

## บทที่ 4 การประกอบสร้าง

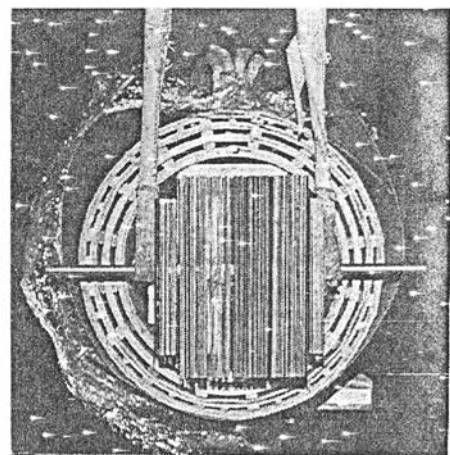
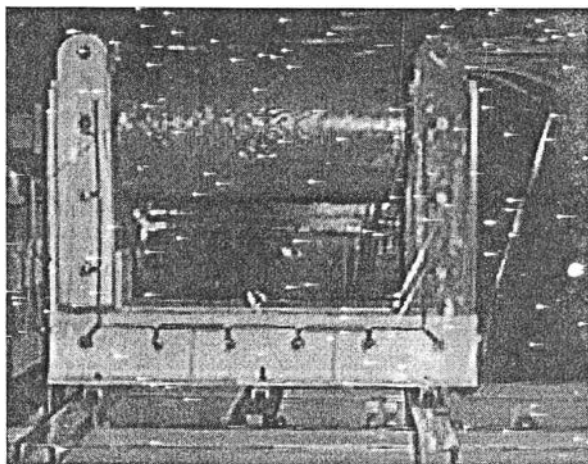
หลังจากได้คำนวณออกแบบ และเตรียมชิ้นส่วนประกอบสร้างไว้พร้อมแล้ว จึงดำเนินการประกอบสร้างตามลำดับขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ แกนเหล็ก ขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดต่อควบ ฉนวนต่างๆ และการบรรจุน้ำมัน

### 4.1 การประกอบแกนเหล็ก

แกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิคอนบางประกอบสร้างแบบ 2 แผ่นสลับทับ 2 แผ่น และประกบด้วยแผ่นเหล็ก ยึดติดด้วยนอตและสลักเกลียวเพื่อความคงทนต่อการรับแรงทางกลของขดลวดต่างๆ โดยที่ทุกส่วนจะต้องลงกราวด์จุดเดียว หลังจากประกอบแกนเหล็กเสร็จจะต้องตรวจสอบการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าให้แน่ใจว่าไม่เกิดวงรอบทางไฟฟ้า เพราะจะทำให้เกิดกระแสไหลวนขณะทำการใช้งานหม้อแปลง ระหว่างการรอกานส่วนอื่นเพื่อการประกอบสร้างจะทำการทาสีแกนเหล็กเพื่อป้องกันผุผอง การกัดกร่อน และการเกิดสนิมจากสภาพอากาศ

### 4.2 การพันขดลวดแรงต่ำ

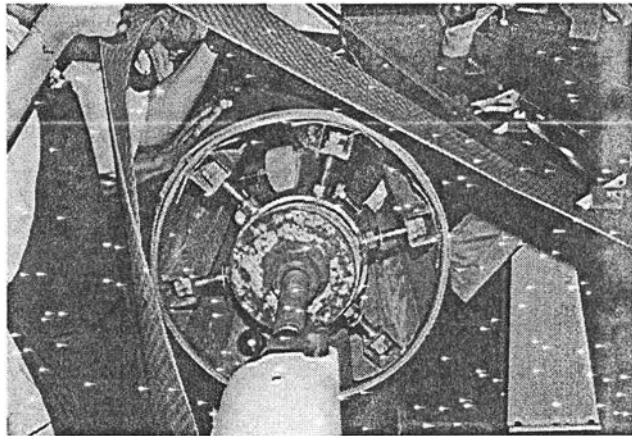
ขดลวดแรงต่ำจะพันบนแผ่นกระดาษอัดที่พันเป็นทรงกระบอก โดยระยะระหว่างขดลวดจะขึ้นด้วยแท่งกระดาษอัดเพื่อรับแรงทางกล และช่องน้ำมันที่เกิดขึ้นจะเป็นประโยชน์ในการระบายความร้อนของขดลวดแรงต่ำ



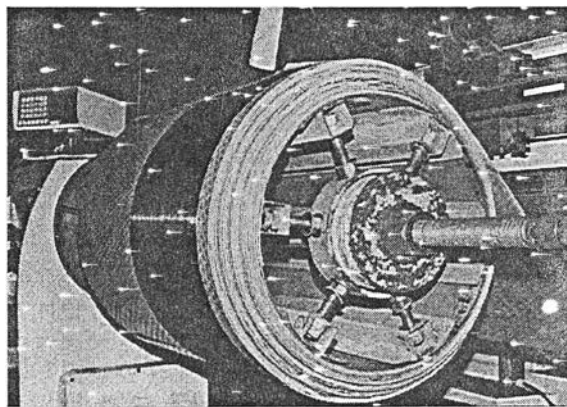
รูปที่ 4.1 ขดลวดแรงต่ำที่ประกอบเข้ากับแกนเหล็ก

### 4.3 การพันขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงสูงจะพันทับบนกระดาษฉนวนที่พันเป็นทรงกระบอก โดยทรงกระบอกนี้ต้องมีระยะน้อยกว่าระยะช่องหน้าต่างของแกนเหล็ก ขนาดของทรงกระบอกนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 474/486 mm มีความยาวทรงกระบอก 876 mm หลังจากพันกระดาษฉนวน แล้วจะพันอิเล็กโทรสแตติกชีลด์ที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมบางดังรูปที่ 4.4 โดยทากาวติดที่ทรงกระบอกฉนวนในตอนเริ่มต้นพันและทากาวในส่วนที่ซ้อนทับกันด้วย ทำให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรสแตติกชีลด์ คือ 486/492 mm จากนั้นทำการพันกระดาษเทอร์โมพอกซ์เพิ่มอีก 6 รอบ



รูปที่ 4.2 การเตรียมพันขดลวดแรงสูงบนกระดาษอัดแรง



รูปที่ 4.3 การพันขดลวดแรงสูงพร้อมกระดาษฉนวน

รูปร่างของขดลวดแรงสูงจะต้องมีความถูกต้องมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยเฉพาะตำแหน่งของขดลวดรอบสุดท้ายของทุกชั้นจะทำการวัด และบันทึกเอาไว้เพื่อควบคุมตำแหน่งของขดลวดรอบสุดท้ายชั้นต่อไป การควบคุมขนาดของขดลวดในแนวยาวจะกระทำโดยการเพิ่มและลดจำนวนรอบของขดลวดใน

แต่ละชั้น โดยกำหนดความผิดพลาดของขดลวดแต่ละชั้นไม่เกิน 3 รอบ การควบคุมขนาดในแนวรัศมีของขดลวดจะกระทำโดยการเพิ่มหรือลดจำนวนกระดาดชนวนระหว่างชั้น กำหนดความผิดพลาดของจำนวนรอบของกระดาดชนวนไม่เกิน 1 รอบ

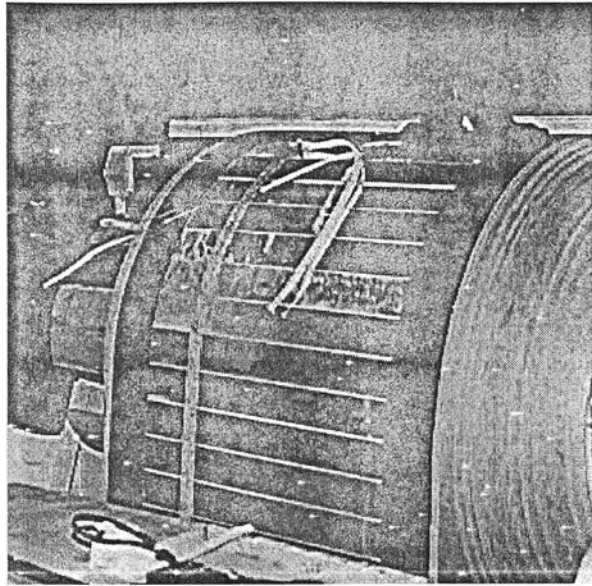
การติดกาวในการเริ่มต้นพันกระดาดชนวนแต่ละชั้นจะทาเป็นแนวยาววันระยะจากขอบกระดาดทั้งสองข้างประมาณ 5 cm โดยทาเป็นแถบกว้างประมาณ 5-10 cm

การพันกระดาดชนวนและทองแดงจะต้องทำให้แน่นที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดขนาดแกบภายในขดลวดและกันการเลื่อนของขดลวด การพันขดลวดจะต้องพยายามพันขดลวดให้เป็นรูปร่างทรงกระบอกกลมที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อรับการกระจายของแรงทางกลที่เกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ ลดระยะแกบระหว่างชั้นภายในขดลวดและเพื่อความสะดวกในการพันขดลวดชั้นต่อไป โดยเฉพาะตำแหน่งของขดลวดแรงสูงชั้นบนสุดจะต้องควบคุมเป็นพิเศษให้มีตำแหน่งที่ถูกต้อง การพันขดลวดชั้นสุดท้ายจะต้องพันให้เต็มตามแนวยาวโดยไม่คำนึงถึงจำนวนรอบที่เกิน แต่จำนวนรอบทั้งหมดควรมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบที่กำหนดไว้ จากนั้นให้พันขดลวดกลับทิศทาง 8 รอบสู่กึ่งกลางขดลวด เพื่อนำสายผ่านปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

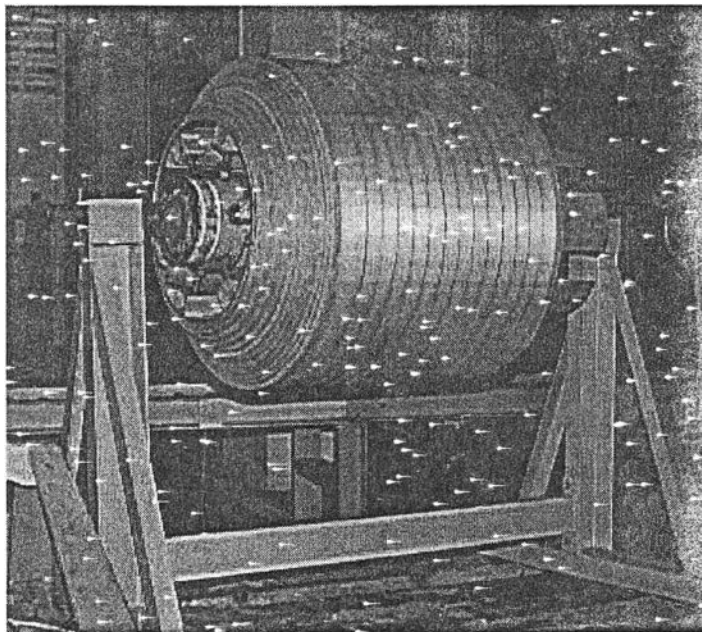
อิเล็กโทรสแตติกชีลด์ ที่พันรอบขดลวดแรงสูงต้องมีความยาวสั้นกว่าความยาวของขดลวดแรงสูงชั้นสูงสุด ประมาณ 15 mm ทั้งสองด้าน และเจาะรูตรงกลางอิเล็กโทรสแตติกชีลด์ให้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 mm เพื่อเป็นรูในการนำสายแรงสูงและสายตัวนำของอิเล็กโทรสแตติกชีลด์ผ่านสู่ปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ดังรูป ที่ 4.5



รูปที่ 4.4 อิเล็กโทรสแตติกชีลด์



รูปที่ 4.5 การพันอิเล็กทรอนิกส์เตดิกซีลด์บนขดลวดแรงสูง



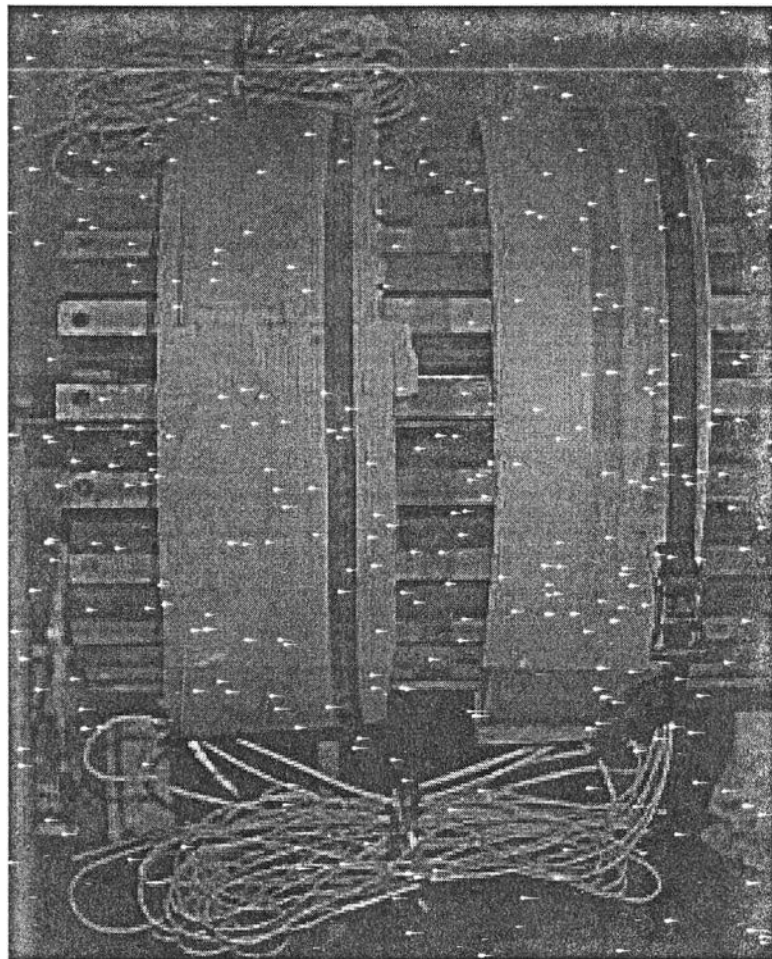
รูปที่ 4.6 ขดลวดแรงสูงที่พันเสร็จแล้ว

#### 4.4 การอบขดลวดแรงสูง

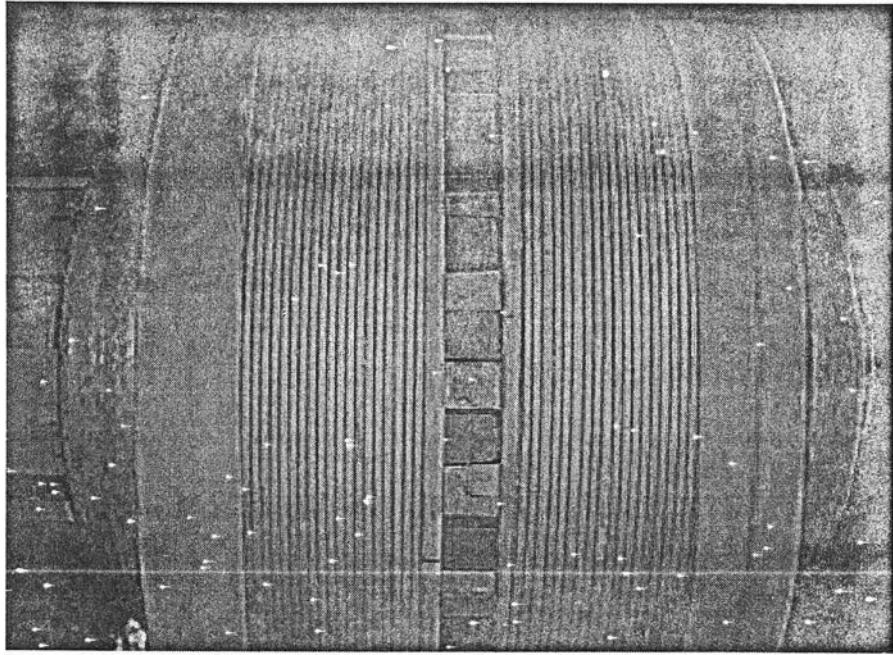
การอบขดลวดเพื่อให้ฉนวนขึ้นกระดาษหอร์โมพอกซ์ละลาย ซึ่งฉนวนขึ้นหลังจากเย็นจะแข็งตัวทำหน้าที่ยึดติดขดลวดกับกระดาษฉนวน การเคลื่อนย้ายขดลวดจะต้องกระทำในแนวนอนเท่านั้นเพื่อป้องกันการเลื่อนของขดลวด การอบจะทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง  $115^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 3 ชั่วโมงและคงระดับอุณหภูมิไว้ 60 นาที และทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ โดยใช้เวลายอย่างน้อย 3 ชั่วโมง

#### 4.5 การประกอบขดลวดต่อควมและวงแหวนเกลี่ยแรงดันกับขดลวดแรงดันสูง

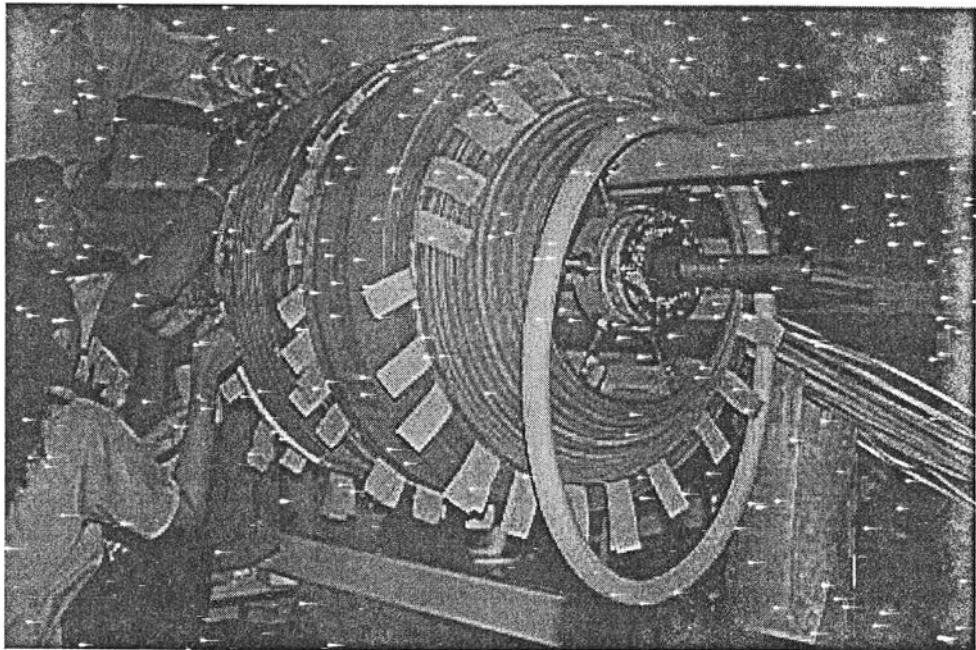
หลังจากทำการอบขดลวดแรงสูง อาจต้องพันกระดาษฉนวนเพิ่มหรืออาจพันกระดาษอัดแรง เพื่อให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดกับกระดาษฉนวนมีค่าเท่ากับรัศมีภายในของวงแหวนเกลี่ยแรงดันเล็ก ประมาณ 4 mm จากนั้นจึงวางขดลวดต่อควมบนขดลวดแรงสูง ให้ได้แนวกึ่งกลางและเว้นระยะห่างระหว่างขดลวดต่อควมทั้ง 2 ชุดให้ขอบปลายนอกของขดลวดต่อควมพอดีกับขอบของอิเล็คโทรสแตติกชีลด์ และใช้แท่งฉนวนที่ทำจากกระดาษอัดแรงสอดเข้าตามแนวยาวของขดลวดแรงสูงเพื่อให้ขดลวดต่อควมกับขดลวดแรงสูงติดแน่นกัน ซึ่งช่องว่างระหว่างแท่งกระดาษอัดแรงจะสอดแผ่นกระดาษฉนวนเพื่อใช้ในการยึดติดขดลวดต่อควมกับวงแหวนเกลี่ยแรงดันให้แน่นกับขดลวดต่อควม



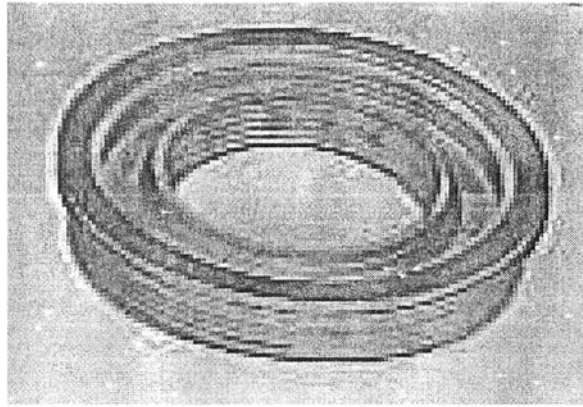
รูปที่ 4.7 ขดลวดต่อควมที่พันเสร็จแล้ว



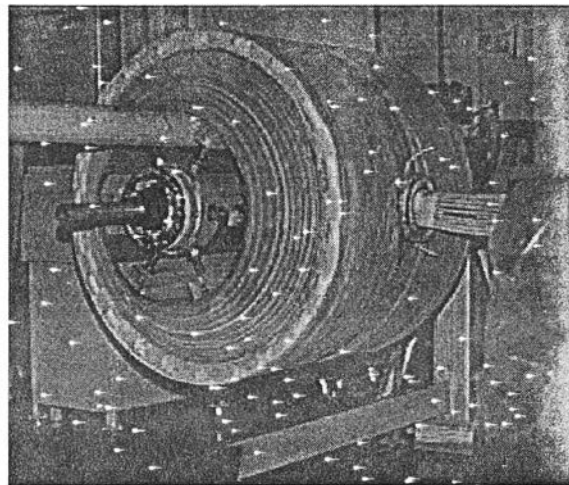
รูปที่ 4.8 การวางขดลวดต่อความถี่รอบนอกขดลวดแรงดันสูง



รูปที่ 4.9 การติดตั้งวงแหวนเกลี่ยแรงดัน



รูปที่ 4.10 ฐานไม้สำหรับวางต่อตัวนำแรงสูง



รูปที่ 4.11 การติดตั้งฐานไม้เข้ากับขดลวดต่อความและขดลวดแรงสูง

#### 4.6 การใส่ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดกับกราวด์และฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

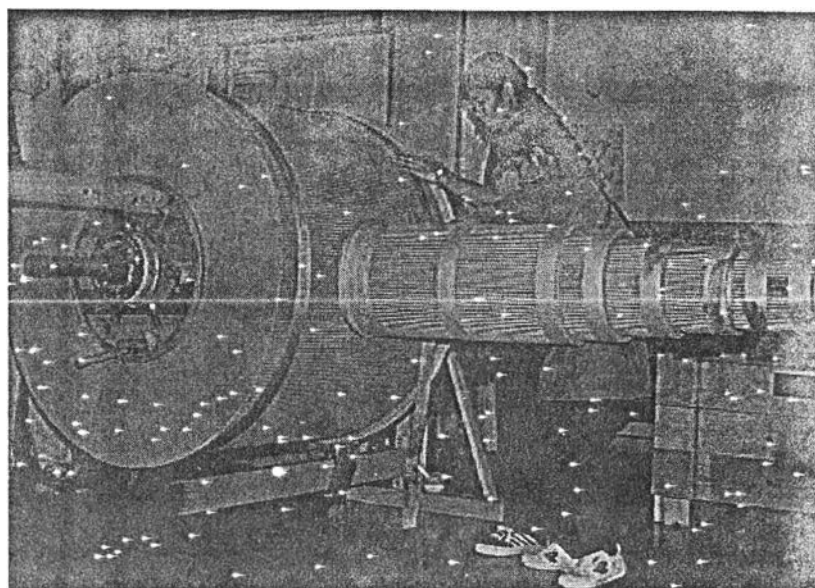
ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดกับกราวด์จะประกอบด้วย ทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ด ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ฉนวนแผ่นราบที่มีผิวเป็นทรงกระบอกและฉนวนรูปวงแหวนแผ่นราบ

ฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าประกอบด้วยแผ่นทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดรูปคลื่น และ กระดาษทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดแผ่นบาง

การพันฉนวนระหว่างขดลวดกับกราวด์และการพันฉนวนในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าจะกระทำสลับกันไปที่ละชั้น ตามขั้นตอนดังนี้

1) ทำการวางฐานรองรับต่อฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า และต้องพยายามวางให้กลางที่สุดเท่าที่จะทำได้เพราะจะมีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า และการประกอบปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าภายหลัง

2) เริ่มพันฉนวนรูปทรงกระบอกที่เจาะรูเอาไว้ แล้วใส่ฉนวนรูปวงแหวนแผ่นราบสลับกันที่ละชั้นรอบขดลวด พร้อมกับใส่แผ่นทรานส์ฟอร์เมอร์บอร์ดรูปคลื่นที่ขึ้นกระดากอัดแรงรอบท่อฉนวนนำสายไฟฟ้าที่วางอยู่บนฐานรองรับที่สลับกันที่ละชั้น จนครบ 10 ชั้น ตามที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยใช้กาวในการยึดติดกระดากฉนวนแต่ละชั้น



รูปที่ 4.12 การใส่ฉนวนครอบขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบและการใส่ฉนวนครอบท่อตัวนำแรงดันสูง

#### 4.7 การเตรียมแผ่นตัวนำแผ่นราบ

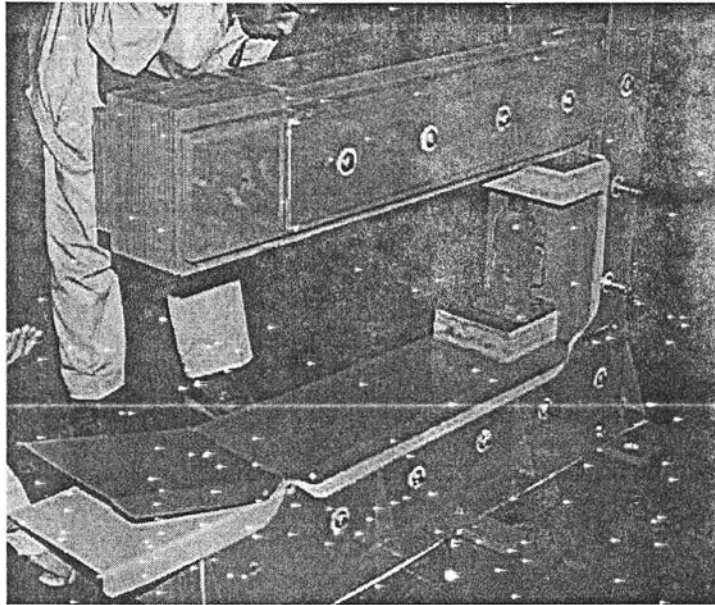
ตัวนำแผ่นราบจะทำให้การกระจายแรงดันระหว่างขดลวดแรงสูงสม่ำเสมอขึ้นโดยทำการประกอบเข้ากับแกนเหล็กและต่อกราวด์ดังรูปที่ 4.15 ตัวนำแผ่นราบจะหาฉนวนให้ได้ความหนากว่า 0.3 mm โดยทำการพันสีโดยใช้เครื่องพันสี เพื่อให้ได้ความหนาของสีที่สม่ำเสมอ ซึ่งทำการพันสีประมาณ 3 ชั้นเพื่อให้มีความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดบนพื้นผิวตัวนำแผ่นราบตามที่ได้ออกแบบไว้ดังรูป ค.7

#### 4.8 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก

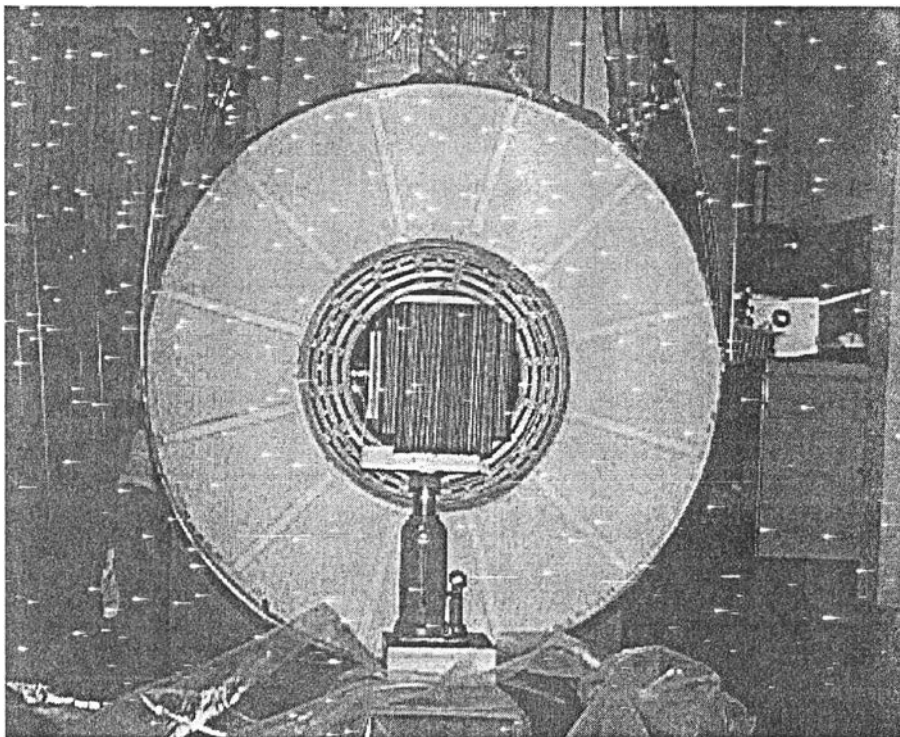
การเคลื่อนย้ายขดลวดที่ทำการประกอบกับฉนวนจะทำในแนวนอนเท่านั้น เพื่อป้องกันการเลื่อนของขดลวด และต้องพิจารณาอุปกรณ์ในการยกขดลวดต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักทั้งหมดของขดลวดได้และต้องระวังการเคลื่อนไหวของฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า ในการประกอบขดลวดผู้วิจัยได้ถอดแกนเหล็กด้านหนึ่งออกเพื่อใช้ในการสวมขดลวด ขณะทำการสวมขดลวดจะมีอุปกรณ์และวัสดุได้แก่ แม่แรงกับแท่งไม้รองรับน้ำหนักช่วยในการค้ำจุนแกนเหล็ก และขดลวด หลังจากการสวมขดลวดแล้วจะทำการประกอบแกนเหล็กเข้าที่เดิม ชั้นนอกติดกับสลักเกลียวให้แน่น และประกอบแผ่นตัวนำที่ช่วยเกลี่ยสนามไฟฟ้าเข้าทั้ง 2 ด้านของแกนเหล็กให้เสมอเป็นระนาบกับแกนเหล็กทั้ง 2 ข้าง จากนั้นจึงตรวจสอบการเชื่อมต่อทาง



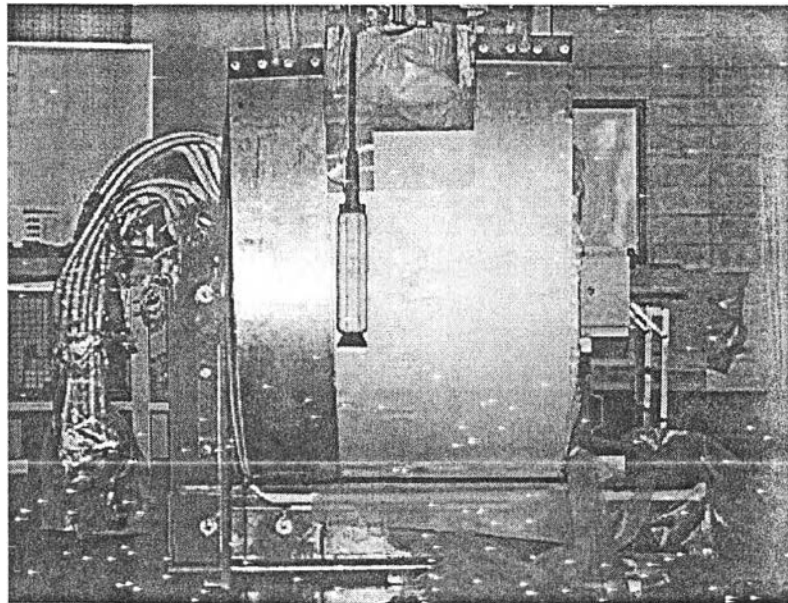
ไฟฟ้า โดยที่แกนเหล็ก นอต สลักเกลียว และแผ่นเหล็กที่ประกอบแกนเหล็กจะต้องลงกราวด์ที่จุดเดียวและต้องไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่เป็นวงรอบทางไฟฟ้า ซึ่งแสดงไว้ตามรูปที่ 4.13-4.15



รูปที่ 4.13 การเตรียมแกนเหล็กเพื่อประกอบขดลวดต่างๆ เข้ากับแกนเหล็ก



รูปที่ 4.14 ภาพหน้าตัดขวางการประกอบขดลวดต่างๆ เข้ากับแกนเหล็ก



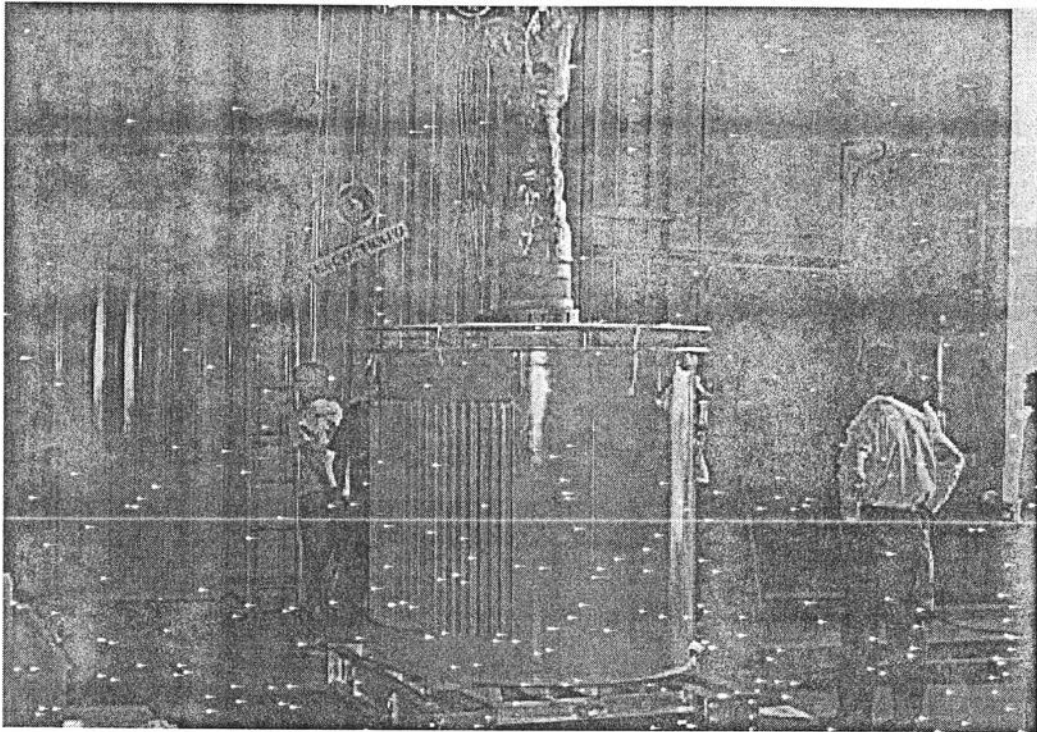
รูปที่ 4.15 ภาพด้านข้างของการประกอบขดลวดต่างๆ เข้ากับแกนเหล็ก

#### 4.9 การประกอบขดลวด แกนเหล็ก ตัวถังเหล็กและปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าเข้าด้วยกัน

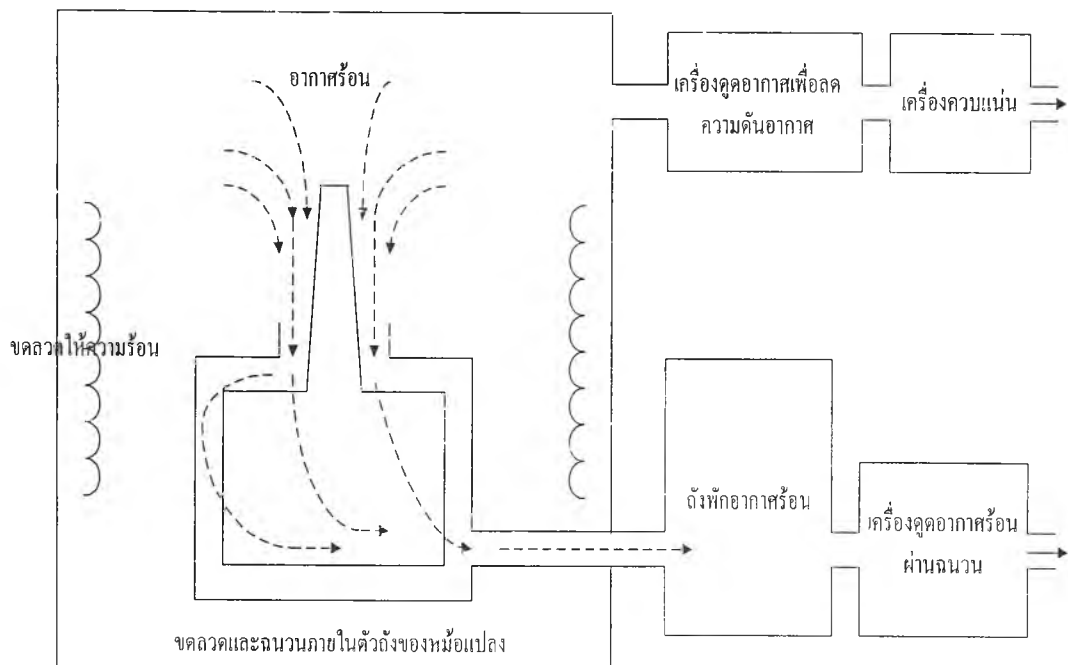
การประกอบขดลวดกับแกนเหล็ก และติดตั้งในตัวถังเหล็กจะกระทำตามขั้นตอนดังนี้ทำการยกขดลวดทั้งหมดรวมทั้งแกนเหล็กที่ประกอบเข้าด้วยกันแล้วลงตัวถังเหล็กที่เตรียมไว้ ทำการคั่นฉนวนที่บริเวณขอบของแกนเหล็กกับตัวถังเพื่อป้องกันการครบรอบทางไฟฟ้า ทำการยึดติดแกนเหล็กเข้ากับตัวถัง ต่อสายกราวด์ของแกนเหล็กเข้ากับตัวถัง จากนั้นทำการประกอบฝาของตัวถังเพื่อกันฝุ่นตกลงไปในตัวถังขณะอบขดลวด

#### 4.10 การอบและดูอากาศของขดลวดในหม้อแปลง

การอบและดูอากาศเพื่อลดความชื้นที่อยู่ในฉนวนให้มีอยู่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะเมื่อใช้งานหม้อแปลง ความชื้นในฉนวนจะออกมาผสมในน้ำมัน และความชื้นเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด การอบ และดูอากาศจะทำเฉพาะฉนวน ขดลวด และแกนเหล็กที่อยู่ในตัวถัง รวมทั้งฉนวนภายในปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าเท่านั้น โดยยังไม่ได้ประกอบปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าเพื่อให้อากาศสามารถไหลผ่านฉนวนได้สะดวกดังรูป 4.16 การอบและดูอากาศจะกระทำตามรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 การเตรียมหม้อแปลงเข้าเตาอบ



รูปที่ 4.17 ภาพแสดงการอบเพื่อไล่ความชื้นของไส้หม้อแปลงในเตาอบ

#### 4.11 การใส่น้ำมัน

การเติมน้ำมันกระทำที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  ความดัน 0.1 bar ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

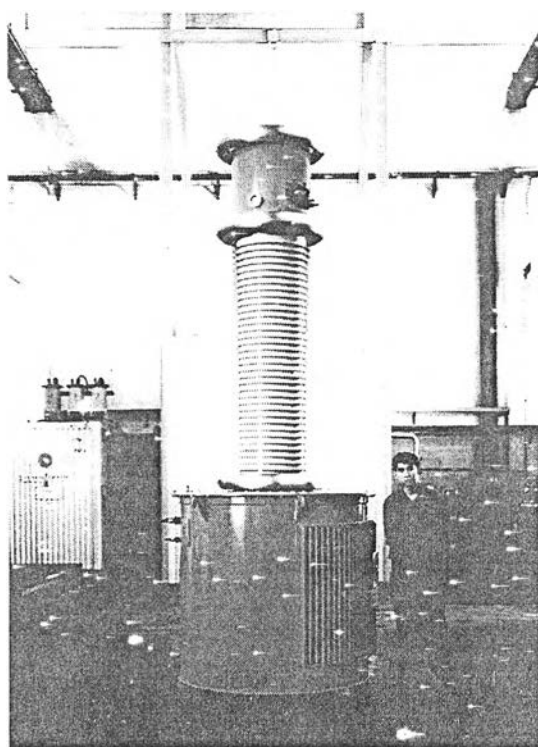
1) เติมน้ำมันด้วยความเร็ว 60mm/h จากตัวถังจนถึงปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าที่ความสูง 1 m ใช้เวลาประมาณ 17 ชั่วโมง

2) เติมน้ำมันด้วยความเร็ว 200 mm/h จากระดับความสูงของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า 1m ถึง 2 m ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง

#### 4.12 การใส่หัวแรงดันสูงของหม้อแปลงและวงแหวนเกลี่ยแรงดัน

หัวแรงสูงจะประกอบด้วยจะติดตั้งร่วมกับวงแหวนเกลี่ยแรงดัน 2 วง เพื่อเกลี่ยแรงดันบริเวณหัวแรงสูงให้สม่ำเสมอขึ้นดังรูปที่ 4.18 การติดตั้งหัวแรงสูงจะทำหลังจากเติมน้ำมันเสร็จ จากนั้นทำการใส่วงแหวนเกลี่ยแรงดันที่ระดับที่ได้ทำการคำนวณไว้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ วงแหวนอันล่างใส่ไว้ที่ระดับจากฝานตัวถึง 20 mm วงแหวนอันล่างของหัวตัวนำแรงสูง จะใส่ไว้ที่ระดับต่ำกว่าฐานรองรับหัวตัวนำแรงสูงประมาณ 10 mm ส่วนวงแหวนตัวบนจะวางไว้ที่ส่วนต่ำสุดของวงแหวนต่ำกว่าส่วนบนสุดของหัวตัวนำแรงดันสูงประมาณ 10 mm

หลังจากเสร็จขั้นตอนการประกอบสร้างทั้งหมดแล้วจะต้องรอเวลาให้น้ำมันซึมซาบเข้ากับฉนวนกระดาษอย่างเต็มที่ จะต้องรอเวลาอย่างน้อย 3 สัปดาห์เพื่อไม่มีฟองอากาศอยู่ภายในน้ำมันซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดดีส์ชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงได้



รูปที่ 4.18 หม้อแปลงที่ประกอบเสร็จแล้ว