแทนค่าในสมการได้ดังนี้

$$C = \frac{0.35\text{mA} \cdot 10\text{ms}}{19.80\text{V}} = 0.1768\mu\text{F}$$

จากการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าควรมีค่ามากกว่า $0.1768\mu\text{F}$ แต่หากใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้ามากเกินไปจะส่งผลให้ตัวความจุไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ซึ่งไดโอดต้องทนกระแสกระชากมากขึ้น (หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่ซาร์จตัวประจุไฟฟ้า) อีกทั้งยังมีราคาแพงอีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด $0.41\mu\text{F}$ ซึ่งเป็นค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดและมีความเหมาะสมกับวงจรเนื่องจากไม่ส่งผลให้เกิดกระแสกระชากที่ไดโอดและมี V_{ripple} ที่น้อยกว่าค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า $0.1768\mu\text{F}$ อีกด้วย ส่วนในการจัดทำวงจรคณะผู้วิจัยได้ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด $0.82\mu\text{F}$ จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน

การคำนวณหาอัตราการทำงานแรงดันตัวเก็บประจุไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วตัวเก็บประจุจะต้องทนแรงดันไฟฟ้าได้อย่างต่ำที่ขนาดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงจุดเอาต์พุตของวงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งในที่นี้คือขนาด 1,980 Vdc อย่างไรก็ตามเพื่อความปลอดภัยในการต่ออนุกรมตัวเก็บประจุไฟฟ้าควรทำการเผื่อค่าไว้ 1.5 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้าตรงจุดเอาต์พุตนั้นคือขนาด 2,970 Vdc ($1980 \times 1.5 = 2,970$ Vdc) เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วตัวเก็บประจุอาจมีแรงดันตกคร่อมไม่เท่ากันก็เป็นได้ สรุปในการจัดทำวงจรคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่า 1,600 Vdc จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกันรวมเป็นขนาด 3,200Vdc

ก.5 การคำนวณหาค่าไดโอดเรกติไฟเออร์ในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไดโอดเรกติไฟเออร์จ่ายให้แก่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในเวลาปกติมีค่ามากกว่านั้นคือ 0.35 mA จึงไม่นำกระแสไฟฟ้านี้มาพิจารณา สรุปในการออกแบบไดโอดเรกติไฟเออร์ในวงจรจะพิจารณาดังนี้

การคำนวณหาค่ากระแสกระชาก I_{FSM}

กระแสกระชากสูงสุดที่ผ่านไดโอดเรกติไฟเออร์จะเกิดขึ้นในขณะที่เปิดเครื่องซึ่งขณะนั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายังไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ ซึ่งค่ากระแสกระชากสูงสุดสามารถคำนวณได้จาก

$$I_{FSM} = \frac{V_{peak}}{R_s + ESR}$$

โดยที่ V_{peak} คือ แรงดันยอดสูงสุดของโวลต์อินพุต
 ESR คือ ความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุค่าต่ำสุดซึ่งน้อยมากมีค่าเป็นมิลลิโอห์มจึงไม่นำมาคำนวณ
 R_s คือ ค่าของตัวต้านทานจำกัดกระแส

ดังนั้นสรุปค่าต่างได้ดังนี้คือ $V_{peak} = 1,980 \text{ Vdc}$, $ESR = 0$ และ $R_s = 50 \text{ } \Omega$ 10W ซึ่งแทนค่าในสมการได้ดังนี้

$$I_{FSM} = \frac{1980}{50 + 0} = 39.6 A_{peak}$$

สรุปได้ว่าไดโอดเรกติไฟเออร์ในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงจะต้องทนกระแสกระชากได้อย่างน้อย $39.6 A_{peak}$

การคำนวณหาอัตราการทำงานแรงดันโวลเทจกลับสูงสุด V_{RRM}

อัตราการทำงานแรงดันโวลเทจกลับสูงสุด V_{RRM} นั้นจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าแรงดันยอดสูงสุดของโวลเทจซึ่งในวงจรนี้มีค่าเท่ากับ $1,980 \text{ Vdc}$ แต่เนื่องจากไม่สามารถหาไดโอดที่มีค่าแรงดันโวลเทจกลับสูงเกินค่า $1,980 \text{ Vdc}$ ได้

ดังนั้นในการออกแบบวงจรจึงใช้หลักการอนุกรมไดโอดเพื่อให้ทนแรงดันโวลเทจกลับได้สูงขึ้น ซึ่งในการออกแบบวงจรได้ทำการเลือกไดโอดเบอร์ 1N5408 ซึ่งคุณลักษณะคือ $I_{F(AV)} = 3 \text{ A}$, $I_{FSM} = 125 A_{peak}$ และ $V_{RRM} = 1000 \text{ Vdc}$ จำนวน 3 ตัวนำมาต่ออนุกรมกันจะได้ $V_{RRM} = 3000 \text{ Vdc}$ ซึ่งมีค่าเกินกำหนดตรงตามความต้องการ

ก.6 การคำนวณหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

การคำนวณหาค่าพิกัดกระแสไฟสลับเอาต์พุตที่จ่ายให้วงจร I_{rms}

หม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงจะต้องทำการคำนวณคำนวณหาค่าพิกัดกระแสไฟสลับเอาต์พุตที่จ่ายให้วงจร I_{rms} ซึ่งมีสมการดังนี้

$$I_{rms} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

โดยที่ I_o คือ ค่ากระแสไฟตรงสูงสุดด้านเอาต์พุต ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.35 mA จะได้

$$I_{rms} = \frac{0.35}{1.414} = 0.2475 \text{ mA}$$

จากการคำนวณสรุปได้ว่ากระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายได้ต้องมากกว่า 0.2475 mA ซึ่งในการออกแบบวงจรได้เลือกใช้ขนาด 100 mA เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดที่มีขนาดต่ำกว่านี้ไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด อีกทั้งจากการออกแบบค่าความต้านทานในหัวข้อ ก.2 ได้มีการจำกัดกระแสไฟฟ้าให้มีขนาดไม่เกิน 0.396 mA ที่ความต้านทาน $5.5 \text{ M}\Omega$ อยู่แล้ว ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงไม่จำเป็นต้องจำกัดกระแสไฟฟ้า

การคำนวณหาค่าพิกัดแรงดันไฟสลับเอาต์พุตของหม้อแปลง V_{rms}

หม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงจะต้องทำการคำนวณหาค่าพิกัดแรงดันไฟสลับเอาต์พุตของหม้อแปลง V_{rms} ซึ่งมีสมการดังนี้

$$V_{rms} = \frac{V_o}{\sqrt{2}}$$

โดยที่ V_{rms} คือ ค่าแรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุต ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1,980 Vdc จะได้

$$V_{rms} = \frac{1980}{1.414} = 1400Vac$$

จากการคำนวณสรุปได้ว่าการออกแบบวงจรควรเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 220Vac : 1400Vac 100mA และเป็นแบบแยกกราวด์ทางไฟฟ้าระหว่างขดไฟมารีกับขดเซคคันดารี เพื่อให้มีความปลอดภัยกับผู้ใช้งานเครื่อง

ก.7 การคำนวณฟิวส์ในวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

การคำนวณหาตัวอัตราทนแรงดัน

ฟิวส์มาตรฐานสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีอัตราการทนแรงดันได้ตามลำดับดังนี้คือ 32, 60, 125, 250, 300, 500, 600, 700 โวลต์ การกำหนดใช้ตัวอัตราทนแรงดันของฟิวส์ที่จะใช้ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันของวงจรเพื่อลดการอาร์กในตัวฟิวส์ขณะตัววงจร ถ้าอัตราการทนแรงดันต่ำเกินไป การเกิดการอาร์กตัวฟิวส์อาจเป็นไปอย่างรุนแรงและตัวฟิวส์จะแตกออกได้ ซึ่งเสี่ยงต่อการลัดไฟได้ ซึ่งในทางปฏิบัติต้องมีกระบอกฟิวส์สำหรับใส่ฟิวส์ด้วย ซึ่งในการออกแบบวงจรได้เลือกตัวอัตราทนแรงดันของฟิวส์ เป็น 250V เพราะใช้กับไฟ 220V

การคำนวณหาตัวอัตราทนกระแส

ตัวอัตราทนกระแสของฟิวส์สามารถกำหนดได้จากค่ากระแสอาร์เอ็มเอสด้านแรงดันไฟมารีของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งหาได้จาก

$$I_p = \frac{V_s I_s}{V_p}$$

โดยที่	I_p	คือ ค่ากระแสของขดไฟมารีของหม้อแปลง หน่วยเป็น RMS
	I_s	คือ ค่ากระแสของขดเซคคันดารีของหม้อแปลง หน่วยเป็น RMS (0.35mA)
	V_p	คือ ค่าแรงดันของขดไฟมารีของหม้อแปลง หน่วยเป็น RMS (220Vac)
	V_s	คือ ค่าแรงดันของขดเซคคันดารีของหม้อแปลง หน่วยเป็น RMS (1000Vac)

ดังนั้น สรุปค่าต่างได้ดังนี้คือ $I_s = 0.35 \text{ mA}$, $V_p = 220 \text{ Vac}$ และ $V_s = 1000 \text{ Vac}$ ซึ่งแทนค่าในสมการได้ดังนี้

$$I_p = \frac{1400Vac \cdot 0.35mA}{220Vac} = 2.227mA$$

ฟิวส์ที่มีตัวอัตราทนกระแสเท่ากับ 2.227 mA นั้นไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดเนื่องจากเป็นค่าที่น้อยมาก ซึ่งค่าน้อยที่สุดที่สามารถหาซื้อได้คือ 500 mA เป็นชนิดขาดเร็วปานกลางซึ่งเหมาะกับงานที่มีการกระชากของกระแสไฟฟ้าเมื่อเปิดครั้งแรก หากนำค่าฟิวส์นี้มาคำนวณหาตัวอัตราทนกระแส I_s จะได้

$$I_s = \frac{220Vac \cdot 500mA}{1400Vac} = 78.57mA$$

จากการคำนวณค่ากระแสของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงจะได้เท่ากับ 78.57 mA ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีความเสียหายกับหม้อแปลงไฟฟ้าและไดโอดเรกติไฟเออร์ ดังนั้นในการออกแบบวงจรจึงเลือกฟิวส์ที่มีอัตราการทนกระแสเท่ากับ 500 mA หรือ 0.5 A

สรุปข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะร่างรายงานของโครงการ

“การตรวจสอบรับรู้ของถูงมือยงทางการแพทยดวยวิธีการตรวจสอบการรัวไหลของประจุไฟฟ้า” ดร.คุณยุต เอี่ยมสอาด หัวหน้าโครงการ

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ
1. ตรวจสอบการพิมพ์ มีพิมพ์ผิดหลายแห่ง เช่น • ตารางที่ 10.1 ในช่องความยาวต่ำสุด เครื่องหมาย □ หน้าเลข 80 และเลข 110 หมายความว่าอะไร • หน้า 12 ข้อ 10.2 บรรทัดแรกที่นักวิจัยเขียน “,u” นั้นหมายถึงอะไร • หน้า 15 หัวข้อ 10.4 บรรทัดที่ 6 คำว่า “ไปชนะตอม” แก้ไขเป็น “ไปชนะตอม” • คำอธิบายรูปที่ 10.7 หน้า 16 พิมพ์ผิด • หน้า 18 บรรทัดสุดท้าย ในวงเล็บให้เขียนเป็นภาษาไทย • หน้า 41 บรรทัดที่ 3 ตรวจสอบความถูกต้องที่นักวิจัยกล่าวว่า “เหล็กลำไฟฟ้าได้ดี” ที่ถูกต้องคืออลูมิเนียมหรือไม่ • คำอธิบายรูปที่ 10.1 ตำแหน่งที่วัดความกว้างและความยาว ควรย้ายไปอยู่ในหน้าเดียวกับรูป • ตารางที่ 11.3 หน้า 52 column ที่ 2 เพิ่มคำว่า “รวม” หน้าคำว่า “36 ข้างของการตรวจซ้ำ” • หน้า 45, หน้า 55 และหน้า 56 มีพิมพ์ผิด	• คณะผู้วิจัยได้แก้ไขเครื่องหมาย □ เป็นเครื่องหมาย ± เป็นที่เรียบร้อยแล้ว • คณะผู้วิจัยได้แก้ไขคำว่า ,u เป็นคำว่า “มี” เป็นที่เรียบร้อยแล้ว • คณะผู้วิจัยได้แก้ไขคำว่า “ไปชนะตอม” เป็น “ไปชนะตอม” แล้ว • คณะผู้วิจัยได้แก้ไขคำว่า “อาการ” เป็น “อากาศ” เป็นที่เรียบร้อยแล้ว • คณะผู้วิจัยได้ตัดประโยคในวงเล็บออกเนื่องจากมีความหมายเหมือนภาษาไทย • คณะผู้วิจัยยืนยันคำว่า “เหล็กลำไฟฟ้าได้ดี” ถูกต้องแล้ว • คณะผู้วิจัยได้ย้ายตามข้อเสนอแนะเป็นที่เรียบร้อยแล้ว • คณะผู้วิจัยได้เพิ่มคำว่า .รวม” เรียบร้อยแล้ว • คณะผู้วิจัยได้ตรวจทานและแก้ไขเรียบร้อยแล้ว
2. บทคัดย่อ หน้า 6 ปรับการเขียนประโยคในบรรทัดที่ 4 “นำแท่งนำไฟฟ้ามาต่ออนุกรมอุปกรณ์แปรจากกระแสไฟฟ้าต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานและอนุกรมกับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง” อ่านแล้วไม่เข้าใจ	• ได้ดำเนินการแล้วในบทคัดย่อ

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ
3. ในงานนี้นักวิจัยทำได้ครบตามวัตถุประสงค์ที่เขียนว่า “ต้องการศึกษาความเป็นไปได้” ส่วน output ยังไม่ได้ ซึ่งนักวิจัยยังขาดการยกระดับความรู้ด้วยการพัฒนางานให้ดีขึ้น	คณะผู้วิจัยเห็นว่างานวิจัยนี้ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์แล้ว นั่นคือวิธีการในงานวิจัยนี้ใช้ได้มีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้นคณะผู้วิจัยควรจะทำงานวิจัยต่อในวิธีอื่น เช่น ระบบการใส่ถุงมืออย่างเข้าแม่พิมพ์ที่รวดเร็ว วงจรในการอ่านค่าการไหลของกระแสที่มีความละเอียดและตอบสนองเร็ว ดังนั้นงานวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยนี้จึงจะเห็นผลลัพธ์ในการพัฒนางานให้ดีขึ้นอย่างชัดเจนในการตรวจสอบแบบอัตโนมัติ
4. การเขียนรายงานวิจัยเป็นแบบการเล่าตามกิจกรรมที่ทำ ควรเขียนเล่าตามประเด็นของความรู้ทำให้เข้าใจยาก รู้แต่จะทำอะไร นักวิจัยควรเพิ่มเติมการอธิบายผลที่เป็นวิชาการ	เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงแนวคิดในการค้นหาวิธีการตรวจสอบรูรั่วซึ่งในงานวิจัยนี้คิดไว้ถึง 4 วิธีการ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้คือความเป็นไปได้ในวิธีการเหล่านี้ ข้อมูลทางวิชาการจะเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยนี้
5. บางหน้าใช้รูปซ้ำเดิม เช่น หน้า 13-14 และหน้า 46-47 ควรใช้การ refer กันก็ได้ ไม่ต้องใช้รูปซ้ำๆ กัน	คณะผู้วิจัยได้แก้ไขโดยตัดรูปที่ซ้ำกันออกและใช้วิธีอ้างอิงที่มีอยู่แล้ว
6. หน้า 25 ข้อ 11.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าของเครื่องตรวจสอบการรั่วไหลกระแสไฟฟ้า ในทางปฏิบัติจะคุม gap ได้อย่างไร	ในงานวิจัยนี้ในทางปฏิบัติ การควบคุม Gap จะยังคงใช้ประสบการณ์จากการทดสอบหลายๆ ครั้ง แล้วนำมาทดสอบเพื่อวัดผล ไม่มีระบบ sensor หรือการควบคุมใดในการตรวจจับทางตรง ซึ่งจากการทดลองก็เกือบจะสัมผัสกับตัวชิ้นงาน
7. หน้า 44 ตารางที่ 11.2 เมื่อสวมจนตึงแล้วรูน่าจะใหญ่จนหาขนาดรูใหม่ได้แบบเดียวกับขนาดรูที่ถูกเข็มเจาะใน column ที่ 2	คณะผู้วิจัยได้อธิบายเพิ่มเติมในหน้าที่ 35 รียบร้อยแล้ว
8. เพิ่มเติมข้อมูลเชิงปริมาณในการสรุปผลแต่ละประเด็น และการสรุปขาดการใช้ข้อมูลอธิบาย เช่น หน้า 57 นักวิจัยสรุปได้ว่าสามารถตรวจสอบได้ถูกต้อง 100% แต่ข้อมูลที่มีเปลี่ยนแปลงตามขนาดรู ควรเพิ่มการสรุปผลความรู้ใหม่ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ด้วย	เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบรูรั่วซึ่งในงานวิจัยนี้มี 4 วิธีการ ผลสรุปอย่างง่ายคือทั้ง 4 วิธีไม่มีความเหมาะสมในเชิง

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ
	ปฏิบัติ โดยในส่วนของการทดลองในห้องปฏิบัติการชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มในการนำองค์ความรู้ใหม่นี้ไปพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ในภาคสนาม และคณะวิจัยได้สรุปผลขององค์ความรู้หลัก คือ การใช้ปรากฏการณ์ของการไหลของกระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบ ในรายงานแล้ว
9. การคำนวณควรยกไปไว้ในภาคผนวก เพราะไม่ใช่ความรู้ใหม่	คณะผู้วิจัยได้ย้ายการคำนวณไปไว้ในภาคผนวก ก. เรียบร้อยแล้ว
10. นักวิจัยได้ใช้ความพยายามตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำ งานที่ได้คือองค์ความรู้ แต่ยังไม่สามารถ apply ได้จริง มีเงื่อนไขอื่นอีกมากที่ทำให้งานใช้จริงยาก	เพราะงานวิจัยนี้ ผลการทดสอบเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้ผลของงานที่ได้เป็นองค์ความรู้และแนวโน้มของวิธีนี้ที่จะประสบความสำเร็จในการพัฒนาในภาคสนามต่อไป
11. จะทำให้งานใช้ได้เชิงอุตสาหกรรม ต้องรวดเร็วและประหยัด แต่ถ้าเป็นเพียงการตรวจสอบในงาน QA ก็อาจจะพอใช้ได้	ระบบที่วิจัยนี้ให้ผลการวัดที่แม่นยำกว่าวิธีเดิม แต่มีข้อจำกัดในด้านของเวลาในการวัด ดังนั้นอาจจะสามารถใช้วัดเพื่อเป็นเครื่องมือในการ confirm การวัดของแบบเก่าก็ได้ เช่น การวัด confirm ในห้องวัดของ QA หรือการใช้วัด confirm ผลเทียบกับชิ้นที่ลูกค้า reject ว่าตรงกันหรือไม่
12. นักวิจัยได้เปลี่ยนแปลงวิธีการวิจัยใหม่ การใช้แม่พิมพ์โลหะเป็นแนวทางที่ใกล้เคียงในการวิจัย แต่ควรเพิ่มเติมขนาดของแม่พิมพ์ของแต่ละ size ถู่มือเพื่อการทดสอบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น	ในส่วนนี้คงต้องเป็นการวิจัยในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการตรวจสอบนี้
13. เพิ่มเติม	คณะผู้วิจัยได้แก้ไขข้อมูลสำคัญเพิ่มเติมในหัวข้อ 11.6.2 หน้า 35 ย่อหน้าสุดท้าย กล่าวถึง “ขนาดรูเฉลี่ยอยู่ที่ 527 ไมครอน” แก้ไขเป็น “ขนาดรูเฉลี่ยอยู่ที่ 1527 ไมครอน” เนื่องจากมีความผิดพลาดในการกรอกข้อมูล