

การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลาย
แบบเหนียวนำไฟฟ้าเพื่อการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลาย
แบบเหนียวนำไฟฟ้าเพื่อการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน



ณัฐวรรณ ตันน้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอม
ละลายแบบเหนียวนำไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน

ณัฐวรรณ ตันหน้อย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติกร สาสุจิตต์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน
ชื่อผู้เขียน	นายณัฐวรรธน์ ต้นน้อย
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเพื่อการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าขนาด 4.5 kW ที่เดิมใช้ในกระบวนการชุบแข็งโลหะ ด้วยการออกแบบและจำลองการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำใหม่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด ความสูงของขดลวด และระยะห่างของขดลวดเท่ากับ 120 mm 160 mm และ 5 mm ตามลำดับ ใช้งานร่วมกับเข้าหลอมแกรไฟต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความสูงเท่ากับ 90 mm และ 156 mm ตามลำดับ โดยขดลวดเหนี่ยวนำถูกระบายความร้อนด้วยน้ำที่มีอัตราการไหล 5 l/min จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างขนาด 10x10 mm ด้วยกำลังไฟฟ้า 3.60 kW เครื่องต้นแบบจะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดเท่ากับ 24.52% ณ สภาวะนี้เครื่องต้นแบบมีอัตราการหลอมละลายสูงสุดเท่ากับ 8.00 kg/h มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 0.06 kWh และ 2.22 MJ/kg ตามลำดับ ผลผลิตที่ได้จากการแปรสภาพเมื่อผ่านกระบวนการ Machining จะมีลักษณะเป็นโลหะผสมที่มีผิวมันวาว มีความหนาแน่นเฉลี่ย 6,942 kg/m³ และมีค่าความเครียดอัดสูงสุดประมาณ 142 MPa ผลผลิตนี้มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับโลหะกลุ่มที่ใช้ในงานไฟฟ้าจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ อาทิ ขั้วแบตเตอรี่ แท่งหลักดิน สายไฟฟ้า หรือนำไปหลอมเป็นโลหะผสมชนิดใหม่เพื่องานเฉพาะด้านได้ ทั้งนี้การแปรสภาพขยะในงานวิจัยนี้มีต้นทุนค่าไฟฟ้าต่ำกว่าค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะอันตรายประเภทนี้ด้วยวิธีฝังกลบและเผาทำลายจึงมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ที่จะพัฒนาเทคโนโลยีนี้เพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ : ขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์, ขยะอิเล็กทรอนิกส์, การจัดการขยะ, การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า, วัสดุทดแทน

Title	REFORMING OF THIN-FILM SOLAR PANEL WASTE WITH INDUCTION HEATING TECHNIQUE TO USE AS A SUBSTITUTE MATERIAL
Author	Mr. Nutthawat Tonnoi
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Parin Khongkrapan

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the feasibility of reforming thin-film solar panel waste with induction heating techniques for use as a substitute material. In this research, a 4.5 kW induction metal heating machine originally used in the metal hardening process was developed. A new induction coil was designed and simulated the operation of with a computer program. A new inductance coil has a coil diameter, coil height, and coil pitch of 120 mm, 160 mm, and 5 mm, respectively. A graphite crucible with an outer diameter of 90 mm and a height of 156 mm was used with the new coil. The induction coil is cooled by water with a flow rate of 5 l/min. From the experimental results, it was found that when reforming thin-film solar panel waste with a sample size of 10x10 mm and an input power of 3.60 kW, a prototype machine has a maximum energy efficiency of 24.52%. This condition, a prototype machine has a maximum melting rate of 8.00 kg/h, with the lowest electrical consumption and specific energy consumption of 0.06 kWh and 2.22 MJ/kg, respectively. The products have an average density of 6,942 kg/m³, and their maximum compressive strength is about 142 MPa. This product has an electrical conductivity similar to that of Grain Oriented Electrical Steel. Therefore, it can be applied as an electric conductor in various forms, such as battery terminals, ground rods, and electric cables, or it can be melted into a new type of alloy for specific work. However, the cost of thin-film solar panel waste reforming in this research is lower than the cost of managing this type of hazardous waste by landfill and incineration methods. Therefore, it is economically feasible to develop this technology for further industrial use.

Keywords : solar panel waste, electronic waste, waste management, induction heating, substitute material

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ยาวุฑฒิ ซึ่งให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำปรึกษาและแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ปรึกษาหลักที่ กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงให้ความดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ปรึกษาร่วม ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยิ่งรัช อรรถเวชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติกร สาสุจิตต์ สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมถึงการตรวจ แก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับสถานที่และทุนอุดหนุน ในการทำวิจัยผ่านโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนใน ระดับบัณฑิตศึกษา มา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัว พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ รวมถึงอาจารย์ และบุคลากร วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในหลาย ๆ ด้าน พร้อมทั้งเป็นกำลังใจจนทำให้ผู้วิจัยได้สำเร็จการศึกษาด้วยดี

ณัฐวรรณ ตันน้อย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	5
ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	6
การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	6
การฝังกลบอย่างปลอดภัย.....	7
การบำบัดและการกำจัดด้วยความร้อน.....	9
การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานตามมาตรฐาน สมาคมอุตสาหกรรมพลังงาน แสงอาทิตย์ (SEIA) ประเทศสหรัฐอเมริกา	10
การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานตามมาตรฐาน คณะกรรมการกำกับกิจการ พลังงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตประเทศไทย	11

การให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า	12
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
การตรวจเอกสาร	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	25
ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่อพ่วงสำหรับเครื่องให้ความร้อนโลหะ	26
1) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) และเบ้าหลอม (Crucible)	26
2) ระบบระบายความร้อน (Cooling System)	31
3) อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ (Hopper)	32
4) ระบบไฟฟ้าและควบคุม	33
ขั้นตอนที่ 2 การทดลองแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคหลอมละลาย	34
การเตรียมตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	35
ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล	39
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย	43
อัตราการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	44
การใช้พลังงานในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	46
ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์	49
การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยกับวัสดุชนิดต่าง ๆ	53
ต้นทุนการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	55
วิเคราะห์ผลการทดลอง	56
ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	59
ประวัติผู้วิจัย	61

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การออกแบบเตาหลอมแบบเหนียวน้ำ	22
ตารางที่ 2 ขนาด มิติ และระยะต่าง ๆ ของขดลวดเหนียวน้ำเพื่อการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	27
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	48
ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนที่ได้จากการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์ม	50
ตารางที่ 5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนที่ได้จากการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์ม	52
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยกับวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	54



สารบัญรูป

	หน้า
ภาพที่ 1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทน	1
ภาพที่ 2 ผังการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	7
ภาพที่ 3 หลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมชนิดไม่อันตราย	8
ภาพที่ 4 หลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมชนิดไม่อันตราย	9
ภาพที่ 5 การให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า	12
ภาพที่ 6 ความลึกในการทะลุทะลวงในโลหะต่าง ๆ	13
ภาพที่ 7 องค์ประกอบของระบบให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ	14
ภาพที่ 8 เตาเหนี่ยวนำแบบบ้ำหลอม	15
ภาพที่ 9 วงจรพื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน	19
ภาพที่ 10 วงจรเตาหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำ	20
ภาพที่ 11 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง.....	20
ภาพที่ 12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	21
ภาพที่ 13 มิติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญต่อการออกแบบ	26
ภาพที่ 14 ผลการจำลองการทำงานของขดลวดแบบ A	28
ภาพที่ 15 ผลการจำลองการทำงานของขดลวดแบบ B.....	28
ภาพที่ 16 ผลการจำลองการทำงานของขดลวดแบบ C	29
ภาพที่ 17 ขนาดบ้ำหลอมชนิดแกรไฟต์มาตรฐานที่มีขายในท้องตลาด.....	30
ภาพที่ 18 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้	31
ภาพที่ 19 อุปกรณ์ป้องกันวัตถุระเบิด	32
ภาพที่ 20 การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันวัตถุระเบิดที่ด้านบนของห้องหลอม.....	33
ภาพที่ 21 ระบบไฟฟ้าและควบคุม	34

ภาพที่ 22 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่แยกออกจากกระจกแล้ว	35
ภาพที่ 23 การตัดเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	36
ภาพที่ 24 การเตรียมตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	36
ภาพที่ 25 การบรรจุตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางในอุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ	37
ภาพที่ 26 การแปรสภาพตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	38
ภาพที่ 27 ขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่แปรสภาพแล้วในแม่พิมพ์	38
ภาพที่ 28 เครื่องวัดพลังงานมัลติฟังก์ชัน	39
ภาพที่ 29 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ	40
ภาพที่ 30 เครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าต้นแบบในงานวิจัยนี้	43
ภาพที่ 31 อัตราการแปรสภาพขยะจากเซลล์แสงอาทิตย์	44
ภาพที่ 32 ผลของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการหลอมละลาย	45
ภาพที่ 33 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการแปรสภาพขยะตัวอย่าง	46
ภาพที่ 34 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทน	51
ภาพที่ 35 การเสียหายของวัสดุ ณ จุดประลัย	51

บทที่ 1 บทนำ

การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง
ด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน

REFORMING OF THIN-FILM SOLAR PANEL WASTE
WITH INDUCTION HEATING TECHNIQUE TO USE AS A SUBSTITUTE MATERIAL

ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยมีแผนยุทธศาสตร์และนโยบายในการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนตามแผน พ.ศ. 2558-2579 (AEDP) 2015 มีแนวทางและเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนทางด้านการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยปี พ.ศ. 2579 จะสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 6,000 MWp (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

แผนพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้า	แผน AEDP2015	
	เป้าหมาย*	ดำเนินการแล้ว
พลังงานแสงอาทิตย์ (MW)	6,000	2,849
ชีวมวล (MW)	5,570	2,290
พลังงานลม (MW)	3,002	1,504
ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย) (MW)	600	382
ขยะชุมชน (MW)	500	500
ขยะอุตสาหกรรม (MW)	50	31
พลังน้ำขนาดเล็ก (MW)	376	188
พลังน้ำขนาดใหญ่ (กฟผ.) (MW)	2,906	2,918
ก๊าซชีวภาพ (พืชพลังงาน) (MW)	680	-
รวม (MW)	19,684	10,662
ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน : AE (%)	20%	10%

ภาพที่ 1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทน

[กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,(2559)]

เพื่อเป็นการส่งเสริมการเจริญเติบโตด้านการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องในประเทศไทยจึงมีการติดตั้งและนำเข้าเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมากเข้ามาติดตั้งเพื่อตอบสนองแผนและนโยบายทางด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเข้ามาติดตั้งจะมีอยู่ 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ชนิดผลึกซิลิคอน (Crystalline Silicon Solar Cell) และ ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน (Thin Film Solar Cell) แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือชนิดผลึกซิลิคอน พลังแสงอาทิตย์จัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมดอายุและมีศักยภาพในการเป็นรูปแบบพลังงานอื่น ๆ ได้ ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานที่มีความนิยมมากในปัจจุบัน

เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุในการใช้งานประมาณ 20-25 ปี และ หลังจากการใช้งานตามอายุ เซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้จะกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากการคาดการณ์ของในปี พ.ศ.2563 จะมีซากขยะแผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 551,684 ton หรือประมาณ 18.38 ล้านแผง ที่ต้องกำจัดในอนาคต (ขยะพิษ อนาคตโซลาร์เซลล์, (2559)) หากมีการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีจากซากเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ไม่ถูกต้องก็จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา เทคโนโลยีทางด้านทำให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจในการจัดการขยะที่มีองค์ประกอบของโลหะ เทคโนโลยีดังกล่าวจะสามารถสร้างอุณหภูมิได้เกินกว่า 1,000 °C จากอุณหภูมิที่เกิน 1,000 °C จะสามารถจัดการสารประกอบชนิดไดออกซิน (Dioxins) ที่เกิดจากการเผาไหม้ขยะอิเล็กทรอนิกส์หรือพลาสติก การเกิดสารไดออกซินจากการเผาไหม้จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-550 °C ความเข้มข้นสูงสุดของสารนี้จะมีอยู่ในก๊าซไอเสียและเถ้า (Ash) ที่อยู่ในปล่องที่อุณหภูมิประมาณ 350 °C ความเข้มข้นจะลดลงต่ำสุด เมื่ออุณหภูมิลดลงหรือเพิ่มขึ้นในช่วง 275 °C และ 420 °C ตามลำดับ สารไดออกซินจะเริ่มถูกทำลาย (Break Down) เมื่ออุณหภูมิ 850 °C ขึ้นไปและจะถูกทำลายเกือบสมบูรณ์ที่อุณหภูมิขึ้นไปถึง 1,100 °C หากไม่มีการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีก็จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่มาในการทำงานการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบจัดการขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่ให้ความร้อนสูงและรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถหลอมละลายส่วนประกอบที่เป็นกระจกหรือแก้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำทางไฟฟ้า
- 2) เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน

ขอบเขตการวิจัย

- 1) ออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องหลอมละลายแบบเหนียวนำทางไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 10 kW เพื่อใช้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้
 - 1.1) ขดลวดเหนียวนำ
 - 1.2) เบ้าหลอมแบบทำงานต่อเนื่อง
 - 1.3) ระบบป้องกันขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแบบทำงานต่อเนื่อง
 - 1.4) ระบบไฟฟ้าและควบคุม
 - 1.5) ระบบระบายความร้อน
- 2) ตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่
 - 2.1) ตัวแปรต้น หรือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)
 - ปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า (Input Power) ที่จ่ายให้กับระบบหลอมละลายแบบเหนียวนำทางไฟฟ้าอย่างน้อย 3 ค่า
 - ปรับเปลี่ยนขนาดของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ผ่านการคัดแยกและบดย่อยแล้วอย่างน้อย 3 ขนาด
 - 2.2) ตัวแปรตาม (Dependent Variable)
 - อัตราการแปรสภาพของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (kg/h)
 - พลังงาน (MJ) และพลังงานจำเพาะ (MJ/kg) ที่ใช้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง
 - ต้นทุนทางด้านพลังงาน (kWh/kg หรือ Baht/kg) ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง
 - กำลังการผลิตในการหลอมละลายขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง.
- 3) ทำการการเปรียบเทียบสมบัติของผลผลิตที่ได้กับวัสดุทดแทนอย่างน้อย 1 ชนิด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน
- 2) ได้แนวทางการจัดการขยะจากเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำทางไฟฟ้า



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการบริหารจัดการขยะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า เทคโนโลยีการรีไซเคิลแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์มีแล้วในตลาดต่างประเทศซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางกล กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางเคมี และกระบวนการกำจัดทิ้ง โดยค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบรีไซเคิลในประเทศสูงกว่า การส่งออกไปจัดการแบบรีไซเคิลในต่างประเทศ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางความร้อน มีดังนี้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) (2556) เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน

การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเด่นที่สำคัญ แตกต่างจากวิธีอื่นหลายประการดังต่อไปนี้

1. ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวในขณะที่ใช้งาน จึงทำให้ไม่มีมลภาวะทางเสียง
2. ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษจากขบวนการผลิตไฟฟ้า
3. มีการบำรุงรักษาน้อยมากและใช้งานแบบอัตโนมัติได้ง่าย
4. ประสิทธิภาพคงที่ไม่ขึ้นกับขนาด

5. สามารถผลิตเป็นแผงขนาดต่าง ๆ ได้ง่าย ทำให้สามารถผลิตได้ปริมาณมาก
6. ผลิตไฟฟ้าได้แม้มีแสงแดดอ่อนหรือมีเมฆ
7. เป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้มาฟรีและมีไม่สิ้นสุด
8. ผลิตไฟฟ้าได้ทุกมุมโลกแม้บนเกาะเล็ก ๆ กลางทะเล บนยอดเขาสูง และในอวกาศ
9. ได้พลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งเป็นพลังงานที่นำมาใช้ได้สะดวกที่สุด

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

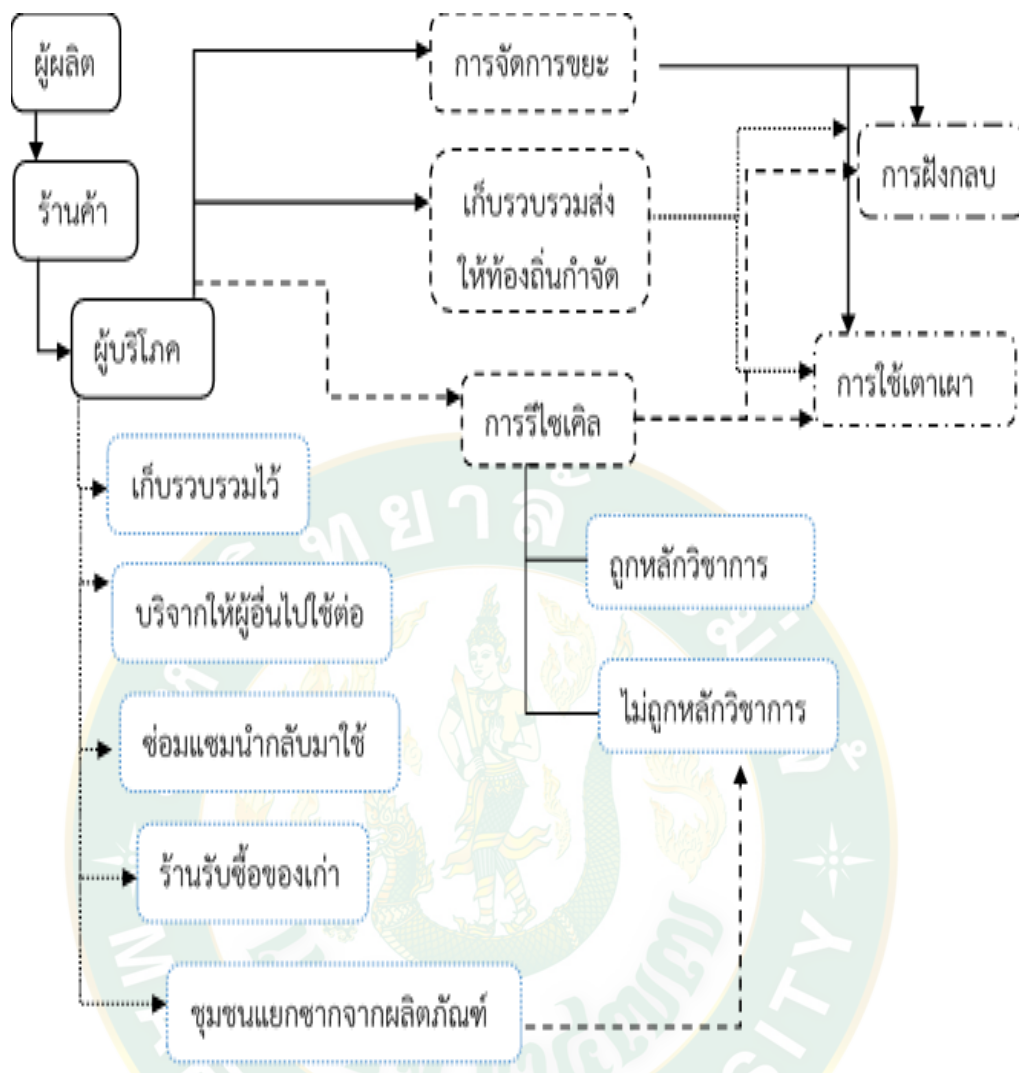
ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

1. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน จะแบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น คือ แบบที่เป็นรูปผลึก (Crystal) และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) แบบที่เป็นรูปผลึกจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) และชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) โดยแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก คือ ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) (2545)

2. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน ซึ่งประเภทนี้จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25% ขึ้นไป แต่มีราคาสูงมาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาขบวนการผลิตสมัยใหม่จะทำให้มีราคาถูกลง และนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต (ปัจจุบันนำมาใช้เพียง 7% ของปริมาณที่มีใช้ทั้งหมด)

การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste หรือ E-Waste) คือ ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเครื่องใช้ไฟฟ้า และ/หรือ ซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ ทั้งที่ใกล้หมดอายุการใช้งาน หรือ ล้าสมัย หรือไม่เป็นที่ต้องการของเจ้าของอีกต่อไป ซึ่งกลายเป็นขยะถูกทิ้งหรือถูกส่งต่อไปยังสถานีรีไซเคิล (คัตคณัฐ ชื่นวงศ์อรุณ, 2564) นอกจากนี้ปัญหาซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในเชิงปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้ว ยังมีปัญหาจากสารอันตรายซึ่งพบในชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ฯลฯ หากชิ้นส่วนเหล่านี้ได้รับการจัดการที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดการรั่วไหลของสารอันตรายสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนรวมทั้งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทั้งในระยะสั้นและระยะยาวแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผังการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์

การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์

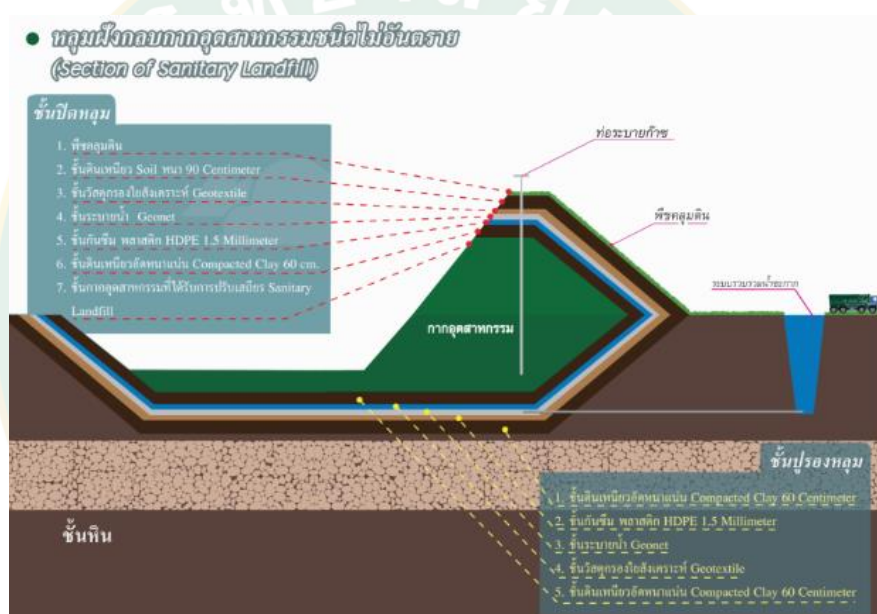
การฝังกลบอย่างปลอดภัย

การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure Landfill) เป็นวิธีทางกายภาพที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียขั้นสุดท้าย (Final Disposal) ซึ่งหลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามกฎหมายกำหนด ได้แก่

1. หลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรมไม่อันตราย (Sanitary Landfill)

กากอุตสาหกรรมไม่อันตราย ได้แก่ กระดาษ เศษเหล็ก และ/หรือของเสียที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งหากของเสียอุตสาหกรรมเหล่านี้ไม่ได้รับการจัดการหรือกำจัดอย่างถูกต้อง จะส่งผลเสียมากมายต่อสิ่งมีชีวิต ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม เพราะฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของ

โรงงานผู้ก่อกำเนิดของเสียอันตรายที่จะต้องส่งกำจัดไปยังโรงงานที่ถูกต้อง ได้รับใบอนุญาต และจัดการอย่างถูกวิธี ลักษณะหลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมไม่อันตราย จะประกอบด้วย ระบบการปูชั้นปูรองหลุม เริ่มจากการปูพื้นบ่อหรือกันหลุมด้วยดินเหนียวและแผ่นพลาสติก HDPE ที่มีความหนาแน่นสูง ป้องกันการรั่วซึมของน้ำชะกากไหลปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำใต้ดินก่อนการปูพื้นชั้นถัดมาด้วยแผ่น Geonet แผ่นพลาสติก HDPE ที่มีลักษณะเป็นตาข่ายที่ทำหน้าที่ระบายน้ำชะกาก ต่อด้วยแผ่น Geotextile ไยสังเคราะห์ที่มีหน้าที่ในการกรองกากอุตสาหกรรม และช่วยให้ น้ำชะกากระบายได้ดียิ่งขึ้น และปูตามด้วย GCL แผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติป้องกันการรั่วซึมน้ำชะกาก และดูดซับ ดักจับโลหะหนักได้เป็นอย่างดี ตามด้วยการปิดทับด้วยดินหนา 60 cm ก่อนทำการฝังกลบกากอุตสาหกรรมลงไป



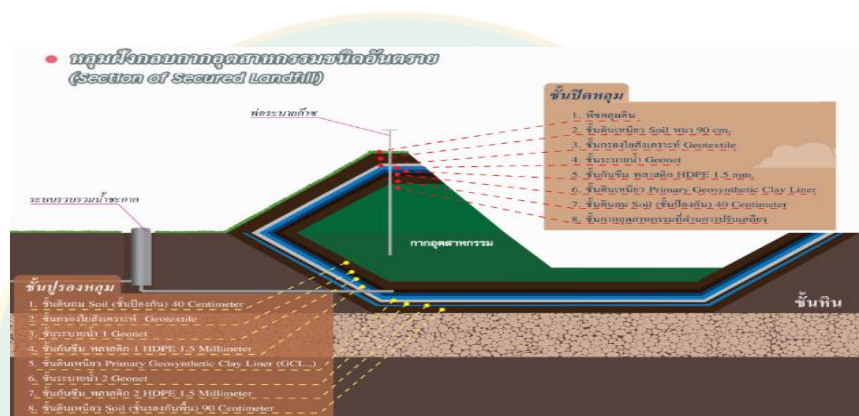
ภาพที่ 3 หลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมชนิดไม่อันตราย

2. หลุมฝังกลบขยะอุตสาหกรรมอันตราย เมื่อทำการปรับเสถียรหรือทำให้เป็นก้อนแข็งแล้ว (Secure Landfill of Stabilized and/or Solidified Wastes)

ของเสียอันตราย (Hazardous Waste) เป็นวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย มีสารพิษปะปนหรือมีตัวทำละลายเสื่อมคุณภาพตามรายชื่อที่ระบุไว้ หรือกากตะกอนที่เกิดจากการผลิต หรือเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย จากกิจกรรมตามรายชื่อที่ระบุ [ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531), 2531] ของเสียอันตรายจึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากากของเสียอุตสาหกรรม ได้แก่

- กากตะกอนจากการละลายเกลือและกากตะกอนจากโรงผลิตโซดาไฟด้วยวิธีใช้เซลล์ปรอท

- กากวัตถุมีพิษและกากตะกอนจากโรงงานผลิตและบรรจุยาฆ่าแมลง
- ฝุ่นจากระบบกำจัดตะกั่วในอากาศและกากตะกอนจากโรงงานหลอมตะกั่ว
- ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมหรือไม่ได้คุณภาพ
- น้ำยาเคมีจากถังซูปโลหะ กากที่เหลือจากการซูปโลหะ รวมทั้งกากตะกอนจากโรงงานซูปโลหะ
- ปลายขั้วหลอดที่ผลิตไม่ได้คุณภาพที่ปนเปื้อนสารปรอทจากโรงงานผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์
- ถ่านไฟฉายที่ผลิตไม่ได้คุณภาพฝุ่นจากระบบกำจัดอากาศกากตะกอนจากโรงงานผลิตถ่านไฟฉาย
- กากสีจากห้องพ่นสีของโรงงานที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับรถยนต์และจักรยานยนต์



ภาพที่ 4 หลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมชนิดไม่อันตราย

การบำบัดและการกำจัดด้วยความร้อน

การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี ไม่สามารถทำลายของเสียอันตรายบางชนิดได้ เช่น น้ำมัน สารปรอทศัตรูพืชบางชนิด ตัวทำละลายอินทรีย์ สารเคมีที่เสื่อมคุณภาพ จึงจำเป็นต้องบำบัดและกำจัดด้วยความร้อน ปัจจุบันการบำบัดและกำจัดด้วยความร้อนในประเทศไทยเป็นการเผาไหม้ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Incineration) เพื่อให้ของเสียเปลี่ยนสภาพเป็นเถ้า แล้วนำเถ้านี้ไปฝังกลบอย่างปลอดภัย การเผาของเสียอันตราย ต้องทำการเผาที่อุณหภูมิ 700-1200 °C และต้องมีส่วนผสมไอก๊าซเข้า เพื่อให้มีมลสารเหลือน้อยที่สุด เตาเผาจะต้องมีการปรับอัตราส่วนเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสม นอกจากนี้จะต้องมีเครื่องฟอกอากาศ เช่น เครื่องดักฝุ่น เครื่องกำจัดโอกรดต่าง ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ข้อควรระวังการบำบัดและการกำจัดด้วยความร้อน ได้แก่ การเผาของเสียอันตรายต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และไม่ต่ำกว่า 700 °C เพื่อไม่ให้อุณหภูมิเตาต่ำลง จนเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และอาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น แอมโมเนีย เมธิลเมอร์แคปแทน และฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นก๊าซพิษก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจของผู้อาศัยที่อยู่ใกล้บริเวณเตาเผา การ

เผาซินค้าอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักไม่ว่าจะเป็น ตะกั่ว แคดเมียม และ สารปรอท เข้าสู่บรรยากาศและกลายเป็นฝ้าถ่าน สารปรอทที่แพร่เข้าสู่บรรยากาศจะสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร โดยเฉพาะในตัวปลาซึ่งเป็นช่องทางสำคัญที่เผยแพร่สารปรอทไปสู่คน ถ้าซินค้านั้นมีส่วนประกอบของพลาสติก PVC ก็จะทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารไดออกซินคลอไรด์ และสารฟิวแรน สารทนไฟซึ่งทำจากโบรมีน ก็จะทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารโบรมเนตไดออกซินและสารฟิวแรน เมื่อมีการเผาขยะอิเล็กทรอนิกส์อย่างไม่ถูกหลักวิชาการ

การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานตามมาตรฐาน สมาคมอุตสาหกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ (SEIA) ประเทศสหรัฐอเมริกา

การกำจัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานแล้วในประเทศสหรัฐอเมริกาถูกควบคุมโดยนโยบายของรัฐในการการควบคุมของเสีย พระราชบัญญัติการอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากร (RCRA) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานจะต้องถูกทดสอบความเป็นความเป็นพิษด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) หากผ่านการทดสอบจะจัดว่าไม่เป็นอันตรายและไม่ถูกควบคุม ทั้งนี้วิธี TCLP ได้ถูกสร้างและพัฒนาขึ้นโดยองค์กร Environmental Protection Agency (EPA) ประเทศสหรัฐอเมริกา วิธีนี้จะใช้สารละลายกรดอินทรีย์เป็นน้ำสกัด วิธีนี้ถูกออกแบบมาเพื่อทดสอบการจำลองการปนเปื้อนมลสารจากน้ำชะละลายในขยะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและเพื่อการทดสอบว่าวัสดุที่นำมาทดสอบน้ำเป็นของเสียอันตรายที่ต้องมีการควบคุมหรือการทำลายฤทธิ์ก่อนนำมาทิ้งสารละลายที่นำมาเป็นน้ำสกัดคือ Acetic Acid ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่เกิดจากสภาวะการหมักแบบไร้ออกซิเจนในสารที่มีองค์ประกอบจากสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอย ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่เกิดจากสภาวะการหมักแบบไร้ออกซิเจนที่มีองค์ประกอบจากสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอย น้ำสกัดได้จากการเติม Glacial Acetic Acid (CH_3COOH) 11.4 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 l ด้วยน้ำกลั่นจากนั้นเติม Sodium Hydroxide (Na-OH) 128.6 ml แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 2 l จะได้สารละลายที่มีค่า pH 4.93 ± 0.05 โดยตัวอย่างขยะที่ใช้จะต้องถูกลดขนาดให้เล็กกว่า 0.95 cm นำตัวอย่างมา 100 g แล้วเติมน้ำสกัด 2 l จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 18 ± 2 h แล้วนำน้ำสกัดที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรองเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 micron แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป

การจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานตามมาตรฐาน คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตประเทศไทย

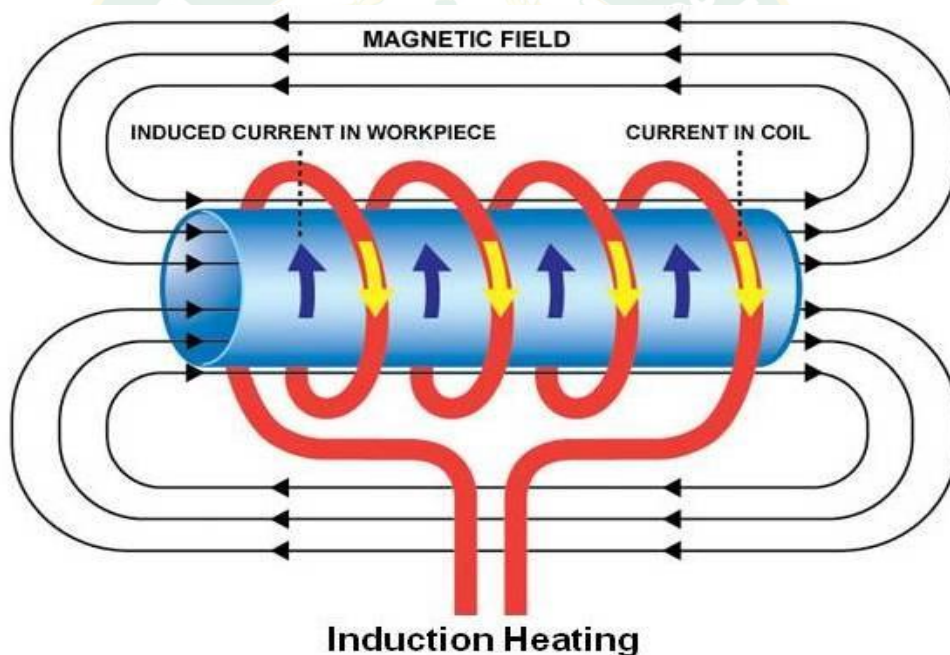
คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีมาตรการในการป้องกันแก้ไข ติดตาม และตรวจสอบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับผู้ประกอบการผลิตไฟฟ้าหลักจากพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยเทคโนโลยีแผงโฟโตโวลตาอิกหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้ระบุวิธีการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุการใช้งานตามหลัก P1.4 คือ ผู้ผลิตและผู้จำหน่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องพิจารณาเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ เกี่ยวกับการกำจัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชำรุดและหมดสภาพแล้ว พร้อมทั้งเสนอมาตรการด้านการกำจัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์อื่น ๆ ทั้งในระยะดำเนินการตลอดจนกรณีที่มีการรื้อถอนเครื่องจักรอุปกรณ์บางส่วนหรือทั้งหมดทั้งนี้ให้พิจารณาเลือกการจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling Method) ไม่ว่าจะภายในหรือภายนอกประเทศเป็นลำดับแรกหากพิจารณาเลือกวิธีอื่นให้ดำเนินการตามที่กำหนดไว้ในกฎหมายอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยใช้หลัก O2.2 และ D2.3 ระบุไว้ว่า ต้องจัดการแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ชำรุดหรือหมดอายุการใช้งานตามมาตรการที่ได้เสนอไว้ในข้อ P1.4 และสอดคล้องกับแนวทางในกรณีดังต่อไปนี้

1) กรณีส่งออกไปจัดการนอกประเทศ ต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยวัตถุอันตราย และข้อกำหนดระหว่างประเทศ ทั้งนี้เมื่อดำเนินการแล้วเสร็จให้แจ้งสำนักงานทราบภายใน 30 วัน นับจากที่มีการส่งออกไปจัดการนอกประเทศ

2) กรณีการจัดการภายในประเทศ ต้องดำเนินการฝังกลบในหลุมฝังกลบของเสียอันตราย (Secure Land Fill) หรือเผาทำลายด้วยเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย หรือจัดการโดยวิธีอื่นโดยให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยวัตถุอันตราย ทั้งนี้ให้แจ้งสำนักงานทราบเป็นประจำทุกปี (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2558)

การให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

การให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Induction Heating) เป็นการให้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การถ่ายเทพลังงานผ่านสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นในโลหะ โดยสามารถใช้กับกระบวนการให้ความร้อนลักษณะต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมโลหะ ได้แก่ การให้ความร้อนโลหะทั้งชิ้น การให้ความร้อนเฉพาะผิวโลหะ และการหลอมโลหะ การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำมีหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นโลหะเกิดจากการเสียดสีของโมเลกุลเนื่องจากความต้านทานสนามแม่เหล็กของชิ้นโลหะ (Reluctance) และเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวนจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในชิ้นโลหะ (Eddy Current)



ภาพที่ 5 การให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

ที่มา: www.ejoteroforcongress.com

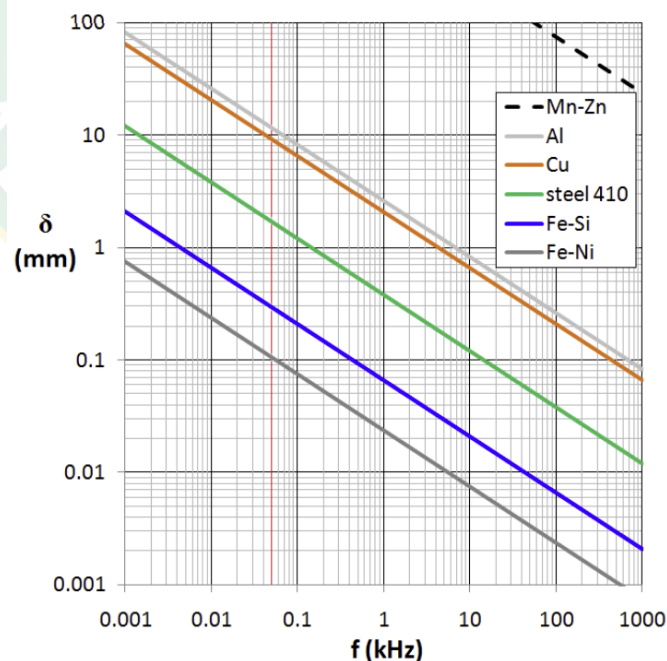
การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ เนื่องจากผลของ Skin Effect ยิ่งลึกลงไปจากพื้นผิวเท่าใด ความหนาแน่นกระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า ก็เลยยิ่งลดลงเป็นฟังก์ชันรากที่สอง (Anatoliy B. et al.,(2017)) โดยความลึกถึงตำแหน่งที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1/e$ (0.368) เท่าของความหนาแน่นที่ผิวหน้า เรียกว่า ความลึกในการทะลุทะลวงของกระแสไฟฟ้า (δ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 (Ahn C. H. et al., (2021))

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2\rho_a}{2\pi f \mu_0 \mu_R}}$$

สมการที่ 1

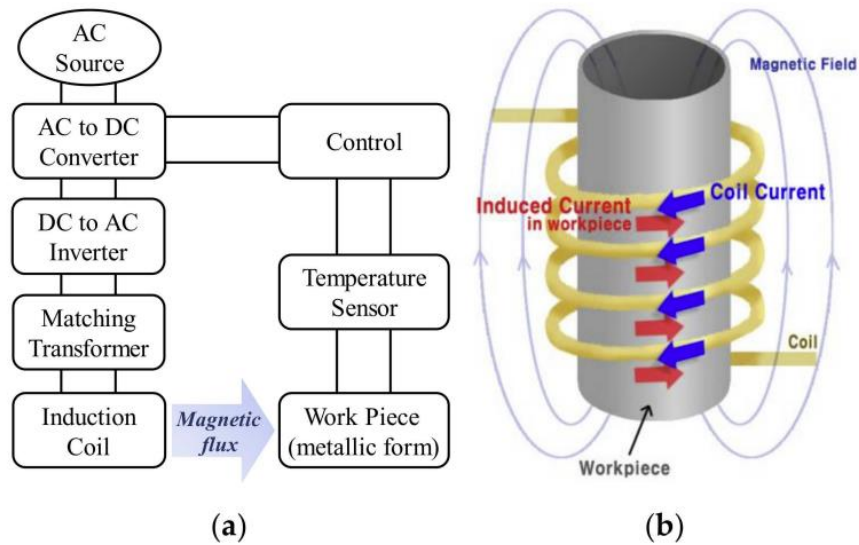
โดยที่	δ_s	คือ ความลึกในการทะลุทะลวงของกระแสไฟฟ้า (m)
	ρ_a	คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ ($\Omega \cdot m$)
	f	คือ ความถี่ (Hz)
	μ_0	คือ Permeability Constant ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)
	μ_R	คือ Relative Permeability (ประมาณ 1)

การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ จะต้องเลือกความถี่ที่เหมาะสมกับวัสดุประสงค์การให้ความร้อน วัสดุ รูปร่าง และขนาดของวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน จากสมการที่ 1 และภาพที่ 6 จะเห็นว่าความถี่ ยิ่งสูงเท่าใด ความลึกในการทะลุทะลวงของกระแสไฟฟ้าจะยิ่งน้อยลงเท่านั้น ทำให้วัตถุได้รับความร้อนแต่เฉพาะที่พื้นผิว ดังนั้นในกรณีที่ต้องการให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอถึงแก่กลางของวัสดุจึงต้องเลือกใช้ความถี่ต่ำ



ภาพที่ 6 ความลึกในการทะลุทะลวงในโลหะต่าง ๆ

ที่มา: Zurek S., (2016)



Induction heating system: (a) block diagram; (b) induction heating principle.

ภาพที่ 7 องค์ประกอบของระบบให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

ที่มา: Ahn C. H. et al. (2021)

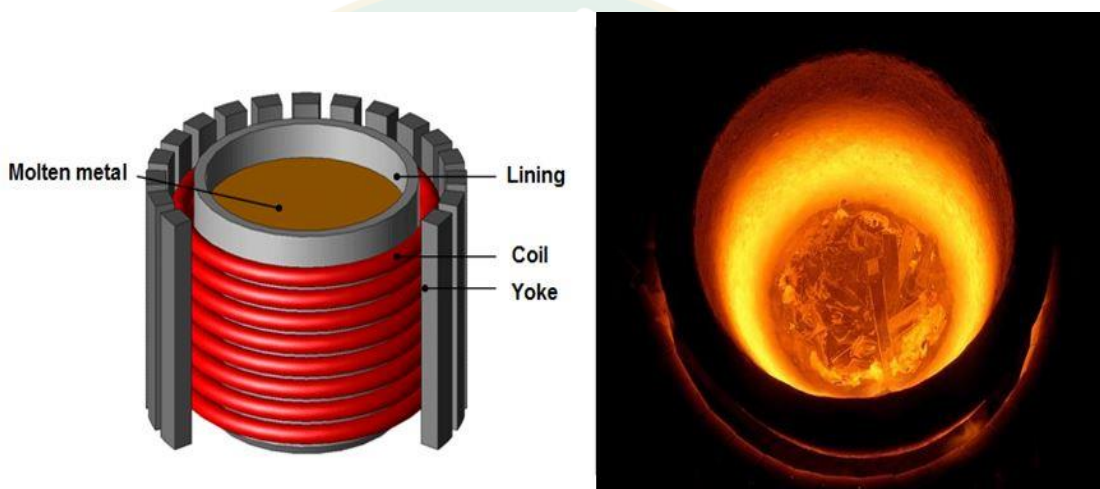
เมื่อใช้ความถี่ต่ำประสิทธิภาพจะลดลง ดังนั้น สมมติว่าจะให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอด้วยประสิทธิภาพสูงแต่วัสดุรูปแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d และให้ความลึกของการทะลุทะลวงของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ δ_s แล้ว จะกำหนดให้ d/δ_s มีค่าประมาณ 3.5-7.0 เพื่อการคำนวณกลับหาค่าความถี่ โดยความถี่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ความถี่การไฟฟ้าจนถึงระดับ kHz ซึ่งการเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะพิจารณาจากความถี่ดังต่อไปนี้

1. ความถี่ 50 - 60 Hz ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้า
2. ความถี่ 0.1-2 kHz ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์แบบไทรสเตอร์
3. ความถี่ 0.1-100 kHz ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์แบบทรานซิสเตอร์
4. ความถี่ 100-500 kHz ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบออสซิลเลเตอร์แบบหลอดสุญญากาศ

โดยทั่วไปในการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำหากใช้ความถี่ 50 - 60 Hz (ความถี่การไฟฟ้า) จะกำหนดเป็นระบบแบบความถี่ต่ำซึ่งนิยมใช้ในการหลอมโลหะเนื่องจากให้ความลึกของการทะลุทะลวงของกระแสไฟฟ้าสูงกว่าแบบความถี่สูง

เตาเหนี่ยวนำความถี่ต่ำแบบเบ้าหลอม

เตาเหนี่ยวนำความถี่ต่ำแบบเบ้าหลอม (2020) (Crucible) เตาแบบนี้จะเบ้าหลอมที่สร้างจากวัสดุทนความร้อนสูงไว้ภายในขดลวดเหนี่ยวนำ (ภาพที่ 8) เตาแบบนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีความถี่เท่ากับการไฟฟ้า เนื่องจากมีความถี่ต่ำจึงทำให้มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงได้ยาก เมื่อเริ่มทำการหลอมส่วนมากจะใช้ Starting Block หรือเหล็กละเหลวไว้ภายในเบ้าหลอมประมาณ 30% ของปริมาตรเบ้าหลอม แล้วนำวัตถุดิบเติมลงไปในเหล็กละเหลวที่เหลืออยู่เพื่อหลอมเหลวต่อไป ส่วนประกอบสำคัญของระบบให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 8 เตาเหนี่ยวนำแบบเบ้าหลอม

ที่มา: <https://ienergyguru.com>

1) ส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply) เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้มีความถี่ที่ต้องการเพื่อป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดความร้อนกับโลหะที่อยู่ภายในขดลวดนั้น ในทางปฏิบัติลักษณะงานที่แตกต่างกันก็มีความต้องการค่าความถี่และความถี่ที่สูงทำให้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง ส่วนในงานประเภทการให้ความร้อนสำหรับการชุบขึ้นรูปโลหะจะต้องการค่าความถี่ที่ค่อนข้างสูง ความถี่การทำงานจึงต่ำกว่า เป็นต้น ความถี่การทำงานและระดับกำลังขาออกของระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะขึ้นกับแหล่งกำเนิดไฟสลับที่จ่ายให้กับเครื่อง และขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร รวมทั้งแสดงความสัมพันธ์กับการประยุกต์ใช้งานในแต่ละช่วงด้วย ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในปัจจุบันจำแนกได้ดังนี้

1.1) แบบใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าโดยตรง เป็นระบบที่ใช้ความถี่จากสายส่งโดยตรง (50-60 Hz) ทั้งนี้แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะมีความถี่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่าความลึกผิวในการให้ความร้อนมีค่ามากโดยค่าความลึกผิวจะมีค่าสูงโดยจะอยู่ในช่วง 10-100 mm ระบบให้ความร้อนแบบนี้นิยมใช้ในงานหลอมโลหะขนาดใหญ่

1.2) แบบใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากชุดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนความถี่จากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ามีความถี่สูงขึ้น โดยสามารถทำความถี่ได้ในช่วง 500 Hz-10 kHz ทำให้ได้ความลึกผิวตั้งแต่ 1-10 mm ระบบให้ความร้อนแบบนี้นิยมใช้ในงานหลอมโลหะขนาดปานกลาง

1.3) แบบใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบวงจรแปลงผันแบบสารกึ่งตัวนำ โดยมีการจัดวงจรได้หลากหลายลักษณะ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ไอเอสซีอาร์ ทรานซิสเตอร์กำลัง และ Mosfet กำลังเป็นอุปกรณ์สวิตช์โดยมีย่านความถี่ตั้งแต่ 500 Hz-50 kHz การใช้งานมีหลายลักษณะ เช่น ที่ความถี่ต่ำมักจะเป็นงานหลอมโลหะ ความถี่ปานกลางสำหรับงานชุบขึ้นรูปโลหะ ความถี่สูงสำหรับงานชุบแข็งผิว เป็นต้น

1.4) แบบใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุ 50 kHz-10 MHz ใช้กับค่าความลึกผิวในช่วง 0.1-2.0 mm ระบบให้ความร้อนแบบนี้จะให้กำลังค่อนข้างต่ำเนื่องจากทำงานในย่านความถี่สูงเหมาะใช้ในงานเชื่อมประสานและการชุบผิวแข็ง

2) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) สร้างจากโลหะที่ขึ้นรูปเป็นลักษณะขดกันหอย เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่จุดศูนย์กลางของขดลวด โดยเมื่อติดตั้งโลหะที่จุดดังกล่าวจะเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นที่โลหะนั้น ๆ และเนื่องจากกระแสที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำมักจะมีปริมาณที่สูงมาก จึงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดลวดเหนี่ยวนำ รูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำจะแตกต่างกันตามลักษณะของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำในชิ้นงานโลหะเกิดจากองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

2.1) การเกิดความร้อนจากกระแสไหลวนในชิ้นโลหะ สนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กในชิ้นโลหะทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนโดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับ Eddy Currents ที่เกิดขึ้นในโลหะที่ถูกเหนี่ยวนำจะเป็นไปตามสมการที่ 2 (Ahn C. H. et al., 2021)

$$P = H^2 \cdot \sqrt{\mu f} \sqrt{10\rho_a} \cdot l \cdot S \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดยที่	P	คือ กำลังไฟฟ้า (W)
	H	คือ แรงแม่เหล็ก (Magnetizing Force) (A/m)
	μ	คือ Permeability Constant (H/m)
	f	คือ ความถี่ (Hz)
	ρ_a	คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ ($\Omega \cdot m$)
	l	คือ ความยาวของลวดตัวนำ (m)
	s	คือ Shape Factor ของลวดตัวนำ

2.2) การเกิดความร้อนจากความต้านทานของสนามแม่เหล็กสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดเหนี่ยวนำจะมีทิศทางของขั้วที่สลับไปมาตามทิศทางของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งโมเลกุลภายในของโลหะจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของขั้วที่เปลี่ยนไปมาทำให้เกิดการเสียดสีและเกิดความร้อน อย่างไรก็ตามการเกิดความร้อนจากความต้านทานของสนามแม่เหล็กจะเกิดเฉพาะโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเท่านั้น

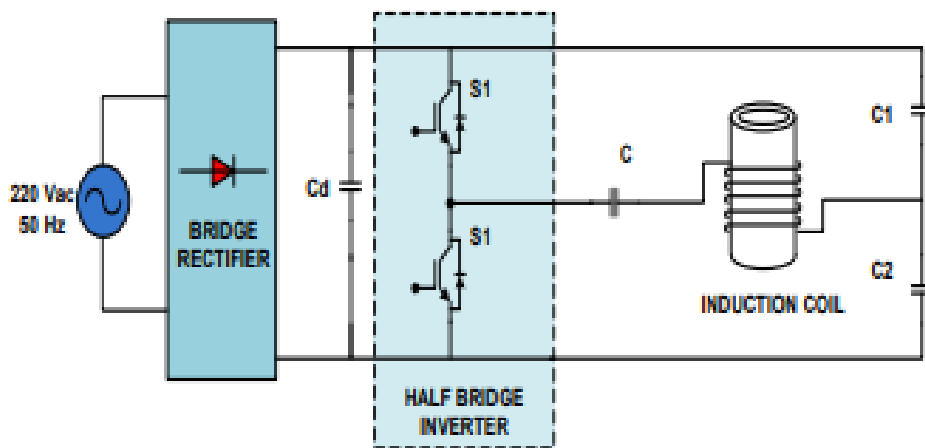
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนในแบบต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Mokhter K. et al. (1998) ศึกษาการทำงานของวงจร Half-Bridge Inverter ร่วมกับ IGBT กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 Phase กำลังไฟฟ้าสูงสุด 6 kW ด้วยการต่อวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance) แบบขนาน จากผลการทดสอบพบว่าการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถปรับค่าความถี่ใช้งานได้ในช่วง 50 Hz - 150 kHz ซึ่งครอบคลุมการใช้งานทั้งด้านการให้ความร้อนที่ผิวหรือการชุบแข็งโลหะและการหลอมโลหะ

Khan I. et al. (1996) ศึกษาการนำเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำแบบใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ Full-Bridge Inverter ร่วมกับ Mosfet ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 100 kHz กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 Phase กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 kW จากผลการทดสอบพบว่าการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถหลอมทองคำน้ำหนัก 100 g ได้ในเวลา 25 s

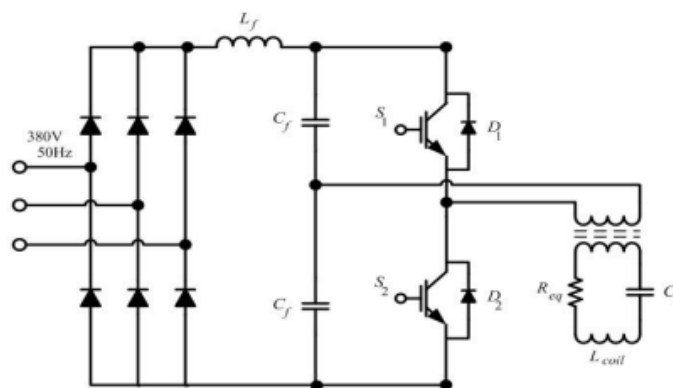
จิระศักดิ์ วงศา และคณะ (2555) ได้ประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับเครื่องหลอมพลาสติกในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก โดยทำการเปลี่ยนขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดเป็นขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนที่ดีกว่าขดลวดความร้อน (Electric Heater) เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นกับบาริลโดยตรง และทำการทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายการไฟฟ้า (AC 1 Phase 220 V 50 Hz) โดยทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แล้วทำการสับสวิตซ์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงด้วยวงจร Half-Bridge Inverter เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำกับกระบอกลอม ความร้อนจะเกิดขึ้นที่กระบอกลอมและถ่ายเทให้กับพลาสติก จากผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิของกระบอกลอมเพิ่มขึ้นจาก 30 °C เป็น 250 °C โดยใช้เวลา 18 min ที่กระแสไฟฟ้าจ่ายเท่ากับ 20.45 A และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.97 คิดเป็นกำลังไฟฟ้าจ่ายได้ 4.36 kW ซึ่งใช้เวลาในการทำความร้อนน้อยกว่าขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดที่พิกัดกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และสามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้ถึง 0.93 kWh



ภาพที่ 9 วงจรพื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน

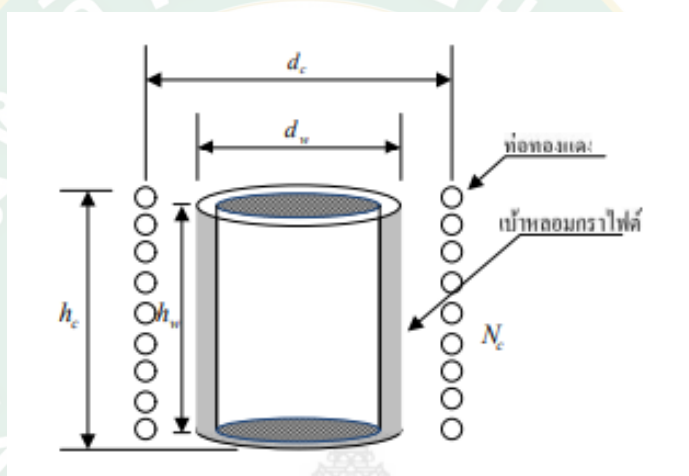
ที่มา: จีระศักดิ์ วงศา และคณะ (2555)

สายชล ชุตเจ็จัน (2554) ศึกษาเตาหลอมหลอมทองเหลืองด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า โดยระบบนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 Phase 380 V 50 Hz กำลังไฟฟ้าสูงสุด 4.5 kW ผ่าน วงจรเรียงกระแสเพื่อปรับให้เป็นแรงดันกระแสตรง (DC) แล้วส่งต่อไปกับ Half-Bridge Inverter เพื่อปรับให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ประมาณ 35 kHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) ของทองเหลือง โดยจากผลการทดลองพบว่าระบบที่ทำงานด้วยความถี่ที่ ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุที่จะหลอมเหลวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าความถี่อื่น ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ คงศักดิ์ รัตน์นิยมชัย และสำราญ สันทาลุนัย (2545) ที่ศึกษาการออกแบบ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full-Bridge โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 60 V ใช้ความถี่ในช่วง 20-50 kHz ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลวนขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำ กับขึ้นงานพบว่าที่ความถี่ดังกล่าวซึ่งใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุที่ใช้ในการหลอมละลายจะ ส่งผลต่อการส่งผ่านพลังงานได้มากที่สุดและใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเร็วขึ้น



ภาพที่ 10 วงจรเตาหลอมทองเหลืองแบบเหนี่ยวนำ

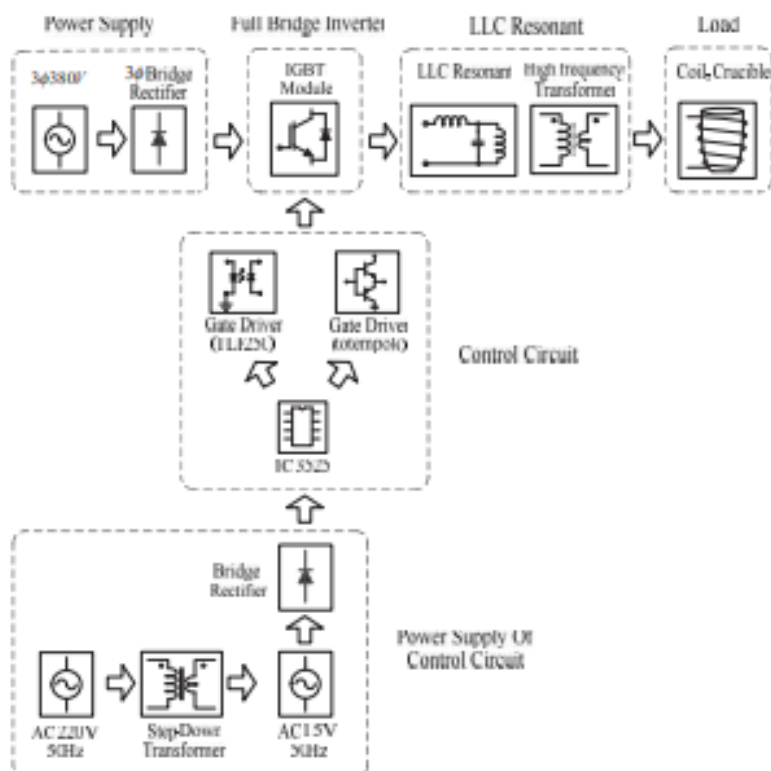
ที่มา: สายชล ชุตเจื้อจัน (2554)



ภาพที่ 11 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง

ที่มา: สายชล ชุตเจื้อจัน (2554)

กฤษฎา ทองงาม (2559) ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยความถี่สูงกับชิ้นงานโลหะด้วยเครื่องเหนี่ยวนำต้นแบบที่ใช้วงจรเรียงกระแสบริดจ์ (Bridge Rectifier) เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (AC to DC) หลังจากนั้นจะเข้าสู่ Inverter เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งแต่มีความถี่สูงขึ้นโดยควบคุมการสวิตช์โดยใช้สัญญาณจากไอซี KA3525A ในการควบคุมความถี่ในการสวิตช์และส่งกำลังผ่านระบบ Resonance แบบ LLC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรไปสู่ขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้กับเบ้าหลอมชนิดกราไฟท์ (Graphite) โดยเมื่อเบ้าหลอมเกิดความร้อนจะถ่ายเทไปยังโลหะที่บรรจุไว้ภายในจนทำให้เกิดการหลอมละลาย จากผลการทดลองหลอมโลหะชนิดสแตนเลสน้ำหนัก 8 kg ด้วยความถี่ 30 kHz พบว่าระบบสามารถหลอมละลายโลหะดังกล่าวได้ด้วยประสิทธิภาพสูงถึง 97%



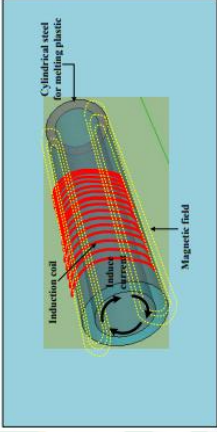
ภาพที่ 12 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง
ที่มา: กฤษฎา ทองงาม (2557)

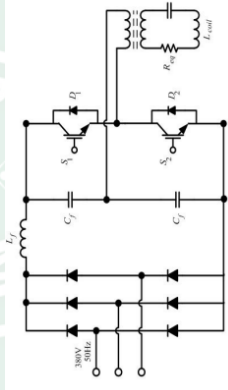
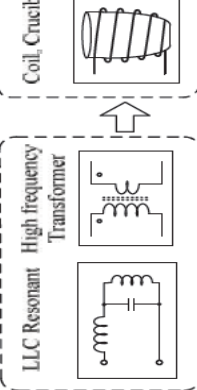
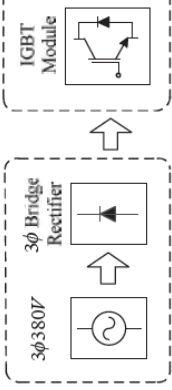
ไพบุลย์ บุปผา (2545) ศึกษาเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงอย่างง่าย สำหรับเหล็กผสมคาร์บอนทรงกระบอก เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้สามารถปรีมารการให้ความร้อนได้ด้วยการควบคุมความถี่ โดยระบบนี้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 220 V ความถี่ 50 Hz ให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสู่ขดลวดเหนี่ยวนำในช่วง 0.5-1.0 kW ที่ช่วงความถี่ 20-48 kHz สามารถใช้ได้กับชิ้นงานลักษณะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานไม่เกิน 1.5 cm

ศักดา พรหมเหมือน และสงพงษ์ ศรีรัตน์ (2553) ศึกษาเครื่องหลอมอลูมิเนียมด้วยหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยวงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 Phase วงจรเรียงกระแสแบบ Diode Bridge Rectifier และวงจร Full-Bridge Inverter แบบเรโซแนนท์ชนิด RLC อนุกรม ซึ่งวงจรจะมีค่าความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ 84 kHz และวัสดุทดสอบเป็นอลูมิเนียมขนาด 100 g ทดสอบโดยปรับค่าความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์ในช่วง 86-96 kHz ผลที่ได้กระแสต้านออกวงจรจะมีค่าอยู่ในช่วง 7.22-4.75 A และเวลาที่ใช้ในการหลอมอยู่ในช่วง 9-13 min

การตรวจเอกสาร

ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การออกแบบเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	การใช้เทคนิคหลอม	วัสดุที่หลอม	สาระสำคัญ
จิระศักดิ์ วงศา และคณะ (2555)	การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับเครื่องหลอมพลาสติก	แบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน 	พลาสติก	พบว่าอุณหภูมิของกระบอกหลอมเพิ่มขึ้นจาก 30 °C เป็น 250 °C โดยใช้เวลา 18 min ที่กระแสไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับ 20.45 A และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.97 คิดเป็นกำลังไฟฟ้าอินพุตได้ 4.364 kW ซึ่งใช้เวลาในการทำความร้อนได้เร็วกว่าชุดลดความร้อนแบบเข็มขัดที่พิกัดกำลังไฟฟ้าอินพุตขนาดใกล้เคียงกัน โดยสามารถลดการใช้กำลังไฟฟ้าได้ถึง 0.93 kWh

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	การใช้เทคนิคทดลอง	วัสดุที่ทดลอง	สาระสำคัญ
สายชล ชูตเจ็อจัน และคณะ (2554)	เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์สำหรับหลอมทองเหลือง	อินเวอร์เตอร์ เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์ 	ทองเหลือง	พบว่าการทำงานที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ทำให้สามารถให้ความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีการทำงานของสวิตช์นำกระแสสลับที่แรงดันเป็นศูนย์ทำให้การสูญเสียพลังงานที่สวิตช์น้อยลง
กฤษฎา ทองงาม และคณะ (2014)	เครื่องหลอมสแตนเลสแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	แบบเหนี่ยวนำความถี่สูง LLC Resonant High frequency Transformer 	สแตนเลส	เครื่องต้นแบบนี้ออกแบบให้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 3 Phase 380 V ภายในเครื่องประกอบด้วย Bridge Rectifier เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
ศักดา พรหมเหมื่อน และสมพงษ์ ศรีลัด (2553)	เครื่องหลอมอลูมิเนียมด้วยหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูง	แบบเหนี่ยวนำความถี่สูง 3φ 380V 3φ Bridge Rectifier IGBT Module 	อลูมิเนียม	พบว่าค่าความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์ในช่วง 86-96 kHz ผลที่ได้กระแสต้านทางออกวงจรจะมีค่าอยู่ในช่วง 7.22-4.75 A และเวลาที่ใช้ในการหลอมอยู่ในช่วง 9-13 min

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	การใช้เทคนิคทดลอง	วัสดุที่ทดลอง	สาระสำคัญ
ไพบูลย์ บุบผา และคณะ (2545)	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงอย่างง่าย สำหรับเหล็กผสมคาร์บอน	แบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	เหล็กคาร์บอน	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถปรับปริมาณความร้อนได้ด้วยอัตราการควบคุมความถี่ ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าเข้า 220 V ความถี่ 50 Hz กำลังไฟฟ้าต้านขาเข้าอยู่ในช่วง 0.5-1.0 kW ที่ช่วงความถี่ 20-48 kHz เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานไม่เกิน 1.5 cm

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ขนาด 4.5 kW ที่เดิมใช้ในกระบวนการชุบแข็งโลหะ โดยเครื่องดังกล่าวติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (Coil Diameter; CD) เท่ากับ 1.8 in (45.72 mm) และมีความสูงของขดลวด (Coil Height; CH) เท่ากับ 4.0 in (101.6 mm) สามารถให้ความร้อนกับเหล็กได้จนถึงจุดหลอมเหลว แต่เนื่องจากเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้ถูกออกแบบให้ใช้ในการชุบแข็งโลหะซึ่งการใช้งานเพียงนำแท่งโลหะเข้าไปวางที่กึ่งกลางของขดลวดจากนั้นเครื่องจากให้ความร้อนกับโลหะนั้นเพียงถึงจุดหลอมเหลวแล้วจะหยุดทำงาน จากข้อจำกัดดังกล่าวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำจึงทำให้เครื่องนี้ไม่สามารถติดตั้งเข้าหลอม (Crucible) ขนาดมาตรฐานสำหรับการหลอมโลหะที่มีขายในท้องตลาด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกตั้งแต่ 47 mm ขึ้นไป) ได้ ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาระบบดังกล่าวเพื่อให้สามารถใช้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางได้อย่างต่อเนื่อง โดยวิธีการดำเนินงานของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่อพ่วงสำหรับเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ขนาด 4.5 kW อันได้แก่ 1) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) 2) ระบบระบายความร้อน (Cooling System) และ 3) อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ (Hopper)

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคหลอมละลายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน

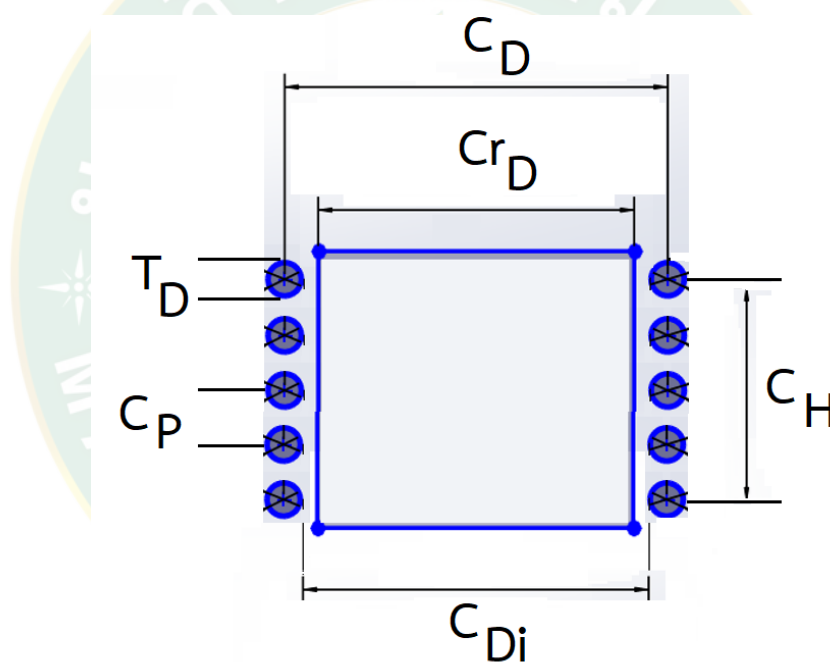
ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่ 1) อัตราการหลอมละลาย (Melting Rate) 2) ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (Electric Power Consumption) 3) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) 4) ค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Strength of Material) และ 5) ต้นทุนการแปรสภาพ

โดยแต่ละขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่อพ่วงสำหรับเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ขนาด 4.5 kW

1) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) และเบ้าหลอม (Crucible)

ขดลวดเหนี่ยวนำมีหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำและทำให้โลหะที่ติดตั้งไว้บริเวณแกนกลางของขดลวดมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดการหลอมละลาย จากข้อมูลด้านการหลอมโลหะด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าระดับอุตสาหกรรมพบว่าลวดนิยมนำมาสร้างจากโลหะทองแดง เนื่องจากมีสมบัติตามการนำไฟฟ้าที่ดี และสามารถดัดขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างจากวัสดุชนิดดังกล่าว ทั้งนี้มิติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญต่อการออกแบบแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 มิติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญต่อการออกแบบ

จากภาพที่ 13 มิติของขดลวดเหนี่ยวนำที่สำคัญต่อการออกแบบ ประกอบด้วย

- 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (Coil Diameter; C_D) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่วัดจากจุดกึ่งกลางของท่อทองแดงที่ขดเป็นวงกลมเมื่อมองจาก Top View
- 2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (Coil Diameter; C_{Di}) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่วัดจากผิวด้านในของท่อทองแดงที่ขดเป็นวงกลมเมื่อมองจาก Top View
- 3) ความสูงของขดลวด (Coil Height; C_H) คือ ความสูงของขดลวดที่วัดจากจุดกึ่งกลางของท่อทองแดงเส้นบนสุดถึงเส้นล่างสุดเมื่อมองจาก Side View

4) ระยะห่างของขดลวด (Coil Pitch; C_p) คือ ระยะที่วัดจากจุดกึ่งกลางของท่อทองแดงถึงจุดกึ่งกลางของท่อทองแดงขดถัดไปเมื่อมองจาก Side View

5) จำนวนรอบในการขด (Number of Turn; N) คือ จำนวนรอบของขดลวดที่ขดจนครบรอบวงกลม

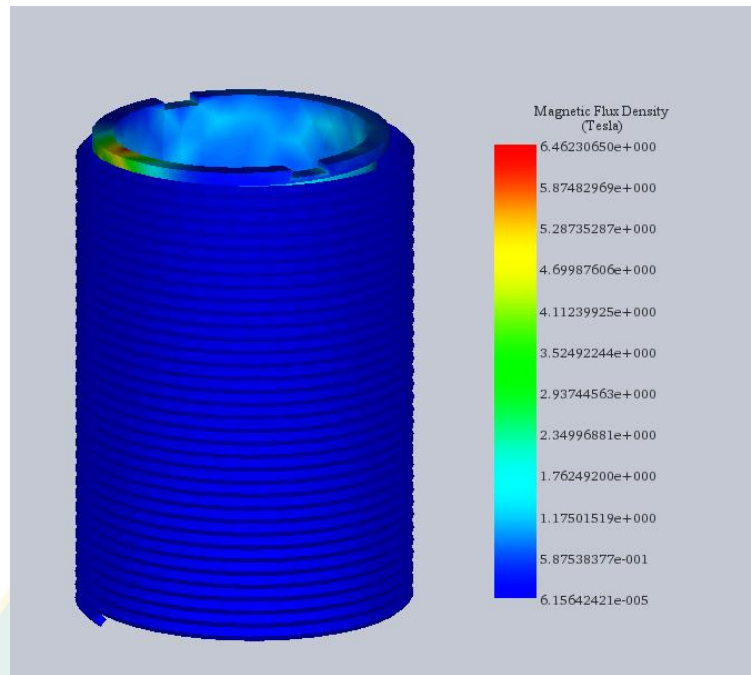
6) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (Tube Diameter; T_D) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดงที่ใช้สร้างขดลวดเหนี่ยวนำ

7) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้าหลอม (Crucible Diameter; C_r) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเบ้าหลอม

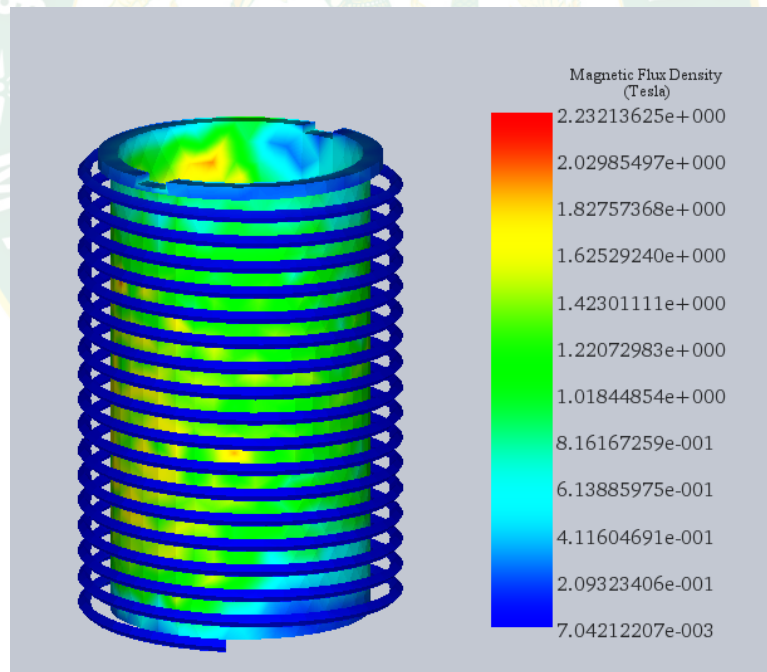
เมื่อทราบข้อมูลด้านขนาด มิติ และระยะต่าง ๆ ที่สำคัญในการออกแบบ ผู้วิจัยจึงทำการจำลองการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสิ้น 3 แบบ โดยกำหนดให้ขดลวดเหนี่ยวนำทั้งหมดสร้างจากท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Tube Diameter; T_D) เท่ากัน ขึ้นรูปให้เป็นขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (Coil Diameter; C_D) และความสูงของขดลวด (Coil Height; C_H) เท่ากัน โดยปรับเปลี่ยนระยะห่างของขดลวด (Coil Pitch; C_P) และจำนวนรอบในการขด (Number of Turn; N) ให้แตกต่างกัน 3 ค่า ดังตารางที่ 1 แล้วจำลองการทำงานด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า (I) และความถี่ (f) ของ Input ที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 แบบให้มีค่าเท่ากันเท่ากับ 380 V 10 A และ 50 Hz ตามลำดับ จนได้ผลการจำลองการทำงานของขดลวดดังกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 14-16

ตารางที่ 2 ขนาด มิติ และระยะต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

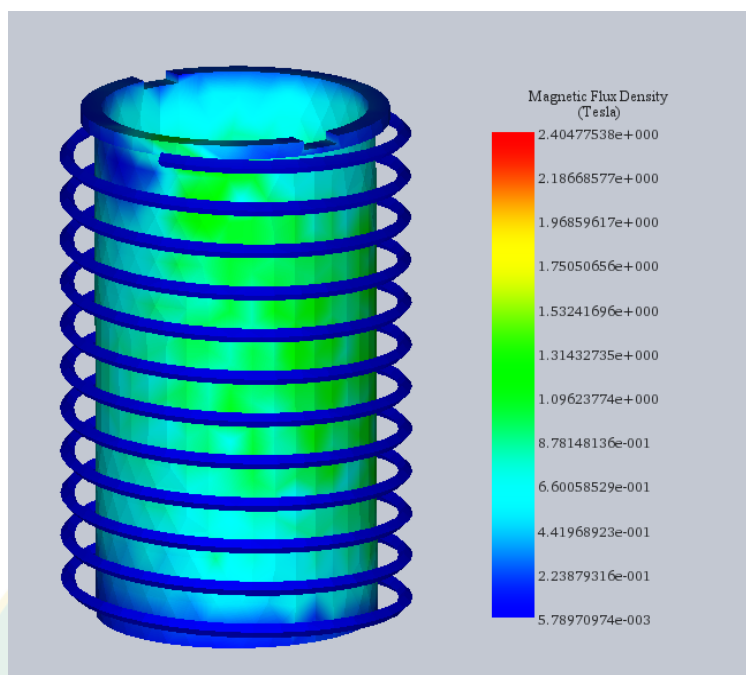
Coil Parameters	A	B	C
Tube diameter (T_D)	5 mm	5 mm	5 mm
Coil diameter (C_D)	120 mm	120 mm	120 mm
Coil Height (C_H)	175 mm	175 mm	175 mm
Coil Pitch; (C_P)	0	5	10
Number of turn (N)	35	18	12



ภาพที่ 14 ผลการจำลองการทำงานของขดลวดแบบ A



ภาพที่ 15 ผลการจำลองการทำงานของขดลวดแบบ B

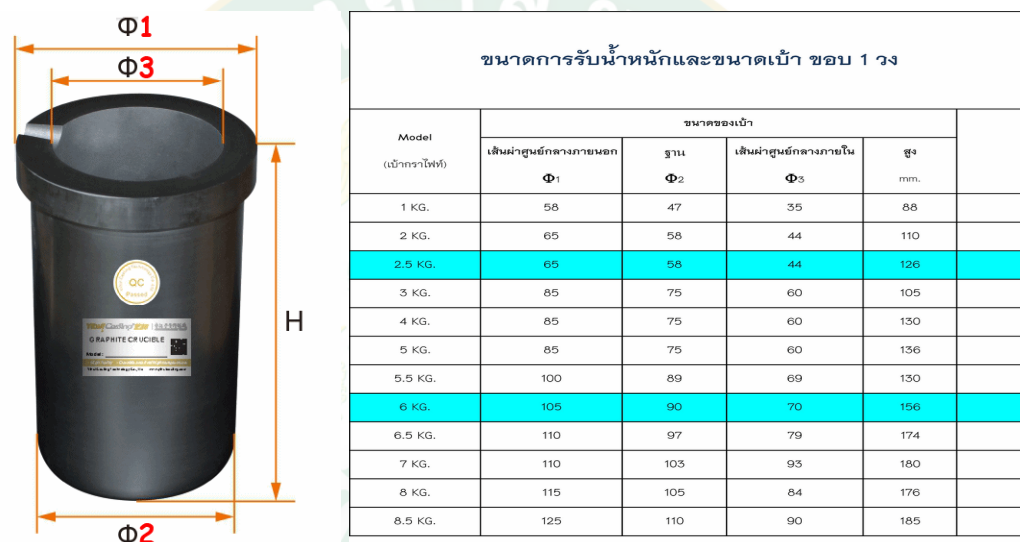


ภาพที่ 16 ผลการจำลองการทำงานของขดลวดแบบ C

จากภาพที่ 14-16 จะเห็นได้ว่าขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างจากวัสดุชนิดเดียวกันและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (T_D) เท่ากัน หากนำมาขึ้นรูปให้เป็นขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (C_D) และความสูงของขดลวด (C_H) เท่ากัน ขดลวดที่มีระยะห่างของขดลวด (C_P) น้อยกว่าจะมีจำนวนรอบในการขด (N) มากกว่า โดยจำนวนขดดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อการเหนี่ยวนำไฟฟ้า กล่าวคือขดลวดเหนี่ยวนำที่มีจำนวนขดมากกว่าจะให้ค่า Magnetic Flux Density สูงกว่าขดลวดเหนี่ยวนำที่มีจำนวนขดน้อยกว่า ทำให้ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ A (ภาพที่ 14) สามารถสร้างความร้อนให้กับโลหะได้ดีกว่าแบบที่มีระยะห่างของขดลวดมากกว่าแบบ B และ C (ภาพที่ 15 และ 16) จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงทำการออกแบบและสร้างขดลวดเหนี่ยวนำให้มีระยะห่างของขดลวดไม่เกิน 1 mm เพื่อให้ท่อทองแดงที่ใช้ขึ้นรูปเป็นขดลวดเหนี่ยวนำสามารถการขยายตัวได้ 10% เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูง

เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อน โดยภายในท่อทองแดงจะต้องมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่านด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสม จากหลักวิศวกรรมด้านกลศาสตร์ของไหลการเลือกใช้ท่อทองแดงท่อทองแดงขนาด 5 mm ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กเกินไปทำให้น้ำระบายความร้อนที่ไหลอยู่ในท่อดังกล่าวด้วยอัตราการไหล 5 l/min เกิดความดันตกคร่อมสูง (รายละเอียดการคำนวณอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นแสดงในขั้นตอนต่อไป) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยได้เลือกใช้ท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (T_D) เท่ากับ 10 mm หนา 0.5 mm ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่มีขายในท้องตลาด และทำการออกแบบขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำโดยอ้างอิงจากขนาด

ของเบ้าหลอม (Crucible) มาตรฐานที่มีขายในท้องตลาด ทั้งนี้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการสืบค้นข้อมูลด้านการหลอมโลหะด้วยเทคนิคเหนียวนำทางไฟฟ้าระดับอุตสาหกรรมพบว่าเบ้าหลอมที่ใช้กับเทคนิคจะต้องมีสมบัติด้านการนำไฟฟ้าและสามารถทนความร้อนสูงได้ ทั้งนี้เบ้าหลอมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจะสร้างจากวัสดุแกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งปัจจุบันมีผู้ผลิตออกมาจำหน่ายหลากหลายขนาดและรูปแบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เบ้าหลอมชนิดแกรไฟต์ขนาดมาตรฐานที่มีขายในท้องตลาด (ภาพที่ 17) เพื่อลดต้นทุนในการสร้าง และสะดวกต่อการซ่อมบำรุงกรณีเบ้าหลอมเกิดการเสียหาย ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้เบ้าหลอมแกรไฟต์ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ภายใน และความสูงเท่ากับ 90 mm 70 mm และ 156 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 17 ขนาดเบ้าหลอมชนิดแกรไฟต์มาตรฐานที่มีขายในท้องตลาด

จากเหตุผลด้านมิติและขนาดของเบ้าหลอมดังกล่าวข้างต้นส่งผลให้การออกแบบขดลวดเหนียวนำในงานวิจัยนี้ต้องอ้างอิงจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเบ้าหลอม (C_D) เนื่องจากจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ในขดลวดเหนียวนำ อีกทั้งเมื่อระบบทำงานเบ้าหลอมและขดลวดเหนียวนำจะเกิดจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเผื่อค่าความปลอดภัย (Factor of Safety; SF) ที่ 10% สำหรับขนาดที่เพิ่มขึ้นของทั้งสองอุปกรณ์ กล่าวคือ ขดลวดเหนียวนำที่ขยายตัวแล้วจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ระยะ C_{D_i} ในภาพที่ 15) ไม่ต่ำกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเบ้าหลอม (C_D) ที่ขยายตัวแล้ว (จาก 90 mm เป็น 99 mm ที่ค่า SF = 10%) ดังนั้นขดลวดเหนียวนำที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้จึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (C_D) ความสูงของขดลวด (C_H) และระยะห่างของขดลวด (C_p) เท่ากับ 120 mm 160 mm และ 5 mm ตามลำดับ (ภาพที่ 18) ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเบ้าหลอม

ขนาดมาตรฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความสูงเท่ากับ 90 mm (เพื่อการขยายตัวเป็น 99 mm) และ 156 mm ตามลำดับ ได้ที่ค่าความปลอดภัย (SF) ด้านการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion) ที่ 10%



ภาพที่ 18 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

2) ระบบระบายความร้อน (Cooling System)

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 4.5 kW แต่เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงระบบดังกล่าวที่ออกแบบมาเพื่อการชุบแข็งโลหะที่มีการทำงานเป็นลักษณะ Batch ให้ทำงานได้แบบต่อเนื่อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำโดยทำการเผื่อค่าความปลอดภัย (Factor of Safety; SF) ที่ 200% ทำให้ได้ภาระความร้อนที่ต้องระบายเท่ากับ 9.0 kW แล้วทำการคำนวณด้วยสมการที่ 3

$$Q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})$$

สมการที่ 3

โดยที่	Q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	\dot{m}	คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)
	c_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (J/kg.°C)
	T_{in}	คือ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทางเข้า (°C)
	T_{out}	คือ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทางออก (°C)

จากสมการที่ 3 เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิน้ำทางเข้าขดลวดเหนี่ยวนำ (T_{in}) มีค่าเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิน้ำทางออก (T_{out}) ไม่เกิน $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (เพื่อไม่ให้เกิดการเดือดของน้ำ) และใช้สมมติฐานในการออกแบบลักษณะ Worst-Case Scenario กล่าวคือ การออกแบบโดยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิน้ำทางเข้า (@ $T_{in} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_p = 4,178\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิทางออกของสารทำงาน (@ $T_{out} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_p = 4,185\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) จะทำให้ได้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่คำนวณได้สูงที่สุด โดยจากการคำนวณด้วยสมมติฐานดังกล่าวพบว่าระบบระบายความร้อนสำหรับขดลวดเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ต้องการน้ำระบายความร้อนที่มีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.07 kg/s หรือ 4.31 L/min โดยในงานวิจัยนี้ได้ปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเท่ากับ 5.00 L/min เพื่อลดการสึกหรอของระบบเนื่องจากความร้อนสะสม

3) อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ (Hopper)

อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ (ภาพที่ 19) มีหน้าที่ป้อนตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเตรียมแล้วลงสู่เข้าหลอมที่ติดตั้งไว้กับขดลวดเหนี่ยวนำภายในห้องหลอม (ภาพที่ 20) อุปกรณ์นี้มีลักษณะเป็นกรวย สร้างจากวัสดุสแตนเลสเกรด 304 โดยกรวยป้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากกรวยเท่ากับ 100 mm มีความสูงเท่ากับ 15 cm ด้านบนของกรวยป้อนจะมีฝาปิดเพื่อป้องกันอันตรายจากความร้อนและป้องกันไม่ให้ก๊าซที่เกิดจากการหลอมละลายองค์ประกอบที่เป็นพลาสติก เล็ดลอดออกมาขณะดำเนินการกระบวนการแปรสภาพ ด้านล่างของกรวยมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 mm มีหน้าที่ป้อนขยะสู่เข้าหลอมอย่างต่อเนื่อง



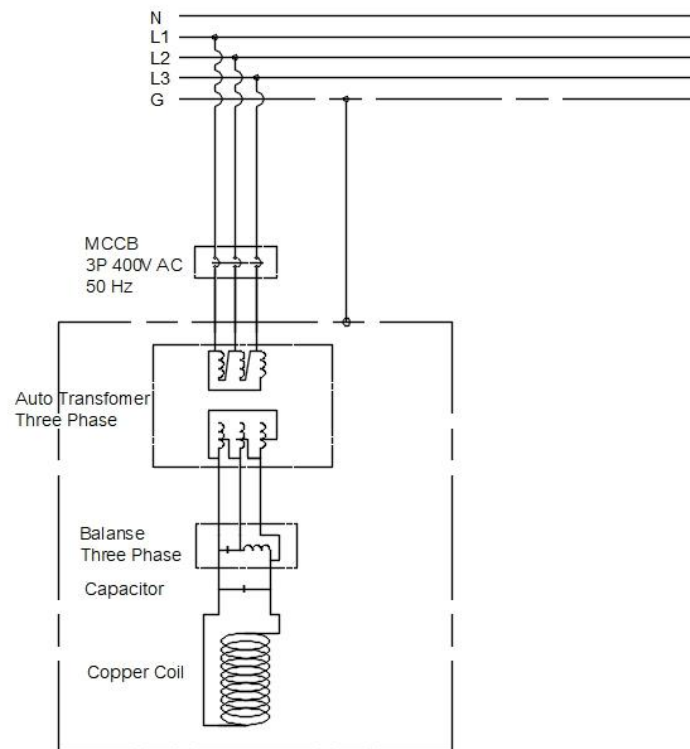
ภาพที่ 19 อุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ



ภาพที่ 20 การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันอุบัติเหตุที่ด้านบนของห้องหลอม

4) ระบบไฟฟ้าและควบคุม

เครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 3Phase 380 V 50Hz สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 4.5 kW การควบคุมความถี่ในการสวิตช์และส่งกำลังใช้ระบบ Residence แบบ LLC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรไปสู่ขดลวดเหนี่ยวนำ โดยวงจรไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ระบบไฟฟ้าและควบคุม

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคหลอมละลาย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะทำการศึกษาการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell) ที่ผ่านการใช้งานและเกิดการชำรุดเนื่องจากการแตกหัก เสื่อมสภาพจนมีประสิทธิภาพต่ำหรือไม่คุ้มค่าที่จะใช้งานต่อไปเป็นตัวแทนของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

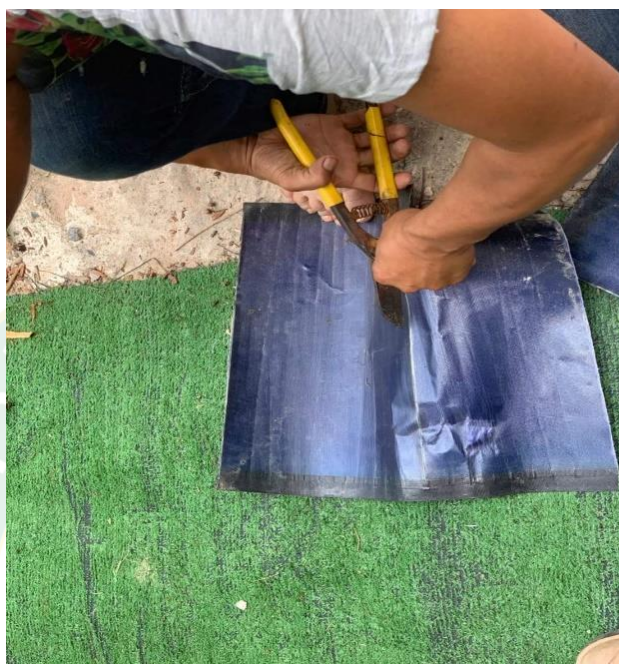
การเตรียมตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1) ทำการแยกกระจกออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ชำรุดจะได้เป็นแผ่นฟิล์มที่มีองค์ประกอบของโลหะและโลหะกลุ่ม Cadmium Telluride (CdTe) Copper Indium Gallium Di Selenide (CIGS) และ Amorphous Silicon (A-Si) ซึ่งถูกฉาบประสานกันเป็นชั้นหลายชั้น โดยแต่ละชั้นของแผ่นฟิล์มไม่สามารถแยกออกจากกันได้ด้วยวิธีทางกายภาพ แต่แผ่นฟิล์มบางดังกล่าวสามารถแยกออกจากกระจกได้ (ภาพที่ 22) โดยพบว่าแผ่นฟิล์มบางที่ลอกออกจากกระจกมีน้ำหนักโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1,000 g ต่อพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางขนาด 1 m² ซึ่งแผ่นฟิล์มนี้จะมีองค์ประกอบของพลาสติกและโลหะที่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ด้วยวิธีทางกายภาพเป็นเหตุให้การจัดการขยะชนิดนี้ด้วยการหลอมละลายเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งนอกเหนือจากการจัดการด้วยเคมีที่จะเกิดสารตกค้างและการเผาอันก่อให้เกิดมลพิษจากสารประกอบได้อีกขึ้นจากการเผาไหม้พลาสติก

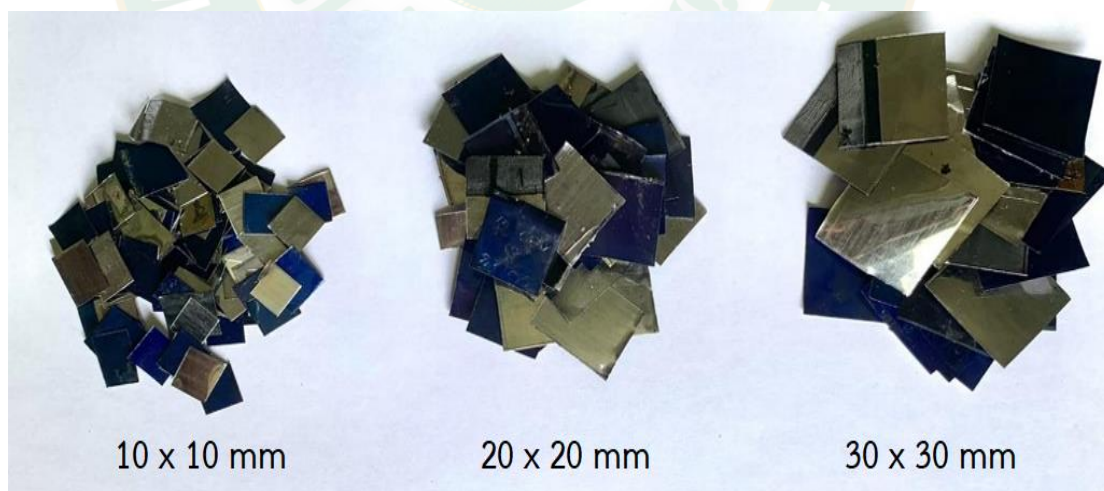


ภาพที่ 22 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่แยกออกจากกระจกแล้ว

2) ทำการตัดแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อ 1) (ภาพที่ 23) ให้มีขนาดโดยประมาณ 10 x 10 mm 20 x 20 mm และ 30 x 30 mm ตามลำดับ (ภาพที่ 24) จากนั้นนำตัวอย่างขยะแต่ละขนาดไปบรรจุในช่องป้อนวัตถุดิบของเครื่อง (ภาพที่ 25)



ภาพที่ 23 การตัดเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง



ภาพที่ 24 การเตรียมตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง



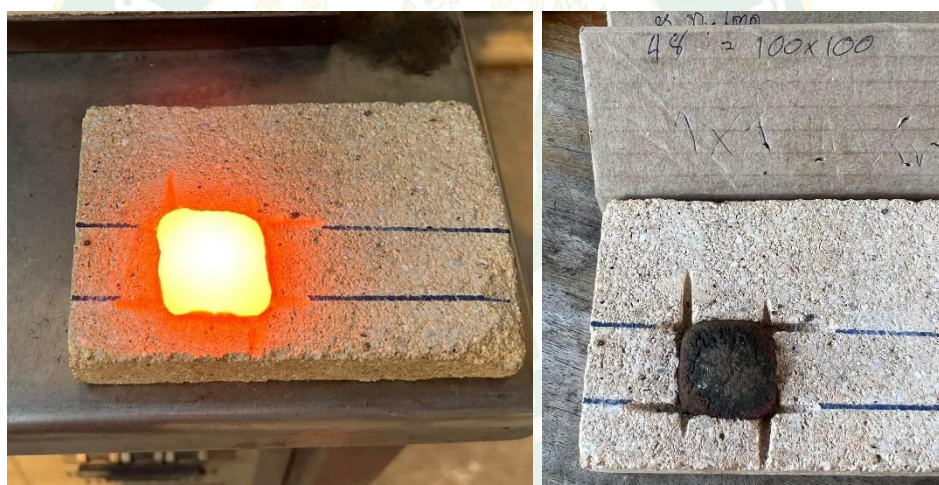
ภาพที่ 25 การบรรจุตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางในอุปกรณ์ป้อนวัตถุดิบ

3) ทำการทดลองแปรสภาพตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละขนาดด้วยการหลอมละลายโดยในงานวิจัยนี้จะทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับตัวอย่างแต่ละขนาดทั้งสิ้น 3 ค่า โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ 60% 70% และ 80% ของพิกัดกำลังไฟฟ้า 4.5 kW เนื่องจากต้องการให้เครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดปัญหา Over Heat ในส่วนของวงจรไฟฟ้า ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 2.70 kW 3.15 kW และ 3.60 kW ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละขนาด

4) ทำการจับเวลาและวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มกระบวนการแปรสภาพจนกระทั่งตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลอมละลาย (ภาพที่ 26) แล้วหยดลงจนเต็มแม่พิมพ์ 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 10 x 10 mm 20 x 20 mm และ 30 x 30 mm โดยทุกแบบมีความลึกเท่ากับ 10 mm ตามลำดับ จากนั้นรอให้ตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลอมละลายเย็นตัวแล้วนำไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก (ภาพที่ 27)



ภาพที่ 26 การแปรสภาพตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง



ภาพที่ 27 ขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่แปรสภาพแล้วในแม่พิมพ์

5) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ในการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มด้วยระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นดังต่อไปนี้

1) อัตราการหลอมละลาย (Malting Rate) คือ ปริมาณของขยะที่หลอมละลายได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาสามารถคำนวณจากสมการที่ 4

$$\dot{m}_{product} = m_{product}/t \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดยที่	$\dot{m}_{product}$	คือ อัตราการหลอมละลาย (Malting Rate) (kg/h)
	$m_{product}$	คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่หลอมละลาย (kg)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการหลอมละลาย (h)

2) ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (Electric Power Consumption) (2015) คือ ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ระบบใช้ไปในกระบวนการแปรสภาพ ในงานวิจัยนี้ให้เครื่องวัดพลังงานมัลติฟังก์ชัน (Multi-Function Power Meter) ยี่ห้อ EASTRON รุ่น SDM630MCT สามารถรายงานผลการวัดเป็นหน่วย kWh, kVarh, W, Var, VA, PF, Hz, และ V ในการวัดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 28 เครื่องวัดพลังงานมัลติฟังก์ชัน

3) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ สามารถคำนวณจากสมการที่ 5

$$SEC = E_{input} / m_{product} \quad \text{สมการที่ 5}$$

โดยที่	SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
	E_{input}	คือ พลังงานที่จ่ายให้กับระบบ (MJ)
	$m_{product}$	คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่หลอมละลาย (kg)

4) ค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Strength of Material) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงของวัสดุด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (ภาพที่ 29) โดยทำการติดตั้งตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วทั้ง 3 ขนาด เข้ากับเครื่องดังกล่าว แล้วทำการให้แรงกดกับตัวอย่างขยะจนถึงจุดเปลี่ยนโครงสร้างพื้นฐานถาวร (Yield Point) แล้วนำข้อมูลจากเครื่องซึ่งได้แก่ แรงกด (F) และระยะยุบตัวของวัสดุ (ΔL) มาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลทั้งสิ้น 3 ค่า ได้แก่ ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) ค่าความเครียดอัด (Compressive Strain) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เพื่อนำสมบัติที่ได้ไปเทียบเคียงกับวัสดุก่อสร้างชนิดต่าง ๆ โดยสมบัติด้านความแข็งแรงของวัสดุดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6-8 ตามลำดับ



ภาพที่ 29 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

- ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) (2020) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงกดที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุ ถ้าวัสดุใดมีค่านี้นสูง หมายถึง วัสดุนั้น ๆ มีความแข็งแรงสูงทนการอัดได้ดี ค่านี้อาจคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$\sigma = F/A$$

สมการที่ 6

โดยที่	σ	คือ ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) (N/m^2)
	F	คือ แรงกดที่กระทำในแนวตั้งฉาก (N)
	A	คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุ (m^2)

- ค่าความเครียดอัด (Compressive Strain) คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดที่เปลี่ยนไปต่อขนาดตั้งต้น ถ้าวัสดุใดมีค่านี้ต่ำ หมายถึง วัสดุนั้น ๆ มีความแข็งแรงสูง มีการเปลี่ยนรูปเมื่อรับแรงอัดต่ำ ค่านี้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$

สมการที่ 7

โดยที่	ε	คือ ค่าความเครียดอัด (Compressive Strain)
	ΔL	คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของวัสดุเมื่อรับแรงกด (m)
	L_0	คือ ความยาวเดิมของวัสดุ (m)

- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) ต่อความเครียด (Strain) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุหรือความสามารถในการโค้งงอของวัสดุ ถ้าวัสดุใดมีค่านี้ต่ำ หมายถึง วัสดุนั้น ๆ สามารถโค้งงอได้ดี ค่านี้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 8

$$E = \sigma/\varepsilon$$

สมการที่ 8

โดยที่	E	คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (N/m^2)
	σ	คือ ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) (N/m^2)
	ε	คือ ค่าความเครียดอัด (Compressive Strain)

5) ต้นทุนการแปรสภาพ

ต้นทุนการแปรสภาพ (Reforming Cost) ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำไฟฟ้าต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ 1 kg สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 9

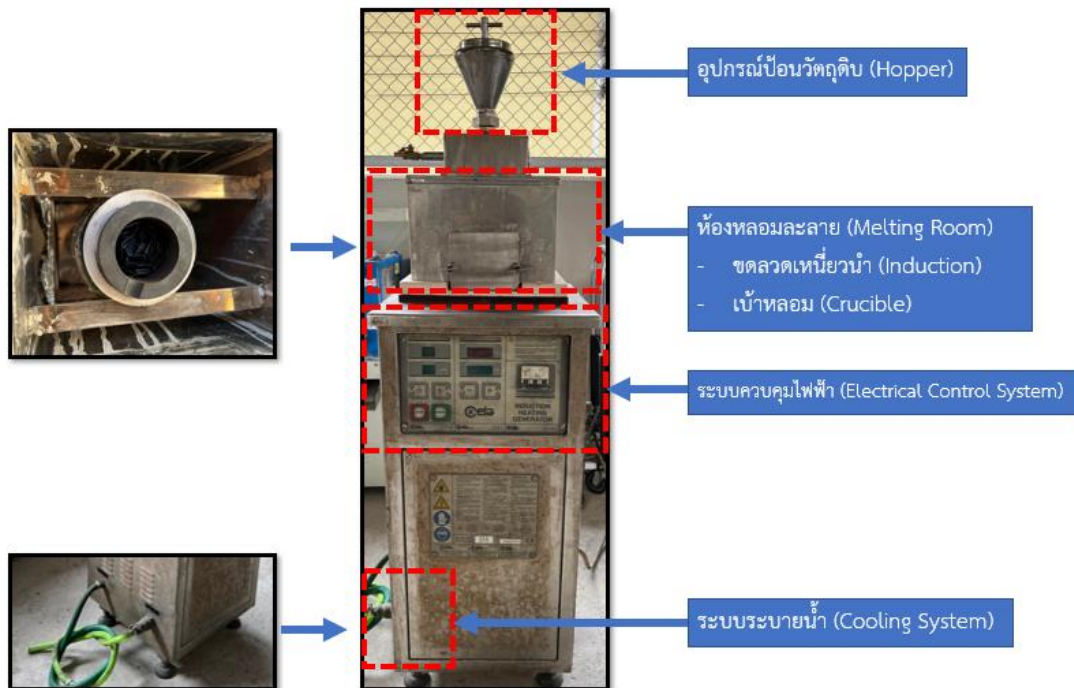
$$R_c = \frac{P_{input} \times E_c}{m_{product}} \quad \text{สมการที่ 9}$$

โดยที่	R_c	คือ ต้นทุนในการแปรสภาพ (Baht/kg)
	P_{input}	คือ ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ (kWh)
	E_c	คือ ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย (Baht/kWh)
	$m_{product}$	คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่หลอมละลาย (kg)

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

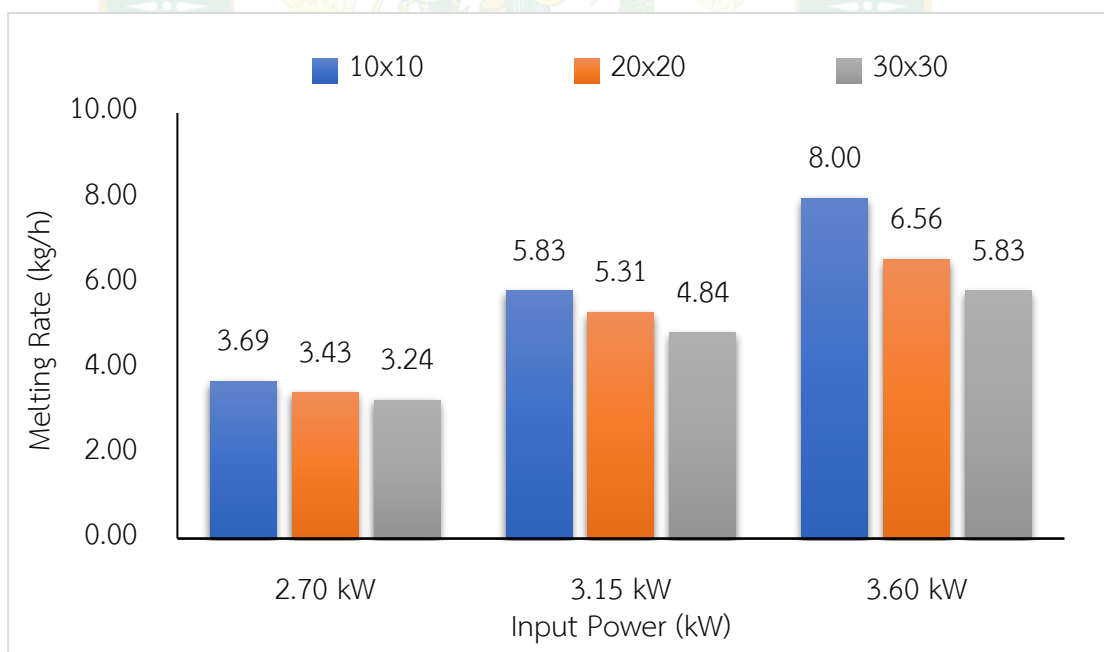
สืบเนื่องจากบทที่ 3 ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ สร้าง และประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ จนได้เป็นเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ต้นแบบในงานวิจัยนี้ อันมีองค์ประกอบดังภาพที่ 30 และได้ทำการทดสอบเครื่องดังกล่าวแล้วเสร็จทำให้เนื้อหาในบทที่ 4 นี้จะนำเสนอผลและวิเคราะห์ผลการวิจัยโดยเรียงลำดับตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและขั้นตอนการวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ซึ่งได้แก่ 1) ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า โดยมีตัวแปรต้น หรือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) คือ กำลังไฟฟ้า (Input power) ที่จ่ายให้กับระบบหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และขนาดของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ผ่านการคัดแยกที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (Dependent Variable) อันได้แก่ อัตราการแปรสภาพของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (kg/h) พลังงาน (MJ) พลังงานจำเพาะ (MJ/kg) และต้นทุนทางด้านพลังงาน (kWh/kg หรือ Baht/kg) ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง โดยผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 30 เครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้ต้นแบบในงานวิจัยนี้

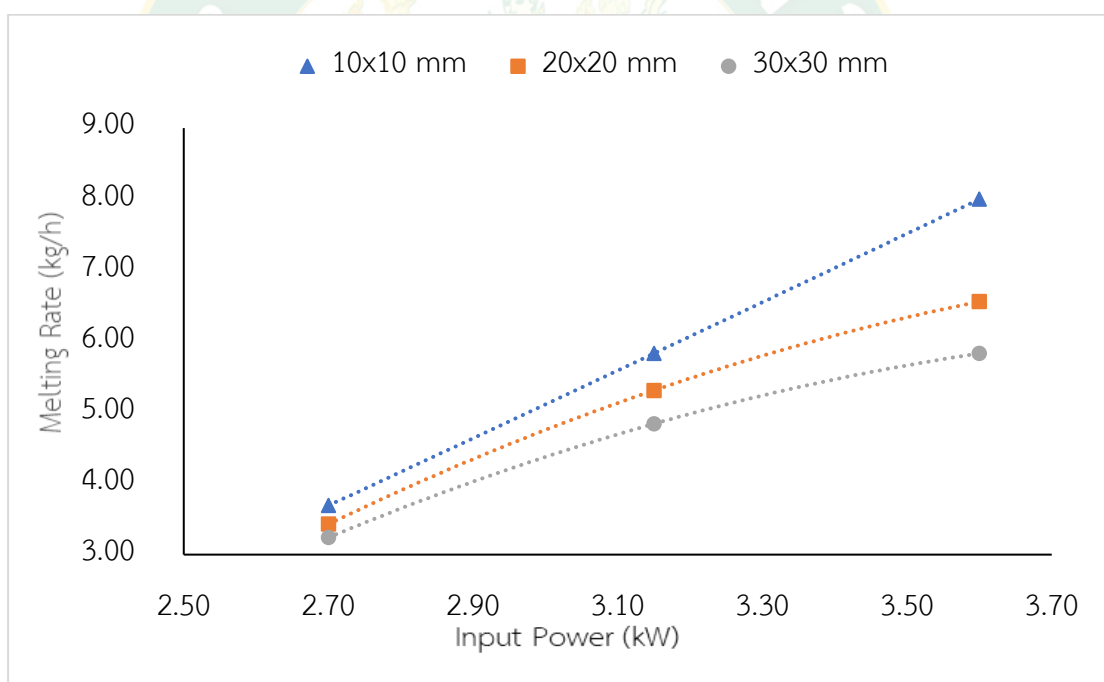
อัตราการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

จากผลการทดลองแปรสภาพตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ลอกกระจกออกแล้วทำการตัดให้มีขนาด 10 x 10 mm 20 x 20 mm และ 30 x 30 mm น้ำหนัก 100 g ต่อการทดลอง ด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ด้วยเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (ภาพที่ 30) ที่กำลังไฟฟ้า (Input Power) 60% 70% และ 80% ของพิกัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.70 kW 3.15 kW และ 3.60 kW ตามลำดับ พบว่าอัตราการหลอมละลายจะแปรผันตามกำลังไฟฟ้า (Input Power) แต่แปรผกผันกับขนาดของขยะตัวอย่าง กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ระบบสามารถให้ความร้อนได้สูงและรวดเร็วขึ้นทำให้อัตราการหลอมละลายสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันขนาดของขยะตัวอย่างที่ใหญ่ขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนจากเข้าหลอมสูงแกนกลางเกิดขึ้นได้ช้าลงจึงทำให้ขยะที่มีขนาดใหญ่ต่ำกว่ามีอัตราการหลอมละลายน้อยกว่าขยะขนาดเล็กในทุกค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power) ที่ทำการทดลอง จากผลของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำดังกล่าวส่งผลต่อแนวโน้มของอัตราการแปรสภาพขยะจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดต่าง ๆ ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 อัตราการแปรสภาพขยะจากเซลล์แสงอาทิตย์

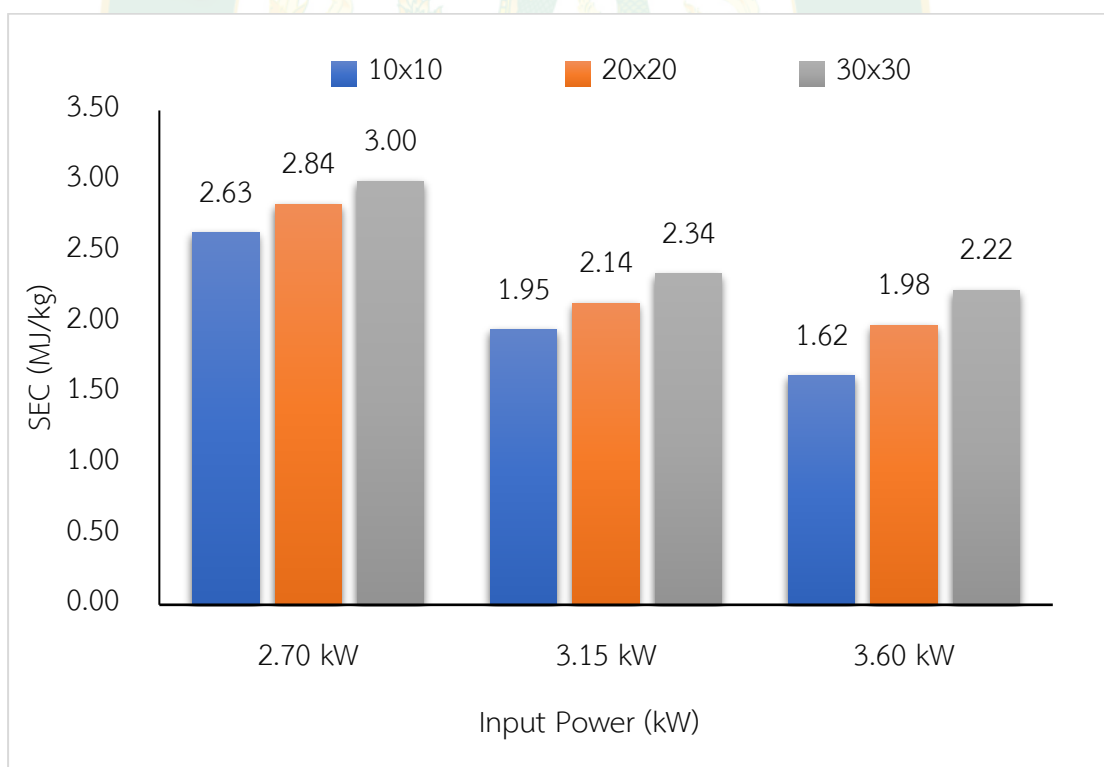
จากภาพที่ 31 จะเห็นได้ว่าที่แต่ละกำลังไฟฟ้า (Input Power) เครื่องต้นแบบจะสามารถหลอมละลายขยะตัวอย่างได้ดีที่สุดเมื่อขยะตัวอย่างมีขนาด 10 x 10 mm เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 60% ของพิกัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบ (2.70 kW) เครื่องต้นแบบใช้เวลาในการหลอมละลายขยะขนาด 10 x 10 mm น้ำหนัก 100 g เท่ากับ 98 s หรือคิดเป็นอัตราการหลอมละลายเท่ากับ 3.69 kg/h ในขณะที่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็น 70% (3.15 kW) ของพิกัดแหล่งจ่ายไฟฟ้า พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มอัตราการหลอมละลายขยะขนาดเดียวกันเป็น 5.83 kg/h หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 58% แต่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็น 80% (3.60 kW) ของพิกัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าเครื่องต้นแบบมีอัตราการหลอมละลายเท่ากับ 8.00 kg/h หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 117% จากการใช้กำลังไฟฟ้า 2.70 kW จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า (Input Power) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบในด้านอัตราการหลอมละลายในลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบพหุนาม (Polynomial) ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ผลของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการหลอมละลาย

การใช้พลังงานในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำไฟฟ้าด้วยเครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้ดังภาพที่ 33 พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) จะแปรผันตามขนาดของขยะ ตัวอย่างแต่แปรผกผันกับกำลังไฟฟ้า (Input Power) กล่าวคือ การแปรสภาพขยะที่มีขนาดใหญ่กว่าจะใช้พลังงานมากกว่า แต่ถ้าขนาดของขยะเท่ากันการแปรสภาพด้วยกำลังไฟฟ้า (Input Power) ที่สูงกว่าจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (Electric Power Consumption) ส่งผลต่อค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่ลดลงด้วย ในทำนองเดียวกันกับอัตราการแปรสภาพจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้า (Input Power) ก็ส่งผลต่อสมรรถนะเชิงพลังงานของเครื่องต้นแบบเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนียวนำจาก 60% ของพิกัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็น 80% เครื่องต้นแบบจะสามารถแปรสภาพขยะที่มีขนาด 10×10 mm ด้วยค่า SEC ที่ลดลงจาก 2.63 MJ/kg เป็น 1.62 MJ/kg หรือลดลง 38.40% ซึ่งเป็นการลดลงแบบพหุนาม (Polynomial) เช่นกัน



ภาพที่ 33 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการแปรสภาพขยะตัวอย่าง

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง









Input Power (kW)	Waste Size (mm)	Melting Time (s)	Melting Rate (kg/h)	Power Consumption (kWh)	Power Consumption (MJ)	SEC (kWh/kg)	SEC (MJ/kg)
2.70	10 x 10	98	3.69	0.07	0.26	0.73	2.63
	20 x 20	105	3.43	0.08	0.28	0.79	2.84
	30 x 30	111	3.24	0.08	0.30	0.83	3.00
3.15	10 x 10	62	5.83	0.05	0.19	0.54	1.95
	20 x 20	68	5.31	0.06	0.21	0.59	2.14
	30 x 30	74	4.84	0.07	0.23	0.65	2.34
3.60	10 x 10	45	8.00	0.05	0.16	0.45	1.62
	20 x 20	55	6.56	0.05	0.20	0.55	1.98
	30 x 30	62	5.83	0.06	0.22	0.62	2.22

**ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์
วัสดุทดแทนที่ได้จากการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง**

เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนี่ยวนำจะเกิดความร้อนสูงจนทำให้ตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเกิดการหลอมละลายแล้วจะไหลลงสู่แม่พิมพ์ขนาด 10 x 10 mm 20 x 20 mm และ 30 x 30 mm (ลึก 10 mm ทุกแบบ) จนได้เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนาตรงกลางเนื่องจากการไหลลงแม่พิมพ์ของขยะที่หลอมละลายอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการพองตรงกลางขณะที่นำแม่พิมพ์ออกจากห้องหลอม ผิวของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะหยาบและมีองค์ประกอบเป็นออกไซด์ (Oxide) ของโลหะผสม และมีเขม่าจากการเผาไหม้วัสดุประเภทโลหะ โดยผลิตภัณฑ์ดิบที่ได้จากการทดลองแต่ละสภาวะมีลักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 4



ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนที่ได้จากการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์ม

พลังงานไฟฟ้า (kW)	ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์		
	ผลิตภัณฑ์จากแผ่นฟิล์มบาง ขนาด 10 x 10 mm	ผลิตภัณฑ์จากแผ่นฟิล์มบาง ขนาด 20 x 20 mm	ผลิตภัณฑ์จากแผ่นฟิล์มบาง ขนาด 30 x 30 mm
2.70			
3.15			
3.60			

ทั้งนี้เมื่อเมื่อผู้วิจัยนำผลิตภัณฑ์ดิบที่มีลักษณะตารางที่ 4 ไปผ่านกระบวนการ Machining ผิวของผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนออกพบว่าภายในมีลักษณะเป็นโลหะที่มีผิวมันวาวดังภาพที่ 34



(A)

(B)

ภาพที่ 34 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทน

(A) ผลิตภัณฑ์ดิบ และ (B) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ Machining

จากนั้นผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพด้วยสภาวะต่าง ๆ ไปทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของวัสดุจนเกิดการเสียหาย ณ จุดประลัย (Ultimate Strength) ดังภาพที่ 35 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขยะทุกขนาดที่ใช้ในการทดลองและทุกค่ากำลังไฟฟ้าในการแปรสภาพมีสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ใกล้เคียงกันโดยมีค่าความหนาแน่น (Density) ในช่วง $6,800-7,200 \text{ kg/m}^3$ ค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) ในช่วง $137-145 \text{ MPa}$ ค่าความเครียดอัด (Compressive Strain) ในช่วง $0.061-0.092$ และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เท่ากับ $1.55-2.51 \text{ GPa}$ โดยรายละเอียดของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 35 การเสียหายของวัสดุ ณ จุดประลัย

ตารางที่ 5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้ายที่ได้จากการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์ม

Input Power (kW)	Product Size (mm)	Density ρ (kg/m ³)	Compressive Force F (N)	Compressive Stress σ (MPa)	Compressive Strain ϵ	Modulus of Elasticity E (GPa)
2.7	10 x 10	6,890	56,898	142.25	0.092	1.55
	20 x 20	6,836	57,683	144.21	0.083	1.74
	30 x 30	7,140	57,977	144.94	0.058	2.51
3.15	10 x 10	6,820	57,094	142.74	0.088	1.62
	20 x 20	6,825	54,838	137.09	0.082	1.67
	30 x 30	7,150	58,664	146.66	0.060	2.44
3.6	10 x 10	6,837	55,721	139.30	0.082	1.70
	20 x 20	6,836	55,034	137.59	0.073	1.89
	30 x 30	7,144	56,898	142.25	0.061	2.35

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยกับวัสดุชนิดต่าง ๆ

หากนำสมบัติเชิงกลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นเพื่อการใช้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นวัสดุทดแทนพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีสมบัติอยู่ในกลุ่มวัสดุเปราะ (Brittle material) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่ง กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์นี้มีค่าความเค้นอัด (Compressive Strength) สูงแต่มีค่าความเครียดอัด (Compressive Strain) ต่ำ จึงมีความทนทานต่อการรับแรงกดมากแต่มีการเปลี่ยนรูปเมื่อรับแรงกดน้อย ทำให้การแตกหักของวัสดุประเภทนี้จะเกิดขึ้นทันทีโดยไม่มีช่วงพลาสติก (ไม่มีการยืดตัวหรือยุบตัวอย่างเห็นได้ชัดก่อนการแตกหักเสียหาย) เช่นเดียวกับวัสดุก่อสร้างจำพวก หินก่อสร้าง (Construction Aggregate) คอนกรีต (Concrete) อิฐ (Brick) โดยผลิตภัณฑ์นี้มีค่าความเครียดอัดเฉลี่ยประมาณ 142 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุก่อสร้างที่ผู้วิจัยกล่าวถึงหลายเท่า โดยผลิตภัณฑ์นี้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับหินแกรนิต (Granite) จึงสามารถใช้ทดแทนได้วัสดุชนิดนี้ได้ แต่เมื่อพิจารณาภาพที่ 34 (B) ซึ่งพบว่าเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการ Machining จะได้เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนที่เป็นโลหะผสมมีผิวมันวาว มีความแข็งแรงใกล้เคียงวัสดุกลุ่มโลหะต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม อาทิ อลูมิเนียม (Aluminum) ทองเหลือง (Brass) ทองแดง (Copper) แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเหล็ก (Steel) ดังนั้นการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการเป็นวัสดุทดแทนจึงสามารถพิจารณาจากค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Compressive Strength) ตามตารางที่ 6 อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังสามารถนำไฟฟ้าได้โดยมีค่าสภาพนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เฉลี่ยเท่ากับ 2.45×10^6 S/m ซึ่งสูงกว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของโลหะกลุ่มที่ใช้ในงานไฟฟ้า (Grain Oriented Electrical Steel; Electrical Conductivity = 2.17×10^6 S/m) เล็กน้อยจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ อาทิ ขั้วแบตเตอรี่ แท่งหลักดิน (Ground Rod) สายไฟฟ้า หรือนำไปหลอมเป็นโลหะผสมชนิดใหม่สำหรับงานเฉพาะด้านได้อีกด้วย

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยกับวัสดุชนิดต่าง ๆ

Material	Density (kg/m^3)	Compressive Strength (MPa)
<i>Reformed PV Waste</i>	<i>6,820-7,150</i>	<i>137-146</i>
Construction Aggregate	1,200-1,750	25-97
Concrete	1,750-2,450	17-28
Brick	1,200-1,700	7-12
Granite	2,650-2,750	130-170
Aluminum	2,710-2,730	30-280
Brass	8,400-8,730	90-310
Copper	8,930-8,940	45-330
Steel	7,750-8,050	250-380

ต้นทุนการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

ต้นทุนการแปรสภาพ (Reforming Cost) ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำไฟฟ้าต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ 1 kg ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (Electric Power Consumption) สูงสุดเท่ากับ 0.83 kWh/kg เมื่อทำการแปรสภาพขยะที่มีขนาด 30 x 30 mm ด้วยกำลังไฟฟ้า 2.70 kW กล่าวคือ การแปรสภาพขยะดังกล่าวมีต้นทุนค่าไฟฟ้าเมื่อคำนวณที่อัตราค่าไฟฟ้า 5 Baht/kWh จะมีต้นทุนการแปรสภาพเท่ากับ 4.15 Baht/kg ทั้งนี้หากคำนวณต้นทุนการแปรสภาพขยะในงานวิจัยนี้ที่ 5.00 Baht/kg ก็ยังคงต่ำกว่าราคากลางของค่ากำจัดของเสียอันตรายจากชุมชนที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษในกรณีเผาทำลายต้องมีราคาไม่เกิน 18 Baht/kg กรณีฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure Landfill) ต้องมีราคาไม่เกิน 15 Baht/kg และกรณีคัดแยกหรือการรีไซเคิล หรือการผลิตเป็นวัสดุติบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ต้องมีราคาไม่เกิน 12 Baht/kg ตามลำดับ (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) ด้วยข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนียวนำไฟฟ้าด้วยเครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ที่จะพัฒนาระบบเพื่อนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรมต่อไป

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลของขนาดขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าขนาดของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการแปรสภาพเนื่องจากขยะที่มีขนาดใหญ่เมื่อบรรจุลงเบ้าหลอมจะทำให้เกิดช่องว่างมากกว่าขยะขนาดเล็ก ซึ่งช่องว่างดังกล่าวส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (Heat Conduction) ลดลงทำให้ใช้เวลาในการหลอมละลายนานกว่าจึงให้อัตราการแปรสภาพต่ำกว่าด้วย ดังนั้นหากต้องการใช้เทคนิคหลอมละลายนี้จึงควรเตรียมวัตถุดิบให้มีขนาดไม่เกิน $10 \times 10 \text{ mm}$

ผลของกำลังไฟฟ้า

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าหากขนาดของขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากัน เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้อัตราการแปรสภาพสูงขึ้นในลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบพหุนาม (Polynomial) เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นในชิ้นโลหะจากการเสียดสีของโมเลกุลเนื่องจากความต้านทานสนามแม่เหล็กของชิ้นโลหะ (Reluctance) และเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวนจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในชิ้นโลหะ (Eddy Current) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นสมการกำลังสองทั้งสิ้น อีกทั้ง Skin Effect ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระแสไหลวนที่จะลดลงเป็นฟังก์ชันรากที่สองกับความลึกของผิวโลหะทำให้เมื่อเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำจะส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อาทิ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของเบ้าหลอมจึงเป็นเหตุให้อัตราการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางในงานวิจัยนี้เปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำแบบพหุนาม (Polynomial) ดังนั้นหากต้องการใช้เทคนิคการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าควรใช้กำลังไฟฟ้าระดับสูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพ

ลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าขนาดของขยะและกำลังไฟฟ้าในการแปรสภาพไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดแผ่นฟิล์มบางที่หลอมละลายแล้วไหลออกจากเบ้าหลอมอย่างต่อเนื่องด้วยอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลเพียงลดระยะเวลาในการหลอมละลายโดยไม่ส่งผลต่อจุดหลอมเหลวที่เปลี่ยนไปของแผ่นฟิล์มบางทุกขนาดจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องให้ความร้อนโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Heating) ขนาด 4.5 kW ที่เดิมใช้ในกระบวนการชุบแข็งโลหะ ด้วยการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้จึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด (C_D) ความสูงของขดลวด (C_H) และระยะห่างของขดลวด (C_P) เท่ากับ 120 mm 160 mm และ 5 mm ตามลำดับ สำหรับติดตั้งเข้าหลอมแกรไฟต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความสูงเท่ากับ 90 mm และ 156 mm ตามลำดับ โดยขดลวดเหนี่ยวนำถูกระบายความร้อนด้วยน้ำที่มีอัตราการไหล 5 l/min

จากผลการทดลองแปรสภาพตัวอย่างขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง พบว่าขยะขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราการแปรสภาพต่ำกว่า และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการแปรสภาพสูงขึ้นในลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบพหุนาม (Polynomial) โดยเมื่อทำการแปรสภาพขยะตัวอย่างขนาด 10 x 10 mm ด้วยกำลังไฟฟ้า 3.60 kW เครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดเท่ากับ 24.52% ณ สภาวะนี้เครื่องต้นแบบมีอัตราการการหลอมละลายสูงสุดเท่ากับ 8.00 kg/h มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (Electric Power Consumption) และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.06 kWh และ 2.22 MJ/kg ตามลำดับ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อผ่านกระบวนการ Machining จะมีลักษณะเป็นโลหะผสมมีผิวมันวาว และมีความแข็งแรงใกล้เคียงวัสดุกลุ่มโลหะต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม อาทิ อลูมิเนียม (Aluminum) ทองเหลือง (Brass) ทองแดง (Copper) แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเหล็ก (Steel) แต่เนื่องผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้าทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ ขั้วแบตเตอรี่ แท่งหลักดิน (Ground Rod) สายไฟฟ้า หรือนำไปหลอมเป็นโลหะผสมชนิดใหม่สำหรับงานเฉพาะด้านได้

การแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้มีต้นทุนค่าไฟฟ้าต่ำกว่าราคากลางของค่ากำจัดของเสียอันตรายจากชุมชนที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษในกรณีฝังกลบและเผาทำลาย ดังนั้นการแปรสภาพขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหลอมละลายแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยเครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้จึงมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ที่จะพัฒนาระบบเพื่อนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรมต่อไป

ข้อเสนอแนะ

- 1) เทคนิคการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีองค์ประกอบของโลหะ
- 2) เทคนิคการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าควรใช้กำลังไฟฟ้าระดับสูงซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ดีกว่า



บรรณานุกรม

- Ahn C. H., Lee J., Kim, Kim D. J., and Shin H. O. 2021. Development of a Novel Concrete Curing Method Using Induction Heating System. **Appl. Sci**,11 (-), 236-252.
- Anatoliy B., Galina B., Natalia G., Sergey M., and Mikhail G. 2017. Main Pipelines Corrosion Monitoring Device. **Earth and Environmental Science**,50(-).
- B., Laura R. and Francesca. 2015. Recovery of valuable materials from end-of-life thin-film photovoltaic panels: environmental impact assessment of different management options. **Cleaner Production**,89(-), 59-64.
- Caijie L., Qin Z., and Hai W. . 2020. Cost benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. **Waste Management**,118(-), 491-500.
- Department, Pollution Control. 2020. Ministry of Natural Resources and Environment. **Guide for disposal of electrical appliances and electronics**147-152.
- Khan, I., Tapson, J. and de Vries, I. 1996. An Induction Furnace Employ 100 kHz Mosfet FullBridge Current Source Load-Resonant Inverter. **Proceedings of IEEE conference. International Symposium on Industronics**,2(-), 530-534.
- Mokhter K, . Shigehiro Y. and Minoru A. 1998. A 50-15KHz Half – Bridge Inverter for Induction Heating Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,43(-), 163-172.
- Morris J., Chapchaimoh K., Poomsa-ad K. and Wiset L. 2016. Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying.,95(-), 491-498.
- S., Zurek. 2016. Qualitative FEM study of proximity loss reduction by various winding configurations. **Transformers Magazine**,3(1)(-), 70.
- กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน. 2559. แผนยุทธศาสตร์และนโยบายในการส่งเสริมการใช้พลังทดแทน. [ระบบออนไลน์]. (เข้าถึง 20 มีนาคม พ.ศ. 2565).
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมควบคุมมลพิษ. 2559. คู่มือการกำจัดซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์. 147-152.
- คงศักดิ์ รัตน์นิยมชัย และสันทาลุญย์, สำราญ. 2545. โครงการนศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม. วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.

- จำกัด, บริษัท เทนเซ็นต์ ประเทศไทย. 2556. เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell). [ระบบออนไลน์]. (เข้าถึง 20 มีนาคม พ.ศ. 2565).
- บุบผา., ไพบูลย์. 2545. เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงอย่างง่าย สำหรับเหล็กผสมคาร์บอนทรงกระบอก. การประชุมเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18. จังหวัดขอนแก่น.
- พิบลวงค์, มนัสนันท์. 2559. การจัดการแผงโซลาร์เซลล์ที่หมดอายุการใช้งาน กรณีศึกษา จังหวัดอุบลราชธานี. วิทยานิพนธ์หลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม) คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- ศักดิ์ดา พรหมเหมือน และศรีรัตน์, สงพงษ์. 2553. เครื่องหลอมอลูมิเนียมเหนี่ยวนำความถี่สูง. วารสารปฏิบัติการ วิศวกรรมไฟฟ้าปีที่ 2(1)1-9.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายณัฐวรรธน์ ตันหน้อย
เกิดเมื่อ	13 กันยายน พ.ศ.2532
ประวัติการศึกษา	<ul style="list-style-type: none"> - สำเร็จการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้ากำลัง โรงเรียนโปลิเทคนิค ลานนา เชียงใหม่ - สำเร็จการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยการอาชีพ ป่าซาง ลำพูน - สำเร็จการศึกษา ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ เชียงใหม่ - กำลังศึกษา ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	<ul style="list-style-type: none"> - อาจารย์ผู้สอนภาควิชา ไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีพายัพและบริหารธุรกิจ เชียงใหม่ 2556-2558 - วิศวกรโครงการ โครงการ THE ENERGY HUA HIN 2558-2559 - อาจารย์(พิเศษ)ผู้สอนภาควิชา ไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีพายัพและบริหารธุรกิจ เชียงใหม่ 2559-2560 - ผู้จัดการฝ่าย วิศวกรรม ห้างหุ้นส่วนจำกัด ตันธวิงศ์ คอนสตรัคชั่น 2560-ปัจจุบัน