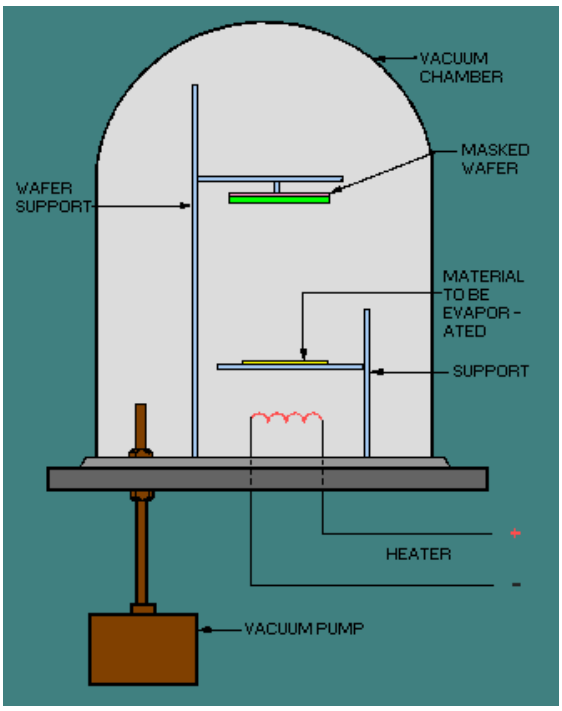
บทที่ 3
การออกแบบและกระบวนการสร้างฟิล์มบาง

การระเหยนั้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการสองขั้นพื้นฐานอันได้แก่ แหล่งวัสดุร้อนที่มีการระเหย และ การควบแน่นที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นกระบวนการที่คล้ายกับกระบวนการของของเหลวที่เป็น น้ำ ที่ได้ระเหยปรากฏอยู่บนฝาหม้อต้มของ โดยที่การระเหยจะเกิดขึ้นที่สภาวะสูญญากาศในสภาพประกอบแวดล้อมที่เป็นก๊าซที่มีความร้อนแตกต่างกัน ซึ่งในส่วนของการระเหยที่กำเนิดจากวัสดุที่ต้องการให้ถูกระเหยออกไปนั้นจะถูกควบคุมด้วยกระบวนภายใต้ระบบสูญญากาศสูง (ที่ปราศจากการปั่นเปื้นของวัสดุอื่น) โดยการระเหยของอนุภาคสามารถเดินทางได้โดยตรงไปยังเป้าหมายที่จะกำหนดเพื่อให้เกิดการสะสมของสารระเหย โดยไม่เกิดการแทรกสอดกับก๊าซชนิดอื่น (ตัวอย่างเช่น ภายในหมอต้มความดันไอน้ำจะดันอากาศ ออกจากหม้อก่อนที่จะสามารถเข้าถึงฝา) ที่ความดันปกติของ $10^{-4}\,Pa$ อนุภาคที่มีการระเหยนี้จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.4 นาโนเมตร ด้วยการใช้วัตถุที่เป็นแหล่งความร้อนในห้องระเหยเช่นความร้อนจากใส้ความร้อน (filaments) พบว่าอะตอมที่ระเหยจะที่เกิดการชนกับอนุภาคต่างๆ ซึ่งอาจทำปฏิกิริยากับ สสารของอนุภาคธาตุชนิดอื่นได้ เช่นถ้า อลูมิเนียม จะเกิดปฏิกริยากับกาซออกซิเจนก็จะกลายเป็นสารประกอบของสารอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เกิดจากการระเหยที่ไม่พึงประสงค์จากกาซของสารเจือปนที่เป็นการจำกัดคุณภาพประกอบของการระเหยที่ในสภาพประกอบของสูญญากาศ นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณของไอระเหยที่จะไปสะสมยังส่วนของพื้นผิวที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้ยากต่อการการควบคุมความหนาดังนั้นการระเหยของวัสดุจะเกิดการไม่สม่ำเสมอ (nonuniformly) หรือทำให้พื้นผิวนั้นมีพื้นผิวที่ขรุขระ เนื่องจากวัสดุที่ได้รับความร้อนพบว่าที่การระเหยนั้นอนุภาคของธาตุโดยส่วนใหญ่จะมีพุ่งไปตกกระทบยังส่วนของพื้นผิวเป้าหมายที่ต้องการจากทิศทางเดียว แต่กระนั้นยังมีลักษณะบางอย่างที่มีการปิดกันทิศทางการเคลื่อนที่ของการพุ่งเข้าสู่เป้าหมายจากสารระเหยในบางพื้นที่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า"แชโดว์"หรือ"ขั้นตอนการปกคลุม เมื่อการระเหยที่ดำเนินการภายใต้สภาวะในสูญญากาศที่ไม่ดีหรือใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ จะก่อให้เกิดการสะสมจากการปกคลุมของธาตุชนิดอื่นไปทั่วก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสารที่ระเหยตลอดทั่วทั้งพื้นผิว และมีแนวโน้มที่จะไม่เป็นฟิล์มอย่างต่อเนื่องหรือไม่ราบเรียบตลอดทั่วพื้นผิวที่ต้องการ ดังนั้นการสะสมของสารที่ต้องการเคลือบ แต่การสะสมจะปรากฏเป็นฝอย ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างกวัสดุอัจฉริยะอิเล็กโทรโครมิค ด้วยการสร้างฟิล์มระเหยของสารประกอบทังสเตนออกไซด์ลงบนกระจกที่มีขั้วโลหะโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์

ที่สภาพสูญญากาศด้วยการสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มสูญญากาศที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าและแหล่งจ่ายกระแส และการออกแบบส่วนประกอบของส่วนต่อเชื่อม และอุปกรณ์วัดความดัน ซึ่งมีส่วนต่างที่สำคัญดั้งต่อไปนี้ คือ 1)หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องเคลือบฟิล์มสูญญากาศ 2) บรรยากาศแบบสูญญากาศ 3) ส่วนประกอบของถังสูญญากาศ 4) การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องเคลือบฟิล์มสูญญากาศ

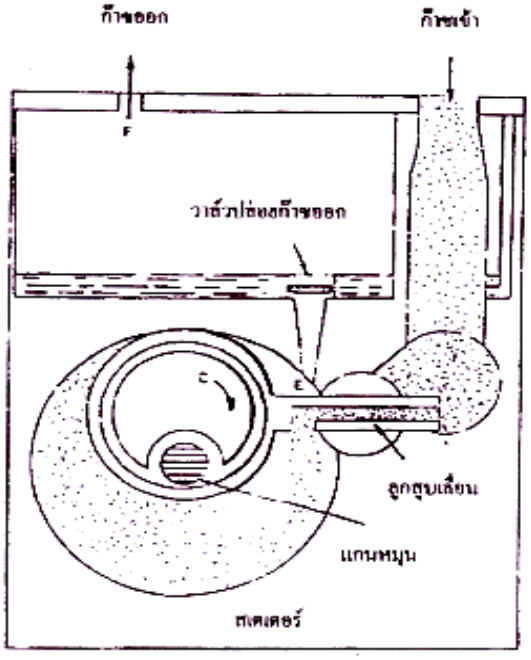
การเคลือบฟิลม์ของสารประกอบออกไซด์ให้ระเหยในสูญญากาศ ซึ่งเป็นการเคลือบโลหะสารประกอบออกไซด์ในห้องเคลือบระบบปิดที่มีสภาวะสูญญากาศ โดยให้ความร้อนแก่โลหะจนกลายเป็นไอ เพื่อให้ไอสารประกอบโลหะออกไซด์นั้นลอยฟุ้งไปติดผิวแผ่นฟิล์มซึ่งมีพื้นผิวที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (เนื่องจากมีการควบคุมความเย็นของแผ่นฟิล์ม) วิธีเคลือบสารประกอบโลหะแบบนี้มีจุดเด่นคือ กระบวนการเคลือบไม่ซับซ้อน ราคาถูก สามารถเคลือบฟิล์มพลาสติกได้เร็ว แต่จุดด้อยคือได้ชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่หนา และอนุภาคสารประกอบโลหะที่เคลือบบนเนื้อฟิล์มมีขนาดใหญ่ ทำให้ฟิล์มที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นสีเงินขาว ซึ่งสะท้อนแสงได้มาก นอกจากนี้จุดด้อยอีกอย่างคือการเคลือบในสูญญากาศสามารถใช้ได้กับโลหะบางชนิดเท่านั้นเช่นอะลูมิเนียมเป็นต้น โดยที่ระบบการระเหยใด ๆ จำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมระบบการทำสุญญูกาศที่รวมถึง ปั๊มสูญญากาศ ที่ต้องออกแบบให้มีความสามารถลดความดันไปจากที่ความดัน $10^{-4}\,Pa$ นอกจากนี้ยังมีแหล่งพลังงานที่ใช้ในการระเหยวัสดุที่จะตกกระทบยังพื้นผิววัสดุที่ต้องการเคลือบ โดยต้องสามารถจ่ายกำลังงานที่มากพียงพอโดยปกติจะต้องใช้แหล่งจ่ายกระแสที่มีกระแสสูง แรงดันต่ำ ในกระการให้ความร้อนจะเป็นการทำให้ลวดโลหะแบบความต้านทานที่ทำจากทังสเตน โมลิบดีนัม หรือ เซรามิก ที่มีการทนอุณหภูมิที่สูง ซึ่งเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่เหมาะสม ในช่วงแรกจะเป็นการเริ่มต้นการอุ่นใส้ความร้อนในที่เป็นแบบ semimetal ที่เรียกว่า"Boat" หรือภาชนะที่ใส่สารที่ต้องการระเหย"เนื่องจากการออกแบบรูปร่างให้เหมือนกับเรือ ซึ่งเมื่อใส้ความร้อนได้รับพลังงานไฟฟ้าแล้วสารประกอบออกไซด์ที่บบรจุอยู่ภายในจะเกิดการระเหย ในรูปแบบการละลายภายในช่อง บรรจุและระเหยเหมือนกับกลุ่มควัน หรือเมฆขึ้นสู่ด้านบนดังที่กล่าวมาข้างต้น หรืออาจจะวัสดุที่มาวางอยู่ใน เบ้าหลอมโลหะดังแสดงในภาพประกอบ 28 ซึ่งมีการแพร่รังสีความร้อนออกเป็น radiatively ที่มีอุณหภูมิที่สูงมากเหมือนกับ ไส้หลอดไฟฟ้า หรือจะใช้วัสดุโลหะที่ต้องการระเหยแขวนไว้ จากไส้หลอดดังนั้นเมื่อใส้หลอดได้รับความร้อนการระเหย ก็จะเกิดขึ้นไปติดยังระนาบของพื้นผิวที่ต้องการเคลือบโดยอาศัยกลไกลในการควบคุมไอระเหยด้วยการใช้แผ่นปิดกัน Shutter เพื่อลดการเกิด shadow หรือจะใช้วิธีการหมุนส่วนของพื้นผิวที่ต้องการเคลือบพร้อมกันเพื่อลดแชว์โดว์



ภาพประกอบ 28 โครงสร้างของเครื่องเคลือบฟิลม์สูญญากาศ

บรรยากาศแบบสูญญากาศ

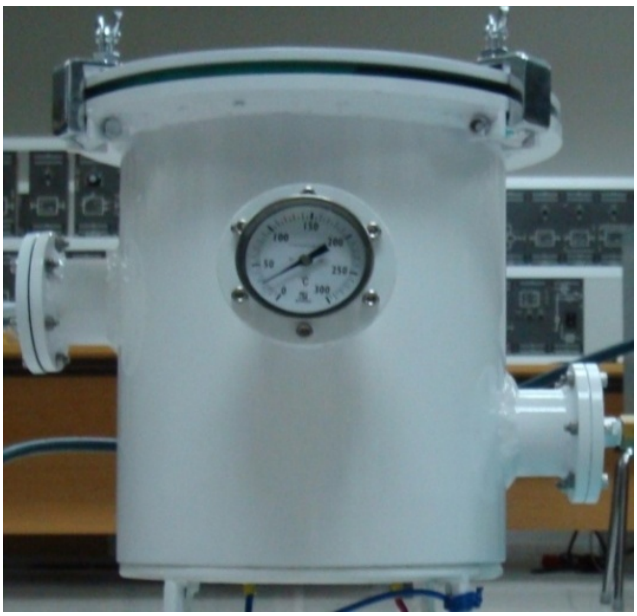
การควบคุมบรรยากาศภายในตัวถังที่เป็นสูญญากาศจัดเป็นการเคลือบฟิล์มที่ดีที่สุด ผลของการเคลือบฟิล์มจะปลอดจากออกไซด์ และการสูญเสียคาร์บอน ข้อเสียของการควบคุมบรรยากาศให้เป็นสูญญากาศมีอยู่ประการเดียวคือ อุปกรณ์ของตัวถัง และอุปกรณ์ควบคุมที่มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสูญญากาศ จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการใช้ชิ้นงานที่มีคุณภาพประกอบสูง อุปกรณ์ที่สำคัญของเครื่องเคลือบฟิล์มโลหะออกไซด์ด้วยระบบสูญญากาศจะประกอบด้วยตัวถังซึ่ง จะใช้ระบบให้ความร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้า (Heating Element) ตัวถังจะมีท่อดูดอากาศต่ออยู่ติดกับปั๊มดูดสูญญากาศแบบปั๊มกลโรตารี (Mechanic Pump) เป็นปั๊มสูญญากาศที่สามารถสร้างสูญญากาศได้ไม่ต่ำกว่า 10^{-3} torr หลักการอย่างง่ายๆคือ ก๊าซหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวกับลูกสูบ ทำให้ก๊าซในห้องสูบมีความดันเพิ่มขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอกก๊าซจะถูกขับออกมาดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 แสดงการทำงานของปั๊มกลโรตารีแบบลูกสูบ

ส่วนประกอบของถังสูญญากาศ

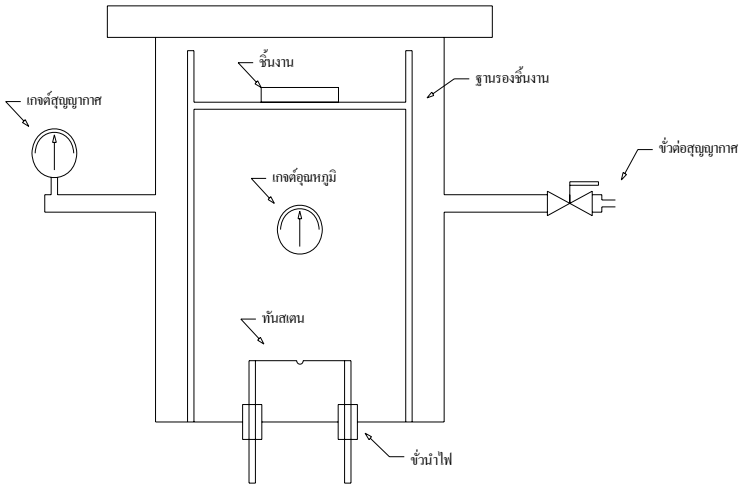
ตัวถังเป็นส่วนประกอบหลักโดยการนำท่ออลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอก 10 นิ้ว ด้านใน 9 นิ้ว สูง 13 นิ้ว ทำเป็นผนังด้านข้าง และนำแผ่นอลูมิเนียมมากลึงเป็นทรงกลมนำมาเชื่อมเพื่อทำแป้นยึดน๊อตด้านบนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 นิ้ว เชื่อมปิดท้ายและได้เจาะตัวถังเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพประกอบ 30 ส่วนของฝาปิดเป็นการนำแผ่นกระจกทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 นิ้ว หนา 0.5 นิ้ว ซึ่งเป็นกระจกทนความร้อนสูงดังภาพประกอบ 31 และส่วนภายในตัวถังเป็นการแสดงโครงสร้างภายในของตัวถังโดยมีเสาและมีถาดรองเพื่อวางชิ้นงานไว้ด้านบนเมื่อสารแตกตัวเข้ามาเกาะบนชิ้นงานดังภาพประกอบ 32 และ 33



ภาพประกอบ 30 แสดงด้านข้างของชิ้นงาน

ภาพประกอบ 31 แสดงฝาปิดด้านบน

ภาพประกอบ 32 โครงสร้างภายในของตัวถัง



ภาพประกอบ 33 แสดงการวางชิ้นงานภายในถัง

จุดต่อเครื่องวัดความดัน เพื่อใช้ในการประกอบต่อเชื่อมอุปกรณ์เครื่องวัดความดับแบบ ย rinary gauge เมื่อปั๊มสูญญากาศได้ดูดอากาศออกจากภายในถังจะทำให้ภายในถังสูญญากาศ มีความดันที่ลดต่ำลงซึ่งจะแสดงค่าความดันด้วยเกจวัดความดัน เมื่อทำการดูดอากาศออกในขณะกำลังปฏิบัติการทดสอบ รวมทั้งอุปกรณ์ดูดอากาศออกจากถังภาชนะที่ทำการเชื่อมด้วยเครื่องดูดอากาศออกจากในถังให้เป็นสูญญากาศดังภาพประกอบ 34 แสดงการต่อเครื่องดูดอากาศ

ภาพประกอบ 34 แสดงการต่อเครื่องดูดอากาศ

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ จากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งโดยวิธีทางวงจรแม่เหล็ก ซึ่งไม่มีจุดต่อไฟฟ้าถึงกันและไม่มีชิ้นส่วนทางกลเคลื่อนที่ โดยทั่วไปเราใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยมีความถี่ไฟฟ้าคงเดิม

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าหม้อแปลงแบ่งออกตามการใช้งานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ 2 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้า ชนิด 3 เฟสแต่ละชนิดมีโครงสร้างสำคัญประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. ขดลวดตัวนำปฐมภูมิ (Primary Winding) ทำหน้าที่รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า
2. ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทำหน้าที่จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า
3. แผ่นแกนเหล็ก (Core) ทำหน้าที่เป็นทางเดินสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและให้ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก
4. ขั้วต่อสายไฟ (Terminal) ทำหน้าที่เป็นจุดต่อสายไฟกับขดลวด
5. แผ่นป้าย (Name Plate) ทำหน้าที่บอกรายละเอียดประจำตัวหม้อแปลง
6. อุปกรณ์ระบายความร้อน (Coolant) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับขดลวด เช่น อากาศ พัดลม น้ำมัน หรือใช้ ทั้งพัดลมและน้ำมันช่วยระบายความร้อน เป็นต้น

7. โครง (Frame) หรือตัวถังของหม้อแปลง (Tank) ทำหน้าที่บรรจุขดลวด แกนเหล็ก รวมทั้งการติดตั้งระบบระบาย ความร้อนให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่
8. สวิตช์และอุปกรณ์ควบคุม (Switch Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และมี อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย

ขดลวด (Coil) วัสดุที่ใช้ทำขดลวดหม้อแปลงโดยทั่วไปทำมาจากสายทองแดงเคลือบน้ำยาฉนวน มีขนาดและลักษณะลวดเป็นทรงกลมหรือแบนขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงลวดเส้นโตจะมีความสามารถในการจ่ายกระแสได้มากกว่าลวดเส้นเล็ก หม้อแปลงขนาดใหญ่มักใช้ลวดถักแบบตีเกลียว เพื่อเพิ่มพื้นที่สายตัวนำให้มีทางเดินของกระแสไฟมากขึ้น สายตัวนำที่ใช้พันขดลวดบนแกนเหล็กทั้งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอาจมีแทปแยก (Tap) เพื่อแบ่งขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ในหม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้การเปลี่ยนแทปด้วยสวิตช์อัตโนมัติ)

ฉนวน (Insulator) สายทองแดงจะต้องผ่านการเคลือบน้ำยาฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดลัดวงจรถึงกันได้ การพันขดลวดบนแกนเหล็ก จึงควรมีกระดาษอาบน้ำยาฉนวนคั่นระหว่างชั้นของขดลวดและคั่นแยกระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิด้วย ในหม้อแปลงขนาดใหญ่มักใช้กระดาษอาบน้ำยาฉนวนพันรอบสายตัวนำก่อนพันเป็นขดลวดลงบนแกนเหล็ก นอกจากนี้ยังใช้น้ำมันชนิดที่เป็นฉนวนและระบายความร้อนให้กับขดลวดอีกด้วย

แกนเหล็ก (Core) แผ่นเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงจะมีส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเพื่อรักษาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบขดลวด แผ่นเหล็กแต่ละชั้นเป็นแผ่นเหล็กบางเรียงต่อกันหลายชิ้นทำให้มีความต้านทานสูงและช่วยลดการสูญเสียบนแกนเหล็กที่ส่งผลให้เกิดความร้อนหรือที่เรียกว่ากระแสไหลวนบนแกนเหล็กโดยทำแผ่นเหล็กให้เป็นแผ่นบางหลายแผ่นเรียงซ้อนประกอบขึ้นเป็นแกนเหล็กของหม้อแปลง ซึ่งมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น แผ่นเหล็กแบบ Core และแบบ Shell

แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core) เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของแม่เหล็กทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าเหล็กและมีความต้านทานสูง จึงช่วยลดการสูญเสียบนแกนเหล็ก หรือลดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนที่ความถี่สูง

แกนอากาศ (Air Core) นอกจากนี้ยังใช้ขดลวดแกนอากาศกับงานในระบบที่ใช้ความถี่สูงโดยไม่ต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กมีการอิ่มตัวหรือการสูญเสียเกิดขึ้นที่แกนเหล็ก

แกนทอลอยด์ (Toroidal Core) มีลักษณะคล้ายวงแหวนทำมาจากโลหะผสมสารกึ่งตัวนำ-ซิลิกอน หม้อแปลงแกน ทอลอยด์มีประสิทธิภาพประกอบสูง (95 %) เพราะแกนทอลอยด์มีสภาพประกอบความนำแม่เหล็กสูง อีกทั้งยังไม่มีช่องรอยต่อเหมือนแกนเหล็กแบบ Core และแบบ Shell จึงช่วยลดการเกิดเสียงรบกวนได้ในขณะทำงาน

ขั้วต่อสายไฟ (Terminal) โดยทั่วไปหม้อแปลงขนาดเล็กจะใช้ขั้วต่อไฟฟ้าต่อเข้าระหว่างปลายขดลวดกับสายไฟฟ้าภายนอกและถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้แผ่นทองแดง(BusBar) และบูชชิ่งกระเบื้องเคลือบ (Ceramic) ต่อเข้าระหว่างปลายขดลวดกับสายไฟฟ้าภายนอก

ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงแบบลดแรงดัน (Step down)

การสร้างหม้อแปลงแบบลดแรงดัน (Step down) นั้น เป็นการสร้างให้มีแรงดันด้านออก 4.5 โวลต์ แต่ต้องการกระแสสูงถึง 140 แอมป์ ซึ่งมีลำดับการทำงานดังนี้

1. นำค่าต่างๆของหม้อแปลงที่ได้คำนวณออกแบบไว้ มาใช้
2. จัดหาอุปกรณ์ที่จะใช้ในการสร้างหม้อแปลง
3. ทำการพันหม้อแปลง

การคำนวณค่าต่างๆได้มีการคำนวณไว้แล้วในบทที่ 3โดยมีค่าดังต่อไปนี้ขนาดแกนเหล็กตัว E ตัว I = 3×2 ตารางนิ้ว

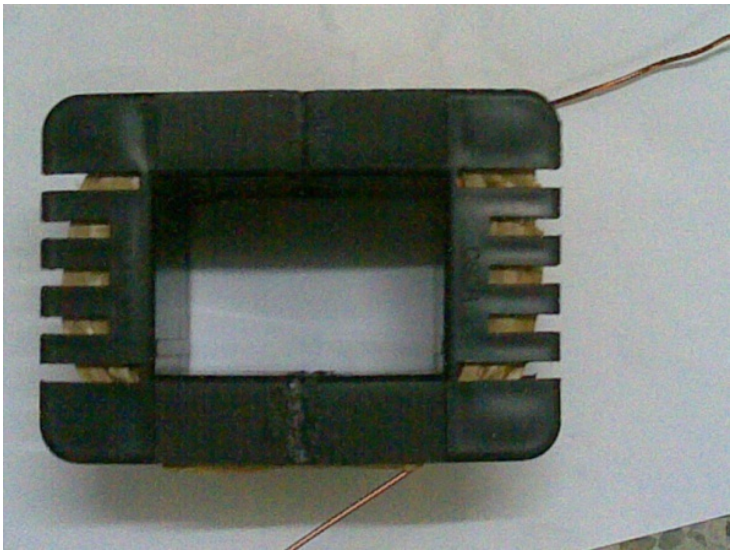
จำนวนรอบปฐมภูมิ N1= 330 รอบ (19 S.W.G)

จำนวนรอบทุติยภูมิ N2= 7.66 รอบ (ใช้แผ่นทองแดงที่ความหนา 0.1 mm กว้าง 75 mm)

กระแส I1= 3A

กระแส I2= 140A

ในการจัดซื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำหม้อแปลงแบบ Step down นั้น อุปกรณ์ที่ซื้อก็มีลวดทองแดง แกนหม้อแปลง บ๊อบปิ้น แผ่นทองแดง เป็นต้นสำหรับแผ่นทองแดงนี้นำมาใช้ ในการพันหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ แทนลวดทองแดงเพราะต้องใช้กระแสสูงมากถ้าใช้ลวดทองแดงต้องใช้เส้นใหญ่มากลำบากต่อการพัน โดยบ๊อบปิ้นขนาด 2×3 ตารางนิ้วในท้องตลาดไม่มี จึงต้องนำบ๊อบปิ้นมาตัดและต่อใหม่ให้ได้ขนาด (2×3) นิ้ว แสดงดังภาพประกอบที่ 35

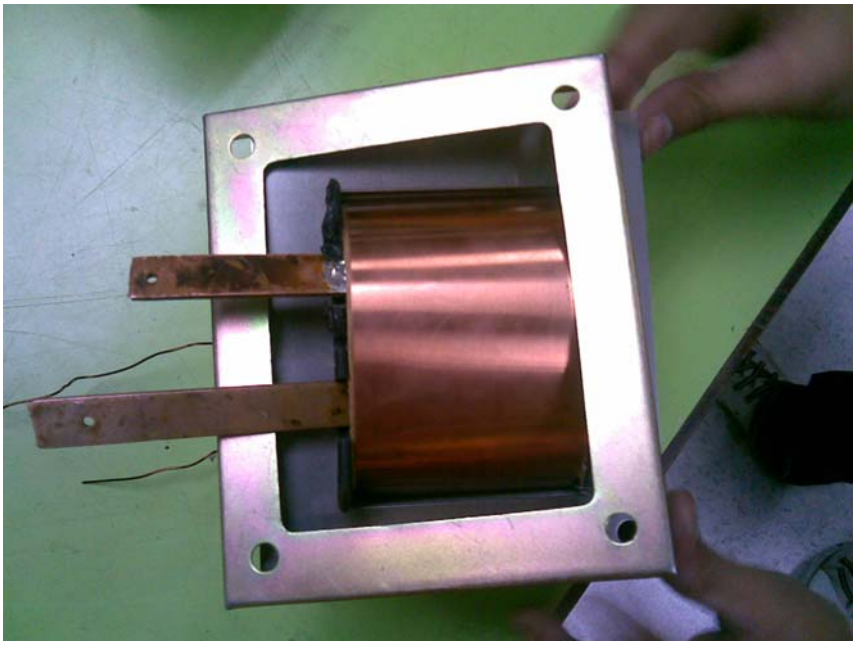


ภาพประกอบ 35 แสดงบ๊อบปิ้นขนาด 2×3 ตารางนิ้ว

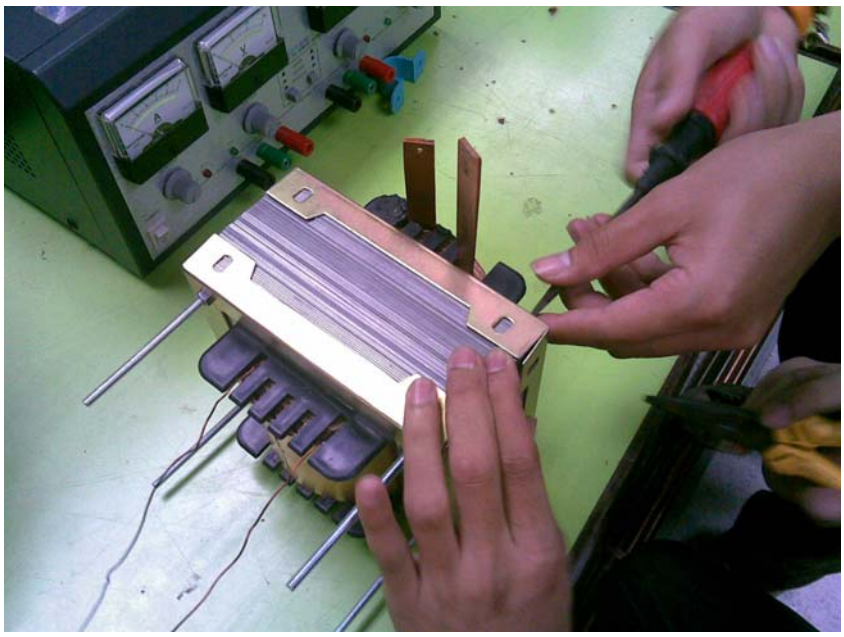
การพันหม้อแปลงเมื่ออุปกรณ์ทุกอย่างเตรียมพร้อมแล้ว ก็นำบ๊อบปิ้นที่ได้มาเสริมแกนกลางเพื่อไม่ให้บ๊อบปิ้นยุบตัวเวลาพันลวดทองแดง เมื่อพันด้านปฐมภูมิแล้วก็มาพันด้านทุติย-ภูมิต่อด้วยแผ่นทองแดง เมื่อเสร็จก็ใช้บัสทองแดงใช้เป็นขั้วต่อด้านขาออก จากนั้นใส่แกนเหล็กตัว E ตัว I และยึดน๊อตให้แข็งแรงก็เสร็จสมบูรณ์ดังแสดงในภาพประกอบที่ 36, 37, 38, 39 และ 40

ภาพประกอบ 36 แสดงการใส่แกนของบ๊อบปิ้นพร้อมพันลวด

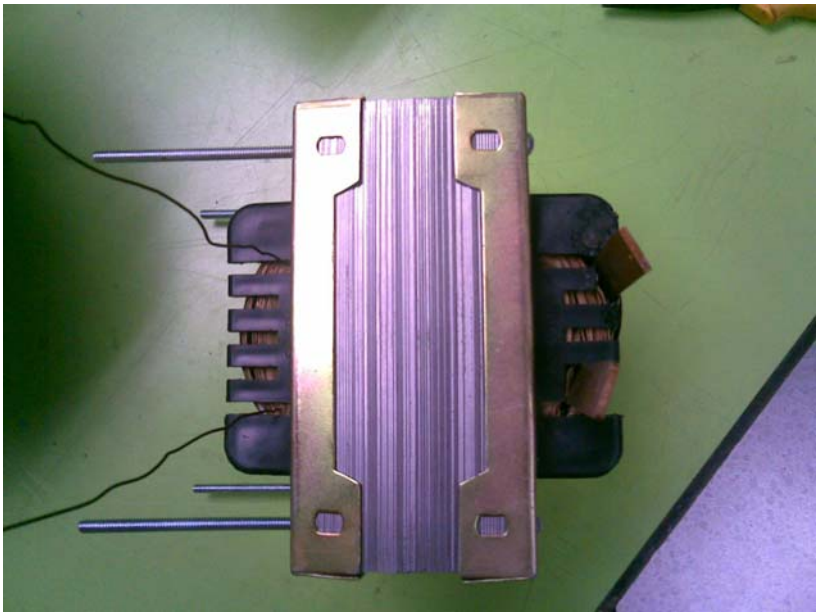
ภาพประกอบ 37 แสดงการพันขดปฐมภูมิ



ภาพประกอบ 38 แสดงการพันด้านทุติยภูมิด้วยแผ่นทองแดง



ภาพประกอบ 39 แสดงการยึดน๊อตแกนเหล็กของหม้อแปลง

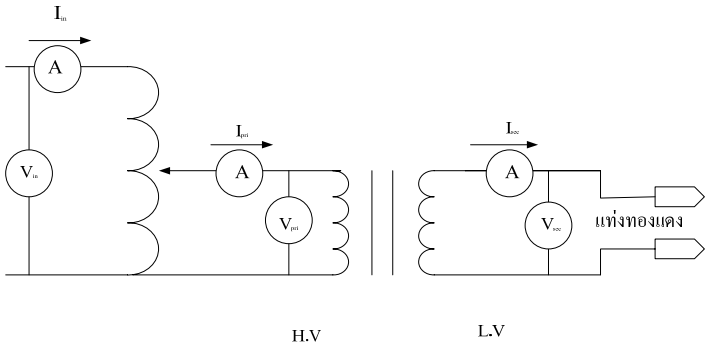


ภาพประกอบ 40 แสดงหม้อแปลงที่พร้อมใช้งาน

การทดสอบหม้อแปลงด้วยการใช้โหลดน้ำเกลือ

ในการทดสอบโหลดน้ำเกลือเพื่อเป็นการความสามารถของแกนหม้อแปลงซึ่งสามารถรับได้ถึง 1495 VA จากการออกแบบและทดสอบความสามารถรับกระแสไฟฟ้าของขดลวดโดยพิจารณาจากอุณหภูมิ ที่ชุดแหล่งจ่ายสามารถจ่ายได้ โดยการทดสอบได้จ่ายไฟให้แก่ขั้วทั้งสองโดยให้ขั้วด้านหนึ่งอยู่กับที่ในน้ำเกลือ และอีกด้านหนึ่งค่อยๆเลื่อนเข้าหาอีกด้านหนึ่งในถังน้ำเกลือจากนั้นทำการวัดค่า ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ส่วนภาพประกอบและวงจรการทดสอบได้แสดงที่ภาพประกอบ 41 และ 42โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะร่วมอยู่ในหัวข้อถัดไป

ภาพประกอบ 41 การทดสอบโหลดน้ำเกลือ



ภาพประกอบ 42 แสดงวงจรการทดสอบโหลดน้ำเกลือ

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าการทดสอบโหลดน้ำเกลือ

ค่าที่จะวัด	In	Primary	Secondary
แรงดัน(V)	220.5	228.3	4.45
กระแส(A)	5.42	4.97	200
S(VA)	1195.11	1134.65	979

การทดสอบชุดแหล่งจ่าย

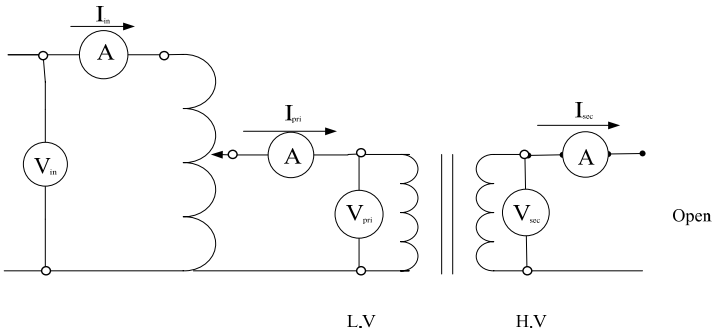
ในการทดสอบชุดแหล่งจ่ายแบบ เปิดวงจร ลัดวงจร และแผ่นทังสเตนเพื่อนำค่าต่างๆที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรในสมมูลของชุดแหล่งจ่ายโดยจะมีลำดับขั้นการทดลองดังนี้

1.การทดสอบแบบเปิดวงจร

2.การทดสอบแบบลัดวงจร

3.การทดสอบโดยโหลดทังสเตน

1. การทดสอบแบบเปิดวงจรจะทำการจ่ายแรงดันเข้าทางด้านแรงดันต่ำ และเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูงดังภาพประกอบ 43 เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์และค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก โดยผลการทดลองได้บันทึกในตารางที่ 3.2

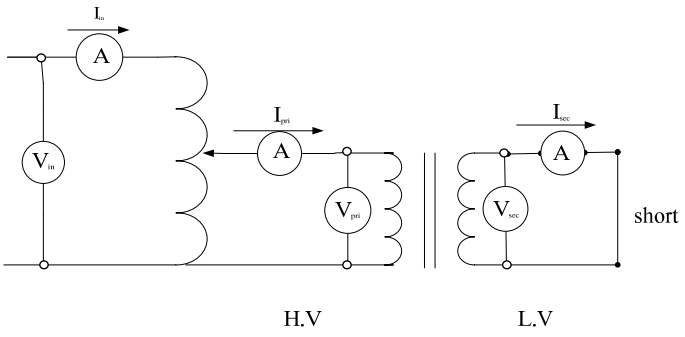


ภาพประกอบ 43 แสดงวงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบชุดแหล่งจ่ายแบบเปิดวงจร

ค่าที่วัด	In	Primary	Secondary
แรงดัน (V)	221.2	4.5	169.24
กระแส (A)	0.23	4.75	0
P (W)	45.5	18.1	0
Q (Var)	22.9	11.2	0
S (VA)	51.0	21.3	0
P.f	0.89	0.85	-

2. การทดสอบแบบลัดวงจรจะทำการจ่ายแรงดันเข้าทางด้านแรงดันสูง และลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำดังภาพประกอบ 44 เพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียในชุดขดลวดทองแดง และค่าอิมพีแดนซ์ของสมมูลย์ของหม้อแปลง โดยการทดสอบได้บันทึกไว้ตารางที่ 3.3

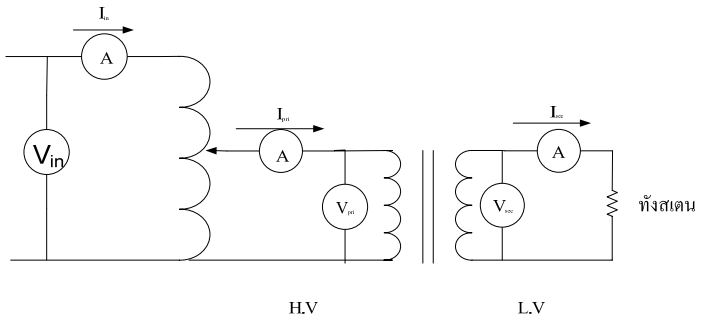


ภาพประกอบ 44 แสดงวงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบชุดแหล่งจ่ายแบบลัดวงจร

ค่าที่วัด	In	Primary	Secondary
แรงดัน (V)	221.5	53.9	0
กระแส(A)	0.894	3.06	140.85
P (w)	191.9	162.5	0
Q (Var)	49.0	29.8	0
S (VA)	198.0	165.2	0
P.f	0.97	0.98	-

3. การทดสอบแบบแผ่นทังสเตนนั้นเป็นการทดสอบในถังสูญญากาศดังภาพประกอบ 45 และบันทึกค่าใช้งานจริงลงในตารางที่ 3.4



ภาพประกอบ 45 แสดงวงจรการทดสอบหม้อแปลงด้วยทังสเตน

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดสอบชุดแหล่งจ่ายด้วยแผ่นทังสเตน

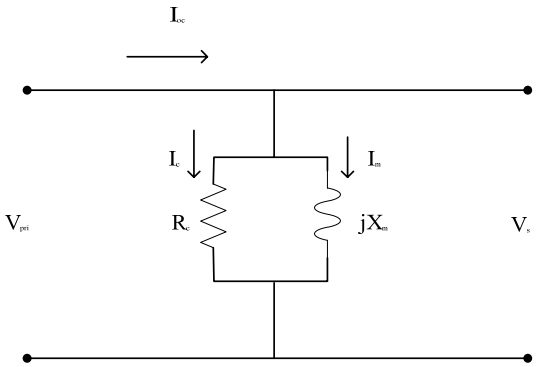
ค่าที่วัด	In	Primary	Secondary
แรงดัน (V)	219.3	93.9	1.0038
กระแส(A)	1.278	2.66	120.5
P (w)	273.8	245.5	0
Q (Var)	61.4	42.8	0
S (VA)	280.6	249.2	0
P.f	0.98	0.99	-

ตารางที่ 3.5 ประสิทธิภาพของชุดแหล่งจ่ายเมื่อจ่ายโหลดทังสเตน

ประสิทธิภาพประกอบระหว่าง		
P_{pri}/P_{in} (%)	P_{sec}/P_{pri} (%)	P_{sec}/P_{in} (%)
89.66	49.27	44.18

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆแบบเปิดวงจรและลัดวงจร

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบเปิดวงจรเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของแกนหม้อแปลงดังภาพประกอบ 46



ภาพประกอบ 46 แสดงวงจรทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร

เมื่อ $\cos\theta = 0.85$

$\theta = \cos^{-1} 0.85$

$= 31.78^{\circ}$

ดังนั้น $I_C = I_{OC} \cos\theta$

$= 4.75 \times 0.85$

$= 4.0375$ A

$I_m = I_{OC} \sin\theta$

$= 4.75 \times \sin 31.78^{\circ}$

$= 2.5016$ A

$$R_C = \frac{V_{Pri}}{I_c}$$

$$= \frac{4.5}{4.0375}$$

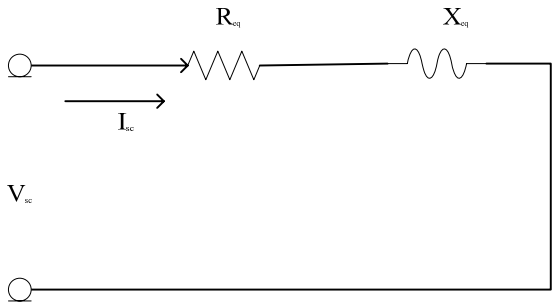
$= 1.114$ Ω

$$X_m = \frac{V_{pri}}{I_m}$$

$$= \frac{4.5}{2.5016}$$

$= 1.798$ Ω

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบลัดวงจรดังภาพประกอบ 47 เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ทองแดงของขดลวด



ภาพประกอบ 47 แสดงวงจรทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร

เมื่อ $$R_{eq} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2}$$

$$= \frac{162.5}{3.06^2}$$

$$= 17.354 \quad \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}}$$

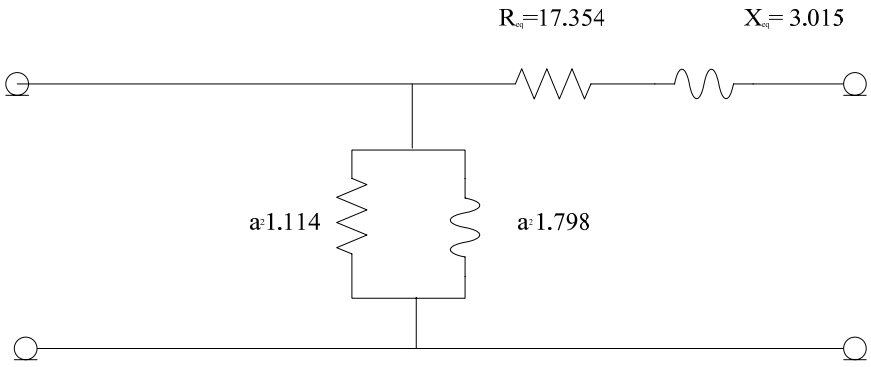
$$= \frac{53.9}{3.06}$$

$$= 17.614 \quad \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^{\ 2} - R_{eq}^{\ 2}}$$

$$= 3.015 \quad \Omega$$

สรุปว่าจากค่าต่างๆที่ได้เมื่อนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลย์จะได้ดังภาพประกอบที่ 48



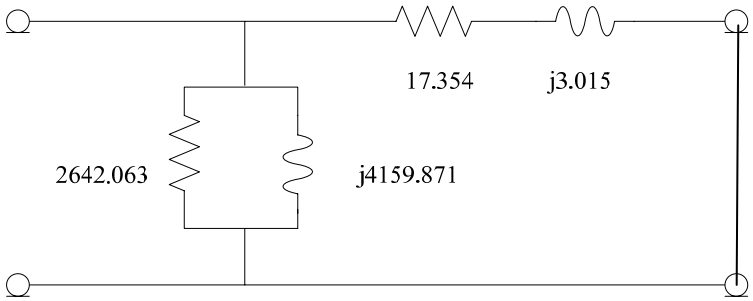
ภาพประกอบ 48 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง

เมื่ออัตราส่วนของหม้อแปลง (a) $= \frac{N_1}{N_2}$

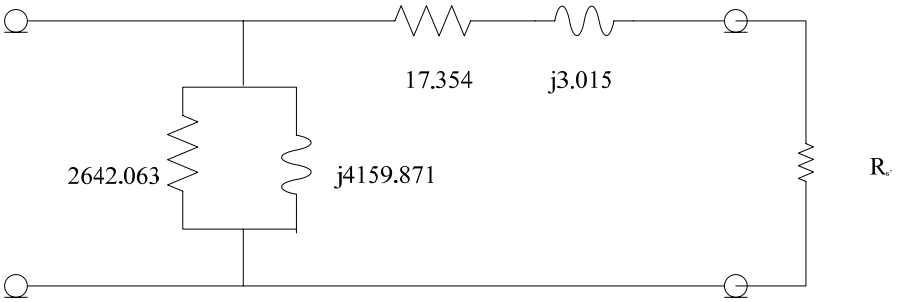
$$= \frac{330}{6.77}$$

$$= 48.7$$

ดังนั้นจะได้วงจรเทียบเคียงวงจรสมมูลดังภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง



ภาพประกอบ 50 แสดงวงจรทดสอบหาค่าโหลดทังสเตน

$$R_S = \frac{V_S}{I_S}$$

$$= \frac{1.0038}{120.5}$$

$$= 0.00833 \quad \Omega$$

$$R'_S = a^2 R_S$$

$$= 48.7^2 \times 0.00833$$

$$= 19.59 \quad \Omega$$

$$V_S' = a\, V_S$$

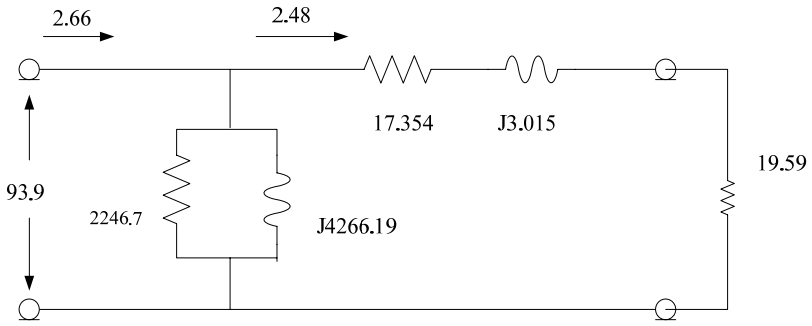
$$= 48.7 \times 1.0038$$

$$= 48.68 \quad V$$

$$I_S' = \frac{I_S}{a}$$

$$= \frac{120.5}{48.7}$$

$$= 2.48 \quad A$$



ภาพประกอบ 51 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงร่วมกับโหลดทังสเตน

ผลที่ได้จากการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายของเครื่องเคลือบฟิมล์แบบเปิดวงจร ลัดวงจร และแผ่นทังสเตน โดยมีอัตราส่วนของหม้อแปลงเท่ากับ 48.7 และนำไปหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

แบบเปิดวงจรจะได้ กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานแกนเหล็ก (I_C) = 4.0375 A กระแสไหลผ่านความเหนียวนำของแกนเหล็ก (I_m) = 2.5016 A ความต้านทานของแกนเหล็ก (R_C) = 1.114 Ω ค่าความเหนียวนำของแกนเหล็ก (X_m) = 1.7988 Ω

แบบลัดวงจร จะได้กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านขดลวดทองแดง(I_{SC}) = 3.06 A ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจร (Z_{eq}) = 17.354 + j3.015 Ω

แบบทังสเตนดังภาพประกอบ 50 จะได้ความต้านทานของทังสเตน (R_S) = 0.00833 Ω ค่าความต้านทาน (R_S') = 19.59 Ω กระแส (I_s') = 2.48 A แรงดัน (V_S') = 48.68 V อิมพีแดนซ์ (Z) = 36.949 + j3.015 Ω

การเคลือบฟิล์มบางทังสเตนออกไซด์

การเตรียมแผ่นกระจก ITO

ในการเตรียมกระจกที่ได้รับการเคลือบฟิล์มของทังสเตนออกไซด์นั้นจะใช้กระจกที่มีการเคลือบโลหะออกไซด์โปร่งแสงที่ทำจากสารประกอบอิเดียมทินออกไซด์ ซึ่งเรียกว่ากระจก (ITO glass) ดังมีขั้นตอนดังนี้

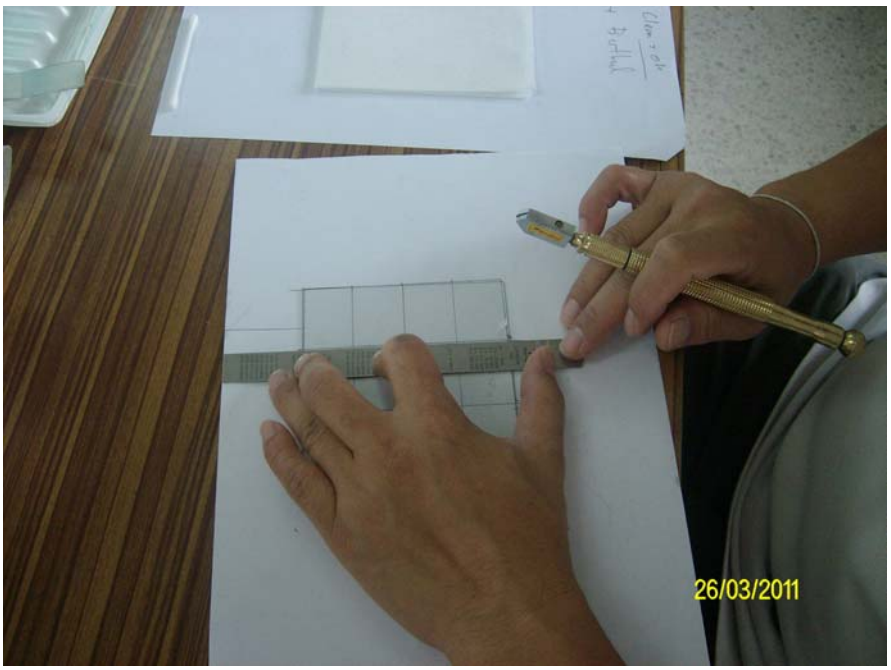
1. ทำการตัดแผ่นกระจก ITO ออกให้มีขนาด $3 \times 2\ cm^2$
2. ทำความสะอาดชิ้นกระจกด้วย acetone และล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (Deionization water) จากนั้นทำให้แห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 52

ภายหลังจากการตัดกระจก ITO แล้วให้ทำความสะอาดอีกครั้งแล้ววัดค่าความต้านทานของกระจกโดยด้านที่เคลือบสาร ITO มีความต้านทานประมาณ 22-25 โอห์ม ส่วนด้านที่เป็นกระจกจะมีความต้านทานสูงมาก จากการเคลือบสารอิเล็กโทรโครมิคเลงบนแผ่นกระจกที่เคลือบสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ หรือ จะเรียกว่ากระจก ITO ซึ่งกระจกชนิดนี้จะมีความต้านทานที่ด้านหน้าและด้านหลังไม่เท่ากันโดยด้านที่เป็นกระจกนั้นจะมีความต้านทานสูงและด้านที่เคลือบสาร ITO จะมีความต้านทาน ดังแสดงในภาพประกอบ 53

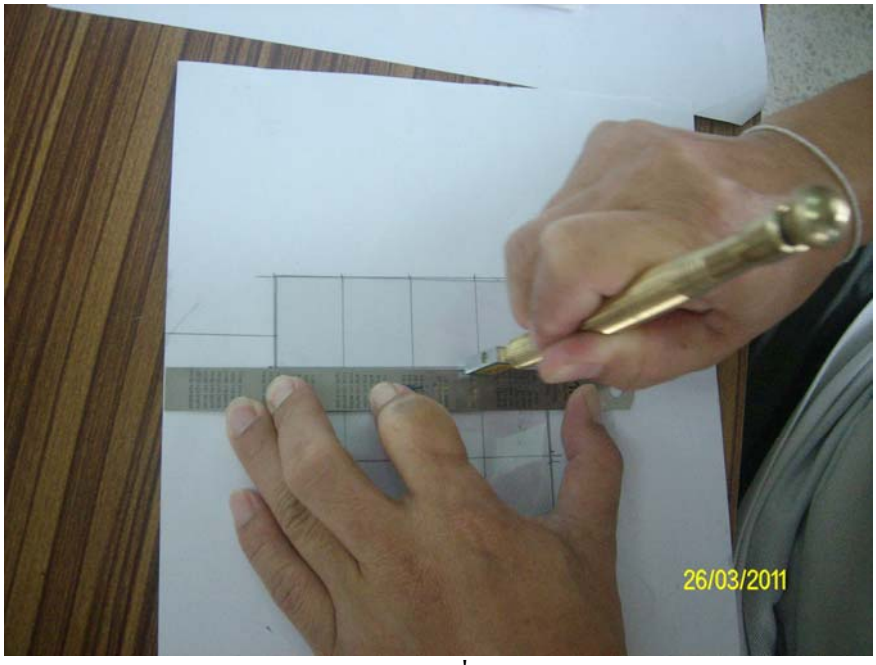
(ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดกระจก

(ข) การจัดวางกระจก ITO บนตาราง pattern

ภาพประกอบ 52 แสดงอุปกรณ์ และการตัดกระจก ITO



(ค) การเตรียมการตัด



(ง)การตัดด้วยที่ตัดกระจก

ภาพประกอบ 52 แสดงอุปกรณ์ และการตัดกระจก ITO(ต่อ)

(ก)แสดงด้านที่เป็นกระจก

(ข)แสดงด้านที่เป็นกระจกเคลือบสาร ITO

ภาพประกอบ 53 แสดงการทดสอบกระจกด้านที่เป็นกระจกและเคลือบสาร ITO

ขั้นตอนการเคลือบสารประกอบทังสเตนออกซไซด์บนแผ่นกระจก ITO

1. ทำความสะอาดภายในภาชนะเครื่องเคลือบสูญญากาศ และทำการติดตั้งส่วนของใส้ทังสเตนที่มีความต้านทาน 2 โอห์ม ที่เป็นแบบหลุมเพื่อใส่สารประกอบทังสเตนออกไซด์เข้ากับขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 54

ภาพประกอบ 54 แสดงกระจกที่ตัดเพื่อเตรียมเคลือบสารทังสเตนออกไซด์

2. ชั่งสารประกอบทังสเตนออกไซด์ปริมาณ 0.1 กรัม จากนั้นใส่สารประกอบออกไซด์ที่ภายในหลุมของใส้ความร้อนทังสเตน และจัดวางแผ่นตะแกรงโลหะที่ตัดเป็นช่องสำหรับวางกระจก ITO ให้ห่างจากใส้ทังสเตนประมาณ 4 cm จากนั้นปิดฝาครอบกระจกด้านบน ดังแสดงในภาพประกอบ 55
3. เปิดวาวล์ควบคุมความดันและทำการเปิดสวิทซ์ปั๊มสูญญากาศเพื่อดูดอากาศและสารประกอบที่เจือปนอยู่ภายในออกจากภาชนะเครื่องเคลือบสูญญากาศ

ภาพประกอบ 55 แสดงการจัดวางกระจก ITO บนตะแกรงโลหะเหนือใส้ความร้อนที่ใส่ผงทังสเตนออกไซด์

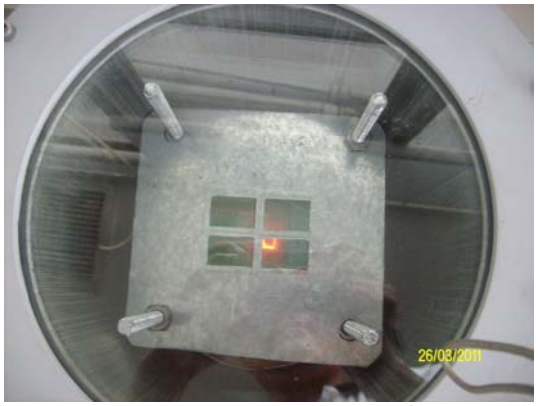
4. เมื่อดูดอากศภายในจนความดันภายในลดต่ำลงตามประสิทธิภาพของปั๊มสูญญากาศที่ประมาณ 0.4 Pa ซึ่งเป็นระดับความสามารถของปั๊มที่จะทำได้ต่อจากนั้นให้เริ่มปรับแรงดันที่อุปกรณ์ควบคุมกระแสที่ให้กับใส่ความร้อนทังสเตน โดยในลำดับแรกให้ทำการอุ่นใส้ความร้อนทังสเตนก่อนโดยการปรับแรงดันที่ 100โวล์ทจาก Auto transformer ให้มีกระแสไหลผ่านใส้ทังสเตนประมาณ 80 แอมป์ ดังแสดงในภาพประกอบ 56 จากนั้นให้ค่อยๆปรับแรงดันเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนใส้ทังสเตนมีสีส้มแดงที่ระดับกระแส 150 แอมป์ จากนั้นให้ปิดวาล์ที่ต่อเชื่อมกับปั๊มสูญญากาศ

(ก) แสดงส่วนประกอบของเครื่องสูญญากาส

(ข)แสดงส่วนเครื่องควบคุมกระแส

ภาพประกอบ 56 แสดงชุดอุปกรณ์การควบคุมกระแส และระบบสูญญากาศ

5. เมื่อกระแสที่ไหลผ่านใส้ทังสเตนที่มีกระแสไหล 150 แอมป์นี้จะทำให้สารประกอบทังสเตนออกไซด์เกิดการระเหยจากความร้อนของใส้ทังสเตนนี้เอง เมื่อไอระเหยของสารประกอบทังสเตนออกไซด์เริ่มระเหยเป็นไอในระยะแรกให้รอ สัก 30 วินาที จากนั้นให้เปิด shutter ที่ปิดกั้นระหว่างแผ่นกระจกกับใส้ความร้อนซึ่งไอระเหยของสารประกอบทังสเตนออกไซด์ระเหยขึ้นไปติดยังส่วนของกระจก ITO โดยในขั้นตอนนี้ต้องรักษาระดับกระแสให้คงที่ที่ 150 A จนกระทั่งสารประกอบทังสเตนออกไซด์ได้ระเหยจนหมด จึงค่อยๆลดระดับกระแสลงอย่างช้าจนเป็นศูนย์แอมป์ดังแสดงในภาพประกอบ 57



(ก) แสดงการปรับระกับกระแสที่ 100 A

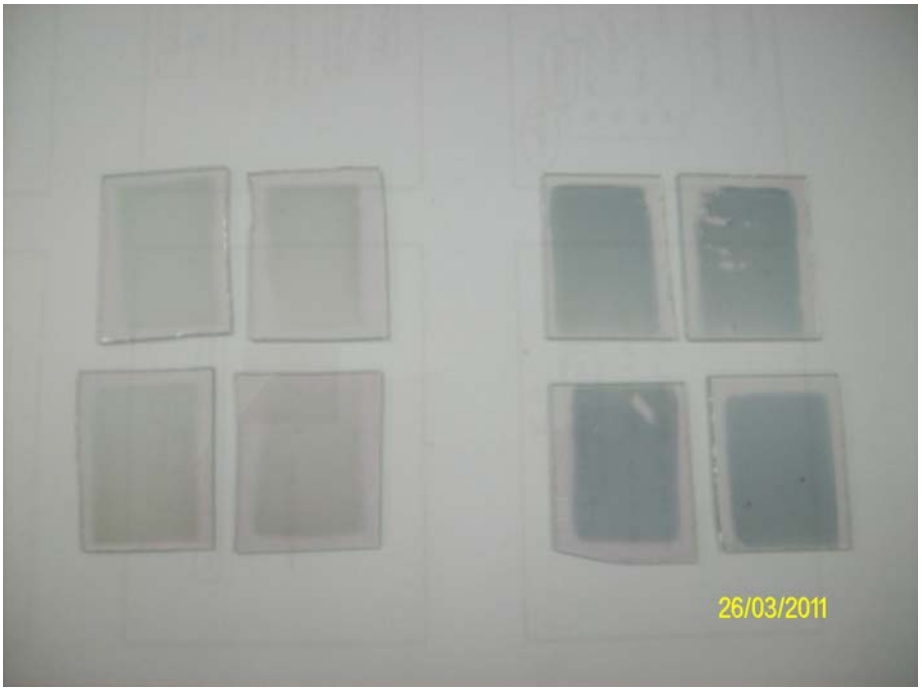
(ข) แสดงการปรับระกับกระแสที่ 120 A

(ค) แสดงการปรับระกับกระแสที่ 130 A

(ค) แสดงการปรับระกับกระแสที่ 150 A

ภาพประกอบ 57 แสดงการให้ความร้อนกับผงทังเสตนออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นไอจับที่กระจก ITO

6. เมื่อสารประกอบทังสเตนออกไซด์ได้ระเหยไปจับติดกับกรจก ITO แล้ว ลดกระแสลงจนเป็นศูนย์ และเปิดวาล์วปรับสภาพบรรยากาศให้เท่ากับบรรยากาศปกติ จากนั้นเปิดกระจกฝาครอบออกแล้วนำเอาแผ่นกระจกที่เคลือบสารประกอบทังสเตนออกไซด์ออกมาดังแสดงในภาพประกอบ 58



ภาพประกอบ 58 แสดงกระจก ITO ที่เคลือบทังสเตนออกไซด์ ที่ผลิตจากปรเทศญี่ปุ่น และจากประเทศเยรมัน

7. ภายหลังจากการเคลือบสารประกอบทังสเตนออกไซด์นำเข้าสู่เตาอบโดยการตั้งอุณหภูมิของการออบไว้ที่100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภาพประกอบ 59 หลังจากนั้นค่อยๆลดอุณหภูมิลง 50 องศาเซลเซียส ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนเข้าสู่อุณหภูมิปกติแล้วจึงนำออกจากเตาอบ มาทำการทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 60

ภาพประกอบ 59 แสดงการนำกระจกที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ แล้วนำเข้าเตาอบโดยเพิ่มอุณหภูมิทีละ 50 องศา

ภาพประกอบ 60 แสดงการนำกระจกที่เคลือบสาร ที่ผ่านการอบด้วยความร้อนออกจากเตาอบ

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการทำเครื่องเคลือบฟิมล์สูญญากาศนี้ เป็นการสร้างชุดแหล่งจ่าย ที่จะต้องจ่ายกระแสให้กับแผ่นทังสเตน เพื่อให้แผ่นทังสเตนเกิดความร้อน ทำให้สารเคมีที่ใส่ในแผ่นทังสเตนเกิดการระเหิดและลอยขึ้นไปเกาะผิวของวัตถุที่ต้องการจะเคลือบผิว โดยวงจรแหล่งจ่ายที่ออกแบบไป จะประกอบด้วยหม้อแปลงจำนวน 2 ตัวคือ หม้อแปลงแบบลดแรงดัน (Step down) และหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ (Auto transformer)

โดยหม้อแปลงแบบลดแรงดันจะมีแรงดันทางด้านออก 265/4.5 โวลต์ และกระแส3/140 แอมแปร์โดยหม้อแปลงตัวนี้เป็นการคำนวณออกแบบและสร้างใหม่ขึ้นมา ซึ่งวิธีการคำนวณจะอยู่ในบทที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้ แกนเหล็กหม้อแปลงมีขนาด 2 × 3 นิ้วและสามารถจ่ายกำลังขนาด 800 – 1500 VA ส่วนขดลวดปฐมภูมิพัน 330 รอบ ใช้ลวดเบอร์ 19 S.W.G ขดลวดทุติยภูมิพัน 6.77 รอบ ใช้ เป็นแผ่นทองแดงที่มีความหนา 0.1 mm กว้าง 75 mm จำนวน 5 แผ่นมาซ้อนทับกันต่อการพัน 1 รอบในส่วนการปรับปรุงตัวถังสูญญากาศนั้น ได้ทำการเพิ่มขนาดของตัวนำไฟฟ้าเข้าสู่ถังใหม่ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ซึ่งใช้แท่งทองแดงเป็นตัวนำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้ไฟฟ้าไหลผ่านลงสู่ตัวถังได้ จึงได้นำเทฟลอนเป็นฉนวน ในการออกแบบต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังนี้คือทนต่อความร้อนสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อความดันสูญญากาศต่ำได้โดยที่แท่งทองแดงได้ทำเกลียวขนาด 19 มิลลิเมตร ส่วนท้ายถังและเทปลอนได้ทำเกลียวขนาด 22 มิลลิเมตร

การเคลือบฟิล์มบางทังสเตนออกไซด์ที่ได้จากสารประกอบทังสเตนออกไซด์ที่อยู่ในรูปของผงแป้งด้วยเครื่องเคลือบสูญญากาศที่สร้างขึ้นนั้นมีศักยภาพพอสมควน ซึ่งมีความสามารถในการสร้างฟิล์มบางทังสเตนออกไซด์ โดยที่ฟิล์มบางที่ได้นี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่สภาพแรงกดอากาศต่ำแต่สภาพการยึดเกาะเข้ากับผิวหน้าของกระจก ITO ได้ แต่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นซึ่งจำเป็นต้องทำการอบด้วยความร้อนด้วยเตาอบเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของฟิล์มที่สร้างขึ้น เนื่องจากการที่ข้อต่อต่างๆ อาจจะมีการรั่วซึม ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาปรับปรุงต่อไป