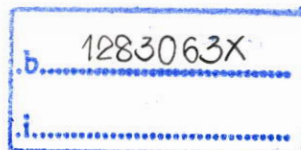




รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาชุดเตาอบยางพาราไร้ดแผ่นด้วยลมร้อนจากเตาแก๊สซีไฟเออร์
Development of the rubber sheet dryer by hot air from gasifier

นายสมพงศ์ บางยี่ขัน
นางวารัชชล วัฒนนะ



สงวนลิขสิทธิ์.....145499
เลขทะเบียน.....
ในเดือนปี 24 ก.พ. 2560

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาชุดเตาอบยางพาราไร้ควันด้วยลมร้อนจากเตาแก๊สซีพีเออร์
แหล่งเงิน ทุนวิจัยเงินรายได้ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขต
ชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 70,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ กันยายน 2557 ถึง กันยายน 2558

นายสมพงศ์ บางยี่ขัน วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

นางวรรณชล วัฒนะ วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบและสร้างชุดอบยางพาราไร้ควันฝุ้งแห้ง โดยมุ่งหวังที่จะลดเวลาในการตากยางไร้ควันฝุ้งแห้ง โดยในชุดอบประกอบด้วย เตากำเนิดความร้อนแก๊สซีพีเออร์ชนิดไหลลง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเตาอบยางพาราไร้ควันฝุ้งแห้งแบบ การดำเนินงานวิจัยได้ออกแบบและสร้างเตาแก๊สซีพีเออร์เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนก่อนและทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา ทั้งนี้เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดของเตาที่ทำการออกแบบ โดยพบว่าเตามีอัตราการกินเชื้อเพลิง 0.00126 kg/s และอัตราไหลของอากาศ 0.0143 m³/s โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ 2.81% ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถจ่ายลมร้อนได้ถึง 60 องศาเซลเซียสและใน Condition ดังกล่าวตลอดการเผาเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีพีเออร์ในขณะที่ระบบจ่ายลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถอบยางพาราไร้ควันฝุ้งแห้งที่มีความชื้นก่อนอบ 45% มาตรฐานแห้งขนาด 90cmx50cmx4mm น้ำหนัก 1.6 - 1.8 kg ให้ความชื้นลดลงถึง 30% มาตรฐานแห้งภายใน 24 ชั่วโมง จนเหลือความชื้น 15% มาตรฐานแห้งซึ่งเพียงพอต่อการจำหน่ายเป็นยางแผ่นดิบคุณภาพดี ความชื้นไม่เกิน 15% มาตรฐานแห้งได้

คำสำคัญ: เตาแก๊สซีพีเออร์/ ยางพาราฝุ้งแห้ง/ เตาชีวมวล

Research Title: Development of the rubber sheet dryer by hot air from Gasifier

Researcher: Mr.Sompong Bangyeekhan

Mrs.Wansachon Watthana

Faculty: Prince of Chumphon Campus **Department:** Engineering

ABSTRACT

This research aims to design and build a drying system for dry an air dried sheet (ADS). This aim is to reduce the time to dry ADS. The system consists of a downdraft gasifier, Heat exchanger and oven-rubber sheet prototypes. We have designed and built downdraft gasifier, to be used as a heat source and test the thermal efficiency of the furnace. There is optimizing the design of the stove. It was found that the stove has a consumption of fuel 0.00126 kg/s and the flowrate of air 0.0143 m³/s, with the thermal efficiency of 2.81%, while the heat exchanger to supply heat up to 60°C in this condition. The burning fuel Gasifier, while the supply of heat exchange equipment can bake rolled rubber sheets with moisture before baking 45% dry basis, weight is 1.6 - 1.8 kg and size 90cmx50cmx4mm to drop the humidity to 30% dry basis in 24 hours.

Keywords: Downdraft gasifier/ Air dried sheet/ Biomass stove

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาชุดเตาอบย่างพาราไรต์แผ่นด้วยลมร้อนจากเตาแก๊สซีไฟเออร์” การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ซึ่งเป็นทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และเครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ของสาขาวิชา ผู้วิจัยขอขอบคุณลูกศิษย์ที่ช่วยงานทดสอบเตา และผ้าไม้เชื้อเพลิง รวมถึงบุคคลากรทุกท่านที่ได้เป็นส่วนหนึ่งของความสำเร็จนี้ ขอขอบคุณในด้านกำลังใจอันได้แก่ บิดา มารดา ภรรยา และลูก สุดท้ายนี้สิ่งที่จะขาดไม่ได้คือบุญคุณของบูรพาจารย์ ที่ได้ประสพวิชาความรู้ สอนสั่งข้าพเจ้าตั้งแต่เกิดจนถึงปัจจุบัน



(นายสมพงศ์ บางยี่ขัน)
หัวหน้าโครงการวิจัย



(นางวรัชชล วัฒนนะ)
ผู้ร่วมโครงการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีการเกิดแก๊สซีพีเคชั่น.....	9
2.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวล.....	12
2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	14
2.4 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	15
2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	19
2.6 Fouling Factor.....	21
2.7 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	23
2.8 วิธีการของค่าประสิทธิผล-เอ็นทียู.....	25
2.9 การทำยางรีดแผ่น.....	27
2.10 หลักการอบแห้ง.....	33
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม.....	41
บทที่ 3 การออกแบบและวิธีดำเนินการวิจัย	45
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ ในการดำเนินการวิจัย.....	45
3.2 การออกแบบแก๊สซีพีเออร์ชนิดไหลลง.....	46
3.3 การทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีพีเออร์.....	48
3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	50
3.5 การอบยางพารารีดแผ่น.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	59
4.1 ผลทดลองจากการหาความเร็วลม.....	59
4.2 ประสิทธิภาพเตาแก๊สซีไฟเออร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น.....	61
4.3 ผลการออกแบบด้วยระบบเตาอบที่สร้างขึ้น.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	70
6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้และที่อยู่ระหว่างดำเนินการ ทั้งหมด อาทิเช่น บทความ/ชิ้นงาน/สิทธิบัตร หรืออื่นๆ.....	70
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณหาปริมาตรความจุภายในเตาแก๊สชีวมวล.....	75
ภาคผนวก ข การคำนวณหาประสิทธิภาพเตาผลิตแก๊สชีวมวล.....	76
ภาคผนวก ค ส่วนประกอบเตาผลิตแก๊สชีวมวล.....	78
ภาคผนวก ง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	80
ภาคผนวก จ เอกสารหลักฐานอ้างอิงของผลผลิตจาก บทที่ 6.....	85
ภาคผนวก ฉ สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	96
ประวัตินักวิจัย	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Representative values of the overall heat transfer coefficients in heat Exchangers	21
2.2 Representative fouling factors (thermal resistance due to fouling for a unit surface area).....	22
2.3 Typical fouling coefficients.....	23
2.4 Effectiveness relations for heat exchangers (Kays and London): $NTU = UA_s/C_{min}$ and $c=C_{min}/C_{max} = (m.C_p)_{min}/(m.C_p)_{max}$	26
2.5 NTU relations for heat exchangers [xz] : $NTU=UA_s/C_{min}$ and $c=C_{min}/C_{max}=(m.C_p)_{min}/(m.C_p)_{max}$	27
2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเทคนิคระหว่างเตาแก๊สซีฟเอร์แบบ Fixed batch ทั้ง 3 แบบ	42
4.1 แสดงมุมมองจากการเปิดของวาล์วและอัตราการไหลของอากาศ เพื่อนำอากาศเข้าไปในเตาแก๊สซีฟเอร์ในขณะที่เผาขึ้นไม้เชื้อเพลิง	59
4.2 ตารางผลการทดสอบการเปิดวาล์วอากาศเข้าเตาและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟเอร์	61
4.3 แสดงอุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาอบในทุกๆชั่วโมงตลอด 24 ชั่วโมง	62
4.4 แสดงน้ำหนักของยางพารา ที่ลดลงเมื่อเวลาการอบผ่านไปทั้ง 24 ชั่วโมงของการอบยางพาราครั้งที่ 1	63
4.4 แสดงน้ำหนักของยางพารา ที่ลดลงเมื่อเวลาการอบผ่านไปทั้ง 24 ชั่วโมงของการอบยางพาราครั้งที่ 2	65
4.6 ตารางค่าเฉลี่ยความชื้นตามมาตรฐานแห้งของยางที่ผ่านการอบทั้ง 2 ครั้ง	67

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ยางรีดแผ่นผึ่งแห้ง.....	1
1.2 การผึ่งยางรีดแผ่นให้แห้งบนราวตากยาง.....	1
1.3 ยางอบแห้งไม่รมควัน PAUSU.....	2
1.4 ยางอบแห้งรมควัน RSS.....	2
1.5 เตอบยางแบบมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหนือเตา.....	4
1.6 เตาก๊าซซีไฟเออร์แบบไหลลง.....	6
1.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	6
1.8 เตอบยางพารารีดแผ่น.....	7
1.9 การเชื่อมต่อระบบระหว่างเตาเผา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและตู้อบยาง.....	7
2.1 โซนของกระบวนการแก๊สซีพีเคชั่นภายในเตาก๊าซซีไฟเออร์.....	9
2.2 กระบวนการทั้ง 4 ขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซีพีเคชั่น.....	12
2.3 เตาก๊าซซีไฟเออร์แบบไหลขึ้น.....	12
2.4 เตาก๊าซซีไฟเออร์แบบไหลลง.....	13
2.5 เตาก๊าซซีไฟเออร์แบบตัดขวาง.....	13
2.6 เตาก๊าซซีไฟเออร์แบบฟลูอิดไดเบด.....	14
2.7 ลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น (Double-Pipe heat exchanger).....	16
2.8 การไหลที่แตกต่างกันใน Cross flow heat exchangers.....	16
2.9 shell-and-tube heat exchanger (one-shell pass and one-tube pass).....	17
2.10 Multi-pass flow arrangements in Shell-and-tube heat exchangers.....	17
2.11 Thermal resistance network associated with heat transfer in a double-pipe heat exchanger.....	20
2.12 การเก็บน้ำยางจากต้นในสวนยาง.....	28
2.13 กรองน้ำยางขณะรวบรวมน้ำยาง.....	29
2.14 เติมน้ำใส่ตะกวง.....	29
2.15 เติมน้ำยางใส่ตะกวงลงไปผสม.....	30
2.16 การกวาดฟองบริเวณผิวหน้าของน้ำยาง.....	31
2.17 การนวดแผ่นยางให้แผ่บางลง.....	32
2.18 การตากยางรีดแผ่นหลังการรีดเสร็จแล้ว.....	33
2.19 การตากยางผึ่งแห้งในโรงเก็บ โดยพาดไว้กับราว.....	33
2.20 ค่าความชื้นวิกฤตที่มีอยู่ในวัสดุ.....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.21 ค่าความชื้นวิกฤตที่มีอยู่ในวัสดุ.....	36
2.22 ค่าความชื้นและอัตราการอบแห้ง.....	37
2.23 Constant Rate Drying (R_c) และ Falling Rate Drying (R_f).....	38
2.24 ลักษณะการระเหยของความชื้นในเนื้อวัสดุ.....	39
3.1 ระบบกลไกอุปกรณ์อบยางพาราไรดแผ่นโดยมีแหล่งกำเนิดความร้อน เป็นเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง.....	45
3.2 อุปกรณ์หลักในชุดระบบอบยางพาราไรดแผ่น.....	46
3.3 Water Boiling Test.....	49
3.4 ขาร์จการดำเนินงานอบยางพาราไรดแผ่น.....	54
3.5 เชื้อเพลิงที่ผ่านการลดความชื้นและควบคุมขนาด.....	55
3.6 ตู้อบยางที่ที่ได้รับลมร้อน ควบคุมให้ตู้อบยางมีอุณหภูมิ 50-60 องศา ในทุกตำแหน่ง.....	55
3.7 จัดเตรียมยางพาราไรดแผ่นให้ได้ขนาดตามกำหนด พร้อมทั้งทำความสะอาด และตากยางให้สะเด็ดน้ำให้แห้งจนไม่มีหยดน้ำเกาะแผ่นยาง อย่างน้อย 6 ชั่วโมง.....	56
3.8 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ลเรียงจากด้านซ้าย, ด้านหลัง, ด้านขวา เรียงตามลำดับ.....	56
3.9 ชั่งน้ำหนักยางพาราพร้อมเก็บข้อมูลน้ำหนักแล้วนำแผ่นยางเข้าตู้อบยาง.....	57
3.10 ชั่งน้ำหนักยางพาราพร้อมเก็บข้อมูล.....	58
4.1 แสดงผลของน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาที่อบจากเริ่มต้นอบจนถึงอบครบ 24 ชั่วโมง ในการทดลองครั้งที่ 1.....	64
4.2 แสดงผลของน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาที่อบจากเริ่มต้นอบจนถึงอบครบ 24 ชั่วโมง ในการทดลองครั้งที่ 2.....	66

บทที่ 1

บทนำ

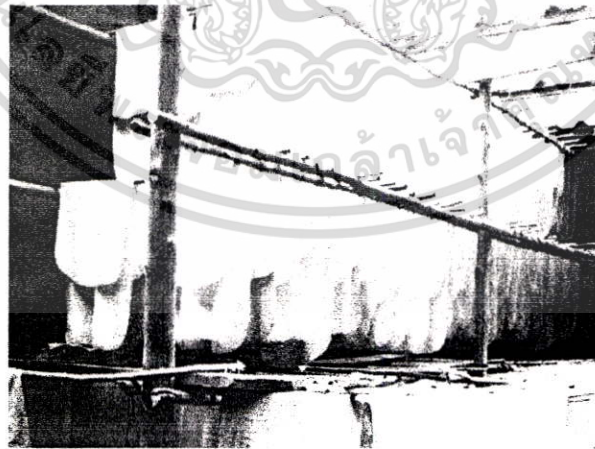
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีวิธีทำแห้งยางรีดแผ่น ดังรูปที่ 1 มีด้วยกัน 2 แบบคือ



รูปที่ 1.1 ยางรีดแผ่นผึ่งแห้ง [1]

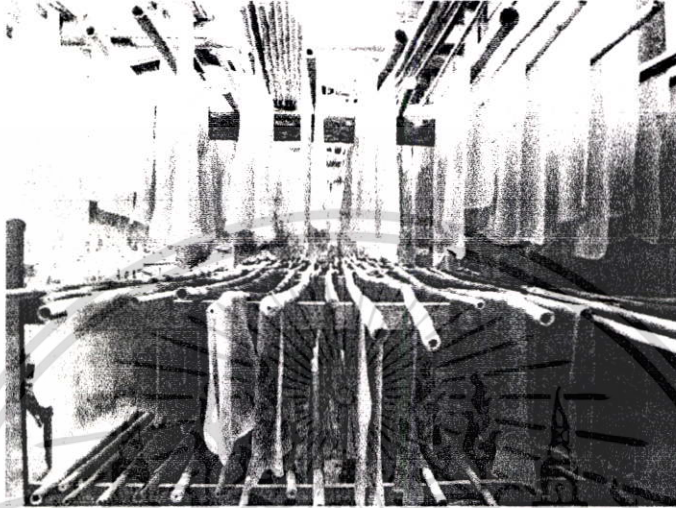
แบบที่ 1 คือการผึ่งให้แห้งโดยการผึ่งลมในที่ที่มีแสงรำไรดังรูปที่ 2 ซึ่งเกษตรกรชาวสวนยางจะเป็นผู้ทำยางรีดแผ่นเองเรียกว่า ยางผึ่งแห้ง (Air dried sheet: ADS)



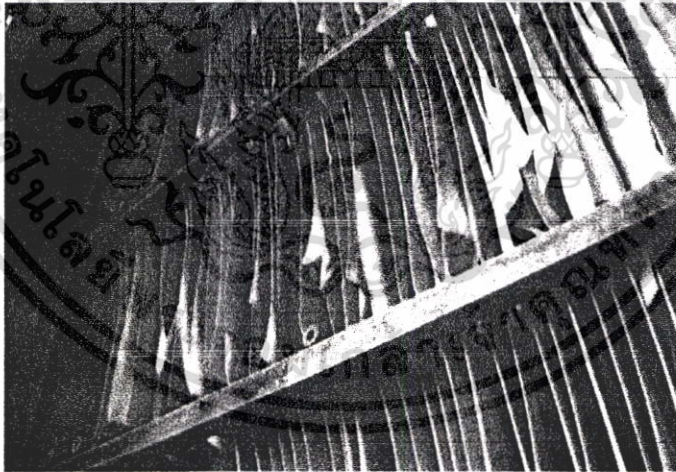
รูปที่ 1.2 การผึ่งยางรีดแผ่นให้แห้งบนราวตากยาง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2 คือเกษตรกรจะขายน้ำยางให้กับสหกรณ์โรงอบยาง/รมยาง หรือโรงอบยาง/รมยางของเอกชน จากนั้นโรงรมยาง/อบยางจะนำน้ำยางมาทำยางรีดแผ่นแล้วเอาเข้าเตาอบยางเพื่อทำแผ่นยางอบแห้งไม่รมควัน (Pale Amber Unsmoked Sheet : PAUSU) ดังรูปที่ 1.3 และทำแผ่นยางอบแห้งรมควัน (Ribbed Smoked Sheet: RSS) ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 ยางอบแห้งไม่รมควัน PAUSU [3]



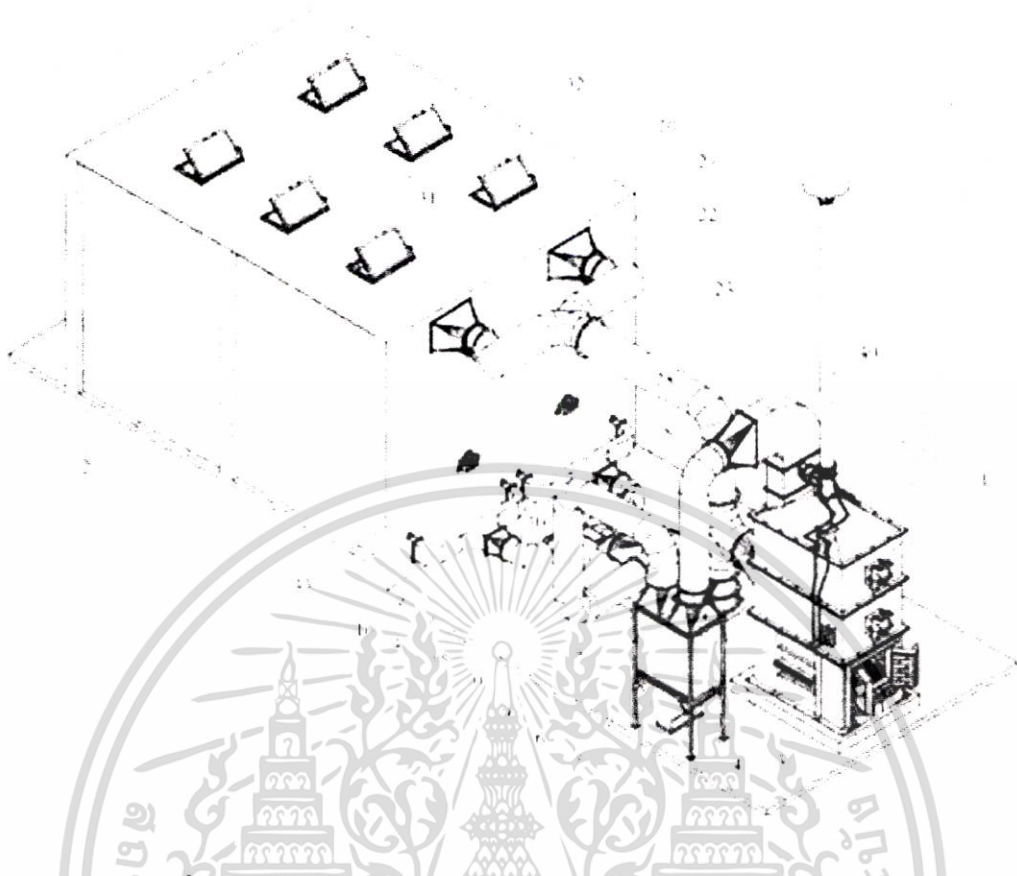
รูปที่ 1.4 ยางอบแห้งรมควัน RSS [4]

โดยกระบวนการแห้งของยางผืนแห้งนั้นเป็นไปได้ช้า กล่าวคือยางที่ตากโดยการผึ่งลมจะมีระยะเวลาในการตากประมาณ 15-20 วัน ในขณะที่กระบวนการทำแห้งของสหกรณ์โรงรมยางก็จะใช้เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 4 วัน จึงจะได้ยางแผ่นแห้งคุณภาพดี ดังนั้นระยะเวลาในการทำยางให้แห้งจึงค่อนข้างช้าใช้เวลานานทำให้สูญเสียรายได้ที่ควรจะได้รับ สูญเสียค่าเสียโอกาสและค่าดอกเบี้ย จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง [5] พบว่าเกษตรกรบางส่วนไม่มั่นใจในการตีเปอร์เซ็นต์ยางในน้ำยางของพ่อค้าหรือสหกรณ์ผู้รับซื้อ ทั้งนี้พบว่ายังไม่มีเครื่องมือวัดเปอร์เซ็นต์ยางในน้ำยางได้ผล 100% เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ดังนั้นเกษตรกรจึงจำเป็นต้องทำยางรีดแผ่นเองแล้วฝึกลงให้แห้งไว้รอขาย ซึ่งเมื่อยางแห้งเกือบสนิทแล้วจะมีความชื้นอยู่ในระดับ 3-10% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการตากยาง ซึ่งวิธีการนี้เกษตรกรยอมรับได้ แต่เนื่องจากความผันผวนของราคายาง จึงไม่อาจไว้วางใจในการตากและเก็บรักษาอย่างเป็นเวลานานๆ ได้ มีโอกาสที่ราคายางจะตกได้อย่างรวดเร็วและการแห้งตัวของยางอาจจะทำให้สูญเสียโอกาส อีกทั้งการเก็บยางเป็นเวลานานไม่เป็นผลดีแก่เกษตรกรเอง เช่น ยางอาจจะขึ้นรา กลิ่นยางที่ฉุนรุนแรงเสียสุขภาพ อีกทั้งการเก็บยังจะมีค่าใช้จ่ายในการเก็บ อีกทั้งสภาพอากาศบางครั้งก็ไม่เป็นใจในการตากฝึกลงของเกษตรกร แต่เกษตรกรก็ไม่มีเครื่องมือที่จะอบยางพารารีดแผ่นให้แห้งได้ในเวลาอันรวดเร็ว

อนึ่งในการอบยางรีดแผ่นของโรงรมยางในปัจจุบัน เป็นลักษณะของการเผาไหม้ผืนจากเตาด้านนอกแล้วให้ลมจากบรรยากาศภายนอกเตาพาความร้อนเข้าไปปะทะกับหน้ายางภายในเตาทำให้ยางแห้ง อย่างไรก็ตามการควบคุมความร้อนภายในเตานั้นทำได้ไม่ถนัดเนื่องจากการเติมเชื้อเพลิงซึ่งเป็นไม้ผืนเป็นเรื่องที่ยุ่งยากในการควบคุมปริมาณการใส่ไม้ผืน อีกทั้งไม้ผืนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น มีความสดแห้งไม่เท่ากันไม้ผืนที่สดจะก่อให้เกิดควันทำให้ควันดังกล่าวเข้าไปจับกับหน้ายางทำให้ยางเป็นสีน้ำตาลคล้ำ การใช้เพียงอากาศร้อนเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวยางออกมาทำให้ยางแห้งลงได้และได้คุณภาพดี อนึ่งเตาอบยางปัจจุบันได้มีการพัฒนาการก่อสร้างให้ใช้กระบวนการนำลมร้อนแบบบังคับได้เข้าตัวห้องอบ แต่ตัวเตาเชื้อเพลิงเป็นแบบที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหนือเตาเผา แบบเตาเผาแก๊สซีพีเคชั่น กิ่งเผาตรง ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 เตาอบแบบมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหนือเตา [6]

ทั้งนี้เตาแบบนี้ก็มีข้อดีและข้อเสียเหมือนกันกล่าวคือ ข้อดีของเตาแบบนี้คือไม่ต้องคำนึงถึงความชื้นของเชื้อเพลิง ไม่ต้องคำนึงถึงขนาดของชั้นเชื้อเพลิง เนื่องจากการกึ่งเผาตรง ทำให้สะดวกในการใช้เชื้อเพลิงแต่ก็มีข้อเสียเรื่องของอุปกรณ์ เช่นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องตัดไฟ ท่อทางต่างๆ ที่จะต้องมีคราบของน้ำมันทาร์เคลือบปกคลุมอยู่ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำได้ไม่ดีนักเมื่อใช้งานเตาไปได้ระยะหนึ่ง ทำให้ต้องมีการซ่อมบำรุงส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งจะติดน้ำมันทาร์ ซึ่งน้ำมันทาร์เป็นสิ่งที่ยุ่งยากในการกำจัด

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดเวลาในการทำแห้งยางฝั่มแห้งด้วยตัวเกษตรกรเองในระดับครัวเรือนก่อนจะขยายหลักการและรูปแบบสู่ภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่อไป โดยการอบยางแผ่นฝั่มแห้งก่อนการเก็บรักษาโดยเร่งให้ยางแห้งเร็วกว่าเดิมโดยการอบด้วยลมร้อนอันเกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของลมเย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับความร้อนของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้แก๊สที่ผลิตจากเตาแก๊สซีพีเออร์โดยมีวัตถุประสงค์งานวิจัยดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

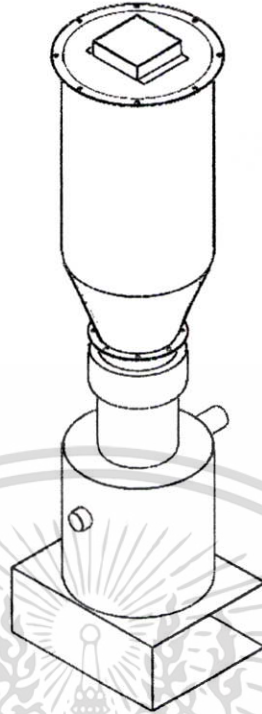
- 1.2.1 เพื่อสร้างชุดเตาอบยางพาราผึ่งแห้งด้วยลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดไหลลงเป็นแหล่งผลิตความร้อน
- 1.2.2 เพื่อลดระยะเวลาในการทำยางผึ่งแห้ง เมื่อเทียบกับวิธีการตากผึ่งแห้งแบบเดิม
- 1.2.3 เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำแห้งของแผ่นยางพาราผึ่งแห้งด้วยการอบไล่ความชื้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้สำหรับอบยางรีดแผ่น โดยใช้ลมร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น
- 1.3.2 ทำการทดสอบกับยางแผ่นดิบขนาด 1.6-1.8 kg/แผ่น จำนวนแผ่นยางที่จะอบจำนวน 5 แผ่น ต่อการอบ 1 รอบ (ขนาดยางต่อ 1 แผ่นโดยประมาณ 50 ซม. X 90 ซม. X 4 มม.)
- 1.3.3 ต้องตากยางผึ่งลมในที่ที่มีอากาศถ่ายเทที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมงจนมีความชื้นในเนื้อยางไม่เกิน 45% Dry basis (DB)
- 1.3.4 ความชื้นในเนื้อยางหลังการอบไม่มากกว่า 15 % DB ภายใน 24 ชั่วโมง
- 1.3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (Cross flow) จำนวน 4 ท่อ
- 1.3.6 เตาก๊าซซีไฟเออร์ออกแบบภายใต้เชื้อเพลิงตั้งต้นคือไม้ยางพาราความชื้น ไม่เกิน 12 % Dry basis (DB)
- 1.3.7 เตาก๊าซซีไฟเออร์เป็นชนิดไหลลงทั้งนี้เพื่อการซ่อมบำรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้น้อยที่สุดหรือไม่ต้องซ่อมบำรุงเลย

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

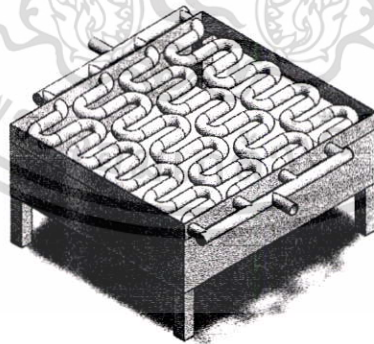
- 1.4.1 ออกแบบและสร้างชุดเตาก๊าซซีไฟเออร์แบบ Downdraft โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นเศษไม้ยางพารา ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 เตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลง

1.4.2 ทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาด้วยวิธีการต้มน้ำในภาชนะเปิด (Water Boiling Test)

1.4.3 ออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (Cross flow) จำนวน 4 ท่อดังรูปที่ 1.7

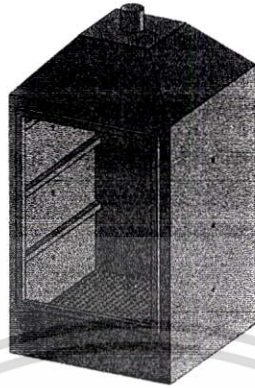


รูปที่ 1.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.4.4 ทดสอบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

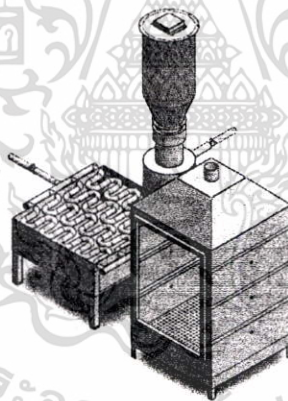
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.5 ออกแบบและสร้างชุดเตาอบยางพาราอัดแผ่นดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 เตาอบยางพาราอัดแผ่น

1.4.6 เชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมด



รูปที่ 1.9 การเชื่อมต่อระบบระหว่างเตาเผา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและตู้อบยาง

1.4.7 ทดสอบการถ่ายลมนร้อนของระบบทั้งหมด

1.4.8 ทดสอบอบยางจริงและเก็บข้อมูลผลการอบยางอัดแผ่น

1.4.9 รายงานผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เครื่องต้นแบบเตาอบย่างพารารีดแผ่นด้วยลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดย
ได้รับความร้อนจากแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบไหลลง

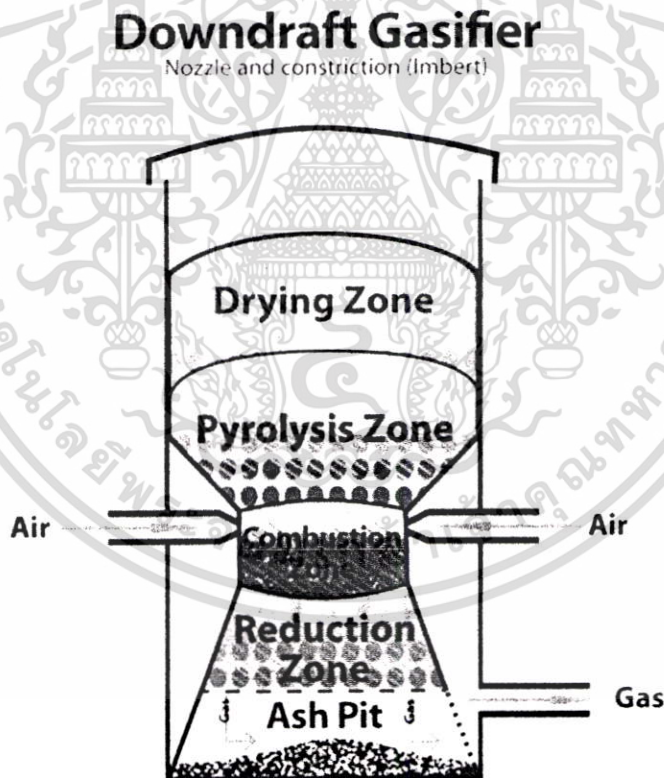


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

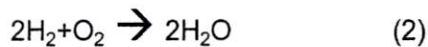
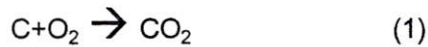
2.1 ทฤษฎีการเกิดแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Biomass Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical Reaction) เชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวนี้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) ซึ่งสภาวะทำให้เกิดแก๊สดังกล่าวก็คือ สภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือเป็นสภาวะที่มีการจำกัดอากาศหรือออกซิเจนเพื่อการเผาไหม้ เพราะถ้าหากมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอแล้วจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Combustion) และจะทำให้กระบวนการเผาไหม้มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ซึ่งไม่ติดไฟออกมา ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซนดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยโซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [7]



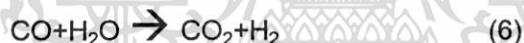
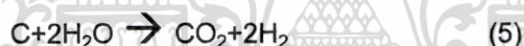
รูปที่ 2.1 โซนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเตาแก๊สซิฟิเคชัน [8]

Combustion Zone (โซนเผาไหม้) เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลถูกความร้อนจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังสมการที่ (1) ถึง (2)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (1) และ (2) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน *Reduction* และ โซน *Pyrolysis* อุณหภูมิในโซนเผาไหม้จะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500 °C

Reduction Zone (โซนปฏิกิริยาหรือโซนผลิตแก๊ส) แก๊สร้อนที่ผ่านมาจากโซนเผาไหม้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาผลิตแก๊สในโซนนี้จะมีอุณหภูมิ 500-900 °C ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านถ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (3) ถึง (7)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (3) เรียกว่า *Boundouard Reduction* และปฏิกิริยาในสมการที่ (4) เรียกว่า *Water Gas Reduction* เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ *Reduction* นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีวมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณมาของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้ออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้ำอุณหภูมิในโซน Reduction สูงกว่า 900 °C แล้ว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซน Reduction ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิด แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (5) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่าประมาณ 500-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ จะทำให้เกิด คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (6) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production

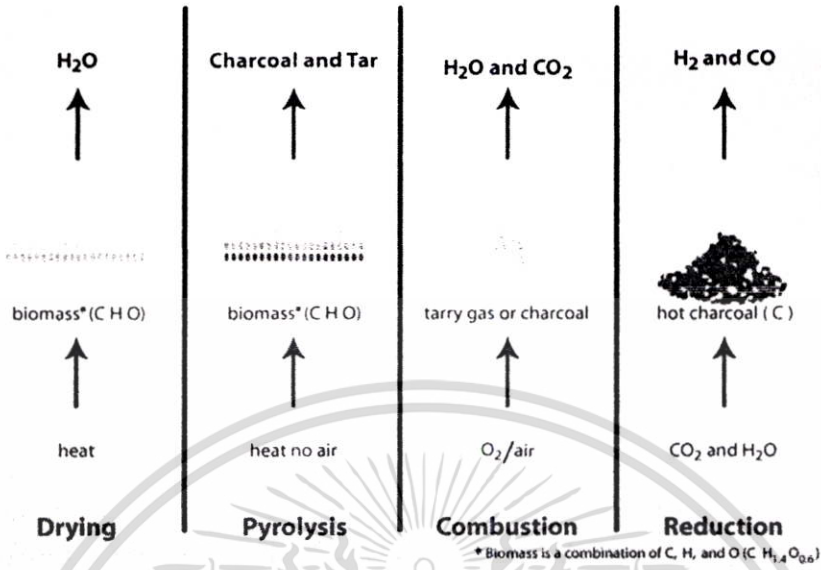
Pyrolysis หรือ Distillation Zone รับความร้อนจากโซน Reduction ทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีววมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดไขมัน และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะท ำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (8)

$$\text{Dry Biomass} + \text{Heat} \rightarrow \text{Charcoal} + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{Pyrolygneous Acid} + \text{Tars} \quad (8)$$

Drying Zone ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C [7] ซึ่งกระบวนการทั้ง 4 ขั้นตอนสามารถแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

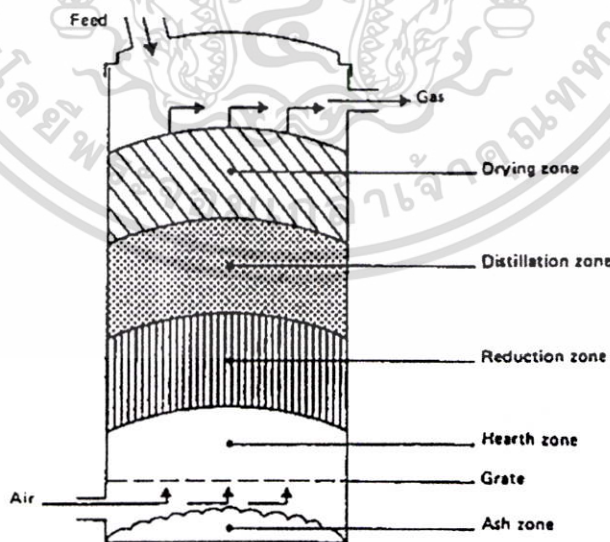
4 Processes in Gasification



รูปที่ 2.2 กระบวนการทั้ง 4 ขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [8]

2.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวล

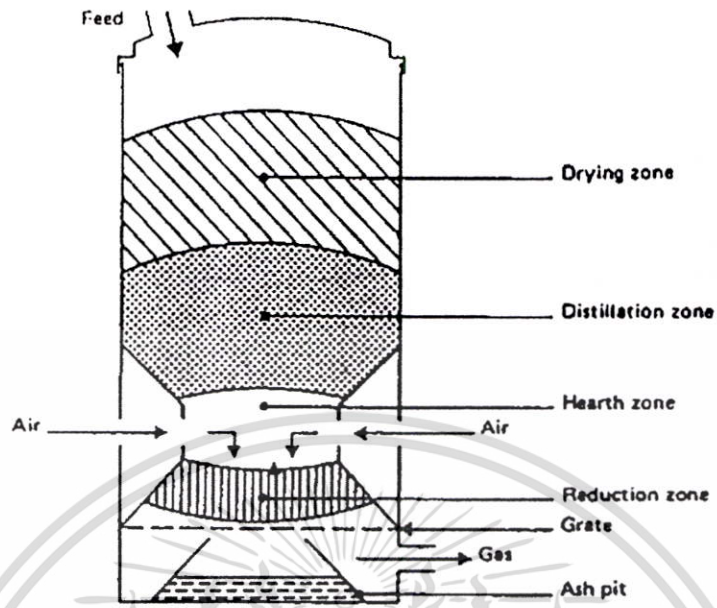
เตาแก๊สซิฟิเคชัน เป็นเตาที่ให้ความร้อนสูงโดยใช้พลังงานจากชีวมวล นำมาเผาด้วยการจำกัดอากาศเพื่อให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะก่อให้เกิดแก๊สชีวมวล (Producer Gas) ซึ่งเตาแก๊สซิฟิเคชันมีด้วยกัน 4 ชนิดตามลักษณะกลไกการเผาไหม้ [9] ประกอบด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้นตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้น [9]

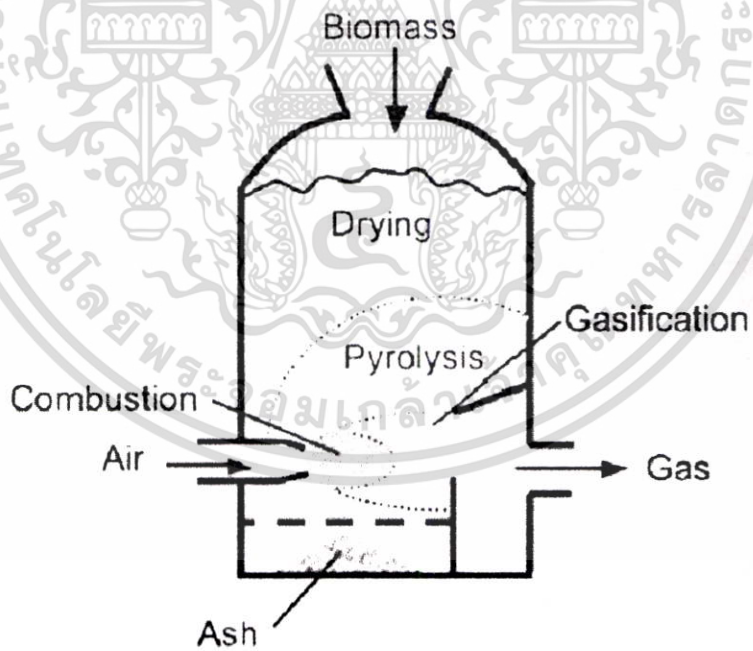
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง [9]

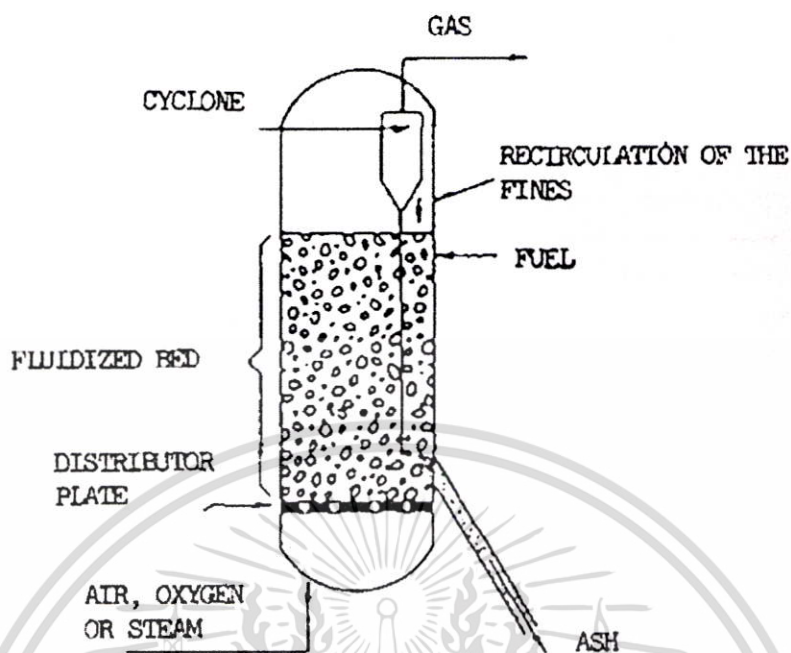
เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบตัดขวางตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบตัดขวาง [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบฟลูอิดไดเบตตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบฟลูอิดไดเบต [9]

เตาแบบไหลขึ้นนั้นจะมีปริมาณน้ำมันทาร์ (Tar) มาก เตาแบบไหลลงจะมีปริมาณน้ำมันทาร์น้อยกว่า เตาแบบไหลตัดขวางจะเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ เตาแบบฟลูอิดไดเบตเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก [11] เตาแก๊สซีไฟเออร์ได้เป็นส่วนหนึ่งของการผลิตพลังงานทดแทน โดยการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงทำให้เกิดงานวิจัยในหลาย ๆ สถาบัน เกี่ยวกับการพัฒนาและออกแบบสร้างเตาผลิตแก๊สชีวมวล รูปแบบการใช้งาน ลักษณะเตาผลิตชีวมวล และวัสดุที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น [12] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเตาแบบไหลลงจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันทาร์น้อย [13] ทั้งนี้ถ้ากระบวนการเผาไหม้มีปริมาณน้ำมันทาร์มากจะทำให้เกิดการเกาะติดตามผนังของเตาและเข้าไปอุดตันรังผึ้งที่บริเวณโซนเผาไหม้ทำให้ปิดกั้นการไหลของถ่านและแก๊สเชื้อเพลิงทำให้เกิดแก๊สน้อย อีกทั้งการเกาะติดของน้ำมันทาร์ก็เป็นสิ่งที่ยากในการกำจัดด้วย

2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ที่จะคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

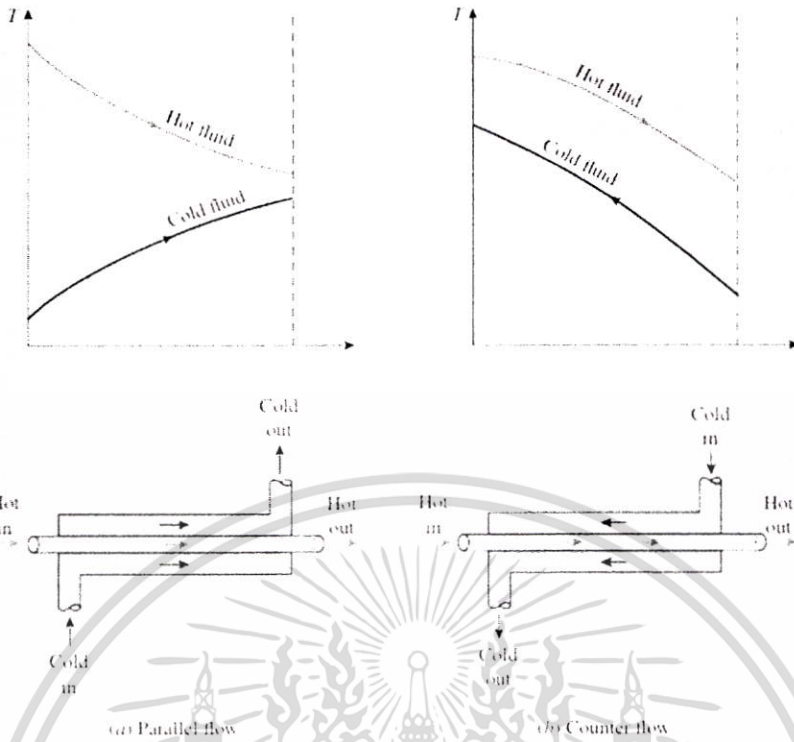
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิศวกรต้องมีความรู้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อน และความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่จะมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสภาวะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่ หน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีใช้และเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับต้นทุนของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์ การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำอย่างระมัดระวัง เงื่อนไขที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมก็คือ ความมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงและราคาถูก

2.4 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Types of Heat Exchangers)

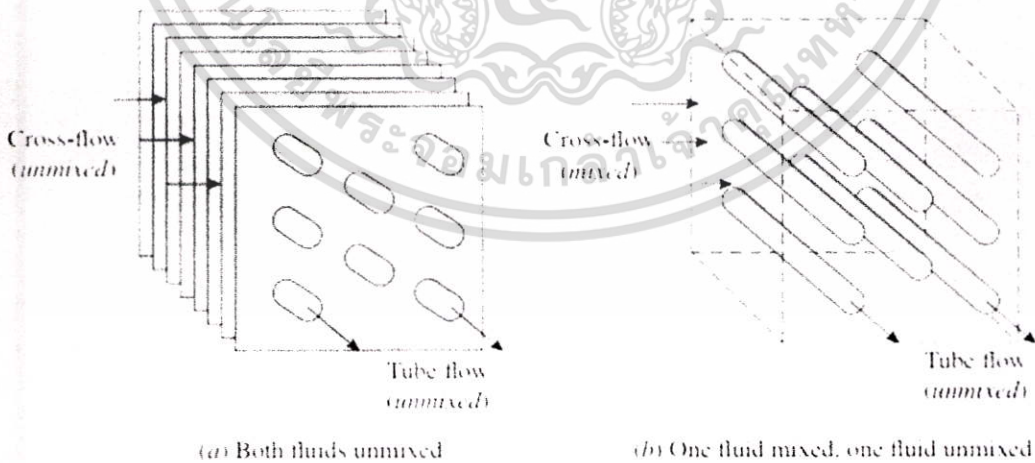
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบการจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลักโดยทั่วไปแล้วจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Concentric tube or Double pipe) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้อาจอยู่ในลักษณะที่ท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกัน ส่วนการไหลของของไหล อาจไหลสวนทางกัน เรียกว่า counter flow หรือไหลขนานกัน เรียกว่า parallel flow ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น (Double-Pipe heat exchanger) [14]

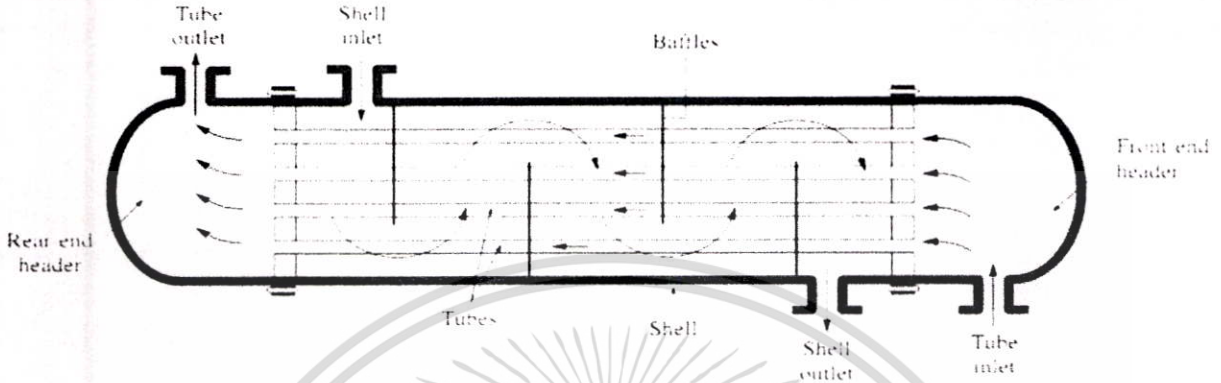
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (Cross flow) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลจะไหลในทิศทางตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การสร้างนี้อาจให้อยู่ในลักษณะของไหลเดี่ยวเดียว (single pass) หรือ ไหลสองเที่ยว (double pass) หรือมากกว่าก็ได้



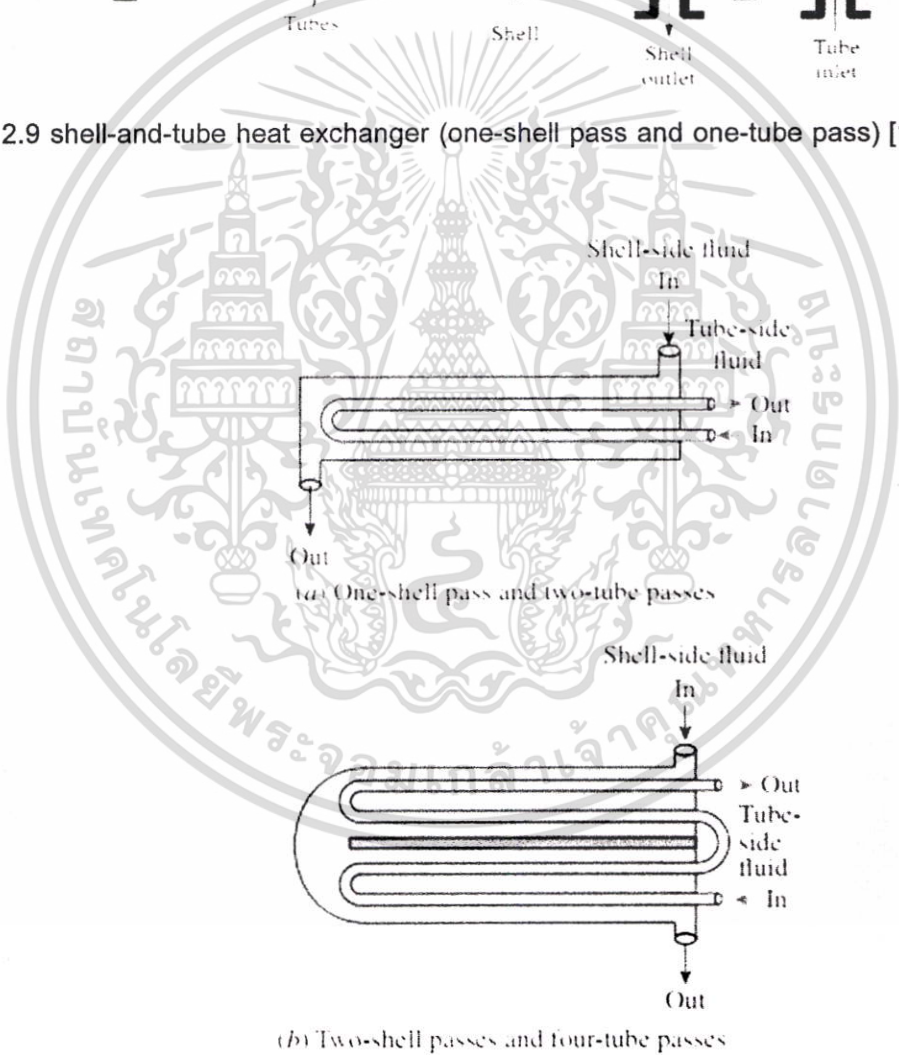
รูปที่ 2.8 การไหลที่แตกต่างกันใน Cross flow heat exchangers [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ของไหลอย่างหนึ่งจะอยู่ในเชลล์ และอีกอย่างหนึ่งจะอยู่ในท่อ สำหรับการไหลนั้นจะอยู่ในลักษณะไหลสวนทาง หรือไหลขนานก็ได้ หรือทั้งสองอย่างในเครื่องเดียวกันก็ได้ดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ อาจออกแบบให้ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกับท่อก็ได้



รูปที่ 2.9 shell-and-tube heat exchanger (one-shell pass and one-tube pass) [14]



รูปที่ 2.10 Multi-pass flow arrangements in Shell-and-tube heat exchangers [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถการแบ่งประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ แบ่งตามสภาวะของของไหลที่ใช้ และแบ่งตามลักษณะการใช้งานดังนี้คือ

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด เช่น น้ำมันกันหอกถันและน้ำมันดิบที่ป้อนเข้าหอกถัน เป็นต้น

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยของเหลวชนิดหนึ่งจะเปลี่ยนสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เครื่องต้มซ้ำ (Re-boiler) ของหอกถันน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ก๊าซ ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ ไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นอากาศที่ใช้ก๊าซทั้งเป็นแหล่งความร้อน

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ก๊าซ ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ โดยชนิดหนึ่งจะมีการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่นในห้อง โดยทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ

5. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ของเหลว ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ โดยชนิดหนึ่งเป็นก๊าซและอีกชนิดหนึ่งเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อน ที่ใช้ก๊าซทั้งจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน

6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ เช่น หม้อไอน้ำแบบท่อซึ่งระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำด้วยก๊าซสันดาป และเครื่องควบแน่น ซึ่งควบแน่นไอให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน

การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์การใช้งาน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งตามประเภทจุดประสงค์การใช้งานหรือลักษณะการใช้งานนั้น ได้แก่

1. เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเคี่ยว (Concentrator) การใช้งานคือการระเหยของเหลวให้เป็นไอเพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์ หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นขึ้น

2. เครื่องอุ่น หรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้ของไหลร้อนล่วงหน้า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามตำแหน่งข้างหน้าของการใช้งานหรือตามประเภทของของไหลที่ถูกอุ่นให้ร้อน เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler Feed Water Preheater) เป็นต้น

3. เครื่องทำให้ร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับของไหลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

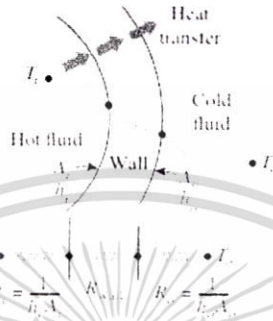
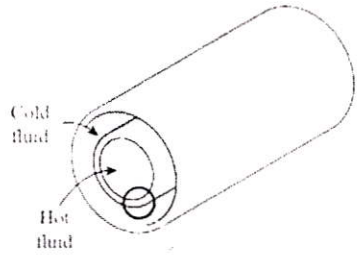
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องทำให้ร้อนยิ่งยวด (Superheat-heater) เครื่องนี้จะทำหน้าที่เพิ่มความร้อนให้กับของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อที่จะทำให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวด
5. เครื่องต้มซ้ำ (Re-boiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนให้กับของเหลวเพื่อที่จะระเหยให้เป็นไออีกครั้ง
6. เครื่องควบแน่น (Condenser) จุดประสงค์ที่สำคัญก็เพื่อควบไอให้กลายเป็นของเหลว เช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำ
7. เครื่องควบแน่นหมด (Total Condenser) เครื่องนี้เป็นเครื่องควบแน่นชนิดหนึ่ง ที่ใช้กับหอกลั่นได้รับการออกแบบให้สามารถควบแน่นไอที่ออกมาจากยอดหอกลั่นได้ทั้งหมด
8. เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial Condenser) เครื่องควบแน่นประเภทผลิตขึ้นใช้กับหอกลั่น มีจุดประสงค์เพื่อควบแน่นบางส่วนให้กลายเป็นของเหลว
9. เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล
10. เครื่องทำให้เย็นจัด (Chillier) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้ต่ำลงมาก โดยใช้สารทำความเย็น (Refrigeration) เช่น ฟรียอน แอมโมเนีย เป็นต้น

2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient)

เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับ เซลล์ในเชิงความร้อนก็คือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลสองชนิด นั้นได้นิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น T_c ที่กันโดยผนังที่บิดด้วยสมการ

เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับ เซลล์ในเชิงความร้อนก็คือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลสองชนิด นั้นได้นิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น T_c ที่กันโดยผนังที่บิดด้วยสมการ (2.1)



รูปที่ 2.11 Thermal resistance network associated with heat transfer in a double-pipe heat exchanger [14]

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (2.1)$$

$$R = R_{\text{total}} = R_i + R_{\text{wall}} + R_o \quad (2.2)$$

เมื่อ U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient, $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
 กำหนด ΔT ออกไป สมการ (2.1) ก็จะลดรูปลงดังสมการ (2.2)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{\text{wall}} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2.4)$$

$$A_s = A_{\text{total}} = A_{\text{fin}} + A_{\text{unfinned}} \quad (2.5)$$

$$A_s = A_{\text{unfinned}} + \eta_{\text{fin}} A_{\text{fin}} \quad (2.6)$$

อย่างไรก็ตามได้มีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์, U ตามตารางที่ 2.1 ซึ่งมีค่าตั้งแต่ $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง gas-to-gas ไปจนถึง $10,000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเปลี่ยนสถานะซึ่งเป็นไปตามกฎธรรมชาติที่มีการส่งถ่ายความร้อนได้ต่ำในกรณีของแก๊สและมีการส่งถ่ายความร้อนได้มากในกรณีกระบวนการเปลี่ยนสถานะตามตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Representative values of the overall heat transfer coefficients in heat Exchangers [14]

Type of heat exchanger	U, W/m ² .K*
Water-to-water	850–1700
Water-to-oil	100–350
Water-to-gasoline or kerosene	300–1000
Water-to-brine	600–1200
Feed water heaters	1000–8500
Steam-to-light fuel oil	200–400
Steam-to-heavy fuel oil	50–200
Steam condenser	1000–6000
Freon condenser (water cooled)	300–1000
Ammonia condenser (water cooled)	800–1400
Alcohol condensers (water cooled)	250–700
Gas-to-gas	10–40
Gas-to-brine	10–250
Oil-to-oil	50–400
Organic vapors-to-water	700–1000
Organic solvents-to-organic solvents	100–300
Water-to-air in finned tubes (water in tubes)	30–60†
	400–850†
Steam-to-air in finned tubes (steam in tubes)	30–300†
	400–4000‡

*Multiply the listed values by 0.176 to convert them to Btu/h.ft².°F.

†Based on air-side surface area.

‡Based on water- or steam-side surface area.

2.6 Fouling Factor

เมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไประยะหนึ่ง สิ่งสกปรกจากของไหลจะเริ่มจับติดกับผิวของโลหะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของโลหะต่ำลง ดังนั้น หากทำการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยไม่ได้คำนึงถึงค่าของความต้านทานอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกเหล่านี้ที่ผนังของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนตามที่ได้ทำนายไว้ ด้วยเหตุนี้ การคำนึงถึงผลเสียของสิ่งสกปรกที่เกาะติดผิวของโลหะไว้ล่วงหน้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ปริมาณที่บ่งบอกถึงสิ่งสกปรกเหล่านี้ เรียกว่า Fouling Factor (R_f) หมายถึง ค่าความต้านทานอันเกิดจากสิ่งสกปรกที่ผนัง (m^2K/W)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.7)$$

$$U_i = \frac{1}{1/h_i + 1/h_{di} + (r_o - r_i)A_i/k_A A_{Alm} + A_i/A_o h_o + A_i/A_o h_{do}} \quad (2.8)$$

อย่างไรก็ตามได้มีการทดสอบหาค่าแฟคเตอร์ของการปนเปื้อน, R_f ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 Representative fouling factors (thermal resistance due to fouling for a unit surface area) [14]

Fluid	$R_f, m^2.K/W$
Distilled water, sea-water, river water, boiler feed water:	
Below 50°C	0.0001
Above 50°C	0.0002
Fuel oil	0.0009
Transformer, lubricating or hydraulic oil	0.0002
Quenching oil	0.0007
Vegetable oil	0.0005
Steam (oil-free)	0.0001
Steam (with oil traces)	0.0002
Organic solvent vapors, natural gas	0.0002
Engine exhaust and fuel gases	0.0018
Refrigerants (liquid)	0.0002
Refrigerants (vapor)	0.0004
Ethylene and methylene glycol (antifreeze) and amine solutions	0.00035
Alcohol vapors	0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่โอกาสในการเกิดการปนเปื้อนและสัมประสิทธิ์ในการเกิดความปนเปื้อนแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 Typical fouling coefficients

	h_d (W/m ² K)	h_d (btu/h ft ² °F)
Distilled and seawater	11350	2000
City water	5680	1000
Muddy water	1990-2840	350-500
Gases	2840	500
Vaporizing liquids	2840	500
Vegetable and gas oils	1990	350

2.7 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Analysis of heat exchangers)

ในการออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในงานทางวิศวกรรม จำต้องมี ความสามารถในการคาดคะเนอุณหภูมิตรงทางออกของของไหลร้อนและเย็นและ สามารถหาอัตราการ ถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างของของไหลร้อนและเย็นได้เมื่อทราบอัตราการไหลของมวลของของ ไหล ในที่นี้จะกล่าวถึงการหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (Log Mean Temperature Difference, or LMTD) และวิธีประสิทธิผล NTU (Effectiveness-NTU) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยปกติมักใช้เป็นเวลานานโดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทำงาน ดังนั้นอาจสมมุติว่าอุปกรณ์มีการ ไหลแบบสภาวะคงที่ คุณสมบัติของไหล เช่น อุณหภูมิ ความเร็วที่ทางออก หรือทางเข้ามีค่าคงที่ ไม่มีการ เปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และ พลังงานศักย์ ความร้อนจำเพาะ ของของไหลจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็น ค่าคงที่ การนำความร้อนตามแนวแกนของท่อไม่มีความสำคัญและจะไม่นำมาคิดก็ได้ สุดท้าย สมมุติให้ผิวนอกสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนเป็นอย่างดีจนไม่มีการสูญเสียความ ร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์ พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อน เท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของ ไหลเย็น ดังสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2.9)$$

และ

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h,out} - T_{h,in}) \quad (2.10)$$

เมื่อ ตัวห้อย h และ c สำหรับของไหลร้อนและของไหลเย็น ตามลำดับ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\dot{m}_c, \dot{m}_h = อัตราการไหลของมวล (mass flow rates)

C_{pc}, C_{ph} = ความร้อนจำเพาะ (specific heats)

$T_{c,out}, T_{h,out}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกจากท่อ (outlet temperature)

$T_{c,in}, T_{h,in}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าท่อ (inlet temperature)

ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อความสะดวกมักรวมอัตราการไหลของมวลและความร้อนจำเพาะของของไหลเข้าด้วยกันเป็นจำนวนหนึ่งๆ ที่เรียกว่า “ อัตราความจุความร้อน (Heat Capacity Rate), C” ดังนี้

$$C = \dot{m} C_p \quad (2.11)$$

สำหรับของไหลร้อน $C_h = \dot{m}_h C_{ph}$ และสำหรับของไหลเย็น $C_c = \dot{m}_c C_{pc}$ (2.12)

เขียนสมการ (7.11) และ (7.12) ในรูปของอัตราความจุความร้อนคือ

$$\dot{Q} = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2.13)$$

$$\dot{Q} = C_h (T_{c,in} - T_{h,out}) \quad (2.14)$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับอัตราความจุความร้อนของของไหลคูณกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ในรูปของความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลที่ร้อนและเย็นโดยที่

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.15)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้หาได้จากกฎการเป็นตัวของนิวตันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แต่เนื่องจาก ΔT อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีรูปสมการเป็น

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_m \quad (2.16)$$

เมื่อ

A_s = พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน และ คือความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมระหว่างของไหล 2 ชนิด

Multi-pass and Cross-Flow Heat Exchangers: Use of a Correction Factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า LMTD มีประโยชน์เพียงแค่ว่าใช้ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างหยาบ ๆ ทั้งนี้เพราะโดยปกติแล้วค่าของ U นี้จะไม่คงที่ อย่างไรก็ตามในการออกแบบนั้นมักจะนำเอาค่า U ของหน้าตัดที่อยู่กึ่งกลางปลายทั้งสอง ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในการคำนวณโดยถือว่ามีค่าคงที่ แต่ถ้าหากค่า U นี้แปรค่ามากก็จะต้องคำนวณหาที่ละขั้นตอนโดยการนำค่า U นั้นไปแทนค่าลงในสมการแล้วอินทิเกรตหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอีกทีหนึ่ง สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ซับซ้อน เช่นแบบท่อกับเซลล์ที่ของไหลในท่อและในเซลล์ไหลผ่านเครื่องหลายเที่ยวหรือ หลายกลับ หรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลมีการคลุกเคล้าปนกัน และไม่คลุกเคล้า จะหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโดยวิธีคณิตศาสตร์ได้ยากมาก วิธีที่นิยมใช้กันก็คือ ให้ตัดแปลงค่า LMTD ที่จะนำไปใช้งานโดยการคูณด้วยแก้ F ที่อยู่ในรูปเส้นกราฟ ในการหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่แท้จริงของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้น ให้คูณค่า LMTD ของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกันที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้นด้วยแฟคเตอร์แก้ (F) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละระบบดังนี้

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CF} \quad (2.17)$$

เมื่อ F is the correction factor $\Delta T_{lm,CF}$ is the log mean temperature difference for a counter flow heat exchanger และ ΔT_{lm} is the actual log mean temperature difference

2.8 วิธีการของค่าประสิทธิผล-เอ็นทียู (The effectiveness-NTU method)

วิธีการของ LMTD ที่ใช้วิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนำมาใช้ประโยชน์เมื่อเราทราบค่าอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้สามารถหาค่าได้ง่ายขึ้น LMTD เป็นวิธีที่ง่ายกับการคำนวณและการไหลของความร้อน พื้นที่ผิวหรือค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนอาจหาได้ เมื่ออุณหภูมิที่เข้าหรือออกเป็นค่าที่นำมาประเมินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นั้น การวิเคราะห์มักรวมลำดับขั้นตอนการอินทิเกรตเพราะว่าค่าของล็อกอยู่ในเทอมของ LMTD ในกรณีเหล่านี้การวิเคราะห์ถูกจัดให้อยู่ในรูปที่ง่ายมากขึ้นโดยการใช้วิธีการ พื้นฐานที่เป็นค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการถ่ายเทความร้อนที่ให้อัตราปริมาณของความร้อน ดังวิธีการของค่าประสิทธิผลมักมีข้อได้เปรียบมากกว่าปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ ด้วยการเปรียบเทียบระหว่างประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้เป็นเหตุผลของการเลือกประเภทที่เหมาะสมที่สุดให้เป็นไปตาม วัตถุประสงค์ของการถ่ายเทความร้อนนั้น

เรากำหนดประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิผล } (\varepsilon) = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{\text{Maximum possible heat transfer rate}} \quad (2.18)$$

การถ่ายเทความร้อนที่ได้จริงอาจคำนวณได้ทั้งการคำนวณพลังงานที่สูญเสียโดยออกจากของไหลร้อนหรือค่าของพลังงานโดยของไหลเย็นที่รับความร้อนเพิ่ม พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานกันและแบบไหลตัดกัน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลขนานกันได้สมการดังนี้

การถ่ายเทความร้อนที่ได้จริงอาจคำนวณได้ทั้งการคำนวณพลังงานที่สูญเสียโดยออกจากของไหลร้อนหรือค่าของพลังงานโดยของไหลเย็นที่รับความร้อนเพิ่ม พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานกันและแบบไหลตัดกัน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลขนานกัน จากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อน เท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น ได้สมการ (2.19)

$$q = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) = C_h(T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (2.19)$$

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (2.20)$$

นิยาม NTU ;
$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} = \frac{UA_s}{\left(\dot{m}C_p\right)_{min}} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon = function(UA_s / C_{min}, C_{min} / C_{max}) = function(NTU, c) \quad (2.22)$$

กลุ่มของเทอม UA_s/C_{min} เรียกว่าจำนวนของหน่วยการถ่ายเทซึ่งบ่งชี้ถึงขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [15] ได้แสดงอัตราส่วนของค่าประสิทธิผลสำหรับ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่าง ๆ และผลลัพธ์บางส่วนนั้นทำการวิเคราะห์โดยการใช้ชาร์ท ขณะที่ชาร์ทค่าประสิทธิผล เอ็นทียูสามารถใช้ได้ดีกับปัญหาที่ต้องการออกแบบที่มีการประยุกต์ใช้ได้ เทียบตรงมากกว่าที่ได้จากการอ่านจากกราฟ ในขณะที่ลำดับขั้นตอนการออกแบบยุ่งยากนั้นอาจจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยซึ่งเป็นการนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ และใช้สมการตามตารางที่ 2.4 (สำหรับ Effectiveness relation) ตารางที่ 2.5 (สำหรับ NTU relation)

ตารางที่ 2.4 Effectiveness relations for heat exchangers (Kays and London): $NTU = UA_s/C_{min}$
and $c = C_{min}/C_{max} = (m.C_p)_{min}/(m.C_p)_{max}$ [14]

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1. Double pipe:	
Parallel-flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+c)]}{1+c}$
Counter-flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c \exp[-NTU(1-c)]}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Shell and tube: One shell pass 2, 4, ...tube passes	$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1+c^2} \frac{1 + \exp\left[-\frac{NTU\sqrt{1+c^2}}{1 - \exp\left[-NTU\sqrt{1+c^2}\right]}\right]}{1 - \exp\left[-NTU\sqrt{1+c^2}\right]} \right\}^{-1}$
3. Cross flow (Single-pass) Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} \left[\exp(-c NTU^{0.78}) - 1 \right] \right\}$
C_{\max} mixed, C_{\min} unmixed	$\varepsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp\{1 - c[1 - \exp(-NTU)]\})$
C_{\min} mixed, C_{\max} unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-cNTU)] \right\}$
4. All heat exchangers with $c=0$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

ตารางที่ 2.5 NTU relations for heat exchangers: $NTU = UA_s / C_{\min}$ and
 $c = C_{\min} / C_{\max} = (m.C_p)_{\min} / (m.C_p)_{\max}$ [14]

Heat exchanger type	NTU relation
1. Double pipe: Parallel-flow	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1+c)]}{1+c}$
Counter-flow	$NTU = \frac{1}{c-1} \ln\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon c-1}\right)$
2. Shell and tube: One shell pass 2, 4, ...tube passes	$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \ln\left(\frac{2/\varepsilon - 1 - c - \sqrt{1+c^2}}{2/\varepsilon - 1 - c + \sqrt{1+c^2}}\right)$
3. Cross flow (Single-pass) Both fluids unmixed	
C_{\max} mixed, C_{\min} unmixed	$NTU = -\ln\left[1 + \frac{\ln(1-\varepsilon)}{c}\right]$
C_{\min} mixed, C_{\max} unmixed	$NTU = -\frac{\ln[c \ln(1-\varepsilon) + 1]}{c}$
4. All heat exchangers with $c=0$	$NTU = -\ln(1-\varepsilon)$

2.9 การทำยางรัดแผ่น

ขั้นตอนที่ 1 การเก็บรวบรวมน้ำยาง

1. ควรขีดด้วยยางให้สะอาดก่อนรองรับน้ำยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำความสะอาดถังเก็บน้ำยางก่อนใช้ทุกครั้ง
3. กวาดน้ำยางในถ้วยรับยางลงไปถังเก็บน้ำยางดังรูปที่ 2.12
4. อย่าใส่ขี้ยางหรือใบไม้ลงในถังเก็บน้ำยาง จะทำให้น้ำสกปรกจับตัวเป็นก้อนเร็วกรอง
5. ถังเก็บน้ำยางควรมีฝาปิด เพื่อป้องกันมิให้น้ำยางกระดกในระหว่างนำไปยังโรงทำ

น้ำยางได้ยาก

ยางแผ่น



รูปที่ 2.12 การเก็บน้ำยางจากต้นในสวนยาง [16]

ขั้นตอนที่ 2 การทำความสะอาดอุปกรณ์

ความสะอาดเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการทำยางแผ่นชั้นดี ต้องทำความสะอาดอุปกรณ์ทำยางแผ่นทุกชนิด ก่อนและหลังจากใช้งานเครื่องมือการทำยางแผ่นควรให้เบี่ยงน้ำก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อความสะดวกในการทำความสะอาดหลังใช้เสร็จ อุปกรณ์ที่จำเป็นในการทำยางแผ่น

1. เครื่องกรองลวดเบอร์ 40 และ 60
2. ตะก
3. ถังสำหรับใส่น้ำยางและน้ำ
4. โต้ขนาดยาง
5. เครื่องรีดชนิดสั้นและชนิดดอก
6. โรงเรือนหรือเพิงอย่างง่าย ๆ
7. กระจบองตวงน้ำยางและน้ำ
8. ใบพายสำหรับกวาน้ำยาง
9. ภาชนะผสมน้ำกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 การกรองน้ำยาง

กรองน้ำยางด้วยเครื่องกรองลวด เบอร์ 40 และ 60 เพื่อเอาสิ่งสกปรกออก โดยเครื่องกรองซ้อนกัน 2 ชั้น เบอร์ 40 ไว้ข้างบน และเบอร์ 60 ไว้ข้างล่าง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กรองน้ำยางขณะรวบรวมน้ำยาง [16]

ขั้นตอนที่ 4 การตวงน้ำยางใส่ตะก

ตวงน้ำยางที่กรองแล้ว ใส่ในตะกที่สะอาดตะกละ 3 ลิตร ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เติมน้ำใส่ตะก [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 การผสมน้ำกับน้ำยาง

เติมน้ำสะอาดลงในตะกุงที่ใส่น้ำยางไว้แล้วตะกุงละ 2 ลิตรจะได้อัตราส่วนผสม ระหว่างยางกับน้ำในอัตรา 3 ต่อ 2 (อัตราส่วนผสมอาจเปลี่ยนแปลงได้ ถ้าหากน้ำยางเจือจางบ้างแล้ว เช่น กรณีที่ฝนตกขณะเก็บน้ำยางหรือจากเหตุอื่น) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เติมน้ำยางใส่ตะกุงลงไปผสม [16]

ขั้นตอนที่ 6 การเลือกใช้น้ำกรดและการผสมน้ำกรด

เพื่อให้ยางแข็งตัวและได้ยางแผ่นที่คุณภาพดี ตรงตามความต้องการของผู้ซื้อหรือโรงงานอุตสาหกรรมควรเลือกใช้กรด ฟอรั่มิก ชนิดความเข้มข้น 90 % ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างจากกรดชนิดอื่น คือ ไม่มีสี มีกลิ่นฉุนจัด หากสูดดมจะแสบจมูกอย่างรุนแรงและละลายน้ำได้ดีมาก

ข้อดีของกรดฟอรั่มิก คือ

1. ยางแผ่นแข็งตัวสม่ำเสมอ
2. สามารถระเหยได้ดี
3. ไม่ทำให้แผ่นยางเหนียวเหนอะ
4. คุณสมบัติและความยืดหยุ่นของแผ่นยางคงเดิม
5. ไม่ทำให้โรงเรือนและแผ่นยางมีกลิ่นเหม็น
6. ไม่ทำให้อุปกรณ์การทำยางแผ่นเสียหายมากนัก จะทำให้อายุการใช้งานยาวนาน

การผสมกรดฟอรั่มิก เพื่อให้ยางแผ่นแข็งตัวในเวลา 30 – 45 นาที ควรผสมกรดฟอรั่มิกในอัตราส่วนดังต่อไปนี้ คือ ใช้กรดฟอรั่มิก 2 ช้อนแกงผสมน้ำสะอาด 3 กระบองนม แล้วกวนให้เข้ากัน โดยใช้กรดเทใส่น้ำ และควรใช้ภาชนะที่เป็นกระเบื้องเคลือบหรือเกลลอนพลาสติกในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 7 การใช้น้ำกรดผสมน้ำยาง

ใช้ใบพายกวาน้ำยางในตะกวงสัก 1-2 เที้ยว แล้วตวงน้ำกรดที่ผสมแล้ว 1 กระป๋องนม เทลงในน้ำยางให้ทั่วตะกวง ขณะที่เทน้ำกรดที่ผสมแล้วใช้ใบพายกวาน้ำยางไปมาประมาณ 6 เที้ยว (น้ำกรดฟอร์มิค 1 ขวด ทำแผ่นยางได้ประมาณ 90-100 แผ่น

ขั้นตอนที่ 8 การกวาดฟองน้ำยาง

ขณะกวาน้ำยางจะมีฟองเกิดขึ้น ใช้ใบพายกวาดฟองออกจากตะกวงให้หมด เก็บรวบรวมใส่ภาชนะไว้ขายเป็นเศษยางชั้นดีฟองน้ำยางถ้าไม่กวาดออก เมื่อนำยางไปรมควันจะทำให้เห็นรอยจุดอากาศในแผ่นยาง ทำให้มาตรฐานคุณภาพยางต่ำลงกว่าที่ควรจะเป็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การกวาดฟองบริเวณผิวหน้าของน้ำยาง [16]

ขั้นตอนที่ 9 ปิดตะกวงป้องกันสิ่งสกปรก

ควรใช้แผ่นสังกะสี หรือวัสดุอื่นใดก็ได้ปิดตะกวงเพื่อป้องกันมิให้ฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกตกลงไปในน้ำยางที่กำลังจับตัว ทิ้งไว้ประมาณ 30 – 45 นาที

ขั้นตอนที่ 10 การนวดแผ่นยาง

เมื่อน้ำยางจับตัวแล้วก็นำไปนวด ควรรินน้ำสะอาดหล่อไว้ทุกตะกวง เพื่อสะดวกในการเทยางออกจากตะกวง การนวดยางควรนวดแผ่นยางบนโต๊ะที่สะอาด ซึ่งปูด้วยอะลูมิเนียมหรือแผ่นสังกะสี นวดด้วยมือหรือไม้กรมแล้วแต่ถนัด หรือปัจจุบันมีเครื่องสำหรับนวดยางควรทำความสะอาดก่อนนวดทุกครั้ง ยางที่นวดแล้วให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การนวดแผ่นยางให้แผ่บางลง [16]

ขั้นตอนที่ 11 การรีดแผ่นยางด้วยเครื่องรีดลื่น

นำยางแผ่นที่นวดแล้ว เข้าเครื่องรีดลื่น 3 – 4 ครั้ง ให้บางประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 12 การรีดแผ่นยางด้วยเครื่องรีดดอก

หลังจากนำแผ่นยางเข้าเครื่องรีดลื่นแล้วก็นำแผ่นยางเข้าเครื่องรีดดอกอีก 1 ครั้ง การรีดดอกจะช่วยให้แผ่นยางเมื่อวางซ้อนกันไม่ติดและแห้งเร็วขึ้นเมื่อนำไปรมควัน

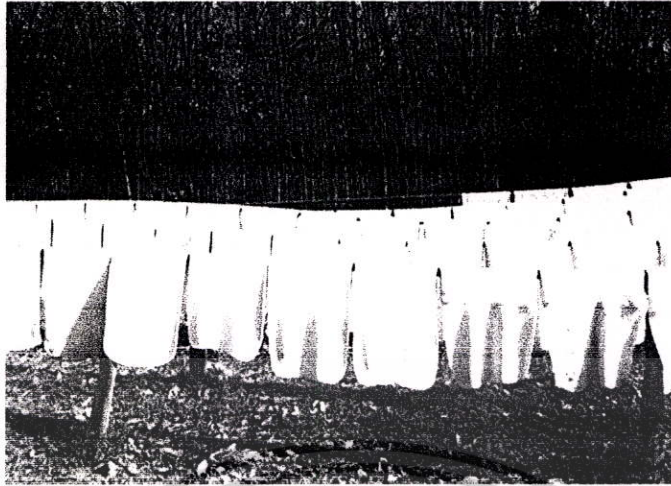
ขั้นตอนที่ 13 การล้างแผ่นยาง

แผ่นยางที่รีดดอกแล้ว ควรล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อล้างน้ำกรด และสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ตามผิวของแผ่นยางออกให้หมด

ขั้นตอนที่ 14 การผึ่งแผ่นยาง

แผ่นยางที่ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้ว ควรนำมาผึ่งไว้ในที่ร่มไม่ควรนำออกไปผึ่งหรือตากไว้กลางแจ้งแดดเพราะจะทำให้ยางแผ่นเสื่อมคุณภาพได้ง่าย อย่าวางแผ่นยางบนพื้น หรือพาดแผ่นยางในที่ที่มีฝุ่นหรือถูกสิ่งสกปรกได้ง่าย ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การตากยางรัดแผ่นหลังการรีดเสร็จแล้ว [16]

ขั้นตอนที่ 15 การเก็บยางแผ่นเพื่อรอจำหน่าย

หลังจากผึ่งยางแผ่นไว้ประมาณ 6 ชั่วโมง ก็เก็บรวบรวมยางแผ่น โดยพาดไว้บนราวในโรงเรือนเพื่อรอจำหน่าย (ถ้ามีโรงรมก็นำเข้ารมควันหรืออาจจะอบยางในโรงอบพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้ยางแผ่นแห้งป้องกันเห็ดรา และสามารถเก็บไว้ได้นาน) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การตากยางผึ่งแห้งในโรงเก็บ โดยพาดไว้กับราว [16]

2.10 หลักการอบแห้ง

การอบแห้งคือการกำจัดความชื้นจำนวนน้อยที่ค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ การอบแห้งมักเป็นกระบวนการสุดท้ายก่อนการบรรจุ เพื่อป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์จากการมีความชื้นเกินค่า

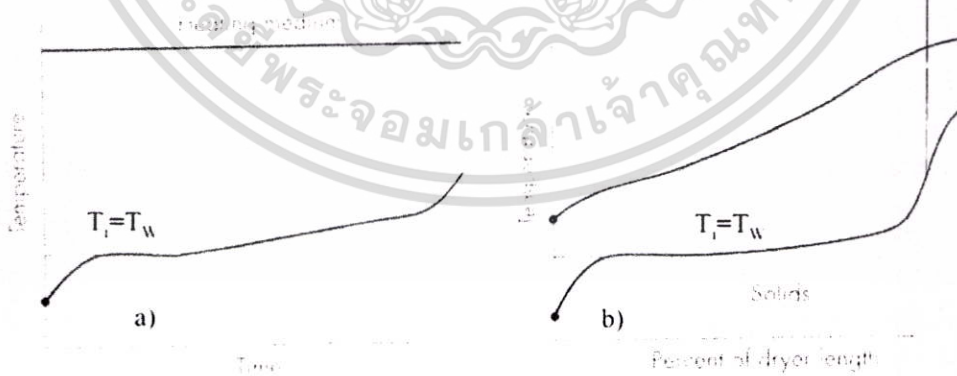
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ปลอดภัยในวัสดุอาหารการมีความชื้นอาจทำให้เกิดเชื้อรา หรือการเกาะติดเป็นก้อนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเม็ดหรืออาจมีผลเสียต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตขั้นต่อไป

การอบแห้งเป็นการกำจัดความชื้นออกด้วยวิธีทางความร้อน โดยการให้ความร้อนเพื่อการระเหยความชื้นออกสู่ตัวกลางซึ่งส่วนใหญ่เป็นอากาศร้อนและแห้ง โดยอากาศดังกล่าวนอกจากจะเป็นแหล่งความร้อนเพื่อการระเหยแล้วยังทำหน้าที่พาความชื้นจากการระเหยออกจากห้องอบ ด้วยความชื้นสุดท้ายในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้นมีน้อยแตกต่างกันออกไป ของแข็งบางชนิดสามารถอบจนแห้งปราศจากน้ำ เรียก bone dry solid แต่ส่วนใหญ่แล้วยังมีความชื้นเหลืออยู่บ้าง ตัวอย่างเช่นเกลือแกงที่ว่าแห้งจะมีความชื้นประมาณ 0.5 % ถ่านหินแห้งจะมีความชื้นประมาณ 4% เป็นต้น การอบแห้งโดยแท้จริงแล้วหมายถึงการทำความชื้นให้ลดลงด้วยวิธีทางความร้อนให้ได้ความชื้นในระดับที่รับได้ มิได้หมายความว่าอบจนมีความชื้นเป็นศูนย์ เนื่องจากของแข็งมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น เป็นเกล็ด (flakes) เป็นเม็ด เป็นผลึก เป็นผง เป็นแผ่น ความชื้นที่จะถูกอบให้แห้งก็อาจอยู่ในของแข็งในหลายรูปแบบ เช่น อาจเคลือบอยู่บนผิวผลึกอย่างในการอบเกลือ เป็นน้ำที่อยู่ในเนื้อวัสดุ เช่น แผ่นยาง หรือไม้กระดาน หรืออาจจะเป็นแบบผสม คือบางส่วนเป็นความชื้นที่อยู่ข้างนอกบางส่วนอยู่ข้างในเนื้อวัสดุอบ อาจจะอยู่ในสภาพของแข็งของเหลวหรือเป็น slurry สภาวะของวัสดุเหล่านี้เป็นตัวกำหนดรูปแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบ ซึ่งก็มีอยู่หลากหลายชนิด เช่น เครื่องอบแบบถาด แบบอุโมงค์ แบบถังหมุน แบบพ่นฝอย แบบ rotary ดังนั้นการอบแห้งจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีขอบข่ายกว้างมาก ในการเรียนในเบื้องต้น จึงจำกัดวงให้แคบไว้เฉพาะเรื่องหลักการทั่วไปของการคำนวณเวลาอบแห้งในอุปกรณ์แบบถาดอบ และแบบอุโมงค์เท่านั้น

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุในเครื่องอบ

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องอบขึ้นอยู่กับธรรมชาติของ วัสดุ และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ ตลอดจนขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบ แต่รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็น่ามีความคล้ายคลึงกัน แม้จะใช้เครื่องอบต่างชนิด ดังรูป 2.20



รูปที่ 2.20 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องอบ a) แบบ Batch b) แบบ อุโมงค์ [17]

ในเครื่องอบแบบแบช (Batch dryer) ซึ่งอบด้วยอากาศแห้งอุณหภูมิคงที่ T_v อุณหภูมิของวัสดุอบจะเพิ่มจากค่าตั้งต้น T_{sa} ถึงค่าอุณหภูมิอบ T_i ในเครื่องอบที่เป็น non adiabatic ที่ไม่มีอากาศพัดผ่าน ค่า T_i นี้จะเท่ากับจุดเดือดของ ๆ เหลวภายใต้ความดันในเครื่องอบ แต่เมื่ออากาศอบที่อยู่ในสภาวะ adiabatic T_i จะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่า $T_{wet\ bulb}, T_w$ (ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิ Adiabatic saturation temperature ในกรณีของเหลวคือน้ำ และก๊าซคืออากาศ) การอบแห้งอาจดำเนินการอยู่ด้วยค่าอุณหภูมิ T_w ระยะเวลาหนึ่ง แต่ถ้าผิวของวัสดุเริ่มแห้ง ไม่นานค่าอุณหภูมินี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น อุณหภูมิ ณ จุดที่ระเหยนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของบริเวณที่ผิวแห้ง และสิ่งแวดล้อม ในช่วงสุดท้ายอุณหภูมิอาจสูงขึ้นตามรูป ค่าเวลาอบตาม รูป 2.20 จะแตกต่างกันตั้งแต่สองสามวินาทีถึงหลาย ๆ ชั่วโมง ของแห้งอาจจะมีค่าอุณหภูมิ T_w เกือบตลอดเวลาที่ใช้อบหรืออาจใช้เวลาที่อุณหภูมินี้เพียงประเดี๋ยวเดียว อุณหภูมิของอากาศมักคงที่ หรืออาจถูกทำให้แปรปรวนให้เปลี่ยนไปตามเวลาที่ใช้อบ

ในเครื่องอบต่อเนื่องสมบูรณ์แบบ วัสดุอบผ่านเข้าระบบคล้ายกับ รูป 2.20 (a) อากาศและวัสดุผ่านเข้าออกคนละด้าน ในระบบที่มีการอบแบบ steady state สภาวะที่จุดต่าง ๆ ในเครื่องอบจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา รูป 2.20 (b) แสดงพฤติกรรมของการอบแบบต่อเนื่อง ในสภาวะคงที่ ก๊าซและของแห้งวิ่งสวนทางกัน ของแห้งเข้าทางซ้ายออกทางขวา ขณะที่ก๊าซเข้าขวาออกซ้าย ตามรูป 2.20 จะเห็นการปรับอุณหภูมิผิวของแห้งจาก T_i สู่สภาวะการอบแบบอัตรอบคงที่ ซึ่งค่า $T_i = T_w$ เนื่องจากความร้อนที่ใช้เพื่อการทำ Initial warm up หรือ Final heating จะมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนที่ใช้เพื่อการระเหย สำหรับการอบวัสดุที่ไวต่อการสูญเสียคุณภาพจะออกแบบให้อุณหภูมิขาออกของของแห้งอยู่ใกล้เคียงกับ ค่า T_w มากที่สุด อากาศร้อนที่เข้าอบมักเข้าที่อุณหภูมิสูงและค่าความชื้นต่ำ

การถ่ายเทความร้อนในเครื่องอบ

ความร้อนที่ถ่ายเทจากลมร้อนสู่วัสดุอบถูกควบคุมด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนหลาย

รูปแบบดังสมการ

$$q_T = h_v A(T_v - T_i) = h_c A(T_v - T_i) + h_r A(T_v - T_i) + u_k A(T_v - T_i) \quad (2.23)$$

เมื่อ h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาจากก๊าซสู่ผิวของแห้ง

h_r = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี ระหว่างวัสดุกับผนังของห้องอบ

u_k = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของการอบโดยการพาและการนำความร้อนผ่านชั้นวัสดุผิวหน้าซึ่งมีการระเหย

T_v, T_i คือค่าอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งและอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและของแห้ง

การกำหนดค่าความชื้นของวัสดุอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุค่าความชื้นอาจแบ่งออกเป็น wet basis กับ dry basis คือการใช้ฐานในการเปรียบเทียบแตกต่างกัน wet basis หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักรวมของของแข็งและความชื้น dry basis เป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับของแข็งเท่านั้น เช่น ถ้าบอกว่าวัสดุมีค่าความชื้น 20% wet basis หมายความว่า มีน้ำ 20 กรัมต่อของแข็ง 80 กรัม แต่ถ้าเป็น 20% dry basis หมายความว่า มีน้ำ 20 กรัมต่อของแข็ง 100 กรัม โดยปกติการบอกค่าความชื้นโดยใช้ dry basis จะทำให้คำนวณง่ายกว่า เพราะสามารถระบุเป็นค่าความชื้นต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของแข็ง เช่น 20% dry basis จะเท่ากับน้ำ 0.2 กรัมต่อของแข็งหนึ่งกรัม เมื่อทำให้แห้งเหลือ 10% dry basis ก็หมายความว่าเหลือความชื้นเพียง น้ำ 0.1 กรัมต่อของแข็งหนึ่งกรัม ค่าความชื้นที่ลดลงเท่ากับ $0.2 - 0.1 = 0.1$ กรัมต่อกรัมของแข็งได้เลย ในทางตรงข้ามถ้าเริ่มจาก 20% เหลือ 10% wet basis จะไม่สามารถจับค่าความชื้นมาลบกันโดยตรงได้ เพราะฐานที่ใช้เทียบเปลี่ยนไป 20% wet basis มีน้ำ 20 กรัมต่อของแข็ง 80 กรัม เมื่อแห้งมี 10% solid หมายความว่า มีน้ำ 10 กรัมต่อของแข็ง 90 กรัม การจะเอาความชื้นมาลบจะต้องเป็นค่าความชื้นในสถานะใหม่ที่เกี่ยวเนื่องกับของแข็งจำนวนเดิมคือ 80 กรัม ซึ่งจะคำนวณได้โดยการเทียบบัญญัติ

ไตรยางค์ดังนี้

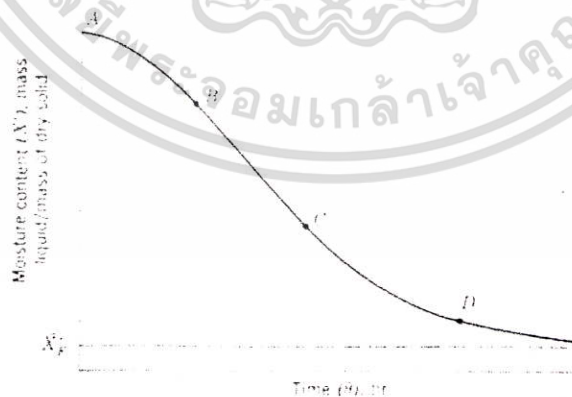
ก่อนอบแห้ง 20% wet solid วัสดุขึ้น 100 กรัม มีน้ำ 20 กรัม ของแข็ง 80 กรัม
 หลังอบแห้ง ของแข็ง 90 กรัม มีความชื้น 10 กรัม
 ของแข็ง 80 กรัม มีความชื้นได้ = $(10/90) \times 80 = 8.88$ กรัม

ดังนั้น ปริมาณน้ำที่จะเหยออกคือ $20 - 8.88 = 11.11$ กรัม

หรือ ของแข็ง 80 กรัมต้อง น้ำระเหยออก 11.11 กรัม

ของแข็ง 1 กรัม ต้องน้ำระเหยออก $(11.11/80) = 0.139$ กรัม

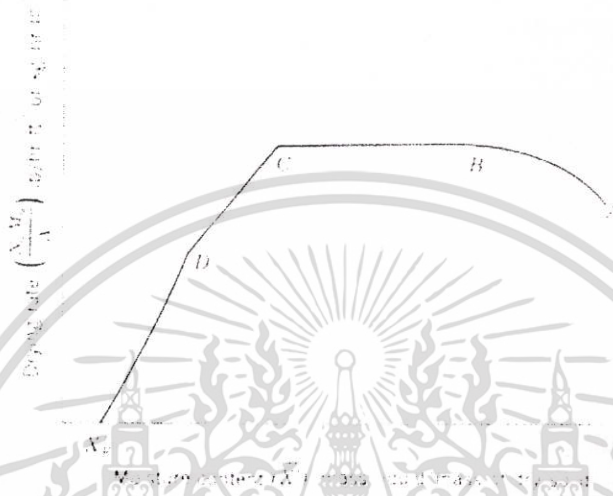
เมื่อเทียบกับข้อมูลข้างต้นที่อบจาก 20 → 10% dry basis ซึ่งระเหยน้ำออก 0.1 กรัมต่อกรัมของแข็งแล้วจะพบว่าผลลัพธ์ต่างกัน และการคำนวณยุ่งยากไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.21 ค่าความชื้นวิกฤตที่มีอยู่ในวัสดุ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

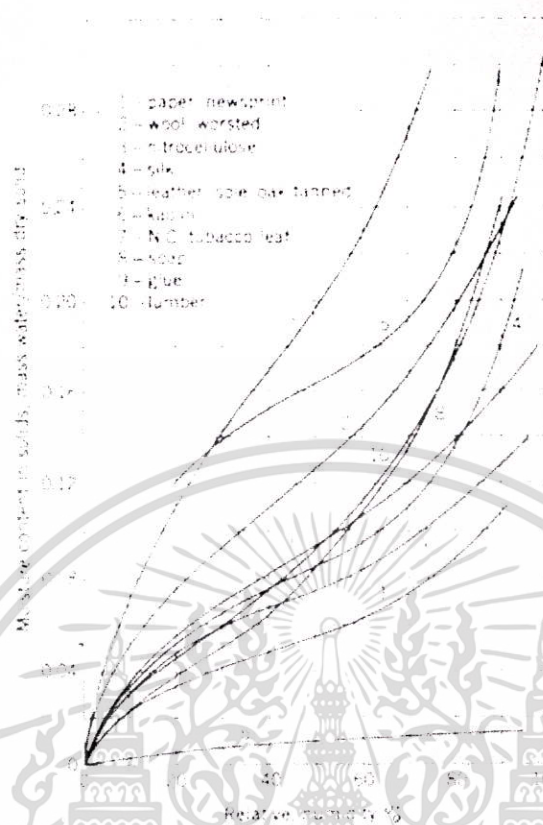
Critical moisture content, \bar{X}'_c ค่าความชื้นวิกฤต คือค่าความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุ ณ เวลาที่อัตราเร็วในการอบแห้งเริ่มลด นับเป็นจุดสุดท้ายของ constant rate drying period การอบแห้งต่อจากนี้ไป จะมีอัตราการระเหยต่ำลงเรื่อยๆ



รูปที่ 2.22 ค่าความชื้นและอัตราการอบแห้ง [17]

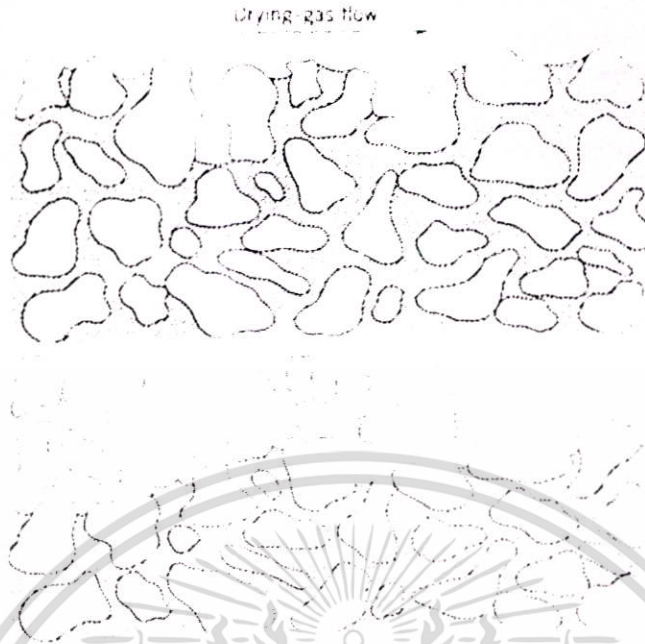
ค่า free moisture หมายถึงค่าความชื้นที่สามารถกำจัดออกได้ที่สภาวะอากาศอบหนึ่ง ๆ ค่า $\bar{X}'_F = \bar{X}'_0 - \bar{X}'_E$ ค่า bound moisture และ unbound moisture, bound moisture คือค่าความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุขณะที่ความชื้นนี้ทำให้เกิดความดันของไอต่ำกว่าค่าความดันไอที่อุณหภูมินั้น ค่า bound moisture มีอยู่ได้หลายสภาพ อาจอยู่ในช่วง Capillary ระหว่างอนุภาควัสดุ เช่น ในแผ่นไม้ เมื่อดูเทียบกับกราฟระหว่างความชื้นสมดุล และความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความชื้นในวัสดุที่สอดคล้องกับจุดตัดเส้น 100% ความชื้นสัมพัทธ์ คือค่าความชื้นสูงสุดในข่ายของ bound moisture ถ้าความชื้นมากกว่านี้ เรียก unbound moisture หรือคิดอีกนัยหนึ่งเนื่องจากปริมาณนอกเหนือจากค่า bound moisture มิได้ถูกยึดอย่างแน่นเหนียวด้วยโครงสร้างของวัสดุ จึงระเหยง่าย unbound moisture จะให้ค่าความชื้นในก๊าซเฟสเท่ากับค่าความดันไอของอากาศ ณ อุณหภูมิ T_w และแม้จะมีความชื้นมากกว่านี้ ก็ไม่มีผลให้ความดันไอสูงขึ้นอีก ทั้งนี้เพราะค่าความดันไอขึ้นกับอุณหภูมิ และเป็นค่าความดันที่สมดุล ณ อุณหภูมินั้น ค่าความชื้นสมดุล \bar{X}'_E คือความชื้นที่จะยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุในสมดุลกับอากาศที่ใช้ออบความชื้นจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตาม ถ้าต้องการได้วัสดุที่มีค่าความชื้นต่ำกว่าค่านี้ จะต้องเปลี่ยนสภาวะของอากาศอบให้ มีค่าความชื้นต่ำลง ดังรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 Constant Rate Drying (R_c) และ Falling Rate Drying (R_f) [17]

อัตราการอบ (R) หมายถึง ค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาหน่วย อาจเป็นปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมง หรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมง Constant Rate Drying (R_c) คือการอบแห้งในช่วงการอบที่มีค่าอัตราการระเหยต่อพื้นที่และเวลาคงที่เป็นการอบที่มีความชื้นในวัสดุเหลือเพื่อ จงเดินทางมาสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่ถ่ายจากลมร้อนมาที่ผิวเป็นปริมาณความร้อนที่อยู่ในประเภท unbound moisture ที่สำคัญคือ การอบในช่วงนี้เกิดโดยที่อุณหภูมิวัสดุคงที่ Twet bulb ของอากาศแห้งที่ใช้ออบ



รูปที่ 2.24 ลักษณะการระเหยของความชื้นในเนื้อวัสดุ [17]

Falling Rate Drying คือ การอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลง เมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาที่จะลด ในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และค่า R_f อาจจะไม่แปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ (กราฟ falling rate เป็นเส้นตรง) หรือไม่ขึ้นโดยตรงกับค่า \bar{X} (กราฟของ falling rate เป็นเส้นโค้ง) ก็ได้ วัสดุอบบางประเภทอาจมีแต่ falling rate ตลอดการอบเลยก็ได้

การคำนวณที่เกี่ยวกับการอบ (Drying Calculation)

การคำนวณที่เกี่ยวกับการอบแห้งมักเป็นการคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ในการอบ (Drying time) สมการทั่วไปสำหรับคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ออบหาได้จากการอินทิเกรตสมการของค่าจำกัดความของ Drying Rate

$$R = -\frac{W_s d\bar{X}}{A d\theta} = \frac{M_s M_0}{A}$$

เมื่อ R คือ ค่า drying rate, lb H₂O./hr.ft², kg H₂O/m².hr.

W_s คือ น้ำหนักของของแข็งแห้ง, lb, kg

\bar{X} คือ ค่าความชื้นในของแข็ง

ซึ่งเมื่อจัดรูปใหม่ และอินทิเกรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^{\theta} d\theta = -\frac{W_s}{A} \int_{\bar{X}_1}^{\bar{X}_2} \frac{d\bar{X}}{R}$$

การอบในช่วง Constant rate

$$R = R_c, \bar{X}_2 = \bar{X}_c$$

$\theta = \theta_c$ สมการของ θ_c จะเท่ากับ

$$\theta_c = -\frac{W_s}{AR_c} (\bar{X}_c - \bar{X}_1)$$

R_c อาจหาจากผลการทดลองอบวัสดุในเครื่องอบภายใต้สภาวะอากาศ ที่เหมือนกับการอบในเครื่องอบ แล้วพลอตค่า Rate กับ \bar{X} หรืออาจคำนวณจากสมการดุลมวล หรือความร้อนของระบบแล้วแต่ข้อมูลที่มีดังต่อไปนี้

$$R_c = k_y (Y_i - Y_v) Ma = \frac{h_v}{\lambda} (T_v - T_i)$$

เมื่อการถ่ายเทเกิดจากผิวสัมผัสสู่อากาศอบ

T_i คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุเท่ากับ T_w

λ คือ ค่าความร้อนแฝงวัดที่อุณหภูมิ T_w ของอากาศอบ

h_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีสมการสำหรับหาค่า h_v ในระบบหน่วยต่าง ๆ ดังนี้

For Flow parallel to solid surface

$$h_v = 0.0128 G_v^{0.8} \quad h_v \text{ มีหน่วยเป็น } \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{hr}^\circ \text{F}}, G_v \text{ มีหน่วยเป็น } \text{lb}/\text{ft}^2 \text{hr}$$

$$h_v = \frac{8.8 G^{0.8}}{D_e^{0.2}}, \quad h_v \text{ มีหน่วยเป็น } \text{w}/\text{m}^2 \text{C}, G \text{ มีหน่วยเป็น } \text{kg}/\text{m}^2 \text{s}$$

D_e คือ equivalent diameter ของ air flow channel, ft, m

For flow perpendicular to solid surface

$$h_v = 24.2 G^{0.37} \quad h_v \text{ มีหน่วยเป็น } \text{w}/\text{m}^2 \text{C}, G \text{ มีหน่วยเป็น } \text{kg}/\text{m}^2 \text{s}$$

และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 0.9-4.5 m/s

การคำนวณเวลาอบในช่วง Falling Rate period

สำหรับการอบเมื่อ

$$R_r \propto \bar{X} \Rightarrow \frac{R}{\bar{X}} = \frac{R_c}{\bar{X}_c}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการหาค่า θ ทั่วไป จะเขียนได้เป็น

$$\int_{\theta_c}^{\theta} d\theta = -\frac{W_s}{A} \int_{\bar{X}_c}^{\bar{X}} \frac{d\bar{X}}{\frac{R_c}{\bar{X}_c} \cdot \bar{X}}$$

ซึ่งเมื่ออินทิเกรตจะได้

$$(\theta - \theta_c) = \theta_f = -\frac{W_s}{A} \frac{\bar{X}_c}{R_c} \ln \frac{\bar{X}}{\bar{X}_c}$$

สมการนี้จะเป็นการคำนวณเวลาอบสำหรับของแข็งที่มีค่า $\bar{X}'_E = 0$ หรือมี drying curve ที่ตัดจุด Origin หรือวัสดุที่สามารถอบจนถึง bone dry solid หรือ zero moisture content ได้แต่ในกรณีที่วัสดุมีคุณสมบัติที่จะเกิด equilibrium moisture สมการเวลาอบใน falling rate period จะเป็น

$$\theta_f = \frac{-W_s (\bar{X}'_c - \bar{X}'_E)}{AR_c} \ln \left(\frac{\bar{X}'_f - \bar{X}'_E}{\bar{X}'_c - \bar{X}'_E} \right)$$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

เตาแก๊สซิไฟเออร์เป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงชนิดแก๊ส (Producer gas) โดยกระบวนการทางอุณหภูมิ ซึ่งเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวจะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าและมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสูงกว่าการเผาชีวมวลโดยตรง โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์มาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อนำไปเผาให้กับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนำลมร้อนที่อยู่ภายในท่อไปอบยางพาราแผ่นต่อไป ทั้งนี้ยังมีข้อกำหนดไว้ว่าเตาและอุปกรณ์ประกอบของชุดอบยางนี้สามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และต้องการการบำรุงรักษาน้อยมากหรือไม่ต้องซ่อมบำรุงเลย และใช้เศษไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงซึ่งเหมาะสมกับเกษตรกรสวนยางรายย่อย โดยปกติสามารถแบ่งเตาแก๊สซิไฟเคชันได้เป็น 4 แบบคือ แบบ Fixed batch gasifier แบบ Fluidized bed gasifier แบบ Entrained flow gasifier และแบบ Molten media gasifier ซึ่งแบบ fixed batch จะมีโครงสร้างของเตาและส่วนประกอบอื่นๆ เรียบง่ายมีกลไกไม่ซับซ้อนและต้องการซ่อมบำรุงน้อยมากหรือไม่ต้องการเลย ซึ่งการซ่อมบำรุงจะทำให้เป็นเรื่องยากกับเกษตรกรรายย่อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ Fixed batch gasifier เนื่องจากมีระบบกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อน อุปกรณ์น้อย ซ่อมบำรุงต่ำมาก โดยเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ Fixed batch มีด้วยกัน 3 แบบคือ แบบแก๊สไหลขึ้น (Updraft)

แบบแก๊สไหลลง (Downdraft) และแบบกึ่งกลาง (Cross draft) โดยเตาแก๊สซีไฟเออร์ทั้ง 3 แบบมีรูปแบบที่แตกต่างกันทางเทคนิคในการเกิดแก๊สดังตารางที่ 2.6 นี้

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเทคนิคระหว่างเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Fixed batch ทั้ง 3 แบบ

Updraft gasifier	Downdraft gasifier	Cross draft gasifier
- อากาศจะไหลเข้ามาทางด้านล่างและแก๊สที่ผลิตได้จะไหลออกมาทางด้านบน	- อากาศจะไหลเข้ามาทางด้านบนและแก๊สที่ผลิตได้จะไหลออกมาทางด้านล่าง	- การออกแบบจะง่ายและมีขนาดเล็ก อากาศจะเข้ามาทางด้านหนึ่งและแก๊สที่ผลิตได้จะออกไปในด้านตรงกันข้าม อากาศที่เข้ามาในตอนแรกนั้นจะผ่าน combustion zone และ Reduction zone ตามลำดับเพื่อผลิตแก๊ส
- ไม่เป็นที่นิยมนัก เพราะว่ามีปัญหาทางเรื่อง Clinker, Tar และต้องมีการเติมไอน้ำเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยาที่ Reduction Zone	- บริเวณ Combustion Zone จะไม่ติดกับบริเวณส่วนที่เป็นซีเมนต์นั้นในกรณีที่คุณหมุมของ Combustion zone สูงๆ จะไม่ทำให้เกิดการละลายและรวมตัวเป็นก้อนของซีเมนต์ (Clinker) และนอกจากนี้ Gasifier ชนิดนี้ยังสามารถนำความชื้นที่ได้จากการอบเชื้อเพลิงที่บริเวณ Distillation zone มาใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ Reduction zone ได้ด้วย	- ความชื้นของไม้เชื้อเพลิงต้องต่ำมาก

ด้วยจุดประสงค์การซ่อมบำรุงต่ำ งานวิจัยนี้จึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเฉพาะเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดไหลลงเท่านั้นโดยมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องดังนี้ มีการศึกษาถึงผลของขนาดชิ้นไม้เชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง [18] โดยพบว่าชิ้นไม้ที่เหมาะสมในการใช้งานกับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงจะมีขนาดอยู่ในระหว่าง 45-65 มม. โดยจะทำให้เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าขนาดยาวกว่านี้และมีความเหมาะสมในการใช้งานได้ดีกว่าขนาดที่สั้นกว่านี้ สอดคล้องกับ [19-21] ซึ่งก็ได้สนับสนุนหลักเกณฑ์นี้เช่นกันทั้งนี้อันเนื่องมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลมีค่าต่ำ

การศึกษาด้านอื่นพบว่าการกระจายขนาดของเชื้อเพลิงที่พบว่าถ้าขนาดของเชื้อเพลิงในถังบรรจุมีขนาดเล็กเสียกันกล่าวคือมีความแตกต่างกันเรื่องขนาดและรูปร่างน้อยมากจะทำให้มีความสม่ำเสมอในการเผาไหม้ ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดแตกต่างกันมาก อากาศและแก๊สจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดโตและเล็กเกยกัน ทำให้บางบริเวณมีการเผาไหม้รุนแรง บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมา ทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (Clinker) ดังที่ [22] ได้กล่าวไว้ในการศึกษาทดสอบการกระจายของเชื้อเพลิงก้อนถ่านหิน และยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงในด้านเชื้อเพลิงอีกคือ ปริมาณการบรรจุสูงสุดของไม้เชื้อเพลิงในถังบรรจุว่าสามารถบรรจุไม้เชื้อเพลิงได้โดยประมาณ 20-70% [23] และมีการศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นของไม้เชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง โดย [24] ได้ศึกษาพบว่าขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลงเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $500-600^{\circ}C$ ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีวมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการ $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป [25] ความชื้นของไม้เชื้อเพลิงสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงที่มีค่าระหว่าง 12-25 % ถ้าความชื้นน้อยกว่าหรือมากกว่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาลดลง การใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์ในการอบยางพาราจากการสืบค้นเอกสารพบว่ามีการใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์ที่เป็นแบบ Updraft หรือกึ่ง Updraft กึ่งเผาตรง [6, 26-28] เกือบทั้งสิ้นดังรูปที่ 2.25 ทั้งนี้เนื่องจากนักวิจัยอาจจะคำนึงถึงความสะดวกในการใส่เชื้อเพลิงเพราะเตาแบบ Updraft สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ได้ สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงกว่าแบบ Down draft ได้ มีค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงกว่าเล็กน้อย แต่เนื่องจากเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ Updraft ในการอบยางทุกแบบจะมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่เหนือเตา ทำให้มีน้ำมันทาร์ลอยเข้าไปเกาะกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ด้านบน ซึ่งน้ำมันทาร์เป็นสิ่งที่กำจัดยากและจะลดประสิทธิภาพในการการแลกเปลี่ยนความร้อนลงเรื่อยๆ การซ่อมบำรุงทำได้ยากและอาจจะต้องทิ้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเกี่ยวกับการอบยางแผ่นและการตากยางผึ่งแห้ง พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบยางแผ่นธรรมชาติได้ดีอยู่ที่ 40-60 เซลเซียส โดยมีความเร็วลมร้อนที่ 0.7-2 m/s [29-30] การตากยางให้สะเด็ดน้ำก่อนเข้าเตาอบที่ 6 ชั่วโมงจะช่วยให้ความชื้นภายในแผ่นยางไม่เกิน 40% อย่างไรก็ตามในการทำในระดับโรงรมมีการวางตากยางแค่ไม่เกิน 2 ชั่วโมงเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

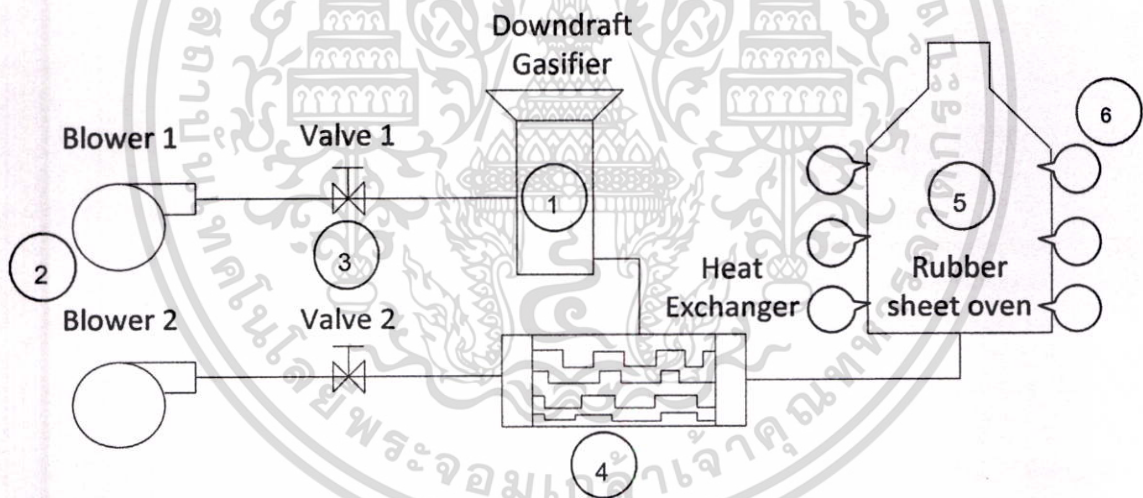
บทที่ 3

การออกแบบและวิธีดำเนินการวิจัย

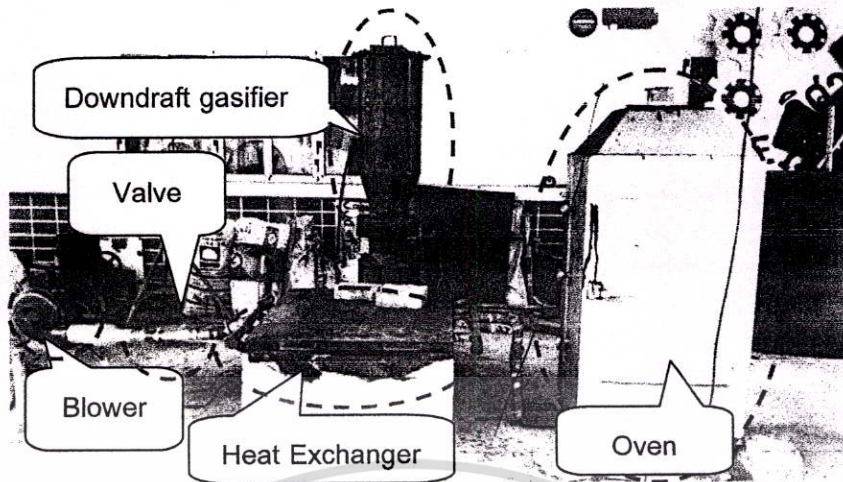
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ ในการดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบและวิธีการดำเนินงานในการออกแบบและสร้างเตาแก๊สซีไฟเออร์ ซึ่งจะแสดงชิ้นส่วนต่างๆของเตาแก๊สซีไฟเออร์รวมไปถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการในการอบยางพาราอัดแผ่นและมีอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ดังนี้

1. เตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดไหลลง
2. พัดลมอัดอากาศ จำนวน 2 ตัว
3. วาล์วปรับอัตราการไหลของอากาศจำนวน 2 ตัว
4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
5. ตู้อบยางพารา
6. เทอร์โมคัปเปิ้ล
7. ตาชั่งดิจิตอล



รูปที่ 3.1 ระบบกลไกอุปกรณ์อบยางพาราอัดแผ่นโดยมีแหล่งกำเนิดความร้อนเป็นเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์หลักในชุดระบบอบยางพาราอัดแผ่น

โดยดำเนินการวิจัยต่อไปดังนี้

3.2 การออกแบบแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง

โดยพิจารณาการอบยางพาราอัดแผ่นจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าต้องใช้ค่าความร้อนในการอบยางจนแห้ง โดยงานวิจัยดังกล่าวใช้ค่าความร้อน 17.5 kJ/s [31] ในขณะที่ค่าความร้อนของไม้พินยางพาราที่มีความชื้น 10.5 ± 1.5 มีค่าเท่ากับ 17.35 MJ/kg ดังนั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบยางพาราอัดแผ่น เป็นจำนวน 4.54 kg/hr หรือเท่ากับ 0.00126 kg/s

หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางห้องเผาไหม้ [32]

หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สโดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง

กำหนด ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ยางพารา มีค่าเท่ากับ 17,350 KJ/Kg

จะได้ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ยางพารา×เตาผลิตแก๊สมีประสิทธิภาพ เท่ากับ 80%เทียบกับทฤษฎี

แทนค่า $17,350 \text{ KJ/Kg} \times 0.8 = 13,880 \text{ KJ/Kg}$ จะต้องใช้ปริมาณไม้ยางพารา 109 Kg

ดังนั้น $13,880 \text{ KJ/Kg} \times 109 \text{ Kg} / (24 \text{ hr} \times 3600 \text{ s}) = 17.5 \text{ KJ/s}$

ค่าความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราในการอบยางหนึ่งครั้ง มีค่าเท่ากับ 17.5 KJ/s

การคำนวณหาค่าขนาดของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

กำหนด

ค่าความร้อนของไม้ยางพาราที่เป็นเชื้อเพลิง 13,880 KJ/Kg

กำหนดเตาแก๊สมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80 % เทียบกับทฤษฎี [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศมีค่า 0.41 คำนวณมาจากงานวิจัย [34]
(B) ฮาร์ทโหลด มีค่า $0.03 \text{ m}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ สำหรับคอคอดตรง [32]

แทนค่า

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊ส=

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ยางพารา \times เตาแก๊สมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80 % เทียบกับทฤษฎี

จะได้

$$\therefore \dot{m}_{\text{gas}} = (17.5 \text{ KJ/s}) / (13,880 \text{ KJ/Kg}) = 0.00126 \text{ Kg/s} \text{ หรือ } 4.54 \text{ Kg/hr}$$

จากกฎทรงมวล

$$\dot{m}_{\text{wood}} = 0.41 \dot{m}_{\text{air}}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = \dot{m}_{\text{wood}} + \dot{m}_{\text{air}}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = 0.41 \dot{m}_{\text{air}} + \dot{m}_{\text{air}}$$

$$\dot{m}_{\text{gas}} = 1.41 \dot{m}_{\text{air}}$$

ดังนั้นอัตรามวลอากาศที่ต้องใช้ในกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์จะมีค่า

$$\dot{m}_{\text{air}} = 0.00126 / 1.41 = 8.93 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

จากฮาร์ทโหลด (B) สำหรับไม่มีคอคอดจะมีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้คือ $0.03 \text{ m}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$

จากสูตร $B = 0.03 \text{ (Air inlet) / (Surface area throat)}$

กำหนดให้ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ทำให้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงมีค่า 4 ที่จะ

ทำให้ได้อัตรามวลอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้

จะได้ $\dot{m}_{\text{air}} = 8.93 \times 10^{-4} / 4 = 2.234 \times 10^{-4}$

อัตราการไหลของมวลอากาศ

จะได้

$$\dot{m}_{\text{air}} / \rho_{\text{air } 35\text{C}} = 2.234 \times 10^{-4} / 1.148157 = 1.95 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

หรือ $0.000195 \times 36000 = 0.700 \text{ m}^3/\text{hr}$

หาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาผลิตแก๊ส

จะได้

$$B = 0.03 \text{ (Air in let) / (surface are throat)}$$

แทนค่า

$$\text{Surface are (throat)} = 0.700/0.03 = 23.35 \text{ cm}^2$$

$$\text{Diameter (throat)} = \sqrt{\frac{23.35 \times 4}{\pi}} = 5.45$$

∴ เส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง 5.45 cm

3.3 การทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สชีวไฟเออร์

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สชีวไฟเออร์โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบยางพาราที่แผ่นมีข้อกำหนดในการคำนวณดังนี้

- ใช้น้ำจืดในการทดสอบ 1 kg
- ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำจืดมีค่าเท่ากับ 4.187 kJ/kg.K
- ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำที่ 100 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 2.260 kJ/kg
- ค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 17,350 kJ/kg
- มวลของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 1 kg
- ความชื้นของเชื้อเพลิง 10.5 ± 1.5 % DB

จะสามารถหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้จากสมการดังนี้ [19]

$$\eta_{\text{ther}} = \frac{m_{wi} C_{pw} (T_c - T_i) + m_{w, \text{evap}} H_i}{m_f H_f} \quad (3.1)$$

เมื่อ

m_{wi} คือ มวลของน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการต้ม (kg)

C_{pw} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำก่อนต้ม 4.187 kJ/kg.k

T_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่น้ำเดือด (°C)

T_i คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนการต้ม (°C)

$m_{w, \text{evap}}$ คือ มวลของน้ำที่ระเหยไปในการต้ม (kg)

H_i คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำเมื่อน้ำเดือด 100 °C 2.260 kJ/kg.k

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการต้มน้ำให้เดือด (kg)

H_f คือ ค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิง 17,350 kJ/kg

วิธีการทำการทดสอบโดยการต้มน้ำในภาชนะเปิด (Water Boiling Test)

อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

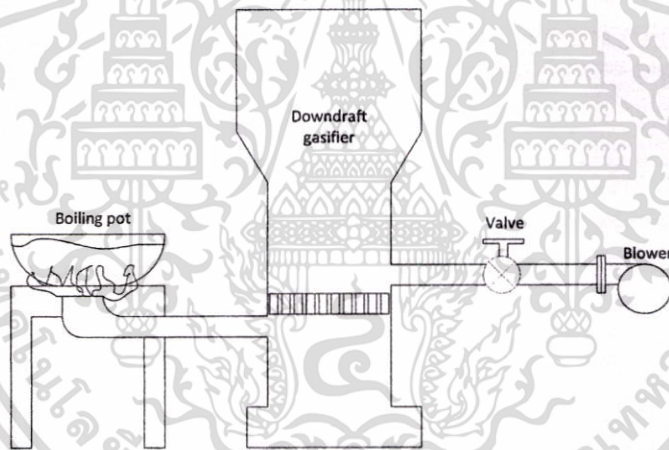
1. ภาชนะโลหะใส่น้ำที่พร้อมจะตั้งไฟเตาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ
3. ตาชั่งดิจิตอล
4. น้ำจืด

ขั้นตอนการทำการทดสอบ

1. เตรียมไม้เชื้อเพลิงชั้นไม้ยางพาราให้มีขนาดใกล้เคียงกันคือ 2-3 นิ้ว ควบคุมความชื้นของไม้เชื้อเพลิงให้ได้ไม่เกิน 10.5 ± 1.5 % DB ควบคุมรูปร่างให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่าๆ กัน
2. ชั่งน้ำหนักชั้นไม้เชื้อเพลิงทดสอบ 3 kg เพื่อใช้ในการทดสอบเผาเพื่อหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน
3. ชั่งน้ำหนักน้ำจืดที่ใส่ในภาชนะเตรียมการต้มจำนวน 1 kg
4. วัดอุณหภูมิน้ำก่อนการต้ม
5. จุดไฟเผาเตาจนติดดีแล้ว ใส่เชื้อเพลิงทดสอบ 3 kg
6. ควบคุมอากาศขาเข้า $2.234 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
7. ต้มน้ำจนเดือดและวัดอุณหภูมิขณะน้ำเดือด จับเวลาในการทดสอบการต้มตั้งแต่เริ่มต้มจนถึงน้ำเดือดดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Water Boiling Test

8. เมื่อน้ำเดือดแล้วให้ยกภาชนะลง วางในอุณหภูมิห้อง
9. ชั่งน้ำหนักน้ำหลังการต้ม
10. นำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณด้วยสมการ (3.1) หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่

สร้างชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเครื่องลดความชื้นยางพาราที่ระดับเกษตรกรขนาดความสามารถ ประมาณ 5 แฉนยางต่อวัน โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงนั้น เริ่มจากการคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนโดยสมมุติค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ให้ใกล้กับความเป็นจริงมากที่สุดคือ

- อุณหภูมิของส่วนผสมของอากาศในห้องเผาไหม้ 275°C
- อุณหภูมิของส่วนผสมของอากาศห้องเผาไหม้ไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนออกปล่องควัน 250°C
- อุณหภูมิอากาศก่อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน 35°C
- อุณหภูมิอากาศร้อนหลังผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน 60°C
- ไม่มีการสูญเสียความร้อนตามผนัง และการแผ่รังสี

จากสมการทรงพลังงาน

ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ - ความร้อนสูญเสียที่ปล่องควัน = ความร้อนถ่ายเทให้อากาศ

$$Q = mC_p \Delta T = UA(T_g - T_a) \quad (3.2)$$

ซึ่ง

Q = ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้, MJ/hr

m = มวลของก๊าซร้อนที่ออกทางปล่องควัน, kg/h

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$

ΔT = ค่าความต่างของอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ออกจากปล่องและอุณหภูมิอากาศ, $^{\circ}\text{C}$

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, kJ/m². $^{\circ}\text{C}$

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน, m²

T_g = อุณหภูมิของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้, $^{\circ}\text{C}$

T_a = อุณหภูมิของลมร้อน, $^{\circ}\text{C}$

จากข้อมูลความต้องการลดความชื้นยางพาราที่ความชื้นประมาณ 45% ให้เหลือ 15% ในปริมาณ 10 kg/วัน มาคำนวณความต้องการใช้ไม้พืนยางพาราต่อชั่วโมงได้โดย

หาค่าความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำจากสมการ

เปอร์เซ็นต์ความชื้น = น.น. น้ำ/ น.น. ยางพาราที่แห้งทั้งหมด

$$\% \text{M.C.1} = W_{m1} / W_1 \text{ และ } W_1 = W_{dm} + W_{m1}$$

$$\% \text{M.C.2} = W_{m2} / W_2 \text{ และ } W_2 = W_{dm} + W_{m2}$$

แทนค่า W_1 และ W_2 และจัดสมการใหม่ จะได้ว่า

$$W_{dm} = W_{m1}(1 - \% \text{M.C.1}) / \% \text{M.C.1} = W_{m2}(1 - \% \text{M.C.2}) / \% \text{M.C.2}$$

หรือ

$$W_{dm} = W_1(1 - \%M.C.1) = W_2(1 - \%M.C.2) \dots\dots\dots (3.3)$$

หรือนำหนักน้ำที่ระเหยไปคือ

$$W_1 - W_2 = W_1(1 - \%M.C.1) / (1 - \%M.C.2)$$

$$W_1 - W_2 = W_1\{1 - (1 - \%M.C.1) / (1 - \%M.C.2)\} \dots\dots\dots(3.4)$$

ซึ่ง

%M.C. = เปอร์เซนต์ความชื้นมาตรฐานเปียก, ทศนิยม

W_m = น้ำหนักน้ำที่อยู่ในยางพาราแผ่น, ก.ก.

W_{dm} = น้ำหนักแห้งของยางพาราแผ่น, ก.ก.

W_1 = น้ำหนักยางพาราแผ่นเริ่มต้น, ก.ก.

W_2 = น้ำหนักยางพาราแผ่นหลังลดความชื้น, ก.ก.

ค่าความร้อน (ΔH) ที่ต้องการใช้ในการระเหยน้ำคือ ผลลัพธ์ในสมการที่ (3.4) คูณด้วยค่า

ความร้อนแฝงของน้ำ (2.26 MJ/kg) หรือ

$$\Delta H = 2.26 W$$

$$1\{1 - (1 - \%M.C.1) / (1 - \%M.C.2)\} \dots\dots\dots(3.5)$$

แทนค่าตัวเลขที่ต้องการในสมการ (3)

$$\Delta H = 2.26 \times 10\{1 - (1 - 0.45) / (1 - 0.15)\}$$

$$= 8 \text{ MJ/วัน}$$

หาค่าความร้อน (Q) โดยเครื่องทำงาน 24 ชม. ดังนั้น

$$Q' = 8 \text{ MJ/d} / 24 \text{ h/d}$$

$$= 333.3 \text{ kJ/h}$$

ให้ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน เป็น 0.5

$$Q = 333.3 / 0.5$$

$$= 666.67 \text{ kJ/h}$$

ค่าความร้อนของไม้ยางพารา = 17.35 MJ/kg

ปริมาณไม้ยางพารา = 0.6667 / 17.35

$$= 0.04 \text{ kg/h}$$

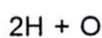
ปริมาณอากาศสำหรับเผาไม้ยางพารา หากจากสมการเคมีองค์ประกอบของไม้ยางพารา [35]

$$C = 44.8\%$$



$$CO_2 = 0.448 \times 32 / 12 = 1.195$$

$$H = 12.2\%$$



$$H_2O = 0.122 \times 16 / 2 = 0.015$$

$$S = 0.9\%$$



$$SO_2 = 0.009 \times 32 / 32 = 0.009$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวม O₂ ที่ต้องใช้เผาไหม้ไม้อย่างพารา 1 ก.ก. = 1.219 ก.ก. ในอากาศมี O₂ อยู่ประมาณ 20% ดังนั้น
ต้องใช้อากาศ 6.1 ก.ก./ก.ก. ไม้อย่างพาราในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต้องใช้ปริมาณอากาศ 2.5 เท่า ของ
ทฤษฎี = 15.25 ก.ก.

มวลอากาศที่ใช้เผาไหม้ไม้อย่างพารา = 0.04 x 15.25

มวลของก๊าซ = 0.61 kg/h

ความร้อนสูญเสียทางปล่องควัน = $mC_p\Delta T$

$$= 0.61 \times 1.03 \times (250 - 35)$$

$$= 135.08 \text{ MJ/h}$$

ความร้อนที่ต้องถ่ายเทให้อากาศ = 666.67 - 135.08

$$= 531.6 \text{ MJ/h}$$

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)

$$1/U = 1/h_o + xA_o/kA_m + 1/h_i \dots\dots\dots(3.6)$$

ซึ่ง

h_o = สัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนที่ผิวของท่อไฟด้านนอก

x = ความหนาของท่อไฟ

k = ค่าการนำความร้อนของท่อจากผนังด้านนอกสู่ผนังด้านใน

h_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวของท่อไฟด้านใน

ค่า h_i หาได้จากจากสมการของ Nusselt

$$h_i = C(k/D)R^{0.8}Pr^{0.4} \dots\dots\dots(3.7)$$

ซึ่ง C = ค่าคงที่, 0.023 ของ McAdams

R คือ Reynold Number ($VD\rho/\mu$) และ Pr คือ Prandtl Number ($C_p\mu/k$)

V = ความเร็วของก๊าซในท่อไฟ, m/s

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อไฟ, m

μ = ความหนืดของอากาศ, Pa.s

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, W/m²°C

ค่าของ h_o หาได้จากสมการ

$$h_o = 0.33 C(k/D)(G \times D/\mu)^{0.6} Pr^{0.3} \dots\dots\dots(3.8)$$

C = ค่าคงที่ที่ต้องหาจากการทดลอง ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าเป็น 1

G = มวลของอากาศที่ไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, kg/s-m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า h_i หรือ h_o จำเป็นต้องหาโดยวิธี trial and error เพราะความเร็วของอากาศผ่าน และก๊าซในท่อร้อนมีความสัมพันธ์กับจำนวนของท่อไฟ ส่วนทอม x_{A_o}/k_{A_m} มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า h_i หรือ h_o สามารถละเลยได้

มวลอากาศที่ไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน = $\rho VA = 1.14 \times 5.4 \times 50.8 / 1000 = 0.3127$

ทดลองใช้ท่อเหล็กดำขนาด 2 นิ้ว (0.0508 ม) ยาว 1 ม. เป็นไฟ จำนวน 4 ท่อ 9 กลับ

$$G = 0.3127 / (1 \times 0.0508 \times 36) = 0.171 \text{ kg/s-m}^2$$

$$h_o = 0.33(0.027/0.0508)(0.171 \times 0.0508 / 0.00002)^{0.6} \times 0.7^{0.3}$$

$$= 6.87 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

ปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้

$$R = VDP/\mu = 5.4 \times 0.0508 \times 1.14 / 0.00003$$

$$= 10,424.16$$

$$h_i = 0.023(0.027/0.0508)(10,424.16)^{0.8} (0.68)^{0.4}$$

$$= 0.01316 \times 1904.2 \times 0.851$$

$$= 17.16 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

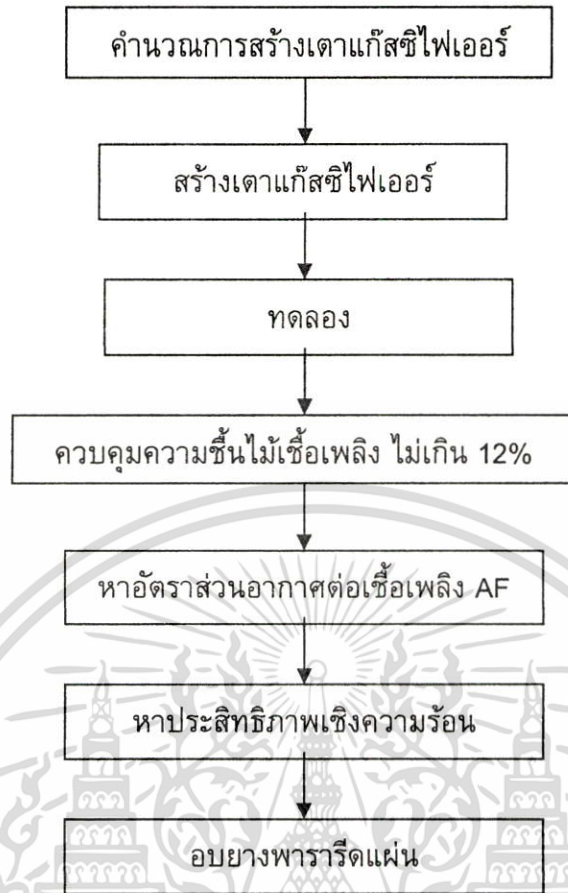
$$1/U = 1/6.87 + 1/17.16$$

$$= 0.145 + 0.058$$

$$= 4.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

3.5 การออกแบบพาราริตแผ่น

กระบวนการก่อนการออกแบบ จะทำการออกแบบและสร้างเตาแก๊สซีฟิเออร์ให้เรียบร้อยก่อน โดยทำการทดสอบเตาแก๊สซีฟิเออร์ด้วยการเตรียมไม้เชื้อเพลิงเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการคำนึงถึง ขนาดของชั้นไม้ ความชื้นของชั้นไม้ การกระจายขนาด เป็นต้น ตามชาร์จ์ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชาร์จการดำเนินงานออบยงพารารีดแผ่น

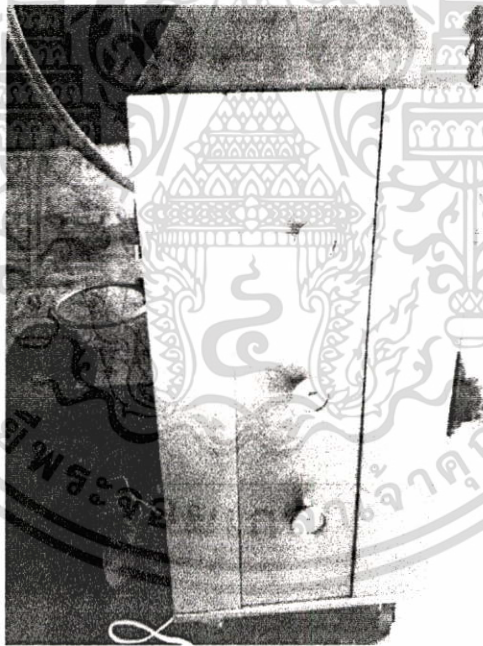
วิธีการดำเนินในการอบยง

1. จัดเตรียมเชื้อเพลิงนำมาตากแดดเพื่อลดความชื้นให้เหลือไม่เกิน 12% DB ตัดให้ได้ขนาดโดยประมาณ 2 นิ้ว ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เชื้อเพลิงที่ผ่านการลดความชื้นและควบคุมขนาด

2. เปิดการทำงานของระบบอบยางพาราด้วยเตาเผาแก๊สซีพีเออร์ ทิ้งไว้ 30 นาที หรือให้อุณหภูมิในตู้อบยางอยู่ที่ 50-60 องศา ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตู้อบยางที่ที่ได้รับลมร้อน ควบคุมให้ตู้อบยางมีอุณหภูมิ 50-60 องศา ในทุกตำแหน่ง

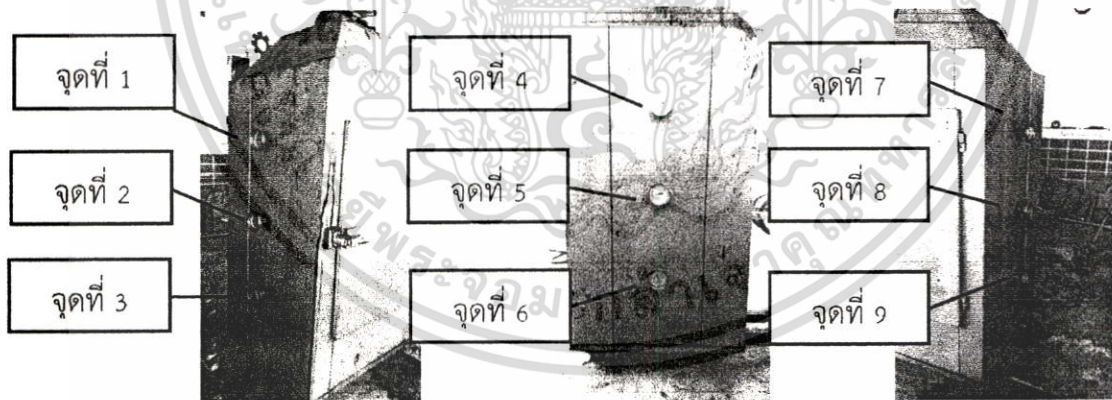
3. จัดเตรียมยางพาราพร้อมทั้งทำความสะอาด ซึ่งมีขนาดกว้าง 50 cm ยาว 90 cm หนาไม่เกิน 40 mm ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 จัดเตรียมขังพาราไรดแผ่นให้ได้น้ำหนักตามกำหนด พร้อมทั้งทำความสะอาดและตากอย่างให้สะเด็ดน้ำให้แห้งจนไม่มีหยดน้ำเกาะแผ่นยาง อย่างน้อย 6 ชั่วโมง

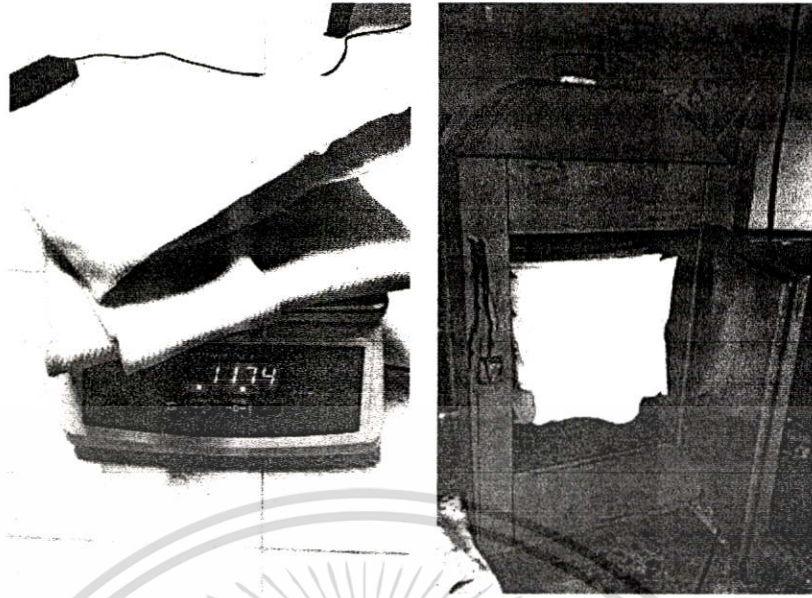
4. ควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ ให้ตู้อบมีอุณหภูมิโดยประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส ในทุกๆ จุดของเตาอบโดยพิจารณาอุณหภูมิจากเกจวัดเทอร์โมคัปเปิ้ลดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิ้ลเรียงจากด้านซ้าย, ด้านหลัง, ด้านขวา เรียงตามลำดับ

3 ชั่งน้ำหนักขังพาราไรดก่อนการอบพร้อมเก็บข้อมูลแล้วนำเข้าตู้อบอย่างดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

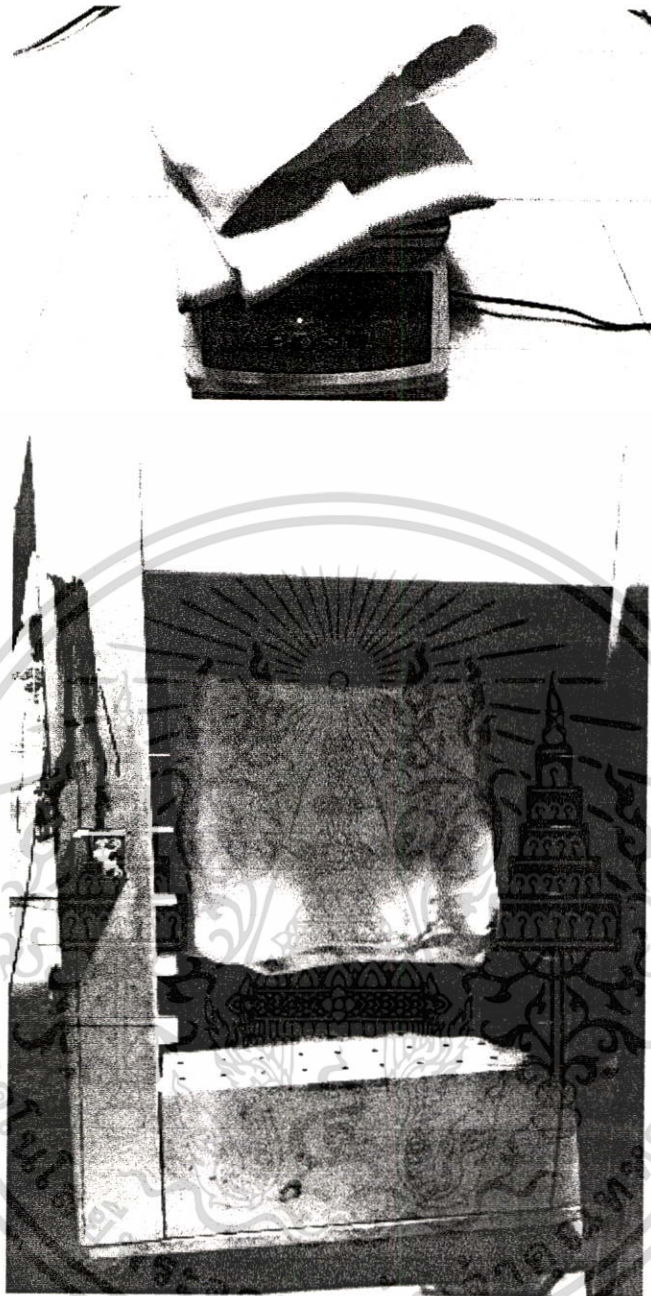


รูปที่ 3.9 ชิ่งนำหนักรายการพร้อมเก็บข้อมูลน้ำหนักแล้วนำแผ่นยางเข้าตู้อบยาง

- 4 ทำการอบแผ่นยาง โดยการเก็บข้อมูลน้ำหนักขงรายการทุกชั่วโมง และอุณหภูมิทุกๆชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมงดังรูปที่ 3.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ชั่งน้ำหนักขงพาราพร้อมเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


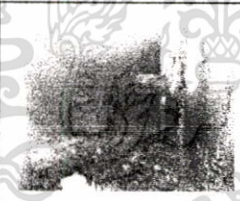

บทที่ 4

ผลการวิจัย

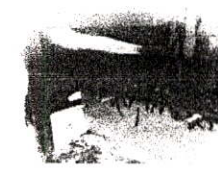
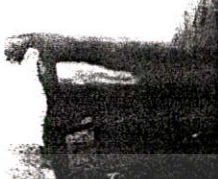




4.1 ผลทดลองจากการหาความเร็วลม

เนื่องจากการทดสอบเชื้อเพลิงที่ใช้ในหลายๆ ขนาดและหลากหลายความชื้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเผาเตาแก๊สซีไฟเออร์ให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยแสดงไว้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงมุมมองการเปิดของวาล์วและอัตราการไหลของอากาศ เพื่อนำอากาศเข้าไปในเตาแก๊สซีไฟเออร์ในขณะเผาชิ้นไม้เชื้อเพลิง

มุมในการเปิดวาล์วที่อลม (องศา)	ความเร็วลม V (m/s)	อัตราการไหลของอากาศ (ลม) $Q=VA$ (m ³ /s)	ภาพการติดของไฟ	ผลที่ได้จากการสังเกต
0	15.5	0.0314		อากาศเข้ามากเกินไปไม่สามารถจุดติดไฟได้
10	14.0	0.0284		อากาศเข้ามากเกินไปไม่สามารถจุดติดไฟได้
20	9.8	0.0198		อากาศเข้ามากเกินไปสามารถจุดติดได้แต่ไม่นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	6.2	0.0125		สามารถจุดติดไฟได้ ต่อเนื่องและทำอุณหภูมิใน เตาอบได้ 60 เซลเซียส
40	4.12	0.0083		สามารถจุดติดไฟได้ ต่อเนื่องและทำอุณหภูมิใน เตาอบได้ 50 เซลเซียส
50	3.0	0.0061		สามารถจุดติดไฟได้ ต่อเนื่องและทำอุณหภูมิใน เตาอบได้ 40 เซลเซียส
60	1.45	0.0029		อากาศเข้าน้อยเกินไป ไม่สามารถทำอุณหภูมิไม่ได้ ตามที่ต้องการ
70	1.05	0.0021		อากาศเข้าน้อยเกินไป ไม่สามารถทำอุณหภูมิไม่ได้ ตามที่ต้องการ
80	0	0		อากาศเข้าน้อยเกินไปไม่ สามารถจุดติดไฟได้

(หมายเหตุ 0 องศา คือ เปิดหมด 80 องศา คือ ปิดหมด)

ผลจากการทดสอบการจ่ายอากาศเข้าไปทำการทดสอบกับเตาแก๊สซีฟิเออร์ที่สร้างขึ้นพบว่าการเปิดปริมาณอากาศด้วยวาล์วเปิดอากาศที่ตำแหน่งการเปิด 30 องศา จะได้ความเร็วอากาศที่ 6.2 m/s และเมื่อคำนวณหาค่าเป็นอัตราการไหลของอากาศโดยนำความเร็วอากาศที่วัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมจนได้ค่าความเร็วลมดังกล่าวมาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อส่งอากาศคือ 50.8 mm. (2 นิ้ว) จะทำให้ทราบค่าอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานในการอบยางอยู่ที่ $0.0125 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่ตำแหน่งการเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วาล์ว 30 องศา โดย Condition ดังกล่าวสามารถทำความร้อนให้กับเตาอบได้ถึง 60 องศาเซลเซียสได้ตลอดการอบทั้ง 24 ชั่วโมง

4.2 ประสิทธิภาพเตาแก๊สซีฟิเออร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น

เนื่องจากเตาแก๊สซีฟิเออร์ชนิดไหลลงจะต้องควบคุมขนาดและความชื้นของชิ้นไม้เชื้อเพลิงเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟิเออร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเตาแก๊สซีฟิเออร์ ด้วยการทดสอบลักษณะของเปลวไฟในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าองศาของการเปิดวาล์วอากาศที่เหมาะสมในการจ่ายลมร้อนให้กับเตาอบประกอบด้วยค่าในการเปิดวาล์ว 3 ค่า ได้แก่ 30 40 และ 50 องศาตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดสอบการเปิดวาล์วอากาศเข้าเตาและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟิเออร์ (อัตราไหลอากาศ = $\rho_{\text{air } 35C} \times A \times V$) ($\rho_{\text{air } 35C}=1.145$) [14] ($A=\pi \times 0.0508^2/4=2.027 \times 10^{-3}$)

ตำแหน่งวาล์ว ($^{\circ}$)	ความเร็วลม (m/s)	อัตราการไหล อากาศ (m^3/s)	อัตราส่วน เชื้อเพลิงต่อ อากาศ	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน (%)
30	6.20	0.0143	11.3492	2.81
40	4.12	0.0095	7.5397	2.05
50	3.00	0.0069	5.5432	1.35

4.3 ผลการอบยางด้วยระบบเตาอบที่สร้างขึ้น

จากการทดลองการอบยางพาราที่รีดแผ่นด้วย เตาแก๊สซีฟิเออร์สามารถอบยางพาราที่รีดแผ่นได้ด้วยเชื้อเพลิงชิ้นไม้ยางพารา ผลการทดลองการอบยางพาราแบบผ่านด้วยเตาแก๊สซีฟิเออร์มีดังนี้ การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาอบในทุกๆชั่วโมงตลอด 24 ชั่วโมง

เวลา	อุณหภูมิในตู้อบ (T_{1-9}) และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาแก๊สซีฟิเออร์(T_c)									
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_c
08.00	50	50	50	50	50	50	45	50	50	680
09.00	50	50	50	50	50	50	45	50	50	470
10.00	55	55	55	50	55	50	43	50	55	470
11.00	50	50	50	50	50	50	45	50	50	609
12.00	50	50	50	50	50	50	50	45	50	583
13.00	50	50	50	50	50	55	50	45	55	707
14.00	50	50	50	50	50	50	50	45	50	740
15.00	50	50	50	50	50	55	50	45	55	720
16.00	45	45	50	50	50	50	50	45	50	710
17.00	45	50	50	50	50	50	50	45	50	730
18.00	50	50	50	50	50	50	50	45	50	715
19.00	50	45	50	50	50	50	50	45	50	720
20.00	50	50	55	50	50	50	50	45	50	705
21.00	50	50	50	50	50	50	55	50	50	750
22.00	50	50	55	50	50	55	50	50	50	710
23.00	55	55	55	50	50	55	50	50	50	740
00.00	50	55	55	50	50	55	50	50	55	715
01.00	45	45	45	45	45	45	45	45	45	720

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

02.00	50	50	50	55	55	55	50	50	50	705
03.00	55	55	60	55	60	60	55	50	60	750
04.00	55	50	60	53	60	60	55	50	60	710
05.00	55	55	65	60	60	65	55	45	60	740
06.00	50	55	60	60	60	63	55	45	60	715
07.00	55	53	60	55	55	60	55	45	55	720
08.00	55	60	55	55	60	60	55	45	55	730

ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิทั้ง 9 ตำแหน่งในเตาอบพบว่า เตาอบและระบบจ่ายลมร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถจ่ายลมร้อนได้ต่อเนื่องสม่ำเสมอตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงในการอบยางพาราที่แผ่น โดยสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิที่ 50-60 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเหมาะสมในการอบยาง [36] ในขณะที่อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ มีค่าประมาณ 710-750 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

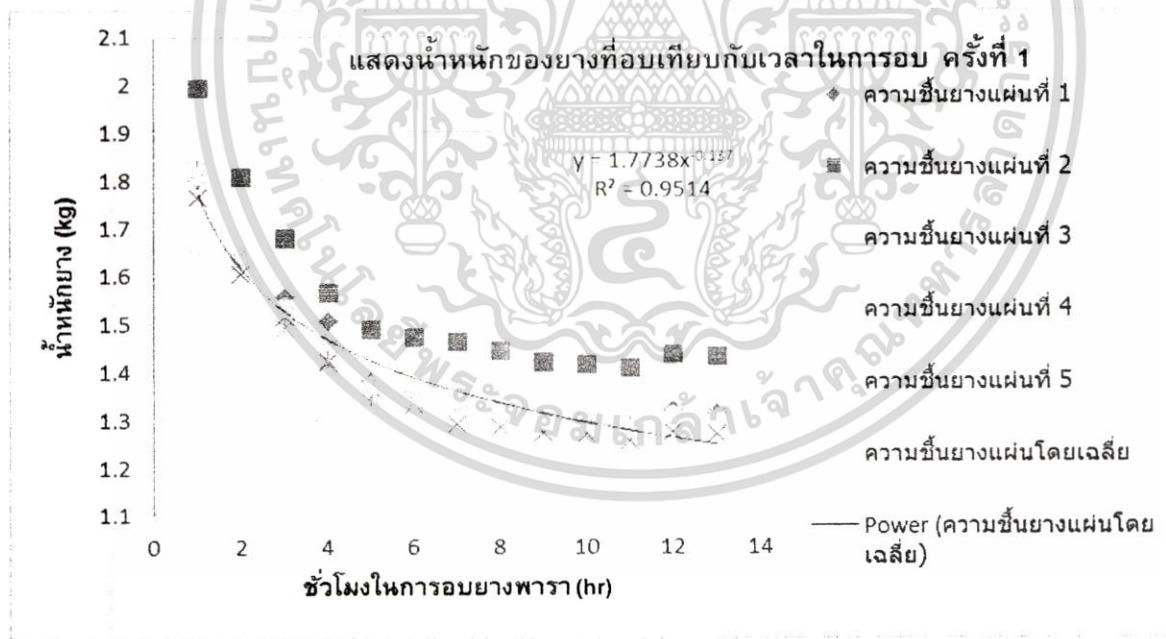
ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักของยางพารา ที่ลดลงเมื่อเวลาการอบผ่านไปทั้ง 24 ชั่วโมงของการอบยางพาราครั้งที่ 1

เวลา	แผ่นที่ 1 (kg)	แผ่นที่ 2 (kg)	แผ่นที่ 3 (kg)	แผ่นที่ 4 (kg)	แผ่นที่ 5 (kg)
08.00	1.804	1.994	1.660	1.766	1.824
10.00	1.634	1.808	1.502	1.604	1.628
12.00	1.554	1.680	1.428	1.514	1.490
14.00	1.506	1.564	1.406	1.420	1.424
16.00	1.378	1.488	1.280	1.364	1.346
18.00	1.342	1.472	1.242	1.330	1.340

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20.00	1.330	1.462	1.232	1.290	1.334
22.00	1.324	1.442	1.216	1.284	1.326
00.00	1.300	1.420	1.206	1.272	1.292
02.00	1.296	1.414	1.190	1.268	1.292
04.00	1.286	1.408	1.186	1.254	1.274
06.00	1.320	1.436	1.198	1.274	1.310
08.00	1.312	1.430	1.194	1.270	1.304
24	0.492	0.564	0.466	0.496	0.52
$\bar{X} = 0.5076$					

ซึ่งสามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงผลของน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาที่อบจากเริ่มต้นอบจนถึงอบครบ 24 ชั่วโมงในการทดลอง ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

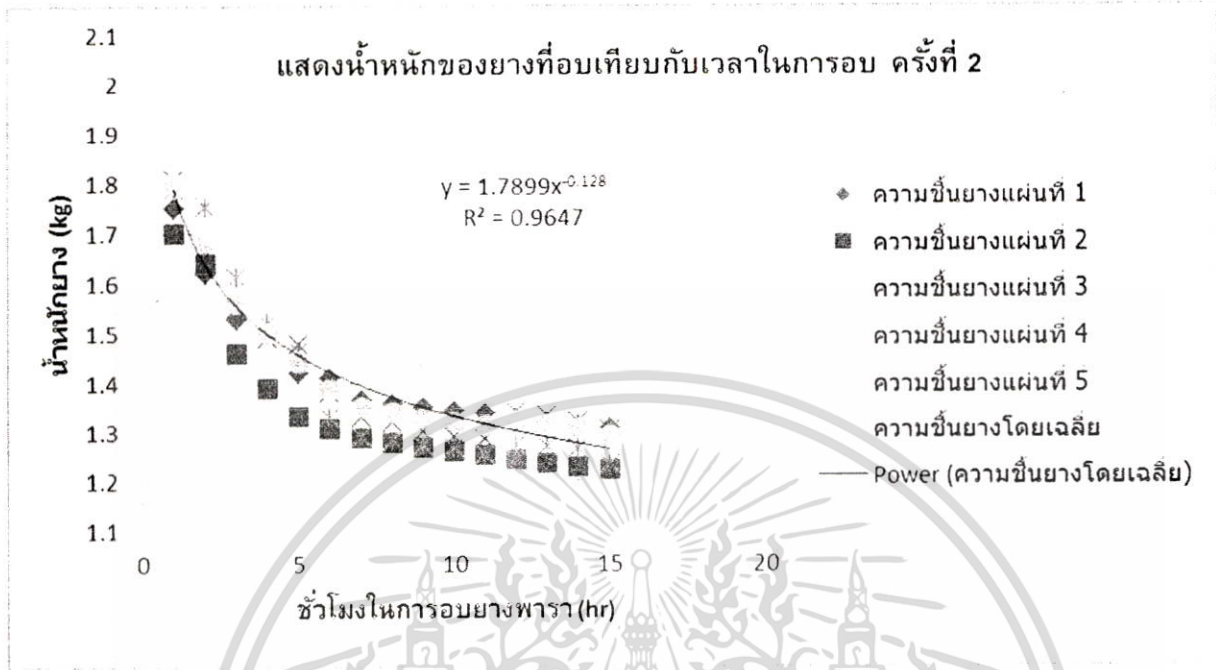
เมื่อทำการทดลองได้แล้วจึงทำการทดสอบซ้ำพบว่าผลการอบมีค่าใกล้เคียงกับครั้งแรกดังตารางการอบที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงน้ำหนักของยางพารา ที่ลดลงเมื่อเวลาการอบผ่านไปทั้ง 24 ชั่วโมงของการอบยางพาราครั้งที่ 2

เวลา	แผ่นที่ 1 (kg)	แผ่นที่ 2 (kg)	แผ่นที่ 3 (kg)	แผ่นที่ 4 (kg)	แผ่นที่ 5 (kg)
16.30	1.750	1.700	1.954	1.808	1.788
17.30	1.621	1.642	1.764	1.636	1.754
18.30	1.528	1.462	1.648	1.550	1.614
19.30	1.501	1.392	1.602	1.492	1.520
20.30	1.422	1.332	1.520	1.478	1.464
21.30	1.411	1.307	1.508	1.382	1.330
22.30	1.366	1.288	1.478	1.330	1.290
23.30	1.358	1.277	1.466	1.320	1.284
00.30	1.350	1.268	1.454	1.300	1.272
01.30	1.342	1.260	1.448	1.291	1.268
02.30	1.338	1.252	1.436	1.286	1.254
03.30	1.329	1.244	1.426	1.340	1.274
04.30	1.320	1.236	1.422	1.332	1.270
05.30	1.314	1.228	1.407	1.320	1.266
06.30	1.308	1.224	1.396	1.303	1.234
24 ชั่วโมง	0.442	0.476	0.558	0.505	0.554
$\bar{X} = 0.507$					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงผลของน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาที่อบจากเริ่มต้นอบจนถึงอบครบ 24 ชั่วโมงในการทดลอง ครั้งที่ 2

จากการอบทำให้ความชื้นที่อยู่ในเนื้อยางได้ระเหยออกมาด้านนอกตามเวลาที่อบไปเรื่อยๆ ซึ่งใกล้เคียงกันทั้ง 2 ครั้งที่ทำการทดสอบ โดยพบว่าจะมีสมการในการลดลงของน้ำหนักยางเป็นสมการกำลัง $y = aX^b$ โดยการทดลองทั้งสองครั้ง ได้ค่า $a = 1.7738$ ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 1.7899 ในการทดลองครั้งที่ 2 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า $b = -0.137$ ในการทดลองครั้งที่ 1 และ -0.128 ในการทดลองครั้งที่ 2

การทดลองทั้งสองครั้งมีกลไกการลดลงของน้ำหนักคล้ายๆ กัน นั่นแสดงว่ามีการทดลองทั้งสองครั้งไม่มีข้อแตกต่างกันโดยพบว่าความชื้นสุดท้ายของยางทั้ง 5 แผ่นเป็นไปตามตารางที่ 4.3 นี้

ตารางที่ 4.6 ตารางค่าเฉลี่ยความชื้นตามมาตรฐานแห้งของยางที่ผ่านการอบทั้ง 2 ครั้ง

	ยางแผ่น ที่ 1	ยางแผ่น ที่ 2	ยางแผ่น ที่ 3	ยางแผ่น ที่ 4	ยางแผ่น ที่ 5	ค่าเฉลี่ยความชื้น ฐานแห้งของยาง ทั้ง 5 แผ่น
ค่าเฉลี่ยความชื้นฐาน แห้งของการทดลอง ครั้งที่ 1	37.50	39.44	39.03	39.06	39.88	38.99
ค่าเฉลี่ยความชื้นฐาน แห้งของการทดลอง ครั้งที่ 2	23.93	34.15	26.36	25.56	42.14	30.19
ค่าเฉลี่ยความชื้นฐาน แห้งของยางโดยเฉลี่ย ทั้ง 5 แผ่น	30.715	36.795	32.695	32.31	41.01	34.59

จากการทดลองพบว่าชุดเตาอบ สามารถอบยางให้ความชื้นลดลงได้เกินกว่า 30 % Dry basis ซึ่งเมื่อเตรียมยางให้ความชื้นขาเข้าของยางรีดแผ่นไม่เกิน 45 % Dry basis ก็จะสามารถอบยางให้ความชื้นเหลือไม่เกิน 15% Dry basis ได้ในการอบยางเพียง 24 ชั่วโมง ซึ่งความชื้นในระดับ 15% Dry basis สามารถขายเป็นยางแผ่นดิบคุณภาพดีความชื้น ไม่เกิน 15% ได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงที่นำมาใช้เป็นต้นกำเนิดความร้อนในระบบนั้น พบว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอในการอบยางพาราแผ่นตามกำหนดได้ เชื้อเพลิงไม้ผืนที่ใช้เผาเพื่อทำความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพเพียงพอในการอบยาง การเผาเชื้อเพลิงไม้ผืนยางพารากับเตาแก๊สซีไฟเออร์จำเป็นต้องควบคุมขนาดของชิ้นไม้เชื้อเพลิงไม่น้อยกว่า 2-3 นิ้ว ทั้งนี้ถ้าขนาดน้อยกว่านี้จะทำให้เสียเวลาในการผ่าและจัดการ รวมทั้งก่อให้เกิดความดันตกในห้องเผาไหม้ จำเป็นต้องเพิ่มกำลังพัดลมขาเข้าเพื่อชดเชยความดันในระบบทำให้ต้องสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของพัดลมอัดอากาศอีก ขณะที่ต้องควบคุมความชื้นของไม้เชื้อเพลิงด้วย โดยการทดสอบพบว่าความชื้นสูงสุดที่เหมาะสมของไม้เชื้อเพลิงคือ 12% Dry basis ทั้งนี้ไม้ผืนยางพาราที่หาได้จากโรงไม้ผืนที่มีขายโดยทั่วไปจะมีค่าความชื้นในเนื้อไม้ถึง 37% Dry basis แต่จากการทดสอบการใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นเกินกว่า 12% dry basis พบว่าเตาแก๊สซีไฟเออร์จะใช้ความร้อนที่ผลิตได้เข้าไปดำเนินการอบชิ้นไม้ในบริเวณโซน Drying ทำให้เกิดไอน้ำที่ระเหยออกมาจากไม้ผืนที่ชื้นนั้น ทำให้ความดันบริเวณดังกล่าวเกิดสูงกว่าด้านล่างไอน้ำจะพวยพุ่งขึ้นสู่ด้านบน พาเอาแก๊สชีวมวลถ่ายออกสู่บรรยากาศภายนอกเกือบทั้งหมด ทำให้จะได้แก๊สชีวมวลผ่านเข้าสู่โซน Reduction มีปริมาณน้อยทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ ดังนั้นความชื้นในไม้เชื้อเพลิงจึงไม่ควรเกินกว่า 12% Dry basis เพื่อให้เตาแก๊สซีไฟเออร์มีแก๊สชีวมวลและจุดไฟได้ต่อเนื่องได้ ในขณะที่ถ้าความยาวของชิ้นไม้เกินกว่า 3 นิ้วจะทำให้เกิดช่องว่างในกองไม้ผืนในถังบรรจุเชื้อเพลิงมากโดยอากาศจะแทรกอยู่ระหว่างชิ้นไม้ในถังบรรจุ ก่อให้เกิดปริมาณออกซิเจนมาก (เผาไหม้สมบูรณ์) จึงทำให้เกิดแก๊สชีวมวลในปริมาณเล็กน้อยจึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำลงไปด้วยประกอบกับความต่อเนื่องของการไหลของเชื้อเพลิงในเตาเผาลดลงอันเกิดจากการขัดกันของชิ้นไม้ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเลือกขนาดและความชื้นของชิ้นไม้เชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีไฟเออร์

การอบยางพารารีดแผ่นด้วยเครื่องอบยางพารานี้ สามารถดำเนินการได้อย่างดี โดยความชื้นของยางก่อนอบไม่ควรเกิน 45% Dry basis เพราะการอบยางด้วยเครื่องอบดังกล่าวสามารถอบลดความชื้นภายใน 24 ชั่วโมงได้ถึง 30% Dry basis ดังนั้นเมื่อความชื้นก่อนอบของแผ่นยางไม่เกิน 45% Dry basis แล้วเมื่ออบด้วยเครื่องอบยางนี้ในเวลา 24 ชั่วโมงความชื้นจะลดลงจนมีความชื้นในยางพารารีดแผ่นเหลือเพียง 15% dry basis ซึ่งเพียงพอที่จะขายเป็นแผ่นยางพาราแผ่นดิบคุณภาพดี ที่ความชื้นไม่เกิน 15% ได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไป

เนื่องจากเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลงจำเป็นต้องควบคุมขนาดและความชื้นของชั้นไม้เชื้อเพลิงอีกทั้งการกระจายขนาดก็จะก่อให้เกิดการติดขัดกันของชั้นไม้เชื้อเพลิงในถังบรรจุ ทำให้ประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีฟิเออร์ลดลง ดังนั้นจึงมีข้อเสนอว่าน่าจะดำเนินการจัดสร้างเครื่องผ่าไม้พิน และต้องนำเชื้อเพลิงเหล่านี้ไปตากแดดก่อนจนเหลือความชื้นในเนื้อไม้พินเชื้อเพลิงไม่เกิน 12% dry basis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

1. บทความวิชาการเรื่อง: “ผลของขนาดชิ้นไม้ผืนยางพาราต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลง” การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 1 จังหวัดชุมพร 19-21 พฤษภาคม 2559.
2. เครื่องต้นแบบ “ชุดเตาอบยางพาราไร้ควันด้วยลมร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลง”
3. บทความวิชาการเรื่อง: “ผลของความชื้นของชิ้นไม้ผืนยางพาราต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลง” The 9th TSAE International Conference IMPACT Arena, Exhibition and Convention Center Bangkok, Thailand 8 – 10 September 2016. (อยู่ในระหว่างการดำเนินการ)
4. บทความวิชาการเรื่อง: “ผลของการกระจายขนาดชิ้นไม้ผืนยางพาราต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลง” การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรมนวัตกรรมและการจัดการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 5 BITEC บางนา กทม. 3-4 ตุลาคม 2559. (อยู่ในระหว่างการดำเนินการ)
5. อบรมเกษตรกรในพื้นที่ ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร เดือนมิถุนายน 2559 (อยู่ในระหว่างการดำเนินการ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] <http://smprubber.weebly.com/products.html> cited 6/4/2018
- [2] <http://moddaeng.igetweb.com/articles/41929221/%E0%B8%AA%E0%B8%B9%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%B3%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B9%88%E0%B8%99%20.html> cited 6/4/2016
- [3] <http://www.tnews.co.th/html/contents/175726/> cited 6/4/2016
- [4] http://www.technologychaoban.com/news_detail.php?tnid=590 cited 6/4/2016
- [5] http://www.rubberthai.com/news/newsinfo/2550/news_aug50/news_2901.htm cited 6/4/2016
- [6] นายฐานิตย์ เมธิยานนท์ และคณะ. ระบบอบ-รมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงแบบใช้ท่อจ่ายลมร้อน. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 8322 24 กันยายน 2556.
- [7] <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/2012371435251.pdf>, รายงานผลการดำเนินโครงการหมู่บ้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: โรงไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับชุมชน. Cited 6/4/2016.
- [8] <http://www.allpowerlabs.com/wp-content/gallery/gasification-grapics/downdraft.jpg>, Cited 6/4/2016.
- [9] FAO (1986). Wood gas as engine fuel. Food and agriculture organization of the United Nations. 72
- [10] http://www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads/images/files/Gasification%20SRK_25%20Aug.pdf Cited 6/4/2016.
- [11] Reed, B. T. and (1998). Hand book of biomass downdraft gasifier engine system. The Biomass Energy Foundation press, Golden Colorado.
- [12] ภาณุพงศ์ ตันดีดน้อยและ ณัฐวิทย์ พรหมมา. (2014). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, จังหวัดขอนแก่น.
- [13] http://rubber.oie.go.th/file/8_เทคโนโลยีแก๊สซีพีเคชั่นเศษไม้.pdf, รายงานเทคโนโลยีการผลิตพลังงาน/เชื้อเพลิงจากเศษไม้ โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์. Cited 6/4/2016.
- [14] Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2015). Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill Education. New York.
- [15] W. M. Kays and A. L. London. *Compact Heat Exchangers*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] <http://www.rubbernongkhai.com/index.php/component/content/article/3-activity/426-rubberdee>
Cited 6/4/2016.

[17] <http://km2.dpim.go.th/new/lib/download.php?dlfile...> Cited 6/4/2016.

[18] สมพงศ์ บ. ผลของขนาดชิ้นไม้ผืนยางพาราต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง. การประชุมวิชาการ I AM BEST ครั้งที่ 1 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร: 19-21 พฤษภาคม 2559.

[19] Jayah, T. H. et al. (2003). Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*. 25: 459-469.

[20] Bhattacharya, S.C. et al. (2002). Effect of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. *Biomass and Bioenergy*. 23: 387-395.

[21] ภาณุพงษ์ หมั่นขีต. (2014). การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลชนิดไหลลง, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 3, จังหวัดภูเก็ต

[22] Upadhyay D. S., Patel V., Patel R. N. (2013) Performance – Evaluation of Lignite in a downdraft Gasifier. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. 4(2): 198-202.

[23] www.energy.mju.ac.th/download/Chapter%206%20Gasification.pdf, Biomass Energy Technology. Cited 6/4/2016.

[24] <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/2012371435251.pdf>, รายงานผลการดำเนินโครงการหมู่บ้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: โรงไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับชุมชน. Cited 6/4/2016.

[25] www.dpim.go.th/service/download?articleid=3502&F=6457. รายงานเทคโนโลยีการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงจากเศษไม้ โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์ Cited 6/4/2016.

[26] ฐานิตย์ เมธิยานนท์และคณะ, เตากำเนิดความร้อนประหยัดพลังงานแบบมีชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแนวตั้งและแก๊สร้อนไหลสองกลับสำหรับการอบ-รมควันยางพารา. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 8119 3 กรกฎาคม 2556.

[27] ฐานิตย์ เมธิยานนท์และคณะ, เตากำเนิดความร้อนประหยัดพลังงานแบบลมร้อนไหลสองกลับสำหรับการอบ-รมควันยางพารา. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 7474 6 กุมภาพันธ์ 2555.

[28] ทวีป แก้วศรี, เตารมควันยางแผ่นที่ได้รับการปรับปรุง. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 8467 12 พฤษภาคม 2556.

[29] จุฑารัตน์ ทะสระและคณะ., (2550). Mathematical modeling and Parameters for the Analysis of Skim Block Rubber Drying, “วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต” วิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Thawatchai T. et al., (2554). การพัฒนาระบบอบแห้งสำหรับยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยลมร้อนและพลังงานแสงอาทิตย์, การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, ee015.
- [31] ปราชญา ปิยจันทร์ และภาณุวัฒน์ สุธรรมชาดา, (2556) “การอบยางพาราที่แห้งด้วยลมร้อนจากเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว” ปรินิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์.
- [32] รัตน์ เลหวนิช., (2007) “การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย” วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [33] วิชัย ศิวะโกศิษฐ์., (2010) “การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลชนิดไหลลงเพื่อใช้ในการอบแห้งในโรงงานผสมปุ๋ยขนาดเล็กโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. 52-59.
- [34] Pulkrabek W. W., (1997) “Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine” Prentice Hall, New Jercey, USA.
- [35] Anis S. and Zainal Z. A., (2014) “Simultaneous conversion of tar particles from biomass producer gas via thermocatalytic cracking under microwave irradiation” 2nd AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering. RCEnE 2014, Bangkok, Thailand. 13-14 Nov
- [36] เถลิงราช นิลเชื้อวงศ์ และคณะ., (2555). การอบแห้งยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับวิสาหกิจและกลุ่มสหกรณ์สวนยางพาราขนาดย่อม, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17 (2): 50-59.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณหาปริมาณความจุภายในเตาผลิตแก๊สชีววมวล

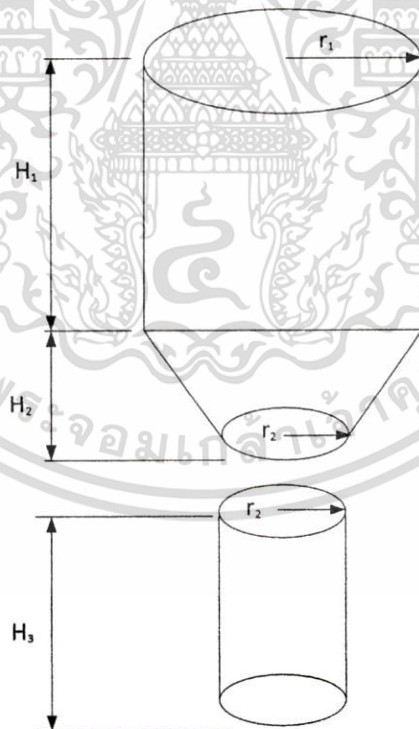
$$\begin{aligned} \text{ส่วน A : } V &= \pi r_1^2 \cdot H_1 \\ &= \pi (0.17825)^2 \cdot (0.6) \\ &= 0.06 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ส่วน B : } V &= (1/3)\pi \cdot H_2 (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2) \\ &= (1/3)\pi (0.2) [(0.17825)^2 + (0.1)^2 + (0.17825 \times 0.1)] \\ &= 0.0125 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ส่วน C : } V &= \pi r_2^2 \cdot H_3 \\ &= \pi (0.1)^2 \cdot (0.5) \\ &= 0.0157 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณความจุทั้งหมด

$$V_{\text{total}} = V_A + V_B + V_C = 0.06 + 0.0125 + 0.0157 = 0.0882 \text{ m}^3$$



รูปที่ ก-1 ขนาดถังบรรจุเชื้อเพลิงเตาแก๊สชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาประสิทธิภาพเตาผลิตแก๊สชีวมวล

ในการทดลองประสิทธิภาพของเตาชีวมวล จะเป็นการทดสอบหาประสิทธิภาพในด้านความร้อนโดยใช้วิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test, WBT) ดังสมการที่ใช้ในการคำนวณ (สมการที่ 3.1)

$$\eta_{\text{ther}} = \frac{m_{wi} C_{pw} (T_e - T_i) + m_{w,\text{evap}} H_i}{m_f H_f}$$

เมื่อ

m_{wi}	คือ มวลของน้ำตั้งต้นที่ใช้ในการต้ม (kg)
C_{pw}	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำก่อนต้ม 4.187 kJ/kg.k
T_e	คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่น้ำเดือด ($^{\circ}\text{C}$)
T_i	คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนการต้ม ($^{\circ}\text{C}$)
$m_{w,\text{evap}}$	คือ มวลของน้ำที่ระเหยไปในการต้ม (kg)
H_i	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำเมื่อน้ำเดือด 100°C 2.260 kJ/kg.k
m_f	คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการต้มน้ำให้เดือด (kg)
H_f	คือ ค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิง 17,350 kJ/kg

1. อัตราการไหลอากาศ = $0.0143 \text{ m}^3/\text{s}$: ใช้เวลาเผา 17 นาทีที่น้ำเดือดที่ 95.4°C
(อัตราการกินเชื้อเพลิง = $4.54 \times 17/60 = 1.2863 \text{ kg/s}$)

$$m_{wi} = 1,000 \text{ g}$$

$$m_{w,\text{evap}} = 1,000 - 159 = 841 \text{ g}$$

$$\Delta T = 95.4 - 31.2 = 64.2^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{\text{ther}} = \{ [(1)(4.19)(64.2) + (0.159)(2,260)] / (1.2863 \times 17,350) \} \times 100$$

$$= 2.81\%$$

2. อัตราการไหลอากาศ = $0.0095 \text{ m}^3/\text{s}$: ใช้เวลาเผา 27 นาทีที่น้ำเดือดที่ 95°C
(อัตราการกินเชื้อเพลิง = $4.54 \times 27/60 = 2.043 \text{ kg/s}$)

$$m_{wi} = 1,000 \text{ g}$$

$$m_{w,\text{evap}} = 1,000 - 202 = 798 \text{ g}$$

$$\Delta T = 95 - 30 = 65^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{\text{ther}} = \{ [(1)(4.19)(65) + (0.202)(2,260)] / (2.043 \times 17,350) \} \times 100$$

$$= 2.05\%$$

3. อัตราการไหลอากาศ = $0.0069 \text{ m}^3/\text{s}$: ใช้เวลาเผา 47 นาทีที่น้ำเดือดที่ 95.2°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(อัตราการกินเชื้อเพลิง = $4.54 \times 47 / 60 = 3.556 \text{ kg/s}$)

$$m_{wi} = 1,000 \text{ g}$$

$$m_{w, \text{evap}} = 1,000 - 246 = 754 \text{ g}$$

$$\Delta T = 95.2 - 29 = 66.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{\text{ther}} = \{ [(1)(4.19)(66.2) + (0.246)(2,260)] / (3.556 \times 17,350) \} \times 100$$

$$= 1.35\%$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

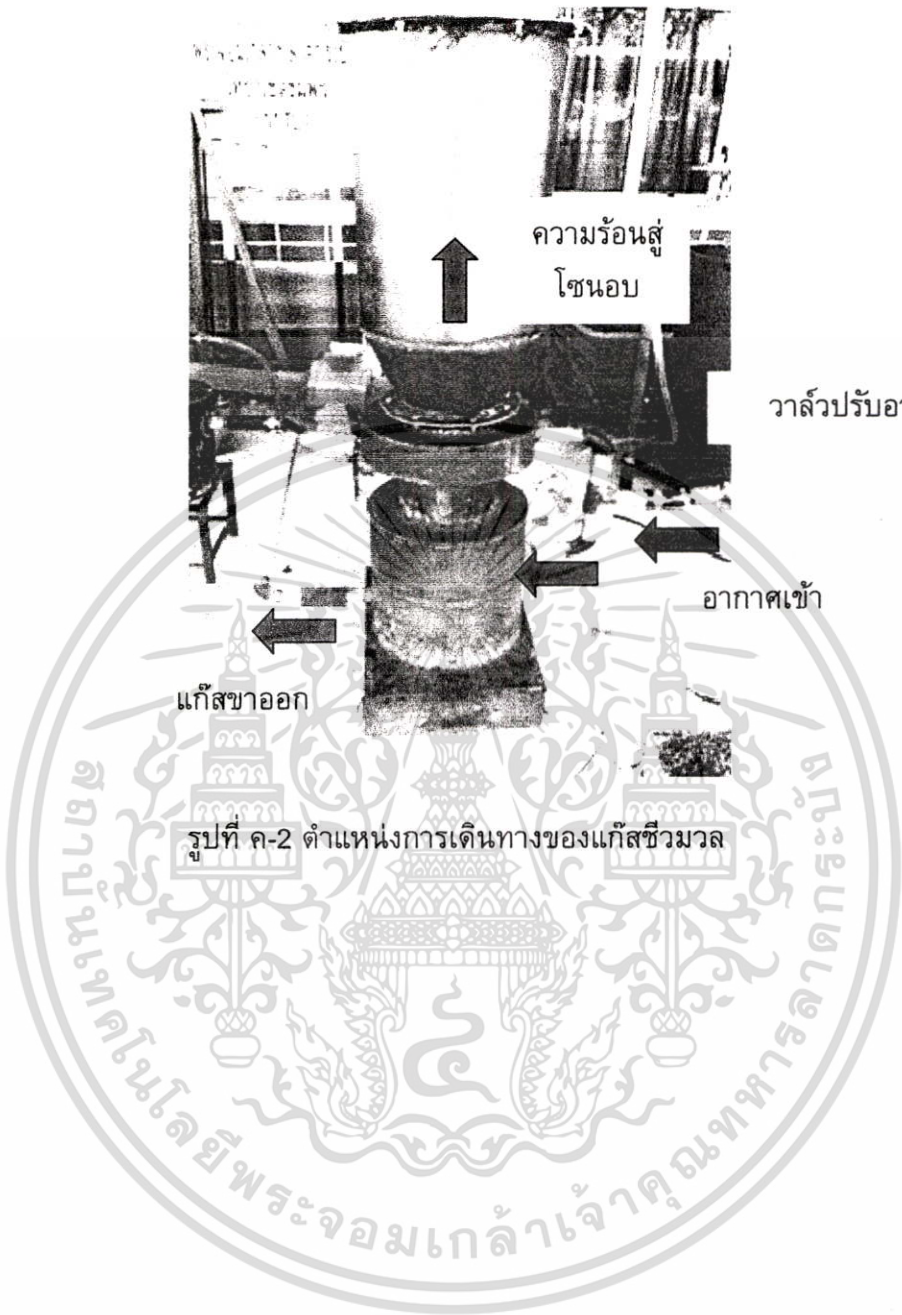
ภาคผนวก ค

ส่วนประกอบเตาผลิตแก๊สชีวมวล



รูปที่ ค-1 เตาแก๊สชีวไฟเออร์แบบไหลลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

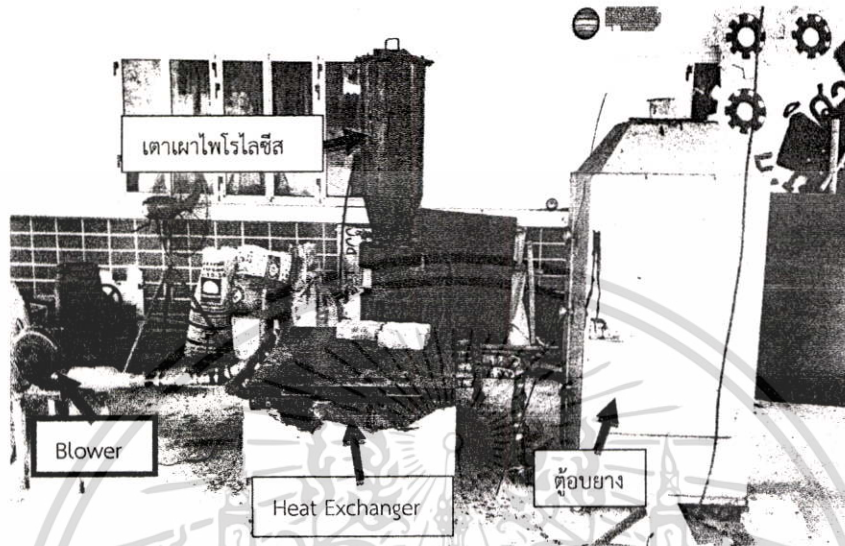


รูปที่ ค-2 ตำแหน่งการเดินทางของแก๊สชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

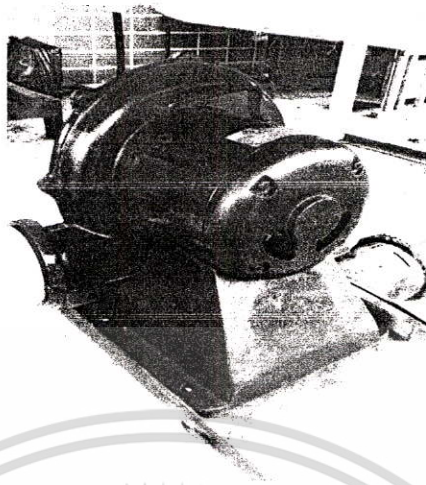


รูปที่ ง-1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการอบยางพาราแบบแผ่นด้วยเตาเผาชีวมวล เตาเผาไฟโรไลซิส Blower Heat Exchanger Thermocouple และตู้อบยางแผ่น



รูปที่ ง-2 การสร้างเตาเผาไฟโรไลซิส ออกแบบโดยเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง โดยคอคอดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ใช้เหล็กหนาขนาด 6 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นแบบคอคอดตรงและในส่วนของฮอปเปอร์มีขนาด 36 เซนติเมตร ใช้เหล็กหนาขนาด 3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

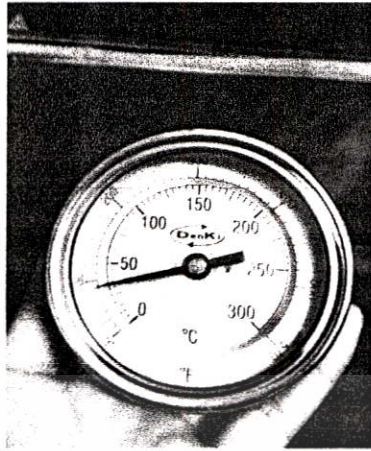


รูปที่ ง-3 Blower เป็นชุดเป่าลมร้อนจาก Heat Exchanger เข้าสู่ภายในตู้อบและเข้าสู่เตาเผาซีเมนต์มวลมีกำลัง 1/5 HP ขนาด 3 นิ้ว ความเร็วรอบ 3000 rpm



รูปที่ ง-4 Heat Exchanger ออกแบบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ขนาด 85x90 เซนติเมตร สูง 42 เซนติเมตร ใช้เหล็กแผ่นขนาด 3 มิลลิเมตร ภายในชุด Heat Exchanger จะเป็นท่อขด ขนาด 2 นิ้ว จำนวน 4 ขด เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเปลวไฟกับอากาศอุณหภูมิห้องที่ไหลภายในท่อขดโดยการเป่าของ Blower

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

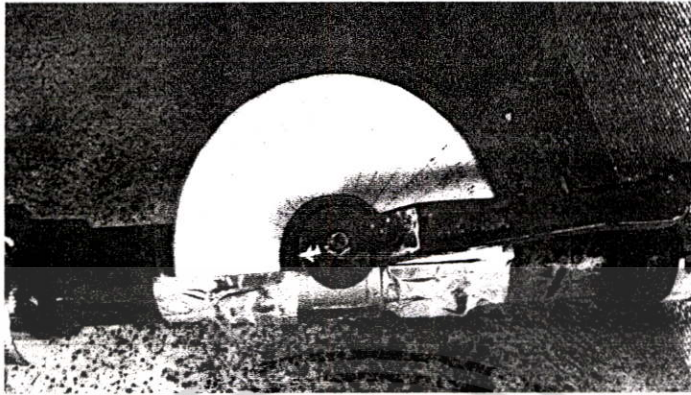


รูปที่ ง-5 Thermocouple เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในแต่ละจุดภายในตู้อบย่าง ยี่ห้อ DenKi type t



รูปที่ ง-6 Thermocouple เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาไฟโรไลซิส
ยี่ห้อ TM902C type k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-7 ชุดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้า
ชุด Heat Exchanger



รูปที่ ง-8 ตาชั่งดิจิตอลใช้ชั่งน้ำหนักยางพาราแบบแผ่นเพื่อหาค่าความชื้นที่หายไป สามารถชั่งได้สูงสุด
15 กิโลกรัม ต่ำสุด 40 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-9 ท่อกาาไนท์ล่ำเลียงแก๊สมีหน้าที่ส่งแก๊สร้อนที่ได้จากเตาเผาชีวมวลไปยังชุดHeat Exchanger เพื่อล่ำเลียงลมร้อนเข้าไปยังตู้อบยาง



รูปที่ ง-10 ตู้อบยาง โครงสร้างตู้อบยางสามารถบรรจุแผ่นดิบได้ประมาณ 5 แผ่น มีขนาดกว้าง×ยาว×สูง : 124×72×72 เซนติเมตร โดยมีลมร้อนทางด้านล่างและถูกระบายออกสู่ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เอกสารหลักฐานอ้างอิงของผลผลิต จากบทที่ 6

- บทความวิชาการเรื่อง: “ผลของขนาดชิ้นไม้ผืนยางพาราต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง” การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 1 จังหวัดชุมพร 19-21 พฤษภาคม 2559.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของขนาดชิ้นไม้ฝืนยาวพาราต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง

The effect of size of para wood pieces on the downdraft gasifier thermal efficiency

สมพงษ์ บางยี่ขัน^{1*}

Sompong Bangyeekhan

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของขนาดเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงโดยการเตรียมชิ้นไม้ทดสอบที่ควบคุม 3 ขนาดคือ ขนาดความยาว 45-65 มม. ขนาด 65-90 มม. และ 90-115 มม. ตามลำดับ และควบคุมความชื้นในชิ้นไม้ไม่เกิน 10.5 ± 1.5 % db และควบคุมพื้นที่หน้าตัดชิ้นไม้ขนาด $750 \text{ มม.}^2 \pm 50 \text{ มม.}^2$ แล้วนำชิ้นไม้มาชั่งน้ำหนักและนำมาเผาโดยการควบคุมอากาศที่ปริมาณ 8.9×10^{-3} เมตร³/วินาที ทำการทดสอบโดยการต้มน้ำในภาชนะเปิด ผลพบว่า ชิ้นไม้ทดสอบที่มีความยาว 45-65 มม. จะทำให้เตาแก๊สซีไฟเออร์ที่ใช้ทดสอบมีประสิทธิภาพสูงกว่าขนาดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากความต่อเนื่องของการไหลของเชื้อเพลิงในเตาเผา และพบว่าขนาดชิ้นไม้ทดสอบขนาดอื่นๆ มีการเผาไหม้ไม่ต่อเนื่องซึ่งเกิดการเกาะตัวของกองชิ้นไม้เชื้อเพลิงและปริมาตรอากาศภายในเตาซึ่งมีช่องว่างมากกว่าทำให้ประสิทธิภาพของเตาลดลง

คำสำคัญ: ขนาดชิ้นไม้ยาวพารา, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง

Abstract

This research wants to investigate in about the effect of para wood ship size to the downdraft gasifier thermal efficiency. In order to reduce the preparation work by controlling the size of three sizes of 45-65 mm in length, 65-90 mm. and 90-115 mm, respectively. This research control moisture content in wood not over $10.5 \pm 1.5\%$ db and cross area cutting size $750 \text{ mm}^2 \pm 50 \text{ mm}^2$ including air to burned by controlling air intake $8.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. The water Boiling Test (WBT) is method to calculate the efficiency. The results of these tests can show the highest efficiency in case of the shortest size of wood. This is due to the continuation of the flow of fuel in the furnace. Burning discrete adhesion of the fuel stack, making the thermal efficiency of the furnace is reduced.

Keyword: Effect of size pieces, Thermal efficiency, Downdraft gasifier

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร 86160 ประเทศไทย *อีเมล: knsompon@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumpon, Chumpon Province, Chumpon 86160, Thailand

1. บทนำ

เตาแก๊สซิฟิเคชัน เป็นเตาที่ทำให้ความร้อนสูงโดยใช้พลังงานจากชีวมวล นำมาเผาด้วยการจำกัดอากาศเพื่อให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะก่อให้เกิดแก๊สชีวมวล (Producer Gas) ซึ่งเตาแก๊สซิฟิเคชันมีด้วยกัน 4 ชนิดตามลักษณะกลไกการเผาไหม้ [1] ประกอบด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้น เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบตัดขวาง และเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไดเบด เตาแบบไหลขึ้นนั้นจะมีปริมาณน้ำมันทาร์ (Tar) มาก เตาแบบไหลลงจะมีปริมาณน้ำมันทาร์น้อยกว่า เตาแบบไหลตัดขวางจะเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำ เตาแบบฟลูอิดไดเบดเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก [2] เตาแก๊สซิฟิเคชัน ได้เป็นส่วนหนึ่งของการผลิตพลังงานทดแทน โดยการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงทำให้เกิดงานวิจัยในหลาย ๆ สถาบัน เกี่ยวกับการพัฒนาและออกแบบสร้างเตาผลิตแก๊สชีวมวล รูปแบบการใช้งาน ลักษณะเตาผลิตชีวมวล และวัสดุที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น [3] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเตาแบบไหลลงจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันทาร์น้อย [4] ทั้งนี้ถ้ากระบวนการเผาไหม้มีปริมาณน้ำมันทาร์มากจะทำให้เกิดการเกาะติดตามผนังของเตาและเข้าไปอุดตันรังผึ้งที่บริเวณโซนเผาไหม้ทำให้ปิดกั้นการไหลของถ่าน และแก๊สเชื้อเพลิงทำให้เกิดแก๊สน้อย อีกทั้งการเกาะติดของน้ำมันทาร์ก็เป็นสิ่งที่ยากในการกำจัดด้วย ด้วยปัจจุบันพบว่าราคายางพาราตกต่ำทำให้มีเกษตรกรจำนวนไม่น้อยได้ตัดโค่นไม้ยางเพื่อปลูกพืชชนิดอื่นทดแทน ทำให้ไม้ยางพารามีราคาถูกลงเหมาะแก่การนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล แต่จากการสืบค้นเอกสาร [5] พบว่าขนาดของไม้เชื้อเพลิงเป็นปัจจัยหลักข้อหนึ่งที่มีผลต่อเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของชิ้นไม้เชื้อเพลิง (ไม้ยางพารา) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง และเป็นที่น่าสนใจว่าขนาดของชิ้นไม้เชื้อเพลิงในแต่ละขนาดจะมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเคชันอย่างไร

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อุปกรณ์และวิธีการ

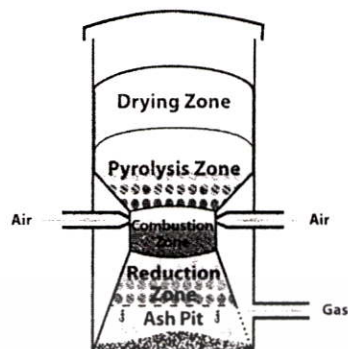
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Biomass Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical Reaction) เชื้อเพลิงแก๊สดังกล่าวนี้นี้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าวก็คือ สภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือเป็นสภาวะที่มีการจำกัดอากาศหรือออกซิเจนเพื่อการเผาไหม้ เพราะถ้าหากมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอแล้วจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทันที (Combustion) และจะทำให้กระบวนการเผาไหม้มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ซึ่งไม่ติดไฟออกมา ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซนดังแสดงในรูปที่ 1 โดยโซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Downdraft Gasifier

Nozzle and construction (Imbert)



รูปที่ 1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [6]

Combustion Zone (โซนเผาไหม้) เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลถูกความร้อนจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังสมการที่ (1) ถึง (2)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (1) และ (2) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนในโซน Reduction และ โซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซนเผาไหม้จะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500 °C

Reduction Zone (โซนปฏิกิริยาหรือโซนผลิตแก๊ส) แก๊สร้อนที่ผ่านมาจากโซนเผาไหม้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาผลิตแก๊สในโซนนี้จะมีอุณหภูมิ 500-900 °C ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านถ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (3) ถึง (7)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (3) เรียกว่า Boundouard Reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (4) เรียกว่า Water Gas Reduction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีวมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณมากของเชื้อเพลิงชีวมวลนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลที่ใช้จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้ออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลมีค่าต่ำ

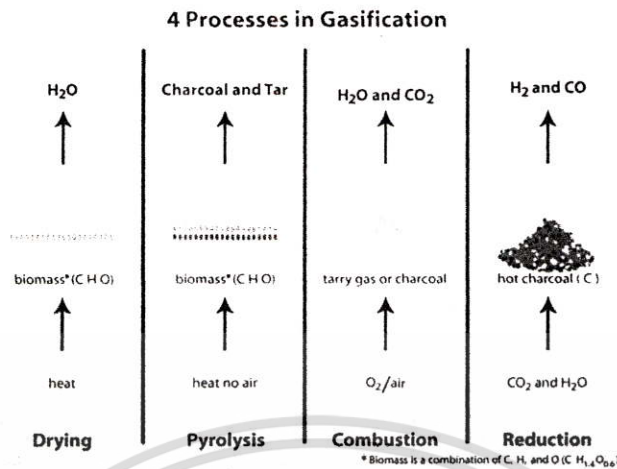
แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในโซน Reduction สูงกว่า 900 °C แล้ว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO₂) และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซน Reduction ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิด แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (5) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีวมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิด คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (6) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากจนเกินไป

นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production

Pyrolysis หรือ Distillation Zone ได้รับความร้อนจากโซน Reduction ทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (8)



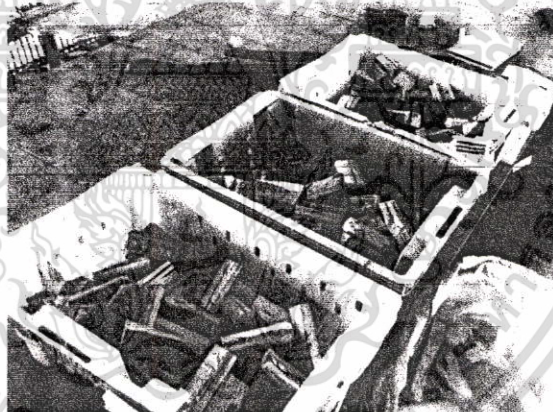
Drying Zone ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากท าให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C [7] ซึ่งกระบวนการทั้ง 4 ขั้นตอนสามารถแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการทั้ง 4 ขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [6]

2.2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.2.1) ขนาดชิ้นไม้ทดสอบ ประกอบด้วยไม้ยางพาราตากแดดให้มีความชื้นฐานแห้ง $10.5 \pm 1.5 \%$ ตัดให้ได้ขนาด ความยาว 45-65 มม. 65-90 มม. และ 90-115 มม. ตามลำดับ หน้าตัดชิ้นไม้ทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูพื้นที่หน้าตัด $750 \text{ mm}^2 \pm 50 \text{ mm}^2$ ทั้ง 3 ความยาว ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัดไม้ทดสอบโดยการควบคุมความชื้นและขนาดของไม้ทดสอบ ทั้ง 3 ขนาด

2.2.2) ปริมาณการเติมไม้เชื้อเพลิงครั้งละ 3 กิโลกรัม

2.2.3) ปรับอากาศเข้าเตาในจุด Combustion Zone $8.92 \text{ m}^3/\text{วินาที}$

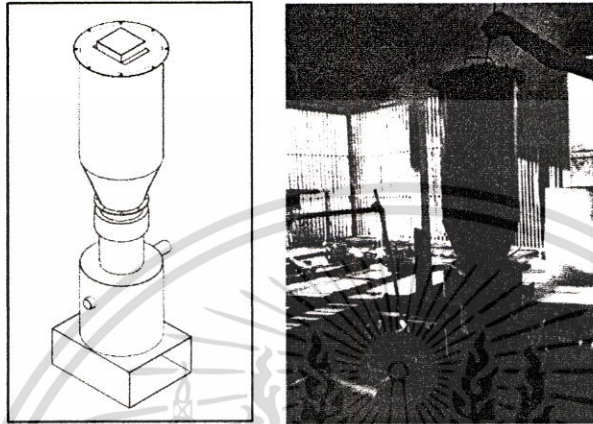
2.2.4) เตาแก๊สซิฟิเคชันทดสอบเป็นเตาแบบไม่มีคอคอดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเตา 20

ซม. ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 4

ตารางที่ 1 รายละเอียดทั่วไปของเตาซิฟิเคชันแบบไหลลงที่ทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ลำดับ	รายละเอียด	ขนาด
1	ความสูงของเตา	170 ซม.
2	เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน	20 ซม.
3	เส้นผ่าศูนย์กลางของตะแกรง	20 ซม. (ไม่มีคอคอด)
4	ตำแหน่งความสูงของตะแกรงจากก้นถึง	30 ซม.

5	ช่องซี้ไถ้	20 ซม. x 40 ซม. x 50 ซม.
6	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ปล่องก้าซอก)	5 ซม.
7	ความจุของถังเชื้อเพลิง	0.04715 m ³
8	เส้นผ่าศูนย์กลางถังเชื้อเพลิง	38 ซม.



รูปที่ 4 รูปเตาแก๊สซีพีเคชั่นที่ทำการทดสอบ

2.2.4) ภาชนะบรรจุน้ำ (กะละมังก้นลึก) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ก้นลึก 10 ซม.

2.2.5) เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01g, 2.2.6) นาฬิกาจับเวลา, 2.2.7) เทอร์

โมคป์เปลชนิด K, 2.2.8) เครื่องวัดความชื้นวัสดุ รุ่น MD014, 2.2.10) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดสาย

วิธีการทดสอบ

ตอนที่ 1 เตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. การทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเชื้อเพลิง โดยนำชิ้นไม้ทดสอบมาตรวจสอบหาค่าความชื้นในชิ้นไม้ด้วยเครื่องวัดความชื้นวัสดุ โดยทำการวัดชิ้นไม้ทดสอบทั้ง 3 ขนาดความยาวและทำการตรวจสอบชิ้นไม้ทุกชิ้นดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ทดสอบชิ้นไม้ตัวอย่างโดยการควบคุมความชื้นไม่เกิน 10.5 ± 1.5

2. เลือกชิ้นงานที่มีความชื้นไม่เกิน $10.5 \pm 1.5\%$ db เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเตา
3. วัดขนาดชิ้นไม้กำหนดหน้าตัดชิ้นไม้เป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน พื้นที่หน้าตัด $750 \text{ mm}^2 \pm 50 \text{ mm}^2$ ทั้ง 3 ความยาวของชิ้นไม้ทดสอบดังตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{ther} = \frac{m_{wi} C_{pw} (T_c - T_i) + m_{i, evap} H_i}{m_f H_f}$$

เมื่อ η_{ther} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%), m_{wi} คือ มวลของน้ำเริ่มต้น (kg)

C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.°C) [4.186 kJ/kg.K], T_c คือ อุณหภูมิที่น้ำเดือด (°C)

T_i คือ อุณหภูมิที่น้ำเริ่มต้น (°C), $m_{i, evap}$ คือ มวลน้ำที่ระเหย (kg), H_i คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg) [2,260kJ/kg], m_f คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg), H_f คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

พบว่าค่าประสิทธิภาพความร้อนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3 ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาขนาดชั้นไม้ทดสอบ ความยาว 45-65 มม.

ขนาดความยาว ชั้นไม้ ทดสอบ	จำนวน ครั้ง ทดสอบ	อุณหภูมิ น้ำเดือด (°C)	อุณหภูมิ น้ำเริ่มต้น (°C)	น้ำหนักน้ำ ที่ระเหย ออก (kg)	เวลาที่ทำการ เผาไหม้จนน้ำ เดือด (min)	อัตราการเผา เชื้อเพลิง (kg)	η_{ther}
45-65 มม.	1	89.2	30.2	97	11	0.026460257	2.646
	2	95.5	29	36.74	13	0.01667468	1.667
	3	95.9	30	205	19	0.024909977	2.491
	4	97	31.7	22	17	0.011251595	1.125
						AVG	1.982

ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงที่ขนาดความยาว 45-65 มม. นั้นมีค่าประมาณ 1.98 ซึ่งมากที่สุดในการทดสอบชั้นไม้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ขนาด ในระหว่างการทดลองพบว่าผู้ทดลองไม่จำเป็นต้องทำการเขี่ยถ่านในเตา ทำให้สามารถทดลองต้มน้ำได้จนเดือดอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4 ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาขนาดชั้นไม้ทดสอบ ความยาว 65-90 มม.

ขนาดความยาว ชั้นไม้ ทดสอบ	จำนวน ครั้ง ทดสอบ	อุณหภูมิ น้ำเดือด (°C)	อุณหภูมิ น้ำเริ่มต้น (°C)	น้ำหนักน้ำ ที่ระเหย ออก (kg)	เวลาที่ทำการ เผาไหม้จนน้ำ เดือด (min)	อัตราการเผา เชื้อเพลิง (kg)	η_{ther}
65-90 มม.	1	92.4	31.2	124	33	0.010235	1.024
	2	95	30.4	64	17	0.01494	1.494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3 เกิดความเสียหายไม่สามารถวัดค่าได้	AVG	1.259
--	-----	-------

ในระหว่างการทดสอบพบว่าเมื่อทำการทดสอบต่อเนื่อง มักจะพบปัญหาการก้องกันของเชื้อเพลิงในถังบรรจุทำให้แก๊สเชื้อเพลิงออกได้น้อยจำเป็นต้องทำการสลายก้องเชื้อเพลิงด้วยการเขี่ยกระจายออก ส่งผลให้การเดือดของน้ำเกิดการล่าช้ากว่าเชื้อเพลิงที่มีขนาด 45-65 มม. โดยเชื้อเพลิงขนาด 65-90 มม. สามารถทำให้เตาแก๊สซิฟเคชั่นที่ใช้ในการทดสอบมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยที่ 1.259 %

ตารางที่ 5 ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาขนาดขึ้นไม้ทดสอบ ความยาว 90-115 มม.

ขนาดความยาว ขึ้นไม้ ทดสอบ	จำนวน ครั้ง ทดสอบ	อุณหภูมิ น้ำเดือด (°C)	อุณหภูมิ น้ำเริ่มต้น (°C)	น้ำหนักน้ำ ที่ระเหย ออก (kg)	เวลาที่ทำการ เผาไหม้จนน้ำ เดือด (min)	อัตราการเผา เชื้อเชื้อเพลิง (kg)	η_{ther}
90-115 มม.	1	95	30.4	63	18	0.014025	1.402
	2	95	30.4	69	26	0.010063	1.006
ครั้งที่ 3 เกิดความเสียหายไม่สามารถวัดค่าได้						AVG	1.204

เชื้อเพลิงขนาด 90-115 มม. สามารถทำให้เตาแก๊สซิฟเคชั่นที่ใช้ในการทดสอบมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยที่ 1.204 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าประสิทธิภาพของความร้อนของเตาที่ใช้ไม้เชื้อเพลิงความยาว 65-90 มม. ทั้งนี้เนื่องจากการเขี่ยกระจายเชื้อเพลิงในเตาของการทดสอบขึ้นไม้ที่ความยาว 90-115 มม.

5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสอแนะ

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟเคชั่นขนาดเล็กพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาโดยการทดสอบเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นไม้เชื้อเพลิงเป็นขนาด 45-65 มม.พบว่ามีความมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากที่สุดที่ โดยมีประสิทธิภาพมากกว่าขนาดขึ้นไม้ที่ความยาว 65-90 มม. ถึง 57% และมีความมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากกว่าขนาดขึ้นไม้ที่ความยาว 90-115 มม. ถึง 64% ในขณะที่ขึ้นงานที่ความยาว 65-90 มม. จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีกว่าขนาดขึ้นไม้ทดสอบที่ความยาว 90-115 มม. เพียงแค่ 5% เท่านั้น การติดขัดของตัวขึ้นเชื้อเพลิงกับเตาก็พบว่าเมื่อทำการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงลดลง กล่าวคือเมื่อทำการเผาไปได้ 10 นาที ในกรณีของขึ้นงานทดสอบ 65-90 มม.จะพบว่ามีการค้างของตัวเชื้อเพลิงในถังบรรจุเชื้อเพลิง และต้องใช้อุปกรณ์เหล็กเส้นในการกระทุ้งในขึ้นไม้เชื้อเพลิงได้ไหลลง ทุก ๆ 2-3 นาที จนกว่าน้ำที่ต้มจะเดือด ซึ่งจะต้องกระทุ้งเศษขึ้นไม้เชื้อเพลิงนี้กว่า 5 ครั้ง ในขณะที่ขึ้นงานทดสอบ 90-115 มม.จะพบว่ามีการค้างของตัวเชื้อเพลิงในถังบรรจุเชื้อเพลิง และต้องใช้อุปกรณ์เหล็กเส้นในการกระทุ้งในขึ้นไม้เชื้อเพลิงได้ไหลลง ทุก ๆ 2-3 นาที จนกว่าน้ำที่ต้มจะเดือดเช่นกันแต่จะต้องกระทุ้งเศษขึ้นไม้เชื้อเพลิงนี้กว่า 6 ครั้งซึ่งต้องเสียเวลากระทุ้งเศษไม้มากกว่า แต่เหตุการณ์การติดของเศษขึ้นเชื้อเพลิงดังกล่าวไม่พบว่าจะเกิดขึ้นในกรณีขึ้นไม้ที่มีขนาด 45-65 ซม. ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลายๆงานที่ผ่านมาพบว่า [5,8-9] ขนาดของขึ้นไม้มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากงานวิจัยนี้ยังพบว่า ความสามารถในการขยายขนาดขึ้นไม้เชื้อเพลิงได้สูงสุดคือประมาณ 15 มม. จากเดิมมีงานวิจัยเสนอให้ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานขึ้นไม้เชื้อเพลิงที่ 50 มม. [8] ทั้งนี้การขยายขนาดดังกล่าวจะช่วยให้ลดเวลาในการเตรียมชิ้นงานไม้เชื้อเพลิงลงได้ จากเดิมไม้พื้นตัดมาตรฐานที่ 1.05 เมตร ซึ่งเมื่อต้องตัดทำไม้เชื้อเพลิงที่ความยาว 50 มม. จะต้องตัด 21 ครั้ง แต่เมื่อขยายให้เพิ่มตัดความยาวไม้เป็น 65 มม. จะต้องเสียเวลาในการตัดชิ้นไม้เพียง 16 ครั้งเท่านั้น ซึ่งลดเวลาทำงานลงไปกว่า 23.8% ทำให้ทำงานได้เร็วขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ และขอขอบคุณนักศึกษาที่ให้ความช่วยเหลือทดสอบเตา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] FAO (1986). Wood gas as engine fuel. Food and agriculture organization of the United Nations. 72
- [2] Reed, B. T. and (1998). Hand book of biomass downdraft gasifier engine system. The Biomass Energy Foundation press, Golden Colorado.
- [3] ภาณุพงษ์ ตันดีตันย์และ ณัฐวิทย์ พรหมมา. (2014). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีพีเออร์โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, จังหวัดขอนแก่น.
- [4] file:///C:/Users/Windows7/Downloads/Wood_Content%20(1).pdf, รายงานเทคโนโลยีการผลิตพลังงาน/เชื้อเพลิงจากเศษไม้ โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์. Cited 6/4/2016.
- [5] Jayah, T. H. et al. (2003). Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. Biomass and Bioenergy. 25: 459-469.
- [6] <http://www.allpowerlabs.com/wp-content/gallery/gasification-grapics/downdraft.jpg>, Cited 6/4/2016.
- [7] <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/2012371435251.pdf>, รายงานผลการดำเนินโครงการหมู่บ้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: โรงไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับชุมชน. Cited 6/4/2016.
- [8] Bhattacharya, S.C. et al. (2002). Effect of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. Biomass and Bioenergy. 23: 387-395.
- [9] ภาณุพงษ์ หมั่นชิต. (2014). การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลชนิดไหลลง, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 3, จังหวัดภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้ แหล่ง

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาชุดเตาอบยางพาราไรต์แผ่นด้วยลมร้อนจากเตาแก๊สซีพีเออร์
 (ภาษาอังกฤษ) Development of the rubber sheet dryer by hot air from Gasifier

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) อ.ดร.สมพงศ์ บางยี่ขัน

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม / 2557 ถึงวันที่ 30/ กันยายน / 2558

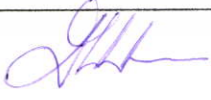
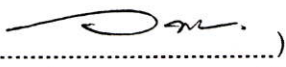
ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดเดียว 70,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 1/ตุลาคม/2557

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	60,000	60,000	-
ค่าวัสดุ	9,500	9,500	-
ค่าสาธารณูปโภค	500	500	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	70,000	70,000	

 (สมพงศ์ บางยี่ขัน) ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน <u>29/กันยายน/2558</u>	 (.....) ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง <u> / / </u>
--	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล สมพงศ์บางยี่ขัน

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
ป.ร.ด.	วิศวกรรมเครื่องกล	ม.สงขลานครินทร์	2555
ค.อ.ม.	เทคโนโลยีเครื่องกล	ส.พระจอมเกล้า พระนครเหนือ	2546
ค.อ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	ส.พระจอมเกล้า พระนครเหนือ	2540

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ จำลองแบบคอมพิวเตอร์ พลังงานทดแทน

ชื่อ-สกุล วรราชชล วัฒนะ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
ว.ศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	ส.พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	2547
ว.ศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	ม.ศรีนครินทร์วิโรฒ ประสานมิตร	2542

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ เชื้อเพลิงชีวมวล พลังงานทดแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้