



รายงานการวิจัย

4-Zone Fast Firing สำหรับพัฒนาการผลิตในปริมาณมากของเซลล์
แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงโครงสร้าง Rear Locally Passivated Cells
(4-Zone Fast Firing for Mass Production Development of High-
Efficiency Solar Cells with Rear Locally Passivated Structure)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

4-Zone Fast Firing สำหรับพัฒนาการผลิตในปริมาณมากของเซลล์
แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงโครงสร้าง Rear Locally Passivated Cells
(4-Zone Fast Firing for Mass Production Development of High-
Efficiency Solar Cells with Rear Locally Passivated Structure)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฟังสุวรรณรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2564

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้ด้วยการสนับสนุนจาก บุคลากร
จากอาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5, 6, 10 และ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้



บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า-แสงที่สำคัญที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่หลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีวิธีการผลิตแตกต่างกัน ซึ่งขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นคือ การอบขี้ผึ้งไฟฟ้เพื่อทำให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถส่งจ่ายกระแสได้ดี เพื่อให้เกิดคุณสมบัติโอห์มมิกที่รอยต่อของขี้ผึ้งไฟฟ้กับชั้นวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยขั้นตอนนี้จำเป็นต้องให้อุณหภูมิสูงกว่า Eutectic Point ของวัสดุทั้งสอง ในเวลาสั้น ๆ โดยทั่วไปใช้เตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว และใช้สายพานลำเลียงแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านห้องเผาที่มีอุณหภูมิต่างๆ เพื่อให้ชิ้นงานแช่ไฟในเวลาที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสร้างเครื่องอบความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว หรือ Fast Firing ด้วยหลอดอินฟราเรดชนิดคลื่นสั้น เพื่อกำหนดโปรไฟล์ของอุณหภูมิการแช่ไฟของชิ้นงานให้เหมาะสมกับการผลิตเซลล์โครงสร้างใหม่ในห้องปฏิบัติการ ระบบการลำเลียงชิ้นงานผ่านเข้ากระบวนการ Fast Firing เริ่มแรกเข้าไปที่ Drying Zone (200-300°C) Burning Zone (500 - 600°C) Firing Zone (800-950°C) และ Cooling Zone ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบ Natural Convection จากการศึกษาทดสอบพบว่าใน Cooling Zone อุณหภูมิอยู่ที่ 100°C ชิ้นงานสามารถกำหนดเวลาแช่ไฟในเวลาสั้นที่สุดที่ 7 วินาที ด้วยการควบคุมการลำเลียงสายพานจากการขับด้วยมอเตอร์ และได้การทดสอบเครื่องต้นแบบสำหรับ Fast Firing ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง LBSF และโครงสร้าง BSF โดยกำหนดเงื่อนไขการแช่ไฟในห้อง Fast Firing ที่ 7 10 15 และ 20 วินาที ในแต่ละเงื่อนไขของอุณหภูมิแช่ไฟที่ 890 °C 910 °C และ 930°C ผลการทดสอบแสดงค่าที่จ้อแสดงผลตรงค่าที่กำหนดไว้และทำงานได้จนครบกระบวนการ

Abstract

Solar cell is one of the most important electrical-optical devices that can directly convert solar energy into electricity. Solar energy is a type of renewable energy that is clean, and environmentally friendly. Currently, there are many types of solar cells, each with different production methods. One important step in the production of solar cells is curing electrodes to enable the solar cells to supply the current well to achieve ohmic contact property at the interface of electrodes and the material layers of solar cells. This procedure requires a temperature higher than the Eutectic point of Al-Si phase diagrams in a short firing-period of time. In typical production process of solar cells, a furnace operates on the rapid temperature with using a conveyor belt through each furnace chamber. Soaking and heating profile is significantly effective on the efficiency of the solar cells.

This research has studied a rapid thermal furnace of used with short-wave infrared lamps to determine the soaking and heating profile for production of new structural cells in the laboratory scale. In the fast-firing process, the samples initially conveying through the drying zone (200-300°C), the burning zone (500 - 600°C), firing zone (800-950°C) and cooling zone, respectively. The system design is based on the principle of Natural Convection heat transfer. In the cooling zone, the temperature is 100°C with soaking time for 7 seconds by controlling the conveyor belt with motor drive. The solar cells based LBSF and BSF structures were operated under fast firing process with various soaking conditions of 7, 10, 15 and 20 sec for each condition heating at 890 °C, 910 °C, and 930°C. The test results illustrated on the display that correctly match with the set value. The fast firing furnace properly works till complete process.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 การออกแบบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบ	
2.1 หลักการทำงานของเตาเผา Fast Firing	5
2.2 การออกแบบเตาเผา Fast Firing	6
2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ	7
2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา	8
2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน	9
2.2.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา ร่วมกับการแผ่รังสีความร้อน	10
บทที่ 3 ส่วนประกอบของเตาเผา Fast Firing ต้นแบบ	
3.1 โครงสร้างของเตาเผา Fast Firing	16
3.2 ระบบไฟฟ้าของเตาเผา Fast Firing	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาเผา Fast Firing	27
4.2 ผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการ Fast Firing	28
4.3 ผลทางจุลโครงสร้างที่รอยสัมผัส Al-Si และบริเวณ p^+ Si	35
4.4 การเปรียบเทียบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบกับเตาเผา Fast Firing ใน อุตสาหกรรม	37
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 เครื่อง Fast Firing ต้นแบบสำหรับห้องปฏิบัติการและการทดสอบ	39
5.2 ทดสอบการ Firing กับเซลล์แสงอาทิตย์	39
5.3 ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	41
ประวัตินักวิจัย	43

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	9
ตารางที่ 3.1 โหลดภายใน Control Board	21
ตารางที่ 3.2 ค่า PID ของแต่ละอุณหภูมิ	26
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานที่ผ่าน การเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	27
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ผ่านการเผา ด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	28
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบในห้องปฏิบัติการกับเตาเผา Fast Firing ที่ใช้ในอุตสาหกรรม	33



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบ 3 Belts -3 Speeds ในอุตสาหกรรม และโปรไฟล์อุณหภูมิ	5
รูปที่ 2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังวัตถุหนึ่งแบบการนำแบบ one-dimension	8
รูปที่ 2.3 (ก) การพาความร้อนแบบบังคับโดยพัดลมระบายความร้อน (ข) การพาความร้อนแบบธรรมชาติรอบ ๆ วัตถุร้อน	9
รูปที่ 2.4 ภาพ Isometric ของเตา Fast firing ในงานวิจัยนี้	11
รูปที่ 2.5 ภาพด้านข้างของเตาเผา Fast firing	11
รูปที่ 2.6 กำหนดลักษณะและขนาดของแต่ละโซน สำหรับคำนวณหาพลังงาน	13
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับอุณหภูมิ	13
รูปที่ 2.8 Drawing Isometric ของโครงสร้างเตาเผา Fast Firing (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างเตาเผา Fast Firing จากมุมมองด้านบน (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน	14
รูปที่ 3.1 ห้องเตาเผาผนัง Fiber Alumina (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน	16
รูปที่ 3.2 Stepping Motor	17
รูปที่ 3.3 (ก) สายพานที่ใช้ในระบบลำเลียง และ (ข) ท่อลูกกลิ้งรับรองสายพาน	17
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมการแผ่รังสีของหลอด IR	18
รูปที่ 3.6 หลอดไฟ IR short wavelength	18
รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิล Type K	19
รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์ต่าง ๆ บริเวณหน้าตู้จ่ายไฟ	19
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้จ่ายไฟ	20
รูปที่ 3.10 Single line diagram ระบบไฟฟ้าสามเฟสของเตาเผา Fast Firing	21
รูปที่ 3.11 ตู้ควบคุมระบบการทำงานของเครื่อง Fast Firing	22
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุม	23
รูปที่ 3.13 Block diagram ของ PID control	24
รูปที่ 3.14 การแกว่งของอุณหภูมิก่อนจะเข้าใกล้ Set Point	25
รูปที่ 4.1 โปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในห้องต่าง ๆ เวลาที่ใช้เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ	27
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF เปรียบเทียบกับโครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มด้านหลัง	28
รูปที่ 4.3 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสงเทียม....	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Voc) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	29
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	29
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	30
รูปที่ 4.7 บริเวณข้อบกพร่องอะลูมิเนียมด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานหลังการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	31
รูปที่ 4.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6010LV	32
รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p+-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si ₃ N ₄ PECVD ด้านหลัง (ก) ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	32

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยลดสัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม (Energy Intensity) พบว่าในปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 14,370 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น ร้อยละ 12.9 จากช่วงเดียวกันของปีก่อน ขณะที่สัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับปี 2553 ซึ่งเป็นปีฐานที่เริ่มดำเนินการตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554 – 2573) และแผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2558 - 2579

พลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอันดับต้น ๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกอย่างหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดและปราศจากมลภาวะ พลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายรวมถึงการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากถ่านหินที่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้เอง หรือต่อเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อขายไฟฟ้าให้กับหน่วยงานของรัฐ ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดจะมีวิธีการผลิตแตกต่างกัน ซึ่งขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นคือ การอบขี้ไฟฟ้าเพื่อทำให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยขั้นตอนนี้จำเป็นต้องใช้เตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว

กระบวนการอบขี้ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal process, RTP) หรือเรียกอีกอย่างว่า Fast Firing มีการใช้เตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว (เตาเผา Fast firing) ที่เป็นระบบการลำเลียงแบบสายพาน ประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ

1. Drying เป็นกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 °C เพื่อให้ขี้ไฟฟ้าที่ใช้ Metal paste แห้ง
2. Burning เป็นกระบวนการที่อุณหภูมิระหว่าง 400-500 °C การเผาสารพอลิเมอร์ต่าง ๆ ใน Metal paste ที่เป็นขี้ไฟฟ้าให้ระเหยออกและมีการระบายควันที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อป้องกันไม่ให้เขม่าควันกลับไปเกาะที่เซลล์แสงอาทิตย์

3. Firing เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่เซลล์แสงอาทิตย์หรือการอบชุบไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความร้อนประมาณ 600 - 900°C ในระยะเวลาสั้น ๆ เพื่อให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

4. Cooling หลังจากการให้ความร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้ Metal paste แพร่ไปยังรอยต่อ จึงต้องมี การลดอุณหภูมิให้เย็นลงน้อยกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิห้อง

โดยทั่วไปเตาเผา Fast firing ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยเป็นเตาเผาที่นำเข้าจาก ต่างประเทศและมีขนาดใหญ่สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจึงได้ทำการสร้างเตาเผา Fast firing ต้นแบบสำหรับห้องปฏิบัติการ เพื่อ สนับสนุนการศึกษาวิจัยการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างเครื่องต้นแบบ 4-zone fast firing สำหรับพัฒนาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพ สูงโครงสร้าง Rear Locally Passivated Cells ในระดับ Mass Production

2. ได้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการ Firing สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพสูงโครงสร้าง Rear Locally Passivated Cells เพื่อปรับปรุงค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และสามารถนำไปสู่การใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตได้

3. เพิ่มขีดความสามารถการวิจัยด้านการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นในประเทศ

4. ผลิตบัณฑิตที่มีความเชี่ยวชาญด้านเครื่องจักรอัตโนมัติในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพสูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ 4-zone fast firing ใช้ระบบควบคุมแบบ PID ควบคุม อุณหภูมิในแต่ละโซนและความเร็วสายลำเลียงแสดงผลโปรไฟล์บนจอเครื่องคอมพิวเตอร์

2. ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการ Firing สำหรับเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ผลิตในห้องปฏิบัติ

3. ศึกษาการเชื่อมโยงระหว่างกระบวนการผลิตที่พัฒนาให้เกิด Rear Locally diffused passivation หรือเรียกว่าโครงสร้าง Local Back Surface Field (LBSF) solar cell กับกระบวนการที่มี อยู่ในระบบอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

4. ทดสอบการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Rear Locally diffused passivation หรือ LBSF ด้วยเครื่องต้นแบบ 4-zone fast firing

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าความรู้ที่เกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการ และจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ
2. ออกแบบระบบ 4-zone fast firing ด้วยหลอดไฟ IR short wavelength และคำนวณตามหลักการถ่ายเทความร้อน
3. จัดหาวัสดุ และสร้างส่วน Hardware และดำเนินการออกแบบส่วนควบคุมความร้อนและความเร็วมอเตอร์
4. สร้างเครื่องต้นแบบ 4-zone fast firing พร้อมชุดควบคุมอัตโนมัติแสดงผลการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
5. ศึกษาโปรไฟล์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของระบบ 4-zone fast firing
6. ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Rear locally-diffused passivation หรือเรียกว่าโครงสร้าง Local Back Surface Field (LBSF) solar cell ที่ใช้เทคนิคต้นทุนต่ำจากหมึกสารเจือและสร้างลวดลายด้วยวิธี Screen printing
7. ทดสอบการ Firing กับเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ที่ผลิตได้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อปรับหาเงื่อนไข Firing ให้ได้ V_{oc} สูงสุด
8. วิเคราะห์ผลจากการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ทางโครงสร้างระดับ Micro-structure และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานภายใต้แสงทดสอบ AM1.5
9. เขียนบทความตีพิมพ์ทางวิชาการ และเผยแพร่เทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ไปสู่องค์กร หรือภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อก้าวสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์
10. สรุปจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ด้านวิชาการเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป
 - เป็นองค์ความรู้ที่สามารถเผยแพร่ในวารสารวิชาการ
 - สร้างเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ได้ภายในประเทศด้วยการใช้เทคนิคที่คล่องตัว และต้นทุนการผลิตต่ำสำหรับออกแบบโครงสร้างในแบบแผนใหม่
2. ด้านนโยบาย
 - ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน การใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น
3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์เพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

- สามารถเข้าสู่อุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ภายในประเทศซึ่งมีการผลิตเซลล์ด้วยวัสดุชนิดซิลิคอนอยู่แล้ว

- สามารถก้าวทันต่อเทคโนโลยี LBSF จากการใช้วัสดุหมึกฟอสฟอรัสที่สามารถสังเคราะห์เองได้ และใช้กระบวนการ Screen Printing ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำเนื่องจากลดกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนจาก Photolithography และ Laser processing สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้

- ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

4. ด้านสังคมและชุมชน

- ประชาชนสามารถเข้าถึงการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงได้มากขึ้นเมื่อเซลล์มีราคาที่ถูกลงจากกระบวนการผลิตที่มีต้นทุนต่ำลง และผลิตได้ภายในประเทศมากขึ้น

5. การเผยแพร่ในวารสาร และการจดสิทธิบัตร

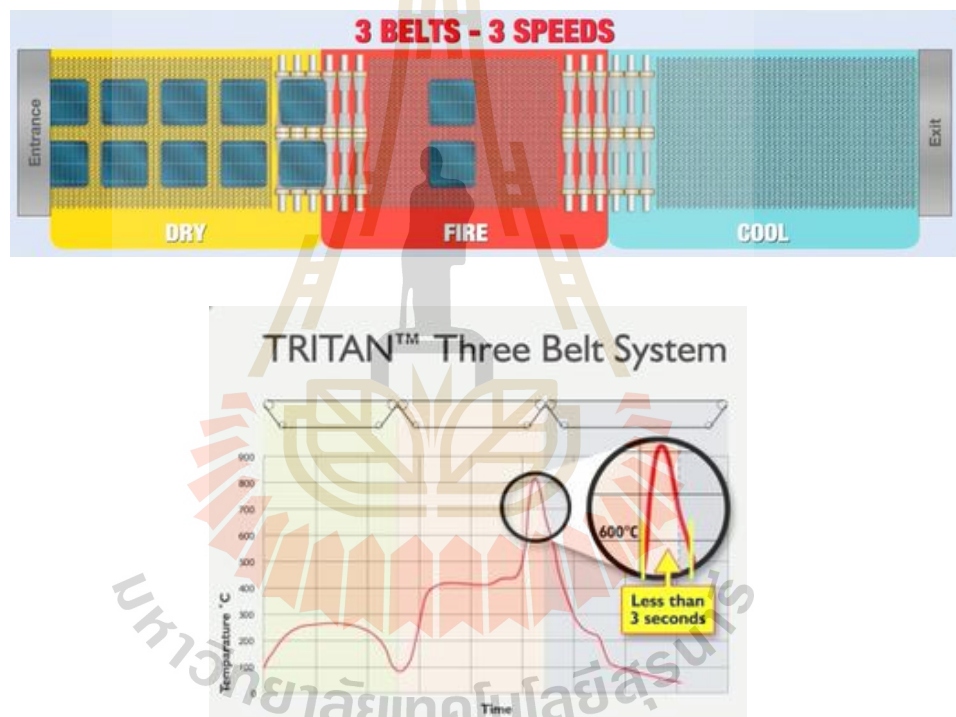
- Kamonchanok Mekmork, Thipwan Fangsuwannarak, Supanut Laohawiroj, Peerawoot Rattanawichai and Warakorn Limsiri “Patterned Borosilicate Glass by a Simplified Flash Foam Stamping Technique as Back Passivation Layer for Photovoltaic Structure” Chiang Mai J. Sci. 2020; 47(4): 614-623

- กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลิมศิริ ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตน์วิชัย และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0011

บทที่ 2

การออกแบบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเตาเผาชนิด 4-Zone Fast Firing สำหรับพัฒนาขั้นตอนการผลิต ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงในปริมาณมาก สำหรับห้องปฏิบัติการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการออกแบบจำลองจากต้นแบบที่ใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตเซลล์ต้นแบบที่มีโปรไฟล์ของระดับอุณหภูมิการเผา (Firing Profile) โดยการศึกษาข้อมูลของบริษัท Dupont Solamet ในอุตสาหกรรมทั่วไปมีกระบวนการอบขั้วไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 3 Belts -3 Speeds แสดงรูปประกอบ top-view และโปรไฟล์ของอุณหภูมิในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบ 3 Belts -3 Speeds ในอุตสาหกรรม และโปรไฟล์อุณหภูมิ

2.1 หลักการทำงานของเตาเผา Fast Firing

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตเตาเผา Fast Firing สำหรับอบขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เกิดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ประกอบด้วย 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ 1. Drying-Zone 2. Burning-Zone 3. Firing-Zone และ 4. Cooling-Zone ตามลำดับ ความร้อนในแต่ละส่วนกำหนดด้วยระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID และแสดงผลที่หน้าจอของตู้ควบคุม ส่วนประกอบของเตาชั้นนอกสุดทำด้วยแผ่นสแตนเลส 301 ชั้นถัดไปเป็นใยแก้วกันความร้อน ชั้นในสุดทำด้วยเซรามิคไฟเบอร์บอร์ด โดยใช้หลอดไฟอินฟราเรดคลื่นสั้น

(Short-IR Lamp) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน เนื่องจากสามารถให้ความร้อนได้สูง รวดเร็ว และยังสามารถควบคุมความร้อนได้แม่นยำ โดยมีสายพานลำเลียงชิ้นงานขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์นำชิ้นงานที่ต้องการอบ ผ่านไปในแต่ละโซน โดยมีการควบคุมความเร็ว และระยะเวลาการเคลื่อนที่ของสายพานให้มีการอบที่เหมาะสม สามารถใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่ที่ต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพเช่นโครงสร้าง Selective Emitter และโครงสร้าง Local back surface field (BSF) เป็นต้น

กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนทั้งแบบผลึกหลายรูป (Poly-crystal) และแบบผลึกเดี่ยว (Single-crystal) จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี เช่น ให้โอห์มมิก (Ohmic's property) ที่ดี และค่าความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (Contact resistance) ระหว่างโลหะกับเซลล์ซิลิคอนมีค่าต่ำ เป็นต้น ดังนั้นขั้วไฟฟ้าบนเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องผ่านกระบวนการอบหรือการให้ความร้อนกับขั้วไฟฟ้าเซลล์ เพื่อให้เกิดอะตอมโลหะซึมลึกลงไปในพื้นที่ต่างๆ ของเซลล์ ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำทันทีหลังจากเซลล์มีชั้นรอยต่อพี-เอ็น ขั้นตอนนี้ใช้เตาเผาที่มีระบบการลำเลียงแบบสายพานโลหะทนความร้อนสูง ซึ่งประกอบด้วย 4 กระบวนการ ดังนี้

1. Drying เป็นกระบวนการอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150°C - 130°C เพื่อโลหะที่พิมพ์ลายบนเซลล์ทั้งด้านบนและด้านล่างแห้ง
2. Burning เป็นกระบวนการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500°C - 600°C เพื่อไล่สารพอลิเมอร์ต่าง ๆ ในขั้วไฟฟ้าให้ระเหยออกไป เนื่องจากเป็นวัสดุ Metal paste ซึ่งมีส่วนผสมของสารละลายพอลิเมอร์ หรือสารที่ปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวนการผลิตให้ระเหยออกไป ในส่วนของกระบวนการนี้อาจเกิดเขม่าควันที่เกิดจากการเผาไหม้โลหะปนเปื้อน สามารถเพิ่มระบบระบายควันออก เพื่อป้องกันไม่ให้เขม่าควันกลับไปเกาะที่เซลล์แสงอาทิตย์ กรณีแผ่นเซลล์ที่ใช้ทดสอบมีขนาดใหญ่
3. Firing เป็นกระบวนการให้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600°C - 900°C แก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นกระบวนการที่สำคัญมากเพื่อให้ที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า Eutectic point ของเฟส Metal-Si ในช่วงเวลาสั้น ๆ เกิดคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดี
4. Cooling เป็นกระบวนการสุดท้ายของเตาเผา เพื่อให้ความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการแพร่ของโลหะเงินไปยังรอยต่อ อุณหภูมิอาจลดลงมาถึงอุณหภูมิห้อง หรือน้อยกว่าขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

2.2 การออกแบบเตาเผา Fast Firing

การถ่ายเทความร้อนเป็นการศึกษาถึงอัตราการถ่ายเทพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างระบบสองระบบหรือระหว่างระบบหนึ่งและสิ่งแวดล้อม เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานรูปอื่น เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบจะทำให้พลังงานในรูปความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า หรือกล่าวได้ว่าเกิดความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ขึ้นในระบบซึ่งหาได้

จากค่าการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) เมื่อเราทราบการกระจายของอุณหภูมิก็คือสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ได้ การถ่ายเทความร้อนเป็นเรื่องที่สนใจกันมากทั้งด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะงานของวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมเคมี ได้แก่ การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งได้แก่ หม้อน้ำ หม้อควบแน่น หม้อน้ำรถยนต์ กังหัน ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อวิศวกรในด้านการออกแบบ การประดิษฐ์ และการซ่อมบำรุงรักษา เพื่อประโยชน์ในด้านการประหยัดวัสดุ เชื้อเพลิง รวมไปถึงระยะเวลาดำเนินงาน การถ่ายเทความร้อนหลักอาจจำแนกได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ การถ่ายเทความร้อนโดยการพา และการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน สภาพความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางใดๆ อาจเกิดมาจากการถ่ายเทความร้อนวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีร่วมกันก็ได้ และกลไกที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนในแต่ละวิธีก็แตกต่างกัน

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำเกิดจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ อันเนื่องมาจากการชนกันโดยตรงของโมเลกุลในกรณีของไหลอยู่นิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอน ดังนั้นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีจึงนำความร้อนได้ดีด้วย ทฤษฎีเบื้องต้นได้มาจากการทดลองและสังเกตของ Biot แต่ชื่อทฤษฎีได้ตั้งชื่อของนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ Joseph Fourier โดยกล่าวว่า อัตราการนำความร้อนในทิศทางใดๆจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับการนำ และความลาดเอียงของอุณหภูมิในทิศทางนั้นแสดงตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) และแสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนำในรูปที่ 2.2

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2.1)$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2.2)$$

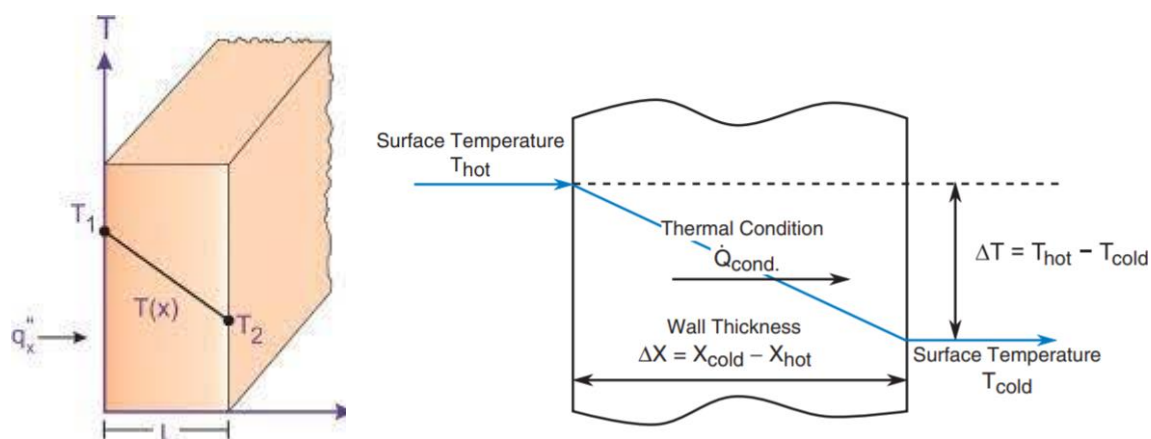
โดยที่ Q_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทในทิศทางตามแนวแกน x มีหน่วยเป็น W

q_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ในทิศทางตามแนวแกน x มีหน่วยเป็น W/m^2

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากในทิศทาง x มีหน่วยเป็น m^2

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีหน่วยเป็น $W/m^\circ C$

$\frac{\partial T}{\partial x}$ หรือ ∇T คือ ค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) มีหน่วยเป็น $^\circ K/m$



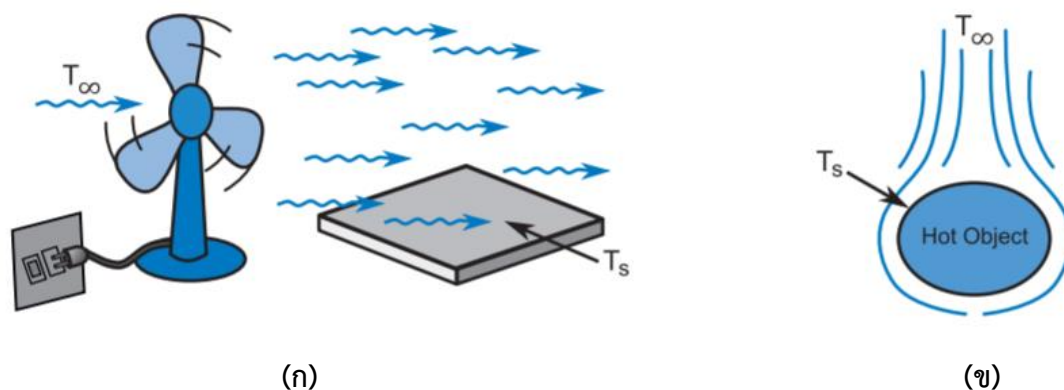
รูปที่ 2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังวัสดุหนึ่งแบบการนำแบบ one-dimension

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นเมื่อมีของไหลไหลผ่านพื้นผิวของวัตถุร้อน หรือไหลในท่อ โดยขณะนั้นอุณหภูมิของของไหลและพื้นผิววัตถุตั้งกล่าวแตกต่างกัน เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวของวัตถุ เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลสัมผัสกับพื้นผิว ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงภายนอกกระทำ เช่น มีปั๊ม หรือพัดลม ทำให้ของไหลเคลื่อนที่เรียกว่าการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convective heat transfer) แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.3(ก) แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความหนาแน่น เป็นผลมาจากการที่อุณหภูมิกายในแตกต่างกัน เรียกว่าการพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convective heat transfer) แสดงดังรูปที่ 2.3(ข) สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) สามารถแสดงตามสมการที่ (2.3) เมื่อความร้อนไหลออกจากพื้นผิวของวัตถุไปสู่ของไหล

$$Q = hA(T_k - T_\infty) \quad (2.3)$$

- เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา มีหน่วยเป็น W
- h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer Coefficient) มีหน่วยเป็น $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
- A คือ พื้นที่สัมผัสการพาความร้อน มีหน่วยเป็น m^2
- T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล มีหน่วยเป็น $^\circ C$
- T_k คือ อุณหภูมิของผิวของวัตถุ มีหน่วยเป็น $^\circ C$



รูปที่ 2.3 (ก) การพาความร้อนแบบบังคับโดยพัดลมระบายความร้อน (ข) การพาความร้อนแบบธรรมชาติรอบ ๆ วัตถุร้อน

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นอยู่กับรูปแบบของการไหล รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิวของวัตถุและกลไกของการพาความร้อน สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ลักษณะของการไหล	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, h (W/m ² K)
การพาความร้อนแบบอิสระ	
ก๊าซ	2 - 25
ของเหลว	50 - 1000
การพาความร้อนแบบบังคับ	
ก๊าซ	25 - 250
ของเหลว	50 - 20,000
การเดือดของน้ำและการกลั่นตัวของไอน้ำ	2,500 - 100,000

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเกิดขึ้นเมื่อวัตถุสองวัตถุที่มีอุณหภูมิต่างกันถูกแยกออกจากกันโดยสุญญากาศ ทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุดขณะนี้ เป็นทฤษฎีของไอสไตน์ (Einstein theory) กล่าวว่า ความร้อนเคลื่อนที่โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีความร้อนสูงสุดที่เปล่งออกมาจากวัตถุหนึ่งที่มีอุณหภูมิสูง ถูกกำหนดโดยกฎของ Stefan-Boltzmann ตามสมการที่ (2.4)

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_k^4 - T_s^4) \quad (2.4)$$

โดยที่ Q_{rad} คือ อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อม มีหน่วยเป็น W

ε คือ การแผ่รังสีของวัตถุขนาดเล็ก

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเป็น $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุเล็ก มีหน่วยเป็น m^2

T_k คือ อุณหภูมิของวัตถุ มีหน่วยเป็น K

T_s คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมรอบๆวัตถุเล็ก มีหน่วยเป็น K

2.2.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาพร้อมกับการแผ่รังสีความร้อน

บางครั้งลักษณะการถ่ายเทความร้อน เกิดจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนมากกว่าหนึ่งลักษณะ เช่น การไหลของก๊าซที่ได้จากการสันดาป การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไปสู่ผนังท่อ เป็นต้น ซึ่งเป็นการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.5)

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} = hA(T_k - T_\infty) + \varepsilon \sigma A (T_k^4 - T_s^4) \quad (2.5)$$

ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงานได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่ร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของไหลเย็น ดังสมการ (2.6)

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.6)$$

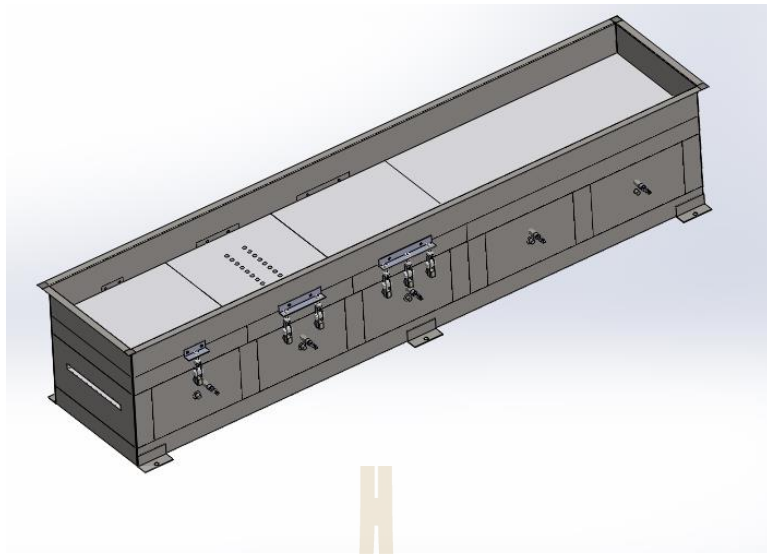
โดยที่ \dot{m} คือ อัตราการไหลของมวล (mass flow rates)

c_p คือ ความร้อนจำเพาะ

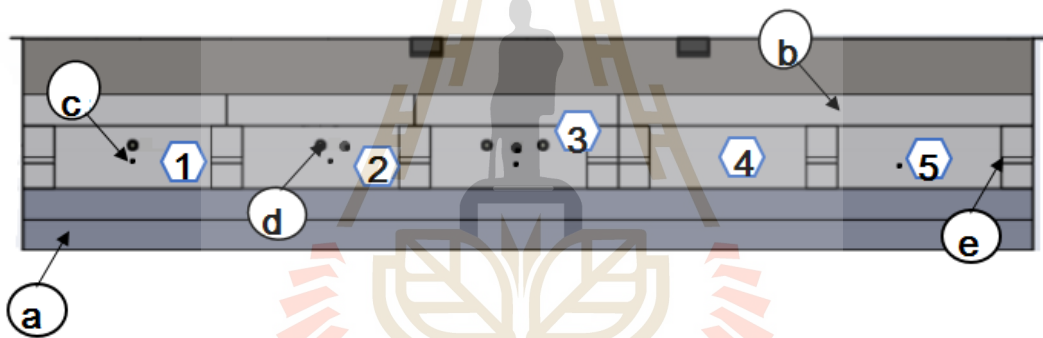
T_{out} คือ อุณหภูมิทางออก

T_{in} คือ อุณหภูมิทางเข้า

ในงานวิจัยนี้มีวิธีการคำนวณหาพลังงานที่ต้องการในเตาเผาเพื่อให้ได้ความร้อนในแต่ละโซนตามที่กำหนด โดยใช้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนเป็นหลัก โดยแสดงภาพ Isometric และภาพด้านข้างของเตา Fast firing ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ภาพ Isometric ของเตา Fast firing ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.5 ภาพด้านข้างของเตาเผา Fast firing

จากรูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเตาเผา Fast firing ประกอบด้วยโครงภายนอกทำจากแผ่นสแตนเลส และหุ้มด้วยฉนวน ตำแหน่ง (a) เป็นเซรามิกไฟเบอร์ที่มีความหนาเท่ากับ 5 cm เซรามิกไฟเบอร์เป็นแบบ Blankets ที่มีความต้านทานแรงดึงสูง นำความร้อนต่ำ และกักเก็บความร้อนต่ำ กั้นเป็นห้องทั้งหมด 5 ห้องโดยแต่ละห้องจะมีขนาดภายในเท่ากันทุกห้อง แต่ละห้องกว้าง 30 cm ยาว 27 cm และสูง 25 cm และแต่ละห้องมีการเจาะช่องแคบ ๆ เพื่อให้สายพานลำเลียงวัสดุผ่านจากตำแหน่ง (e) มีขนาดเท่ากับกว้าง 30 cm และสูง 30 cm ตำแหน่ง (c) เป็นช่องกลมสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิล มีขนาดผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 mm ตำแหน่ง (d) เป็นช่องกลมสำหรับใส่หลอดไฟ IR ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 mm ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละโซน มีการติดตั้งฉนวนภายในทำให้การถ่ายเทความร้อนที่แต่ละห้องถ่ายเทให้กันปริมาณที่น้อย โดยที่หลักการทำงานของแต่ละโซนสามารถอธิบายได้ดังนี้

โซน Preheat-Zone แบ่งเป็น 1 ห้องเรียกห้อง Drying ที่ตำแหน่ง (1) และควบคุมอุณหภูมิได้ระหว่าง 200-300°C โดยมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิล type K จำนวน 1 แห่งที่สามารถอ่านค่า

อุณหภูมิในช่วง 270 - 1372 °C โดยห้องนี้ถูกออกแบบมาเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ห้องนี้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1,000 วัตต์ กำหนดเวลาให้ห้องนี้ทำการอบวัสดุที่ระยะเวลา 10 วินาที จึงเลือกใช้ความร้อนด้วยหลอดไฟ IR จำนวน 1 หลอด ขนาด 1000 วัตต์

กลุ่ม Heat-Zone แบ่งออกเป็น 2 ห้อง คือห้อง Burning และห้อง Firing โดยที่ห้อง Burning ที่ตำแหน่ง (2) และควบคุมอุณหภูมิที่ 500 - 600°C โดยมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิล type K จำนวน 1 แห่ง โดยที่ห้องนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเผาไหม้สารอินทรีย์หรือสารที่ปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวนการผลิตออก และในส่วนของห้องนี้จะเกิดเขม่าควันที่เกิดจากการเผาไหม้ จึงต้องมีการระบายควันในห้องนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้เขม่าควันกลับไปเกาะที่เซลล์แสงอาทิตย์อีก โดยที่ฉนวนของห้องนี้ถูกเจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 mm จำนวน 6 รูเพื่อระบายควัน โดยที่ห้องนี้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 2,000 วัตต์ ในห้องนี้ทำการเผาที่ระยะเวลา 10 วินาที ห้องนี้เลือกใช้หลอดไฟ IR ขนาด 1000 วัตต์จำนวน 2 หลอด และห้อง Firing ที่ตำแหน่ง (3) และควบคุมอุณหภูมิที่ 800 - 950°C มีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิล type K จำนวน 1 แห่ง ห้องนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเผาขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้อะตอมโลหะซึมลงไปบนเซลล์ที่บริเวณผิวต้น ๆ โดยที่ห้องนี้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนเท่ากับ 3,000 วัตต์ ห้องนี้ทำการเผาที่ระยะเวลา 10 วินาที ห้องนี้จึงเลือกใช้หลอดไฟ IR ขนาด 1000 วัตต์จำนวน 4 หลอด หรือใช้หลอดไฟ IR ขนาด 2,000 วัตต์ จำนวน 3 หลอด

กลุ่ม Cooling-Zone โซนนี้แบ่งออกเป็น 2 ห้อง ที่ตำแหน่ง (4, 5) เพื่อไม่ให้อุณหภูมิลดลงรวดเร็วจนเกินไป และใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบ Natural Convection ดังนั้นจึงไม่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อช่วยลดอุณหภูมิ จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่า Cooling Zone สามารถลดอุณหภูมิจากห้อง Firing ที่มีอุณหภูมิ 900°C ให้เหลือ 100°C ได้ในเวลาอันสั้น โดยในโซนนี้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ห้องสุดท้ายที่ตำแหน่ง (4)

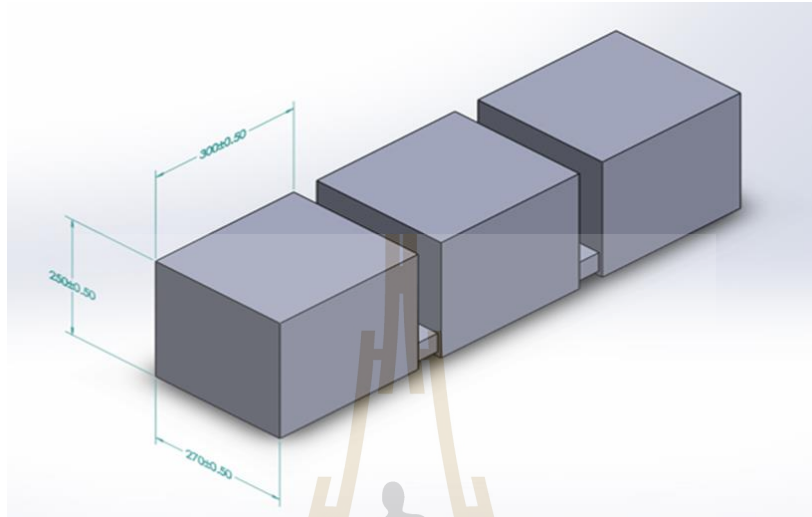
จากการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในสมการที่ (2.7) พิจารณาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$Q = mc_p \Delta T / t \quad (2.7)$$

โดยมีเงื่อนไขของการออกแบบคำนวณดังนี้

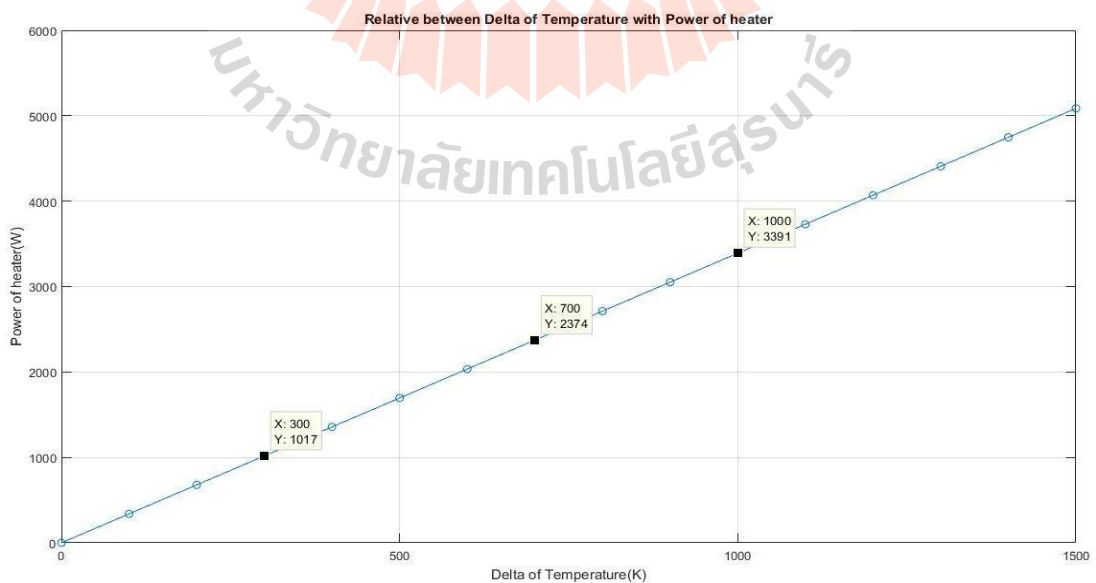
- ระบบที่พิจารณาเป็นระบบปิด
- โซนที่ 1 ผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ 300 °C
- โซนที่ 2 ผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ 500 °C
- โซนที่ 3 ผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ 900 °C
- ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบและเข้าระบบ

- คุณสมบัติของอากาศไม่มีการเปลี่ยนแปลง กำหนด $\rho_{\text{air}} = 1.164 \text{ kg/m}^3$ และ $c_p = 1007 \text{ J/kg K}$
- ทุกโซนมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง = $0.30 \times 0.27 \times 0.25$ เมตร ดังรูปที่ 2.6

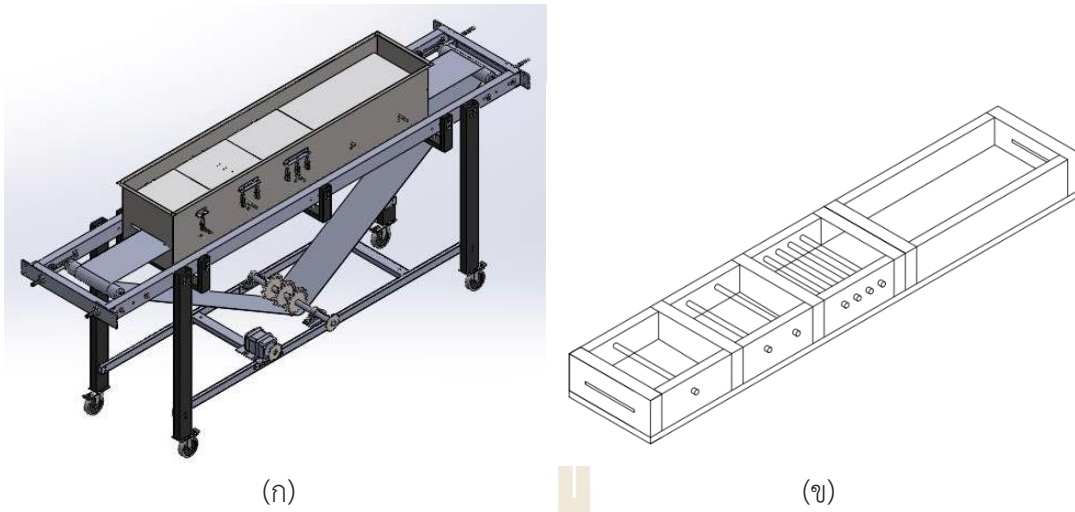


รูปที่ 2.6 กำหนดลักษณะและขนาดของแต่ละโซน สำหรับคำนวณหาพลังงาน

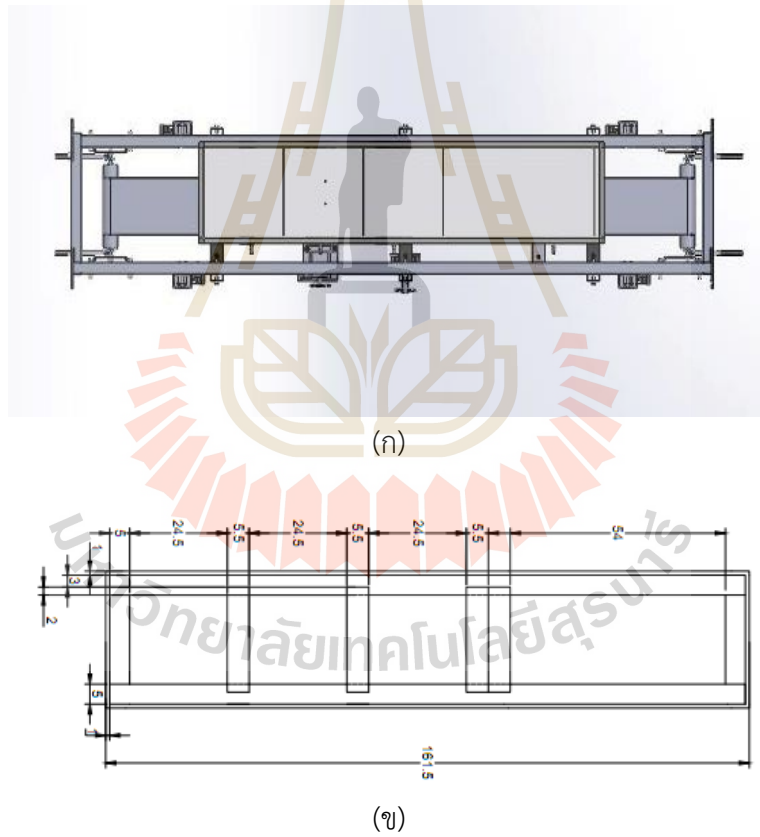
จากข้อมูลเบื้องต้นสามารถคำนวณหาพลังงานที่ต้องการเทียบกับอุณหภูมิได้แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.7 และรายละเอียดรูปแบบเตาเผา Fast Firing แสดงดังรูปที่ 2.8 - 2.10



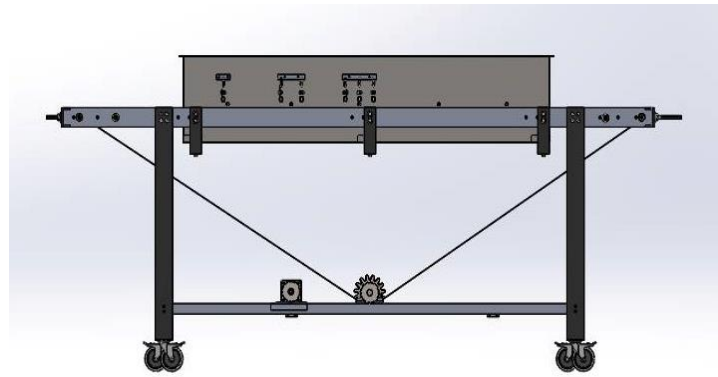
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับอุณหภูมิ



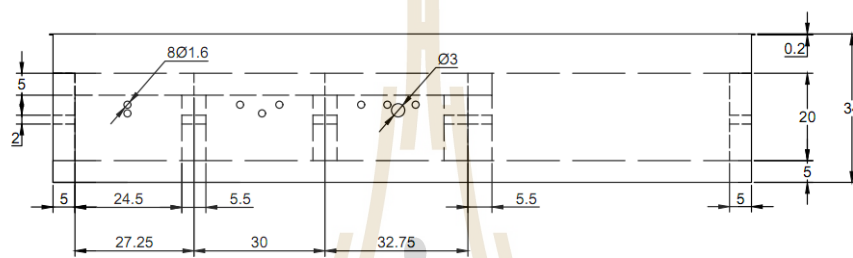
รูปที่ 2.8 Drawing Isometric ของโครงสร้างเตาเผา Fast Firing (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน



รูปที่ 2.9 โครงสร้างเตาเผา Fast Firing จากมุมมองด้านบน (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 โครงสร้างเตาเผา Fast Firing จากมุมมองด้านข้าง (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน

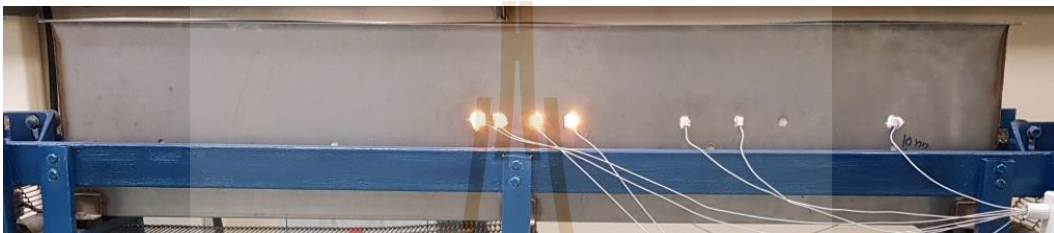
บทที่ 3

ส่วนประกอบของเตาเผา Fast Firing ต้นแบบ

3.1 โครงสร้างของเตาเผา Fast Firing

- ห้องเตาเผาผนัง Fiber Alumina

ในส่วนของเตาเผา Fast Firing ประกอบด้วย 4 ห้อง ใช้ผนังเตาด้วยแผ่น Fiber Alumina หนา 5 เซนติเมตร มีช่องเพื่อให้สายพานลำเลียงชิ้นงานผ่านได้ โครงสร้างของเตาเผาแสดงดังรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ห้องเตาเผาผนัง Fiber Alumina (ก) ภายนอกและ (ข) ภายใน

- มอเตอร์ขับเคลื่อนสายพาน

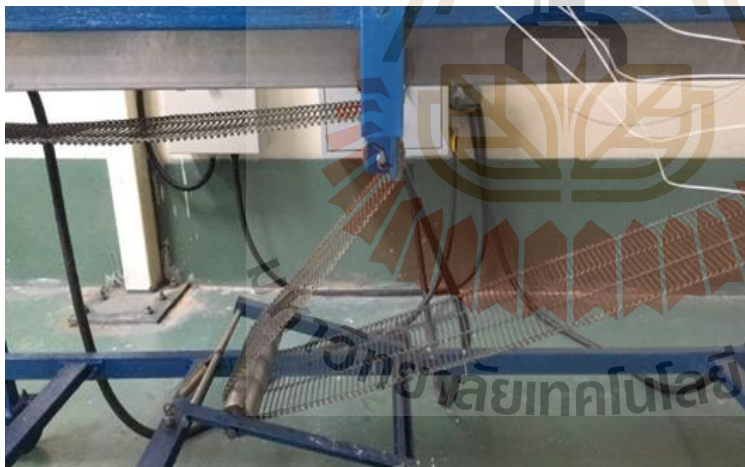
มอเตอร์ที่ใช้งานในระบบเลือกใช้ชนิดสเตปปิ้งมอเตอร์ (Stepping motor) รุ่น 86HS85 ชนิด 2 เฟสแรงบิดสูง NEMA34 กระแส 6A แรงบิด 8.5 N.m แสดงการยึดมอเตอร์ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Stepping Motor

- สายพานลำเลียง

สายพานที่ใช้เป็นชนิดสแตนเลส SST 2080 ทนความร้อนได้สูงถึง 1200 องศาเซลเซียส สำหรับลำเลียงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบเตาเผา Fast Firing และใช้ท่อลูกกลิ้ง 2 ชุดรับรองสายพาน แสดงในรูปที่ 3.3 และใช้เบรคเป็นตัวกดสายพานทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อลดการสั่นของสายพานและป้องกันไม่ให้สายพานกระทบกับขอบทางเข้า แสดงดังรูปที่ 3.4



(ก)



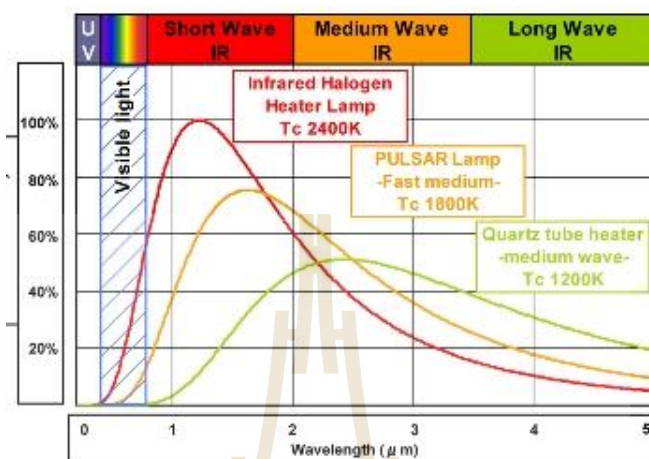
(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) สายพานที่ใช้ในระบบลำเลียง และ (ข) ท่อลูกกลิ้งรับรองสายพาน

- หลอดไฟอินฟราเรดคลื่นสั้น

หลอดไฟที่ใช้ในระบบเป็นหลอดอินฟราเรดคลื่นสั้น (IR lamp) แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีของหลอด IR ในรูปที่ 3.4 ในงานนี้ได้เลือกใช้ขนาด 1,000 และ 2,000 วัตต์ โดยแต่ละห้องจะมีจำนวนหลอดไฟไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการในแต่ละห้อง โดยห้องที่ 1 จะใช้อุณหภูมิประมาณ 100 - 300°C จึงใช้

หลอดไฟ IR 1,000 วัตต์ จำนวน 1 หลอด ห้องที่ 2 จะใช้อุณหภูมิประมาณ 300 - 600°C จึงใช้หลอดไฟ IR 1,000 วัตต์ จำนวน 2 หลอด และห้องที่ 3 จะใช้อุณหภูมิประมาณ 800 - 900°C จึงใช้หลอดไฟ IR 1,000 วัตต์ จำนวน 4 หลอด หรือใช้หลอดไฟ IR 2,000 วัตต์ จำนวน 3 หลอด แสดงภาพหลอด IR ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 สเปกตรัมการแผ่รังสีของหลอด IR



รูปที่ 3.6 หลอดไฟ IR short wavelength

- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้คือ Type K โดยทำจากส่วนประกอบของวัสดุ Chromel - Alomel มีให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ออุณหภูมิอยู่ที่ $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ใช้สำหรับงานวัดอุณหภูมิสูง โดยมีย่านการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -200°C ถึง $+1350^{\circ}\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 3.7 ห้องอบ Drying zone และ Burning zone ใช้เทอร์โมคัปเปิลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 cm. ในพิกัด 600°C แต่ห้องอบ Firing ใช้เทอร์โมคัปเปิลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 cm. ในพิกัด 1200°C



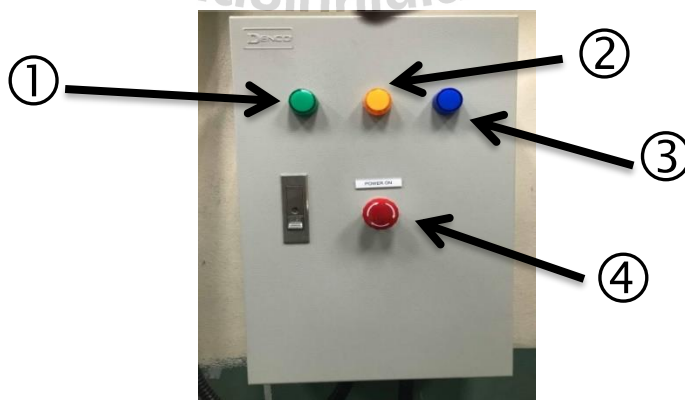
รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิล Type K

3.2 ระบบไฟฟ้าของเตาเผา Fast Firing

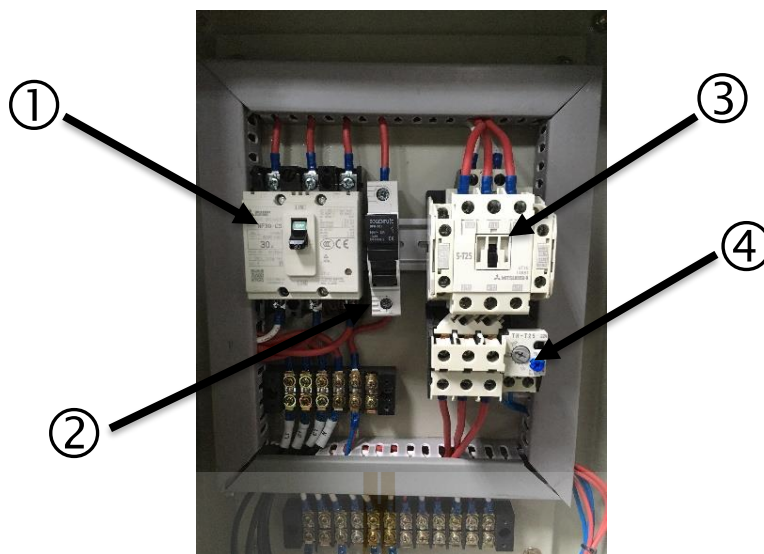
เตาเผา Fast Firing ใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่นมอเตอร์ และหลอดไฟ IR เพื่อควบคุมความเร็วของสายพานลำเลียง และการสั่งให้หยุดเพื่อให้ชิ้นงานแช่ไฟในแต่ละห้องตามเวลาที่ต้องการ และส่วนของระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID เพื่อกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการจากการควบคุมการทำงานของหลอดไฟ IR โดยที่ระบบไฟฟ้าของเตา Fast Firing มีส่วนประกอบดังนี้

- ตู้จ่ายไฟ

Load Panel หรือแผงวงจรย่อยจะรับไฟจากตู้จ่ายไฟ หรือ MDB (Main Distribution Board) เพื่อจ่ายไฟไปยังโหลดต่าง ๆ ในระบบ โดยผ่าน Circuit breaker ในตู้จ่ายไฟของเตาเผา Fast Firing ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น Circuit Breaker, fuse, Magnetic contactor และ Overload relay เป็นต้น ด้านหน้าของตู้จ่ายไฟมีอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 3.8 โดยที่หมายเลข 1, 2 และ 3 คือ หลอดไฟ LED ที่แสดงสถานะการทำงานของเตาเผา Fast Firing และหมายเลข 4 คือ ปุ่ม Emergency switch เพื่อหยุดการทำงานของเตาเผา Fast Firing ทั้งหมดแบบฉุกเฉิน



รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์ต่าง ๆ บริเวณหน้าตู้จ่ายไฟ



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้จ่ายไฟ

รูปที่ 3.9 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้จ่ายไฟ ซึ่งประกอบด้วย

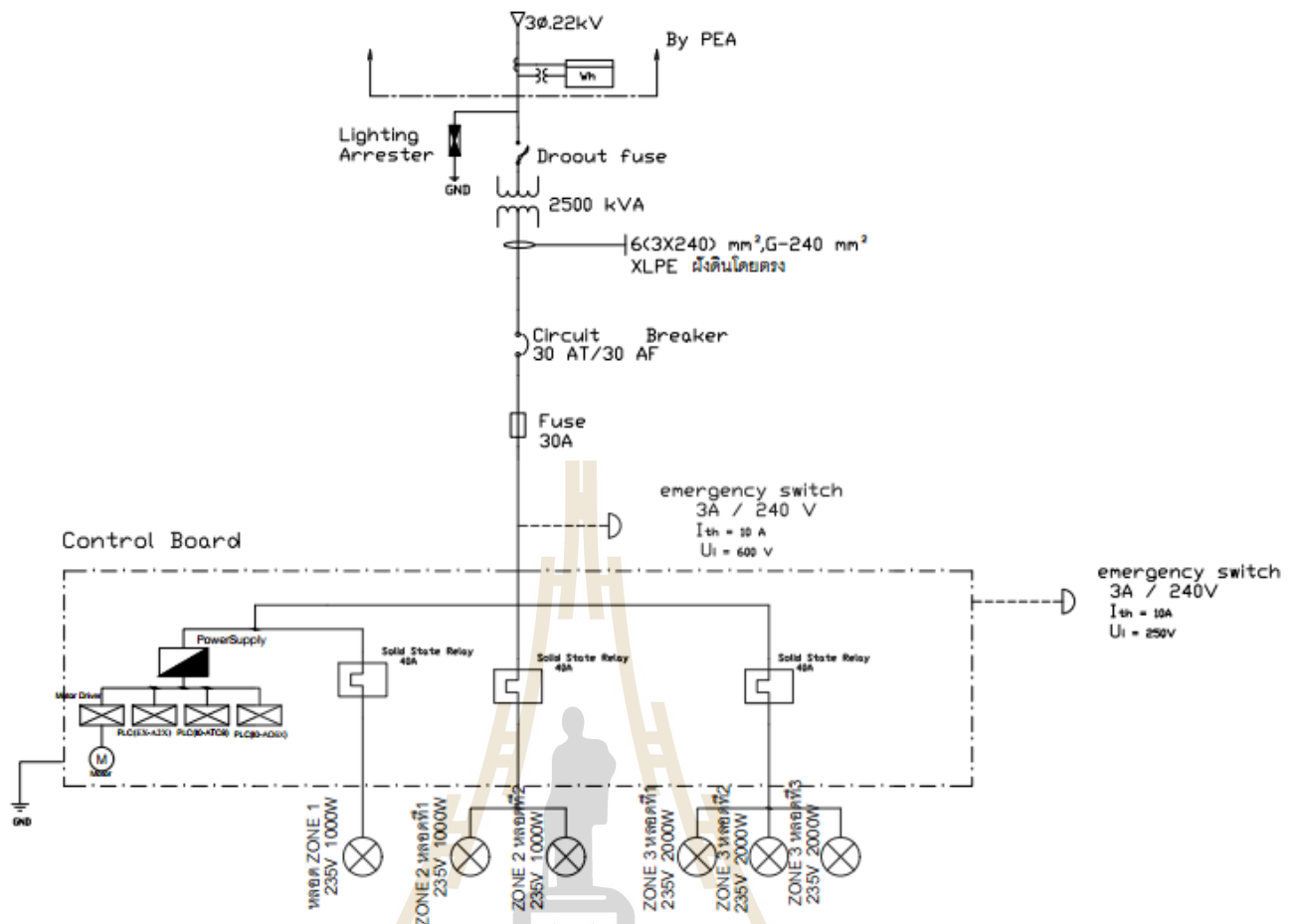
1. Circuit Breaker (MCCB) รุ่น NF30-CS คือ เบรกเกอร์ชนิดตัดตอนอัตโนมัติ มีชนิด 2P, 3P เหมาะสำหรับติดตั้งในอาคารสำนักงาน โกดัง หรือเป็นเบรกเกอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ ของ NF30-CS 30A ชนิด 2P มีค่า $I_c = 2.5 \text{ kA}$

2. ฟิวส์ (Fuse) คือ อุปกรณ์ป้องกันวงจรไฟฟ้าจากการที่มีกระแสไหลผ่านวงจรมากเกินไป (Overload Current) หรือเกิดไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่มากกว่า กระแสที่ฟิวส์ทนได้ (Current Rating)

3. แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) คือ อุปกรณ์สวิตช์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า เพื่อ การเปิด - ปิดของหน้าสัมผัส (Contact) ทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยในการเปิด-ปิด หน้าสัมผัส ในการตัดต่อวงจรไฟฟ้า เช่น เปิด - ปิด การทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์ นิยมใช้ในวงจร ของระบบแอร์ ระบบควบคุมมอเตอร์ หรือใช้ในการควบคุมเครื่องจักรต่างๆ โดยแมกเนติกคอนแทคเตอร์ จะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญต่อการทำงานได้แก่ แกนเหล็ก (Core) ขดลวด (Coil) และหน้าสัมผัส (Contact)






4. Overload Relay รุ่น TH-T25 คือ อุปกรณ์ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกำลังหรือใช้ป้องกัน มอเตอร์ไม่ให้เกิดความเสียหาย เมื่อมีกระแสไหลเกินพิกัด

Single Line diagram ทางไฟฟ้าของเครื่อง Fast Firing แสดงดังรูปที่ 3.10 และรายละเอียดของ โหลดภายใน Control Board แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.10 Single line diagram ระบบไฟฟ้าสามเฟสของเตาเผา Fast Firing

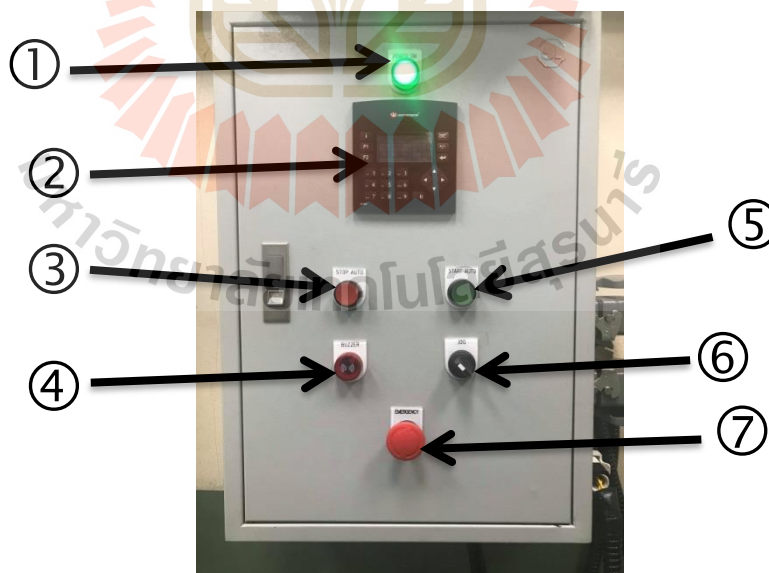
ตารางที่ 3.1 โหลดภายใน Control Board

ชื่อ	สัญลักษณ์	รายละเอียด
Circuit Beaker		รุ่น NF30-CS, ขนาด 30A, ชนิด 2P, $I_c = 2.5$ kA
Fuse		ใช้ของ Bogen fuse, แรงดันที่ทนได้ 690V 32A
Power supply		แรงดันไฟฟ้าเข้า: 100V - 120V / 200V - 220V แรงดันขาออก: 24V _{ac} กระแสขาออก: 0 - 10A
Motor driver		รุ่น M880A
Stepping motor		รุ่น 86HS85 ชนิด 2 เฟส แรงบิดสูง, กระแส 6A, แรงบิด 8.5Nm

ชื่อ	สัญลักษณ์	รายละเอียด
PLC	☒	รุ่น EX-A2X ตัวควบคุมหลัก
PLC	☒	รุ่น IO-ATC8 ตัวควบคุมอุณหภูมิ
PLC	☒	รุ่น IO-AOBX ตัวแปลงสัญญาณให้ Solid state relay
Solid state relay	☑	ทั้ง 3 ตัว ใช้ขนาด 40A
หลอดไฟ IR	⊗	จะมีทั้งหมด 2 แบบ 1,000W และ 2,000W 235V

- ตู้ควบคุม

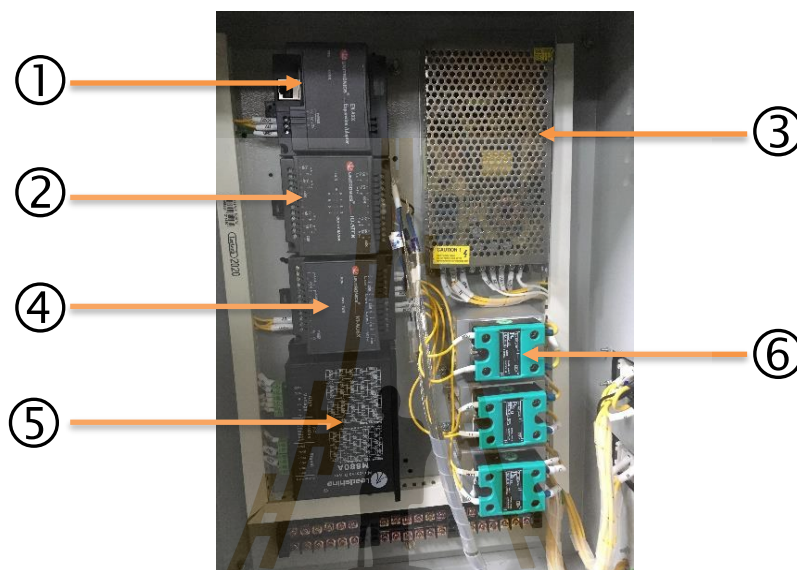
ตู้ควบคุมจะรับแรงดันไฟฟ้าจากตู้จ่ายไฟเข้ามาผ่าน Power Supply ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจึงจ่ายแรงดันไฟไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ อุปกรณ์ด้านหน้าตู้ และภายในตู้ แสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.11 ตู้ควบคุมระบบการทำงานของเครื่อง Fast Firing

1. หลอด LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่อง Fast Firing
2. หน้าจอควบคุมการทำงานและแสดงผลของเครื่อง Fast Firing

3. ปุ่มหยุดการทำงานชั่วคราวของเครื่อง Fast Firing
4. Buzzer เป็นลำโพงที่ให้เสียงเพื่อให้เริ่มใส่ชิ้นงานลงบนสายพาน
5. ปุ่มกดเริ่มการทำงานของเครื่อง Fast Firing
6. ปุ่มควบคุมสายพานให้ทำงานเพียงอย่างเดียว และ OFF ในส่วนของ heating
7. ปุ่ม Emergency switch กดเพื่อหยุดการทำงานของผู้ควบคุมทั้งหมดแบบฉุกเฉิน



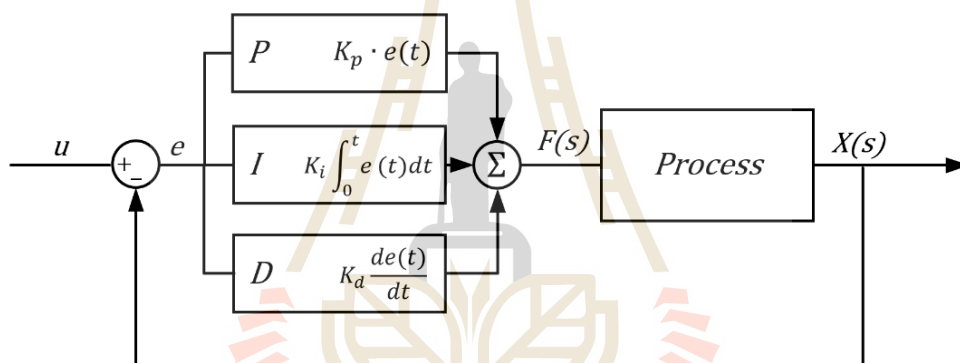
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุม

1. PLC รุ่น EX-A2X เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่างๆ โดยภายในมี Microcontroller สำหรับสั่งการที่สำคัญของ PLC
2. PLC รุ่น IO-ATC8 เป็นตัวรับค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลแล้วส่งค่าที่ได้ไปที่หน้าจอแสดงผล
3. Power supply ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นปรับแรงดันและส่งออกขนาด 24 V ไปยังอุปกรณ์อุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการ
4. PLC รุ่น IO-AO6X เป็นตัวขยาย Input/Output จาก PLC สามารถต่อร่วมกับ PLC 1 ตัว ได้มากถึง 8 I/O Expansion Modules สามารถใช้ร่วมกับ PLC รุ่น M90/M91 และ Vision Series
5. Micro-step Driver รุ่น M880A เหมาะสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่ สามารถใช้กับเครื่องต่างๆ เช่น เครื่องตัดฉลาก, เครื่องตัดเลเซอร์, เครื่องแกะสลัก, อุปกรณ์รับและอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับให้เข้ากับแอปพลิเคชันที่ต้องการความร้อนต่ำ ความเร็วสูงและความแม่นยำสูง
6. Single Phase Solid State Relay จำนวน 3 ตัว โดย PS-Series (Single Phase Solid State Relay) เมื่อมีสัญญาณ Input เข้ามา ตามย่านของแรงดัน Output ไม่มีหน้าสัมผัสจึงทำให้ไม่มีการ

อาร์คเหมาะกับการที่มีการ ON/OFF บ่อย ๆ มีให้เลือกทั้งแบบที่ใช้กับ Resistive Load เช่น Heater หลอดไฟและ Inductive Load เช่น Motor เป็นต้น สามารถใช้ทดแทน Magnetic Contactor ได้ ซึ่งให้อายุการใช้งานที่นานกว่า เนื่องจากมีการตัดต่อบ่อยครั้งและรับกระแสสูง ดังนั้นการติดตั้ง Solid State Relay ต้องติดตั้งร่วมกับ Heat Sink เพื่อระบายความร้อน

ในการทดลอง เมื่อนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการแล้ว สิ่งหนึ่งที่สำคัญคือ การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามที่กำหนด เพื่อให้ได้คุณภาพการแพะซึมของขั้วโลหะ การออกแบบห้องฉนวนที่ดีเพื่อรักษาอุณหภูมิคงที่และลดการสูญเสียความร้อนจากภายในสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก จึงต้องมีการติดตั้งตัวควบคุมที่ทำให้อุณหภูมิลับสู่ค่าที่ต้องการและไม่เกิดการแกว่งของอุณหภูมิมากเกินไป โดยเลือกใช้วิธี PID Control

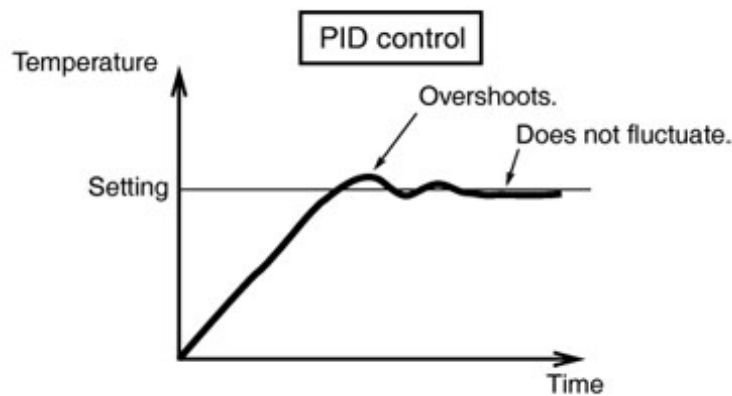
การควบคุมแบบ PID เป็นการควบคุมแบบระบบวงปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Close Loop Control System หรือ Feedback Control System) โดยการควบคุม PID แสดง Block diagram ดังรูปที่ 3.13 มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 3.13 Block diagram ของ PID control

1. P-Proportional control action เป็นการกำหนดการทำงานของ Output ให้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์กับค่า Error หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ ซึ่งในทางปฏิบัติ ค่า P จะเข้าใกล้ค่าหนึ่งที่ไม่เท่ากับ Set Point หรือเรียกค่า Offset

2. I-Integral Control Action เป็นระบบควบคุม I จะเข้าไปจัดการกับค่า Offset ให้เข้าสู่ Set Point โดยค่า Output ที่ได้จะขึ้นอยู่กับ Integral Time ที่ถูกกำหนดมาในช่วงแรก หากกำหนดให้ Integral Time น้อย ก็จะสามารถเข้าสู่ Set Point ได้อย่างรวดเร็ว แต่จะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิมากขึ้นด้วย และหากกำหนด Integral Time มาก ก็จะมีการแกว่งของอุณหภูมิน้อย แต่จะเข้าสู่ Set Point นานขึ้นด้วย แสดงพฤติกรรมดังกล่าวได้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การแกว่งของอุณหภูมิก่อนจะเข้าใกล้ Set Point

3. D-Derivation Control System ในกรณีที่ระบบมีการรบกวนจากภายนอก (Disturbance) ทำให้อุณหภูมิภายในห้องมีการเปลี่ยนแปลง จึงต้องมีการควบคุมแบบ D เพื่อทำให้ระบบกลับเข้าสู่ Set Point ได้อย่างรวดเร็ว และที่สถานะคงตัวของระบบ สามารถหาค่าตัวแปรของ PID ได้จากสมการที่ (3.1)

$$Y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

โดยที่ $Y(y)$ คือสัญญาณ Output ของตัว Controller ณ เวลา t ใดๆ

K_p คือค่า Proportional Gain

K_i คือค่า Integral Gain

K_d คือค่า Derivation Gain

E คือค่า Error

T คือเวลา

τ คือผลรวมของตัวแปร Error ตั้งแต่ $0-t$

การตั้งค่า PID เครื่อง Fast Firing ในแต่ละห้องมีการใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน การปรับตั้ง PID จึงต้องมีความแตกต่างกันด้วย ตัวอย่างค่าที่เซตอุณหภูมิแสดงในตาราง 3.2 ซึ่งในบางห้องหรือบางอุณหภูมิที่มีการใช้หลอดไฟ IR มากเกินไป ทำให้มีความร้อนที่สูงเกินกว่าที่ PID จะสามารถควบคุมได้ จึงต้องมีการลดการทำงานของหลอดไฟ IR ลงเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ

ตารางที่ 3.2 ค่า PID ของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	P	I	D	จำนวนหลอด IR
890	83	8	800	2
900	83	8	800	2
910	70	10	717	2
930	70	8	717	3
950	70	8	717	3

ดังนั้นระบบการควบคุมอุณหภูมิของเครื่อง Fast Firing ที่ใช้ระบบ PID ในการควบคุม ซึ่งสามารถอุณหภูมิเข้าสู่ค่าที่กำหนดได้อย่างแม่นยำและมีความรวดเร็ว ซึ่งในบทความต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบอุณหภูมิของเครื่อง Fast Firing ที่ออกแบบสร้างขึ้นในงานนี้



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาเผา Fast Firing

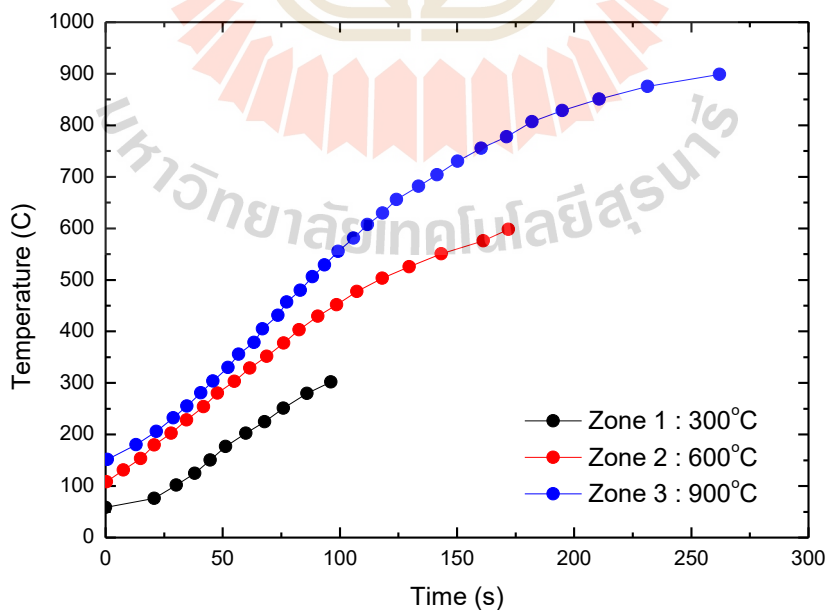
ในการทดสอบอุณหภูมิของแต่ละห้องภายในเตาเผา Fast firing ได้กำหนดอุณหภูมิของห้องที่ 1 2 และ 3 เป็น 300°C, 600°C และ 900°C ตามลำดับโดยผลการทดสอบพบว่า

ห้องที่ 1 กำหนดอุณหภูมิที่ 300°C เมื่อเปิดการทำงานของเตาเผา พบว่าใช้เวลา 1 นาที 36 วินาที ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด

ห้องที่ 2 กำหนดอุณหภูมิที่ 600°C หลอด IR ในห้องที่ 2 จะทำงานเมื่ออุณหภูมิห้องที่ 1 มีค่าที่ 70% ของอุณหภูมิที่กำหนด พบว่าใช้เวลา 2 นาที 52 วินาที ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด

ห้องที่ 3 กำหนดอุณหภูมิที่ 900°C หลอด IR ในห้องที่ 3 จะทำงานเมื่ออุณหภูมิห้องที่ 2 มีค่าที่ 70% ของอุณหภูมิที่กำหนด เมื่อเปิดการทำงานของเตาเผา พบว่าใช้เวลา 4 นาที 22 วินาที ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิในห้องเผา Fast firing ในโซน 1 2 และ 3 ที่กำหนดและเวลาที่ใช้ในกระบวนการที่ให้อุณหภูมิคงที่ตามที่เซตไว้ จากผลพบว่าเวลาที่ใช้ในแต่ละโซนของเครื่อง Fast Firing ให้ระยะเวลาที่สั้น เหมาะสำหรับการเริ่มกระบวนการอบแบบ Fast Firing ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์

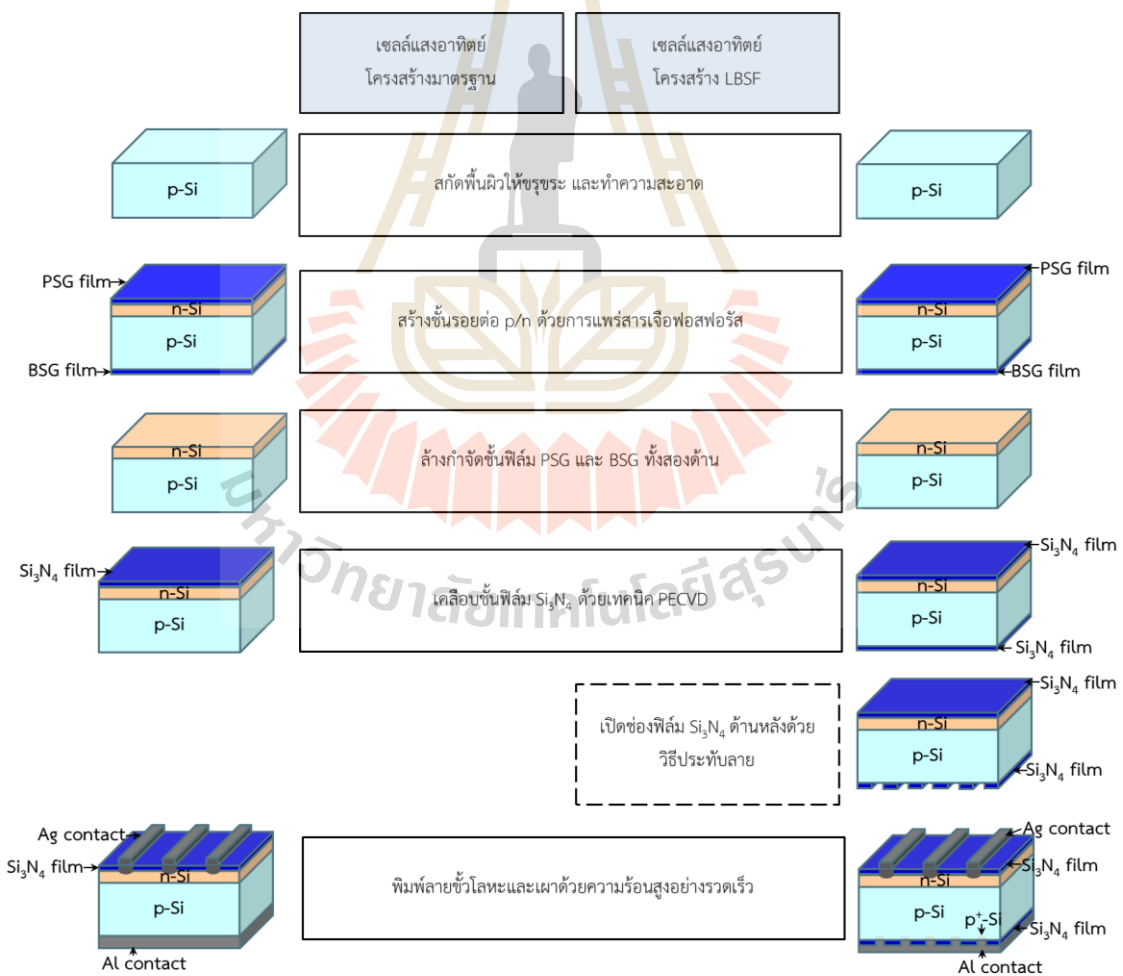


รูปที่ 4.1 โปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในห้องต่าง ๆ เวลาที่ใช้เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ

4.2 ผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการ Fast Firing

การทดสอบนี้ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนหลายผลึกขนาด $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ ชนิด p-type (mc-Si) ที่เจือด้วยโบรอน มีความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง $1 - 3 \Omega\text{ cm}$ ที่ความหนา $200 \mu\text{m}$ จากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างมาตรฐาน Back Surface Field (BSF) และโครงสร้าง Local back surface field (LBSF) ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มด้านหลัง ด้วยวิธีประทับลาย ซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คิดค้นขึ้น และยื่นจดสิทธิบัตร โดยจะนำมาอบด้วยระบบ Fast Firing เพื่อหาเงื่อนไขของเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม

การเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มด้านหลังกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่ามีขั้นตอนที่แตกต่างกันเพียงการเปิดช่องชั้นฟิล์มด้านหลังด้วยวิธีการประทับลาย



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF เปรียบเทียบกับโครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มด้านหลัง

ในขั้นตอนแรก แผ่น mc-Si ได้ผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิวให้ขรุขระและทำความสะอาดพื้นผิว หลังจากนั้นสร้างชั้นรอยต่อ p/n ด้วยการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในสถานะก๊าซ เพื่อให้ได้ชั้น n-Si ที่มีค่าความต้านทานแผ่นประมาณ 100 - 110 โอห์มต่อพื้นที่ จากนั้นกำจัดฟิล์มซิลิเกตของฟอสฟอรัส (Phosphor-silicate glass PSG) และฟิล์มซิลิเกตโบรอน (Borosilicate glass BSG) ที่เกิดขึ้นขณะการแพร่สารเจือที่ความร้อนสูง จากนั้นทำการเคลือบชั้นฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ (SiN_x) ด้วยเทคนิค PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) เพื่อให้ได้ฟิล์มบาง SiN_x ที่มีความหนา 80 - 85 นาโนเมตร และมีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็น 2.08 - 2.10 โดยเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF จะทำการเคลือบชั้นฟิล์มทั้งสองด้านและเปิดช่องชั้นฟิล์มด้านหลัง ลวดลายเส้นขนาด 250 μm โดยการประทับลายด้วยสารละลาย HF5% เป็นเวลา 2 นาที และทำความสะอาดด้วยวิธี RCA จากนั้นสร้างขั้วโลหะลวดลายกริดด้วยโลหะเงิน (Ag) ที่ด้านหน้ารับแสง และด้านหลังทั้งพื้นที่จากโลหะอะลูมิเนียม (Al) โดยใช้เทคนิคพิมพ์ลาย และผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วด้วยเตาเผา Fast firing ที่เงื่อนไขต่างกันภายใต้ความดันบรรยากาศ เพื่อให้เกิดสมบัติแบบโอห์มมิคที่ติระหว่างรอยสัมผัสขั้วโลหะกับแผ่น mc-Si และให้ความต้านทานไฟฟ้ารอยสัมผัสมีค่าต่ำ

โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาแช่ไฟภายในแต่ละห้อง ได้แก่ ห้องที่ 1 อุณหภูมิ 300°C แช่ไฟเป็นเวลา 10 วินาที ห้องที่ 2 อุณหภูมิ 600°C แช่ไฟเป็นเวลา 10 วินาที และห้องที่ 3 จะศึกษาเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาที่ 890 °C 910 °C และ 930°C และในแต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิได้มีเงื่อนไขปรับเปลี่ยนเวลาการแช่ไฟเป็น 7 10 15 และ 20 วินาที ตามลำดับ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบของโครงสร้าง LBSF ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 4.3 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสงเทียม

ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์วัดด้วยเครื่องระบบจำลองแสงอาทิตย์ Photo emission technology (Solar simulator) Model #SS100AAA เครื่องวัดสัญญาณและตัวจ่าย

ไฟฟ้า Precision source ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น B2901A และโปรแกรม Agilent B2900A Quick IV Measurement ที่สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 4.3 ภายใต้การจำลองแสงสเปกตรัม AM1.5 มีความเข้มของแสงมาตรฐานเท่ากับ 1000 W/m^2

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ โดยแสดงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) กระแสไฟฟ้ลัดวงจร (J_{sc}), ฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพ (η) พบว่าที่อุณหภูมิ 910°C เวลาแช่ไฟ 7 วินาที จะได้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 11.42%

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ โดยแสดงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) กระแสไฟฟ้ลัดวงจร (J_{sc}), ฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพ (η) พบว่าที่อุณหภูมิ 910°C เวลา 7 วินาที จะได้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ได้แก่ 11.26%

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิของการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์คือ 910°C ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด ที่อุณหภูมิ 890°C จะมีประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปส่งผลให้การเกิด BSF ได้ช้า การนำไฟฟ้าจึงต่ำ ส่วนอุณหภูมิ 950°C จะมีประสิทธิภาพที่ลดลง เนื่องจากสามารถเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro cracks) หรือการโก่งงอ (Bend) ของแผ่น mc-Si ได้จากอุณหภูมิที่สูงมากเกินไป

เมื่อพิจารณาที่เวลาของการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์คือ 7 วินาที ซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพจะลดลงในทุกอุณหภูมิ เนื่องด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและค่าฟิลแฟคเตอร์ที่ลดลง โดยเวลาที่น้อยจะลดการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination) เป็นผลมาจากการลดลงของความเค้นของแผ่น mc-Si ที่เกิดจากความร้อนสูงมากเกินไปและลดความเปื่อยเบนของอุณหภูมิและการสั้นของพาหะ ส่งผลให้ค่า V_{oc} , FF และ η สูงขึ้น

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าค่า V_{oc} มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความเครียดของแผ่น mc-Si ที่เกิดจากความร้อนสูงมากเกินไป ส่วนอุณหภูมิมิผลต่อค่า V_{oc} เล็กน้อย

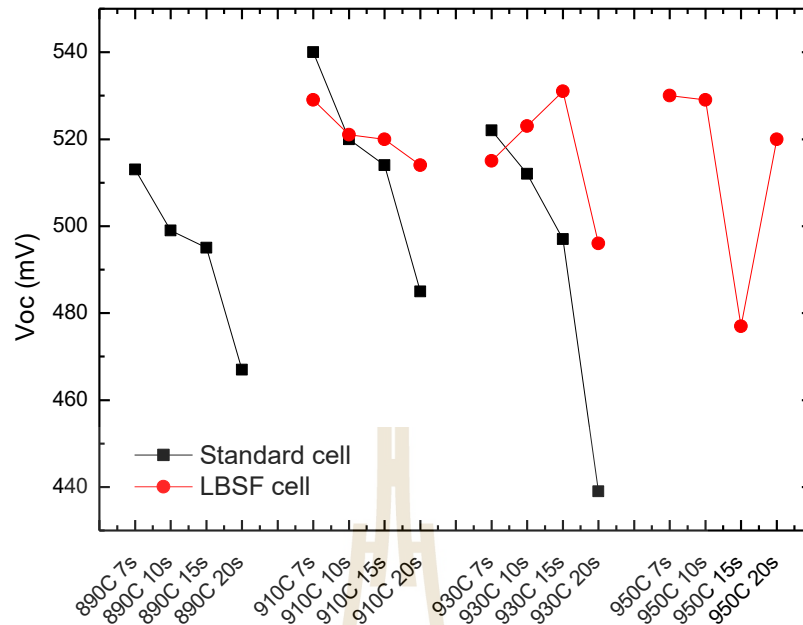
จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าค่า FF มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น โดยเวลาที่น้อยที่สุดจะให้ค่า FF ที่สูงที่สุด และที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่า FF ที่สูงที่สุด

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

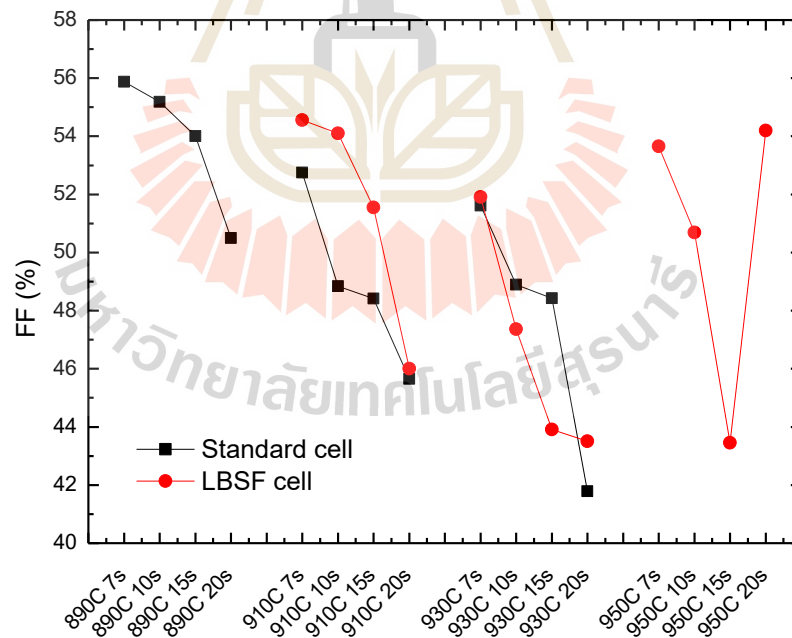
โครงสร้าง	เงื่อนไข	อุณหภูมิ (°C)	เวลาแช่ไฟ (sec)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA)	FF (%)	η (%)
BSF	A1	890	7	513	37.2	55.88	10.66
	A2		10	499	35.9	55.18	10.24
	A3		15	495	36.8	54.00	9.84
	A4		20	467	37.2	50.50	8.77
	B1	910	7	540	40.1	52.75	11.42
	B2		10	520	42.1	48.84	10.69
	B3		15	514	42.7	48.42	10.63
	B4		20	485	39.7	45.65	8.79
	C1	930	7	522	41.4	51.61	11.15
	C2		10	512	43.1	48.89	10.79
	C3		15	497	42.8	48.43	10.3
	C4		20	439	44	41.78	8.07

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

โครงสร้าง	เงื่อนไข	อุณหภูมิ (°C)	เวลาแช่ไฟ (sec)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA)	FF (%)	η (%)	
LBSF	D1	910	7	529	39.0	54.56	11.26	
	D2		10	521	39.1	54.10	11.02	
	D3		15	520	40.5	51.55	10.86	
	D4		20	514	41.2	46.00	9.74	
	E1	930	7	515	40.0	51.91	10.69	
	E2		10	523	39.3	47.36	9.73	
	E3		15	531	39.9	43.91	9.30	
	E4		20	496	39.1	43.50	8.44	
	F1	950	7	530	39.7	53.66	11.24	
	F2		10	529	40.0	50.69	10.73	
	F3		15	477	38.5	43.46	7.98	
	F4		20	520	39.7	54.20	11.19	

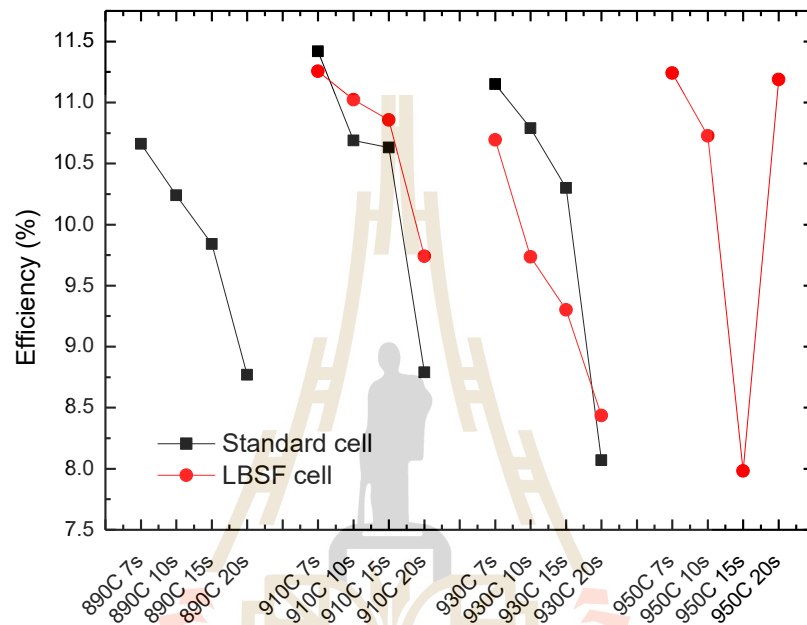


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ



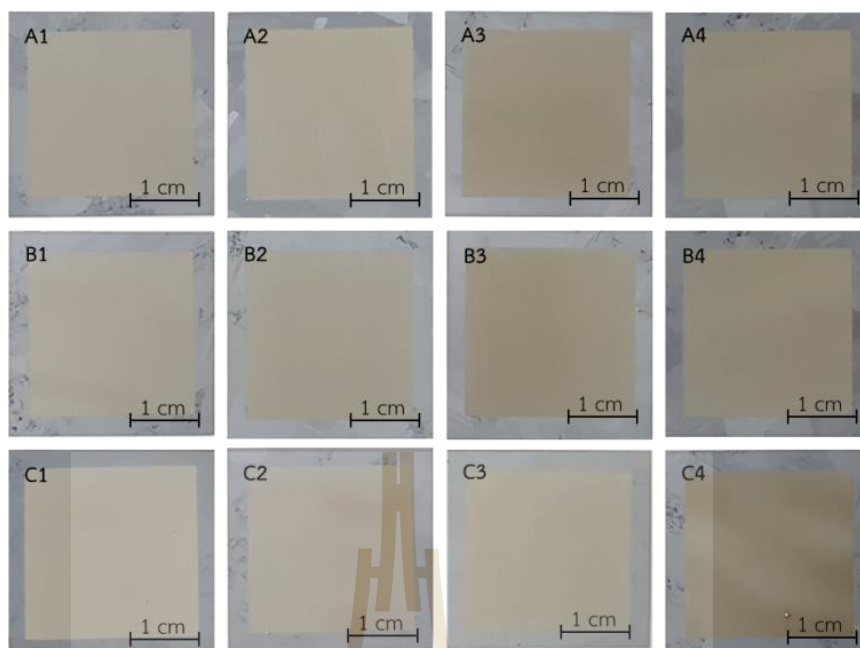
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าค่า η มีแนวโน้มเดียวกันกับค่า Voc โดยเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ η ลดลง ส่วนอุณหภูมิมีผลต่อค่า η เล็กน้อย อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ไม่เพียงแต่การมีเงื่อนไขของอุณหภูมิ Fast Firing ที่เหมาะสมยังเกี่ยวข้องโดยตรงกับขนาดของช่องเปิด ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่นำมาศึกษา



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายบริเวณขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF หลังการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วด้วยเตาเผา Fast firing ที่อุณหภูมิ 890 °C 910 °C และ 930°C แซ่ไฟเป็นเวลา 7, 10, 15 และ 20 วินาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น สีของขั้วโลหะอะลูมิเนียมจะเข้มขึ้น และหากใช้เวลาและอุณหภูมิมากเกินไปจะเกิดผิวไม่สม่ำเสมอและเกิดรอยแตกระหว่างขั้วโลหะและแผ่น mc-Si ขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพลดลง



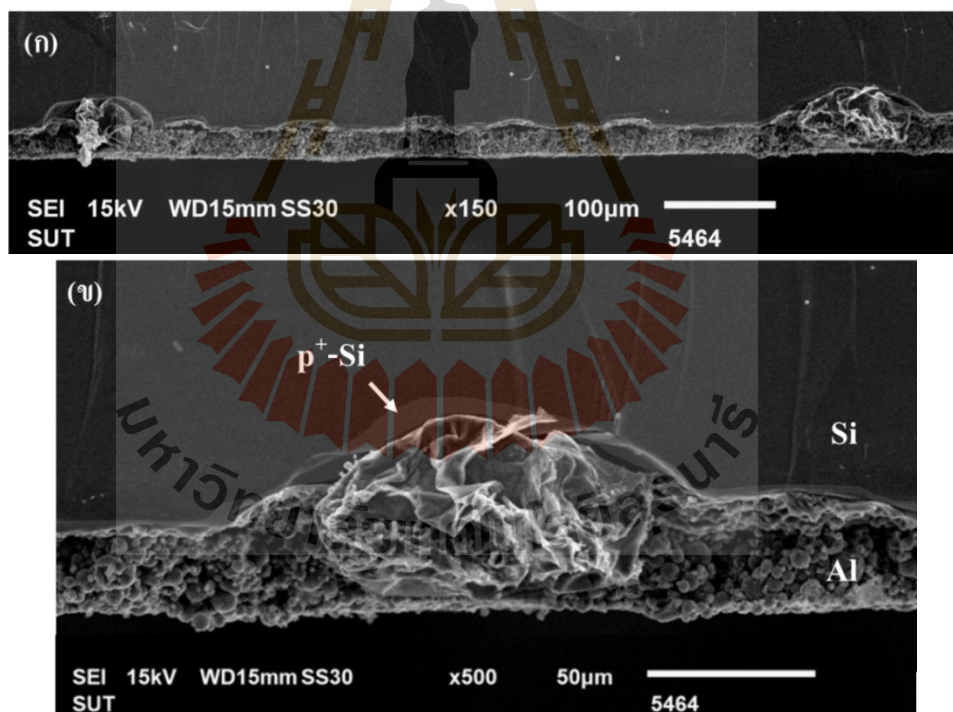
รูปที่ 4.7 บริเวณหัวโลหะอะลูมิเนียมด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานหลังการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

4.3 ผลทางจุลโครงสร้างที่รอยสัมผัส Al-Si และบริเวณ $p^+ Si$

การวิเคราะห์ผลการแลกเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมและซิลิคอน (Al-Si) บริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ผ่านการอบด้วยเครื่อง Fast Firing ที่ออกแบบขึ้น ได้ศึกษาลักษณะทางจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6010LV ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงภาพเครื่องในรูปที่ 4.8 กล้อง SEM มีหลักการจากการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวของชิ้นงานและแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะมีกำลังขยายสูงและสามารถจำแนกลักษณะรายละเอียดได้ถึง 10 nm นำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานรวมถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงาน



รูปที่ 4.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6010LV



รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลัง (ก) ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ผ่านการ Fast Firing พบบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว แสดงดัง

รูปที่ 4.9 จากภาพพบบริเวณ Alloy ของ Al-Si และบริเวณ p⁺-Si (สีเทา) ความหนาประมาณ 8 μm ภายในช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิดชั้น Al – BSF ดังนั้น เครื่องอบ Fast Firing สามารถให้ความร้อนสูงในระดับ Eutectic ของ Al-Si ทำให้เกิดคุณภาพที่ดีของชั้น Passivation ด้านหลังเซลล์ที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

4.4 การเปรียบเทียบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบกับเตาเผา Fast Firing ในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบในห้องปฏิบัติการกับเตาเผา Fast Firing ที่ใช้ในอุตสาหกรรม รุ่น HSK2505-0611 เตาเผา Fast Firing ที่ใช้ในอุตสาหกรรมใช้เวลาประมาณ 40 นาที เพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปสูงสุดที่ 1050°C ส่วนเตาเผา Fast Firing ในห้องปฏิบัติการให้อุณหภูมิสูงสุดที่ 950°C ใช้เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งโดยทั่วไปในการอบขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 900 - 1000°C ดังนั้นเตาเผา Fast Firing ในห้องปฏิบัติการสามารถนำมาใช้งานในการอบขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาปรับเงื่อนไข Firing ต่าง ๆ ได้ง่ายสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่ หรือโครงสร้างต้นแบบ

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบเตาเผา Fast Firing ต้นแบบในห้องปฏิบัติการกับเตาเผา Fast Firing ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

การเปรียบเทียบ	เตาเผา Fast Firing ในอุตสาหกรรม รุ่น HSK2505-0611	เตาเผา Fast Firing ต้นแบบในห้องปฏิบัติการ Solar SUT
อุณหภูมิสูงสุด	1050 °C	950°C
ระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิ	40 นาที	5 นาที
ความกว้างของเครื่อง	1.2 เมตร	0.6 เมตร
ความยาวของเครื่อง	6.9 เมตร	2.8 เมตร
ความสูงของเครื่อง	1.3 เมตร	1.1 เมตร
ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิ	+/- 2 °C	+/- 2 °C
กำลังไฟฟ้าที่ใช้	240V, 3phase, 60Hz, 5wire, 42KVA	240V, 3phase, 50Hz, 4wire, 10KVA
Spare Part	1 set heating board, 1 solid relay, 2 relays, 2 switches	1 set heating board, 3 solid relay, , 3 switches

ในส่วนของสายพานสแตนเลสทนความร้อนสูงสำหรับงาน Firing ของอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ มีขนาดความกว้างไม่แตกต่างจากที่ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม แต่ในส่วนของความยาวของตัวเครื่องแตกต่างกัน เนื่องจากเครื่องต้นแบบนั้นออกแบบสำหรับการผลิตเซลล์ในห้องปฏิบัติการที่มีจำนวนเซลล์ทดสอบแค่ไฟในแต่ละห้องมีปริมาณไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามเครื่องต้นแบบมีกระบวนการส่งชิ้นงานอย่างต่อเนื่องได้เช่นเดียวกับเครื่องอุตสาหกรรม โดยเตาเผา Fast Firing ต้นแบบในห้องปฏิบัติการมีขนาดเล็ก จึงมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในห้อง Firing zone ได้เร็วกว่าถึง 2 เท่าเทียบกับขนาดในอุตสาหกรรม ทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าและสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก ดังนั้นการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่อง Firing ให้เหมาะสมกับการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการจะประหยัดพลังงานไฟฟ้า และราคาอุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่า



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 เครื่อง Fast Firing ต้นแบบสำหรับห้องปฏิบัติการและการทดสอบ

- ประสบความสำเร็จในการออกแบบและสร้างเครื่อง Fast Firing ใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานเพื่อคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละโซน พิจารณากรณีไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบและเข้าระบบ เพื่อให้ได้โปรไฟล์การอบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต และเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขึ้นหนึ่งเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุด ดังนั้นการออกแบบจึงจัดเป็น 4 ห้องประกอบด้วย 1. Drying Zone ควบคุมอุณหภูมิได้ระหว่าง 200-300°C ใช้หลอด Short Wavelength IR ขนาด 1000 วัตต์ 1 หลอด 2. Burning Zone สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ระหว่าง 500 - 600°C ใช้หลอด Short Wavelength IR ขนาด 1000 วัตต์ 2 หลอด เพื่อเผาไหม้สารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตออกไป 3. Firing Zone ควบคุมอุณหภูมิได้ระหว่าง 800-950°C ใช้หลอด Short Wavelength IR ขนาด 2000 วัตต์ 3 หลอด 4. Cooling-Zone แบ่งออกเป็น 2 ห้อง ที่ตำแหน่ง เพื่อไม่ให้อุณหภูมิลดลงเร็วเกินไป และใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบ Natural Convection ดังนั้นจึงไม่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อช่วยลดอุณหภูมิ จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่า Cooling Zone สามารถลดอุณหภูมิจากห้อง Firing ที่มีอุณหภูมิ 900°C ให้เหลือ 100°C ได้ในเวลาอันสั้น

- ประสบความสำเร็จในทดสอบการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละโซนตามกำหนดด้วยอุปกรณ์ชุดควบคุมแบบป้อนกลับ PID ส่งผลที่กำหนดได้อย่างแม่นยำและมีความรวดเร็ว ก่อนลำเลียงชิ้นงานเข้าสู่ระบบ โดยที่ ห้อง Drying กำหนดอุณหภูมิที่ 300°C เมื่อเปิดการทำงานของหลอด IR พบว่าใช้เวลา 1 นาที 36 วินาที จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ 300°C ห้อง Burning กำหนดอุณหภูมิที่ 600°C พบว่าใช้เวลา 2 นาที 52 วินาที ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด และห้อง Firing อุณหภูมิที่ 900°C พบว่าใช้เวลา 4 นาที 22 วินาที ในการให้ความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด

5.2 ทดสอบการ Firing กับเซลล์แสงอาทิตย์

- ประสบความสำเร็จในการทดสอบเครื่องต้นแบบสำหรับ Fast Firing ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้าง LBSF และโครงสร้าง BSF โดยกำหนดเงื่อนไขการแช่ไฟในแต่ละห้องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ กันด้วยการควบคุมการลำเลียงสายพานจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ ควบคุมการแช่ไฟด้วยการควบคุมของระบบ PLC ได้ทำการทดสอบเวลาการแช่ไฟในห้อง Fast Firing ที่ 7 10 15

และ 20 วินาที ในแต่ละเงื่อนไขของอุณหภูมิแช่ไฟที่ 890 °C 910 °C และ 930°C ผลการทดสอบ แสดงค่าที่จ่อแสดงผลตรงค่าที่กำหนดไว้ และทำงานได้จนครบกระบวนการ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF ผ่านการ Fast Firing ที่อุณหภูมิเหมาะสมอยู่ที่ 910 °C แช่ไฟนาน 7 วินาที เมื่อแช่ไฟนานขึ้น ส่งผลการลดลงของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน เนื่องจากคุณภาพของฟิล์มโลหะลดลง สำหรับกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ใช้อุณหภูมิ Firing 910 และ 950 °C จะให้ประสิทธิภาพที่ดี และเมื่อแช่ไฟนานขึ้นผลทางไฟฟ้าลดลงเช่นกัน ดังนั้นจากปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาการแช่ไฟที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ การควบคุมปัจจัยทั้งสองจากระบบ Fast Firing ที่มีเสถียรภาพจึงเป็นส่วนที่สำคัญมากอย่างหนึ่งต่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง

5.3 ข้อเสนอแนะ

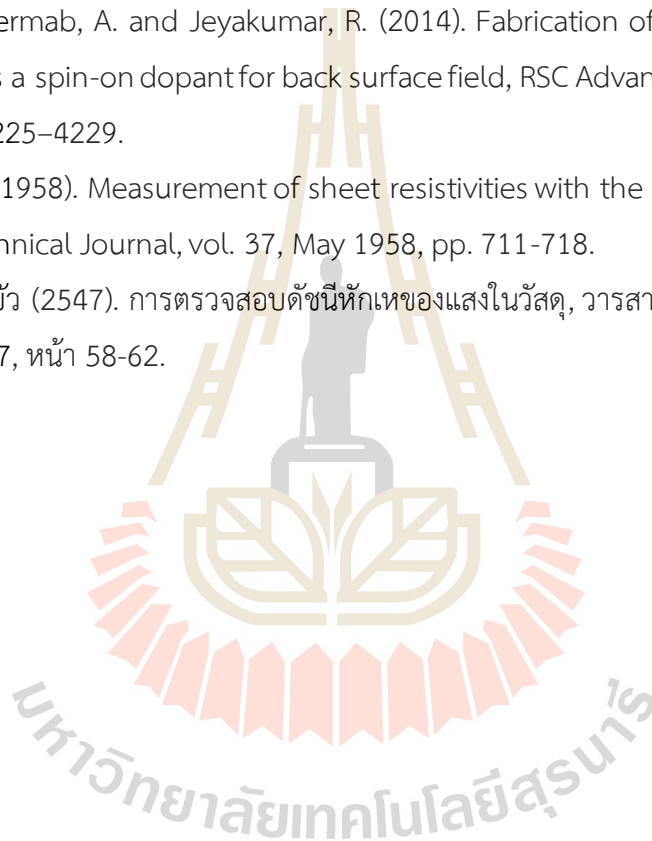
การทดสอบ Fast Firing ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กับการผลิตขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด จำเป็นต้องพิจารณาเงื่อนไขอื่นที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเซลล์เช่น ระยะช่องเปิดด้านหลังของ LBSF cell ดังนั้นการทดสอบ Fast Firing จึงกำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาการแช่ไฟ เพื่อเน้นการทดสอบความแม่นยำและความถูกต้องของการทำงานเครื่อง Fast Firing มากกว่าศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง LBSF ที่เงื่อนไขการผลิตที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

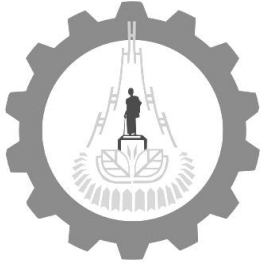


บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2557), ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย, คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่2 (พลังงานแสงอาทิตย์), หน้า 1-7.
- [2] Green, M.A. (2001), Crystalline silicon solar cells, London: Imperial College Press.
- [3] Gall, S., Manuel, S. and Lerat, J.F. (2013). Boron laser doping through high quality Al₂O₃ passivation layer for localized B-BSF PERL solar cells, Energy Procedia, vol. 38, September 2013, pp. 270-277
- [4] Wang, Z., Han, P., Lu, H., Qian, H., Chen, L., Meng, Q., Tang, N., Gao, F., Jiang, Y., Wu, J., Wu, W., Zhu, H., Ji, J., Shi, Z., Sugianto, A., Mai, L., Hallam, B. and Wenham, S. (2012). Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers, Prog. Photovolt: Res. Appl, vol. 20, April 2012, pp. 260–268.
- [5] Eisenberg, Y., Kreinin, L., Bordin, N. and Eisenberg, N. (2016). Effective Surface Recombination of p+ Layers Doped Using Ion Implantation or Surface Deposited B Sources, Energy Procedia, vol. 92, August 2016, pp. 16-23.
- [6] Yong, H., Xiao, X., Yan, W. and Jian-zhong, F. (2015). A facile and low-cost micro fabrication material: flash foam, Scientific Reports, vol. 5:13522, August 2015.
- [7] Vick, G. L. and Whittle, K. M. (1969). Solid Solubility and Diffusion Coefficients of Boron in Silicon, J. Electrochem. Soc.: SOLID STATE SCIENCE, vol. 116, August 1969, pp.1142-1144.
- [8] Jager, U., Wolf, A., Wufka, C., Tomizawa, Y., Imamura, T., Soeda, M., Ikeda, Y. and Shiro, T. (2014). Local boron doping for p-type PERL silicon solar cells fabricated by laser processing of doped silicon nanoparticle paste, paper presented in the 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands.
- [9] Kränzle, A., Kopecek, R., Peter, K. and Fath, P. (2006). Bifacial solar cells on multicrystalline silicon with boron BSF and open rear contact, paper presented in the 4th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, United States of America.

- [10] Armel, D.P., Bouchaib, H., Laurent, B., Phillippe, T. and Cesar, K. (2014). Sol-gel deposited phosphorus and boron doped thin silica films for diffused n+p and n+pp+ structures, *Physica Status Solidi*, vol. 11, Issue 11-12, pp. 1654–1656.
- [11] Kim, D.S., Das, A., Nakayashiki, K., Rounsaville, B., Meemongkolkat, V. and Rohatgi, A. (2007). Silicon solar cells with boron back surface field formed by using boric acid, paper presented in the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy.
- [12] Katsu, T. (2002). Space solar cell, Google Patents.
- [13] Singh, G., Vermab, A. and Jeyakumar, R. (2014). Fabrication of c-Si solar cells using boric acid as a spin-on dopant for back surface field, *RSC Advances*, vol. 4, November 2013, pp. 4225–4229.
- [14] Smits, F.M. (1958). Measurement of sheet resistivities with the four-point probe, *Bell System Technical Journal*, vol. 37, May 1958, pp. 711-718.
- [15] สุรสิทธิ์ พลิกบัว (2547). การตรวจสอบดัชนีหักเหของแสงในวัสดุ, *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, ตุลาคม-ธันวาคม 2547, หน้า 58-62.





แบบประวัติส่วนตัว

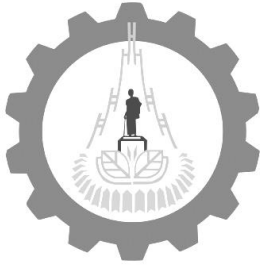
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224311 โทรสาร 0 44-224613



karoon@sut.ac.th

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฟังสุวรรณรักษ์
Assist. Prof. Dr.Karoon Fangsuwannarak

การศึกษา/คุณวุฒิ	พ.ศ. 2557 ปร.ด. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2544 วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2558-2560 กรรมการสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ พ.ศ. 2551-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2551 ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2536-2550 อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล พ.ศ. 2545-2550 หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
งานวิจัย	<ol style="list-style-type: none">พ.ศ. 2560 การพัฒนาและวัดผลทางคลินิกของเครื่องพุงน้ำหนักรถจักรยานที่ 2 ของคนไข้ขณะเดิน (Development and Clinical Outcome Evaluation of Walking Support) แหล่งทุน: ที่ประชุมอธิการแห่งประเทศไทย (ทปอ.)พ.ศ. 2560 การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงค็อกซ์ไคต์ระดับนาโนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำพ.ศ. 2559 4-Zone Fast Firing สำหรับพัฒนาการผลิตในปริมาณมากของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงโครงสร้าง Rear Locally Passivated Cells แหล่งทุน: วช.พ.ศ. 2558 โครงการให้คำปรึกษาทางวิศวกรรมแก่ SMS ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากกระทรวงอุตสาหกรรมพ.ศ. 2556 โครงการวิจัยการศึกษาผลของการเติมสารเร่งในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล



แบบประวัติส่วนตัว

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224311 โทรสาร 0 44-224613



karoon@sut.ac.th

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฟังสุวรรณรักษ์
Assist. Prof. Dr.Karoon Fangsuwannarak

6. พ.ศ. 2548-2549 โครงการให้คำปรึกษา แนะนำเพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์ผ้าไหมให้ได้มาตรฐาน (ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพมาตรฐานไหมไทยเพื่อก้าวสู่เมืองแฟชั่น)

ผลงานวิชาการ

1. เอกสารประกอบการสอนวิชาการถ่ายเทความร้อน
2. บทความวิชาการ

2.1 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ “เครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์ กรณีศึกษาการต่อท่อจูนนิ่งคอลัมน์แบบกระบอกสูบรวมและกระบอกสูบแยก” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16, 2545, จังหวัดภูเก็ต

2.2 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ “การศึกษารีเจนเนอเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์ กรณีต่อท่อจูนนิ่งคอลัมน์แบบกระบอกสูบรวม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 2546, จังหวัดปราจีนบุรี

2.3 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ ,ปกรณ์วิศว์ ปัตถา “ การศึกษาต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนโดยการทดลอง ” การประชุมวิชาการวิศวกรรม มอ. วิชาการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2546, จังหวัดสงขลา

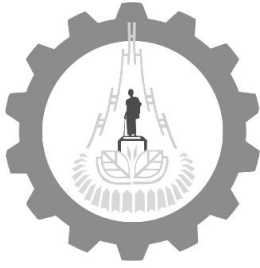
2.4 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ ,รักพงษ์ ชันฉวี “ การสูบน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยหลักการซาเวรี ” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล, 2546

2.5 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ “ความถี่กำธรของระบบการเคลื่อนที่ของลำน้ำในท่อดิสเพลสเซอร์รูปตัว U สำหรับการใช้งานเพื่อสูบน้ำ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, จังหวัดเชียงใหม่

2.6 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ “การศึกษาผลของการเติมสารเร่งผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถจักรยานยนต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, จังหวัดอุบลราชธานี

2.7 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ “ผลกระทบของการเติมสารเติมแต่งในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีต่อสมรรถนะเครื่องยนต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7, 3-5 พฤษภาคม 2554, จังหวัดภูเก็ต

2.8 K. Fangsuwannarak and T. Fangsuwannarak “ Tricycle Drive by Solar Cells and Manpower” 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition CCH Congress Centre and International Fair Hamburg Germany,p.4161-4163, 5-9 September 2011, Hamburg Germany



แบบประวัติส่วนตัว

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224311 โทรสาร 0 44-224613



karoon@sut.ac.th

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฟังสุวรรณรักษ์
Assist. Prof. Dr.Karoon Fangsuwannarak

ผลงานวิชาการ

2.9 K. Fangsuwannarak, and K. Triratanasirichai, “ Comparative engine performance of DI pick-up diesel engine tested by mixing metal oxide and bio-solution additives in diesel fuel and palm biodiesel blends(B5)”, International Conference on Application and Design in Mechanical Engineering, 27-28 February, 2012, Penang, Malaysia.

2.10 K. Fangsuwannarak, and K. Triratanasirichai, “ Influence of TIO₂ and Bio-Solution Based Additives on Exhaust Emissions of a DI Diesel Engine”, International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology, 22-23 September, 2012, Guangzhou, China.”

2.11 K. Fangsuwannarak, K. Triratanasirichai “Influence of TiO₂ and bio-solution based additives on exhaust emissions of a DI diesel engine” Advanced Materials Research Vols. 602-604 (2013) pp 1054-1058

2.12 K. Fangsuwannarak, K. Triratanasirichai, “Effect of Metalloid Compound and Bio-Solution Additives on Biodiesel Engine Performance and Exhaust Emissions” American Journal of Applied Sciences, 10(10) (2013), pp 1201-1213.

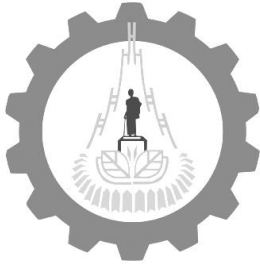
2.13 K. Fangsuwannarak, K. Triratanasirichai, “Improvements of Palm Biodiesel Properties by Using Nano-TIO₂ Additive Exhaust Emission and Engine Performance” The Romanian Review Precision Mechanics Optics & Mechatronics, 43 (2013), pp 111-118.

2.14 K. Fangsuwannarak, K. Triratanasirichai “Effect of Nano-TiO₂ Additives Blended in Palm Biodiesel on Engine Performance” The 27th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Chonburi, (2013). Thailand.

2.15 K. Fangsuwannarak, K. Triratanasirichai “Effect of Nano-Titanium Dioxide Based Additives on Exhaust Emissions of an Indirect Injection Diesel Engine” Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition, Tokyo, Japan.

2.16 K. Fangsuwannarak “Effect of organic solution based additive on exhaust emissions of an indirect injection diesel engine” The Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2015, Kobe, Japan

2.17 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ และพลรวี วรรณริโก “การเปรียบเทียบคุณสมบัติ และการปลดปล่อยมลพิษของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันทำอาหารที่ใช้แล้ว” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12, 8 - 10 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ณ โรงแรมวังจันทร์ ริเวอร์วิว จ.พิษณุโลก



แบบประวัติส่วนตัว

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224311 โทรสาร 0 44-224613



karoon@sut.ac.th

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฟังสุวรรณรักษ์
Assist. Prof. Dr.Karoon Fangsuwannarak

ผลงานวิชาการ

2.18 K. Fangsuwannarak, P. Wanriko, T. Fangsuwannarak “Effect of bio-polymer additive on the fuel properties of palm biodiesel and on engine performance analysis and exhaust emission” 3rd International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPSE 2016, 8-12 September 2016, Kitakyushu, Japan

2.19 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ และพลรวี วรรณริโก “การปล่อยมลพิษของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการกลั่นซ้ำในเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

2.20 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์ และพลรวี วรรณริโก “การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยกระบวนการกลั่นซ้ำ” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

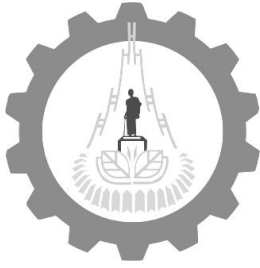
2.21 K. Fangsuwannarak, P. Wanriko “Exhaust Emission Reduction from Compression Ignition Engine by Using Palm Biodiesel Blended with Nano Zinc Oxide Additive” 5th Asia Conference on Mechanical and Materials Engineering, ACMME 2017, 9-11 June, 2017, Tokyo, Japan

2.22 K. Fangsuwannarak, T. Fangsuwannarak, S. Junpirom, P. Wanriko and Y. Khotbut “EMISSION REDUCTION FOR HIGH-SPEED DIESEL ENGINE USING PALM OIL BIODIESEL BY REPEATED-DISTILLATION PROCESS.” Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, 17 - 22 June, 2018, Yokohama, Japan

2.23 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์, ยงศธร โคตรบุตร, และพลรวี วรรณริโก “การลดมลพิษจากเครื่องยนต์อัตรระเบิดโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสมกับสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14, 13-15 มิถุนายน 2561 ณ โนวเทล จ.ระยอง

2.24 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์, เมธัส พันธุ์ถ้วน, ยงศธร โคตรบุตร, และสุริยา พันธุ์โกศล “ผลกระทบของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ส่งผลต่อสมรรถนะและสารมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, 21-24 พฤษภาคม 2562, เดอะ กรีนเนอร์ รีสอร์ท เขาใหญ่ จ.นครราชสีมา

2.25 การุญ ฟังสุวรรณรักษ์, ยงศธร โคตรบุตร, เมธัส พันธุ์ถ้วน, และสุริยา พันธุ์โกศล “ผลกระทบของไบโอดีเซลปาล์มต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่มีการปรับอัตราส่วนกำลังอัด” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, 21-24 พฤษภาคม 2562, เดอะ กรีนเนอร์ รีสอร์ท เขาใหญ่ จ.นครราชสีมา



แบบประวัติส่วนตัว

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224311 โทรสาร 0 44-224613



karoon@sut.ac.th

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฟังสุวรรณรักษ์
Assist. Prof. Dr.Karoon Fangsuwannarak

2.26 K. Fangsuwannarak, T. Fangsuwannarak, and Y. Khotbut “ Effect of Nano-TiO₂ Additives Blended in Palm Biodiesel on Compression Ignition Engine Performance” Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 8, No. 3, July 2020

2.27 K. Fangsuwannarak, Y. Khotbut, T. Fangsuwannarak, M. Phantoun and S. Phankosol “ Effect of a Variable Compression Ratio on the Performance and Exhaust Emission of an Agricultural Engine using Palm Biofuel” Chiang Mai Journal of Science, 47(4),pp. 752-764, 2020

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4422 4582 0856613088
โทรสาร 0 4422 4601



thipwan@g.sut.ac.th

ผศ.ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

Assistant Professor Dr. Thipwan Fangsuwannarak

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาเอก

2551 Ph.D. (Photovoltaic Engineering) Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Australia

ระดับปริญญาโท

2540 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (Electrical Engineering, Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

ระดับปริญญาตรี

2536 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 (B.Eng (2nd Honor in Electronic Engineering) มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จ. นครราชสีมา

ประวัติการทำงาน

- 2540-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ และนักวิจัย วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จ.นครราชสีมา
- 2557-ปัจจุบัน ผู้ทรงคุณวุฒิ ให้ข้อคิดเห็นและประเมินโครงการทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่ และทุนพัฒนานักวิจัย (รุ่นกลาง) ของฝ่ายวิชาการ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- 2555 ที่ปรึกษา R&D group, Innovative Harvesting Energy, China
- 2554 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินข้อเสนอโครงการวิจัย ให้แก่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล HDD สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2552-2554 วิทยากรผู้เชี่ยวชาญฝึกอบรมการผลิตและวิเคราะห์ฟิล์มบาง อุตสาหกรรมฮาร์ดิสไดฟ์ให้แก่ บริษัทซีเกต บริษัทเวสเทินท์ดิจิตอล บริษัทฮิตาชิฮาร์ดิสไดฟ์
- 2553 ออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการเรียนรู้ และจัดบรรยาย อบรมภาคสนาม ให้แก่ชุมชน อ. ครบุรี จ. นครราชสีมา
- 2548-2550 นักวิจัยในกลุ่มโครงการ Global Climate and Energy Project (GCEP) แหล่งทุนจาก Stanford University, USA
- 2539-2540 นักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
- 2536-2537 อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน กรุงเทพฯ

สาขาวิชาการที่มีความเชี่ยวชาญ

- การผลิตวัสดุผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่จาก nc-Si ink และ ZnO:Bi film การวิเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำชั้นสูง และวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน
- การผลิตเซลล์อาทิตย์และพัฒนาประสิทธิภาพด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ
- ออกแบบระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบระบบอิสระและระบบที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่ง
- ออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนจากระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

ผลงานและรางวัล

1. รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 1 ในการประกวด Solar Floating System for Smart City Mini-Hackathon เมื่อวันที่ 21 สิงหาคม 2563 จัดโดยอุทยานวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่นร่วมกับ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
2. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (13 ส.ค. 2563) การประดิษฐ์ “วิธีการผลิตชั้นรับแสงซิลิคอนดอทของเซลล์แสงอาทิตย์” เลขที่คำขอ 2001004521
3. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (14 ก.ค. 2563) การประดิษฐ์ “เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างสนามไฟฟ้า ด้านหลังบริเวณช่องเปิดสารเจือด้วยลวดลายฟิล์มโบโรซิลิเกต และลวดลายฟิล์มออกไซด์ด้วยวิธีการประทับลาย และวิธีการผลิต” เลขที่คำขอ 2001003968
4. บทความยอดเยี่ยม (Best paper) สาขาวัสดุพลังงาน จากการประชุมวิชาการ 15th Conference on Energy Network of Thailand, พ.ศ. 2562 “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแสงของฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนชั้นซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสมัท สำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์”
5. รางวัล Best Runner-up Paper สาขาวัสดุพลังงาน จากการประชุมวิชาการ 15th Conference on Energy Network of Thailand, พ.ศ. 2562 “ผลของอุณหภูมิและเวลาการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์”
6. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (25 ก.ค. 2558) การประดิษฐ์ “แผ่นพื้นอัจฉริยะสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงเฉื่อยเชิงกล” เลขที่คำขอ 1601002468
7. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (16 ธ.ค. 2558) การประดิษฐ์ “เซลล์นำไฟฟ้าพลังแสงด้วยผลึกนาโนทรงกลมซิงค์ ออกไซด์เจือสารบิสมัท และวิธีการผลิต” เลขที่คำขอ 1501007762
8. ลิขสิทธิ์ ลักษณะงานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ “โปรแกรมที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอซีของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด” เลขที่327427 (2558)
9. อนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์ (3 ก.พ.2555) “การใช้วัสดุเพฟลอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์” เลขที่อนุสิทธิบัตร 6976
10. บทความยอดเยี่ยม Energy Materials paper award for 7th Conference on Energy Network of Thailand, 2011 “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้น”

11. Research Group Scholarship: Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
12. Ph.D. Scholarship สำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ ประเทศไทย ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับ Third-generation of Silicon Solar cells ศึกษาที่ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, UNSW, Australia

ภาระงานสอนและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

สอนในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ในรายวิชาดังนี้

อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม วิศวกรรมไฟฟ้า สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์ประยุกต์ เซลล์แสงอาทิตย์และระบบ เทคโนโลยีวงจรรวม วงจรรวมดิจิทัล และวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า

ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ฟิล์มบาง ZnO:Bi สำหรับป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

หมึกพอสพอรัสสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงแบบ Selective Emitter Cell

เครื่องฉีดสารสำหรับสร้างชั้นพาสซีเวชันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีต้นทุนต่ำ

สังเคราะห์ฟิล์มบางผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ Third Generation

การบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. งานวิจัยเรื่อง โครงการเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหมึกซิลิคอนควอนตัมต่อทจากการใช้แผ่นเซลล์ที่เสื่อมสภาพเสียหายมาผลิตใหม่
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2561
2. งานวิจัยเรื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยเทคโนโลยี Selective Emitter ที่ใช้วิธี Screen Printing
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2559
3. งานวิจัยเรื่อง การสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำจากการประทับลาย
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2558
4. งานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2557 เสร็จสมบูรณ์
5. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงค่าความนำไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงของผลึกนาโนซิลิคอนควอนตัมต่อทสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2556 เสร็จสมบูรณ์
6. งานวิจัยเรื่อง การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี

- แหล่งทุน วช. 2555 เสร็จสมบูรณ์
7. งานวิจัยเรื่อง เทคนิคต้นทุนต่ำด้วยการฉีดสารละลายเพื่อสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
- แหล่งทุน วช. 2554-2555 เสร็จสมบูรณ์
7. งานวิจัยเรื่อง การเตรียมผลึกนาโนซิลิคอนและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
- แหล่งทุน วช. 2553-2554 เสร็จสมบูรณ์
8. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณภาพของผิวพาสซีเวชันด้านหลัง ต้นทุนต่ำ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
- แหล่งทุน สกว. 2552 เสร็จสมบูรณ์
9. งานวิจัยเรื่อง การลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์ด้วย ANISOTROPIC TEXTURE ETCHING เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
- แหล่งทุน วช. 2552 เสร็จสมบูรณ์
10. งานวิจัยเรื่อง Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน Stanford University, USA
11. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาเครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์และการประยุกต์ใช้งาน : ออกแบบทรานสดิวเซอร์ในภาค tuning line
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการ ใช้ระยะเวลา 1 ปี (2545)
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยที่กำลังทำ

1. งานวิจัยเรื่อง Integration, performance studies, and applications of energy harvesting and storage systems
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการย่อย 4 ระยะเวลา 3 ปี ของโครงการเข้าร่วม/จัดตั้งโครงการศูนย์เครือข่ายการวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยี ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
- แหล่งทุน ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ 2561

ผลงานเผยแพร่

1. Thipwan Fangsuwannarak, Supanut Laohawiroj, Peerawoot Rattanawichai, Kamonchanok Mekmork, Warakorn Limsiri, Rungrueng Phatthanakun, "Silicon dots films deposited by spin-coating as a generated carrier addition layer of third generation photovoltaics" Progress in Natural Science: Materials International <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.11.008> (Article in Press) IF 4.0
2. Kamonchanok Mekmork, Thipwan Fangsuwannarak, Supanut Laohawiroj, Peerawoot Rattanawichai and Warakorn Limsiri "Patterned Borosilicate Glass by a Simplified Flash Foam Stamping Technique as Back Passivation Layer for Photovoltaic Structure" Chiang Mai J. Sci. 2020; 47(4): 614-623

3. ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตน์วิชัย กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹ้มศิริ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัทที่มีผลึกนาโน สำหรับเป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0005
4. พีรวุฒิ รัตน์วิชัย ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹ้มศิริ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ และ รุ่งเรือง พัฒนากุล “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแสงของฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนชั้นซิงค์ออกไซด์เจือด้วยบิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0010
5. กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹ้มศิริ ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตน์วิชัย และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 21-24 พฤษภาคม 2562 จ. นครราชสีมา หน้า EM0011
6. Peerawoot Rattanawichai, **Thipwan Fangsuwannarak***, Rungrueang Phatthanakun and Sirirat T. Rattanachan, “High Photocurrent Gain of Spherical Nano-crystalline ZnO:Bi Film for Advanced Solar Cells Application” Chiang Mai Journal of Science 45 : 1995-2004 (2018)
7. Supanut Laohawiroj, Apirak Mangkornkaew, Atthaphon Maneedaeng, **Thipwan Fangsuwannarak**, “Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique” Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology, Volume 13 No.2 (2018)
8. กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹ้มศิริ และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 791-794
9. พีรวุฒิ รัตน์วิชัย ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 879-885
10. ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตน์วิชัย รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้บิสมัทจากหมึกคอมโพสิตซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 899-905
11. กมลชนก เมฆหมอก ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ และ ณิชกุล ช่างสุวนิช “ผลของการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบ Gradient-Index ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สีดำน” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 31 พฤษภาคม-2 มิถุนายน 2560 จ. เชียงใหม่ หน้า 458-463
12. S. Chanrawangyot, S.T. Rattanachan, A. Watcharenwong, **T. Fangsuwannarak**, Antibacterial activity of ZnO nanoparticles coated on ceramic tiles prepared by sol-gel method, Journal of Metals, Materials and Minerals, Volume 27, Issue 2, p. 1-5 (2017)
13. A. Mangkornkaew and T. Fangsuwannarak, Characterization of patterns of Localized

- Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure, Materials Science and Engineering 241, 012042 (2017)
14. Karoon Fangsuwannarak, Ponrawee Wanriko, Thipwan Fangsuwannarak, “Effect of Bio-polymer Additive on the Fuel Properties of Palm Biodiesel and on Engine Performance Analysis and Exhaust Emission” Energy Procedia, Volume 100, p. 227-236 (2016)
 15. อภิรักษ์ มังกรแก้ว ชิตพงษ์ เกตุถนอม อี๊ซ เลหาวิโรจน์ และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “การสร้างชั้นอิมิตเตอร์และชั้นไดอิเล็กตริกสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 18-20 มิถุนายน 2559 จ. พิษณุโลก หน้า 458-463
 16. W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimnirun, W. Klysubun, **T. Fangsuwannarak**, S.T. Rattanachan, N. Pisitpipathsin, M. Promsawat, and S. Pojprapa, “Polarization Switching of PZT under Electrical Field via in-situ Synchrotron X-ray Absorption Spectroscopy” Ferroelectrics, 492: p.35–42 (2016)
 17. อภิรักษ์ มังกรแก้ว และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ด้วยเทคนิคพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON38) 18-20 พฤศจิกายน 2558 จ.พระนครศรีอยุธยา
 18. **T. Fangsuwannarak** “IPA Free Texturization Process for Monocrystalline Silicon Solar Cells by PTFE Mask”, The Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2015, Kobe Japan, Proceeding p.363-369, 11-14 June (2015)
 19. **T. Fangsuwannarak**, A. Mankornkaew, N. Phiwpha and S. Sopitpan, “Preparation of Different Phosphorus Concentration for N^+ Selective Emitter Solar cell by Spin on doping”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
 20. S.T. Rattanachan, J. Kaewphoka and **T. Fangsuwannarak**, “Annealing Atmosphere of Bismuth Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by CTAB-Assisted Sol-gel Method”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
 21. J. Kaewphoka, **T. Fangsuwannarak** and S.T. Rattanachan, “Synthesis of surfactant-assisted nanostructured Bidoped Zinc oxide for photo-sensing application”, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference ID paper 1396, 15-17 May (2014)
 22. N. Phiwpha, **T. Fangsuwannarak** and S. Sopitpan, “Locally contacted rear surface passivated solar cells by inkjet printing”, Proc. of SPIE Vol. 9234 92341B-1 (2014)
 23. N. Phiwpha and **T. Fangsuwannarak**, “Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing” Integrated Ferroelectrics, 149: pp.102-106, (2013)
 24. S.T. Rattanachan, P. Krongarrom and **T. Fangsuwannarak**, “Influence of annealing temperature on characteristics of bismuth doped zinc oxide films” American Journal of Applied Sciences Volume 10, Issue 11, 1 October 2013, Pages 1427-1438 (2013)

25. T. Fangsuwannarak and K. Kunchana, "Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process" The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, No. 43: pp.106-110 (2013)
26. T. Fangsuwannarak, K. Amonsurintawong and S. Sopitpan, "Aluminum-induced crystallization of p⁺silicon pinholes for the formation of rear passivation contact in solar cell" Key Engineering Materials Vol. 547 (2013) pp. 31-40 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.547.31
27. T. Fangsuwannarak, K. Khunchana and S.T. Rattanachan "Optical Band Gaps and Electrical Conductance of Si nanocrystals in SiO₂ Matrix for Optoelectronic Applications" Key Engineering Materials Vol. 545 (2013) pp 134-140 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.545.134
28. T. Fangsuwannarak, P. Krongarrom, J. kaewphoka and S. T. Rattanachan, "Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells" Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4799-0545-4/13 ©2013 IEEE
29. K. Kunchana and T. Fangsuwannarak, "Thin Film preparation of silicon nanocrystals embedded in silicon oxide by sol-gel method" Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4673-2025-2/12/ ©2012 IEEE
30. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T Rattanachan, Thipwan Fangsuwannarak, "ZnO Doped with Bismuth in Case of In-Phase Behavior for Solar Cell Application" Engineering Journal, Vol 16, No 3 p. 59-70 (2012)
31. T. Fangsuwannarak, P. Krongarrom, and S. T. Rattanachan, "Synthesis and characterizations of bismuth doped zinc oxide via sol-gel technique for solar cells applications" 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 Sep. (2011)
32. P. Krongarrom, S.T. Rattanachan and T. Fangsuwannarak, "Structural and optical characterizations of n-type doped ZnO by sol-gel method for photovoltaic", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on, On page(s): 50 - 53, Volume: Issue: , 17-19 May (2011)
33. ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ "การสร้างชั้นพาสซีวชั้นด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมกับชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 จ.ภูเก็ต 5 - 7 พฤษภาคม 2554 CEN12-562 (บทความยอดเยี่ยมประเภทวัสดุพลังงาน)
34. กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ "ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5 - 7 พฤษภาคม 2553 ENETT6-1193
35. T. Fangsuwannarak and K. Amonsurintawong, "Texturisation of monocrystalline Si

- wafer by wet chemical etchants without surfactant additive through PTFE masks”, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and 5th World Photovoltaics Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 Sep. (2010)
36. **T. Fangsuwannarak** and G. Scardera, “Effect of Annealing Temperature on Dark Current Density of Silicon nanocrystals embedded in a Nitride Matrix for Photovoltaic Application,” Proc. the 5th International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, On page(s): 797 - 800, Volume: Issue: , 14-17 May (2008)
 37. **T. Fangsuwannarak**, E.C. Cho, G. Conibeer, Y. Huang, T. Trupke and M.A. Green, “Analysis of The Effect of Silicon Quantum Dot Density on The Photoluminescence Spectra of Silicon Dot/Silicon Dioxide Superlattices,” *Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Dresden, Germany*, (2006)
 38. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, G. Scardera, G. Conibeer, M. A. Green, “Effects of Silicon Nanocrystallite Density on The Raman-Scattering Spectra of Silicon Quantum Dot Superlattices,” *Proc. SPIE 6415-07* (2006)
 39. G. Conibeer, M. A. Green, R. Corkish, Y. Cho, E-C. Cho, C-W Jiang, **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, “Silicon Nanostructures for Third Generation Photovoltaic Solar Cells,” *Thin Solid Film*, **511-512**, 654 (2006).
 40. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, “All-Silicon Tandem Cells Based on “Artificial” Semiconductor Synthesised Using Silicon Quantum Dots in Dielectric Matrix,” *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden* (2006)
 41. Scardera, T. Puzzer, D. McGrouther, E. Pink, **T. Fangsuwannarak**, G. Conibeer, and M. A. Green, “Investigating Large Area Fabrication of Silicon Quantum dots in a Nitride Matrix for Photovoltaic Applications,” *IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii*, **122** (2006)
 42. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, Y. H. Cho, G. Conibeer, T. Puzzer, and M. A. Green, “Conductivity of Self-Organized Silicon Quantum Dots Embedded in Silicon Dioxide,” *Proc. SPIE 6037*, 60370T (2005)
 43. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, “Artificial Semiconductor Synthesised Using Si Quantum Dots in a Dielectric Matrix,” *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona* (2005)
 44. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow, “Novel amorphous silicon alloy optoelectronic integrated circuits,” *Journal of Non-Crystalline Solids* **227-330**, 1146-1150 (1998)
 45. K. Chirakawikul, **T. Sujaridchai**, B. Ratwises, D. Kruangam, S. Panyakeow, W.

- Boonkosum, T. Sugino and J. Shirafuji, "Preparation of p-type polycrystalline diamond films and their applications to hole injection layers in amorphous SiC:H thin film light emitting diodes," *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227-230, 1156-1159 (1998)
46. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwises, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, S. Fujikake and H. Sakai, "Amorphous SiO:H thin film visible light emitting diode," *Journal of Non-Crystalline Solids*, **198-200**,1226-1229 (1998)
47. D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, and W. Boonkosum, "Novel Application of Amorphous Silicon Flexible Solar Cells As Battery Charger for Personal Mobile Telephone," *Technical Digest of the International PVSEC-9, Japan* (1996)
48. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Application of Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition to the Fabrication of Si Alloy Optoelectronic Devices," *Proceeding of 8th ASIAN Conference on Electrical Discharge ACED, Siam Inter-Continental, Bangkok* (1996)
49. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Basic Properties of Amorphous Silicon Alloys for Optoelectronic IC Applications," *Proceeding of Regional Symposium on Material Science, Fundamental and Applications on Semiconductor and Superconductors, Philippines* (1996)
50. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, "Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diod," *International Conference Amorphous Semiconductors Science&Technology (ICAS)* (1995)
51. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, "Fabrication of Amorphous Silicon Alloy Optical Devices for New Types of Thin Film Optoelectronic Integrated Circuits," *Australia Microelectronic Conference (MICRO), Adelaide, Australia* (1995)
52. W. Boonkosum, **T. Sujaridchai**, D. Kruangam, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Novel Matrix and Multi-Layer Amorphous Thin Film LED Flat Panel Display," *Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), Symposium V-Flat Panel Display San Francisco, USA,* (1995)