

เครื่องย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อผลิตปุ๋ยโดยใช้พลังงานความร้อนจากการ
เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**ORGANIC WASTE DEGRADATION FOR FERTILIZER
PRODUCTION USING LARGE-SCALE INDUCTION
HEATING SYSTEM**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

เครื่องย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อผลิตปุ๋ยโดยใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำ
สนามแม่เหล็กขนาดใหญ่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ชนเสกฐ์ ทศศิกรพัฒน์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภากา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จักริน ศรีสุวรรณนท์ : เครื่องย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อผลิตปุ๋ยโดยใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ (ORGANIC WASTE DEGRADATION FOR FERTILIZER PRODUCTION USING LARGE-SCALE INDUCTION HEATING SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 110 หน้า.

การให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) เป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนสมัยใหม่ที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งยังมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการให้ความร้อนแบบทั่ว ๆ ไป เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานแล้ว ประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ที่ประมาณ 81.3 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เตาเผาชีวมวลและขดลวดความร้อนทั้งสแตน มีประสิทธิภาพประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และ 51.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำนี้ ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางและได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนอย่างแพร่หลายอีกด้วย ดังนั้นจากความสำคัญของแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาและออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดพลังงานความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำกำลังงานสูงที่มีขนาดใหญ่เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ ให้ความร้อนกับถังอบ Bioreactor โดยตรง เพื่อใช้สำหรับย่อยสลายขยะอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ และเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพ โดยทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์ กลุ่ม Mesophilic ลงไปด้วย ซึ่งกระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์จากขยะอินทรีย์ทั้งหมดนี้จะใช้เวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง เพื่อลดปัญหาการเพิ่มขึ้นของขยะอินทรีย์ที่มีจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ และทำให้สภาพแวดล้อมเสียหายน้อยลงด้วย โดยขนาดของถังอบที่ทำการออกแบบนั้นมีขนาดความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร และความยาว 155 เซนติเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ที่มีกำลังงานสูงประมาณ 9.6 กิโลวัตต์ จำนวน 2 เครื่องเพื่อเพียงพอและเหมาะสมต่อถังอบที่ใช้ในการย่อยสลายขยะอินทรีย์จำนวนมาก ซึ่งการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนในแบบต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา จักริน ศรีสุวรรณนท์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ

JAKKARIN SRITUVANONT : ORGANIC WASTE DEGRADATION FOR
FERTILIZER PRODUCTION USING LARGE-SCALE INDUCTION
HEATING SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHANCHAI,
THONHSOPA, Ph.D., 110 PP.

LARGE-SCALE OF INDUCTION HEATING

The heater from heating induction is a new heating technology that saves energy and it is friendly to the environment. Also, its performance is more effective than the other common heater. Comparing to the energy usage, the performance of the induction circuit is approximately 81.3 percent, while the biomass tank and tungsten coil have 70 percent and 51.8 percent respectively. The heating method from induction heating has been interested in people widely, therefore, it has been applied to use as a heater in worldwide. From this important source of heating, many researchers continuously develop and design the large induction-heating machine with high energy for heating up the tank directly. The reason is to degrade the organic waste as much as possible and turn them into an effective fertilizer by adding microorganism called Mesophilic into it; the fertilizer transforming process will take no more than 24 hours. In addition, the size of the tank from researchers' design will have 100-centimeter radius and 155-centimeter length, which is very large. Literally, the result of this process is to reduce the rate of organic waste and bring back the good environment. Though, the researchers have designed the large induction-heating machine with high energy at approximate 9.6 kilowatt and use two machines in order to appropriately suit the heating tank for a large number of organic-waste degradation. This research can be

applied to many heating methods in the industry in an effective way.



School of Electronic Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature Jalekany Srituvanont

Advisor's Signature P. Chanok

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีนั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่เมตตาให้ความรู้ชี้แนะ อบรม สั่งสอน และช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนเสถียร ทศศิกรพัฒน์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ดร.สำราญ สันทาลุนย์ อาจารย์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ และคำปรึกษาการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์ กรรมการ ที่กรุณาให้ความรู้ การแนะนำแนวทางการทำงาน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำและคำปรึกษาการทำวิจัย

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือมาโดยตลอด ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จคุณค่าทั้งหลายที่ได้รับจากรายงานการศึกษาฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิต์แต่บิดามารดา และบูรพาจารย์ที่เคยอบรมสั่งสอน รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน

จักริน ศรีธวานนท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	5
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	5
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	6
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่สำหรับใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์	
2.1 บทนำ.....	16

สารบัญ(ต่อ)

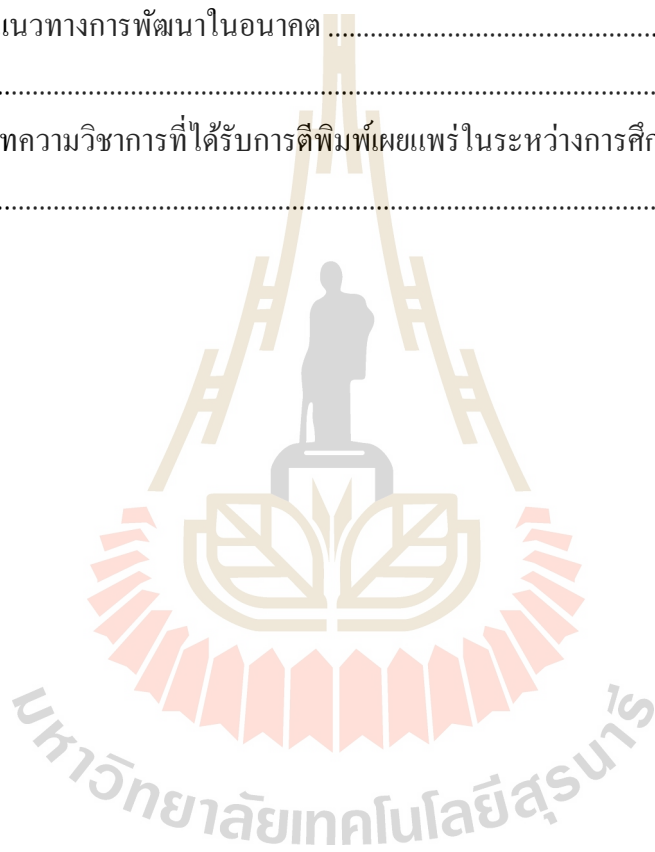
หน้า

2.2	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำความร้อนและการเหนี่ยวนำความร้อนมายังถังอบโดยตรง	16
2.2.1	ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)	16
2.2.2	ทฤษฎีการเกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ.....	21
2.2.3	ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect).....	24
2.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของกรอบเพื่อย่อยสลายขยะอินทรีย์สำหรับการใช้ในการเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงในอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมกับเชื้อจุลินทรีย์.....	34
2.3.1	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของกรอบเพื่อลดความชื้นและกำจัดขยะอินทรีย์ในถังอบ	34
2.3.2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำปุ๋ยอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับอุณหภูมิและความชื้นในถังอบ	38
2.4	สรุป	44
3	การศึกษาและออกแบบระบบสำหรับการวิเคราะห์เครื่องย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อผลิตปุ๋ยอินทรีย์โดยใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่	
3.1	บทนำ.....	45
3.2	การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน	46
3.3	การออกแบบระบบและ โครงสร้างของถังอบขนาดใหญ่สำหรับทดสอบ.....	56
3.4	การวิเคราะห์อุณหภูมิกับความชื้นและพลังงานความร้อนของขยะอินทรีย์	64
3.5	สรุป	66
4	การทดลองและผลการทดลอง	
4.1	บทนำ.....	67
4.2	วิธีการทดลอง	67
4.2.1	วิธีการทดลองเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อไปใช้กับถังอบ.....	67
4.3	ผลการทดลอง.....	67
4.4	สรุป	98

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	99
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	100
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	100
	เอกสารอ้างอิง.....	101
	ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	104
	ประวัติผู้เขียน.....	110



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่าง ๆ 27
2.2	แสดงค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของตัวนำชนิดต่าง ๆ 27
2.3	แสดงองค์ประกอบที่เป็นธาตุอาหารหลักของพืชแต่ละชนิด 39
2.4	แสดงค่าธาตุอาหารหลักต่าง ๆ สำหรับวัสดุที่นำมาขยายสลายได้ง่าย 40
2.5	แสดงค่าธาตุอาหารหลักต่าง ๆ สำหรับวัสดุที่นำมาขยายสลายได้ยาก..... 40
4.1	แสดงค่าความถี่ที่ใช้และกระแสที่ไหลคดิ่งไปในแต่ละเครื่อง 1-4 พร้อมทั้งยังแสดง ค่า Inductor (L) และ Resistor (R) ที่ใช้พันถึงแต่ละชุด เมื่อทำการปรับจูนแรงดัน เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ..... 79
4.2	ทำการวัดค่าความร้อนโดยใช้กล้องอินฟราเรดเพื่อวัดความร้อนที่เกิดขึ้นกับ ตัวถังเมื่อเวลาผ่านไปและดูค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลคดิ่งไปใช้ 80
4.3	แสดงค่า Inductor (L) และ Resistor (R) ที่ใช้พันถึงใน 1 ชุด พร้อมทั้งยังแสดงค่า ความถี่ที่ใช้และกระแสที่ไหลคดิ่ง เมื่อทำการปรับจูนแรงดันเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ 82
4.4	ทำการเปิดทดสอบเครื่องให้ความร้อน 1 เครื่องเพื่อดูระยะเวลาที่ทำให้ถึงนั้นร้อน ทั่วทั้งถึงสังเกตอุณหภูมิภายในและภายนอกถึง พร้อมทั้งค่ากระแสไฟฟ้า 83
4.5	แสดงค่า Inductor (L) และ Resistor (R) ที่ใช้พันถึงทั้ง 2 ชุด พร้อมทั้งยังแสดงค่า ความถี่ที่ใช้และกระแสที่ไหลคดิ่งของเครื่องให้ความร้อนทั้ง 2 เครื่อง เมื่อทำการ ปรับจูนแรงดันเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ 86
4.6	ทำการวัดค่าความร้อนเฉลี่ยของแต่ละชุดหลอดที่เกิดขึ้นกับตัวถังเมื่อเวลาผ่านไป และดูค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลคดิ่งไปใช้เมื่อใช้จำนวนเครื่องให้ความร้อน 2 เครื่อง กับชุดหลอดทองแดง 4 ชุด 87
4.7	หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวกซากอ้อย เปลือกมัน ขี้วัวแห้ง ประมาณ 270 กิโลกรัม แล้วนั้นทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ 89
4.8	หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวกซากไก่ตายของสดตามตลาด เศษผัก ผลไม้ รวม ๆ แล้วประมาณ 300 กิโลกรัม แล้วทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ 91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวกซากอ้อย เปลือกมัน จี๊วแห้ง ที่นำไปตากแดดให้แห้งก่อนแล้วประมาณ 330 กิโลกรัม แล้วทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ	93
4.10 หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวก filter cake เปลือกมัน จี๊วแห้ง ประมาณ 360 กิโลกรัม แล้วจากนั้นทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ	95



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนในตำแหน่งต่าง ๆ บนเหล็กตันทรงกระบอก และ (ข) แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของเหล็กตันด้านในและด้านนอก	8
1.2 ถังอบเทคโนโลยีที่ให้ความร้อนแบบอินฟราเรดจากหลอดลวดร้อนทั้งสแตน	9
1.3 โครงสร้างแบบใช้วิธีดั้งเดิมทั่วไป (Ordinary)	10
1.4 โครงสร้างเครื่องแบบใช้วิธีเรือนกระจก (Greenhouse)	10
1.5 โครงสร้างเครื่องโดยใช้วิธีแสงอาทิตย์ (Solar)	11
1.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีการเติบโต (GI) ของทั้ง 3 แบบ	11
1.7 เครื่องอบแห้งเพื่อย่อยสลายขยะอินทรีย์และเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ด้วยวิธี DHAF	12
1.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อุณหภูมิกับระยะเวลาในแบบ DHAF และแบบดั้งเดิม TSC	13
1.9 แสดงลักษณะของถังหมักและวิธีการทำดินจากขยะอินทรีย์ในแต่ละขั้นตอน	13
1.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อุณหภูมิกับระยะเวลาในแบบ SHF และแบบดั้งเดิม TF	14
1.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ความชื้นกับระยะเวลาในแบบ SHF และแบบดั้งเดิม TF	14
2.1 แสดงขนาดลดเหนี่ยวนำ	19
2.2 แสดงขนาดลดเหนี่ยวนำต่ออนุกรม	20
2.3 แสดงขนาดลดเหนี่ยวนำต่อขนาน	20
2.4 แสดงขนาดลดเหนี่ยวนำต่อผสม	21
2.5 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนบนชิ้นงาน	22
2.6 แสดงวงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง	23
2.7 (ก) วิเคราะห์ค่าความร้อนในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ลึกลงไปจากผิว และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าส่วนระยะลึกในเนื้อผิวกับความลึกผิว	25
2.8 (ก) กราฟแสดงค่าความลึกผิวกับความถี่ของวัสดุชนิดต่าง ๆ และ (ข) กราฟแสดงความลึกผิวกับความถี่ในวัสดุที่ความนำได้ดีและไม่ดีกับวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก	25
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าจำเพาะความนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ	29
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความจุความจำเพาะกับอุณหภูมิ	29
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความนำความร้อนกับอุณหภูมิ	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ.....	36
2.13 แสดงแบคทีเรียในกลุ่ม Bacillus.....	41
2.14 แสดงเชื้อราที่จะนำมาใช้ช่วยย่อยสายใยอินทรีย์.....	42
2.15 แสดงแอคติโนมัยซีต (Actinomycetes) มาย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ.....	43
3.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน.....	46
3.2 แสดงระบบของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน.....	47
3.3 แสดงระบบของวงจรกำเนิดความถี่ในส่วนต่าง ๆ.....	48
3.4 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....	49
3.5 แสดงวงจรขับกระแสไปยังสวิตซ์ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์.....	50
3.6 แสดงวงจร Isolated โดยใช้หม้อแปลง.....	51
3.7 Schematic ของวงจรชุดสร้างและขับสัญญาณพัลส์.....	52
3.8 แสดงทรานซิสเตอร์กำลังสูง (IGBT).....	53
3.9 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของไอจีบีที.....	54
3.10 กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของไอจีบีที.....	54
3.11 แสดงวงจรของ IC Gate Driver UCC21520DW.....	55
3.12 แผนภาพระบบไล่ความชื้นในขยะอินทรีย์.....	56
3.13 แสดงโครงสร้างจำลองภายนอกและภายในของถังอบรวมถึงระบบให้ความร้อน.....	57
3.14 โครงสร้างภายนอกของถังอบและระบบมอเตอร์เกียร์ลดรอบควบคุมชุดไบกวน.....	58
3.15 แกนเพลลาและชุดไบกวนภายในถังอบ.....	58
3.16 แสดงชุดลวดทองแดงที่พันรอบถังจำนวน 2 ชุด.....	59
3.17 แสดงชุดเครื่องให้ความร้อนกับถังอบจำนวน 2 ชุด.....	60
3.18 แสดงตู้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์.....	61
3.19 อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์.....	62
3.20 แสดงภาพ Schematic ของวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	63
3.21 แสดงการต่อชุดควบคุมมอเตอร์แบบสตาร์ท.....	64
4.1 วัดแรงดันบนวงจรควบคุมแรงดันแบบคงที่ 5 โวลต์.....	68
4.2 วัดแรงดันบนวงจรควบคุมแรงดันแบบคงที่ 12 โวลต์.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 (ก) วัดสัญญาณที่เข้า IC Gate Driver ขา 1 และขา 2 เทียบกับกราวด์ ชุดแรก และ (ข) สัญญาณพัลส์ขนาดแอมพลิจูด 2.29 โวลต์ ที่ความถี่ 8.89 กิโลเฮิร์ตซ์	69
4.4 (ก) วัดสัญญาณที่เข้า IC Gate Driver ขา 1 และขา 2 เทียบกับกราวด์ ชุดที่สอง และ (ข) วัดสัญญาณพัลส์ขนาดแอมพลิจูด 2.33 โวลต์ ที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์.....	69
4.5 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Gate Drive ทั้งสองช่องขา 10 และขา 15 เทียบกับขากราวด์ และ (ข) วัดสัญญาณพัลส์ที่ออกจาก IC Gate Drive ขนาด 15.3 V _{p-p}	70
4.6 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Gate Drive ทั้งสองช่องขา 10 และขา 15 เทียบกับขากราวด์ และ (ข) วัดสัญญาณพัลส์ที่ออกจาก IC Gate Drive ขนาด 14.7 V _{p-p}	70
4.7 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง A และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด 26.9 V _{p-p} และความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์	71
4.8 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง B และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด 26.9 V _{p-p} และความถี่ 8.89 กิโลเฮิร์ตซ์	71
4.9 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง C และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด 26.5 V _{p-p} และความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์	72
4.10 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง D และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด 27.3 V _{p-p} และความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์	72
4.11 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีตัวเดียวกันที่ตำแหน่ง A และ B และ (ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงานเปิดและปิด.....	73
4.12 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง A และ C ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และ (ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงานเปิด-ปิดเมื่อตัวหนึ่งเปิด ไอจีบีทีอีกตัวจะปิด.....	73
4.13 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง A และ D ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และ (ข) รูปสัญญาณที่ไอจีบีทีสลับกันทำงานเปิด-ปิดที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์	74
4.14 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีตัวเดียวที่ตำแหน่ง C และ D และ (ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงาน on และ off.....	74
4.15 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง B และ C ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และ (ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงานเปิดและปิดทำให้ไอจีบีทีเกิดความร้อนที่น้อย	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 (ก) วัดการทำงานไอจีบีที่ทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง B และ D ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน ที่ไขว้กัน และ (ข) รูปสัญญาณสลับกันทำงานเปิด-ปิดที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์.....	75
4.17 เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่นำมาใช้กับถังอบขนาดใหญ่.....	76
4.18 (ก) แสดงอุณหภูมิภายในถังบริเวณลวดทองแดง และ (ข) แสดงอุณหภูมิ ภายนอกถังบริเวณขดลวดทองแดง.....	76
4.19 ทำการพันลวดทองแดงทั้ง 4 ชุดบริเวณรอบถังอบ	77
4.20 ถังอบที่พันลวดครบ 4 ชุดพร้อมนำไปใช้งานอบย่อยสลายขยะอินทรีย์.....	77
4.21 ได้ทำการติดตั้งเครื่องให้ความร้อนกับถังอบทั้งหมด 4 ชุดพร้อมขดลวดทองแดง.....	78
4.22 เป็นรูปสัญญาณของเครื่องให้ความร้อนที่ให้กับถังอบ ความถี่ 8.892 กิโลเฮิร์ตซ์.....	78
4.23 แสดงวิธีการต่อขดลวดทั้ง 4 ชุดให้เป็นชุดเดียว.....	81
4.24 ใช้เครื่องให้ความร้อนกับถังอบเพียงเครื่องเดียวกับชุดลวดทั้ง 4 ชุด	81
4.25 (ก) แสดงรูปสัญญาณเมื่อใช้เครื่องให้ความร้อนเพียงหนึ่งเครื่องที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์ และ (ข) แสดงกระแส 30 แอมแปร์เมื่อทำการเปิดเครื่อง.....	82
4.26 แสดงวิธีการต่อขดลวดทั้ง 4 ชุดให้เป็น 2 ชุดสำหรับเครื่องให้ความร้อน 2 เครื่อง	84
4.27 ใช้เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนทั้ง 2 เครื่องให้ความร้อนกับถังอบ	85
4.28 (ก) แสดงรูปสัญญาณความถี่เครื่องให้ความร้อนชุดที่ 1 ที่ความถี่ 8.892 กิโลเฮิร์ตซ์ (ข) แสดงรูปสัญญาณความถี่เครื่องให้ความร้อนชุดที่ 2 ที่ความถี่ 8.804 กิโลเฮิร์ตซ์.....	85
4.29 ขยะอินทรีย์ที่นำมาใส่ถังอบก่อนเปิดเครื่องให้ความร้อน	88
4.30 (ก) วัสดุที่ทำกรอบย่อยสลายเรียบร้อยแล้ว และ (ข) แสดงอุณหภูมิของวัสดุ หลังการอบอยู่ประมาณ 102 องศาเซลเซียส	88
4.31 ขยะอินทรีย์ตามตลาดสดที่นำมาใส่ถังอบก่อนเปิดเครื่องให้ความร้อน	90
4.32 (ก) วัสดุหลังจากอบให้ความร้อนขยะสดเรียบร้อยแล้ว และ (ข) ทำการวัดอุณหภูมิ ของวัสดุหลังการอบอยู่ประมาณ 86.9 องศาเซลเซียส	90
4.33 ขยะอินทรีย์พวกเป็น filter cake เปลือกมัน ข้าวแห้งที่ตากแดดมาแล้วใส่ถังอบ	92
4.34 (ก) หลังจากให้ความร้อนกับขยะอินทรีย์ประมาณ 20 ชั่วโมง และ (ข) ใช้กล้อง อินฟราเรดดูความร้อนของวัสดุหลังอบ อุณหภูมิประมาณ 89.3 องศาเซลเซียส	92
4.35 แสดงวัสดุที่เป็น ฟางข้าว ข้าวแห้ง ข้าวเปลือกแห้ง ใบไม้แห้ง ซากไก่	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 (ก) หลังจากอบให้ความร้อนขณะอินทรีย์เพื่อย่อยสลายแล้ว และ (ข) วัดอุณหภูมิ วัสดุหลังจากอบให้ความร้อนแล้ว อุณหภูมิประมาณ 98.1 องศาเซลเซียส	94
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาการอบ	96
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับระยะเวลาการอบ	97
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของเครื่องเหนี่ยวนำ ความร้อนกับ ระยะเวลาการอบ	97
4.40 (ก) หลังการอบแล้วทำการพักทิ้งไว้ให้เย็นลงแล้วจึงนำบรรจุใส่ถุงปุ๋ยไว้และ (ข) หลังการเติมเชื้อจุลินทรีย์แล้วปล่อยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายต่อประมาณ 2 อาทิตย์	98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	Magnetic vector potential
B	=	magnetic flux density
C	=	capacitor
C_p	=	Specific heat of the material
D	=	electric flux density
E	=	electric field
E_{loc}	=	inside electric field
H	=	magnetic field
L	=	inductor
L_h	=	latent heat of vaporization
N	=	number of molecules
P	=	heat power source density
ρ_c	=	specific heat capacity of an object
P_D	=	penetration depth
P_o	=	Incident power on medium
P_d	=	power absorbed per unit mass
ϵ^*	=	complex permittivity
ϵ_r	=	relative permittivity
ϵ_0	=	permittivity of free space
ϵ''	=	dielectric loss factor of the material
ϵ''_{eff}	=	effective loss factor
ϵ_{eff}	=	effective dielectric constant
σ_d	=	dielectric conductivity
μ_0	=	permeability of free space
f	=	frequency
λ	=	wavelength

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ω	=	angular frequency
k	=	thermal conductivity
ρ	=	density of the material
Δ	=	delta factor
Δt	=	time duration
ΔT	=	temperature change in the material
l	=	length
χ	=	susceptibility
σ	=	electrical conductivity
T	=	temperature
q	=	power per volume
a	=	thermal diffusivity
J_s	=	forced current density
M_1	=	liquid of mass ratio
T_0	=	period
R_T	=	distribution temperature
d t	=	time delay
ν	=	magnetic reluctance
rms	=	root mean square
DC	=	direct current
SAR	=	specific absorption rate
N_p	=	turns of the coil inductance
R_w	=	equivalent resistance of the material
IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
PCB	=	printed circuit board

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการให้ความร้อนสำหรับการอบลวดความขึ้นเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์หลากหลายวิธี ทั้งการให้ความร้อนแบบใช้เตาเผาชีวมวล การให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน ซึ่งวิธีเหล่านี้ล้วนแต่สิ้นเปลืองพลังงาน และเป็นมลภาวะต่อสภาวะแวดล้อมอย่างมาก ซึ่งงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงในด้านการใช้พลังงานก็คือ การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เนื่องจากการเหนี่ยวนำความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีข้อดี คือ ง่ายและเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนที่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สามารถหาได้โดยง่ายเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบเตาเผาชีวมวลที่ต้องใช้แหล่งเชื้อเพลิง เช่น แกลบ ข้าวโพด หรือไม้ ในการเผาไหม้ชีวมวล ซึ่งหาได้ยากและมีราคาแพง อย่างที่สองไม่มีการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานแบบเตาเผาที่ต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ซึ่งทำให้มีการปล่อยมลพิษ คาร์บอนไดออกไซด์ เชื้อเพลิง เชื้อเพลิง ในการเผาไหม้ซึ่งทำให้มีการปล่อยมลพิษ คาร์บอนไดออกไซด์ เชื้อเพลิง เชื้อเพลิง ซึ่งมีการใช้งานเป็นส่วนมากในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และอย่างที่สอง แหล่งพลังงานจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนยังสามารถประยุกต์เข้ากับระบบควบคุมอัตโนมัติที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยตรงในการควบคุมและตรวจวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้การบำรุงรักษาทำได้ง่ายขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพของการใช้พลังงานแล้วประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ที่ประมาณ 81.3 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เตาเผาชีวมวลมีประสิทธิภาพประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ (Elepano, Satairapan et al. 2000) และเมื่อนำไปเทียบกับขดลวดความร้อน (Tungsten Filament) ที่สามารถใช้พลังงานจากไฟฟ้าได้โดยตรงเหมือนกันซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 51.8 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าแหล่งพลังงานจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนก็ยิ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า (Karunanithy, Shafer et al. 2016) เนื่องจากว่าแหล่งพลังงานจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าโดยตรงและสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับระบบไฟฟ้าและระบบพลังงานแสงอาทิตย์หรือระบบอื่น ๆ ได้ ซึ่งทางผู้วิจัยจะใช้หลักการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำนี้ไปประยุกต์ใช้กับถังอบที่มีขนาดใหญ่เพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ที่เป็นปัญหาอย่างมากและยังเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ให้มีคุณภาพอีกด้วย

ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยหมัก (Organic Fertilizer) เป็นปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุทางชีวเคมีโดยจุลินทรีย์กลุ่มใช้ออกซิเจน (Aerobic Microorganisms) หรือปุ๋ยที่ทำมาจากวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มาจากซากพืชและซากสัตว์ต่าง ๆ ตามตลาด โดยผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การสับ การบด การหมัก การร่อน การเติมจุลินทรีย์ หรือกลับกอง จนย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ย ปุ๋ยมีความสำคัญต่อการปรับปรุงดินทำให้ดินมีสภาพดีขึ้นและช่วยเพิ่มจุลินทรีย์พร้อมแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่าง ๆ ให้กับดินและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในธรรมชาติ พร้อมทั้งยังเป็นอาหารที่เป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืชผลต่าง ๆ อีกด้วย เพราะประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุและแร่ธาตุต่าง ๆ ทั้ง 13 ชนิดที่พืชต้องการ ดังนี้ แร่ธาตุหลัก พืชต้องการในปริมาณสูงมาก ประกอบด้วย ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แร่ธาตุรอง พืชต้องการในปริมาณที่น้อย ประกอบด้วย แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) กำมะถัน (S) และแร่ธาตุเสริม ซึ่งพืชต้องการน้อยมากแต่ขาดไม่ได้ ประกอบด้วย เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โบรอน (B) โมลิบดีนัม (Mo) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) คลอรีน (Cl) ซึ่งปุ๋ยอินทรีย์มีลักษณะทางกายภาพได้หลายแบบ เช่น ปุ๋ยผง ปุ๋ยเม็ด และปุ๋ยน้ำ แต่ที่นิยมจำหน่ายในท้องตลาดส่วนใหญ่เป็นปุ๋ยเม็ด เนื่องจากสะดวกกับเกษตรกรในการนำไปใช้ และซึ่งในปัจจุบันนั้นประเทศไทยมีปริมาณขยะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีขยะ 27.8 ล้านตันหรือคิดเป็น 74,130 ตันต่อวันเฉลี่ยเป็นปริมาณขยะ 1.14 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน โดยขยะอินทรีย์ มีสัดส่วนเป็นร้อยละ 64 ของขยะทั้งหมด (รายการสถานการณ์ขยะมูลฝอยในประเทศไทย ปี 2560 กรมควบคุมมลพิษ) และยังเป็นขยะที่หาวิธีการกำจัดได้ยากกว่าขยะแห้งและเนื่องจากมีปริมาณขยะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ การกำจัดขยะอินทรีย์ในแต่ละครั้งนั้นยังมีความรวดเร็วไม่พอ พร้อมทั้งยังกำจัดไม่ถูกวิธี เช่น นำไปกองทิ้งบนพื้นดิน นำไปทิ้งทะเล เผาในเตาเผาขยะ ฟังกลบ หมักทำปุ๋ยกลางแจ้งหรือนำไปใช้ในการผลิตเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ไบโอดีเซล น้ำหมักชีวภาพ เป็นต้น การกำจัดขยะที่กล่าวมานี้บางวิธีก็ไม่ได้เป็นการกำจัดอย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคคลและชุมชน พร้อมทั้งยังเกิดสภาวะเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อม (Yoon, Johanna et al. 2015) เกิดการปนเปื้อนของน้ำขยะในดินเป็นผลให้ดินเสื่อมคุณภาพไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมได้อีกและยังเป็นอันตรายได้เนื่องจากขยะประเภทนี้สามารถผลิตก๊าซมีเทนที่สามารถติดไฟได้และใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย (Marinella, Elena et al. 2014) รวมถึงมีการใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก และต้นทุนการกำจัดขยะประเภทนี้ยังสูงอีกด้วย ซึ่งในขยะอินทรีย์ที่ต้องกำจัดส่วนมาก ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนผักประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ผลไม้ 30 เปอร์เซ็นต์ และสัตว์ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีความชื้นสูง และมีการเน่าเสียเร็ว ถ้าหากทิ้งไว้เกิน 1 วัน จะส่งกลิ่นเหม็น ซึ่งในการออกแบบเครื่องกำจัดขยะอินทรีย์ของผู้วิจัยนี้ใช้หลักการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อทำให้ถังอบขนาดใหญ่ร้อนโดยตรงและนำมาใช้ในการเปลี่ยนขยะอินทรีย์ให้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่มีค่าความชื้นต่ำประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ (Liang, Das

et al. 2003) เพื่อใช้สำหรับการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งทำการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์เฉพาะกลุ่มที่ทนความร้อนปานกลาง (Mesophilic bacteria) คือ แบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิปานกลางซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญอยู่ในช่วง 30-45 องศาเซลเซียส มีประโยชน์ในการถนอมอาหารด้วยการหมัก เช่น การผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และใช้บำบัดน้ำเสีย พร้อมทั้งแบคทีเรีย แอคติโนมัยซิสและรา (Nair, Okamitsu et al. 2010) เมื่อคัดเลือกได้แล้วจะทำการผลิตเป็นหัวเชื้อ (inoculum) หลังจากทีวัสดุทำปุ๋ยอินทรีย์ถูกย่อยโดยความร้อนใน Bioreactor เป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิประมาณ 85-95 องศาเซลเซียส (Sutripta, Subrata et al. 2016) แล้วปล่อยให้อุณหภูมิในถังลดลงต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส จึงทำการใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic (อุณหภูมิปานกลาง) ของ แบคทีเรีย แอคติโนมัยซิส และรา ที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ช่วยย่อยส่วนประกอบของพืชและสัตว์ที่ทนทานต่อการย่อยสลาย เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และไคตินที่สามารถช่วยเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้เป็นน้ำตาลฟรุกโทสได้ (Raut, William et al. 2008) เมื่อทำการเติมจุลินทรีย์เรียบร้อยแล้วทำการเดินเครื่องมอเตอร์หมุนใบกวน โดยไม่ต้องให้ความร้อนเป็นเวลาประมาณ 45 -60 นาที หลังจากนั้นนำวัสดุบรรจุในกระสอบปุ๋ยแล้วรอให้เกิดกระบวนการหมักปุ๋ยอย่างถูกต้องครบสมบูรณ์ (Compost) ประมาณ 2-3 อาทิตย์ เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพปุ๋ย และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพได้แก่ การหาความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า รวมถึงนำไปทดสอบกับพืชผักถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น (James, Tin et al. 2008) เป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการย่อยสลายและกำจัดขยะอินทรีย์เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ดังนั้นจากที่กล่าวถึงกระบวนการกำจัดขยะอินทรีย์นั้น ที่นิยมในปัจจุบันนั้นพลังงานความร้อนเป็นปัจจัยที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการอบเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ ซึ่งเทคโนโลยีในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์นั้น โดยทั่ว ๆ ไปจะใช้วิธีการฝังกลบ และหมักจุลินทรีย์เพื่อทำปุ๋ยการแฉ่ง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 1-2 เดือน ดังนั้นจึงต้องหาเทคโนโลยีในการกำจัดขยะอินทรีย์ให้รวดเร็วและลดเวลาในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อีกระบบหนึ่งเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนจากได้หวนใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบอินฟราเรดโดยใช้ขดลวดร้อนทั้งสแตน ซึ่งมีอุณหภูมิของขดลวดร้อนทั้งสแตนอยู่ที่ประมาณ 85-95 องศาเซลเซียส และใช้วิธีบดวัสดุต่าง ๆ รวมกันนำไปใส่ในถัง ซึ่งมีการใช้ใบพัดเหล็กกวนเพื่อให้วัสดุและความร้อนกระจายตัว แต่มีค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่เหมาะสม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางและวิธีการที่จะกำจัดขยะอินทรีย์ให้เสร็จภายใน 24 ชั่วโมง โดยการออกแบบกระบวนการหมักใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับการกำจัดเหล่านี้ โดยไม่ต้องมีการบดวัสดุที่นำมาใช้และใช้หลักการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Heating) โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไปกระทำต่อถังเหล็กโดยตรงเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและก่อให้เกิดการไหลวนของกระแสทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นในตัวถังเหล็ก โดยระบบการอบแห้งนี้ต้องมีชุดให้ความร้อน

กับตัวถังอบทั้งหมด 4 ชุด เพื่อให้การกระจายความร้อนในตัวถังมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งการอบนั้นมีความสำคัญในการลดความชื้นของขยะอินทรีย์ และเป็นการกำจัดจุลินทรีย์บางชนิดและเชื้อโรคต่าง ๆ ที่มาจากขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการทางความร้อน (Jiao, Lei et al. 2018) ในอนาคตซึ่งผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์และทดสอบการทำงานของระบบการอบขยะอินทรีย์ ทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพของการใช้พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า และระยะเวลาในการอบไล่ความชื้นในขยะอินทรีย์ โดยที่จะทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิภายในของตัวถังอบในแต่ละตำแหน่งและอุณหภูมิของขยะอินทรีย์ภายในตัวถัง เพื่อดูความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความชื้นของขยะอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป เพื่อนำมาวิเคราะห์และหาความเหมาะสมของการใช้พลังงานความร้อน และระยะเวลาในการอบขยะอินทรีย์ทำให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ที่มีกำลังงานสูง และมีประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานได้จริง
- 1.2.2 ออกแบบสร้างถังอบขนาดใหญ่พร้อมทั้งระบบควบคุมใบกวน
- 1.2.3 เพื่อกำจัดขยะอินทรีย์และเปลี่ยนขยะอินทรีย์ให้กลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง โดยใช้จุลินทรีย์มาช่วยย่อยสลาย

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การให้พลังงานความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับถังอบในการกำจัดขยะอินทรีย์เพื่อจะช่วยให้การกำจัดขยะอินทรีย์นี้มีคุณภาพและประสิทธิภาพที่ดีกว่าการกำจัดขยะแบบการให้ความร้อนแบบเตาเผาชีวมวลหรือการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ ซึ่งผลที่ได้คืออุณหภูมิของขยะอินทรีย์ในถังอบจะมีค่าคงที่ ทำให้เมื่อนำไปย่อยต่อด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Mesophilic แล้วจะทำให้เกิดเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงยิ่งขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ออกแบบถังอบขยะอินทรีย์ซึ่งมีขนาดโดยประมาณที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร ความยาว 155 เซนติเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร ถังมีความสูงจากพื้น 180 เซนติเมตร และมีชุดใบกวน 5 ชุด อยู่ภายในถังอบ

1.4.2 ออกแบบเครื่องให้ความร้อนโดยใช้หลักการขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ ในการเหนี่ยวนำให้ตัวถังอบนั้นมีความร้อนโดยตรง ซึ่งใช้ขดลวดทองแดงที่ต่ออนุกรมกันจำนวน 2 ชุด เพื่อให้สำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน 2 เครื่อง

1.4.3 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดขยะอินทรีย์แล้วจึงทำการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic ของ แบคทีเรีย แอคทีโนมัยซีส และรา เพื่อให้จุลินทรีย์เหล่านี้ทำการย่อยวัสดุให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์อย่างสมบูรณ์

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนและวิธีการกำจัดขยะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.5.2 ออกแบบสร้างเครื่องสำหรับกำจัดขยะอินทรีย์ครั้งละไม่เกิน 500 กิโลกรัม โดยใช้พลังงานความร้อนจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ จำนวน 2 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องให้กำลังงานไฟฟ้าประมาณ 9.64 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิรตซ์

1.5.3 ทดสอบและเก็บผลเครื่องกำจัดขยะอินทรีย์ขนาดใหญ่เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการใช้กำลังงาน อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วในการกำจัดขยะอินทรีย์ รวมถึงวิเคราะห์คุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ที่เกิดขึ้น

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

ศึกษาและสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีในปัจจุบันเพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจและออกแบบเครื่องกำจัดขยะอินทรีย์ให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยประยุกต์ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนจากวงจรเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เพื่อนำความร้อนเข้าสู่ถังโดยตรง เมื่อระบบพร้อมใช้งานจึงทำการทดสอบการทำงานของระบบและทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของระบบดังนี้ อุณหภูมิของขยะอินทรีย์ในตัวถัง น้ำหนักและความชื้นของขยะอินทรีย์ที่เปลี่ยนไป คุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมในเรื่องของการใช้กำลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนกับระยะเวลาในช่วงการทำงานต่าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วจึงทำการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ และจัดทำรายงาน

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1.6.2.1 ศึกษาค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.6.2.2 วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการถึงวิธีการกำจัดขยะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพ อย่างรวดเร็วภายใน 24 ชั่วโมง โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากวงจรเหนี่ยวนำขนาดใหญ่

1.6.2.3 สร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้พลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาในการกำจัดขยะอินทรีย์ อุณหภูมิของขยะและถังอบ น้ำหนักและความชื้นที่เปลี่ยนไปรวมถึงประสิทธิภาพของปุ๋ยอินทรีย์

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 3 (F3) และห้องปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกษตร (F14) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.6.4.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.6.4.2 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

1.6.4.3 กล้องวัดความร้อนแบบอินฟราเรด (Thermal Imaging Camera)

1.6.4.4 มิเตอร์วัดค่า LCR (Handheld Capacitance and LCR Meters)

1.6.4.5 มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Multimeter)

1.6.4.6 โพรบวัดความชื้น (Moisture Meter)

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.6.5.1 เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.6.5.2 เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้าง และวัดผลการทดสอบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ อุณหภูมิ น้ำหนักและความชื้นของขยะอินทรีย์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

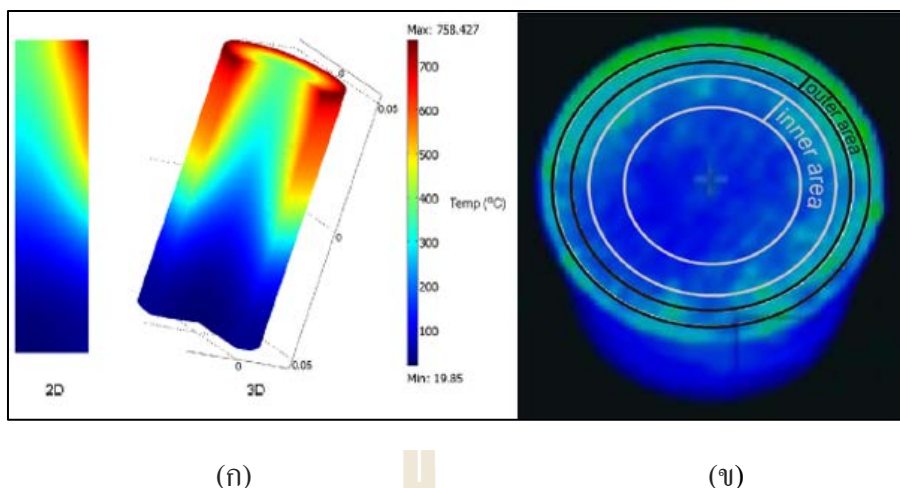
1.7.1 ได้เครื่องอบสำหรับการกำจัดขยะอินทรีย์โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ ที่สามารถให้พลังงานความร้อนได้สูงกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบเดิมที่มีอยู่แล้ว เพื่อลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงและทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และจะทำให้ได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง

1.7.2 ได้องค์ความรู้ในเรื่องของการออกแบบแหล่งพลังงานความร้อนจากวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่และระบบควบคุมต่าง ๆ ซึ่งเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานหรือโรงงานต่าง ๆ ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ เพื่อยกระดับให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

1.8 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาและออกแบบระบบสำหรับไล่ความชื้นในขณะอินทรีย์โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อน สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก ส่วนแรก คือ ส่วนของการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อเหนี่ยวนำทำให้ถังอบร้อนโดยตรงสำหรับนำไปใช้อบขณะอินทรีย์ในถังหมักและส่วนที่สอง คือ ส่วนของการออกแบบระบบการอบแห้งสำหรับลดความชื้นและย่อยสลายขณะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับเหล็กคันทรงกระบอกซึ่งเป็นงานวิจัยของ Matej Kranjc และคณะ (Matej, Anze et al. 2008) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของการเกิดความร้อนที่ตัวเหล็กคันทรงกระบอก และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความนำความร้อน ค่าความนำไฟฟ้า และค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยวัสดุที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิค่าความนำไฟฟ้า (σ) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C) และค่าความนำความร้อน (λ) เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิส่วนวัสดุที่เป็นเหล็กที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั้น จะมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.39 เมกกะเซกกันต่อเมตร และค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 500 จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน และค่าความนำความร้อนเท่ากับ 16 วัตต์ต่อเคลวินเมตร ซึ่งส่งผลมาจากการเหนี่ยวนำกระแสของขดลวดที่พันอยู่รอบแท่งเหล็กคันทรงจำนวน 4 รอบ และทำการป้อนความถี่ทดสอบที่ 101 กิโลเฮิร์ตซ์ให้กับขดลวดเป็นระยะเวลา 55 วินาที หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ถูกเหนี่ยวนำในตำแหน่งต่าง ๆ บนเหล็กคันทรง ดังรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าบริเวณผิวเหล็กคันทรงจะมีอุณหภูมิที่สูงประมาณ 700 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ลึกลงไปในผิวประมาณ 10 เซนติเมตร ที่มีอุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากความสามารถในการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็กในตัวชิ้นงานที่มีความถี่ยิ่งสูงจะทำให้ความสามารถในการทะลุผ่านน้อยลง จึงทำให้เกิดกระแสไหลวนที่บริเวณผิวมากกว่าบริเวณที่ลึกลงไปในผิว เป็นผลให้อุณหภูมิที่บริเวณผิวมีค่าสูงกว่าที่ลึกลงไปในผิวอย่างชัดเจน และเนื่องจากการทดลองนี้ได้พันขดลวดเฉพาะในช่วงบนจึงทำให้ช่วงล่างของแท่งเหล็กมีอุณหภูมิที่ต่ำจึงเป็นการยืนยันว่าการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำสามารถควบคุมให้เกิดความร้อนในตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานได้



รูปที่ 1.1 (ก) ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนในตำแหน่งต่าง ๆ บนเหล็กตันทรงกระบอก และ (ข) แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของเหล็กตันด้านในและด้านนอก

ได้ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในและภายนอกของวัสดุที่เป็นเหล็กตันทรงกระบอก โดยวัดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยออกมาโดยที่ผิวด้านนอกนั้นจะมีอุณหภูมิอยู่ประมาณ 573 องศาเซลเซียส และด้านในบริเวณที่ลึกลงไปประมาณ 10 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมิอยู่ประมาณ 460 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นเหตุผล ในเรื่องของการเลือกรูปแบบของแหล่งพลังงานความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนกับตัวถังอบโดยตรง เพื่อลดความชื้นวัสดุภายใน เนื่องจากถังอบมีขนาดที่ใหญ่และมีน้ำหนักมากจึงจำเป็นต้องใช้ชุดวงจรเหนี่ยวนำมากกว่าหนึ่งชุดเพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิตัวถังอบให้มีอุณหภูมิที่คงที่มากที่สุดตลอดทั้งถังอบ ซึ่งในข้างต้นได้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบในส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้วงจรเหนี่ยวนำความร้อนเป็นแหล่งพลังงาน ต่อไปผู้วิจัยจะกล่าวถึงในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการอบเพื่อลดความชื้นและกำจัดขยะอินทรีย์โดยใช้วิธีการเหนี่ยวนำความร้อนและวิธีต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพ

เครื่องกำจัดขยะอินทรีย์ขนาดใหญ่เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีจากประเทศไต้หวันโดยใช้กระบวนการให้ความร้อนกับตัวถัง เป็นแบบระบบหลอดรังสีอินฟราเรด (Electric Infrared Heating) คลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 780-1400 นาโนเมตร โดยตัวปล่อยคลื่นคือ หลอด Tungsten Filament ซึ่งจะแผ่รังสีมาที่ถังอบโดยตรง ทำให้ถังอบร้อนซึ่งจะคิดไว้ที่ด้านหลังถัง และภายในถังมีใบกวนที่ควบคุมด้วยระบบมอเตอร์และเกียร์ทดรอบ โดยอุณหภูมิของถังอบจะอยู่ที่ประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้เวลา 24 ชั่วโมง ในการกำจัดขยะอินทรีย์ หลังจากอบเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์เสร็จแล้วจึงนำใส่ถุงปุ๋ยแล้วใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์ทำการย่อยต่ออีก

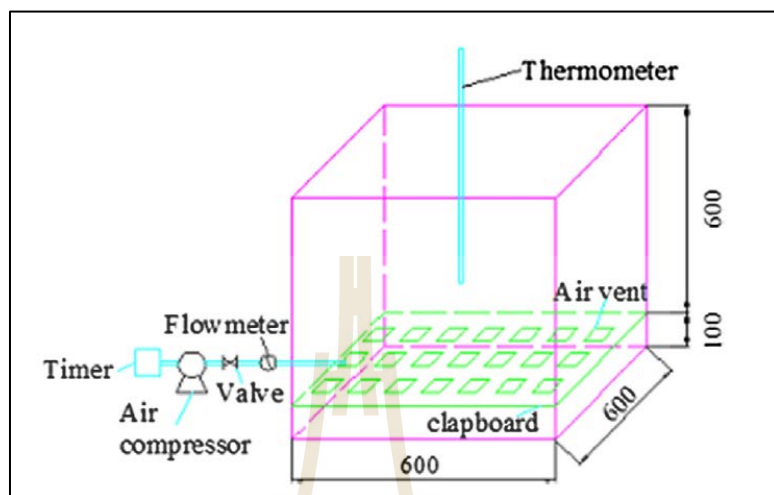
ประมาณ 4 อาทิตย์ เพื่อที่จะได้ปุ๋ยอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเครื่องนี้ใช้หลอดร้อน Tungsten Filament เป็นแหล่งพลังงานความร้อน จึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง และราคาแพง ปกติราคาของหลอดรังสีอินฟราเรด โดยทั่วไปที่มีขนาดหลอดยาวประมาณ 1 เมตร มีราคาเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10,000 บาทต่อกิโลวัตต์ ดังรูปที่ 1.2 โดยที่ติดอยู่กับถังอบขยะอินทรีย์นั้นนั้นใช้จำนวนหลอด ขนาด 3 กิโลวัตต์ จำนวนประมาณ 7 หลอด ซึ่งใช้ขนาดกำลังไฟฟ้าอยู่ประมาณ 21 กิโลวัตต์



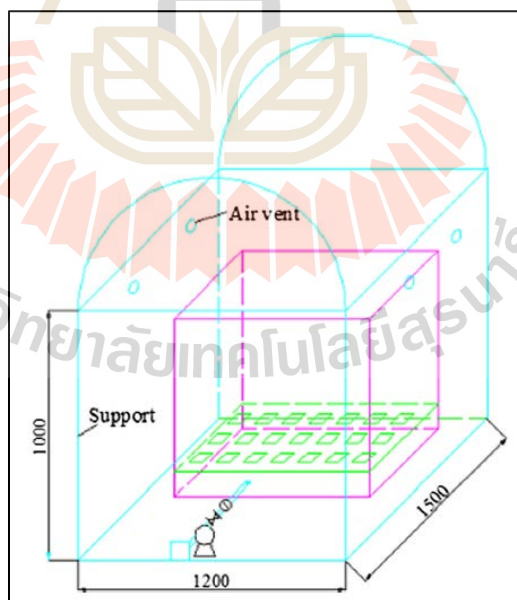
รูปที่ 1.2 ถังอบเทคโนโลยีที่ให้ความร้อนแบบอินฟราเรดจากหลอดลวดร้อนทั้งสแตน

จากงานวิจัยของ Yiqun Chen และคณะ (Yiqun, Fang et al. 2014) ได้ศึกษาวิธีการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในการหมักและกำจัดกากตะกอนน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งกากตะกอนน้ำเสียนั้นมีสารที่เป็นอันตรายต่อคน และสภาพแวดล้อมซึ่งประกอบไปด้วยแบคทีเรีย ไวรัส สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ไม่ดี ซึ่งการกำจัดหลักในปัจจุบันจะใช้วิธีการเผาให้เป็นถ่าน และการฝังกลบบนพื้นดิน ซึ่งวิธีเหล่านี้ส่งผลให้เกิดก๊าซพิษต่าง ๆ เช่น CH_4 , CO_2 , SO_2 โดยการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 3 แบบ แบบแรกใช้วิธีดั้งเดิมทั่วไป (Ordinary) ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดที่ปลอดภัยและเป็นวิธีการทางธรรมชาติที่ใช้จุลินทรีย์ในการช่วยย่อยสลายซึ่งสามารถผลิตปุ๋ยหมักได้ในปัจจุบันนั้นการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ (Compost) โดยสมบูรณ์แบบนั้น แบ่งได้เป็นวิธีการหมักแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic composting) และแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการหมัก (Anaerobic composting) ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังรูปที่ 1.3 แบบที่สองใช้วิธีเรือนกระจก (Greenhouse) เป็นอีกเทคโนโลยีที่สามารถรักษาอุณหภูมิภายในถังไว้ได้โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์วิธีการนี้มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจมากเพราะต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ ดังรูปที่ 1.4 และ แบบที่ 3 ใช้วิธีแสงอาทิตย์ (solar) โดยเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน

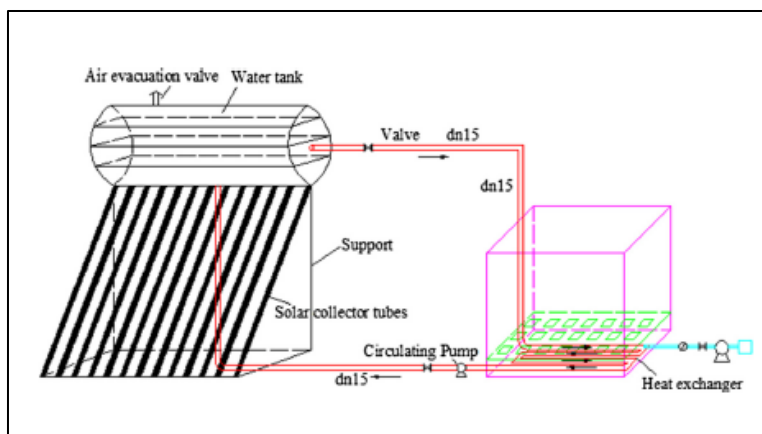
ให้กับน้ำทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นและใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศก่อนน้ำเสีย ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนที่สุดและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.3 โครงสร้างแบบใช้วิธีดั้งเดิมทั่วไป (Ordinary)

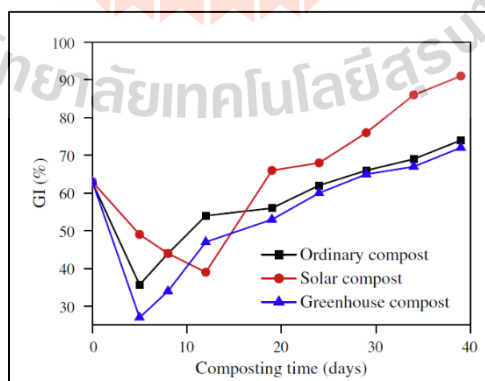


รูปที่ 1.4 โครงสร้างเครื่องแบบใช้วิธีเรือนกระจก (Greenhouse)



รูปที่ 1.5 โครงสร้างเครื่องโดยใช้วิธีแสงอาทิตย์ (Solar)

ในการทดลองแบบที่ 2 และ 3 นั้นจะใช้พลังงานแสงอาทิตย์เหมือนกัน หลังจาก 40 วันในการหมักทำปุ๋ยทั้ง 3 แบบแล้ว เครื่องหมักแบบ Solar ได้ให้เสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าทั้งสองระบบ และเป็นวิธีการหมักกักตุนน้ำเสียเพื่อทำปุ๋ยอย่างสมบูรณ์แบบ ซึ่งข้อเสียในระหว่างการหมักนั้นในโตรเจนจะมีการสูญเสียไปเป็นแอมโมเนียในอากาศ ทำให้เกิดมลภาวะทางกลิ่น และสูญเสียสารอาหารไป จึงต้องทำการผสมกับขี้เลื่อยและเศษใบไม้เพื่อให้อัตราส่วน C/N ดีที่สุดประมาณ 30 : 1 ส่วนข้อดีคือสามารถรักษาอุณหภูมิได้มากกว่า 55 องศาเซลเซียส นานกว่า 3 วัน และสามารถลดผลรวมคาร์บอนต่อผลรวมไนโตรเจน (TC/TN) ได้ 31.3 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มค่าดัชนีการเจริญเติบโต (GI) ได้สูงถึง 91 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีการเติบโต (GI) ของทั้ง 3 แบบ

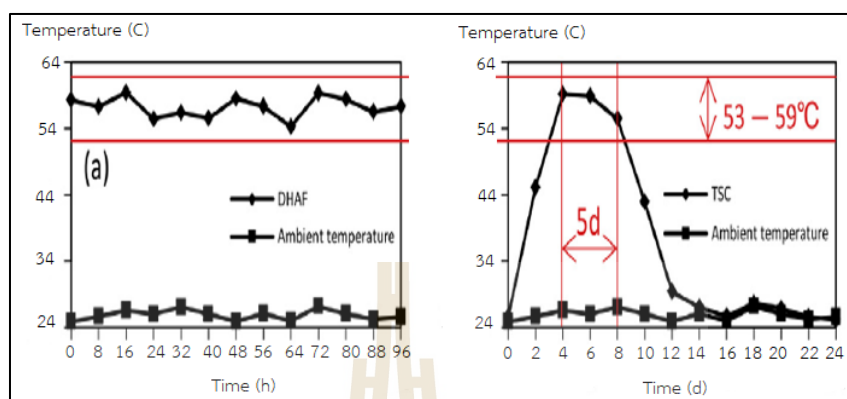
จากงานวิจัยของ Yang Jiang และคณะ (Yang, Meiting et al. 2015) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดขยะอินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงภายใน 96 ชั่วโมง ด้วยวิธี Dynamic high-temperature aerobic fermentation (DHAF) ซึ่งเป็นการหมักปุ๋ยที่ต้องการอากาศเพื่อสร้างพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ด้วยเอนไซม์ เช่น การหมักกรดซิตริก กรดน้ำส้ม โดยวิธีการทดลองนี้จะกำจัดขยะอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ดีเนื่องจากมีปริมาณไขมันสูง (15-40 เปอร์เซ็นต์) และมีความชื้นมาก (65-80 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจะใช้ความร้อน (Heating jacket) สูงไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และมีปั๊มลม (Air pump) ไว้เพื่อควบคุมอุณหภูมิ เพราะจะทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์บางชนิดตายได้ โดยวิธีการทดลองนี้ได้ทำการผสมปุ๋ยหมัก (Matured compost) กับขยะอินทรีย์ (Food Waste) ในอัตราส่วน 41.6 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 58.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขยะอินทรีย์ที่นำมาใช้ทดลองนั้นมีส่วนผสมข้าวหุงสุก 18.2 กิโลกรัม กะหล่ำปลี 14 กิโลกรัม เนื้อหมูที่สุกแล้ว 7 กิโลกรัม แล้วจึงนำไปใส่ถังอบ (Bioreactor) ที่มีใบกวนอยู่ภายใน ดังรูปที่ 1.7 โดยตั้งอุณหภูมิถังอบไว้ที่ประมาณ 53-59 องศาเซลเซียส และตั้งรอบการหมุนของมอเตอร์ไว้ที่ 20 รอบต่อนาที ให้หมุนไปและกลับ



รูปที่ 1.7 เครื่องอบแห้งเพื่อย่อยสลายขยะอินทรีย์และเปลี่ยนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ด้วยวิธี DHAF

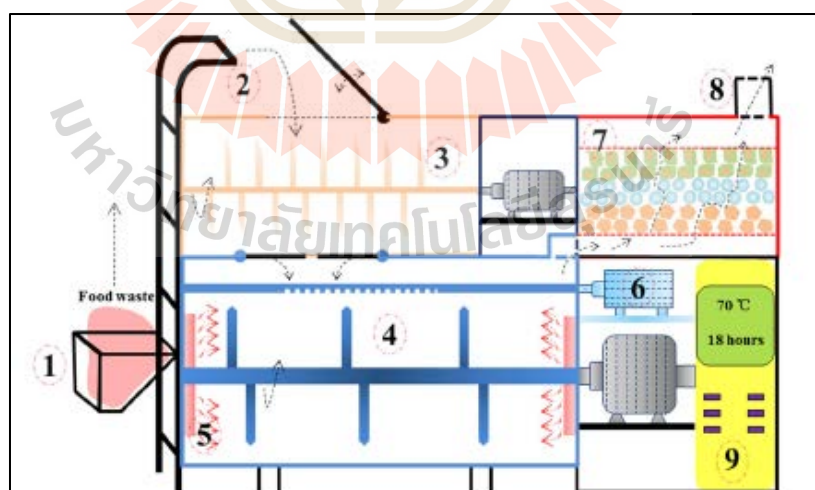
จากนั้นอบให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง โดยรักษาอุณหภูมิไว้ให้คงที่เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมีความสำคัญในการอบขยะอินทรีย์อย่างมาก เสร็จแล้วให้นำตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์มีขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร ที่ลึกลงไป 30 เซนติเมตร ที่ได้นี้มาทดสอบวัดค่าความนำไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.35 มิลลิเซกต์ต่อเซนติเมตร วัดค่า pH มีค่าเท่ากับ 7.7 วัดค่าอัตราส่วนผลรวมคาร์บอนต่อผลรวมไนโตรเจน (TC/TN) เท่ากับ 17.4 และ วัดค่าการละลายน้ำของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (DC/DN) มีค่าเท่ากับ 7.6 ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงถึงคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ที่ดีในระยะเวลา

อันรวดเร็วและมีผลคล้ายกับการทดลองปุ๋ยแบบดั้งเดิม traditional static composting (TSC) ที่ใช้เวลา 1-2 เดือน ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์



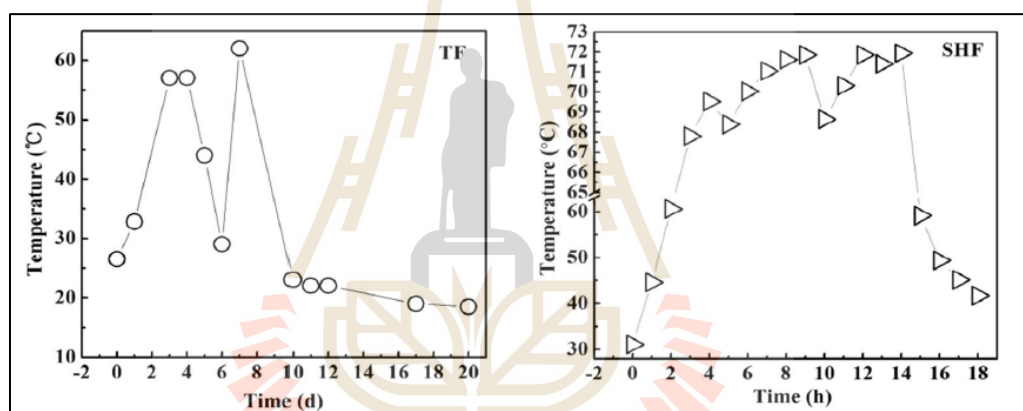
รูปที่ 1.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อุณหภูมิกับระยะเวลาในแบบ DHAF และแบบดั้งเดิม TSC

จากงานวิจัยของ Jiaqi Hou และคณะ (Jiaqi, Beidou et al. 2017) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหาร (Food waste) เพื่อเปลี่ยนเป็นดินที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกในระยะเวลาอันสั้นโดยใช้วิธีการหมักแบบ short-duration hydrothermal fermentation (SHF) ดังรูป 1.9

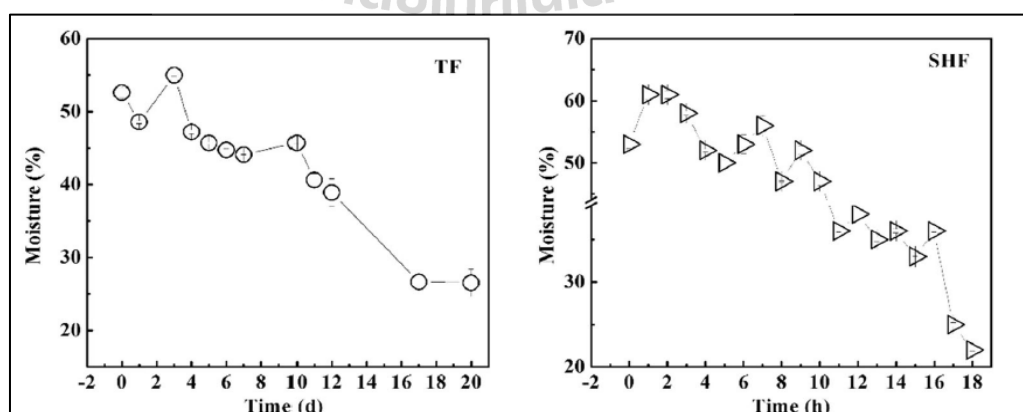


รูปที่ 1.9 แสดงลักษณะของถังหมักและวิธีการทำดินจากขยะอินทรีย์ในแต่ละขั้นตอน

โดยการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยความร้อนแบบ SHF นั้น จะอบขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส โดยเริ่มต้นที่ชั่วโมงที่ 5 ถึงชั่วโมงที่ 15 และใช้เวลาทั้งหมด 18 ชั่วโมง โดยไม่มีการเติมจุลินทรีย์ไปช่วยย่อย และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการหมักขยะอินทรีย์แบบดั้งเดิม (TF) อุณหภูมิของขยะอินทรีย์ จะอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 3 ถึงวันที่ 8 และหลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลง โดยจะใช้เวลาในการทำดินทั้งหมด 20 วัน ซึ่งความร้อนนั้นมีผลต่อความเร็วในการอบ และลดขนาดวัสดุให้เล็กลง ดังรูปที่ 1.10 โดยขั้นตอนการทำดินในถังอบนั้นมีความชื้นของขยะอินทรีย์เริ่มต้นอยู่ประมาณ 55-65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อหมักขยะอินทรีย์แบบดั้งเดิม (TF) ความชื้นในถังจะค่อยๆ ลดลง เหลือประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1/2 ของจำนวนขยะทั้งหมด และเมื่อหมักขยะอินทรีย์แบบ SHF ความชื้นของวัตถุดิบจะเหลือประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ หรือ 2/5 ของจำนวนขยะทั้งหมด ซึ่งความชื้นนี้มีผลกับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในขยะอินทรีย์ ดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.10 เปรียบเทียบความสัมพัทธ์อุณหภูมิกับระยะเวลาในแบบ SHF และแบบดั้งเดิม TF



รูปที่ 1.11 เปรียบเทียบความสัมพัทธ์ความชื้นกับระยะเวลาในแบบ SHF และแบบดั้งเดิม TF

ส่วนค่า pH เริ่มต้นอยู่ประมาณ 6.17 เมื่อทำการหมักแล้วแบบ TF ค่า pH จะอยู่ประมาณ 8.13 ส่วนแบบ SHF ค่า pH จะอยู่ประมาณ 7.96 รวมถึงวัดค่าอัตราส่วนผลรวมคาร์บอนต่อผลรวมไนโตรเจน (TC/TN) เมื่อทำการหมักขยะเสร็จแล้ว แบบ TF อยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และแบบ SHF จะอยู่ประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะได้ดินที่มีคุณภาพ ที่ผลิตมาจากวิธี short-duration hydrothermal fermentation นั้นมีสารอาหารสูงและสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดินได้ดีกว่าแบบดั้งเดิม



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องเหนี่ยวนำ ความร้อนขนาดใหญ่สำหรับใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์

2.1 บทนำ

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบระบบสำหรับการกำจัดขยะอินทรีย์ที่เน่าเสียเร็วให้เสร็จภายใน 24 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากหลักการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) ทำการเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในถังอบ (Bioreactor) ก่อให้เกิดความร้อนมายังถังอบ โดยตรงซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนนี้สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีมลพิษ และยังประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านอื่น ๆ ซึ่งในบทนี้สามารถแบ่งเป็นส่วนที่สำคัญได้สามส่วนดังนี้

1. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำความร้อนและการเหนี่ยวนำความร้อนมายังถังอบโดยตรง
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของการอบเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์สำหรับใช้ในการเปลี่ยนขยะอินทรีย์ให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง ในอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมกับเชื้อจุลินทรีย์
3. สรุป

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำความร้อนและการเหนี่ยวนำความร้อนมายังถังอบโดยตรง

หัวข้อนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงตัวเหนี่ยวนำ หลักการและทฤษฎีให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ในการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ และผลกระทบเชิงผิว (Skin effect)

2.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง โดยมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี ซึ่งลักษณะของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นการนำเอาลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวดอาจพันบนแกนชนิดต่าง ๆ ซึ่งส่วน

มากแกนเป็นแม่เหล็กที่ทำมาจากเหล็ก เฟอร์ไรต์ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวขดลวดเมื่อกระแสไหลผ่านตัวขดลวด พลังงานจะถูกเก็บไว้ชั่วคราวในรูปสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสนั้นเปลี่ยนแปลงจะทำให้สนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลาเกิดแรงดันไฟฟ้าในตัวนำ ซึ่งค่าการเหนี่ยวนำเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น ซึ่งการเหนี่ยวนำนี้จะถูกกำหนดโดยปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กผ่านวงจрдังสมการที่ 2.1

$$L = \frac{d\Phi}{di} \quad (2.1)$$

โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)
 Φ คือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์)
 i คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กสอดคล้องซึ่งตามกฎของแอมแปร์ (Sang, Ismail et al. 2007) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดตัวนำ เมื่อลวดตัวนำไม่มีกระแสไหลผ่าน สนามแม่เหล็กจะเป็นศูนย์แต่เมื่อลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ลวดตัวนำ ดังสมการที่ 2.2

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.2)$$

ตามกฎของไมเคิล ฟาราเดย์ เป็นปรากฏการณ์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในขดลวดจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแปรผันโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ถ้ามีจำนวนขดลวดจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุก ๆ รอบ ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดแต่ละรอบจะมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้จาก ดังสมการที่ 2.3 จากสภาวะดังกล่าวทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

$$P = \frac{\varepsilon^2}{R} = I^2 R \quad (2.4)$$

โดยที่	B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา (เทสลา)
	μ_0 คือ ความซาบซึมได้ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (เฮนรีต่อเมตร)
	I คือ กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่อยู่ภายในเส้นทางปิดล้อม (แอมแปร์)
	r คือ รัศมีของลวดตัวนำ (เมตร)
	R คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
	ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โวลต์)
	N คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
	P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
	$\frac{d\phi}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา

ลวดหรือตัวนำอื่น ๆ จะสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไหลผ่าน ดังนั้นทุกตัวนำมีค่าการเหนี่ยวนำซึ่งไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดลวดเข้าไปในคอยล์ ซึ่งการเพิ่มจำนวนเส้นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นการเพิ่มสนามแม่เหล็กและเพิ่มการเหนี่ยวนำ โดยยิ่งพันมารอบจำนวนเส้นฟลักซ์และค่าการเหนี่ยวนำก็ยิ่งสูงการเหนี่ยวนำยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของคอยล์และปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมาย ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ 4 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยแรก จำนวนรอบของขดลวดเขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเพิ่มมากขึ้นด้วย จากนั้นจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำ และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็ก (ฟลักซ์) จำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด ปัจจัยที่สอง พื้นที่หน้าตัดของแกนเขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่หน้าตัดของแกนมากขึ้น จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก (ฟลักซ์) มีจำนวนมากขึ้นด้วย ส่งผลให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำ จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของแกน ปัจจัยที่สาม วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ, เหล็ก, เฟอร์ไรต์, โคนบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่า ค่าความซาบซึม (Permeability)

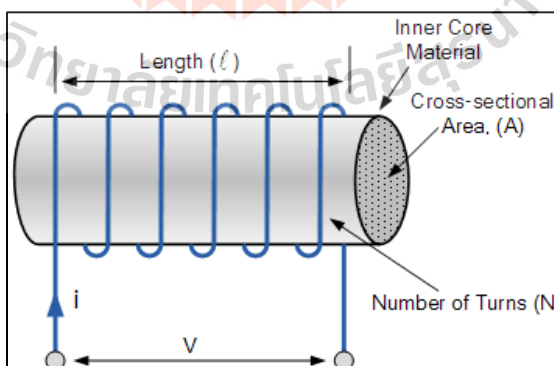
แตกต่างกัน ในกรณีที่มีความซาบซึ่มมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความซาบซึ่มของแกน และปัจจัยที่ดี ความยาวของแกนเขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนขยายออกผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดจะมีปริมาณลดลง แต่ถ้าความยาวของแกนสั้นลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมกันทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของแกน

ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด พื้นที่หน้าตัดของแกน และความยาวของแกน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นแกนซึ่งจะมีค่าคงตัวที่เรียกว่าค่าความซาบซึ่มทางแม่เหล็ก (permeability) ของแกน กรณีขดลวดแกนอากาศ ค่าความซาบซึ่มให้ซึมผ่านได้ประมาณเท่ากับที่ว่างหรือสุญญากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร และของเหล็กมีค่า 6.3×10^{-3} เฮนรีต่อเมตร ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.5

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.5)$$

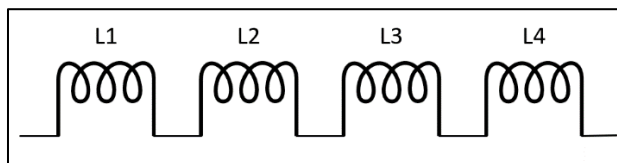
โดยที่

- N คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
- μ คือ ค่าความซาบซึ่มวัสดุที่นำมาทำเป็นแกน (เฮนรีต่อเมตร)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (ตารางเมตร)
- l คือ ความยาวของแกน (เมตร)



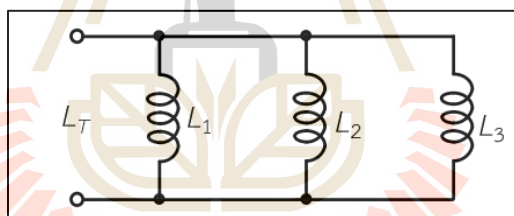
รูปที่ 2.1 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำ

การต่อวงจรตัวเหนี่ยวนำ การต่อวงจรตัวเหนี่ยวนำ มีอยู่ 3 แบบแรกคือ การต่อวงจรอนุกรม คือ การนำเอาตัวเหนี่ยวนำตั้งแต่ 2 ตัว ขึ้นไปมาต่ออนุกรมหรือการต่อลักษณะนี้เป็นการเพิ่มความยาวให้กับขดลวด มีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมเพิ่มขึ้น $L_T = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ ดังรูปที่ 2.2



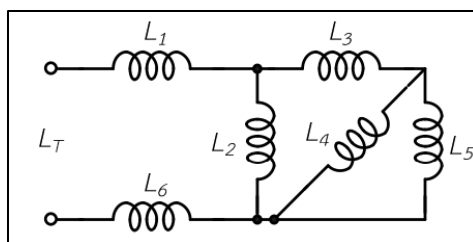
รูปที่ 2.2 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำต่ออนุกรม

แบบสองการต่อวงจรขนาน คือการนำเอาตัวเหนี่ยวนำตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาต่อขนานกัน ค่าความเหนี่ยวนำรวมทั้งหมด จะมีค่าน้อยกว่าค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าน้อยที่สุดที่ต่ออยู่ในวงจร $1/L_T = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + 1/L_4$ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำต่อขนาน

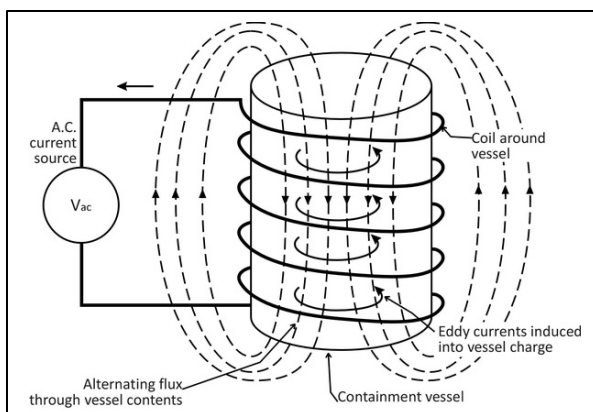
แบบที่สามการต่อวงจรตัวเหนี่ยวนำแบบผสม คือการนำเอาตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมและขนานกัน ค่าความเหนี่ยวนำ รวมทั้งหมด จะต้องมีการวิเคราะห์หว่าต่อกันในลักษณะใด การคำนวณค่าจะใช้วิธีเดียวกับการต่อวงจร ผสมของตัวต้านทาน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำต่อผสม

2.2.2 ทฤษฎีการเกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบเตาเผาชีวมวล (Biomass Heating) การให้ความร้อนแบบหลอดรังสีอินฟราเรด (Electric Infrared Heating) และสูงกว่าการให้ความร้อนในแบบอื่น ๆ (Jeerasak, Jirasak et al. 2014) โดยการให้ความร้อนด้วยวิธีการเหนี่ยวนำนั้นใช้หลักการคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดก่อให้เกิดถ่ายเทพลังงานผ่านสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งเมื่อใส่ชิ้นโลหะก็คือถึงเหล็กเข้าไปในสนามแม่เหล็กนี้ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าบนชิ้นผิวโลหะในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดความร้อนขึ้นในโลหะ โดยกระบวนการให้ความร้อนนี้สามารถใช้กับกระบวนการให้ความร้อนลักษณะต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมโลหะได้อย่างรวดเร็ว (Shih, Sheng et al. 2014) ได้แก่ การให้ความร้อนโลหะทั้งชิ้น การให้ความร้อนเฉพาะผิวโลหะ และการหลอมโลหะ เป็นต้น การค้นพบของไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) กล่าวว่า ไฟฟ้าเกิดจากการที่เส้นแรงแม่เหล็กตัดกับขดลวดจึงเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced current) ซึ่งกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ตัดกันของสนามแม่เหล็กกับขดลวด และเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำบริเวณผิวของโลหะ ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ผิวของชิ้นโลหะ สรุปความร้อนที่เกิดบนผิวโลหะนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสเหนี่ยวนำรวดเร็ว (Lenka, Andrej et al. 2016) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนบนชิ้นงาน

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของอินดักชันฮีตติ้ง (Induction heating) คล้ายกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสสลับจากด้านปฐมภูมิแปลงไปยังด้านทุติยภูมิ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสสลับมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลง และยังทำหน้าที่ในการถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าไปยังด้านทุติยภูมิด้วยความถี่เท่าเดิม โดยถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าให้กับแกนเหล็กที่เกิดเป็นพลังงานความร้อนแล้ว พลังงานไฟฟ้าในขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านทุติยภูมิต้องมีค่าเท่ากัน ดังสมการที่ 2.6

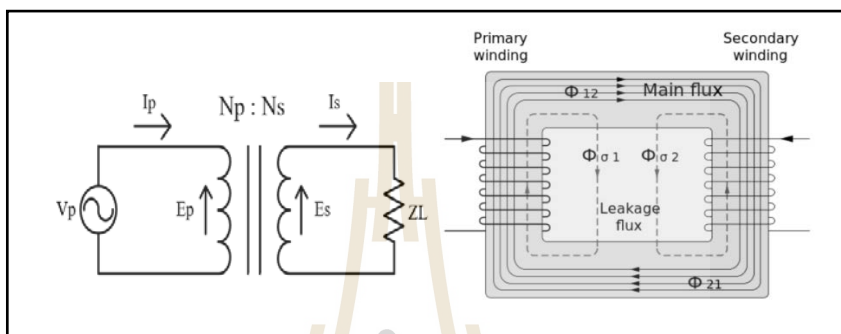
$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = A_v \quad (2.6)$$

โดยที่

- A_v คือ Potential Transformer Ratio
- E_p คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ (โวลต์)
- E_s คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิ (โวลต์)
- V_p คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดปฐมภูมิ (โวลต์)
- V_s คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิ (โวลต์)
- N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ (รอบ)
- N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ (รอบ)

เมื่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิพันเพียงรอบเดียวจะทำให้ $N_s = 1$ ซึ่งหมายถึงการลัดวงจรทางทุติยภูมิ ซึ่งโหลดเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิที่ลัดวงจรอยู่ในขดลวดปฐมภูมิที่ทำหน้าที่สร้าง

สนามแม่เหล็กเคลื่อนผ่านโหลดจึงเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนที่โหลดและทำให้เกิดการสูญเสียทางความร้อนเพิ่มขึ้น โดยการสูญเสียทางความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไหลวน (I_{eddy}) และความต้านทานของโหลด (Z_L) เป็นตามสมการกำลังไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ $I_{eddy}^2 \times Z_L$ โดยที่กระแสจะหาได้จากความเข้มของสนามแม่เหล็ก ความต้านทานหาได้จาก ค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) และความซึมซาบแม่เหล็กของโหลด (Permeability) (Vichian et al. 2009) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง

จากรูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับโหลด เป็นการแสดงระบบพื้นฐานของการเหนี่ยวนำความร้อนเมื่อมีพลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมเข้ากับขดลวด เป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น โดยเรียกว่า การเหนี่ยวนำภายในขดลวด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีปริมาณสำหรับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพราะฉะนั้นสูตรคำนวณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดังสมการที่ 2.7

$$E_{p,s} = N_{p,s} \frac{d\phi_{1,2}}{dt} \tag{2.7}$$

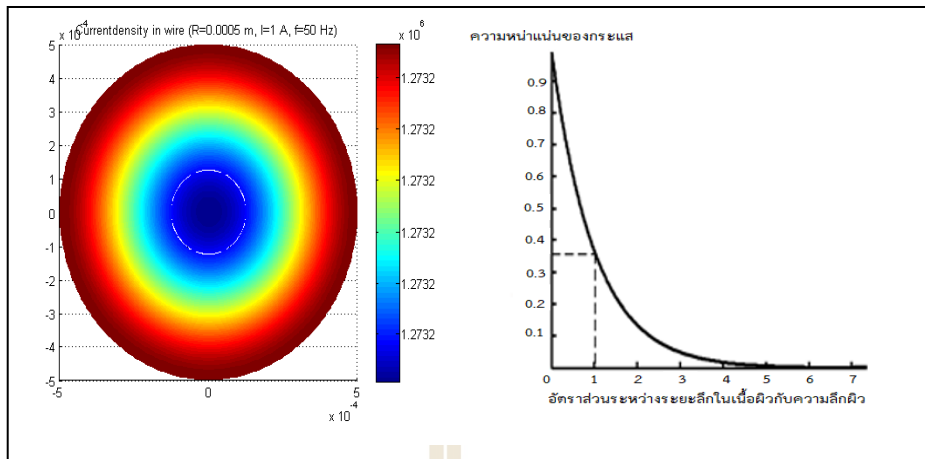
โดยที่ $E_{p,s}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (โวลต์)
 $\phi_{1,2}$ คือ เส้นแรงหรือฟลักซ์แม่เหล็กด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (เวเบอร์)

ซึ่งค่าของตัวต้านทานหาได้จากค่าความต้านทานจำเพาะ ส่วนกระแสไฟฟ้าหาได้จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นได้นั้นมีความสัมพันธ์กับค่าของความลึกผิว (Skin depth) ซึ่งระบบการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความ

ร้อนในชั้นโลหะมาจากองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรก การเกิดความร้อนจากกระแสไหลวนในชั้นโลหะ ซึ่งสนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและกระแสไหลวน (Eddy current) โดยทิศทางกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นนี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นในชั้นโลหะ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้คือ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายทอดไปเป็นความร้อนในชั้นโลหะ และส่วนที่สอง การเกิดความร้อนจากความต้านทานของสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดเหนี่ยวนำจะมีทิศทางของขั้วที่สลับไปตามทิศทางของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งโมเลกุลภายในชั้นโลหะจะเกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของขั้วที่เปลี่ยนไปมานี้ทำให้เกิดการเสียดสีและเกิดความร้อน ซึ่งการเกิดความร้อนจากความต้านทานของสนามแม่เหล็กจะเกิดเฉพาะโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเท่านั้น

2.2.3 ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)

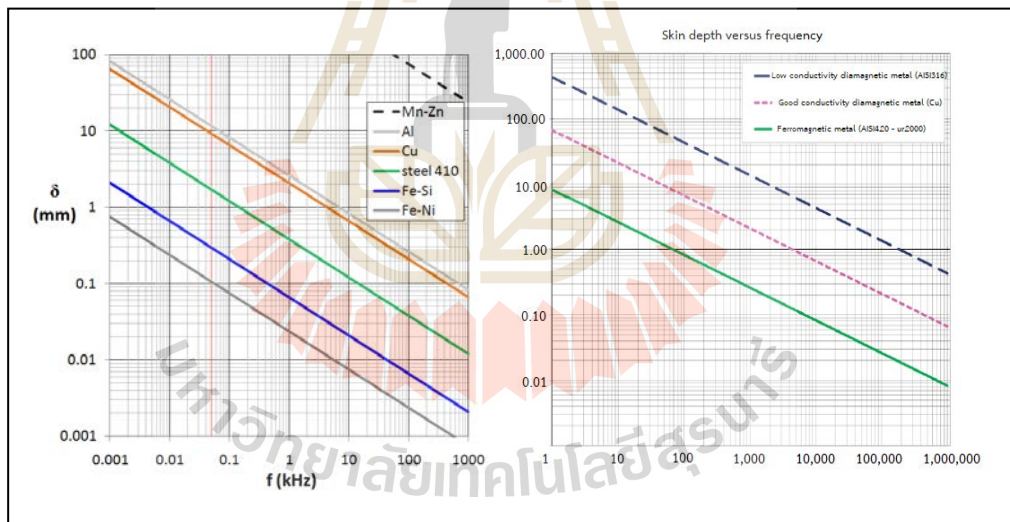
เนื่องจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนมีลักษณะของสนามแม่เหล็กและกระแสไหลวนเป็นแบบกระแสสลับ (AC) ความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้มีผลกระทบเชิงผิว (Skin effect) ซึ่งผลกระทบทางผิวเป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสรอบผิวดำนำสูงกว่าภายในซึ่งจะลดลงตามระดับความลึกที่มากขึ้นในตัวนำ จึงทำให้ผิวดำนำมีอุณหภูมิสูงกว่าภายใน (Shih-Chih, Ming et al. 2014) ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 เพราะเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำบริเวณรอบ ๆ ผิวของชิ้นงานที่เป็นตัวนำมีความเข้มข้นทำให้มีค่าอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อความถี่ลดลงจะส่งผลให้ค่ากระแสเหนี่ยวนำลดลงเรื่อย ๆ ตามความลึกที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เรียกว่าความลึกของผิว (Skin depth) ซึ่งเราสามารถหาค่า Skin depth โดยความลึกสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์ ของผิวและสามารถหาค่าพลังงานที่วิ่งผ่านได้ (Acero, Rafael et al. 2006)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.7 (ก) วิเคราะห์ค่าความร้อนในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ลึกลงไปจากผิว และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นของกระแสกับอัตราส่วนระยะลึกในเนื้อผิวกับความลึกผิว



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) กราฟแสดงค่าความลึกผิวกับความถี่ของวัสดุชนิดต่าง ๆ และ (ข) กราฟแสดง ความลึกผิวกับความถี่ในวัสดุที่ความนำได้ดีและไม่ดีกับวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก

ความหนาแน่นของกระแสจะพบมากที่สุดบริเวณพื้นผิวของตัวนำ และจะค่อยๆลดลงในจุดที่ลึกลงไปในตัวนำ ซึ่งการลดลงของความหนาแน่นของกระแสนี้เรียกว่า ผลกระทบที่

ผิว หรือ ความลึกของผิว เป็นตัวชี้วัดของความลึกในจุดที่ความหนาแน่นของกระแสตกลงไปที่ $1/e$ (ประมาณ 0.37) ของค่าที่ผิวดำนำสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.8

$$i_x = i_0 e^{-x/\delta} \quad (2.8)$$

โดยที่ i_x คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ลึกลงจากผิวเข้ามา
 i_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ผิว
 x คือ ระยะลึกลงไปในเนื้อผิว
 δ คือ ความลึกผิว (Skin depth)

เมื่อ δ เป็น ความลึกของผิว ดังนั้นความลึกของผิวจะถูกกำหนดว่าเป็นความลึกใต้ผิวน้ำของตัวนำ ซึ่งในตัวนำที่คั้น ความลึกของผิวจะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของสภาพต้านทาน และความลึกของผิวยังแปรผันตามรากที่สองผกผันของการซึมผ่านแม่เหล็กของตัวนำ ซึ่งการคำนวณโดยทั่วไปสำหรับความลึกของผิวที่ความถี่ต่ำกว่า 10^{18} เฮิรตซ์ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.9

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{(2\pi f)(\mu_0\mu_r)}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.9)$$

โดยที่ μ_0 คือ ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ
 ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวกลางเป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า
 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่าง ๆ

Materials	Electrical Resistivity
Silver	1.59×10^{-8}
Copper	1.68×10^{-8}
Gold	2.20×10^{-8}
Aluminum	2.65×10^{-8}
Tungsten	5.60×10^{-8}
Iron	9.71×10^{-8}
Steel	7.20×10^{-7}
Platinum	1.10×10^{-7}
Nichrome	1.50×10^{-6}
Coal	3.5×10^{-5}
Germanium	4.6×10^{-1}
Silicon	6.40×10^2
Rubber	10^{13}
Sulfur	10^{15}
Quartz	7.5×10^{17}

โดยที่ μ_r คือ ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของตัวนำชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงค่าตามวัสดุประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของตัวนำชนิดต่าง ๆ

Materials	Magnetic Permeability
Air	$1.25663753 \times 10^{-6}$
Aluminum	1.256665×10^{-6}
Bismuth	1.25643×10^{-6}
Copper	1.256629×10^{-6}
Iron (Pure)	6.30×10^{-3}
Nickle	$1.26 \times 10^{-4} - 7.54 \times 10^{-4}$
Carbon Steel	1.26×10^{-4}

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Materials	Magnetic Permeability
Hydrogen	1.2566371×10^{-6}
Water	1.256627×10^{-6}
Wood	$1.25663760 \times 10^{-6}$
Bismuth	1.25643×10^{-6}
Platinum	1.256970×10^{-6}
Teflon	1.2567×10^{-6}
Sapphire	1.2566368×10^{-6}
Hydrogen	1.2566371×10^{-6}

โดยที่

 f คือ ค่าความถี่ของกระแส (เฮิรตซ์) σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จากสมการที่ 2.10

$$\sigma(T) = \frac{1}{(4.9659 \times 10^{-7} + T \cdot 8.4121 - T^2 \cdot 3.7246 \times 10^{-13} + T^4 \cdot 6.1960 \times 10^{-17})} \quad (2.10)$$

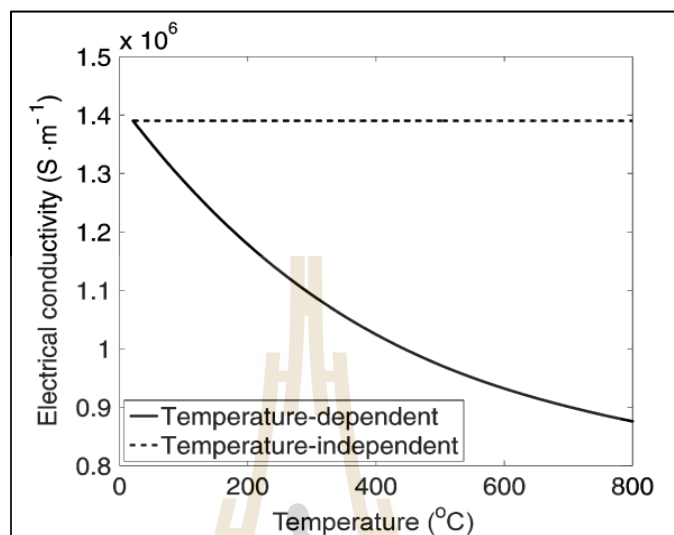
เมื่อ T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าถ้าหากเราทำการควบคุมความถี่ของการทำงานจะเป็นการควบคุมระดับความลึกของชั้นงานที่ต้องการให้เกิดความร้อน จากสมการที่ 2.10, 2.11 และ 2.12 (Matej, Anze et al. 2008) เป็นสมการที่ไว้สำหรับหาค่าจำเพาะความนำไฟฟ้า (σ) ค่าความจุความจำเพาะ (C) และค่าความนำความร้อน (λ) ของวัสดุที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

$$C(T) = 351.93 + T \cdot 976 \times 10^{-4} \quad (2.11)$$

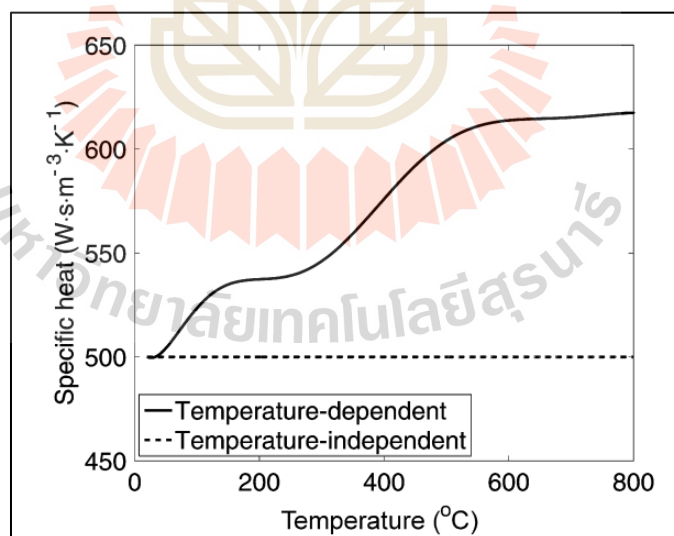
$$\lambda(T) = 11.215 + T \cdot 1.4087 \times 10^{-2} \quad (2.12)$$

ส่วนวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจะมีค่าจำเพาะความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.39 เมกกะซีเมนส์ต่อเมตร ค่าความจุความจำเพาะเท่ากับ 500 จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน และค่าความนำ

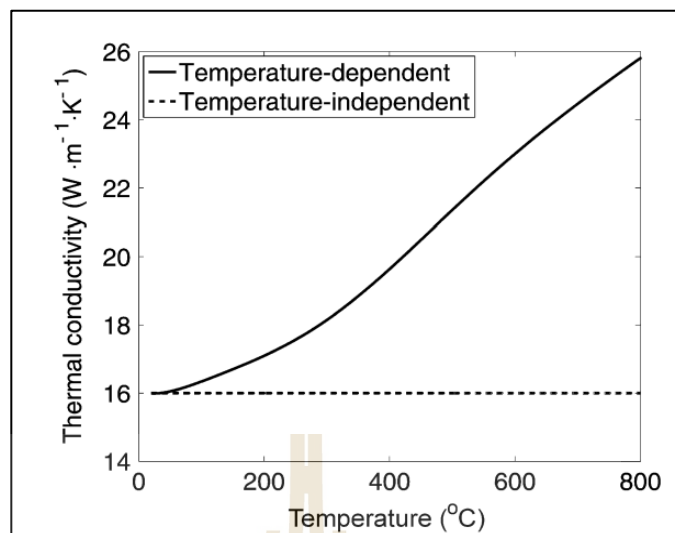
ความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 16 วัตต์ต่อเคลวินเมตร ซึ่งจะมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.9, 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าจำเพาะความนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความจุความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความนำความร้อนกับอุณหภูมิ

การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) เป็นกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากสสารหนึ่งไปยังอีกสสารหนึ่ง โดยมีสื่อตัวกลางหรือไม่มีก็ได้ เราแบ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 ประเภท ประเภทแรกการนำความร้อน (Heat Conduction) เป็นการศึกษาพลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมที่เรียงตัวกันเป็นระเบียบ ซึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะนั้นเป็นการนำความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างโมเลกุล วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ ซึ่งวิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อน โดยทั่วไปจะถ่ายเทความร้อนทางอ้อมจากแหล่งความร้อนผ่านผนังโลหะให้แก่วัตถุคิบที่จะอบลดความชื้นจึงมีความร้อนสูญเสียน้อยและมีประสิทธิภาพความร้อนที่สูงถึง 70-90 เปอร์เซ็นต์ และยังวัสดุคิบมีอัตราความชื้นสูงเท่าใด ประสิทธิภาพความร้อนจะสูงขึ้นเท่านั้น แต่ถ้าวิธีการพาความร้อนโดยใช้ลมร้อน โดยทั่วไปนั้นจะได้รับความร้อนด้วยลมร้อนที่มีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ที่ 30-60 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น เมื่อหาค่าปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอบได้แล้ว ยิ่งเครื่องอบมีปริมาตรเล็กเท่าใด ก็แสดงว่าสมรรถนะในการอบยิ่งสูงเท่านั้นหรือถ้าเครื่องอบที่มีปริมาตรเท่ากัน เครื่องอบที่อบวัตถุคิบแห้งเร็วกว่าจะมีสมรรถนะสูงกว่า ส่วนการคำนวณปริมาณความร้อนของเครื่องอบแบบรับความร้อนด้วยการนำความร้อนดังสมการ

$$Q = UA(T_k - T_m) \quad (2.13)$$

โดยที่	Q คือ ปริมาณความร้อน (จูล)
	U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน)
	A คือ แร่งพื้นที่ให้ความร้อนที่สัมผัสกับวัตถุคิบ (ตารางเมตร)
	T_k คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อน (เคลวิน)
	T_m คือ อุณหภูมิของวัตถุคิบ (เคลวิน)

ประเภทที่สองคือ การพาความร้อน (Heat Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ในสสารสองสถานะคือ ของเหลวและก๊าซเนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวซึ่งประเภทของการพาความร้อนแบ่งเป็น การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural or Free Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของไหลโดยไม่มีกลไกใด ๆ ทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของไหล โดยของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม โบลเวอร์ และประเภทที่สามคือ การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน

จากชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนได้ติดตั้งเข้ากับตัวถังอบโดยตรง คือการเหนี่ยวนำพลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้ถังอบนั้นเกิดพลังงานความร้อนขึ้น และผู้วิจัยได้ใช้หลักการนำความร้อนของถังอบในบริเวณที่มีขดลวดทองแดงพันไว้ซึ่งบริเวณนั้นจะมีความร้อนที่สูงมาก เมื่อปล่อยทิ้งไว้บริเวณที่ร้อนนั้นจะถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้กับบริเวณอื่นของตัวถัง เพื่อให้เกิดเสถียรภาพทางความร้อนทั่วบริเวณถังอบ และยังถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้กับขะอินทรีย์ภายในเพื่อทำการอบลดความชื้นและได้ใช้หลักการพาความร้อนในถังอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากขะอินทรีย์ นอกจากนี้จึงได้วิเคราะห์สมการทางความร้อน สมดุลพลังงาน สมการถ่ายโอนพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้าของระบบเพื่อทำการวิเคราะห์และสร้างชุดเหนี่ยวนำความร้อน จึงได้วิเคราะห์สมการการนำความร้อนอุณหภูมิในตัวถังเองและการนำความร้อนจากตัวถังกับขะอินทรีย์ภายใน ได้ทำการหาเสถียรภาพของพลังงาน Energy balance (Yunus, Michael et al. 2011 and Jiin-Yun, Yu-Wei et al. 2007) ต้องทำการวิเคราะห์สมการดังนี้

วิเคราะห์พลังงานการไหลเข้าและออกจากระบบ (Net flow) คือ พลังงานของการไหลเข้าและออกจากระบบแบ่งเป็น Flow of energy in $q_x|_x$, Flow of energy out $q_x|_{x+\Delta x}$ ดังสมการที่ 2.14

$$q_{x|x} - q_{x|x+\Delta x} = \cancel{q_{x/x}} - \cancel{q_{x/x}} - \frac{\partial q_x dx}{\partial x} = -\frac{\partial q_x dx}{\partial x} \quad (2.14)$$

วิเคราะห์ Rate of energy generator คืออัตราการสร้างพลังงานความร้อนหรือ Heat flux (จุดต่อวินาที) ซึ่งตัวมันเองนั้นสามารถสร้างความร้อนขึ้นมาได้ซึ่งความร้อนนี้เกิดมาจากไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.15

$$\text{Rate of Energy "generation"} = \dot{q} \times \text{Volume} = \dot{q} \times d_x d_y d_z \quad (2.15)$$

วิเคราะห์ Rate of energy accumulation คือ อัตราการสะสมพลังงานภายในมวล ($\frac{dU}{dt} \times \text{mass}$) ดังสมการที่ 2.16

$$U = C_p (T - T_{ret}) \quad (2.16)$$

โดยที่

U คือ พลังงานสะสม

C_p คือ Heat capacity และ $(T - T_{ret})$ คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเพราะฉะนั้น อัตราการสะสมพลังงานแสดงดังสมการที่ 2.17

$$\frac{dU}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} \times \text{mass} = C_p \frac{dT}{dt} \times \rho \times d_x d_y d_z \quad (2.17)$$

ซึ่งพลังงานความร้อนจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิจึงหาความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนและอุณหภูมิในสมการที่ 2.18

$$q_x = -K (d_y d_z) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.18)$$

โดยที่

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นค่าที่แสดงความสามารถการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของวัสดุ (วัดต่อเมตรเคลวิน) เพราะฉะนั้นแทนลงในสมการ Net flow จะได้ดังสมการที่ 2.19

$$\text{net flow} = \frac{\partial q_x dx}{\partial x} = \frac{\partial K}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} d_x d_y d_z \quad (2.19)$$

เพราะฉะนั้น Rate of energy accumulation = (Flow of energy in - Flow of energy out) + Rate of Energy generation แสดงในสมการที่ 2.22

$$\rho C_p = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial K}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} d_x d_y d_z + \dot{q} \quad (2.20)$$

$$\rho C_p = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial K}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial K}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial K}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{q} \quad (2.21)$$

$$\rho C_p = \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla K \nabla T + \dot{q} \quad (2.22)$$

วิเคราะห์การพาความร้อนซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งก็คือขยะอินทรีย์และของไหลก็คือไอความร้อนในถัง โดยไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ไอความร้อนเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไอความร้อนเอง เพื่อเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและได้ความชื้นในขยะอินทรีย์ภายในถังอบ ซึ่งปริมาณความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลของอากาศที่ไหลเป็นหลัก (Flux) มีหน่วยเป็นจูลต่อวินาที ดังสมการที่ 2.23

$$Flux = \dot{m} C_p (T - T_R) \quad (2.23)$$

จากความสัมพันธ์ปริมาณมวลไอความร้อนที่ไหลเท่ากับผลคูณความหนาแน่น (ρ) และปริมาตรของมวลไอความร้อนที่ไหล (V_p) ดังสมการที่ 2.24

$$Flux = V_p C_p (T - T_R) = v A_p C_p (T - T_R) \quad (2.24)$$

โดยที่ \dot{m} คือ ปริมาณมวลความร้อนที่ไหล
 C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ
 $(T - T_R)$ คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง
 v คือ ความเร็วที่ไหล
 A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของมวลที่ไหลผ่าน ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการความร้อนในส่วนของ Time, Space ได้ดังสมการที่ 2.25

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla K \nabla T + V_p C_p (T - T_R) + \dot{q} \quad (2.25)$$

โดยที่	$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$	คือ	ส่วนอัตราการสะสมพลังงานความร้อนในถังอบ
	$\nabla K \nabla T$	คือ	ส่วนการนำความร้อนจากถังอบสู่วัตถุภายในถังหรือเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange)
	$V_p C_p (T - T_R)$	คือ	ส่วนของการพาไอความร้อนในถังอบเพื่ออบไล่ความชื้นออกจากขยะอินทรีย์
	\dot{q}	คือ	ส่วนการสร้างพลังงานความร้อนขึ้นด้วยตัวเองซึ่งจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองถังที่ทำการวิเคราะห์และออกแบบ

2.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของการอบเพื่อย่อยสลายขยะอินทรีย์ สำหรับใช้ในการเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง ในอุณหภูมิและความชื้นที่ เหมาะสมกับเชื้อจุลินทรีย์

2.3.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของการอบเพื่อลดความชื้นและกำจัดขยะ อินทรีย์ในถังอบ

กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบเพื่อลดความชื้นในขยะอินทรีย์ในถังอบซึ่งการลดความชื้นในขยะอินทรีย์นั้นคือการเอาน้ำออกจากวัสดุแล้วทำให้ปริมาณน้ำลดลงหรือความชื้นลดลง ซึ่งโดยปกติทั่วไปมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กับวัสดุทางการเกษตรหรือเชื้อเพลิงชีวมวลจะใช้วิธีการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนจากภายนอกถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุที่อยู่ผิวและเนื้อวัสดุระเหยออกมาดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.26 ทั้งนี้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (drying time) จากความชื้นเริ่มต้นไปสู่ความชื้นที่ต้องการ

$$q_T = h_v A (T_v - T_i) = h_c A (T_v - T_i) + h_r A (T_v - T_i) + u_k A (T_v - T_i) \quad (2.26)$$

โดยที่	h_c	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากอากาศร้อนสู่ผิววัสดุ
	h_r	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุกับผนังของห้องอบ

u_k คือ สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนคู่ผิวหน้าของการอบโดยการพาและการนำความร้อนผ่านชั้นวัสดุคู่ผิวหน้าซึ่งมีการระเหย

T_v, T_i คือ ค่าอุณหภูมิอากาศที่ไซ้บแห้งและอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและวัสดุตามลำดับ (เคลวิน)

อัตราการลดความชื้นจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบและสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) โดยทั่วไปการอบแห้งสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.12 ช่วงแรกคือ ช่วงอุ่นวัตถุดิบเริ่มแรก (Initial period) เป็นช่วงเริ่มต้นที่วัตถุดิบที่ใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นยังสูงอยู่และเป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัตถุดิบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้นจนถึงอุณหภูมิสมดุล เรียกว่าช่วงอุ่นวัตถุดิบ ซึ่งอัตราการทำแห้งจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคงที่ ช่วงที่สองคือ ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (Constant-rate period) อัตราการถ่ายเทมวลวัตถุดิบมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิของวัสดุคงที่และปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจะถูกไปใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ซึ่งขั้นของการระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัตถุดิบ โดยอัตราความชื้นของวัตถุดิบจะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่และอัตราเร็วในการอบนั้นก็จะมีค่าคงที่ ซึ่งช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งอัตราเร็วในการอบคงที่ R_A สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.27

$$R_A = \frac{\alpha(T - T_m)}{\lambda} \quad (2.27)$$

โดยที่

R_A คือ อัตราเร็วในการอบคงที่

α คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน)

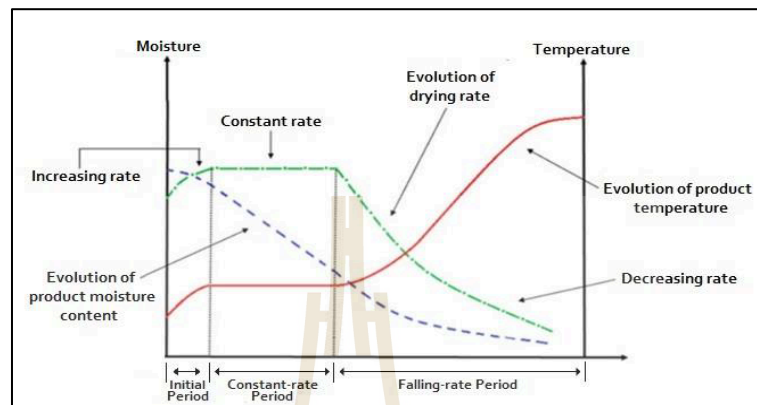
T คือ อุณหภูมิของไออากาศร้อนภายในถังอบ (เคลวิน)

T_m คือ อุณหภูมิของวัตถุดิบในถังอบ (เคลวิน)

λ คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (จุลต่อกรัม)

ช่วงสุดท้ายคือ ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง (Falling-rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิของวัสดุภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ ซึ่งขั้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบจนปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัตถุดิบแห้งลงและความชื้นภายในเนื้อวัตถุดิบก็เริ่มลดลง ทำให้ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุดิบจะซึม

ขึ้นมามากแทน ให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า อีกทั้งจะทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของอากาศร้อนในถังอบด้วย จากบริเวณพื้นผิวเข้าไปถึงภายในเนื้อวัตถุดิบ ซึ่งในช่วงนี้อัตราเร็วในการอบจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ

การหาสมดุลความร้อนของกระบวนการอบขยะอินทรีย์ด้วยความร้อน ซึ่งใช้สมการการสมดุลพลังงานของอากาศร้อนกับความชื้นของวัสดุ โดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำจากวัสดุขึ้นมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศ ดังสมการที่ 2.28

$$m_w h_{fg} = \dot{m}_a c_a (T_{ai} - T_{af}) t \quad (2.28)$$

- โดยที่
- m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (กิโลกรัม)
 - h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
 - \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
 - c_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเซลเซียส)
 - T_{ai} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
 - T_{af} คือ อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
 - t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (วินาที)

การหาประสิทธิภาพรวมในการอบขยะอินทรีย์ของถังอบ (Bioreactor) ด้วยความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้จากความร้อนที่ใช้ในการระเหยของน้ำต่อปริมาณความร้อนที่ให้ด้วยแหล่งพลังงาน ความร้อนตามสมการที่ 2.29

$$\eta_t = \frac{m_w h_{fg}}{m_f LHV} \times 100 \quad (2.29)$$

โดยที่ η_t คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (กิโลกรัม)

LHV คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

กรณีที่เรารู้ค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ เราสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกหลังจากอบแห้งได้จากสมการ 2.30

$$W_f = \frac{W_i (1 - M_i)}{(1 - M_f)} \quad (2.30)$$

โดยที่ M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

M_f คือ ความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้าย (กิโลกรัม)

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางค้า ดังสมการที่ 2.31

$$M_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100\% \quad (2.31)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งปกติแล้วจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งความชื้นมาตรฐานแห้งหาได้ดังสมการที่ 2.32

$$M_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (2.32)$$

โดยที่	M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก (เปอร์เซ็นต์)
	M_d	คือ	คือความชื้นมาตรฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์)
	m_w	คือ	น้ำหนักของวัตถุดิบขณะเปียก (กิโลกรัม)
	m_d	คือ	น้ำหนักของวัตถุดิบขณะแห้ง (กิโลกรัม)

2.3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำปุ๋ยอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับอุณหภูมิและความชื้นในถังอบ

ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์ในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพ (Benyi, Yu et al. 2018) โดยขยะอินทรีย์ที่ต้องกำจัดตามตลาดทั่วไปนั้นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนผักประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ผลไม้ 30 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อสัตว์ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีความชื้นสูง และมีการเน่าเสียเร็ว ถ้าหากทิ้งไว้เกิน 1 วัน จะส่งกลิ่นเหม็นทำให้เป็นมลพิษต่อสภาวะแวดล้อม ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นวิธีการกำจัดของเสียเหล่านี้เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพ โดยใช้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่ ให้มีความชื้นประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยเริ่มแรกทำการใส่วัตถุดิบที่เป็นขยะอินทรีย์มีความชื้นประมาณ 65-80 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการอบโดยอุณหภูมิของขยะอินทรีย์อยู่ที่ 85-105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง เพื่อทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นเชื้อโรคและปฏิชีวนะต่อจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ได้ถูกฆ่าตายหมดและยังเพิ่มความรวดเร็วในการย่อยสลายด้วย ซึ่งโดยปกติสามารถให้ความร้อนอยู่ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส (Mi-Sun, Dong et al. 2017) หลังจากนั้นปิดเครื่องให้ความร้อนแล้วรอให้ถังอบมีอุณหภูมิเย็นลงประมาณ 30-40 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเหมาะสมที่จะนำหัวเชื้อจุลินทรีย์ชีวภัณฑ์กลุ่ม Mesophilic ที่ทนอุณหภูมิได้ปานกลาง จำพวกเชื้อราไตรโคเดอร์มา (*Trichoderma harzianum*) แบคทีเรียชนิด บาซิลลัส (*Bacillus*), PGPR (Plant Growth Promoting Rhizocacteria) และ แอคติโนมัยซีต (*Actinomycetes*) ที่มีคุณภาพสูงใส่ลงไป ในวัตถุดิบและคลุกเคล้าเข้าด้วยกันเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์เพื่อในการย่อยเซลล์ลูโลส ลิกนิน และฟอสฟอรัส พร้อมทั้งยังช่วยเสริมธาตุอาหารและตรึงไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตของพืชในดิน (Javkhan, Antioio et al. 2015) ซึ่งกระบวนการย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นสารตั้งต้นของปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงนั้นจะใช้ระยะเวลาภายในไม่เกิน 24 ชั่วโมง ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทำปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงนั้นต้องเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายตัวได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ จากครัวเรือน

เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม โดยแยกออกได้คร่าว ๆ ตามประเภทของวัสดุคือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัชพืช, วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม, วัสดุที่ได้จากสิ่งขับถ่ายจากสัตว์ และวัสดุจากขยะมูลฝอยจากครัวเรือน ซึ่งวัสดุอินทรีย์ที่ใช้ทำปุ๋ยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุที่ย่อยสลายง่าย และวัสดุที่ย่อยสลายยาก โดยใช้ค่าสัดส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจน หรือ C/N ratio เป็นเกณฑ์ ถ้าเป็นวัสดุที่ย่อยสลายง่าย สัดส่วน C/N ratio ต่ำกว่า 100 : 1 และวัสดุที่ย่อยสลายยาก สัดส่วน C/N ratio สูงกว่า 100 : 1 ซึ่งวัสดุทั้ง 2 กลุ่มนี้ มีองค์ประกอบที่เป็นธาตุอาหารหลักพืชดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3, 2.4 และตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบที่เป็นธาตุอาหารหลักของพืชแต่ละชนิด

ชนิดของวัสดุ	%N	%P	%K	%Ca	%Mg	%Mn	%Zn	%Cu	%Fe
แกลบ	0.35	0.01	0.52	0.22	0.027	0.039	0.002	0.001	2.744
ใบยาสูบ	1.77	0.34	3.18	2.49	0.248	0.009	0.005	0.002	0.166
กากตะกอนอ้อย	1.96	2.67	1.13	5.91	0.350	0.055	0.020	0.003	1.904
ขี้เถ้าเตา	0.15	0.23	1.78	0.50	0.145	0.021	0.010	0.001	0.702
อ้อย	0.47	0.01	0.40	0.58	0.030	0.004	0.003	0.001	0.549
กากอ้อย	0.34	0.01	0.35	0.11	0.019	0.002	0.002	0.001	0.034
ใบอ้อย	0.94	0.14	1.53	0.29	0.082	0.002	0.002	0.001	0.024
ขี้เถ้าแกลบ	0.22	0.01	0.50	0.05	0.057	0.013	0.010	0.001	0.042
ขังข้าวโพด	2.13	0.34	0.94	0.05	0.114	0.002	0.010	0.001	0.018
เปลือกข้าวโพด	1.37	0.19	1.38	0.10	0.087	0.001	0.002	0.002	0.031
รำอ่อน	2.64	2.52	2.09	0.03	0.617	0.008	0.010	0.001	0.015
ขี้เลื่อยเพาะเห็ด	2.29	1.19	0.43	0.93	0.520	0.008	0.025	0.001	0.164

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าธาตุอาหารหลักต่าง ๆ สำหรับวัสดุที่นำมาย่อยสลายได้ง่าย

ชนิดของวัสดุ	N %	P ₂ O ₅ %	%K ₂ O	% C	C/N	pH
ฟางข้าว	0.55	0.09	2.39	48.82	89	8.20
ผักตบชวา	1.27	0.71	1.84	43.56	34	7.80
หญ้าขน	1.38	0.34	3.69	48.66	35	7.10
ต้นข้าวโพด	0.53	0.15	2.21	33.00	62	8.20
มันสำปะหลัง	0.60	0.22	0.67	48.85	81	3.60
สับปะรด	1.79	0.85	5.46	46.8	26	7.60
เปลือกเมล็ดคากาแฟ	0.93	0.14	6.22	65.05	70	6.30
เปลือกถั่วลิสง	0.73	-	-	58.36	70	6.40
เปลือกทุเรียน	0.83	0.19	2.15	50.63	75	5.50

โดยอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจน หรือ C/N ratio ถ้าเป็นวัสดุที่ย่อยสลายง่ายเป็นสัดส่วน C/N ratio ต่ำกว่า 100 : 1

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าธาตุอาหารหลักต่าง ๆ สำหรับวัสดุที่นำมาย่อยสลายได้ยาก

ชนิดของวัสดุ	N %	P ₂ O ₅ %	%K ₂ O	% C	C/N	pH
ไม้เบญจพรรณ	0.32	0.16	2.45	62.70	196	5.40
ไม้ยางเก่า	0.25	0.15	0.53	56.37	225	7.40
ไม้ยางใหม่	0.19	0.36	0.40	58.41	307	7.50
ใบอ้อย	0.49	0.21	0.58	51.52	105	6.20
กากอ้อย	0.40	0.15	0.44	57.69	146	6.05
ขุยมะพร้าว	0.36	0.05	2.94	60.13	167	6.15
แกลบ	0.36	0.09	1.08	54.72	152	6.18
ต้นปอกระเจา	0.45	-	-	51.83	115	5.30
เปลือกเมล็ดปาล์มบด	0.52	0.03	0.30	60.65	117	5.49

โดยอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจน หรือ C/N ratio ถ้าเป็นวัสดุที่ย่อยสลายง่าย ซึ่งเป็นสัดส่วน C/N ratio สูงกว่า 100 : 1

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ นั้นมีบทบาทสำคัญที่สุดในการย่อยสลายขยะอินทรีย์โดยจะย่อยเชื้อใยของวัสดุให้เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลเล็กลงจนเป็นอินทรีย์วัตถุที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จุลินทรีย์เหล่านี้ประกอบด้วย แบคทีเรีย เชื้อราและ แอคคีโตไมซีตเป็นส่วนใหญ่ โดยมีบทบาทและหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละกลุ่มของจุลินทรีย์ซึ่งมีสภาพแวดล้อมและชนิดของวัสดุเป็นตัวกำหนด

แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดในการทำปุ๋ยคอกรูปที่ 2.13 โดยมีทั้งพวกที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการย่อยสลาย และพวกอาศัยสารประกอบที่ละลายง่ายจากเนื้อเยื่อพืชเป็นแหล่งอาหารในการเจริญเติบโต กระบวนการย่อยของแบคทีเรียยังทำให้ความร้อนในกองปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกองปุ๋ยมีผลต่อการจำกัดชนิด และปริมาณของแบคทีเรีย ทำให้แบ่งแบคทีเรียออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พวกที่เจริญเติบโตในระยะแรกที่อุณหภูมิกองปุ๋ยไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส และเจริญได้ในอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ถึง 65 องศาเซลเซียส พวกหลังนี้ส่วนมากจะเป็นพวกที่สร้างสปอร์ จึงทนอยู่ได้ในความร้อนค่อนข้างสูง โดยแบคทีเรีย Bacillus เป็นแบคทีเรียที่ทนต่อความร้อน และสามารถสร้างเอนโดสปอร์ซึ่งทนต่อความร้อน ทนต่อความแห้งแล้ง สารเคมี และสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่าง ๆ ได้ดี รวมถึงมีเอนไซม์ที่สามารถย่อยโปรตีนในอาหารให้เป็นกรดแอมิโน แบคทีเรียในกลุ่ม Bacillus นี้ส่วนใหญ่เจริญได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง อุณหภูมิที่เจริญได้ดีคืออยู่ระหว่าง 30-45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.13 แสดงแบคทีเรียในกลุ่ม Bacillus

เชื้อรา (Fungi) เชื้อราที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ ดังรูปที่ 2.14 เนื่องจากสามารถปลดปล่อยเอนไซม์ที่สามารถช่วยย่อยสลายสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ แต่เชื้อรานั้นมีข้อจำกัดในการเจริญเติบโต คือต้องมีอากาศถ่ายเทได้ดี และอุณหภูมิกับความชื้นไม่สูงมากนัก โดยเชื้อราไตรโคเดอร์มา (*Trichoderma harzianum*) เป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในจำพวกของเชื้อราชั้นสูง ซึ่งมีความสามารถในการควบคุมและกำจัดโรคของพืชที่ได้อย่างกว้างขวาง เชื้อราไตรโคเดอร์มาเป็นเชื้อราที่มีศักยภาพสูงมากชนิดหนึ่ง โดยค่า pH ของดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราไตรโคเดอร์มา อยู่ระหว่าง 5.5 – 6.5 คือเป็นกรดอ่อน ๆ ซึ่งเป็นช่วง pH ที่ปลูกพืชส่วนใหญ่แล้วเจริญเติบโตได้ดี ส่วนเชื้อราชนิด PGPR (Plant Growth Promoting Rhizocacteria) เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินรอบรากพืชและช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเป็นกระบวนการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช และยังช่วยเพิ่มธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดิน



รูปที่ 2.14 แสดงเชื้อราที่จะนำมาใช้ช่วยย่อยสลายขยะอินทรีย์

แอกติโนมัยซีต (Actinomycetes) แอกติโนมัยซีตมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าเชื้อราและแบคทีเรีย ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเจริญได้ดีในสภาพที่มีอากาศพอเพียง เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต และสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 65-75 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 75 องศาเซลเซียส มักจะไม่พบเชื้อแอกติโนมัยซีต ซึ่งเชื้อแอกติโนมัยซีตมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เช่น เซลลูโลส ลิกนิน ไคติน และโปรตีน ที่มีอยู่ในกองปุ๋ยขณะที่อุณหภูมิสูง โดยเชื้อแอกติโนมัยซีตที่มักพบเสมอในกองปุ๋ย ได้แก่ *Thermoactinomyces* sp. และ *Thermomonospora* sp. ซึ่งเป็นพวกที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ออกมาย่อยเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.15 แสดงแอกติโนมัยซีต (Actinomycetes) มาย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ

นอกจากเชื้อจุลินทรีย์จะมีบทบาทสำคัญในการช่วยย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอย่างมากแล้ว ปัจจัยที่สนับสนุนการสลายตัวของวัสดุอินทรีย์ ก็มีส่วนสำคัญที่ช่วยให้การสลายตัวเป็นไปในอัตราที่เร็วหรือช้าด้วย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ วัสดุที่นำมาทำปุ๋ยควรเป็นวัสดุที่ขึ้นไม่ใหญ่มากนัก เพื่อสะดวกแก่ จุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ทั่วถึง ซึ่งจะช่วยให้วัสดุสลายตัวได้เร็วขึ้น ในการนำวัสดุอินทรีย์มาใช้ทำปุ๋ยนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือ ความอ่อนและความแข็งของวัสดุ ถ้าเป็นวัสดุที่มีเนื้อเยื่ออ่อน การย่อยสลายก็จะเร็วกว่าพวกที่มีเนื้อเยื่อแข็ง เช่น การทำปุ๋ยจากฟางข้าว หรือเปลือกถั่ว จะได้ผลลัพธ์ที่เร็วกว่าใช้ขี้เลื่อยหรือแกลบ เป็นต้น อีกปัจจัยคือ ความชื้น ความชื้นหรือปริมาณน้ำในกองปุ๋ย เป็นตัวควบคุมการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายอยู่ที่ประมาณ 35-45 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ถ้าความชื้นต่ำกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ การย่อยสลายของวัสดุจะช้าลง เพราะจุลินทรีย์ขาดน้ำ แต่ถ้าความชื้นเกิน 45 เปอร์เซ็นต์ ทำให้น้ำในปุ๋ยมีปริมาณมากเกินไป โดยน้ำเข้าแทนที่อากาศ ทำให้อากาศน้อยลง ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือทำให้จุลินทรีย์ขาดอากาศนั่นเอง อากาศหรือออกซิเจนมีความจำเป็นในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ในกองปุ๋ยแล้วส่วนใหญ่ เป็นพวกที่ต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในกระบวนการหายใจอณูภูมิ ซึ่งอณูภูมิภายในกองปุ๋ยที่เหมาะสมมีผลทำให้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้นค่อนข้างรวดเร็ว ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ มาจากการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ ในการย่อยสลายเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ให้เป็นอาหารในการเจริญเติบโต อีกปัจจัยหนึ่งคือความเป็นกรด-ด่าง จากค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุที่ใช้ทำปุ๋ยโดยทั่วไปมีค่าเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย ในช่วงแรกความเป็นกรด-ด่างจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ จากเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

แต่อย่างไรก็ตามความเป็นกรด-ด่างในปุ๋ยหมักไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จะอยู่ระหว่าง 6-8 ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยอินทรีย์ด้วย

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่มีขนาดใหญ่ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นและย่อยสลายขยะอินทรีย์ การถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อนภายในถังอบ รวมถึงสมการในการวิเคราะห์พลังงานความร้อนต่าง ๆ และในส่วนของหลักการและทฤษฎีในการทำปุ๋ยอินทรีย์จากขยะอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่เหมาะสมกับอุณหภูมิและความชื้นในถังอบ รวมถึงวัสดุที่ใช้ในการทำปุ๋ยอินทรีย์ และปัจจัยต่าง ๆ ในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่วนในบทต่อไปนั้น จะกล่าวถึงในเรื่องของการออกแบบระบบให้ความร้อนขนาดใหญ่และการวิเคราะห์ต่าง ๆ



บทที่ 3

การศึกษาและออกแบบระบบสำหรับการวิเคราะห์เครื่องย่อยสลายขยะอินทรีย์ เพื่อผลิตปุ๋ยอินทรีย์โดยใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ขนาดใหญ่

3.1 บทนำ

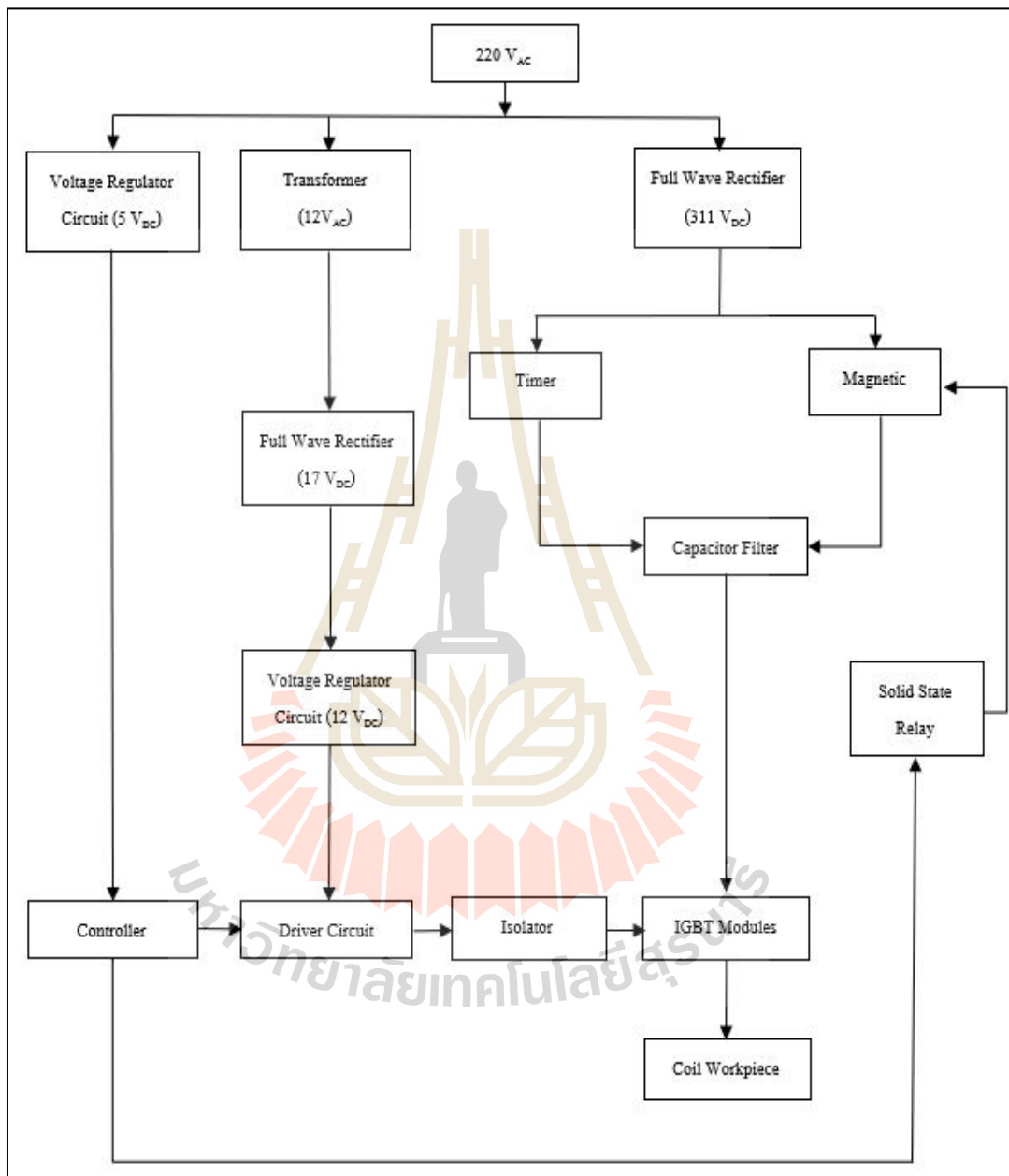
ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบความร้อนเพื่อวิเคราะห์และสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ เพื่อใช้สำหรับในการอบลดความชื้นในขยะอินทรีย์เพื่อกำจัดเชื้อโรคและจุลินทรีย์บางชนิดที่ไม่ดี เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพโดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์บางกลุ่มเข้าไปด้วย เหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์สำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยอินทรีย์และการกำจัดขยะอินทรีย์ที่เน่าเสียเร็วให้มีคุณภาพ เพื่อลดปัญหามลพิษต่าง ๆ ทั้งทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ซึ่งถึงอบขยะอินทรีย์นี้มีความเหมาะสมแก่การนำมาใช้ทดลองและสามารถนำไปใช้งานได้จริง เพื่อให้ได้ข้อมูลจากการทดลองและใช้งานนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ในส่วนของประสิทธิภาพการทำงาน คุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์และระบบต่าง ๆ อีกทั้งยังวิเคราะห์อุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบเพื่อลดความชื้นในขยะอินทรีย์

จากการศึกษาเครื่องย่อยสลายขยะอินทรีย์เพื่อผลิตปุ๋ยโดยใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่นั้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน
2. การออกแบบระบบและ โครงสร้างของถังอบขนาดใหญ่สำหรับทดสอบ
3. การวิเคราะห์ในส่วนอุณหภูมิ ความชื้นและพลังงานความร้อนของขยะอินทรีย์
4. สรุป

3.2 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

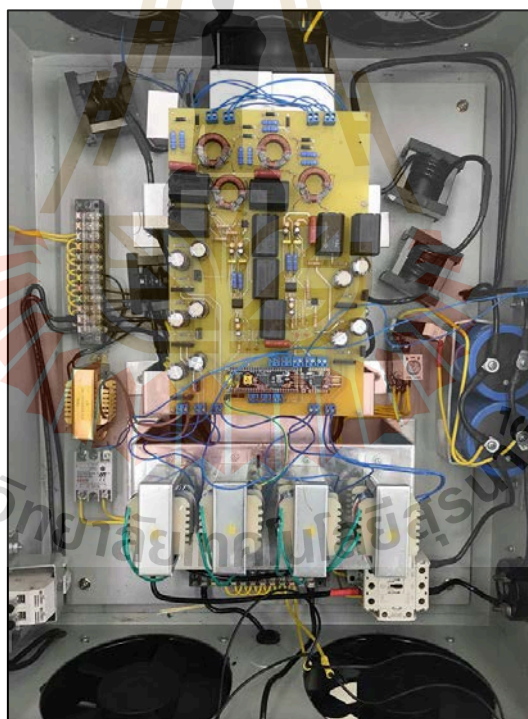
ในการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนสามารถแสดงแผนภาพไดอะแกรมจากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

ในหลักของการสร้างกระแสไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและเกิดความร้อนขึ้นในถังอบขนาดใหญ่ นั้นมีหลักการทำงาน ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็น

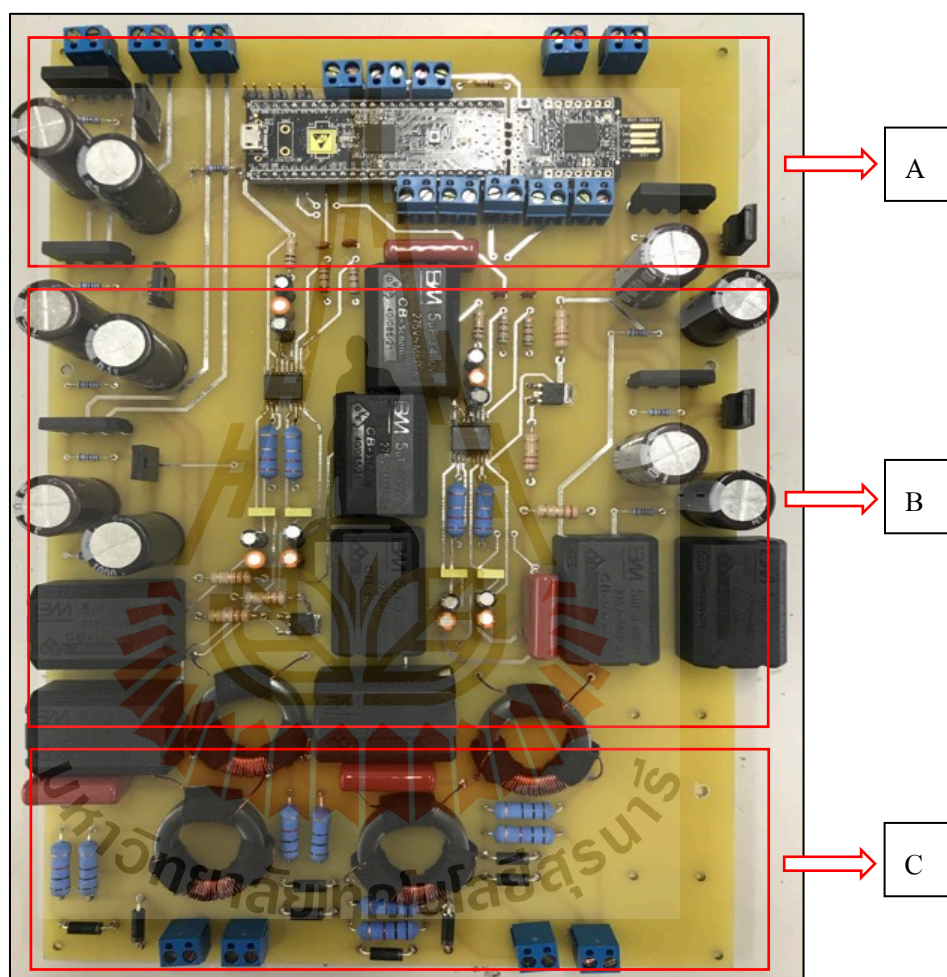
ภาพรวมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) โดยเริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จ่ายไฟให้ส่วนการทำงานทั้งสามส่วนดังนี้ ส่วนแรกป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 311 V_{DC} จากนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ เพื่อกรองไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้เพาเวอร์ไอจีบีที (IGBT) ขนาด 1200 โวลต์ 100 แอมแปร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ประมาณ 32 แอมแปร์ สำหรับความถี่สูง ซึ่งอยู่ที่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อขับโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ ที่มีค่า Inductor (L) อยู่ประมาณ 223.5 ไมโครเฮนรี่ และค่า Resistor (R) อยู่ที่ 3.78 โอห์ม เพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นบนผิวถังเหล็ก ซึ่งระบบถูกขับให้ทำงานโดยวงจรชุด IC Gate Driver โดยใช้ไฟเลี้ยงขนาด 12 โวลต์ ในส่วนที่สอง และถูกควบคุมความถี่ของวงจรด้วยชุดควบคุม Controller ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสัญญาณของวงจร Driver และควบคุมการทำงานของ Solid State Relay โดยใช้ไฟเลี้ยงขนาด 5 โวลต์



รูปที่ 3.2 แสดงระบบของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

จากวงจรดังรูปที่ 3.3 นั้นเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อนำสัญญาณนี้ไปใช้ควบคุม On-Off สวิตช์ของ IGBT ต่อ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก A เป็นส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีขนาด 5 โวลต์ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณออกมา และยังเป็น

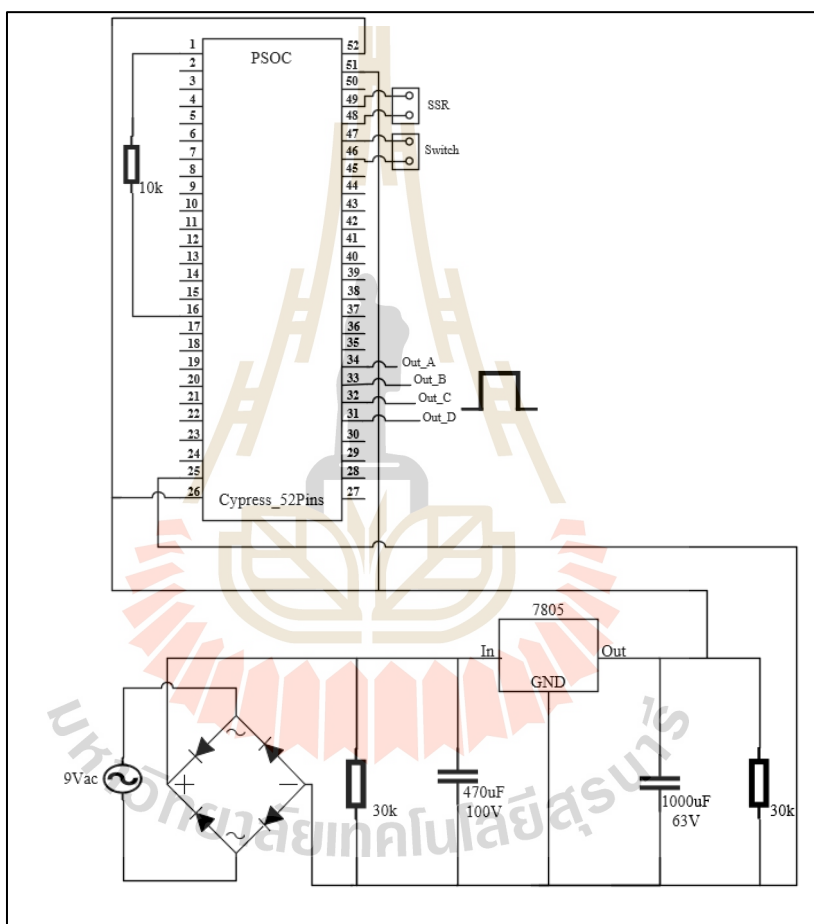
ส่วนควบคุมระบบต่าง ๆ ของวงจรอีกด้วย ส่วนที่สอง B เป็นส่วนที่ใช้วงจรรวม (IC Gate Drivers) ซึ่งเป็นวงจรสั่งการให้ IGBT ทำงานแบบ Switch ได้สมบูรณ์ เพราะทำให้ไม่เกิด Loss ซึ่งในอุปกรณ์ 1 ตัว จะมี 2 Drivers ในตัวทำให้ขับสัญญาณพัลส์ออกมา 12 โวลต์ และในส่วนที่สาม C เป็นส่วนการใช้หม้อแปลงแบบ pulse transformer ทำหน้าที่แยก (Isolated) ระหว่างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ ควบคุมกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ IGBT



รูปที่ 3.3 แสดงระบบของวงจรถูกกำเนิดความถี่ในส่วนต่าง ๆ

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์เป็นวงจรที่กำเนิดรูปคลื่นพัลส์หรือรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งขนาดและความถี่ของรูปคลื่นที่เกิดขึ้นสามารถกำหนดได้ตามที่ออกแบบใช้งานรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจากวงจรพัลส์สามารถนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรทางดิจิทัลได้ ซึ่งสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากระดับลอจิก 0 ไปลอจิก 1 และเปลี่ยนระดับลอจิก 1 เป็น

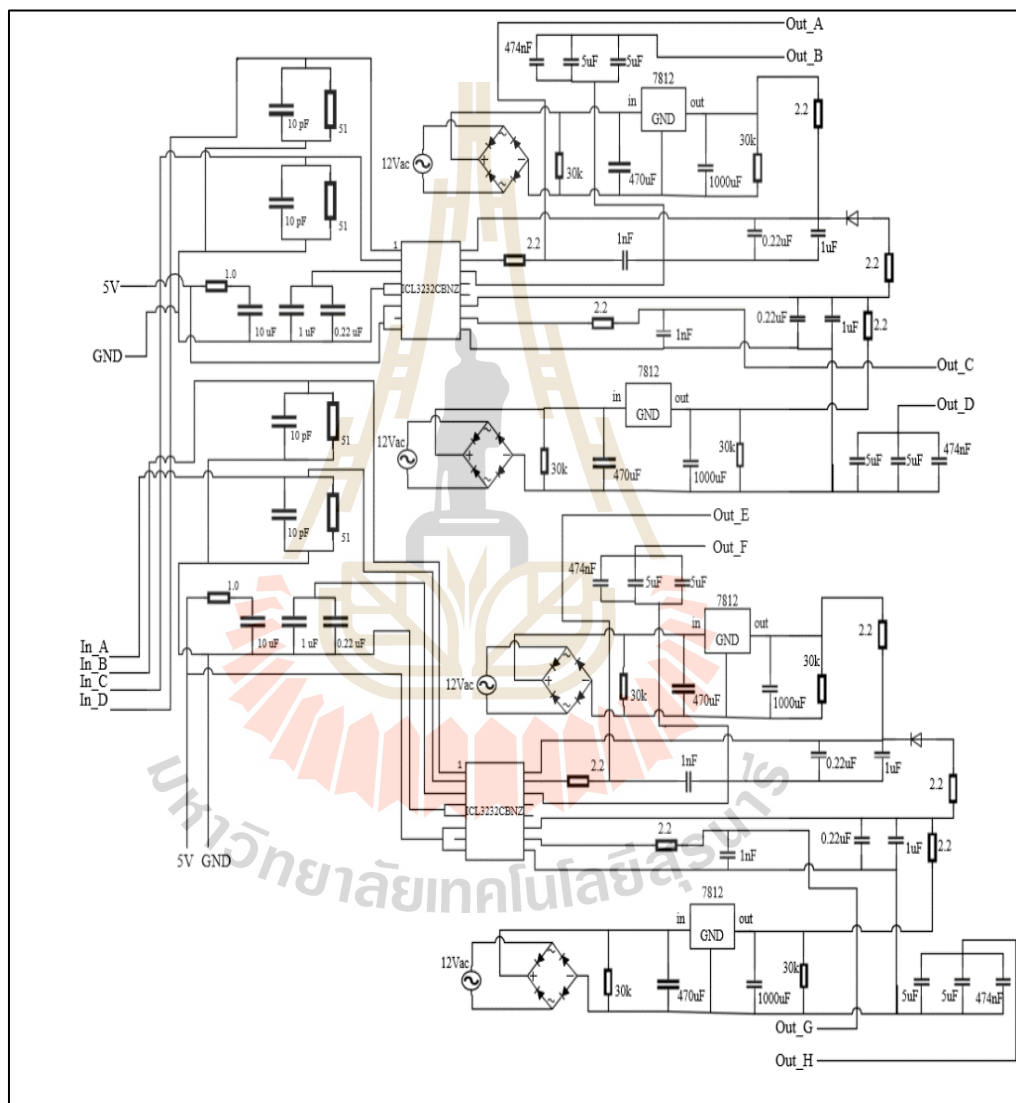
ระดับลอจิก 0 เปลี่ยนวนซ้ำ ๆ เช่นนี้ต่อเนื่องกันไป สัญญาณประกอบไปด้วย แอมพลิจูด (amplitude), ขอบขาขึ้น (rising edge) และขอบขาลง (falling edge), ความกว้างของสัญญาณ (pulse width) และเส้นฐาน (based line) ซึ่งในวงจรด้านล่างนั้นเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit กำเนิดสัญญาณพัลส์ขนาด 5 โวลต์ ออกมาทั้งหมด 4 ขา โดยวงจรนี้ใช้ไฟเลี้ยงจากวงจร Voltage Regulator ขนาด 5 โวลต์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

การออกแบบวงจรขับเคลื่อน (Gate Driver) เป็นวงจรส่วนที่สำคัญ ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณพัลส์ที่สร้างมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (PSoC) กับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (IGBT) ซึ่งในส่วนนี้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สร้างสัญญาณพัลส์ออกมา 5 โวลต์ และได้ส่งเข้าตัว IC Gate Drivers UCC21520DW 4A/6A, 5.7 kVrms Isolated Dual Channel Gate Driver เป็นอุปกรณ์ที่

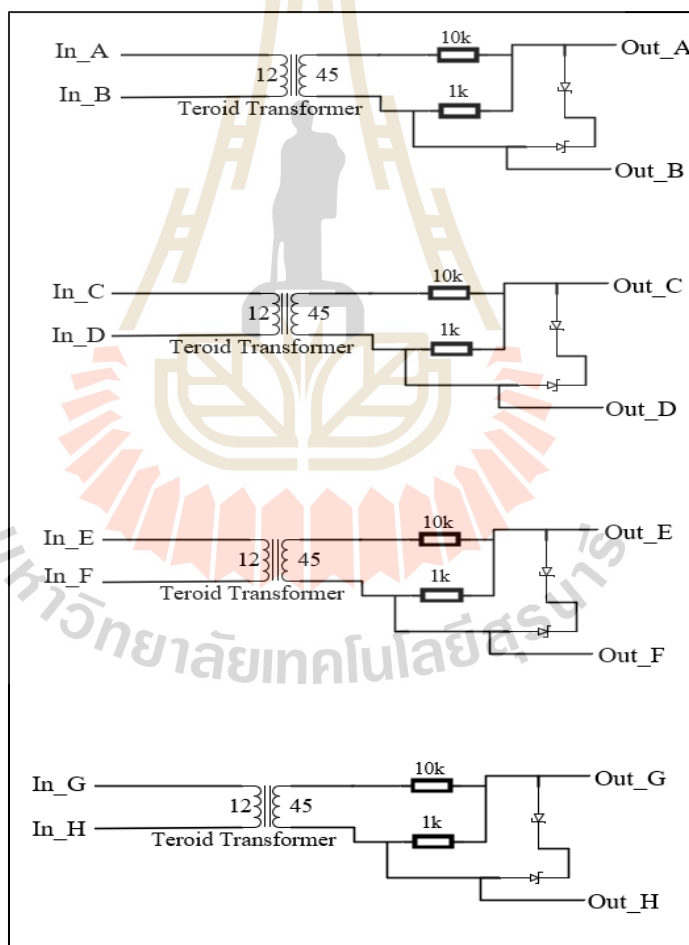
มีจำนวนไคร์ฟเวอร์ จำนวน 2 Drivers กระแสขาออก 6 แอมแปร์ โดยอินพุตใช้เป็นสัญญาณพัลส์ และไฟเลี้ยง 5 โวลต์ ซึ่งวงจรนี้จะมีไฟเลี้ยงฝั่ง Output จากวงจร Voltage Regulator ขนาด 12 โวลต์ จำนวน 2 ชุด และ จะสร้างความถี่และสัญญาณพัลส์ออกมา 12 โวลต์ ทั้งสองชุด Drivers โดยวงจรนี้ ได้ทำการออกแบบไว้ทั้งหมดนี้จะมี 2 ชุด IC Gate Drivers เป็นกำเนิดสัญญาณทั้งซีกบนและซีกล่าง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรขับเคลื่อนกระแสไปยังสวิตช์ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์

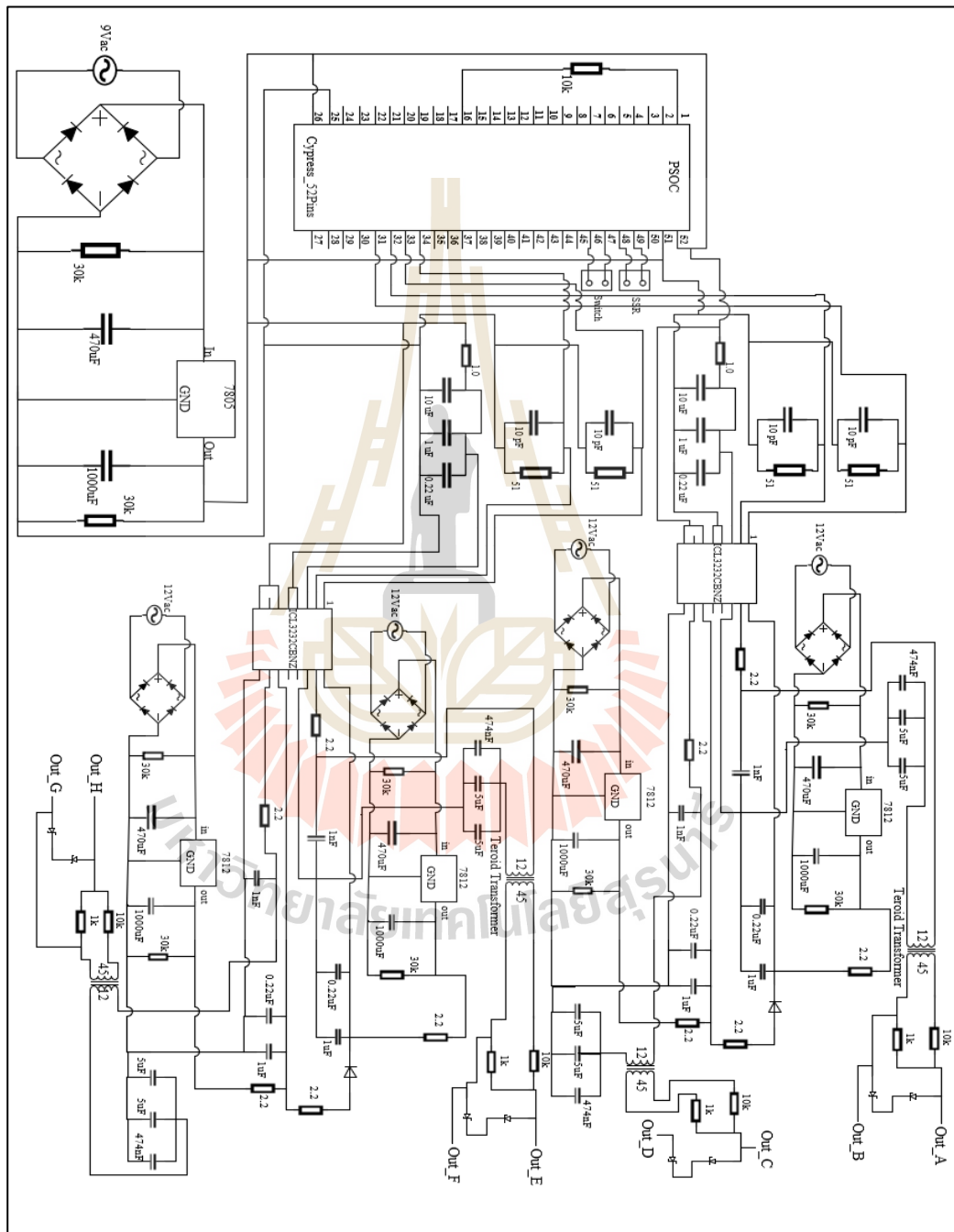
แหล่งจ่ายกำลังสวิตช์ซึ่ง (Switching Power Supply) ที่มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังความถี่สูงและมีการแยกกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

(High Frequency Transformer) 4 ตัวทำหน้าที่เป็นวงจรแยก (Isolated) เพื่อแยกกราวด์ให้กับ IGBT แต่ละตัวดังรูปที่ 3.6 เพื่อสะดวกและปลอดภัย และยังมีข้อดีคือ ให้ Negative bias (โวลต์ลบ) ป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดกับ IGBT ซึ่งป้องกัน IGBT ระเบิดได้ดี ซึ่งการพันหม้อแปลงแบบ Pulse Transformer แบบ 1 ต่อ 1 โดยจำนวนรอบเป็น 12 : 45 รอบและใช้แกน Ferrite ที่เป็นโดนัทแล้วใช้ Zener diode ในการควบคุมโวลต์ ซึ่งวิธีการทำงานของวงจรนี้ นำสัญญาณที่มาจาก IC Gate Drivers 12 โวลต์ Pulse ป้อนเข้าที่ Input ผ่านหม้อแปลงแล้วดูสัญญาณออกจาก Zener Diode จะได้สัญญาณขนาด +12 โวลต์ และ -12 โวลต์ เพื่อที่จะสามารถหยุดการนำกระแส ทำให้เกิดการควบคุมปิด-เปิด ของ IGBT ได้ ซึ่งในวงจร จะมีชุด IGBT 2 ชุด เพื่อสลับกันทำงานและลดความสูญเสีย Loss ที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.6 แสดงวงจร Isolated โดยใช้หม้อแปลง

เมื่อนำวงจรในแต่ละส่วนมารวมกันจะได้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อนำสัญญาณนี้ไปใช้ควบคุม On-Off สวิตช์ของ IGBT ความถี่สูงอีกที ซึ่งวงจรนี้จะได้สัญญาณพัลส์ 24 โวลต์ เป็นไฟ +12 โวลต์ และ -12 โวลต์ จำนวน 2 Output ซึ่งดังแสดงในรูป 3.7



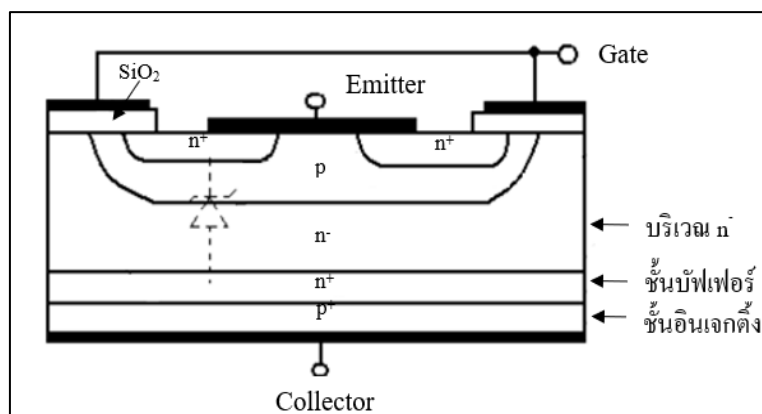
รูปที่ 3.7 Schematic ของวงจรชุดสร้างและขับสัญญาณพัลส์

ไอจีบีที (Isulated Gate Bipolar Transistors: IGBT) คือทรานซิสเตอร์กำลังสูงที่ควบคุมด้วยแหล่งจ่ายแรงดันเป็นผลทำให้ความถี่ในการสวิตช์สูง ซึ่ง IGBT เป็นการนำส่วนที่ดีที่สุดของ ทรานซิสเตอร์สองชนิด โดยใช้ประโยชน์จากการมีค่า Input impedance และ Switching speeds ที่สูง ของ MOSFET กับการใช้ประโยชน์ของการมีค่าแรงดันอิมิต์ที่ต่ำของ BJT เพื่อเป็นทรานซิสเตอร์รูปแบบใหม่ที่มีกระแสควบคุมได้ที่ Collector-Emitter สูง ซึ่งจะสามารถขับโหลดขนาดหนักได้ กับ กระแสที่ต้องใช้ในการขับ Gate ที่ต่ำมากทำให้การออกแบบวงจรภาค Gate driver ง่ายทำให้การควบคุมเปิด ปิด IGBT ก็จะไปด้วย ซึ่ง IGBT จะถูกตั้งให้ทำงาน ON หรือ OFF จากการกระตุ้นที่ ขั้ว Gate ซึ่งถ้าจ่ายแรงดันบวกอินพุตระหว่าง Gate กับ Emitter จะเป็นการสั่งการให้ IGBT ทำงาน ON แต่ในทางกลับกันถ้าจ่ายแรงดันศูนย์หรือแรงดันลบเข้าที่ขั้ว Gate กับ Emitter จะทำให้ IGBT ทำงาน OFF ดังรูปที่ 3.8



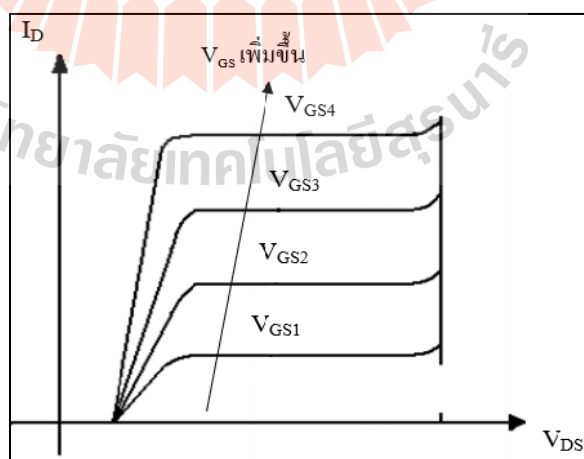
รูปที่ 3.8 แสดงทรานซิสเตอร์กำลังสูง (IGBT)

โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแชนแนล (N-Channel) ดังรูปที่ 3.9 โครงสร้างส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟตแต่จะแตกต่างกันตรงที่ไอจีบีทีจะมีชั้น P^+ หรือชั้นอิงเจ็ทตั้ง จะต่ออยู่ระหว่างขาแครนซึ่งในมอสเฟตจะไม่มีและจากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนพาวเวอร์มอสเฟตโดยทั่วไป



รูปที่ 3.9 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของไอจีบีที

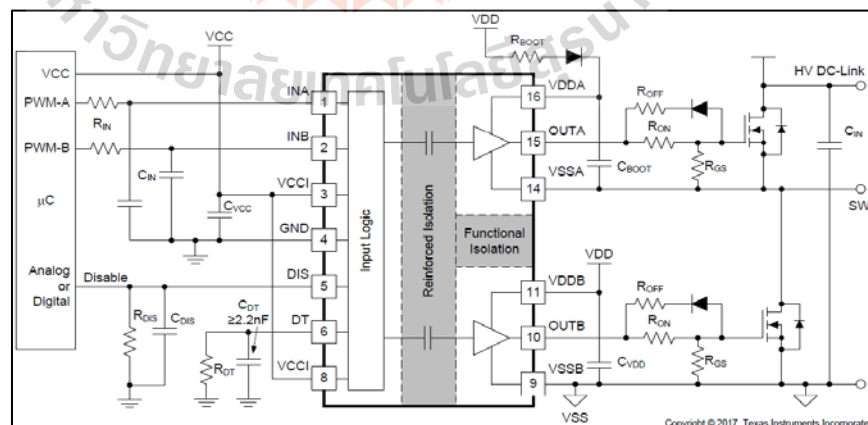
กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ ไอจีบีที มีลักษณะคล้ายกับระหว่างขาเกตและขาซอร์สของทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ ไอจีบีที แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดัน จะเห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟจะมีคุณลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่ต่อเมื่อกระแสเดรนต่ำ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกต และขาซอร์สต่ำลงเข้าใกล้แรงดันเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (Threshold Voltage: $V_{GS(th)}$) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สนั้นต่ำกว่าแรงดันที่จุด $V_{GS(th)}$ แล้ว ไอจีบีทีจะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส (Cut-off)



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ ไอจีบีที

สถานะนำกระแสของ IGBT เมื่อขาเกรนได้รับแรงดันไบอัสตรงคือ ได้รับแรงดันเป็นบวก เมื่อเทียบกับขาซอร์ส และแรงดันระหว่างขาเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมาขังบริเวณรอยเลื่อน n^- จะรวมกับโฮลทำให้ไอจีบีทีอยู่ในสถานะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเกรนไปยังซอร์สได้ และสถานะหยุดนำกระแสของ IGBT เมื่อแรงดันระหว่างขาเกต และขาซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน $V_{GS(th)}$ จะทำให้มีแรงดันที่ไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพ p เป็น n^- ได้ทำให้บริเวณ n^- ไม่ตรงกับบริเวณซอร์ส n^+ ไอจีบีทีจึงจะอยู่ในสถานะหยุดนำกระแส

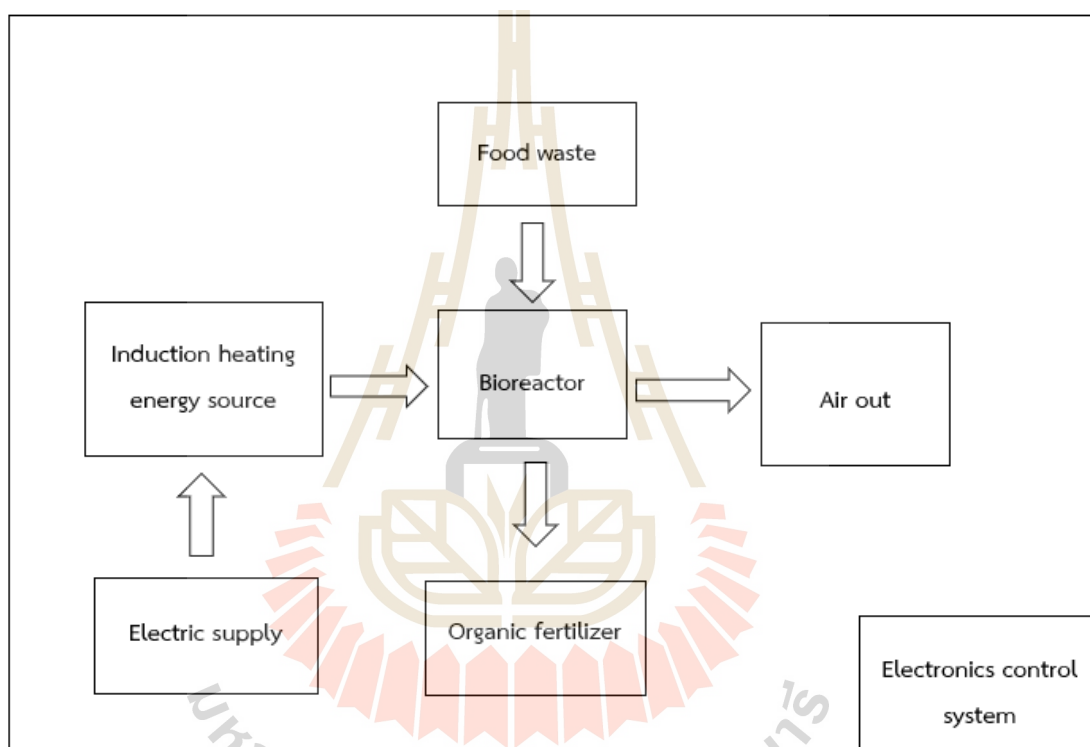
วงจรขับเคลื่อนไอจีบีที (Gate Driver Circuit) เป็นวงจรที่ขยายสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation - PWM) เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของไอจีบีที ซึ่งในการออกแบบนี้ใช้ไอจีบีที เบอร์ FF100R12RT4 และใช้ไอซีไดรฟ์เวอร์ เบอร์ UCC21520DW ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งการออกแบบวงจรขับเคลื่อน ที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณพัลส์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์จากวงจรรวมกำเนิดจากสัญญาณต่าง ๆ กับสวิทช์อิล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง, มอสเฟตกำลัง หรือ ไอจีบีที เป็นต้น โดยทั่วไปวงจรขับเคลื่อนจะทำหน้าที่แยก (Isolated) ความเชื่อมโยงทางไฟฟ้าระหว่างสัญญาณพัลส์ควบคุมกับสวิทช์อิล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรกำลังและทำหน้าที่ตัดสัญญาณควบคุมสวิทช์อิล็กทรอนิกส์กำลัง ในกรณีที่วงจรกำลังกำลังอยู่ในสถานะกระแสไหลกลับหรือแรงดันสูงกว่าพิกัดเป็นต้น ลักษณะของวงจรขับเคลื่อนเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์และสวิทช์อิล็กทรอนิกส์กำลัง ในการสร้างวงจรชุดขับเคลื่อนกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วย IC Gate Driver และ IGBT ซึ่งในส่วนของการสร้างสัญญาณจะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ (PSoC) กำเนิดสัญญาณพัลส์ขนาด 5 โวลต์ ส่วนไอจีบีทีจะทำหน้าที่เป็นตัววิตซ์ซึ่งในวงจร



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรของ IC Gate Driver UCC21520DW

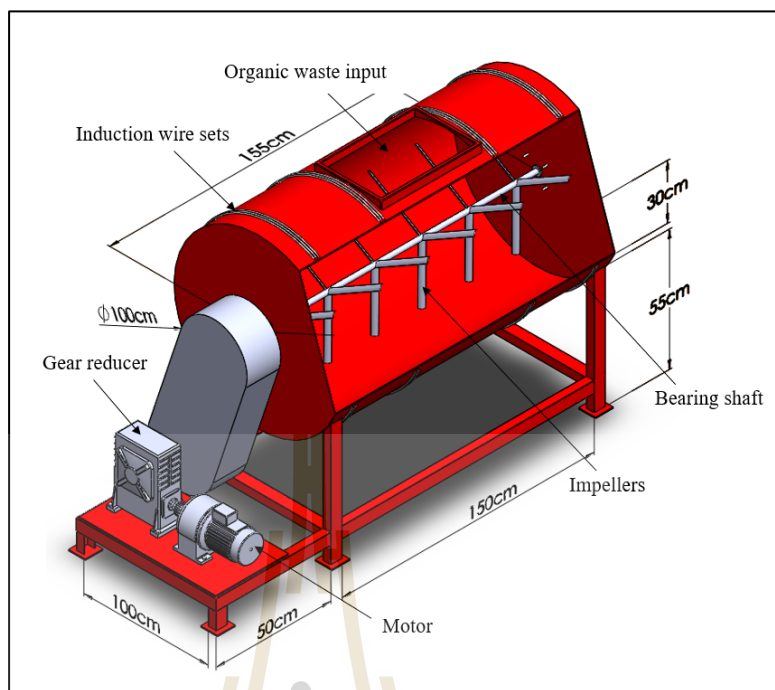
3.3 การออกแบบระบบและโครงสร้างของถังอบขนาดใหญ่สำหรับทดสอบ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงระบบลดความชื้นในขยะอินทรีย์เพื่อย่อยสลายขยะอินทรีย์และเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยอินทรีย์หรือโรงงานต่าง ๆ ที่ต้องการกำจัดขยะอินทรีย์อย่างรวดเร็ว โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่มีขนาดใหญ่สำหรับให้ความร้อนกับถังอบโดยตรง ซึ่งในกระบวนการทำงานของระบบทั้งหมดนั้นแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพระบบไล่ความชื้นในขยะอินทรีย์

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบถังอบขนาดใหญ่ (Bioreactor) สำหรับนำมาใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์โดยโครงสร้างของถังอบ ประกอบไปด้วย ช่องนำวัสดุเข้าและออก ระบบชุดมอเตอร์และเกียร์ลดรอบ ชุดแกนเพลลาและใบกวนภายในถังอบ รวมถึงระบบให้ความร้อนกับถังอบด้วยการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ ดังแสดงเป็นภาพจำลองดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างจำลองภายนอกและภายในของถังบวมถึงระบบให้ความร้อน

งานวิจัยนี้ได้มีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วย ตัวถังที่ทำจากเหล็ก ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงวางแนวนอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 เซนติเมตรเมตร ยาว 154 เซนติเมตร และความหนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งด้านบนมีช่องปิด-เปิด สำหรับบรรจุวัสดุเข้าและนำความชื้นออก ส่วนด้านหลังมีช่องปิด-เปิด สำหรับนำปุ๋ยออก ดังรูปที่ 3.14 ตรงศูนย์กลางของถังตั้งแต่หัวจรดท้ายเป็นเพลากลมหัก ติดตั้งใบกวนทั้งหมด 5 ชุด ปลายเพลาด้านหนึ่งติดชุดเกียร์ครอบ และมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ดังรูปที่ 3.15 เพื่อทำการหมุนแกนใบกวนสำหรับการถ่ายเทความร้อนของวัตถุดิบ และคลุกเคล้าวัตถุดิบกับจุลินทรีย์ภายในให้เข้ากัน ซึ่งวัสดุที่ทำตัวถังเป็นแผ่นเหล็กหนาจึงต้องมีระบบให้ความร้อนกับตัวถังโดยตรง ซึ่งได้ทำการพันลวดเหนี่ยวนำอยู่บริเวณข้างถังเป็นจำนวน 4 ชุด โดยต่ออนุกรมกันเป็น 2 ชุด ดังรูปที่ 3.16 สำหรับใช้กับเครื่องให้ความร้อน ทั้งหมด 2 เครื่อง ซึ่งได้ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) ที่มีขนาดใหญ่ และสำหรับความเร็วของมอเตอร์หมุนใบกวนภายในนั้นถูกควบคุมด้วยวงจร Controller จากภายนอก ดังรูปที่ 3.17

ตัวต้นแบบของถังอบ (Bioreactor) ที่ใช้ในการอบเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ โดยตัวถังเป็นเหล็กหนา 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 เซนติเมตรเมตร ยาว 154 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งสามารถบรรจุขยะอินทรีย์ภายในได้สูงสุดทั้งหมดประมาณ 500 กิโลกรัม ซึ่งสามารถทำการออกแบบเพื่อเพิ่มขนาดถังอบให้มีขนาดใหญ่ และยาวกว่านี้ได้ เพื่อสามารถบรรจุขยะได้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.14 โครงสร้างภายนอกของถังอบและระบบมอเตอร์เกียร์ลดรอบควบคุมชุดไบกวน

ภายในตัวถังอบตั้งแต่หัวจรดท้ายเป็นเพลากลมหั้ก ติดตั้งไบกวนทั้งหมด 5 ชุด เพื่อจะได้ กวนทั่วถึงวัสดุภายในถัง ดังรูปที่ 3.15 อีกทั้งปลายเพลาด้านหนึ่งของถังติดชุดเกียร์ลดรอบจำนวน 2 ตัว ขนาดทดรอบ 1 ต่อ 32 และ 1 ต่อ 40 พร้อมติดตั้งมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 1400 รอบต่อนาที เมื่อคำนวณแล้วแกนเพลและไบกวนจะหมุน 1 รอบต่อนาที เป็นรอบต่ำเพื่อจะเกิดเป็นแรงทอร์คสูง สำหรับกวนวัสดุภายในที่มีน้ำหนักมาก



รูปที่ 3.15 แกนเพลและชุดไบกวนภายในถังอบ

ภายนอกของตัวถังอบนั้นได้ทำการพันลวดทองแดงเบอร์ 10 จำนวน 4 ชุด ซึ่งในแต่ละชุดนั้นจะมีจำนวนรอบอยู่ที่ประมาณ 7 รอบ แล้วนำลวดทั้งสองชุดมาต่ออนุกรมรวมกันจะได้ชุดลวดทองแดง 2 ชุด ด้านหน้าและด้านหลังของถังอบ ดังรูปที่ 3.16 เมื่อทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชุดลวดทองแดงโดยใช้มิเตอร์วัดค่า LCR ชุดแรกจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เท่ากับ 223.5 ไมโครเฮนรี ค่าต้านทาน (Resistor) เท่ากับ 3.78 โอห์ม และวัดชุดที่สอง จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เท่ากับ 211.8 ไมโครเฮนรี ค่าความต้านทาน (Resistor) เท่ากับ 3.83 โอห์ม



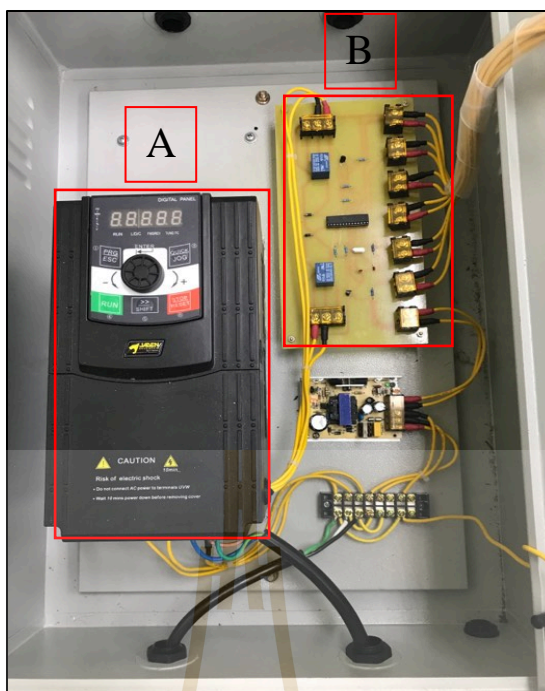
รูปที่ 3.16 แสดงชุดลวดทองแดงที่พันรอบถังจำนวน 2 ชุด

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) ที่ใช้กับถังอบจำนวน 2 เครื่อง โดยทั้งสองเครื่องใช้ค่า Capacitor ที่ 1 ไมโครฟารัด และความถี่อยู่ประมาณที่ 8.88 กิโลเฮิรตซ์ ทั้งสองเครื่องเพื่อทำการแมทซ์อิมพีแดนซ์ โดยเครื่องให้ความร้อน 1 เครื่องใช้กับชุดลวดเหนี่ยวนำ 1 ชุด ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงชุดเครื่องให้ความร้อนกับถังอบจำนวน 2 ชุด

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้งานกันทั่วไป ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ซึ่งในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ พลังงานไฟฟ้าไม่ได้นำเข้าสู่ที่โรเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำของชุดลวดภายในจึงนิยมเรียกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนี้ว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และทิศทางการหมุนของมอเตอร์ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย หรืออีกวิธีการปรับทางหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส คือสลับสายจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ U V W คู่ใดคู่หนึ่ง ดังรูปที่ 3.18 ด้านล่างนั้นเป็นผู้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบอัตโนมัติโดยกรอบภาพ A เป็นตัวอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดควบคุมมอเตอร์ 5 แรง โดยขนาดอินพุตเป็นไฟ 1 เฟส 200-240 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ และ เอาต์พุตเป็น 3 เฟส เพื่อไปใช้ควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส ส่วนกรอบภาพ B เป็นชุดควบคุมระบบอินเวอร์เตอร์อีกที ให้ทำงานอัตโนมัติโดยใช้ Relay ควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน Forward และ Reverse ทำการกลับทิศการหมุนของมอเตอร์ อีกทั้งยังมีปุ่มกดควบคุมโหมดในการทำงานอีกด้วย



รูปที่ 3.18 แสดงตู้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์

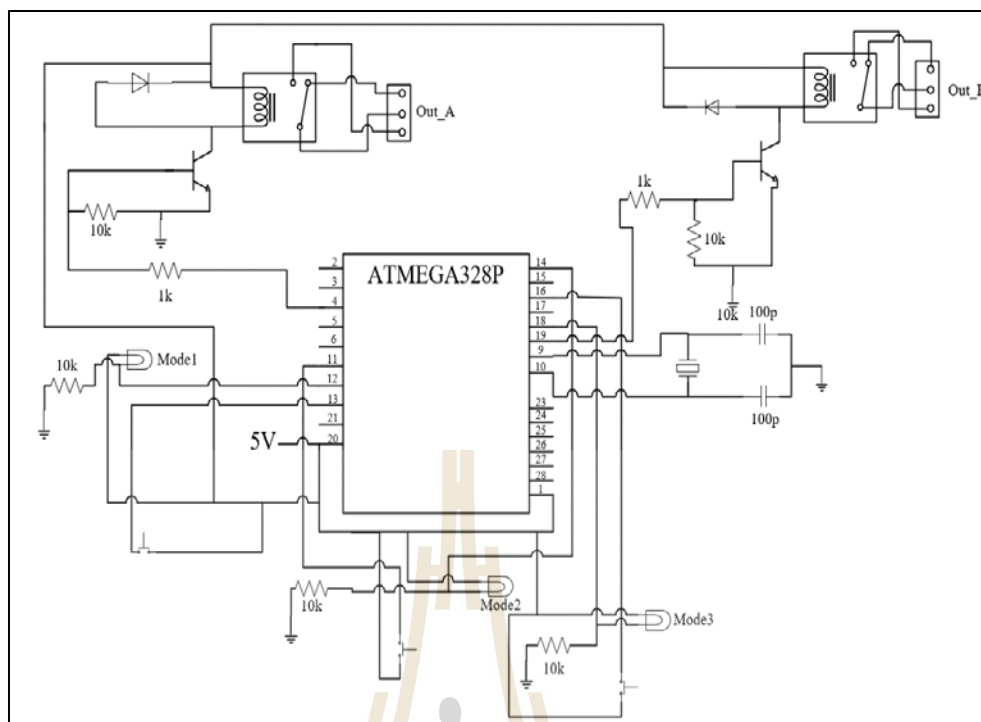
อินเวอร์เตอร์ (Inverter Drive) หรือ เอซีไดรฟ์ (AC Driver) ดังรูปที่ 3.18 (A) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับปรับควบคุมความเร็วรอบและทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งโครงสร้างหลักภายในของตัวอินเวอร์เตอร์ นั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกชุดคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่สองชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับและสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ และ ส่วนที่สามชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์และชุดอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.19 เป็นอินเวอร์เตอร์ Jaden รุ่น DLF1 ขนาด 5 แรงม้า ซึ่งหลักการทำงานของตัวอินเวอร์เตอร์นั้นเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับ (220 โวลต์) ไหลเข้าวงจรจะผ่านเข้าไปยังวงจรคอนเวอร์เตอร์ก่อนเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เมื่อแรงดันถูกกรองสัญญาณให้เรียบแล้วจะส่งผ่านไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถแปลงแรงดันและควบคุมความถี่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความเร็วหรือแรงบิดตามที่ต้องการได้



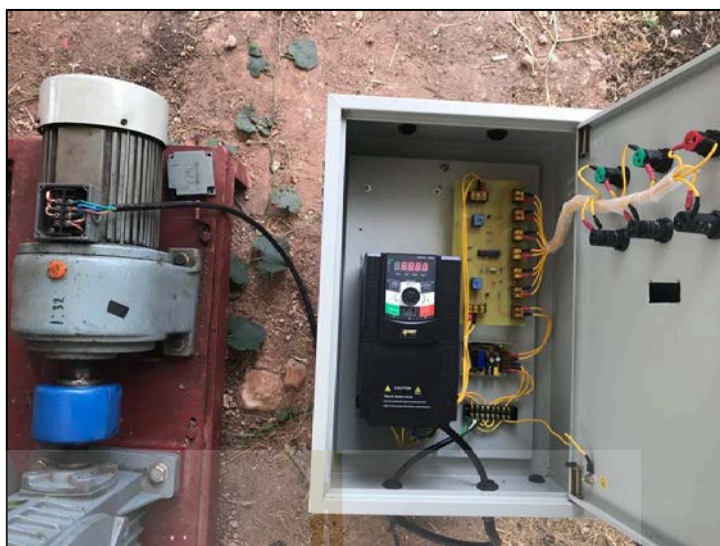
รูปที่ 3.19 อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์

จากรูปตู้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ มีส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.18 (B) เป็นวงจรที่ใช้ควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน Forward และ Reverse เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปและกลับได้อัตโนมัติ โดยระบบนี้ได้ทำการออกแบบโหมดการทำงานอยู่ทั้งหมด 3 โหมด โดยโหมดแรกเป็นระบบ เปิด-ปิดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โหมดที่สองเป็นโหมดที่ให้อินเวอร์เตอร์ทำงานทั้ง Forward และ Reverse สลับกันไปมาโดยแล้วหยุดพัก โดยระบบนี้สามารถตั้งเวลาได้ ให้ทำงานกี่นาทีก่อนค่อยเปลี่ยนเป็นโหมดพักแล้วทำการหมุนต่ออีกด้าน เพื่อเป็นการกลับพลิกวัสดุภายในเพื่อให้เกิดถ่ายเทพลังงานความร้อนและเป็นการคลุกเคล้าวัสดุไปมาด้วย ส่วนโหมดที่สามเป็นโหมดการทำงานให้หมุนไปทาง Forward หรือ Reverse อย่างเดียวเพื่อใช้สำหรับอบเสร็จสิ้นกระบวนการหมดแล้วต้องการนำวัสดุภายในถึงออกโหมคนี้จะช่วยโกยวัสดุมาทางช่องทางออก ซึ่งวงจรการออกแบบทั้งหมดแสดงเป็น Schematic ด้านล่างดังรูปที่ 3.20 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ IC ATMEGA328P ในการควบคุมระบบทั้งหมด



รูปที่ 3.20 แสดงภาพ Schematic ของวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์

เมื่อได้ตู้ควบคุมมอเตอร์แล้วก็นำมาต่อกับมอเตอร์ของถังอบ ซึ่งมอเตอร์นี้เป็นมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้า 2.2 กิโลวัตต์ 1400 รอบต่อนาที ซึ่งเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์นี้เป็นแบบ 3 เฟส เหมือนกัน ซึ่งใช้วิธีการต่อกับมอเตอร์แบบสตาร์ เพราะโหลดที่ใช้ดึงกำลังไฟมาก ดังรูปที่ 3.21 โดยการต่อแบบสตาร์-เคลด้า นั้นเป็นเทคนิคเพื่อการสตาร์ทมอเตอร์แบบลดกระแสตอนเริ่มต้นเพื่อแก้ปัญหากระแสกระชากสูง การสตาร์ทแบบสตาร์-เคลด้า นี้จึงเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากออกแบบง่ายและเหมาะสำหรับการสตาร์ทมอเตอร์สามเฟสแบบเหนี่ยวนำ ใช้สำหรับมอเตอร์ที่มีการต่อขดลวดภายในที่มีปลายสายต่อออกมาข้างนอก 6 ปลายและมอเตอร์จะต้องมีพิกัดแรงดันสำหรับการต่อแบบเคลด้าที่สามารถต่อเข้ากับแรงดัน 3 สายจ่ายได้อย่างปลอดภัย เมื่อทำการต่อระบบมอเตอร์แล้ว จะมีชุดเกียร์ทดเพื่อลดรอบการหมุนของมอเตอร์ลง 2 ชุด โดยชุดแรกมีอัตรา การลดรอบเป็น 1 ต่อ 32 จากจำนวนรอบการหมุนมอเตอร์เป็น 1400 รอบต่อนาที เมื่อผ่านเกียร์ทด ชุดแรกจะเหลือจำนวนรอบประมาณ 43 รอบต่อนาที หลังจากนั้นก็ใช้เกียร์ทดที่มีอัตราการลดรอบ 1 ต่อ 40 รอบต่อนาที ลดรอบลงอีก จาก 43 รอบ ก็จะเหลือประมาณ 1 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นรอบต่ำทำให้ชุดเพลลาและใบกวนภายในถังก็จะหมุนช้า 1 รอบต่อนาที สาเหตุที่ลดรอบให้ช้าลงนั้นเพื่อให้เกิดแรงหมุน (Torque) ที่มากพอใช้สำหรับกวนวัสดุภายในที่มีน้ำหนักมาก



รูปที่ 3.21 แสดงการต่อชุดควบคุมมอเตอร์แบบสตาร์

3.4 การวิเคราะห์อุณหภูมิกับความชื้นและพลังงานความร้อนของขยะอินทรีย์

ในงานวิจัยนี้จะทำการไล่ความชื้นออกจากขยะอินทรีย์ให้เหลือความชื้นประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ความร้อนอยู่ที่ประมาณ 85-95 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงคำนวณค่าพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้าของระบบเพื่อทำการวิเคราะห์ชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่นำมาใช้กับถังหมัก (Bioreactor) ซึ่งถังหมักที่ทำการออกแบบนี้สามารถบรรจุขยะอินทรีย์ได้สูงสุด 500 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มแรกประมาณ 65-75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการอบไล่ความชื้นแล้วจะเหลือความชื้นของวัตถุดิบที่ประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ และเหลือน้ำหนักสุดท้ายของวัตถุดิบประมาณ 230 กิโลกรัม ซึ่งหาได้จากถรรพการคำนวณในสมการที่ 3.1

$$W_f = \frac{W_i(1 - M_i)}{1 - M_f} \quad (3.1)$$

ถึงใส่ขยะอินทรีย์ได้สูงสุดประมาณ 500 กิโลกรัม ที่มีความชื้นประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการอบแล้วจะเหลือความชื้นอยู่ที่ 35 เปอร์เซ็นต์ ทำการคำนวณน้ำหนักที่เหลือโดยประมาณ ซึ่ง W_f คือน้ำหนักสุดท้าย (กิโลกรัม), W_i คือน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม), M_i คือความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์) และ M_f คือความชื้นสุดท้ายหลังการอบไล่ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

$$W_f = \frac{500(1-0.70)}{1-0.35} = 230 \text{ กิโลกรัม}$$

จากการคำนวณจะเหลือน้ำหนักสุดท้าย $W_f = 230$ กิโลกรัม และน้ำที่ระเหยออกไป $500 - 230$ เท่ากับ 270 กิโลกรัม แล้วนำน้ำที่ระเหยออกไปนำมาคำนวณหาพลังงานความร้อนจากสมการที่ 3.2

$$Q_{Total} = mc\Delta T + ml \quad (3.2)$$

โดยที่ Q_{Total} คือค่าพลังงานความร้อนทั้งหมด (แคลอรี), m คือ คือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยออกไป (กรัม), c คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (1 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส), ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพปกติ (องศาเซลเซียส) และ l คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (540 แคลอรีต่อกรัม)

$$Q_{Total} = 270,000 \times 1 \times (100 - 30) + 270,000 \times 540 = 1.647 \times 10^8 \text{ แคลอรี}$$

$$Q_{Total} = 16.47 \times 10^7 \text{ จูล}$$

เมื่อทำการคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าจากการใช้เวลาทั้งหมด 20 ชั่วโมงในการอบไล่ความชื้นจากสมการที่ 3.3

$$P = \frac{Q}{t} \quad (3.3)$$

$$P = \frac{1.647 \times 10^8}{20 \times 60 \times 60} = 6.863 \text{ กิโลวัตต์}$$

แต่เนื่องด้วยวิธีการให้ความร้อนของเรานั้นให้ความร้อนจากถังอบโดยตรงเมื่อถังอบร้อนจึงถ่ายเทพลังงานความร้อนมายังถังจึงเกิดการสูญเสียและเกิดการสะสมพลังงานความร้อนในถังก่อนที่จะถ่ายเทมายังขยะอินทรีย์อีกครั้ง อีกทั้งถังอบยังมีความหนาถึง 10 มิลลิเมตร จากที่ทำการสร้างเครื่องให้ความร้อน ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าอยู่เครื่องละประมาณ 9.6 กิโลวัตต์ ทั้งหมด 2 เครื่องรวม 19.6 กิโลวัตต์ เพื่อเพียงพอสำหรับอบขยะอินทรีย์จำนวนมากในเวลาลดน้อยลง เมื่อทำการคิดค่าไฟฟ้า

ของเครื่องให้ความร้อนในขณะเปิด 20 ชั่วโมง นั้นจะอยู่ที่ ครั้งละประมาณ 1,024 บาท โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3.50 บาท

จากขนาดของถังอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 เซนติเมตร ยาว 155 เซนติเมตร เมื่อคำนวณปริมาตรน้ำของถัง จากสมการ 3.4

$$V = \pi r^2 h \quad (3.4)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของทรงถังทรงกระบอก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

r คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)

h คือ ความยาวถัง (เซนติเมตร)

ซึ่งจะได้ปริมาตรเท่ากับ 1,473,014 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถบรรจุขยะได้ขนาด 3/4 ของถังคิดเป็นน้ำหนักแล้วไม่รวมไบกวนจะอยู่ประมาณ 1.1 ตัน แต่เมื่อมีไบกวนภายในถังทดลองแล้วสามารถบรรจุน้ำหนักได้ที่ 400 กิโลกรัม ซึ่งสามารถนำไปเทียบขนาดเพื่อออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ และถ้าต้องการออกแบบถังให้สามารถบรรจุขยะได้ประมาณ 1 ตัน นั้นสามารถเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวขึ้นได้ โดยที่ทำการออกแบบเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 เซนติเมตร ความยาวเพิ่มเป็น 250 เซนติเมตร เมื่อคำนวณเป็นปริมาตรขณะที่ไม่มไบกวนได้เท่ากับ 4,417,867 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อมีไบกวนในถังและบรรจุขยะขนาด 3/4 ของถังจะได้ปริมาตรขยะที่สามารถบรรจุได้ประมาณ 1,200,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ 1.2 ตัน

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาและออกแบบระบบสำหรับการวิเคราะห์และสร้างชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่มีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะนำไปใช้สำหรับอบเพื่อลดความชื้นและกำจัดขยะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูง รวมถึงการออกแบบและสร้างถังอบที่มีขนาดใหญ่ ระบบควบคุมชุดไบกวนและระบบสำหรับการให้ความร้อนกับถังอบเพื่อให้ได้อุณหภูมิและความชื้นมีความเหมาะสมกับการใช้งาน รวมถึงการวิเคราะห์ในส่วนอุณหภูมิ ความชื้นและพลังงานความร้อนของขยะอินทรีย์ เพื่อทำการทดสอบและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

สำหรับในบทนี้กล่าวถึงการทดลองเครื่องกำเนิดขั้วอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปั๊มที่มีคุณภาพได้ทำการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับให้ความร้อนกับถังอบโดยตรง ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง และเก็บผลการทดลองในส่วนต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในส่วนของวงจรเหนี่ยวนำสำหรับให้ความร้อนกับถังและนำข้อมูลที่ได้นำมาสรุปผลการทดลอง

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 วิธีการทดลองเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อไปใช้กับถังอบ

การทดลองนี้จะใช้สัญญาณ PWM มาควบคุมการทำงานของไอจีบีที 4 ตัว เพื่อให้ทำงานเปิด-ปิดเป็นสวิตช์ สำหรับไปขับขดลวดที่พันอยู่กับถัง มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการใส่วัสดุที่เป็นขั้วอินทรีย์ลงไปในถังอบจากด้านบนถัง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการต่อเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนกับขดลวดที่พันอยู่รอบถังโดยจะใช้เครื่องเหนี่ยวนำจำนวน 2 เครื่อง

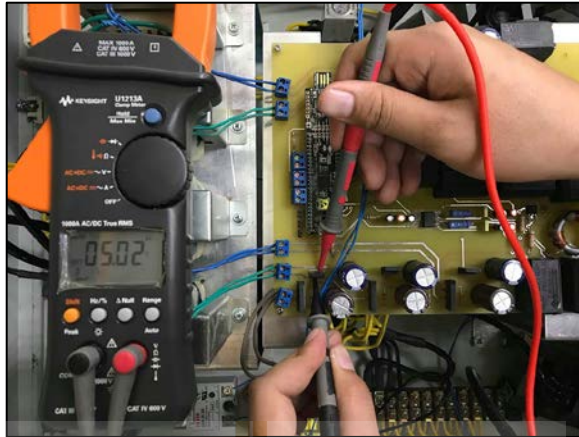
ขั้นตอนที่ 3 นำสายไฟสองสายดึงไฟฟ้ามาจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส เนื่องจากตัวเครื่องกินกระแสสูงประมาณ 30 แอมแปร์

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากต่อระบบไฟเข้าเครื่องแล้วทำการยกเบรกเกอร์ขึ้นเพื่อเปิดเครื่องแล้วทำการรอประมาณ 40 วินาที เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าตัวเก็บประจุ

4.3 ผลการทดลอง

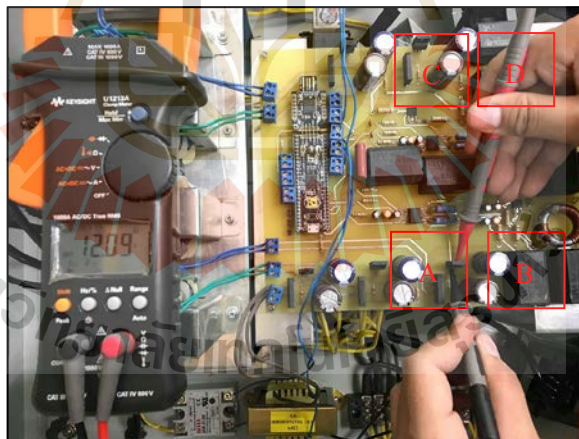
ทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ บนบอร์ดกำเนิดสัญญาณ PWM ด้วยมัลติมิเตอร์ เพื่อดูค่าแรงดันไฟในแต่ละจุดว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยได้ผลดังที่จะแสดงต่อไปนี้

วัดแรงดันไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ 7805 เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับบอร์ดไมโคร PSoc และเป็นไฟเลี้ยงขาเข้าของ IC Gate Drivers ขนาด 5 โวลต์ ตามรูปที่ 4.1



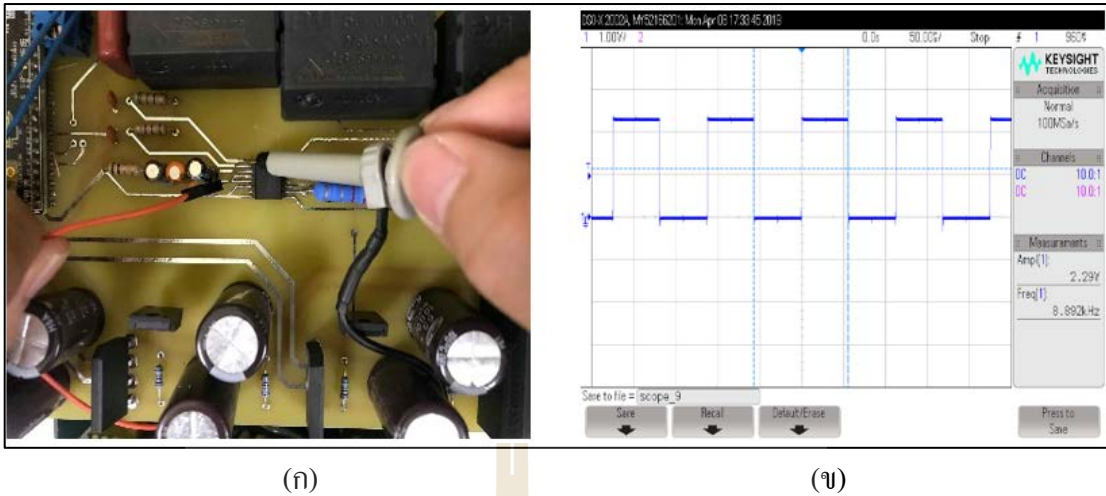
รูปที่ 4.1 วัดแรงดันบนวงจรควบคุมแรงดันแบบคงที่ 5 โวลต์

วัดแรงดันไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ 7812 สำหรับเป็นไฟเลี้ยงให้กับขาออกของ IC Gate Drivers ซึ่งต้องแยกเป็น 2 ชุดเพราะเนื่องจากชนิด IC นี้มี 2 วงจรที่ Isolated กันอยู่จึงใช้ระบบไฟร่วมกันไม่ได้ เหตุนี้จึงต้องแยกไฟเข้าขาออกเป็น 12 โวลต์ 2 ชุด ต่อหนึ่งวงจร ดังรูป 4.2 (A-D)



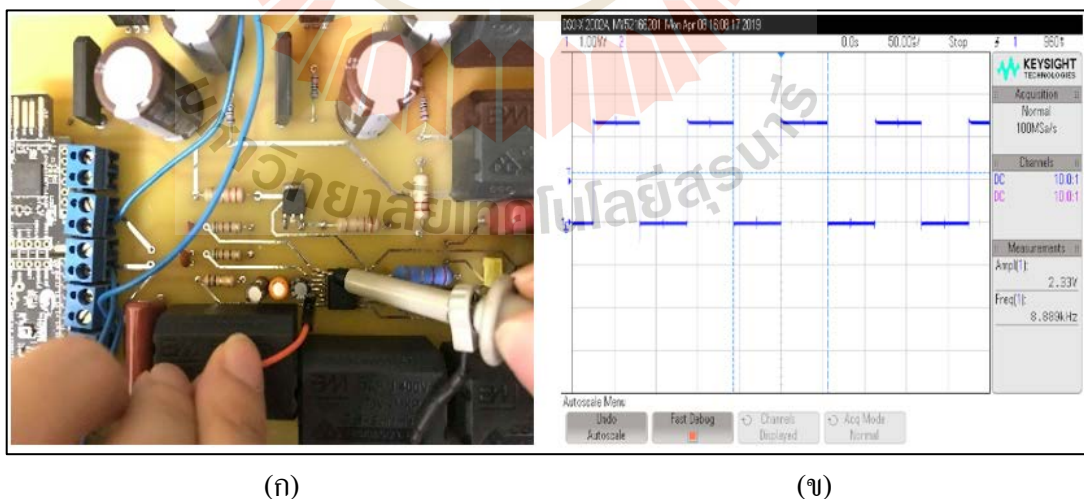
รูปที่ 4.2 วัดแรงดันบนวงจรควบคุมแรงดันแบบคงที่ 12 โวลต์

ทำการวัดแรงดันและสัญญาณที่ออกมาจากบอร์ดไมโคร PSoC ที่ส่งสัญญาณต่อไปยัง IC Gate Drive เป็นสัญญาณขนาด 2.29 โวลต์เพราะเนื่องจากถูก R ลดแรงดันลงไปด้วย โดยสัญญาณจากไมโครที่ออกจากขา 31 และ 32 นั้นจะเข้าขาที่หนึ่งและขาสองของ Driver ซึ่งจะมีสองชุดการทำงานในตัวเดียว ซึ่งไคร์เวอร์หนึ่งตัวนี้จะใช้สัญญาณขับทั้งหมด 2 ชุด เป็นภาคขยายบนและล่าง



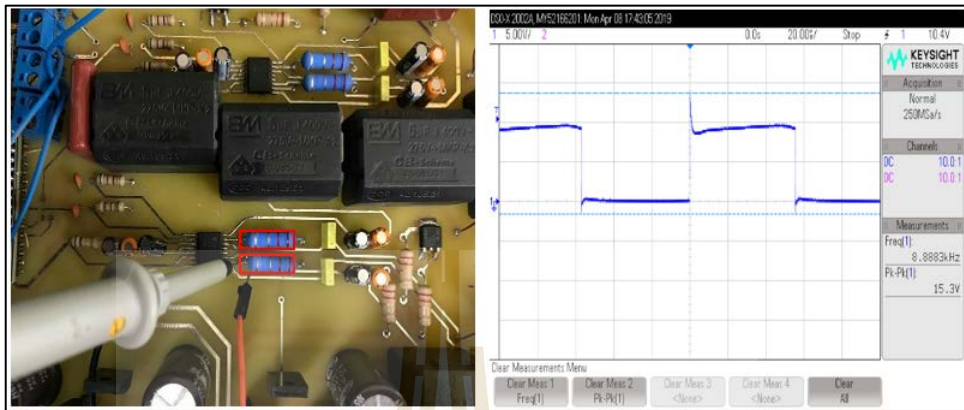
รูปที่ 4.3 (ก) วัดสัญญาณที่เข้า IC Gate Driver ขา 1 และขา 2 เทียบกับกราวด์ ชุดแรก
และ (ข) สัญญาณพัลส์ขนาดแอมพลิจูด 2.29 โวลต์ ที่ความถี่ 8.89 กิโลเฮิรตซ์

ในบอร์ดกำเนิดสัญญาณนั้นจะมีตัว IC Gate Drive จำนวน 2 ชุด เพื่อทำหน้าที่ในการขับสวิทช์ IGBT ให้ทำงาน On-Off สลับกัน เพราะฉะนั้นจึงทำการวัดสัญญาณที่ส่งไปให้ตัวไดรเวอร์อีกหนึ่งชุดโดยสัญญาณนี้มาจากไมโครที่ออกจากขา 33 และ 34 จะส่งเข้าขาแรกและขาสองของของตัว Driver อีกหนึ่งชุด



รูปที่ 4.4 (ก) วัดสัญญาณที่เข้า IC Gate Driver ขา 1 และขา 2 เทียบกับกราวด์ ชุดที่สอง และ
(ข) วัดสัญญาณพัลส์ขนาดแอมพลิจูด 2.33 โวลต์ ที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิรตซ์

IC Gate Driver หนึ่งตัวนั้นจะมีชุด Isolated แยกวงจรบนและล่างออกจากกัน ฉะนั้นจะได้ 2 เอาต์พุต ที่ไดร์ทสัญญาณขนาดแอมป์ริจูดประมาณ 10 โวลต์ จึงทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตตัวแรก

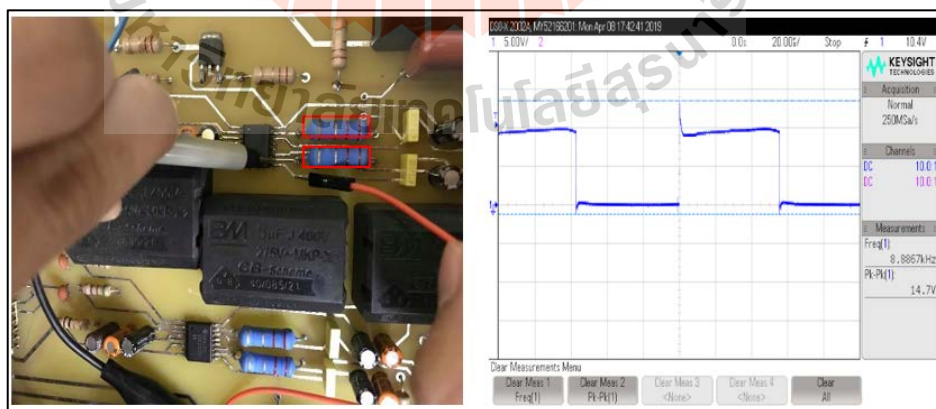


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Gate Drive ทั้งสองช่องทาง 10 และขา 15 เทียบกับขากราวด์ และ (ข) วัดสัญญาณพัลส์ที่ออกจาก IC Gate Drive ขนาด 15.3 V_{p-p}

โดยชุดขับสัญญาณที่ทำการออกแบบไว้จะมีทั้งหมด 2 วงจร โดยทั้งสองวงจรมานำไปขับสวิตช์เปิด-ปิด IGBT ทั้งหมด 2 ตัว ให้สลับการทำงานเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ได้ จึงทำการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นในตัวที่สองขนาดแอมป์ริจูดประมาณ 10 โวลต์ ดังรูปที่ 4.6

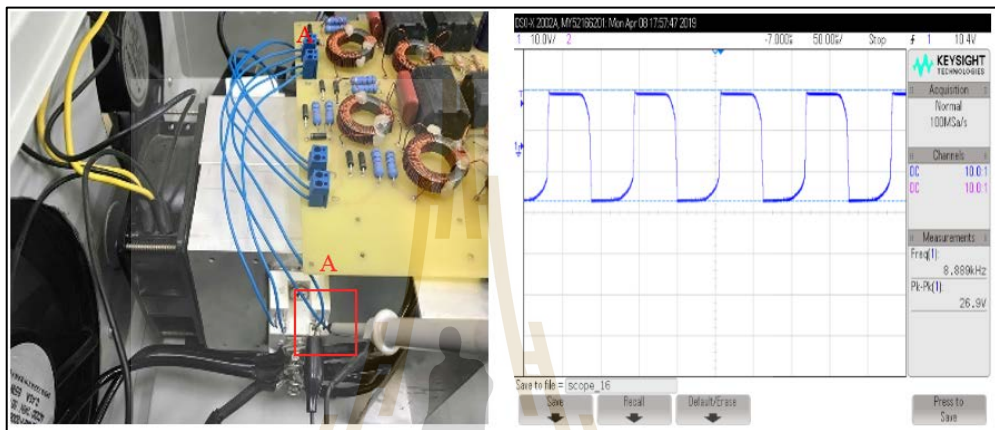


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Gate Drive ทั้งสองช่องทาง 10 และขา 15 เทียบกับขากราวด์ และ (ข) ทำการวัดสัญญาณพัลส์ที่ออกจาก IC Gate Drive ขนาด 14.7 V_{p-p}

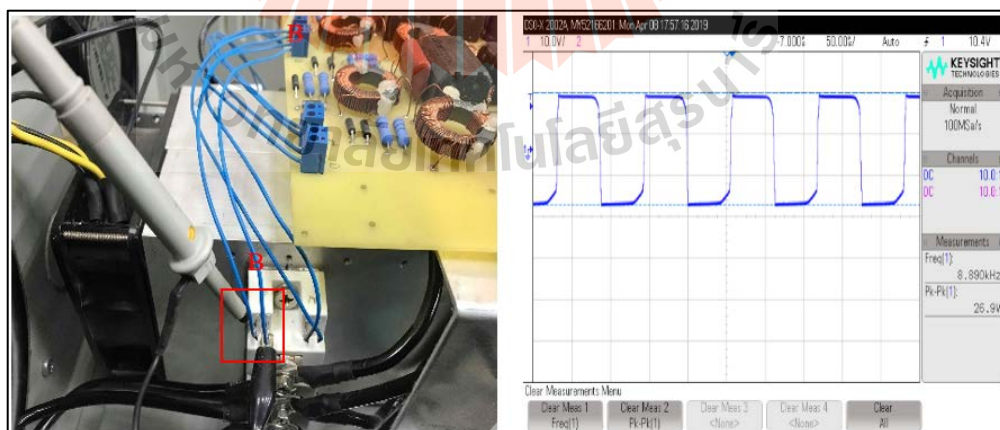
หลังจากสัญญาณได้ถูกขับจาก IC Gate Drive ให้มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นแล้วนั้นก็จะถูกส่งมายัง IGBT ซึ่งจะมีส่วนที่เป็นหม้อแปลงแบบ Pulse Transformer โดยจำนวนรอบเป็น 12 : 45 รอบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแยก (Isolated) เพื่อแยกกราวด์ให้กับ IGBT แต่ละตัว และยังให้โวลต์ลบซึ่งจะเกิดเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดประมาณ 27 โวลต์ แล้วจึงใช้ Zener diode ในการควบคุมโวลต์ให้เป็นแรงดันบวก 13.5 โวลต์ และเป็นแรงดันลบ -13.5 โวลต์ เพื่อควบคุมการ ปิด-เปิด ของ IGBT



(ก)

(ข)

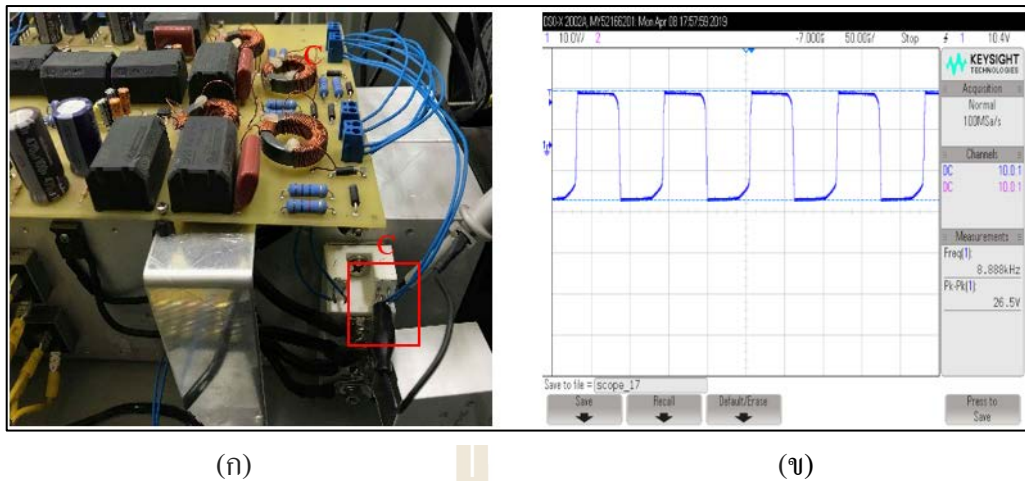
รูปที่ 4.7 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง A และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด 26.9 V_{P-P} และความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง B และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด 26.9 V_{P-P} และความถี่ 8.89 กิโลเฮิร์ตซ์



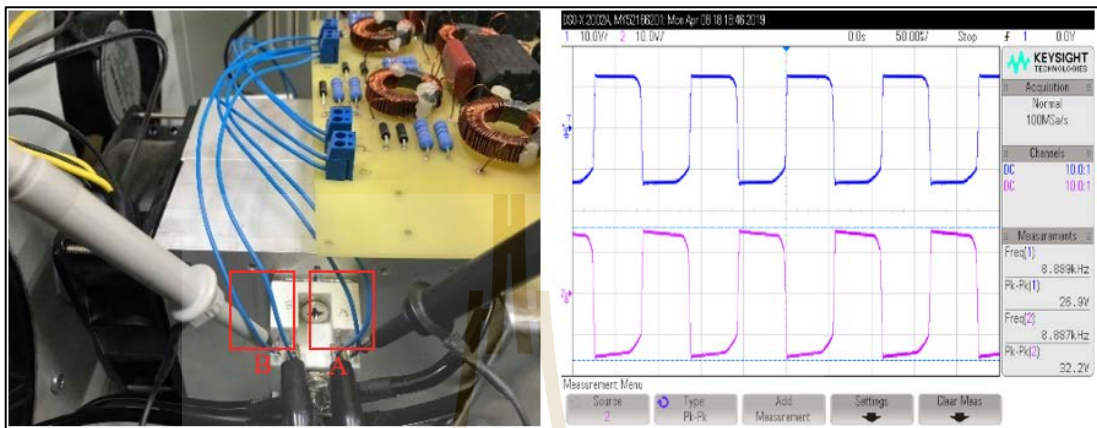
รูปที่ 4.9 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง C และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด $26.5 V_{p-p}$ และความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.10 (ก) วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านมาจากหม้อแปลง มายัง IGBT ณ ตำแหน่ง D และ (ข) รูปสัญญาณพัลส์เพื่อดูแรงดันที่มีขนาด $27.3 V_{p-p}$ และความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์

หลังจากทำการเช็คสัญญาณที่เข้า IGBT ที่ตำแหน่ง A-D แล้ว สัญญาณมีลักษณะเป็นพัลส์ เกิดเป็นแรงดันด้านซิกบวคและแรงดันด้านซิกลบที่สามารถนำไปควบคุมให้ไอจีบีทีให้ทำงานเปิดและปิดได้พร้อมทั้งยังมีส่วนที่เป็นหม้อแปลงที่ทำหน้าที่เป็น Isolated แยกวงจรภาคกำเนิดสัญญาณออกจากสวิทช์ไอจีบีทีเพื่อป้องกันความเสียหายภาคขับสัญญาณลงได้

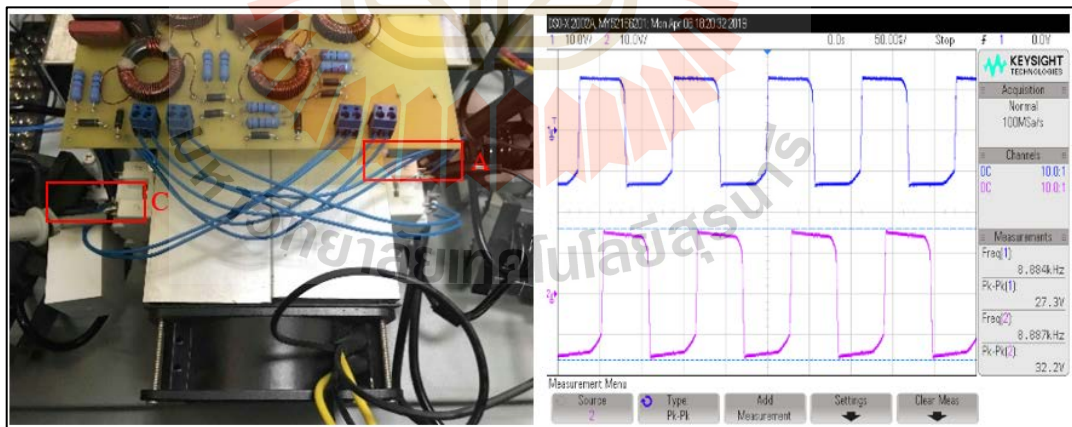
เมื่อทำการเช็คสัญญาณที่เข้าไอจีบีทีแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงต้องทำการเช็คการทำงานของไอจีบีทีทั้งสองว่าสามารถสลับกันทำงานให้ on และ off พร้อมกันแต่คนละฝั่งของไอจีบีทีได้ไหมเพื่อได้สัญญาณ Full wave ที่สลับกันทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.11-4.16



(ก)

(ข)

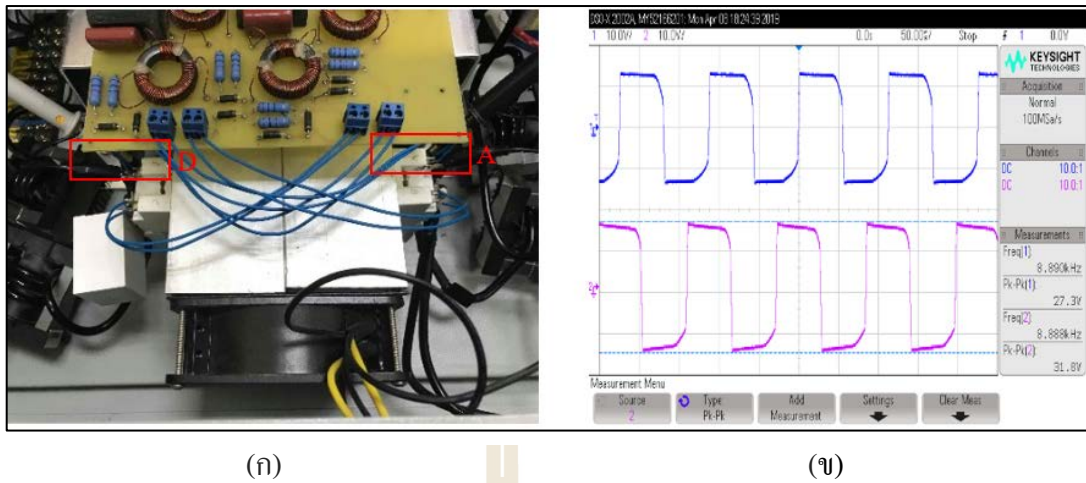
รูปที่ 4.11 (ก) วัดการทำงานไอจีบีทีตัวเดียวกันที่ตำแหน่ง A และ B และ
(ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงานเปิดและปิด



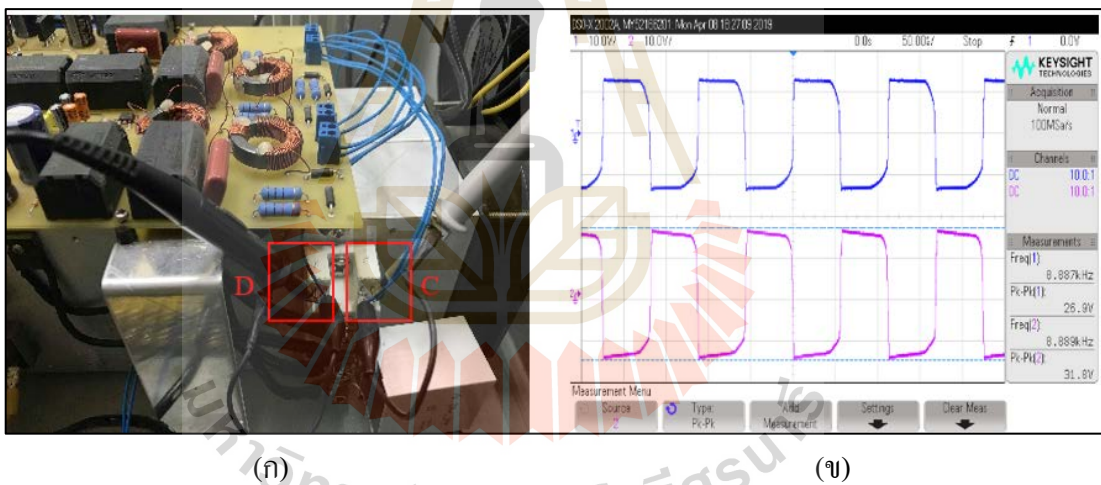
(ก)

(ข)

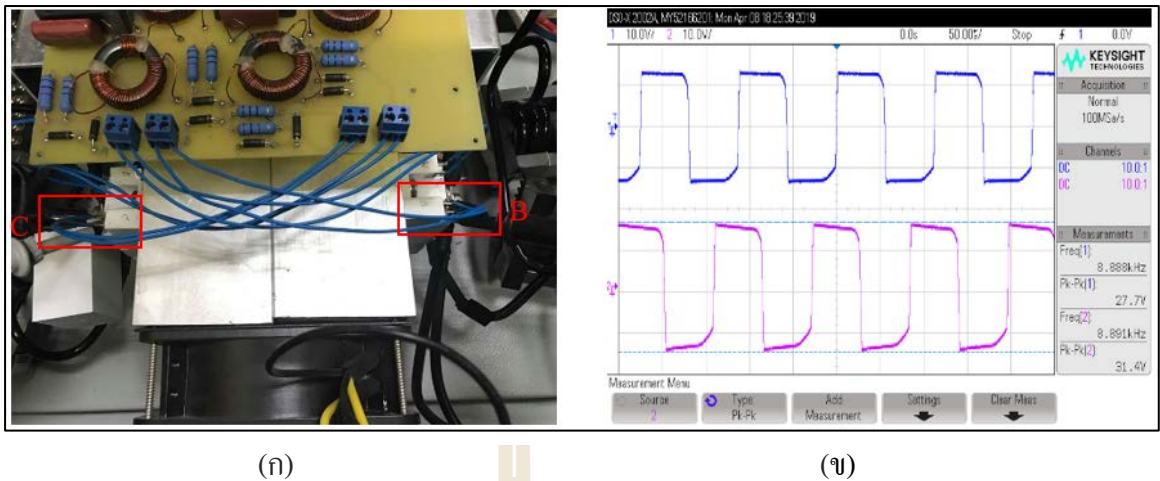
รูปที่ 4.12 (ก) วัดการทำงานไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง A และ C ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และ
(ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงานเปิด-ปิดเมื่อตัวหนึ่งเปิดไอจีบีทีอีกตัวจะปิด



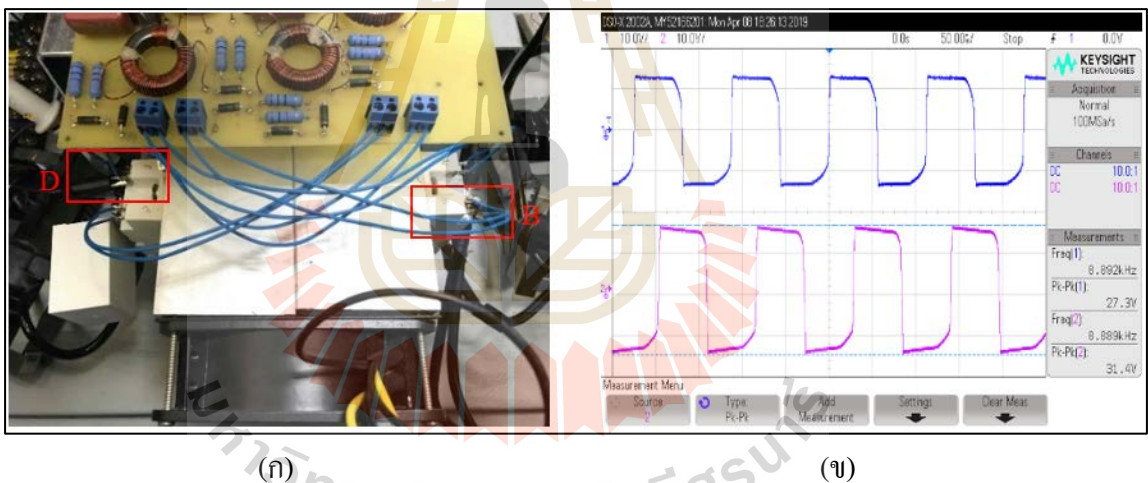
รูปที่ 4.13 (ก) วัดการทำงานไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง A และ D ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และ (ข) รูปสัญญาณที่ไอจีบีทีสลับกันทำงานเปิด-ปิดที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.14 (ก) วัดการทำงานไอจีบีทีตัวเดียวกันที่ตำแหน่ง C และ D และ (ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงาน on และ off

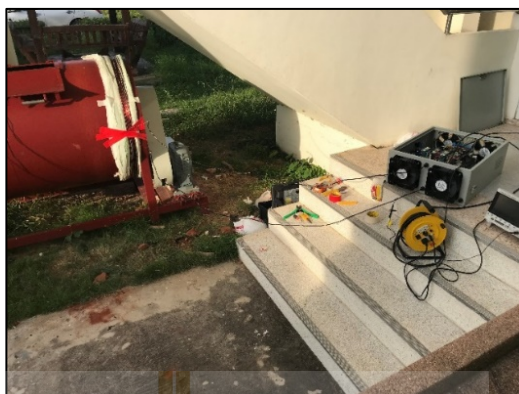


รูปที่ 4.15 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง B และ C ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และ (ข) รูปสัญญาณที่สลับกันทำงานเปิดและปิดทำให้ไอจีบีทีเกิดความร้อนที่น้อย



รูปที่ 4.16 (ก) วัดการทำงาน ไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ตำแหน่ง B และ D ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน ที่ไขว้กัน และ (ข) รูปสัญญาณสลับกันทำงานเปิด-ปิดที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิรตซ์

จากการที่สร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ที่ให้ความร้อนกับถังอบโดยตรง เรียบร้อยแล้วนั้น จึงได้นำมาใช้ทดลองกับถังอบเพื่อวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน อุณหภูมิ และระยะเวลาที่สามารถทำให้ถังอบนั้นร้อนได้โดยเร็ว จึงได้ทำการออกแบบจำนวนรอบการพันขดลวดทองแดง เริ่มแรกนั้นทำการพันทองแดง 1 ชุด สำหรับการจูนและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.17 เพื่อเช็คจูนดูความถี่ ค่าลวดทองแดงที่พัน ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ให้เหมาะสมกับเครื่องให้ความร้อนเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 4.17 เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่นำมาใช้กับถังอบขนาดใหญ่

หลังจากนั้นได้ทำการเช็คอุณหภูมิภายในและภายนอกถังเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที พบว่า บริเวณขดลวดที่พันภายในมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 150 องศาเซลเซียส และภายนอกบริเวณใกล้ขดลวดมีอุณหภูมิอยู่ประมาณ 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.18



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.18 (ก) แสดงอุณหภูมิภายในถังบริเวณขดลวดทองแดง และ (ข) แสดงอุณหภูมิภายนอกถังบริเวณขดลวดทองแดง

หลังจากที่ได้ทำการเช็คแล้วว่าการพันขดลวดทองแดงรอบถังขนาดใหญ่ขึ้นเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสามารถให้ความร้อนกับตัวถังได้โดยตรง ผู้วิจัยจึงได้ทำการพันขดลวดทองแดง บริเวณทั้งหมด 4 ชุด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการให้ความร้อนกับถังโดยตรงสูงสุด ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ทำการพันลวดทองแดงทั้ง 4 ชุดบริเวณรอบถังอบ

เมื่อทำการพันลวดทองแดงรอบถังทั้งหมด 4 ชุดแล้วนั้น โดยที่ค่าอินดักเตอร์ (Inductor) ของลวดแต่ละขดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดประมาณ 190 ไมโครเฮนรี่ เพื่อพร้อมใช้งานกับเครื่องให้ความร้อนทั้งหมด 4 เครื่อง โดยทำการคลุมด้วยเส้นใยทนความร้อนรอบถังด้วยเพื่อกักเก็บความร้อนและไม่ให้ความร้อนออกสู่ภายนอก ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ถังอบที่พันลวดครบ 4 ชุดพร้อมนำไปใช้งานอบย่อยสลายขยะอินทรีย์

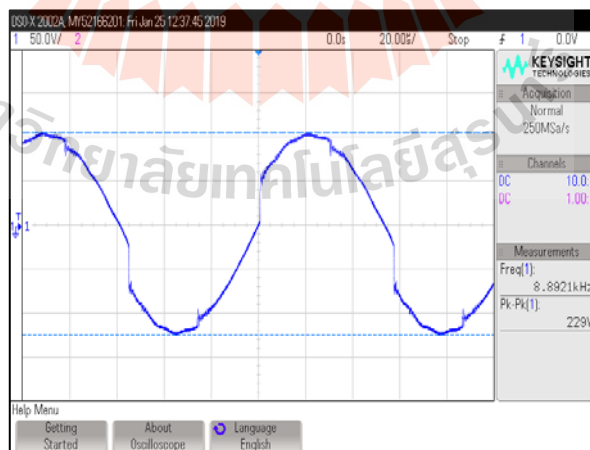
เมื่อทำการสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนครบทั้ง 4 เครื่องแล้วจึงได้นำมาใช้กับชุดขดลวดทองแดงทั้ง 4 ชุด โดยทำการปรับจูนความถี่ในแต่ละเครื่องกับชุดขดลวดเพื่อให้สามารถดึงกระแสได้สูงสุด ซึ่งได้ใช้พาวเวอร์ซัพพลายขนาดใหญ่ 30 แอมแปร์ 1000 โวลต์ ในการจ่ายไฟเข้ากับ

เครื่องเพื่อทำการปรับจูนความถี่และดูการดิ่งกระแสเมื่อปรับ โวลต์ขึ้นไปในค่าต่าง ๆ เพื่อเช็คดูการทำงานและการทนกระแสได้ของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน ดังตารางที่ 4.1 เพื่อดูความถี่ที่ใช้ กระแสที่ไหลตติงได้ในแต่ละเครื่องที่ทำการต่อเครื่องให้ความร้อน ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ได้ทำการติดตั้งเครื่องให้ความร้อนกับถังอบทั้งหมด 4 ชุดพร้อมชุดลวดทองแดง

ทำการวัดสัญญาณของเครื่องให้ความร้อนในแต่ละเครื่องเพื่อดูค่าความถี่และรูปสัญญาณว่ามีกรรพิดเพี้ยนไปหรือไม่ ซึ่งจะมีลักษณะของกราฟ ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 เป็นรูปสัญญาณของเครื่องให้ความร้อนที่ให้กับถังอบ ความถี่ 8.892 กิโลเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถี่ที่ใช้ (กิโลเฮิรตซ์) และกระแสที่ไหลคดิ่ง (แอมแปร์) ไปในแต่ละเครื่อง 1-4 พร้อมทั้งยังแสดงค่า Inductor (L) (ไมโครเฮนรี่) และ Resistor (R) (โอห์ม) ที่ใช้พันถึงแต่ละชุด เมื่อทำการปรับจูนแรงดัน (โวลต์) เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ เพื่อดูว่าเมื่อนำไปใช้งานจริงนั้นจะสามารถทนกระแสได้หรือไม่

เครื่อง หนึ่งยวนำ ความ ร้อน	Inductor	Resistor	Frequency	กระแสที่ไหลคดิ่งเมื่อทำการปรับค่าแรงดัน เพิ่มขึ้น					
				30	150	250	310	320	340
1	160	3.9	8.569	4.36	14.96	25.78	34.80	36.38	39.62
2	195	3.6	8.965	4.42	15.20	25.82	34.22	35.42	38.66
3	190	3.4	8.906	4.24	15.30	25.98	34.10	35.64	38.66
4	197.6	3.5	8.645	4.24	15.26	26.26	34.90	36.32	39.46

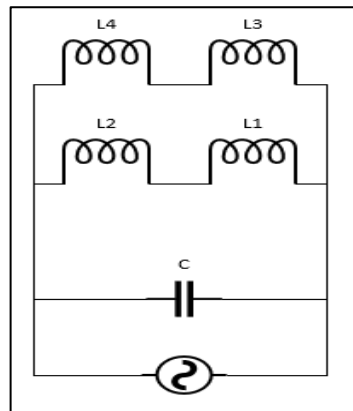
เมื่อทำการเปิดเครื่องให้ความร้อนทั้ง 4 เครื่องกับชุดลวดทองแดงที่พันรอบถึงนั้นในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อดูค่ากระแสที่ไหลคดิ่งไปใช้ อุณหภูมิของชุดลวดและอุณหภูมิภายในถึงบริเวณชุดลวดแต่ละชุดนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันจึงสรุปมาเป็นตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ทำการวัดค่าความร้อน โดยใช้กล้องอินฟราเรดเพื่อวัดความร้อนที่เกิดขึ้นกับตัวถังเมื่อเวลาผ่านไปและดูค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลลงดังต่อไปนี้

เวลาที่เปิดเครื่องให้ความร้อน (นาทีก)	กระแสที่ไหลลงดังไปใช้ (แอมแปร์)	อุณหภูมิของขดลวด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิภายในถังบริเวณขดลวด (องศาเซลเซียส)
5	32	37	70
15	27	60	92
30	25	65	115
45	23	68	125
60	22	75	147
90	22	75	150

หลังจากเปิดเครื่องให้ความร้อนกับถังเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 45 นาที กระแสที่ดังเริ่มคงที่ อยู่ประมาณ 23 แอมแปร์ และอุณหภูมิภายในถังบริเวณเฉพาะขดลวดมีค่าประมาณ 125 องศาเซลเซียส แต่ไม่ได้ทำให้ร้อนทั่วทั้งถัง จึงต้องใช้เวลาประมาณ 90 นาที เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนภายในถัง จึงจะทำให้ถังอบนั้นมีอุณหภูมิที่ร้อนประมาณ 130 ทั่วทั้งถัง ซึ่งรวดเร็ว

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองอีกวิธีโดยใช้เครื่องให้ความร้อนเพียงเครื่องเดียว เนื่องจากถ้าใช้เครื่องให้ความร้อนทั้ง 4 เครื่องนั้น จะทำให้มีเครื่องเยอะเกินไปจะเกิดความยุ่งยากในการขนย้ายและติดตั้ง อีกทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายไฟฟ้ามามากจึงยังไม่เหมาะสมสำหรับขนาดส่วนถังอบขณะนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบนำลวดทองแดงชุด 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 มาต่ออนุกรมกันก่อนจึงนำมาขนานกันทีหลังเพื่อจะได้มองเป็นชุดลวดชุดเดียว ดังรูปที่ 4.23

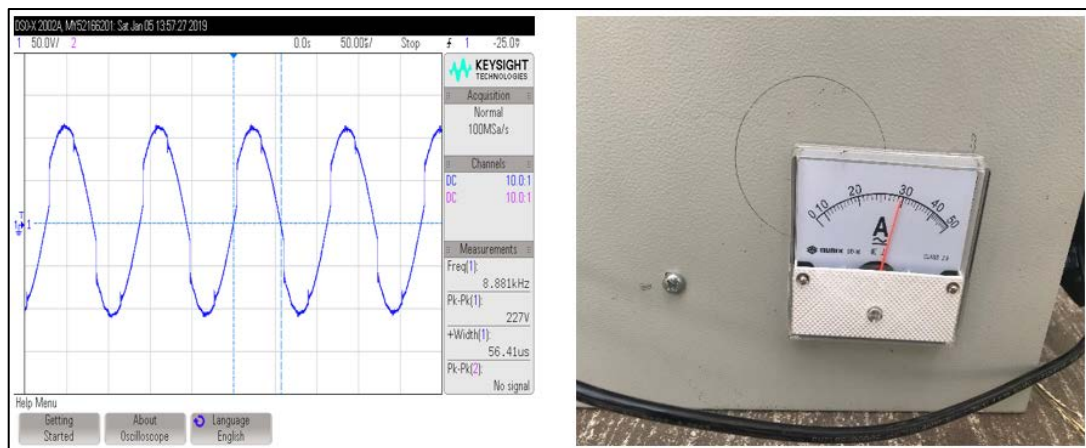


รูปที่ 4.23 แสดงวิธีการต่อขดลวดทั้ง 4 ชุดให้เป็นชุดเดียว

การต่อแบบตัวขดลวดเหนี่ยวนำลักษณะนี้จะทำให้ค่าเหนี่ยวนำทั้ง 4 ชุด เสมือนเป็นค่าเพียงตัวเดียว ซึ่งจะมีค่าเหนี่ยวนำประมาณ 185 ไมโครเฮนรี่ ซึ่งไม่จำเป็นต้องแมทซ์อิมพีแดนซ์ค่าตัวเก็บประจุใหม่ ยังคงใช้ 1 ไมโครฟารัด แต่พลังงานจะถูกกระจายไปยัง 4 ชุดขดลวด ทำให้แต่ละขดลวดกระแสไปใช้ได้น้อยทำให้กำลังลดลงด้วย ดังรูปที่ 4.24 จากนั้นจึงทำการทดสอบแล้วเก็บผลสัญญาณความถี่และกระแสที่ไหลคดิ่งไปใช้ ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ใช้เครื่องให้ความร้อนกับถังอบเพียงเครื่องเดียวกับชุดลวดทั้ง 4 ชุด



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.25 (ก) แสดงรูปสัญญาณเมื่อใช้เครื่องให้ความร้อนเพียงหนึ่งเครื่องที่ความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์ และ (ข) แสดงกระแส 30 แอมแปร์ เมื่อทำการเปิดเครื่อง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Inductor (L) (ไมโครเฮนรี่) และ Resistor (R) (โอห์ม) ที่ใช้พันธังใน 1 ชุด พร้อมทั้งยังแสดงค่าความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์) ที่ใช้และกระแสที่ไหลคดิ่ง (แอมแปร์) เมื่อทำการปรับจูนแรงดัน (โวลต์) เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ เพื่อดูว่าเครื่องสามารถนำไปใช้งานให้ความร้อนกับตัวถังอบขนาดใหญได้จริง

เครื่อง เหนี่ยวนำ ความ ร้อน	Inductor	Resistor	Frequency	กระแสที่ไหลคดิ่งเมื่อทำการปรับค่าแรงดัน เพิ่มขึ้น					
				30	150	250	310	320	340
1	185	4.12	9.369	3.76	13.64	21.78	31.04	35.98	37.74

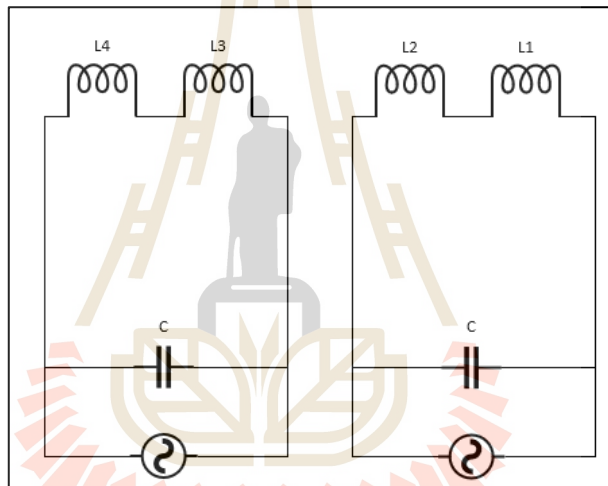
ตารางที่ 4.4 ทำการเปิดทดสอบเครื่องให้ความร้อน 1 เครื่องเพื่อดูระยะเวลาที่ทำให้ถึงนั้นร้อนทั่วทั้งถัง ตั้งถังเกิดอุณหภูมิภายในและภายนอกถัง พร้อมทั้งค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดสามารถดึงไปใช้ได้

เวลาที่เปิดเครื่องให้ความร้อน (นาทื)	กระแสที่โหลดดึงไปใช้ (แอมแปร์)	อุณหภูมิของขดลวด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิภายในถังบริเวณขดลวด (องศาเซลเซียส)
5	30	35	32
15	28	45	60
30	26	65	65
45	26	68	72
60	25	69	79
90	25	70	88
120	24	70	105
150	24	72	114
180	24	72	115

หลังจากเปิดใช้เครื่องหนึ่งขวนำความร้อนเพียง 1 เครื่องสำหรับชุดขดลวดทองแดงทั้ง 4 ชุด จะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิของขดลวดแต่ละชุดนั้นจะร้อนช้ามากประมาณ 120 นาที บริเวณภายในขดลวดจะร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียส และต้องเปิดเครื่องนานถึง 180 นาที เพื่อให้ถึงอบนั้นร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียส ทั้งกันทั้งถึง ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่โหลดดึงใช้เท่าเดิมประมาณ 30 แอมแปร์ แต่ได้แบ่งไปยังลวดทั้ง 4 ชุด ทำให้แต่ละชุดนั้นร้อนช้า

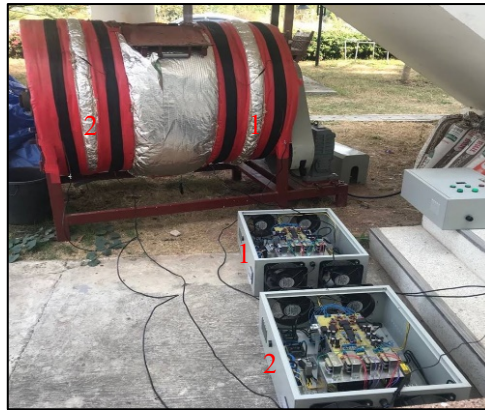
จากการทดลองมา 2 แบบ พบว่าทั้งสองแบบนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งแบบแรกนั้นที่ใช้เครื่องหนึ่งขวนำความร้อนทั้ง 4 เครื่องกับชุดลวดทั้ง 4 ชุด นั้นทำให้ถึงอบร้อนนั้นได้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 120 องศาเซลเซียส ทั้งถึงได้รวดเร็ว แต่มีจำนวนเครื่องเยอะเกินความจำเป็น ไม่เหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งจริงแต่สามารถนำไปใช้กับถังที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ได้ ส่วนใน

แบบที่สองนั้นใช้จำนวนเครื่องให้ความร้อนเพียงหนึ่งเครื่องกับชุดลวดทองแดงทั้ง 4 ชุดพบว่า ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง แต่จะทำให้ถึงนั้นร้อนทั่วกันทั้งถึงนั้นใช้เวลามากเกินไปจึงยังไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานแต่สามารถนำไปปรับใช้กับถังอบที่มีขนาดเล็กกว่านี้ได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบใช้เครื่องหนึ่งยูนิตให้ความร้อน 2 เครื่องกับชุดลวดทองแดงทั้ง 4 ชุด เพื่อให้ได้ความร้อนที่เพียงพอและเหมาะสมกับขนาดของถังอบ โดยทำการออกแบบชุดลวดใหม่ซึ่งจะนำชุดลวดที่มีอยู่เดิมทุกชุดเอาออกครึ่งหนึ่งแล้วนำทองแดงชุดที่ 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 มาต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 4.26 จะได้ชุดลวดหนึ่งยูนิตจำนวน 2 ชุดซึ่งแต่ละชุดจะมีค่าเหนี่ยวนำเท่าเดิมจึงไม่ต้องปรับค่าตัวเก็บประจุใหม่สามารถนำมาใช้กับเครื่องให้ความร้อนทั้ง 2 เครื่องได้ เพื่อให้มีประสิทธิภาพด้านการให้พลังงานความร้อนกับตัวถังเพิ่มมากยิ่งขึ้น



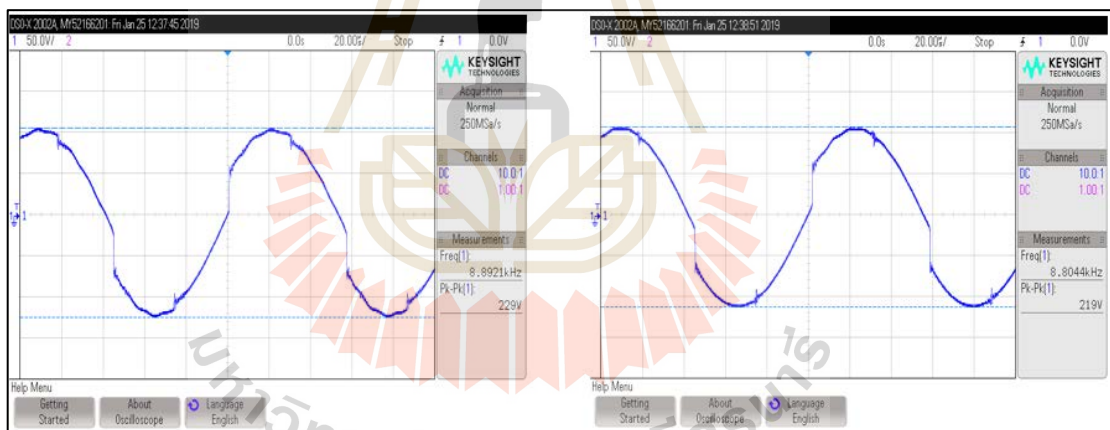
รูปที่ 4.26 แสดงวิธีการต่อชุดลวดทั้ง 4 ชุดให้เป็น 2 ชุดสำหรับเครื่องให้ความร้อน 2 เครื่อง

เมื่อทำการออกแบบชุดลวดทองแดงเป็น 2 ชุดเรียบร้อยแล้วจึงได้นำเครื่องหนึ่งยูนิตให้ความร้อนทั้ง 2 เครื่องมาติดตั้งกับตัวถังอบขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.27 เพื่อทำการปรับจูนค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชุดลวดใหม่นี้เพื่อให้สามารถดึงกระแสได้สูงสุด



รูปที่ 4.27 ใช้เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนทั้ง 2 เครื่องให้ความร้อนกับถังอบ

ทำการวัดสัญญาณและปรับความถี่ของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนทั้ง 2 เครื่องดังรูปที่ 4.28 เพื่อให้สามารถดึงกระแสได้สูงสุดและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานได้จริง



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.28 (ก) แสดงรูปสัญญาณความถี่เครื่องให้ความร้อนชุดที่ 1 ที่ความถี่ 8.892 กิโลเฮิรตซ์

(ข) แสดงรูปสัญญาณความถี่เครื่องให้ความร้อนชุดที่ 2 ที่ความถี่ 8.804 กิโลเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Inductor (L) (ไมโครเฮนรี) และ Resistor (R) (โอห์ม) ที่ใช้พันถึงทั้ง 2 ชุด พร้อมทั้งยังแสดงค่าความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์) ที่ใช้และกระแสที่ไหลคั้ง (แอมแปร์) ของเครื่องให้ความร้อนทั้ง 2 เครื่อง เมื่อทำการ ปรับจูนแรงดัน (โวลต์) เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ เพื่อดูว่าเครื่องสามารถทนการคั้งกระแสของไหลคั้ง ได้ ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

เครื่อง เหนี่ยวนำ ความ ร้อน	Inductor	Resistor	Frequency	กระแสที่ไหลคั้งเมื่อทำการปรับค่าแรงดัน เพิ่มขึ้น					
				30	150	250	310	320	340
1	207.4	3.672	8.892	4.64	13.16	20.92	33.84	34.18	36.52
2	218.8	3.549	8.804	4.82	16.24	28.38	35.32	37.98	39.52

จากการทดลองใช้เครื่องให้ความร้อนทั้ง 2 เครื่องจะเห็นได้ว่าค่า Inductor จะอยู่ประมาณ 218 ไมโครเฮนรี ความต้านทานจะอยู่ประมาณ 3.6 โอห์ม และค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับคั้งกระแสได้สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 8.892 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยกระแสที่คั้งของทั้ง 2 เครื่องที่ 320 โวลต์ จะอยู่ประมาณ 34 แอมแปร์

ตารางที่ 4.6 ทำการวัดค่าความร้อนเฉลี่ยของแต่ละชุดลวดที่เกิดขึ้นกับตัวถังเมื่อเวลาผ่านไปและดูค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลคั้งไปใช้เมื่อใช้จำนวนเครื่องให้ความร้อน 2 เครื่องกับชุดลวดทองแดง 4 ชุด

เวลาที่เปิดเครื่องให้ความร้อน (นาทื)	กระแสที่ไหลคั้งไปใช้ (แอมแปร์)	อุณหภูมิของชุดลวด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิภายในถังบริเวณชุดลวด (องศาเซลเซียส)
5	35	37	60
15	27	65	82
30	25	80	95
45	24	85	115
60	24	95	126
90	24	95	128

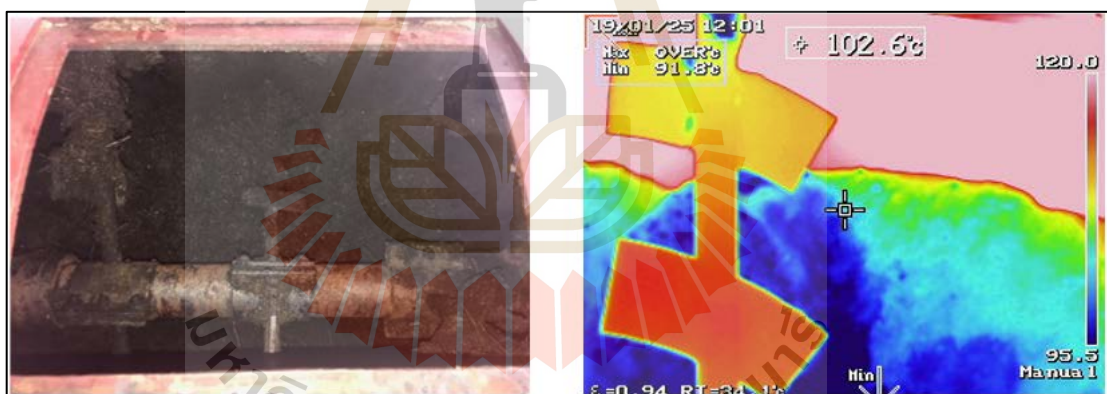
หลังจากเปิดเครื่องให้ความร้อนกับถังเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที อุณหภูมิภายในถังบริเวณเฉพาะชุดลวดมีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส กระแสที่คั้งเริ่มคั้งที่อยู่ประมาณ 24 แอมแปร์ และเมื่อเปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 90 นาที ถังร้อน 115 องศาเซลเซียส ทั้งหมดทั้งถัง ซึ่งการทดสอบนี้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้จริงเพราะไม่ใช้เวลาที่ทำให้ถังร้อนนานเกินไป อีกทั้งยังใช้เพียง 2 เครื่อง ซึ่งอุณหภูมิของถังอบนั้นสามารถนำไปใช้อบขยะอินทรีย์เพื่อเร่งการย่อยสลายได้ดี

เมื่อทำการออกแบบระบบสำหรับให้ความร้อนกับถังอบเรียบร้อยแล้วนั้น โดยใช้เครื่องให้ความร้อน 2 เครื่องกับชุดลวดเหนียวนำทั้ง 2 ชุด เพื่อให้ความร้อนได้เพียงพอกับการใส่ขยะอินทรีย์ลงไปในถังอบ จึงได้นำขยะอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มาทดลองอบเพื่อย่อยสลายให้กลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งได้ทำการเก็บผลการทดลองและพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ อาทิ อุณหภูมิ ความชื้น กระแสไฟฟ้า น้ำหนักวัสดุและระยะเวลาที่ทำการทดลองในแต่ละครั้ง ได้ทดลองนำวัสดุที่เป็น

filter cake หรือซากอ้อยที่บดแล้ว เปลือกมัน ข้าวแ้วแห้ง รวม ๆ แล้วประมาณ 270 กิโลกรัม ดังรูปที่ 4.29 หลังการอบแล้วทำการวัดอุณหภูมิของวัสดุ ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 ขยะอินทรีย์ที่นำมาใส่ถังก่อนเปิดเครื่องให้ความร้อน



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.30 (ก) วัสดุที่ทำการอบย่อยสลายเรียบร้อยแล้ว และ (ข) แสดงอุณหภูมิของวัสดุหลังการอบ อยู่ประมาณ 102 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวกซากอ้อย เปลือกมัน จี๊วแห้ง ประมาณ 270 กิโลกรัม แล้วนั้นทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้น และ น้ำหนักที่เหลือโดยประมาณของวัสดุนำมาสรุปเป็นตารางด้านล่าง

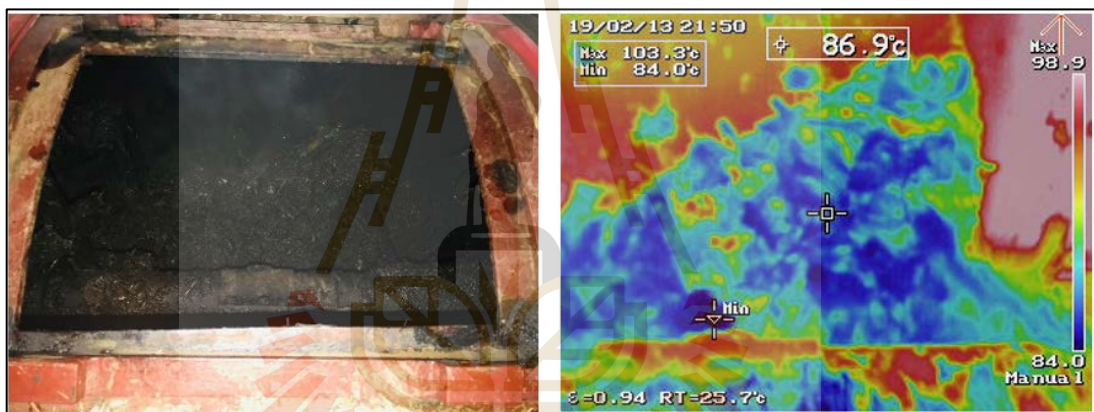
เวลาที่ใช้อบย่อยสลาย ขยะอินทรีย์ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเฉลี่ยของขยะ อินทรีย์ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นของ ขยะอินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์)	กระแสไฟฟ้า ที่โหลดใช้ (แอมแปร์)
เริ่มต้น	32	72	32
2	62	72	27
4	75	68	26
6	82	68	25
8	87	65	25
10	93	65	25
12	95	62	25
14	97	56	24
16	98	47	24
18	100	43	24
20	102	40	24

เมื่อทำการอบขยะอินทรีย์น้ำหนักประมาณ 270 กิโลกรัม ผ่านไป 20 ชั่วโมง แล้วจะเหลือ น้ำหนักประมาณ 124 กิโลกรัมที่ความชื้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

ได้ทดลองนำวัสดุที่เป็น ซากไก่ตาย ของสดตามตลาด เศษผัก ผลไม้ รวม ๆ แล้วประมาณ 300 กิโลกรัม ดังรูปที่ 4.31 หลังการอบแล้วทำการวัดอุณหภูมิของวัสดุ ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ขยะอินทรีย์ตามตลาดสดที่นำมาใส่ถังอบก่อนเปิดเครื่องให้ความร้อน



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.32 (ก) วัสดุหลังจากอบให้ความร้อนขยะสดเรียบร้อยแล้ว และ (ข) ทำการวัดอุณหภูมิของวัสดุหลังการอบอยู่ประมาณ 86.9 องศาเซลเซียส

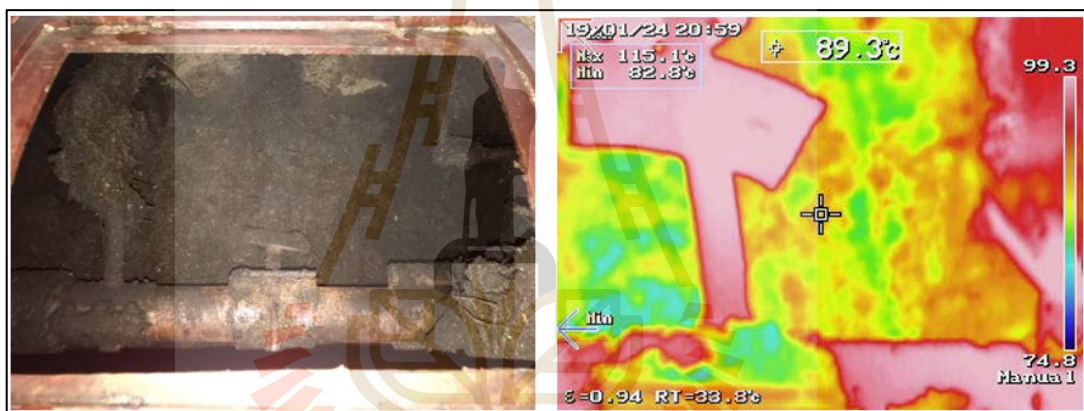
ตารางที่ 4.8 หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวกซากไก่ตาย ของสดตามตลาด เศษผัก ผลไม้ รวม ๆ แล้วประมาณ 300 กิโลกรัม แล้วทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้น และน้ำหนักที่เหลือโดยประมาณของวัสดุนำมาสรุปเป็นตารางด้านล่าง

เวลาที่ใช้อบย่อยสลาย ขยะอินทรีย์ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเฉลี่ยของขยะ อินทรีย์ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นของ ขยะอินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์)	กระแสไฟฟ้า ที่โหลดใช้ (แอมแปร์)
เริ่มต้น	34	78	32
2	63	78	28
4	71	76	27
6	76	75	26
8	79	75	25
10	81	66	25
12	85	60	24
14	86	52	24
16	86	47	24
18	90	45	23
20	92	45	23

เมื่อทำการอบขยะอินทรีย์น้ำหนักประมาณ 300 กิโลกรัม ผ่านไป 20 ชั่วโมงแล้วจะเหลือ น้ำหนักประมาณ 138 กิโลกรัมที่ความชื้นประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เพราะเนื่องจากขยะมีความชื้นมาก ได้ทดลองนำวัสดุที่เป็น filter cake หรือซากอ้อยที่บดแล้ว เปลือกมัน ขี้วัวแห้ง ที่นำไปตาก แดดให้แห้งก่อน รวม ๆ แล้วประมาณ 330 กิโลกรัม แล้วนำมาเก็บผล ตามรูปที่ 4.33- 4.34



รูปที่ 4.33 ขยะอินทรีย์พวกเป็น filter cake เปลือกมัน จี๊วแห้งที่ตากแดดมาแล้วใส่ถังอบ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.34 (ก) หลังจากให้ความร้อนกับขยะอินทรีย์ประมาณ 20 ชั่วโมง และ (ข) ใช้กล้องอินฟราเรดดูความร้อนของวัสดุหลังอบ อุณหภูมิประมาณ 89.3 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวกซากอ้อย เปลือกมัน จี๊วแห้ง ที่นำไปตากแดดให้แห้งก่อนแล้วประมาณ 330 กิโลกรัม แล้วทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้น และน้ำหนักที่เหลือโดยประมาณของวัสดุนำมาสรุปเป็นตารางด้านล่าง

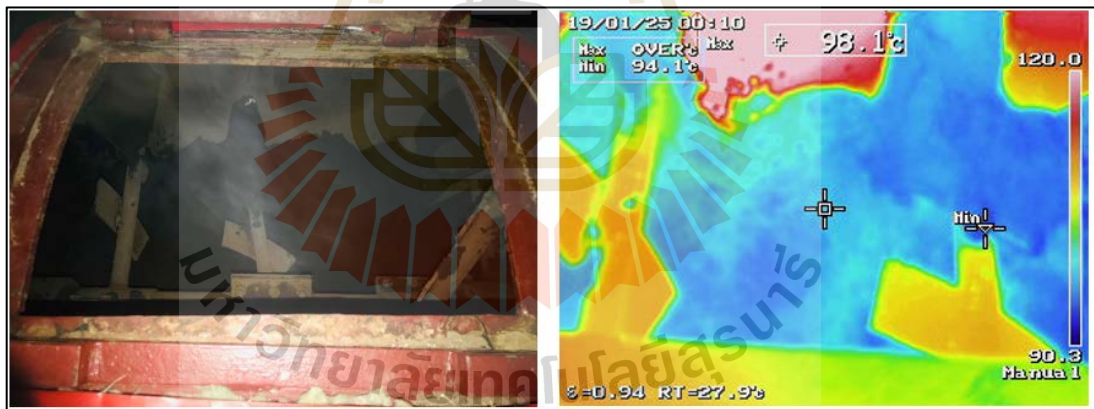
เวลาที่ใช้อบย่อยสลาย ขยะอินทรีย์ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเฉลี่ยของขยะ อินทรีย์ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นของ ขยะอินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์)	กระแสไฟฟ้า ที่โหลดใช้ (แอมแปร์)
เริ่มต้น	36	68	32
2	68	68	27.5
4	76	68	26.5
6	84	66	25.5
8	89	60	25
10	95	55	25
12	97	51	25
14	97	47	24.5
16	98	42	24
18	101	34	24
20	103	30	23.5

เมื่อทำการอบขยะอินทรีย์น้ำหนักประมาณ 330 กิโลกรัม หลังจากผ่านไป 20 ชั่วโมงแล้ว เหลือน้ำหนัก 152 ประมาณ กิโลกรัมที่ความชื้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีความชื้นน้อย

ได้ทดลองนำวัสดุที่เป็น ฟางข้าว ขี้วัวแห้ง ขี้เป็ดแห้ง ใบไม้แห้ง ซากไก่ตาย รวม ๆ แล้ว ประมาณ 360 กิโลกรัม ใสลงไปในถังอบเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ดังรูปที่ 4.35 หลังจากนั้นทำการอบให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมงแล้วทำการวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 แสดงวัสดุที่เป็น ฟางข้าว ขี้วัวแห้ง ขี้เป็ดแห้ง ใบไม้แห้ง ซากไก่



(ก)

(ข)

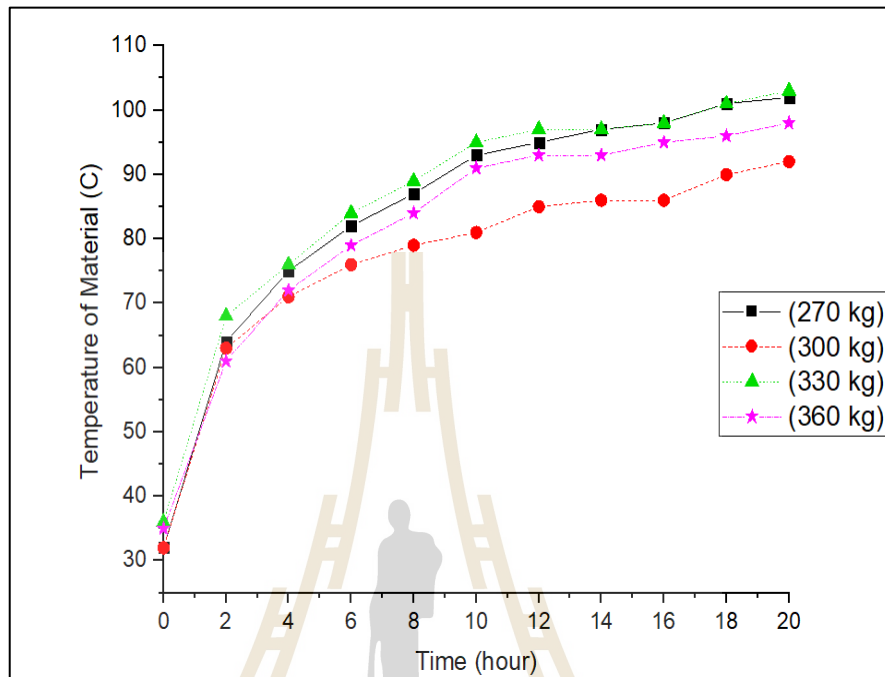
รูปที่ 4.36 (ก) หลังจากอบให้ความร้อนขยะอินทรีย์เพื่อย่อยสลายแล้ว และ (ข) วัดอุณหภูมิวัสดุ หลังจากอบให้ความร้อนแล้ว อุณหภูมิประมาณ 98.1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.10 หลังจากทำการอบขยะอินทรีย์จำพวก filter cake เปลือกมัน จี๊วแห้ง ประมาณ 360 กิโลกรัม แล้วจากนั้นทำการบันทึกพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้น และ น้ำหนักที่เหลือโดยประมาณของวัสดุนำมาสรุปเป็นตารางด้านล่าง

เวลาที่ใช้อบย่อยสลาย ขยะอินทรีย์ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเฉลี่ยของขยะ อินทรีย์ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นของ ขยะอินทรีย์ (เปอร์เซ็นต์)	กระแสไฟฟ้า ที่โหลดใช้ (แอมแปร์)
เริ่มต้น	35	75	32
2	61	75	26
4	72	73	25.5
6	79	73	25
8	84	70	25
10	91	61	24.5
12	93	55	24.5
14	93	47	24
16	95	42	24
18	96	38	23.5
20	98	37	23

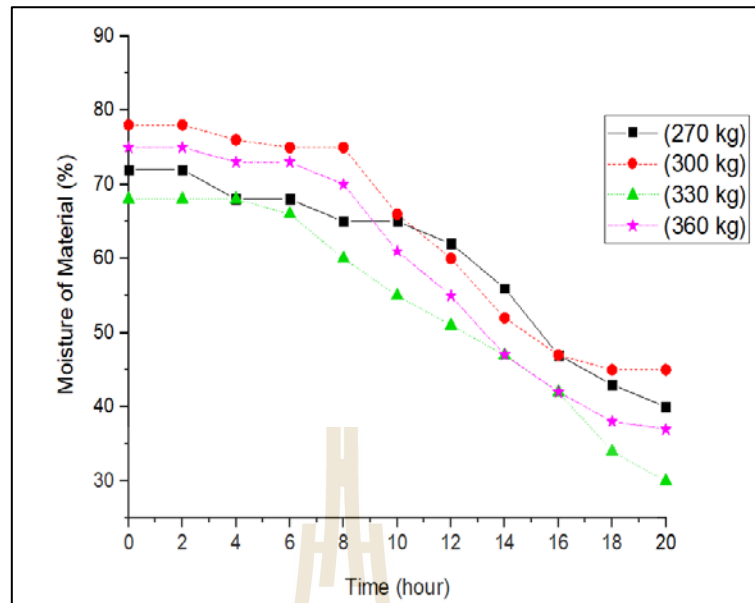
เมื่อทำการอบขยะอินทรีย์น้ำหนักประมาณ 360 กิโลกรัม เมื่อทำการอบให้ความร้อนผ่านไป 20 ชั่วโมงแล้วจะเหลือน้ำหนักวัสดุประมาณ 166 กิโลกรัมที่ความชื้นประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์

จากการนำขยะอินทรีย์มาทดลองอบย่อยสลายบางส่วน สามารถนำมาเขียนกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของขยะอินทรีย์กับระยะเวลาที่ทำให้ความร้อน ดังรูปที่ 4.37



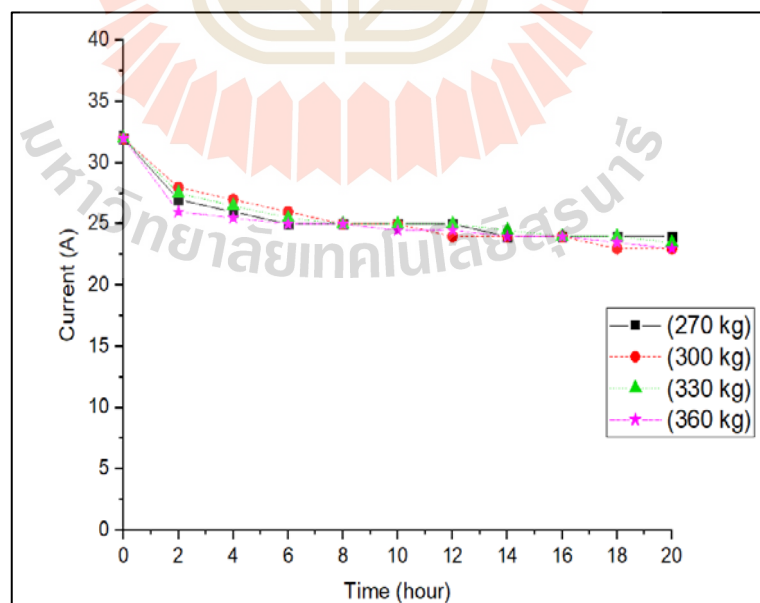
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาการอบให้ความร้อน

พร้อมทั้งยังสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของขยะอินทรีย์ที่ ทำการอบกับระยะเวลาที่ทำให้การเปิดเครื่องให้ความร้อนกับถังอบ ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับระยะเวลาการอบให้ความร้อน

ซึ่งจากการทดลองนั้นยังสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงทำการดึงไปใช้กับระยะเวลาที่ทำการเปิดเครื่องให้ความร้อน ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของเครื่องนี้ขวนำความร้อนกับระยะเวลาการอบให้ความร้อน

หลังจากการอบสลายขยะอินทรีย์ด้วยความร้อนเรียบร้อยแล้วนั้นทำการพักปิดเครื่องรอให้อุณหภูมิของวัสดุเย็นลงประมาณ 40 องศาเซลเซียสแล้วจึงบรรจุใส่ถุงปุ๋ย เพื่อทำการเติมกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ประกอบด้วย แบคทีเรีย เชื้อราและแอคคิโนมายซีส ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายเชื้อใยของวัสดุให้เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลเล็กลงจนเป็นอินทรีย์วัตถุที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ หลังจากนั้นมัดปากถุงปล่อยทิ้งไว้ให้จุลินทรีย์ช่วยย่อยต่อประมาณ 2 อาทิตย์ก็จะได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 (ก) หลังการอบแล้วทำการพักทิ้งไว้ให้เย็นลงแล้วจึงนำบรรจุใส่ถุงปุ๋ยไว้ และ (ข) หลังการเติมเชื้อจุลินทรีย์แล้วปล่อยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายต่อ ประมาณ 2 อาทิตย์

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดลองเครื่องกำจัดขยะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยที่มีคุณภาพ จึงได้ทำการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับให้ความร้อนกับถังอบโดยตรง โดยวิธีการทดลองเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อไปใช้กับถังอบนั้น ได้ผลของการทดลองวัดสัญญาณและการปรับจูนความถี่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน รวมถึงการออกแบบการพันขดลวดทองแดงรอบถังอบในแบบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพด้านพลังงานความร้อนแก่ตัวถังอบสูงที่สุด เมื่อเสร็จสิ้นการออกแบบแล้วจึงได้นำขยะอินทรีย์หลากหลายประเภทมาทดลองอบเพื่อดูการย่อยสลาย และค่าความร้อน ความชื้นของขยะอินทรีย์ และกระแสไฟฟ้าในการดึงไปใช้งานของเครื่อง รวมถึงระยะเวลาในการอบย่อยสลายขยะอินทรีย์ด้วย ซึ่งสรุปเป็นตารางและกราฟสุดท้ายหลังการอบเสร็จสิ้นแล้วพักให้เย็นลงแล้วนั้น จึงทำการเติมเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เข้าไปช่วยเร่งการย่อยสลายของขยะอินทรีย์ต่อเพื่อให้กลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่สมบูรณ์แบบและมีคุณภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันพลังงานความร้อนมีวิธีการสร้างขึ้นหลากหลายรูปแบบและมีประโยชน์อย่างมากสำหรับนำมาใช้ในการกำจัดขยะอินทรีย์ อาทิ เช่น การให้ความร้อนแบบใช้เตาเผาชีวมวล การให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนทั้งสแตนเลส การให้ความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการให้ความร้อนแบบใช้หลอดรังสีอินฟราเรด ซึ่งวิธีที่กล่าวมานี้ล้วนแต่สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่กับถังอบเพื่อทำให้ถังอบนั้นร้อนทั่วกันทั้งถังสำหรับนำไปใช้ย่อยสลายและกำจัดขยะอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งวิธีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ ถึง 81.3 เปอร์เซ็นต์ และยังเป็นพลังงานที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานโดยตรง ซึ่งในช่วงแรกผู้วิจัยได้ทำการศึกษาออกแบบและสร้างระบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่มีขนาด -12 โวลต์ ถึง +12 โวลต์ เพื่อนำไปใช้ขับสวิตซ์ไอจีบีทีให้ทำงานโดยใช้ความถี่ 8.88 กิโลเฮิร์ตซ์ ในส่วนถัดมาทำการออกแบบขดลวดทองแดงที่พันรอบถังเพื่อที่จะนำมาใช้กับเครื่องให้ความร้อน โดยได้ทำการทดลอง 3 แบบ ซึ่งในแต่ละแบบจะให้ผลในเรื่องประสิทธิภาพความร้อนที่แตกต่างกัน สำหรับในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน 2 เครื่องที่สามารถดึงกระแสได้เครื่องละ 30 แอมแปร์ และ 32 แอมแปร์ สำหรับขดลวดทองแดงทั้ง 2 ชุดที่ค่าเหนี่ยวนำ 207.4 ไมโครเฮนรี และ 218.8 ไมโครเฮนรี ที่ความถี่ 8.892 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 8.804 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ เพื่อให้ความร้อนทั้งถังเพียงพอที่ต้องการประมาณ 120 องศาเซลเซียส ในเวลาประมาณ 90 นาที หลังจากสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่ทำให้ถังอบขนาดใหญ่ร้อนได้แล้วนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำไปประยุกต์ใช้สำหรับการย่อยสลายขยะอินทรีย์จำพวก เศษซากไก่ที่ตายแล้ว ของสดที่เหลือทิ้งตามตลาด เศษผักและผลไม้ ฟางข้าว เปลือกมัน อ้อยที่บดแล้ว รวมถึงจี้วัวและจี้เป็ด นำมาทดลองใส่ถังอบเพื่อย่อยสลายแล้วทำการเปิดเครื่องให้ความร้อนและระบบใบกวนเป็นระยะเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิของขยะจะค่อยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 90-105 องศาเซลเซียส แล้วความชื้นของขยะจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นรอให้อุณหภูมิวัสดุเย็นลงประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงทำการ

เดิมเชื้อจุลินทรีย์ลงไปช่วยย่อยสลายอีกครั้งหนึ่ง บรรจุใส่ถุงปุ๋ยแล้วรอประมาณ 2 อาทิตย์ จะได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงจากการย่อยสลายขยะอินทรีย์

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการจัดหาขยะอินทรีย์มาทดลองย่อยสลายในแต่ละครั้งนั้นต้องใช้จำนวนมากประมาณ 200 - 300 กิโลกรัม ทำให้เกิดความยุ่งยากในการเตรียมวัสดุมาทดลองแต่ละครั้ง อีกทั้งขนาดของถังอบและระบบไบโแก๊สที่ทำการออกแบบไว้นั้นไม่สามารถบรรจุวัสดุให้อัดลงไปจำนวนมากกว่านี้ได้เพราะจะเกิดความเสียหายกับระบบไบโแก๊ส แกนเพลลา มอเตอร์และ ชุดเกียร์ที่ครอบได้ ผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้ทำการแก้ไขขนาดถังอบและระบบไบโแก๊สของถังใหม่ทั้งหมดเพื่อที่จะสามารถอบขยะอินทรีย์ได้จำนวนมากกว่านี้ รวมไปถึงระบบวัดแล้วควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบอัตโนมัติ

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

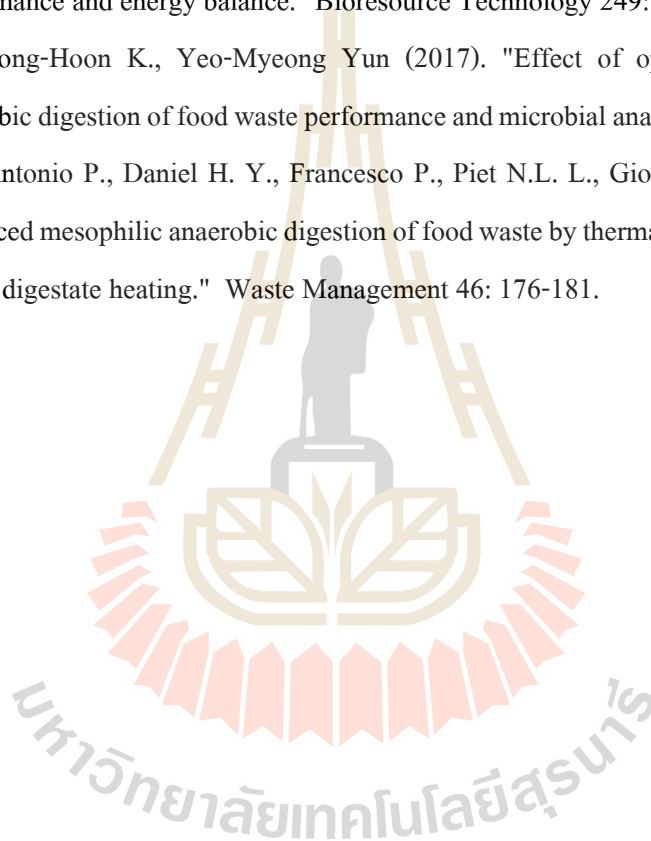
แนวทางในอนาคตของผู้พัฒนาต่อ ถ้าอยากเพิ่มปริมาณขยะอินทรีย์ที่ทำการทดลองอบย่อยสลายแต่ละครั้งให้มีจำนวนมากขึ้นนั้น ผู้พัฒนาต้องมีการพัฒนาขนาดของถังอบและระบบชุดหมุนไบโแก๊สใหม่ทั้งหมดเพื่อที่จะสามารถอัดบรรจุปริมาณขยะได้เยอะกว่านี้ อีกทั้งยังต้องพัฒนาระบบวัดและควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาการอบให้เป็นแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Elepano A.R., Satairapan K.T. (2000). "Development of a rice hull cyclonic furnace for drying application." *World Renewable Energy Congress VI*: 2190-2193.
- Karunanithy C., Shafer K. (2016). "Heat transfer characteristics and cooking efficiency of different sauce pans on various cooktops." *Applied Thermal Engineering* 93: 1202-1205.
- Yoon L., Johanna S., Andras B., Per-Anders H., Hakan J. (2015). "Environmental impact of recycling digested food waste as a fertilizer in agriculture—A case study." *Resources, Conservation and Recycling* 37: 1-14.
- Marinella P., Elena F., Viviana P., Giorgio C., Andrea C., Enrico D. (2014). "Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: Toxicological risk and odor nuisance effects." *Environment International* 68: 16-24.
- C. Liang, K.C. Das, R.W. Mc (2003). "The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend." *Bioresource Technology* 86: 131-137.
- J. Nair, K. Okamitsu (2010). "Microbial inoculants for small scale composting of putrescible kitchen wastes." *Waste Management* 30: 977-982.
- Sutripta S., Subrata P., Sunanda C. (2016). "Optimization of a Vegetable Waste Composting Process with a Significant Thermophilic Phase." *Procedia Environmental Sciences* 35: 435-440.
- M.P. Raut, S.P.M. Prince W., J.K. Bhattacharyya., T. Chakrabarti., S. Devotta (2008). "Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste – A compost maturity analysis perspective." *Bioresource Technology* 99: 6512-6519.
- James I. C., Tin-En H. (2008). "Effects of compositions on food waste composting." *Bioresource Technology* 99: 8068-8074.
- Jiao M., Lei Z., Kongyun Z., Aimin Li (2018). "Thermally assisted bio-drying of food waste: Synergistic enhancement and energetic evaluation." *Waste Management* 80: 327-338.

- Matej K., Anze Z., Damijan M., T. Jarm (2010). "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 3585-3591.
- Chen Y., Yu F., Liang S., Wang Z., Liu Z., Xiong Ya (2014). "Utilization of solar energy in sewage sludge composting: Fertilizer effect and application." *Waste Management* 34: 2014-2021.
- Jiang Y., Ju M., Li W., Ren Q., Liu L., Chen Y., Yang Q., Hou Q., Yiliang Liu (2015). "Rapid production of organic fertilizer by dynamic high-temperature aerobic fermentation (DHAF) of food waste." *Bioresource Technology* 197: 7-14.
- Hou J., Li M., Xi B., Tan W., Ding J., Hao Y., Liu D., Hongliang Liu (2017). "Short-duration hydrothermal fermentation of food waste: preparation of soil conditioner for amending organic-matter-impoverished arable soils." *Environ Sci Pollut Res* 24: 21283-21297.
- Sang-Jin M., Ismail Zahed (2007). " Ampere's law and energy loss in AdS/CFT duality." *Physics Letters B* 648: 318-322.
- Jeerasak W., Jirasak S., Wanchai Subsingha (2014). "INNOVATIVE OF INDUCTION HEATING." *Journal of thonburi University*.
- Shin-Chin N., Sheng-Wei T., Mi-Sh H., Rong Hu., Ch-Hau Chan (2014). "Key parameters and optimal design of a single-layered induction coil for external rapid mold surface heating." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 57: 109-117.
- Lenka J., Andrej G., Peter K., Milan Saga (2016). "Optimization of the induction heating process in order to achieve uniform surface temperature." *The 20th International Conference: Machine Modeling and Simulations, MMS 2015* 136: 125-131.
- Shin-Chin N., Ming-Shyan H., Tzung-Hung Tsai (2014). "Enhancement of induction heating efficiency on injection mold surface using a novel magnetic shielding method." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 50: 52-60.
- Jesus A., Rafael A., Jose M. Burdio (2006). "Frequency-Dependent Resistance in Litz-Wire Planar Windings for Domestic Induction Heating Appliances." *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS* 21:856-866.
- Matej K., Tomaaz Jarm (2010). "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 53: 3585-3591.

- Yunus A.C., Michael A.Boles (2011). "Thermodynamics an Engineering Approach 7th Edition." McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Jiin-Yun J., Yu-Wei Chiu (2007). " Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating." Applied Thermal Engineering 27:1883-1894.
- Benyi X., Yu Q., Wenzhe Z., Jing W., Hong Q., Junxin L.,Yu-you Li (2018). " Temperature-phased anaerobic digestion of food waste: A comparison with single-stage digestions based on performance and energy balance." Bioresource Technology 249: 826-834.
- Mi-Sun K., Dong-Hoon K., Yeo-Myeong Yun (2017). "Effect of operation temperature on anaerobic digestion of food waste performance and microbial analysis." Fuel 209:598-605.
- Javkhlán A., Antonio P., Daniel H. Y., Francesco P., Piet N.L. L., Giovanni Esposito (2015). " Enhanced mesophilic anaerobic digestion of food waste by thermal pretreatment: Substrate versus digestate heating." Waste Management 46: 176-181.





ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Jakkarin Srituvanont, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Samran Santalunai.
(2018). **Experiment of induction heating application for heating multilayer metallic hollow altered cylinder.** The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications 26-28 April, 2018.



Experiment of Induction Heating Application for Heating Multilayer Metallic Hollow Altered Cylinder

Jakkarin Srituvanont

School of Electronic Engineering
Suranaree University of technology
Nakhonratchasima 30000, Thailand
e-mail: M6040017@g.sut.ac.th

Chanchai Thongsopa

School of Electronic Engineering
Suranaree University of technology
Nakhonratchasima 30000, Thailand
e-mail: chan@sut.ac.th

Thanaset Thosdeekoraphat

School of Electronic Engineering
Suranaree University of technology
Nakhonratchasima 30000, Thailand
e-mail: thanaset@sut.ac.th

Samran Santalunai

School of Electronic Engineering
Suranaree University of technology
Nakhonratchasima 30000, Thailand
e-mail: samran.sa@sut.ac.th

Abstract—This paper is focused on an experiment about the output load of heating induction during heat exchange. Reference was taken from the experiment of Keeratidech Thepsatitsilp and his further research found out the appropriate forms for output load have multilayer metallic hollow cylinder can make the outermost layer have more heat than the other layers next to it. These other layers are not commonly hot as observed during this experiment. The supply pattern in the experiment on output load reveals that the outermost layer will hot most. We used materials like zinc alike and pattern of output load and they look very similar to the original model. The results of the experiment found out the outermost load layer will be the hottest and the heat will decrease respectively when getting to the next layers. Also the dimensions width and space of opening on the slide in output load will produce heat which will also affects the inner layer.

Keywords—induction heating; multilayer metallic hollow altered cylinder

I INTRODUCTION

At the moment, there are many types of agriculture. We use this technology in developing agricultural industries. Such as drying to remove humidity in maize, peeled longan, or organic waste [1-4]. By using the principle of induction heating as a thermal power supply which can alternate current flow through the coil thereby causing magnetic field for action on metal pieces. The output load to make eddy current in metal pieces in the opposite direction to induce thermal power is clean energy and have effect in the effective production of high heat and output load. It is extremely important in utilization. From the reference of Keeratidech Thepsatitsilp experiment, it was discovered that the output load can make the outer most layer have more heat than the subsequent layers next to it [5].

We conducted studies and trials to make output load hot by heating all the pieces together. During this experiment we used zinc material and space in opening the slides in various characteristics. We found out that after heating all the pieces, the outermost layer had more heat than the next layers close to

it. We also saw that from the inner layer, the heat decreases respectively and the dimension and width and space of the opening of the slide have effect on the heat of the material. This experiment is useful when air is used for heat exchange in agricultural industries.

Therefore this paper presents an experiment about output load of induction heating. During heat exchange, output load gets hot together with other pieces and the dimension of the opening space on the have effect with the inner layer.

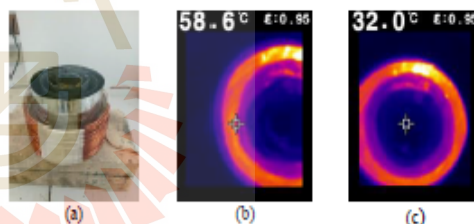


Figure 1. Experiment output load of Keeratidech Thepsatitsilp (a) result of experiment about heat in the outermost layer has temperature of 58.6 °C (b) and the next layer has a temperature of 32.0 °C (c).

II MATERIAL AND METHOD

This section will talk about the materials and method used during this experiment. It also talks about the various models of induction heating which alternates the flow of current through coil causing magnetic field that also makes electric current flow in work piece [6, 10]. Thus heat depends on the quality of current also to the change of time during heat transfer process. As described by the Fourier equation [11, 12].

$$k(\nabla^2 T) + \dot{q} = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (1)$$

which T is temperature, k is thermal conductivity, ρ is density of workpiece, c_p is heat capacity, \dot{q} is the heat source density induced by eddy current per unit time in a unit volume which is find from

$$\dot{q} = \frac{J^2}{\sigma} = \sigma \left(\frac{\partial \hat{A}}{\partial t} \right)^2 = \sigma \left(\frac{\partial (\hat{A} e^{j\omega t})}{\partial t} \right)^2 = \sigma (j\omega \hat{A} e^{j\omega t})^2 \quad (2)$$

which J is conduction current density, σ is the electric conductivity, \hat{A} is the amplitude of magnetic vector potential, A is the magnetic vector potential and A can be expressed as

$$A(x, y, z, t) = \hat{A}(x, y, z) e^{j\omega t} \quad (3)$$

From output load in this experiment we designed a system of induction heating circuit from block diagram in figure. 2. Which can be divided in 2 parts. The First part has a voltage regulator that gives 12 V_{dc} and connects with a frequency oscillator circuit at 18.5 kHz square wave which connects to IGBT MOSFET gate drives the fly back circuit which was supplied from full wave rectifier (110 V_{dc}) for drive coil work piece. So power dispensing or current will change according to output load with format in the experiment.

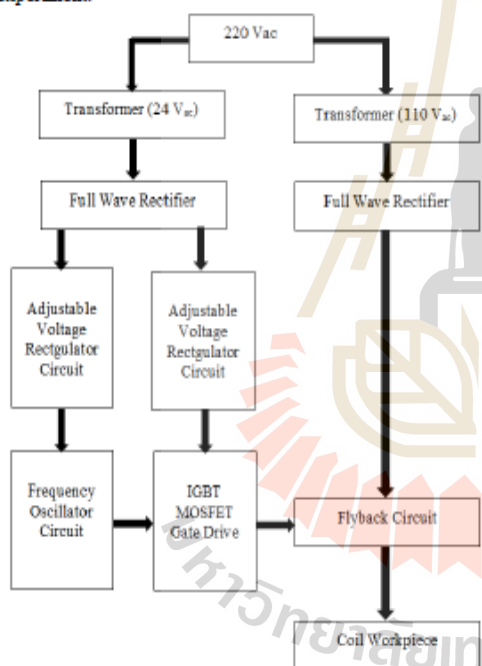


Figure 2. Block diagram of induction heating system design.

The material used for output load was zinc in bending to make the characteristics similar to hollow cylinder in order to have opening slide spaces in different sizes [13, 14]. The outer layer has a width of 9.5 cm and a length of 26.3 cm. The middle layer has a width of 9.5 cm and a length of 21.75 cm. The inner layer has a width of 9.5 cm and a length of 13.6 cm. The hollow cylinder has a diameter of 8 cm and a height of 9.5 cm. The experiment has 7 methods which can be divided into 2 parts. The first part of output load experiment has different styles and involve 4 methods.

The first in figure 3(a) has 3 layers, the outermost layer, middle layer and the inner layer. The placement and direction of space and the opening on the slide are in the same direction and the same width. The spaces are free. The second figure 3(b) has 3 layers the outermost layer, the middle layer which has a placement and direction of space of opening on the slide in the same direction and finally the inner layer has opposite and width spaces which are free. The third figure 3(c) has 3 layers. The outermost and the inner have placement and direction of space of opening on the slide in the same direction while the middle layer is opposite with width of 3 layers which the spaces are free. The fourth in figure 3(d) has 3 layers, the outermost and the inner layer have placement and direction of space opening on the slide in the opening direction while the middle layer does not have space of opening on the slide and width of 3 layers with the spaces free.

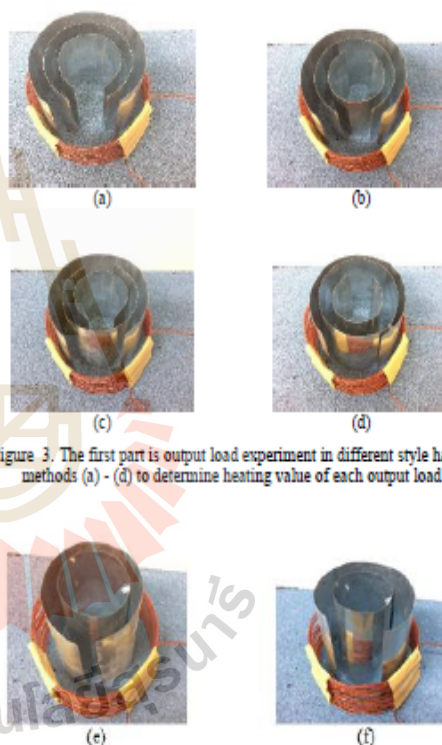


Figure 3. The first part is output load experiment in different style have 4 methods (a) - (d) to determine heating value of each output load.

Figure 4. The second part is space of opening on the slide have 3 methods (e) - (g) to determine heating value of each output load.

The second part is space of opening on the slide and heat output load experiment. It has 3 methods.

The first in figure 4(e) has 2 layers, the outer layer and the inner layer. The outer layer has space of opening of 2 cm on the slide while the inner layer is hollow cylindrical. The second figure 4(f) has 2 layers, the outer layer and the inner layer. The outer layer has space of opening of 5 cm on the slide while the inner layer is hollow cylindrical. The third figure 4(g) has 2 layers, the outer layer and the inner layer. The outer layer has space of opening of 9 cm and the inner layer is hollow cylindrical.

III. RESULTS AND DISCUSSION

From the experiment, we have reference from the experiment of Keeratidech Thepsatitslip which shows that at a frequency of 18.5 kHz power consumption will be at 120 W over the time of 150 s. It also found out that the outermost position will have high temperature than the next layer closer to it even though at midpoint it is not hot.

So it can be concluded that when the outer layer is closed, it will only heat the outer layer and the inner layer will not be heated. This session discusses the result of output load in the experiment which has 7 methods in operating at a frequency of 18.5 kHz over a time of 10 s. So power dispensing or current will change according to output load with format in the experiment.

The first part of the experiment is shown in figure 3(a) that at an operating frequency of 18.5 kHz and an electric current of 3.48 A with a voltage of 110 V there will be power at 382.8 W over the time of 10 s. The result shown in figure 5(a) indicates that when the temperature of the outermost layer of a zinc sheet is 225.5 °C the middle layer at 106.9 °C and the inner layer at 94.6 °C it will be noticed that the layers next to the outermost layer will have a decrease in temperature. The second part of the experiment is shown in figure 3(b) that at an operating frequency of 18.5 kHz and an electric current of 3.51 A with a voltage of 110 V there will be power at 386.1 W over the time of 10 s. The result shown in figure 5(b) indicates that when the temperature of the outermost layer of a zinc sheet is 202.8 °C the middle layer at 120.0 °C and the inner layer at 116.7 °C. From the figures it is clear that the layers next to the outermost layer will have less heat in temperature. The third part of the experiment is shown in figure 3(c) that at an operating frequency of 18.5 kHz and an electric current of 3.62 A with a voltage of 110 V there will be power at 398.2 W over the time of 10 s. The result shown in figure 5(c) indicates that when the temperature of the outermost layer of a zinc sheet is 223.3 °C the middle layer at 155.6 °C and the inner layer at 101.8 °C. It will be noticed that the temperature of the outermost layer will be the hottest while heat will decrease in the next layer.

The fourth part of the experiment is shown in figure 3(d) that at an operating frequency of 18.5 kHz and an electric current of 5.66 A with a voltage of 110 V there will be power at 622.6 W over the time of 10 s. The result shown in figure 5(d) indicates that when the temperature of the outermost layer of a zinc sheet is 221.0 °C the middle layer at 201.8 °C and the inner layer at 46.5 °C. It will be noticed that the

layers next to the outermost layer will have a decrease in temperature. It equally shows that while the outermost layer is hotter than the middle layer, the inner layer is not hot.

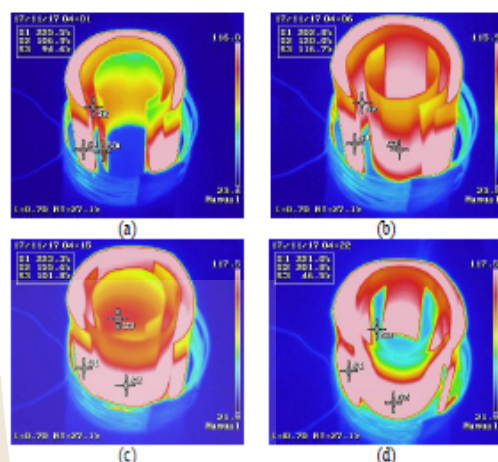


Figure 5. The first part experimental results to compare the thermal heat in different style have 4 methods (a) - (d)

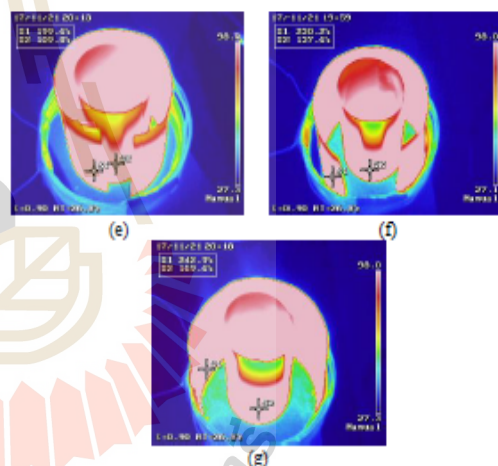


Figure 6. The second part experimental results about width in space of opening on the slide with the heat of inner materials have 3 methods (e) - (g).

So we have results about width in space of opening on a slide. Also with the heat of the inner materials. Power dispensing current will change according to output load in the format in the experiment. The first step of the experiment is shown in figure 4(e) with the width in a space of opening on the slide is 2 cm, and operates at a frequency of 18.5 kHz with electric current at 4.24 A voltage 110 V producing a power of 466.4 W in 10 s. The result shown in figure 6(e) with the temperature of the outer layer at 199.6 °C, the inner layer at 109.8 °C. It was noticed that the temperature is at its hottest point but heat will decrease in the next layer. This confirmed that width in space opening on a slide is important. The second part of the experiment in figure 4(f) shows that

there is an open space on the opening on the slide which is 5 cm and operates at a frequency of 18.5 kHz with an electric current of 4.34 A with a voltage of 110 V making it to have a power of 477.4 W within 10 s. The figure in 6(f) shows that the temperature of the outer layer is 230.2 °C, the inner layer 137.6 °C. It was realized that the hottest temperature was on the outer layer while the heat decreased on the next layer. This also went further to show that width in space of operating slide is very important. The third part of the experiment in figure 4(g) shows an open space of opening on a slide which is 9 cm and operates at a frequency of 18.5 kHz with an electric current of 4.37 A with a voltage of 110 V producing power of 480.7 W within 10 s. Figure 6(g) showed that the temperature of the outer layer was 242.9°C and the inner layer has 169.6°C. It was noticed that the hottest temperature was on the outer layer and the heat decreased on the next layer. So width and size in space of opening on a slide has importance with heat.

The result of experiment have width in space opening on the slide is 2, 5 and 9 cm have the different of temperature in each forms and use to apply to plot the graph in the temperature at that time.

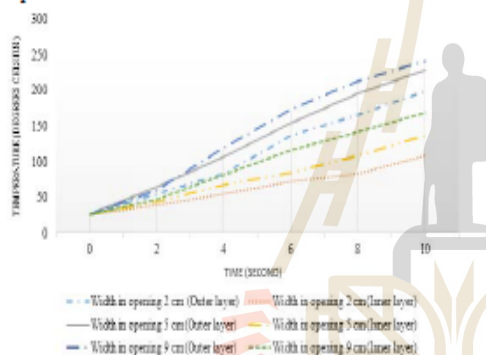


Figure 7. The graph shows the experimental results to the relationship of temperature with the size of the space opening on the slide.

IV. CONCLUSION

In this paper we experienced about output load of induction heating and the characteristics of output load. We found out that multilayer metallic hollow cylinder style can make the outermost layer the hottest among the other layers next to it. Seven methods were employed during this experiment to show that the outermost layer has the most heat while the heat decreases on the other layers next to it. Therefore space on the opening on a slide layer will hot if the outermost layer is close to it but the inner layer will not be hot.

Also the width on the space opening on the slide will be affected by heat in each form of output load and power dispensing of current will change according to output load in the format in the experiment.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the Office of the Higher Education under NRU project in Thailand. The authors deeply appreciate the valuable comments of the reviewers and recommends to be advantageous for revisions this paper.

REFERENCES

- [1] N.Tippayawong, C.Tantakitti, S.Thavornun, "Energy efficiency improvements in longan drying practice," *Energy*, vol. 33, pp. 1137-1143, 2008.
- [2] N.Tippayawong, C.Tantakitti, S.Thavornun, V.Peerawanitkul "Energy conservation indrying of peeled longan by forced convection and hot air recirculation," *Biosystems Engineering*, vol. 104, pp. 199-204, 2009.
- [3] Yang Jiang, Meiting Ju, weizun Li, Qingbin Ren,Le Liu, Yu Chen, Qian Yang, Qidong Hou, Yilang Liu, "Rapid production of organic fertilizer by dynamic high-temperature aerobic fermentation (DHAF) of food waste," *Bioresource Technology*, vol.197, pp. 7-14, 2015.
- [4] Irfan Afzal, Muhammad Amir Bakhtavar, Muhammad Ishfaq, Muhammad Sagheer, Dieudonne Baributsa, "Maintaining dryness during storage contributes to higher maize seed quality," *Journal of Stored Products Research*, vol.72, pp. 49-53, 2017.
- [5] Keeratidech Thepsatsitip, Worawut Boonpeang, Phanupong Saeung, Nuttakorn Pukseesang, Chanchai Thongsopa, "Experiment and design a suitable induction heating for air heat exchanger application," *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) 2017*, pp. 161-163, 2017.
- [6] Chester A. Tudbury, "Electric and magnetic conditions inside an induction-heated workpiece," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, vol. 78, pp. 79-83, 1959.
- [7] Xiaobin Fu, Baoyu Wang, Xuefeng Tang, Hongchao Ji, Xiaoxing, Zhu, "Study on induction heating of workpiece before gear rolling process with different coil structures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 1-9, 2017.
- [8] T. watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Fukui, "Elemental Development of Metal Melting by Electromagnetic Induction Heating Using Superconductor Coils," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1-4, 2016
- [9] Y. Han, H. Wen, E. Yu, "Study on electromagnetic heating process of heavy-duty sprockets with circular coils and profile coils," *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 861-868, 2016.
- [10] L. Jakubovičová, G. Andrej, K. Peter, and S. Milan, "Optimization of the Induction Heating Process in Order to Achieve Uniform Surface Temperature," *Procedia Engineering*, vol. 136, pp. 125-131, 2016.
- [11] Jün-Yuh Jang, Yu-Wei Chiu, "Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electromagnetic induction heating," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp.1883-1894, 2007.
- [12] Sang-Jin Sin, Ismail Zahed, "Ampere's law and energy loss in Ads/CFT duality," *Physics Letters B*, vol. 648, pp. 318-322, 2007.
- [13] Matej Kranjc, Anze Zupanic, Damijan Miklavcic, Tomaz Jarm "Numerical analysis and Thermographic investigation of induction heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.53, pp. 3585-3591, 2010.
- [14] Ming-Shyan Huang, Yao-Lin Huang, "Effect of multi-layered induction coils on efficiency and uniformity of surface heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 2414-2423, 2010.

ประวัติผู้เขียน

นายจักริน ศรีสุวรรณนท์ เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2537 ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 707 หมู่ 4 ตำบลโพธิ์กลาง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 จบระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2560 และเมื่อปี พ.ศ. 2560 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ 1 ฉบับ งานชื่อ The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications ในหัวข้อ “Experiment of induction heating application for heating multilayer metallic hollow altered cylinder” งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุน OROG



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี