บทที่ 5
ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

ข้อสรุปในการวิจัย

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นใช้สำหรับให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น 60 °C จากอุณหภูมิห้อง ในขบวนการเคลือบฉนวนสายไฟฟ้า กำลังออกสูงสุดที่ชิ้นงานมีค่า 1,281 วัตต์ ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 64 เปอร์เซนต์ ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 95 % ประสิทธิภาพหม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงเท่ากับ 91 % ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่า 0.53 ประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสเท่ากับ 98 % ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องเท่ากับ 54 % กำลังปรากฏด้านออกของอินเวอร์เตอร์ประมาณ 4.2 kVA กำลังด้านเข้าของเครื่องประมาณ 2.4 กิโลวัตต์ ค่าตัวประกอบกำลังด้านขาเข้าของเครื่องเท่ากับ 0.66 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้จะสามารถปรับค่ากำลังออกที่ชิ้นงานได้ในช่วง 100 - 30 เปอร์เซนต์ โดยการปรับความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในช่วง 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ที่กำลังออกสูงสุดสามารถให้ความร้อนแก่ลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น 60 °C จากอุณหภูมิห้อง ได้ภายในเวลา 6 วินาที จะเห็นได้ว่าเครื่องสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและปรับกำลังออกได้ในช่วงที่กว้างโดยการปรับความถี่ในช่วงประมาณ 3 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งจะมีข้อดีในแง่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์จะทำงานในช่วงความถี่ที่แคบ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบวงจรสนับเบอร์

สำหรับกำลังงานสูงสุด 1,281 วัตต์ สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นงานที่เป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น 60 °C จากอุณหภูมิห้อง ได้ภายในเวลา 6 วินาที เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำเป็นรูปทรงกระบอกยาว 20 เซนติเมตร ความเร็วของการป้อนชิ้นงานเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2 เมตรต่อนาที แต่ในการใช้งานจริงจะติดตั้งเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจำนวน 5 เครื่อง ซึ่งจะสามารถเพิ่มความเร็วของการผลิตได้ 10 เมตรต่อนาที และจะมีเครื่องสำรองอีก 1 เครื่อง เมื่อเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดขัดข้องหรือชำรุด ก็สามารถเดินเครื่องสำรองมาทดแทนได้โดยไม่กระทบต่อขบวนการผลิต เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่มีกำลังออกสูง ๆ เพียงเครื่องเดียว จะมีความยุ่งยากในการออกแบบ และจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องเนื่องจากพิกัดของอุปกรณ์มีค่าสูง อีกทั้งเมื่อเครื่องเกิดขัดข้องหรือชำรุด จะทำให้ขบวนการผลิตหยุดชะงักลงได้

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงาน ในกรณีที่ไม่มีชิ้นงานอยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดมาก ส่วนค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำนั้น ในช่วงความถี่สูงค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวัดเล็กน้อย แต่จะมีความแตกต่างกันมากขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากในการคำนวณทางทฤษฎีนั้นใช้ข้อมูลของขดลวดเหนี่ยวนำเป็นลวดทองแดงตัน ส่วนในการทดลองวัดค่าขดลวดเหนี่ยวนำใช้ท่อทองแดงกลวง ในช่วงความถี่สูงกระแสส่วนใหญ่จะไหลที่ผิวของขดลวดเนื่องจากปรากฏการณ์ผิว(skin effect) ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ท่อทองแดงกลวงจึงมีค่าสูงกว่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ลวดทองแดงตันเพียงเล็กน้อย ส่วนทางด้านความถี่ต่ำนั้นเมื่อ skin depth มีค่ามากกว่าความหนาของท่อทองแดงกลวงมากขึ้น ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำกลวงที่ได้จากการวัดจึงมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ลวดทองแดงตันที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมากขึ้น

ในกรณีที่มีชิ้นงานที่เป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 10 เปอร์เซนต์ ส่วนค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 2 - 5 เท่า ทั้งในช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำซึ่งความแตกต่างนี้ส่วนหนึ่งมาจากผลจากการใช้ท่อทองแดงกลวงดังที่ได้กล่าวมาแล้วโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ แต่ความแตกต่างส่วนใหญ่ของค่าความต้านทานน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ชิ้นงานที่ใช้ในการการทดลองไม่ได้เป็นแท่งอะลูมิเนียมตัน แต่เป็นแท่งอะลูมิเนียมตีเกลียว เนื่องจากกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำที่ไหลในชิ้นงานมีทิศทางการไหลตามแนวเส้นรอบวงของชิ้นงานตลอดแนวเส้นลวดที่ใช้ตีเกลียว ดังนั้นผลของความต้านทานระหว่างผิวของเส้นลวดอะลูมิเนียมที่ใช้ในการตีเกลียว จะทำให้ค่าความต้านทานของชิ้นงานสูงขึ้นมาก การเพิ่มขึ้นของความต้านทานเนื่องจากความต้านทานที่ผิวของเส้นลวดอะลูมิเนียมตีเกลียวนี้ จะเป็นผลดีคือทำให้ทั้งประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าสูงขึ้น

เนื่องจากตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวมีค่าเท่ากับ 0.2 ถ้าไม่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำให้สูงขึ้นจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีกำลังออกถึง 11 kVA ดังนั้นจึงใช้ตัวเก็บประจุขนาด 40 ไมโครฟารัด ต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับ 0.55 ซึ่งจะเป็นการลดขนาดของอินเวอร์เตอร์ลงเกือบ 3 เท่า นอกจากนี้ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบ

กำลังยังทำหน้าที่ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ จึงสามารถออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบกึ่งบริดจ์ ทำงานในภาคแรงดันศูนย์ เพื่อลดกำลังสูญเสียในสวิตช์ จากการทดสอบเครื่อง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์

วงจรควบคุมประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานและวงจรขับนำเบส วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานใช้การป้อนกลับของกระแสโหลดผ่านหม้อแปลงขับนำเพื่อป้อนให้กับวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ โดยในการออกแบบหม้อแปลงใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) เพื่อสถานะการทำงานของสวิตช์ วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานที่ออกแบบจะมีข้อดีในแง่ความง่ายของวงจร มีความซับซ้อนน้อย และป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอก ทำให้วงจรมีความเชื่อถือได้สูง

จากการทดสอบเครื่อง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมของเครื่องมีค่าประมาณ 54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวมีค่าค่อนข้างต่ำอันเป็นผลมาจากความต้านทานของลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวมีค่าต่ำ จากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่สูงขึ้นประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลง ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพขดลวดเหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ แต่จะต้องคำนึงถึงความเร็วในการหยุดนำกระแสของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วย ทั้งนี้ที่ความถี่สูง ๆ อาจจะต้องเปลี่ยนไปใช้สวิตช์ที่หยุดนำกระแสได้เร็วกว่าทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีราคาสูง เช่น มอสเฟสกำลัง หรือ IGBT

ในการออกแบบชนิดและพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจร ใช้โปรแกรม LEC 5.0 ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจร โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งได้จากการวัด ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว แล้วทำการคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์ จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อนำมาวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม LEC 5.0 จะเห็นได้ว่าขนาดและรูปร่างของกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบการทำงานเครื่อง ซึ่งแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรจึงมีค่าใกล้เคียงความจริง

ปัญหาและข้อเสนอในการปรับปรุง

1 การเลือกแกนแม่เหล็กในวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงาน ต้องใช้แกนแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติในการอิ่มตัวเหมือนกัน เพราะถ้าคุณสมบัติไม่เหมือนกันแล้วช่วงเวลาในการอิ่มตัวของแกนจะไม่เท่ากัน ทำให้ทรานซิสเตอร์กำลังจะมีช่วงที่นำกระแสไม่เท่ากันและอาจจะทำให้เกิดการทะลุผ่าน(Shoot Through) ของสวิตช์ คือ ทรานซิสเตอร์กำลัง ขึ้นได้

2 อาจจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้ เพราะที่ความถี่สูงประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้น แต่ต้องใช้สวิตช์ที่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นและมีราคาสูงกว่าทรานซิสเตอร์กำลัง เช่น มอสเฟตกำลัง หรือ IGBT ซึ่งสามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่า ทรานซิสเตอร์กำลัง