



การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์  
ด้วยกระบวนการทอริฟิเคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อม  
AN OPTIMUM CONDITIONS STUDY OF TORREFIED BIOMASS PRODUCTION  
BY INCLINED SCREW TORREFACTION PROCESS USING INDIRECT HEAT

ณัฐนนท์ วิมลสุตม์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์  
ด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อม



ณัฐนนท์ วิมลสุตร์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

AN OPTIMUM CONDITIONS STUDY OF TORREFIED BIOMASS PRODUCTION  
BY INCLINED SCREW TORREFACTION PROCESS USING INDIRECT HEAT



NATTANON VIMOLSUTR

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING  
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟด์  
ด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อม

ของ

ณัฐนนท์ วิมลสุตร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ..... ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน) (รองศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์ ด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อม
ผู้วิจัย	ณัฐนันท์ วิมลสุตว์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมาส แก้วล้วน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้กระบวนการทอรรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียง หัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ใช้ในการสร้างแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส ไปยังกระบวนการทอรรีแฟคชั่นในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงนำ Torrgas มาใช้แทนแก๊สปิโตรเลียมเหลว ทั้งชีวมวลอัดเม็ดและไม้สับถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตชีวมวลทอรรีไฟต์เป็นผลิตภัณฑ์หลักและ Torrgas เป็นผลพลอยได้ ชีวมวลอัดเม็ดถูกบ้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์ที่สองระดับคือ 17.5 และ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่ไม้สับถูกบ้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์ที่อัตราค่าที่ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในการทดลองเวลาในการทำปฏิกิริยาที่วัตถุดิบให้ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ถูกปรับจาก 16, 20, 24, 28 และ 32 นาที เพื่อหาเงื่อนไขในการผลิตชีวมวลทอรรีไฟต์คุณภาพดี จากผลที่ได้รับพบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ชีวมวลและพลังงาน ค่าความร้อนของชีวมวลทอรรีไฟต์เพิ่มขึ้นตามเวลาการทำปฏิกิริยา ที่อัตราการบ้อนเม็ดชีวมวล 17.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและเวลาสัมผัสความร้อน 24 นาทีที่ผลิตภัณฑ์ชีวมวลแบบทอรรีไฟต์มีค่าความร้อน 23.31 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ผลได้เชิงมวล 61 เปอร์เซ็นต์และผลได้เชิงพลังงาน 87.77 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการบ้อนเม็ดชีวมวล 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและเวลาในการสัมผัสความร้อนที่ 32 นาทีชีวมวลทอรรีไฟต์มีค่าความร้อน 23.65 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ผลได้เชิงมวล 52.62 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงาน 76.82 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการบ้อนไม้สับ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและเวลาในการรับความร้อนของไม้สับคือ 32 นาที ไม้สับทอรรีไฟต์มีค่าความร้อน 24.03 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ผลได้เชิงมวล 51.58 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงาน 76.50 เปอร์เซ็นต์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของ Torrgas แห่ง เมื่อวัตถุดิบคือชีวมวลอัดเม็ดและไม้สับพบว่า Torrgas มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 6.84-10.05 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ในช่วงระยะเวลาดำเนินการปริมาณของ Torrgas เพียงพอที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสร้างแหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการทำปฏิกิริยา เมื่อทำการอัดผลิตภัณฑ์ไม้สับทอรรีไฟต์ให้เป็นชีวมวลทอรรีไฟต์อัดเม็ดพบว่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นจาก 338 เป็น 680 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและความหนาแน่นเชิงพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 4.86 เป็น 16.34 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ : ชีวมวลอัดเม็ด, ไม้สับ, ชีวมวลทอรรีไฟต์, ทอรรีแก๊ส, ทอรรีไฟต์รีแอกเตอร์

Title	AN OPTIMUM CONDITIONS STUDY OF TORREFIED BIOMASS PRODUCTION BY INCLINED SCREW TORREFACTION PROCESS USING INDIRECT HEAT
Author	NATTANON VIMOLSUTR
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sommas Kaewluan

The objective of this research is to improve the properties of biomass fuel by using the inclined screw torrefaction process. An LPG burner was used to generate heat source with temperature about 600-700 degree Celsius to the torrefaction process during start up period. After that, Torrgas was used to replace the LPG. Both biomass pellets and wood chips were used as raw materials for producing torrefied biomass as product and Torrgas as a by-product. Biomass pellets were fed into the torrefied reactor at two levels: 17.5 and 20 kilograms per hour while wood chips were fed at 10 kilograms per hour. In the experiment, torrefaction times at which the raw material was heated in the reactor were adjusted from 16, 20, 24, 28 to 32 minutes to find conditions for producing good quality torrefied biomass. The results revealed that the torrefaction time affected the torrefied biomass product and energy properties. The calorific value of torrefied biomass was increased with torrefaction time. At the biomass pellet feed rate of 17.5 kilograms per hour and heat exposure time of 24 minutes, torrefied biomass product had a calorific value of 23.31 megajoules per kilogram, the mass yield of 61% and an energy yield of 87.77%. At the biomass pellet feed rate of 20 kilograms per hour and heat exposure time at 32 minutes, torrefied biomass had a heat value of 23.65 megajoules per kilogram, mass yield of 52.62% and energy yield of 76.82%. At a wood chip feed rate of 10 kilograms per hour and a heat exposure time of 32 minutes, the torrefied wood chips had the heat value of 24.03 megajoules per kilogram, mass yield of 51.58% and energy yield of 76.50%. From the analysis of the composition of dry Torrgas, it was found to have the calorific value in the range of 6.84-10.05 megajoules per normal cubic meter and during the running period, the amount of Torrgas is sufficient to use as fuel to generate heat source. When pelletizing of torrefied wood chips to torrefied pellets, it was found that the bulk density was increased from 338 to 680 kilograms per cubic meter and bulk energy density was increased from 4.86 to 16.34 gigajoules per cubic meter.

Keyword : Biomass pellet, Wood chips, Torrefied biomass, Torrgas, Torrefied reactor

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2561 เลขที่ 227/2561 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่เอื้อเพื่ออาคารปฏิบัติการโรงงานต้นแบบ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่าง ๆ ระหว่างจัดทำงานวิจัยนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาบัตรฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากก็น้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากปริญญาบัตรนี้ขอมอบให้กับ ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

ณัฐนนท์ วิมลสุตว์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญรูปภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย .....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย .....	3
ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	12
ชีวมวล .....	12
เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	13
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน .....	13
กระบวนการทอรีไฟเคชัน.....	14
การดำเนินการขั้นพื้นฐานของกระบวนการทอรีไฟเคชัน .....	16
ความร้อนและการอบแห้ง.....	17
การสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolytic decomposition) .....	17
การแปรสภาพเป็นแก๊ส.....	18
การเกิดแก๊สโดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์.....	19

ทฤษฎีการเผาไหม้.....	19
ค่าความร้อน.....	19
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	22
อุปกรณ์ทดลอง.....	22
เครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่นแบบสกรูเอียงและชุดอุปกรณ์ประกอบ.....	22
ชุดลำเลียงชีวมวล.....	23
เครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่นแบบสกรูเอียง.....	24
ชุดระบายความร้อนและถังเก็บชีวมวลทอริไฟด์.....	26
วิธีการทดลอง.....	27
ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	29
เงื่อนไขการทดลอง.....	30
การวิเคราะห์ผลผลิต.....	33
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	35
ผลการทดลองที่ 1.....	35
ผลการทดลองที่ 2.....	40
ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากการทดลองของชีวมวลอัดเม็ด.....	41
ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 1.....	41
ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 2.....	42
ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 3.....	43
ผลการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับชีวมวลอัดเม็ด.....	44
ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 1.....	44
ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 2.....	45
ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 3.....	46

การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชั่นของการทดลองที่ 2 .....	47
การวิเคราะห์ค่า Mass Yield และ Energy Yield ของการทดลองที่ 2 .....	49
ผลการทดสอบหาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของชีวมวลอัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรีไฟด์ .....	52
ผลการทดลองที่ 3 .....	55
ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากการทดลองของไม้สับ .....	55
ผลการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับไม้สับ .....	56
การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชั่นของที่ทดลองที่ 3 .....	58
การหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรและพลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดทอรีไฟด์และไม้สับทอรีไฟด์อัดเม็ด .....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	63
สรุปผลการทดลอง .....	63
ข้อเสนอแนะ .....	64
บรรณานุกรม .....	66
ภาคผนวก .....	68
ภาคผนวก ก .....	69
ส่วนประกอบเตาปฏิกรณ์ .....	69
ภาคผนวก ข .....	74
ตัวอย่างการคำนวณ .....	74
ภาคผนวก ค .....	80
ตารางบันทึกผลการวัดอุณหภูมิและผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสีย .....	80
ภาคผนวก ง .....	92
รายการสัญลักษณ์ .....	92
ภาคผนวก จ .....	94

ผลงานตีพิมพ์.....	94
ภาคผนวก ฉ .....	105
ผลการวิเคราะห์ชีวมวลอัดเม็ดและทอริไฟด์.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	110



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น.....	15
ภาพประกอบ 2 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น .....	15
ภาพประกอบ 3 ขั้นตอนการเกิดออกซิเดชั่น .....	16
ภาพประกอบ 4 การวิเคราะห์ปริมาณสารในเนื้อไม้โดยใช้ความร้อน .....	17
ภาพประกอบ 5 การสลายตัวด้วยความร้อนของลิกโนเซลลูโลสและเนื้อไม้ .....	18
ภาพประกอบ 6 เครื่องปฏิกรณ์ทอรีรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงพร้อมชุดอุปกรณ์ประกอบ.....	23
ภาพประกอบ 7 ชุดลำเลียงชีวมวล .....	24
ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงร้อยละของการบ้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์และระดับความหนาของวัสดุในท่อลำเลียง.....	25
ภาพประกอบ 9 เครื่องปฏิกรณ์.....	26
ภาพประกอบ 10 ชุดระบายความร้อนและถังเก็บชีวมวลทอรีรีไฟด์ .....	27
ภาพประกอบ 11 ทิศทางการไหลของชีวมวล.....	28
ภาพประกอบ 12 ทิศการไหลของอากาศร้อน.....	29
ภาพประกอบ 13 แสดงตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 6.....	30
ภาพประกอบ 14 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ทอรีรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงในการทดลองที่ 1 .....	31
ภาพประกอบ 15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ทอรีรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงในการทดลองที่ 2 และ 3.....	32
ภาพประกอบ 16 ผลได้เชิงมวลจากเครื่องทอรีรีไฟด์แบบสกรูเอียงที่อัตราการบ้อนชีวมวลอัดเม็ด 17.5 kg/h และเวลาที่วัสดุรับความร้อนที่ 3 ช่วงเวลาคือ 16 นาที 20 นาที และ 24 นาที.....	36
ภาพประกอบ 17 ชีวมวลอัดเม็ดทอรีรีไฟด์แบ่งตามลักษณะสี .....	37
ภาพประกอบ 18 สัดส่วนของเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์แบ่งตามลักษณะสี .....	37

ภาพประกอบ 19 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ทั้งสามลักษณะสี .....	38
ภาพประกอบ 20 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ.....	39
ภาพประกอบ 21 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด .....	39
ภาพประกอบ 22 ค่าความร้อนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ และผลได้เชิงพลังงาน .....	40
ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงผลการวัดจากคุณสมบัติของการทดลองเงื่อนไขที่ 1 .....	42
ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงผลการวัดจากคุณสมบัติของการทดลองเงื่อนไขที่ 2 .....	43
ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงผลการวัดจากคุณสมบัติของการทดลองเงื่อนไขที่ 1 .....	44
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงระดับคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 1.....	45
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงระดับคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองเงื่อนไขที่ 2.....	46
ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงระดับคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองเงื่อนไขที่ 3.....	47
ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงการวิเคราะห์แก๊สของทอร์แก๊สแห่งที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ .....	48
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงค่าความร้อนของทอร์แก๊สแห่งที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ.....	48
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงแสดงอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ .....	49
ภาพประกอบ 32 ผลได้เชิงมวลของแต่เงื่อนไขในการทดลองที่ 2.....	50
ภาพประกอบ 33 สัดส่วนของเชื้อเพลิงทอริไฟต์แบ่งตามลักษณะสี.....	50
ภาพประกอบ 34 ผลได้เชิงมวล,ผลได้เชิงพลังงานและค่าความร้อนเฉลี่ยของการทดลองที่ 2.....	51
ภาพประกอบ 35 ผลได้เชิงพลังงานของแต่เงื่อนไขในการทดลองที่ 2.....	52
ภาพประกอบ 36 สีของชีวมวลและทอริไฟต์ .....	53
ภาพประกอบ 37 ตัวอย่างทดลองที่ 1 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้.....	53
ภาพประกอบ 38 ตัวอย่างทดลองที่ 2 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้.....	54

ภาพประกอบ 39 ตัวอย่างทดลองที่ 3 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้.....	54
ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างทดลองที่ 4 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้.....	55
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงผลการวัดจากอุณหภูมิของการทดลองเงื่อนไขที่ 4 .....	56
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองเงื่อนไขที่ 4 .....	57
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากของ เงื่อนไขที่ 3 ในการทดลองที่ 2 กับ การทดลองที่ 3.....	58
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงการวิเคราะห์แก๊สของเทอร์แก๊สแห่งที่ใช้ไม้สับเป็นวัสดุ .....	59
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงค่าความร้อนของเทอร์แก๊สแห่งที่ใช้ไม้สับเป็นวัสดุ .....	59
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงแสดงอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ไม้สับเป็นวัสดุ .....	60
ภาพประกอบ 47 การแปรรูปจากไม้สับทอริไฟด์เป็นไม้สับทอริไฟด์อัดเม็ดโดยเครื่องอัดเม็ด ...	61
ภาพประกอบ 48 ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์และไม้ สับทอริไฟด์อัดเม็ด.....	61
ภาพประกอบ 49 พลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์ และไม้สับทอริไฟด์อัดเม็ด .....	62

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกในปัจจุบันให้ความสนใจกับผลกระทบที่มีต่อธรรมชาติและมลภาวะต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและหันมาสนใจการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนเนื่องจาก เป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งเพราะเป็นทรัพยากรที่ใช้ประโยชน์ได้ไม่สิ้นสุด (Tumuluru, Wright, Kenny, & Hess, 2011) เชื้อเพลิงหมุนเวียนมีหลาย ๆ รูปแบบที่สามารถนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ ตัวอย่าง เช่น เชื้อเพลิงแข็ง (ชีวมวลอัดแท่ง, ชีวมวลอัดเม็ด) เชื้อเพลิงเหลว (เอทานอลไบโอดีเซล) และเชื้อเพลิงก๊าซ (ก๊าซชีวภาพ) (Crnogaca, 2017) โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้ใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับผลิตไฟฟ้าให้ความร้อนแก่กระบวนการในอุตสาหกรรม เป็นต้น จากสถิติความต้องการในการใช้พลังงานหลักของโลก ในปี ค.ศ. 2008 ได้คาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2035 จะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 53% (Crnogaca, 2017) ในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลค่อย ๆ หมดไป แต่ความต้องการใช้เชื้อเพลิงกลับมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การให้การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมาเป็นพลังงานทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จึงเป็นทางเลือกที่ดีอย่างหนึ่ง เพราะเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวลเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ซึ่งมันคือผลผลิตที่ได้จากพืชและสัตว์ที่ถูกมองข้าม เช่น แกลบ ชานอ้อย ชี้อ้อย กากปาล์ม ชังข้าวโพด หญ้าเนเปียร์ รวมไปถึงมูลสัตว์ โดยสิ่งเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้

ในเขตพื้นที่จังหวัดนครนายก และจังหวัดใกล้เคียงมีเกษตรกรจำนวนมากที่ปลูกไม้ผล เช่น มะยงชิด มะม่วง ส้มโอ กระท้อน มะปรางหวาน ทุเรียน มังคุด ฯลฯ และพบปัญหาหลังจากเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตซึ่งจะมีวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรซึ่งประกอบด้วย กิ่งไม้และท่อนไม้ที่เกิดจากการตัดแต่งกิ่ง เป็นต้น ดังนั้นหากนำเศษไม้ดังกล่าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นแนวทางที่ช่วยลดปัญหาขยะจากเศษวัสดุทางการเกษตรที่หลงเหลือจากกระบวนการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ด้วยแต่ละชนิดของชีวมวลจะมีลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการนำวัสดุชีวมวลไปใช้ประโยชน์ เช่น ขนาด รูปร่าง ค่าความร้อน ความชื้น ความหนาแน่น ปริมาณซีเถ้า เป็นต้น การปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลขั้นต้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการนำวัสดุชีวมวลมาทำเป็นชีวมวลอัดเม็ด (biomass pellets) หรือชีวมวลอัดแท่ง (biomass briquette) เพื่อเพิ่มโอกาสให้

ชีวมวลสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้มากขึ้น แต่การทำชีวมวลให้อยู่ในรูปชีวมวลอัดเม็ด หรืออัดแท่งก็ยังมีข้อด้อยในด้านค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของเชื้อเพลิงและสภาวะความชื้น ในการเก็บรักษา จึงทำให้การนำชีวมวลอัดเม็ดหรืออัดแท่งไปใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลยังทำได้ไม่ดีนัก อย่างไรก็ตามยังมีกระบวนการที่สามารถแก้ปัญหาและปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลนี้ได้ โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านค่าความร้อนและพลังงานต่อหน่วยมวล นั่นก็คือการทำทอริรีไฟต์ชีวมวลโดยกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าระหว่าง 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส หรือเรียกว่ากระบวนการทอริรีแฟคชัน (Torrefaction) เปลี่ยนสมบัติของชีวมวลดั้งเดิมเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพที่ดีขึ้นสำหรับการใช้งานในการเผาไหม้และการทำให้เป็นแก๊ส การทอริรีแฟคชันนำไปสู่ผลิตภัณฑ์แห่ง ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางชีวภาพเช่นการเน่าเปื่อย รวมถึงการทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนต่อมวลและปริมาตร โดยให้ค่าความร้อนของชีวมวลทอริรีไฟต์มีค่าประมาณ 20 ถึง 21 GJ / ton (LHV) (R. Nachenius, Wardt, Ronsse, & Prins, 2015)

ดังนั้นการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นที่จะนำชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผ่านกระบวนการทอริรีแฟคชันด้วยปฏิกรณ์แบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนจากสารระเหยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเพื่อนำน้ำออกจากชีวมวล และเกิดการละลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเซลลูโลสบางส่วน (Pach, Vigouroux, & Björnbohm, 2002) แล้วนำไปผ่านขบวนการอัดเม็ดเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทอริรีไฟต์อัดเม็ดที่มีค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตรสูง ทำให้ชีวมวลมีความเปราะและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เนื่องจากโอเอชกรุปถูกทำลาย มีค่าความร้อนสูงเนื่องจากมีการสูญเสียสารระเหยและการแตกสลายพันธะคาร์บอนในกลุ่มคาร์บอกซิลิกทำให้มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และช่วยลดรายจ่ายให้กับเกษตรกร

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอริรีไฟต์ด้วยกระบวนการทอริรีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการ

2. เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอริรีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมโดยปรับเปลี่ยนเวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์และอัตราการป้อนวัตถุดิบชีวมวล

3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานจากชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์

#### ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวในการให้ความร้อนในช่วงเริ่มต้นเพื่ออุ่นชุดปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิอย่างน้อย 500 องศาเซลเซียส
2. ใช้สารระเหยจากกระบวนการทอริแฟคชันเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนกับระบบแทนหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว
3. เวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์อยู่ที่ช่วง 20-40 นาที

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. รู้และเข้าใจตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟต์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้แก๊สร้อนจากหัวเผาสารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการ
2. ได้สภาวะในการควบคุมการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟต์ที่ได้คุณภาพดีและปลดปล่อยมลพิษต่ำและค่าความร้อนสูงสุด
3. ได้ค่าสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟต์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้แก๊สร้อนจากหัวเผาสารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการ
4. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟต์ด้วยกระบวนการทอริแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้แก๊สร้อนจากหัวเผาสารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการ

#### ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศุภปฏิพร สิทธิกุล ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และขนาดอนุภาคของชีวมวลที่มีผลต่อคุณสมบัติของค่าความร้อนของชีวมวลจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ลำต้นและเห้งมันสำปะหลัง ใบ และยอดอ้อย ฟางข้าว ทางปาล์ม และชังข้าวโพด พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองในการทำนายค่าความร้อนที่เชื่อมโยงกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ สำหรับการทำการทดลองชีวมวลจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกชีวมวลจำนวน 10 กิโลกรัม จะถูกใช้เพื่อศึกษาตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักด้วยความร้อน โดยกำหนดเงื่อนไขให้อุณหภูมิคงที่ที่ 220 260 และ 280 องศาเซลเซียส ของชีวมวลแต่ละชนิด ส่วนที่สองชีวมวลจำนวน 40 กิโลกรัม ถูกทอริไฟต์ในเตาปฏิกรณ์ขนาดห้องทดลอง โดยกำหนดให้เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ

220 260 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลองของแต่ละอุณหภูมิดังกล่าวได้แก่ 20 40 และ 60 นาที จากนั้นชีวมวลที่ถูกทอริไฟด์จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน การวิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ส่วนที่สามชีวมวลจำนวน 40 กิโลกรัม จะถูกทอริไฟด์ในเตาปฏิกรณ์เพื่อหาจุดสิ้นสุดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 220 260 และ 280 องศาเซลเซียส สุดท้าย ตัวอย่างของชีวมวลที่ได้จากกระบวนการทอริไฟด์ขั้นในส่วนนี้จะถูกนำมาหาค่าความร้อนด้วยบอมคาลอริมิเตอร์ สำหรับผลการศึกษาคือพบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับผลของขนาดอนุภาคเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของเห้งน้ำมัน ใบและยอดอ้อย และชังข้าวโพด จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความร้อนของทางปาล์มและฟางข้าวจะมีค่าลดลง การทำนายค่าความร้อนด้วย สมการที่สร้างขึ้นโดยเชื่อมโยงกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ จะมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนที่ได้จากการทดลอง โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (Normalized root mean squares deviation) เท่ากับ 13.19%

Nachenius, R.W. (R. W. Nachenius, van de Wardt, Ronsse, & Prins, 2015) และคณะ ได้ศึกษากระบวนการทอริไฟด์ขั้นของไม้สนด้วยชุดทดลองเตาปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียง การทดลองถูกดำเนินการโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรครั้งละตัว (อุณหภูมิ เวลาในห้องปฏิบัติการ อัตราการป้อนวัสดุ และอัตราการป้อนไนโตรเจน) โดยกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลองพื้นฐานไว้ดังนี้ อุณหภูมิผิวผนังห้องปฏิบัติการ 325 องศาเซลเซียส เวลาที่วัสดุอยู่ในห้องปฏิบัติการ 345 วินาที อัตราการป้อนชีวมวลป้อนเข้าห้องปฏิบัติการ 2.48 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนไนโตรเจนเข้าสู่ห้องปฏิบัติการ 8 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่อุณหภูมิผิวผนังห้องปฏิบัติการสามารถปรับได้ 5 ค่า (275 300 325 350 และ 375 องศาเซลเซียส) อัตราการป้อนชีวมวลปรับได้ 3 ค่า (0.79 1.54 2.48 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) อัตราการป้อนไนโตรเจนระหว่าง 8-32 ลิตรต่อชั่วโมง) ผลการศึกษาคือว่าอนุภาคไม้สนแบบหยาบสามารถทอริไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวห้องปฏิบัติการและเวลาที่วัสดุอยู่ในห้องปฏิบัติการส่งผลมากกว่าต่อผลผลิตไม้ทอริไฟด์ ในขณะที่ค่าความร้อนไม้ทอริไฟด์มีค่ามากขึ้นเมื่อสัดส่วนของไม้ทอริไฟด์ต่อชีวมวลมีค่าลดลง

Woodyและคณะ (Woody, 1941) ได้ตรวจสอบความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ของการผลิตถ่านโค้กเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในห้องถลุงด้วยกระบวนการ Hayes โดยผลิตถ่านจากถ่านหิน โดยท่อปฏิกรณ์ที่เป็นแบบสกรูลำเลียงที่มีขนาดท่อ 43.2 เซนติเมตร ยาว 6.1 เมตร หมุนด้วยความเร็ว 1.5-4 รอบต่อนาที ในขณะที่สกรูลำเลียงสามารถหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาได้ด้วย

ความเร็วปรากฏที่ 13.5 รอบต่อนาที วัดอุณหภูมิที่ป้อนมีเวลาอยู่ในปฏิกรณ์ประมาณ 20 นาที และผลิตภัณฑ์ที่ออกจากห้องปฏิริยาแบบสกรูลำเลียงถูกส่งต่อไปยังระบบระบายความร้อน ในขณะที่ก๊าซและน้ำมันดิบก็ถูกปล่อยออกที่ส่วนท้ายของสกรูลำเลียงเช่นกันเพื่อเข้าสู่ระบบระบายความร้อนและเก็บรวบรวม เมื่อใช้แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหินพบว่าห้องปฏิกรณ์ทำงานที่อุณหภูมิ 593-704 องศาเซลเซียส ซึ่งการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จะรวมต้นทุนการผลิตด้วย

Nam, S.B. และคณะ (Nam, Park, Kim, & Gu, 2016) ได้ศึกษาคุณลักษณะของปฏิริยาทอริแพคชั่นวัสดุชีวมวลด้วยเครื่องปฏิกรณ์นำร่องแบบทอหมุน (Rotary kiln reactor) โดยทดลองกับชีวมวล 3 ชนิดประกอบด้วย ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch: EFB) ชีวมวลอัดเม็ด (wood pellets) และ แกลบ (rice husks) ผลการทดลองพบว่าผลผลิตทอริไฟด์ทะลายปาล์มเปล่ามีค่า 61% ผลผลิตทอริไฟด์ชีวมวลอัดเม็ด 76.7% และผลผลิตทอริไฟด์แกลบมีค่า 30.8% ในขณะที่สัดส่วนของ H/C ของผลิตภัณฑ์ทอริไฟด์แห้งมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแกลบและทะลายปาล์มเปล่ามีค่า H/C ใกล้เคียงกับถ่านหิน

Lei Shang และ คณะ (Shang et al., 2014) ได้ศึกษากระบวนการทอริแพคชั่นชีวมวลโดยกระบวนการการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยความร้อนที่ไม่สูงมากนัก (200-300 องศาเซลเซียส) ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าจะชีวมวลเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานมวลโดยการระเหยของน้ำและส่วนหนึ่งของสารระเหย ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้แบบจำลองที่ต่อเนื่องกันสองขั้นตอนเพื่ออธิบายถึงจลนพลศาสตร์การสลายตัวด้วยความร้อนของไม้สน ตัวแปรในแบบจำลองทางจลศาสตร์พิจารณาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ (Thermogravimetric analyser: TGA) และการสูญเสียมวลในช่วงระยะเวลาการให้ความร้อนในช่วงแรก และถูกนำมาพิจารณาเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน (10-50 องศาเซลเซียสต่อนาที) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากแบบจำลอง ในขั้นตอนที่สองเครื่องปฏิกรณ์นำร่องแบบต่อเนื่องถูกสร้างขึ้นเพื่อทอริไฟด์ไม้ดิบในปริมาณมาก แบบจำลองการเกิดปฏิริยาขั้นตอนที่ 2 ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายผลผลิตของปฏิริยาทอริแพคชั่นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ อุณหภูมิตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์และอัตราการป้อนมวลชีวมวลร่วมกับพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์ ที่ได้จากการทดสอบใน TGA รวมกับผลจากห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ใช้ในการวัดค่าความร้อนสูง (HHV) และการสูญเสียมวล (y) ของวัสดุชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันทำให้สามารถคาดเดา HHV ของเศษไม้ทอริไฟด์จากเครื่องปฏิกรณ์นำร่อง ผลจากการศึกษาและแบบจำลองสามารถนำมาใช้ในการทำนาย

คุณภาพของผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชันซึ่งยังคงเป็นปัญหาสำหรับโรงงานผลิตเชื้อเพลิงทอริรีแฟคชันชีวมวลในปัจจุบัน

Biomass Technology Group (BTG) (BTG, 2017) พัฒนาเตาปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทอริรีแฟคชันซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนคุณสมบัติของชีวมวล เช่น ไม้ ให้มีคุณภาพในการเผาไหม้ได้ดีขึ้น และจะสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่แห้งและไม่เสื่อมสลายง่าย โดยมีขั้นตอนการทำงานของกระบวนการทอริรีแฟคชันชีวมวลดังนี้ การรักษาความร้อนของสารชีวมวลที่ 200-300 องศาเซลเซียส มักจะดำเนินการภายใต้ความดันบรรยากาศและไม่มีออกซิเจน ในระหว่างกระบวนการทอริรีแฟคชัน น้ำที่มีอยู่ในชีวมวลเช่นเดียวกับสารระเหยจะระเหยออก และไบโอพอลิเมอร์ (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) จะย่อยสลายไปส่วนหนึ่ง และสุดท้ายจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่แข็ง แห้ง และมีสีดำ หรือเรียกว่า Torrefied biomass หรือ bio-coal ในระหว่างกระบวนการ ชีวมวลจะสูญเสีย 20% ของมวล และ 10% ของค่าความร้อนของมัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ในปริมาณมาก พลังงานจากสารระเหยสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการทอริรีแฟคชันได้ หลังจากชีวมวลกลายเป็นทอริรีไฟด์ มันจะสามารถถูกอัดให้กลายเป็นแท่งหรือเม็ดได้ เพื่อเพิ่มความหนาแน่น สุดท้ายจะไล่น้ำออกเพื่อให้สามารถถูกเก็บไว้ในที่อากาศชื้นได้ โดยจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงในความชื้น ซึ่งแตกต่างจากชีวมวลเดิม

Reza, M. T., และคณะ, 2015, (Reza, Coronella, Sullivan, Williams, & Shekarriz, 2015) ได้ทำการออกแบบและการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ Hydrothermal Carbonization (HTC) หรือ กระบวนการทอริรีแฟคชันแบบเปียก (Wet Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลเปียกให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งเนื้อเดียวที่มีคาร์บอนสูง มีพลังงานสูง ข้อดีของกระบวนการ Hydrothermal Carbonization คือการใช้ความชื้นในวัตถุดิบเป็นตัวกลางในปฏิกิริยาและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการอบแห้งวัตถุดิบก่อนกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ Hydrothermal Carbonization

Yanyang Mei และคณะ (Mei et al., 2015) ได้ศึกษาการทำทอริรีแฟคชัน ของไม้ซีดาร์ โดยได้ดำเนินการในเตาปฏิกรณ์แบบหมุนขนาดทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ (200 230 260 และ 290 องศาเซลเซียส) อิทธิพลของความสามารถในการบดและความสามารถในการชลประทานของเชื้อเพลิงทอริรีไฟด์ถูกตรวจสอบอย่างละเอียดและประสิทธิภาพการเผาไหม้ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเทียบกับมวลชีวภาพดิบความสามารถในการบดและความไม่สามารถย่อยสลายของมวลชีวภาพที่ได้รับการดัดแปรนี้ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การบริโภคพลังงานลดลงและการเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคขนาดเล็กลง การใช้ก๊าซหุงต้มในโรงงาน

อุตสาหกรรมมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมของไม้ซีดาร์ในระหว่างการสีกหรือและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความหนาแน่นของพลังงานและผลผลิตพลังงาน คุณหมุมิของทอริรีแพคชั่นใช้ก๊าซหุงต้มได้ภายใน 260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเผาไหม้ของตัวอย่างที่ถูกฉีกครึ่งส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้ของตัวเร่งซึ่งมีลักษณะการเผาไหม้คล้ายคลึงกับลิกไนต์

Da Silva CMS. และคณะ (Silva et al., 2017) ได้ศึกษาและประเมินศักยภาพของกระบวนการทอริรีแพคชั่นชีวมวลแข็งจากวัสดุชีวมวลในประเทศบราซิล จากการศึกษาปรากฏชัดเจนว่าชีวมวลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพสูงสำหรับใช้งานในกระบวนการที่เหมาะสม กระบวนการทอริรีแพคชั่นสามารถแปลงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงเพื่อใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน กระบวนการทอริรีแพคชั่นแบบแห้งถูกศึกษาและพัฒนาเป็นอย่างมาก แม้ว่ากระบวนการทอริรีแพคชั่นแบบเปียกเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงมากกว่า เทคโนโลยีทอริรีแพคชั่นยังคงอยู่ในขั้นตอนก่อนที่จะพัฒนาไปสู่กระบวนการเชิงพาณิชย์

สมมาส แก้วล้วน และคณะ (สมมาส แก้วล้วน, 2013) ได้ทำการศึกษา ทดสอบ และเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลขนาด 20 kW ที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงกับเตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5) ที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิง เตาชีวมวลที่ใช้ทดสอบสมรรถนะประกอบด้วยตัวเตาที่มีผนัง 2 ชั้น (ห้องปฏิกิริยาและช่องอุ่นอากาศ) ห้องเผาไหม้แก๊สชีวมวล ช่องปากเตาสำหรับป้อนชีวมวล ช่องใต้เตาสำหรับถ่ายซีเถ้าออก นอกจากนี้ยังมีวาล์วควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เข้าสู่ห้องปฏิกิริยา และวาล์วควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 2 เข้าสู่ช่องอุ่นอากาศด้วย จากการทดสอบต้มระเหยน้ำ 15 กิโลกรัม ในเวลา 100 นาที โดยใช้เตาชีวมวลและเตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5) ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่าเตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และต่ำกว่าเตาหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพสูง (SG5) ประมาณ 29% และ 41% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่ำกว่าเตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และต่ำกว่าเตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพสูง (SG5) ประมาณ 67% และ 60% ตามลำดับ เมื่อคิดราคาแก๊ส LPG ที่ 18 บาทต่อกิโลกรัม หากราคาแก๊ส LPG ปรับตัวเพิ่มขึ้นเป็น 30 บาทต่อกิโลกรัมจะส่งผลให้การใช้เตาชีวมวลมีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้เตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวทั้งสองแบบ 80% และ 76% ตามลำดับ ดังนั้นการนำเตาชีวมวลมาใช้แทนเตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายให้ครัวเรือนได้อย่างมาก จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง

มีความเหมาะสมในการนำเตาชีวมวลมาใช้เป็นเตาความร้อนสำหรับการประกอบอาหารในครัวเรือน หรือประกอบกิจการร้านอาหารขนาดเล็ก นอกจากนั้นการใช้เตาชีวมวลยังมีส่วนช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงอีกด้วย



## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### ชีวมวล

หมายถึงวัสดุหรือเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ชีวมวลจึงนับรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ มูลสัตว์ และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิลมีที่มาจากแหล่งเดียวกัน คือพืชและสัตว์ แต่มีความแตกต่างกันที่เวลา นั่นคือการเกิดเชื้อเพลิงฟอสซิลต้องใช้เวลาที่ยาวนานในการแปรสภาพซากพืชซากสัตว์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่ต่างกัน จึงไม่ถือว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นชีวมวล

#### แหล่งที่มาของชีวมวล

ชีวมวลประกอบด้วยวัสดุหลายประเภทแต่มักจะหมายถึงวัสดุจากพืชเป็นหลัก เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้จากการทาสงป่าไม้ หรือแปรรูปไม้ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ และสามารถจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

1. เศษไม้ (Wood Residues) เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่อยู่ในรูปของแข็ง ที่เกิดขึ้นมากในอุตสาหกรรมป่าไม้ ซึ่งส่วนใหญ่ต้องการใช้เพียงแค่ส่วนของลำต้นหรือเนื้อไม้ ส่วนที่เหลือ คือ ใบและกิ่งก้านต่างๆ รวมถึงขี้เลื่อยจากกระบวนการแปรรูปไม้ที่ไม่สามารถนำมาใช้ตามวัตถุประสงค์สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้

2. เศษพืชผลทางการเกษตร (Agricultural Wastes) เป็นเศษวัสดุต่างๆ ที่เกิดจากพืชผลทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และเศษผัก เป็นต้น เศษวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มีจำนวนมาก และสามารถนำมาผลิตพลังงานได้เช่นกัน

3. สิ่งปฏิกูลจากสัตว์ (Animal Wastes) สิ่งปฏิกูลจากสัตว์มีปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากการเลี้ยงสัตว์ในลักษณะเป็นฟาร์ม การรวบรวมสิ่งปฏิกูลได้มากพอจะสามารถผลิตเป็นพลังงานได้

4. ของเหลือใช้จากชุมชน (Municipal Wastes) หรืออาจเรียกว่าขยะชุมชน เป็นผลจากการบริโภคของมนุษย์ที่มีการทิ้งของที่เหลือใช้ในสภาพขยะ ซึ่งในเมืองใหญ่หรือในที่ที่มีปริมาณประชากรหนาแน่นจะยังมีปริมาณของเหลือทิ้งชนิดนี้มาก

เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีหลายประการจึงทำให้เป็นอุปสรรคในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านความร้อนและพลังงาน โดยข้อดีดังกล่าวประกอบด้วย ความขึ้นสูง ความหนาแน่นต่ำ

พลังงานต่อหน่วยมวลต่ำ พลังงานต่อหน่วยปริมาตรต่ำ ลดขนาดได้ยาก สามารถดูดซับน้ำได้ มีออกซิเจนสูง มีโลหะแอลคาไลสูง มีขนาดไม่แน่นอน เป็นต้น

### เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดหรือเชื้อเพลิงอัดแท่ง มีรูปแบบเป็นแท่งเล็ก ๆ มีน้ำหนักและความยาวเท่ากัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ ส่วนใหญ่ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เป็นเชื้อเพลิงประเภทที่มาจากไม้ ส่วนใหญ่ผลิตจาก ชี้เลื่อย เศษวัสดุจากไม้แปรรูป เศษไม้เหลือจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ ไม้จากตัดแต่งกิ่ง ไม้ถูกโค่นหรือยืนต้นตาย นอกจากนี้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย ชังข้าวโพด รวมถึงพืชล้มลุกต่างๆ เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีข้อดีหลายประการจึงทำให้เป็นอุปสรรคในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านความร้อนและพลังงาน โดยข้อดีดังกล่าวประกอบด้วย ความหนาแน่นต่ำ พลังงานต่อหน่วยปริมาตรต่ำ สามารถดูดซับน้ำได้ ออกซิเจนสูง มีโลหะแอลคาไลสูง ความชื้นสูง และมีความชื้นที่แตกต่างกัน ทำให้การนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตไม่สะดวก เนื่องจากการควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง เพื่อผลิตความร้อนให้แก่ระบบไม่สม่ำเสมอ ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง รวมไปถึงปัญหาการจัดการวัตถุดิบที่ยุงยาก เช่น การจัดเก็บ การขนส่ง เป็นต้น

### กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวลเกิดขึ้นในภาชนะปิด เรียกว่า เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในภาวะที่จำกัดปริมาณออกซิเจน (Partial Oxidation) กระบวนการผลิตแก๊สเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบ Heterogeneous คือ สารที่มี 2 สภาวะ มาทำปฏิกิริยากัน เช่นการผลิตแก๊สจากเชื้อเพลิงแกลบ (ของแข็งกับแก๊ส) โดยการผลิตแก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) สามารถแบ่งตามตัวกลางที่ใช้ทำปฏิกิริยา และขั้นตอนในการเผาไหม้ ออกได้เป็น 4 ชนิด

1. Air-Blown Gasification กระบวนการชนิดนี้เกิดขึ้นโดยใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในชั้นเผาไหม้ ได้รับความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วถูกส่งต่อไปเพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะได้แก๊สที่ค่าความร้อนไม่สูงนัก เนื่องจากมีไนโตรเจน ที่อยู่ในอากาศเป็นองค์ประกอบอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิง 70 % และแก๊สที่ให้พลังงานคือคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน รวมถึงสารระเหยต่างๆ รวมกันประมาณ 30 %

2. Oxidative Gasification ลักษณะของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ แทนอากาศซึ่งทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง เพราะไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบใน แก๊สเชื้อเพลิงการควบคุมกระบวนการเผาไหม้สามารถทำได้ดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของออกซิเจนบริสุทธิ์มีราคาสูง

3. Steam Gasification ในกระบวนการนี้ใช้ไอน้ำเข้าช่วยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าความร้อนให้กับแก๊สเชื้อเพลิง โดยเป็นการเพิ่มไฮโดรเจน แต่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาจะต้องสูงซึ่งไม่ควรต่ำกว่า  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้

4. Hydrogen Gasification เป็นกระบวนการที่ใช้ไฮโดรเจนแทนอากาศทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงโดยไม่มีการใช้อากาศหรือออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ปกติจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  และภายใต้ความดันที่สูง  $20\text{ MPa}$  โดยแก๊สที่ได้ประกอบด้วยมีเทนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการนี้จะสร้างขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิง (Synthetic Fuel) และเชื้อเพลิง ที่นิยมนำมาใช้ผลิตแก๊สคือ ถ่านหินเนื่องจากมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

#### กระบวนการทอริรีแฟคชัน

ทอริรีแฟคชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (mild pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำ  $200 - 315$  องศาเซลเซียส ที่สภาวะบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน ประโยชน์ของกระบวนการทอริรีแฟคชันคือ น้ำจะถูกนำออกจากชีวมวล ทำให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเซลลูโลสบางส่วน ทำให้ชีวมวลที่เป็นของแข็ง มีค่าความร้อนสูง การดูดความชื้นต่ำ เปราะง่ายต่อการบด

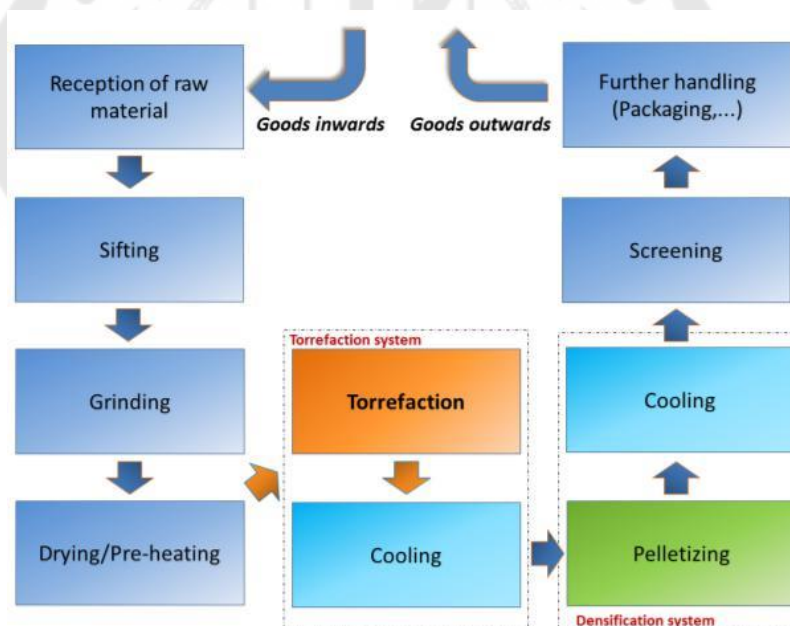
การทอริรีแฟคชันชีวมวลนั้นปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ทำให้ได้ชีวมวลทอริรีไฟด์และสารระเหย Gaur and Reed ได้สรุปปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะได้สารระเหยเบา (light volatile) เช่น โมโนแซกคาไลน์ พอลิแซกคาไลน์ และดีไฮโดรซูก้า และขั้นตอนที่ 2 จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การใช้ความร้อนเพื่อแตกสลายพันธะคาร์บอนกลุ่มคาร์บอกซิลิกทำให้เกิดการก่อตัวของกรด ซึ่งการเกิดกรดจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการคายน้ำ และปฏิกิริยาการแตกสลายพันธะด้วยความร้อนจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนิล ได้แก่ ไฮดรอกซิลอะซิโตน เมทานอล โฟพานอล กรดอะซิติก ฟูเพอร์รอล น้ำ กรดแล็กติกและกรดฟอร์มิก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ด้วยการสลายตัวดังกล่าวทำให้ชีวมวลมีความเปราะ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เนื่องจาก ไอโซพรีนถูกทำลาย มีค่าความร้อนสูง

เนื่องจากการสูญเสียสารระเหยและการแตกสลายพันธะคาร์บอนในกลุ่มคาร์บอกซิลิกทำให้มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 1 ขั้นตอนของกระบวนการทอริฟิเคชัน

ที่มา: <https://sunshinehours.net/2016/04/28/word-of-the-day-torrefaction/>



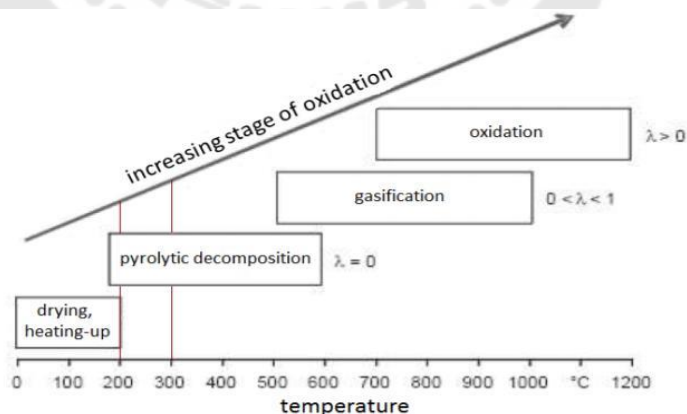
ภาพประกอบ 2 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการทอริฟิเคชัน

ที่มา: <https://docplayer.net/15505139-Torrefaction-of-biomass.html>

### การดำเนินการขั้นพื้นฐานของกระบวนการทอริรีแฟคชั่น

จากภาพประกอบที่ 1 และ 2 แสดงถึงขั้นตอนพื้นฐานของไม้ที่ผ่านกระบวนการทอริรีแฟคชั่นจากการจัดเก็บวัสดุชีวมวล ประการแรกจะร่อนเศษไม้ให้สิ่งสกปรกและเศษดินออก หลังจากนั้นบดเศษไม้ให้ได้ขนาดตามต้องการ จากนั้นอบชีวมวลให้แห้ง ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการ จากนั้นนำวัสดุไปผ่านความร้อนโดยกระบวนการทอริรีแฟคชั่นที่ปราศจากออกซิเจนตามที่อธิบายไว้ข้างต้น โดยปกติแล้วหลังจากการทอริรีไฟต์ จะต้องพักวัสดุไว้ให้เย็นลง เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาความร้อนสูงป้องกันการลุกไหม้เมื่อได้รับออกซิเจนจากภายนอก จากนั้นนำวัสดุไปอัดแท่งปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มปริมาตรและความหนาแน่นและพลังงานของผลิตภัณฑ์ ทิ้งให้วัสดุเย็นลงหลังจากนั้นตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำการจัดเก็บ

ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โม-เคมี ขึ้นอยู่กับกระบวนการแปลง มีอยู่สี่ขั้นตอนของการแปลงเทอร์โม-เคมี สามารถดำเนินการร่วมกันหรือแยกจากกันได้เป็นขั้นตอนอิสระ ความแตกต่างระหว่างขั้นตอนเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ ปฏิกิริยา แต่มีการใช้ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และที่สำคัญอีกอย่างคืออัตราส่วนอากาศ ประกอบด้วย การอบแห้ง การเพิ่มความชื้น การย่อยสลายไพโรไลติก และแสดงให้เห็นคาบในกระบวนการที่ปราศจากออกซิเจน ในเวลาเดียวกันขั้นนี้อาจเกิดหลังจากการทอริรีแฟคชั่น การใช้แก๊สซิฟิเคชั่นทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุทอริรีไฟต์ให้ดีขึ้นในการใช้งาน

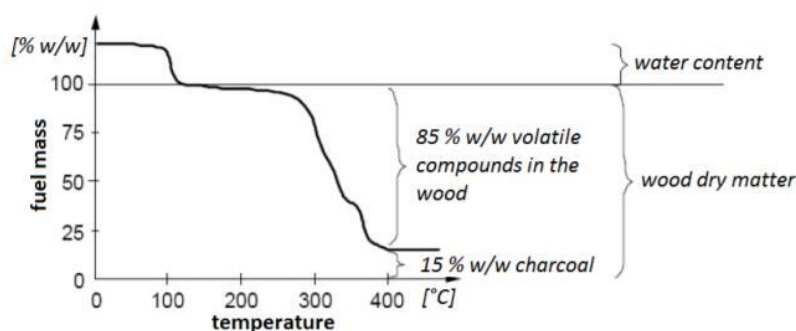


ภาพประกอบ 3 ขั้นตอนการเกิดออกซิเดชั่น

ที่มา: <https://docplayer.net/15505139-Torrefaction-of-biomass.html>

## ความร้อนและการอบแห้ง

ขั้นตอนแรกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้เอนทัลปีของสารระเหยมีความเสถียรและอาจจะคงที่จนกว่าปริมาณน้ำจะระเหยมากพอ ผลอื่นๆนอกจากนี้คือเกือบจะไม่มีพลังงานที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนสารอินทรีย์ การสลายตัวจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าจะถึงระดับอุณหภูมิที่เพียงพอหรือควบคู่ไปกับการสูญเสียน้ำในชีวมวล อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดเพราะอาจนำไปสู่การระเบิดของผนังเซลล์พืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของไม้สนตั้งแต่ยางสนจนถึงเนื้อเยื่อถ้าให้ความร้อนสูงจนเกินไป นอกจากนี้จะเกิดค่าการขยายตัวของไม้ที่ความแตกต่างกันนำไปสู่แรงดึงเครียดในโครงสร้างไม้ในตอนแรก และสุดท้ายจะทำให้เกิดการแตกหัก



ภาพประกอบ 4 การวิเคราะห์ปริมาณสารในเนื้อไม้โดยใช้ความร้อน

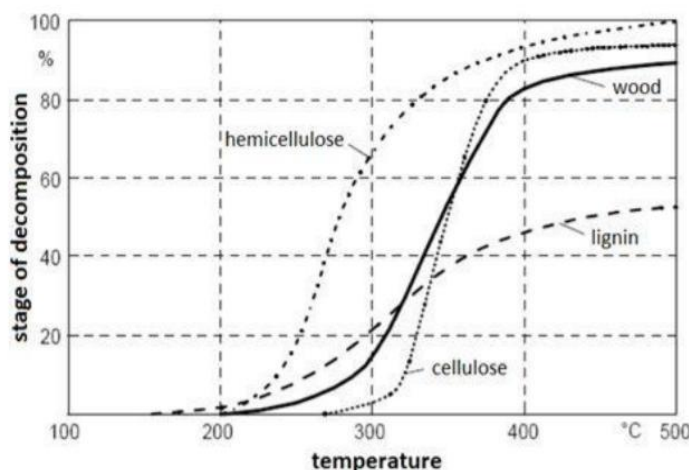
ที่มา: <https://docplayer.net/15505139-Torrefaction-of-biomass.html>

จากภาพแสดงพฤติกรรมทางความร้อนของไม้เปียก เมื่อให้ความร้อนโดยปราศจากออกซิเจน กราฟอธิบายว่าเชื้อเพลิงที่เปียกเกิน 100% สามารถทำให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแห้งได้ การวิเคราะห์ความร้อน ซึ่งเป็นหลักการสำหรับแผนภาพดังกล่าว ตรวจสอบการสูญเสียมวลของไม้ตัวอย่าง ระยะเวลา และอุณหภูมิ ที่เหลือผลิตภัณฑ์จะได้ถ่านหรือบางครั้งเรียกว่าโค้ก เป็นสิ่งที่เหลือหลังจากที่ไพโรไลซิสและมีปริมาณคาร์บอนมาก

## การสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolytic decomposition)

การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงให้สมบูรณ์คือการสลายตัวด้วยความร้อน ซึ่งเป็นการทำลายโมเลกุลของวัสดุที่ผ่านการให้ความร้อนโดยปราศจากออกซิเจน ถึงแม้จะเกิด

ออกซิเจนขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนแปลงเทอร์โม-เคมี ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและดำเนินการต่อจนเสร็จสิ้น สารที่สลายตัวจะไหลออกสู่ด้านนอกของอนุภาค หลักการของทอริแพคชั่นจะขึ้นอยู่กับการสมบัติของลิกโนเซลลูโลสในวัสดุที่จะสูญเสียสามองค์ประกอบหลักที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อทอริแพคชั่นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 200 - 300 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลสคือองค์ประกอบหลักที่ถูกย่อยสลาย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลเปราะบางมากเมื่อต้องถ่ายโอนความร้อนมาก ในความเป็นจริงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสอธิบายว่าด้วยกลไกสองขั้นตอนตามที่ระบุไว้โดย DI BLASI et al, 1997 ตามที่ได้เผยแพร่ในขั้นตอนแรก โครงสร้างน้ำตาลจะเปลี่ยนไปและจัดเรียงใหม่ เป็นผลมาจากการดีโพลีเมอไรเซชัน (Depolymerization) ส่วนขั้นตอนที่สองประกอบด้วยส่วนใหญ่ของการย่อยสลายปฏิกิริยาที่นำไปสู่การสูญเสียของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ตามลำดับการย่อยสลายการก่อตัวของซาร์ไอน้ำ และ เช่นเดียวกับการล้างสารระเหยเช่นสารประกอบคาร์บอนิลออกจากคาร์บอน ปฏิกิริยาของขั้นตอนแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิถึง 250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการสูญเสียมวลที่น้อยมากและจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงเริ่มขั้นตอนที่สองคือการย่อยสลายของปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 5 การสลายตัวด้วยความร้อนของลิกโนเซลลูโลสและเนื้อไม้

ที่มา: <https://docplayer.net/15505139-Torrefaction-of-biomass.html>

### การแปรสภาพเป็นแก๊ส

การแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) เป็นกระบวนการผลิตแก๊ส โดยการเผาไหม้ชีวมวลในที่จำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจน (Partial Combustion) หรือการใช้ออกซิเจนบางส่วน

ในการทาปฏิกิริยา (ประมาณร้อยละ 30 ของปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้) โดยกระบวนการ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 600 - 900 °C แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้จะประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เป็นหลัก ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สที่ให้พลังงานได้ โดยสามารถนำแก๊สที่ได้ไปเผาให้ความร้อนโดยตรง หรือทำให้ควบแน่นแล้วนำไปกลั่นเป็นเมทานอล นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สนี้ไปแยกองค์ประกอบ แล้วใช้ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติของแก๊สแต่ละชนิด

### การเกิดแก๊สโดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์

ลักษณะของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (oxidation) แทนอากาศ ซึ่งทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง เพราะไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในแก๊สเชื้อเพลิง การควบคุมกระบวนการเผาไหม้สามารถทำได้ดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของออกซิเจนบริสุทธิ์มีราคาสูง

### ทฤษฎีการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (Combustible Element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์รวมทั้งทำให้เกิดปัญหามลพิษในอากาศ

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือเวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (Turbulence)

### ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีอยู่ 2 ค่า คือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV)

1. ค่าความร้อนสูง (HHV) คือ ค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง bomb calorimeter ที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ) โดย

เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกเผาไหม้ในภาชนะปิดที่แช่อยู่ในน้ำ หลังจากเชื้อเพลิงชีวมวลเผาไหม้จะคายความร้อนให้แก่ น้ำ ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเราสามารถหาปริมาณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลได้จากการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ (เนื่องจากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะควบแน่นเป็นของเหลว)

การหาค่าความร้อนสูง (HHV)

$$HHV_{ar} = \frac{Q}{M_f} \text{ (kJ / kg)} \quad (2-1)$$

$$HHV_{db} = \frac{Q}{(M_f - M_w)} \text{ (kJ / kg)} \quad (2-2)$$

$$HHV_{daf} = \frac{Q}{(M_f - M_w - M_{ash})} \text{ (kJ / kg)} \quad (2-3)$$

เมื่อ  $HHV_{ar}$  คือ ค่าความร้อนสูงของวัสดุ  
 $HHV_{db}$  คือ ค่าความร้อนสูงของวัสดุที่ไม่มีความชื้น  
 $HHV_{daf}$  คือ ค่าความร้อนสูงของวัสดุที่ไม่มีความชื้นและเถ้า  
 $Q$  คือ ปริมาณความร้อน  
 $M_f$  คือ มวลเชื้อเพลิง  
 $M_w$  คือ มวลความชื้น  
 $M_{ash}$  คือ มวลเถ้า

การประมาณค่าความร้อนของ Dulong-Berthelot

$$HHV(\text{kJ / kg}) = 349.1C + 1178.3H + 100.5S - 103.4O - 15.1N - 21.1ASH \quad (2-4)$$

เมื่อ  $C$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุคาร์บอนในวัสดุ  
 $H$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในวัสดุ

- $S$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุซัลเฟอร์ในวัสดุ  
 $O$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุออกซิเจนในวัสดุ  
 $N$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไนโตรเจนในวัสดุ  
 $ASH$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเถ้าในวัสดุ

2. ค่าความร้อนต่ำ (LHV) คือค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่พิจารณาว่าไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่ได้ควบแน่นเป็นของเหลว โดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วนจะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ให้อยู่ในสถานะไอน้ำ (เอนทัลปีของไอน้ำมีค่าสูงกว่าเอนทัลปีของน้ำที่สถานะของเหลว)

$$LHV = HHV - h_{fg} \left( \frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right)$$

(2-5)

- เมื่อ  $H$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในวัสดุ  
 $M$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในวัสดุ  
 $h_{fg}$  คือ ค่าความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ

### บทที่ 3

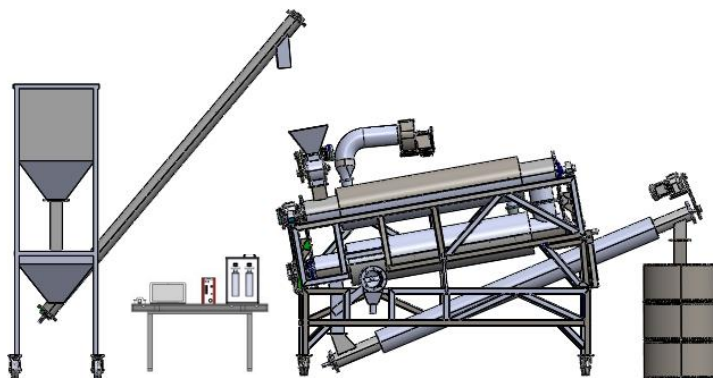
## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์ทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยกระบวนการทอริเฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้สารระเหย
2. เบิร์นเนอร์แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG Burner) Olympia LTG-3-30,000 kcal/h
3. เครื่องวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง (Synthesis Gas Analyzer) MRU Airfare Emission monitoring system รุ่น vario plus
4. ชุดเก็บข้อมูลอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (Data Logger) Wisco รุ่น AI210
5. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple Type K)
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก IDS01 ขนาด 150 kg x 0.01 kg
7. คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลการทำงาน
8. ชุดลำเลียงชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
9. ชุดโรตารีแอร์ลอคควาล์ว (Rotary Airlock Valve)
10. พัดลมดูดแก๊สไอเสีย ยี่ห้อ VENZ SC-164
11. Programmable Logic Control (PLC) ยี่ห้อ IDEC Micro smart FC6A

### เครื่องปฏิกรณ์ทอริเฟคชันแบบสกรูเอียงและชุดอุปกรณ์ประกอบ

เครื่องปฏิกรณ์นี้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นใหม่โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอริเฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการทอริเฟคชัน โดยแบ่งชุดอุปกรณ์เป็น 3 ส่วน ดังนี้ (1) ชุดลำเลียงชีวมวล (2) เครื่องปฏิกรณ์ทอริเฟคชันแบบสกรูเอียง (3) ชุดระบายความร้อนและดึงเก็บ

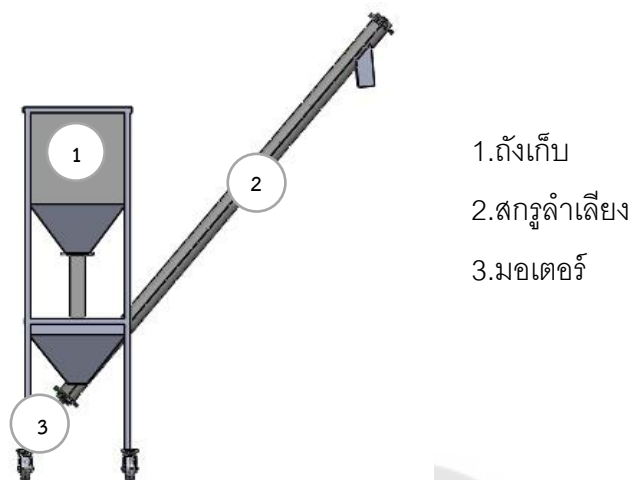


(ก) ชุดลำเลียงซีวมวล (ข) ชุดอุปกรณ์วัด (ค) เครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียง (ง) ชุดระบายความร้อนและถังเก็บ

ภาพประกอบ 6 เครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงพร้อมชุดอุปกรณ์ประกอบ

### ชุดลำเลียงซีวมวล

ชุดลำเลียงซีวมวลทำหน้าที่ลำเลียงซีวมวลจากถังเก็บ (Silo) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียง สกรูลำเลียงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีระยะพิท 4 นิ้ว ป้อนซีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ทำงานได้โดยการหมุนของใบสกรูที่อยู่ด้านในท่อลำเลียงเพื่อนำวัสดุติดภายในถังเก็บจากกันถึงไปปล่อยออกบริเวณส่วนปลายด้านบนสุดของท่อลำเลียง ใบสกรูลำเลียงถูกขับให้หมุนด้วยมอเตอร์เกียร์พร้อมเฟืองทดที่มีอัตราทดของมอเตอร์เกียร์ 200: 1 และ อัตราทดเฟือง 4:1 โดยมอเตอร์ที่ใช้มีขนาด ¼ HP ความเร็วรอบสูงสุด 1,400 rpm ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์จึงทำให้สามารถลดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตามความถี่ของอินเวอร์เตอร์



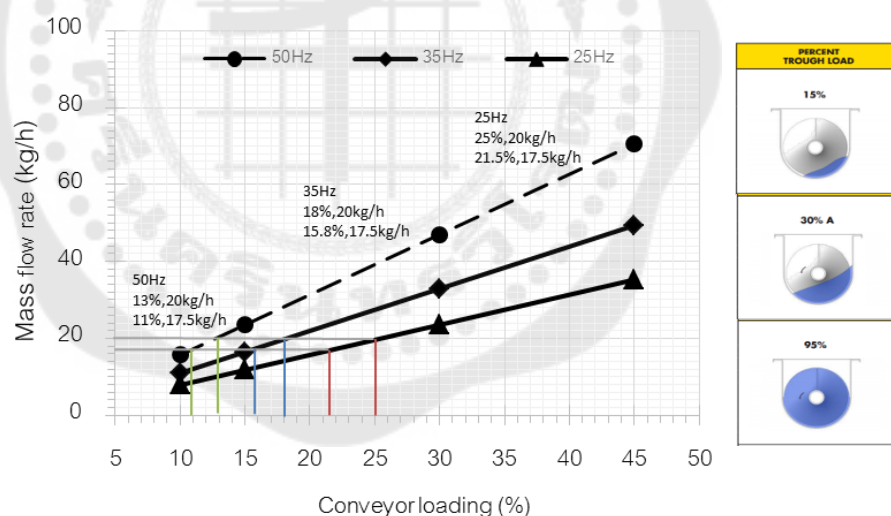
ภาพประกอบ 7 ชุดลำเลียงชีวมวล

### เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียง

เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียง ประกอบด้วย ชุดโรตารีแอร์ลิวควาล์ว ชุดสกรูอบแห้ง ชุดสกรูทอริไฟด์ และชุดหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิง โดยมีหลักการทำงานเริ่มจากชุดโรตารีแอร์ลิวควาล์วรับวัตถุดิบ (ชีวมวลอัดเม็ด หรือไม้สับ) จากชุดลำเลียงชีวมวลหรือจากการตักป้อนด้วยคน โดยโรตารีแอร์ลิวควาล์วประกอบด้วยโรเตอร์ที่มีใบกวาดจำนวน 6 ใบ ติดตั้งอยู่ในตัวเรือนที่มีช่องรับวัสดุเข้าด้านบนและปล่อยออกด้านล่าง โรเตอร์ถูกขับให้หมุนด้วยมอเตอร์เกียร์พร้อมเฟืองทดที่มีอัตราทดของมอเตอร์เกียร์ 200: 1 และ อัตราทดเฟือง 4:1 โดยมอเตอร์ที่ใช้มีขนาด ¼ HP ความเร็วรอบสูงสุด 1,400 rpm ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์จึงทำให้สามารถลดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตามความถี่ของอินเวอร์เตอร์ กรณีโรตารีแอร์ลิวควาล์วทำงานร่วมกับชุดลำเลียงชีวมวล อัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของชุดลำเลียงชีวมวล และในกรณีโรตารีแอร์ลิวควาล์วทำงานร่วมกับการตักป้อนด้วยคน อัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของชุดโรตารีแอร์ลิวควาล์ว

จากนั้นวัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนบน คือ สกรูอบแห้ง (Drying screw) โดยมีใบเกลียวสกรูอยู่ภายในท่อลำเลียงจำนวน 18 ใบ ที่ทำให้วัตถุดิบเคลื่อนที่ไปจนสุดความยาวของท่อลำเลียง และตกลงสู่ชุดสกรูของเครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนล่าง คือ ทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) สกรูลำเลียงมีเส้นผ่าน

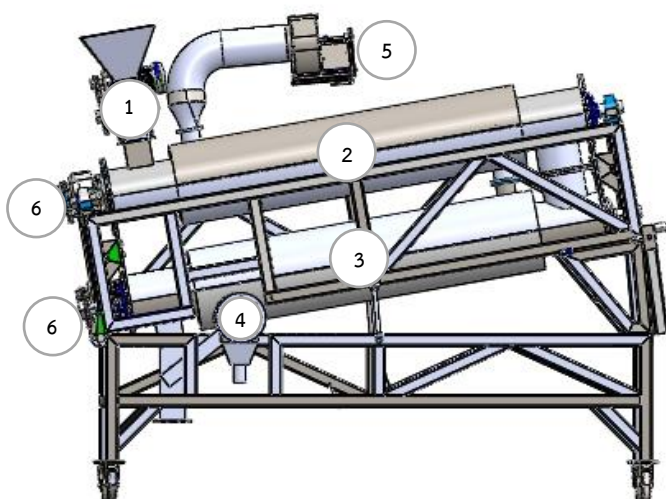
ศูนย์กลาง 8 นิ้ว มีระยะพิท 4 นิ้ว โดยมีใบเกลียวสกรูอยู่ภายในท่อลำเลียงจำนวน 18 ใบ ที่ทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปจนสุดความยาวของท่อลำเลียง โดยใบเกลียวสกรูถูกขับด้วยมอเตอร์เกียร์พร้อมเฟืองทดที่มีอัตราทดของมอเตอร์เกียร์ 200:1 และ อัตราทดเฟือง 2.625:1 โดยมอเตอร์ที่ใช้มีขนาด 1 HP ความเร็วรอบสูงสุด 1,400 rpm และความเร็วในการหมุนของมอเตอร์สามารถควบคุมได้ด้วยอินเวอร์เตอร์จึงทำให้สามารถเพิ่มและลดอัตราการไหลของวัสดุที่ผ่านท่อลำเลียงได้ อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการไหลของวัสดุผ่านท่อลำเลียงคือภาวะการป้อนวัสดุเข้าสู่ท่อลำเลียง เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของวัสดุมีค่าคงที่ค่าหนึ่งพบว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนของสกรูเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ร้อยละของการป้อนวัสดุเข้าสู่ท่อและสกรูลำเลียงเปลี่ยนแปลงด้วยโดยร้อยละของการป้อนวัสดุเข้าสู่ท่อและสกรูลำเลียงลดลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น โดยร้อยละของการป้อนวัสดุเข้าสู่ท่อและสกรูลำเลียง (percentage of conveyor loading) คืออัตราส่วนระหว่างอัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่ท่อและสกรูลำเลียงจริงเทียบกับอัตราการป้อนวัสดุสูงสุดทางทฤษฎีเข้าสู่ท่อและสกรูลำเลียง



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงร้อยละของการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์และระดับความหนาของวัสดุในท่อลำเลียง

โดยวัตถุดิบได้รับความร้อนจากผนังภายนอกของท่อลำเลียงโดยความร้อนได้จากแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะได้อุณหภูมิสูงจากแก๊สที่ระเหยที่เกิดจากกระบวนการทอริแคว้น (TorrGas) หลังจากชุดปฏิกรณ์ถูกทำให้ร้อนด้วยแก๊สร้อนจากหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Olympia LTG-3) ประมาณ 10-20 นาที

โดยหัวเผาที่มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำสุดและสูงสุดที่ 1.67 และ 2.51 kg/h เพื่อให้ได้แก๊สร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 °C เมื่อสารระเหยที่ได้จากกระบวนการทอรีไฟเคชันสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง จึงหยุดการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลว แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไหลเข้าสู่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยไหลวนรอบผิวท่อของสกรูลำเลียงส่วนล่างจำนวน 6 รอบ เพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ทอรีไฟด์สกรู จากนั้นแก๊สร้อนไหลออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของชุดทอรีไฟด์สกรู และไหลเข้าสู่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของสกรูอบแห้งและไหลวนรอบผิวท่อของสกรูอบแห้ง จำนวน 6 รอบ เพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สกรูอบแห้ง จากนั้นแก๊สร้อนไหลออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของสกรูอบแห้ง เข้าสู่พัดลมดูดแก๊สไอเสียแล้วปล่อยไอเสียสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป



- 1.โรตารีแอร์ล็ค
- 2.สกรูอบแห้ง
- 3.สกรูทอรีไฟด์
- 4.หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิง
- 5.พัดลมดูดแก๊สไอเสีย
- 6.มอเตอร์

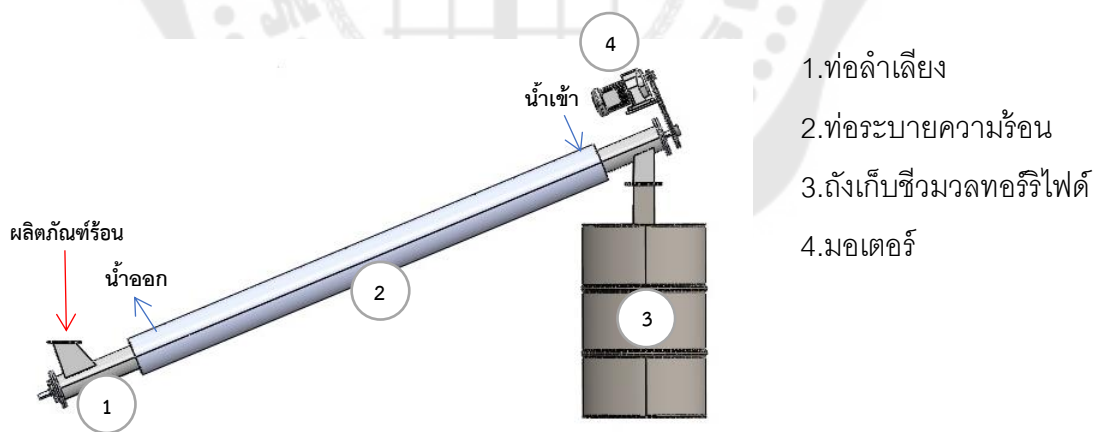
ภาพประกอบ 9 เครื่องปฏิกรณ์

### ชุดระบายความร้อนและถังเก็บชีวมวลทอรีไฟด์

ชุดระบายความร้อนและถังเก็บชีวมวลทอรีไฟด์ทำงานเมื่อชีวมวลทอรีไฟด์ที่มีอุณหภูมิสูงที่ไหลออกจากสกรูทอรีไฟด์แล้วจะตกลงสู่ชุดระบายความร้อน โดยชุดระบายความร้อนประกอบด้วยท่อลำเลียงผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอรีไฟด์ร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีระยะพิท 4 นิ้ว ภายในท่อลำเลียงมีใบสกรูที่อยู่ด้านในเพื่อนำผลิตภัณฑ์ไปยังถังเก็บชีวมวลทอรีไฟด์ขนาด 200 ลิตร ใบสกรูลำเลียงถูกขับให้หมุนด้วยมอเตอร์เกียร์พร้อมเฟืองทดที่มีอัตราทดของ

มอเตอร์เกียร์ 200: 1 และ อัตราทดเฟือง 4:1 โดยมอเตอร์ที่ใช้มีขนาด ¼ HP ความเร็วรอบสูงสุด 1,400 rpm ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ขณะที่ผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอริไฟด์ร้อนไหลผ่านท่อลำเลียง ความร้อนจากผลิตภัณฑ์ถ่ายเทออกผ่านฉนวนท่อลำเลียงผลิตภัณฑ์ไปยังน้ำหล่อเย็นที่ไหลภายนอกท่อลำเลียง ซึ่งภายนอกท่อลำเลียงถูกออกแบบให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น (double heat exchanger) โดยที่ช่องการไหลของน้ำระบายความร้อนซึ่งถูกออกแบบให้มีแผ่นบังคับการไหลของน้ำระบายความร้อนให้เกิดการไหลในลักษณะไหลวนรอบท่อลำเลียงผลิตภัณฑ์ทอริไฟด์ และทิศทางการไหลของน้ำระบายความร้อนเป็นแบบไหลสวนทางกับทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอริไฟด์ ผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอริไฟด์ที่ออกจากชุดระบายความร้อนจะตกลงสู่ถังเก็บเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองหรือระหว่างการทดลองสามารถนำผลิตภัณฑ์ออกมาจากถังเก็บผลิตภัณฑ์ได้

ในกรณีที่เครื่องปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้นไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน ผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอริไฟด์ที่ออกจากทอริไฟด์ชั้นสกรูจะตกลงสู่ถังเก็บชีวมวลทอริไฟด์โดยตรง ซึ่งถังเก็บผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอริไฟด์มีขนาด 75 ลิตร ซึ่งติดตั้งไว้ด้านล่างของทอริไฟด์สกรู เมื่อเสร็จสิ้นแต่ละการทดลองต้องทิ้งผลิตภัณฑ์ไว้ในถังเก็บอย่างน้อย 8-12 ชั่วโมงเพื่อป้องกันการจืดติดไฟด้วยตัวเองของผลิตภัณฑ์



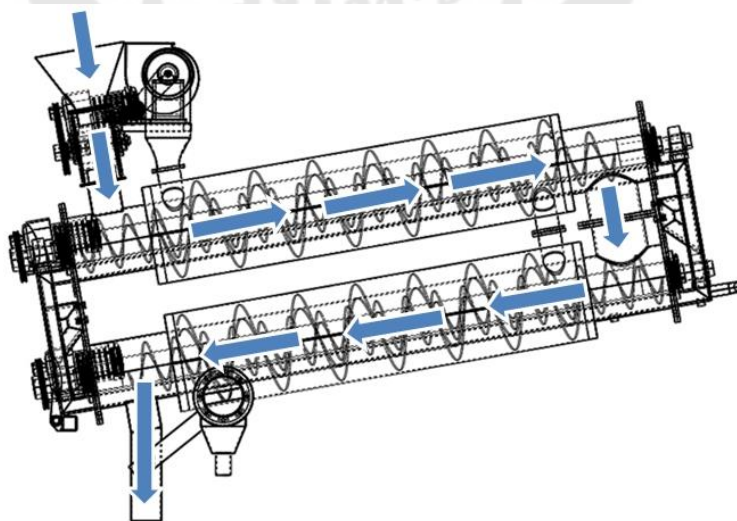
ภาพประกอบ 10 ชุดระบายความร้อนและถังเก็บชีวมวลทอริไฟด์

### วิธีการทดลอง

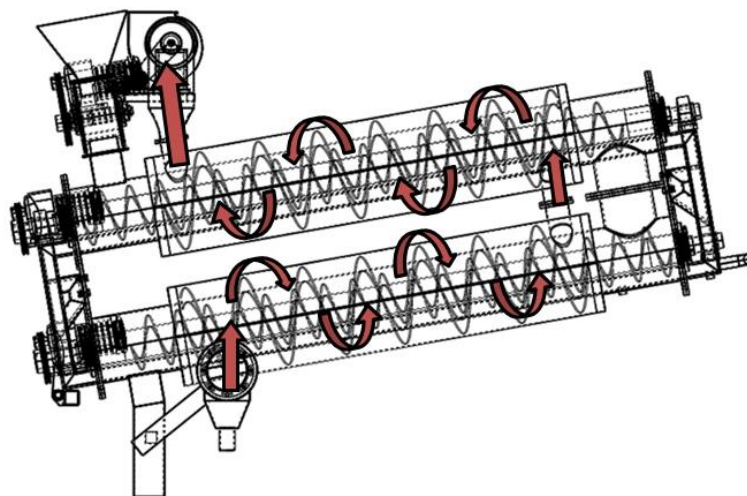
การผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์ด้วยกระบวนการทอริไฟด์ชั้นแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการ โดยในช่วงเริ่มต้นใช้หัวเผา

เชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นแหล่งความร้อนป้อนให้กระบวนการจนกระทั่งมีสารระเหยเกิดขึ้นจากกระบวนการและสารระเหยสามารถติดไฟได้ดีจึงหยุดการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลวและใช้สารระเหยที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่ระบบ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. ป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยผ่านโรตารีแอร์ล็คควาล์ว
2. ชีวมวลถูกลำเลียงผ่านเครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบสกรูเอียงส่วนบนในขณะที่ความร้อนโดยรอบท่อลำเลียงถูกส่งผ่านเข้ามายังวัสดุชีวมวลทำให้ความชื้นถูกไล่ออกจากวัสดุชีวมวล
3. ชีวมวลแห้งถูกลำเลียงผ่านเครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบสกรูเอียงส่วนล่างในขณะที่ความร้อนโดยรอบท่อลำเลียงถูกส่งผ่านเข้ามายังวัสดุชีวมวลทำให้สารระเหยบางส่วนถูกไล่ออกจากวัสดุชีวมวลได้ผลผลิตเป็นชีวมวลทอรีไฟต์
4. ชีวมวลทอรีไฟต์ถูกลำเลียงผ่านชุดระบายความร้อนโดยความร้อนถูกถ่ายเทผ่านผนังไปยังน้ำที่อยู่รอบท่อลำเลียง
5. สารระเหยไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบสกรูเอียงส่วนล่างและไหลเข้าสู่หัวเผาเพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้กับกระบวนการโดยฝุ่นจากสารระเหยจะถูกเหวี่ยงออกลงสู่ถังดักฝุ่น



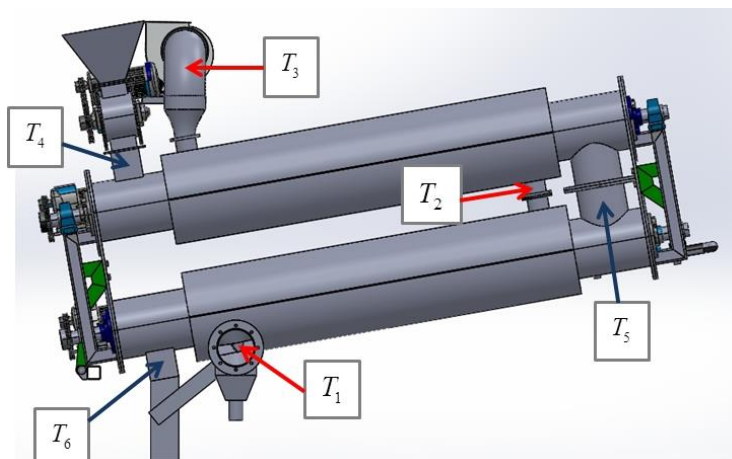
ภาพประกอบ 11 ทิศทางการไหลของชีวมวล



ภาพประกอบ 12 ทิศการไหลของอากาศร้อน

#### ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

1. อุณหภูมิแก๊สร้อนที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนล่าง
2. อุณหภูมิแก๊สร้อนที่ท่อเชื่อมระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนล่างและส่วนบน
3. อุณหภูมิแก๊สร้อน (ไอเสีย) ที่ไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนบน
4. อุณหภูมิภายในท่อลำเลียงชีวมวลที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนบน
5. อุณหภูมิภายในท่อเชื่อมระหว่างท่อลำเลียงชีวมวลระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนล่างและส่วนบน
6. อุณหภูมิสารระเหยที่ทางออกของท่อลำเลียงชีวมวลของเครื่องปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชั่นแบบสกรูเอียงส่วนล่าง



ภาพประกอบ 13 แสดงตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 6

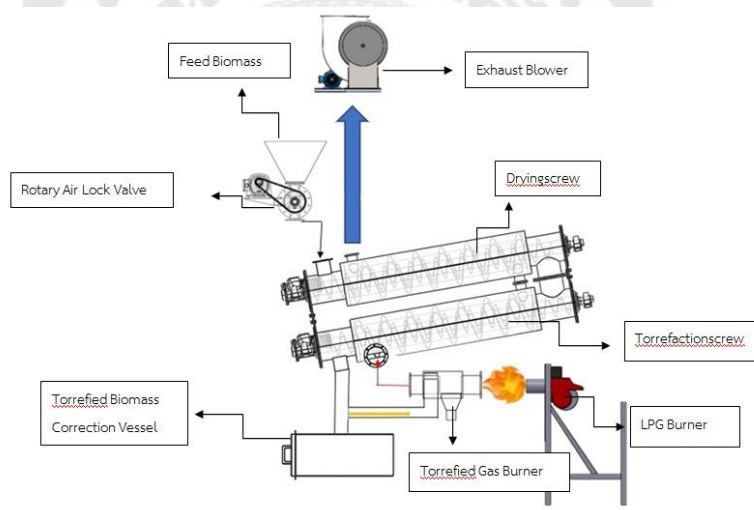
### เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองผลิตชีวมวลทอริไฟด์ (Torrefied biomass) ด้วยชุดปฏิกรณ์ทอริไฟด์ แพลคชั่นแบบสกรูเอียง เมื่อวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือชีวมวลอัดเม็ด (Biomass pellet) เมื่อชีวมวลอัดเม็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาวประมาณ 15-30 mm และไม้สับ (Wood chip) โดยมีขนาดความหนาประมาณ 2-3 mm ยาวประมาณ 20-30 mm โดยแหล่งความร้อนที่ป้อนให้ชุดปฏิกรณ์ทอริไฟด์แพลคชั่นแบบสกรูเอียงมี 2 แหล่ง คือ จากหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG burner) และจากหัวเผาทอร์แก๊ส (Torgas Burner) โดยหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีการใช้งานในช่วงเริ่มต้นการทำงานของชุดปฏิกรณ์ทอริไฟด์แพลคชั่นแบบสกรูเอียงเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สกรูอบแห้ง (Drying screw) และทอริไฟด์สกรู (Torrefied Screw) ให้มีสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตชีวมวลทอริไฟด์และใช้รักษาอุณหภูมิแหล่งความร้อน (แก๊สร้อน) ที่ป้อนเข้าสู่ชุดปฏิกรณ์ทอริไฟด์แพลคชั่นแบบสกรูเอียงให้มีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 600-700 °C ในขณะที่หัวเผาทอร์แก๊สถูกใช้เมื่อมีทอร์แก๊สเกิดขึ้นจากกระบวนการทอริไฟด์แพลคชั่นเพื่อเป็นแหล่งความร้อนหลักสำหรับชุดปฏิกรณ์ทอริไฟด์แพลคชั่นแบบสกรูเอียง

การทดลองเริ่มต้นจากการใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัตถุดิบโดยกำหนดให้อัตราการป้อนเริ่มต้นอยู่ที่ 17.5 kg/h และกำหนดให้ระยะเวลาในการรับความร้อนของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ 16, 20 และ 24 นาที การทดลองต่อไปกำหนดให้อัตราการป้อนวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 20 kg/h เมื่ออัตราการป้อนวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจึงเพิ่มระยะเวลาในการรับความร้อนของวัตถุดิบด้วยเช่นกันโดยเริ่มกำหนดระยะเวลาในการรับความร้อนของวัตถุดิบเท่ากับ 24, 28 และ 32 นาที หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนวัตถุดิบจากชีวมวลอัดเม็ดเป็นไม้สับ โดยกำหนดให้ระยะเวลาในการรับความร้อนของ

วัตถุดิบเท่ากับ 32 นาที อัตราการป้อนอยู่ที่ 17.5 kg/h ซึ่งได้แบ่งการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

การทดลองที่ 1 ชีวมวลอัดเม็ดถูกตักป้อนด้วยมือลงสู่โรตารีแอร์ล็อกควาล์ว โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองชีวมวลอัดเม็ดถูกตักป้อนจำนวน 50 kg เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ใช้เวลา รวม 2 ชั่วโมง 50 นาที และไปยังถังเก็บชีวมวลทอริไฟด์ การทดลองมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่วัตถุดิบเคลื่อนที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 3 ระดับคือ 20, 25 และ 30 นาที ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนคือ 16, 20 และ 24 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ 25, 35 และ 50 Hz ตามลำดับ เมื่อเสร็จสิ้นแต่ละการทดลองต้องทิ้งผลิตภัณฑ์ไว้ในถังเก็บอย่างน้อย 12 ชั่วโมงเพื่อป้องกันการจุดติดไฟด้วยตัวเองของผลิตภัณฑ์ วัตถุดิบมีอัตราการไหลคงที่ที่ 17.5 kg/h มีทั้งหมด 3 เงื่อนไขดังนี้



ภาพประกอบ 14 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้นแบบสกรูเอียงในการทดลองที่

1

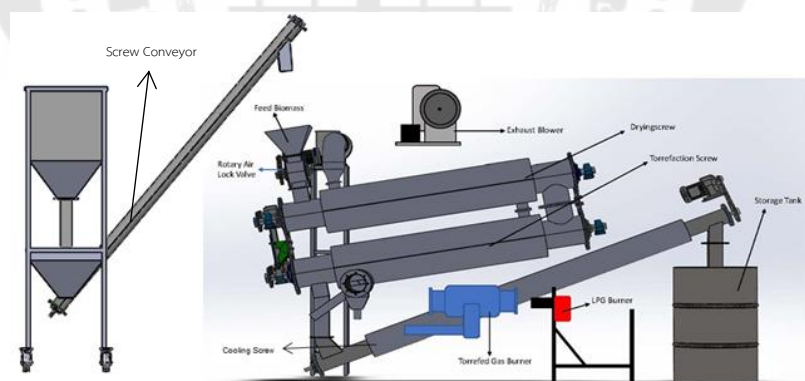
เงื่อนไขที่ 1 ชีวมวลอัดเม็ดมีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่เท่ากันที่ 10 นาที ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากันที่ 8 นาที ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการหมุนของสกรูทั้งสองที่ 50 Hz

เงื่อนไขที่ 2 ชีวมวลอัดเม็ดมีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) ที่ 10 นาที และสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่ 15 นาที ในขณะที่เวลาในการรับความร้อน

ร่อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw) เท่ากับ 8 นาที และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 12 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการปรับความถี่ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 50 Hz และ 35 Hz ตามลำดับ

เงื่อนไขที่ 3 ชีวมวลอัดเม็ดถูกป้อนลงสู่โรตารีแอร์ลิวควาล์วด้วย ชีวมวลอัดเม็ดมีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) ที่ 10 นาที และสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่ 20 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw) เท่ากับ 8 นาที และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 16 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการปรับความถี่ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 50 Hz และ 25 Hz ตามลำดับ

การทดลองที่ 2 และ 3 วัตถุดิบ (ชีวมวลอัดเม็ด, ไม้สับ) ถูกป้อนลงสู่โรตารีแอร์ลิวควาล์วด้วยชุดลำเลียงชีวมวลไปยังเครื่องปฏิกรณ์และผ่านชุดระบายความร้อนก่อนจะไปยังถังเก็บชีวมวลทอริไฟด์ โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่วัตถุดิบเคลื่อนที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 3 ระดับคือ 30, 35 และ 40 นาที ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนคือ 24, 28 และ 32 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ 25, 35 และ 50 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้นแบบสกรูเอียงในการทดลองที่

2 และ 3

การทดลองที่ 2 วัตถุดิบมีอัตราการไหลคงที่ที่ 20 kg/h มีทั้งหมด 3 เงื่อนไขดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 วัตถุดิบ (ชีวมวลอัดเม็ด 50 kg) มีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) มากกว่าสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่ 10 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw)

เท่ากับ 8 นาที และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 16 นาที ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการหมุนของสกรูที่ 25 Hz และ 50 Hz ตามลำดับ

เงื่อนไขที่ 2 วัตุดิบ (ชีวมวลอัดเม็ด 50 kg) มีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) น้อยกว่าสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่ 15 นาที และ 20 นาที ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw) เท่ากับ 12 นาที และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 16 นาที ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการหมุนของสกรูที่ 25 Hz และ 35 Hz ตามลำดับ

เงื่อนไขที่ 3 วัตุดิบ (ชีวมวลอัดเม็ด 50 kg) มีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่เท่ากันที่ 20 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากันที่ 16 นาที ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการหมุนของสกรูทั้งสองที่ 25 Hz

การทดลองที่ 3 วัตุดิบมีอัตราการไหลคงที่ที่ 10 kg/h

วัตุดิบ (ไม้สับ 16.75 kg) มีระยะเวลาการเคลื่อนที่อยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และสกรูทอริไฟด์ (Torrefied screw) ที่เท่ากันที่ 20 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากันที่ 16 นาที ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการหมุนของสกรูทั้งสองที่ 25 Hz

### การวิเคราะห์ผลผลิต

การวิเคราะห์ผลผลิตชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์ (Torrefied biomass pellet) ซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการทอริไฟด์ขั้น ถูกหาปริมาณและคุณภาพ โดยการซึ่งหามวลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการและทำการแยกสัดส่วนผลิตภัณฑ์เป็น 3 ชั้นคุณภาพตามลักษณะสีคือ 1. ผลิตภัณฑ์ที่มีสีน้ำตาล 2. ผลิตภัณฑ์ที่มีสีน้ำตาลดำหรือน้ำตาลเข้มและ 3. ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ จากนั้นผลิตภัณฑ์แต่ละส่วนถูกวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วยการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น, สารระเหย, เถ้า และคาร์บอนคงตัว ที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น, สารระเหยและเถ้าสามารถทำได้ตามมาตรฐาน ASTM D3173, ASTM D3175 และ ASTM D2866-94 ตามลำดับ โดยคาร์บอนคงตัวคำนวณหาปริมาณได้จากผลต่างของชีวมวลเริ่มต้นและผลรวมของความชื้น, สารระเหยและเถ้า รวมไปถึงการ

วิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ด้วย นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์แต่ละส่วนถูกวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis) และยังมีการตรวจสอบสมบัติการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยผลได้เชิงมวล (Mass yield; MY) สามารถหาได้จากสมการที่ 3-1

$$MY(\text{wt}\%) = \frac{M_t}{M_r} \times 100\% \quad (3-1)$$

โดยที่  $MY$  คือ ผลได้เชิงมวล (%)

$M_t$  คือ มวลผลิตภัณฑ์ (kg)

$M_r$  คือ มวลวัตถุดิบ (kg)

ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงาน

ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงาน (Energy conversion efficiency) จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดหรือไม้สับ (Wood pellet or wood chip) เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์หรือเชื้อเพลิงไม้สับทอริไฟด์ (Torrefied wood pellet or torrefied wood chip) สามารถหาได้จากสมการของผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield: EY)

$$EY = MY \times \frac{HHV_t}{HHV_r} \times 100\% \quad (3-2)$$

โดยที่  $EY$  คือ ผลได้เชิงพลังงาน (%)

$HHV_t$  คือ ค่าความร้อนผลิตภัณฑ์ (kg)

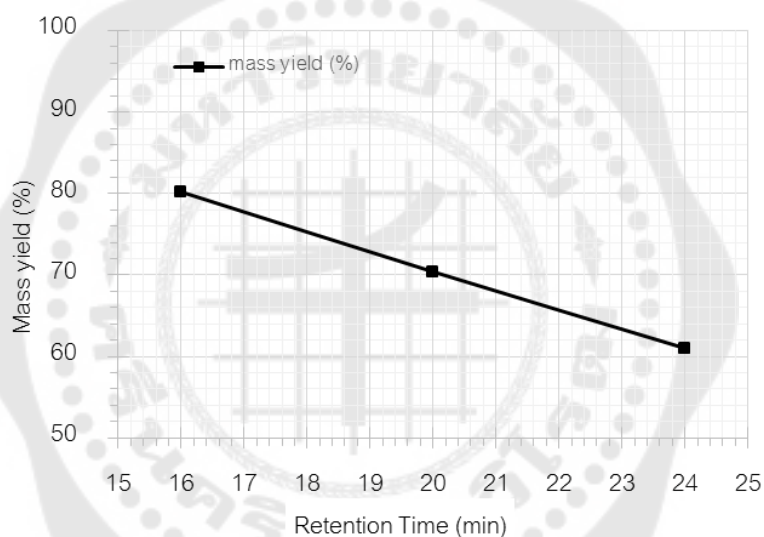
$HHV_r$  คือ ค่าความร้อนวัตถุดิบ (kg)

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### ผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองที่ 1 ซึ่งมีช่วงเวลาที่ชีวมวลอัดเม็ดได้รับความร้อนขณะที่เคลื่อนที่อยู่ในกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟด์จำนวน 3 ช่วงเวลา คือ 16 นาที 20 นาที และ 24 นาที ตามลำดับโดยชีวมวลอัดเม็ดอัตราการไหลคงที่ที่ 17.5 kg/h แหล่งความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 600-700 °C ถูกป้อนเข้าสู่เปลือกทอกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟด์เพื่อถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุที่ไหลอยู่ภายในทอกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟด์ในลักษณะไหลสวนทาง ซึ่งความร้อนได้จากการเผาไหม้แก๊สปีโตรเลียมเหลวในช่วง 10-20 นาทีแรก และได้จากการเผาไหม้สารระเหยจากกระบวนการทอริไฟด์ขั้นในช่วงเวลาที่เหลือ ก่อนไอเสียจะถูกพัดลมดูดและปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ วัสดุชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์ไหลลงสู่ถังเก็บจนหมดจึงเสร็จสิ้นการทดลองและรอจนผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์เย็นลงซึ่งใช้เวลาประมาณ 8-12 ชั่วโมง จึงเปิดถังเก็บเพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลได้เชิงมวล (Mass yield) โดยผลได้เชิงมวลแสดงในภาพประกอบที่ 22 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ชีวมวลได้รับความร้อนที่มากขึ้น โดยที่ระยะเวลาได้รับความร้อนรวมทั้งสกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟด์เท่ากับ 16 นาที ได้ค่าผลได้เชิงมวลที่ 80.2% เมื่อเพิ่มระยะเวลาได้รับความร้อน ผลได้เชิงมวลลดลง 9.8 % และ 19.2 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ของ Nachenius , 2015 ที่มีผลได้เชิงมวลลดลงตามเวลาที่ไม้สนสับขนาดไม่เกิน 6 mm อยู่ในชุดปฏิกรณ์แบบสกรูแนวราบ (R. W. Nachenius et al., 2015)



ภาพประกอบ 16 ผลได้เชิงมวลจากเครื่องทอรีไฟต์แบบสกรูเอียงที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 17.5 kg/h และเวลาที่วัดรับความร้อนที่ 3 ช่วงเวลาคือ 16 นาที 20 นาที และ 24 นาที

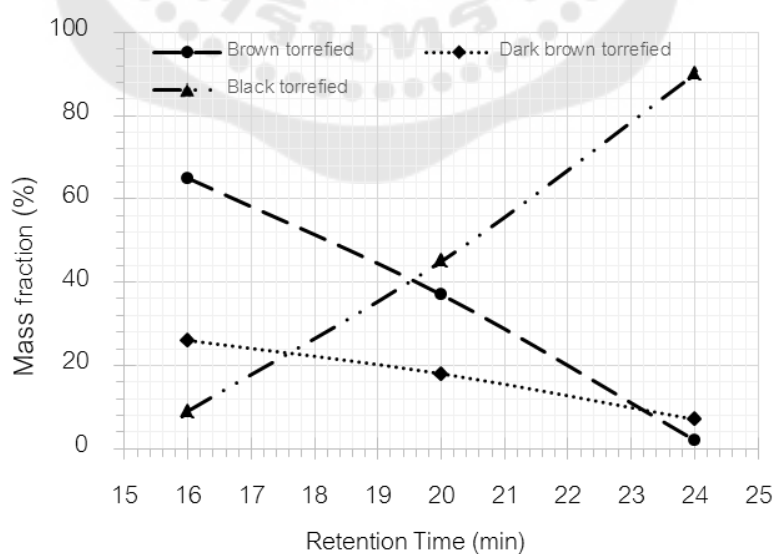
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในแต่เงื่อนไขมาแยกตามลักษณะสี พบว่าสามารถแยกผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอรีไฟต์ได้ 3 ส่วนตามลักษณะสี คือ ชีวมวลอัดเม็ดทอรีไฟต์สีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้ม และสีดำ ซึ่งแสดงตามภาพประกอบที่ 17



ก. ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์สีน้ำตาล ข. ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์สีน้ำตาลเข้ม ค. ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์สีดำ

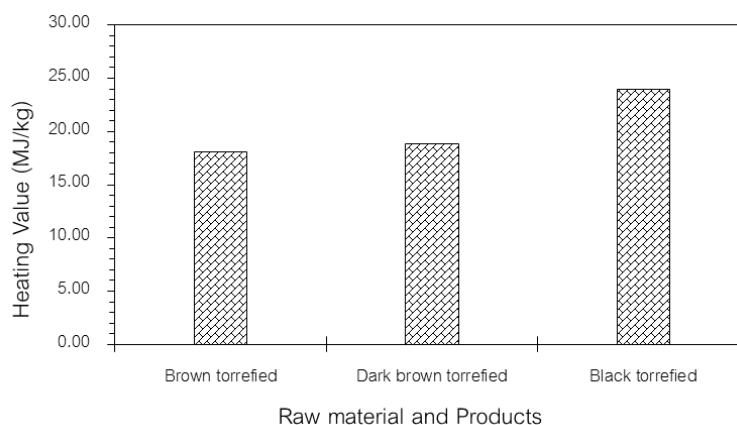
ภาพประกอบ 17 ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์แบ่งตามลักษณะสี

เมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยมวลของชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์ทั้งสามลักษณะสี (Mass fraction) พบว่า ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์ที่มีลักษณะสีน้ำตาลมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น คือ 65, 37, 2% ตามลำดับ, ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์ที่มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มมีแนวโน้มค่อยๆลดลงตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น คือ 26, 18, 7% ตามลำดับ และชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์ที่มีลักษณะสีน้ำตาลดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น คือ 9, 45 และ 90% ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลักษณะสีของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์แสดงในภาพประกอบที่ 18



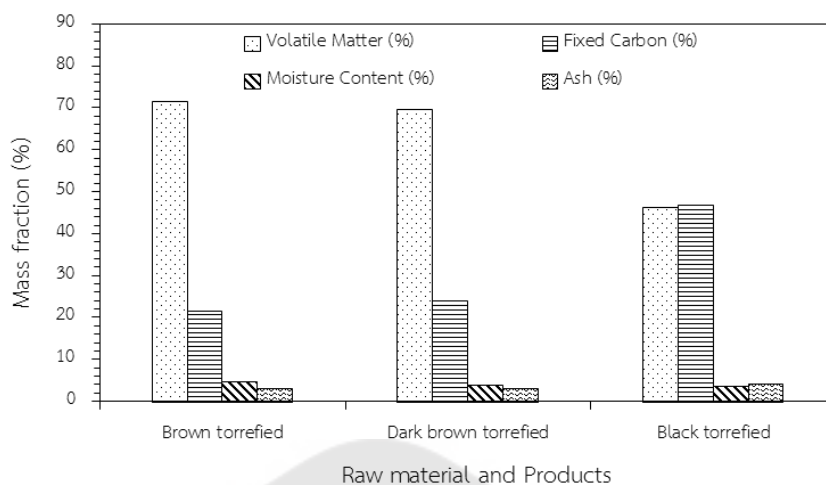
ภาพประกอบ 18 สัดส่วนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์แบ่งตามลักษณะสี

เมื่อนำชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์ตามลักษณะสีทั้งสามลักษณะสีไปวิเคราะห์ค่าความร้อน องค์ประกอบโดยประมาณ และองค์ประกอบโดยละเอียด ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN รุ่น CHN286 ยี่ห้อ Leco ณ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย พบว่าผลการส่งวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 24.03 MJ/kg จาก 18.06 MJ/kg และมีค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18.82, 20.90 และ 23.31 MJ/kg เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ โดยค่าความร้อนที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ ของ Nachenius และ Reza ที่มีค่าความร้อนต่อมวลมีค่าประมาณ 20 ถึง 21 GJ / ton (LHV) (R. W. Nachenius et al., 2015)



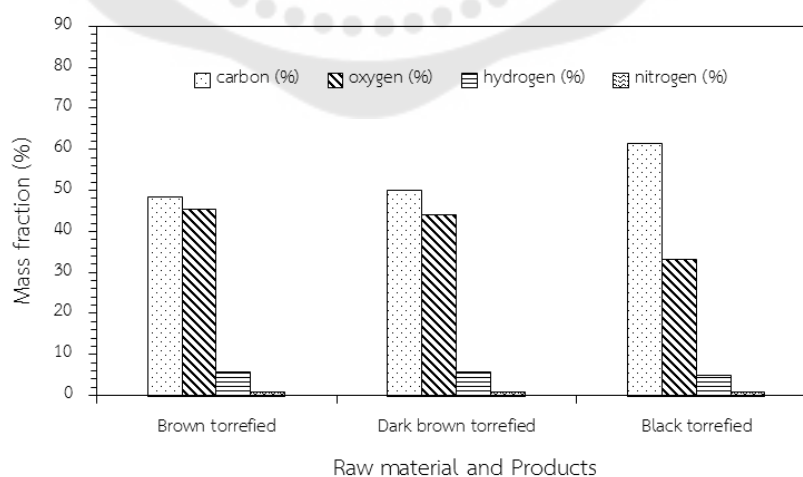
ภาพประกอบ 19 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์ทั้งสามลักษณะสี

จากผลการส่งวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งวิเคราะห์หาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆภายในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์ทั้งสามลักษณะสี ประกอบด้วย สารระเหย (Volatile Matter), คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon), ความชื้น (Moisture) และ เถ้า (Ash) พบว่า สารระเหยมีแนวโน้มลดลงเหลือ 46.13% จาก 71.26%, คาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 46.62% จาก 21.34%, ความชื้นลดลงเล็กน้อยจาก 4.46% เป็น 3.35% และ เถ้าอยู่ระหว่าง 2.9% ถึง 3.9% เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์เปลี่ยนลักษณะจากสีน้ำตาลเป็นสีดำ ตามลำดับ



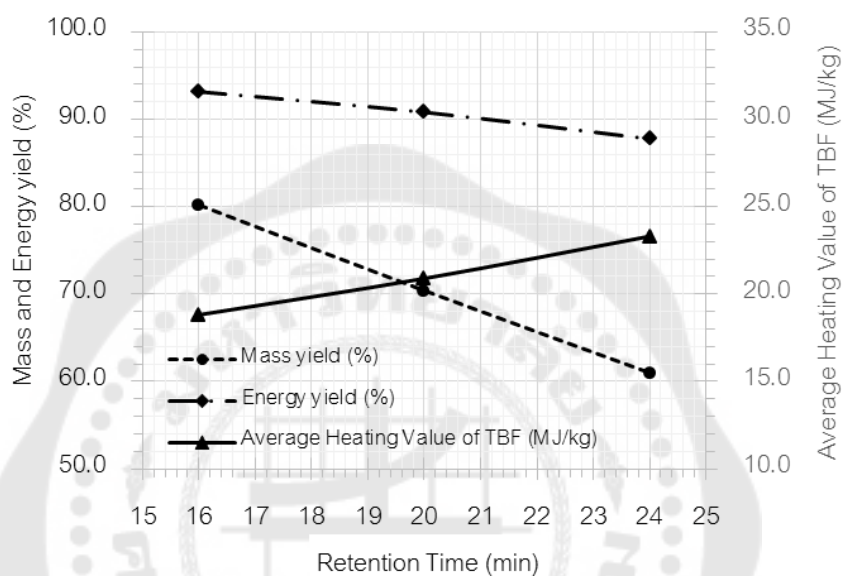
ภาพประกอบ 20 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

จากผลการส่งวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis) ซึ่งวิเคราะห์หาปริมาณขององค์ประกอบธาตุภายในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟด์ทั้งสามลักษณะที่ประกอบด้วย คาร์บอน (Carbon), ออกซิเจน (Oxygen), ไฮโดรเจน (Hydrogen) และ ไนโตรเจน (Nitrogen) พบว่า คาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 61.37% จาก 48.23%, ออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเหลือ 33.18% จาก 45.36%, ไฮโดรเจนลดลงเล็กน้อยจาก 5.71 เป็น 4.69% และเถ้าอยู่ระหว่าง 0.70% ถึง 0.76%



ภาพประกอบ 21 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด

เมื่อพิจารณาค่าผลได้เชิงพลังงานพบว่า มีแนวโน้มลดลงจาก 93.17, 90.82 และ 87.77 % ตามลำดับ และเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ โดยสัมพันธ์กับแนวโน้มค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ที่เพิ่มขึ้นจาก 18.82, 20.90 และ 23.31 MJ/kg ตามลำดับ



ภาพประกอบ 22 ค่าความร้อนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ และผลได้เชิงพลังงาน

## ผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองที่ 2 มีช่วงเวลาที่ชีวมวลอัดเม็ดได้รับความร้อนขณะที่เคลื่อนที่อยู่ในกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟต์จำนวน 3 ช่วงเวลา คือ 24 นาที 28 นาที และ 32 นาที ตามลำดับ โดยชีวมวลอัดเม็ดอัตราการไหลคงที่ที่ 20 kg/h แหล่งความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 600-700 °C ถูกบ้อนเข้าสู่เปลือกท่อสกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟต์เพื่อถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุที่ไหลอยู่ภายในท่อสกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟต์ในลักษณะไหลสวนทาง ซึ่งความร้อนได้จากการเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวในช่วง 10-20 นาทีแรก และได้จากการเผาไหม้สารระเหยจากกระบวนการทอริไฟต์ในช่วงเวลาที่เหลือ ก่อนไอน้ำจะถูกพัดลมดูดและปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ จากนั้นวัสดุชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์จะผ่านชุดระบายความร้อนก่อนที่จะไหลลงสู่ถังเก็บจนหมดจึงเสร็จสิ้นการทดลองและสามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลได้เชิงมวล (mass yield) โดยผลได้เชิงมวลแสดงในภาพประกอบที่ 34 จากผลการทดลองที่ได้พบว่า

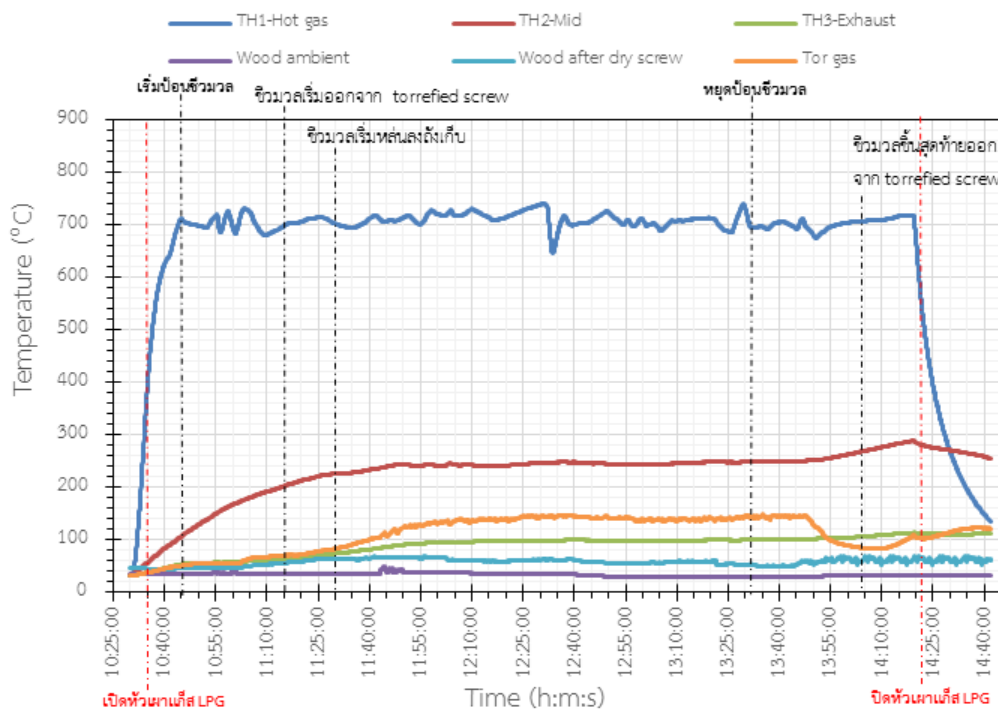
ผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น โดยที่ระยะเวลารับความร้อนรวมทั้งสกรูอบแห้งและสกรูทอริไฟด์ เท่ากับ 24 นาที ได้ค่าผลได้เชิงมวลที่ 81.3% เมื่อเพิ่มระยะเวลารับความร้อน ผลได้เชิงมวลลดลง 16.5 % และ 28.7 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ของ Nachenius , 2015 ที่มีผลได้เชิงมวลลดลงตามเวลาที่ไม้สนสับขนาดไม่เกิน 6 mm อยู่ในชุดปฏิกรณ์แบบสกรูแนวราบ

### ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากการทดลองของชีวมวลอัดเม็ด

จากการทดลองวัดอุณหภูมิเพื่อวิเคราะห์การทำงานของชุดเตาปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้นแบบสกรูเอียงเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงทอริไฟด์ ได้ผลการวัดอุณหภูมิจากตำแหน่งการวัดทั้งหมด 6 จุด ได้แก่ อุณหภูมิแก๊สร้อนก่อนเข้าสู่ Torrefied Screw (TH1-Hot gas / T<sub>1</sub>), อุณหภูมิแก๊สร้อนที่ออกจาก Torrefied Screw เพื่อเข้าสู่ Drying screw (TH2-Mid / T<sub>2</sub>), อุณหภูมิแก๊สร้อนที่ออกจาก Drying screw (TH3-Exhaust / T<sub>3</sub>) อุณหภูมิเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่กำลังเข้าสู่ Drying screw (Wood ambient / T<sub>4</sub>) อุณหภูมิชีวมวลอัดเม็ดที่ออกจาก Drying screw ( Wood after dry screw / T<sub>5</sub>) เพื่อเข้าสู่ Torrefied Screw อุณหภูมิเชื้อเพลิงทอริไฟด์และทอร์แก๊สที่ออกจาก Torrefied screw (Torrgas / T<sub>6</sub>) ก่อนเข้าสู่ชุดระบายความร้อนและถังเก็บ

### ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 1

จากการทดลองตามเงื่อนไขการทดลองที่ 1 เริ่มใช้ชุด LPG Burnner เวลา 10.35 น. เริ่มป้อนชีวมวล เวลา 10.45 น. ชีวมวลอัดเม็ดจะใช้เวลาอยู่ใน Drying Screw และ Torrefaction Screw ที่ 10 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ โดยมี Burner ให้ความร้อนอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ Torrgas ไม่ถึง 180 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถนำ Torrgas มาใช้เป็นแหล่งความร้อนแทนแทนเชื้อเพลิงแทนการใช้เชื้อเพลิง LPG ได้ จากการชั่งน้ำหนักถังแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ก่อนและหลังการทดลอง พบว่ามีเชื้อเพลิง LPG ถูกใช้ไปจำนวน 6.47 กิโลกรัม ตั้งแต่เวลา 10.35-14.22 เป็นเวลาทั้งหมด 3 ชั่วโมง 47 นาที (อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊ส LPG 1.71 kg/h) ใช้เวลาดังแต่เริ่มจนหยุดนำชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้นแบบสกรูเอียงที่ 10.45-13.32 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 47 ทอริไฟด์สีน้ำตาลที่ได้มีอัตราส่วนมากที่สุดจากทั้งสามสีแสดงในภาพประกอบ 33 น้ำหนักทั้งหมดของทอริไฟด์ที่ได้จากการทดลอง 40.65 กิโลกรัม จากชีวมวลอัดเม็ดทั้งหมด 50 กิโลกรัม น้ำหนักของชีวมวลทอริไฟด์ลดลงไป 18.7% เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

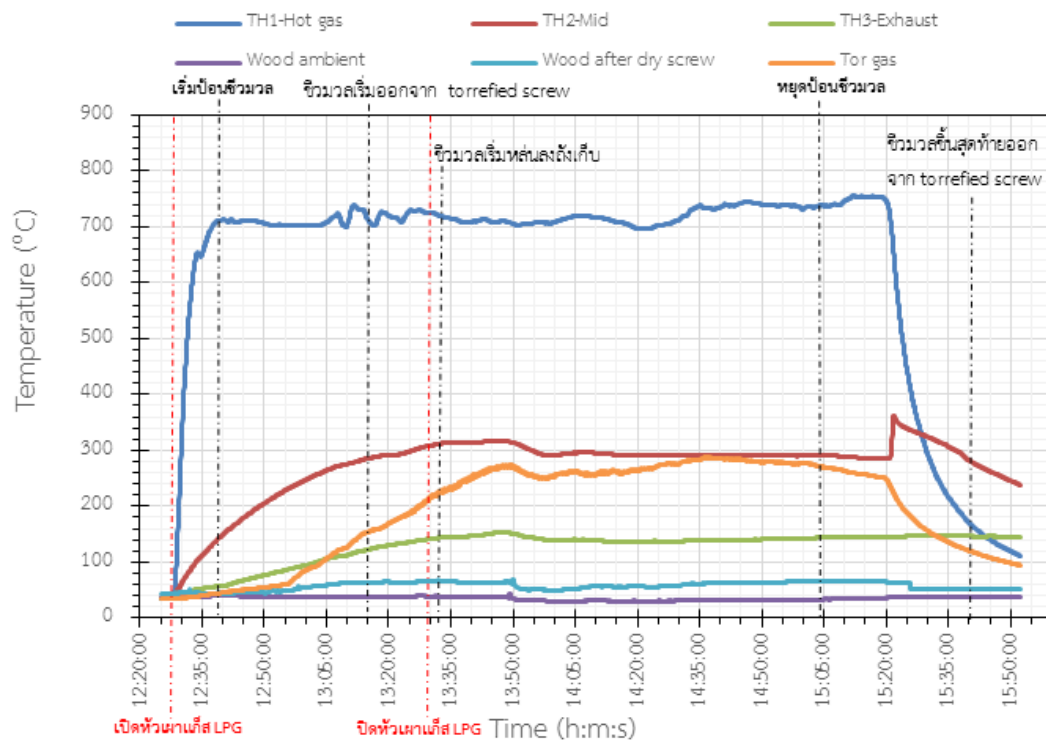


ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงผลการวัดจากอุณหภูมิของการทดลองเงื่อนไขที่ 1

## ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 2

จากการทดลองตามเงื่อนไขการทดลองที่ 2 เริ่มใช้ชุด LPG Burnner เวลา 12.28 น. เริ่มป้อนชีวมวลเวลา 12.38 น. ชีวมวลอัดเม็ดจะใช้เวลาอยู่ใน Drying Screw และ Torrefaction Screw ที่ 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ โดยมี Burner ให้ความร้อนอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิ Torrgas เฉลี่ยอยู่ที่ 180-200 องศาเซลเซียส Torrgas สามารถติดไฟได้ดีสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิง LPG ได้ จากการชั่งน้ำหนักถังแก๊สปิโตรเลียมเหลว LPG ก่อนและหลังการทดลอง ซึ่งแสดง พบว่ามีเชื้อเพลิง LPG ถูกใช้ไปจำนวน 1.64 กิโลกรัม ตั้งแต่เวลา 12.28-13.29 น. เป็นเวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมง 1 นาที (อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊ส LPG 1.64 kg/h) หลังจากนั้นใช้ Torrgas เป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักในการให้ความร้อน ตั้งแต่เวลา 13.22-15.27 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 5 นาที เมื่อหยุดการนำชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชันแบบสกรูเอียงที่เวลา 15.04 น. ใช้เวลาดังแต่เริ่มจนหยุดนำชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริรีแฟคชันแบบสกรูเอียงที่ 12.38-15.04 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 26 นาที จะเห็นได้ว่า Torrgas ไม่เพียงพอที่จะเป็นแหล่งความร้อนหลัก ทอริรีไฟด์สีน้ำตาลเข้มที่ได้มี

อัตราส่วนมากที่สุดจากทั้งสามสีแสดงในภาพประกอบ 42 น้ำหนักของชีวมวลทอริไฟด์ที่ได้จากการทดลอง 32.39 กิโลกรัม จากชีวมวลอัดเม็ดทั้งหมด 50 กิโลกรัม น้ำหนักของชีวมวลทอริไฟด์ลดลงไป 35.22% เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

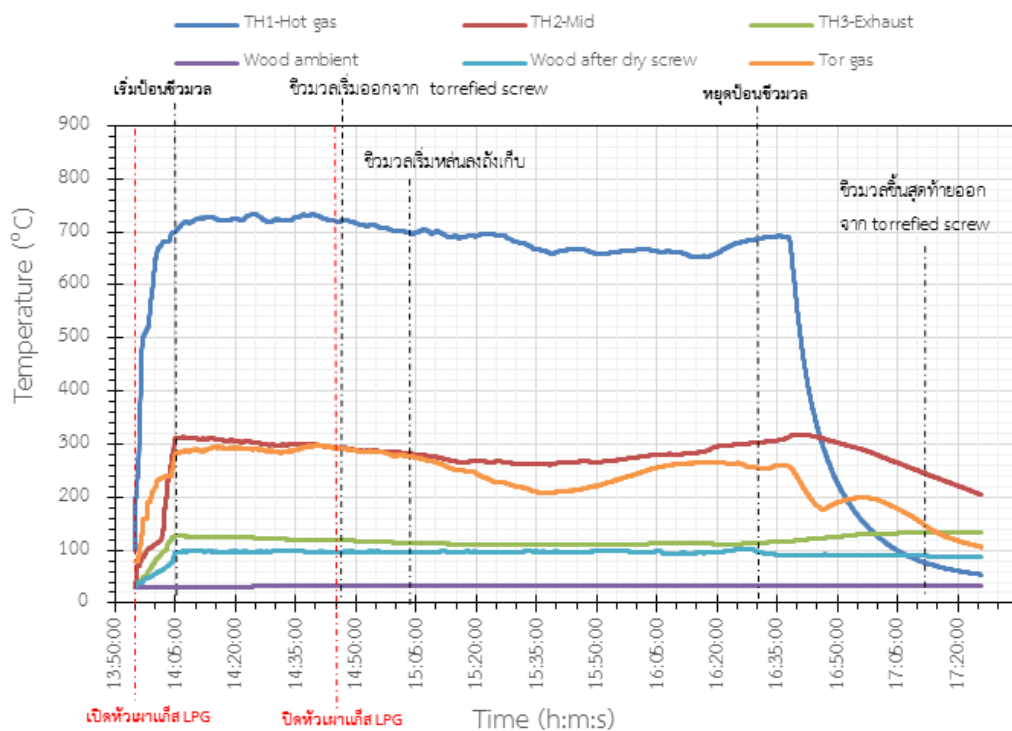


ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงผลการวัดจากอุณหภูมิของการทดลองเงื่อนไขที่ 2

### ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 3

จากการทดลองทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 3 เริ่มใช้ชุด LPG Burnner เวลา 13.55 น. เริ่มป้อนชีวมวลเวลา 14.05 น. ชีวมวลอัดเม็ดจะใช้เวลาอยู่ใน Drying Screw และ Torrefaction Screw ที่ 20 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ จากการซึ่งน้ำหนักแก๊สปิโตรเลียมเหลว(LPG) ก่อนและหลังการทดลอง พบว่ามีเชื้อเพลิง LPG ถูกใช้ไปจำนวน 1.48 กิโลกรัม ตั้งแต่เวลา 13.55 - 14.45 น. เป็นเวลาทั้งหมด 50 นาที (อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊ส LPG 1.78 kg/h) หลังจากนั้นใช้ Torrgas เป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักในการให้ความร้อน ตั้งแต่เวลา 14.45 – 16.56 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 11 นาที เมื่อหยุดการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้นแบบสกรูเฉียงที่เวลา 16.31 น. ใช้เวลาตั้งแต่เริ่มจนหยุดนำชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริไฟด์ชั้น

แบบสกรูเอียงที่ 14.05-16.31 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 26 นาที จะเห็นได้ว่า Torrgas ไม่เพียงพอที่จะเป็นแหล่งความร้อนหลัก ทอริไฟด์ส์ดำที่ได้มีอัตราส่วนมากที่สุดจากทั้งสามสี น้ำหนักของทอริไฟด์ที่ได้จากการทดลอง 26.31 กิโลกรัม จากชีวมวลอัดเม็ดทั้งหมด 50 กิโลกรัม น้ำหนักของชีวมวลทอริไฟด์ลดลงไป 47.38% เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น



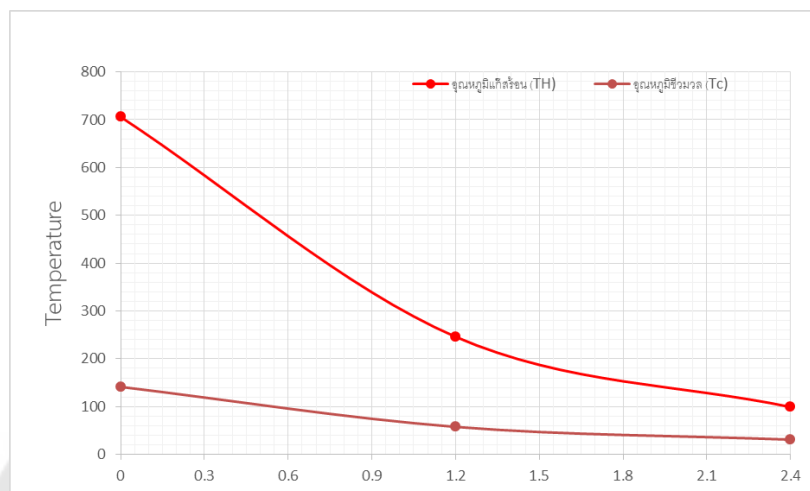
ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงผลการวัดจากอุณหภูมิของการทดลองเงื่อนไขที่ 1

### ผลการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับชีวมวลอัดเม็ด

#### ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 1

จากการทดลองเงื่อนไขที่ 1 พบว่าระบบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ที่ ช่วงเวลาระหว่าง 11.15 – 13.30 น. แก๊สร้อนเข้าสู่ Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_1$ ) มีค่า 705.82 องศาเซลเซียส แก๊สร้อนออกจาก Torrefied Screw เพื่อเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของ ( $T_2$ ) มีค่า 246.11 องศาเซลเซียส และแก๊สร้อนที่ออกจาก Drying screw อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_3$ ) มีค่า 99.25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_4$ ) มีค่า 31.02 องศาเซลเซียส ชีวมวลอัดเม็ดออกจาก Drying screw เพื่อเข้าสู่

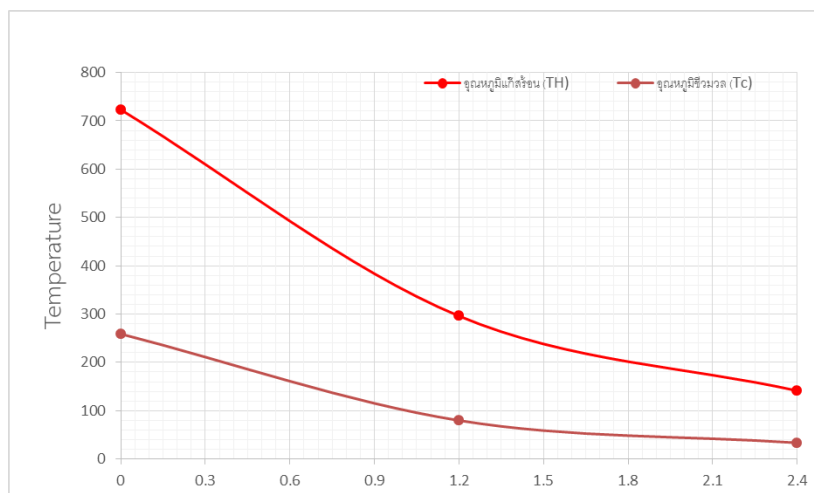
Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_5$ ) มีค่า 57.73 องศาเซลเซียส และ ชีวมวลทอริไฟด์และทอร์แก๊สออกจาก Torrefied screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_6$ ) มีค่า 141.62 องศาเซลเซียส จากการทดลองสังเกตได้ว่าในช่วงนี้ทอร์แก๊สสามารถติดไฟได้ดีจนสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนทดแทนแก๊สแอลพีจีได้



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองที่ 2  
เงื่อนไขที่ 1

### ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 2

จากการทดลองเงื่อนไขที่ 2 พบว่าระบบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่ ช่วงเวลาระหว่าง 13.20 – 15.20 น. แก๊สร้อนเข้าสู่ Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_1$ ) มีค่า 723.1 องศาเซลเซียส แก๊สร้อนออกจาก Torrefied Screw เพื่อเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของ ( $T_2$ ) มีค่า 296 องศาเซลเซียส และแก๊สร้อนที่ออกจาก Drying screw อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_3$ ) มีค่า 141.4 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_4$ ) มีค่า 33.6 องศาเซลเซียส ชีวมวลอัดเม็ดออกจาก Drying screw เพื่อเข้าสู่ Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_5$ ) มีค่า 79.9 องศาเซลเซียส และ ชีวมวลทอริไฟด์และทอร์แก๊สออกจาก Torrefied screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_6$ ) มีค่า 259 องศาเซลเซียส จากการทดลองสังเกตได้ว่าในช่วงนี้ทอร์แก๊สสามารถติดไฟได้ดีจนสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนทดแทนแก๊สแอลพีจีได้

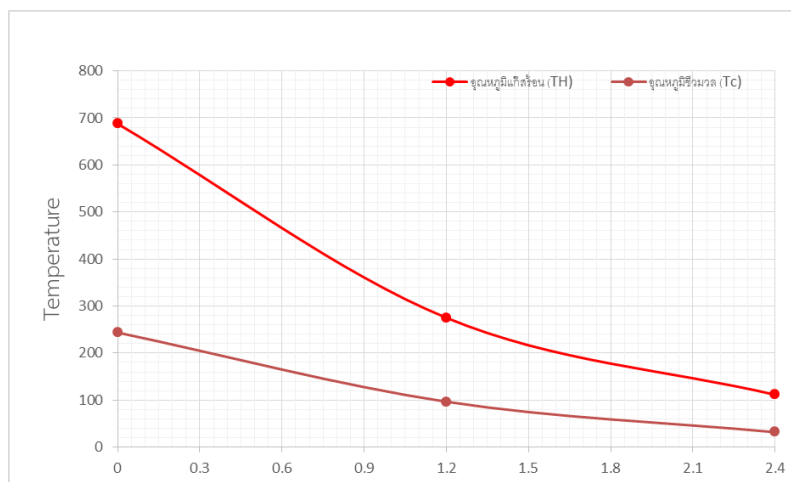


ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองเงื่อนไขที่

2

### ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 3

จากการทดลองเงื่อนไขที่ 3 พบว่าระบบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่ ช่วงเวลาระหว่าง 14.50 – 16.25 น. แก๊สร้อนเข้าสู่ Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_1$ ) มีค่า 687.61 องศาเซลเซียส แก๊สร้อนออกจาก Torrefied Screw เพื่อเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของ ( $T_2$ ) มีค่า 275.08 องศาเซลเซียส และแก๊สร้อนที่ออกจาก Drying screw อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_3$ ) มีค่า 111.5 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_4$ ) มีค่า 31.92 องศาเซลเซียส ชีวมวลอัดเม็ดออกจาก Drying screw เพื่อเข้าสู่ Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_5$ ) มีค่า 96.69 องศาเซลเซียส และ ชีวมวลทอริไฟด์และทอร์แก๊สออกจาก Torrefied screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_6$ ) มีค่า 243.73 องศาเซลเซียส จากการทดลอง สังเกตได้ว่าในช่วงนี้ทอร์แก๊สสามารถติดไฟได้ดีจนสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนทดแทนแก๊สแอลพีจีได้



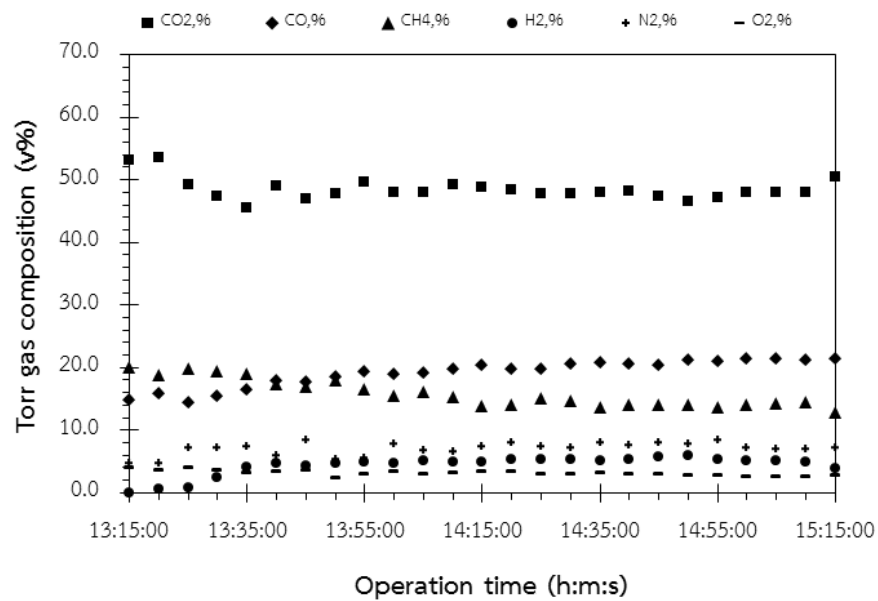
ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองเงื่อนไขที่

3

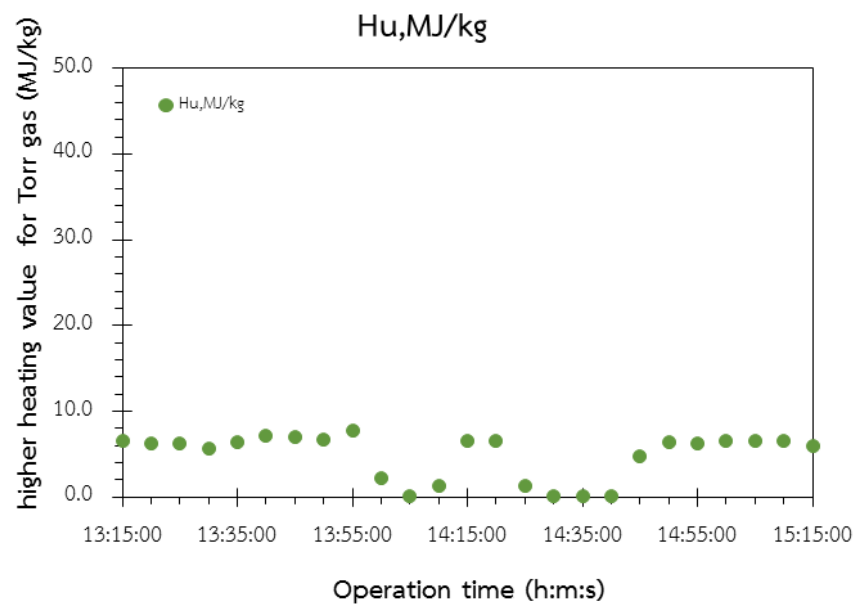
ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิระหว่างแก๊สร้อนและชีวมวลอัดเม็ดที่ไหลเข้าและออก จากเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชั่นแบบสตูเอียงซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนรอบเปลือก ของท่อปฏิกรณ์ไปยังเม็ดของแข็งที่ไหลตามใบสกรูลำเลียงภายในเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชั่นเพื่อ เปลี่ยนชีวมวลอัดเม็ดเป็นชีวมวลทอร์รีไฟด์ แก๊สร้อนถ่ายเทความร้อนไปสู่ชีวมวลอัดเม็ดในระบบ เมื่อชีวมวลอัดเม็ดอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ชีวมวลอัดเม็ดถูกไล่ความชื้นและสารระเหยออกมาอยู่ใน รูปของแก๊สเรียกว่าทอร์แก๊ส (Torrgas) และสามารถนำทอร์แก๊สมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตแก๊สร้อน ทดแทนการใช้เชื้อเพลิง LPG ได้

### การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟคชั่นของการทดลองที่ 2

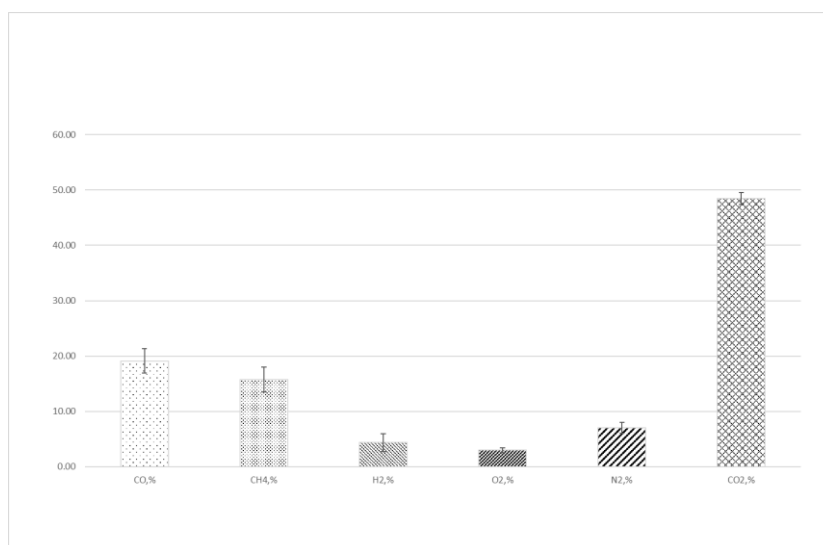
จากภาพประกอบ 29 และภาพประกอบ 30 พบว่าเวลา 12.40 – 13.05 น. เป็นช่วงที่ Torrgas สามารถนำมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ มีอุณหภูมิเฉลี่ยของทอร์แก๊สมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่อยู่ที่ 271.45 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของทอร์แก๊สแห่งพบว่า มีองค์ประกอบของ แก๊ส  $O_2$  ,  $CO_2$  ,  $CO$  ,  $H_2$  ,  $CH_4$  และ  $N_2$  เฉลี่ยอยู่ที่ 2.99%, 48.86%, 19.11%, 4.34%, 15.73% และ 7.03% ตามลำดับ และค่าความร้อนของทอร์แก๊สแห่งที่ได้อยู่ระหว่าง 5.97-7.71 MJ/kg



ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงการวิเคราะห์แก๊สของทอร์แก๊สแห้งที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ



ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงค่าความร้อนของทอร์แก๊สแห้งที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ

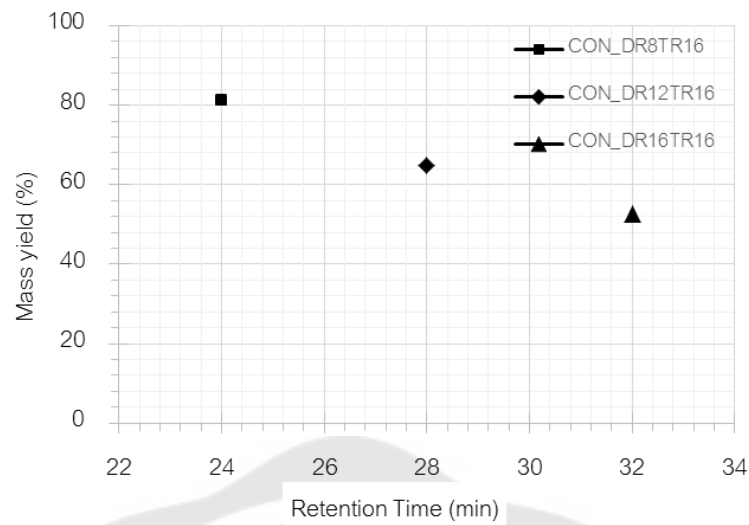


ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงแสดงอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ

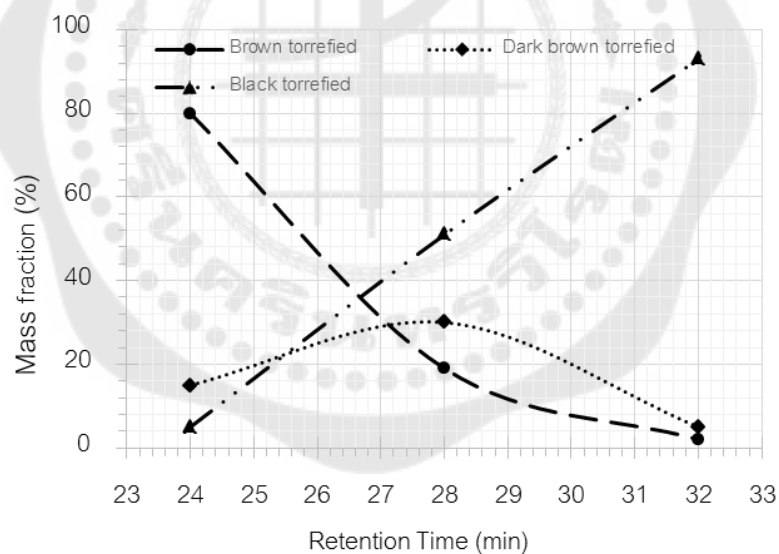
## การวิเคราะห์ค่า Mass Yield และ Energy Yield ของการทดลองที่ 2

ชีวมวลอัดเม็ดและชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ที่แยกมาทั้ง 3 ส่วนถูกวิเคราะห์ค่าความร้อน องค์ประกอบโดยประมาณ และองค์ประกอบโดยละเอียด ผลการวิเคราะห์พบว่า ชีวมวลอัดเม็ด เชื้อเพลิงทอริไฟต์สีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้ม และสีดำ มีค่าความร้อน 18.06, 18.91 และ 24.03 MJ/kg ตามลำดับ โดยมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจากวัตถุดิบซึ่งมีค่าความร้อน 16.20 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟต์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลได้เชิงมวล พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการรับความร้อนที่นานขึ้นจาก 81.29, 64.78 และ 52.62% ตามลำดับ สอดคล้องกับผลของ Nam และคณะที่มีผลผลิตทอริไฟต์ทะเลายปาล์มเปล่ามีค่า 61% (Nam, Park, Kim, & Gu, 2016) และสัดส่วนโดยมวลของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ทั้งสามลักษณะสี (Mass fraction) พบว่ามีชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ที่มีลักษณะสีเป็นสีน้ำตาลมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น คือ 80, 19, 2% ตามลำดับ, ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ที่มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น คือ 15, 30, 5% ตามลำดับ และชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ที่มีลักษณะสีน้ำตาลดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ชีวมวลรับความร้อนที่มากขึ้น คือ 5, 51 และ 93% ตามลำดับ



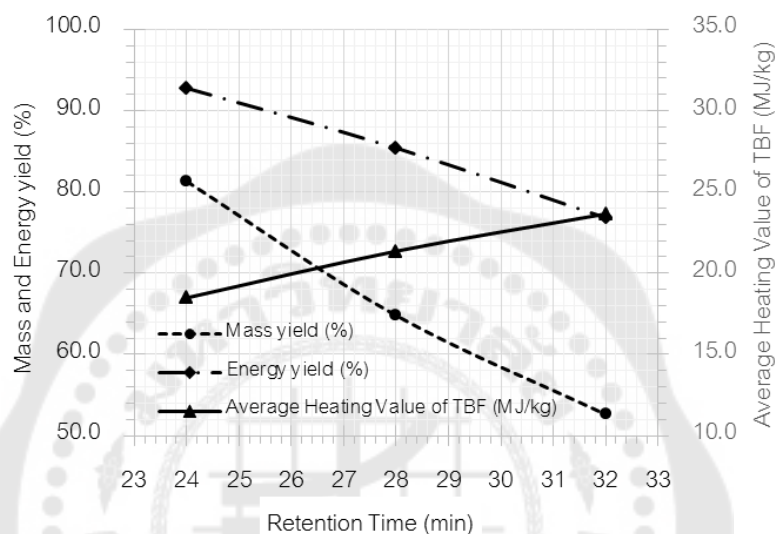
ภาพประกอบ 32 ผลได้เชิงมวลของแต่เงื่อนไขในการทดลองที่ 2



ภาพประกอบ 33 สัดส่วนของเชื้อเพลิงทอริไฟต์แบ่งตามลักษณะสี

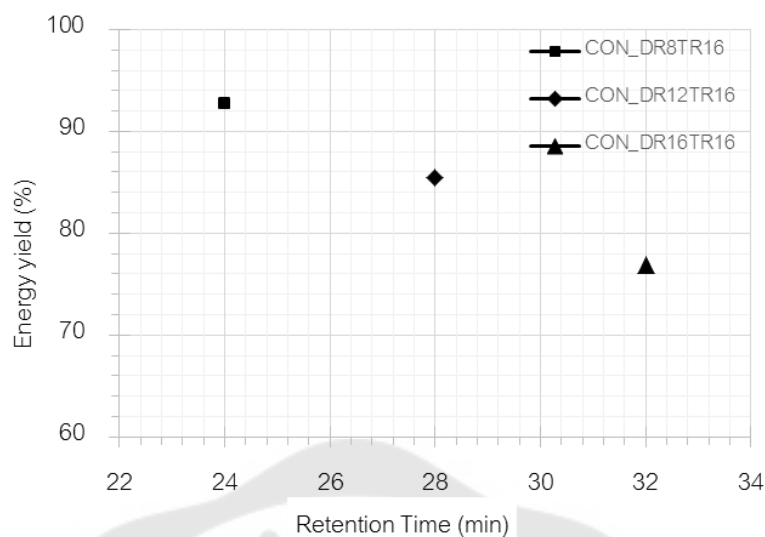
เมื่อนำชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ตามลักษณะสีทั้งสามลักษณะสีไปวิเคราะห์ค่าความร้อน องค์ประกอบโดยประมาณ และองค์ประกอบโดยละเอียด ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN รุ่น CHN286 ยี่ห้อ Leco ณ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าผลการส่งวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นถึง

24.03 MJ/kg จาก 18.06 MJ/kg และมีค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18.49, 21.36 และ 23.65 MJ/kg เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 24, 28 และ 32 นาที ตามลำดับ โดยค่าความร้อนที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ ของ Nachenius , 2015 และ Reza (R. W. Nachenius et al., 2015)



ภาพประกอบ 34 ผลได้เชิงมวล,ผลได้เชิงพลังงานและค่าความร้อนเฉลี่ยของการทดลองที่ 2

เมื่อพิจารณาค่าผลได้เชิงพลังงานพบว่า มีแนวโน้มลดลงจาก 92.78, 85.41 และ 76.82 % ตามลำดับ และเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 24, 28 และ 32 นาที ตามลำดับ โดยแนวโน้มค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 18.49, 21.36 และ 23.65 MJ/kg ตามลำดับ โดยค่าความร้อนที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Nachenius , 2015 ที่มีค่าความร้อนต่อมวลมีค่าประมาณ 20 ถึง 21 GJ / ton (LHV) (R. W. Nachenius et al., 2015)



ภาพประกอบ 35 ผลได้เชิงพลังงานของแต่ละเงื่อนไขในการทดลองที่ 2

### ผลการทดสอบหาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของชีวมวลอัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์

#### ไฟต์

ในการทดสอบหาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของชีวมวลอัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์ โดยการนำตัวอย่างจากการทดลองที่ได้ทั้ง 3 แบบมาแช่ในน้ำเพื่อดูการดูดซึมน้ำและการพองตัวของตัวอย่างผลิตภัณฑ์

เมื่อแช่ตัวอย่างทดลองในน้ำ ผ่านไปประมาณ 3 – 5 นาที พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ ตัวอย่างทดลองหมายเลข 1 หรือชีวมวลอัดเม็ด จมอยู่ใต้ผิวน้ำเกิดการพองตัวและแตกออก ตัวอย่างทดลองหมายเลข 2 หรือทอรรีไฟต์สีน้ำตาล จมอยู่ใต้ผิวน้ำเกิดการพองตัวและแตกออก แต่ใช้เวลานานกว่าตัวอย่างหมายเลข 1 ตัวอย่างทดลองหมายเลข 3 หรือทอรรีไฟต์สีน้ำตาลเข้ม มีบางส่วนที่จมอยู่ใต้ผิวน้ำ และบางส่วนที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ เกิดการพองตัวเล็กน้อย แต่ไม่เกิดการแตกออก และตัวอย่างทดลองที่ 4 หรือทอรรีไฟต์สีดำ ลอยอยู่บนผิวน้ำไม่เกิดการขยายตัวและการแตกออก



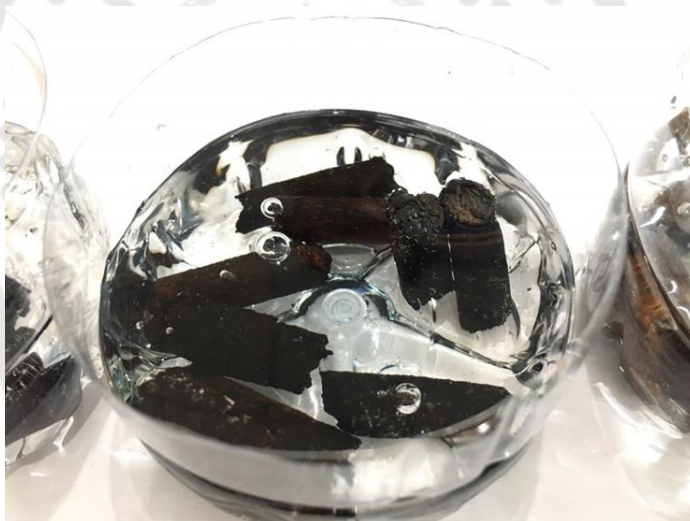
ภาพประกอบ 36 สีของซีเมนต์และทอริไฟต์



ภาพประกอบ 37 ตัวอย่างทดลองที่ 1 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้



ภาพประกอบ 38 ตัวอย่างทดลองที่ 2 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้



ภาพประกอบ 39 ตัวอย่างทดลองที่ 3 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้

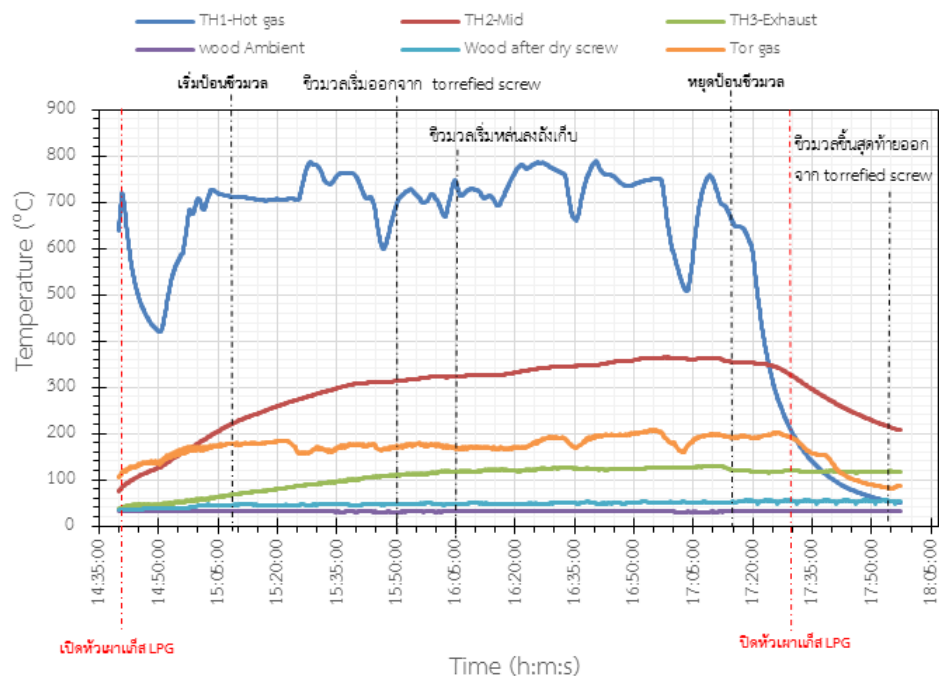


ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างทดลองที่ 4 เมื่อแช่น้ำทิ้งไว้

### ผลการทดลองที่ 3

#### ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติจากการทดลองของไม้สับ

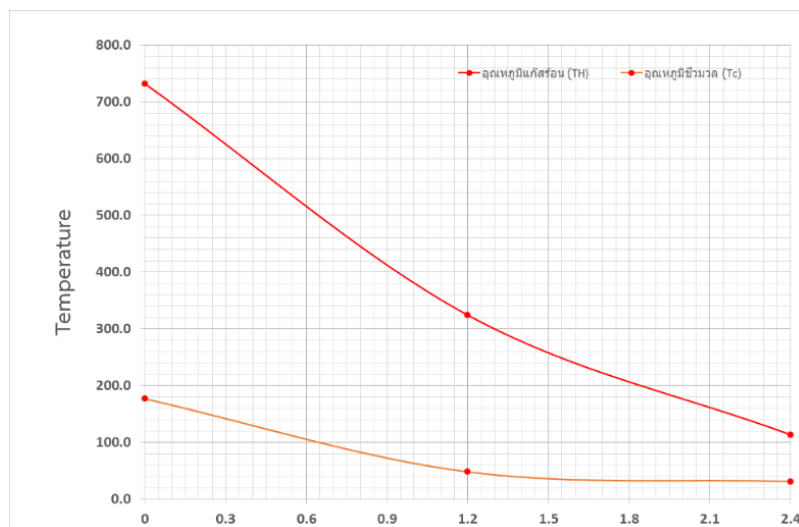
จากการทดลองการทดลองที่ 3 เริ่มใช้ชุด LPG burner เวลา 14.41 น. เริ่มป้อนชีวมวลเวลา 15.08 น. ชีวมวลอัดเม็ดจะใช้เวลาอยู่ใน Drying screw และ Torrefaction screw ที่ 25 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ จากการชั่งน้ำหนักถังแก๊สปิโตรเลียมเหลว(LPG) ก่อนและหลังการทดลอง พบว่ามีเชื้อเพลิง LPG ถูกใช้ไปจำนวน 0.9 กิโลกรัม ตั้งแต่เวลา 14.41-17.29 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 48 นาที (อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊ส LPG 0.32kg/h) หลังจากนั้นใช้ Torrgas เป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักในการให้ความร้อน ตั้งแต่เวลา 16.22-17.25 น. เป็นเวลาทั้งหมด 57 นาที เมื่อหยุดการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริไฟเคชันแบบสกรูเอียงที่เวลา 17.15 น. ใช้เวลาตั้งแต่เริ่มจนหยุดนำชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอริไฟเคชันแบบสกรูเอียงที่ 15.08 - 17.15 น. เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 7 นาที จะเห็นได้ว่า Torrgas ไม่เพียงพอที่จะเป็นแหล่งความร้อนหลัก จากรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าทอริไฟด์ออกมาเป็นสีดำทั้งหมด น้ำหนักของทอริไฟด์ที่ได้จากการทดลอง 4.8 กิโลกรัม จากชีวมวลอัดเม็ดทั้งหมด 16.75 กิโลกรัม น้ำหนักของชีวมวลทอริไฟด์ลดลงไป 71.34% เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น



ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงผลการวัดจากอุณหภูมิของการทดลองเงื่อนไขที่ 4

### ผลการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับไม้สับ

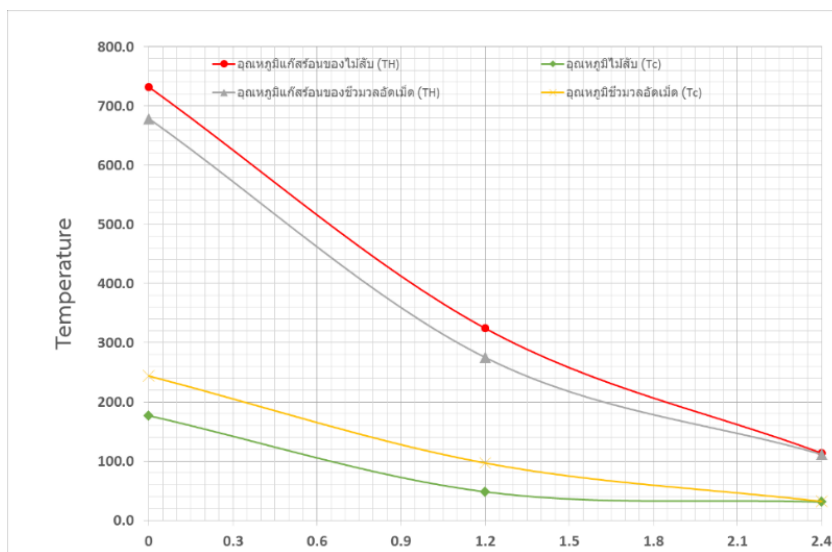
จากการทดลองที่ 3 พบว่าระบบผลิตเชื้อเพลิงทอริไฟด์เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่ ช่วงเวลาระหว่าง 15.25-16.55 น. แก๊สร้อนเข้าสู่ Torrefied screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย (TH1) มีค่า 731.87 องศาเซลเซียส แก๊สร้อนออกจาก Torrefied screw เพื่อเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของ (TH2) มีค่า 324.26 องศาเซลเซียส และแก๊สร้อนที่ออกจาก Drying screw อุณหภูมิเฉลี่ย (TH3) มีค่า 113.43 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่ Drying screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย (TC1) มีค่า 30.98 องศาเซลเซียส ชีวมวลอัดเม็ดออกจาก Drying screw เพื่อเข้าสู่ Torrefied Screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย (TC2) มีค่า 48.02 องศาเซลเซียส และ ชีวมวลทอริไฟด์และทอร์แก๊สออกจาก Torrefied screw ที่อุณหภูมิเฉลี่ย (TC3) มีค่า 176.67 องศาเซลเซียส จากการทดลองสังเกตได้ว่าในช่วงนี้ทอร์แก๊สสามารถติดไฟได้ดีจนสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนทดแทนแก๊สแอลพีจีได้



ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการทดลองเงื่อนไขที่

4

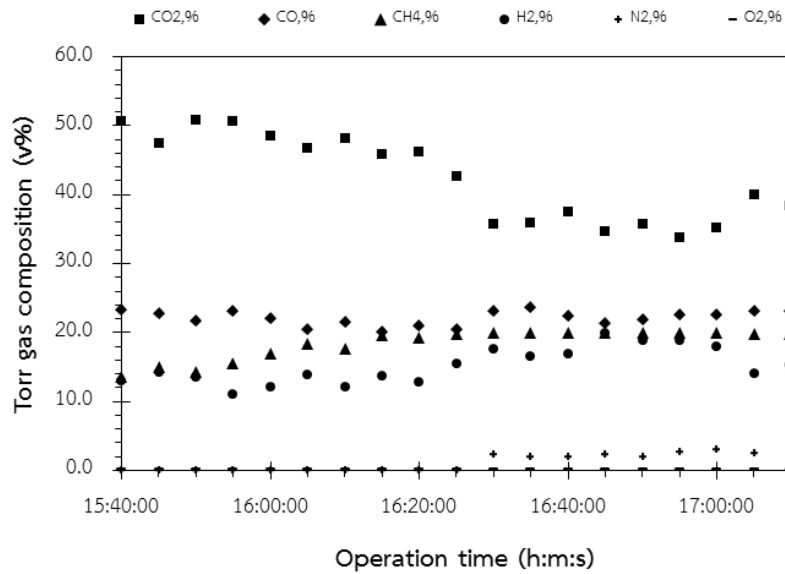
จากการทดลองเงื่อนไขที่ 1 ในการทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3 มีระยะเวลาการเคลื่อนที่ของวัสดุอยู่ใน Drying screw และ Torrefied screw ที่เท่ากันก็คือ 20 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ เมื่อนำการทดลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า แก๊สร้อนของไม้สับมีอุณหภูมิสูงกว่าวัสดุที่เป็นชีวมวลอัดเม็ดที่จุดเริ่มต้นคือ 731.87 องศาเซลเซียส และ 678.61 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่อุณหภูมิของวัสดุไม้สับมีค่า 176 องศาเซลเซียสกลับน้อยกว่าอุณหภูมิของวัสดุชีวมวลอัดเม็ดที่มีค่า 243.73 องศาเซลเซียส ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน และความสัมพันธ์นี้ยังคงเกิดขึ้นไปจนถึงช่วงกลางของการทดลอง หลังจากนั้นอุณหภูมิของแก๊สร้อนและวัสดุทั้งสองมีแนวโน้มของอุณหภูมิลดลงจนอยู่ ณ อุณหภูมิจุดเดียวกัน



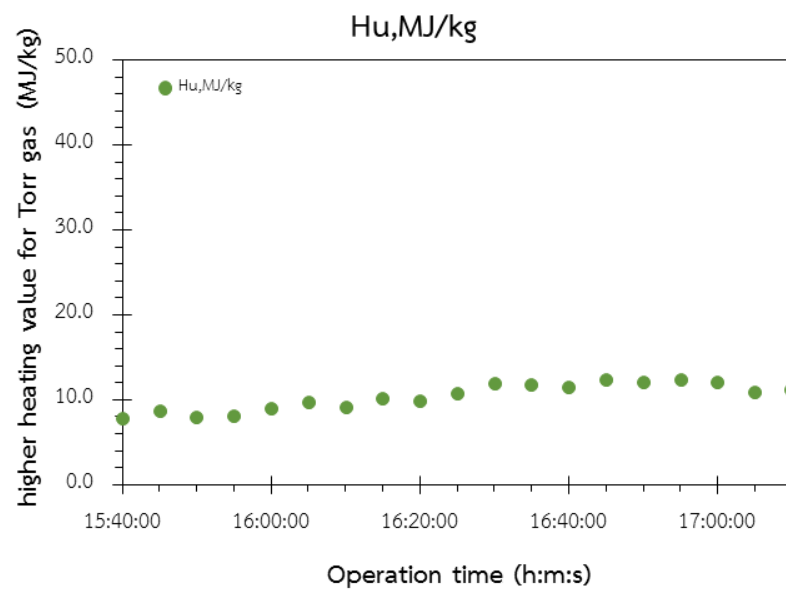
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากของ  
เงื่อนไขที่ 3 ในการทดลองที่ 2 กับ การทดลองที่ 3

### การวิเคราะห์แก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีรีแฟคชั่นของที่ทดลองที่ 3

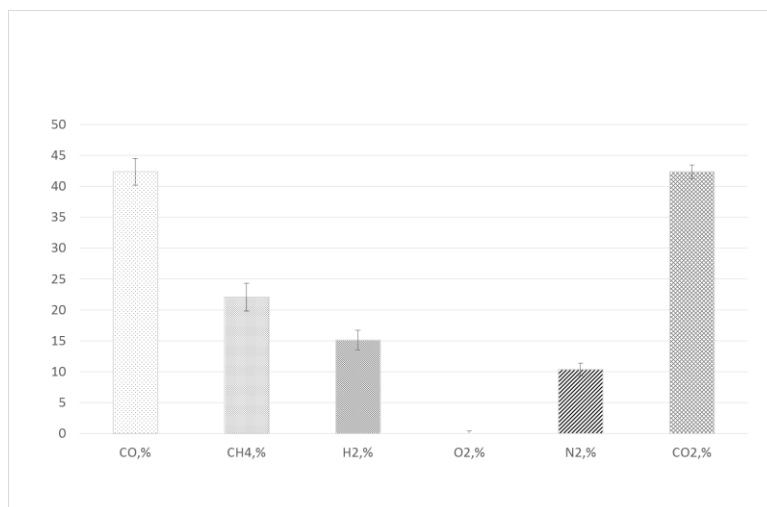
จากภาพประกอบ 44 และภาพประกอบ 45 พบว่าเวลา 15:40:00-17:00:00 เป็นช่วง  
ที่ Torrgas สามารถนำมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ มีอุณหภูมิเฉลี่ยของทอริกแก๊สมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่อยู่ที่  
176.68 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของทอริกแก๊สแห่งพบว่า มีองค์ประกอบของ  
แก๊ส  $O_2$  ,  $CO_2$  ,  $CO$  ,  $H_2$  ,  $CH_4$  และ  $N_2$  เฉลี่ยอยู่ที่ 0%, 42.33%, 22.01%, 15.11%, 18.30% และ  
1.07%ตามลำดับ และค่าความร้อนของทอริกแก๊สแห่งที่ได้มีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้นจาก 7.8 MJ/kg  
เป็น 12.3 MJ/kg



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงการวิเคราะห์แก๊สของทอร์แก๊สแห้งที่ใช้ไม้สับเป็นวัสดุ



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงค่าความร้อนของทอร์แก๊สแห้งที่ใช้ไม้สับเป็นวัสดุ



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงแสดงอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ไม้สับเป็นนิวสตุ

### การหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรและพลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์และไม้สับทอริไฟต์อัดเม็ด

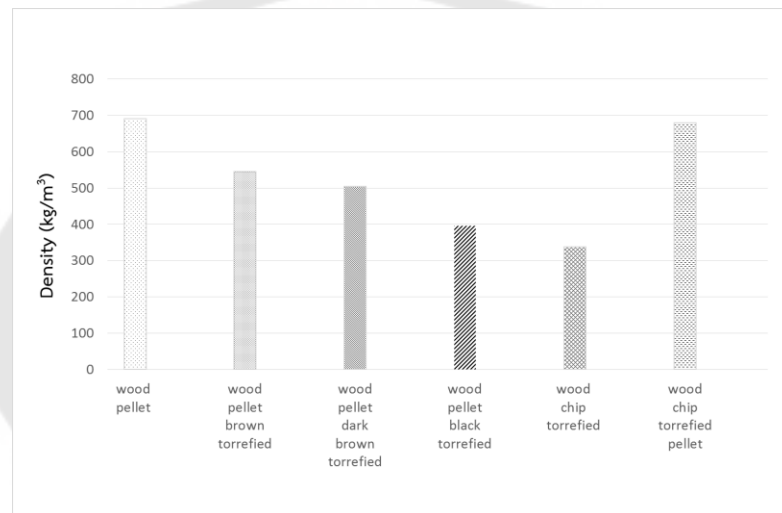
ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดมีค่า  $690 \text{ kg/m}^3$ , ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์สีน้ำตาลมีค่า  $545 \text{ kg/m}^3$ , ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์สีน้ำตาลเข้มมีค่า  $505 \text{ kg/m}^3$ , ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์สีดำมีค่า  $395 \text{ kg/m}^3$ , ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของไม้สับทอริไฟต์มีค่า  $338 \text{ kg/m}^3$  และความหนาแน่นของไม้สับทอริไฟต์อัดเม็ดมีค่า  $680 \text{ kg/m}^3$

พลังงานของชีวมวลอัดเม็ดมีค่า  $11.18 \text{ GJ/m}^3$ , ค่าพลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์สีน้ำตาลมีค่า  $9.84 \text{ GJ/m}^3$ , ค่าพลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์สีน้ำตาลเข้มมีค่า  $9.55 \text{ GJ/m}^3$ , ค่าพลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์สีดำมีค่า  $9.49 \text{ MJ/m}^3$ , ค่าพลังงานเชิงปริมาตรของไม้สับทอริไฟต์มีค่า  $5.48 \text{ GJ/m}^3$  และค่าพลังงานเชิงปริมาตรของไม้สับทอริไฟต์อัดเม็ดมีค่า  $16.34 \text{ GJ/m}^3$

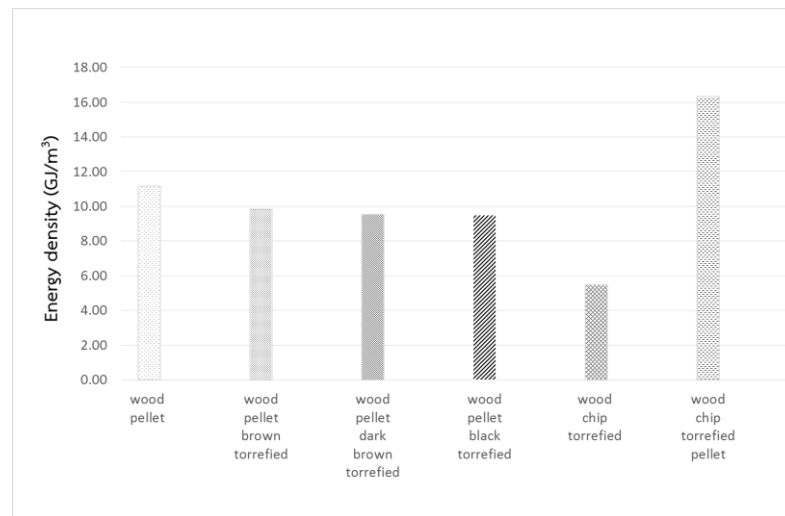
จะเห็นว่าเมื่อนำไม้สับที่ผ่านกระบวนการทอริฟิเคชันแล้วกลายเป็นไม้สับทอริไฟต์นำมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเม็ดทำให้ความหนาแน่นและพลังงานเชิงปริมาตรที่ได้มีค่ามากกว่าชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ทั้งสามสีมีค่าจากไม้สับทอริไฟต์และมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับชีวมวลอัดเม็ดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทอริฟิเคชัน



ภาพประกอบ 47 การแปรรูปจากไม้สับทอริไฟด์เป็นไม้สับทอริไฟด์อัดเม็ดโดยเครื่องอัดเม็ด



ภาพประกอบ 48 ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์และไม้สับทอริไฟด์อัดเม็ด



ภาพประกอบ 49 พลังงานเชิงปริมาตรของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์ และไม้สับทอริไฟด์อัดเม็ด



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดด้วยกระบวนการทอริฟิเคชันแบบสกรูเอียงซึ่งกำหนดให้มี 3 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 และ 2 แบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 3 เงื่อนไขในแต่ละการทดลองและการทดลองที่ 3 มีเพียง 1 เงื่อนไข รวมทั้งหมด 7 เงื่อนไขจากการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 และ 2 ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเป็นวัสดุ มีอัตราการป้อน 17.5 และ 20 kg/h ตามลำดับ จำนวน 50 kg โดยการทดลองที่ 3 ใช้ไม้สับเป็นวัสดุ มีอัตราการป้อน 10 kg/h จำนวน 16.5 kg โดยใช้กำหนดให้ระยะเวลาที่ให้วัสดุรับความร้อนอยู่ในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เป็นตัวกำหนดในการแบ่งเงื่อนไข ดังนี้

การทดลองที่ 1 มีระยะเวลาการรับความร้อนในสกรูอบแห้ง (Drying screw) เท่ากับ 8 นาทีและในสกรูทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 8, 12 และ 16 นาที จากผลการทดลองพบว่า ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานมีแนวโน้มลดลงจาก 80.2% เป็น 61% และจาก 93.17% เป็น 87.77% ตามลำดับ ตามเวลาที่วัสดุอยู่ในทอริไฟด์สกรูนานขึ้น เมื่อแยกผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์ตามสีแล้วพิจารณาสัดส่วนพบว่า แนวโน้มของเชื้อเพลิงทอริไฟด์สีดำมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาในการรับความร้อนที่นานขึ้น ในขณะที่ทอริไฟด์สีน้ำตาล และสีน้ำตาลเข้ม มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสรุปได้ว่าการทดลองเงื่อนไขที่ 3 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง โดยมีระยะเวลาการรับความร้อนรวมเท่ากับ 24 นาที มีปริมาณการไหลภายในสกรูอบแห้ง และทอริไฟด์สกรูเท่ากับ 11% และ 21.5% ตามลำดับ มีผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 61% และ 87.77% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์มากถึง 23.31 MJ/kg และมีอัตราส่วนของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์สีดำมากที่สุด ซึ่งเป็นลักษณะสีของชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์ที่มีค่าความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 24.03 MJ/kg โดยทั่วไปความต้องการของโรงไฟฟ้าในการนำเชื้อเพลิงทอริไฟด์ไปใช้เป็นแหล่งความร้อนซึ่งมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 21-22 MJ/kg

การทดลองที่ 2 มีระยะเวลาการรับความร้อนในสกรูอบแห้ง (Drying screw) เท่ากับ 8, 12 และ 16 นาที ตามลำดับและในสกรูทอริไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 16 นาที จากผลการทดลองพบว่า ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานมีแนวโน้มลดลงจาก 81.29% เป็น 52.62% และจาก 92.78% เป็น 76.80% ตามเวลาที่วัสดุอยู่ในสกรูอบแห้งนานขึ้น จากผลการ

วิเคราะห์แก๊สร้อนจากสารระเหย (Torrgas) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถนำมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้อยู่ที่ 271.45 องศาเซลเซียส และมีปริมาณ  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  และ  $N_2$  เฉลี่ยอยู่ที่ 2.99%, 48.86%, 19.11%, 4.34%, 15.73% และ 7.03% ตามลำดับ และค่าความร้อนของทอร์แก๊สแห้งเฉลี่ยที่ 6.84 MJ/kg เมื่อแยกผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ตามสีแล้วพิจารณาสัดส่วนพบว่า แนวน้ำของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์สีดำมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาในการรับความร้อนที่นานขึ้น ในขณะที่ทอร์ไฟด์สีน้ำตาลมีแวน้ำมลดลงและสีน้ำตาลเข้มมีแวน้ำเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งสรุปได้ว่าการทดลองเงื่อนไขที่ 3 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง โดยมีระยะเวลาการรับความร้อนรวมเท่ากับ 32 นาที มีปริมาณการไหลภายในสกรูอบแห้งและทอร์รีไฟด์สกรูเท่ากับ 21.5% มีผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 52.62% และ 76.82% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟด์มากถึง 23.65 MJ/kg และมีอัตราส่วนของชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟด์สีดำมากที่สุด และมีปริมาณแก๊สร้อนจากสารระเหย (Torrgas) ที่มากพอสามารถติดไฟได้ดี ใช้เป็นแหล่งความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิง LPG ได้

การทดลองที่ 3 มีระยะเวลาการรับความร้อนในสกรูอบแห้ง (Drying screw) และในสกรูทอร์รีไฟด์สกรู (Torrefied screw) เท่ากับ 16 นาที และมีระยะเวลาการรับความร้อนรวมเท่ากับ 32 นาที จากผลการทดลองพบว่า ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 51.58% และ 76.50% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงไม้สับทอร์รีไฟด์เท่ากับ 24.03 MJ/kg จากผลการวิเคราะห์แก๊สร้อนจากสารระเหย (Torrgas) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถนำมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้อยู่ที่ 176.68 องศาเซลเซียส และมีปริมาณ  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  และ  $N_2$  เฉลี่ยอยู่ที่ 0, 42.33, 22.01, 15.11, 18.30 และ 1.07% ตามลำดับ เมื่อเทียบปริมาณธาตุดังกล่าวกับการทดลองที่ 2 พบว่า  $O_2$ ,  $CO_2$  และ  $N_2$  มีค่าน้อยกว่าแต่ค่าของ  $CO$ ,  $H_2$  และ  $CH_4$  มีค่ามากกว่า ส่งผลให้ค่าความร้อนเฉลี่ยของทอร์แก๊สแห้งที่ได้จากการทดลองที่ 3 มีค่าเท่ากับ 10.05 MJ/kg ซึ่งมากกว่าการทดลองที่ 2 ที่ 6.84 MJ/kg และเมื่อนำไม้สับทอร์รีไฟด์มาผ่านการอัดเม็ดพบว่ามีความหนาแน่นเท่ากับ  $680 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีค่าความหนาแน่นมากกว่าชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ทั้งสามลักษณะสี และมีค่าพลังงานต่อปริมาตรเท่ากับ 16.34 MJ/kg

### ข้อเสนอแนะ

1. ควบคุมมาตรฐานความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุม Drying screw และ Torrefaction screw เนื่องจากหากมีค่ามากเกินไปจะส่งผลต่อค่าการทดลอง

2. เนื่องจากพบปัญหาเกี่ยวกับการจัดการปริมาณควันจึงเห็นควรว่าควรใช้ Blower ที่มีกำลังเพิ่มขึ้น
3. ยังมีจุดรั่วของแก๊สเนื่องจากยังใส่ฉนวนได้ไม่แน่นพอและรอยเชื่อมไม่ประสานกัน จึงควรใส่ฉนวนเพิ่มและเชื่อมเพิ่มเติม



## บรรณานุกรม

- BTG. (2017). Pilot plant for torrefaction & carbonisation. Retrieved from <http://www.btgworld.com/en/rtd/test-facilities/torrefaction>
- Crnogaca, B. (2017). Torrefaction as a process for biomass conversion into biocoal. *Tehnika*, 72, 323-327. doi:10.5937/tehnika1703323C
- Mei, Y., Liu, R., Yang, Q., Yang, H., Shao, J., Draper, C., . . . Chen, H. (2015). Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas. *Bioresource Technology*, 177, 355-360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.113>
- Nachenius, R., Wardt, T., Ronsse, F., & Prins, W. (2015). Residence time distributions of coarse biomass particles in a screw conveyor reactor. *Fuel Processing Technology*, 130, 87-95. doi:10.1016/j.fuproc.2014.09.039
- Nachenius, R. W., van de Wardt, T. A., Ronsse, F., & Prins, W. (2015). Torrefaction of pine in a bench-scale screw conveyor reactor. *Biomass and Bioenergy*, 79, 96-104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.027>
- Nam, S. B., Park, Y. S., Kim, D. J., & Gu, J. H. (2016). Torrefaction Reaction Characteristic of Various Biomass Waste on Pilot Scale of Torrefaction Reaction System. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 890-894. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.044>
- Pach, M., Vigouroux, R., & Björnbo, E. (2002). *Torrefied Biomass a Substitute for Wood and Charcoal*.
- Reza, M. T., Coronella, C., Sullivan, S., Williams, K., & Shekarriz, R. (2015). *Design and Operation of a Bench scale Continuous Reactor for Hydrothermal Carbonization*.
- Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Bach, L. S., Stelte, W., & Henriksen, U. B. (2014). Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108, 109-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.05.010>
- Silva, C., Vital, B., Carneiro, A., Costa, E., Magalhães, M., & Trugilho, P. (2017). Structural

and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction. *Industrial Crops and Products*, 109, 598.

doi:10.1016/j.indcrop.2017.09.010

Tumuluru, J. S., Wright, C., Kenny, K., & Hess, J. (2011). *A Review on Biomass Densification for Energy Applications*.

Woody, G. V. (1941). Production of coke as a domestic fuel source: The Hayes process for carbonizing coal at low temperatures. *Industrial and Engineering Chemistry Vol.* 33.

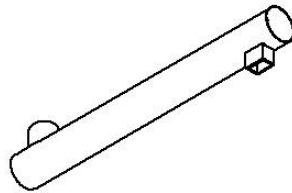
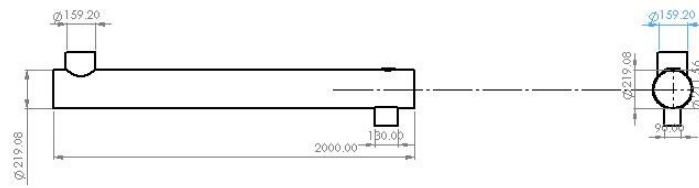
สมมาส แก้วล้วน, ด. จ., สุรัชย์ จันทร์ศรี, เวดิน ปิยรัตน์. (2013). การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวล ขนาด 20 kW. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 8 ฉบับที่ 1



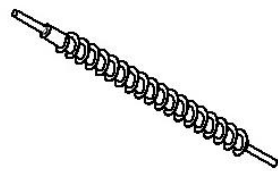
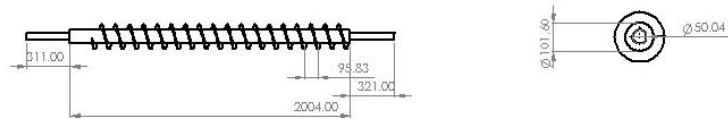




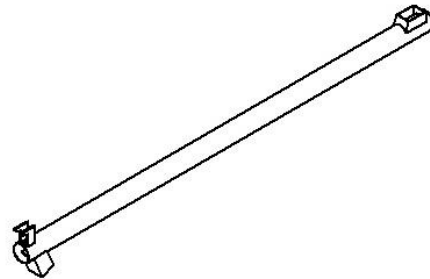
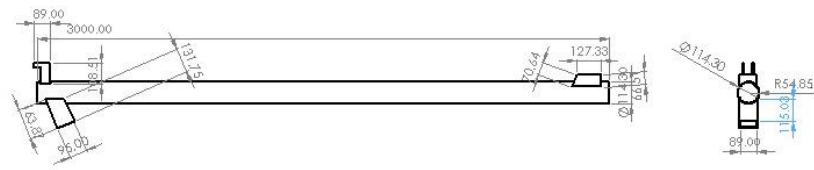
ภาคผนวก ก  
ส่วนประกอบเตาปฏิกรณ์



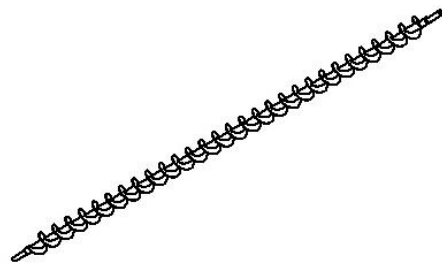
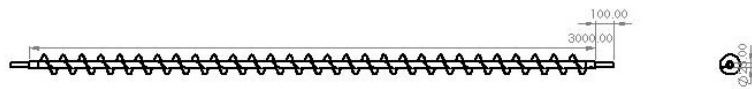
ท่อสกรูลำเรียงของสกรูส่วนบนและส่วนล่าง



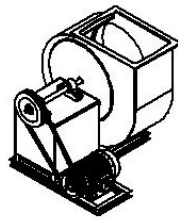
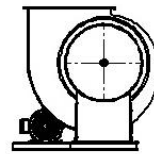
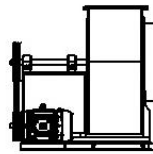
ใบสกรูลำเรียงของสกรูส่วนบนและส่วนล่าง



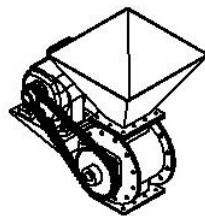
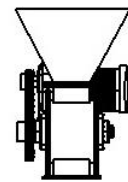
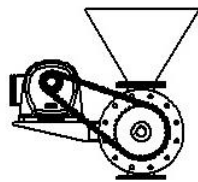
ท่อสกรูลำเรียงของชุดระบายความร้อน



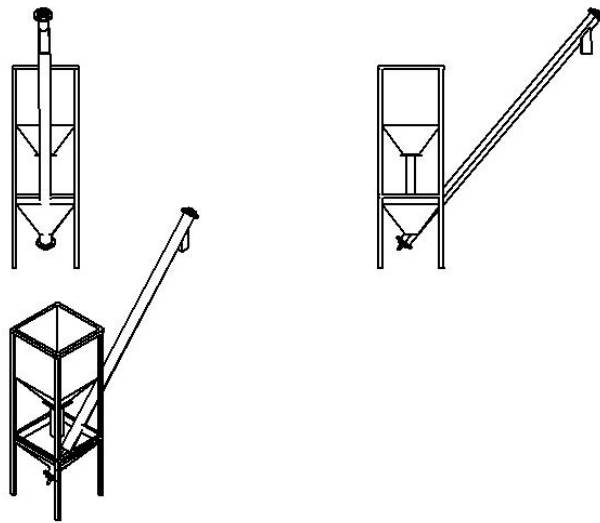
ใบสกรูลำเรียงของชุดระบายความร้อน



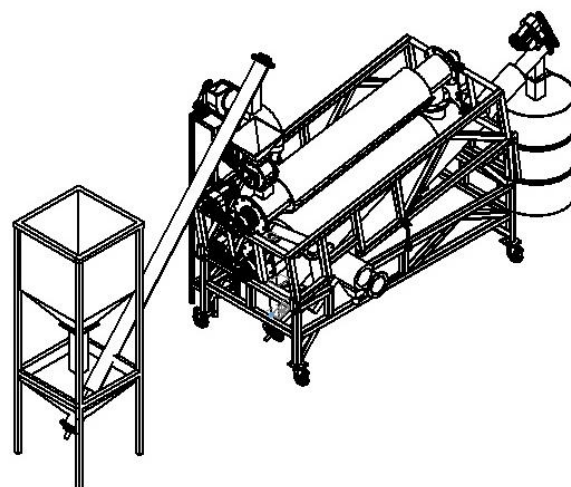
พัดลมดูด



โรตารีวาล์ว



ชุดบ่อนซีมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์



ภาพรวมเครื่องปฏิกรณ์



ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่า Mass Yield และ Energy Yield

ตาราง ข.1 คุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดและชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ทั้งสามสี

คุณสมบัติ	ชีวมวลอัดเม็ด	ทอริไฟต์สีน้ำตาล	ทอริไฟต์สีน้ำตาลเข้ม	ทอริไฟต์สีดำ
ความชื้น, %	8.33	4.66	3.85	3.35
สารระเหย, %	73.12	71.26	69.37	46.13
ค่าคงตัว, %	16.62	21.34	23.88	46.62
เถ้า, %	1.93	2.94	2.90	3.90
ไฮโดรเจน, %	6.18	5.71	5.60	4.69
คาร์บอน, %	45.40	48.23	49.87	61.37
ไนโตรเจน, %	0.14	0.70	0.71	0.76
ออกซิเจน, %	46.35	45.36	43.82	33.18
ซัลเฟอร์, %	0.00	0.00	0.00	0.00
ความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4,180	4,314.08	4,516.04	5,738.60

การหาค่า Mass Yield และ Energy Yield มีสูตรดังนี้

$$\text{MassYield} = \frac{M_T}{M_0}$$

$$\text{EnergyYield} = \text{massYield} \times \frac{HHV_T}{HHV_0}$$

- เมื่อ
- $M_0$  คือ ชีวมวลอัดเม็ดก่อนอบย่าง
  - $M_T$  คือ ชีวมวลอัดเม็ดหลังอบย่าง
  - $HHV_0$  คือ ค่าความร้อนของชีวมวลก่อนอบย่าง
  - $HHV_T$  คือ ค่าความร้อนของชีวมวลหลังอบย่าง

1. การทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 1 เงื่อนไขที่ 1

$$\text{MassYield} = \frac{40.10}{50}$$

$$= 0.802$$

$$\text{EnergyYield} = 0.802 \times \frac{18.82}{16.20}$$

$$= 0.9317$$

การทดลองครั้งที่ 1 เงื่อนไขที่ 2

$$\text{MassYield} = \frac{35.2}{50}$$

$$= 0.704$$

$$\text{EnergyYield} = 0.704 \times \frac{20.90}{16.20}$$

$$= 0.9082$$

การทดลองครั้งที่ 1 เงื่อนไขที่ 3

$$\text{MassYield} = \frac{30.50}{50}$$

$$= 0.61$$

$$\begin{aligned} \text{EnergyYield} &= 0.61 \times \frac{23.31}{16.20} \\ &= 0.8777 \end{aligned}$$

2. การทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 2 เงื่อนไขที่ 1

$$\begin{aligned} \text{MassYield} &= \frac{30.50}{50} \\ &= 0.813 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{EnergyYield} &= 0.813 \times \frac{18.49}{16.20} \\ &= 0.9278 \end{aligned}$$

การทดลองครั้งที่ 2 เงื่อนไขที่ 2

$$\begin{aligned} \text{MassYield} &= \frac{32.39}{50} \\ &= 0.648 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{EnergyYield} &= 0.648 \times \frac{21.36}{16.20} \\ &= 0.8541 \end{aligned}$$

การทดลองครั้งที่ 2 เงื่อนไขที่ 3

$$\text{MassYield} = \frac{26.31}{50}$$

$$=0.526$$

$$EnergyYield = 0.526 \times \frac{23.65}{16.20}$$

$$=0.7682$$

3. การทดลองครั้งที่ 3

$$MassYield = \frac{8.64}{16.75}$$

$$=0.5158$$

$$EnergyYield = 0.5158 \times \frac{24.03}{16.20}$$

$$=0.765$$

ตัวอย่างการหาความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ดเปรียบเทียบกับทอริไฟต์

การหาความหนาแน่น มีสูตรดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{ปริมาตร}}$$

จะได้ ความหนาแน่นของชีวมวลอัดเม็ด

$$= \frac{1.38(kg)}{0.002(m^3)} = 690kg / m^3$$

ความหนาแน่นของชีวมวลทอริไฟต์สีน้ำตาล

$$= \frac{1.09(kg)}{0.002(m^3)} = 545kg / m^3$$

ความหนาแน่นของชีวมวลทอริไฟด์สีน้ำตาลเข้ม

$$= \frac{1.01(kg)}{0.002(m^3)} = 505kg / m^3$$

ความหนาแน่นของชีวมวลทอริไฟด์สีดำ

$$= \frac{0.79(kg)}{0.002(m^3)} = 395kg / m^3$$

ความหนาแน่นของไม้สับทอริไฟด์หลังจากผ่านกระบวนการอัดเม็ด

$$= \frac{1.36(kg)}{0.002(m^3)} = 680kg / m^3$$



ภาควิชาการศึกษาศาสตร์

ตารางบันทึกผลการวัดคุณวุฒิและผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสีย

ตาราง ค.1 ผลการวัดอุณหภูมิการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 1

เวลา(min)	Hot gas	Mid	Exhaust	wood Ambient	Wood after dry screw	Torr gas
0	88.6	40.2	28.3	36.7	39.2	47.5
5	170.9	50.1	28.8	36.6	39.4	62.4
10	328.6	66.7	30.5	36.5	39	82.8
15	380	74	31.3	36.5	39.1	87.9
20	420.5	78.4	33	36.7	39.1	93.7
25	449.9	82.9	34	36.5	39.3	80.1
30	477.3	89.4	35.5	36.5	39.1	69.5
35	500.9	95.3	36.7	36.7	38.8	66.2
40	518.2	101.2	38.5	36.5	38.3	61.2
45	530.4	105.8	40.9	36.5	37.9	53.9
50	538.4	111.2	40.6	36.7	38.7	52.2
55	544.3	116.2	41.8	36.5	37.1	50.7
60	548.5	120.8	42.9	36.5	37.1	50.5
65	551.9	125.9	43.4	36.7	37.4	47.5
70	555.6	133	44.4	36.6	37.5	48.9
75	555	139.5	44.3	36.5	38.2	49.7
80	562.2	145.3	44.9	36.5	39.4	49.6
85	568.3	150	45.5	36.6	40.6	50.2
90	572.1	152.5	45.8	36.6	41.9	50.8
95	573.5	156.6	46	36.7	42.8	51.3
100	594.3	161.8	45.7	36.7	43.5	50.9
105	610.8	165.2	46.7	36.5	44.1	51.6
110	622.2	168.6	47.1	36.4	44.8	50.7

115	628.8	172.1	48.3	36.5	45.1	51.7
120	632.9	176.2	48.1	36.7	45.5	53.6
125	635.8	181.9	48.6	39	45	59
130	633.5	186.8	49	36.9	45.2	65.2
135	615.5	188.4	49.4	36.9	47.4	69.4
140	599.9	189.5	49.6	36.8	50.3	68.1
145	604.1	192.3	50.4	36.3	52.2	68.4
150	610.5	195.4	51.1	44.3	53.5	69.9
155	616.3	201.6	52.2	42.5	54.7	71.1
160	623.1	217.5	53.6	35.7	57.1	73.5
165	628.2	227.4	55.5	35.8	59.1	74.1
170	630.3	234.2	57.4	35.7	61.1	76.5
175	620.6	239.7	59.3	35.7	63.2	76.3
180	610.9	245.3	61.3	35.7	65.5	77.4
185	604.3	249.1	63.1	35.8	67.8	77.1
190	599.9	252.3	65	35.8	69.4	77.6
195	597.1	254.5	66.8	35.9	72.4	78.1
200	594.2	259.5	68.6	35.8	73.1	78.2
205	596.7	259	70	35.6	75.1	78.8
210	600.3	261.6	71.6	35.4	76.9	77.8
215	601.6	254	72.6	35.2	77.9	77.7
220	600.1	247.9	72.7	35.1	79.5	77.2
225	598.6	246.1	72.8	35.2	81.2	77.7
230	598	245.5	72.9	35.1	82.1	77.8
235	597.8	245.1	73.2	35.1	83.6	78.2
240	596.5	244.6	73.6	35.1	86.4	78.4
245	596.9	244.2	73.8	35.2	87.4	77.2
250	600.5	243.9	74.2	35.2	87.8	77.5
255	603	243.9	74.6	35.2	88.4	76.5

260	606.1	243.9	75	35.3	87.8	78
265	609.8	244	75.4	35.4	88.6	77.9
270	614.3	245.8	75.9	35.6	89.7	77.4
275	611.4	247.8	76.8	35.6	90.6	78.9
280	625.9	248.6	77.5	35.8	92.2	78.4
285	652.1	250	78.3	36.1	93.4	78.7
290	687.1	267.6	80	36	94.8	80.5
295	677.8	273.6	82.1	35.9	95.4	80.1
300	661.3	278.1	84	35.7	96.6	80.2
305	648.1	280.6	86.1	35.7	96	80.3
310	640	286.9	87.7	35.4	98.7	82.9
315	634.6	288.2	90	35.4	98.1	81.9
320	629.5	289.8	91.9	35.4	98.4	85.4
325	625.4	291.8	93.3	35.4	98.2	85.5
330	623.6	296.9	94.6	35.5	82.6	88.3
335	623.1	299.7	96.7	35.7	83.4	89.3
340	621.4	299.4	98.1	35.9	83	91.8
345	620.4	302.5	99.1	36.1	82.3	94.8
350	618.9	301.3	101.6	36.1	81.5	95.7
355	617.3	303.3	103	36.2	81.1	98.3
360	617.2	305.8	104	36.5	81.2	99
365	618.6	307.1	105.7	36.7	82.9	102.8
370	618.9	307.1	107.2	47	83.5	102.3
375	620	307.7	107.9	37	83.1	104.9
380	621.9	310.3	109.6	45.1	83.9	106.4
385	623.5	308.5	110.4	37.4	83.3	106

ตาราง ค.2 ผลการวัดคุณนหุมีการทดลองที่ 2 เจ็อนไซที่ 2

เวลา(min)	Hot gas	Mid	Exhaust	wood Ambient	Wood after dry screw	Torr gas
0	35.8	35	35.4	37.5	43.8	35.8
5	304.3	61.4	40.3	37.9	45	36.3
10	650.8	112.4	52.8	37.7	44.5	40
15	712.4	149.7	57.5	40.8	44.1	45.4
20	711.6	179.4	67.6	39	45.9	50.6
25	706.2	205.3	76.6	38.4	46.9	55
30	702.3	228.2	85.7	37.6	48.2	60.3
35	701.1	247.4	94.4	37.8	54.8	85.1
40	707.4	264.3	105.5	38.3	59	106.5
45	701.7	275.4	112.8	37.7	62.4	126.9
50	713.3	285.5	121.9	38	63	153.7
55	719.9	290.6	129.9	38.2	64.7	169.3
60	728.7	297.9	135.9	38.9	63.7	188.4
65	725.5	308.4	141.3	39.2	65.9	217.3
70	714.2	313.4	145	38.4	65.3	234
75	709	313.9	146.6	37.9	62.9	252.3
80	707.3	316.3	151.6	38.2	62.8	265.5
85	705.1	313.9	151	34.5	67.5	268
90	706.9	298.5	143.6	32.1	52.3	253.4
95	707.9	290.8	139.9	30.5	49.2	255.2
100	718.3	295	140.3	30.7	52.6	264.2
105	717.2	295.2	138.8	30.9	56.3	258.7
110	708.4	291.7	136.3	30.7	56.1	261.4
115	697.9	290.4	136.7	30.6	56.9	262.8

120	701.4	290.6	136.9	30.7	56.1	272.2
125	712.4	290.5	137	30.9	58.6	276.1
130	737.7	291.3	138.8	31.1	61.3	284
135	736.1	292	138.6	31.6	62.9	284.9
140	741.6	291.2	138.4	31.8	63.3	282.4
145	739.3	290.2	140.8	32	62.9	278.8
150	738.1	290.3	143	32.7	64.3	278.6
155	732.2	290.1	141.2	33.3	65.3	277.8
160	737.2	290.7	144.1	33.6	65.3	270.1
165	746.1	288.9	144.9	34.2	66.1	263.2
170	753.3	285.8	145.3	34.4	66.4	256.1
175	746.7	284.5	145.3	35	64.6	248.5
180	445.9	339.5	146.2	37	62.8	188.3
185	293.8	324.1	146.5	37.1	52.2	156.4
190	216.9	306.8	147.4	37.1	52.2	135.7
195	171	282.2	146.8	37	52.2	120.6
200	140.8	262.7	146.4	37	52.2	108.1
205	119.5	245.8	145.1	37.1	52.3	98.6

ตาราง ค.3 ผลการวัดอุณหภูมิการทดลองที่ 2 เงื่อนไขที่ 3

เวลา(min)	Hot gas	Mid	Exhaust	wood Ambient	Wood after dry screw	Torr gas
0	32.4	32.4	33.8	36.7	47.4	32.9
5	389	57.1	36.9	36.5	45.3	37.7
10	624.4	84.5	46	36.7	45.2	45.8
15	710.7	107.2	53.7	36.5	46.2	50.9

20	698	129.5	56.2	36.7	47.2	55.1
25	716.7	149.8	57	39	46.2	56.2
30	696.3	167.4	57.7	44.3	45.6	55.8
35	725.4	180.4	60	35.7	50.4	63.8
40	680.3	192	61.1	35.8	53.6	67.5
45	697.5	202.5	63.6	35.2	55.9	70.4
50	705.3	212.8	66.7	35.2	59.1	72.3
55	713.3	221.1	70.3	35.6	63.3	77.8
60	702.1	226.1	74.2	35.7	64.7	83.1
65	693.9	228	77.6	35.4	63.9	91.9
70	711.8	233.5	81.9	36.1	65.1	100.3
75	706.3	239.3	86.4	37	66.9	108.2
80	713	243.1	90.9	37	67.5	125
85	700.3	240.8	93.1	37.6	65.7	128
90	719.2	241.8	95.4	37.7	65.8	130.5
95	716.9	242.9	95.9	37.2	62.2	136.1
100	730.1	243	96.7	36.8	61.4	135.6
105	713.4	240.8	97.1	36.1	60.1	139.9
110	713.8	241.9	97	36	59.6	140.9
115	727.2	244.5	97.6	35.8	60.9	145.4
120	738.1	246.4	98.7	36	62.5	145.2
125	679.1	247.9	99.2	35.3	61.4	144
130	700	248	99.9	34.3	62.4	145.3
135	706.6	245.3	99.6	31.7	58.5	141.8
140	724.3	244.8	99.4	30.6	56.5	143.1
145	704.6	243	98.9	29.8	54.6	143
150	709.9	243.5	98.6	29.4	55.1	139.7
155	690.5	244.3	98.6	29.1	56.8	138
160	706.5	245.8	98.6	29.2	59.6	135.1

165	710.4	247.2	99.2	29.5	59.1	138.8
170	712.4	248.3	99.9	29.6	59.4	140.7
175	687	248	99.7	30	54.4	140.9
180	732.6	248.3	99.8	30.7	52.3	145.1
185	696.1	248.5	100	30.8	50.1	146.8
190	704.5	249.1	100.8	30.8	50.3	145.8
195	692.2	250.2	101.5	30.6	53.6	143.6
200	680.4	251.6	102.4	30.8	53.9	129.8
205	695.9	255.9	102.9	31.4	64.6	99.7
210	704.3	262.3	104.5	31.8	66.4	89.7
215	707	269.5	106.7	31.6	64.4	84.1
220	709	276.5	109.2	32	63.8	83.5
225	716.8	283.6	111.9	31.7	65.2	93.4
230	673.7	285.6	113.9	31.7	64.5	105.4
235	394.4	275.7	111.9	32	58	106
240	269	270.9	110.9	31.8	63.4	115
245	196	265.2	110.9	31.8	60.5	121.7
250	148.7	258.6	111.4	32.1	58.2	122.9

ตาราง ค.4 ผลการวัดอุณหภูมิการทดลองที่ 3

เวลา(min)	Hot gas	Mid	Exhaust	wood Ambient	Wood after dry screw	Torr gas
0	638.3	74.9	36.9	31.1	34.2	105.5
5	495.3	107.7	45.7	31.4	36	134.3
10	422.1	125.6	46.4	31.5	38.2	135.6
15	574.5	153.6	53.2	31.2	38.1	161.2

20	709.8	178.8	57.8	31.6	43.2	166.3
25	719.9	205	62.7	31	44.1	175.1
30	711.2	226.8	69.3	31.5	45.8	177
35	705.6	243	75.3	30.9	45.2	177.9
40	706.9	259.3	79.9	30.8	44.2	183.1
45	705	272.6	85.9	30.9	45.1	160.6
50	780.2	285.9	90.4	31.2	45.5	168.4
55	757.1	297.9	96.3	30.7	47.6	166.1
60	755	307.8	100.7	30.6	45.2	174.8
65	665.6	311	106.7	30.6	46.3	168.7
70	692.9	313	111.7	30.5	46.5	170.5
75	716	317.8	112.1	30.8	47.9	178.3
80	708.1	322.7	115.6	30.6	47.8	174.5
85	744.8	323.1	117.5	31	47.6	167.2
90	727.5	326.6	117.2	31.3	50.3	171
95	699.1	326.8	121.2	31.1	48.4	167.1
100	765.1	331.7	119.1	30.8	47.6	169.3
105	783.3	339.3	121	31.1	48.2	182
110	771.2	344	125.3	31.6	50.1	190.2
115	664.1	346	124.6	30.9	50.9	170.1
120	786.9	347.3	122.9	31.3	51.5	191.6
125	754.9	355.2	122.8	31.2	49.2	197.4
130	738.4	358.6	122.8	31.3	50.2	200.5
135	751.1	363.5	126.3	30.8	50.4	207.7
140	591.1	363.9	125.2	30.7	51.4	180.9
145	589.6	360.9	126.3	30.6	51.1	184.4
150	748.1	363.3	129.9	30.7	49.7	198.8
155	655.9	354.6	120.5	31	52	192.7
160	593.6	352.4	117.8	30.9	54.7	191

165	315.2	346.2	116.1	30.9	54.7	198.4
170	201.3	325	119.1	30.9	54.7	189.8
175	139.6	295.7	116.2	30.9	54.7	157.3
180	101.9	269.9	118.7	30.9	54.7	136.8
185	78.1	247.2	116.1	30.9	54.8	102.5
190	63.2	229	117.3	30.9	54.8	89.2
195	53.3	212.8	118.5	30.8	54.7	81.6

ตารางที่ ค.5 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียของชีวมวลอัดเม็ดโดยเริ่มวัดหลังจากเกิดเทอร์แก๊ส

เวลา(min)	CO <sub>2</sub> ,%	CO,%	CH <sub>4</sub> ,%	H <sub>2</sub> ,%	N <sub>2</sub> ,%	O <sub>2</sub> ,%
0	53.10	14.87	20.03	0.00	5	3.79
5	53.57	15.79	18.63	0.54	5	3.50
10	49.31	14.42	19.80	0.74	7	3.86
15	47.43	15.43	19.33	2.39	7	3.45
20	45.55	16.45	18.85	4.03	7	3.03
25	49.02	17.80	17.24	4.64	6	3.21
30	46.96	17.69	16.82	4.39	8	3.48
35	47.73	18.58	17.95	4.75	5	2.31
40	49.54	19.29	16.48	4.90	6	2.91
45	47.91	19.02	15.34	4.67	8	3.34
50	48.01	19.11	15.94	5.08	7	2.80
55	49.20	19.82	15.17	4.93	7	3.06
60	48.86	20.35	13.87	4.95	7	3.21
65	48.29	19.64	13.93	5.42	8	3.30
70	47.69	19.78	14.92	5.36	7	2.87
75	47.82	20.54	14.53	5.39	7	2.82
80	48.01	20.67	13.66	5.13	8	2.97

85	48.12	20.52	13.97	5.28	8	2.85
90	47.37	20.45	13.91	5.63	8	2.94
95	46.45	21.26	13.89	5.85	8	2.58
100	47.15	21.00	13.46	5.30	8	2.74
105	47.96	21.39	14.01	5.14	7	2.40
110	47.91	21.42	14.23	5.12	7	2.35
115	47.98	21.27	14.47	4.92	7	2.38
120	50.47	21.30	12.78	3.91	7	2.67

ตารางที่ ค.6 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียของไม้สับโดยเริ่มวัดหลังจากเกิดเทอร์แก๊ส

เวลา(min)	CO <sub>2</sub> ,%	CO,%	CH <sub>4</sub> ,%	H <sub>2</sub> ,%	N <sub>2</sub> ,%	O <sub>2</sub> ,%
0	50.7	23.17	13.529	13	0	0
5	47.5	22.69	14.872	14.27	0	0
10	50.8	21.72	14.191	13.44	0	0
15	50.7	23.04	15.386	10.91	0	0
20	48.4	22.01	16.824	12.06	0	0
25	46.7	20.33	18.341	13.83	0	0
30	48.2	21.55	17.533	12.11	0	0
35	45.8	20.1	19.604	13.74	0	0
40	46.2	20.91	19.24	12.83	0	0
45	42.7	20.46	19.691	15.4	0	0
50	35.6	23.02	19.858	17.54	2.34	0
55	35.9	23.61	19.849	16.42	1.99	0
60	37.4	22.38	19.809	16.79	1.96	0
65	34.7	21.38	19.916	19.9	2.21	0
70	35.6	21.74	19.854	18.85	1.99	0
75	33.8	22.61	19.9	18.89	2.62	0
80	35.2	22.45	19.864	17.92	2.99	0

85	39.9	23.06	19.707	14.07	2.4	0
90	38.4	23.15	19.743	15.18	1.87	0





ภาคผนวก ง  
รายการสัญลักษณ์

## รายการสัญลักษณ์

$A_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลแก๊สในเชื้อเพลิง	
$C_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิงที่แห้ง	
$H_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงที่แห้ง	
$HHV$	=	ค่าความร้อนทางสูง	MJ/kg
$LHV$	=	ค่าความร้อนทางต่ำ	MJ/kg
$N_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่แห้ง	
$O_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลออกซิเจนในเชื้อเพลิงที่แห้ง	
$S_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงที่แห้ง	
$W_{db}$	=	สัดส่วนโดยมวลน้ำในเชื้อเพลิง	
$M_O$	=	ชีวมวลอัดเม็ดก่อนอบย่าง	
$M_T$	=	ชีวมวลอัดเม็ดหลังอบย่าง	
$HHV_T$	=	ค่าความร้อนของชีวมวลหลังอบย่าง	
$HHV_O$	=	ค่าความร้อนของชีวมวลก่อนอบย่าง	



ภาคผนวก จ  
ผลงานตีพิมพ์



adiCET

การประชุมวิชาการระดับชาติ  
สู่การพัฒนาชุมชนฉลาด  
ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1

The 1<sup>st</sup> National Conference  
on Smart Community Development  
in the Asia Pacific (nSCAP2020)

21 กุมภาพันธ์ 2563

ณ วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ศูนย์แม่ริม

ประเภทบทความที่เปิดรับ

1. ผลงานเพื่อชุมชน
2. สิ่งแวดล้อม
3. นวัตกรรมเพื่อชุมชน
4. งานวิชาการรับใช้สังคม

ค่าธรรมเนียม 2 ช่องทาง

ค่าลงทะเบียน 1,200 บาท

1. ชำระเงินโดยผ่านช่องทางออนไลน์ สามารถส่งหลักฐานการโอนเงินมาที่ [adicet2020@g.cmr.ac.th](mailto:adicet2020@g.cmr.ac.th) ภายในวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2020
2. ชำระเงินช่องทาง ในวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2563

กำหนดการ

20 - 31 มกราคม 2563	ขยายเวลาเปิดรับบทความวิจัยฉบับเต็ม ในรูปแบบ Word และ PDF file นำมาทาง <a href="mailto:adicet2020@g.cmr.ac.th">adicet2020@g.cmr.ac.th</a>
1 - 7 กุมภาพันธ์ 2563	พิจารณาและตอบรับบทความและจัดส่งข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ผู้นำเสนอผลงาน
8 - 15 กุมภาพันธ์ 2563	ผู้นำเสนอผลงานดำเนินการปรับแก้บทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ และส่งบทความฉบับสมบูรณ์ให้ผู้จัดงาน
16 กุมภาพันธ์ 2563	แจ้งกำหนดการนำเสนอผลงาน
16 - 18 กุมภาพันธ์ 2563	วันชำระเงินค่าลงทะเบียน สำหรับผู้นำเสนอผลงาน
21 กุมภาพันธ์ 2563	การประชุมวิชาการระดับชาติ

บทความที่ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการ (Peer review) แล้วอยู่ในเกณฑ์คะแนนประเมินระดับ "ดีมาก" จะได้สิทธิในการเข้ารับใบการตีพิมพ์ผลงาน วารสารราชภัฏเชียงใหม่ ซึ่งได้รับการรับรองจากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่ม 2 ทั้งนี้หากผู้เขียนประสงค์จะรับสิทธิการตีพิมพ์ในวารสารดังกล่าวจะต้องดำเนินการตามกระบวนการของทางวารสารต่อไป



รายละเอียดและแบบฟอร์ม  
การจัดทำบทความ

nSCAP2020 จัดร่วมกับงานครบรอบ "10 ปี adicET" กับการพัฒนาผลงานเพื่อท้องถิ่น โดยมุ่งหวังให้มีการแสดงผลงาน เป็นเวทีในการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ประสบการณ์วิจัย และสร้างความร่วมมือร่วมกับภาคเครือข่ายในการพัฒนางานวิจัยสู่ท้องถิ่นให้เกิดความเข้มแข็งและมุ่งไปสู่ชุมชนฉลาด

[www.adicet.cmr.ac.th/adicet10yr](http://www.adicet.cmr.ac.th/adicet10yr)





adiCET



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
ภายใต้ งานครบรอบ 10 ปี adiCET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น  
ระหว่างวันที่ 20 - 21 กุมภาพันธ์ 2563

ณ วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ศูนย์แมริม จังหวัดเชียงใหม่

ที่ adiCET-nSCAP2020-SOI05

### หนังสือตอบรับบทความ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020) ภายใต้งานครบรอบ 10 ปี adiCET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น ระหว่างวันที่ 20 - 21 กุมภาพันธ์ 2563 ณ วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ศูนย์แมริม จังหวัดเชียงใหม่ ตามรายละเอียดดังนี้

รหัสบทความ SOI05

สาขาบทความ นวัตกรรมเพื่อชุมชน

ชื่อบทความ การปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอริเฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้เทอร์แก๊ส

ชื่อผู้เขียน ณัฐนที วิมลสุตร์, ภาคภูมิ ศรีมรินทร์, และสมมาส แก้วล้วน

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก

บัดนี้ ผลงานของท่านได้ผ่านการพิจารณาให้เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการดังกล่าว จึงขอให้ท่านดำเนินการชำระค่าลงทะเบียนพร้อมแนบหลักฐานการชำระเงิน ระหว่างวันที่ 16 - 18 กุมภาพันธ์ 2563 ทั้งนี้ท่านสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่เว็บไซต์ของงานประชุมวิชาการ

(ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรรค์)

คณบดีวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

31 มกราคม 2563

nSCAP2020



<https://www.adicet.cmru.ac.th/web2019/th/national-conference/>

10<sup>th</sup> Anniversary



<https://www.adicet.cmru.ac.th/web2019/th>



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (NSCAP2020)  
10 ปี odICET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

**การปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชันแบบสกรูเอียง  
โดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้ทอรรีแฟคชัน  
Biofuel Properties Improvement with Inclined Screw Torrefaction  
Process using Indirect Heat via Torgas Combustion**

ณัฐนันท์ วิมลสุตรี<sup>1</sup>, ภาคภูมิ ศรีธรรมรัตน์<sup>1</sup>, และสมมาส แก้วล้วน<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

\*โทรศัพท์ 089-7659091 E-mail sommas@g.swu.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการทอรรีแฟคชัน โดยมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของระยะเวลาที่เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเคลื่อนที่ผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของชุดปฏิกรณ์ทอรรีแฟคชันที่ 3 ช่วงระยะเวลาคือ 16, 20 และ 24 นาที ซึ่งส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์ (Torrefied biomass) โดยวัดจุดดับคือเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีค่าความร้อน 16.2 MJ/kg ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผ่านโรตาริวาล์วที่อัตราการไหลคงที่ 17.5 kg/h ผลการทดลองพบว่าในช่วงเริ่มต้นอุณหภูมิแก๊สร้อนประมาณ 600 °C ถูกป้อนเข้าโดยรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นผนังท่อด้านนอกของชุดปฏิกรณ์แบบสกรูเอียง โดยแก๊สร้อนช่วงแรกมาจากหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที จะมีสารระเหยเกิดจากกระบวนการทอรรีแฟคชันเข้ามาเผาพร้อมกับแก๊สปิโตรเลียมเหลว ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงค่อยๆ หรือและปิดหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่ออุณหภูมิแก๊สร้อนเริ่มคงที่

ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีระยะเวลาอยู่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของชุดปฏิกรณ์ทอรรีแฟคชันนานขึ้นจะทำให้ได้เชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดสีดำมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีผลได้เชิงมวล (mass yield) และผลที่ได้เชิงพลังงาน (energy yield) ลดลง โดยระยะเวลาที่วัสดุไหลและรับความร้อนในชุดปฏิกรณ์ที่ 24 นาทีจะได้ค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดที่ 23.31 MJ/kg

**คำสำคัญ:** ชีวมวลอัดเม็ด, ชีวมวลทอรรีไฟด์, สารระเหย, ปฏิกรณ์แบบสกรูเอียง, ความร้อนทางอ้อม

**ABSTRACT**

The purpose of this research is to improve bio-fuel properties using an inclined-screw torrefaction process with indirect heat obtained from the released volatile biomass. The effects of the amount of the time, that biomass pellets travel through the heat exchange tube in the torrefaction reactor, on the quantity and properties of the torrefied biomass were investigated for 16, 20 and 24 minutes of time. The biomass pellets, with the heat value of 16.2 MJ/kg, were fed into the reactor via the rotary valve at a constant flowrate of 17.5 kg/hr. The hot Liquid Petroleum Gas (LPG) at 600 °C was fed into the heat exchanger tube, which was the outside wall of the inclined screw reactor, to initiate the torrefaction process. The volatile gas, which was produced from the torrefaction process, was later fed to the combustor together with the LPG. This caused higher temperature of the system. Then the feeding of the LPG was phased out and the temperature of the system was finally constant.

It was found that operating at the longer time of biomass pellets travel through the heat exchange tube in the torrefaction reactor, yielded more amounts of the black-colour pallet product,



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี adICET ก้าวการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

which had highest heating value. However, it gave lower mass yield and energy yield. The heating value of the torrefied biomass obtained from this process is 23.31 MJ/kg that of the time at 24 minutes for biomass pellets travel through the heat exchange tube in the torrefaction reactor.

**Keyword:** Biomass pellet Torrefied biomass Released volatile Inclined Screw Reactor Indirect Heat

## 1. บทนำ

ชีวมวลคืออินทรีย์สารจากธรรมชาติ เป็นแหล่งสะสมพลังงานจากกระบวนการสังเคราะห์แสง และสามารถนำพลังงานที่เก็บสะสมมาใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของอินทรีย์สารเหล่านี้ เช่น เศษไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เศษหญ้า หรือผลพลอยได้จากการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรประเภทพืชเลี้ยง ฟาง แกลบ ชานอ้อย เป็นต้น ชีวมวลจะมีองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล เช่น ความชื้น ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น จึงทำให้เป็นอุปสรรคในการนำวัสดุชีวมวลไปใช้ประโยชน์ การปรับปรุงคุณภาพชีวมวลให้ดีขึ้นและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันไม่ว่าจะใช้ชีวมวลชนิดใด สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (biomass pellets) หรือชีวมวลอัดแท่ง (biomass briquette) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดโอกาสในการใช้ประโยชน์จากชีวมวลแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้มากขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการทำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีการใช้พลังงานมากในการบดหรือการสับย่อยชีวมวล (hammer mill) จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์มากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามยังพบข้อเสียบางประการจึงทำให้ไม่สามารถใช้ทดแทนถ่านหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อเสียต่างๆ ประกอบด้วย ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักและปริมาตรยังต่ำกว่าถ่านหิน อีกทั้งข้อจำกัดด้านเวลาและสถานะในการเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดให้มีคุณภาพคงเดิม เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดยังสามารถดูดซับความชื้นได้ดีทั้งความชื้นจากอากาศและน้ำ อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ดีด้วยจุลินทรีย์ จึงทำให้เชื้อเพลิงดังกล่าวเสื่อมคุณภาพได้

แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลคือการทำเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ด ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้ได้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพเทียบเท่าถ่านหิน ทั้งในด้านสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี รวมทั้งสภาพ

การทอร์รีไฟด์ชีวมวลโดยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 320 °C ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction) เพื่อปรับปรุงสมบัติของชีวมวลดั้งเดิมให้ได้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพที่ดีขึ้นสำหรับการใช้งานในการเผาไหม้และการทำให้เป็นแก๊ส การทอร์รีแฟคชันนำไปสู่ผลิตภัณฑ์แห้งที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางชีวภาพเช่น เน่าเปื่อย รวมถึงการทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนต่อมวลและปริมาตร โดยให้ค่าความร้อนต่อมวลมีค่าประมาณ 20 ถึง 21 GJ / ton (LHV) (Nachenius, van de Wardt, Ronsse, & Prins, 2015) และค่าความร้อนต่อปริมาตรมีค่าประมาณ 15 - 18.5 GJ/m<sup>3</sup> (LHV) และเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดมีค่าความหนาแน่นประมาณ 750 - 850 kg/m<sup>3</sup>

กระบวนการทอร์รีแฟคชันแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนได้เป็น 2 แบบ คือแบบให้ความร้อนโดยตรง (directly heated torrefaction) และแบบให้ความร้อนโดยอ้อม (indirectly heated torrefaction) (Akinyemi et al., 2017; Nam, Park, Kim, & Gu, 2016; Nhuchhen, Basu, & Acharya, 2016; Woody, G.V, 1941) โดยกระบวนการทอร์รีแฟคชันแบบให้ความร้อนโดยตรง แก๊สร้อนที่มีออกซิเจนต่ำหรือไม่มีเลยไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทำให้ได้ชีวมวลทอร์รีไฟด์และแก๊ส โดยแก๊สที่ได้จากกระบวนการเรียกว่าทอร์แก๊ส (torrgas) ซึ่งมีค่าความร้อนต่ำจึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแหล่งความร้อนหลักสำหรับกระบวนการต้องใช้แหล่งเชื้อเพลิงภายนอกทั้งจากแก๊สธรรมชาติ, ชีวมวล และอื่นๆเป็นแหล่งความร้อน ในขณะที่กระบวนการทอร์รีแฟคชันแบบให้ความร้อนโดยอ้อม ความร้อนถูกส่งผ่านผนังเข้าสู่วัสดุที่อยู่ในกระบวนการทำให้ได้ชีวมวลทอร์รีไฟด์และทอร์แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงสามารถนำมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักของกระบวนการทอร์รีแฟคชันได้ โดยแหล่งความร้อนควรมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 500 - 700 °C



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี adiCET ก้าวการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของระยะเวลาที่วัสดุชีวมวลเคลื่อนที่และรับความร้อนอยู่ในชุดปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชัน โดยความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้จากการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนทางอ้อมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชันแบบสกรูเอียง โดยพิจารณาถึงปริมาณและคุณภาพของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ รวมถึงประสิทธิภาพในการแปรรูปหลังจากจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ชีวมวลอัดเม็ด

## 2. ทฤษฎีของการวิจัย

เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีหลายประการจึงทำให้เป็นอุปสรรคในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านความร้อนและพลังงาน ซึ่งข้อดีคือดังกล่าวประกอบด้วย ความชื้นสูง ความหนาแน่นปรากฏต่ำ พลังงานต่อหน่วยมวลต่ำ พลังงานต่อหน่วยปริมาตรต่ำ ลดขนาดได้ยาก สามารถดูดซับน้ำได้ มีออกซิเจนสูง มีโลหะแอสคาโลสูง มีขนาดไม่แน่นอน เป็นต้น

2.1 กระบวนการทอร์รีแฟคชัน กระบวนการทอร์รีแฟคชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (mild pyrolysis) ที่อุณหภูมิที่ 200 – 320 °C ในสภาวะบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน ประโยชน์ของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน คือ น้ำจะถูกนำออกจากชีวมวลทำให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลสบางส่วน (Prins, Ptasinski, & Janssen, 2006) ชีวมวลที่เป็นของแข็งมีค่าความร้อนสูง การดูดความชื้นกลับต่ำ เปราะ ง่ายต่อการบด การทอร์รีแฟคชันชีวมวลนั้น ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ทำให้ได้ชีวมวลทอร์รีไฟด์และสารระเหย Gaur and Reed ได้สรุปปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะได้สารระเหยเบา (light volatile) เช่น โมโนแซคคาไรด์ พอลิแซคคาไรด์ และดีไฮโดรซูก้า และ ขั้นตอน ที่ 2 จะได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การใช้ความร้อนเพื่อแตกสลายพันธะคาร์บอนกลุ่มคาร์บอนซิกติกทำให้เกิดการก่อตัวของกรด ซึ่งการเกิดกรดจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการคายน้ำ และปฏิกิริยาการแตกสลายพันธะด้วยความร้อนจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนิว ได้แก่ ไฮดรอกซิโอะซิโตน เมทานอล โพรพานอล กรดอะซิติก

ฟูเฟอร์รอล น้ำ กรดแล็กติกและกรดฟอรัมมิก (Tumuluru, Wright, Kenny, & Hess, 2011) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ด้วยการสลายตัวดังกล่าวทำให้ชีวมวลมีความเปราะ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำเนื่องจาก โอเอชกรุ๊ปถูกทำลาย มีค่าความร้อนสูงเนื่องจากการสูญเสียสารระเหยและการแตกสลายพันธะคาร์บอนในกลุ่มคาร์บอนซิกติกทำให้มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนของกระบวนการ Torrefaction ประกอบด้วย  
1. รวบรวมชีวมวล 2. อบแห้ง 3. ทอร์รีแฟคชัน 4. บดและอัดเม็ด

ขั้นตอนที่ 1 ชีวมวลที่มีชนิด ขนาด รูปร่าง และความชื้นแตกต่างกัน จะถูกรวบรวมมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยชีวมวลจะถูกลดขนาดและอัดให้เป็นเม็ดเพื่อให้สามารถไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ได้ง่าย

ขั้นตอนที่ 2 ชีวมวลถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แบบสกรูชุดที่ 1 เพื่อไล่ความชื้นออกจากชีวมวล

ขั้นตอนที่ 3 ชีวมวลที่แห้งจะไหลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แบบสกรูชุดที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่ไล่สารระเหยบางส่วนออกจากชีวมวล ซึ่งเป็นไปตามกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยสารระเหยซึ่งมีฝุ่นปะปนอยู่ด้วยไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู เพื่อเข้าสู่ไซโคลนดักฝุ่น ก่อนที่สารระเหยจะถูกส่งไปเผาเพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้ชุดปฏิกรณ์ เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ถูกระบายออกจากปฏิกรณ์แบบสกรูที่ปลายทางออกเพื่อเข้าสู่ถังเก็บชีวมวลทอร์รีไฟด์

ขั้นตอนที่ 4 เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ซึ่งเย็นลงแล้วจะถูกนำไปหาผลได้เชิงมวลและพลังงาน

### 2.2 การวิเคราะห์ผลผลิต

การวิเคราะห์ผลผลิตชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ (torrefied biomass pellet) ซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ถูกหาปริมาณและคุณภาพ โดยการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการและทำการแยกสัดส่วนผลิตภัณฑ์เป็น 3 ชั้นคุณภาพคือ 1. ผลิตภัณฑ์ที่มีสีน้ำตาล 2. ผลิตภัณฑ์ที่มีสีน้ำตาลดำ และ 3. ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ จากนั้นผลิตภัณฑ์แต่ละส่วนถูกวิเคราะห์หองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis) รวมถึงการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ด้วย นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบสมบัติการดูดซึมน้ำและ



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชนนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี adICET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยผลได้เชิงมวล  
(Mass yield; MY) สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$MY(\text{wt}\%) = \frac{M_t}{M_r} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ MY คือ ผลได้เชิงมวล (%)

$M_t$  คือ มวลผลิตภัณฑ์ (kg)

$M_r$  คือ มวลวัตถุดิบ (kg)

### 2.3 ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงาน

ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงาน (Energy conversion efficiency) จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellet) เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอร์รีไฟด์ (torrefied wood pellet) นำเสนอในเทอมของผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield: EY) สามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$EY = MY \times \frac{Hv_t}{Hv_r} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ EY คือ ผลได้เชิงพลังงาน (%)

$Hv_t$  คือ ค่าความร้อนผลิตภัณฑ์ (kg)

$Hv_r$  คือ ค่าความร้อนวัตถุดิบ (kg)

## 3. ระเบียบวิธีวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาสารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

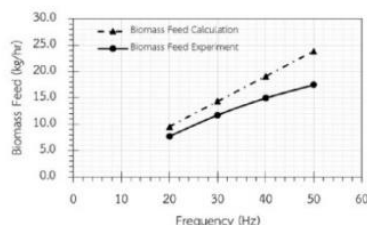
3.1 สมบัติของวัตถุดิบสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาวประมาณ 20 - 30 mm ถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยชีวมวลอัดเม็ดมีสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์สมบัติชีวมวลอัดเม็ด

คุณสมบัติ	สภาพน้ำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น,%	8.33	-
สารระเหย,%	73.12	79.76
ถ่านคงตัว,%	16.62	18.14
เถ้า, %	1.93	2.10
คาร์บอน,%	45.4	49.53
ไฮโดรเจน,%	6.18	5.73
ออกซิเจน, %	46.35	42.48
ไนโตรเจน,%	0.14	0.16
ซัลเฟอร์,%	0.00	0.00

ค่าความร้อนสูง, MJ/kg	17.489	19.079
ค่าความร้อนต่ำ, MJ/kg	16.192	17.656

3.2 อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ อัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดที่ป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ ถูกควบคุมโดยใช้วาล์วแบบโรตารีแบบปรับความเร็วรอบ โดยผลการปรับเทียบอัตราการไหลแสดงดังภาพที่ 1 เมื่อโรตารีวาล์วหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุดสามารถป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ได้ในอัตรา 17.5 kg/h และมีแนวโน้มลดลงตามความเร็วรอบการหมุนของโรตารีที่ลดลง ซึ่งอัตราการไหลของชีวมวลจริงต่ำกว่าอัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดที่คำนวณได้ประมาณ 20 - 25%



ภาพที่ 1: ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการหมุนของชุดป้อนชีวมวลกับอัตราการป้อนชีวมวล

3.3 เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชัน เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชันสำหรับปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยใช้ความร้อนทางอ้อมจากการเผาสารระเหยที่ปลดปล่อยจากกระบวนการซึ่งถูกออกแบบให้มีส่วนประกอบ 5 ส่วน ส่วนที่ 1 ส่วนป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ส่วนที่ 2 ส่วนอบแห้ง ส่วนที่ 3 ส่วนทอร์รีไฟด์ ส่วนที่ 4 ส่วนรับชีวมวลทอร์รีไฟด์ ส่วนที่ 5 ส่วนผลิตและส่งจ่ายความร้อน

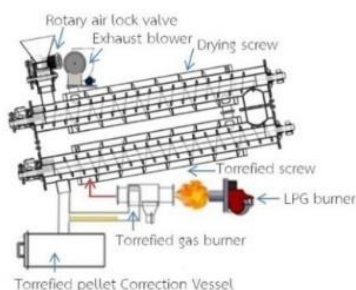
โดยส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 คือส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการทอร์รีแฟคชันแบบสกรูเอียงโดยสกรูลำเลียงส่วนบนมีลักษณะเอียงขึ้นทำหน้าที่เป็นสกรูอบแห้ง (drying screw) ในขณะที่สกรูลำเลียงส่วนล่างมีลักษณะเอียงลงทำหน้าที่เป็นทอร์รีไฟด์สกรู (torrefied screw) โดยกำหนดให้เวลาที่วัตถุดิบไหลผ่านสกรูอบแห้งเท่ากับ 10 นาที และเวลาที่วัตถุดิบไหลผ่านทอร์รีไฟด์



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี odKET กับการพัฒนาผลงานเพื่อท้องถิ่น

สกรูเท่ากับ 10, 15 และ 20 นาที ในขณะที่เวลาในการรับความร้อนผ่านผนังท่อเข้าสู่วัสดุในสกรูรอบแห้ง (drying screw) เท่ากับ 8 นาที และทอริฟิเคชัน (torrefied screw) เท่ากับ 8, 12 และ 16 นาที ตามลำดับ

3.4 การทดลองผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริฟิเคชันชีวมวลอัดเม็ดถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอริฟิเคชันแบบสกรูเอียงส่วนบนด้วยโรตารีแอร์ลอคควาล์วที่อัตราการไหล 17.5 kg/h โดยวัสดุตกลงสู่ท่อและเกลียวลำเลียงทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปจนสุดความยาวของท่อและตกลงสู่ท่อของเครื่องปฏิกรณ์ทอริฟิเคชันแบบสกรูเอียงส่วนล่าง



ภาพที่ 2: เครื่องปฏิกรณ์ผลิตเชื้อเพลิงทอริฟิเคชันแบบสกรูเอียง

เกลียวลำเลียงทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปจนสุดความยาวของท่อและตกลงสู่ถังเก็บผลิตภัณฑ์ โดยผนังภายนอกของท่อลำเลียงวัสดุถูกทำให้ร้อนด้วยแก๊สที่ผลิตจากการเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะใช้การเผาไหม้สารระเหยที่เกิดจากการอบแห้งทอริฟิเคชัน (Torgas) หลังจากชุดปฏิกรณ์ถูกทำให้ร้อน

โดยแก๊สร้อนจากหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สสูงต้ม (Olympia LTG-3) ประมาณ 20 นาที เพื่อให้ได้แก๊สร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 °C ในเวลาเดียวกันสารระเหยจากการอบแห้งทอริฟิเคชันสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง จึงหยุดการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สสูงต้ม แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไหลเข้าสู่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและไหลวนรอบท่อสกรูลำเลียงจำนวน 6 รอบ เพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ทอริฟิเคชันสกรู จากนั้นแก๊สร้อนไหลที่ออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากชุดทอริฟิเคชันสกรูและไหลเข้าสู่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของสกรูรอบแห้งและไหลวนรอบท่อสกรูรอบแห้งจำนวน 6 รอบ เพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สกรูรอบแห้ง จากนั้นแก๊สร้อนไหลออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงที่ 2 เข้าสู่พัดลมดูดแก๊สไอเสียและถูกพัดลมปล่อยไอเสียสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป อุณหภูมิแก๊สร้อนถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 บริเวณทางเข้าแก๊สร้อนสู่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 บริเวณรอยต่อระหว่างทางออกแก๊สร้อนจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงที่ 1 และทางเข้าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 บริเวณทางออกของแก๊สร้อนจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงที่ 2

#### 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์เชื้อเพลิงทอริฟิเคชันจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีอัตราการไหลคงที่ที่ 17.5 kg/h โดยในช่วงเริ่มต้นขณะที่ยังไม่มีการระเหยจากการอบแห้ง (torgas) จะใช้หัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลวให้ความร้อนประมาณ 20 นาทีจนกระทั่งมีสารระเหยเกิดขึ้นจากการอบแห้ง (torgas) และสารระเหยสามารถติดไฟได้จึงปิดการทำงานของหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว โดยหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำสุดและสูงสุดที่ 1.67 และ 2.51 kg/h

ในแต่ละการทดลองมีการป้อนวัตถุดิบ (ชีวมวลอัดเม็ด) เข้าสู่ชุดปฏิกรณ์ใช้เวลา รวม 2 ชั่วโมง 50 นาที ซึ่งใช้วัตถุดิบจำนวน 50 กิโลกรัม การทดลองมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์ส่วนล่าง (ทอริฟิเคชันสกรู) 3 ระดับคือ 8, 12 และ 16 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ 25, 37.5 และ 50 Hz ตามลำดับ ในขณะที่เวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์ส่วนบน (สกรูรอบแห้ง) มีค่าคงที่ที่ 8 นาที ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการหมุนของ

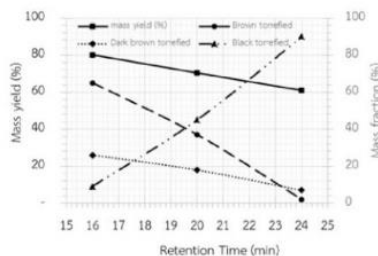


การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี odICET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

สกรูรอบแห้งที่ 50 Hz เมื่อเสร็จสิ้นแต่ละการทดลองต้องทิ้งผลิตภัณฑ์ไว้ในถังเก็บอย่างน้อย 12 ชั่วโมงเพื่อป้องกันการจุดติดไฟด้วยตัวเองของผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาซึ่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณได้เชิงมวล จากนั้นทำการแยกผลิตภัณฑ์แต่ละการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3 คือชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์ สีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้ม และสีดำ โดยมีสัดส่วนแสดงในภาพที่ 4 จากผลการทดลองพบว่าผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์ส่วนล่าง นานขึ้นโดยผลได้เชิงมวลลดลงจาก 80.2, 70.4 และ 61% เมื่อเวลาในการให้ความร้อนนานขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ของ Nachenius , 2015 ที่มีผลได้เชิงมวลลดลงตามเวลาที่ไม้สนสับขนาดไม่เกิน 6 mm อยู่ในชุดปฏิกรณ์แบบสกรูแนวราบ เมื่อพิจารณาสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ชีวมวลทอรรีไฟต์แยกตามสีพบว่า เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์สีดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้น ในขณะที่ทอรรีไฟต์สีน้ำตาล และสีน้ำตาลดำ มีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 3: เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์



ภาพที่ 4: ผลได้เชิงมวลและสัดส่วนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์แบ่งตามลักษณะสี

ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์ที่แยกมาทั้ง 3 ส่วน ถูกวิเคราะห์ค่าความร้อน องค์ประกอบโดยประมาณ และองค์ประกอบโดยละเอียด ผลการวิเคราะห์พบว่า เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์สีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้ม และสีดำ มีค่าความร้อน 18.06, 18.91 และ 24.03 MJ/kg ตามลำดับ โดยมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจากวัตถุดิบซึ่งมีค่าความร้อน 16.20 MJ/kg

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์สมบัติชีวมวลทอรรีไฟต์

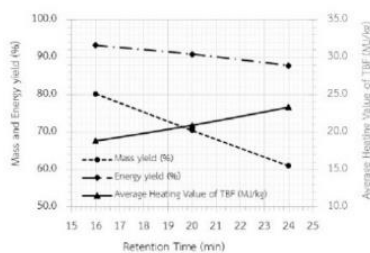
คุณสมบัติ	เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์สีน้ำตาล	เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์สีน้ำตาลเข้ม	เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์สีดำ
ความชื้น,%	4.46	3.85	3.35
สารระเหย,%	71.26	69.37	46.13
ถ่านคงตัว,%	21.34	23.88	46.62
เถ้า,%	2.94	2.90	3.9
คาร์บอน,%	48.23	49.87	61.37
ไฮโดรเจน,%	5.71	5.60	4.69
ออกซิเจน,%	45.36	43.82	33.18
ไนโตรเจน,%	0.70	0.71	0.76
ค่าความร้อนต่ำ,MJ/kg	18.06	18.91	24.03

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟต์พบว่าค่าเพิ่มขึ้นจาก 18.82, 20.90 และ 23.31 MJ/kg เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ โดยค่าความร้อนที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ ของ



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี odicET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

Nachenius , 2015 และ Reza อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลได้เชิงพลังงานพบว่าแนวโน้มลดลงจาก 93.17, 90.82 และ 87.77 % เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ โดยแนวโน้มค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ และผลได้เชิงพลังงาน แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5: ค่าความร้อนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์ และผลได้เชิงพลังงาน

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์อัดเม็ดโดยมีอัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 17.5 kg/h ผ่านปฏิกรณ์ทอริฟิเคชันแบบสกรูเอียงแบบให้ความร้อนทางอ้อม โดยความร้อนช่วงเริ่มต้น (20 นาทีแรก) ได้จากหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) หลังจากนั้นปฏิกรณ์รับความร้อนจากการเผาไหม้ทอริไฟต์แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเตาปฏิกรณ์รวม 20 นาที โดยการทดลองกำหนดให้เวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์ส่วนบน (สกรูอบแห้ง) มีค่าคงที่ที่ 8 นาที ในขณะที่มีการปรับเปลี่ยนเวลาที่วัสดุอยู่ในชุดปฏิกรณ์ส่วนล่าง (ทอริไฟต์สกรู) 3 ระดับคือ 8, 12 และ 16 นาที โดยอุณหภูมิปล่องไอเสียมีค่าอยู่ในช่วง 130-150 °C ผลการทดลองพบว่าค่าความร้อนเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟต์พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18.82, 20.90 และ 23.31 MJ/kg เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าผลได้เชิงพลังงานพบว่าแนวโน้มลดลงจาก 93.17, 90.82 และ 87.77 % เมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16, 20 และ 24 นาที ตามลำดับ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2561 เลขที่ 227/2561 และได้รับการทุนสนับสนุนการเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานฯ จากบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2563

## 7. เอกสารอ้างอิง

- Akinyemi, O., Jiang, L., Buchireddy, P., Barskov, S., Guillory, J., & Holmes, W. (2017). *Investigation of Effect of biomass Torrefaction Temperature on Volatile Energy Recovery Through Combustion*.
- Reza, M. T., Coronella, C., Sullivan, S., Williams, K., & Shekarriz, R. (2015). *Design and Operation of a Bench scale Continuous Reactor for Hydrothermal Carbonization*.
- Nam, S. B., Park, Y. S., Kim, D. J., & Gu, J. H. (2016). Torrefaction Reaction Characteristic of Various Biomass Waste on Pilot Scale of Torrefaction Reaction System. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 890-894.
- Nachenius, R. W., van de Wardt, T. A., Ronsse, F., & Prins, W. (2015). Torrefaction of pine in a bench-scale screw conveyor reactor. *Biomass and Bioenergy*, 79, 96-104.
- Nhuchhen, D. R., Basu, P., & Acharya, B. (2016). Investigation into overall heat transfer coefficient in indirectly heated rotary torrefier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 64-76.
- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. G. (2006). Torrefaction of wood: Part 2.



การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020)  
10 ปี adicET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 77(1), 35-40.

S. Gaur, T.B. (1998). *Thermal Data for Natural and Synthetic Materials*. New York: Marcel Dekker.

Tumuluru, J. S., Wright, C., Kenny, K., & Hess, J. (2011). *A Review on Biomass Densification for Energy Applications*.

Woody, G.V. (1941). Production of coke as a domestic fuel source: The Hayes process for carbonizing coal at low temperatures. *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 33 (7)





ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ชีวมวลอัดเม็ดและทอริไฟต์

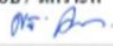



คำขอบริการที่ สนท. 129/62 ที่ ทป. 382-04/62


**รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์**  
**ให้แก่**  
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

การทดสอบ / วิเคราะห์ **ไม้ซิวมวลอัดเม็ด**  
วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ ASTM D 7582, D 5373, D 4239 and D 5865  
ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

คุณสมบัติ	สภาพน่าสง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	8.33	-
สารระเหย, %	73.12	79.76
อานคกตัว, %	16.62	18.14
เถ้า, %	1.93	2.10
ไฮโดรเจน, %	6.18	5.73
คาร์บอน, %	45.40	49.53
ไนโตรเจน, %	0.14	0.16
ออกซิเจน, %	46.35	42.48
ซีโอเปอร์, %	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4,180	4,560
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,870	4,220

ผู้ทดสอบ / วิเคราะห์  
1.   
2. \_\_\_\_\_

ผู้รับรอง   
(ดร. สมชาย พิศารัตน์)  
ผู้อำนวยการ

ผู้ตรวจสอบ   
(ดร. บัณฑิต จันทรวงศ์ไพศาล)

ศูนย์เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม  
วันที่ 19 เมษายน 2562

ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น  
ห้ามนำผลการทดสอบ / วิเคราะห์ ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วว.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

FM-EIE-13

๑๕ หมู่ ๓ เขตนครราชสีมา ๓๑๐๐๓๖ | อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๑๑๑  
โทร.(ในจ) ๐ ๒๕๖๒ ๕๐๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๖๒ ๕๐๐๑  
E-mail : info@istr.or.th Website : www.istr.or.th

วิสัยทัศน์ : วว. เป็นองค์กรชั้นนำในการบูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรมเพื่อสร้างสังคมนวัตกรรมอย่างยั่งยืน

ผลการวิเคราะห์ซิวมวลอัดเม็ด

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2019-099	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

**รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ**

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Ultimate Analysis และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ชื่อตัวอย่าง : Torr1  
วันที่รับตัวอย่าง : 5 สิงหาคม 2562  
เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN รุ่น CHN628 ยี่ห้อ Leco  
2. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ยี่ห้อ CARBOLITE  
3. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ยี่ห้อ CARBOLITE  
4. Bomb Calorimeter รุ่น AC500 ยี่ห้อ Leco

**ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :**

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
Carbon Content	ASTM D5373	wt. %	48.23	0.23
Hydrogen Content		wt. %	5.71	0.70
Nitrogen Content		wt. %	0.70	3.58
Moisture Content	ASTM D3172-3175	wt. %	4.46	0.52
Volatile Matter		wt. %	71.26	0.23
Ash		wt. %	2.94	3.66
Fixed Carbon		wt. %	21.34	1.41
Heating Value	ASTM D5865	cal/g	4,314.08	0.34

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

.....  
พัลลภ ชูอินทร์  
(นางสาวพัชรา ชูอินทร์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 7 สิงหาคม 2562

.....  
Al  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิฑิตสานต์)  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 7 สิงหาคม 2562

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

ผลการวิเคราะห์ชีวมวลอัดเม็ดทอริไฟด์สีน้ำตาล

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล	เอกสารเลขที่ FEB-2019-100	ลำดับการแก้ไข 0
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Ultimate Analysis และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ชื่อตัวอย่าง : Torr2

วันที่รับตัวอย่าง : 5 สิงหาคม 2562

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : 1. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN รุ่น CHN628 ชื่อ Leco

2. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

3. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

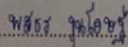
4. Bomb Calorimeter รุ่น AC500 ชื่อ Leco

## ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
Carbon Content	ASTM D5373	wt. %	49.87	0.01
Hydrogen Content		wt. %	5.60	0.21
Nitrogen Content		wt. %	0.71	0.39
Moisture Content	ASTM D3172-3175	wt. %	3.85	1.28
Volatile Matter		wt. %	69.37	0.11
Ash		wt. %	2.90	0.79
Fixed Carbon		wt. %	23.88	0.37
Heating Value	ASTM D5865	cal/g	4,516.04	0.51

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

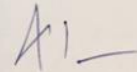
## รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง



(นางสาวพัสสร จุฑโฒินันท์)

นักวิทยาศาสตร์

วันที่ 7 สิงหาคม 2562



(ศาสตราจารย์ ดร.รตภาพงษ์ วิฑิตกานต์)

ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

- หมายเหตุ :
- ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
  - ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

ผลการวิเคราะห์ชีวมวลอัดเม็ดทอริรีไฟต์สีน้ำตาลเข้ม

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล	เอกสารเลขที่ FEB-2019-101	ลำดับการแก้ไข 0
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Ultimate Analysis และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ชื่อตัวอย่าง : Torr3

วันที่รับตัวอย่าง : 5 สิงหาคม 2562

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHN รุ่น CHN628 ชื่อ Leco

2. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

3. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

4. Bomb Calorimeter รุ่น ACS500 ชื่อ Leco

## ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
Carbon Content	ASTM D5373	wt. %	61.37	0.25
Hydrogen Content		wt. %	4.69	0.45
Nitrogen Content		wt. %	0.76	2.46
Moisture Content	ASTM D3172-3175	wt. %	3.35	0.96
Volatile Matter		wt. %	46.13	1.46
Ash		wt. %	3.90	1.46
Fixed Carbon		wt. %	46.62	1.31
Heating Value	ASTM D5865	cal/g	5,738.60	2.21

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสิธร ชูอินทร์

(นางสาวพัสิธร ชูอินทร์)

นักวิทยาศาสตร์

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

A.I.

(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิฑิตสานต์)

ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อย่างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

ผลการวิเคราะห์ทอริไฟด์สีดำ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐนนท์ วิมลสุตร์
วัน เดือน ปี เกิด	29 มกราคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2557 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ปทุมธานี พ.ศ.2560 ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	35/75 ม.7 ต.ลาดสวาย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

