



สภาวะที่เหมาะสมของการทอรีแพคชั่นซีวมวล



โดย  
นายสุวัฒน์ เณรโต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

สภาวะที่เหมาะสมของการทอรีแฟคชั่นชีวมวล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

# OPTIMUM CONDITION OF BIOMASS TORREFACTION



By  
MR. Suwat NANETOE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Doctor of Philosophy (ENERGY ENGINEERING)  
Department of MECHANICAL ENGINEERING  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2018  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ สภาวะที่เหมาะสมของการทอรีแพคชั่นชีวมวล  
โดย สุวัฒน์ เณรโต  
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาคุณภิวัตน์  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

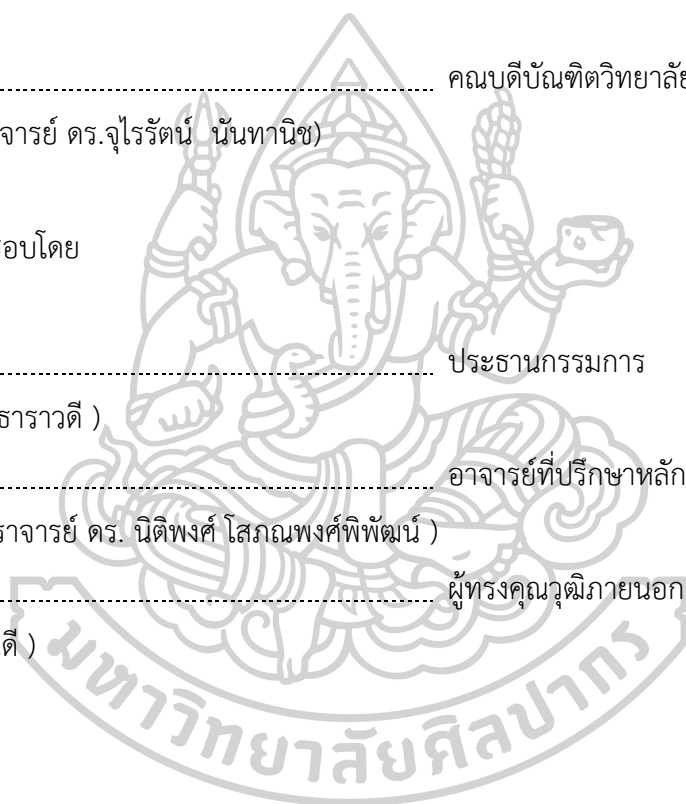
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี )

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ )

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ดร. สุระ ตันดี )



56406804 : วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาคุณฐิบัณฑิต

คำสำคัญ : ทอรรีไฟร์, ค่าความร้อน, ความไม่ชอบน้ำ, ความสามารถในการบด

นาย สุวัฒน์ เณรโต: สภาวะที่เหมาะสมของการทอรรีไฟร์ชื้นชีวมวล อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตินงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของดัชนีความรุนแรงในการทอรรีไฟร์ที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและฟางข้าว ได้แก่ ความสามารถในการบด อัตราการดูดซับความชื้น และค่าความร้อน นอกจากนี้ยังศึกษาผลของดัชนีความรุนแรงในการทอรรีไฟร์ที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด การศึกษาทำโดยเตรียมชีวมวลดิบ 3 ชนิด ได้แก่ กระถิน ฟางข้าว และเหง้ามันสำปะหลัง จากนั้นนำชีวมวลทั้งสามชนิดเข้าสู่กระบวนการทอรรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาในการทอรรีไฟร์ 30, 90 และ 180 นาที นำตัวอย่างที่ได้มาวัดน้ำหนักเพื่อหาค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรรีไฟร์ นำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งเข้าสู่อบความชื้นที่ 90%Rh, 25 องศาเซลเซียส เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ วัดค่าความร้อนของชีวมวลทอรรีไฟร์โดยวิธีบอมบ์คาลอรีมิเตอร์ และวัดความสามารถในการบดโดยวิธีการดัชนีความสามารถในการบดของฮาร์โกรฟ จากนั้นจะนำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปเม็ดเดี่ยว และประเมินความสามารถในการขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่า ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรรีไฟร์มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราส่วนค่าความสัมพันธ์ของชีวมวลทอรรีไฟร์ที่เวลาใดๆ ต่ออัตราส่วนค่าความร้อนของชีวมวลดิบ  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]$  โดยค่าดัชนีความรุนแรงในการทอรรีไฟร์สามารถใช้ในการจำแนกความอ่อน-เข้ม ของการทอรรีไฟร์ได้ในช่วงการทอรรีไฟร์แบบอ่อน ค่าความร้อนของชีวมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย ในขณะที่การทอรรีไฟร์แบบเข้มจะทำให้ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นมาก สำหรับเงื่อนไขการทอรรีไฟร์ที่รุนแรงที่สุดที่ 280 °C, 180 นาที การทอรรีไฟร์แบบอ่อนจะเกิดในช่วงดัชนีความรุนแรง 0-0.52 และค่า  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0] / TSI$  มีค่า 0.135 MJ/kg-Unit of TSI สำหรับการทอรรีไฟร์แบบเข้มจะเกิดในช่วงดัชนีความรุนแรง 0.52-1 และค่า  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0] / TSI$  มีค่า 0.503 MJ/kg-Unit of TSI และเมื่อดัชนีความรุนแรงในการทอรรีไฟร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้น โดยในกรณีของฟางข้าวซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Non-woody Biomass ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ตามค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรรีไฟร์ของการทอรรีไฟร์ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่า 0.0038 หน่วย/หน่วย สำหรับกรณีกระถินและเหง้ามันสำปะหลังซึ่งอยู่ในกลุ่ม Woody Biomass จะพบว่าความเข้มของการทอรรีไฟร์มีผลต่ออัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ โดยการทอรรีไฟร์แบบอ่อน อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของกระถินและเหง้ามันสำปะหลังมีค่า 0.00131 และ 0.00053 Unit of k/Unit of TSI ตามลำดับในการทอรรีไฟร์แบบเข้ม อัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของ

กระถินและเหง้ามันสำปะหลัง มีค่า 0.00236 และ 0.00232 Unit of k/Unit of TSI ตามลำดับ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์และดัชนีความสามารถในการบดไม่พบว่ามีความสัมพันธ์กัน ตัวแปรที่มีผลต่อดัชนีความสามารถในการบดโดยตรง คือ อุณหภูมิและเวลาในการทอรีไฟร์ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างและปริมาณเส้นใยเซลลูโลสมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการบด โดยฟางข้าวสามารถบดได้ในทุกช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 220 ถึง 280 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระถินและเหง้ามันสำปะหลังจะบดได้ที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเวลาในการทอรีไฟร์ที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 260 °C สำหรับเหง้ามันและกระถิน ยิ่งไปกว่านั้นค่าความรุนแรงในการทอรีไฟร์ไม่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการขึ้นรูปโดยตรง แต่การทอรีไฟร์ที่รุนแรงทำให้อนุภาคชีวมวลสูญเสียกลไกการยึดเกาะทางกล เนื่องจากการทอรีไฟร์ทำให้เส้นใยมีความเปราะ ส่งผลให้การอัดขึ้นรูปทำได้ไม่ดี และมีการแตกร่วนของอนุภาคเชื้อเพลิง



56406804 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : torrefied, Higher heating value, hydrophobic, grindability

MR. SUWAT NANETOE : OPTIMUM CONDITION OF BIOMASS TORREFACTION

THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. NITIPONG SOPONPONGPIPAT

This research aimed to study the effects of the Torrefaction Severity Index on the fuel properties of acacia, cassava rhizome, and straw. The fuel properties analyzed in this study include pellet grindability, moisture absorption rate, and heating values. Additionally, this study examined the effects of the Torrefaction Severity Index on the fuel properties and palletization. Acacia, cassava rhizome, and straw raw-biomasses were fed into the torrefaction process with the temperatures set at 220, 250, and 280 °C, and with three different residence time of 30, 90, and 180 minutes. After the torrefaction process, the Torrefaction Severity Index of the biomasses were calculated by dividing the biomasses into two parts. The first part was heated in the heating oven at 90% Rh and 25 °C to obtain the water absorption coefficient, to measure the heat value of biomasses by using a bomb calorimeter, and to determine the grindability by using the Hardgrove Grindability Index. The second part of the biomasses was extruded to pellets, using the single pellet press in order to verify palletization.

The results showed that there was a linear relationship between the Torrefaction Severity Index and torrefied pellets and heat values ratio  $[\text{HHV}_{\text{torr}}/\text{HHV}_o]$ . The Torrefaction Severity Index was able to differentiate weak and strong torrefactions. Weak torrefaction resulted in decreasing heat values, while strong torrefaction resulted in increasing heat values. The highest Torrefaction Severity Index was in the torrefied condition at 280 °C and 180 minutes. The weak torrefaction occurred when the Torrefaction Severity Index was 0 - 0.52 and the value of  $[\text{HHV}_{\text{torr}}/\text{HHV}_o]/\text{TSI}$  was 0.135 MJ/kg. The strong torrefaction occurred when the Torrefaction Severity Index was 0.52 - 1.00, and the value of  $[\text{HHV}_{\text{torr}}/\text{HHV}_o]/\text{TSI}$  was 0.503 MJ / kg.

In addition, there was an inversed relation between the Torrefaction

Severity Index and the water absorption coefficient. When the Torrefaction Severity Index increased, the water absorption coefficient linearly decreased. In the case of straw which is a non-woody biomass, the water absorption coefficient decreased continuously according to the Torrefaction Severity Index at 0.0038 unit of k/unit of TSI. Acacia and cassava rhizome, woody biomasses, had the effect of the Torrefaction Severity Index on the water absorption coefficient. The water absorption coefficient of acacia and cassava rhizome biomasses were 0.00131 and 0.00053 unit of k/unit of TSI, respectively. The decreasing water absorption coefficient of acacia and cassava rhizome was 0.00236 and 0.00232 unit of k/unit of TSI, respectively.

No relationship between the Torrefaction Severity Index and the Grindability Index grindability was found in this study. The factors affecting the grindability were temperature and residence time. It was also found that the structure and the number of cellulose-based fibers had a direct impact on the grindability. Straw could be grinded at the temperature range from 220 to 280 °C. Acacia and cassava rhizome could be grinded at the temperature range from 260 to 280 °C. However, it is essential for acacia and cassava rhizome to set the sufficient residence time for torrefaction at 260 °C. Moreover, no relationship between the Torrefaction Severity Index and pellet grindability was found. In fact, strong torrefaction could cause the biomass particles to lose mechanical adhesion since the torrefaction made the fibers fragile, negatively resulting in crumbles of the biomasses



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาช่วยเหลือ และดูแลเอาใจใส่ อย่างดียิ่ง จากท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ควบคุม ตรวจสอบแก้ไข และให้ข้อเสนอแนะ ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาของท่านอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุระ ตันติ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณ ซึ่งเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ ในการสนับสนุนงานวิจัย นอกจากนี้ยังได้รับกำลังใจและความช่วยเหลือจาก คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดและผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขออภัยเป็นอย่างสูงและขอน้อมรับคำแนะนำ หากมีส่วนหนึ่งส่วนใดผิดพลาดหรือบกพร่อง

สุวัฒน์ เณรโต

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	9
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	9
1.4 วิธีดำเนินการ.....	10
บทที่ 2 .....	11
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1.1 ชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose biomass).....	11
2.2 กระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion process).....	12
2.2.1 ไพโรไลซิส (pyrolysis).....	12
2.2.2 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification).....	16
2.2.3 ทอริฟิเคชัน (Torrefaction).....	16
2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล.....	20
2.3.1 การวิเคราะห์ประมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis).....	20
2.3.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ (Ultimate analysis).....	20

2.3.3 การหาค่าความร้อนสูง (Higher heating value) .....	20
2.4 ดัชนีความรุนแรงของการทำทอริแฟคชั่น (Torrefaction severity index, TSI).....	21
2.5 สรุป .....	22
บทที่ 3 .....	24
3.1 แผนการดำเนินงาน .....	24
3.1.1 แผนการดำเนินงาน.....	24
3.1.2 แผนการวิจัย.....	25
3.1.3 แผนการทดลอง .....	25
3.2 วิธีการทดลอง.....	26
3.2.1. ทดสอบหาค่าความร้อน โดยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ทดสอบหาปริมาณความร้อนที่ชีวมวล .....	27
3.2.2. การทดสอบการดูดซับความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	30
3.2.3 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคชีวมวล .....	31
3.2.4 การหาความสามารถในการบด .....	34
บทที่ 4 .....	36
4.1 ผลของดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์ ที่มีต่อค่าความร้อน .....	36
4.2 ผลของดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์ที่มีต่อการดูดซึมน้ำ .....	42
4.3 ผลของดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์ที่มีต่อดัชนีความสามารถในการบด .....	47
4.4 การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป.....	51
บทที่ 5 .....	56
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	57
รายการอ้างอิง .....	58
ภาคผนวก ก.....	61

ภาคผนวก ข..... 94

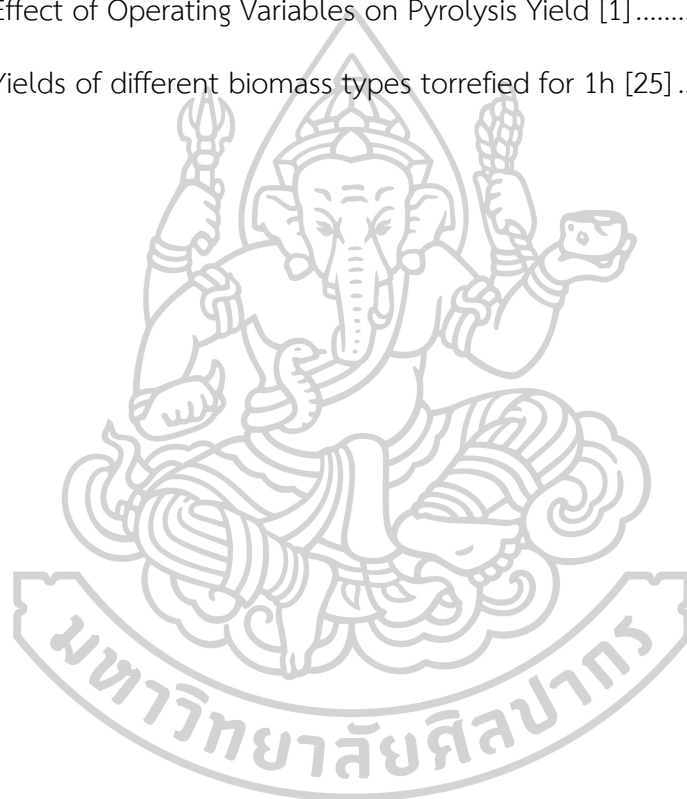
ภาคผนวก ค..... 129

ประวัติผู้เขียน..... 168



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การแบ่งกลุ่มของชีวมวล [1].....	3
ตารางที่ 1.2 ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ที่ไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ( พ.ศ. 2555 ).....	6
ตารางที่ 1.3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชีวมวล.....	7
ตารางที่ 2.1 Effect of Operating Variables on Pyrolysis Yield [1].....	14
ตารางที่ 2.2 Yields of different biomass types torrefied for 1h [25] .....	18



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการผลิตพลังงาน .....	1
รูปที่ 1.2 แสดงผลการจำลองการนำเข้าพลังงานของประเทศไทย.....	2
รูปที่ 1.3 ค่าความร้อนของชีวมวลทอริไฟร์เทียบกับชีวมวลชีวมวลดิบที่อุณหภูมิ 230 260 และ 280 องศาเซลเซียส .....	8
รูปที่ 1.4 คุณสมบัติของความไม่ชอบน้ำของชีวมวลทอริไฟร์แห้งตะเกียบและ ชีวมวลดิบ .....	8
รูปที่ 2.1(a) Molecular structure of cellulose. (b) Molecular structure of a typical hemicellulose, xylan. (c) Some structural units of lignin. [1] .....	12
รูปที่ 2.2 Process of decomposition of large hydrocarbon molecules into smaller ones during pyrolysis. [1] .....	13
รูปที่ 2.3 A variety of pyrolyzer designs: (a) bubbling fluidized bed, (b) circulating fluidized bed, (c) ultra-rapid, (d) ablative, (e) rotating cone, and (f) vacuum. ....	16
รูปที่ 2.4 Stages in the torrefaction process [22] .....	17
รูปที่ 2.5 Composition of the torrefaction reaction products [22].....	17
รูปที่ 2.6 Van Krevelen diagram showing change in the biomass O/C and O/H .....	20
รูปที่ 2.7 Three-dimensional profiles of torrefaction severity index of.....	22
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน .....	24
รูปที่ 3.2 แผนงานวิจัย.....	25
รูปที่ 3.3 แผนการทดลอง.....	26
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของบอมบ์แคลอริมิเตอร์ .....	28
รูปที่ 3.5 บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter).....	29
รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น .....	30
รูปที่ 3.7 การกระจายขนาดแบบ differential analysis.....	33

รูปที่ 3.8 การกระจายขนาดแบบ cumulative analysis .....	33
รูปที่ 3.9 เครื่องเขย่าและตะแกรงคัดขนาด.....	34
รูปที่ 3.10 น้ำหนักที่ผ่านการร่อนผ่านเครื่องร่อนของถ่านหินที่มีค่า HGI 24, 36 และ 67 .....	35
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์กับค่าความร้อน .....	41
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ ...	46
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์กับดัชนีความสามารถในการบด ..	51
รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของกระถินอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ต่างๆ .....	52
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของฟางข้าวอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ต่างๆ .....	53
รูปที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของเหง้ามันอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ต่างๆ .....	54



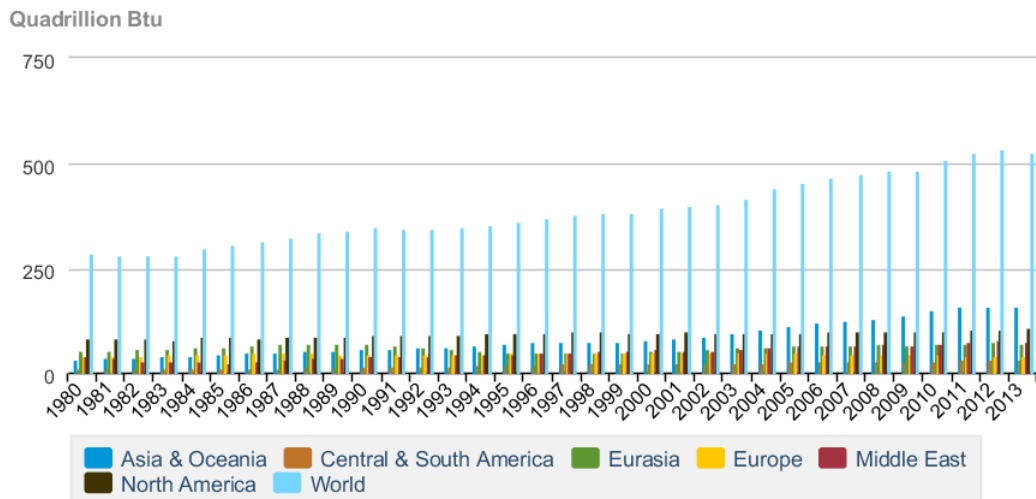
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ด้วยสถานการณ์ด้านพลังงานที่หลายประเทศกำลังประสบปัญหาที่อยู่นั้น ดังเช่นกรณีน้ำมัน ก็มีการปรับตัวสูงขึ้นและมีความผันผวนของราคาเป็นอย่างมาก ดังนั้นแหล่งพลังงานต่างๆ ก็เป็นความต้องการของประเทศมหาอำนาจ ดังรูปที่ 1.1

#### Total Primary Energy Production

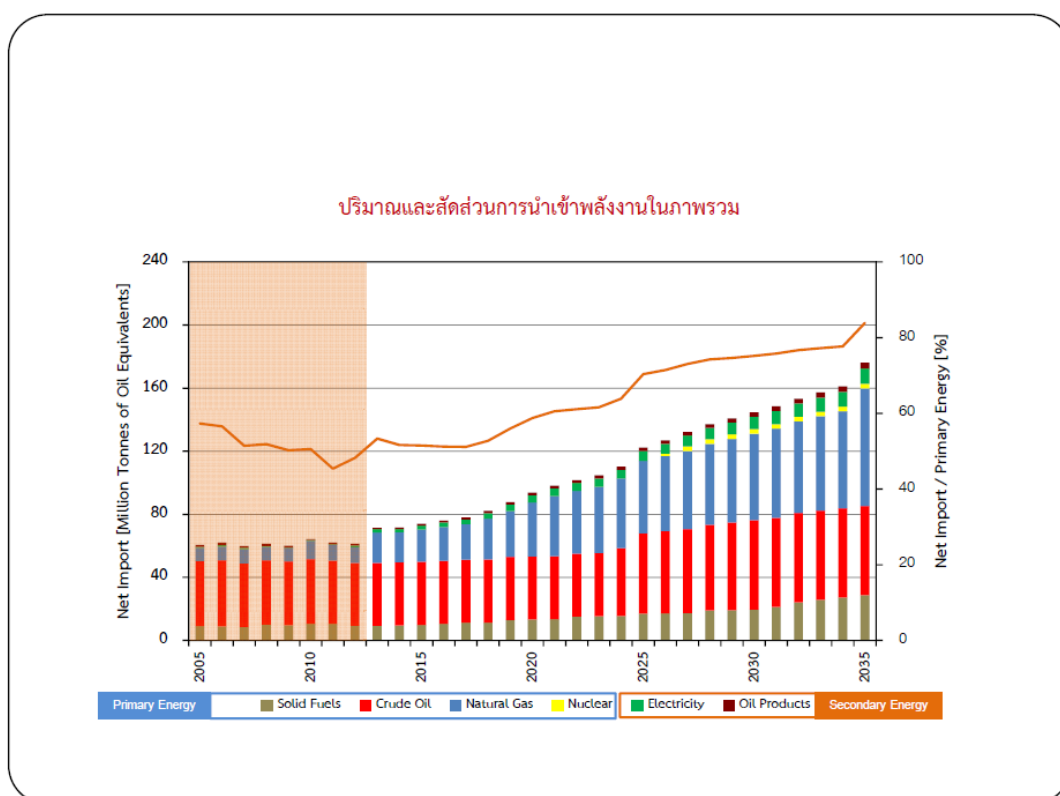


Source: U.S. Energy Information Administration

รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการผลิตพลังงาน

ประเทศไทยก็มีอัตราการนำเข้าพลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับการใช้พลังงานต่างๆ ของคนในประเทศ ทำให้อาจมีโอกาสประสบปัญหาภาวะคุกคามด้านพลังงานในอนาคตก็เป็นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนพัฒนาแหล่งพลังงานและเทคโนโลยีพลังงานไว้รับมือกับสถานการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาด้านพลังงานในประเทศไทย ดังรูปที่ 1.2





รูปที่ 1.2 แสดงผลการจำลองการนำเข้าพลังงานของประเทศไทย  
ที่มา : สัมมนาเชิงวิชาการ ภาพอนาคตพลังงานไทย 2558 กระทรวงพลังงาน

ดังนั้นจึงน่าจะมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนรวมถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและจริงจังในแผนพลังงานของประเทศ ซึ่งชีวมวลก็เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญเช่นกัน

พลังงานทางเลือกที่น่าสนใจและสามารถผลิตขึ้นมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งนับวันพลังงานฟอสซิลก็จะหมดไปหากจะมีขึ้นมาใหม่ ก็ต้องใช้เวลหลายล้านปี ดังนั้นชีวมวล (Biomass) ก็เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถทำขึ้นมาใหม่ได้ (Renewable energy) ชีวมวลมีการให้คำจำกัดความกันหลากหลาย ซึ่งความหมายในกรอบการประชุมสหประชาชาติเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC 2005)) ให้ความหมายว่า มันไม่ใช่ฟอสซิล และเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ มีต้นกำเนิดจากพืช สัตว์ และสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก ซึ่งรวมถึงผลิตภัณฑ์ และผลพลอยได้จากผลิตภัณฑ์ ของเหลือและของเสียจากการเกษตร และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ชีวมวลสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ เป็น 2 กลุ่ม ดังตารางที่ 1.1 [1]

ตารางที่ 1.1 การแบ่งกลุ่มของชีวมวล [1]

กลุ่มที่ 1 เป็นของธรรมชาติ	ชีวมวลบนพื้นดิน	ชีวมวลจากป่า หญ้า พืชให้พลังงาน พืชจากการเพาะปลูก
	ชีวมวลในน้ำ	สาหร่าย พืชน้ำ
กลุ่มที่ 2 เป็นของเสีย	ขยะ	ขยะมูลฝอยจากเทศบาล การชีวภาพ น้ำเสีย แก๊สจากการฝังขยะ
	ของเสียจากการเกษตร	ปศุสัตว์ และปุ๋ยคอก พืชที่เหลือจากการเกษตร
	ของเหลือจากป่า	เปลือกไม้ ใบไม้ ฟืนไม้
	ของเสียจากอุตสาหกรรม	เศษต้นไม้ ขี้เลื่อย ไขมันและน้ำมันที่ไม่มีประโยชน์

### ประเภทของชีวมวล

"ชีวมวล" ส่วนมากมักจะหมายถึงพืช ชีวมวลของพืชทั่วไปจะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ประเภทที่เป็นไม้และไม่ใช่มไม้ เช่น ปาล์มน้ำมันและมะพร้าวจะจัดอยู่ในประเภทเป็นไม้ ส่วนพืชที่เป็นอาหารส่วนใหญ่จะจัดอยู่ในประเภทชีวมวลที่ไม่ใช่มไม้

ความแตกต่างที่มากที่สุดระหว่างชีวมวลประเภทไม้และชีวมวลที่ไม่ใช่มไม้คือเวลาที่ทำให้ชีวมวลเปลี่ยนแปลงไป ชีวมวลประเภทไม้โดยทั่วไปจะใช้เวลานานที่จะเติบโตและทำให้ต้องมีการจัดการที่ซับซ้อนมากขึ้นกว่าชีวมวลประเภทที่ไม่ใช่มไม้ ส่วนใหญ่แล้วชีวมวลประเภทนี้สามารถนำมาใช้ได้ทันที ในขณะที่ชีวมวลประเภทที่ไม่ใช่มไม้จะต้องถูกแปลงเป็นสารเคมีก่อนที่จะนำไปใช้ ต่อไปนี้คือลักษณะบางชนิดที่พบบ่อยที่สุดของชีวมวลที่ใช้ในการผลิตพลังงาน

- Woody Biomass (ชีวมวลประเภทไม้)
  - มะพร้าว ในพื้นที่ที่มีต้นมะพร้าวเป็นจำนวนมากเมื่อมีการเก็บมะพร้าวแล้ว เนื้อหรือส่วนที่กินได้ของมะพร้าวจะนำไปบริโภคส่วนที่เหลือจะถูกแปลงสภาพเป็นก้อน

ประโยชน์ของชีวมวลชนิดนี้คือการที่มันสามารถเผาผลาญได้อย่างมีประสิทธิภาพและใบที่เหลือก็สามารถนำมาอัดเป็นก้อนใช้ได้

- ปาล์มน้ำมันให้ชีวมวลได้สองวิธี คือเนื้อและเมล็ดใช้ผลิตน้ำมันซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซล หลังจากทีปาล์มน้ำมันได้ถูกเก็บไปแล้วก็เหลือเฉพาะลำต้นที่สามารถนำมาเผาเป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเป็นชีวมวลที่ให้ชีวมวลทั้งโดยตรงและโดยอ้อม
- ต้นพ็อปลาร์ (Poplar) เป็นพืชที่มีมูลค่าสูง พืชในประเภทนี้ประกอบด้วยแอสเพน ต้นไม้เหล่านี้มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีความต้านทานการเกิดโรคสูง
- ต้นไพน (Pine) มีมูลค่ามากเช่นเดียวกับต้นพ็อปลาร์ มันสามารถเติบโตได้อย่างรวดเร็วเพาะปลูกได้ง่ายและมีต้นทุนในการเพาะปลูกต่ำ
- ต้นกระถิน [2] เป็นไม้ตระกูลถั่วที่มีความสามารถดักไนโตรเจนจากอากาศได้โดยปมของไรโซเบียม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5-2.5 มิลลิเมตร โดยในรากขนาดเล็กหรือรากฝอย จะมีเชื้อราไมโครไรซาอยู่ร่วมกับระบบราก ช่วยให้ต้นกระถินได้ฟอสฟอรัสและธาตุอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นได้มากขึ้น
- เหง้ามันสำปะหลัง [4] เหง้ามันเป็นส่วนที่ถูกตัดออกจากหัวมัน ด้านบนมีลักษณะเป็นลำต้นค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 15 มม. ยาวประมาณ 30 ซม. ส่วนอีกด้านหนึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน ปัจจุบันยังไม่ค่อยนำไปใช้งาน จึงมักถูกเผาทิ้งตามไร่
- 
- Non-woody Biomass (ชีวมวลประเภทไม่ใช่ไม้)

ส่วนใหญ่มาจากพืชพลังงานสูง (อ้อยข้าวโพดและอื่น ๆ ) และรวมทั้งของเสียจากอาหารอุตสาหกรรมและสัตว์ ความสำคัญของมันได้เกิดขึ้นมาจากที่มันความเป็นไปได้ที่จะใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวมากขึ้นโดยเฉพาะที่มาจากพืชพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้สำหรับยานพาหนะ เอทานอลที่ทำจากอ้อยข้าวโพดหรือข้าวสาลีเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่แพร่หลายมาก

- สาหร่าย (Algae) ให้ผลประโยชน์อย่างมากทางด้านเชื้อเพลิงชีวภาพ ข้อแรกสาหร่ายสามารถจัดการได้อย่างง่ายดายโดยใช้เทคโนโลยีทางพันธุวิศวกรรม สิ่งนี้จะช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนการผลิตน้ำมันให้ประโยชน์มากขึ้น ประการที่สองสาหร่ายสามารถปลูกได้ในพื้นที่เล็กๆ ตามชายฝั่ง
- ข้าวโพด (Corn) ประโยชน์ที่มากที่สุดของข้าวโพดก็คือว่ามันเติบโตขึ้นง่ายและมีความอุดมสมบูรณ์ สหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตข้าวโพดชั้นนำของโลก และเป็นประเทศชั้นนำของโลกที่เป็นผู้ผลิตเอทานอลที่ทำจากข้าวโพด ในแต่ละปีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงของ

ผลิตภัณฑ์จากข้าวโพดที่ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกาจะใช้เพื่อให้ไขมันเชื้อเพลิงเอทานอล

- หญ้า (Grasses) หญ้ามีหลายชนิดที่แตกต่างกันและเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพสูง ส่วนใหญ่ที่กล่าวถึงกันทั่วไปคือ หญ้าสวิชท์ (Switchgrass) ซึ่งมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ทั้งทางตรงและทางอ้อม มีเซลลูโลสสูง ทำให้มันเหมาะที่จะเป็นชีวมวลโดยตรงคือมันถูกเผาไหม้โดยตรง ในขณะที่บางแหล่ง จะถูกแปลงเป็นเม็ดเพื่อความสะดวกในการขนส่งและง่ายในเก็บรักษา ประโยชน์ของหญ้า Switchgrass ที่มากกว่าชีวมวลอื่นๆ เช่น
  - การปรับปรุงคุณภาพดินจากการไม่ไถในแต่ละปี
  - อัตราผลตอบแทนที่ค่อนข้างสูงในที่ดินชายฝั่ง ที่ไม่เหมาะสำหรับการผลิตอาหาร
  - ทนต่อภัยแล้งและทนต่อศัตรูพืช
  - มีความต้องการน้ำและปุ๋ยต่ำ
    - ถั่วเหลือง (Soybean) ปัจจุบันนี้ถั่วเหลืองโดยทั่วไปแล้วไม่ถือว่าเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานชีวมวลขนาดใหญ่ เพราะมันต้องใช้น้ำและปุ๋ยจำนวนมากที่ค่อนข้างสูง มีผลผลิตต่อไร่ต่ำและมีต้นทุนในการเพาะปลูกค่อนข้างสูง
    - อ้อย (Sugar cane) ศักยภาพของอ้อยที่จะทำหน้าที่เป็นวัตถุดิบชีวมวลขึ้นอยู่กับสถานที่ซึ่งเป็นที่ปลูก ในบราซิลอ้อยได้รับการเพาะปลูกมานานหลายทศวรรษและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้อ้อยเป็นเชื้อเพลิงจะค่อนข้างจำกัด ในสถานที่อื่น ๆ เช่น แอฟริกาใต้ ผลกระทบของการใช้อ้อยเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลแบบดั้งเดิม
    - ฟางข้าว [3] มีขนาดเล็กยาวแต่กลวงได้มาหลังการจากการเกี่ยวข้าว ฟางข้าวมีประโยชน์หลายอย่าง เช่น เป็นอาหารสัตว์ ใช้คลุมดิน เพาะเห็ดฟาง ทำโครงพวงหรีดดอกไม้ และใช้ในอุตสาหกรรมทำกระดาษ เป็นต้น แต่ยังมีฟางข้าวอีกมากที่ไม่ได้นำไปใช้ คาดว่าประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนที่เหลือถูกเผาทิ้ง

ตารางที่ 1.2 ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ที่ไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ( พ.ศ. 2555 )

ชนิดพืช	วัสดุเหลือใช้	ปริมาณชีวมวลที่เหลือ [ล้านตันต่อปี]	ค่าความร้อน (MJ/kg)	พลังงาน (กิโลตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ, kTOE)
ข้าว	ฟางข้าว	15.70	12.33	4,623.78
	แกลบ	1.78	14.20	602.63
อ้อย	ใบและยอดอ้อย	27.68	15.48	10,233.94
	ชานอ้อย	0.03	7.37	5.26
มันสำปะหลัง	ลำต้น	1.84	13.38	587.89
	เหงำมัน	13.16	5.49	1,727.32
ข้าวโพด	ชัง	0.24	16.63	96.26
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์มเปล่า	1.34	7.24	232.25
	ใบปาล์ม	0.00	11.80	-
	กะลาปาล์ม	0.00	16.90	-
	ทางปาล์ม	33.31	7.54	5,998.29
ยางพารา	เปลือก ปีกไม้ ปลายไม้	0.00	13.96	-
	ขี้เลื่อย	0.00	13.96	-
	ราก ตอ และกิ่ง	0.74	13.96	245.40
ยูคาลิปตัส	เปลือก ปลายไม้	6.00	6.30	902.84
			<b>รวม</b>	<b>23,765.14</b>

ที่มา : โครงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย สำหรับวิจัยค้นคว้าพลังงาน  
กระทรวงพลังงาน (2555)

ชีวมวลตามตารางที่ 1.2 นี้ สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ เพื่อให้เหมาะสม  
ในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ โดยผลิตภัณฑ์จากชีวมวล สามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 3  
ชนิดคือ 1.ของเหลว ได้แก่ อีเทนอล ไบโอดีเซล 2.แก๊ส ได้แก่ ไบโอก๊าซ (มีเทน,  
คาร์บอนไดออกไซด์) โพรพิลีนเอทิลเอทิล (คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนได  
ออกไซด์) ซินแก๊ส (คาร์บอนมอนอกไซด์, ไฮโดรเจน) 3.ของแข็ง ได้แก่ ถ่าน ถ่านชีวมวลทอรัไฟร์

ก่อนการที่จะนำชีวมวลมาใช้งานต้องมีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของชีวมวลที่จะใช้ก่อน  
เนื่องจากคุณสมบัติของชีวมวลบางอย่างไม่เหมาะต่อการใช้งาน เช่น ปริมาณความชื้นซึ่งถ้ามีมาก  
เกินไปจะส่งผลให้ชีวมวลสามารถเผาไหม้ได้น้อยลง นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงปริมาณเถ้า ปริมาณไ  
ระเหย และค่าพลังงานความร้อนที่ชีวมวลสามารถผลิตได้อีกด้วย [5-7] ดังตารางที่ 1.3

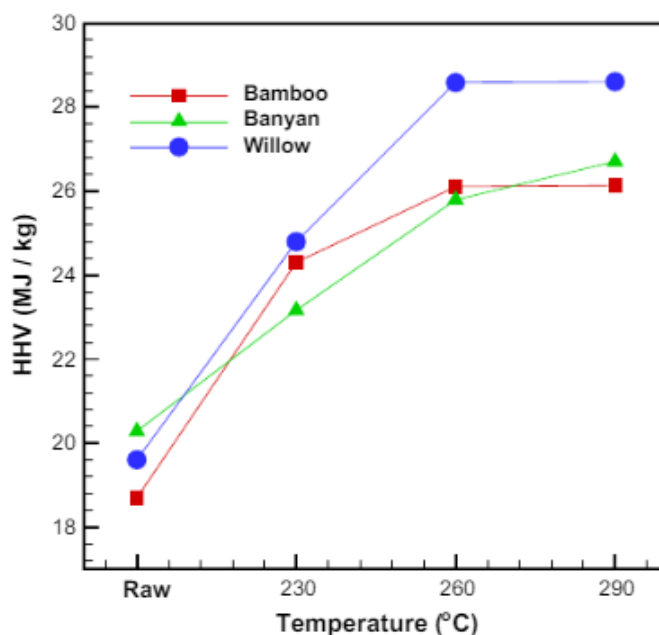
ตารางที่ 1.3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชีวมวล

คุณสมบัติชีวมวลต่างๆ	Moisture %	Ash %	Volatile Matter %	Fixed Carbon %	Higher Heating Value kJ/kg	Lower Heating Value kJ/kg
แกลบ (Rice Husk)	12.00	12.65	56.46	18.88	14,755	13,517
ฟางข้าว (Rice Straw)	10.00	10.39	60.70	18.90	13,650	12,330
ชานอ้อย (Bagasse)	50.73	1.43	41.98	5.86	9,243	7,368
ใบอ้อย (Cane Trash)	9.20	6.10	67.80	16.90	16,794	15,479
ไม้ยางพารา (Parawood)	45.00	1.59	45.70	7.71	10,365	8,600
เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)	38.50	4.42	42.68	14.39	13,127	11,400
กะลาปาล์ม (Palm Shell)	12.00	3.50	68.20	16.30	18,267	16,900
ทะลายปาล์ม (Empty Fruit Bunch)	58.60	2.03	30.46	8.90	9,196	7,240
ต้นปาล์ม (Palm Trunk)	48.40	1.20	38.70	11.70	9,370	7,556
หางปาล์ม (Palm Leaf)	78.40	0.70	16.30	4.60	3,908	1,760
ซังข้าวโพค (Corn cob)	40.00	0.90	45.42	13.68	11,298	9,615
ลำต้นข้าวโพค (Corn Stalk)	41.70	3.70	46.46	8.14	11,704	9,830
เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome)	59.40	1.50	31.00	8.10	7,451	5,494
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark)	60.00	2.44	28.00	9.56	6,811	4,917

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนงานพลังงาน กระทรวงพลังงาน

ในการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้ง ซึ่งเป็นการอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากชีวมวล หรือจะเป็นการลดขนาดและการเพิ่มความหนาแน่นด้วยการขึ้นรูป และอีกวิธีหนึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลโดยใช้ความร้อน โดยให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิ 350 – 650 องศาเซลเซียส เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส และอีกหนึ่งกระบวนการที่เป็นกระบวนการย่อยๆของกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการไพโรไลซิส โดยกระบวนการนี้จะให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส และกระบวนการจะดำเนินไปภายใต้บรรยากาศเฉื่อยและมีอัตราความร้อนต่ำ [8-11] ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการทอร์แฟกชัน

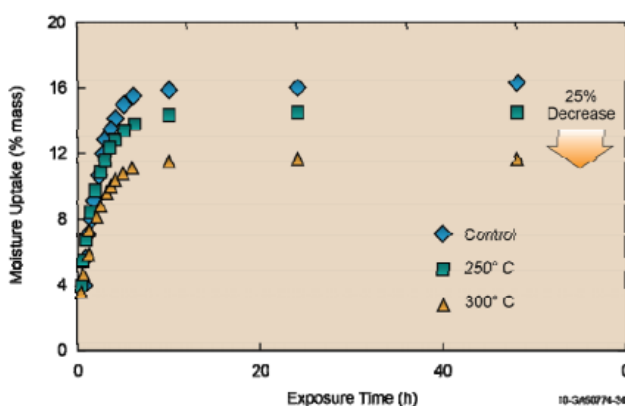
ได้มีการศึกษาอิทธิพลของค่าความร้อนของชีวมวลไม้ไผ่ ต้นไทร และมะเขือ เมื่อนำชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมาทอร์ไฟร์ จะพบว่า เมื่อทอร์ไฟร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ชีวมวลจะมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ตามรูปที่ 1.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับอุณหภูมิ



รูปที่ 1.3 ค่าความร้อนของชีวมวลทอริไฟร์เทียบกับชีวมวลชีวมวลดิบที่อุณหภูมิ 230 260 และ 280 องศาเซลเซียส

ที่มา : Chen WH, and others “An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction”

นอกจากนั้นชีวมวลเมื่อนำมาเก็บไว้เป็นระยะเวลาสั้นๆนั้น ชีวมวลก็จะดูดความชื้นเข้าไป ทำให้ชีวมวลเกิดการเน่าสลาย เสียหายได้ โดยพบว่าชีวมวลทอริไฟร์จะมีการดูดความชื้นลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ (ชีวมวลตัวที่ควบคุม) ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 คุณสมบัติของความไม่ชอบน้ำของชีวมวลทอริไฟร์แท่งตะเกียบและ ชีวมวลดิบ  
ที่มา: Tumuluru J.S., and Others. “Review on biomass torrefaction process and product properties s-1041 symposium on thermochemical conversion”

ชีวมวลที่นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ จะนำมาขึ้นรูปให้เป็นแท่งทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 6 ถึง 16 มิลลิเมตร ความยาว 10 ถึง 30 มิลลิเมตร โดยความสามารถในการขึ้นรูปเป็นชีวมวลแท่งนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล อุณหภูมิและแรงกดของแม่พิมพ์ [9, 10, 12-14]

ดังนั้นจึงมีแนวคิดซึ่งจะใช้ชีวมวลที่เป็นพืชผลทางอุตสาหกรรม นำมาผ่านกระบวนการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น ทดสอบการขึ้นรูป ทดสอบค่าความร้อน เป็นต้น เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอริไฟร์ เพื่อช่วยให้ทราบถึงปัญหา รวมไปถึงผลกระทบต่างๆ ที่อาจเกิดกับชีวมวลเพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพของชีวมวล

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลของดัชนีความรุนแรงในการทอริไฟร์ที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและฟางข้าว ได้แก่ ความสามารถในการบด อัตราการดูดซับความชื้น และค่าความร้อน

1.2.2 ศึกษาผลของดัชนีความรุนแรงในการทอริไฟร์ที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทอริไฟร์ ต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและฟางข้าวสับละเอียดขนาด 3-5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 220, 250 และ 280°C

1.3.2 ทดสอบความต้านการสลายตัวและทดสอบคุณสมบัติแบบ Proximate Analysis ของต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและฟางข้าวได้แก่

1.3.2.1 ค่าความร้อน (High Heating Value)

1.3.2.2 ค่าความไม่ชอบน้ำ (Hydroscopicity)

1.3.2.3 ความสามารถในการบด (Grindability)

1.3.2.4 ความสามารถในการขึ้นรูป ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ม.ม.และมีความยาว 2 ซม. (Pelletization)



## 1.4 วิธีดำเนินการ

การดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน				
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
1.4.1 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิตเชื้อเพลิงแท่ง	↔				
1.4.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทอรีไฟร์		↔			
1.4.3 นำต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและฟางข้าวสับละเอียดมาผ่านกระบวนการทอรีไฟร์			↔		
1.4.4 ทดสอบคุณสมบัติทาง Proximate Analysis ของเหง้ามันสำปะหลัง ต้นกระถินและฟางข้าว				↔	
1.4.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ					↔



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

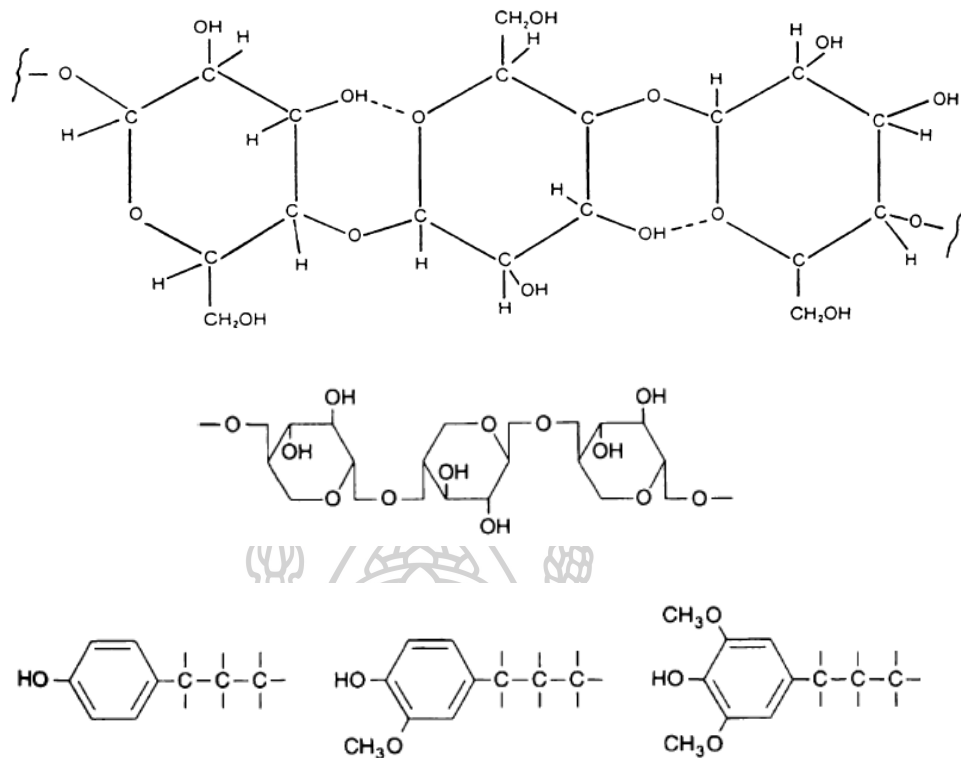
##### 2.1.1 ชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose biomass)

องค์ประกอบทั่วไปของชีวมวลประกอบด้วยโพลีเมอร์หลัก 3 ส่วน คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ดังรูปที่ 2.1

2.1.1.1 เซลลูโลส เป็นสารประกอบที่มีอยู่มากมายบนโลก และมีอยู่มากในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 คือประมาณ 30-50% โดยน้ำหนักแห้ง ขึ้นอยู่กับชนิดของสายพันธ์ [1] เซลลูโลส  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นโพลีเมอร์สายโซ่ยาว มีอันดับการพอลิเมอไรเซชันสูง (high degree of polymerization) จำนวนโดยประมาณของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ที่อยู่ในสายพอลิเมอร์สูงประมาณ 10,000 (น้ำตาลโมเลกุลประมาณ 10,000 โมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว) และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500,000 [1] นั่นคือ มันมีโครงสร้างผลึกนับพันของโมเลกุลกลูโคสซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน 6 ตัว ดังรูปที่ 2.1 ทำให้ทนทานต่อสารเคมีและสารละลาย อีกทั้งมีค่าแรงต้านทานแรงดึงสูง (high tensile strength) [1, 15]

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส  $(C_5H_8O_4)_n$  เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) เป็นส่วนประกอบหนึ่งของผนังเซลล์ มีอยู่ประมาณ 15-35% โดยน้ำหนักแห้ง ในขณะที่เซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลักที่แข็งแรง มีความต้านทานต่อการย่อยสลาย ส่วนเฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous structure) คือ มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระบบทำให้มีความแข็งแรงต่ำ และมีอันดับการพอลิเมอไรเซชันต่ำ (Low degree of polymerization) ประมาณ 200 และทำให้สลายตัวได้ง่าย (easy hydrolysis) ด้วยกรดอ่อนและด่าง [16]

2.1.1.3 ลิกนิน เป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) มีขนาดโมเลกุลใหญ่ อยู่ในช่องว่างในผนังเซลล์ และทำหน้าที่ยึดเกาะเซลล์ให้อยู่ด้วยกัน มีอยู่ประมาณ 15-35 % ของชีวมวลแห้ง มีส่วนประกอบโรรเมติคตามธรรมชาติ (กลิ่นหอม) จำนวนมาก [17,18] ลิกนินย่อยสลายยาก ถึงแม้แต่กรดกำมะถันก็ไม่สามารถละลายได้ [1] ในไม้เนื้อแข็งมีประมาณ 18-25 % และในไม้เนื้ออ่อนมีประมาณ 25-35 % โดยน้ำหนักแห้ง



รูปที่ 2.1(a) Molecular structure of cellulose. (b) Molecular structure of a typical hemicellulose, xylan. (c) Some structural units of lignin. [1]

## 2.2 กระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion process)

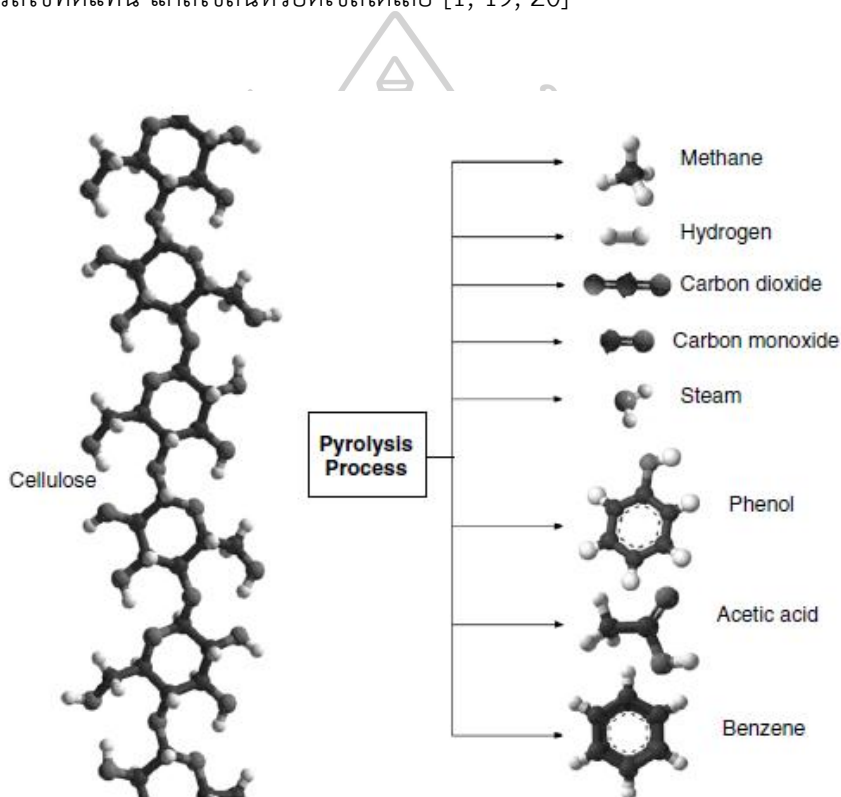
กระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อนเป็นการสลายอินทรีย์สารโดยเพิ่มอุณหภูมิในบรรยากาศออกซิเจนที่จำกัด จุดประสงค์ของกระบวนการทางความร้อนนี้ก็เพื่อสลายสารประกอบลิกโนโซลูโลสให้เป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กลง เพื่อที่จะปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มค่าหรือมีค่าสูงขึ้น การเผาชีวมวลโดยตรงเป็นวิธีการดั้งเดิม ซึ่งวิธีการนี้ไม่ได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าของชีวมวลเลย นอกจากจะได้พลังงานงานความร้อนเท่านั้น [1]

### 2.2.1 ไพโรไลซิส (pyrolysis)

ไพโรไลซิส เป็นวิธีการผลิตถ่านดั้งเดิม ที่แพร่หลายมากกว่า 38,000 ปีแล้ว โดยนำไปใช้ในการหุงข้าว ให้ความร้อนและในอุตสาหกรรมต่างๆ ไพโรไลซิสเป็นวิธีการสลาย (แตกตัว) ให้โมเลกุลที่ซับซ้อน (ใหญ่) ให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กหลายๆโมเลกุล ซึ่งผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสสามารถจำแนกง่ายๆได้ 3 ชนิดดังรูปที่ 2.2 คือ [1]

1. ของแข็ง (ส่วนมากเป็นถ่านและคาร์บอน)
2. ของเหลว (น้ำมันดิน ไฮโดรคาร์บอนหนักและน้ำ)
3. แก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ อะเซทิลีน มีเทน อีเทน เบนซีน เป็นต้น)

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวล เป็นที่น่าสนใจมากและมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากกรรมวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถให้ความร้อนสูง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวก็สามารถใช้แทนน้ำมันดิบได้ น้ำมันชีวมวลสามารถใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ และสามารถใช้ทดแทน แก๊สโซลีนหรือดีเซลได้เลย [1, 19, 20]



รูปที่ 2.2 Process of decomposition of large hydrocarbon molecules into smaller ones during pyrolysis. [1]

### 2.2.1.1 ชนิดของเครื่องไพโรไลเซอร์ [1]

สมัยก่อน เครื่องไพโรไลเซอร์ มักจะทำหรือผลิต ผลิตภัณฑ์ เป็นครั้งๆหรือวงๆไม่ได้ผลิตต่อเนื่อง จะใช้เวลาในการผลิตยาวนานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ (ถ่าน) จำนวนมาก โดยใช้อัตราให้ความร้อนช้าๆและระยะเวลาให้ความร้อนนานๆ (อยู่ในเตานานๆ) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านจำนวนมาก ดูจากตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 Effect of Operating Variables on Pyrolysis Yield [1]

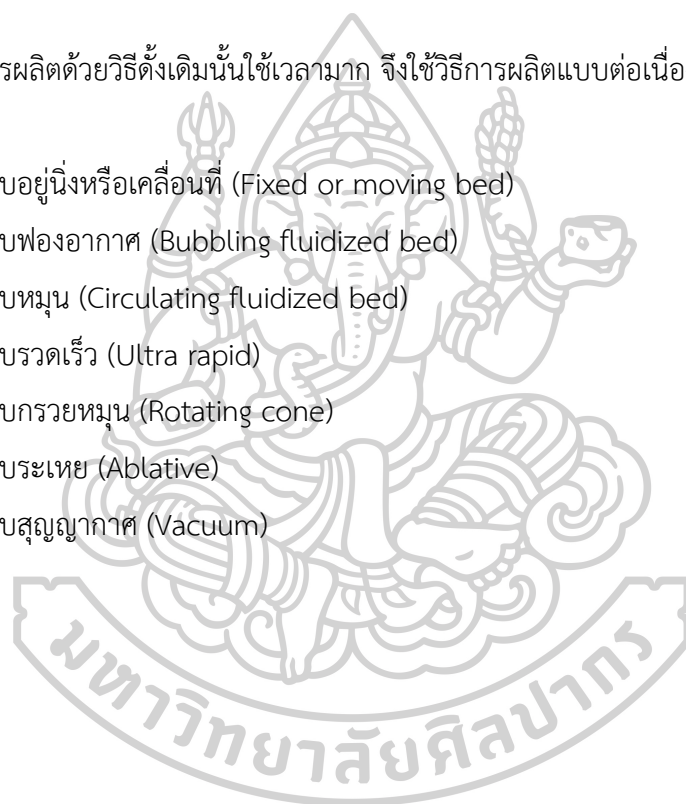
	Maximum		
Maximum Yield	Temperature	Heating Rate	Gas Residence Time
Char	Low	Slow	Long
Liquid	Low (~500 °C <sup>1</sup> )	High	Short
Gas	High	Low	Long

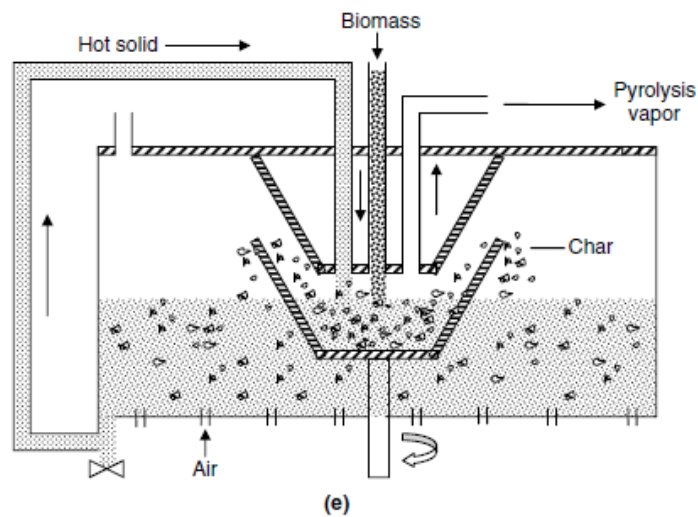
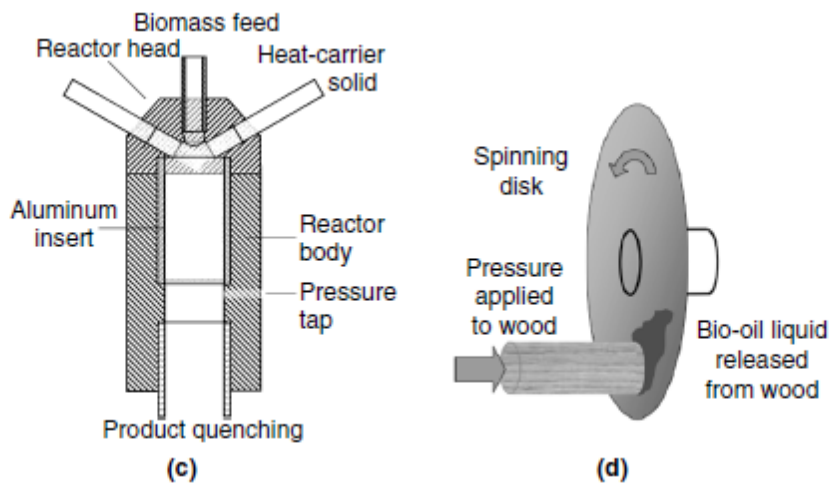
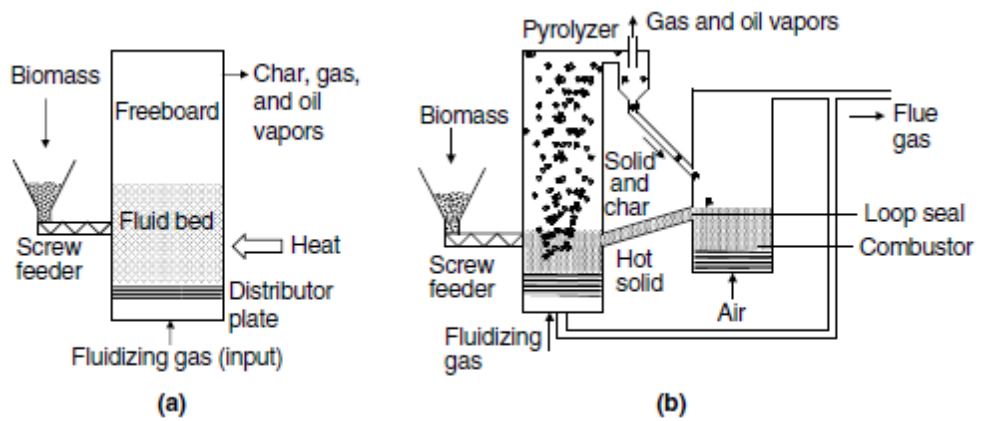
<sup>1</sup>Data excerpted from Bridgwater, 1999.

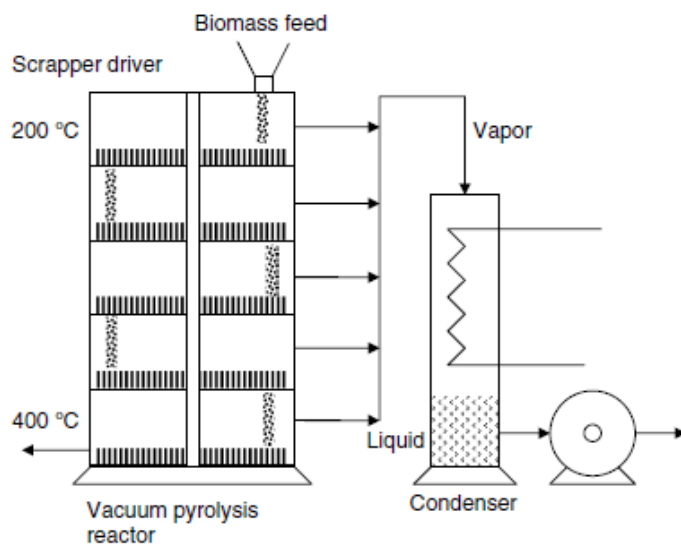
Source: Compiled from data in Demirbas, 2001.

ในสมัยใหม่การผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมนั้นใช้เวลามาก จึงใช้วิธีการผลิตแบบต่อเนื่องได้ 7 แบบ ดังรูปที่ 2.3 คือ [1]

- 1.แบบอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ (Fixed or moving bed)
- 2.แบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized bed)
- 3.แบบหมุน (Circulating fluidized bed)
- 4.แบบรวดเร็ว (Ultra rapid)
- 5.แบบกรวยหมุน (Rotating cone)
- 6.แบบระเหย (Ablative)
- 7.แบบสุญญากาศ (Vacuum)







(f)

รูปที่ 2.3 A variety of pyrolyzer designs: (a) bubbling fluidized bed, (b) circulating fluidized bed, (c) ultra-rapid, (d) ablative, (e) rotating cone, and (f) vacuum.

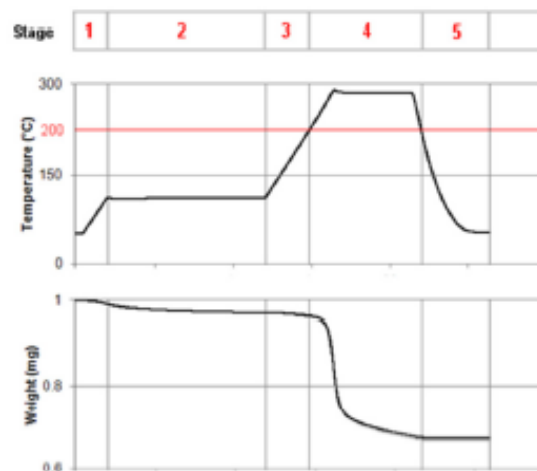
### 2.2.2 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน เพื่อจุดประสงค์ผลิต ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ ซินแก๊ส (syn gas) หรือแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthesis gas) วิธีนี้จะแตกต่างจากวิธีทาง ไพโรไลซิส (pyrolysis) คือการใช้อุณหภูมิสูงในบรรยากาศออกซิเจนจำกัด [19] แก๊สซิฟิเคชันใช้กันมากกว่า 70 ปี เพื่อผลิต โพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) [21]

### 2.2.3 ทอริไฟร์ (Torrefaction)

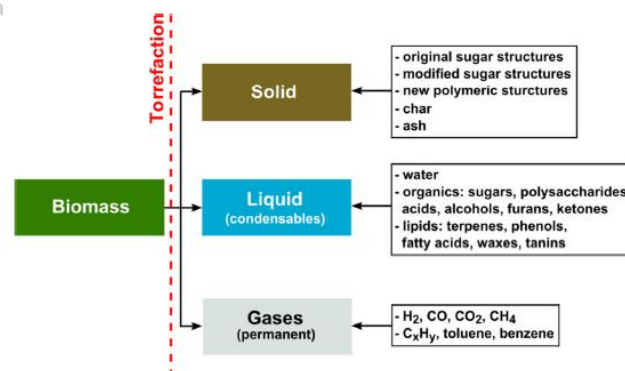
ทอริไฟร์ เป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลด้วยวิธี เคมีความร้อน (Thermochemical) ขบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิระหว่าง 200-300 °C ที่ความดันบรรยากาศ ภายใต้บรรยากาศอับอากาศ โดยปกติทั่วไปจะใช้เวลาในกระบวนการน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ทอริไฟร์ก็เป็นวิธีการทำไพโรไลซิสเหมือนกัน แต่เป็นไพโรไลซิสแบบอ่อน (mild pyrolysis) คำว่าทอริไฟร์ดั้งเดิมนั้นมาจากภาษาฝรั่งเศส ซึ่งมีความหมายว่า ปิ้งหรือย่าง (roasting) อย่างไรก็ตามชื่อทอริไฟร์นี้ใช้ในกระบวนการคั่วเมล็ดกาแฟ เพื่อให้ได้เมล็ดกาแฟที่มีความเปราะ (brittleness) ขบวนการทอริไฟร์สามารถแยกออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ตามเวลาและอุณหภูมิ [22] ตามรูปที่ 2.4 ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนการให้ความร้อน ซึ่งขั้นตอนนี้อุณหภูมิของชีวมวลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 100 °C โดยจะทำให้น้ำในชีวมวลนั้นระเหยไป และอุณหภูมินั้นจะคงที่ที่ 100 °C ซึ่งจะอยู่ในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเรียกว่าขั้นตอน

เริ่มการทำให้แห้ง (pre-drying phase) ขั้นตอนที่ 3 เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100-200°C เรียกขั้นตอนนี้ว่า ขั้นตอนหลังการทำให้แห้งและให้ความร้อนปานกลาง (post-drying and intermediate heating phase) ในขั้นตอนนี้ น้ำทั้งหมดก็จะระเหยไปพร้อมกับสารประกอบอินทรีย์ที่เบา (light organic) ก็ระเหยไปด้วย ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนของทอริไฟร์ จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (decomposition reaction) เมื่ออุณหภูมิถึง 200°C ในขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนทำให้เย็นลง (cooling phase) ซึ่งของแข็งและชีวมวลทอริไฟร์ ที่ได้จะลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิต้อง



รูปที่ 2.4 Stages in the torrefaction process [22]

ชีวมวลที่ผ่านการทำทอริไฟร์นั้น จากกระบวนการจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมา 3 ส่วน คือ ได้ทั้งเป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส [22] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Composition of the torrefaction reaction products [22]



### 2.2.3.1 อุณหภูมิของการทอริไฟร์ (torrefaction temperature)

ผลจากการทอริไฟร์ชีวมวล ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการทอริไฟร์ (ตารางที่ 3) และผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวก็จะได้มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของการทอริไฟร์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส นั่นก็ทำให้เชื่อมั่นว่าอุณหภูมิมีนัยสำคัญเป็นอย่างมากต่อสัดส่วนและผลผลิตที่ได้ [23, 24]

ตารางที่ 2.2 Yields of different biomass types torrefied for 1h [25]

Biomass	Temp. (°C)	Gas (%)	Liquid (%)	Solid (%)	Solids composition (%)			% energy retained
					C	H	O	
Pine	230	0.6	7.0	92.4	49.7	5.9	44.3	96.5
Pine	250	1.0	10.8	88.2	50.9	5.8	43.2	94.4
Pine	280	2.1	19.8	78.1	56.4	5.5	38.0	93.9
Bagasse	230	2.6	9.9	87.5	48.6	5.6	45.5	96.4
Bagasse	250	10.4	10.7	78.9	50.6	5.6	43.5	92.0
Bagasse	280	12.9	18.5	68.6	52.8	5.3	41.5	82.9
Birch	250	1.7	12.8	85.5	51.5	5.8	42.5	97.9
Birch	230	0.8	6.0	93.2	48.2	5.9	45.7	93.8
Birch	250	1.2	10.8	88.0	49.5	5.7	44.7	90.0
Birch	280	2.0	19.0	79.0	51.3	5.6	43.0	84.3
Salix	230	1.0	8.0	91.0	45.6	5.9	48.2	94.4
Salix	250	1.5	13.0	85.5	45.8	5.8	48.1	88.4
Salix	280	3.0	18.0	79.0	46.3	5.6	47.7	81.8
Miscanthus	230	1.0	10.0	89.0	44.4	6.1	48.7	87.7
Miscanthus	250	2.0	15.0	83.0	47.4	5.8	46.1	87.7
Miscanthus	280	7.0	24.0	69.0	51.3	5.7	42.4	80.0
Straw Pellets	230	0.1	5.0	95.0	47.8	6.3	45.2	95.1
Straw Pellets	250	0.3	9.8	90.0	49.0	6.1	44.1	91.6
Straw Pellets	280	1.0	19.1	79.9	52.8	6.1	40.3	89.8
Wood Pellets	230	0.06	6.5	96.5	49.8	6.3	43.8	97.5
Wood Pellets	250	0.15	5.5	94.4	50.7	6.2	43.0	96.9
Wood Pellets	280	0.6	10	89.4	52.5	6.2	41.3	96.0

\*solids composition expressed on a dry ash-free basis

### 2.2.3.2 ขนาดของอนุภาค (particle size)

ขนาดของอนุภาคก็มีผลต่อปฏิกิริยาทอริไฟร์เหมือนกัน แต่ก็ยังน้อยกว่าอุณหภูมิ และ เวลาพำนัก (residence time) ขนาดของอนุภาคก็ไม่มีผลที่เป็นนัยสำคัญต่อการทำทอริไฟร์ ได้มีการศึกษาการทำทอริไฟร์ ต้นหลิว (willow) เมื่อลดขนาดต้นหลิวให้มีขนาดในช่วง 0-50 มม. [24] ซึ่งก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาทอริไฟร์ต้นหญ้ามิสแดนทัส (miscanthus) [26]

### 2.2.3.3 เวลาพำนัก (residence time)

เวลาพำนักเป็นตัวแปรที่มีผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาของรีเฟลนลิ่ง และคณะ ได้ทำการเพิ่มเวลาพำนัก (residence time) จาก 20 เป็น 40 นาที พบว่ามีการสูญเสีย น้ำหนักโดยเฉลี่ย 1-5 %

#### 2.2.3.4 คุณสมบัติของชีวมวลทอริไฟร์ (properties of torrefied biomass)

2.2.3.4.1 ความสามารถในการบดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ (Grindability) เป็นสิ่งที่สำคัญมากในกระบวนการทอริแฟคชั่น นั่นก็หมายความว่า การทำทอริไฟร์ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเปราะขึ้น ซึ่งทำให้ปรับปรุงคุณสมบัติการบดให้ดีขึ้น เนื่องจากการนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอริแฟคชั่นไปใช้นั้น จะต้องลดขนาดของผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปใช้ในขบวนการต่อไป ไม่ว่าจะเป็น เผาโดยตรง เผาร่วม (co-firing) หรือใช้ในขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น และไพโรไลซิส ในการที่จะลดขนาดนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงาน งานวิจัยของ เบอร์แมนและคณะ [22] พบว่า ชีวมวลที่ผ่านการทอริไฟร์ จะใช้พลังงานในการบดลดขนาด (grinding) เพียง 10-30% ของพลังงานที่ใช้กับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านการทอริไฟร์

#### 2.2.3.4.2 ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity)

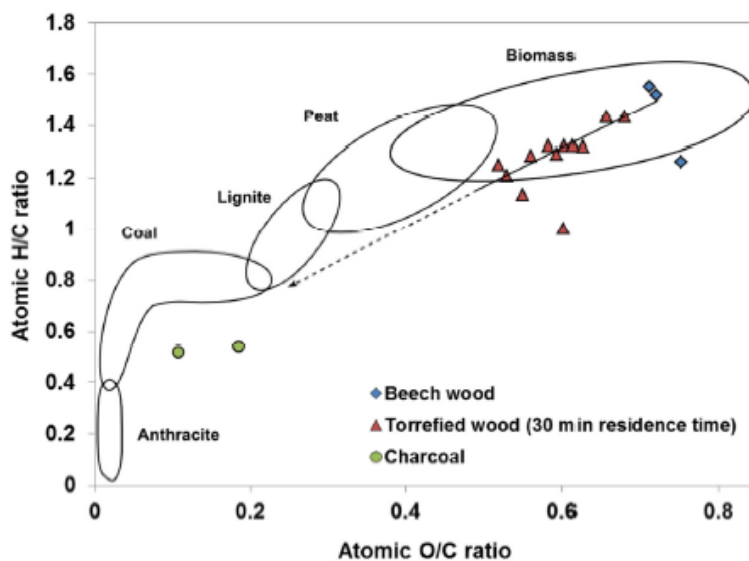
ความไม่ชอบน้ำ เป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญในการที่จะเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในโกดัง เพื่อใช้ในขบวนการต่อไป นั่นคือ ชีวมวลที่ผ่านการทอริไฟร์จะไม่ค่อยดูดน้ำ ดังนั้นจึงง่ายในการเก็บรักษา และการนำไปใช้ เพราะน้ำจะทำให้ผลิตภัณฑ์ขึ้นซึ่งมีความยากต่อการเผาไหม้ และทำให้จุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเติบโตอยู่ในผลิตภัณฑ์ [16, 22] ทำให้สกปรกและก่อให้เกิดเชื้อโรคได้

#### 2.2.3.4.3 การอัดขึ้นรูป (Pelletization)

ขบวนการอัดขึ้นรูปชีวมวล เพื่อแก้ปัญหาในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การเก็บรักษา และยังเพิ่มค่าของพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยของปริมาตรเชื้อเพลิง (Volumetric calorific value) [1]

#### 2.2.3.4.4 ความหนาแน่นพลังงาน (Energy density)

ขบวนการทอริแฟคชั่นชีวมวลจะลดพิกน้าและสารระเหยต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ กรดแอสติก เมทานอล และอื่นๆ ซึ่งจะมีโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนประกอบที่มีออกซิเจน ไฮโดรเจน และคาร์บอนนี้ หากนำไปหาอัตราส่วนออกซิเจนกับคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนกับคาร์บอน (H/C) พบว่า ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นจะทำให้ค่าของ O/C และ H/C เปลี่ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินตามรูป 2.6 [27]



รูปที่ 2.6 Van Krevelen diagram showing change in the biomass O/C and O/H ratio after torrefaction [27]

## 2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล

### 2.3.1 การวิเคราะห์ประมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis)

การวิเคราะห์กลุ่มสารของตัวอย่างชีวมวลที่ผ่านการทอริไฟร์ จะวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer (TGA/DSC)) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5142-04 เพื่อที่จะหาความชื้นสารละลาย ชี้อ่อน และคาร์บอนเสถียร [28]

### 2.3.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุเพื่อหาสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ตามสัดส่วนของธาตุคือ  $C+H+O+N+S+ASH+M = 100 \%$  ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5373-08

### 2.3.3 การหาค่าความร้อนสูง (Higher heating value)

ค่าความร้อนสูงของชีวมวลเริ่มต้น และชีวมวลที่ผ่านการทอริไฟร์สามารถคำนวณได้จากสมการ 1 ซึ่งถูกพัฒนาโดยเซงและอาชีวีโต [29]

$$HHV(MJ/kg) = -1.3675 + 0.3137 * C + 0.7009 * H + 0.03 \quad (1)$$

## 2.4 ดัชนีความรุนแรงของการทำทอริแฟคชัน (Torrefaction severity index, TSI)

เป็นตัวบ่งชี้ระดับของการทำทอริแฟคชัน (torrefaction degree) [30] โดยค่าของ TSI สามารถจะคำนวณได้จากสูตรซึ่ง TSI จะมีค่าระหว่าง 0-1

$$TSI = \frac{\Delta WI}{\Delta WI_{ref}} = \frac{W_i - W_t}{W_i - W_{ref}}$$

เมื่อ  $W_i$  เป็น น้ำหนักเริ่มต้น

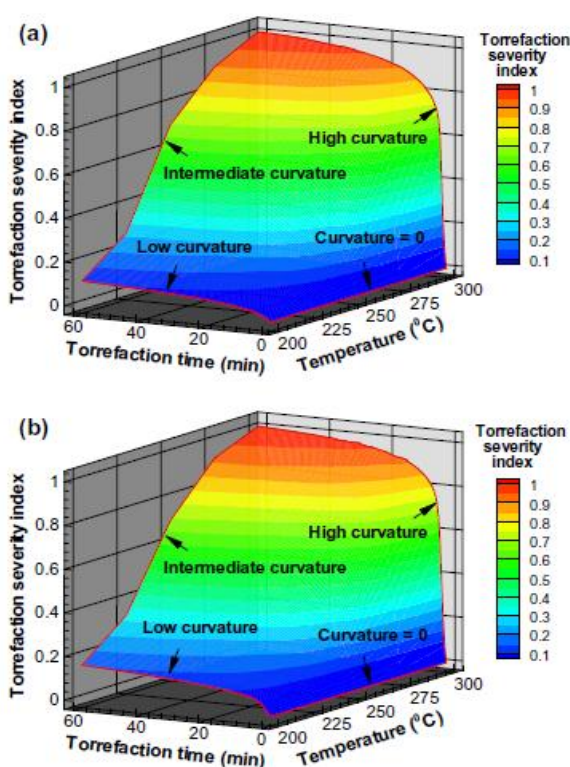
$W_t$  เป็น น้ำหนักที่เวลาใดๆ

$W_{ref}$  เป็น น้ำหนักที่อุณหภูมิอ้างอิง

จากสูตรจะเห็นได้ว่าค่า TSI นั้นเป็นอัตราส่วนของผลต่างของมวลเริ่มต้นกับมวลที่ผ่านกระบวนการทอริไฟร์ที่อุณหภูมิและเวลาใดๆกับผลต่างของมวลเริ่มต้นกับมวลที่เวลานานที่สุดและอุณหภูมิที่สูงที่สุดในการทอริไฟร์ โดยจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งจากค่านี้นี้ตัวหารนั้นจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับว่าผู้ที่ทำการศึกษาจะใช้เงื่อนไขของเวลาและอุณหภูมิในการทอริไฟร์เท่าใด โดยค่าที่ได้เป็น 0 หมายถึงชีวมวลดิบและหากได้ค่าเป็น 1 หมายถึงชีวมวลได้ทำในเงื่อนไขที่สูงที่สุดในการทอริไฟร์

ในการวิจัยเกี่ยวกับ การทอริไฟร์ที่ผ่านมา นักวิจัยได้นำค่า TSI มาศึกษาหลายท่านด้วยกัน Chen et al, 2014 [31] ได้ศึกษาค่า TSI สัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิในการทอริไฟร์ ได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ 3 มิติ จากรูปที่ 2.7 เป็นภาพ 3 มิติ ของค่า TSI ของสาหร่าย 2 ชนิด คือ *Chlamydomonas* sp.JSC4 และ *Chlorella sorokiniana* CY1 มีรูปร่าง ความโค้งลาดชัน คล้ายๆกัน TSI เป็นตัวแปร(parameter) [31] ที่เป็นไปได้ที่จะแสดงหรือชี้ให้เห็นถึงการย่อยสลายทางความร้อนในแนวทางของการทอริแฟคชันชีวมวล ตามรูป ความโค้งยิ่งมากเท่าไรก็ยิ่งมีความว่องไวของน้ำหนักชีวมวลที่หายไปในการทำทอริแฟคชันเท่านั้น ความโค้งที่อยู่ในแนวเวลาของทอริแฟคชัน (torrefaction time) ที่ศูนย์จะมีความโค้งเป็นศูนย์ และตามเส้นของอุณหภูมิทอริไฟร์ (torrefaction temperature) ที่อุณหภูมิ 200°C มีความโค้งน้อย (Low curvature) ตามความโค้งของเวลาตามทอริไฟร์ 60 นาที มีความโค้งปานกลาง (intermediate curvature) ซึ่งสื่อให้เห็นว่าระดับของทอริแฟคชันสามารถควบคุมตามอุณหภูมิ และความโค้งตามอุณหภูมิทอริแฟคชันที่ 300°C และเวลาในการทอริแฟคชันน้อย มีความโค้งที่มาก ชี้ให้เห็นถึงความว่องไวของน้ำหนักที่หายไปในการทำทอริแฟคชัน ความโค้ง (แนวโค้ง) ตามอุณหภูมิ 300°C แสดงได้ชัดเจนว่า ชีวมวลที่ทำทอริแฟคชัน

ที่อุณหภูมิซึ่งใช้เวลาน้อย ใช้พลังงาน และประหยัดกว่าในการอัพเกรดชีวมวลเมื่อเปรียบเทียบกับ การทอริแฟคชัน ที่ใช้เวลาทอริแฟคชัน 60 นาที และอุณหภูมิในการทอริแฟคชันที่ต่ำกว่า 300°C



รูปที่ 2.7 Three-dimensional profiles of torrefaction severity index of (a) *Chlamydomonas* sp. JSC4 and (b) *Chlorella sorokiniana* CY1 in torrefaction.[31]

Chen et al, 2015 ทำการศึกษาสำหรับสาย C.v.ESP-31 ได้แผนที่แสดงความสัมพันธ์ (Contour map) ของ TSI กับอุณหภูมิและเวลา, Zlang et al, 2017 ทำการศึกษากากกาแฟ กากชา จีน และสาหร่ายที่ไม่ใช่แล้วได้เป็นเส้นแนวโน้มที่ลดลงแสดงความสัมพันธ์ของ TSI กับ Energy yield, Energy index Yong Yang Gan et al, 2018 ทำการศึกษามีตสบูดำได้เส้นแนวโน้มที่ลดลงแสดงความสัมพันธ์ของ TSI กับ Energy yield

## 2.5 สรุป

ชีวมวลสามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยกระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อนไม่จำเป็นที่จะเป็นการทำไพโรไลซิส ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส การทำแก๊สซิฟิเคชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส (producer gas) และการทำ

ทอริแฟคชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง ซึ่งแต่ละวิธีการผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการ ในส่วนชีวมวลที่ผ่านการทำทอริแฟคชัน จะทำให้คุณสมบัติ เดิมของชีวมวลไม่ว่าจะเป็น ความสามารถในการบดให้ได้ขนาดที่ต้องการ (grindability) ความไม่ชอบ น้ำ (hydrophobicity) การขึ้นรูป (pelletization) และความหนาแน่นพลังงานเปลี่ยนไป การที่จะ ทราบได้ว่าที่เวลาใดและอุณหภูมิที่เท่าใดนั้นเหมาะสมที่จะใช้ในการทำทอริฟิเคชัน เช่นและคณะ [31] ได้ทำการวิจัยและใช้ดัชนีความรุนแรงของการทำทอริแฟคชัน (torrefaction severity index, TSI) โดยนำสาหร่าย 2 ชนิด มาทำทอริแฟคชัน แล้วนำค่าของ TSI, torrefaction time และ temperature มาพล็อตเป็นภาพ 3 มิติ ซึ่งค่า TSI ดังกล่าวยังมิได้นำพารามิเตอร์ของความหนาแน่น ความไม่ชอบน้ำ ความสามารถในการบด และชีวมวลทอริไฟร์ที่ใช้ก็มีขนาดเล็ก ชีวมวลทอริไฟร์ที่ อัดขึ้นรูปเป็นก้อนแล้ว ค่าของ TSI สามารถนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมหรือไม่ ดังนั้น เพื่อให้ ครอบคลุมจึงควรนำชีวมวลทอริไฟร์ที่อัดขึ้นรูป (torrefied pellet) มาพิจารณาด้วย

จากสมบัติของชีวมวล ชีวมวลนั้นจะดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ อันประกอบไปด้วย ค่าความร้อน (Higher heating value) ผลได้ของพลังงาน (Energy yield) ความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ความสามารถในการขึ้นรูป (Pelletization) ดังนั้น ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันแล้วชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะดีหรือไม่ดีก็จะต้องนำมาศึกษา คุณสมบัติต่างๆดังกล่าวนั้นด้วย ซึ่งได้มีการวิจัยโดย Prins et al. [6, 7] ได้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ชีวมวล ทอริไฟร์โดยวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของค่าความร้อน พบว่า เมื่อ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันสูงขึ้น (Residue time) ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น แต่เวลาเพิ่มขึ้นค่าความร้อนไม่ค่อยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้น Wang et al. [5] ได้ ศึกษาความไม่ชอบน้ำ ความสามารถในการบด ความหนาแน่นพลังงาน พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งชีวมวลสามารถบดง่ายขึ้น Peng et al. [32] ได้ศึกษาทอริแฟคชันและ เคนซิฟิเคชันซีลี้อย พบว่า ค่าความร้อนของซีลี้อยทอริไฟร์มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักมวลหาย (Mass Loss) คือ เมื่อน้ำหนักมวลหายเพิ่มขึ้น ความรุนแรงของทอริแฟคชันก็เพิ่มขึ้นด้วย นอกจาก Chen et al. [31] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักมวลหายและความรุนแรงของทอริแฟคชันแล้ว Sabil et al. [32] ได้ศึกษาชีวมวลปาล์มน้ำมันพบว่า น้ำหนักมวลหาย สามารถเป็นตัวชี้หรือแสดงความ รุนแรงของทอริแฟคชันของกระบวนการได้

จะเห็นได้ว่า Chen et al. [31] ได้ใช้น้ำหนักมวลหายมาใช้เป็นดัชนีชี้วัดความรุนแรงของทอริแฟคชัน (Torrefaction severity index , TSI) โดยมีค่าตั้งแต่ 0-1 โดย 1 เป็นค่าความรุนแรงสูงสุด ของทอริแฟคชัน

## บทที่ 3

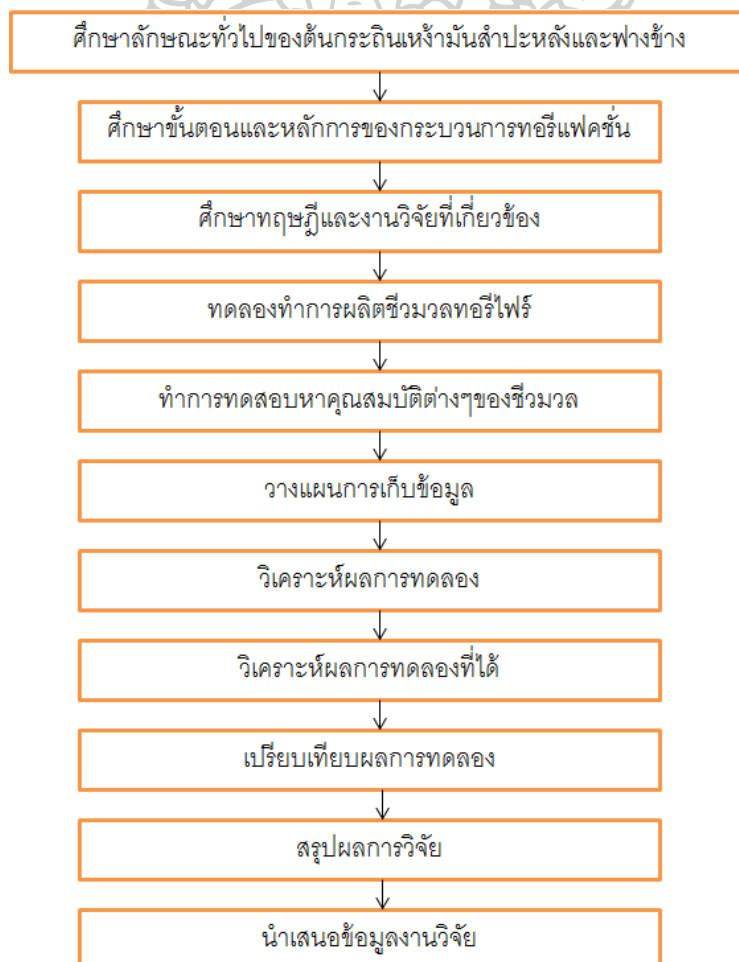
### ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติของ เหง้ามันสำปะหลังต้นกระถิน และฟางข้าวทอรีไฟร์ โดยจะทำการทดลองและศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของชีวมวลโดยประกอบไปด้วย ค่าความร้อน ค่าความไม่ชอบน้ำ ความสามารถในการกระจายตัว ความสามารถในการขึ้นรูป โดยในการทดลองจะแบ่งชีวมวลออกเป็น 2 ประเภทคือ ชีวมวลปกติ และชีวมวลทอรีไฟร์ เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างชีวมวลทั้งสอง

##### 3.1.1 แผนการดำเนินงาน

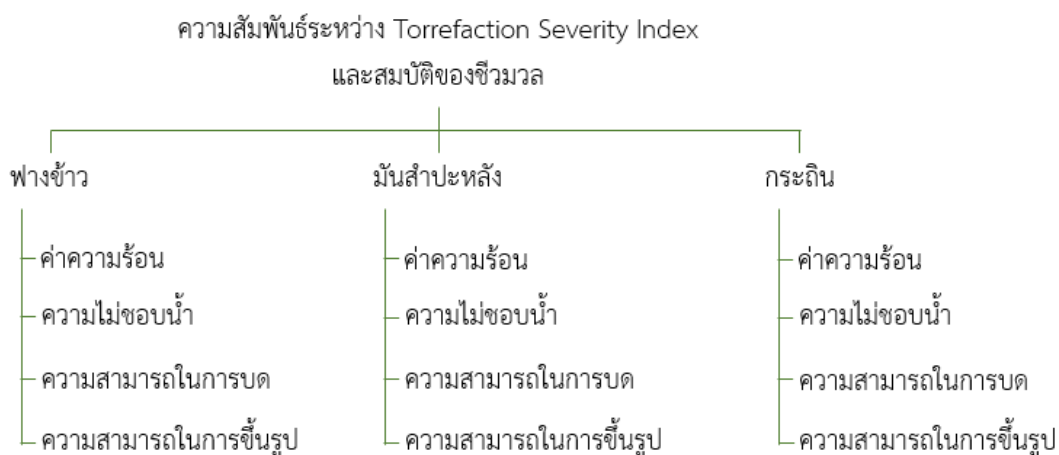
แผนการดำเนินงานโดยรวม มีรายละเอียดงานวิจัยดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

### 3.1.2 แผนการวิจัย

ศึกษาและเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของชีวมวล จะมุ่งเน้นไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความรุนแรงในการทอริไฟร์ (Torrefaction severity index, TSI) กับสมบัติต่างๆของชีวมวลทอริไฟร์ ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความไม่ชอบน้ำ ความสามารถในการบด และความสามารถในการขึ้นรูป โดยชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและ ฟางข้าว แผนงานวิจัยเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.2



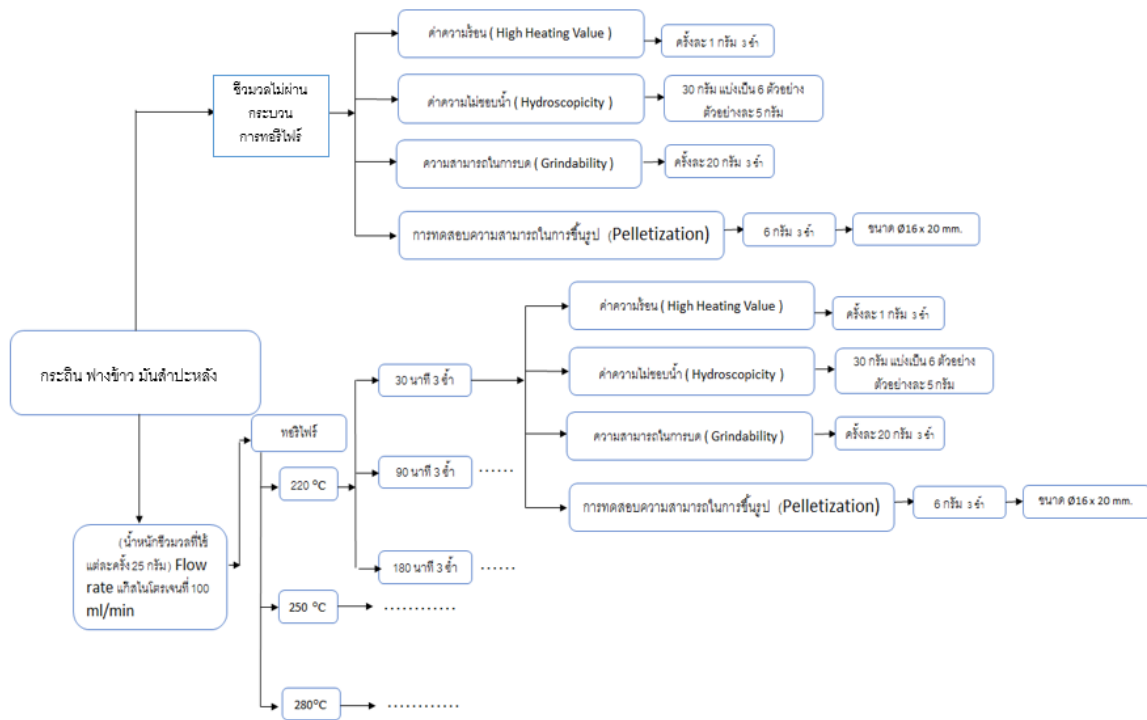
รูปที่ 3.2 แผนงานวิจัย

### 3.1.3 แผนการทดลอง

รูปที่ 3.3 แสดงแผนการทดลองในการวิจัยครั้งนี้ จากรูปจะใช้กระถิน เหง้ามันสำปะหลัง และ ฟางข้าวเป็นชีวมวลในการทดลอง โดยแบ่งชีวมวลที่จะทำการทดลองออกเป็น ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น และชีวมวลที่ไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่น สำหรับการทอริไฟร์ชีวมวลนั้นจะทำที่อุณหภูมิ 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส และแต่ละอุณหภูมิทอริไฟร์จะแปรค่าเวลาในการทำปฏิกิริยาทอริไฟร์ (Resident time) 30, 90 และ 180 นาที หลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการทอริแฟคชั่นแล้วจะนำชีวมวล ไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆของชีวมวล ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความไม่ชอบน้ำ ความสามารถในการบด และความสามารถในการขึ้นรูป สำหรับการหาค่าความร้อนจะใช้วิธีการบอมป์คาลอรีมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D5865-07 ในการหาค่าความไม่ชอบน้ำจะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดน้ำกลับ ส่วนความสามารถในการบดนั้นจะใช้ค่า Hardgrove Grindability Index (HGI) เป็นตัวอ้างอิงในการเปรียบเทียบ สำหรับความสามารถในการขึ้นรูปจะใช้



เครื่องขึ้นรูปชีวมวลเม็ดเดี่ยว (Single pellet machine) ในการขึ้นรูป ชีวมวลที่ขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร และสังเกตการแตกและความเสียหายหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 3.3 แผนการทดลอง

### 3.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองและทดสอบของชีวมวลทั้ง 2 ประเภทจะมีวิธีการทดสอบคุณสมบัติที่เหมือนกัน แต่จะมีกระบวนการที่แตกต่างกันคือกระบวนการทอร์ฟิฟแค้น โดยกระบวนการทอร์ฟิฟแค้นนี้จะเริ่มจากการเตรียมชีวมวลที่จะใช้โดยในงานวิจัยนี้ใช้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการสับหยาบและสับละเอียดมาแล้ว และมีขนาดอนุภาคที่ 3-5 มิลลิเมตร ใสลงไปใน Reactor โดย Reactor จะถูกให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 – 300 องศาเซลเซียส โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้มี อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจะทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ Reactor โดยมีโรตารีเตอร์เป็นตัวควบคุมการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยในการทดลองนี้จะปรับให้แก๊สไนโตรเจนมีอัตราการไหลที่ 100 ml/นาที จากนั้นจึงเริ่มกระบวนการทอร์ฟิฟแค้น โดยในระหว่างการทดลองจะมีการบันทึกค่าน้ำหนักของชีวมวลภายใน Reactor เป็นช่วงๆ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลากับน้ำหนักที่สูญเสียไป

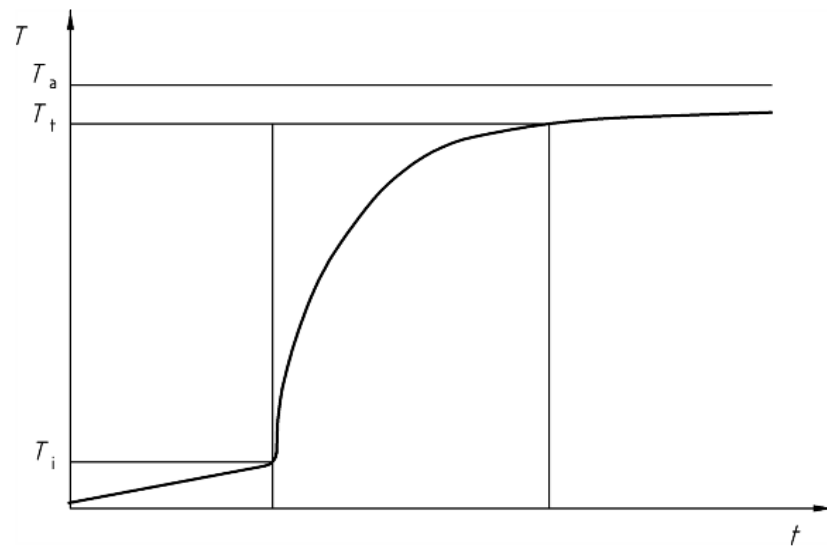
หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแพคชั่นเรียบร้อยแล้วจะนำชีวมวลทอรีไฟร์ที่ได้ไปทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

### 3.2.1. ทดสอบหาค่าความร้อน โดยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ทดสอบหาปริมาณความร้อนที่ชีวมวล

ดำเนินการโดยใช้ชีวมวล 1 กรัมต่อการทดลอง 1 ครั้ง จากนั้นนำชีวมวลใส่ถ้วยใส่สารและนำไปใส่ลงในแท่นเหล็กรองรับภายในลูกบอมบ์ และทำการติดตั้งลวดจุดระเบิดโดยทำการติดตั้งลวดไม่ให้ลวดสัมผัสโดนกับตัวถ้วยเพราะจะทำให้จุดระเบิดไม่สำเร็จ จากนั้นทำการปิดฝาลูกบอมบ์และทำการอัดแก๊สออกซิเจนเข้าไปภายในลูกบอมบ์โดยอัดให้ภายในลูกบอมบ์มีความดันอยู่ที่ 25 – 30 atm จากนั้นนำลูกบอมบ์วางลงในถังเหล็กที่บรรจุน้ำไว้ 1 ลิตร โดยจัดวางให้ก้นของลูกบอมบ์วางขนานกับถังเหล็ก แล้วนำถังเหล็กใส่ลงในชุดจุดระเบิดและทำการต่อวงจรเพื่อจุดระเบิด และปิดฝาชุดจุดระเบิดให้สนิท จากนั้นทำการเปิดใบพัดเพื่อทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลเป็นเวลา 5 นาที ทำการจุดระเบิดบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งครบ 30 นาที

#### 3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- ชั่งตัวอย่างชีวมวลให้มีน้ำหนักแน่นอนประมาณ 1 กรัม
- นำตัวอย่างชีวมวลที่จะบรรจุในลูกบอมบ์มาวางในที่วางของบอมบ์เฮด ตัดสายลวด ยาว 10 เซนติเมตร นำไปสอดในรูเล็ก ๆ โดยเลื่อนแคปขึ้นเมื่อสอดเสร็จแล้วทั้งสองข้างให้ตั้งแคปลง ขั้นตอนนี้ต้องระวังอย่าให้ลวดแตะโดนขอบของลูกบอมบ์ แต่ต้องให้ลวดแตะบนตัวอย่าง
- นำบอมเฮดใส่ออกซิเจนบอมบ์ปิดฝา
- เติมออกซิเจนในบอมบ์โดยการเปิดวาล์วของถังแก๊สออกซิเจนตั้งความดันเกจไว้ที่ 200 psi
- เติมน้ำลงในกระบอกสแตนเลส (bucket) ประมาณ 2000 มิลลิลิตร แล้วนำเข้าเครื่องบอมบ์ จากนั้นนำลูกบอมบ์ที่อัดอากาศแล้วต่อสายไฟที่ใช้ในการจุดระเบิดให้กับลูกบอมบ์ จากนั้นปิดฝาดังที่มีใบกววนติดอยู่บนฝา เพื่อใช้ในการกวนให้อุณหภูมิของน้ำกระจายทั่วถึงกัน
- ใส่เทอร์โมมิเตอร์ลงไปในถังเพื่อใช้ในการดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จับเวลา โดยปล่อยให้เครื่องทำงานประมาณ 5 นาที จากนั้นจุดระเบิด และบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที จนกว่าอุณหภูมิจะเริ่มคงที่
- เมื่อเครื่องทำงานเสร็จ ให้เปิดฝา นำออกซิเจนบอมบ์ ออกมา ไล่ก๊าซออก เปิดฝา นำหัวบอมบ์วางบนขาตั้ง วัดความยาวของลวดที่เหลือจากการเผาไหม้ และทำการชั่งน้ำหนักชีวมวลที่เหลือ จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิจะได้ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของบอมบ์คาลอริมิเตอร์

- การคำนวณหาได้จากสมการ

$$t = t_c - t_a - r_1(b-a) - r_2(c-b) \quad (1)$$

- เมื่อ  $a$  คือ เวลาการจุดระเบิด  
 $b$  คือ เวลาเมื่ออุณหภูมินั้นถึง 60% ของที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด  
 $c$  คือ เวลาที่เริ่มต้นของคาบ (คิดหลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น) โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลายเป็นคงที่  
 $t$  คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อ่านได้ถูกต้อง (องศาเซลเซียส)  
 $t_c$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่อ่านในเวลาจุดระเบิด  
 $t_a$  คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้  
 $r_1$  คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาทีก่อนจุดระเบิด  
 $r_2$  คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาทีหลังจากเวลา  $c$

- ค่าความร้อนรอกของการเผาไหม้หาได้จาก

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (2)$$

- เมื่อ  $H_g$  คือ ค่าความร้อนรวมของการเผาไหม้ (จูลต่อกรัม)  
 $W$  คือ ค่าความจุความร้อนของตัวบอมบ์คาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

- $m$  คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)  
 $e_1$  คือ ค่าแก้ไข ของ ความร้อนในการเกิดของ ( $\text{HNO}_3$ ) 23.9 แคลอรี  
 $e_2$  คือ ค่าแก้ไข ของ ความร้อนในการเกิดของ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 13.7 แคลอรี  
 $e_3$  คือ ค่าแก้ไข ของ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร โดยใช้

Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)

- ค่ามาตรฐานคาลอริมิเตอร์

$$W = \frac{H_m + e_1 + e_3}{t} \quad (3)$$

- เมื่อ  $W$  คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)  
 $H$  คือ Heat of combustion of Standard benzoic acid (ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)

- $m$  คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)  
 $t$  คือ ผลรวมของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)  
 $e_1$  คือ ค่าแก้ไข ของ ความร้อนในการเกิดของ ( $\text{HNO}_3$ ) 23.9 แคลอรี  
 $e_3$  คือ ค่าแก้ไข ของ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร โดยใช้

Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)



รูปที่ 3.5 บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)

### 3.2.2. การทดสอบการดูดซับความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล

การทดสอบดูดซับความชื้นนั้นตัวอย่างชีวมวลจะต้องได้รับการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างชีวมวลมาทดสอบในตู้ควบคุมความชื้น ซึ่งอุณหภูมิและความชื้นจะได้รับการรักษาให้คงที่ด้วยอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และมีความชื้น 90% RH เป็นเวลา 5 ชั่วโมงซึ่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของชีวมวลในช่วงเวลาต่างๆ จะได้รับการบันทึกด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความแม่นยำ 0.01 กรัม ทุกๆ 10 นาที ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นบันทึกทุกๆ 30 นาที ในชั่วโมงที่ 2 และ 3 และบันทึกทุกๆ 1 ชั่วโมง ในชั่วโมงที่ 4 และ 5 จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วทำการเก็บผลครั้งสุดท้าย น้ำหนักที่ได้รับการบันทึกจะนำมาใช้เพื่อคำนวณอัตราการดูดซับความชื้นมาตรฐาน ASAVE448.1 สำหรับสมการที่ใช้การคำนวณอัตราการดูดซับความชื้นนี้คือ

$$\frac{M_t - M_d}{M_s - M_d} = 1 - e^{-kt} \quad (4)$$

และ

$$\text{ความชื้นอิมมิตัว (\%)} = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ

$M_t$  คือ มวล ณ. เวลาใดๆ (g)

$M_g$  คือ มวลวัสดุอิมมิตัว (g)

$M_d$  คือ มวลวัสดุแห้ง (g)

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับความชื้น ( $\text{min}^{-1}$ )

$t$  คือ เวลา (min)



รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

### 3.2.3 การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคชีวมวล

การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคชีวมวลที่ผ่านการลดขนาดแล้วที่ผ่านการลดขนาดแล้วทำโดยเตรียมชีวมวลจำนวน 20 กรัม แล้วนำไปเข้าเครื่องบด เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปใส่บนตะแกรงที่ไล่ลำดับขนาดจากตะแกรงขนาดใหญ่ลงมาหาตะแกรงขนาดเล็ก จากนั้นนำตะแกรงใส่ในเครื่องร่อนอนุภาคทำการเปิดเครื่องร่อน ให้เครื่องร่อนทำการร่อนชีวมวลเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปิดเครื่องและชั่งน้ำหนักของชีวมวลที่ตกค้างอยู่ในแต่ละชั้นเพื่อนำไปคำนวณหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย

- การหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

อนุภาคขนาดใหญ่ กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตัวอย่างมีค่าเท่ากับศูนย์กลางอนุภาคทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคตัวอย่าง

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} \quad (6)$$

เมื่อ  $D_p$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตัวอย่าง (mm)

$V_p$  = ปริมาตรของอนุภาคตัวอย่าง 1 อนุภาค ( $\text{mm}^3$ )

ปริมาตรของอนุภาคตัวอย่าง 1 อนุภาค หาได้จากการใช้ขวดหาคความถ่วงจำเพาะ ดังนี้

$$V_p = \frac{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)}{(\text{density of water})n} \quad (7)$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนอนุภาคที่ใส่ในขวดหาคความถ่วงจำเพาะ (ให้ใส่อนุภาคปริมาณ 1 ใน 3 ของขวด)

$m_1$  = มวลของขวด (g)

$m_2$  = มวลของขวดและอนุภาคของแข็ง (g)

$m_3$  = มวลของขวดและน้ำเต็มขวด (g)

$m_4$  = มวลของขวด อนุภาคของแข็งและน้ำเต็ม (g)

อนุภาคขนาดเล็กและมีหลายขนาดหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคตัวอย่างด้วยการใช้ตะแกรงคัดขนาด และนำข้อมูลมาคำนวณดังนี้

**แบบที่ 1** เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยอัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ (volume surface mean diameter ,  $D_s$ )

$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_{Pi}}} \quad (8)$$

เมื่อ  $D_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (mm)

$\bar{X}_i$  = อัตราส่วนโดยมวลอนุภาคในตะแกรงลำดับที่  $i$

$\bar{D}_{Pi}$  = ขนาดเฉลี่ยอนุภาคที่ค้างในตะแกรงลำดับที่  $i$

$$x_i = \frac{m_i}{m_T} \quad (9)$$

เมื่อ  $m_i$  = มวลอนุภาคที่ค้างในตะแกรงลำดับที่  $i$  (g)

$m_T$  = มวลอนุภาคทั้งหมด (g)

$$\bar{D}_s = \frac{D_{Pi} + D_{Pi+1}}{2} \quad (10)$$

เมื่อ  $D_{Pi}$  = ขนาดรูเปิดตะแกรงลำดับที่  $i$  ซึ่งเป็นตะแกรงที่อนุภาคค้างอยู่ (mm)

$D_{Pi+1}$  = ขนาดรูเปิดตะแกรงที่อนุภาคผ่านมาหรือตะแกรงที่อยู่ข้างบนตะแกรงลำดับที่  $i$  (mm)

**แบบที่ 2** เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยมวล (mass mean diameter ,  $D_w$  )

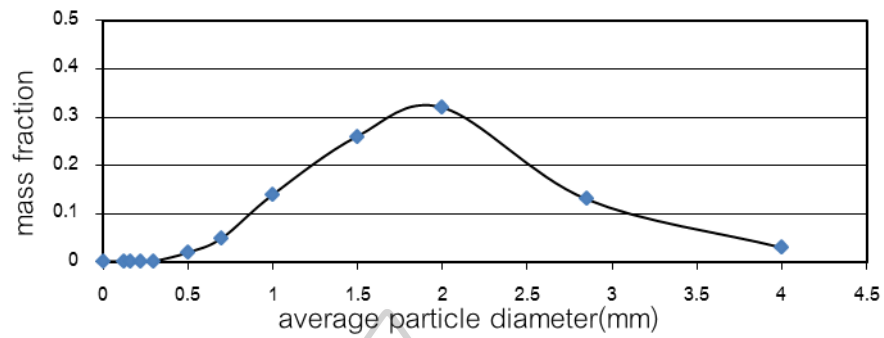
$$\bar{D}_w = \sum_{i=1}^n (x_i D_{Pi}) \quad (11)$$

**แบบที่ 3** เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยปริมาตร (volume mean diameter ,  $\bar{D}_v$ )

$$\bar{D}_v = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_{Pi}^3}} \right]^{1/3} \quad (12)$$

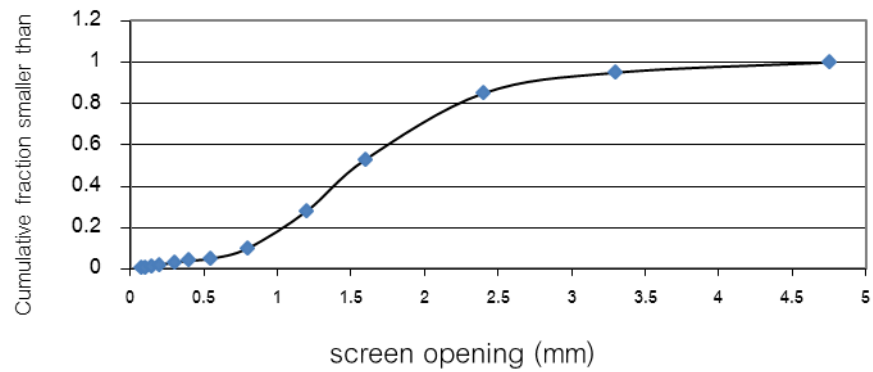
การแสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคสามารถแสดงได้ 2 แบบดังนี้

1) แบบ differential analysis ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การกระจายขนาดแบบ differential analysis

2) แบบ cumulative analysis ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การกระจายขนาดแบบ cumulative analysis

อัตราการลดขนาดขึ้นกับชนิดของเครื่องบดและวัตถุดิบที่นำมาบด

$$\text{อัตราการลดขนาด} = \frac{\text{ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคก่อนบด}}{\text{ขนาดเฉลี่ยอนุภาคหลังบด}} \quad (13)$$





รูปที่ 3.9 เครื่องเขย่าและตะแกรงคัดขนาด

### 3.2.4 การหาความสามารถในการบด

การบดคือการทำชีวมวลให้มีอนุภาคเล็กลงซึ่งส่งผลให้การเผาไหม้ง่ายขึ้น โดยสมการที่ใช้บดมีดังนี้

$$M_H = m(HGI) + b \quad (14)$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

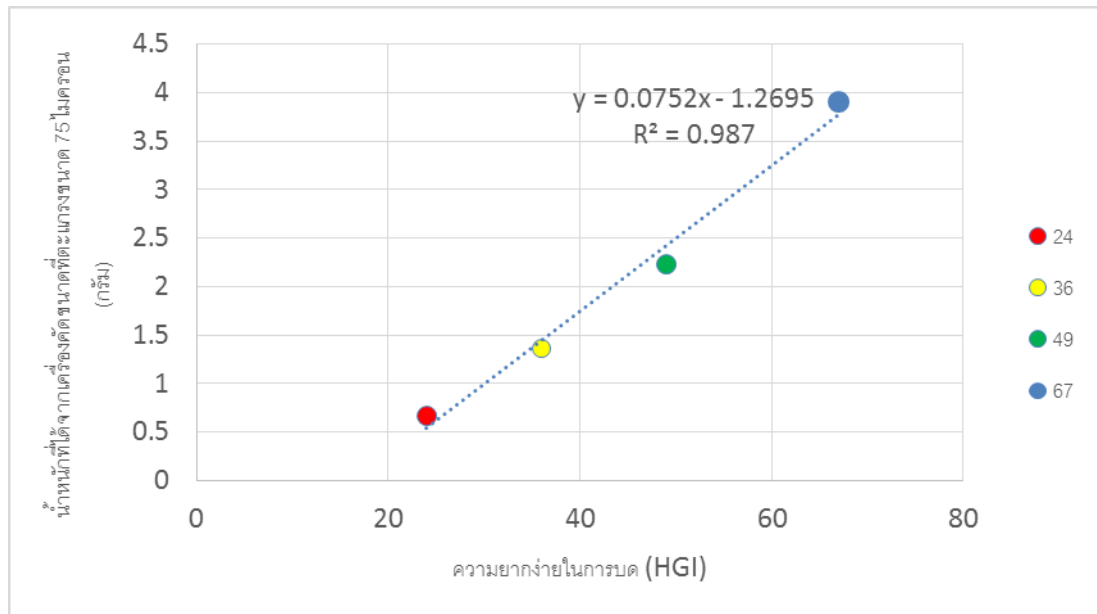
$$HGI_{equiv} = \frac{Mh - b}{m} \quad (15)$$

เมื่อ  $m$  คือ ความชันที่ได้จากกราฟเท่ากับ 0.0752 (ซึ่งหาได้จากการบดถ่านหิน ตัวอย่างที่รู้ค่า HGI)

$B$  คือ จุดตัดที่ได้จากกราฟเท่ากับ 1.2695 (ซึ่งหาได้จากการบดถ่านหิน ตัวอย่างที่รู้ค่า HGI)

$HGI_{equiv}$  คือ ค่าความสามารถของการบดง่ายของถ่านหิน

$M_H$  คือ น้ำหนักที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน



รูปที่ 3.10 น้ำหนักที่ผ่านการร่อนผ่านเครื่องร่อนของถ่านหินที่มีค่า HGI 24, 36 และ 67



## บทที่ 4

### ผลและอธิบายผล

#### 4.1 ผลของดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ ที่มีต่อค่าความร้อน

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์และค่าความร้อนของกระถิน ฟางข้าว และเหง้ามันตามลำดับ โดยแกนตั้งแสดงค่าความร้อนในหน่วยเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) และแกนนอนแสดงค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ ซึ่งเป็นปริมาณไร้หน่วย (Dimensionless quantity) ในกรณีของกระถินแสดงไว้ในรูป 4.1 ก. จากรูปจะพบว่า กระถินดิบที่ไม่ผ่านการทอรีไฟร์จะมีค่าความร้อน 17.94 MJ/kg และเมื่อกระถินผ่านกระบวนการทอรีไฟร์ด้วยค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.533 จะทำให้ค่าความร้อนของกระถินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยเมื่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.533 จะทำให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.94 MJ/kg เป็น 19.37 MJ/kg ซึ่งมีอัตราเพิ่มขึ้น 2.68 MJ/kg – Unit of TSI และเมื่อค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.533 ถึง 1 ค่าความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นด้วยความชันที่สูงกว่าในช่วงแรก โดยค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 19.37 MJ/kg เป็น 23.66 MJ/kg คิดเป็นอัตราเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน 9.19 MJ/kg- Unit of TSI ของการทอรีไฟร์ ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ ที่แบ่งออกเป็น 2 ช่วง นี้ สามารถพบได้ในชีวมวลฟางข้าว และเหง้ามันสำหรับหลังเช่นกัน รูปที่ 4.1 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ฟางข้าว จากรูปจะพบว่าเมื่อค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.522 ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14.77 MJ/kg เป็น 16.6 MJ/kg คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน 3.50 MJ/kg- Unit of TSI ของการทอรีไฟร์ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่มีความชันน้อยๆและเมื่อค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.522 ถึง 1 ค่าความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 16.6 MJ/kg เป็น 18.74 MJ/kg คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน 4.48 MJ/kg- Unit of TSI ของการทอรีไฟร์ การเพิ่มขึ้นนี้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นและมีความชันมากกว่าช่วงแรกเช่นเดียวกับค่ากระถิน รูปที่ 4.1 ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ของเหง้ามันสำหรับหลัง จากรูปพบแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน กระถินและฟางข้าว กล่าวถึง เมื่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.546 ค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นด้วยความชันน้อยๆโดยมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 17.66 MJ/kg เป็น 19.51 MJ/kg คิดเป็นอัตราเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน 3.40 MJ/kg-หน่วยความรุนแรงของการทอรีไฟร์ และ

เมื่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจาก 0.546 ถึง 1.0 ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 19.51 MJ/kg เป็น 23.17 MJ/kg คิดเป็นอัตราเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน 8.04 MJ/kg- Unit of TSI ของการทอรีไฟร์ ในช่วงนี้อัตราการเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่มีความชันมากกว่าในช่วงแรก

เมื่อนำข้อมูลของกระถิน ฟางข้าวและมันสำปะหลังมาพิจารณาร่วมกัน จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 ง จากรูปจะเห็นการแบ่งกลุ่มเป็นข้อมูลอย่างชัดเจน โดยกระถินและแห้งมันสำปะหลังจะมีแนวโน้มข้อมูลเกาะกลุ่มกันและฟางข้าวจะมีแนวโน้มให้ค่าความร้อนต่ำกว่าชีวมวลทั้งสองชนิดข้างต้นที่เป็นช่วงนี้เนื่องจาก ค่าความร้อนเริ่มต้นของชีวมวลในขณะที่ยังไม่ผ่านการทอรีไฟร์ของฟางข้าวมีค่าต่ำกว่าของกระถินและมันสำปะหลัง เพื่อที่จะว่ากำจัดผลของค่าความร้อนเริ่มต้นที่ไม่เท่ากันนี้ จะนิยามพจน์ อัตราส่วนค่าความร้อนชีวมวลทอรีไฟร์ต่อชีวมวลดิบ ( $HHV_{\text{torr}}/HHV_0$ ) และใช้เป็นแกนตั้ง ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จ จากรูปจะพบว่า ข้อมูลทั้งหมดเกาะกลุ่มเป็นแนวโน้มเดียวกัน โดยสามารถแบ่งความ ความสัมพันธ์ออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ 0 ถึง 0.52 และช่วงที่สองที่มีดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์อยู่ในช่วง 0.52 ถึง 1 โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า  $HHV_{\text{torr}}/HHV_0$  เทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีของความรุนแรงของการทอรีไฟร์ ในช่วงที่สองจะมีค่า 0.503 ซึ่งมากกว่าในช่วงแรกที่มีค่า 0.135

ตามนิยามค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ของ Chen et al, 2014 ที่ว่าค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์คือสัดส่วนของผลต่างของมวลเริ่มต้นกับมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิและเวลาใดๆ ต่อผลต่างของมวลเริ่มต้นกับมวลที่เวลาที่นานที่สุดและอุณหภูมิที่สูงที่สุดในการทอรีไฟร์ จะเห็นได้ว่าตัวหารตามนิยามนี้เป็นค่าไม่คงที่ขึ้นกับเงื่อนไขของผู้วิจัยแต่ละราย ดังนั้นแม้ว่าจะพบในงานวิจัยนี้ว่าค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่มีค่า 0.52 เป็นตัวแบ่งแนวโน้มที่แตกต่างกันของของค่าการเปลี่ยนแปลง  $HHV_{\text{torr}}/HHV_0$  อย่างไรก็ตามค่าแบ่งนี้เป็นค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขการทอรีไฟร์ที่รุนแรงที่สุด ดังนั้นในการระบุจุดแบ่งแนวโน้มของค่า  $HHV_{\text{torr}}/HHV_0$  จึงควรระบุเงื่อนไขการทอรีไฟร์ที่รุนแรงที่สุดด้วยเสมอ

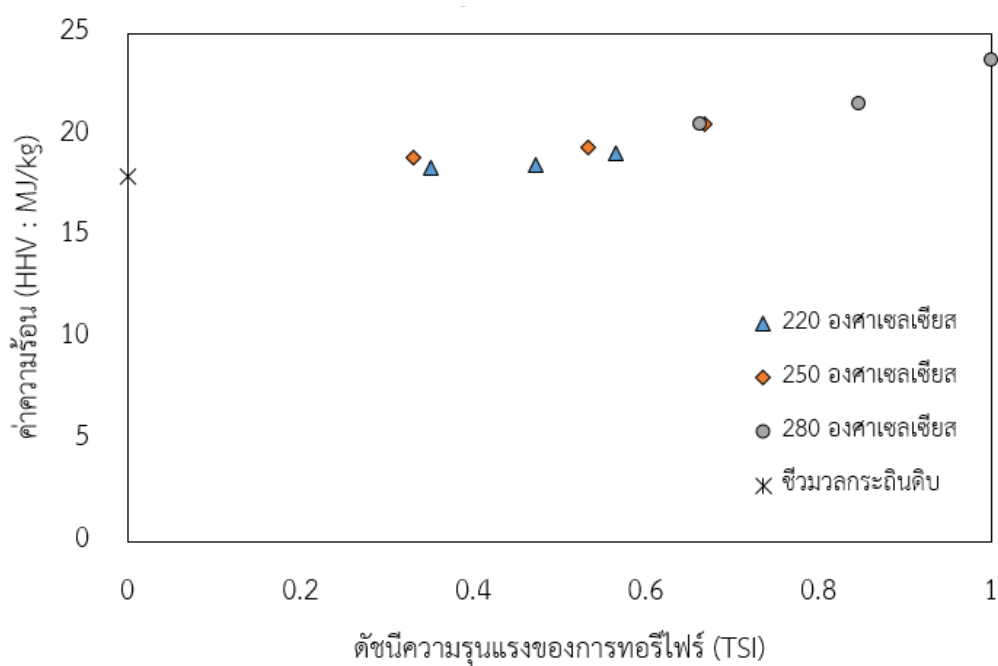
สำหรับสาเหตุที่เกิดจุดแบ่งแนวโน้มข้อมูลที่ดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่ 0.52 เมื่อการทอรีไฟร์ที่รุนแรงที่สุดทำที่ 280 °C, 180 นาทีสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการสลายตัวขั้นตอนเดียว ( One step model) Saponpongipat et al, 2015 ได้อธิบายว่าในกระบวนการทอรีไฟร์ของชีวมวลนั้น ในตอนเริ่มต้นจะมีเพียงชีวมวลดิบเท่านั้น เมื่อผ่านการทอรีไฟร์ไปเวลาหนึ่งภายในเตาปฏิกรณ์จะประกอบไปด้วย ชีวมวลดิบและชีวมวลทอรีไฟร์โดยปริมาณของชีวมวลดิบจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ปริมาณชีวมวลทอรีไฟร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าในช่วงเวลาใดๆ มวลที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์จะประกอบไปด้วยชีวมวลดิบและชีวมวลทอรีไฟร์ ในเงื่อนไขการทอรีไฟร์ที่ไม่รุนแรง ชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์จะมีสัดส่วนชีวมวลดิบมากกว่าชีวมวลการทอรีไฟร์ ดังนั้นค่าความ

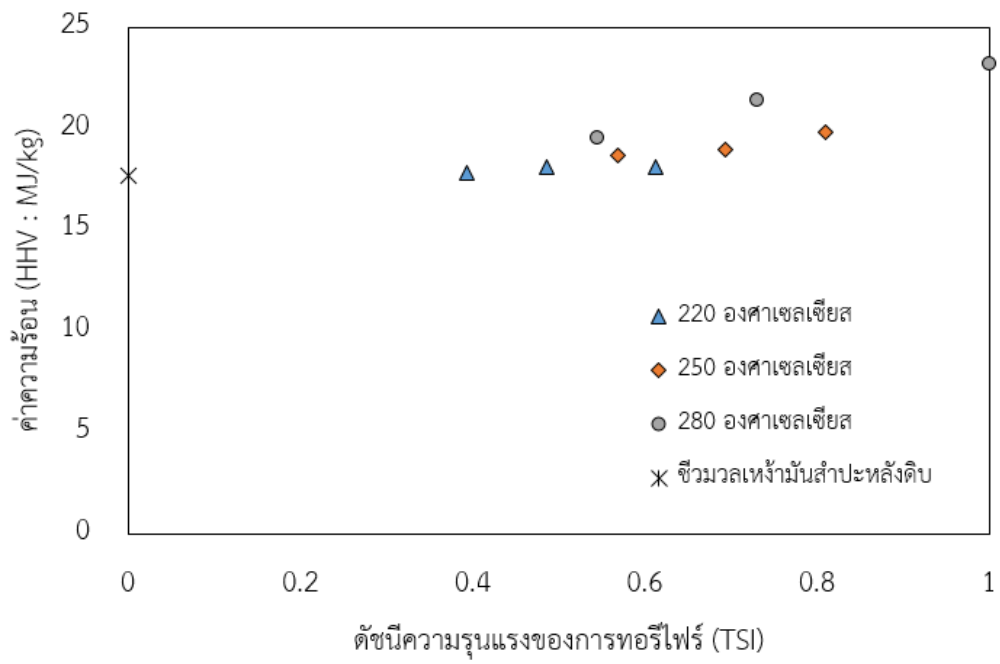
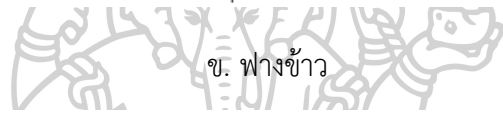
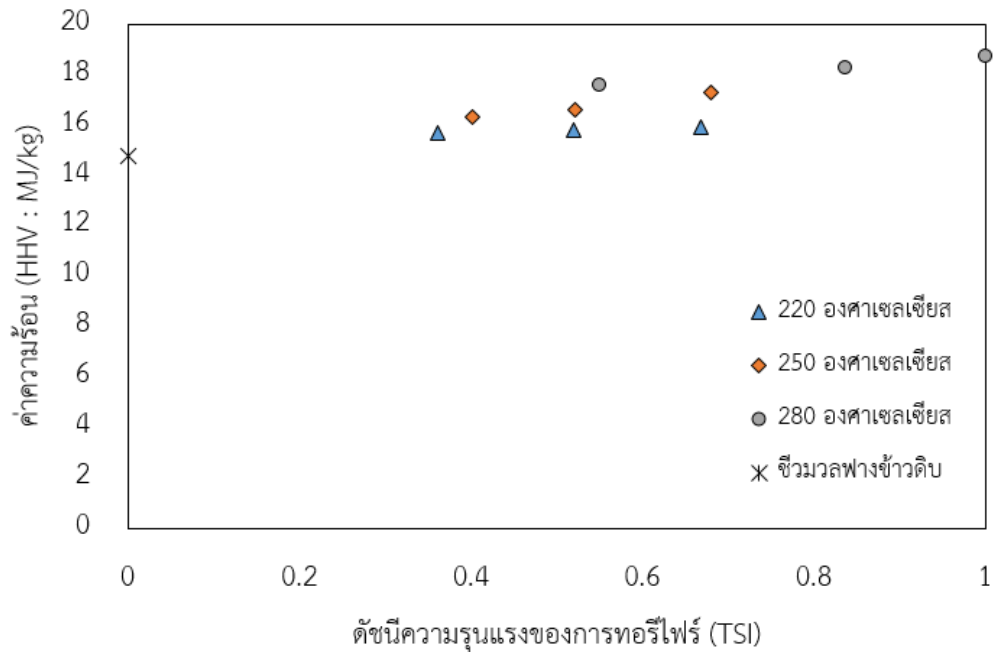
ร้อนจึงมีค่าสูงกว่าชีวมวลดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีไฟรไม่มากนัก ในทางตรงข้ามภายใต้เงื่อนไขการทอรีไฟรที่รุนแรง ชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์จะมีสัดส่วนของชีวมวลทอรีไฟรมากกว่าชีวมวลดิบ ดังนั้นค่าความร้อนจึงมีค่าสูงกว่าชีวมวลดิบที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีไฟรมาก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาแบบจำลองการสลายตัวของ Prin et al, 2006 จะพบว่าอัตราส่วนมวลที่เวลาใดๆต่อมวลเริ่มต้น จะมีค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเวลาในการทอรีไฟรเพิ่มขึ้น โดยค่าคงที่นี้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟรมีค่ามาก และจะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟรมีค่าน้อย สิ่งนี้ชี้ให้เห็นข้อจำกัดในการเกิดชีวมวลทอรีไฟรที่อุณหภูมิต่างๆ โดยแม้ว่าจะใช้เวลาในการทอรีไฟรยาวนานเพียงใด ก็ไม่สามารถเพิ่มสัดส่วนชีวมวลทอรีไฟรได้มากกว่าค่าคงที่ค่านี้ เมื่อตรวจสอบข้อมูลในงานนี้จะพบว่าในตัวอย่างทั้งหมดค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรมีค่าต่ำกว่า 0.52 นั้น เป็นการทอรีไฟรภายใต้เงื่อนไข อุณหภูมิต่ำกว่า 250 °C และใช้เวลาในการทอรีไฟรน้อยกว่า 90 นาที ทั้งหมด ดังนั้นที่ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรต่ำกว่า 0.52 จึงมีชีวมวลทอรีไฟรเกิดขึ้นน้อย ค่าความร้อนจึงเพิ่มขึ้นน้อยและส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]$  ต่อดัชนีความรุนแรงมีค่าน้อยไปด้วย ในทางตรงข้ามที่ดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรมีค่ามากกว่า 0.52 เกิดที่อุณหภูมิสูง ซึ่งรายงานของ Prin et al, 2006 ชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูง อัตราการสลายตัวไปเป็นชีวมวลทอรีไฟรมีค่ามากทำให้ค่าความร้อนในช่วงดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรตั้งแต่ 0.52 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากส่งผลให้ ค่าอัตราส่วน  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]$  ต่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรมีค่ามาก และทำให้เกิดแนวโน้มข้อมูล 2 แนวโน้มที่มีความชันเส้นตรงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1ก - 4.1จ

เพื่อให้สะดวกในการอภิปรายต่อไปสำหรับงานวิจัยนี้ จะเรียกการทอรีไฟรที่เกิดในช่วงดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรตั้งแต่ 0 ถึง 0.52 ว่าการทอรีไฟรแบบอ่อน (Weak Torrefaction) และเรียกการทอรีไฟรในช่วงดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรตั้งแต่ 0.52 ถึง 1 ว่าการทอรีไฟรแบบเข้ม (Strong torrefaction) จะเห็นได้ว่า จะเห็นได้ว่าการใช้ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร ทำให้สามารถจำแนกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของชีวมวลในกระบวนการทอรีไฟรตามความเข้ม-อ่อน ของการทอรีไฟร ซึ่งการจำแนกในลักษณะนี้ไม่สามารถทำได้ในกรณีที่พิจารณาอุณหภูมิหรือเวลาในการทอรีไฟรเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามที่พึงสังเกตว่า ตัวเลขค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร 0.52 ในงานวิจัยนี้ เกิดจาก การทอรีไฟรที่รุนแรงที่สุดที่ 280 °C, 180 นาที ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าต่างๆในอนาคตจึงควรใช้เงื่อนไขความรุนแรงในการทอรีไฟรเดียวกัน

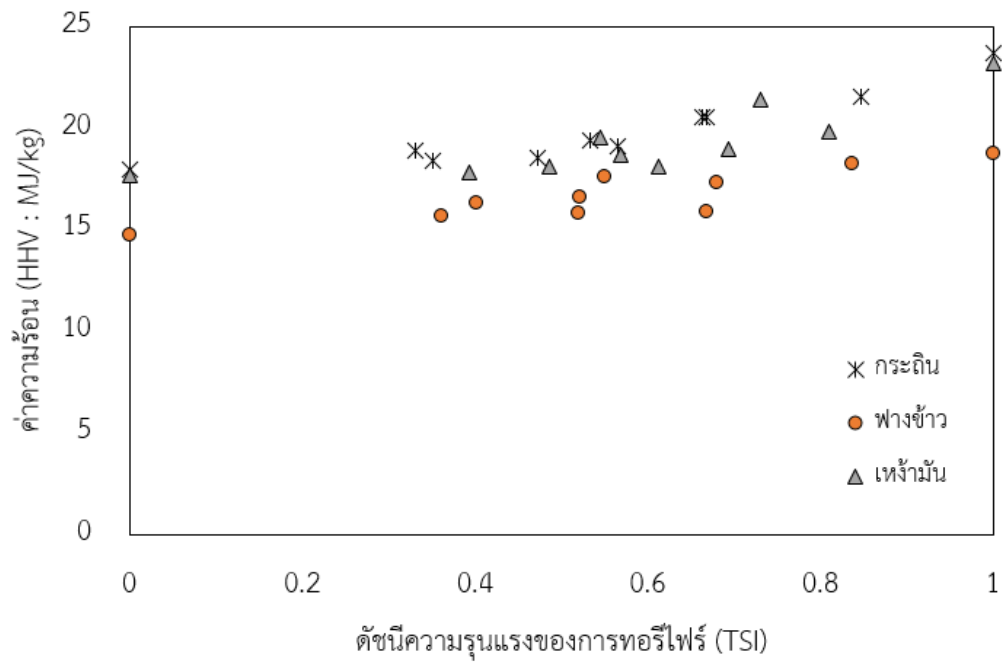
ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟรมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราส่วนค่าความสัมพันธ์ของชีวมวลทอรีไฟรที่เวลาใดๆ ต่ออัตราส่วนค่าความร้อนของชีวมวลดิบ  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]$  โดยค่าดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟรสามารถใช้ในการจำแนกความอ่อน-เข้ม ของการทอรีไฟรได้ ในช่วงการทอรีไฟรแบบอ่อน ค่าความร้อนของชีวมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย ในขณะที่

การทอรีไฟร์แบบเข้มจะทำให้ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นมาก สำหรับเงื่อนไขการทอรีไฟร์ที่รุนแรงที่สุดที่ 280 °C, 180 นาที การทอรีไฟร์แบบอ่อนจะเกิดในช่วงดัชนีความรุนแรง 0-0.52 และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าความร้อนของชีวมวลทอรีไฟร์ต่อค่าความร้อนของชีวมวลดิบต่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ มีค่า 0.135 MJ/Kg-หน่วยความรุนแรงของการทอรีไฟร์ สำหรับการทอรีไฟร์แบบเข้มจะเกิดในช่วงดัชนีความรุนแรง 0.52-1 และค่า อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าความร้อนของชีวมวลทอรีไฟร์ต่อค่าความร้อนของชีวมวลดิบต่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่า 0.503 MJ/kg- unit of TSI

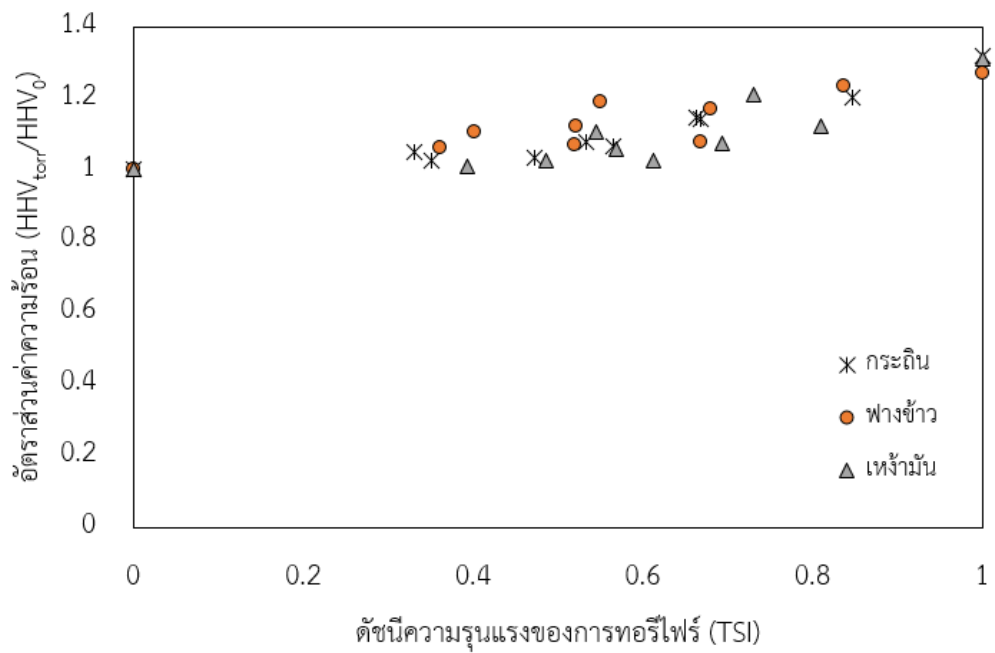




ค. เหง้ามัน



จ. รวมทุกชีวมวล



จ. ความสัมพันธ์ไร้หน่วย

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์กับค่าความร้อน



#### 4.2 ผลของดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่มีต่อการดูดซึมน้ำ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซึมน้ำ (Lam et al, 2011)[33] เป็นเครื่องมือในการวัดความไม่ชอบน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์ รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ และค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซึมน้ำ (k) ตัวแปรทั้งสองนี้เป็นตัวแปรไร้หน่วย สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ ในการดูดซึมน้ำนั้นหากมีค่ามาก จะหมายถึงชีวมวลนั้นดูดความชื้นในอากาศกลับเข้ามาสู่ตัวชีวมวลเองได้มาก หรืออีกนัยหนึ่งคือ ชีวมวลนั้นมีแนวโน้มชอบน้ำ ในกรณีของกระถิน (รูปที่4.2ก) จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้น ด้วยความชัน 0.00131 unit of k/unit of TSI เมื่อดัชนีความรุนแรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.533 หน่วย ความรุนแรงของการทอรีไฟร์ และเมื่อดัชนีความรุนแรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.533 ถึง 1 ความรุนแรงของการทอรีไฟร์ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้นด้วยความชัน 0.00236 unit of k/unit of TSI จะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง โดยมีจุดแบ่งแนวโน้มที่ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่ 0.533 ในช่วงแรก (ดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่า 0 ถึง 0.533) อัตราการเปลี่ยนแปลง (ความชัน) ของค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยกว่าในช่วงหลัง (ดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่า 0.533 ถึง 1) หมายความว่าในช่วงแรกความไม่ชอบน้ำของชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราน้อยกว่าในช่วงหลัง แนวโน้มเช่นนี้พบได้ในกรณีของชีวมวลเหง้ามันสำปะหลังเช่นกัน (รูปที่4.2ค) จากรูปเมื่อค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.57 ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ชอบน้ำมีค่าลดลงจาก 0.0052 เป็น 0.0049 โดยมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้นด้วยความชัน 0.00053 unit of k/unit of TSI เมื่อดัชนีความรุนแรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.57 ถึง 1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงจาก 0.0049 เป็น 0.0039 โดยมีแนวโน้มเป็นเชิงเส้นด้วยความชัน 0.00232 unit of k/unit of TSI สำหรับกรณีฟางข้าว (รูปที่4.2ข) มีแนวโน้มที่แตกต่างออกไป จากรูปจะพบว่าข้อมูลอัตราการดูดซึมน้ำของฟางข้าวมีแนวโน้มกระจายตัวมากกว่า กรณีของกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้น โดยพบแนวโน้มเดียวตลอดช่วงความรุนแรงของการทอรีไฟร์ โดยเมื่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 1 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะลดลงจาก 0.0065 เป็น 0.0027 โดยมีอัตราการลดลง 0.0038 unit of k/unit of TSI เมื่อเปรียบเทียบกับกระถินและเหง้ามันสำปะหลังจะพบว่า ฟางข้าวมีอัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมากกว่าของกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งสามารถตีความได้ว่า ฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการทอรีไฟร์จะมีความไม่ชอบน้ำมากกว่ากระถินและเหง้ามันสำปะหลัง

แนวโน้มความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจาก การสูญเสียองค์ประกอบเคมีเซลลูโลสในชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์ เนื่องจากเคมีเซลลูโลสมีลักษณะชอบน้ำและจะดูดซึมน้ำความชื้นในอากาศ ดังนั้นเมื่อการทอรีไฟร์มีความรุนแรงขึ้น เคมีเซลลูโลสซึ่งสลายตัวได้ง่ายที่สุดจะสลายตัวและลดปริมาณลงอย่าง

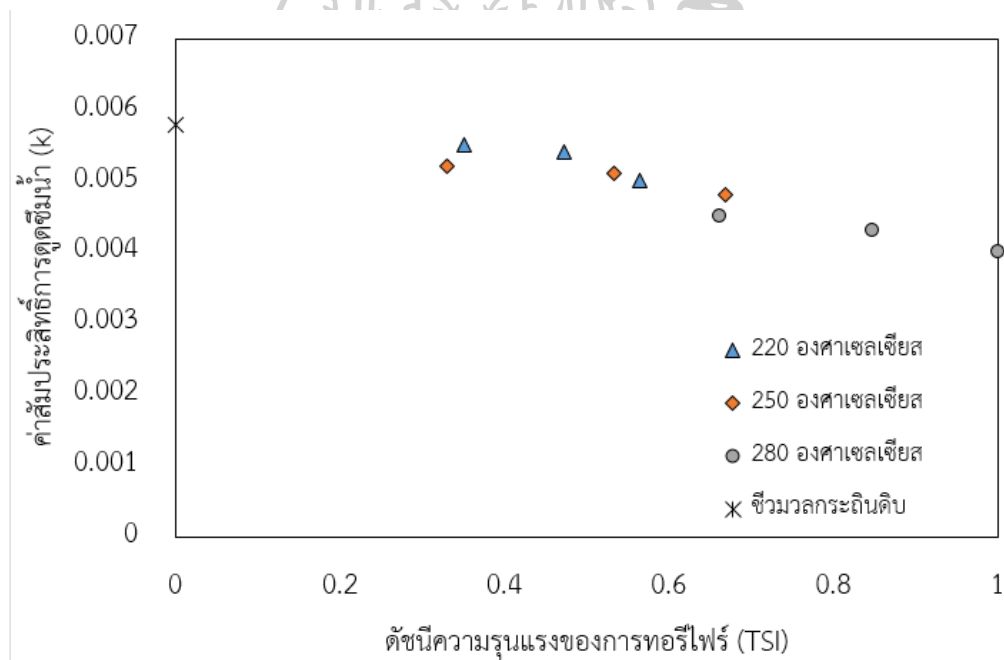
รวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มมากขึ้นจึงเป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในกระบวนการทอรีไฟร์ แนวโน้มเช่นนี้พบในรายงานก่อนหน้านี้อย่างเช่นกัน [34, 35]

สำหรับแนวโน้มของฟางข้าวที่แตกต่างออกไปจากกระถินและเหง้ามันสำปะหลังนั้น เกิดจากโครงสร้างของกระถินและมันสำปะหลังมีปริมาณเส้นใยเซลลูโลสมากกว่าฟางข้าว โดยปกติเฮมิเซลลูโลสจะเกาะอยู่รอบๆเส้นใยซึ่งมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสเป็นหลัก ในกรณีกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีเส้นใยจำนวนมาก เส้นใยเซลลูโลสนี้ขัดขวางการถ่ายเทความร้อนไปสู่เฮมิเซลลูโลสและขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารระเหยที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นในการทอรีไฟร์ที่มีความรุนแรงน้อย เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวได้น้อยทำให้อัตราการดูดซึมน้ำจึงมีค่าลดลงน้อย และเมื่อการทอรีไฟร์มีความรุนแรงมากขึ้นเซลลูโลสบางส่วนจะสลายตัวและเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวได้มากขึ้น ดังนั้นอัตราการดูดซึมน้ำจึงมีค่าลดลงอย่างมาก ในกรณีของฟางข้าวซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลสน้อย การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่เพิ่มขึ้น โดยอิทธิพลของปริมาณเซลลูโลสในการขัดขวางการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะมีค่าน้อย ดังนั้นอัตราการดูดซึมน้ำจึงมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นโดยมีแนวโน้มเดียว

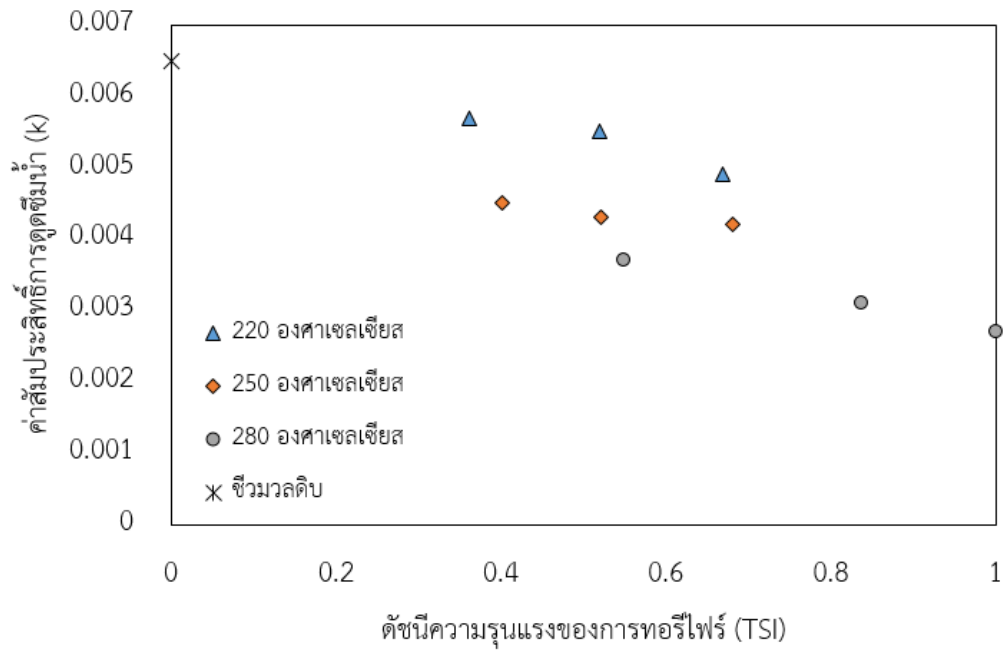
เมื่อนำข้อมูลการทดลองของชีวมวลทุกตัวมาเปรียบเทียบกัน (รูปที่ 4.2ง) จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำเริ่มต้นของชีวมวลแต่ละชนิดก่อนการทอรีไฟร์มีค่าไม่เท่ากัน จะพบว่าฟางข้าวดิบมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมากที่สุดและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความรุนแรงของการทอรีไฟร์ฟางข้าวกลุ่มนี้ทำให้ไม่เห็นแนวโน้มที่ชัดเจน เพื่อที่จะลดผลของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำที่แตกต่างกันนี้ จะนิยามค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ ( $k_{\text{torr}}/k_0$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของชีวมวลทอรีไฟร์ที่เวลาใดๆ หารด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของชีวมวลดิบเริ่มต้นก่อนการทอรีไฟร์ เมื่อนำค่าอัตราส่วนนี้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2จ จากรูปจะพบแนวโน้มที่แตกต่างกันสองกลุ่มคือกลุ่มแรกของฟางข้าวและกลุ่มที่สองของกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง

ความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างและองค์ประกอบของเซลลูโลสที่แตกต่างกันนั่นเอง โดยกระถินและเหง้ามันสำปะหลังจะจัดอยู่ในกลุ่ม woody Biomass [36] และฟางข้าวจะจัดอยู่ในกลุ่ม Non-woody Biomass [36] นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในกรณีของกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง จะพบว่า จุดแบ่งที่ทำให้อัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำมีค่าเปลี่ยนไป มีค่า 0.57 ซึ่งสอดคล้องกับที่พบในกรณีของค่าความร้อน ทำให้กล่าวได้ว่าในการทอรีไฟร์แบบอ่อน (ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.57) ชีวมวลมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการทอรีไฟร์แบบเข้ม

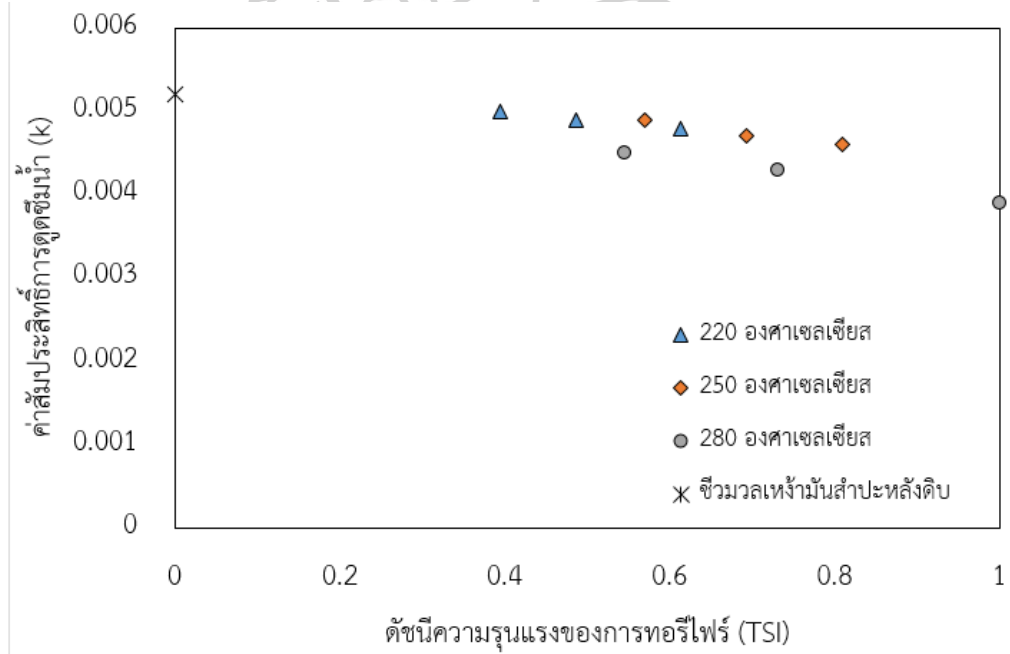
ดังนั้นสรุปได้ว่า เมื่อดัชนีความรุนแรงในการทอริไฟร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้น โดยในกรณีของฟางข้าวซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Non-woody Biomass ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ตามค่าดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์ของการทอริไฟร์ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่า 0.0038 unit of k/unit of TSI สำหรับกรณีกระถินและเหง้ามันสำปะหลังซึ่งอยู่ในกลุ่ม Woody Biomass จะพบว่าความเข้มของการทอริไฟร์มีผลต่ออัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ โดยการทอริไฟร์แบบอ่อน อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของกระถินและเหง้ามันสำปะหลังมีค่า 0.00131 และ 0.00053 unit of k/unit of TSI ตามลำดับในการทอริไฟร์แบบเข้ม อัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง มีค่า 0.00236 และ 0.00232 unit of k/unit of TSI ตามลำดับ



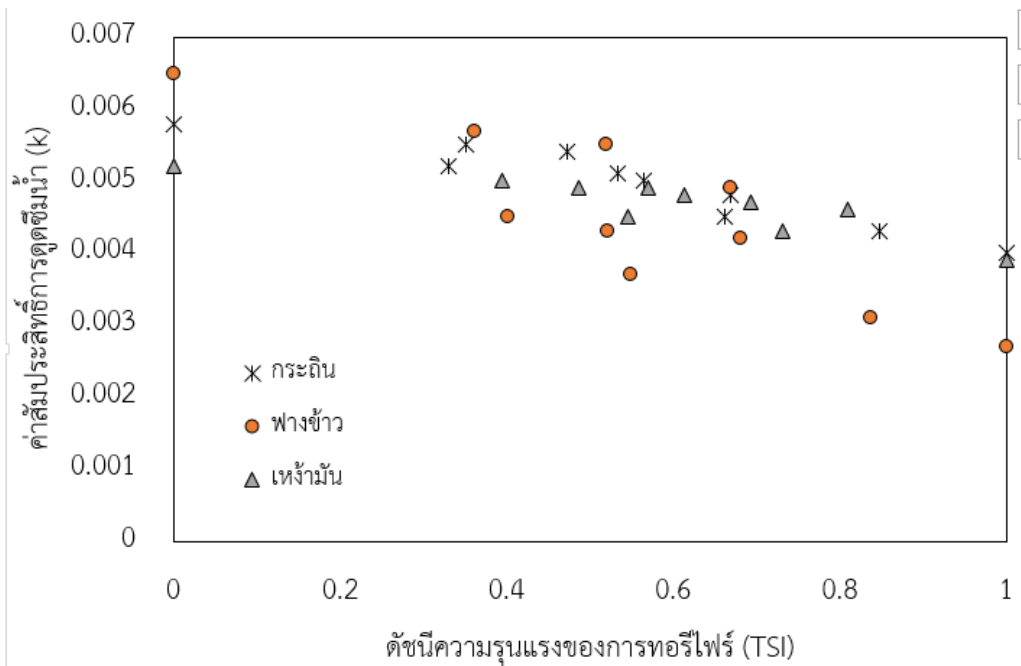
ก. กระถิน



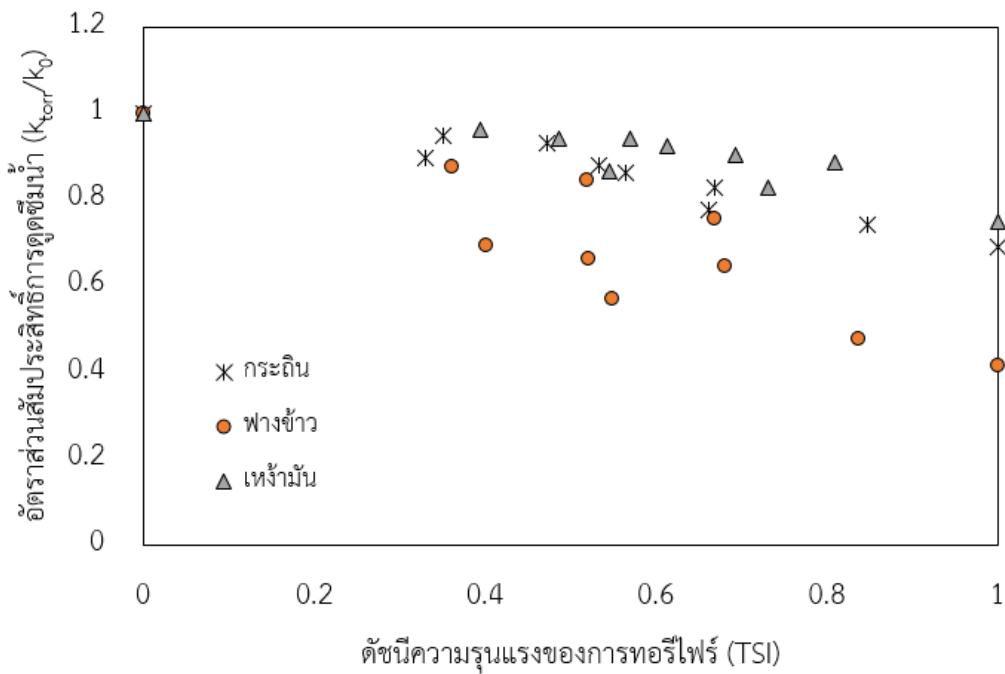
ข. ฟางข้าว



ค. เหม้ามัน



ง. รวมทุกชีวมวล



จ. ความสัมพันธ์ไร้หน่วย

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอร์ไทร์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ

#### 4.3 ผลของดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ที่มีต่อดัชนีความสามารถในการบด

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความสามารถในการบดกับดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ สำหรับกรณีของกระถิน (รูปที่ 4.3ก) จะพบว่าไม่สามารถบดชีวมวลได้ เมื่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่าน้อยกว่า 0.6 และแม้ว่าจะสามารถบดชีวมวลได้ เมื่อดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์มีค่ามากกว่า 0.6 แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถยืนยันว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความสามารถในการบด และดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์ เนื่องจาก พบว่าที่ค่าดัชนีของความรุนแรงใกล้เคียงกัน (0.66 และ 0.67) แต่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์แตกต่างกัน จะมีดัชนีความสามารถในการบดแตกต่างกัน ซึ่งสิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าอาจไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์และดัชนีความสามารถในการบด อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า อุณหภูมิทอรีไฟร์เป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อดัชนีความสามารถในการบด โดยอุณหภูมิทอรีไฟร์ที่ 280 องศาเซลเซียส จะทำให้กระถินสามารถบดได้ และเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์ยาวนานขึ้น (ดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟร์มีค่ามากขึ้น) ก็จะทำให้ความสามารถในการบดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

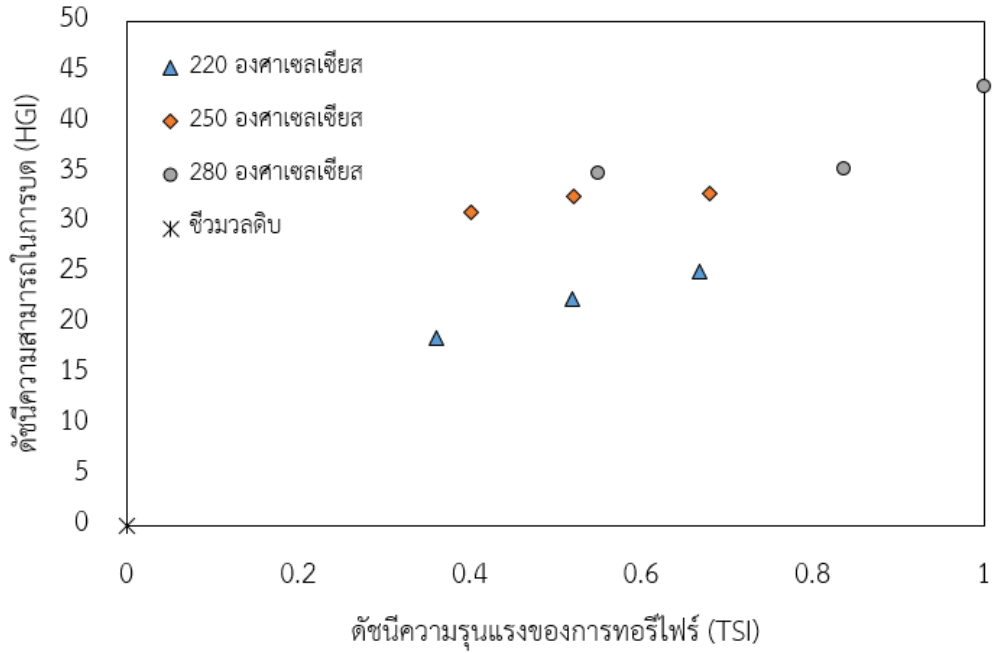
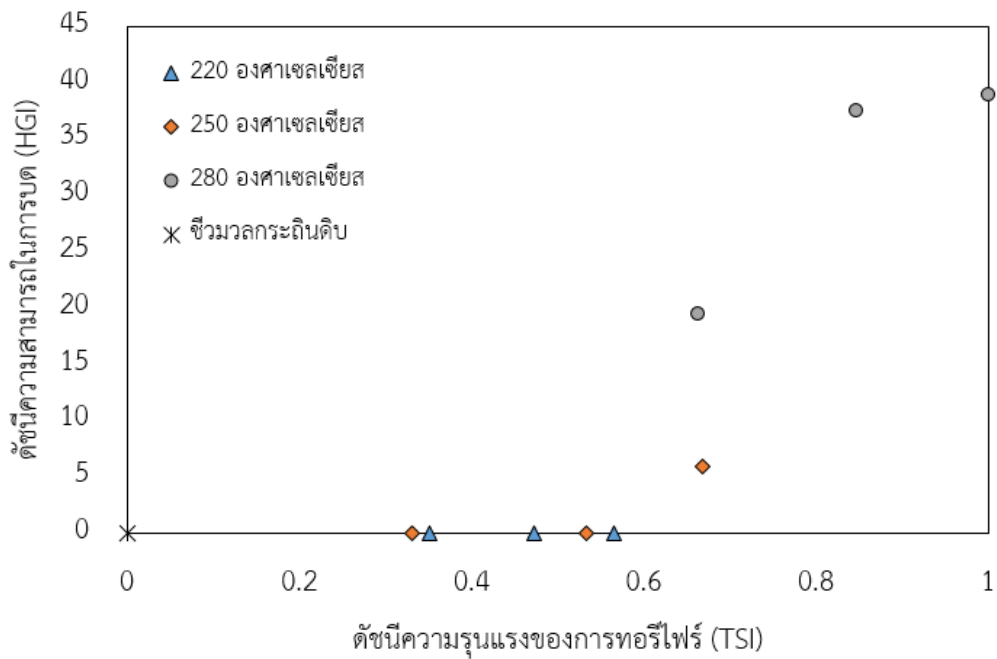
ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้พบได้เช่นเดียวกัน ในกรณีของเหง้ามันสำปะหลัง (รูปที่ 4.3ค) โดยเหง้ามันสามารถบดได้ เมื่อ อุณหภูมิทอรีไฟร์มีค่า 280 °C และดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟร์มีค่ามากกว่า 0.55 และเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้น (ดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น) ค่าดัชนีความสามารถในการบดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างอุณหภูมิในการทอรีไฟร์กับค่าดัชนีความสามารถในการบด โดยพิจารณาข้อมูลการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

ความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันระหว่างกระถินและเหง้ามันสำปะหลังเป็นผลมาจากโครงสร้างเส้นใยเซลลูโลสที่มีอยู่มากในกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง เซลลูโลสสลายตัวที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ที่สูง และเมื่อเซลลูโลสสลายตัวชีวมวลจะมีความเปราะและสามารถบดได้โดยง่าย [5] เมื่อพิจารณาข้อมูลของกระถินและเหง้ามันสำปะหลังจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 280 °C (ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะทำให้เซลลูโลสสลายตัว) ชีวมวลทั้งสองชนิดจะถูกบดได้แม้ว่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์จะมีค่าน้อยก็ตาม (อุณหภูมิ 250 °C, ดัชนีความรุนแรง 0.546) และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 250 °C แม้ว่าจะจะมีค่าดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟร์มากกว่า (อุณหภูมิ 250 °C, ดัชนีความรุนแรง 0.694) แต่กลับพบว่าไม่สามารถบดได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟร์ไม่ส่งผลโดยตรงต่อค่าดัชนีความสามารถในการบดและตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อดัชนีความสามารถในการบดคือ อุณหภูมิการทอรีไฟร์และเวลาในการทอรีไฟร์

ในกรณีของฟางข้าว พบว่าสามารถบดได้ในทุกช่วงอุณหภูมิ แต่พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงในการทอรีไฟร์และดัชนีความสามารถในการบด และแม้ว่าจะพบว่าฟางข้าวสามารถบดได้ในทุกช่วงอุณหภูมิแต่จะเห็นได้จากรูปที่ 4.3 ข ว่าอุณหภูมิและเวลาในการทอรีไฟร์มีผล

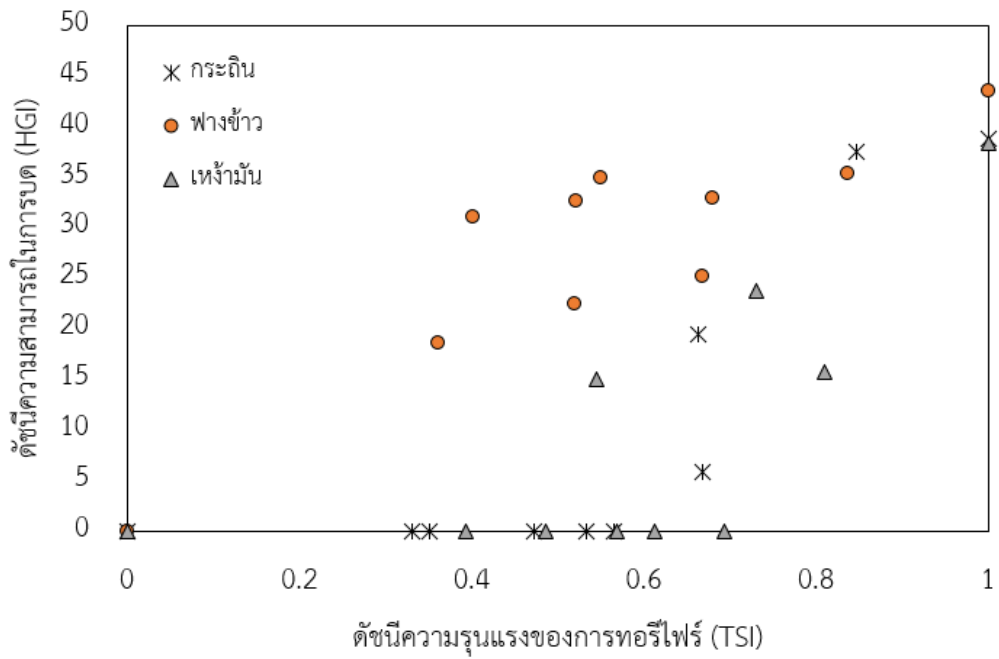
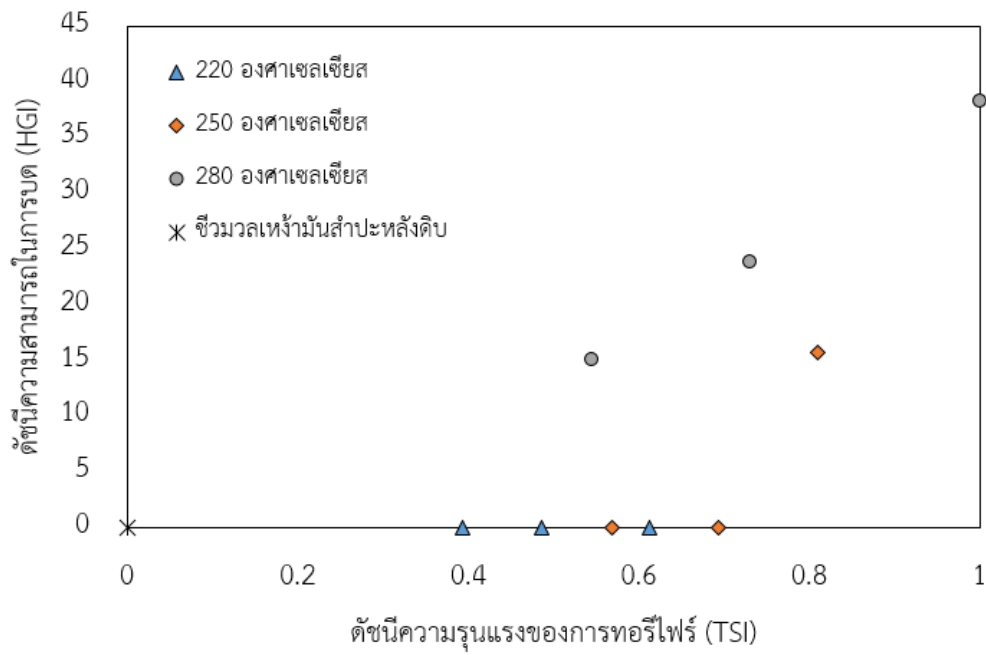
ต่อความสามารถในการบด ข้อมูลในรูปที่ 4.3 ข แบ่งออกเป็นกลุ่มตามอุณหภูมิอย่างชัดเจนโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มข้อมูลตามอุณหภูมิทอริไฟร์ 220 องศาเซลเซียส และกลุ่มข้อมูลตามอุณหภูมิการทอริไฟร์ 260 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากฟางข้าวมีองค์ประกอบของเส้นใยเซลลูโลสน้อยและมีเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ดังนั้น การสลายตัวจึงเกิดขึ้นได้ง่ายในทุกช่วงอุณหภูมิและเมื่อเกิดการสลายตัวแล้ว ซิวมวลทอริไฟร์จึงมีความเปราะและสามารถบดได้ อย่างไรก็ตามก็ตีเนื่องจากในฟางข้าวจะมีเซลลูโลสอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งเซลลูโลสนี้จะสลายตัวได้น้อยและไม่สลายตัวเลยที่อุณหภูมิต่ำๆ ดังนั้นจึงพบการแยกกลุ่มข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม ตามอุณหภูมิตามที่กล่าวมาข้างต้นและเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลของซิ่วมวลทุกตัวจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 ง จากรูปจะเห็นว่าไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์และดัชนีความสามารถในการบด นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีความสามารถในการบดมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของซิ่วมวลแม้ว่าจะมีค่าดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์ใกล้เคียงกันก็ตาม เพื่อตัดผลของค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันของซิ่วมวลแต่ละชนิดจะนิยามค่าอัตราส่วนดัชนีความสามารถในการบด ( $HGI_{\text{torr}}/HGI_0$ ) โดยหาจากค่าดัชนีความสามารถในการบดของซิ่วมวลทอริไฟร์ที่เวลาใดๆ หารด้วยค่าดัชนีความสามารถในการบดของซิ่วมวลที่ผ่านการทอริไฟร์ที่รุนแรงที่สุด เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนดัชนีความสามารถในการบดและค่าดัชนีความรุนแรงในการทอริไฟร์ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 จ จากรูปจะพบว่าไม่พบความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนดัชนีความสามารถในการบดและอัตราส่วนความรุนแรงในการทอริไฟร์ และนอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนดัชนีความสามารถในการบดมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของซิ่วมวล

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอริไฟร์และดัชนีความสามารถในการบด ตัวแปรที่มีผลต่อดัชนีความสามารถในการบดโดยตรง คือ อุณหภูมิและเวลาในการทอริไฟร์ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างและปริมาณเส้นใยเซลลูโลสมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการบด โดยฟางข้าวสามารถบดได้ในทุกช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 220 ถึง 280 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระถินและเหง้ามันสำปะหลังจะบดได้ที่อุณหภูมิทอริไฟร์ 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามก็ตีเวลาในการทอริไฟร์ที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 260 °C สำหรับเหง้ามันและกระถิน

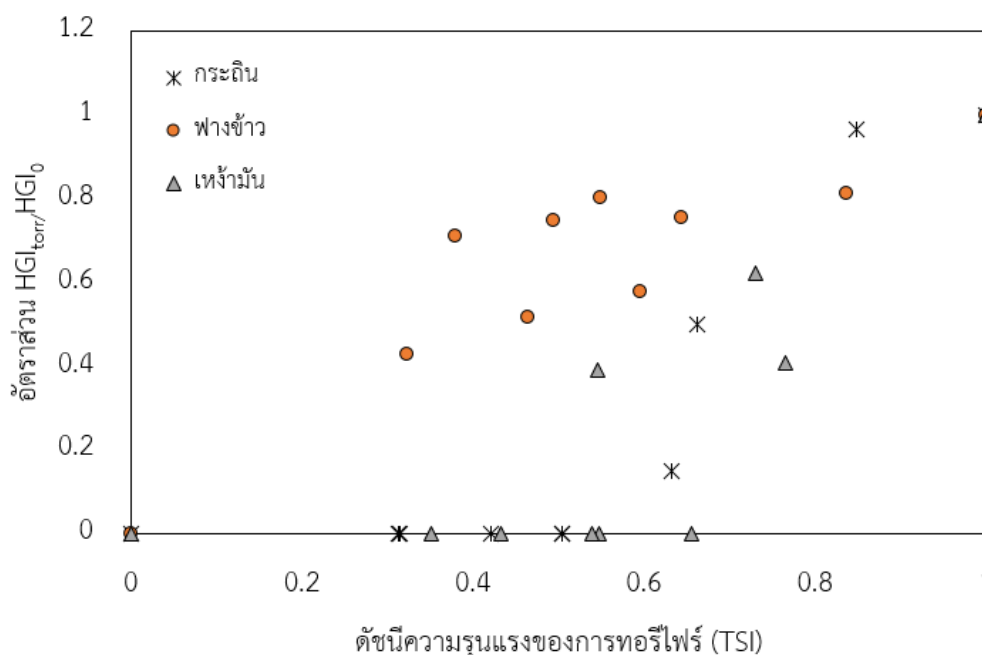


ข. ฟางข้าว





ง. รวมทุกซิวมวล



จ. ความสัมพันธ์ไร้หน่วย

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไฟร์กับดัชนีความสามารถในการบิด

#### 4.4 การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบแท่งเตี้ยด้วยเครื่องอัดกระบอกเดียว จากรูปจะพบว่าชีวมวลสามารถอัดขึ้นรูปได้ในทุกระดับความรุนแรงของการทอรีไฟร์ โดยในกรณีกระถินดิบ (รูปที่ 4.4ก) เม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็ง ไม่มีรอยแตกร้าว และผิวมีความมันเงา เมื่อทอรีไฟร์กระถินด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.4ข) จะพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็ง มีรอยแตกร้าวบางส่วนเพียงเล็กน้อย และผิวมันเงาน้อยกว่ากระถินดิบ นอกจากนี้พบว่าผิวมีผงชีวมวลแตกร่วนที่ส่วนท้ายของเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งแสดงถึงการประสานกันได้ระหว่างอนุภาคชีวมวลที่ลดลง เมื่อทอรีไฟร์กระถินด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.4ค) จะพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็งแต่มีเศษของชีวมวลช่วงส่วนหัวและท้ายมีการแตกออก มีรอยแตกร้าวเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคชีวมวลยึดเกาะกันได้ลดลง เมื่อทอรีไฟร์กระถินด้วยอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.4ง) จะพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงค่อนข้างแข็งแต่ตัวแท่งของชีวมวลไม่เกาะตัว มีความเปราะ และมีรอยแตกมาก ชีวมวลตรงส่วนท้ายจะหลุดออก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขึ้นรูปที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



ก. ชีวมวลกระถินดิบแห้งตะเกียบ



ข. ชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียสแห้งตะเกียบ



ค. ชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส  
แห้งตะเกียบ



ง. ชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส  
แห้งตะเกียบ

รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของกระถินอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ต่างๆ

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบแห้งตะเกียบด้วยเครื่องอัดกระบอกเดียว จากรูปจะพบว่าชีวมวลสามารถอัดขึ้นรูปได้ในทุกระดับความรุนแรงของการทอรีไฟร์ โดยในกรณีฟางข้าวดิบ (รูปที่ 4.5ก) เม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็ง ไม่มีรอยแตกร้าว และผิวมีความมันเงาเช่นเดียวกับกระถินดิบ เมื่อทอรีไฟร์ฟางข้าวด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.5ข) จะพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็ง มีรอยแตกร้าวเล็กน้อย และผิวมีสีคล้ำขึ้น ซึ่งแสดงถึงการประสานกันได้ระหว่างอนุภาคชีวมวลที่ลดลง เมื่อทอรีไฟร์ฟางข้าวด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.5ค) จะพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็งมีรอยแตกร้าวเล็กน้อย เมื่อทอรีไฟร์ฟางข้าวด้วยอุณหภูมิ 280

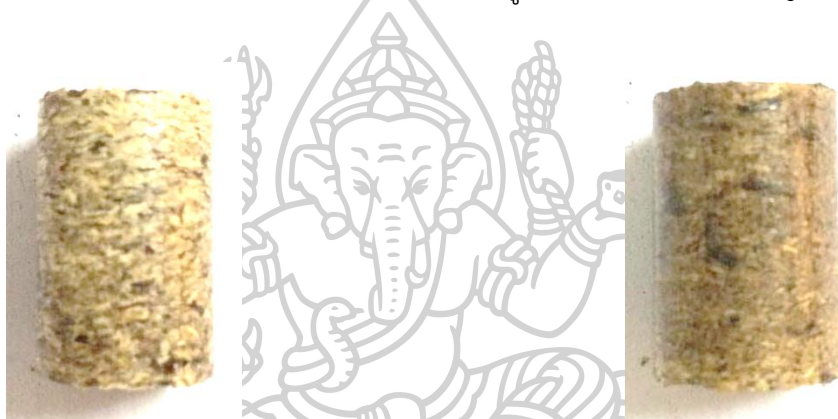
องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.5ง) จะพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีความเปราะ มีรอยแตกร้าว มีเศษชีวมวลบริเวณส่วนหัวและท้ายชีวมวล มีเศษของชีวมวลที่เป็นผงบางส่วนร่อนออกมาจากพื้นผิว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขึ้นรูปที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของฟางข้าวอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทอริไฟร์ต่างๆ

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของเหง้ามันสำปะหลังทอริไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบแท่งตะเกียบด้วยเครื่องอัดกระบอกเดียว จากรูปจะพบว่าชีวมวลสามารถอัดขึ้นรูปได้ในทุกระดับความรุนแรงของการทอริไฟร์ โดยในกรณีเหง้ามันดิบ (รูปที่ 4.6ก) เม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็ง ไม่มีรอยแตกร้าว และผิวมีความมันเงาเช่นเดียวกับกระถินดิบ และฟางข้าวดิบ เมื่อทอริไฟร์เหง้ามันด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.6

ข) จะพบว่าเม็ดยาเม็ดซึ่งมีความแข็ง มีรอยแตกร้าวบางส่วนเพียงเล็กน้อย และผิวค่อนข้างมันเงา ซึ่งแสดงถึงการประสานกันได้ระหว่างอนุภาคชีวมวลที่ลดลง เมื่อทอริไฟร์แห้งมันด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.6ค) จะพบว่าเม็ดยาเม็ดซึ่งมีความแข็งแต่มีเศษของของชีวมวลช่วงส่วนหัวและท้ายบางส่วนมีการแตกออก มีรอยแตกร้าว และผิวค่อนข้างมันเงา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขึ้นรูปที่เริ่มลดลง เมื่อทอริไฟร์แห้งมันด้วยอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที แล้วนำมาขึ้นรูป (รูปที่ 4.6ง) จะพบว่าเม็ดยาเม็ดซึ่งมีความแข็งแต่จะมีเศษของของชีวมวลช่วงส่วนหัวและท้ายบางส่วนมีการแตกออก มีรอยแตกร้าวค่อนข้างมาก และผิวไม่มันเงาซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขึ้นรูปที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



ก. เหม็ดยาเม็ดสำหรับขึ้นรูป

ข. เหม็ดยาเม็ดสำหรับขึ้นรูป 220 องศาเซลเซียส



ค. เหม็ดยาเม็ดสำหรับขึ้นรูป 250 องศาเซลเซียส      ง. เหม็ดยาเม็ดสำหรับขึ้นรูป 280 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของเหม็ดยาเม็ดขึ้นรูปที่อุณหภูมิทอริไฟร์ต่างๆ

จะเห็นได้ค่าความรุนแรงในการทอริไฟร์ไม่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการขึ้นรูปโดยตรง แต่ความรุนแรงในการทอริไฟร์ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะของอนุภาคชีวมวลลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกาะกันของอนุภาคชีวมวลเกิดจากกลไก 2 ประการคือ การยึดเกาะทางกลที่เกิดจากการทับทับกันของเส้นใยในชีวมวล และการยึดเกาะจากการหลอมตัวของลิกนินที่อุณหภูมิสูงและเย็นตัวลงกลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ [10, 12] เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการทอริไฟร์ที่มีความรุนแรงเส้นใยต่างๆ จะเกิดความเปราะจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ทำให้การยึดเกาะทางกลลดลง การยึดเกาะจึงเกิดขึ้นได้จากการยึดประสานของลิกนินเท่านั้น ดังนั้นการยึดเกาะของอนุภาคจึงทำไม่ได้ดีตั้งแต่เริ่มขึ้นรูป อนุภาคที่ไม่ได้ยึดเกาะโดยลิกนินจะหลุดร่อนเป็นผงออกมาดังแสดงในรูปที่ 4.6

ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าความรุนแรงในการทอริไฟร์ไม่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการขึ้นรูปโดยตรง แต่การทอริไฟร์ที่รุนแรงทำให้อนุภาคชีวมวลสูญเสียกลไกการยึดเกาะทางกล เนื่องจากการทอริไฟร์ทำให้เส้นใยมีความเปราะ ส่งผลให้การอัดขึ้นรูปทำไม่ได้ดี และมีการแตกร่วนของอนุภาคเชื้อเพลิง



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของดัชนีความรุนแรงในการทอรีไพร์ที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของต้นกระถิน เหง้ามันสำปะหลังและฟางข้าว ได้แก่ ความสามารถในการบด อัตราการดูดซับความชื้น และค่าความร้อน นอกจากนี้ยังศึกษาผลของดัชนีความรุนแรงในการทอรีไพร์ที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด จากการศึกษาพบว่า

- ค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไพร์มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราส่วนค่าความสัมพันธ์ของชีวมวลทอรีไพร์ที่เวลาใดๆ ต่ออัตราส่วนค่าความร้อนของชีวมวลดิบ  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]$  โดยค่าดัชนีความรุนแรงในการทอรีไพร์สามารถใช้ในการจำแนกความอ่อน-แข็ง ของการทอรีไพร์ได้ในช่วงการทอรีไพร์แบบอ่อน ค่าความร้อนของชีวมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย ในขณะที่การทอรีไพร์แบบเข้มจะทำให้ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นมาก สำหรับเงื่อนไขการทอรีไพร์ที่รุนแรงที่สุดที่  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 180 นาที การทอรีไพร์แบบอ่อนจะเกิดในช่วงดัชนีความรุนแรง 0-0.52 และค่า  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]$  TSI มีค่า 0.135 MJ/kg- Unit of TSI สำหรับการทอรีไพร์แบบเข้มจะเกิดในช่วงดัชนีความรุนแรง 0.52-1 และค่า  $[HHV_{\text{torr}}/HHV_0]/TSI$  มีค่า 0.503 MJ/kg-Unit of TSI

- เมื่อดัชนีความรุนแรงในการทอรีไพร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้น โดยในกรณีของฟางข้าวซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Non-woody Biomass ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ตามค่าดัชนีความรุนแรงของการทอรีไพร์ของการทอรีไพร์ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่า 0.0038 unit of k/unit of TSI สำหรับกรณีกระถินและเหง้ามันสำปะหลังซึ่งอยู่ในกลุ่ม Woody Biomass จะพบว่าความเข้มของการทอรีไพร์มีผลต่ออัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ โดยการทอรีไพร์แบบอ่อน อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของกระถินและเหง้ามันสำปะหลังมีค่า 0.00131 และ 0.00053 unit of k/unit of TSI ตามลำดับในการทอรีไพร์แบบเข้ม อัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของกระถินและเหง้ามันสำปะหลัง มีค่า 0.00236 และ 0.00232 unit of k/unit of TSI ตามลำดับ

- ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงของการทอรีไพร์และดัชนีความสามารถในการบดไม่พบว่ามีความสัมพันธ์กัน ตัวแปรที่มีผลต่อดัชนีความสามารถในการบดโดยตรง คือ อุณหภูมิและเวลาในการทอรีไพร์ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างและปริมาณเส้นใยเซลลูโลสมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการบด โดยฟางข้าวสามารถบดได้ในทุกช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 220 ถึง 280 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระถินและเหง้ามันสำปะหลังจะบดได้ที่อุณหภูมิทอรีไพร์ 260 ถึง 280 องศา

เซลเซียส อย่างไรก็ตามเวลาในการทอรีไฟร์ที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 260 °C สำหรับแห้งน้ำมันและกระถิน

- ค่าความร้อนในการทอรีไฟร์ไม่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการขึ้นรูปโดยตรง แต่การทอรีไฟร์ที่รุนแรงทำให้อนุภาคชีวมวลสูญเสียกลไกการยึดเกาะทางกล เนื่องจากการทอรีไฟร์ทำให้เส้นใยมีความเปราะ ส่งผลให้การอัดขึ้นรูปทำได้ไม่ดี และมีการแตกร่วนของอนุภาคเชื้อเพลิง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการศึกษานี้กำหนดของเขตจำนวนชีวมวลไว้เพียง 3 ชนิด ซึ่งการศึกษาชี้ให้เห็นพฤติกรรมที่แตกต่างกันของชีวมวลในกลุ่ม Woody และ Non-woody biomass อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้มีเพียงฟางข้าวเป็นตัวแทนของชีวมวลในกลุ่ม Non-woody biomass ในการศึกษาในอนาคตควรเพิ่มชนิดชีวมวล เพื่อยืนยันพฤติกรรมที่แตกต่างกันของชีวมวลทั้งสองกลุ่มนี้ต่อไป

5.2.2 จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าค่าดัชนีความร้อนในการทอรีไฟร์มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตามที่ดีดัชนีความร้อนในการทอรีไฟร์เป็นปริมาณที่ไม่สามารถกำหนดได้โดยตรง เนื่องจากยังไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณค่าดัชนีความร้อนของการทอรีไฟร์ ดังนั้นจึงควรมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าดัชนีความร้อนของการทอรีไฟร์ต่อไป

5.2.3 จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าความสามารถในการบดไม่มีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีความร้อนในการทอรีไฟร์โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่าดัชนีความร้อนในการทอรีไฟร์ส่งผลทางอ้อมโดยแสดงถึงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปควรสืบหาตัวแปรที่เป็นลักษณะเฉพาะของชีวมวลแต่ละชนิด เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายความสามารถในการบดของชีวมวลที่เงื่อนไขการทอรีไฟร์ที่สภาวะต่างๆ ต่อไป

5.2.4 ควรศึกษาประเด็นของจุดที่เหมาะสมของ torrefaction severity index ในการใช้พลังงานทอรีไฟร์



## รายการอ้างอิง

- [1] P. Basu, Biomass Gasification and Pyrolysis, (2010).
- [2] S.L. Doty, T.Q. Shang, A.M. Wilson, A.L. Moore, L.A. Newman, S.E. Strand, M.P. Gordon, Metabolism of the soil and groundwater contaminants, ethylene dibromide and trichloroethylene, by the tropical leguminous tree, *Leuceana leucocephala*, Water Research, 37 (2003) 441-449.
- [3] Q. Dong, S. Zhang, K. Ding, S. Zhu, H. Zhang, X. Liu, Pyrolysis behavior of raw/torrefied rice straw after different demineralization processes, Biomass and Bioenergy, 119 (2018) 229-236.
- [4] N. Tippayawong, P. Rerkkriangkrai, P. Aggarangsi, A. Pattiya, Biochar Production from Cassava Rhizome in a Semi-continuous Carbonization System, Energy Procedia, 141 (2017) 109-113.
- [5] G. Wang, Y. Luo, J. Deng, J. Kuang, Y. Zhang, Pretreatment of biomass by torrefaction, Chinese Science Bulletin, 56 (2011) 1442-1448.
- [6] M.J. Prins, K.J. Ptasinski, F.J.J.G. Janssen, Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 77 (2006) 28-34.
- [7] M.J. Prins, K.J. Ptasinski, F.J.J.G. Janssen, Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 77 (2006) 35-40.
- [8] S.H. Larsson, M. Rudolfsson, M. Nordwaeger, I. Olofsson, R. Samuelsson, Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce, Applied Energy, 102 (2013) 827-832.
- [9] W. Stelte, C. Clemons, J.K. Holm, A.R. Sanadi, J. Ahrenfeldt, L. Shang, U.B. Henriksen, Pelletizing properties of torrefied spruce, Biomass and Bioenergy, 35 (2011) 4690-4698.
- [10] W. Stelte, N.P.K. Nielsen, H.O. Hansen, J. Dahl, L. Shang, A.R. Sanadi, Pelletizing properties of torrefied wheat straw, Biomass and Bioenergy, 49 (2013) 214-221.
- [11] W.-H. Chen, H.-C. Hsu, K.-M. Lu, W.-J. Lee, T.-C. Lin, Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass, Energy, 36 (2011) 3012-3021.
- [12] H. Li, X. Liu, R. Legros, X.T. Bi, C. Jim Lim, S. Sokhansanj, Pelletization of torrefied

sawdust and properties of torrefied pellets, *Applied Energy*, 93 (2012) 680-685.

[13] C. Serrano, E. Monedero, M. Lapuerta, H. Portero, Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets, *Fuel Processing Technology*, 92 (2011) 699-706.

[14] N. Kaliyan, R. Morey, Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass, 2009.

[15] E. SJÖSTRÖM, *Wood Chemistry Fundamentals and Applications*, (1993).

[16] S. Negi, S. Sadaka, Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process, (2009).

[17] J.H. Lora, W.G. Glasser, Recent Industrial Applications of Lignin: A Sustainable Alternative to Nonrenewable Materials, *Journal of Polymers and the Environment*, 10 (2002) 39-48.

[18] M. BREBU, C. VASILE, THERMAL DEGRADATION OF LIGNIN – A REVIEW CELLULOSE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY, 44 (2010) 353-363.

[19] D. Mohan, C.U. Pittman, P.H. Steele, Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review, *Energy & Fuels*, 20 (2006) 848-889.

[20] G.W.G. Abraham Gesner, *A practical treatise on coal, petroleum, and other distilled oils*, (1865).

[21] G.W. Huber, S. Iborra, A. Corma, Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering, *Chemical Reviews*, 106 (2006) 4044-4098.

[22] P.C.A. Bergman, A.R. Boersma, R.W.R. Zwart, J.H.A.Kiel, torrefaction of biomass co-firing in existing coal-fired power stations, (2005).

[23] C. Couhert, S. Salvador, J.M. Commandré, Impact of torrefaction on syngas production from wood, *Fuel*, 88 (2009) 2286-2290.

[24] T.G. Bridgeman, J.M. Jones, I. Shield, P.T. Williams, Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties, *Fuel*, 87 (2008) 844-856.

[25] R. Wallace, D. Ciolkosz, A review of torrefaction for bioenergy feedstock production, (2011).

[26] M. Wilk, A. Magdziarz, Hydrothermal carbonization, torrefaction and slow pyrolysis

- of *Miscanthus giganteus*, *Energy*, 140 (2017) 1292-1304.
- [27] M.J. Prins, K.J. Ptasinski, F.J.J.G. Janssen, More efficient biomass gasification via torrefaction, *Energy*, 31 (2006) 3458-3470.
- [28] L.P. Ramos, The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials, (2003).
- [29] C. Sheng, J.L.T. Azevedo, Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass and Bioenergy*, 28 (2005) 499-507.
- [30] P. Basu, A. Kulshreshtha, B. Acharya, An Index for Quantifying the Degree of Torrefaction.
- [31] W.-H. Chen, M.-Y. Huang, J.-S. Chang, C.-Y. Chen, Thermal decomposition dynamics and severity of microalgae residues in torrefaction, *Bioresource Technology*, 169 (2014) 258-264.
- [32] J.H. Peng, X.T. Bi, S. Sokhansanj, C.J. Lim, Torrefaction and densification of different species of softwood residues, *Fuel*, 111 (2013) 411-421.
- [33] P.S. Lam, S. Sokhansanj, X. Bi, C.J. Lim, S. Melin, Energy Input and Quality of Pellets Made from Steam-Exploded Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*), *Energy & Fuels*, 25 (2011) 1521-1528.
- [34] M. Phanphanich, S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 1246-1253.
- [35] A. Pimchuai, A. Dutta, P. Basu, Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties, *Energy & Fuels*, 24 (2010) 4638-4645.
- [36] S.G. Pallardy, *Physiology of Woody Plants*, (2008).

ภาคผนวก ก



ตาราง ก-1 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถิน

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	0	0	0
53	0	0	0
75	0	0	0
106	0	0	0.02
150	0.02	0.1	0.06
212	0.06	0.17	0.09
300	0.1	0.32	0.18
425	0.27	0.74	0.45
600	0.59	1.67	1.08
850	8.36	9.22	9.05
1700	10.24	7.48	8.61
3350	0.18	0.15	0.22
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.82	น้ำหนักรวม (Mt) 19.85	น้ำหนักรวม (Mt) 19.76

ตาราง ก-2 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่  
220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	0.42	0.42	0.38
53	0.17	0.18	0.22
75	0.28	0.26	0.2
106	0.49	0.37	0.41
150	0.71	0.61	0.59
212	1.26	1.11	1.32
300	2.04	2.04	1.98
425	3.13	2.98	2.75
600	4.26	4.11	4.08
850	6.08	6.57	6.77
1700	1.07	1.24	1.11
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.91	น้ำหนักรวม (Mt) 19.89	น้ำหนักรวม (Mt) 19.81

ตาราง ก-3 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	1.23	1.24	1.19
53	0.48	0.5	0.47
75	0.78	0.83	0.87
106	1.01	1	1.04
150	1.46	1.59	1.63
212	2.26	2.34	2.29
300	3.07	3.1	3.04
425	3.33	3.28	3.31
600	3.15	2.95	2.88
850	2.81	2.68	2.81
1700	0.22	0.19	0.21
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.8	น้ำหนักรวม (Mt) 19.7	น้ำหนักรวม (Mt) 19.74

ตาราง ก-4 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	3.02	3.25	3.31
53	0.69	0.79	0.84
75	1.17	1.28	1.31
106	1.32	1.37	1.25
150	1.88	1.95	1.89
212	2.39	2.49	2.54
300	2.83	2.79	2.83
425	2.67	2.43	2.61
600	1.9	1.67	1.54
850	1.23	1.05	1.12
1700	0.03	0.02	0.04
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.13	น้ำหนักรวม (Mt) 19.09	น้ำหนักรวม (Mt) 19.28



ตาราง ก-5 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	0.29	0.28	0.24
53	0.07	0.12	0.14
75	0.15	0.18	0.19
106	0.23	0.21	0.25
150	0.4	0.34	0.27
212	0.75	0.64	0.92
300	1.25	1.31	1.19
425	1.98	2.03	1.84
600	3.21	3.42	3.51
850	9.02	8.96	8.65
1700	2.29	2.12	2.19
3350	0.2	0.29	0.25
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.84	น้ำหนักรวม (Mt) 19.9	น้ำหนักรวม (Mt) 19.64

ตาราง ก-6 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่  
220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	0.33	0.29	0.3
53	0.11	0.07	0.15
75	0.17	0.21	0.25
106	0.38	0.53	0.42
150	0.58	0.63	0.49
212	1.21	1.29	1.39
300	2.21	2.13	1.66
425	3.13	3.33	3.25
600	3.83	3.89	4.02
850	6.82	6.52	6.67
1700	1.01	1.08	1.22
3350	0.1	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.88	น้ำหนักรวม (Mt) 19.97	น้ำหนักรวม (Mt) 19.82

ตาราง ก-7 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)
0	0.64	0.62	0.65
53	0.2	0.25	0.19
75	0.34	0.28	0.35
106	0.54	0.48	0.51
150	0.9	1.01	1.03
212	1.53	1.6	1.49
300	2.44	2.29	2.41
425	3.18	3.24	3.23
600	3.88	3.73	3.67
850	5.43	5.66	5.6
1700	0.7	0.65	0.71
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.78	น้ำหนักรวม (Mt) 19.81	น้ำหนักรวม (Mt) 19.84

ตาราง ก-8 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่  
250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)
0	0.9	0.92	0.89
53	0.33	0.25	0.31
75	0.6	0.57	0.43
106	0.78	0.84	0.87
150	1.23	1.19	1.25
212	1.92	2.01	1.97
300	2.68	2.59	2.53
425	3.39	3.29	3.31
600	3.69	3.73	3.62
850	4.06	4.12	4.35
1700	0.35	0.44	0.33
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.93	น้ำหนักรวม (Mt) 19.95	น้ำหนักรวม (Mt) 19.86

ตาราง ก-9 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)
0	2.08	2.12	2.21
53	0.65	0.6	0.57
75	1.08	1.12	1.09
106	1.27	1.21	1.16
150	1.68	1.72	1.75
212	2.29	2.31	2.25
300	2.87	2.82	2.81
425	3.07	3.12	3.16
600	2.48	2.51	2.51
850	2.26	2.13	2.29
1700	0.16	0.11	0.07
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.89	น้ำหนักรวม (Mt) 19.77	น้ำหนักรวม (Mt) 19.87

ตาราง ก-10 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบัดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)
0	3.33	3.41	3.29
53	0.82	0.78	0.85
75	1.19	1.22	1.14
106	1.25	1.31	1.42
150	1.79	1.68	1.82
212	2.12	2.22	2.17
300	2.59	2.64	2.5
425	2.39	2.28	2.19
600	2.16	2.21	2.32
850	1.96	2.01	2.04
1700	0.11	0.07	0.05
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.71	น้ำหนักรวม (Mt) 19.83	น้ำหนักรวม (Mt) 19.79

ตาราง ก-11 ตารางแสดงค่าความสามารถในการบัดของต้นกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิและเวลา  
ต่างๆ โดยเปรียบเทียบจากค่า HGI ของถ่านหิน 4 ค่าคือ 24, 36, 49 และ 67

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	มวล (เปอร์เซ็นต์)	HGI
220	30	1.81	0.00
	90	2.21	0.00
	180	2.96	0.00
250	30	4.25	0.00
	90	6.17	0.00
	180	8.64	5.86
280	30	13.73	19.42
	90	20.75	37.51
	180	21.73	38.84

ตาราง ก-12 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์กระถิน

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.84	94.49	88.00
20	93.98	94.61	88.13
30	94.08	94.71	88.23
40	94.14	94.78	88.29
50	94.22	94.84	88.36
60	94.23	94.88	88.38
90	94.31	94.96	88.46
120	94.37	95.01	88.51
150	94.41	95.03	88.54
180	94.51	95.07	88.62
210	94.52	95.09	88.64
240	94.52	95.10	88.65
270	94.53	95.11	88.68
300	94.54	95.13	88.70
1 วัน	94.61	95.20	88.76
2 วัน	94.68	95.27	88.84



ตาราง ก-13 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถิน

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.10810674	-0.189454179	-0.04401689
20	-0.2904283	-0.356508263	-0.21215381
30	-0.44457898	-0.520811315	-0.36395982
40	-0.54993949	-0.654342707	-0.4675005
50	-0.71028214	-0.78496289	-0.60363267
60	-0.73226105	-0.882601359	-0.64619229
90	-0.92800563	-1.112175801	-0.83724752
120	-1.10493634	-1.288066467	-0.97832612
150	-1.24308667	-1.368109175	-1.0736363
180	-1.7057102	-1.550430732	-1.38379123
210	-1.76633482	-1.655791248	-1.47910141
240	-1.76633482	-1.712949661	-1.53039471
270	-1.83087334	-1.773574283	-1.70224496
300	-1.89986621	-1.907105676	-1.83577635



ตาราง ก-14 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์มวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.66	94.36	87.88
20	93.75	94.45	87.96
30	93.89	94.54	88.05
40	93.97	94.62	88.14
50	94.02	94.67	88.18
60	94.08	94.74	88.26
90	94.13	94.79	88.32
120	94.17	94.83	88.37
150	94.20	94.85	88.40
180	94.22	94.86	88.43
210	94.24	94.88	88.43
240	94.25	94.90	88.45
270	94.26	94.90	88.46
300	94.28	94.92	88.48
1 วัน	94.35	94.98	88.55
2 วัน	94.42	95.05	88.60

ตาราง ก-15 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.2068002	-0.310676531	-0.1970277
20	-0.33284092	-0.450438474	-0.31481074
30	-0.56724162	-0.612957403	-0.46636064
40	-0.73087105	-0.78358292	-0.64505243
50	-0.84865408	-0.907196876	-0.7360242
60	-1.01117301	-1.110795831	-0.9473333
90	-1.17023771	-1.286686498	-1.14148931
120	-1.31865771	-1.453740583	-1.33819961
150	-1.44649108	-1.549050762	-1.47796155
180	-1.54180126	-1.600344057	-1.64048048
210	-1.64716178	-1.711569692	-1.64048048
240	-1.70432019	-1.836732835	-1.76564362
270	-1.76494482	-1.836732835	-1.83463649
300	-1.89847621	-1.979833679	-1.98878717



ตาราง ก-16 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.73	94.40	87.93
20	93.79	94.51	88.05
30	93.90	94.60	88.15
40	93.99	94.66	88.19
50	94.04	94.72	88.25
60	94.08	94.77	88.29
90	94.13	94.81	88.32
120	94.18	94.85	88.37
150	94.22	94.87	88.40
180	94.25	94.90	88.43
210	94.26	94.92	88.45
240	94.28	94.94	88.48
270	94.30	94.96	88.48
300	94.32	94.98	88.50
1 วัน	94.40	95.04	88.55
2 วัน	94.45	95.10	88.62

ตาราง ก-17 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟรที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.26225742	-0.297773836	-0.24084109
20	-0.3492688	-0.468731634	-0.43189633
30	-0.53159035	-0.634246073	-0.6248
40	-0.71028214	-0.762079444	-0.71374748
50	-0.82535147	-0.908682918	-0.86402969
60	-0.92800563	-1.049761517	-0.97844004
90	-1.07318764	-1.178973248	-1.07375022
120	-1.24308667	-1.327393253	-1.25607177
150	-1.40342932	-1.410774862	-1.38390515
180	-1.54319127	-1.550536805	-1.53050862
210	-1.59448456	-1.65589732	-1.64173425
240	-1.7057102	-1.773680356	-1.83589027
270	-1.83087334	-1.907211748	-1.83589027
300	-1.97397418	-2.061362428	-1.99004095



ตาราง ก-18 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์กระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.71	94.40	87.90
20	93.79	94.45	87.97
30	93.84	94.50	88.01
40	93.88	94.57	88.05
50	93.89	94.57	88.08
60	93.96	94.60	88.11
90	93.98	94.66	88.15
120	93.99	94.67	88.16
150	94.03	94.70	88.20
180	94.05	94.73	88.23
210	94.05	94.75	88.23
240	94.07	94.76	88.23
270	94.07	94.77	88.24
300	94.09	94.78	88.24
1 วัน	94.15	94.83	88.30
2 วัน	94.20	94.87	88.34

ตาราง ก-19 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.64710324	-0.696015404	-0.69064405
20	-0.82535147	-0.808493387	-0.86391577
30	-0.9554046	-0.935245093	-0.97832612
40	-1.07318764	-1.144965624	-1.10753785
50	-1.10493634	-1.144965624	-1.21673715
60	-1.36086971	-1.250326139	-1.33933947
90	-1.44788109	-1.501640568	-1.53039471
120	-1.4944011	-1.550430732	-1.58446193
150	-1.7057102	-1.712949661	-1.83577635
180	-1.83087334	-1.907105676	-2.07693841
210	-1.83087334	-2.061256356	-2.07693841
240	-1.97397418	-2.148267733	-2.07693841
270	-1.97397418	-2.243577912	-2.17224859
300	-2.14102827	-2.348938428	-2.17224859



ตาราง ก-20 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.62	94.28	87.85
20	93.71	94.37	87.92
30	93.75	94.42	87.99
40	93.80	94.45	88.02
50	93.84	94.51	88.06
60	93.89	94.55	88.10
90	93.94	94.59	88.14
120	93.96	94.63	88.19
150	93.97	94.64	88.20
180	93.97	94.64	88.20
210	93.98	94.64	88.21
240	94.01	94.68	88.23
270	94.02	94.69	88.23
300	94.02	94.69	88.23
1 วัน	94.06	94.73	88.28
2 วัน	94.13	94.77	88.34



ตาราง ก-21 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.6058149	-0.653175165	-0.58198757
20	-0.79997091	-0.856116009	-0.73613825
30	-0.90005437	-0.989647401	-0.91845981
40	-1.04113297	-1.07925956	-1.00807196
50	-1.1703447	-1.286898925	-1.14160336
60	-1.3595867	-1.45395301	-1.29575404
90	-1.59320155	-1.654623705	-1.47807559
120	-1.70442719	-1.905938133	-1.76575767
150	-1.76505181	-1.980046105	-1.83475054
180	-1.76505181	-1.980046105	-1.83475054
210	-1.82959033	-1.980046105	-1.90885851
240	-2.05273388	-2.347770886	-2.07591259
270	-2.13974526	-2.465553921	-2.07591259
300	-2.13974526	-2.465553921	-2.07591259



ตาราง ก-22 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.65	94.33	87.86
20	93.70	94.39	87.92
30	93.75	94.43	87.95
40	93.81	94.48	88.01
50	93.82	94.49	88.02
60	93.85	94.51	88.05
90	93.91	94.57	88.10
120	93.93	94.59	88.12
150	93.95	94.62	88.14
180	93.95	94.62	88.14
210	93.95	94.63	88.15
240	93.95	94.63	88.16
270	93.96	94.63	88.17
300	93.96	94.64	88.18
1 วัน	94.00	94.70	88.22
2 วัน	94.04	94.74	88.25

ตาราง ก-23 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.87439979	-0.831423396	-0.81024622
20	-1.01160091	-0.989647401	-0.97730031
30	-1.17066561	-1.111008258	-1.07261049
40	-1.40246722	-1.286898925	-1.29575404
50	-1.44691898	-1.326119638	-1.33831365
60	-1.59352246	-1.409501247	-1.47807559
90	-1.97301208	-1.7111782119	-1.76575767
120	-2.14006616	-1.836945262	-1.90885851
150	-2.34073686	-2.060088813	-2.07591259
180	-2.34073686	-2.060088813	-2.07591259
210	-2.34073686	-2.14710019	-2.17122277
240	-2.34073686	-2.14710019	-2.27658329
270	-2.45851989	-2.14710019	-2.39436633
300	-2.45851989	-2.24241037	-2.52789772



ตาราง ก-24 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.76	94.40	87.89
20	93.83	94.47	87.96
30	93.87	94.54	87.99
40	93.89	94.57	88.03
50	93.93	94.59	88.06
60	93.95	94.61	88.10
90	93.99	94.67	88.14
120	93.99	94.67	88.15
150	94.00	94.69	88.15
180	94.00	94.69	88.15
210	94.01	94.70	88.15
240	94.01	94.72	88.15
270	94.02	94.74	88.16
300	94.03	94.76	88.18
1 วัน	94.06	94.79	88.22
2 วัน	94.10	94.82	88.26

ตาราง ก-25 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟรที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.01256302	-0.808493387	-0.86391577
20	-1.24308667	-0.990814944	-1.0736363
30	-1.40342932	-1.213958495	-1.17899682
40	-1.4944011	-1.327287181	-1.33933947
50	-1.7057102	-1.410668789	-1.47910141
60	-1.83087334	-1.501640568	-1.70224496
90	-2.14102827	-1.838112804	-1.98992703
120	-2.14102827	-1.838112804	-2.07693841
150	-2.23633845	-1.981213648	-2.07693841
180	-2.23633845	-1.981213648	-2.07693841
210	-2.34169896	-2.061256356	-2.07693841
240	-2.34169896	-2.243577912	-2.07693841
270	-2.459482	-2.466721464	-2.17224859
300	-2.59301339	-2.754403536	-2.39539214



ตาราง ก-26 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.62	94.29	87.84
20	93.70	94.37	87.90
30	93.75	94.41	87.94
40	93.79	94.44	87.97
50	93.79	94.46	87.99
60	93.80	94.48	88.01
90	93.83	94.51	88.04
120	93.84	94.51	88.05
150	93.84	94.52	88.05
180	93.85	94.53	88.06
210	93.85	94.53	88.06
240	93.85	94.53	88.07
270	93.85	94.54	88.07
300	93.87	94.55	88.07
1 วัน	93.89	94.58	88.11
2 วัน	93.92	94.61	88.14

ตาราง ก-27 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟรที่  
อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.13655013	-1.07925956	-1.07261049
20	-1.44670506	-1.366941633	-1.29575404
30	-1.70453417	-1.549263189	-1.47807559
40	-1.97279815	-1.711782119	-1.64059452
50	-1.97279815	-1.836945262	-1.76575767
60	-2.05284086	-1.980046105	-1.90885851
90	-2.34052293	-2.24241037	-2.17122277
120	-2.45830597	-2.24241037	-2.27658329
150	-2.45830597	-2.347770886	-2.27658329
180	-2.59183736	-2.465553921	-2.39436633
210	-2.59183736	-2.465553921	-2.39436633
240	-2.59183736	-2.465553921	-2.52789772
270	-2.59183736	-2.599085314	-2.52789772
300	-2.9283096	-2.753235994	-2.52789772



ตาราง ก-28 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์กระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	101.18	91.44	94.75
20	101.23	91.50	94.81
30	101.28	91.56	94.87
40	101.30	91.59	94.91
50	101.32	91.61	94.93
60	101.32	91.61	94.93
90	101.33	91.61	94.94
120	101.33	91.62	94.94
150	101.36	91.63	94.95
180	101.36	91.64	94.95
210	101.41	91.68	94.97
240	101.42	91.68	94.98
270	101.42	91.69	94.98
300	101.42	91.70	94.99
1 วัน	101.46	91.75	95.03
2 วัน	101.49	91.77	95.06



ตาราง ก-29 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟรที่  
อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.18162824	-1.018081246	-1.11598735
20	-1.35751891	-1.218751942	-1.33109873
30	-1.57109301	-1.47006637	-1.60553557
40	-1.67117646	-1.62421705	-1.84192435
50	-1.7824021	-1.742000086	-1.98502519
60	-1.7824021	-1.742000086	-1.98502519
90	-1.84302672	-1.742000086	-2.0650679
120	-1.84302672	-1.806538607	-2.0650679
150	-2.05066609	-1.875531478	-2.15207928
180	-2.05066609	-1.94963945	-2.15207928
210	-2.5361739	-2.31736423	-2.35274997
240	-2.66970529	-2.31736423	-2.47053301
270	-2.66970529	-2.435147266	-2.47053301
300	-2.66970529	-2.568678659	-2.6040644



ตาราง ก-30 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลกระถินทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	93.68	94.34	87.85
20	93.75	94.41	87.92
30	93.79	94.46	87.97
40	93.83	94.48	87.99
50	93.84	94.49	88.01
60	93.85	94.52	88.03
90	93.87	94.56	88.05
120	93.90	94.56	88.07
150	93.90	94.56	88.07
180	93.90	94.56	88.08
210	93.91	94.57	88.09
240	93.92	94.58	88.12
270	93.92	94.59	88.13
300	93.93	94.60	88.14
1 วัน	93.98	94.65	88.16
2 วัน	94.02	94.72	88.20

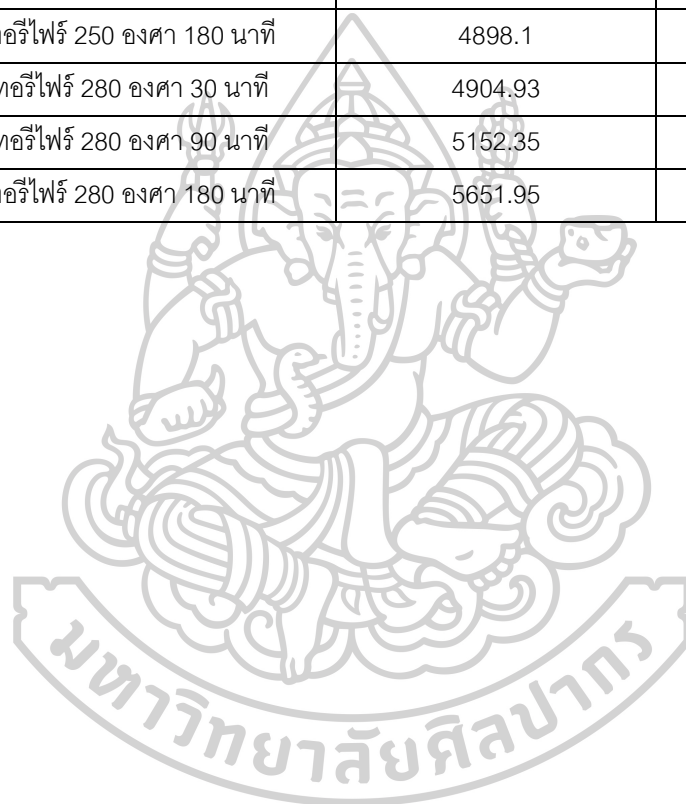
ตาราง ก-31 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลต้นกระถินทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.01256302	-0.908576846	-0.91948562
20	-1.24308667	-1.112175801	-1.14262917
30	-1.40342932	-1.288066467	-1.33933947
40	-1.59448456	-1.368109175	-1.43031125
50	-1.64855178	-1.410668789	-1.53039471
60	-1.7057102	-1.550430732	-1.64162034
90	-1.83087334	-1.773574283	-1.76678348
120	-2.05401689	-1.773574283	-1.90988433
150	-2.05401689	-1.773574283	-1.90988433
180	-2.05401689	-1.773574283	-1.98992703
210	-2.14102827	-1.838112804	-2.07693841
240	-2.23633845	-1.907105676	-2.39539214
270	-2.23633845	-1.981213648	-2.52892354
300	-2.34169896	-2.061256356	-2.68307422



ตาราง ก-32 ตารางแสดงการบันทึกผลการหาค่าความร้อนของต้นกระถิน

ชนิดชีวมวล	ค่าความร้อนที่ได้ Cal/g	ค่าความร้อนที่ได้ Mj/kg
กระถิน ดิบ	4283.51	17.94
กระถิน ทอรีไฟร์ 220 องศา 30 นาที	4397.77	18.41
กระถิน ทอรีไฟร์ 220 องศา 90 นาที	4431.11	18.55
กระถิน ทอรีไฟร์ 220 องศา 180 นาที	4568.07	19.13
กระถิน ทอรีไฟร์ 250 องศา 30 นาที	4503.66	18.86
กระถิน ทอรีไฟร์ 250 องศา 90 นาที	4626.38	19.37
กระถิน ทอรีไฟร์ 250 องศา 180 นาที	4898.1	20.51
กระถิน ทอรีไฟร์ 280 องศา 30 นาที	4904.93	20.54
กระถิน ทอรีไฟร์ 280 องศา 90 นาที	5152.35	21.57
กระถิน ทอรีไฟร์ 280 องศา 180 นาที	5651.95	23.66





ตาราง ข-1 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งมันดำปะหลังไม่ผ่าน  
กระบวนการเทอร์รี่ไฟร์

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)		น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)		น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	
0	0		0		0	
53	0		0.01		0	
75	0		0.02		0	
106	0.01		0.03		0.03	
150	0.02		0.07		0.02	
212	0.02		0.11		0.03	
300	0.07		0.16		0.11	
425	0.16		0.31		0.2	
600	0.4		0.91		0.61	
850	5.73		7.12		6.4	
1700	12.65		10.5		11.74	
3350	0.75		0.36		0.42	
	น้ำหนักรวม (Mt)	19.81	น้ำหนักรวม	19.6	น้ำหนักรวม	19.56

ตาราง ข-2 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งมันสำปะหลังผ่าน  
กระบวนกร เทอร์รี่ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (M <sub>i</sub> )	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (M <sub>i</sub> )	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (M <sub>i</sub> )
0	0.47	0.53	0.45
53	0.13	0.18	0.16
75	0.15	0.2	0.26
106	0.24	0.34	0.31
150	0.48	0.25	0.35
212	0.76	0.76	0.89
300	1.19	1.05	1.34
425	2.11	2.34	2.01
600	4.07	4.35	4.22
850	8.31	7.9	8.45
1700	1.97	1.65	1.45
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.88	น้ำหนักรวม 19.55	น้ำหนักรวม 19.89

ตาราง ข-3 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งผ่าน  
กระบวนกร เทอร์ไฟร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)			
0	0.72	0.75	0.84			
53	0.19	0.18	0.12			
75	0.29	0.35	0.33			
106	0.44	0.65	0.77			
150	0.67	0.45	0.36			
212	1.12	1.25	1.16			
300	1.95	1.84	1.93			
425	3.01	3.15	3.23			
600	4.07	4.04	4.02			
850	6.18	6.01	5.99			
1700	1.25	1.12	1.09			
3350	0	0	0			
	น้ำหนักรวม (Mt)	19.89	น้ำหนักรวม	19.79	น้ำหนักรวม	19.84



ตาราง ข-4 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งมันสำปะหลังผ่าน  
กระบวนกร เทอร์รี่ไฟร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และเวลา 180 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)
0	0.7	0.68	0.72
53	0.23	0.25	0.31
75	0.37	0.37	0.35
106	0.41	0.59	0.61
150	0.71	0.78	0.75
212	1.21	1.28	1.34
300	2.03	2.05	2.01
425	3.18	3.26	3.15
600	4.28	4.32	4.44
850	6.07	5.59	5.52
1700	0.63	0.51	0.54
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.82	น้ำหนักรวม 19.68	น้ำหนักรวม 19.74

ตาราง ข-5 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งมันสำปะหลังผ่าน  
กระบวนกร เทอร์รี่ไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)
0	0.75	0.73	0.69
53	0.16	0.11	0.17
75	0.28	0.15	0.21
106	0.4	0.54	0.55
150	0.65	0.66	0.59
212	1.14	1.11	1.25
300	2.04	2.16	2.03
425	3.09	3.01	3.12
600	4.32	4.22	4.55
850	6.12	6.31	6.09
1700	0.86	0.71	0.54
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.81	น้ำหนักรวม 19.71	น้ำหนักรวม 19.79

ตาราง ข-6 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งดำปะหลังผ่าน  
กระบวนกร เทอร์รี่ไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)
0	0.97	0.89	0.95
53	0.23	0.32	0.4
75	0.53	0.48	0.54
106	0.62	0.63	0.73
150	1.02	1.25	1.31
212	1.67	1.52	1.53
300	2.51	2.59	2.63
425	2.3	2.41	2.65
600	3.68	3.88	3.54
850	4.72	4.85	4.52
1700	0.8	0.83	0.79
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.05	น้ำหนักรวม 19.65	น้ำหนักรวม 19.59

ตาราง ข-7 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งน้ำมันดำปะหลังผ่าน  
กระบวนกร เทอร์รี่ไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเวลา 180 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)
0	1.91	1.71	1.88
53	0.54	0.62	0.71
75	0.88	0.89	0.75
106	1.09	1.11	1.05
150	1.55	1.48	1.52
212	2.16	2.21	1.98
300	2.98	2.92	2.97
425	3.32	3.4	3.46
600	2.84	2.89	2.81
850	2.44	2.39	2.46
1700	0.14	0.17	0.21
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.85	น้ำหนักรวม 19.79	น้ำหนักรวม 19.8

ตาราง ข-8 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งน้ำมันดำปะหลังผ่าน  
กระบวนกรเทอร์ไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)
0	1.8	1.79	1.91
53	0.6	0.54	0.62
75	0.84	0.79	0.69
106	1.1	0.99	0.95
150	1.42	1.39	1.41
212	2.01	2.2	2.09
300	2.72	2.67	2.88
425	3.01	3.08	3.11
600	2.89	2.95	2.81
850	3.21	3.01	3.11
1700	0.31	0.29	0.24
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.91	น้ำหนักรวม 19.7	น้ำหนักรวม 19.82

ตาราง ข-9 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งน้ำมันดำปะหลังผ่าน  
กระบวนการเทอร์ไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม) (Mi)
0	2.99	2.85	2.97
53	0.86	0.92	0.89
75	1.13	1.08	1.25
106	1.31	1.41	1.39
150	1.49	1.53	1.44
212	2.1	2.34	2.18
300	2.49	2.41	2.33
425	2.59	2.52	2.69
600	2.34	2.33	2.27
850	2.42	2.29	2.32
1700	0.17	0.19	0.2
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.89	น้ำหนักรวม 19.87	น้ำหนักรวม 19.93

ตาราง ข-10 ตารางแสดงค่าการบันทึกการหาขนาดของอนุภาคของแข็งมันสำปะหลังผ่าน  
กระบวนกรเทอร์ไฟฟี่ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลา 180 นาที

ขนาด ตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (M <sub>i</sub> )	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (M <sub>i</sub> )	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (M <sub>i</sub> )
0	2.44	2.92	2.12
53	0.62	1.5	0.53
75	1	1.06	0.87
106	1.18	1.31	1.05
150	1.63	1.65	1.51
212	2.23	2.23	2.01
300	2.82	2.69	2.7
425	3.05	2.81	3.02
600	2.53	2.27	2.83
850	1.84	1.15	2.59
1700	0.12	0.15	0.28
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 19.46	น้ำหนักรวม 19.74	น้ำหนักรวม 19.51

ตาราง ข-11 ตารางแสดงค่าความสามารถในการบัดของเหง้ามันสำปะหลังสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบจากค่า HGI ของถ่านหิน 4 ค่าคือ 24, 36, 49 และ 67

ประเภท	เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ถูกร่อน ผ่านตะแกรง ขนาด 75 ไมครอน (กรัม)	น้ำหนักรวม (กรัม)	มวล (เปอร์เซ็นต์)	HGI
เหง้ามันสำปะหลัง ดิบไม่ผ่าน กระบวนการทอรี ไฟร์	0	0	19.81	0.00	0.00
เหง้ามันสำปะหลัง ผ่านกระบวนการทอ รีไฟร์ 220 องศา เซลเซียส	30	0.60	19.88	3.02	0.00
	90	0.91	19.89	4.58	0.00
	180	0.93	19.82	4.69	0.00
เหง้ามันสำปะหลัง ผ่านกระบวนการทอ รีไฟร์ 250 องศา เซลเซียส	30	0.91	19.81	4.59	0.00
	90	1.2	19.05	6.30	0.00
	180	2.45	19.85	12.34	15.70
เหง้ามันสำปะหลัง ผ่านกระบวนการทอ รีไฟร์ 280 องศา เซลเซียส	30	2.4	19.91	12.05	15.03
	90	3.06	19.46	15.72	23.81
	180	4.15	19.84	20.92	38.30



สมการ

มวล (เปอร์เซ็นต์) = น้ำหนักที่ถูกร้อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน (กรัม) / น้ำหนักรวม (กรัม)

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า HGI

$$M_h = m(\text{HGI}) + b$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\text{HGI}_{\text{equiv}} = \frac{Mh - b}{m}$$

เมื่อ	m	คือ ความชันที่ได้จากกราฟเท่ากับ 0.0752 (ซึ่งหาได้จากการบดถ่านหินตัวอย่างที่
และ		ค่า HGI)
	b	คือ จุดตัดที่ได้จากกราฟเท่ากับ 1.2695 (ซึ่งหาได้จากการบดถ่านหินตัวอย่างที่รู้
		ค่า HGI)
	HGI <sub>equiv</sub>	คือ ค่าความสามารถในการบดง่ายของถ่านหิน
	M <sub>h</sub>	คือ น้ำหนักที่ถูกร้อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน



ตาราง ข-12 ตารางการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลังดิบ

เหง้ำมันสำปะหลังดิบ						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.86	83.95	101.16	0.000	0.000	0.000
10	96.27	84.33	101.60	0.428	0.453	0.435
20	96.41	84.38	101.72	0.574	0.512	0.554
30	96.48	84.48	101.80	0.647	0.631	0.633
40	96.56	84.55	101.89	0.730	0.715	0.722
50	96.60	84.62	101.92	0.772	0.798	0.751
60	96.64	84.65	101.98	0.814	0.834	0.811
90	96.68	84.67	102.03	0.855	0.858	0.860
120	96.72	84.71	102.07	0.897	0.905	0.900
150	96.76	84.74	102.13	0.939	0.941	0.959
180	96.80	84.77	102.16	0.981	0.977	0.989
210	96.83	84.81	102.17	1.012	1.024	0.998
240	96.84	84.82	102.18	1.022	1.036	1.008
270	96.85	84.83	102.19	1.033	1.048	1.018
300	96.85	84.84	102.21	1.033	1.060	1.038
1 วัน	96.89	84.87	102.24	1.074	1.096	1.068
2 วัน	97.01	84.96	102.37	1.200	1.203	1.196

หมายเหตุ ความชื้นฐานแห้ง =  $\frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100$

โดยที่  $M_t$  คือ มวล ณ เวลาใดๆ (g)

$M_d$  คือ มวลวัสดุแห้ง (g)

ตารางที่ ข-13 ตารางแสดงการบันทึกค่า y ของเหง้ามันสำปะหลังดิบ

เหง้ามันสำปะหลังดิบ			
เวลา(นาทึ)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.259	-0.287	-0.273
20	-0.469	-0.370	-0.442
30	-0.593	-0.559	-0.574
40	-0.756	-0.717	-0.746
50	-0.849	-0.904	-0.810
60	-0.952	-0.996	-0.953
90	-1.066	-1.063	-1.090
120	-1.196	-1.211	-1.216
150	-1.344	-1.339	-1.439
180	-1.518	-1.486	-1.572
210	-1.673	-1.722	-1.621
240	-1.730	-1.791	-1.672
270	-1.790	-1.865	-1.726
300	-1.790	-1.945	-1.844

โดยนำหนักที่บันทึกได้จะนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการดูดซับความชื้นตามมาตรฐาน ASABES448.1 โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณจะถูกแสดงไว้ดังสมการนี้

$$\frac{M-M_e}{M_i-M_e} = e^{-kt} \quad (1)$$

- เมื่อ
- M คือ ความชื้นของชีวมวลตัวอย่าง ณ เวลานั้น (%)
  - $M_e$  คือ ความชื้นสมดุลของชีวมวลตัวอย่าง (%)
  - $M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของชีวมวลตัวอย่าง
  - K คือ สัมประสิทธิ์ค่าความไม่ชอบน้ำ
  - T คือ เวลา (นาทึ)

จากสูตรที่ 1 ทำการ take Ln ทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้

$$\text{Ln} \frac{M - Me}{Mi - Me} = \text{Ln}(e^{-kt})$$

จากนั้นจะได้

$$\text{Ln} \frac{M - Me}{Mi - Me} = -kt$$

จากนั้นจะได้

$$(M - Me) - (Mi - Me) = -kt$$

ทำการย้ายข้างสมการจะได้

$$(M - Me) = -kt + (M - Me) \quad (2)$$

นำสูตรที่ 2 ไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่ชอบน้ำ (k)



ตาราง ข-14 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้ง 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 30 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.74	83.83	101.02	0.000	0.000	0.000
10	96.10	84.15	101.41	0.376	0.382	0.386
20	96.20	84.24	101.51	0.480	0.489	0.485
30	96.28	84.33	101.62	0.564	0.596	0.594
40	96.36	84.40	101.70	0.648	0.680	0.673
50	96.42	84.45	101.76	0.710	0.740	0.733
60	96.46	84.49	101.81	0.752	0.787	0.782
90	96.50	84.52	101.85	0.794	0.823	0.822
120	96.53	84.55	101.89	0.825	0.859	0.861
150	96.56	84.57	101.92	0.856	0.883	0.891
180	96.58	84.59	101.94	0.877	0.907	0.911
210	96.60	84.60	101.95	0.898	0.919	0.921
240	96.62	84.61	101.96	0.919	0.930	0.931
270	96.63	84.61	101.97	0.930	0.930	0.940
300	96.64	84.62	101.97	0.940	0.942	0.940
1 วัน	96.70	84.69	102.06	1.003	1.026	1.029
2 วัน	96.79	84.74	102.11	1.097	1.086	1.079

ตารางที่ ข-15 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 30 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.328	-0.351	-0.367
20	-0.484	-0.517	-0.521
30	-0.630	-0.715	-0.723
40	-0.800	-0.902	-0.902
50	-0.951	-1.061	-1.060
60	-1.065	-1.210	-1.214
90	-1.194	-1.338	-1.357
120	-1.304	-1.484	-1.524
150	-1.426	-1.596	-1.671
180	-1.517	-1.721	-1.782
210	-1.617	-1.790	-1.843
240	-1.728	-1.864	-1.907
270	-1.789	-1.864	-1.976
300	-1.854	-1.944	-1.976

ตาราง ข-16 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้ง 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 90 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.87	83.96	101.15	0.000	0.000	0.000
10	96.19	84.25	101.49	0.334	0.345	0.336
20	96.31	84.36	101.61	0.459	0.476	0.455
30	96.40	84.42	101.71	0.553	0.548	0.554
40	96.48	84.47	101.77	0.636	0.607	0.613
50	96.50	84.51	101.80	0.657	0.655	0.643
60	96.53	84.54	101.84	0.688	0.691	0.682
90	96.56	84.56	101.88	0.720	0.715	0.722
120	96.60	84.60	101.92	0.761	0.762	0.761
150	96.62	84.63	101.95	0.782	0.798	0.791
180	96.65	84.65	101.98	0.814	0.822	0.821
210	96.67	84.66	102.00	0.834	0.834	0.840
240	96.69	84.67	102.03	0.855	0.846	0.870
270	96.70	84.68	102.03	0.866	0.858	0.870
300	96.71	84.69	102.04	0.876	0.869	0.880
1 วัน	96.78	84.75	102.10	0.949	0.941	0.939
2 วัน	96.86	84.80	102.17	1.033	1.000	1.008

ตาราง ข-17 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 90 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.358	-0.423	-0.397
20	-0.556	-0.646	-0.591
30	-0.734	-0.793	-0.788
40	-0.925	-0.934	-0.928
50	-0.979	-1.063	-1.006
60	-1.066	-1.172	-1.120
90	-1.162	-1.252	-1.249
120	-1.305	-1.435	-1.398
150	-1.385	-1.597	-1.526
180	-1.518	-1.722	-1.672
210	-1.619	-1.791	-1.783
240	-1.730	-1.865	-1.978
270	-1.790	-1.945	-1.978
300	-1.855	-2.032	-2.052



ตาราง ข-18 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 180 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.86	83.95	101.16	0.000	0.000	0.000
10	96.16	84.21	101.48	0.313	0.310	0.316
20	96.26	84.31	101.58	0.417	0.429	0.415
30	96.37	84.38	101.68	0.532	0.512	0.514
40	96.45	84.45	101.76	0.615	0.596	0.593
50	96.47	84.48	101.80	0.636	0.631	0.633
60	96.50	84.53	101.83	0.668	0.691	0.662
90	96.54	84.55	101.87	0.709	0.715	0.702
120	96.57	84.57	101.91	0.741	0.739	0.741
150	96.60	84.61	101.94	0.772	0.786	0.771
180	96.62	84.62	101.97	0.793	0.798	0.801
210	96.64	84.63	101.99	0.814	0.810	0.820
240	96.66	84.65	101.99	0.835	0.834	0.820
270	96.67	84.66	102.01	0.845	0.846	0.840
300	96.68	84.67	102.02	0.855	0.858	0.850
1 วัน	96.75	84.73	102.11	0.928	0.929	0.939
2 วัน	96.81	84.79	102.17	0.991	1.001	0.998

ตาราง ข-19 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 180 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.389	-0.370	-0.383
20	-0.556	-0.559	-0.539
30	-0.779	-0.717	-0.725
40	-0.979	-0.904	-0.903
50	-1.037	-0.996	-1.006
60	-1.129	-1.172	-1.090
90	-1.267	-1.252	-1.216
120	-1.385	-1.339	-1.359
150	-1.518	-1.540	-1.481
180	-1.618	-1.597	-1.621
210	-1.730	-1.658	-1.726
240	-1.855	-1.791	-1.726
270	-1.924	-1.865	-1.844
300	-1.998	-1.945	-1.909

ตาราง ข-20 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 30 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.74	83.84	101.02	0.000	0.000	0.000
10	96.02	84.09	101.31	0.292	0.298	0.287
20	96.11	84.15	101.39	0.386	0.370	0.366
30	96.19	84.21	101.49	0.470	0.441	0.465
40	96.25	84.28	101.53	0.533	0.525	0.505
50	96.29	84.31	101.59	0.574	0.561	0.564
60	96.33	84.35	101.66	0.616	0.608	0.634
90	96.35	84.39	101.69	0.637	0.656	0.663
120	96.37	84.42	101.72	0.658	0.692	0.693
150	96.41	84.44	101.75	0.700	0.716	0.723
180	96.43	84.46	101.77	0.721	0.740	0.742
210	96.44	84.48	101.78	0.731	0.763	0.752
240	96.45	84.48	101.79	0.742	0.763	0.762
270	96.45	84.49	101.79	0.742	0.775	0.762
300	96.46	84.49	101.80	0.752	0.775	0.772
1 วัน	96.54	84.55	101.87	0.836	0.847	0.841
2 วัน	96.61	84.59	101.93	0.909	0.895	0.901

ตาราง ข-21 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 30 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.484	-0.517	-0.488
20	-0.650	-0.645	-0.626
30	-0.824	-0.791	-0.831
40	-0.978	-0.995	-0.926
50	-1.096	-1.097	-1.089
60	-1.229	-1.251	-1.319
90	-1.304	-1.433	-1.437
120	-1.384	-1.596	-1.571
150	-1.566	-1.721	-1.725
180	-1.671	-1.864	-1.843
210	-1.728	-2.031	-1.907
240	-1.789	-2.031	-1.976
270	-1.789	-2.126	-1.976
300	-1.854	-2.126	-2.050

ตาราง ข-22 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 90 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.74	83.86	101.04	0.000	0.000	0.000
10	95.95	84.04	101.25	0.219	0.215	0.208
20	96.02	84.09	101.35	0.292	0.274	0.307
30	96.08	84.17	101.40	0.355	0.370	0.356
40	96.11	84.20	101.44	0.386	0.405	0.396
50	96.15	84.26	101.49	0.428	0.477	0.445
60	96.21	84.31	101.55	0.491	0.537	0.505
90	96.25	84.33	101.57	0.533	0.560	0.525
120	96.28	84.35	101.59	0.564	0.584	0.544
150	96.31	84.36	101.60	0.595	0.596	0.554
180	96.31	84.37	101.62	0.595	0.608	0.574
210	96.33	84.38	101.64	0.616	0.620	0.594
240	96.34	84.38	101.65	0.627	0.620	0.604
270	96.35	84.39	101.66	0.637	0.632	0.614
300	96.35	84.40	101.67	0.637	0.644	0.624
1 วัน	96.41	84.45	101.73	0.700	0.704	0.683
2 วัน	96.47	84.49	101.81	0.762	0.751	0.762

ตาราง ข-23 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 90 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.610	-0.622	-0.590
20	-0.755	-0.740	-0.787
30	-0.898	-0.963	-0.902
40	-0.978	-1.062	-1.005
50	-1.096	-1.294	-1.150
60	-1.304	-1.539	-1.357
90	-1.471	-1.657	-1.437
120	-1.617	-1.790	-1.524
150	-1.789	-1.864	-1.571
180	-1.789	-1.944	-1.671
210	-1.923	-2.031	-1.782
240	-1.997	-2.031	-1.843
270	-2.077	-2.127	-1.907
300	-2.077	-2.232	-1.976

ตาราง ข-24 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ามันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 180 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.86	83.95	101.16	0.000	0.000	0.000
10	96.05	84.11	101.35	0.198	0.191	0.188
20	96.12	84.18	101.44	0.271	0.274	0.277
30	96.17	84.23	101.50	0.323	0.334	0.336
40	96.20	84.26	101.54	0.355	0.369	0.376
50	96.23	84.28	101.57	0.386	0.393	0.405
60	96.25	84.30	101.60	0.407	0.417	0.435
90	96.27	84.32	101.63	0.428	0.441	0.465
120	96.28	84.33	101.65	0.438	0.453	0.484
150	96.29	84.33	101.67	0.449	0.453	0.504
180	96.30	84.34	101.68	0.459	0.465	0.514
210	96.30	84.35	101.69	0.459	0.476	0.524
240	96.31	84.36	101.70	0.469	0.488	0.534
270	96.31	84.36	101.71	0.469	0.488	0.544
300	96.32	84.37	101.72	0.480	0.500	0.554
1 วัน	96.36	84.41	101.74	0.522	0.548	0.573
2 วัน	96.42	84.45	101.78	0.584	0.596	0.613

ตาราง ข-25 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 180 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-0.952	-0.904	-0.856
20	-1.162	-1.134	-1.090
30	-1.344	-1.339	-1.284
40	-1.472	-1.486	-1.439
50	-1.618	-1.597	-1.572
60	-1.730	-1.722	-1.726
90	-1.855	-1.865	-1.909
120	-1.924	-1.945	-2.052
150	-1.998	-1.945	-2.219
180	-2.078	-2.032	-2.314
210	-2.078	-2.128	-2.419
240	-2.165	-2.233	-2.537
270	-2.165	-2.233	-2.671
300	-2.260	-2.351	-2.825



ตาราง ข-26 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 30 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.76	83.85	101.05	0.000	0.000	0.000
10	95.94	84.06	101.23	0.188	0.250	0.178
20	96.02	84.16	101.31	0.272	0.370	0.257
30	96.08	84.18	101.36	0.334	0.394	0.307
40	96.09	84.19	101.36	0.345	0.405	0.307
50	96.09	84.20	101.39	0.345	0.417	0.336
60	96.10	84.21	101.40	0.355	0.429	0.346
90	96.13	84.22	101.42	0.386	0.441	0.366
120	96.13	84.22	101.43	0.386	0.441	0.376
150	96.13	84.23	101.44	0.386	0.453	0.386
180	96.13	84.23	101.45	0.386	0.453	0.396
210	96.13	84.23	101.45	0.386	0.453	0.396
240	96.13	84.24	101.45	0.386	0.465	0.396
270	96.13	84.24	101.45	0.386	0.465	0.396
300	96.13	84.24	101.46	0.386	0.465	0.406
1 วัน	96.15	84.27	101.49	0.407	0.501	0.435
2 วัน	96.17	84.29	101.50	0.428	0.525	0.445

ตาราง ข-27 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 30 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-1.426	-1.294	-1.320
20	-1.854	-1.864	-1.671
30	-2.365	-2.031	-1.977
40	-2.482	-2.126	-1.977
50	-2.482	-2.232	-2.218
60	-2.616	-2.350	-2.313
90	-3.176	-2.483	-2.536
120	-3.176	-2.483	-2.670
150	-3.176	-2.637	-2.824
180	-3.176	-2.637	-3.006
210	-3.176	-2.637	-3.006
240	-3.176	-2.820	-3.006
270	-3.176	-2.820	-3.006
300	-3.176	-2.820	-3.229

ตาราง ข-28 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 90 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.75	83.84	101.02	0.000	0.000	0.000
10	95.91	83.99	101.20	0.167	0.179	0.178
20	95.96	84.04	101.26	0.219	0.239	0.238
30	96.00	84.08	101.29	0.261	0.286	0.267
40	96.04	84.10	101.32	0.303	0.310	0.297
50	96.05	84.11	101.34	0.313	0.322	0.317
60	96.06	84.12	101.36	0.324	0.334	0.337
90	96.07	84.12	101.37	0.334	0.334	0.346
120	96.07	84.13	101.37	0.334	0.346	0.346
150	96.08	84.14	101.37	0.345	0.358	0.346
180	96.08	84.14	101.38	0.345	0.358	0.356
210	96.08	84.15	101.38	0.345	0.370	0.356
240	96.09	84.15	101.38	0.355	0.370	0.356
270	96.09	84.15	101.38	0.355	0.370	0.356
300	96.09	84.15	101.39	0.355	0.370	0.366
1 วัน	96.12	84.18	101.42	0.386	0.406	0.396
2 วัน	96.14	84.19	101.44	0.407	0.417	0.416

ตาราง ข-29 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที

เหง้ำมันล่ำปะหลังทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 90 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-1.426	-1.433	-1.437
20	-1.671	-1.721	-1.725
30	-1.923	-2.031	-1.907
40	-2.259	-2.232	-2.130
50	-2.365	-2.349	-2.313
60	-2.482	-2.483	-2.536
90	-2.616	-2.483	-2.669
120	-2.616	-2.637	-2.669
150	-2.770	-2.819	-2.669
180	-2.770	-2.819	-2.824
210	-2.770	-3.043	-2.824
240	-2.952	-3.043	-2.824
270	-2.952	-3.043	-2.824
300	-2.952	-3.043	-3.006

ตาราง ข-30 ตารางแสดงการบันทึกค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นฐานแห้งของเหง้ำมันสำปะหลัง  
ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิตั้ง 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

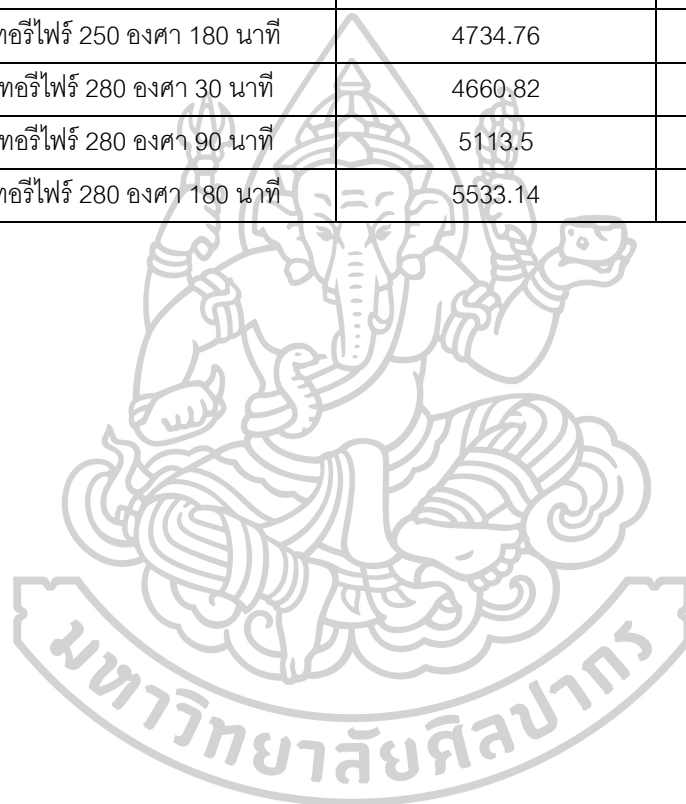
เหง้ำมันสำปะหลังทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 180 นาที						
เวลา (นาที)	น้ำหนัก(g)			ความชื้นฐานแห้ง		
	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 1	การทดลอง ที่ 2	การทดลอง ที่ 3
0	95.86	83.95	101.16	0.000	0.000	0.000
10	96.07	84.12	101.37	0.219	0.203	0.208
20	96.09	84.15	101.41	0.240	0.238	0.247
30	96.12	84.17	101.43	0.271	0.262	0.267
40	96.15	84.20	101.45	0.303	0.298	0.287
50	96.17	84.20	101.46	0.323	0.298	0.297
60	96.18	84.21	101.47	0.334	0.310	0.306
90	96.18	84.22	101.48	0.334	0.322	0.316
120	96.19	84.22	101.49	0.344	0.322	0.326
150	96.19	84.23	101.49	0.344	0.334	0.326
180	96.20	84.23	101.50	0.355	0.334	0.336
210	96.20	84.24	101.50	0.355	0.345	0.336
240	96.21	84.24	101.50	0.365	0.345	0.336
270	96.21	84.24	101.51	0.365	0.345	0.346
300	96.21	84.25	101.51	0.365	0.357	0.346
1 วัน	96.24	84.27	101.54	0.396	0.381	0.376
2 วัน	96.26	84.29	101.56	0.417	0.405	0.395

ตาราง ข-31 ตารางแสดงการบันทึกค่า  $y$  ของเหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

เหง้ามันสำปะหลังทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 180 นาที			
เวลา(นาที)	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
10	-1.618	-1.597	-1.672
20	-1.730	-1.791	-1.909
30	-1.924	-1.945	-2.052
40	-2.165	-2.233	-2.219
50	-2.366	-2.233	-2.314
60	-2.483	-2.351	-2.419
90	-2.483	-2.484	-2.537
120	-2.617	-2.484	-2.671
150	-2.617	-2.638	-2.671
180	-2.771	-2.638	-2.825
210	-2.771	-2.821	-2.825
240	-2.953	-2.821	-2.825
270	-2.953	-2.821	-3.007
300	-2.953	-3.044	-3.007

ตาราง ข-32 ตารางแสดงการบันทึกผลการหาค่าความร้อนของต้นกระถิน

ชนิดชีวมวล	ค่าความร้อนที่ได้ Cal/g	ค่าความร้อนที่ได้ Mj/kg
เห้งน้ำมันดิบ	4218.17	17.66147779
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 220 องศา 30 นาที	4263.2	17.8500184
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 220 องศา 90 นาที	4324.33	18.10596971
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 220 องศา 180 นาที	4330.55	18.13201285
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 250 องศา 30 นาที	4463.56	18.68892572
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 250 องศา 90 นาที	4530.18	18.96786366
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 250 องศา 180 นาที	4734.76	19.82444012
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 280 องศา 30 นาที	4660.82	19.51485334
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 280 องศา 90 นาที	5113.5	21.4102245
เห้งน้ำมัน ทอริไฟร์ 280 องศา 180 นาที	5533.14	23.16725718



ภาคผนวก ค





ตาราง ค-1 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียด

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	1.75	1.74	1.75
53	1.0	1.0	0.98
75	1.50	1.2	1.37
106	1.30	1.4	1.44
150	1.0	1.0	1.1
212	0.80	0.78	0.82
300	0.65	0.63	0.59
425	0.55	0.57	0.57
600	0.51	0.52	0.55
850	0.47	0.50	0.40
1700	0.40	0.48	0.39
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.93	น้ำหนักรวม (Mt) 9.82	น้ำหนักรวม (Mt) 9.96

ตาราง ค-2 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.9	2.8	2.81
53	0.87	0.88	0.88
75	1.21	1.22	1.27
106	1.15	1.00	1.04
150	1.04	1.06	1.1
212	0.69	0.65	0.72
300	0.72	0.71	0.69
425	0.67	0.68	0.67
600	0.51	0.52	0.55
850	0.21	0.20	0.20
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.97	น้ำหนักรวม (Mt) 9.72	น้ำหนักรวม (Mt) 9.93

ตาราง ค-3 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.7	2.74	2.78
53	0.90	0.88	0.90
75	1.37	1.32	1.38
106	1.17	1.20	1.18
150	1.02	1.06	1.00
212	0.65	0.65	0.68
300	0.61	0.62	0.64
425	0.60	0.58	0.64
600	0.49	0.50	0.55
850	0.03	0.02	0.04
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.81	น้ำหนักรวม (Mt) 9.57	น้ำหนักรวม (Mt) 9.79

ตาราง ค-4 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.5	2.49	2.52
53	0.87	0.86	0.87
75	1.26	1.27	1.20
106	1.15	1.14	1.11
150	1.06	1.06	1.05
212	0.71	0.73	0.71
300	0.79	0.80	0.81
425	0.73	0.71	0.70
600	0.56	0.55	0.58
850	0.33	0.35	0.31
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.96	น้ำหนักรวม (Mt) 9.96	น้ำหนักรวม (Mt) 9.86

ตาราง ค-5 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	1.87	1.85	1.88
53	0.80	0.83	0.87
75	1.35	1.33	1.20
106	1.30	1.29	1.32
150	1.10	1.06	1.05
212	0.75	0.73	0.71
300	0.55	0.59	0.63
425	0.59	0.56	0.60
600	0.62	0.61	0.58
850	0.65	0.64	0.59
1700	0.30	0.34	0.33
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.88	น้ำหนักรวม (Mt) 9.83	น้ำหนักรวม (Mt) 9.76

ตาราง ค-6 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.51	2.55	2.53
53	0.94	0.90	0.89
75	1.47	1.42	1.44
106	1.39	1.40	1.42
150	1.27	1.25	1.27
212	0.86	0.88	0.89
300	0.73	0.69	0.70
425	0.39	0.44	0.47
600	0.21	0.23	0.20
850	0.08	0.09	0.08
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.85	น้ำหนักรวม (Mt) 9.85	น้ำหนักรวม (Mt) 9.89

ตาราง ค-7 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.33	2.36	2.37
53	0.83	0.81	0.86
75	1.29	1.27	1.30
106	1.24	1.27	1.28
150	1.24	1.20	1.27
212	0.92	0.94	0.89
300	0.71	0.73	0.75
425	0.51	0.52	0.49
600	0.40	0.41	0.44
850	0.22	0.23	0.20
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.69	น้ำหนักรวม (Mt) 9.74	น้ำหนักรวม (Mt) 9.85

ตาราง ค-8 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.21	2.36	2.27
53	0.84	0.81	0.84
75	1.31	1.29	1.30
106	1.43	1.45	1.47
150	1.26	1.23	1.27
212	0.87	0.93	0.89
300	0.63	0.75	0.77
425	0.47	0.52	0.49
600	0.31	0.41	0.44
850	0.17	0.23	0.20
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.5	น้ำหนักรวม (Mt) 9.98	น้ำหนักรวม (Mt) 9.94



ตาราง ค-9 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์ที่  
อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.03	2.06	2.05
53	0.93	0.90	0.91
75	1.50	1.47	1.46
106	1.56	1.55	1.53
150	1.30	1.28	1.27
212	0.93	0.95	0.90
300	0.60	0.64	0.69
425	0.45	0.48	0.49
600	0.25	0.24	0.30
850	0.19	0.20	0.20
1700	0.06	0.05	0.06
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.8	น้ำหนักรวม (Mt) 9.82	น้ำหนักรวม (Mt) 9.86

ตาราง ค-10 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบัดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์  
ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	3.09	3.07	3.05
53	1.13	1.11	1.09
75	1.57	1.55	1.54
106	1.53	1.55	1.53
150	1.11	1.18	1.20
212	0.62	0.64	0.63
300	0.47	0.50	0.51
425	0.23	0.22	0.20
600	0.08	0.07	0.06
850	0.01	0.03	0.01
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.84	น้ำหนักรวม (Mt) 9.92	น้ำหนักรวม (Mt) 9.82

ตาราง ค-11 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบัดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์  
ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.83	2.84	2.87
53	1.10	1.11	1.07
75	1.58	1.55	1.54
106	1.47	1.48	1.45
150	1.19	1.18	1.20
212	0.78	0.77	0.72
300	0.51	0.50	0.51
425	0.30	0.27	0.26
600	0.14	0.17	0.15
850	0.05	0.03	0.02
1700	0.02	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.97	น้ำหนักรวม (Mt) 9.9	น้ำหนักรวม (Mt) 9.79

ตาราง ค-12 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบัดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์  
ที่อุณหภูมิตั้ง 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.72	2.74	2.71
53	1.09	1.11	1.13
75	1.62	1.60	1.63
106	1.47	1.48	1.45
150	1.22	1.18	1.21
212	0.80	0.81	0.80
300	0.54	0.50	0.52
425	0.32	0.27	0.26
600	0.12	0.17	0.15
850	0.03	0.05	0.02
1700	0.	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.93	น้ำหนักรวม (Mt) 9.91	น้ำหนักรวม (Mt) 9.88

ตาราง ค-13 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบัดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์  
ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 1	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 2	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi) ครั้งที่ 3
0	2.66	2.64	2.61
53	1.06	1.11	1.13
75	1.69	1.63	1.63
106	1.50	1.48	1.47
150	1.18	1.17	1.21
212	0.81	0.81	0.80
300	0.56	0.54	0.51
425	0.28	0.27	0.26
600	0.11	0.18	0.15
850	0.08	0.05	0.04
1700	0.02	0.04	0.05
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.95	น้ำหนักรวม (Mt) 9.92	น้ำหนักรวม (Mt) 9.86

ตาราง ค-14 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบัดของฟางข้าวสับละเอียดทรีไฟร์  
ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)
0	2.71	2.55	2.64
53	1.03	1.02	0.98
75	1.56	1.58	1.64
106	1.43	1.49	1.38
150	1.21	1.24	1.15
212	0.84	0.86	0.91
300	0.61	0.58	0.48
425	0.33	0.41	0.47
600	0.11	0.19	0.12
850	0.01	0.06	0.04
1700	0	0	0
3350	0	0	0
	น้ำหนักรวม (Mt) 9.84	น้ำหนักรวม (Mt) 9.98	น้ำหนักรวม (Mt) 9.81

ตาราง ค-15 ตารางบันทึกค่าการทดสอบความสามารถในการบดของฟางข้าวสับละเอียดทอรีไฟร์  
ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที

ขนาดตะแกรง (ไมโครเมตร)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)	น้ำหนักของชีวมวล (กรัม) (Mi)			
0	3.41	3.38				
53	1.13	1.05	0.98			
75	1.61	1.54	1.64			
106	1.35	1.44	1.38			
150	1.01	0.99	1.15			
212	0.54	0.66	0.91			
300	0.41	0.42	0.48			
425	0.20	0.22	0.47			
600	0.03	0.04	0.12			
850	0	0.01	0.04			
1700	0	0	0			
3350	0	0	0			
	น้ำหนักรวม (Mt)	9.69	น้ำหนักรวม (Mt)	9.75	น้ำหนักรวม (Mt)	9.81

ตาราง ค-16 ตารางแสดงค่าความสามารถในการบดของฟางข้าวละเอียดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆโดยเปรียบเทียบจากค่า HGI ของถ่านหิน 4 ค่าคือ 24, 36, 49 และ 67

ประเภท	เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ถูก ร่อนผ่าน ตะแกรงขนาด 75 ไมครอน (กรัม)	น้ำหนัก รวม (กรัม)	มวล (เปอร์เซ็นต์)	HGI
ฟางข้าวดิบไม่ ผ่านกระบวนการ ทอรีไฟร์	0	1.24	9.82	12.63	0.00
ฟางข้าวผ่าน กระบวนการทอรี ไฟร์ 220 องศา เซลเซียส	30	2.67	9.88	27.02	18.62
	90	2.96	9.80	30.20	22.48
	180	3.16	9.69	32.61	25.14
ฟางข้าวผ่าน กระบวนการทอรี ไฟร์ 250 องศา เซลเซียส	30	3.60	9.81	36.70	30.99
	90	3.72	9.91	37.54	32.59
	180	3.74	9.84	38.01	32.85
ฟางข้าวผ่าน กระบวนการทอรี ไฟร์ 280 องศา เซลเซียส	30	3.89	9.92	39.21	34.85
	90	3.93	9.97	39.42	35.38
	180	4.54	9.69	46.85	43.49



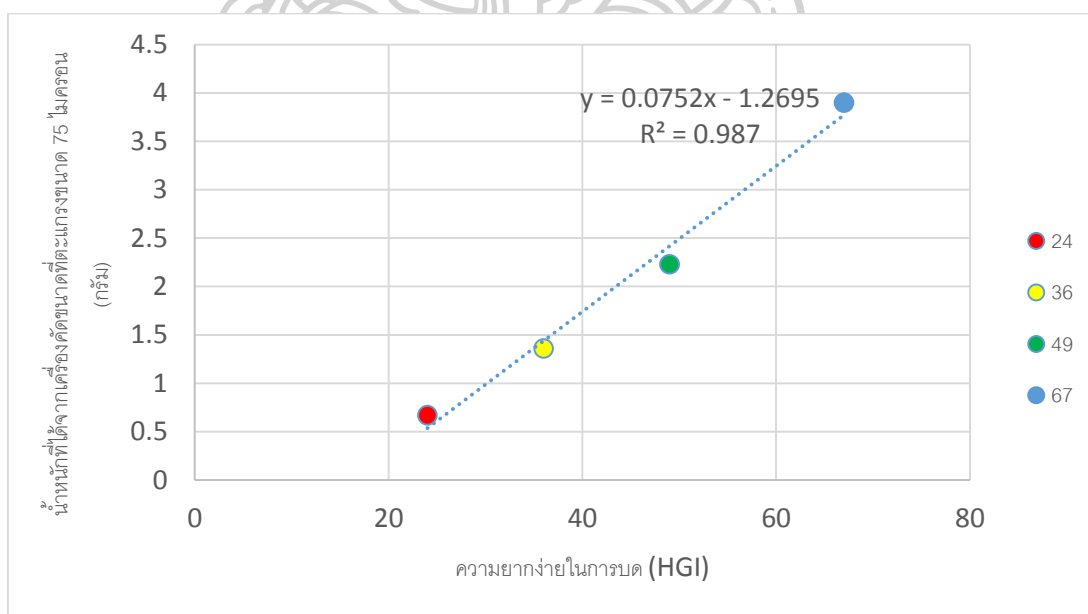
สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า HGI

$$M_H = m(\text{HGI}) + b$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\text{HGI}_{\text{equiv}} = \frac{Mh - b}{m}$$

เมื่อ	m	คือ ความชันที่ได้จากกราฟเท่ากับ 0.0752 (ซึ่งหาได้จากการบดถ่านหินตัวอย่างที่
จะ		ค่า HGI)
	b	คือ จุดตัดที่ได้จากกราฟเท่ากับ 1.2695 (ซึ่งหาได้จากการบดถ่านหินตัวอย่างที่รู้
		ค่า HGI)
	$\text{HGI}_{\text{equiv}}$	คือ ค่าความสามารถในการบดง่ายของถ่านหิน
	$M_H$	คือ น้ำหนักที่ถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน



ภาพ ข-10 น้ำหนักที่ผ่านการร่อนผ่านเครื่องร่อนของถ่านหินที่มีค่า HGI 24, 36 และ 67

ตาราง ค-17 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์ฟางข้าว

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	89.56	90.24	88.61
20	89.61	90.26	88.63
30	89.63	90.32	88.67
40	89.63	90.32	88.67
50	89.64	90.35	88.70
60	89.65	90.37	88.71
90	89.65	90.40	88.71
120	89.65	90.41	88.73
150	89.68	90.41	88.74
180	89.70	90.41	88.75
210	89.71	90.44	88.78
240	89.72	90.45	88.79
270	89.72	90.45	88.79
300	89.75	90.48	88.80
1 วัน	89.76	90.49	88.81
2 วัน	89.78	90.50	88.82

ตาราง ค-18 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าว

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.40353131	-1.244154594	-1.43960942
20	-1.66136042	-1.324197302	-1.53969288
30	-1.78652356	-1.611879374	-1.77608166
40	-1.78652356	-1.611879374	-1.77608166
50	-1.85551644	-1.794200931	-1.99922521
60	-1.92962441	-1.937301775	-2.08623658
90	-1.92962441	-2.199666039	-2.08623658
120	-1.92962441	-2.305026555	-2.28690728
150	-2.19198867	-2.305026555	-2.40469032
180	-2.41513222	-2.305026555	-2.53822171
210	-2.54866362	-2.710491663	-3.0978375
240	-2.7028143	-2.89281322	-3.38551957
270	-2.7028143	-2.89281322	-3.38551957
300	-3.39596148	-3.809103951	-3.79098468

ตาราง ค-19 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอร์ไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 30 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	91.79	79.92	97.10
20	91.84	79.97	97.16
30	91.89	80.00	97.19
40	91.90	80.03	97.23
50	91.91	80.06	97.25
60	91.92	80.10	97.27
90	91.95	80.14	97.34
120	91.96	80.16	97.39
150	91.97	80.19	97.44
180	91.99	80.20	97.51
210	92.05	80.24	97.55
240	92.11	80.25	97.59
270	92.17	80.31	97.63
300	92.20	80.36	97.67
1 วัน	92.24	80.39	97.71
2 วัน	92.29	80.43	97.74

ตาราง ค-20 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 30 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.60693548	-0.448324242	-0.41613713
20	-0.712296	-0.551508478	-0.5145772
30	-0.83007904	-0.618949759	-0.56768702
40	-0.85539684	-0.691270421	-0.64319458
50	-0.88137233	-0.769231962	-0.68319991
60	-0.90804058	-0.883642313	-0.72487261
90	-0.99259796	-1.012854045	-0.88614075
120	-1.02245093	-1.084313009	-1.01967215
150	-1.05322259	-1.202096044	-1.17382283
180	-1.11776111	-1.244655659	-1.43952599
210	-1.34090466	-1.435710895	-1.63058123
240	-1.62858673	-1.489778117	-1.86697001
270	-2.03405184	-1.895243225	-2.17712494
300	-2.32173391	-2.434239726	-2.62911006

ตาราง ค-21 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 90 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	89.55	90.23	83.69
20	89.61	90.28	83.75
30	89.64	90.31	83.79
40	89.69	90.35	83.80
50	89.73	90.39	83.84
60	89.77	90.44	83.85
90	89.79	90.46	83.85
120	89.82	90.48	83.86
150	89.83	90.51	83.86
180	89.85	90.54	83.86
210	89.88	90.57	83.86
240	89.90	90.58	83.86
270	89.92	90.62	83.86
300	89.94	90.63	83.86
1 วัน	89.95	90.65	83.90
2 วัน	89.98	90.71	83.91

ตาราง ค-22 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 90 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-0.73270326	-0.630495767	-1.33607704
20	-0.88298546	-0.740496662	-1.65453077
30	-0.96754285	-0.812817323	-1.94221285
40	-1.12660754	-0.918177839	-2.02922422
50	-1.27502755	-1.035960875	-2.48120935
60	-1.44938094	-1.205859912	-2.63536003
90	-1.54946439	-1.282820953	-2.63536003
120	-1.72131465	-1.366202562	-2.81768158
150	-1.78585317	-1.505964504	-2.81768158
180	-1.92895402	-1.668483433	-2.81768158
210	-2.19131828	-1.862639448	-2.81768158
240	-2.41446183	-1.93674742	-2.81768158
270	-2.7021439	-2.3044722	-2.81768158
300	-3.10760901	-2.422255236	-2.81768158

ตาราง ค-23 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอรีไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 180 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	91.95	80.09	97.19
20	91.99	80.15	97.22
30	92.04	80.21	97.27
40	92.07	80.24	97.31
50	92.11	80.27	97.35
60	92.13	80.28	97.37
90	92.16	80.33	97.40
120	92.17	80.38	97.42
150	92.23	80.40	97.46
180	92.25	80.44	97.50
210	92.29	80.47	97.53
240	92.30	80.51	97.57
270	92.34	80.54	97.62
300	92.39	80.55	97.63
1 วัน	92.42	80.59	97.65
2 วัน	92.46	81.06	97.68



ตาราง ค-24 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 220 องศาเซลเซียส 180 นาที

เวลา	$\ln(M-Me)1$	$\ln(M-Me)2$	$\ln(M-Me)3$
10	-0.589093	0.191809726	-0.68422999
20	-0.67077103	0.127958254	-0.74740889
30	-0.78324902	0.059750004	-0.86247822
40	-0.85735699	0.023817995	-0.96513237
50	-0.96557057	-0.0134534	-1.07954273
60	-1.02441107	-0.026192425	-1.14206308
90	-1.11972125	-0.092441811	-1.24384578
120	-1.1536228	-0.163393547	-1.31795375
150	-1.38542442	-0.19324651	-1.48500783
180	-1.4763962	-0.255766867	-1.68567853
210	-1.68770529	-0.305363808	-1.86800009
240	-1.74832991	-0.375568067	-2.17815501
270	-2.03601198	-0.431657534	-2.78429082
300	-2.57500848	-0.451075619	-2.96661237

ตาราง ค-25 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์ฟางข้าวเทอร์รี่ 250  
องศาเซลเซียส 30 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	91.85	79.92	97.13
20	91.88	79.95	97.14
30	91.94	79.99	97.15
40	91.96	80.03	97.15
50	92.01	80.05	97.16
60	92.03	80.10	97.16
90	92.07	80.12	97.16
120	92.10	80.15	97.16
150	92.12	80.16	97.17
180	92.15	80.19	97.17
210	92.17	80.22	97.17
240	92.21	80.25	97.17
270	92.25	80.28	97.17
300	92.29	80.31	97.17
1 วัน	92.33	80.32	97.20
2 วัน	92.36	80.37	97.21

ตาราง ค-26 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 30 นาที

เวลา	$\ln(M-Me)_1$	$\ln(M-Me)_2$	$\ln(M-Me)_3$
10	-0.58713286	-0.573612612	-2.49557867
20	-0.64775748	-0.642605483	-2.62911006
30	-0.78128887	-0.742688942	-2.78326074
40	-0.83007904	-0.853914577	-2.78326074
50	-0.96361043	-0.914539199	-2.9655823
60	-1.02245093	-1.084438236	-2.9655823
90	-1.15166266	-1.161399277	-2.9655823
120	-1.26086195	-1.289232648	-2.9655823
150	-1.34090466	-1.335752664	-3.18872585
180	-1.47443605	-1.489903344	-3.18872585
210	-1.57451951	-1.672224901	-3.18872585
240	-1.81090829	-1.895368452	-3.18872585
270	-2.12106322	-2.183050524	-3.18872585
300	-2.57304834	-2.588515632	-3.18872585

ตาราง ค-27 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์ฟางข้าวเทอริไฟร์ 250  
องศาเซลเซียส 90 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	97.10	87.36	91.78
20	97.11	87.38	91.80
30	97.12	87.41	91.81
40	97.14	87.42	91.82
50	97.15	87.43	91.85
60	97.15	87.43	91.85
90	97.15	87.44	91.85
120	97.15	87.44	91.85
150	97.17	87.44	91.85
180	97.17	87.47	91.87
210	97.18	87.48	91.87
240	97.19	87.50	91.88
270	97.20	87.51	91.90
300	97.25	87.52	91.91
1 วัน	97.26	87.53	91.92
2 วัน	97.28	87.55	91.95

ตาราง ค-28 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 90 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.68485455	-1.525369569	-1.68574515
20	-1.74201297	-1.636595204	-1.81090829
30	-1.80263759	-1.830751218	-1.87990116
40	-1.93616898	-1.904859191	-1.95400913
50	-2.01027695	-1.984901898	-2.2163734
60	-2.01027695	-1.984901898	-2.2163734
90	-2.01027695	-2.071913275	-2.2163734
120	-2.01027695	-2.071913275	-2.2163734
150	-2.17733104	-2.071913275	-2.2163734
180	-2.17733104	-2.390367006	-2.43951695
210	-2.27264122	-2.523898399	-2.43951695
240	-2.37800173	-2.860370636	-2.57304834
270	-2.49578477	-3.083514187	-2.90952058
300	-3.47661402	-3.371196259	-3.13266413

ตาราง ค-29 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 250  
องศาเซลเซียส 180 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	79.92	97.07	90.66
20	79.94	97.09	90.70
30	79.95	97.10	90.71
40	79.96	97.11	90.71
50	79.97	97.12	90.71
60	79.98	97.12	90.71
90	80.00	97.12	90.71
120	80.01	97.13	90.71
150	80.01	97.13	90.72
180	80.01	97.14	90.72
210	80.02	97.15	90.72
240	80.03	97.15	90.72
270	80.03	97.16	90.72
300	80.03	97.16	90.73
1 วัน	80.05	97.17	90.74
2 วัน	80.07	97.19	90.74

ตาราง ค-30 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทรารีไฟร์ 250 องศาเซลเซียส 180 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.6728508	-2.09031966	-2.42745408
20	-1.81595164	-2.272641217	-3.12060126
30	-1.89599435	-2.378001732	-3.40828333
40	-1.98300573	-2.495784768	-3.40828333
50	-2.07831591	-2.629316161	-3.40828333
60	-2.18367642	-2.629316161	-3.40828333
90	-2.43499085	-2.629316161	-3.40828333
120	-2.58914153	-2.78346684	-3.40828333
150	-2.58914153	-2.78346684	-3.81374844
180	-2.58914153	-2.965788397	-3.81374844
210	-2.77146309	-3.188931948	-3.81374844
240	-2.99460664	-3.188931948	-3.81374844
270	-2.99460664	-3.476614021	-3.81374844
300	-2.99460664	-3.476614021	-4.50689562

ตาราง ค-31 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของซีเมนต์ฟางข้าวเทอร์ไฟร์ 280  
องศาเซลเซียส 30 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	90.75	89.68	97.15
20	90.76	89.69	97.16
30	90.78	89.70	97.17
40	90.79	89.71	97.18
50	90.80	89.71	97.18
60	90.80	89.72	97.19
90	90.81	89.73	97.20
120	90.82	89.74	97.21
150	90.83	89.74	97.21
180	90.84	89.74	97.21
210	90.84	89.77	97.24
240	90.86	89.78	97.24
270	90.87	89.90	97.25
300	90.88	89.90	97.27
1 วัน	90.88	89.90	97.27
2 วัน	90.91	89.93	98.30



ตาราง ค-32 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 30 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-1.73430689	-1.276256256	0.169705819
20	-1.79884542	-1.31707825	0.160972139
30	-1.94194626	-1.359637865	0.152161509
40	-2.02198897	-1.404089627	0.143272562
50	-2.10900034	-1.404089627	0.143272562
60	-2.10900034	-1.450609643	0.134303892
90	-2.20431052	-1.499399807	0.125254056
120	-2.30967104	-1.550693102	0.116121573
150	-2.42745408	-1.550693102	0.116121573
180	-2.56098547	-1.550693102	0.116121573
210	-2.56098547	-1.722543359	0.088212784
240	-2.8974577	-1.78708188	0.088212784
270	-3.12060126	-3.396519792	0.078734041
300	-3.40828333	-3.396519792	0.059502679

ตาราง ค-33 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 90 นาที

เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	90.69	89.65	97.11
20	90.70	89.66	97.12
30	90.71	89.68	97.13
40	90.72	89.69	97.16
50	90.72	89.70	97.16
60	90.73	89.70	97.17
90	90.73	89.70	97.18
120	90.73	89.71	97.19
150	90.73	89.71	97.19
180	90.73	89.71	97.20
210	90.73	89.71	97.21
240	90.74	89.71	97.21
270	90.74	89.71	97.22
300	90.74	89.72	97.23
1 วัน	90.74	89.73	97.25
2 วัน	90.78	89.75	97.27

ตาราง ค-34 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 90 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-2.30956071	-2.192658614	-1.80263759
20	-2.42734374	-2.298019129	-1.86717611
30	-2.56087514	-2.549333558	-1.93616898
40	-2.71502581	-2.703484237	-2.17733104
50	-2.71502581	-2.885805794	-2.17733104
60	-2.89734737	-2.885805794	-2.27264122
90	-2.89734737	-2.885805794	-2.37800173
120	-2.89734737	-3.108949345	-2.49578477
150	-2.89734737	-3.108949345	-2.49578477
180	-2.89734737	-3.108949345	-2.62931616
210	-2.89734737	-3.108949345	-2.78346684
240	-3.12049092	-3.108949345	-2.78346684
270	-3.12049092	-3.108949345	-2.9657884
300	-3.12049092	-3.396631418	-3.18893195

ตาราง ค-35 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทอริไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 180 นาที

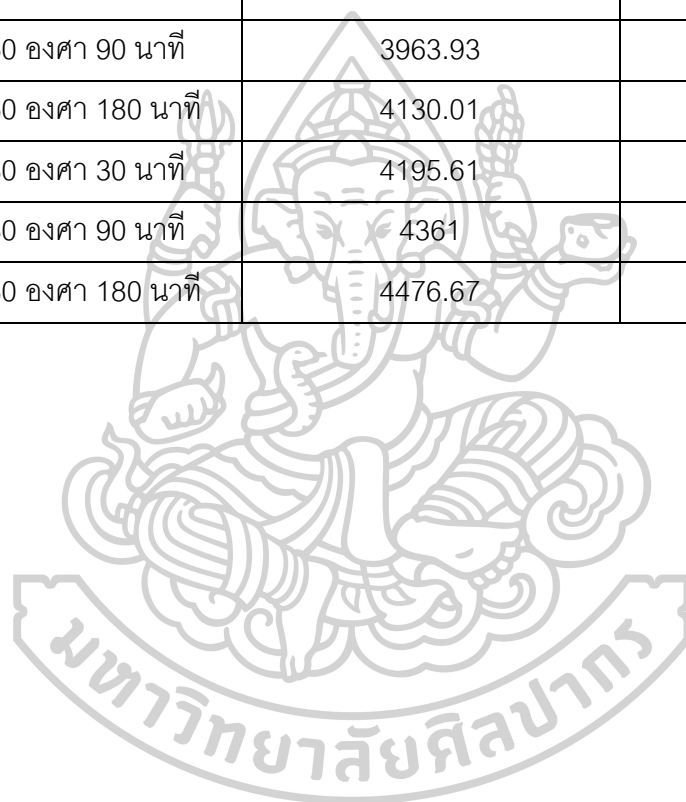
เวลา(นาที)	น้ำหนัก(กรัม)7	น้ำหนัก(กรัม)8	น้ำหนัก(กรัม)9
10	90.26	89.16	88.65
20	90.26	89.17	88.69
30	90.26	89.19	88.70
40	90.26	89.20	88.71
50	90.27	89.20	88.71
60	90.27	89.21	88.71
90	90.27	89.21	88.72
120	90.27	89.21	88.72
150	90.28	89.22	88.72
180	90.28	89.23	88.72
210	90.28	89.24	88.73
240	90.29	89.24	88.73
270	90.31	89.25	88.74
300	90.32	89.25	88.75
1 วัน	90.33	89.25	88.77
2 วัน	90.37	89.30	88.79

ตาราง ค-36 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความไม่ชอบน้ำของชีวมวลฟางข้าวเทรารีไฟร์ 280 องศาเซลเซียส 180 นาที

เวลา	ln(M-Me)1	ln(M-Me)2	ln(M-Me)3
10	-2.10457751	-1.851150838	-1.84552589
20	-2.10457751	-1.92525881	-2.18199813
30	-2.10457751	-2.092312895	-2.28735865
40	-2.10457751	-2.187623075	-2.40514168
50	-2.19988769	-2.187623075	-2.40514168
60	-2.19988769	-2.29298359	-2.40514168
90	-2.19988769	-2.29298359	-2.53867307
120	-2.19988769	-2.29298359	-2.53867307
150	-2.30524821	-2.410766626	-2.53867307
180	-2.30524821	-2.544298018	-2.53867307
210	-2.30524821	-2.698448698	-2.69282375
240	-2.42303125	-2.698448698	-2.69282375
270	-2.71071332	-2.880770255	-2.87514531
300	-2.89303488	-2.880770255	-3.09828886

ตาราง ค-37 ค่าพลังงานความร้อนของชีวมวลฟางข้าว

ชนิดชีวมวล	ค่าความร้อนที่ได้ Cal/g	ค่าความร้อนที่ได้ Mj/kg
ฟางดิบ	3528.48	14.77
ฟางทอรีไฟร์ 220 องศา 30 นาที	3750.7	15.70
ฟางทอรีไฟร์ 220 องศา 90 นาที	3775.17	15.81
ฟางทอรีไฟร์ 220 องศา 180 นาที	3799.12	15.91
ฟางทอรีไฟร์ 250 องศา 30 นาที	3896.69	16.32
ฟางทอรีไฟร์ 250 องศา 90 นาที	3963.93	16.60
ฟางทอรีไฟร์ 250 องศา 180 นาที	4130.01	17.29
ฟางทอรีไฟร์ 280 องศา 30 นาที	4195.61	17.57
ฟางทอรีไฟร์ 280 องศา 90 นาที	4361	18.26
ฟางทอรีไฟร์ 280 องศา 180 นาที	4476.67	18.74



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสุวัฒน์ เณรโต
วัน เดือน ปี เกิด	3 พฤษภาคม 2502
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	102/55 ถ.กรุงเกษม แขวงบางขุนพรหม เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร

