

การหาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

*Mimosa pigra* L. เพื่อการผลิตกรดลิวูลินิก



นายชัยทัศน์ บุญจันทร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

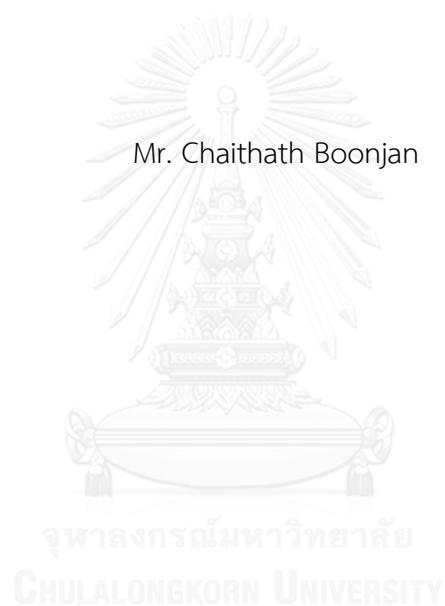
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMIZATION FOR PRETREATMENT OF WOOD FROM GIANT SENSITIVE PLANT

*Mimosa pigra* L. FOR LEVULINIC ACID PRODUCTION

Mr. Chaithath Boonjan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Biotechnology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ <i>Mimosa pigra</i> L. เพื่อการผลิตกรดลิวูลินิก
โดย	นายชัยทัศน์ บุญจันทร์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.हरรรษา ปุณณะพยัคฆ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ สีลานันท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.हरรรษา ปุณณะพยัคฆ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพร เปรมจิต)

ชัยทัศน์ บุญจันทร์ : การหาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ *Mimosa pigra* L. เพื่อการผลิตกรดลิวูลินิก (OPTIMIZATION FOR PRETREATMENT OF WOOD FROM GIANT SENSITIVE PLANT *Mimosa pigra* L. FOR LEVULINIC ACID PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.हरรรษา ปุณณะพยัคฆ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.สีหนาท ประสงค์สุข, อ. ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต, 96 หน้า.

กรดลิวูลินิก เป็นสารเคมีคาร์บอน 5 อะตอม โมเลกุลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดคาร์บอกซิลิกและหมู่คีโตน ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตสารเพิ่มมูลค่า กรดลิวูลินิกสามารถผลิตได้จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส โดยอาศัยกระบวนการปรับสภาพและปฏิกิริยาทางเคมี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ซึ่งเป็นพืชที่ประกอบด้วยเซลลูโลสในปริมาณสูง สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกรดลิวูลินิกได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อตรวจสอบผลของการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์และผลิตกรดลิวูลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ เมื่อนำเนื้อไม้ไมยราบยักษ์มาปรับสภาพด้วยวิธีทั้ง 3 วิธี พบว่า (1) ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี คือ การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งสามารถเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเนื้อไม้สูงถึง 65.37 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก), (2) ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ด้วยวิธีทางชีวภาพ คือ การปรับสภาพด้วยการใช้เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 อัตราส่วน 6 มิลลิกรัมเชื้อราต่อ 1 กรัมเนื้อไม้ เป็นเวลา 30 วัน ซึ่งสามารถเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเนื้อไม้สูงถึง 53.83 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก), และ (3) ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี คือ การปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมของวิธีทางชีวภาพ และตามด้วยภาวะที่เหมาะสมของวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี ซึ่งสามารถเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเนื้อไม้สูงถึง 70.15 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) นำเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมของแต่ละวิธีมาผลิตกรดลิวูลินิกผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์โมไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 ผลการทดลองพบว่า ผลผลิตกรดลิวูลินิกสูงสุด คือ 5.68 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) (เนื้อไม้ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี) เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5

สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5571952023 : MAJOR BIOTECHNOLOGY

KEYWORDS: LEVULINIC ACID / GIANT SENSITIVE PLANT / CELLULOSE / PRETREATMENT

CHAITHATH BOONJAN: OPTIMIZATION FOR PRETREATMENT OF WOOD FROM GIANT SENSITIVE PLANT *Mimosa pigra* L. FOR LEVULINIC ACID PRODUCTION. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR.HUNSA PUNNAPAYAK, CO-ADVISOR: ASST. PROF. DR.SEHANAT PRASONGSUK, DR.DUANGAMOL TUNGASMITA, 96 pp.

Levulinic acid is a C5-chemical with a ketone and a carboxylic group which can be used to produce value-added product. It can be produced from lignocellulose by using pretreatment process and chemical reaction. Giant sensitive plant (*Mimosa pigra* L.), a woody tropical weed containing high cellulose content which can be utilized as a substrate for levulinic acid production, was used in this research. The aims of this study are to investigate the feasibility of the pretreatment of wood from giant sensitive plant and to produce levulinic acid from pretreated wood. The wood was pretreated with 3 pretreatment methods and it was found that (1) the optimum condition for the thermo-chemical pretreatment was pretreatment with microwave-assisted NaOH at 10 % w/v, for 10 min, which could increase the cellulose content of wood up to 65.37 % (w/w), (2) the optimum condition for the biological pretreatment was pretreatment with *Phanerochaete sordida* SK7 at ration 6:1 mg culture/g wood , for 30 days, which could increase the cellulose content of wood up to 53.83 % (w/w), and (3) the optimum condition for the biological pretreatment combined with thermo-chemical pretreatment was pretreatment with the optimum condition of biological pretreatment and followed by the optimum condition of thermo-chemical pretreatment, which could increase the cellulose content of wood up to 70.15 % (w/w). The pretreated wood from each method under optimum condition was used to produce levulinic acid via hydrothermolysis process using ZSM-5 and Al-SBA-15 as catalysts. The highest levulinic acid yields was 5.68 % (w/w) (pretreated wood with biological pretreatment combined with thermo-chemical pretreatment) using ZSM-5 as the catalyst.

Field of Study: Biotechnology

Academic Year: 2015

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
2.1 กรดสีวูลินิก.....	4
2.1.1 การแปรรูปกรดสีวูลินิกเป็นสารเคมีเพิ่มมูลค่า.....	5
2.1.2 การใช้กรดสีวูลินิกในอุตสาหกรรม.....	7
2.1.3 การสังเคราะห์กรดสีวูลินิก.....	9
2.2 ลิกโนเซลลูโลส.....	12
2.2.1 เซลลูโลส.....	12
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส.....	13
2.2.3 ลิกนิน.....	13
2.3 ไมยราพยักษ์.....	14
2.3.1 การจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์.....	15

2.3.3 การควบคุมการระบาดของไมยราบยักษ์ .....	16
2.4 แนวคิดการใช้ประโยชน์จากลิกโนเซลลูโลส .....	17
2.5 การปรับสภาพ.....	19
2.5.1 การปรับสภาพทางกายภาพ .....	20
2.5.2 การปรับสภาพทางเคมี .....	20
2.5.3 การปรับสภาพทางเคมีกายภาพ .....	21
2.5.4 การปรับสภาพทางชีวภาพ.....	22
2.6 ไฮโดรเทอร์โมไลซิส .....	23
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี.....	25
2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	27
2.8.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	27
2.8.2 การวิเคราะห์การดูดซับและการปล่อยของแก๊สไนโตรเจน .....	28
2.8.3 การวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ .....	30
2.8.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนธาตุ Si/Al ด้วยเทคนิค inductively coupled plasma-mass spectrometry .....	31
2.9 การวิเคราะห์ปริมาณของผลผลิตกรดลิวลินิก.....	32
2.9.1 เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ชนิดตัวตรวจวัดเฟรมไอออไนเซชัน.....	32
2.9.2 เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	32
บทที่ 3.....	33
3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	33
3.2. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.3 วิธีการดำเนินงาน .....	35
3.3.1. เก็บตัวอย่างเนื้อไม้มายราบยักษ์ .....	35



3.3.2. ภาววะที่เหมะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	35
3.3.2.1 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี.....	35
3.3.2.2 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	36
3.3.2.3 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี ....	37
3.3.3 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ใช้ผลิตกรดลิวูลินิก.....	38
3.3.3.1 สังเคราะห์ pure silica SBA-15.....	38
3.3.3.2 สังเคราะห์ Al-SBA-15 จาก pure silica SBA-15 .....	38
3.3.3.3 ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี .....	38
3.3.4. ผลิตและหาปริมาณกรดลิวูลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ ไมยราบยักษ์.....	39
3.3.4.1 ผลิตกรดลิวูลินิก.....	39
3.3.4.2 หาปริมาณกรดลิวูลินิก .....	40
บทที่ 4 .....	42
4.1. องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ .....	42
4.2. ภาววะที่เหมะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ .....	42
4.2.1. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี.....	42
4.2.1.1 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ร่วมกับสารเคมี .....	42
4.2.1.2 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจาก เครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี.....	43
4.2.1.3 การเปรียบเทียบภาววะที่เหมะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ด้วยภาววะที่เหมะสมจากการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี และการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ สารเคมี.....	43

4.2.2. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ .....	49
4.2.3. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี.....	50
4.2.4 การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธีการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี).....	54
4.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ใช้ผลิตกรดลิวูลินิก.....	57
4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	57
4.3.2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซไนโตรเจน .....	57
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งของ Al ใน SBA-15.....	58
4.3.4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนธาตุซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) .....	59
4.4 ผลิตและหาปริมาณกรดลิวูลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	59
4.4.1 ผลผลิตสุทธิ (ของเหลว, ของแข็ง, แก๊ส) หลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส .....	59
4.4.2 ค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดลิวูลินิกหลังกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส .....	59
บทที่ 5.....	65
5.1. องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ .....	65
5.2 ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ .....	65
5.2.1. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี.....	65
5.2.1.1 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี.....	65

5.2.1.2 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี.....	66
5.2.1.3 การเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมีและการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี.....	66
5.2.2. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ .....	68
5.2.3. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี.....	68
5.2.4 การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธีการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี) .....	69
5.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี AL-SBA-15 ที่ใช้ผลิตกรดสีวุลินิก.....	70
5.4 ผลิตและหาปริมาณกรดสีวุลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	71
5.4.1 ผลผลิตสุทธิ (ของเหลว, ของแข็ง, แก๊ส) หลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์โมไลซิส .....	71
5.4.2 ค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดสีวุลินิกหลังสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเทอร์โมไฮโดไลซิส .....	72
บทที่ 6 .....	75
6.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	75
6.2 ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	75
6.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี AL-SBA-15 ที่ใช้ผลิตกรดสีวุลินิก.....	76
6.4 ผลิตและหาปริมาณกรดสีวุลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	77
อภิปรายผล.....	77

ข้อเสนอแนะ .....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก .....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	96



## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 สารเคมีเพิ่มมูลค่าจากการแปรรูปของกรดลิวูลินิกและความต้องการ.....	8
ตาราง 2 นิวเคลียสที่สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	31
ตาราง 3 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์.....	42
ตาราง 4 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี	45
ตาราง 5 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี .....	46
ตาราง 6 การเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี และภาวะที่เหมาะสมจากการใช้เครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี.....	47
ตาราง 7 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยเชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7.....	51
ตาราง 8 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยเชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7 (เลือกปริมาณเชื้อราที่ใช้ 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้แห้ง ระยะเวลาในการปรับสภาพเป็น 30, 60 และ 90 วัน).....	52
ตาราง 9 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยเชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วนปริมาณเชื้อ (mg) ต่อ น้ำหนักเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ (g) คือ 6:1 เป็นเวลา 30 วัน และตามด้วยการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับ 10 % NaOH และการฟอกด้วย 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	53
ตาราง 10 การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี).....	55
ตาราง 11 ลักษณะพื้นผิวของ SBA-15 และ Al-SBA-15.....	58
ตาราง 12 ผลผลิตสุทธิ (ของเหลว, ของแข็ง, แก๊ส) หลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 .....	61

หน้า

ตาราง 13 ผลผลิตสุทธิและค่าความจำเพาะของกรดลิวูลินิกหลังสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเทอร์โมไฮโดไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15.....	62
ตาราง 14 ระยะเวลาการระเหยกลายเป็นไอ (retention time) ของกรดลิวูลินิกและสารประกอบอื่นๆ.....	64
ตาราง 15 ต้นทุนและผลกำไรการผลิตกรดลิวูลินิก 1 กิโลกรัม .....	79



## สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดลิวูลินิก .....	4
รูป 2 การแปรรูปกรดลิวูลินิกเป็นสารเคมีชนิดอื่น .....	5
รูป 3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดไดฟีนอลิกจากกรดลิวูลินิก.....	5
รูป 4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ $\gamma$ - valerolactone จากกรดลิวูลินิก.....	6
รูป 5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Methyltetrahydrofuran จากกรดลิวูลินิก.....	6
รูป 6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 5-bromolevulinic acid จากกรดลิวูลินิก.....	7
รูป 7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ delta-aminolevulinic acid จาก 5-bromolevulinic acid.....	7
รูป 8 การใช้กรดลิวูลินิกในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	8
รูป 9 การเปลี่ยนน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม เป็น 5-hydroxymethylfurfural .....	9
รูป 10 การเปลี่ยน 5-hydroxymethylfurfural เป็นกรดลิวูลินิก.....	10
รูป 11 การเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นกรดลิวูลินิก .....	12
รูป 12 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในลิกโนเซลลูโลส.....	12
รูป 13 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	13
รูป 14 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส .....	13
รูป 15 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน .....	14
รูป 16 ลำต้น, ใบ, ผล, และดอกของไม้ไมยราบยักษ์.....	16
รูป 17 แนวคิด Lignocellulosic feedstock biorefinery .....	18
รูป 18 การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส .....	19
รูป 19 วิธีของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิสของเซลลูโลส.....	24
รูป 20 โครงสร้างซีไอไลต์ .....	26
รูป 21 การเกิดโครงสร้างรูพรุนแบบหกเหลี่ยม (hexagonal).....	27

รูป 22 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	28
รูป 23 การจำแนกชนิดของไอโซเทอร์ตาม IUPAC.....	29
รูป 24 กระบวนการของการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS .....	31
รูป 25 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
รูป 26 แสดงการเจริญของเชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7 บนเนื้อไม้ไมยราบ ยักษ์ที่อัตราส่วนปริมาณเชื้อรา 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้แห้ง เป็นระยะเวลา (ก) 7 วัน, (ข) 14 วัน, (ค) 21 วัน .....	50
รูป 27 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	56
รูป 28 รูปแบบการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีของ (ก) SBA-15 และ (ข) Al-SBA-15.....	57
รูป 29 ไอโซเทรมการดูดซับและการคายก๊าซไนโตรเจนของ (ก) SBA-15 และ (ข) Al-SBA-15 .	58
รูป 30 กราฟ Al MAS-NMR ของ Al-SBA-15 .....	58
รูป 31 โครมาโตแกรมของ (ก) กรดลิวูลินิกทางการค้า กรดลิวูลินิกและสารประกอบอื่นๆ จาก การสังเคราะห์ด้วยวิธีเทอร์โมไฮโดรไลซิส โดยใช้ (ข) เซลลูโลสทางการค้า (ค) เซลลูโลสจากเนื้อ ไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ .....	63
รูป 32 สภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกสเปคโตรมิเตอร์ (GC-MS condition) .....	95



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

กรดลิวูลินิก (levulinic acid) หรือ 4-oxopentanoic acid เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดคาร์บอกซิลิกและหมู่คีโตน ซึ่งสามารถใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อแปรรูปไปเป็นสารเคมีชนิดอื่นที่มีมูลค่าเพิ่ม และวัสดุพอลิเมอร์ต่างๆ (Girisuta, 2007) เช่น สารเติมแต่งเชื้อเพลิง (fuel additives) สารตั้งต้นของพอลิเมอร์ (polymer precursors) ยากำจัดวัชพืช (herbicides) เภสัชภัณฑ์ (pharmaceuticals) สารแต่งกลิ่น (flavour substances) และสารมัธยันตร์ (chemical intermediates) (Ren, Zhou และ Liu, 2013) เป็นต้น ปัจจุบัน มีการแปรรูปกรดลิวูลินิกเป็นสารเพิ่มมูลค่า เช่น (1) การสังเคราะห์กรดซัคซินิก (succinic acid) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์สำหรับการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ (polyester), พอลิอีเทอร์ (polyether) และพอลิยูรีเทน (polyurethane) ซึ่งสังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของกรดลิวูลินิก โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น  $V_2O_5$  เป็นต้น, (2) การสังเคราะห์  $\gamma$ -valerolactone (GVL) เป็นตัวทำละลายและกาว ซึ่งสังเคราะห์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ของกรดลิวูลินิก โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา, และ (3) การสังเคราะห์ methyltetrahydrofuran (MTFH) เป็นองค์ประกอบของพลังงานทางเลือก เช่น แก๊สโซลีน (gasoline) และไบโอดีเซล (biodiesel) สังเคราะห์ได้จากการรีดิวซ์  $\gamma$ -valerolactone ซึ่งเป็นสารแปรรูปจากกรดลิวูลินิก เป็นต้น (Bozell และคณะ, 2000; Weingarten และคณะ, 2013)

กรดลิวูลินิกสามารถผลิตได้จากน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม เช่น น้ำตาลกลูโคส (glucose) โดยเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็น 5-hydroxymethylfurfural โดยอาศัยปฏิกิริยาการขจัดน้ำ (dehydration) และ (2) การเปลี่ยน 5-hydroxymethylfurfural เป็นกรดลิวูลินิก โดยอาศัยปฏิกิริยาการเติมน้ำ (hydration) (Weingarten และคณะ, 2013) นอกจากนี้ สารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ เช่น แป้งและเซลลูโลส ก็สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกรดลิวูลินิกได้เช่นกัน เนื่องจากมีหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งหรือเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส และเปลี่ยนเป็น 5-hydroxymethylfurfural และกรดลิวูลินิกตามลำดับ (Wang และคณะ, 2013)

เซลลูโลส เป็นสารตั้งต้นที่มีศักยภาพในการผลิตกรดลิวูลินิก เนื่องจากเป็นพอลิแซคคาไรด์ในธรรมชาติ โดยเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ซึ่งเป็นองค์ประกอบ

ของชีวมวลพืช (Kumar และคณะ, 2009) จากการวิจัยที่ผ่านมาพบการใช้ชีวมวลพืชในการผลิตกรดลิวูลินิก ได้แก่ ผักตบชวา ฟางข้าว และเปลือกข้าว เป็นต้น (Chang, Cen และ Ma, 2007; Girisuta, 2007; Bevilaqua และคณะ, 2013) ซึ่งการเลือกใช้ชีวมวลพืชเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจะมีข้อดีในด้านการไม่มีผลกระทบต่อหรือแข่งขันกับห่วงโซ่อาหาร และสารตั้งต้นมีมูลค่าต่ำ ในปัจจุบัน มีโรงงานการผลิตกรดลิวูลินิก สำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ชีวมวลพืชเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ กากต้นยาสูบ (tobacco bagasse) ตั้งอยู่ในเมือง Caserta ประเทศอิตาลี มีกำลังผลิตที่ 3,000 ตันต่อปี (Ritter, 2006)

ชีวมวลพืชที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) หรือ Giant sensitive plant ซึ่งเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่พบการระบาดอย่างหนักในประเทศไทย ถูกนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในปี พ.ศ. 2495 เพื่อใช้เป็นพืชบำรุงดินในไร่ยาสูบ แต่เนื่องจากสามารถปรับตัวดำรงชีวิตและขยายพันธุ์ได้ดี จึงทำให้พืชชนิดนี้แพร่กระจายไปได้ในหลาย ๆ พื้นที่และเกิดการระบาดในที่สุด ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสภาพแวดล้อม และเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก (Pramual, Khumkratok และ Wongpakam, 2011)

อย่างไรก็ตามวัสดุลิกโนเซลลูโลสจากแหล่งชีวมวลพืช ยังพบองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ นอกจากเซลลูโลส ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น (Menon และ Rao, 2012) ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกรดลิวูลินิกจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการแยกหรือกำจัดองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่จำเป็นต่อกระบวนการผลิตออก หนึ่งในกระบวนการดังกล่าว คือ การปรับสภาพ (pretreatment) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงและกำจัดโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่เป็นสิ่งกีดขวางต่อการย่อยสลายเซลลูโลส เช่น กำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ลดโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความเปราะบางของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Blanch, Simmons และ Klein-Marcuschamer, 2011) วิธีการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส แบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้ (1) วิธีทางกายภาพ (physical pretreatment) ได้แก่ การบด, การตัด, การใช้รังสี, การใช้ความร้อนร่วมกับแรงดัน เป็นต้น (2) วิธีทางเคมี (chemical pretreatment) ได้แก่ การใช้กรด, การใช้ด่าง, การกำจัดลิกนินด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน, การใช้สารละลายอินทรีย์ เป็นต้น, (3) วิธีทางเคมีกายภาพ ได้แก่ stream explosion, microwave-chemical pretreatment, liquid-hot water pretreatment เป็นต้น และ (4) วิธีทางชีวภาพ (biological pretreatment) ได้แก่ ราเน่าขาว (white-rot fungi) (Kumar และคณะ, 2009; Ren, Zhou และ Liu, 2013))

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ เพื่อการผลิตกรดลิวูลินิก โดยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี (การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี และการใช้ความร้อนและแรงดันจากหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี) และวิธีทางชีวภาพ (การ

ใช้เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7) ในการปรับสภาพ โดยประสิทธิภาพของแต่ละปัจจัยจะพิจารณาจากปริมาณสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น, ปริมาณสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ลดลง, ปริมาณสารเคมีที่ใช้, และปริมาณพลังงานที่ใช้ หลังจากนั้น นำเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพมาผลิตกรดลิวูลินิกที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส (hydrothermolysis) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี คือ อะลูมิเนียม-एसบีเอ-15 (Al-SBA-15) และ ซีเอสเอ็ม-5 (ZSM-5) ภายใต้ภาวะแรงดันของก๊าซไนโตรเจน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย (Research objective)

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมีและวิธีทางชีวภาพ
2. ศึกษาการผลิตกรดลิวูลินิก (levulinic acid) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส (hydrothermolysis) จากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย (Scope of research)

1. หาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ เพื่อการผลิตกรดลิวูลินิก โดยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี และวิธีทางชีวภาพ
2. ผลิตกรดลิวูลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธี การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี, วิธีทางชีวภาพ และ วิธีทางชีวภาพและวิธี การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี โดยสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี อะลูมิเนียม-एसบีเอ-15 (Al-SBA-15) และ ซีเอสเอ็ม-5 (ZSM-5)

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ทราบภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี วิธีทางชีวภาพ และวิธีทางชีวภาพและวิธี การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี, และสามารถผลิตกรดลิวูลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ

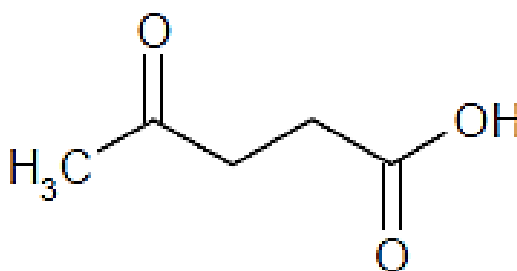
## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

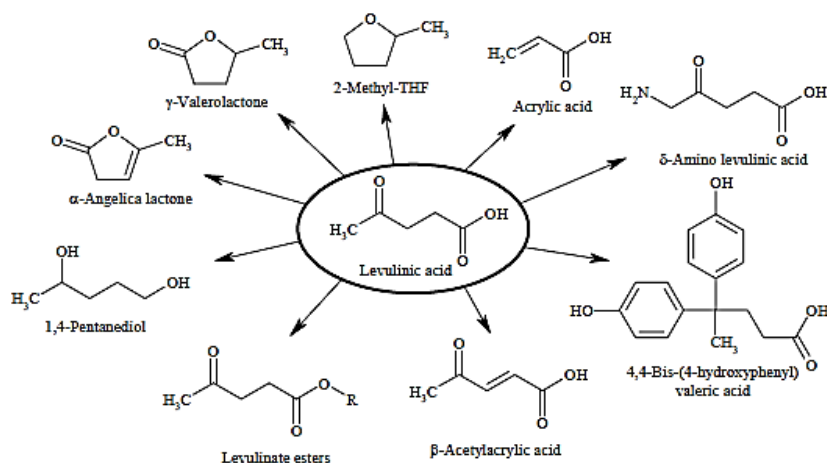
#### 2.1 กรดลิวูลินิก (levulinic acid)

กรดลิวูลินิก (levulinic acid) หรือ 4-oxopentanoic หรือ  $\gamma$ -ketovaleric acid มีสูตรทางเคมี คือ  $C_5H_8O_3$  โมเลกุลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดคาร์บอกซิลิกและหมู่คีโตน (Ren, Zhou และ Liu, 2013) มีลักษณะทางสัญญาณวิทยาเป็นผลึกสีขาว จุดหลอมเหลวที่ 33-37 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 245-246 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นที่ 1.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กรดลิวูลินิกสามารถละลายได้ในน้ำร้อน, เอทานอล (ethanol), ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether), คลอโรฟอร์ม (chloroform), อะซิโตน (acetone), สารละลายกรดเจือจาง (dilute acid) เป็นต้น (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015)

กรดลิวูลินิกสามารถใช้ทำปฏิกิริยาเพื่อแปรรูปเป็นสารเคมีชนิดอื่นที่มีมูลค่าเพิ่มและวัสดุพอลิเมอร์ต่างๆ (Girisuta, 2007) เช่น สารเติมแต่งเชื้อเพลิง (fuel additives), สารตั้งต้นของพอลิเมอร์ (polymer precursors), ยากำจัดวัชพืช (herbicides), เภสัชภัณฑ์ (pharmaceuticals), สารแต่งกลิ่น (flavour substances), และสารมัธยันตร์ (chemical intermediates) (Ren, Zhou และ Liu, 2013)



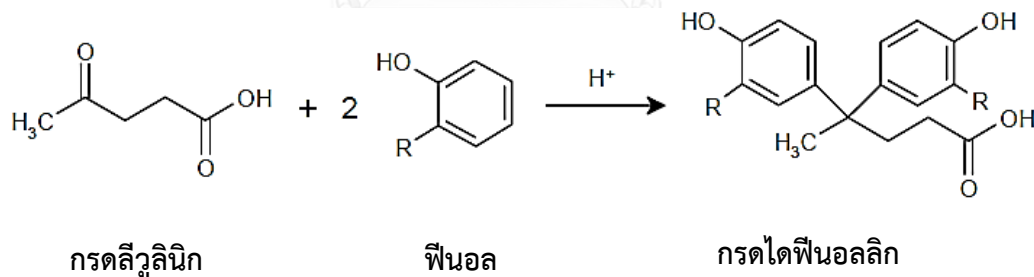
รูป 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดลิวูลินิก (Bozell และคณะ, 2000)



รูป 2 การแปรรูปกรดลิวลินิกเป็นสารเคมีชนิดอื่น (Girisuta, 2007)

### 2.1.1 การแปรรูปกรดลิวลินิกเป็นสารเคมีเพิ่มมูลค่า อาทิเช่น

1. กรดไดฟีนอลิก (diphenolic acid) เป็นกรดที่ใช้แปรรูปเป็นสารหล่อลื่น (lubricants), กาว (adhesive), และสารตั้งต้น (มอนอเมอร์) ในการสังเคราะห์อีพอกซี, พอลิคาร์บอเนต, และพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015) โดยกรดไดฟีนอลิก เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดลิวลินิกกับฟีนอล ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยโมลของสาร (Girisuta, 2007) ดังรูป 3

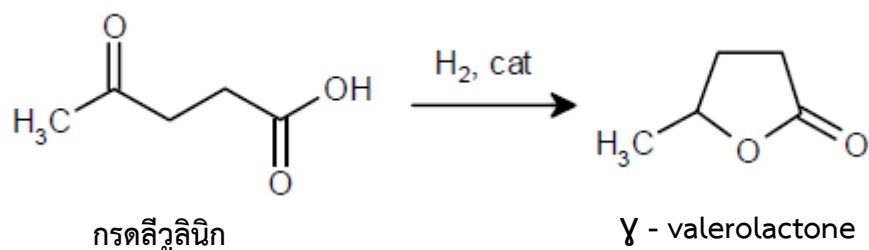


รูป 3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดไดฟีนอลิกจากกรดลิวลินิก (Girisuta, 2007)

2. กรดซัคซินิก (succinic acid) เป็นกรดที่ใช้แปรรูปเป็นตัวทำละลาย (solvent), ยากำจัดวัชพืช (herbicides), และสารตั้งต้น (มอนอเมอร์) ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์, พอลิอีเทอร์, และพอลิยูรีเทน เป็นต้น (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015) โดยกรดซัคซินิก เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของกรดลิวลินิก โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น  $V_2O_5$  เป็นต้น (Girisuta, 2007)

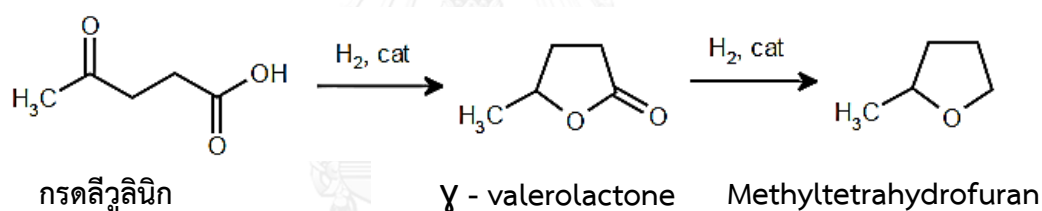
3.  $\gamma$ -valerolactone (GVL) เป็นสารเคมีที่ใช้แปรรูปเป็นตัวทำละลาย, กาว, สารเติมแต่งเชื้อเพลิง, และเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015) โดย

$\gamma$ - valerolactone เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ของกรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Weingarten และคณะ, 2013) ดังรูป 4



รูป 4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์  $\gamma$  - valerolactone จากกรดลิวูลินิก (Girisuta, 2007)

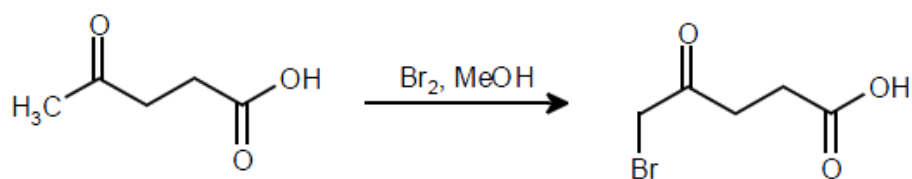
4. Methyltetrahydrofuran (MTFH) เป็นสารเคมีที่ใช้แปรรูปเป็นสารเติมแต่งเชื้อเพลิง, ตัวทำละลาย, และองค์ประกอบของพลังงานทางเลือก เช่น แก๊สโซลีน (gasoline) และ ไบโอดีเซล (biodiesel) เป็นต้น (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015) โดย Methyltetrahydrofuran เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของกรดลิวูลินิก ได้  $\gamma$ - valerolactone และจะถูกรีดิวิซ์เป็น Methyltetrahydrofuran (Weingarten และคณะ, 2013) ดังรูป 5



รูป 5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Methyltetrahydrofuran จากกรดลิวูลินิก (Girisuta, 2007)

5. Delta-aminolevulinic acid (DALA) เป็นสารเคมีที่ใช้แปรรูปเป็นสารกำจัดวัชพืชทางชีวภาพ ซึ่งเตรียมได้จาก aminating levulinic acid (Girisuta, 2007) โดยเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนได้แก่

ขั้นตอนแรก กรดลิวูลินิกเกิดปฏิกิริยากับสารละลายโบรมีน (bromination) ในสารละลายเมทานอลได้ 5-bromolevulinic acid ดังรูป 6

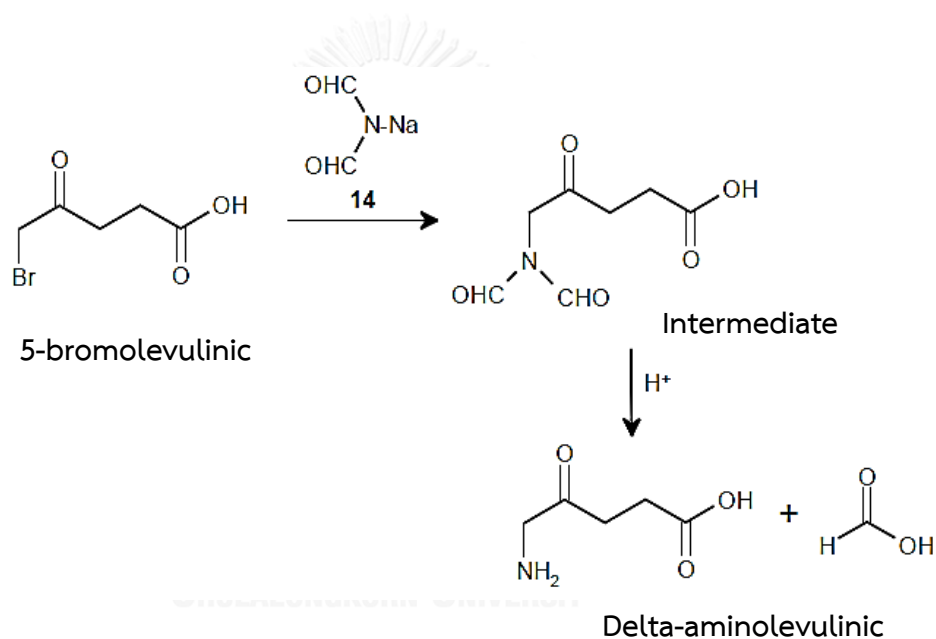


กรดลิวูลินิก

5-bromolevulinic

รูป 6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 5-bromolevulinic acid จากกรดลิวูลินิก (Girisuta, 2007)

ขั้นตอนที่ 2 5-bromolevulinic acid ถูกเปลี่ยนเป็น delta-aminolevulinic acid โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม N-nucleophile เช่น sodium azide หรือ potassium phthalimide เป็นต้น ดังรูป 7



5-bromolevulinic

Intermediate

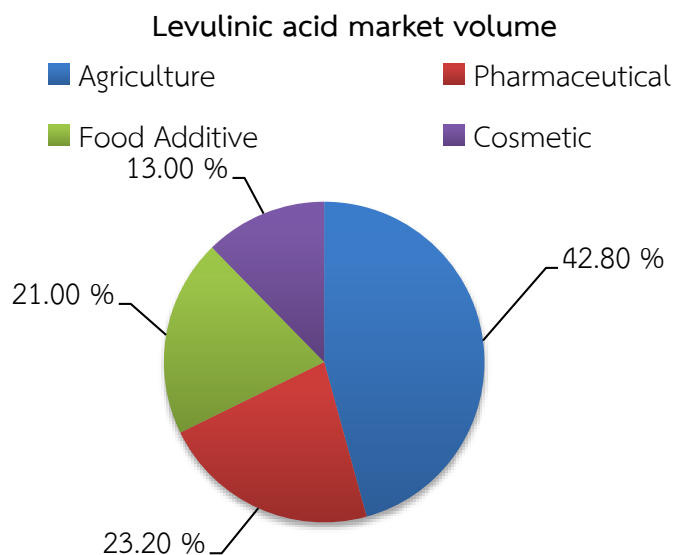
Delta-aminolevulinic

รูป 7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ delta-aminolevulinic acid จาก 5-bromolevulinic acid (Girisuta, 2007)

### 2.1.2 การใช้กรดลิวูลินิกในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันกรดลิวูลินิกถูกใช้เป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์สารเคมีเพิ่มมูลค่าหลายชนิด ซึ่งอุตสาหกรรมต่างๆ มีความต้องการในการใช้กรดลิวูลินิกที่แตกต่างกัน โดยอุตสาหกรรมการเกษตร มีความต้องการสูงสุดที่ 42.80 % รองลงมา คือ อุตสาหกรรมยา, อุตสาหกรรมอาหาร, และ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง มีความต้องการที่ 23.20 %, 21.00 % และ 13.00 % ตามลำดับ (รูป 8) (Bozell และคณะ, 2000) ในปี 2013 พบการใช้กรดลิวูลินิกทั่วโลกอยู่ที่ 2,600 ตัน/ปี และคาดการณ์ว่าในปี 2020 ความต้องการในการใช้กรดลิวูลินิกจะเพิ่มขึ้นเป็น 3,800 ตัน/ปี (Mukherjee, Dumont

และ Raghavan, 2015) โดยสารเคมีเพิ่มมูลค่าที่แปรรูปมาจากกรดลิวูลินิกและถูกใช้มากที่สุด ได้แก่ methyltetrahydrofuran รองลงมา คือ delta-aminolevulinic acid (DALA), tetrahydrofuran, butanediol และ diphenolic acid ตามลำดับ (ตาราง 1) (Bozell และคณะ, 2000)



รูป 8 การใช้กรดลิวูลินิกในอุตสาหกรรมต่างๆ (Bozell และคณะ, 2000)

ตาราง 1 สารเคมีเพิ่มมูลค่าจากการแปรรูปของกรดลิวูลินิกและความต้องการ (Bozell และคณะ, 2000)

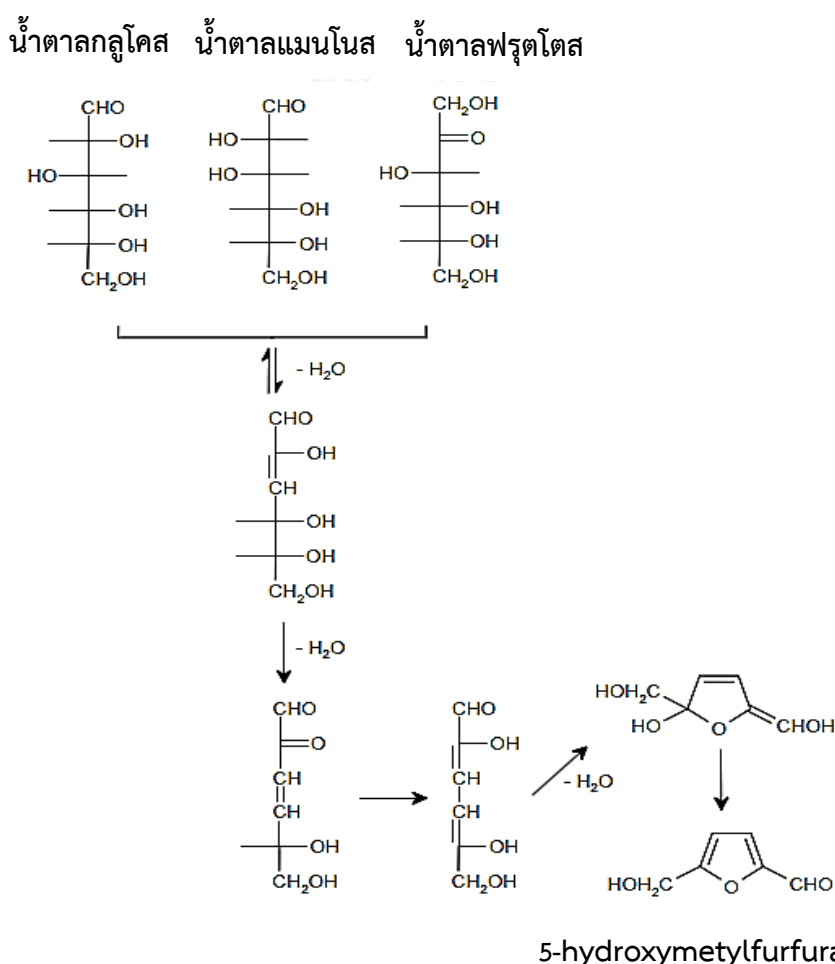
สารเพิ่มมูลค่า	ประเภทการใช้งาน	ความต้องการ (million lb/year)
Methyltetrahydrofuran (MTHF)	เชื้อเพลิงพลังงาน	10,000-100,000
Delta-aminolevulinic acid (DALA)	สารกำจัดวัชพืชทางชีวภาพ	175-350
Tetrahydrofuran (THF)	สารละลาย	200
Butanediol	สารตั้งต้น (โมโนเมอร์)	200
Diphenolic acid	สารตั้งต้น (โมโนเมอร์)	35



### 2.1.3 การสังเคราะห์กรดลิวลินิก

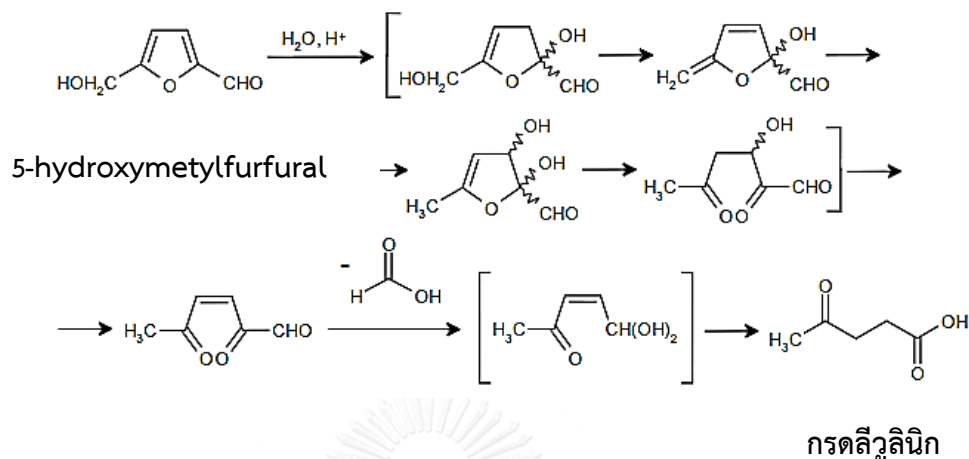
กรดลิวลินิก สามารถสังเคราะห์ได้จากสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ น้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (hexose sugar) เช่น น้ำตาลกลูโคส (glucose), น้ำตาลแมนโนส (mannose), น้ำตาลฟรุคโตส (fructose) เป็นต้น (Girisuta, 2007) โดยขั้นตอนการสังเคราะห์กรดลิวลินิกจากน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเปลี่ยนน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม เป็น 5-hydroxymethylfurfural โดยปฏิกิริยาการขจัดน้ำ (dehydration) ซึ่งอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยากรด (acid catalyst) (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015) ดังรูป 9



รูป 9 การเปลี่ยนน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม เป็น 5-hydroxymethylfurfural (Girisuta, 2007)

2. การเปลี่ยน 5-hydroxymethylfurfura เป็นกรดลิวูลินิก โดยปฏิกิริยาการเติมน้ำ (hydration) ให้กับพันธะคู่ของวงแหวนฟูแรน (furan ring) ดังรูป 10



รูป 10 การเปลี่ยน 5-hydroxymethylfurfural เป็นกรดลิวูลินิก (Girisuta, 2007)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการสังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากน้ำตาลกลูโคส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากัด เช่น Zeng และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา solid heteropoly acid salts  $Ag_3PW_{12}O_{40}$  ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 81.61 % (Zeng และคณะ, 2012), Ya' ani และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $CrCl_3$  และ HY zeolite ที่ภาวะอุณหภูมิ 145.2 องศาเซลเซียส เวลา 146.7 นาที ได้ผลผลิตสุทธิที่ 55.2 % (Ya'aini, Amin และ Asmadi, 2012), และ Suacharoen และ Tungasmita สังเคราะห์กรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru-ZSM-5 ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 38.1 % เป็นต้น (Suacharoen และ Tungasmita, 2013)

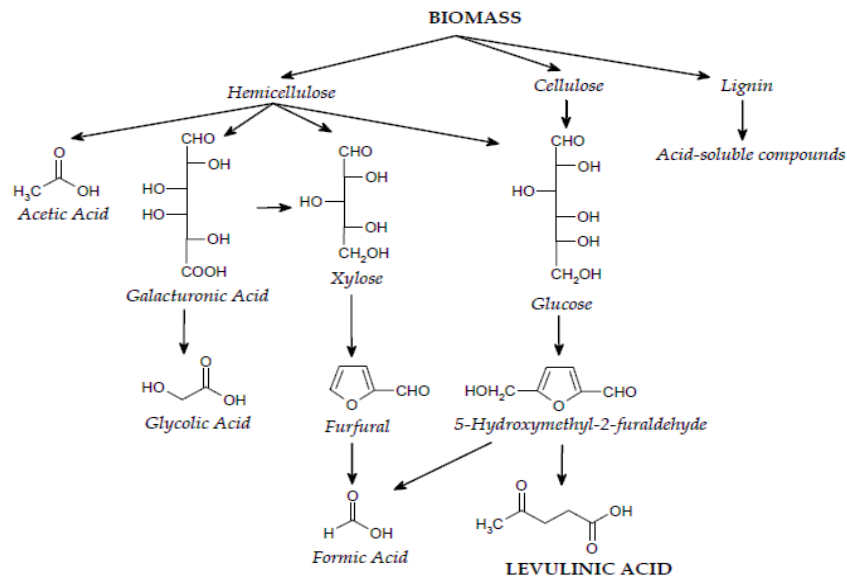
น้ำตาลซูโครส เป็นน้ำตาลอีกหนึ่งชนิดที่ถูกนำมาสังเคราะห์กรดลิวูลินิก เนื่องจากเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) 2 โมเลกุล ได้แก่ น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุคโตส (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการสังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากน้ำตาลซูโครส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากัด เช่น Hua Chang และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $SO_4^{2-}/Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$  ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิ 33.05 % (HuaChang และคณะ, 2010), Li และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากัดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 43.31 % (Li และคณะ, 2010), Zeng และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $SO_4^{2-}/TiO_2-ZrO_2$  ที่ภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 50 % (Zeng และคณะ, 2012), และ Suacharoen และ Tungasmita สังเคราะห์กรด

ลิวูลินิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru-ZSM-5 ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 37.8 % เป็นต้น (Suacharoen และ Tungasmita, 2013)

นอกจากนั้น สารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ เช่น แป้งและเซลลูโลส สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรดลิวูลินิกได้เช่นกัน เนื่องจากมีหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส ดังนั้น หากแป้งหรือเซลลูโลสถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคส ก็สามารถเปลี่ยนเป็น 5-hydroxymethylfurfural และกรดลิวูลินิกตามลำดับ (Ren, Zhou และ Liu, 2013) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการสังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากแป้งและเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เช่น Suacharoen และ Tungasmita สังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากแป้ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ru-Al-SBA-15 ที่ภาวะอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 32.2 % (Suacharoen และ Tungasmita, 2013), Peng และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CrCl}_3$  ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 48 % (Peng และคณะ, 2010), และ Joshi และคณะ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{ZrO}_2$  ที่ภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 39 % เป็นต้น (Joshi และคณะ, 2014)

เซลลูโลส เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบในธรรมชาติ เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุชีวภาพเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชีวมวลพืช (Kumar และคณะ, 2009) แต่เซลลูโลสที่พบในธรรมชาติ มักจัดเรียงตัวอยู่กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น (Menon และ Rao, 2012) ซึ่งเฮมิเซลลูโลส ก็เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นกรดลิวูลินิกได้ เนื่องจากมีน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอมเป็นองค์ประกอบเช่นกัน (Girisuta, 2007) ดังรูป 11

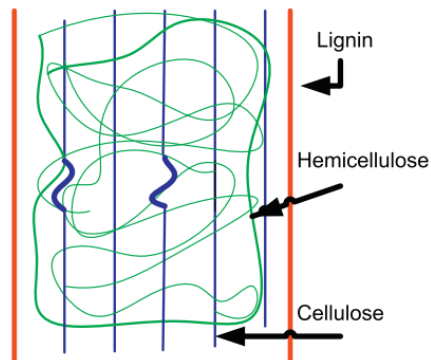
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการสังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากวัสดุชีวภาพเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เช่น Efremov และคณะ สังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากไม้แอสเพน (aspen wood) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 15.5 % (Efremov, Pervyshina และ Kuznetsov, 1997), Efremov สังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากไม้บีช (beech wood) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก ที่ภาวะอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 17.8 % (Efremov, Pervyshina และ Kuznetsov, 1998), และ Galletti สังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากฟางข้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กรดไฮโดรคลอริก ที่ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตสุทธิที่ 49.3 % เป็นต้น (Galletti และคณะ, 2012)



รูป 11 การเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นกรดคีวูลินิก (Girisuta, 2007)

## 2.2 ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose)

ลิกโนเซลลูโลส เป็นแหล่งชีวมวล ซึ่งพบในผนังเซลล์ของพืช ประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) 40-50 %, เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) 25-30 % และลิกนิน (lignin) 15-20 % (Menon และ Rao, 2012)

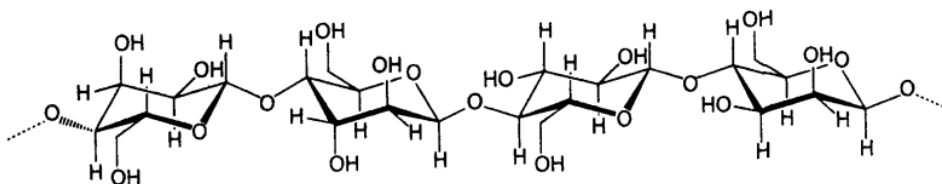


รูป 12 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในลิกโนเซลลูโลส (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012)

### 2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์สายตรงของกลูโคส (glucose or  $\beta$ -D-glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 glycosidic มีสูตรโมเลกุล คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  หนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 25,000 หน่วย (Cheng, 2009) และมีหน่วยซ้ำเป็นเซลโลไบโอส (cellobiose or D-

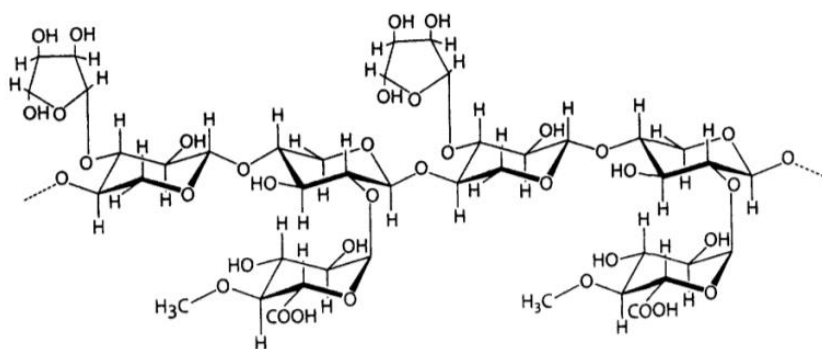
glucopyranosyl- $\beta$ -1,4-D-glucopyranose) เซลลูโลสสายยาวจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และแวนเดอร์วาลส์ (hydrogen and vander waals bonds) ทำให้เซลลูโลสจัดเรียงตัวกันเป็นมัด เรียกว่าไมโครไฟบริล (microfibril) ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นระเบียบ (crystalline) และไม่เป็นระเบียบ (paracrystalline) ไมโครไฟบริลยึดจับกับเฮมิเซลลูโลสและห่อหุ้มด้วยลิกนิน รวมกันเป็นแมโครไฟบริล (Kumar และคณะ, 2009)



รูป 13 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (Cheng, 2009)

### 2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

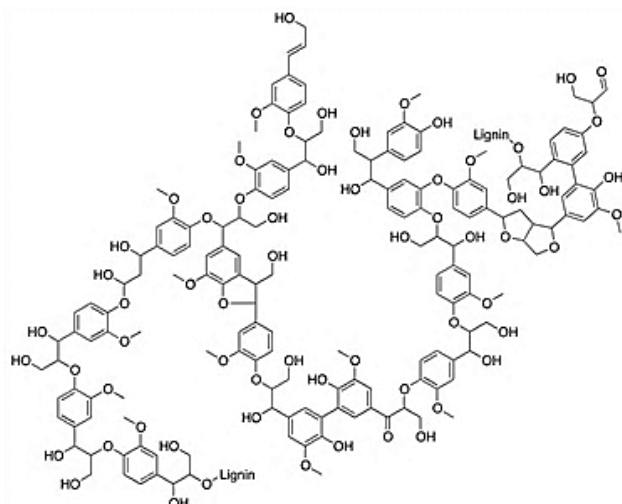
เฮมิเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์แบบมีกิ่งของโมโนเมอร์หลายชนิด ประกอบด้วย น้ำตาลคาร์บอน 5 อะตอม เช่น อะราบิโนสและไซโลส เป็นต้น, น้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม เช่น กลูโคส, กาแลกโทส, แมนโทส, และแรมโนส เป็นต้น, และกรดยูโรนิก เช่น กาแลกทูโรนิก, กลูคูโรนิก, และเมทิลกลูคูโรนิก เป็นต้น เป็นโพลิเมอร์สายสั้นขนาด 150-200 หน่วย (Cheng, 2009) โครงสร้างไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากมีการแตกกิ่งเป็นจำนวนมาก เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเซลลูโลสกับลิกนิน ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงยิ่งขึ้น และยังช่วยสร้างความยืดหยุ่นให้ผนังเซลล์ (Pérez และคณะ, 2002)



รูป 14 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส (Cheng, 2009)

### 2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน เป็นพอลิเมอร์ของฟีนิลโพรเพน 3 ชนิด คือ *p*-hydroxyphenyl, guaiacyl, และ syringyl จำนวนมากกว่า 10,000 หน่วย มีหน้าที่ช่วยให้ความแข็งแรง ค้ำจุนโครงสร้าง และต้านทานการบุกรุกของเชื้อโรค (Pérez และคณะ, 2002)



รูป 15 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน (Cheng, 2009)

### 2.3 ไมยราบยักษ์ (Giant Sensitive Plant)

ไมยราบยักษ์ มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Mimosa pigra* L. ชื่อสามัญภาษาอังกฤษคือ Giant sensitive plant มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบประเทศอเมริกากลางและทวีปอเมริกาใต้ และแพร่กระจายสู่ทวีปอาฟริกา ทวีปเอเชีย และทวีปออสเตรเลีย ตามลำดับ พืชชนิดนี้ถูกนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2495 โดยผู้นำเกษตรกรชาวไอร์แลนด์ทางภาคเหนือ ได้นำเมล็ดพันธุ์จากประเทศอินโดนีเซียมาปลูกที่อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 2 ชนิด คือ ชนิดต้นและชนิดเถา โดยมุ่งที่จะใช้เป็นพืชบำรุงดินในไร่อ้อยเป็นหลัก แต่เนื่องจากพืชชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดที่มีภูมิอากาศคล้ายกับประเทศไทย จึงเจริญได้ดีในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และมีการขยายพันธุ์โดยเมล็ดได้ดี สามารถปรับตัวดำรงชีวิตได้ในดินทุกชนิด นอกจากนั้น เมล็ดมีพักตัว (seed dormancy) ได้เป็นระยะเวลาช้านาน เพื่อรอปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการงอกของเมล็ด จึงทำให้พืชชนิดนี้แพร่กระจายไปได้ในหลาย ๆ พื้นที่ และเมื่อเข้ายึดครองพื้นที่แล้ว ยากที่พรรณไม้อื่นจะขึ้นผสมผสานได้ เนื่องจากพืชชนิดนี้จะขึ้นปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้พรรณพืชดั้งเดิม เช่น กกและหญ้าหลายชนิด รวมทั้งไม้พุ่มที่ขึ้นตามริมน้ำหรือที่ขึ้นแฉะขาดแสงตายลงและค่อย ๆ สูญหายไปจากพื้นที่ ฉะนั้น จึงพบไมยราบยักษ์ได้ทั่วไปนับตั้งแต่บนภูเขา ที่ลุ่ม และในไร่นาของเกษตรกรทั่วประเทศ (Pramual, Khumkratok และ Wongpakam, 2011)

### 2.3.1 การจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์ (Scientific classification)

ไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) จัดเป็นพืชตระกูลถั่ว (Fabaceae) มีลำดับชั้นทางอนุกรมวิธาน ดังนี้ (Julien, McFadyen และ Cullen, 2012)

อาณาจักร (Kingdom)	Plantae
หมวด (Division)	Tracheophyta
ชั้น (Class)	Magnoliopsida
อันดับ (Order)	Fabales
วงศ์ (Family)	Fabaceae
วงศ์ย่อย (Subfamily)	Mimosoideae
สกุล (Genus)	Mimosa
ชนิด (Species)	<i>M. pigra</i>

### 2.3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไมยราบยักษ์ (Julien, McFadyen และ Cullen, 2012)

ต้น มีหนามออกตามแนวลำต้น ลำต้นสูงประมาณ 2-4 เมตร ลำต้นอ่อนจะมีสีเขียว และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อมีอายุมากขึ้น เนื้อไม้ค่อนข้างแข็งและเหนียว

ใบ ประกอบแบบขนนก 2 ชั้น ใบย่อยชั้นแรก 10-15 คู่ ใบย่อย และชั้นรอง 35-51 คู่ รูปขอบขนานแคบ ก้านและแกนใบมีหนาม ท้องใบเรียบ หลังใบมีขนอ่อนๆ

ดอก มีสีม่วงอมชมพู ออกเป็นช่อกลมที่ซอกใบ ก้านดอกมีหนาม กลีบรองดอกเป็นแผ่นบางใส กลีบดอกคล้ายเป็นหลอด ปลายกลีบแยก เกสรผู้ 8 อัน รังไข่มีขนแน่น

ผล เป็นฝักยาวแบน กว้าง 0.6-1 เซนติเมตร ยาว 4-6 เซนติเมตร มีขนหรือหนามแข็งคลุมติดกันแน่นเป็นกระจุกขอบใบมีหนาม เป็นหยัก เมล็ดรูปไข่ สีน้ำตาลขนาดเล็ก

การขยายพันธุ์ จะขยายพันธุ์โดยอาศัยเมล็ด



รูป 16 ลำต้น, ใบ, ผล, และดอกของไม้มายราบยักษ์

### 2.3.3 การควบคุมการระบาดของไม้มายราบยักษ์ ดังนี้

(1) วิธีทางกายภาพ ด้วยการขุดราก ถอนโคน ซึ่งการถางและการตัดไม้ไม่สามารถกำจัดได้ เพราะไม้มายราบยักษ์เป็นพืชล้มลุกคาบปี จึงสามารถเจริญเติบโตใหม่ได้ นอกจากนั้น การเผาก็เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้ แต่การเผาไม่สามารถกำจัดส่วนของเมล็ด เนื่องจากสามารถทนความร้อนได้ และการเผาอาจเป็นการเพิ่มการขยายพันธุ์ของไม้มายราบยักษ์ด้วยเมล็ดอีกด้วย เนื่องจากความร้อนทำให้ฝักของเมล็ดแตกออก และแพร่กระจายเมล็ดสู่สิ่งแวดล้อม (Schultz และ Barrow, 1995; Walden และคณะ, 2000)

(2) วิธีทางเคมี มีทั้งสารเคมีประเภทเม็ดและของเหลว แต่การใช้สารเคมีเป็นของเหลวจะมีข้อเสีย เนื่องจากอาจส่งผลต่อพืชชนิดอื่นๆ ในพื้นที่ใกล้เคียง ดังนั้นจึงควรใช้ในภาวะที่ความชื้นสูง, อุณหภูมิต่ำ, และไม่มีลม เพื่อลดการแพร่กระจายของสารเคมี (Walden และคณะ, 2000) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการใช้สารเคมีในการกำจัดไม้มายราบยักษ์ เช่น Son และคณะ ทำการทดลองโดยใช้สารเคมี ได้แก่ paraquat, glyphosate, metsulfuron methyl, และ triclopyr butoxyethyl โดยพบว่าสารเคมี glyphosate ให้ผลควบคุมการเจริญของไม้มายราบยักษ์ดีที่สุด (Son และคณะ, 2001)



(3) วิธีทางชีวภาพ เป็นการควบคุมหรือกำจัดโดยใช้สิ่งมีชีวิต เช่น แมลง หรือ เชื้อรา โดยจะมุ่งเน้นที่การทำลายส่วนของใบและราก (Heard และคณะ, 2005) เช่น Evans, Carrion และ Guzman ใช้เชื้อรา *Sphaerulina mimoso-pigrae* ในการกำจัดไมยราบยักษ์ (Evans, Carrion และ Guzman, 1993), Paynter ใช้ตัวอ่อนของ *Macaria pallidata* และ *Leuciris Wmbriaria* กัดกินใบของไมยราบยักษ์ (Paynter, 2004), และ Wirf ใช้ตัวอ่อนของ *Macaria pallidata* กัดกินใบของไมยราบยักษ์เช่นกัน อย่างไรก็ตามการกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพจะใช้เวลาในการกำจัด (Wirf, 2006)

(4) การแปรรูปเป็นวัสดุหรือผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า เนื่องจากไมยราบยักษ์เป็นวัชพืชที่พบการระบาดในหลายพื้นที่ และยากที่จะควบคุมหรือกำจัดให้หมดไป จึงมีการนำไมยราบยักษ์มาแปรรูปเป็นวัสดุหรือผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า เช่น บัญจรัตน์ โจลานันท์ และคณะ ทำการแปรรูปไมยราบยักษ์เป็นพลังงานทดแทนถ่านอัดแท่ง ซึ่งให้ความร้อนจะสูงและติดไฟจะอยู่ได้นานกว่าถ่านทั่วไป (บัญญัติ, อาทิตย์ และ จันสุตา, 2554), และ นางเยาว์ มาลัยทอง และ อภิวัฒน์ ธีรวิฑูกรัก ทำวิจัยการนำไมยราบยักษ์มาพัฒนาการผลิตเยื่อกระดาษ และนำมาแปรรูปเป็นกระดาษกรอง ซึ่งสามารถพับเป็นรูปหยักได้โดยไม่เปราะแตกง่าย สามารถกรองแบบลดความดันโดยไม่ทะลุและมีประสิทธิภาพการกรองสารได้ใกล้เคียงกับกระดาษกรองที่ขายในปัจจุบัน (นางเยาว์ และ อภิวัฒน์, 2544)

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันไมยราบยักษ์ยังเป็นวัชพืชที่พบการระบาดในหลายพื้นที่ของประเทศไทยและก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสภาพแวดล้อม และเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก และพืชชนิดนี้ยากที่จะควบคุมหรือกำจัดให้หมดไป ซึ่งการใช้ประโยชน์จากไมยราบยักษ์เพื่อแปรรูปเป็นวัสดุหรือผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า จึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่จะควบคุมและกำจัดไมยราบยักษ์ให้มีการระบาดและแพร่กระจายลดลง รวมทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับไมยราบยักษ์อีกทางหนึ่งด้วย

## 2.4 แนวคิดการใช้ประโยชน์จากลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic feedstock biorefinery)

(Kamm และ Kamm, 2004)

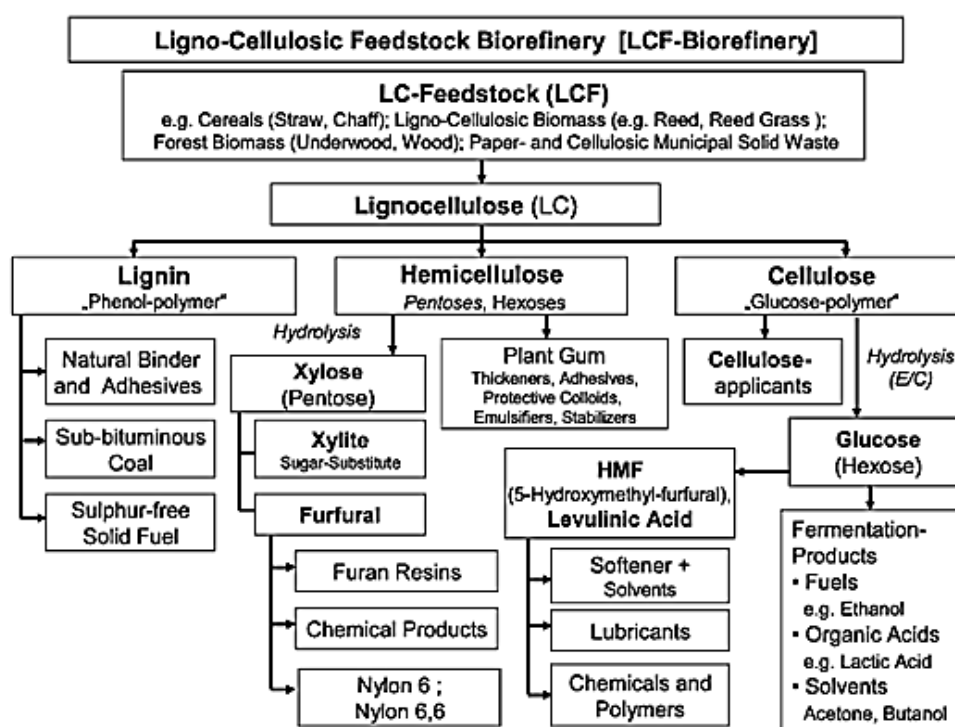
แนวคิดการใช้ประโยชน์จากลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic feedstock biorefinery) เป็นการใช้ประโยชน์จากลิกโนเซลลูโลสเพื่อการผลิตเชื้อเพลิง พลังงาน และสารเคมี โดยผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ 3 ขั้นตอน คือ

(1) การแยกชีวมวล ออกเป็นส่วนประกอบต่างๆ (เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน) โดยอาศัยกระบวนการต่างๆ เช่น การกรอง, การใช้ตัวทำละลายสกัด, และการกลั่น เป็นต้น

(2) การแปลงสารตัวกลางที่ได้จากขั้นแรก เป็นสารเคมีที่มีคุณค่าหรือมีศักยภาพ เช่น แอลกอฮอล์, กรดต่างๆ, และ platform chemical (กรดลิวลินิก, กรดแลคติก, สารประกอบฟีนอลิก)

โดยกระบวนการที่ใช้จะแตกต่างกัน เช่น การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี (thermochemical process) เช่น การแปรสภาพเป็นแก๊ส (gasification), การแปรสภาพเป็นของเหลว (liquefaction) เป็นต้น หรือ กระบวนการทางชีวเคมี (biochemical processes) เช่น การหมัก (fermentation) เป็นต้น

(3) การแปรรูปสารเคมีที่ได้เป็นวัสดุหรือสารเคมีเพิ่มมูลค่า เช่น การแปรรูปกรดลิวลินิกเป็นกรดไดฟีนอลิก เพื่อใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น



รูป 17 แนวคิด Lignocellulosic feedstock biorefinery (Kamm และ Kamm, 2004)

การผลิตสารเคมีจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส พบสารเคมีกว่า 300 ชนิด ที่สามารถผลิตได้จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส กลุ่มวิจัยจาก National Renewable Energy Laboratory (2004) ประเทศสหรัฐอเมริกา ศึกษาศักยภาพของสารเคมีที่ได้จากวัสดุลิกโนเซลลูโลสและคัดเลือกออกมา 12 รายการ ที่ถือว่าเป็นสารเคมีที่มีคุณค่าหรือมีศักยภาพ สามารถนำไปพัฒนาเป็นสารเคมีที่มีมูลค่าเพิ่มและวัสดุพอลิเมอร์ต่อไป (Energy, 2010) สารเคมีที่ ทั้ง 12 รายการ ประกอบด้วย

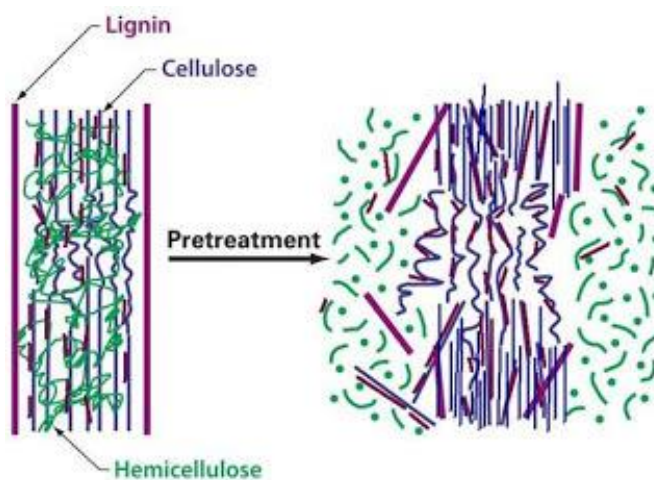
- (1) กรดซัคซินิก, กรดฟูมาริก และกรดมาลิก (1,4 succinic, fumaric and malic acid )
- (2) กรดฟูแรน ไดคาร์บอกซิลิก (2,5 furan dicarboxylic acid)

- (3) กรดไฮดรอกซี โพรพิโอนิก (3 hydroxy propionic acid)
- (4) กรดแอสพาทิก (aspartic acid)
- (5) กรดกลูคาร์คิก (glucaric acid)
- (6) กรดกลูตามิก (glutamic acid)
- (7) กรดอิทาโคนิก (itaconic acid)
- (8) กรดลิวูลินิก (levulinic acid)
- (9) ไฮดรอกซีบิวทิโรแลคโตน (3-hydroxybutyrolactone)
- (10) กลีเซอรอล (glycerol)
- (11) ซอร์บิทอล (sorbital)
- (12) ซิลิทอลและอะราบิทอล (xylitol and arabinital)

ในบรรดาสารเคมีที่มีคุณค่าหรือมีศักยภาพ ทั้ง 12 สารเคมีข้างต้น กรดลิวูลินิกเป็นหนึ่งในสารเคมีที่จัดอยู่ในสารเคมีที่มีคุณค่าหรือมีศักยภาพที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง (Mukherjee, Dumont และ Raghavan, 2015)

## 2.5 การปรับสภาพ (Pretreatment)

การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลส เป็นการเปลี่ยนและกำจัดโครงสร้างขององค์ประกอบต่างๆ ที่เป็นสิ่งกีดขวางต่อการย่อยสลายเซลลูโลส ซึ่งอาจส่งผลต่อขั้นตอนการย่อยสลายหรืออาจทำให้เกิดอนุพันธ์ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพเพื่อกำจัดเอมิเซลลูโลสและลิกนิน ลดโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Blanch, Simmons และ Klein-Marcuschamer, 2011)



รูป 18 การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Blanch, Simmons และ Klein-Marcuschamer, 2011)

การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสแบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้

**2.5.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (physical pretreatment)** เป็นการปรับสภาพเพื่อลดขนาดของวัสดุ เพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการทำปฏิกิริยา การปรับสภาพทางกายภาพ ได้แก่ (1) การบด, การตัด (grinding, cutting) เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุด และควรใช้ร่วมกับการปรับสภาพอื่นๆ (2) การใช้รังสี (irradiation) เช่น รังสีแกมมา ( $\gamma$ -ray), รังสีไมโครเวฟ (microwave ray), อิเล็กตรอน (electron beam) ซึ่งรังสีเหล่านี้จะมีผลทำลายการยึดพันธะระหว่างลิกนินกับเซลลูโลส (3) การใช้ความร้อนและแรงดัน (heat and pressure) ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุ (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น Cao และคณะ ปรับสภาพขานข้าวฟ่างหวาน (sweet sorghum bagasse) ด้วยวิธีการตัด และการบดให้มีขนาด 40 เมช (mesh) แล้วนำไปปรับสภาพต่อด้วยการใช้ความร้อนและแรงดัน ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 49.78 % เป็น 54.40 % (8.50 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 27.82 % เป็น 22.44 % (19.34 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และลดสัดส่วนของลิกนินจาก 10.83 % เป็น 10.71 % (1.11 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) (Cao และคณะ, 2012) นอกจากการนั้น การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางกายภาพมักถูกใช้ร่วมกับการปรับสภาพอื่นๆ เช่น Salehian และคณะ ปรับสภาพเนื้อไม้สน ด้วยการตัดและการบด ให้มีขนาดเนื้อไม้สน 20 เมช ก่อนนำไปปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 38.20 % เป็น 46.80 % (22.51 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 8.50 % เป็น 7.90 % (7.06 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และลดสัดส่วนของลิกนินจาก 29.50 % เป็น 23.60 % (20.00 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) (Salehian และคณะ, 2013)

**2.5.2 การปรับสภาพทางเคมี (chemical pretreatment)** เป็นการเพิ่มการย่อยสลายเซลลูโลส โดยการกำจัดลิกนิน และ/หรือ เฮมิเซลลูโลส, ลดค่าดีกรีของการเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP), ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส (crystallinity of the cellulose) การปรับสภาพทางเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ (1) การใช้กรด (acid pretreatment) มักถูกใช้ในความเข้มข้นต่ำ มีผลต่อการย่อยเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น น้ำตาลไซโลส (xylose) สารละลายกรดที่นิยมใช้ เช่น กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ), กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ), กรดไนตริก ( $HNO_3$ ) เป็นต้น (2) การใช้ด่าง (alkali pretreatment) มีผลต่อการกำจัดลิกนิน โดยการทำลายส่วนของเอสเทอร์และไกลโคซิดิก (ester and glycosidic side chain) ของลิกนิน และเพิ่มความเป็นรู

พอรุน เพิ่มพื้นที่ผิวภายในของวัสดุ และลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส สารละลายต่างที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca<sub>2</sub>OH), แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) เป็นต้น (3) การใช้สารละลายอินทรีย์ (organosolv pretreatment) จะใช้สารละลาย organic หรือ aqueous solvents ซึ่งมีผลต่อการกำจัดลิกนิน สารละลายที่ใช้ เช่น เอทานอล (ethanol), เมทานอล (methanol), เอทีลีนไกลคอล (ethylene glycol), อะซิโตน (acetone), กลีเซอรอล (glycerol) เป็นต้น (4) การกำจัดลิกนินด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative delignification) เป็นกระบวนการกำจัดลิกนินโดยอาศัยเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase enzyme) ซึ่งพบในสารเคมี เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เป็นต้น (5) สารละลายไอออนิก (ionic liquids, ILs) มีผลต่อการกำจัดลิกนิน และสารประกอบคาร์โบไฮเดรต (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการปรับสภาพวัสดุลิกนินเซลลูโลสด้วยวิธีทางเคมี เช่น Zhu และคณะ ปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 % ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 70 นาที พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 51.40 % เป็น 65.40 % (27.24 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 20.10 % เหลือ 14.30 % (28.86 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และลดสัดส่วนของลิกนินจาก 9.40 % เหลือ 6.00 % (36.17 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) (Zhu และคณะ, 2005), และ Cao และคณะ ปรับสภาพฟางข้าวฟางหวาน ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 2 ชั่วโมง และฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 49.78 % เป็น 72.45 % (45.54 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 27.82 % เป็น 17.52 % (37.02 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และลดสัดส่วนของลิกนินจาก 10.83 % เป็น 2.29 % (78.86 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) (Cao และคณะ, 2012) อย่างไรก็ตาม การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี มักใช้ร่วมกับความร้อน เช่น Li และคณะ ปรับสภาพหญ้า ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1.2 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 39.50 % เป็น 50.40 % (27.59 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 20.30 % เหลือ 4.40 % (78.33 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) แต่ไม่สามารถลดสัดส่วนของลิกนินได้ (Li และคณะ, 2010)

**2.5.3 การปรับสภาพทางเคมีกายภาพ (physicochemical pretreatment)** เป็นการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับสารเคมี ได้แก่ (1) steam explosion เป็นการใช้แรงดันสูง ทำให้เกิดการบิบัติของวัสดุ มีผลต่อการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส และเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนิน (2)

ammonia fiber explosion (AFEX) เป็นการปรับสภาพด้วยการใช้สารละลายแอมโมเนียที่ความดันและอุณหภูมิ มีผลต่อการลดโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส, กำจัดกลุ่มอะซิทิลในเฮมิเซลลูโลส, ทำลายพันธะ ligninecarbohydrate complex (LCC) ที่เชื่อมระหว่างคาร์โบไฮเดรตกับลิกนิน, และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยา (3) microwave-chemical pretreatment เป็นการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ, ทำลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน, และเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัตถุดิบ เนื่องจากมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงส่งผลให้เพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยา (Zhu และคณะ, 2005) (4) liquid-hot water pretreatment เป็นการใช้ความดันและความร้อนสูง มีผลต่อการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้น้ำตาล (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางเคมีกายภาพหลายวิธี อาทิเช่น Zhu และคณะ ปรับสภาพฟางข้าว (rice straw) ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 % ที่ภาวะกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ เวลา 70 นาที พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 51.4 % เป็น 69.3 % (34.82 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 20.1 % เหลือ 10.3 % (48.76 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และลดสัดส่วนของลิกนินจาก 9.4 % เหลือ 5.0 % (46.80 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) (Zhu และคณะ, 2005), และ Cao และคณะ ปรับสภาพขานข้าวฟางหวาน ด้วยการใช้แรงดันและความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 % ที่ภาวะอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และตามด้วยการกำจัดลิกนินด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 5 % ที่ภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสจาก 49.78 % เป็น 82.08 % (64.89 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสจาก 27.27 % เหลือ 9.45 % (65.35 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และลดสัดส่วนของลิกนินจาก 10.87 % เหลือ 0.97 % (91.08 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) (Cao และคณะ, 2012)

**2.5.4 การปรับสภาพทางชีวภาพ (biological pretreatment)** เป็นการใช้เชื้อจุลินทรีย์บางชนิด เช่น ราเนาขาว (white rot fungi) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนโครงสร้าง และย่อยสลายลิกนิน เชื้อราที่ถูกนำมาใช้ อาทิเช่น เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium*, *Phanerochaete sordida*, *Ceriporiopsis subvermispota*, *Phlebia subserialis*, *Pleurotus ostreatus* และ *Trametes versicolor* เป็นต้น (Tian, Fang และ Guo, 2012) เชื้อราดังกล่าวสามารถสร้างเอนไซม์กลุ่มลิกโนไลติก (ligninolytic enzyme) ที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้ เอนไซม์ในกลุ่มนี้ประกอบด้วยเอนไซม์ย่อย 3 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (Lignin peroxidase, LiP),

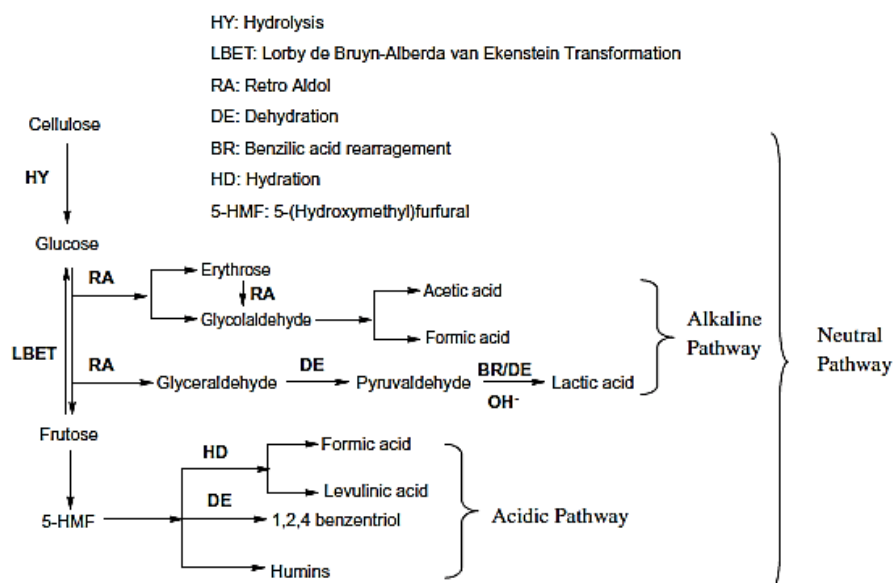
เอนไซม์แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (Manganese peroxidase, MnP), และเอนไซม์แลคเคส (laccase) (Tuor, Winterhalter และ Fiechter, 1995) อย่างไรก็ตาม เชื้อราแต่ละชนิดสามารถสร้างเอนไซม์ในกลุ่มลิกนินโกลติกได้แตกต่างกัน เช่น *P. chrysosporium* สามารถสร้างเอนไซม์ LiP และ MnP เป็นส่วนใหญ่, *P. sordida* สามารถสร้างเอนไซม์ LiP และ Laccase เป็นส่วนใหญ่, และ *T. versicolor* สามารถสร้างเอนไซม์ได้ทั้ง 3 ชนิด เป็นต้น (Harvey และ Thurston, 2001; Borazjani, Wiltcher และ Diehl, 2005) การปรับปรุงสภาพทางชีวภาพ มีข้อดี คือ ไม่ใช้สารเคมี, ใช้พลังงานต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลานานในการปรับปรุงสภาพ (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการปรับปรุงสภาพวัสดุลิกนินเซลลูโลสด้วยวิธีทางชีวภาพ อาทิเช่น Shi และคณะ ปรับปรุงสภาพต้นฝ้าย (cotton stalks) ด้วยการใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* เป็นเวลา 14 วัน สามารถลดลิกนินได้ 35.53 % จากลิกนินที่พบในต้นฝ้าย (Shi, Chinn และ Sharma-Shivappa, 2008), Bak และคณะ ปรับปรุงสภาพฟางข้าว ด้วยการใช้เชื้อรา *P. chrysosporium* เป็นเวลา 15 วัน สามารถลดลิกนินได้ 21 % จากลิกนินที่พบในฟางข้าว (Bak และคณะ, 2009), Nazarpour และคณะ ปรับปรุงสภาพไม้ยางพารา (rubber wood) ด้วยการใช้เชื้อรา 2 ชนิด ได้แก่ *C. subvermispota* และ *T. versicolor* เป็นเวลา 90 วัน พบว่า เชื้อรา *C. subvermispota* สามารถลดปริมาณลิกนินสูงสุดที่ 45.06 % จากปริมาณลิกนินที่พบในไม้ยางพารา และที่ *T. versicolor* สามารถลดปริมาณลิกนินสูงสุดที่ 34.40 % จากปริมาณลิกนินที่พบในไม้ยางพารา (Nazarpour และคณะ, 2013), และ Senesrisakul และคณะ ปรับปรุงสภาพซังข้าวโพด ด้วยเชื้อรา *P. sordida* สายพันธุ์ SK7 เป็นเวลา 20 วัน สามารถลดลิกนินได้ 17.58 % จากลิกนินที่พบในซังข้าวโพด (Senesrisakul, Gulari และ Chavadej, 2014)

## 2.6 ไฮโดรเทอร์โมไลซิส (Hydrothermolysis)

ไฮโดรเทอร์โมไลซิส เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งหรือแก๊สเป็นของเหลว (liquefaction) ที่ใช้ในการเปลี่ยนสารประกอบชีวมวลพืชเป็นสารเคมี ภายใต้ความร้อนและความดันสูง โดยมีน้ำเป็นสารตัวกลางที่จะทำให้ระบบเหมาะสมกับสารละลาย วิธีของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์โมไลซิสของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตเพื่อเปลี่ยนเป็นสารเคมีจะแตกต่างกันตามสภาวะของระบบ ดังนี้ ในสภาวะกรด (acidic condition) สารหลักที่ถูกเปลี่ยนจากสารประกอบคาร์โบไฮเดรต คือ 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) และ กรดลิวูลินิก, สภาวะด่าง (alkali condition) สารหลัก คือ กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) เช่น กรดแลคติก (lactic acid), กรดอะซิติก (acetic acid), และ สภาวะกลาง (neutral condition) สารหลักจะถูกเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ของทั้ง 2 สภาวะ ขึ้นอยู่

กับการแตกตัวของน้ำ ( $H_2O$ ) เป็น ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ที่อุณหภูมิสูง (Yin และ Tan, 2012) ดังรูป 19



รูป 19 วิธีของกระบวนการไฮโดรเทอร์โมไลซิสของเซลลูโลส (Yin และ Tan, 2012)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการสังเคราะห์สารจากสารประกอบคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์โมไลซิส เช่น Yin และ Tan (2012) สังเคราะห์สารจากเซลลูโลส ภายใต้ภาวะกรด (pH 3) ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก, ภาวะกลาง (pH 7) และภาวะด่าง (pH 14) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ภาวะอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 3000 psig พบว่า ที่ภาวะกรด เกิดสารหลัก ได้แก่ HMF, กรดลิวูลินิก และกรดอะซิติก, ภาวะกลาง เกิดสารหลัก ได้แก่ HMF และสารกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (กรดแลกติก, กรดโพพรีโอนิก, กรดไฮโซบิวทีริก) และสภาวะด่าง เกิดสารหลัก ได้แก่ สารกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (กรดแลกติก, กรดอะซิติก, กรดบิวทีริก และกรดกรดคาร์โปอิก) และได้ไฮดรอกซิลอะซีโตน (Yin และ Tan, 2012) นอกจากนี้ Suacharoen และ Tungasmita (2012) สังเคราะห์สารจากสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลซูโครส และแป้ง ภายใต้ภาวะที่เป็นกรด ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) ได้แก่ ซีเอสเอ็ม-5 (ZSM-5) และ อะลูมิเนียม-เอสบีเอ-15 (Al-SBA-15) ที่ภาวะอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ความดันของแก๊สไนโตรเจน 10 บาร์ พบสารหลักที่เกิดขึ้น ได้แก่ กรดลิวูลินิก, 3-methyl-2-cyclopentenone, 4-propoxyphenol และ 3-hydroxyacetophenone เป็นต้น (Suacharoen และ Tungasmita, 2013)



## 2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical catalyst) (Hagen, 1999)

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี คือสารที่เปลี่ยนความเร็วของปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรในปฏิกิริยา เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมา ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

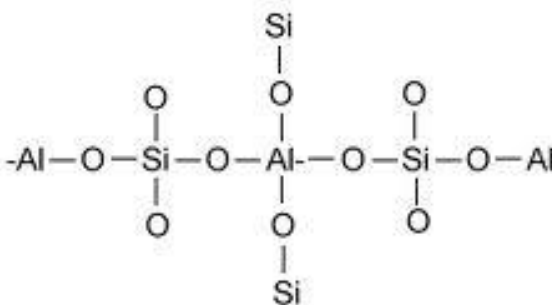
(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคเหมือนกับสารตั้งต้น หรือสามารถละลายอยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้นได้ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยากรด (acid catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาเบส (base catalyst) ในสารละลายน้ำ เช่น กรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีข้อดี คือ สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ และลดปัญหาการสลายตัวของผลผลิตเนื่องจากปฏิกิริยาอยู่ในภาวะปกติเช่น ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่แพง แต่มีข้อเสียข้อเสีย คือ แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลผลิตได้ยาก เนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) หมายถึงตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคต่างจากสารตั้งต้น มักเป็นของแข็ง มีพื้นที่ผิวและการกระจายตัวของอนุภาคสูงอยู่บนตัวรองรับที่มีความเสถียรสูง ทนต่อสารเคมีและความร้อน การทำงานโดยใช้กลไกการดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) ซึ่งตัวทำปฏิกิริยาจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณตำแหน่งกัมมันต์ (active site) และเกิดปฏิกิริยา ผลผลิตที่เกิดขึ้นจะถูกคายออกจากตำแหน่งกัมมันต์เพื่อให้ตัวทำปฏิกิริยาเข้ามาดูดซับบนพื้นผิวแล้วเกิดปฏิกิริยาต่อไป มีข้อดี คือ เนื่องจากตัวมีลักษณะเป็นของแข็ง จึงสามารถแยกออกจากสารตั้งต้นและผลผลิตได้ง่าย แต่ข้อเสีย คือ ความจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยาจะน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ แต่ในอุตสาหกรรมมักจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มากกว่า เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นและผลผลิต

นอกจากนั้นปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ยังสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะความขนาดของรูพรุนได้ 3 ประเภท ดังนี้

(1) วัสดุรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (microporous materials) มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 20 อังสตรอม ( $\text{Å}$ ) วัสดุกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดี คือ ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicates) ประกอบด้วยอะตอมซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) โดยสร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) อะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมจะอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้าจะเชื่อมต่อกันที่ออกซิเจน เกิดโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น และเกิดเป็นช่องว่างระหว่าง

โมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะเกาะอยู่อย่างหลวมๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก



รูป 20 โครงสร้างซีโอไลต์ (Hagen, 1999)

ซีโอไลต์ มีหลายชนิด ทั้งที่อยู่ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปแร่ เช่น แรมมอร์ดีไนต์ (mordenite) และแร่อฟาไซต์ (faujasite) หรือ ซีโอไลต์สังเคราะห์ เช่น ซีโอไลต์ชนิด A, X, Y และ ZSM-5 ซึ่งซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ประกอบด้วยอัตราส่วนของซิลิกาสูงและอะลูมิเนียมต่ำ เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก มีความพรุนสูง และมีขนาดของรูพรุนที่สม่ำเสมอ สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและคัดแยกโมเลกุลได้

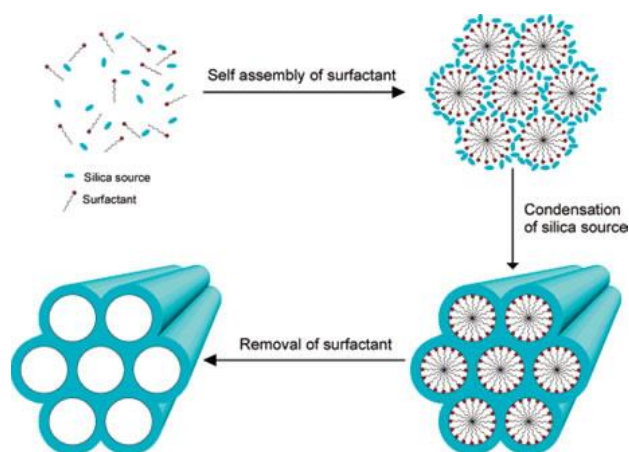
(2) วัสดุรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (mesoporous materials) มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 20-500 อังสตรอม มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงถึง 700-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากวัสดุมีการกระจายขนาดของรูพรุนแคบ และรูพรุนมีความเป็นระเบียบสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ และตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุรูพรุนขนาดเมโซพอร์ที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และ SBA-15 เป็นต้น

ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ประกอบด้วยโครงสร้างรูพรุนแบบหกเหลี่ยมที่เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ การกระจายตัวของรูพรุนในช่วงที่แคบ รูพรุนมีขนาด 20-100 อังสตรอม มีค่าพื้นที่ผิวที่จำเพาะสูงที่มากกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีสมบัติทนความร้อนได้ดี

ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด SBA-15 ประกอบด้วยโครงสร้างรูพรุนแบบหกเหลี่ยมเดียวกับชนิด MCM-41 แต่รูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าที่ขนาด 46-300 อังสตรอม มีค่าพื้นที่ผิวที่จำเพาะสูงที่ 690 – 1,040 ตารางเมตรต่อกรัม และมีสมบัติทนความร้อนได้ดีเช่นกัน

การเกิดโครงสร้างรูพรุนแบบหกเหลี่ยมที่เรียงตัวขนาน เกิดจากซิลิกาที่เติมลงไปรอบๆ แห่งไมเซลล์ (micelle) ที่จัดเรียงตัวกันเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) โดยเกิดไฮโดรไลซิสคอนเดน-

เซชัน (hydrolysis condensation) และพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) รอบๆ ไมเซลล์ เมื่อกำจัดไมเซลล์ออกจะเกิดรูพรุนดังกล่าว



รูป 21 การเกิดโครงสร้างรูพรุนแบบหกเหลี่ยม (hexagonal)

(3) วัสดุรูพรุนขนาดมาโครพอร์ (macropores) มีรูพรุนขนาดใหญ่ มากกว่า 500 อังสตรอม ขึ้นไป เป็นวัสดุที่ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากไม่ได้มีส่วนช่วยโดยตรงต่อการเพิ่ม ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุรูพรุนรวมถึงการมีขนาด ความกว้างของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโมเลกุลทั่วไปมาก จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ไม่มีอิทธิพลภายในรูพรุนเหล่านี้ นอกจากนี้สารตั้งต้นที่นำมาใช้สังเคราะห์มีราคาสูง และใช้พลังงานสูงในการผลิต

## 2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

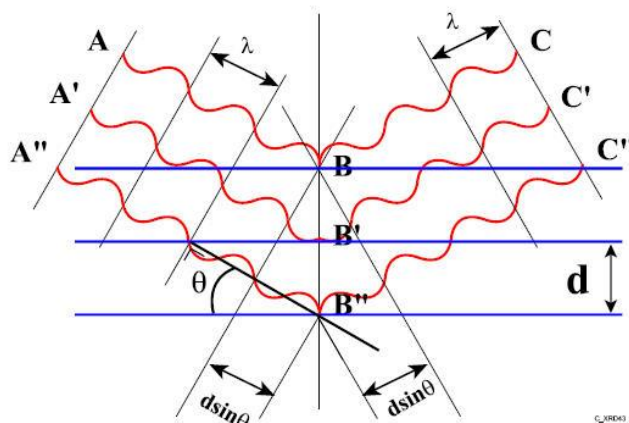
2.8.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) (Soler-Illia และคณะ, 2002)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ตามหลักการของ Bragg's law หรือ

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ตัวตรวจวัดรับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่าง และศึกษารายละเอียดโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยในผลึกของแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ (unit cell) ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ นอกจากนี้ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยังสามารถคำนวณหาปริมาณของ

องค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, ขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์, และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย



รูป 22 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุวัสดุรูพรุนขนาดเมโซพอร์ได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal symmetry) จะแสดง การสะท้อนของระนาบ จำนวน 5 พีค (100, 110, 200, 210, และ 300) ที่สอดคล้องกับระนาบผลึก (lattice plane) ของดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) โดยกราฟการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลจะปรากฏอยู่ในช่วงมุมต่ำ (low angle) ที่ 2-theta ระหว่าง 0.5-3 (Suacharoen และ Tungasmita, 2013)

### 2.8.2 การวิเคราะห์การดูดซับและการปล่อยของแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption technique) (Sing, 2001)

การดูดซับและการปล่อยของแก๊สไนโตรเจน เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบความเป็นรูพรุนของวัสดุ รวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิว, ขนาดของรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนของวัสดุ ซึ่งการดูดซับโดยแก๊สจะถูกแสดงผลในรูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งจำแนกชนิดของไอโซเทอร์มเป็น 6 ชนิด (รูปที่ 23) ซึ่งชื่อที่เรียกเป็นไปตาม IUPAC ได้แก่

ชนิดที่ 1 (Type I) ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (langmuir isotherm) สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว ไอโซเทอร์มแบบนี้มักพบในวัสดุที่มีความพรุน ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ ดังรูป 23

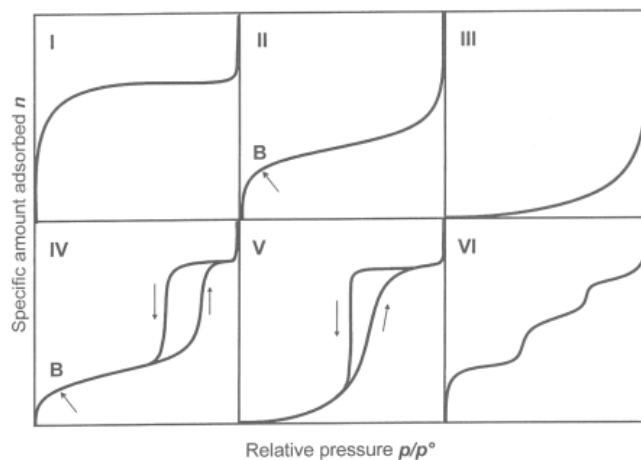
ชนิดที่ 2 (Type II) ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-Shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มี ความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียว แล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังรูป 23

ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้ว จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจาก อันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้ว หลังจากผิวหน้า ถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมี สูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์ ดังรูป 23

ชนิดที่ 4 (Type IV) มักพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ คือมีขนาดของรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกซึ่งมีค่า  $P/P_0$  ต่ำ แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อค่า  $P/P_0$  มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบกะปิลลารี ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิสที่เกิด จากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่าเพราะ ต้องเอาชนะแรงกะปิลลารี (capillary force) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรู พรุนได้ ดังรูป 23

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนกับชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้น เมื่อค่า  $P/P_0$  สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ ฮิสเทอรีซิสจาก การดูดซับและการคายเกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ดังรูป 23

ชนิดที่ 6 (Type VI) เรียกว่าเป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) เกิดจาก การดูดซับทีละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟจะขึ้นกับ อุณหภูมิ ดังรูป 23



รูป 23 การจำแนกชนิดของไอโซเทอร์มตาม IUPAC (Brunauer, Emmett และ Teller, 1938)

Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ ( $W$ ) กับความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการที่ เรียกว่า สมการของ BET ได้ดังนี้ (Brunauer, Emmett และ Teller, 1938)

$$\frac{1}{W\left(\frac{P_0}{P} - 1\right)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} (P/P_0)$$

โดย  $W$  = ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ ความดันสัมพัทธ์  $P/P_0$   
 $W_m$  = ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสาร  
 $P$  = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะทำการทดลอง (มิลลิเมตรปรอท)  
 $P_0$  = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิเมตรปรอท)

### 2.8.3 การวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance spectra, NMR) (Bovey, Mirau และ Gutowsky, 1988)

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ เป็นกระบวนการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของนิวเคลียสในสนามแม่เหล็กภายนอก สามารถใช้ในการระบุบุโครงสร้างของสาร, วัดอัตราส่วนของสารในสารผสม และระบุตำแหน่งของอะตอมในโมเลกุล เช่น ซีไอโลด์ และสารประกอบกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกต เป็นต้น ซึ่งการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีพลังงานอยู่ในช่วงที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสปิน (spin) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของนิวเคลียสแต่ละชนิด ซึ่งนิวเคลียสที่สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้จะต้องไม่มีค่าสปินไม่เท่ากับ 0 เช่น  $^1\text{H}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{205}\text{Tl}$  เป็นต้น (ตารางที่ 2)

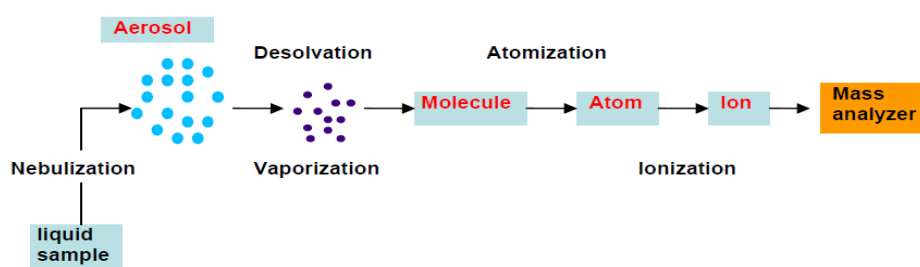
การดูดกลืนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของนิวเคลียสในโมเลกุลสารตัวอย่างซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก การดูดกลืนพลังงานเกิดขึ้นจากนิวเคลียสของอะตอมมีการแยกออกเป็นระดับชั้นพลังงานสูงและต่ำ เมื่อวางอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก ตัวอย่างเช่น โพรตอน (เทคนิค  $^1\text{H-NMR}$ ) จะมีการแยกออกเป็น 2 ชั้น คือ ระดับพลังงานที่ต่ำ ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสหรือโปรตอนที่เรียงตัวขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก (aligned orientation) และระดับพลังงานที่สูงกว่า ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสที่เรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก (opposed orientation) นิวเคลียสที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าจะดูดกลืนพลังงานและย้ายขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ ZEEMAN splitting) ซึ่งความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานทั้ง 2 ( $\Delta E$ ) จะมีค่าตรงกับความถี่ในช่วงของคลื่นวิทยุ ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่เรียกว่า nuclear magnetic resonance และค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนจะถูกตรวจวัดได้

ตาราง 2 นิวเคลียสที่สามารถดูตกสลับแม่เหล็กไฟฟ้า

ไอโซโทป (Isotope)	สปิน Spin	ปริมาณที่พบในธรรมชาติ (Natural abundance) (%)
$^1\text{H}$	1/2	99.98
$^{23}\text{Na}$	3/2	100
$^{27}\text{Al}$	5/2	100
$^{29}\text{Si}$	1/2	4.70
$^{129}\text{Xe}$	1/2	26.44
$^{205}\text{Tl}$	1/2	70.50

#### 2.8.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนธาตุ Si/Al ด้วยเทคนิค inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) (Montaser, 1998)

Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) เป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุ (elemental analysis) โดยหลักการของอะตอมมิสเปกโทรสโกปี (atomic spectroscopy) โดยอาศัยการคายพลังงานของอะตอม (atomic emission) การวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS เป็นการนำพลังงานจากพลาสมาในการยิงอิเล็กตรอนให้หลุดจากวงแหวนชั้นนอกของอะตอม ทำให้เกิดไอออนประจุบวกของสารตัวอย่าง ไอออนนี้จะถูกแยกและวัดด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวอย่าง การทำงานของ ICP-MS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ (1) ICP เป็นแหล่งกำเนิดการกระตุ้นอุณหภูมิสูง ที่เกิดกระบวนการกำจัดตัวทำละลาย (desolvation) ออกจากสารละลายตัวอย่าง และระเหยสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปไอ (vaporization) ซึ่งไอของโมเลกุลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นอะตอม (atomization) แล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และ (2) MS เป็นเครื่องตรวจวัดไอออนของตัวอย่างที่เกิดขึ้น โดยการตรวจวัดไอโซโทป (isotopes) ของธาตุตามอัตราส่วนของมวลต่อประจุ (mass-to-charge ratio,  $m/e$ ) ดังรูป 24



รูป 24 กระบวนการของการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS

## 2.9 การวิเคราะห์ปริมาณของผลผลิตกรดสีวลินิก

### 2.9.1 เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ชนิดตัวตรวจวัดเฟรมไอออไนเซชัน (Gas Chromatograph- Flame Ionization detector) (Jorgensen, Picel และ Stamoudis, 1990)

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคการแยกสารซึ่งสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ เช่น alkane, alcohol, fatty acid, industrial solvents, PAHs เป็นต้น โดยเปลี่ยนสารผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง แล้วให้ไอของสารเหล่านั้นผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเฟสคงที่ (stationary phase) โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) หรือ แก๊สตัวพา (carrier gas) องค์ประกอบของสารผสมที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่และการกระจายตัวผ่านเฟสคงที่ต่างกันจะแยกออกจากกัน โดยตัวตรวจวัดชนิด flame ionization (FID) เป็นตัวตรวจวัดที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สารอินทรีย์โดยทั่วไป มีความไวสูง โดยสารที่ถูกแยกที่เดินทางออกจากคอลัมน์จะถูกเผาไหม้ ภายใต้เปลวไฟของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และแก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) เกิดการไอออไนซ์ขึ้นและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะวิ่งเข้าสู่อิเล็กโทรด (electrode) ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและถูกบันทึกสัญญาณเป็นโครมาโตแกรม (chromatogram) ออกมา

### 2.9.2 เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC-MS) (Itoi, 1998)

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ เป็นเทคนิคที่ใช้ทำนายชนิดขององค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในสารประกอบ โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับลายพิมพ์ (fingerprint) ของเลขมวล (mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ใน ซึ่งเทคนิคนี้ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และส่วนของเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer) ซึ่งเทคนิค 2 เทคนิคที่มารวมกันสามารถวิเคราะห์สารผสมที่สามารถระเหยได้ในอุณหภูมิไม่สูงนัก โดยที่แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นส่วนที่แยกสารสารผสมออกจากกัน ในขณะที่ส่วนแมสสเปกโตรมิเตอร์ เป็นส่วนที่การวิเคราะห์ชนิดของสารหรือองค์ประกอบของสาร



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ	บริษัท
1. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง	Sartorius
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	Mettler Toledo
3. เครื่องบด	-
4. เครื่องบดละเอียด	Moulinex
5. ตระแกรงร่อน	-
6. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง	Mettler Toledo
7. เครื่องวัดความชื้น รุ่น KettFD-600	Kett Electric Laboratory
8. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ	Clifton
9. เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์	Omni
10. ตู้ปัมเชื้อแบบควบคุมอุณหภูมิ	Memmert
11. ตู้อบความร้อนสูง	Memmert
12. เตาเผาถ้ำ	Lenton furnaces
13. ตู้เขี่ยเชื้อแบบ Laminar flow รุ่น BV 123	ZISSOC
14. เครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูง	All American
15. เครื่องไมโครเวฟ	Electrolux
16. X-ray powder diffractometer (XRD)	Rigaku D/MAX-2200 Ultima
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	SEM(JSM-6610) HV/LV
18. nuclear magnetic resonance spectra	UNITYINOVA Varian 500 MHz NMR spectrometer
19. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)	Varian CP3800 gas chromatograph (GC)
20. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์	Agilent model GC: 6890 N - MSD: 5973 N
21. เครื่องปฏิกรณ์ความดัน (Parr reactor)	-

22. เครื่องระเหยกลายเป็นไอ (Evapulator)

Eyela

23. เครื่องเผาเพื่อไล่น้ำ (calcine)

Lenton furnaces

### 3.2. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

#### สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
2. กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
4. ผงวุ้น (agar)
5. มอลต์สกัด (malt extract)
6. เปปโตน (peptone)
7. กลูโคส (glucose)
8. น้ำแช่ข้าวโพด (corn steep liquor)
9. โซเดียมลอริลซัลเฟต (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>11</sub>OSO<sub>3</sub>Na)
10. ไดโซเดียมเอธิลีนไดอะมีนเตตระอะซิเตต (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)
11. โซเดียมบอเรตเตตระไฮเดรต (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O)
12. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)
13. 2-อีทอกซีเอทานอล (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>)
14. โซเดียมซัลไฟด์ (Na<sub>2</sub>S)
15. เตตระไฮโดรเนพทาลีน (C<sub>10</sub>H<sub>18</sub>)
16. อะซีโตน (acetone)
17. ซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C<sub>19</sub>H<sub>42</sub>BrN)
18. เอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>6</sub>)
19. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO<sub>4</sub>)
20. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
21. เฟอร์ริกไนเตรตนาโนไฮเดรต (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O)
22. ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO<sub>3</sub>)
23. โพแทสเซียมอะซิเตต (CH<sub>3</sub>COOK)
24. กรดอะซิติก, เกรเซียล (CH<sub>3</sub>COOH)
25. เตอร์เทียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ((CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>COH)

#### บริษัท

- Ajax Finechem Pty Ltd
- J.T. Bake
- Fisher Scientific UK
- Sigma
- Himedia
- Himedia
- Sigma
- Sigma
- Ajax Finechem Pty Ltd
- Mallinckrodt  
biotechnology
- Ajax Finechem Pty Ltd
- Ajax Finechem Pty Ltd
- Merck
- Scharlau
- Fluka
- Merck
- Ajax Finechem Pty Ltd
- Fisher
- Cralo Erba
- Cralo Erba
- APS
- Merck
- Scharlau
- Merck
- APS

26. กรดออกซาลิกดีไฮเดรต ( $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ )	Cralo Erba
27. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	Ajax Finechem Pty Ltd
28. เซลลูโลสทางการค้า	Sigma
29. พลูโรนิค. P123 (pluronic P123)	Aldrich
30. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ( $Si(OC_2H_5)_4$ )	Fluka
31. โซเดียมอะลูมิเนต ( $NaAlO_2$ )	Riedel-deHaen
32. ซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5	Sigma
33. ไดคลอโรมีเทน ( $CH_2Cl_2$ )	OReC
34. แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ )	Thai Industrial Gases

### 3.3 วิธีการดำเนินงาน

#### 3.3.1. เก็บตัวอย่างเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

เก็บตัวอย่างไมยราบยักษ์ จากพื้นที่อำเภอหันคา จังหวัดชัยนาท โดยใช้เฉพาะส่วนลำต้น และกิ่ง นำตัวอย่างพืชมาอบให้แห้งในตู้อบความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 วัน

นำตัวอย่างพืชมาผ่านกระบวนการบดแบบละเอียด แล้วนำมาร่อนผ่านตระแกรงอะลูมิเนียม ขนาด 1 มิลลิเมตร (ประมาณ 20 mesh) เพื่อใช้ในการปรับสภาพในขั้นตอนต่อไป และหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพืชเริ่มต้น ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า (Goering และ Van Soest, 1970)

#### 3.3.2. ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ จะใช้วิธีการปรับสภาพ 3 วิธี ได้แก่

3.3.2.1 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี (Sun และ Cheng, 2005; Xu และคณะ, 2011; Binod และคณะ, 2012; Cao และคณะ, 2012)

นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดละเอียด ปริมาณ 3 กรัม ผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ 2 ชนิด ได้แก่ (1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) หรือ (2) สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ในปริมาณ 60 กรัม (อัตราส่วนของตัวอย่างพืช : สารละลายเท่ากับ 1: 20) นำไปปรับสภาพร่วมกับวิธีทางกายภาพ 2 วิธี ได้แก่

(1) การใช้ความร้อนร่วมกับแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลา 1 ชั่วโมง

(2) การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ เวลา 10 นาที

จากนั้น นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการปรับสภาพมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีภาวะเป็นกลาง (pH 7) นำไปอบในตู้อบความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างน้ำหนักคงที่ (เวลา 2-3 วัน) แล้วนำตัวอย่างพืชที่ผ่านการปรับสภาพมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณสุทธิหลังการปรับสภาพ

นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการปรับสภาพมาฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการฟอกมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีภาวะเป็นกลาง (pH 7) นำไปอบในตู้อบความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างน้ำหนักคงที่ (เวลา 2-3 วัน) แล้วนำตัวอย่างพืชที่ผ่านการฟอกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณสุทธิหลังการปรับสภาพ

3.3.2.2 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ ด้วยการใช้เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7

การเตรียมหัวเชื้อรา โดยการเลี้ยงเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 (คัดแยกจากห้องปฏิบัติการการใช้ประโยชน์จากชีวมวลพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ในอาหารสูตร MEA (malt extract peptone agar) ที่อุณหภูมิห้อง จนเส้นใยราเจริญเกือบเต็มจานเพาะเลี้ยง (ประมาณ 3-5 วัน) ใช้คอร์กบอเรียร์ขนาด 1 เซนติเมตร เจาะรบนอาหารวุ้นจำนวน 20 ชิ้นวุ้นใส่ในอาหาร MEB (malt extract peptone broth) เลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน ที่ภาวะนิ่ง แล้วจึงนำเส้นใยราที่ได้ไปปั่นด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ที่ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที นำหัวเชื้อรามาบ่มกับเนื้อไม้ไมยราบยักษ์บดละเอียด ตามวิธีดัดแปลงจาก Vicentim และ Ferraz (2007) โดยใช้เนื้อไม้ไมยราบยักษ์น้ำหนักแห้ง 3 กรัม บ่มในพลาสติกขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำแช่ข้าวโพด (corn steep liquor) 0.5 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ของน้ำหนักแห้งของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ปรับความชื้นโดยการเติมน้ำกลั่นที่ 6 มิลลิลิตร แล้วทำให้ปลอดเชื้อด้วยเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงที่ 121 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที นำมาบ่มด้วยเชื้อราที่ผ่านการโฮโมจีไนซ์เซอร์ (Vicentim และ Ferraz, 2007) โดยแปรผันปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการปรับสภาพ ได้แก่

(1) การแปรผันปริมาณของเชื้อรา ได้แก่ ปริมาณ 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมแห้งต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์แห้ง

(2) ระยะเวลาในการบ่ม ได้แก่ 7, 14 และ 21 วัน

หลังจากนั้น นำปริมาณของเชื้อราที่ใช้ในการบ่มจากภาวะที่ดีที่สุด มาทดลองการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 30, 60, และ 90 วัน ตามลำดับ

### 3.3.2.3 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี

นำภาวะการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2 มาใช้ร่วมกัน โดยแบ่งการปรับสภาพเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

(1) การปรับสภาพด้วยเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 โดยการใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2.2

(2) การปรับสภาพต่อด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี โดยการใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2.1

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design: CRD) ทำชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ นำเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า (Goering และ Van Soest, 1970) เปรียบเทียบปริมาณสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ลดลงระหว่างการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ภาวะต่างๆ และที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA), Duncan Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อเลือกภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพจากทั้ง 3 วิธี ได้แก่ (1) วิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี (2) วิธีทางชีวภาพ และ (3) วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี และนำเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพจากภาวะที่เหมาะสมทั้ง 3 วิธี มาศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ และเปรียบเทียบกับเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

### 3.3.3 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ใช้ผลิตภัณฑ์สุชาโรเอ็น และ Tungasmita, 2013)

การสังเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่

#### 3.3.3.1 สังเคราะห์ pure silica SBA-15

การสังเคราะห์ pure silica SBA-15 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal method) ประกอบด้วยการใช้ TEOS (tetraethylorthosilicate) : P123 (triblock copolymer pluronic P123) : HCl : H<sub>2</sub>O ในอัตราส่วน 1.0 : 0.0165 : 6.95 : 140

การสังเคราะห์เริ่มจากการผสม template pluronic 123 กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.9 โมลาร์ (M) กวนที่อุณหภูมิห้องจนสารละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติม TEOS ลงไปผสม กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปกวนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการตกผลึกที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำมาผ่านการกรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) แล้วนำไปเผาเพื่อไล่น้ำ (calcine) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 5 ชั่วโมง

#### 3.3.3.2 สังเคราะห์ Al-SBA-15 จาก pure silica SBA-15

การรวมอะตอมอะลูมิเนียม (Al atom) เข้าในโครงสร้างเมโซพอร์ (mesoporous) ของ pure silica SBA-15 โดยการผสม pure SBA-15 ที่ผ่านการเผาเพื่อไล่น้ำ ปริมาณ 0.5 กรัม กับน้ำที่ประกอบด้วยโซเดียมอะลูมิเนต (sodium aluminate) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำมารีฟลักซ์ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH<sub>4</sub>Cl) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) กรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเผาเพื่อไล่น้ำที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15 ที่ได้ ควรมีสัดส่วนโมลของ Si/Al ที่ 14.1

#### 3.3.3.3 ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี

3.3.3.3.1 ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีและศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี (X-ray powder diffraction, XRD)

3.3.3.3.2 เทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (nitrogen sorption analysis)

3.3.3.3.3 ตำแหน่งของ Al ใน pure silica SBA-15 ด้วยเทคนิคอะลูมิเนียมนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Al magic spinning nuclear magnetic resonance spectra, Al MAS-NMR)

3.3.3.3.4 ตรวจสอบอัตราส่วนธาตุ Si/Al ด้วยเทคนิค inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)

### 3.3.4. ผลิตและหาปริมาณกรดสีวลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ (Suacharoen และ Tungasmita, 2013)

#### 3.3.4.1 ผลิตกรดสีวลินิก

การผลิตกรดสีวลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์สังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส โดยแหล่งของเซลลูโลสที่ใช้ประกอบด้วย 5 แหล่ง ดังนี้

1. เซลลูโลสทางการค้า จากบริษัท Sigma
2. เซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี
3. เซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ
4. เซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี
5. เซลลูโลสที่ได้จากการเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

การผลิตกรดสีวลินิก ประกอบด้วย เซลลูโลสเริ่มต้น 2.5 กรัม, ตัวเร่งปฏิกิริยา (ZSM-5, Al-SBA-15) 0.25 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 30 มิลลิลิตร ผสมลงในเครื่องปฏิกรณ์ความดัน (parr reactor) และเติมแก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) จำนวน 145 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง แยกผลผลิตที่ได้ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส และคำนวณอัตราส่วนของแข็ง ของเหลว และแก๊สหลังการผลิต โดยของแข็ง คำนวณจากน้ำหนักแห้งของของแข็ง, ของเหลว คำนวณจากน้ำหนักของของเหลว, และแก๊ส คำนวณจากค่าที่หักลบจากของแข็งและของเหลว

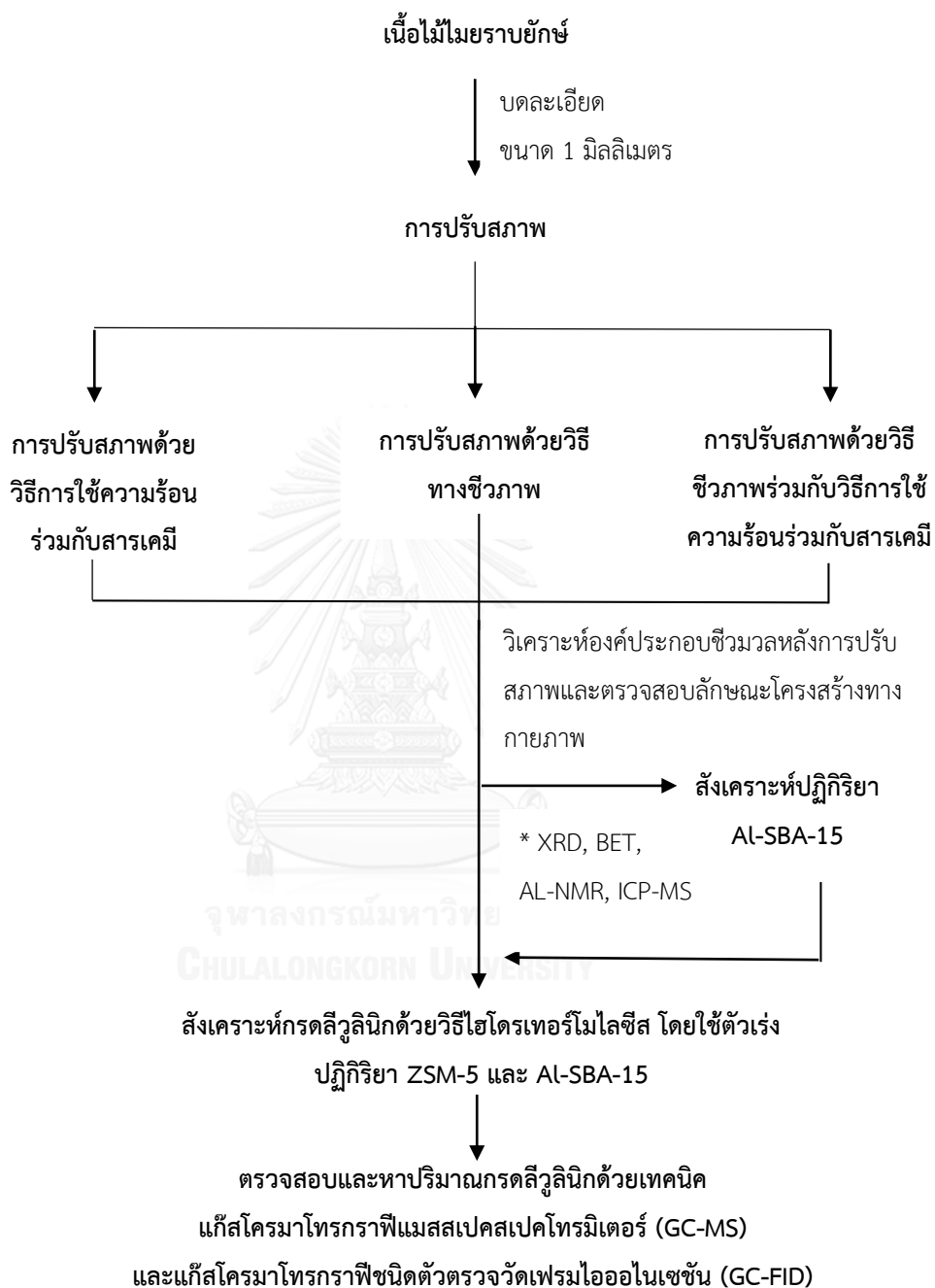
### 3.3.4.2 หาปริมาณกรดลิวูลินิก

นำผลผลิตในส่วนของเหลว มาระเหยเพื่อกำจัดน้ำด้วยเครื่องระเหย (evaporator) แล้วละลายของเหลวที่เหลือจากการระเหยด้วยสารละลายไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) นำของเหลวที่ละลายในสารละลายไดคลอโรมีเทนมาวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) เพื่อทำนายชนิดของสารประกอบที่พบ และแก๊สโครมาโทกราฟีชนิดตัวตรวจวัดเฟรมไอออนไนเซชัน (GC-FID) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณผลผลิตสุทธิ (levulinic acid yield) และค่าความจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดกรดลิวูลินิก (levulinic acid selectivity) โดยเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตกรดลิวูลินิกที่ได้จากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี) กับเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและเซลล์ulosทางการค้า





## แผนผังงานวิจัย



\* XRD = ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี

BET = ตรวจสอบขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน

AL-MAS-NMR = ตรวจสอบตำแหน่งของ Al ใน pure silica SBA-15 ด้วยเทคนิค AL-MAS-NMR

ICP-MS = ตรวจสอบอัตราส่วนธาตุ Si/Al ด้วยเทคนิค ICP-MS

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1. องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ที่ใช้ในศึกษา ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เถ้า และองค์ประกอบอื่นๆ โดยมีสัดส่วนแสดงดังตาราง 3 และ ค่าความชื้นที่ 34.28 %

ตาราง 3 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

องค์ประกอบทางเคมี	สัดส่วน (% น้ำหนักโดยน้ำหนัก)
เซลลูโลส (cellulose)	47.56 ± 0.31
เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)	20.90 ± 1.00
ลิกนิน (lignin)	21.16 ± 0.41
เถ้า (ash)	0.17 ± 0.10
องค์ประกอบอื่นๆ (other component)	10.21 ± 0.75

#### 4.2. ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์แบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่

##### 4.2.1. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี ประกอบด้วย

4.2.1.1 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี

การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5, 10, 15 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) หรือ สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และตามด้วยการพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่า ภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี คือ การปรับสภาพร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) โดยเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 65.37 % (37.45 % ของสัดส่วน

เซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้สารเคมีและความเข้มข้นอื่นๆ, ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 8.87 % และ 18.77 % ตามลำดับ (57.56 %, 11.29 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ลดลง) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้สารเคมีและความเข้มข้นอื่นๆ และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 62.89 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) (ตาราง 4)

4.2.1.2 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี

การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูง อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลา 60 นาที ร่วมกับสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5, 10, 15 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) หรือ สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.5, 1, 1.5 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และตามด้วยการฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่า ภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี ได้แก่ การปรับสภาพร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) โดยเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 68.24 % (43.48 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้สารเคมีและความเข้มข้นอื่นๆ, ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 1.95 % (90.67 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้สารเคมีและความเข้มข้น อื่นๆ, แต่ไม่สามารถลดสัดส่วนของลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพได้ และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 57.78 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) (ตาราง 5)

4.2.1.3 การเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมีและการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี

จากผลการทดลองที่ 4.2.1.1 และ 4.2.1.2 พบว่า การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน จะให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อนำภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมีทั้ง 2 วิธี มาเปรียบเทียบกัน พบว่า การปรับสภาพด้วยการใช้รังสีจากเครื่อง

ไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ให้ผล การลดลงของสัดส่วนลิกนิน, เถ้า และน้ำหนักน้ำหนักสุทธิคงเหลือหลังการปรับสภาพสูงกว่าการปรับ สภาพด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อย่างมีนัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % แต่การปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยปริมาตร) ให้ผลการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน เซลลูโลส, การลดลงของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและองค์ประกอบอื่นๆ สูงกว่าการปรับสภาพด้วยการใช้ รั้งสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดย ปริมาตร) อย่างมีนัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตาราง 6)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า การปรับสภาพด้วยการใช้รั้งสีจากเครื่องไมโครเวฟ ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และการใช้ความ ร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) แสดงลักษณะความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ โดยแตกต่างจาก พื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเรียบ และขนาดของรูพรุนที่พบ จากการปรับสภาพทั้ง 2 วิธี มีความแตกต่างกัน โดยขนาดรูพรุนของการปรับสภาพด้วยการใช้รั้งสีจาก เครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) มี ขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำ แรงดันสูงร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อย่างชัดเจน ดัง แสดงในรูป 25

**ตาราง 4 การปรับสภาพเนื้อไม้เมยราบยักซ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี**

ภาวะของการปรับสภาพ	สัดส่วนของ		สัดส่วนของ		สัดส่วนของ		สัดส่วนขององค์ประกอบอื่นๆ (%) <sup>*</sup>	น้ำหนักสุทธิ (%) <sup>*</sup>
	เซลลูโลส (%) <sup>*</sup>	เฮมิเซลลูโลส (%) <sup>*</sup>	ลิกนิน (%) <sup>*</sup>	สกัดส่วนของ	สกัดส่วนของ	สกัดส่วนของ		
เนื้อไม้ผ่านการปรับสภาพ	47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.90 ± 1.00 <sup>g</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>cdef</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>a</sup>	10.21 ± 0.75 <sup>e</sup>	100 <sup>i</sup>		
ปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่กำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ								
H <sub>2</sub> O	48.14 ± 0.85 <sup>a</sup>	21.03 ± 0.80 <sup>g</sup>	21.05 ± 0.43 <sup>cdef</sup>	0.40 ± 0.50 <sup>a</sup>	9.37 ± 1.52 <sup>de</sup>	96.67 ± 0.33 <sup>h</sup>		
5 % NaOH	61.81 ± 1.16 <sup>de</sup>	12.94 ± 0.42 <sup>d</sup>	19.09 ± 0.69 <sup>abc</sup>	0.25 ± 0.19 <sup>a</sup>	5.91 ± 0.74 <sup>ab</sup>	70.66 ± 1.15 <sup>d</sup>		
10 % NaOH	63.27 ± 1.51 <sup>e</sup>	10.57 ± 0.66 <sup>abc</sup>	18.84 ± 0.32 <sup>ab</sup>	0.26 ± 0.18 <sup>a</sup>	7.05 ± 1.51 <sup>bc</sup>	66.78 ± 0.19 <sup>c</sup>		
15 % NaOH	60.99 ± 1.38 <sup>d</sup>	12.13 ± 0.50 <sup>cd</sup>	19.23 ± 0.35 <sup>abc</sup>	0.49 ± 0.09 <sup>a</sup>	7.15 ± 1.21 <sup>bc</sup>	63.78 ± 0.19 <sup>b</sup>		
0.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54.02 ± 0.14 <sup>b</sup>	20.25 ± 0.92 <sup>g</sup>	21.02 ± 1.39 <sup>bcddef</sup>	0.43 ± 0.61 <sup>a</sup>	4.29 ± 1.08 <sup>a</sup>	83.89 ± 0.51 <sup>g</sup>		
1 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54.82 ± 0.96 <sup>bc</sup>	19.10 ± 2.19 <sup>efg</sup>	21.54 ± 2.38 <sup>def</sup>	0.24 ± 0.11 <sup>a</sup>	4.29 ± 0.85 <sup>a</sup>	82.00 ± 1.73 <sup>f</sup>		
1.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	55.18 ± 1.02 <sup>bc</sup>	17.53 ± 1.50 <sup>e</sup>	22.86 ± 1.52 <sup>f</sup>	0.20 ± 0.17 <sup>a</sup>	4.23 ± 0.27 <sup>a</sup>	81.33 ± 0.88 <sup>f</sup>		
ปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่กำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ และตามด้วยการพอกด้วย 2% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง								
5 % NaOH + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	61.90 ± 1.72 <sup>de</sup>	10.81 ± 0.97 <sup>bc</sup>	20.03 ± 1.03 <sup>abcde</sup>	0.09 ± 0.02 <sup>a</sup>	7.17 ± 1.76 <sup>bc</sup>	66.44 ± 1.02 <sup>c</sup>		
10 % NaOH + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	65.37 ± 0.22 <sup>f</sup>	8.87 ± 1.59 <sup>a</sup>	18.77 ± 1.61 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.04 <sup>a</sup>	6.95 ± 0.42 <sup>bc</sup>	62.89 ± 0.38 <sup>b</sup>		
15 % NaOH + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	62.18 ± 0.40 <sup>de</sup>	9.72 ± 0.16 <sup>ab</sup>	19.60 ± 0.41 <sup>abcd</sup>	0.11 ± 0.06 <sup>a</sup>	8.39 ± 0.52 <sup>cd</sup>	59.78 ± 0.19 <sup>a</sup>		
0.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	54.87 ± 0.48 <sup>bc</sup>	19.56 ± 1.21 <sup>fg</sup>	20.84 ± 1.33 <sup>abcdef</sup>	0.10 ± 0.03 <sup>a</sup>	4.63 ± 1.17 <sup>a</sup>	80.56 ± 1.64 <sup>ef</sup>		
1 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	55.88 ± 0.33 <sup>c</sup>	17.99 ± 0.54 <sup>ef</sup>	21.74 ± 1.04 <sup>def</sup>	0.08 ± 0.06 <sup>a</sup>	4.31 ± 0.52 <sup>a</sup>	80.67 ± 0.67 <sup>ef</sup>		
1.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	56.26 ± 0.87 <sup>c</sup>	17.64 ± 0.33 <sup>ef</sup>	21.95 ± 0.86 <sup>ef</sup>	0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>	4.02 ± 0.27 <sup>a</sup>	79.22 ± 0.69 <sup>e</sup>		

<sup>\*</sup> ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวยกกำลัง (a, b, c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA และ DMRT, P < 0.05) โดยใช้ตัวยกกำลัง a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด

**ตาราง 5 การปรับสภาพเนื้อไม้เมื่อยร่ายช่วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องรีงเนื้อไม้แรงดันสูงร่วมกับสารเคมี**

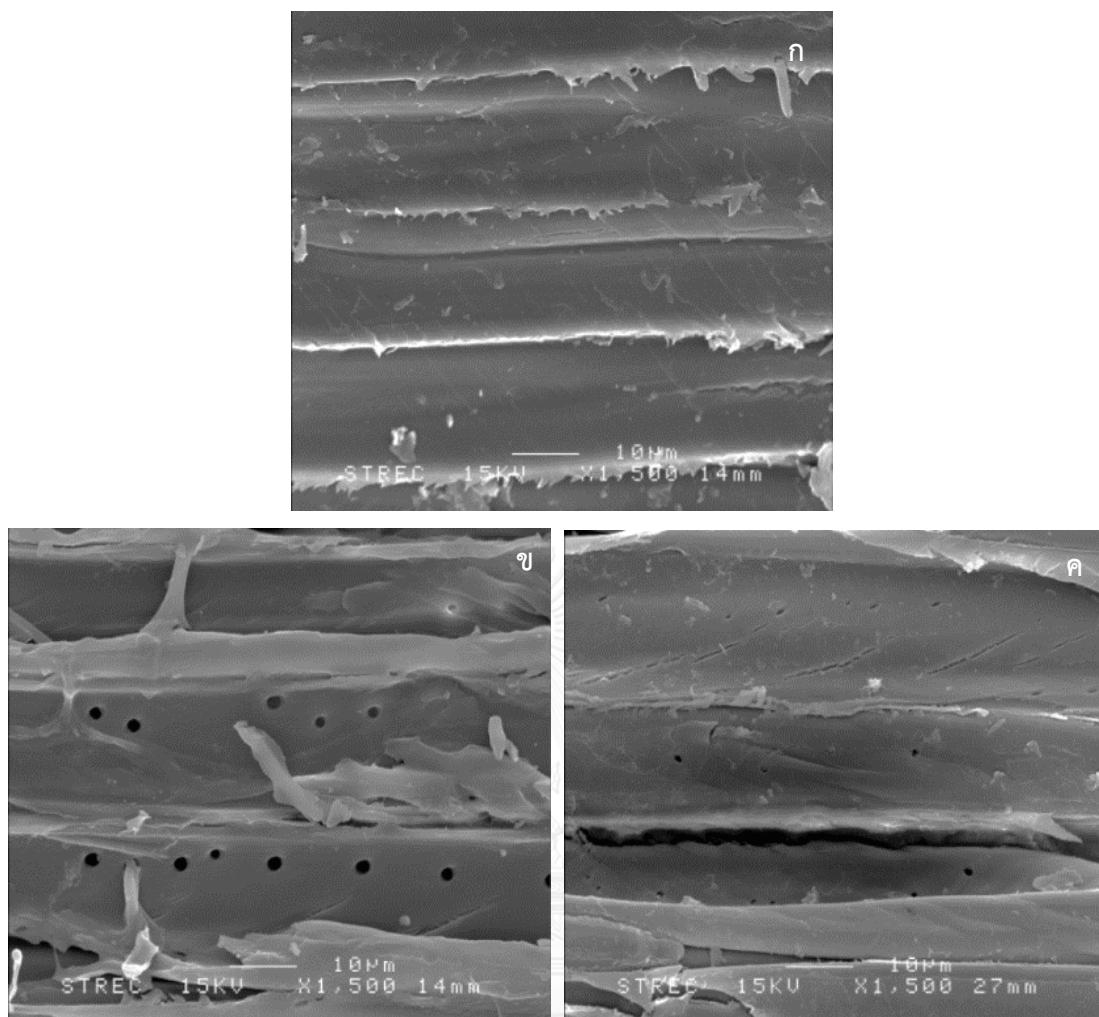
ภาวะของการปรับสภาพ	สัดส่วนของ เซลลูโลส (%)*	สัดส่วนของ เฮมิเซลลูโลส (%)*	สัดส่วนของ ลิกนิน (%)*	สัดส่วนของ เถ้า (%)*	สัดส่วนขององค์ ประกอบอื่นๆ (%)*	น้ำหนักสุทธิ(%)*
เนื้อไม้ผ่านการปรับสภาพ	47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.90 ± 1.00 <sup>g</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>cdef</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>a</sup>	10.21 ± 0.75 <sup>e</sup>	100 <sup>f</sup>
ปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่กำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ						
H <sub>2</sub> O	48.14 ± 0.85 <sup>a</sup>	21.03 ± 0.80 <sup>g</sup>	21.05 ± 0.43 <sup>cdef</sup>	0.40 ± 0.50 <sup>a</sup>	9.37 ± 1.52 <sup>de</sup>	96.67 ± 0.33 <sup>h</sup>
5 % NaOH	61.81 ± 1.16 <sup>de</sup>	12.94 ± 0.42 <sup>d</sup>	19.09 ± 0.69 <sup>abc</sup>	0.25 ± 0.19 <sup>a</sup>	5.91 ± 0.74 <sup>ab</sup>	70.66 ± 1.15 <sup>d</sup>
10 % NaOH	63.27 ± 1.51 <sup>e</sup>	10.57 ± 0.66 <sup>abc</sup>	18.84 ± 0.32 <sup>ab</sup>	0.26 ± 0.18 <sup>a</sup>	7.05 ± 1.51 <sup>bc</sup>	66.78 ± 0.19 <sup>c</sup>
15 % NaOH	60.99 ± 1.38 <sup>d</sup>	12.13 ± 0.50 <sup>cd</sup>	19.23 ± 0.35 <sup>abc</sup>	0.49 ± 0.09 <sup>a</sup>	7.15 ± 1.21 <sup>bc</sup>	63.78 ± 0.19 <sup>b</sup>
0.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54.02 ± 0.14 <sup>b</sup>	20.25 ± 0.92 <sup>g</sup>	21.02 ± 1.39 <sup>bcd</sup>	0.43 ± 0.61 <sup>a</sup>	4.29 ± 1.08 <sup>a</sup>	83.89 ± 0.51 <sup>g</sup>
1 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54.82 ± 0.96 <sup>bc</sup>	19.10 ± 2.19 <sup>efg</sup>	21.54 ± 2.38 <sup>def</sup>	0.24 ± 0.11 <sup>a</sup>	4.29 ± 0.85 <sup>a</sup>	82.00 ± 1.73 <sup>f</sup>
1.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	55.18 ± 1.02 <sup>bc</sup>	17.53 ± 1.50 <sup>e</sup>	22.86 ± 1.52 <sup>f</sup>	0.20 ± 0.17 <sup>a</sup>	4.23 ± 0.27 <sup>a</sup>	81.33 ± 0.88 <sup>f</sup>
ปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่กำลังไฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ และตามด้วยการพอกด้วย 2% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง						
5 % NaOH + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	61.90 ± 1.72 <sup>de</sup>	10.81 ± 0.97 <sup>bc</sup>	20.03 ± 1.03 <sup>abcde</sup>	0.09 ± 0.02 <sup>a</sup>	7.17 ± 1.76 <sup>bc</sup>	66.44 ± 1.02 <sup>c</sup>
10 % NaOH + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	65.37 ± 0.22 <sup>f</sup>	8.87 ± 1.59 <sup>a</sup>	18.77 ± 1.61 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.04 <sup>a</sup>	6.95 ± 0.42 <sup>bc</sup>	62.89 ± 0.38 <sup>b</sup>
15 % NaOH + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	62.18 ± 0.40 <sup>de</sup>	9.72 ± 0.16 <sup>ab</sup>	19.60 ± 0.41 <sup>abcd</sup>	0.11 ± 0.06 <sup>a</sup>	8.39 ± 0.52 <sup>cd</sup>	59.78 ± 0.19 <sup>a</sup>
0.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	54.87 ± 0.48 <sup>bc</sup>	19.56 ± 1.21 <sup>fg</sup>	20.84 ± 1.33 <sup>bcdef</sup>	0.10 ± 0.03 <sup>a</sup>	4.63 ± 1.17 <sup>a</sup>	80.56 ± 1.64 <sup>ef</sup>
1 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	55.88 ± 0.33 <sup>c</sup>	17.99 ± 0.54 <sup>ef</sup>	21.74 ± 1.04 <sup>def</sup>	0.08 ± 0.06 <sup>a</sup>	4.31 ± 0.52 <sup>a</sup>	80.67 ± 0.67 <sup>ef</sup>
1.5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	56.26 ± 0.87 <sup>c</sup>	17.64 ± 0.33 <sup>ef</sup>	21.95 ± 0.86 <sup>ef</sup>	0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>	4.02 ± 0.27 <sup>a</sup>	79.22 ± 0.69 <sup>e</sup>

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวอย่าง (a, b, c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA และ DMRT, P < 0.05) โดยให้ตัวอย่างกำลัง a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด

ตาราง 6 การเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้เมยรายักษ์ ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี และภาวะที่เหมาะสมจากการใช้เครื่องปั่นไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี

ภาวะของการปรับสภาพ	สัดส่วนของ เซลลูโลส (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของ เฮมิเซลลูโลส (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของ ลิกนิน (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของ ไม้ (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของ องค์ประกอบอื่น (%) <sup>*</sup>	น้ำหนักสุทธิ (%) <sup>*</sup>
เนื้อไม้ผ่านการปรับสภาพ	47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.90 ± 1.00 <sup>c</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>b</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>b</sup>	10.21 ± 0.75 <sup>c</sup>	100 <sup>c</sup>
ปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ร่วมกับ สารละลาย 10 % NaOH และพอกด้วยสารละลาย 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	65.37 ± 0.22 <sup>b</sup>	8.87 ± 1.59 <sup>b</sup>	18.77 ± 1.61 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.04 <sup>a</sup>	6.95 ± 0.42 <sup>b</sup>	62.89 ± 0.38 <sup>b</sup>
ปรับสภาพด้วยความร้อนและแรงดันจากเครื่องไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลาย 1 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> และ พอกด้วยสารละลาย 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	68.24 ± 0.17 <sup>c</sup>	1.95 ± 0.70 <sup>a</sup>	24.37 ± 1.52 <sup>c</sup>	0.14 ± 0.06 <sup>b</sup>	5.30 ± 0.71 <sup>a</sup>	57.78 ± 0.19 <sup>a</sup>

± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวยกกำลัง (a, b, c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA และ DMRT, P < 0.05) โดยให้ตัวยกกำลัง a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด



รูป 25 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

(ข) เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้รังสีจากไมโครเวฟร่วมกับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และ ฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดย ปริมาตร)

(ค) เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่อง ึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดย ปริมาตร) และฟอกด้วยสารละลาย 2 % ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร)



#### 4.2.2. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ

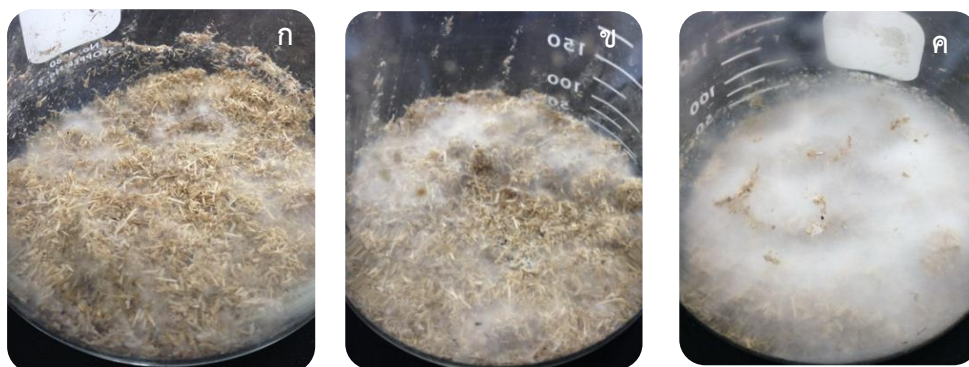
การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ ด้วยการใส่เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 โดยแปรผันปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการปรับสภาพ ดังนี้

1. ปริมาณของเชื้อรา ได้แก่ 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์แห้ง
2. ระยะเวลาในการบ่ม ได้แก่ 7, 14 และ 21 วัน

จากผลการทดลอง พบว่า ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ คือ การใช้ปริมาณเชื้อรา 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ที่ระยะเวลา 21 วัน ภาวะดังกล่าวให้ผลการเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 52.73 % (10.87 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้ปริมาณเชื้อราและระยะเวลาในการปรับสภาพอื่นๆ, ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 18.88 % (9.62 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้ปริมาณเชื้อราและระยะเวลาในการปรับสภาพอื่นๆ, ลดสัดส่วนของลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 15.57 % (26.42 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่ใช้ปริมาณเชื้อราและระยะเวลาในการปรับสภาพอื่นๆ และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 75.22 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) (ตาราง 7) รูปการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใส่เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 แสดงในรูป 26

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส และอัตราการลดลงของสัดส่วนลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์หลังการปรับสภาพ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพมากขึ้น ดังนั้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพเป็น 30, 60, และ 90 วัน โดยใช้ปริมาณเชื้อราที่ใช้ 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ซึ่งเป็นปริมาณเชื้อราที่ให้ผลการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และผลการลดลงของสัดส่วนลิกนินสูงสุด โดยพบว่า ระยะเวลาการปรับสภาพที่ 30 วัน เป็นภาวะที่เพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพสูงสุดเป็น 53.83 % (13.18 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่เวลา 60 และ 90 วัน, ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 16.73 % (19.95 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพที่เวลา 60 และ 90 วัน และลดสัดส่วนลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 16.00 % (24.38 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

กับภาวะการปรับสภาพที่เวลา 60 และ 90 วัน และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 73.89 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) (ตาราง 8)



รูป 26 แสดงการเจริญของเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 บนเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่อัตราส่วนปริมาณเชื้อรา 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้แห้ง เป็นระยะเวลา (ก) 7 วัน, (ข) 14 วัน, (ค) 21 วัน

#### 4.2.3. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี

การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี เป็นการปรับสภาพโดยนำภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพในข้อ 4.1.1 มาใช้ร่วมกับ 4.1.2 ตามลำดับดังนี้

(1) ภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (ข้อ 4.1.2) ได้แก่ การปรับสภาพด้วยเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 ที่ปริมาณเชื้อรา 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมเนื้อไม้แห้ง เวลา 30 วัน

(2) ภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี (ข้อ 4.1.1) ได้แก่ การปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) เวลา 10 นาที และการพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 70.15 % (47.50 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น), ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเนื้อไม้ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 8.20 % (60.77 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) และ 17.10 % (19.19 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) ตามลำดับ และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 43.33 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) (ตาราง 9)

ตาราง 7 การปรับสภาพเนื้อไม้เมยราบยักษ์ด้วยเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7

ระยะเวลา	ภาวะของการปรับสภาพ	ปริมาณเชื้อ (mg) : น้ำหนักเนื้อไม้ (g)	สัดส่วนของ		สัดส่วนของ		สัดส่วนของ		สัดส่วนขององค์ประกอบอื่นๆ (%)*	น้ำหนักสุทธิ (%)*
			เซลลูโลส (%)*	เฮมิเซลลูโลส (%)*	ลิกนิน (%)*	เถ้า (%)*	เซลลูโลส (%)*	เฮมิเซลลูโลส (%)*		
เนื้อไม้ไม่ผ่านการปรับสภาพ			47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.89 ± 1.00 <sup>d</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>c</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>ab</sup>	10.21 ± 0.75	100 <sup>e</sup>		
7 วัน	2 : 1		51.10 ± 0.76 <sup>bc</sup>	19.80 ± 0.75 <sup>cd</sup>	20.49 ± 0.81 <sup>c</sup>	0.14 ± 0.09 <sup>a</sup>	8.46 ± 1.08 <sup>a</sup>	89.22 ± 1.65 <sup>d</sup>		
	4 : 1		51.58 ± 0.36 <sup>bc</sup>	17.76 ± 0.77 <sup>a</sup>	20.48 ± 0.88 <sup>c</sup>	0.13 ± 0.11 <sup>a</sup>	10.05 ± 1.89 <sup>b</sup>	89.11 ± 0.19 <sup>d</sup>		
	6 : 1		52.04 ± 0.34 <sup>cde</sup>	18.17 ± 0.30 <sup>ab</sup>	20.68 ± 0.78 <sup>c</sup>	0.07 ± 0.10 <sup>a</sup>	9.04 ± 0.12 <sup>ab</sup>	90.33 ± 0.33 <sup>d</sup>		
14 วัน	2 : 1		51.75 ± 0.42 <sup>cde</sup>	17.41 ± 0.44 <sup>a</sup>	18.32 ± 1.00 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.19 <sup>bc</sup>	12.11 ± 0.39 <sup>d</sup>	82.22 ± 0.51 <sup>c</sup>		
	4 : 1		51.85 ± 0.62 <sup>cde</sup>	17.79 ± 0.99 <sup>a</sup>	17.92 ± 0.57 <sup>b</sup>	0.42 ± 0.14 <sup>bc</sup>	12.02 ± 0.49 <sup>d</sup>	80.44 ± 0.20 <sup>b</sup>		
21 วัน	6 : 1		52.28 ± 0.24 <sup>de</sup>	17.56 ± 0.67 <sup>a</sup>	18.32 ± 0.89 <sup>b</sup>	0.20 ± 0.16 <sup>ab</sup>	11.64 ± 0.35 <sup>cd</sup>	82.89 ± 1.34 <sup>c</sup>		
	2 : 1		50.23 ± 0.66 <sup>b</sup>	19.33 ± 1.15 <sup>bc</sup>	17.74 ± 1.09 <sup>b</sup>	0.47 ± 0.26 <sup>c</sup>	12.22 ± 0.60 <sup>d</sup>	75.33 ± 0.88 <sup>a</sup>		
	4 : 1		52.41 ± 1.63 <sup>de</sup>	18.81 ± 0.84 <sup>abc</sup>	15.88 ± 0.36 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.04 <sup>a</sup>	12.82 ± 0.90 <sup>d</sup>	75.78 ± 0.19 <sup>a</sup>		
	6 : 1		52.73 ± 0.65 <sup>e</sup>	18.88 ± 0.42 <sup>abc</sup>	15.57 ± 1.11 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.07 <sup>abc</sup>	12.55 ± 0.33 <sup>d</sup>	75.22 ± 1.71 <sup>a</sup>		

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวอักษร (a, b, c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA และ DMRT, P < 0.05) โดยให้ตัวอักษร a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าร้อยละต่ำสุด

ตาราง 8 การปรับสภาพเนื้อไม้เมยราบยักษ์ด้วยเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 (เลือกปริมาณเชื้อราที่ใช้ 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้แห้ง ระยะเวลาในการปรับสภาพเป็น 30, 60 และ 90 วัน)

ภาวะของการปรับสภาพ	สัดส่วนของเซลลูโลส (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของลิกนิน (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของเส้นใย (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของคาร์บอน (%) <sup>*</sup>	สัดส่วนของไนโตรเจน (%) <sup>*</sup>
เนื้อไม้เมยราบยักษ์ (mg) : น้ำหนักเนื้อไม้ (g) 6 : 1	30 วัน	47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.89 ± 1.00 <sup>b</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>c</sup>	10.21 ± 0.75 <sup>bc</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>ab</sup>
	60 วัน	53.83 ± 0.58 <sup>c</sup>	16.73 ± 0.64 <sup>a</sup>	16.00 ± 0.66 <sup>a</sup>	13.32 ± 0.77 <sup>c</sup>	0.12 ± 0.06 <sup>a</sup>
	90 วัน	52.97 ± 0.50 <sup>b</sup>	16.93 ± 1.54 <sup>a</sup>	17.98 ± 0.93 <sup>b</sup>	12.05 ± 0.84 <sup>ab</sup>	0.07 ± 0.11 <sup>a</sup>
ระยะเวลา	52.13 ± 0.39 <sup>b</sup>	18.34 ± 0.56 <sup>a</sup>	17.74 ± 0.08 <sup>b</sup>	11.61 ± 0.32 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.03 <sup>a</sup>	74.22 ± 1.97 <sup>a</sup>
						100 <sup>b</sup>

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวอักษร (a, b, c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA และ DMRT, P < 0.05) โดยใช้ตัวอักษร a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด

ตาราง 9 การปรับสภาพเนื้อไมยราบยักซ์ด้วยเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วนปริมาณเชื้อ (mg) ต่อ น้ำหนักเนื้อไมยราบยักซ์ (g) คือ 6:1 เป็นเวลา 30 วัน และตามด้วยการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับ 10 % NaOH และการฟอกด้วย 2 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

ภาวะของการปรับสภาพ	สัดส่วนของ เซลลูโลส (%)*	สัดส่วนของ เฮมิเซลลูโลส (%)*	สัดส่วนของ ลิกนิน (%)*	สัดส่วนของ ใย (%)*	สัดส่วนของ องค์ประกอบอื่นๆ (%)*	น้ำหนักสุทธิ (%)*
เนื้อไม้ผ่านการปรับสภาพ	47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.89 ± 1.00 <sup>b</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>b</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>a</sup>	10.21 ± 0.75 <sup>b</sup>	100 <sup>b</sup>
การปรับสภาพด้วย						
1. เชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วน 6:1 เวลา 30 วัน						
	70.15 ± 0.76 <sup>b</sup>	8.20 ± 0.56 <sup>a</sup>	17.10 ± 0.56 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.06 <sup>a</sup>	4.36 ± 0.64 <sup>a</sup>	43.33 ± 1.00 <sup>a</sup>
2. รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ร่วมกับ 10 % NaOH และฟอกด้วย 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>						

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวอักษร (a,b,c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA P < 0.05) โดยให้ตัวอักษรที่ a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด

#### 4.2.4 การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธีการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีการกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีการชีวภาพ, วิธีการชีวภาพและวิธีการกายภาพร่วมกับเคมี)

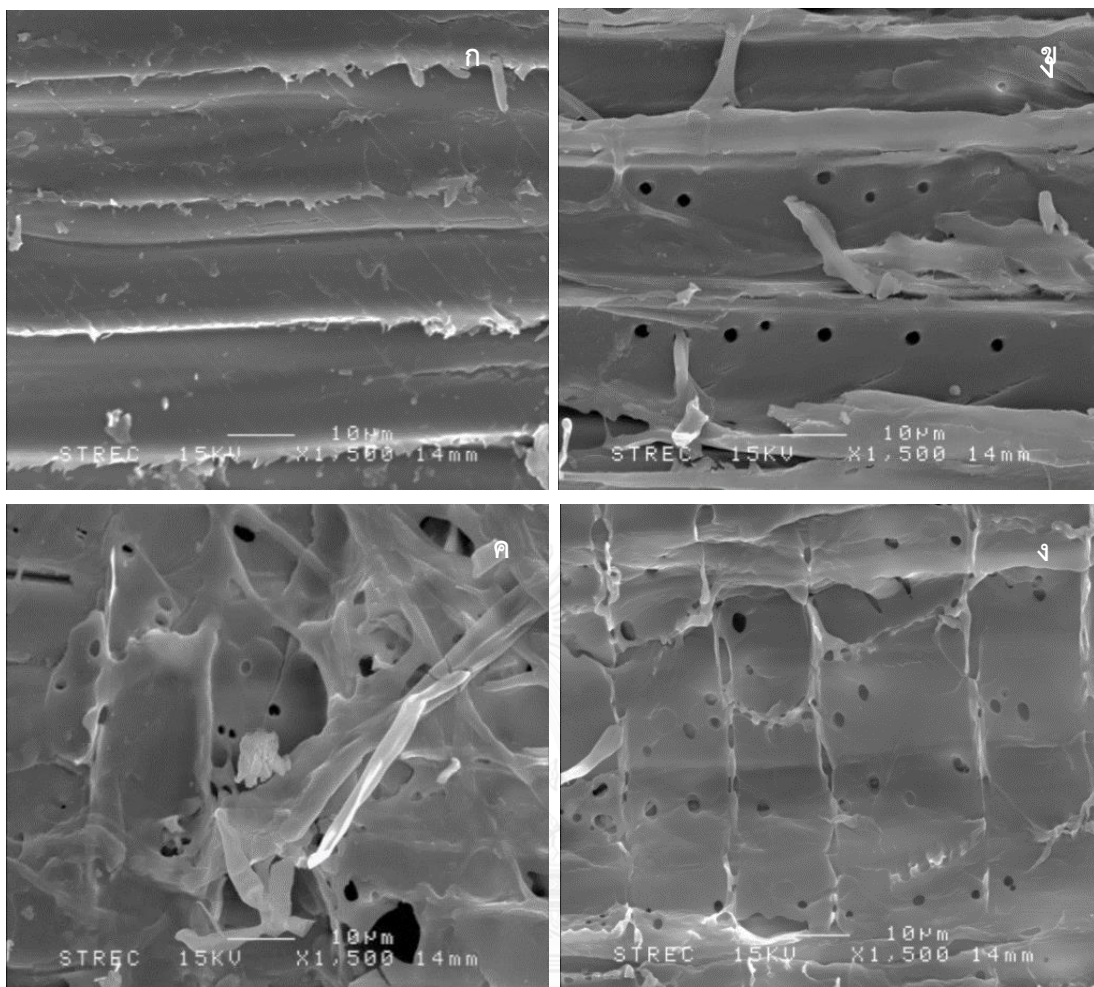
การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี พบว่า การปรับสภาพด้วยวิธีการชีวภาพและวิธีการกายภาพร่วมกับสารเคมี ด้วยเชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วน 6:1 เป็นเวลา 30 วัน และตามด้วยการปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) เวลา 10 นาที และการพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ให้ผลการเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพสูงสุดที่ 70.15 % (47.50 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับภาวะการปรับสภาพวิธีอื่นๆ, ลดสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือที่ 8.20 % (60.77 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับการปรับสภาพด้วยวิธีการกายภาพร่วมกับเคมี แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับการปรับสภาพด้วยวิธีการชีวภาพและเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ, ลดสัดส่วนลิกนินของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือที่ 17.10 % (19.19 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับการปรับสภาพด้วยวิธีการชีวภาพ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างไรก็ตาม น้ำหนักสุทธิหลังของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพลดลงที่สุดสุด โดยคงเหลือน้ำหนักสุทธิที่ 43.33 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กับเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยวิธีอื่นๆ และที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ตาราง 10)

การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (รูป ก) แสดงลักษณะของพื้นผิวเรียบ ไม่มีความเป็นรูพรุนบนพื้นผิว ในขณะที่เนื้อไม้ที่ผ่านการปรับสภาพ ทั้ง 3 วิธี คือวิธีการกายภาพร่วมกับสารเคมี (รูป ข), วิธีการชีวภาพ (รูป ค), และวิธีการชีวภาพและวิธีการกายภาพร่วมกับสารเคมี (รูป ง) จะแสดงลักษณะความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ (รูป 27)

ตาราง 10 การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม่เมยร่ายกัช่วยวิธีการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี)

ภาวะของการปรับสภาพ	สัดส่วนของเซลลูโลส (%)*	สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส (%)*	สัดส่วนของลิกนิน (%)*	สัดส่วนของเถ้า (%)*	สัดส่วนของอินทรีย์สาร (%)*	สัดส่วนของน้ำหนักรีด (%)*
เนื้อไม่ผ่านการปรับสภาพ	47.56 ± 0.31 <sup>a</sup>	20.89 ± 1.00 <sup>c</sup>	21.16 ± 0.41 <sup>c</sup>	0.17 ± 0.10 <sup>bc</sup>	10.21 ± 0.75 <sup>c</sup>	100 <sup>d</sup>
การปรับสภาพด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ร่วมกับสารละลาย 10 % NaOH และพอกด้วยสารละลาย 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	65.37 ± 0.22 <sup>c</sup>	8.87 ± 1.59 <sup>a</sup>	18.77 ± 1.61 <sup>b</sup>	0.03 ± 0.04 <sup>a</sup>	6.95 ± 0.42 <sup>b</sup>	62.89 ± 0.38 <sup>b</sup>
การปรับสภาพด้วยเชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วน 6:1 เวลา 30 วัน	53.83 ± 0.58 <sup>b</sup>	16.73 ± 0.64 <sup>b</sup>	16.00 ± 0.66 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.06 <sup>bc</sup>	13.32 ± 0.77 <sup>d</sup>	73.89 ± 1.34 <sup>c</sup>
การปรับสภาพด้วยเชื้อรา <i>Phanerochaete sordida</i> สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วน 6:1 เวลา 30 วัน	70.15 ± 0.76 <sup>d</sup>	8.20 ± 0.56 <sup>a</sup>	17.10 ± 0.56 <sup>ab</sup>	0.18 ± 0.06 <sup>c</sup>	4.36 ± 0.64 <sup>a</sup>	43.33 ± 1.00 <sup>a</sup>
2. รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ร่วมกับ 10 % NaOH และพอกด้วย 2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>						

\* ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 3 ซ้ำ และ ความแตกต่างของตัวอักษร (a,b,c) ในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ANOVA และ DMRT, P < 0.05) โดยให้ตัวอักษร a เป็นตัวแทนของกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุด



รูป 27 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวเนื้อไม้มายราบยักษ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

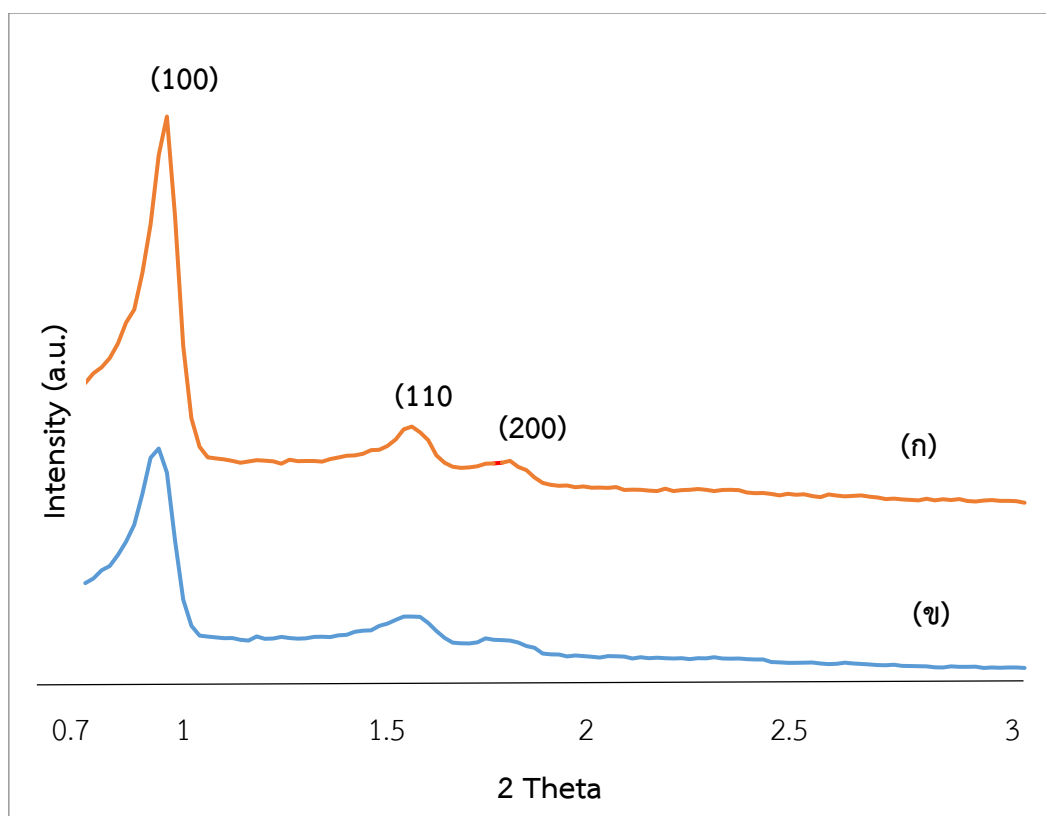
- (ก) เนื้อไม้มายราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ
- (ข) เนื้อไม้มายราบยักษ์หลังการปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมของวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี
- (ค) เนื้อไม้มายราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมของวิธีทางชีวภาพ
- (ง) เนื้อไม้มายราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมของวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี



### 4.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ใช้ผลิตภัณฑ์ซิลิกา

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

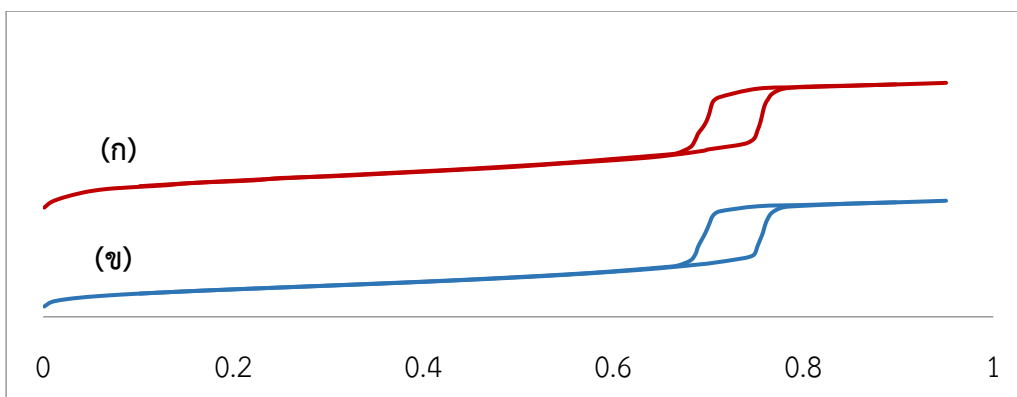
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของ pure silica SBA-15 และ Al-SBA-15 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า pure silica SBA-15 และ Al-SBA-15 แสดงพีคจำนวน 3 พีค ที่การสะท้อนของระนาบ 100, 110 และ 200 ซึ่งแสดงโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของ pure silica SBA-15 และ Al-SBA-15 (รูป 28)



รูป 28 รูปแบบการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีของ (ก) SBA-15 และ (ข) Al-SBA-15

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับก๊าซไนโตรเจน

การดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ pure silica SBA-15 และ Al-SBA-15 พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบชนิดที่ 4 ซึ่งการดูดซับในช่วงแรกจะมีค่า  $P/P_0$  ต่ำ หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $P/P_0$  มากขึ้น และเส้นกราฟของการดูดซับและการคายจะไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่า ซึ่งไอโซเทอมชนิดนี้จะพบได้ในวัสดุรูพรุนประเภทเมโซพอร์ (mesopore) (รูป 29)



รูป 29 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายก๊าซไนโตรเจนของ (ก) SBA-15 และ (ข) Al-SBA-15

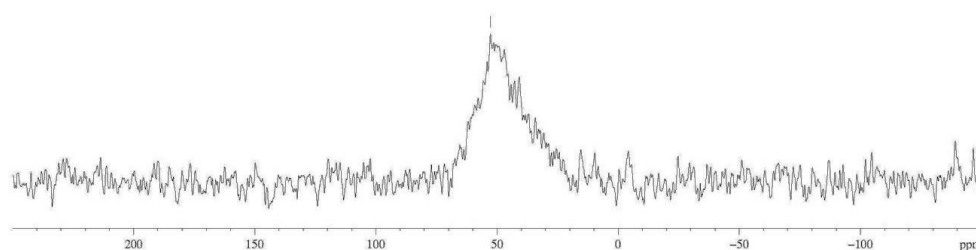
ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและขนาดรูพรุนของ SBA-15 และ Al-SBA-15 แสดงในตาราง 11

ตาราง 11 ลักษณะพื้นผิวของ SBA-15 และ Al-SBA-15

Catalyst	Total specific surface area ( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	Pore size distribution (nm)	Mesopore Volume ( $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ )	$D_{(100)}$ (nm)	Wall Thickness (nm)
SBA-15	653	9.36	1.0086	9.48	1.59
Al-SBAa-15	494	9.36	0.8778	9.56	1.67

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งของ Al ใน SBA-15

การวิเคราะห์ตำแหน่งของ Al ใน SBA-15 พบว่า ตำแหน่งพีคที่ 50 ppm แสดงตำแหน่งอะตอมของอะลูมิเนียมในโครงสร้างเตตระไฮดรอน (โครงสร้าง  $\text{AlO}_4$ ) ของ SBA-15 สเปกตรัมของ Al-SBA-15 แสดงในรูป 30



รูป 30 กราฟ Al MAS-NMR ของ Al-SBA-15

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนธาตุซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al)

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนธาตุ Si/Al ในโครงสร้างของ AL-SBA-15 พบว่า อัตราส่วนธาตุ Si/Al เท่ากับ 15.35

### 4.4 ผลิตและหาปริมาณกรดซิลิโคนิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

#### 4.4.1 ผลผลิตสุทธิ (ของเหลว, ของแข็ง, แก๊ส) หลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส

การสังเคราะห์กรดซิลิโคนิกผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส แบ่งผลผลิตออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยผลผลิตหลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส จากแหล่งเซลลูโลส 5 แหล่ง ประกอบด้วย เซลลูโลสทางการค้า, เซลลูโลสจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และเซลลูโลสจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี, วิธีทางชีวภาพ วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ AL-SBA-15 พบว่า ผลผลิตหลังการผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ประกอบด้วย ของแข็ง 2.29 %-3.33 %, ของเหลว 57.79 %-62.1 % และแก๊ส 34.92 %-39.93 % (ตาราง 12) และผลผลิตหลังการสังเคราะห์สังเคราะห์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา AL-SBA-15 ประกอบด้วยของแข็ง 2.39 %-3.15 %, ของเหลว 57.80 %-61.32 % และแก๊ส 34.92 %-39.93 % (ตาราง 12) ซึ่งส่วนที่นำมาวิเคราะห์ผลผลิตสุทธิและค่าความจำเพาะของกรดซิลิโคนิกในขั้นตอนต่อไปคือ ส่วนของเหลว

#### 4.4.2 ค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดซิลิโคนิกหลังกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส

ค่าความจำเพาะของการเกิดกรดซิลิโคนิก เมื่อสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี ให้ค่าความจำเพาะสูงสุดที่ 18.68 % รองลงมา คือ เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี และเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ ให้ค่าความจำเพาะที่ 16.65 % และ 13.46 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าความจำเพาะของการเกิดกรดซิลิโคนิกข้างต้น ยังแสดงค่าน้อยกว่าการสังเคราะห์กรดซิลิโคนิกจากเซลลูโลสทางการค้า ซึ่งให้ค่าความจำเพาะที่ 62.81 % (ตาราง 13) ในขณะที่การสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไซส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AL-SBA-15 พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี ให้ค่าความจำเพาะสูงสุดที่ 13.82 % รองลงมา คือ เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับ

สารเคมี และเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ ให้ค่าความจำเพาะที่ 12.23 % และ 10.32 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าความจำเพาะของการเกิดกรดลิวลินิกข้างต้น ยังแสดงค่าน้อยกว่าการสังเคราะห์กรดลิวลินิกจากเซลลูโลสทางการค้า ซึ่งให้ค่าความจำเพาะที่ 40.16 % เช่นกัน (ตารางที่ 13)

ผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิก พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี ให้ผลผลิตสุทธิสูงสุดที่ 5.68 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) รองลงมา คือ เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี และเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ ให้ค่าความจำเพาะที่ 5.13 % และ 3.92 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกข้างต้น ยังแสดงค่าน้อยกว่าการสังเคราะห์กรดลิวลินิกจากเซลลูโลสทางการค้า ซึ่งให้ผลผลิตสุทธิที่ 18.68 % (ตาราง 13) ในขณะที่ การสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเทอร์โมไฮโดไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15 พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี ให้ผลผลิตสุทธิสูงสุดที่ 4.27 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) รองลงมา คือ เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี และเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ ให้ค่าความจำเพาะที่ 3.61 % และ 2.83 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกข้างต้น ยังแสดงค่าน้อยกว่าการสังเคราะห์กรดลิวลินิกจากเซลลูโลสทางการค้า ซึ่งให้ผลผลิตสุทธิที่ 11.85 % (ตาราง 13)

เมื่อเปรียบเทียบค่าความจำเพาะของกรดลิวลินิก พบว่า การสังเคราะห์กรดลิวลินิกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 จะให้ค่าความจำเพาะต่อการเกิดกรดลิวลินิก สูงกว่าการสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15 เมื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์กรดลิวลินิกที่ใช้แหล่งเซลลูโลสชนิดเดียวกัน (ตาราง 13) แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 มีความจำเพาะต่อการเกิดกรดลิวลินิกสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15

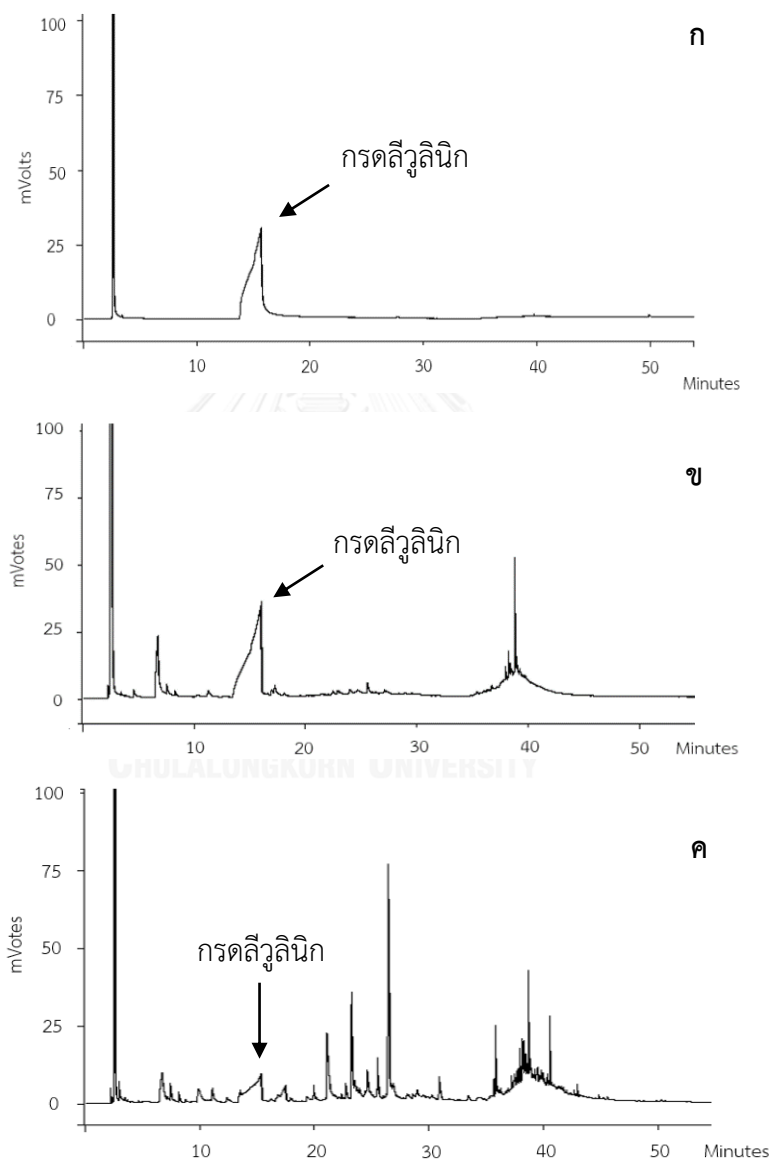
ตาราง 12 ผลผลิตสุทธิ (ของเหลว, ของแข็ง, แก๊ส) หลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การผลิตกรดซิลิกิก แหล่งเซลลูโลส	ผลผลิตสุทธิของแข็ง		ผลผลิตสุทธิของเหลว		ผลผลิตสุทธิของแก๊ส (Gas yield, %)
		(Solid yield, %)	(Liquid yield, %)	(Liquid yield, %)	(Gas yield, %)	
ZSM-5	เซลลูโลสทางการค้า	2.29	57.79	39.93		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	2.98	62.11	34.92		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	3.00	60.87	36.13		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ	3.33	59.73	36.95		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	3.00	61.87	35.13		
Al-SBA-15	เซลลูโลสทางการค้า	2.39	58.45	39.16		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	3.15	57.80	39.05		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	3.08	61.32	35.61		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ	3.09	58.33	38.59		
	เนื้อไม้ไมยราวยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	3.06	60.21	36.74		

ตาราง 13 ผลผลิตสุทธิและค่าความจำเป็นของการดริวลิติกหลังสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเทอร์โมไฮโดไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การผลิตรดริวลิติก แหล่งเซลลูโลส	ผลผลิตสุทธิของแข็งหลังการระเหยน้ำ (% น้ำหนักโดยน้ำหนัก)	ความจำเป็นเฉพาะของ การดริวลิติก (%)	ผลผลิตสุทธิของกรดริวลิติก (% น้ำหนักโดยน้ำหนัก)
ZSM-5	เซลลูโลสทางการค้า	30.40	62.81	19.13
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	29.00	10.95	3.18
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	30.80	16.65	5.13
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ	29.20	13.46	3.92
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	30.40	18.68	5.68
Al-SBA-15	เซลลูโลสทางการค้า	29.50	40.16	11.85
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	26.75	8.15	2.19
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	29.50	12.23	3.61
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ	27.50	10.32	2.83
	เนื้อไม้มยรายักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี	31.00	13.82	4.27

โครมาโตแกรมของกรดสีวุลินิกและสารประกอบอื่นๆ หลังการสังเคราะห์ด้วยเซลล์ลูโลสจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพและเซลล์ลูโลสทางการค้าด้วยวิธีเทอร์โมไฮโดรไลซิส และวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization (GC-FID) แสดงในรูป 31 และระยะเวลาการระเหยกลายเป็นไอ (retention time) ของกรดสีวุลินิกและสารประกอบอื่นๆ แสดงในตาราง 16



รูป 31 โครมาโตแกรมของ (ก) กรดสีวุลินิกทางการค้า กรดสีวุลินิกและสารประกอบอื่นๆ จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีเทอร์โมไฮโดรไลซิส โดยใช้ (ข) เซลล์ลูโลสทางการค้า (ค) เซลล์ลูโลสจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ

ตาราง 14 ระยะเวลาการระเหยกลายเป็นไอ (retention time) ของกรดสีวลินิกและสารประกอบอื่นๆ

ลำดับ	ระยะเวลาการระเหย เป็นไอ (retention time)	ชนิดของสารประกอบ
1	6.70	L-lactic acid
2	11.05	2-cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-
3	15.29	levulinic acid
4	17.47	catechol
5	21.06	2-cyclohexen-1-one, 4-(1-methylethyl)-
6	23.22	1,2-benzenediol, 3-methoxy-
7	24.57	1,2-benzenediol, 3-methyl-
8	25.49	carvenone
9	26.44	phenol, 2,6-dimethoxy- (Syringol)
10	37.93	2-propenoic acid (acrylic acid)
11	38.10	ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-
12	38.22	1-(3-isopropyl-4-methyl-pent-3-en-1-ynyl)-1- methyl-cyclopropane
13	38.38	2,3-Epoxypropyl 3,5-xyllyl ether
14	38.68	1H-2-Indenone,2,4,5,6,7,7a-hexahydro-3-(1- methylethyl)-7a-methyl
15	38.94	dihydroxanthin
16	39.20	5-benzofuranacetic acid
17	39.51	unknown
18	39.70	1,2,3,4-tetrahydronaphthalen-1,2-diol, 5,6- dimethoxy-
19	39.82	unknown
20	40.93	unknown



## บทที่ 5

### อภิปรายผลการวิจัย

#### 5.1. องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ประกอบด้วย เซลลูโลส 47.56 %, เฮมิเซลลูโลส 20.90 %, ลิกนิน 21.16 %, เถ้า 0.17 % และอื่นๆ 10.21 % ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ที่ประกอบด้วยเซลลูโลส 40-50 %, เฮมิเซลลูโลส 25-35 %, ลิกนิน 15-25 %, เถ้า 0.1-1 % และอื่นๆ 0.5-10 % (Höfer, 2009)

#### 5.2. ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

##### 5.2.1. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี

5.2.1.1 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี

การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ เวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % ที่ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสได้ 37.45 % และลดสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ 57.56 % และ 11.29 % ตามลำดับ เนื่องจาก การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารละลายต่าง มีผลต่อการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์เพิ่มสูงขึ้น (Cao และคณะ, 2012) รวมถึงการใช้รังสีไมโครเวฟ มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการปรับสภาพด้วยต่าง เช่น การกำจัดลิกนิน และลดระยะเวลาในการปรับสภาพ (Keshwani และ Cheng, 2010) นอกจากนี้ การฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน เนื่องจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติในการกำจัดลิกนินและไม่ส่งผลต่อการทำลายเซลลูโลส (Cao และคณะ, 2012) ซึ่งเมื่อเทียบภาวะการปรับสภาพที่ไม่ผ่านการฟอกและที่ผ่านการฟอก จะพบว่าสัดส่วนลิกนินจะลดลงเล็กน้อย

### 5.2.1.2 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี

การใช้ความร้อนและแรงดันที่ 121 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลา 1 ชั่วโมง ร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และการพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ที่ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสได้ 43.48 % และลดสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสได้ 90.67 % เนื่องจาก การใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูง มีผลต่อการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012) และเมื่อนำมาใช้ร่วมกับสารละลายกรดที่มีสมบัติในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส (Nikzad และคณะ, 2012) จึงทำให้ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ได้อย่างมาก ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลสและลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ และหลังการพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ให้ผลการลดลงของสัดส่วนลิกนินเล็กน้อย เมื่อเทียบกับภาวะการปรับสภาพที่ไม่ผ่านการพอกที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่เท่ากัน

### 5.2.1.3 การเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารเคมีและการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารเคมี

การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ในการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ให้ผลการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส, การลดลงของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ให้ผลการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส, การลดลงของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส แต่ไม่สามารถลดสัดส่วนของลิกนินได้ ซึ่งการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพและสารเคมีที่แตกต่างกัน จะแสดงผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน โดยวิธีทางกายภาพที่ใช้ ได้แก่ (1) การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ, ทำลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน, และเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัสดุ เนื่องจากมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง จึงส่งผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยา (Zhu และคณะ, 2005) และ (2) การใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูง จะทำให้เกิดการบีบอัดของวัสดุ มีผลต่อการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน (Conde-Mejia, Jimenez-Gutierrez และ El-Halwagi, 2012) ในขณะที่สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ (1) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารละลายต่าง มีผลต่อการกำจัดส่วนของลิกนิน โดยการทำลายส่วนของเอสเทอร์และไกลโคซิดิก ซึ่งเป็นโครงสร้างของลิกนิน, เพิ่มความเป็นรู

พูนและพื้นที่ผิวภายในของวัสดุ (Cao และคณะ, 2012) และ (2) สารละลายกรดซัลฟิวริก มีผลต่อการย่อยเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว จึงทำให้สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่ใช้สารเคมีกรดในการปรับสภาพจะลดลงในปริมาณมาก ส่งผลถึงการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลสในวัสดุลิกโน-เซลลูโลส ถึงแม้จะใช้สารละลายกรดที่ความเข้มข้นต่ำก็ตาม (Nikzad และคณะ, 2012) นอกจากนี้ การพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หลังผ่านการปรับสภาพ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส เนื่องจาก สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีสมบัติในการกำจัดลิกนินที่เหลืออยู่หลังการปรับสภาพ และไม่ส่งผลต่อการทำลายเซลลูโลส (Cao และคณะ, 2012) ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การพอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หลังการปรับสภาพสามารถช่วยเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลส และลดสัดส่วนของลิกนิน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่ใช้ความเข้มข้นของสารเคมีที่เท่ากันของภาวะที่ไม่ผ่านการพอก และที่ผ่านการพอกหลังการปรับสภาพ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส และการลดลงของสัดส่วนลิกนินหลังการพอกยังแสดงผลไม่ชัดเจนนัก

นอกจากผลของสัดส่วนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เปลี่ยนแปลงหลังการปรับสภาพแล้ว ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวไมยราบยักษ์หลังการปรับสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการเลือกภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไมยราบยักษ์ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า การปรับสภาพด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และการใช้ความร้อนและแรงดันจากเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) แสดงลักษณะความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวเนื้อไม้เหมือนกัน แต่ขนาดของรูพรุนที่พบมีความแตกต่างกัน โดยขนาดรูพรุนของการปรับสภาพด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) มีขนาดใหญ่กว่าอย่างชัดเจน อาจเนื่องจาก การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ จะมีการเคลื่อนที่ของไอออน และทำให้เกิดการสันสเทือนของโมเลกุลที่มีขั้ว จึงก่อให้เกิดความร้อนและการชนกันของโมเลกุล ซึ่งเป็นการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับวัสดุโดยตรง นอกจากนี้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ทำให้รูพรุนที่พบบนพื้นผิวเนื้อไม้หลังการปรับสภาพด้วยรังสีจากไมโครเวฟมีขนาดใหญ่กว่าการปรับสภาพด้วยเครื่องนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Tomás-Pejó และคณะ, 2011)

จากการพิจารณาปัจจัยทั้งหมดของการปรับสภาพ ได้แก่ สัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินหลังการปรับสภาพ, ปริมาณสารเคมีที่ใช้, ระยะเวลาที่ใช้, น้ำหนักสุทธิหลังการปรับสภาพ และโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่า การปรับสภาพด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนัก

โดยปริมาตร) เป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี เนื่องจากสามารถลดสัดส่วนลินินินได้สูงกว่า, คงเหลือน้ำหนักสุทธิหลังการปรับสภาพสูงกว่า, ใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพน้อยกว่า, อีกทั้งยังคงเหลือสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่สูงกว่า ซึ่งอาจใช้เป็นสารตั้งต้นของการผลิตกรดลิกูลินิกได้เช่นกัน เนื่องจากมีน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอมเป็นองค์ประกอบ

### 5.2.2. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ

การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ ได้แก่ การใช้เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 โดยเป็นเชื้อราในกลุ่มราเน่าขาว (white rot fungi) ที่มีความสามารถในการสร้างเอนไซม์ลิกนินโอไลติก ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์ 3 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดส, เอนไซม์แมกกานีสเปอร์ออกซิเดส และเอนไซม์แลคเคส (Yao และ Nokes, 2013) อย่างไรก็ตาม *P. sordida* สายพันธุ์ SK7 มีความสามารถในการสร้างเอนไซม์เพียง 2 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดสและเอนไซม์แลคเคส ซึ่งเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการย่อยสลายลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลสได้อย่างจำเพาะ (Tuor, Winterhalter และ Fiechter, 1995)

จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ ด้วยการใช้เชื้อรา *P. sordida* สายพันธุ์ SK7 โดยแปรผันปริมาณเชื้อราที่ใช้และจำนวนวันที่ใช้ในการปรับสภาพ พบว่า อัตราส่วนปริมาณเชื้อต่อปริมาณเนื้อไม้ไมยราบยักษ์แห้ง คือ 6 มิลลิกรัม : 1 กรัม เป็นเวลา 30 วัน ให้ผลการปรับสภาพที่ดีที่สุด โดยสามารถลดลินินินได้ 24.38 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้เชื้อราในการปรับสภาพ ซึ่งจะให้ผลการลดลงของลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลส เช่น Seneerisakul และคณะ ทำการปรับสภาพซังข้าวโพด ด้วยเชื้อรา *P. sordida* สายพันธุ์ SK7 เป็นเวลา 20 วัน สามารถลดลินินินได้ 17.58 % (Seneerisakul, Gulari และ Chavadej, 2014) นอกจากนั้น พบการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส ด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* ซึ่งเป็นเชื้อราในกลุ่ม *Phanerochaete* เช่นเดียวกับ *P. sordida* เช่น Shi และคณะ ทำการปรับสภาพต้นฝ้ายด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* เป็นเวลา 14 วัน สามารถลดลินินินได้ 19.38 %, และ Bak และคณะ ทำการปรับสภาพฟางข้าว *P. chrysosporium* เป็นเวลา 15 วัน สามารถลดลินินินได้ 21 % เป็นต้น (Shi, Chinn และ Sharma-Shivappa, 2008; Shi, Sharma-Shivappa และ Chinn, 2009)

### 5.2.3. การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี

การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสได้ 47.50 % ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ 60.77 % และ 19.19 % ตามลำดับ เนื่องจากการปรับสภาพร่วมกันของวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี ส่งผลให้เกิดการ

กำจัดลิกนินในช่วงที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (*Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7) (Tuor, Winterhalter และ Fiechter, 1995) และเมื่อนำมาปรับสภาพต่อด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี (การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟที่ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และการฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร)) ทำให้เกิดการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ (Keshwani และ Cheng, 2010)

#### 5.2.4 การเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธีการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี)

จากผลการทดลอง พบว่า ภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี แสดงผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน ดังนี้

(1) ภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี คือ การปรับสภาพด้วยการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และตามด้วยการฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) โดยแสดงผลการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส 37.45 %, ลดสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน 57.56 % และ 11.29 % ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อการกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ รวมทั้งการใช้รังสีไมโครเวฟช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปรับสภาพด้วยต่าง เช่น การกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เป็นต้น จึงส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยลดระยะเวลาในการปรับสภาพอีกด้วย (Keshwani และ Cheng, 2010)

(2) ภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ คือ การใช้เชื้อรา *P. sordida* สายพันธุ์ SK7 ที่อัตราส่วนปริมาณเชื้อราต่อปริมาณเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ใช้ คือ 6 มิลลิกรัม ต่อ 1 กรัม เป็นเวลา 30 วัน โดยแสดงผลการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส 13.18 %, ลดสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน 19.95 % และ 24.38 % ตามลำดับ เนื่องจาก เชื้อรา *P. sordida* สายพันธุ์ SK7 มีคุณสมบัติในการสร้างเอนไซม์ลิกนินเปอร์ออกซิเดสและเอนไซม์แลคเคส ที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายลิกนินได้ (Tuor, Winterhalter และ Fiechter, 1995) จึงพบการกำจัดลิกนินในปริมาณที่สูงกว่าการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี

(3) ภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี คือ การปรับสภาพด้วยวิธีที่เหมาะสมของวิธีทางชีวภาพ และปรับสภาพต่อด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับ

เคมี โดยแสดงผลการเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสได้ 47.50 % ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ 60.77 % และ 19.19 % ตามลำดับ เนื่องจาก การปรับสภาพด้วยวิธีวิธีทางชีวภาพและตามด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี จึงทำให้การปรับสภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้เพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลส ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้มากกว่าการปรับสภาพด้วยวิธีการปรับสภาพเพียงขั้นตอนเดียว

การเปรียบเทียบโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์หลังการปรับสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี) พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 3 วิธีแสดงผลที่สอดคล้องกัน คือ แสดงลักษณะความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ซึ่งจำนวนรูพรุนที่พบมีจำนวนมาก-น้อยแตกต่างกัน โดยการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี (วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี, วิธีทางชีวภาพ, วิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี) แสดงลักษณะความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวเนื้อไม้ ในขณะที่เนื้อไม้ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพแสดงลักษณะของพื้นผิวเรียบ ไม่มีความเป็นรูพรุนบนพื้นผิว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา เช่น Binod และคณะ (2012) ปรับสภาพซังข้าวโพดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก และ Nantapipat และคณะ (2013) ปรับสภาพขานอ้อยด้วยรังสีจากเครื่องไมโครเวฟร่วมกับสารละลายต่าง แสดงความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวเช่นกัน ซึ่งความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวของเนื้อไม้สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป (Binod และคณะ, 2012; Nazarpour และคณะ, 2013)

### 5.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ใช้ผลิตกรดลิวูลินิก

การตรวจสอบลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบ พีคจำนวน 3 พีค ที่การสะท้อนของระนาบ 100, 110, 200 ซึ่งแสดงโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) ของตัวเร่งปฏิกิริยา และตำแหน่งการสะท้อนของ Al-SBA-15 ที่ 100 จะเคลื่อนไปทาง 2-Theta เล็กน้อยเมื่อเทียบกับ pure silica SBA-15 แสดงให้เห็นว่า Al-SBA-15 มีระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาค (d-spacing) ของรูในโครงสร้างมีค่ามากกว่า pure silica SBA-15 (Hu และคณะ, 2006), (2) การตรวจสอบขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน พบ ไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ 4 รูพรุน (pore size) ขนาด 9.36 นาโนเมตร เนื่องจาก ตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15 เป็นวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ (ขนาด 2-50 นาโนเมตร) ซึ่งการดูดซับในช่วงแรกมีค่า  $P/P_0$  ต่ำ หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $P/P_0$  มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบคัปิลลารี ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิสที่เกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยาก

กว่าเพราะต้องเอาชนะแรงค้ำปิลลารี (capillary force) (Hollas, 2000) และความจำเพาะของพื้นที่ผิว (Total specific surface area) ของ Al-SBA-15 (494 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) จะมีค่าน้อยกว่าของ pure silica SBA-15 (653 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) เนื่องจากการใส่อะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปในโครงสร้างของ pure silica SBA-15 ทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง (Suacharoen และ Tungasmita, 2013), (3) การตรวจสอบตำแหน่ง Al ในโครงสร้าง pure silica SBA-15 พบ พีคในตำแหน่งที่ 50 ppm ซึ่งแสดงตำแหน่งอะตอมของอะลูมิเนียมในโครงสร้างเตตระไฮดรอน (โครงสร้าง AlO<sub>4</sub>) ของ pure silica SBA-15 (Suacharoen และ Tungasmita, 2013), และ (4) การตรวจสอบอัตราส่วนธาตุ Si/Al ในโครงสร้างของ Al-SBA-15 พบ อัตราส่วนธาตุ Si/Al เท่ากับ 15.35 ซึ่งคลาดเคลื่อนจากอัตราส่วนธาตุ Si/Al ตามทฤษฎีที่ 14.1 เนื่องจาก เนื่องจากอะตอมของ Al ที่ใส่ไปตามอัตราส่วนทางทฤษฎี สามารถเข้าไปสร้างพันธะในโครงสร้างของ pure silica SBA-15 ได้เพียงบางส่วน จึงทำให้อะตอมของ Al ที่ไม่เสถียรถูกกำจัดออกหลังผ่านกระบวนการเผาเพื่อไล่น้ำ (calcine) รอบสุดท้าย ส่งผลให้อัตราส่วนธาตุ Si/Al ซึ่งคลาดเคลื่อนจากอัตราส่วนธาตุ Si/Al ตามทฤษฎี (Koekkoek และคณะ, 2012)

#### 5.4 ผลผลิตและหาปริมาณกรดลิวลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

##### 5.4.1 ผลผลิตสุทธิ (ของเหลว, ของแข็ง, แก๊ส) หลังการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลซิส

การสังเคราะห์กรดลิวลินิกผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลซิส ประกอบด้วย (1) เซลลูโลสจากไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ เป็นสารตั้งต้นการผลิตกรดลิวลินิก ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง, (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (ZSM-5, Al-SBA-15) เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ระบบอยู่ในภาวะที่เป็นกรด ซึ่งเกิดจากโปรตอนที่เกิดบนสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต หากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้รับโปรตอนจากสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion) ซึ่งเป็นไอออนที่มีบทบาทในกระบวนการแตกย่อยโมเลกุล (Twaiq, Mohamed และ Bhatia, 2003; Ramya และคณะ, 2012) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวอยู่ในภาวะของแข็งและจะไม่ถูกเปลี่ยนสถานะภายหลังกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลซิส (Hagen, 1999) และ (3) น้ำ เป็นสารละลายในระบบ ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนโปรตอนกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ระบบอยู่ในภาวะที่เป็นกรด ซึ่งช่วยเร่งการย่อยสลายองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ (Nazari และคณะ, 2015)

หลังการสังเคราะห์กรดลิวลินิกผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลซิส ภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไนโตรเจน โดยหลังการสังเคราะห์กรดลิวลินิก แบ่งผลผลิตออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ของแข็ง ประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมีของไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการ

เปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบอื่นๆ เนื่องจากไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ ประกอบด้วย เซลลูโลส เป็นส่วนใหญ่ แต่ยังคงเหลือเฮมิเซลลูโลส และลิกนินบางส่วนอยู่ ซึ่งเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัว ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส แต่จะสลายตัวสมบูรณ์ที่ 450 องศาเซลเซียส (Schniewind, 1989) ดังนั้นจึงเหลือเซลลูโลสบางส่วนที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดลิวูลินิกและสารประกอบอื่นๆ ในส่วนของเฮมิ-เซลลูโลส จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 200 - 260 องศาเซลเซียส ดังนั้นเฮมิเซลลูโลสที่เหลือหลังการปรับสภาพ จะถูกสลายและเปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่นๆ (Schniewind, 1989) และในส่วนของลิกนิน จะสลายตัวอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่วนของ aliphatic side จะเริ่มแตกออกจากลิกนิน และที่อุณหภูมิ 370 - 400 องศาเซลเซียส พันธะระหว่างคาร์บอนจะแตกออก ดังนั้นลิกนินบางส่วนจึงไม่ถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่นๆ (Schniewind, 1989) นอกจากของแข็งจะประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนแล้ว ยังประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงในระบบหลังการสังเคราะห์, (2) ของเหลว เป็นส่วนของสารประกอบที่ถูกเปลี่ยนมาจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ โดยจะละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งเป็นตัวทำละลายของระบบ (Nazari และคณะ, 2015) อย่างไรก็ตามจากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์โมไลซิสจะทำการระเหยเอาน้ำออกจากระบบเพื่อให้คงเหลือเฉพาะสารประกอบที่สังเคราะห์ได้จากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดลิวูลินิก, และ (3) แก๊ส เป็นของสารประกอบที่ถูกเปลี่ยนมาจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของไมยราบยักษ์ที่กลายเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของแก๊ส (Nazari และคณะ, 2015) รวมถึงน้ำที่เป็นตัวทำละลายของระบบ ก็เปลี่ยนรูปเป็นแก๊สบางส่วนเช่นกัน

#### 5.4.2 ค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดลิวูลินิกหลังสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเทอร์โมไฮโดไลซิส

ค่าความจำเพาะของกรดลิวูลินิก จะแปรผันตามสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากเซลลูโลส ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักที่สามารถเปลี่ยนเป็นกรดลิวูลินิก (Girisuta, 2007) โดยในภาวะที่เป็นกรด เซลลูโลสจะถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และเกิดปฏิกิริยาการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrangement) ให้อยู่ในรูปของ enediol และเกิดปฏิกิริยาการจัดน้ำเปลี่ยน enediol ให้เป็น 3,4-dideoxyglucosulose-3 และ 5-HMF ตามลำดับ จากนั้น 5-HMF เกิดปฏิกิริยาการเติมน้ำให้กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ของวงแหวนฟูแรน (furan ring) เปลี่ยนรูปเป็น tricarbonyl intermediate ซึ่งจะไม่เสถียร และเปลี่ยนเป็นกรดลิวูลินิกในที่สุด (Girisuta, 2007) ซึ่งจากการทดลองพบว่า การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมีให้ค่าสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพสูงสุด คือ 70.15 % โดยให้ค่าความจำเพาะสูงสุดที่ 18.86 % และ 13.82 % เมื่อ



ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หากสัดส่วนเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพมีสูง จะส่งผลให้ค่าความจำเพาะของกรดลิวูลินิกสูงด้วย นอกจากนี้ เซลลูโลสยังสามารถเปลี่ยนเป็นสารเคมีอื่นๆ เช่น กรดแลคติก (lactic acid) และกรดโพรปิโอนิก (2-propionic acid) เป็นต้น (Wang และคณะ, 2013) แต่จะพบในปริมาณน้อย นอกจากนี้ ในขณะที่ ลิกนินที่เหลือในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพก็สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เช่นกัน ซึ่งเมื่อโครงสร้างของลิกนินแตกออก จะให้สารในกลุ่ม phenol และ syringol ซึ่งสารดังกล่าวสามารถถูกออกซิไดซ์ เป็นสารเคมีชนิดอื่น เช่น 3-methoxy-1,2-benzenediol, 3-methyl-1,2-benzenediol, เป็นต้น (Pan และคณะ, 2010) ซึ่งจากการทดลองนี้ พบสาร 2,6-dimethoxyphenol (syringol), catechol, 3-methoxy-1,2-Benzenediol, 3-methyl-1,2-Benzenediol, และ carvenone ซึ่งเป็นสารที่ผ่านการแปรรูปจากลิกนิน แสดงให้เห็นว่าลิกนินที่เหลือในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ สามารถเกิดปฏิกิริยาและเปลี่ยนรูปเป็นสารเคมีอื่นๆ ส่งผลให้ค่าความจำเพาะของการเกิดกรดลิวูลินิกลดลงได้

นอกจากสัดส่วนของเซลลูโลสและลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ จะมีผลต่อค่าความจำเพาะของกรดลิวูลินิกแล้ว ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความจำเพาะของกรดลิวูลินิก โดยค่าความเป็นกรดสูงจะแสดงความจำเพาะต่อการเกิดกรดลิวูลินิกที่สูง (Ya'aini และ Amin, 2013) ซึ่งค่าความเป็นกรดของของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นอยู่กับ (1) ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นวัสดุรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (ZSM-5) จะให้ค่าความเป็นกรดสูงกว่าวัสดุรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (Al-SBA-15) (Song และคณะ, 1996; Triantafyllidis และคณะ, 2007) และ (2) อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al ratio) ซึ่งอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่สูงขึ้น จะทำให้ค่าความเป็นกรดลดลง (Coster, Blumenfeld และ Fripiat, 1994; Huang และคณะ, 2008; Koekkoek และคณะ, 2012) จากผลการทดลอง พบว่า ZSM-5 มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่ 14.1 ซึ่งต่ำกว่า Al-SBA-15 ที่ 15.35 ทำให้ ZSM-5 มีค่าความเป็นกรดที่สูงกว่า Al-SBA-15 ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไทเทรต ที่พบว่า ZSM-5 แสดงค่าความเป็นกรดที่ 0.70 มิลลิโมลต่อกรัม (mmol/g) ซึ่งสูงกว่า Al-SBA-15 ที่แสดงค่าความเป็นกรดที่ 0.58 มิลลิโมลต่อกรัม (mmol/g)

ในขณะที่ผลผลิตสุทธิของกรดลิวูลินิก จะแปรผันตาม (1) ผลผลิตสุทธิของของเหลวหลังการระเหยเอาน้ำออกจากส่วนของเหลว บ่งบอกปริมาณของสารประกอบทั้งหมดที่เปลี่ยนมาจากองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ และ (2) ค่าความจำเพาะของกรดลิวูลินิก บ่งบอกถึงปริมาณกรดลิวูลินิกที่อยู่ในส่วนของผลผลิตสุทธิของของเหลวหลังการระเหยเอาน้ำออกจากส่วนของเหลว โดยจากผลการทดลอง พบว่า การสังเคราะห์กรดลิวูลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบ

ยักซ์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมีให้เป็นภาวะที่ให้ผลผลิตสุทธิสูงสุดที่ 5.68 % และ 4.27 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เมื่อสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 ตามลำดับ ซึ่งการสังเคราะห์กรดลิวลินิกจากภาวะการปรับสภาพดังกล่าว มีค่าผลผลิตสุทธิของของเหลวหลังการระเหยเอาน้ำออกที่ใกล้เคียงกันที่ 30.40 % และ 31.00 % (เมื่อสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 ตามลำดับ) แต่ให้ค่าค่าความจำเพาะของกรดลิวลินิกแตกต่างกันที่ 18.86 % และ 13.82 % (เมื่อสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 ตามลำดับ) ดังนั้น ค่าความจำเพาะของกรดลิวลินิกที่สูง จะส่งผลให้ผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกสูงขึ้น



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ไมยราบยักษ์ เป็นวัชพืชที่พบการระบาดในหลายพื้นที่และยากที่จะควบคุมการระบาดและกำจัดให้หมดไป ซึ่งการนำไมยราบยักษ์มาใช้แปรรูปให้เกิดผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ นอกจากนี้จะช่วยลดการระบาดแล้ว ยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับไมยราบยักษ์ได้อีกด้วย ในอดีตที่ผ่านมา มีการนำเนื้อไม้ไมยราบยักษ์มาผ่านการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า เช่น ไม้อัด, ถ่านไม้, และกระดาษกรอง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ไมยราบยักษ์สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากกว่าที่ผ่านมา เนื่องจากไมยราบยักษ์มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ เซลลูโลส ซึ่งสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น พลังงาน (เอทานอล), สารเคมี (กรดลิวูลินิก, กรดแลกติก), และสารละลาย (อะซิโตน, บิวทานอล) เป็นต้น (Kamm และ Kamm, 2004) นอกจากนี้เซลลูโลสแล้ว ภายในโครงสร้างของไมยราบยักษ์ ยังพบองค์ประกอบทางเคมีชนิดอื่น เช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เป็นต้น (Menon และ Rao, 2012) ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการปรับสภาพเพื่อกำจัดองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าว

#### 6.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ที่ใช้ในศึกษาประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ เซลลูโลส 47.56 %, เฮมิเซลลูโลส 20.90 %, ลิกนิน 21.16 %, เถ้า 0.17 %, องค์ประกอบอื่นๆ 10.21 % และความชื้น 34.28 %

#### 6.2 ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

5.2.1 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี พบว่า ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ คือการใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และตามด้วยการฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 65.37 % (37.45 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น), ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 8.87 % (57.56 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง), และลดสัดส่วนของลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 18.77 % (11.29 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 62.89 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก)

6.2.2 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพ พบว่า ภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ คือการใช้เชื้อรา *Phanerochaete sordida* สายพันธุ์ SK7 โดยใช้ปริมาณเชื้อรา 6 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัมของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ เป็นเวลา 30 วัน โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 53.83 % (13.18 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น), ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 16.73 % (19.95 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง), และลดสัดส่วนของลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 16.00 % (24.38 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพคงเหลือ 73.89 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก)

6.2.3 การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี โดยการปรับสภาพด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธีทางชีวภาพ และตามด้วยภาวะที่เหมาะสมจากวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 70.15 % (47.50 % ของสัดส่วนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น), ลดสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 8.20 % (60.77 % ของสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง), และลดสัดส่วนของลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 17.10 % (19.19 % ของสัดส่วนลิกนินที่ลดลง) และน้ำหนักสุทธิของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพเหลือ 43.33 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก)

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์หลังการปรับสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า พื้นผิวของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีลักษณะพื้นผิวเรียบ มีความต่อเนื่องของพื้นผิว ในขณะที่พื้นผิวของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ จะพบลักษณะรูพรุนบนพื้นผิวของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ซึ่งพบมากน้อยแตกต่างกันตามวิธีการปรับสภาพที่ใช้ โดยการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี เป็นวิธีที่ทำให้เกิดรูพรุนบนพื้นผิวของเนื้อไม้มากที่สุด

### 6.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ใช้ผลิตกรดลิวลินิก

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี Al-SBA-15 ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล พบว่า

- (1) โครงสร้างเป็นแบบหกเหลี่ยม (hexagonal)
- (2) รูพรุนมีขนาด 9.36 นาโนเมตร และรูปแบบการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเป็นแบบที่ 4 ซึ่งพบในกลุ่มวัสดุรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (2-50 นาโนเมตร)
- (3) ตำแหน่งของอะตอม Al แสดงในโครงสร้างเตตระไฮดรอน (ตำแหน่งพีคที่ 50 ppm)

- (4) อัตราส่วนของอะตอม Al/Si ใน Al-SBA-15 เท่ากับ 15.35 (อัตราส่วนทางทฤษฎี เท่ากับ 14.1)

#### 6.4 ผลิตและหาปริมาณกรดลิวลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์

การผลิตกรดลิวลินิกจากเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ Al-SBA-15 พบว่า เซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี ให้ค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกสูงสุด ดังนี้

- (1) กรดลิวลินิก ที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ให้ค่าความจำเพาะกรดลิวลินิกที่ 18.68 % และให้ผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกที่ 5.68 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก)
- (2) กรดลิวลินิก ที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15 ให้ค่าความจำเพาะกรดลิวลินิกที่ 13.82 % และให้ผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกที่ 4.27 % (น้ำหนักโดยน้ำหนัก)

นอกจากนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 แสดงความจำเพาะต่อการเกิดกรดลิวลินิกสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Al-SBA-15

#### อภิปรายผล

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสารเคมีเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูง มีการแข่งขันสูงทั้งในประเทศและนานาชาติ รวมทั้งมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นมากมาย อาทิเช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น โดยการผลิตรวมในเชิงอุตสาหกรรม ต้องคำนึงถึง จุดคุ้มทุน (Break-Even Point) ทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นระดับปริมาณสินค้าที่ผลิตและขายสินค้า ที่ทำให้รายได้รวมจากการดำเนินธุรกิจเท่ากับต้นทุนรวม ซึ่งทำให้ต้องคำนวณถึงต้นทุนและผลกำไรของการผลิต เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับผู้ประกอบการในดำเนินธุรกิจต่อไป

ในงานวิจัยนี้ สนใจการผลิตกรดลิวลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ โดยทำการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (เชื้อรา *P. sordida* อัตราส่วน 6 มิลลิกรัมเชื้อรา : 1 กรัมเนื้อไม้เป็นเวลา 30 วัน) และตามด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับสารเคมี (การใช้รังสีจากเครื่องไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ เวลา 10 นาที ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) และการฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 % (น้ำหนักโดยปริมาตร) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง) จากนั้น นำเนื้อไม้ที่ผ่านการปรับสภาพมาผลิตกรดลิวลินิกผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิส (ความดันแก๊สไฮโดรเจน 145 ปอนด์/ตารางนิ้ว อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 (10 %

น้ำหนัก/น้ำหนักสารตั้งต้น) จากผลการทดลอง พบว่า ได้ผลผลิตกรดลิวูลินิกสุทธิที่ 0.0568 กรัม/กรัม เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ และเมื่อคำนวณจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์เริ่มต้นที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่า ได้ผลผลิตกรดลิวูลินิกสุทธิที่ 0.0244 กรัม/กรัมเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

จากขั้นตอนการผลิตกรดลิวูลินิกข้างต้น เมื่อคำนวณถึงต้นทุนและผลกำไรจากการผลิต พบว่า ต้นทุนของการผลิต ประกอบด้วย (1) สารตั้งต้นของการผลิต ได้แก่ เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ ซึ่งพบปริมาณมากในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นวัชพืชที่ระบอบอย่างหนัก แต่พบการนำไมยราบยักษ์ไปใช้ประโยชน์ในปริมาณน้อยมาก จึงทำให้เนื้อไม้ไมยราบยักษ์เป็นสารตั้งต้นที่มีมูลค่าต่ำในกระบวนการผลิต, (2) พลังงานที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ พลังงานความร้อนในการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์และการผลิตกรดลิวูลินิก, (3) สารเคมี ได้แก่ สารเคมีในการปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์, การผลิตกรดลิวูลินิก และการแยกกรดลิวูลินิกให้บริสุทธิ์ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ (โซเดียมไฮดรอกไซด์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, แก๊สไนโตรเจน, ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5) ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก และใช้ในปริมาณน้อย มีเพียงตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ที่มีราคาสูง (366 ดอลลาร์สหรัฐ/กิโลกรัม, บริษัท Sigma) แต่ใช้ในปริมาณน้อยเช่นกัน, และ (4) แรงงาน ซึ่งกระบวนการผลิตจะใช้เครื่องจักรเป็นส่วนใหญ่ โดยจะมีต้นทุนสูงในกรณีที่มีการตั้งโรงงานหรือสร้างเครื่องจักรชนิดใหม่ที่ใช้ในการผลิต แต่หากมีเครื่องจักรที่สนับสนุนการผลิตอยู่แล้ว จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก ดังนั้น ต้นทุนของการผลิตกรดลิวูลินิกส่วนใหญ่จะอยู่ที่พลังงานและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ รวมถึงแรงงานการผลิต (กรณีที่ตั้งโรงงานหรือสร้างเครื่องจักรชนิดใหม่) อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี, ขนาด, และมาตรการส่งเสริมการลงทุนของรัฐ และในส่วนของกำไรจากการผลิต คือ กรดลิวูลินิก รวมถึงผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ได้จากการผลิต

จากข้อมูลงานวิจัย พบว่า เนื้อไม้ไมยราบยักษ์ 1 กรัม สามารถให้ผลผลิตกรดลิวูลินิกที่ 0.0244 กรัม ดังนั้น หากต้องการได้กรดลิวูลินิก 1 กิโลกรัม จำเป็นต้องใช้เนื้อไม้ไมยราบยักษ์เริ่มต้นที่ 40 กิโลกรัม ซึ่งจะต้องนำเนื้อไม้ไมยราบยักษ์มาผ่านการปรับสภาพและผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการกว่า 8000 ครั้ง ถึงจะได้กรดลิวูลินิก 1 กิโลกรัม ซึ่งหากคำนวณต้นทุนและผลกำไรของการผลิต แสดงในตาราง 15

ตาราง 15 ต้นทุนและผลกำไรการผลิตกรดลิวูลินิก 1 กิโลกรัม

ต้นทุนการผลิต		ผลกำไร	
ประเภท	ราคา (ดอลลาร์สหรัฐ)	ประเภท	ราคา (ดอลลาร์สหรัฐ)
สารตั้งต้นการผลิต (เนื้อไม้ ไมยราบยักษ์)	0	กรดลิวูลินิก ***	1,590
พลังงาน *			
- การปรับสภาพ (0.374 กิโลวัตต์/ครั้ง)	324		
- การผลิต (0.160 กิโลวัตต์/ครั้ง)	140		
สารเคมี **			
- การปรับสภาพ	500		
- การผลิต	1000		
รวม	1,964	รวม	1,590

\* พลังงาน คำนวณจากการแปลงอุณหภูมิเป็นกำลังไฟฟ้า (วัตต์) และเปรียบเทียบกับอัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ประเภทอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยคำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตต่อครั้ง

\*\*สารเคมี คำนวณจากราคาสารเคมีที่ใช้ทั้งหมดต่อการผลิตกรดลิวูลินิก 1 กิโลกรัม

\*\*\* ราคากรดลิวูลินิก (ความบริสุทธิ์ 98 %, บริษัท Sigma)

จากข้อมูลข้างต้น เห็นว่า การผลิตกรดลิวูลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ ยังให้ผลกำไรน้อยกว่าต้นทุนของการผลิต อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิต ยังได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ (byproduct) ที่มีมูลค่าสูง เช่น L-lactic acid (ความบริสุทธิ์ 98 %, บริษัท Sigma) มีราคา 7,348 ดอลลาร์สหรัฐ/กิโลกรัม, catechol (ความบริสุทธิ์ 99 %, บริษัท Sigma) มีราคา 436 ดอลลาร์สหรัฐ/กิโลกรัม, และ 2,6-dimethoxyphenol (ความบริสุทธิ์ 99 %, บริษัท Sigma) มีราคา 1,757 ดอลลาร์สหรัฐ/กิโลกรัม เป็นต้น ซึ่งหากแยกให้บริสุทธิ์ ก็สามารถเพิ่มกำไรทางการผลิตได้ รวมถึง การวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลผลิตสุทธิของกรดลิวูลินิกสูงขึ้น เช่น การเพิ่มขั้นตอนการกำจัดลิกนินหลังการปรับสภาพ, การเปลี่ยนภาวะการผลิต เป็นต้น อาจเป็นอีกแนวทางในการเพิ่มผลกำไรของการผลิตได้

เช่นกัน นอกจากนี้ การผลิตสารเคมีในเชิงอุตสาหกรรม ราคาของต้นทุนที่ใช้จะถูกกว่าต้นทุนที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากราคาของพลังงานและสารเคมีที่ใช้จะต่ำลงเมื่อมีการสั่งซื้อในปริมาณที่สูงขึ้น

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมีจากชีวมวลพืช ยังสามารถแปรรูปองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่ไม่ถูกใช้ในกระบวนการผลิต และถูกแยกออกมาในขั้นตอนแรกสามารถนำไปแปรรูปเป็นสารเคมีเพิ่มมูลค่าอื่นๆ และหากอุตสาหกรรมดังกล่าวมีความสามารถในการแปรรูปกรดลิวลินิกเป็นสารเคมีเพิ่มมูลค่าอื่นๆ เช่น สารเติมแต่งเชื้อเพลิง สารตั้งต้นของพอลิเมอร์, และสารมัธยันตร์ เป็นต้น ก็จะสามารถเพิ่มผลกำไรทางการผลิตได้อีกทางหนึ่ง รวมทั้งขีดความสามารถของหน่วยงานวิจัยของอุตสาหกรรม ในการพัฒนาการผลิตให้สามารถลดต้นทุนและเพิ่มผลกำไรทางการผลิตให้สูงกว่าจุดคุ้มทุนที่ตั้งไว้

ดังนั้น ความคุ้มทุนจากการผลิตกรดลิวลินิกจากเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ ในเชิงอุตสาหกรรม จึงเกิดขึ้นจากการใช้สารตั้งต้นที่มีมูลค่าต่ำ แต่ได้กรดลิวลินิกและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีราคาสูง อีกทั้งยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นสารเคมีชนิดอื่นที่มีมูลค่าเพิ่ม รวมทั้งความคุ้มทุนทางอ้อมที่มีใช้เป็นเม็ดเงินโดยตรง เช่น การลดการระบาศของไมยราบยักษ์ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มพื้นที่ทำกินทั้งด้านเกษตรกรรม ปศุสัตว์ และการประมง รวมถึงส่งผลดีต่อระบบนิเวศอีกด้วย

### ข้อเสนอแนะ

การปรับสภาพเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ด้วยวิธีทางชีวภาพและวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี สามารถเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ได้ อย่างไรก็ตามยังคงเหลือองค์ประกอบอื่นในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ที่ผ่านการปรับสภาพ โดยเฉพาะลิกนิน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกำจัดลิกนิน (delignification) หลังการปรับสภาพ สามารถกำจัดลิกนินในเนื้อไม้ไมยราบยักษ์ และเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสให้สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจำเพาะและผลผลิตสุทธิของกรดลิวลินิกเพิ่มสูงขึ้นได้



## รายการอ้างอิง

- Bak, J. S., Ko, J. K., Choi, I. G., Park, Y. C., Seo, J. H. และ Kim, K. H. (2009). "Fungal pretreatment of lignocellulose by *Phanerochaete chrysosporium* to produce ethanol from rice straw." Biotechnology and Bioengineering **104**(3): 471-482.
- Bevilaqua, D. B., Rambo, M. K., Rizzetti, T. M., Cardoso, A. L. และ Martins, A. F. (2013). "Cleaner production: levulinic acid from rice husks." Journal of Cleaner Production **47**: 96-101.
- Binod, P., Satyanagalakshmi, K., Sindhu, R., Janu, K. U., Sukumaran, R. K. และ Pandey, A. (2012). "Short duration microwave assisted pretreatment enhances the enzymatic saccharification and fermentable sugar yield from sugarcane bagasse." Renewable Energy **37**(1): 109-116.
- Blanch, H. W., Simmons, B. A. และ Klein-Marcuschamer, D. (2011). "Biomass deconstruction to sugars." Biotechnology Journal **6**(9): 1086-1102.
- Borazjani, H., Wiltcher, D. และ Diehl, S. (2005). "Bioremediation of polychlorinated biphenyl and Petroleum contaminated soil." Proceedings of Environmental Science and Technology **2**: 502-507.
- Bovey, F. A., Mirau, P. A. และ Gutowsky, H. (1988). Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, Elsevier.
- Bozell, J. J., Moens, L., Elliott, D., Wang, Y., Neuenschwander, G., Fitzpatrick, S., Bilski, R. และ Jarnefeld, J. (2000). "Production of levulinic acid and use as a platform chemical for derived products." Resources, Conservation and Recycling **28**(3): 227-239.
- Brunauer, S., Emmett, P. H. และ Teller, E. (1938). "Adsorption of gases in multimolecular layers." Journal of the American Chemical Society **60**(2): 309-319.

- Cao, W., Sun, C., Liu, R., Yin, R. และ Wu, X. (2012). "Comparison of the effects of five pretreatment methods on enhancing the enzymatic digestibility and ethanol production from sweet sorghum bagasse." Bioresource Technology **111**: 215-221.
- Chang, C., Cen, P. และ Ma, X. (2007). "Levulinic acid production from wheat straw." Bioresource Technology **98**(7): 1448-1453.
- Cheng, J. (2009). Biomass to Renewable Energy Processes, CRC press.
- Conde-Mejia, C., Jimenez-Gutierrez, A. และ El-Halwagi, M. (2012). "A comparison of pretreatment methods for bioethanol production from lignocellulosic materials." Process Safety and Environmental Protection **90**(3): 189-202.
- Coster, D., Blumenfeld, A. และ Fripiat, J. (1994). "Lewis acid sites and surface aluminum in aluminas and zeolites: a high-resolution NMR study." The Journal of Physical Chemistry **98**(24): 6201-6211.
- Efremov, A., Pervyshina, G. และ Kuznetsov, B. (1997). "Thermocatalytic transformations of wood and cellulose in the presence of HCl, HBr, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>." Chemistry of Natural Compounds **33**(1): 84-88.
- Efremov, A., Pervyshina, G. และ Kuznetsov, B. (1998). "Production of levulinic acid from wood raw material in the presence of sulfuric acid and its salts." Chemistry of Natural Compounds **34**(2): 182-185.
- Energy, U. (2010). Energy Efficiency and Renewable Energy.
- Evans, H. C., Carrion, G. และ Guzman, G. (1993). "A new species of Sphaerulina and its *Phloeospora anamorph*, with potential for biological control of *Mimosa pigra*." Mycological Research **97**(1): 59-67.
- Galletti, A. M. R., Antonetti, C., De Luise, V., Licursi, D. และ Nassi, N. (2012). "Levulinic acid production from waste biomass." BioResources **7**(2): 1824-1835.
- Girisuta, B. (2007). Levulinic Acid from Lignocellulosic Biomass, University Library Groningen][Host].

- Goering, H. และ Van Soest, P. (1970). "Forage fiber analysis. Agricultural handbook no. 379." US Department of Agriculture, Washington, DC: 1-20.
- Hagen, J. (1999). "Heterogeneous Catalysis: Fundamentals." Industrial Catalysis: A Practical Approach, Second Edition: 99-222.
- Harvey, P. J. และ Thurston, C. F. (2001). The Biochemistry of Lignolytic Fungi. British Mycological Society Symposium Series.
- Heard, T. A., Paynter, Q., Chan, R. และ Mira, A. (2005). "Malacorhinus irregularis for biological control of *Mimosa pigra*: host-specificity, life cycle, and establishment in Australia." Biological Control **32**(2): 252-262.
- Höfer, R. (2009). Sustainable Solutions for Modern Economies, Royal Society of Chemistry.
- Hollas, J. M. (2000). Moderne Methoden in der Spektroskopie, Springer.
- Hu, W., Luo, Q., Su, Y., Chen, L., Yue, Y., Ye, C. และ Deng, F. (2006). "Acid sites in mesoporous Al-SBA-15 material as revealed by solid-state NMR spectroscopy." Microporous and Mesoporous Materials **92**(1): 22-30.
- HuaChang, J., Ling, Z., BingLong, Y., JunJiang, G. และ BaoJian, L. (2010). "Preparation of  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  solid superacid catalyst for producing levulinic acid from hydrolysis of sucrose." Chemistry and Industry of Forest Products **30**(6): 61-65.
- Huang, J., Jiang, Y., Marthala, V. R., Thomas, B., Romanova, E. และ Hunger, M. (2008). "Characterization and acidic properties of aluminum-exchanged zeolites X and Y." The Journal of Physical Chemistry C **112**(10): 3811-3818.
- Itoji, H. (1998). Gas chromatograph/mass spectrometer, Google Patents.
- Jorgensen, A. D., Picel, K. C. และ Stamoudis, V. C. (1990). "Prediction of gas chromatography flame ionization detector response factors from molecular structures." Analytical Chemistry **62**(7): 683-689.

- Joshi, S. S., Zodge, A. D., Pandare, K. V. และ Kulkarni, B. D. (2014). "Efficient Conversion of Cellulose to Levulinic Acid by Hydrothermal Treatment Using Zirconium Dioxide as a Recyclable Solid Acid Catalyst." Industrial & Engineering Chemistry Research **53**(49): 18796-18805.
- Julien, M., McFadyen, R. และ Cullen, J. (2012). "Biological Control of Weeds in Australia."
- Kamm, B. และ Kamm, M. (2004). "Principles of biorefineries." Applied Microbiology and Biotechnology **64**(2): 137-145.
- Keshwani, D. R. และ Cheng, J. J. (2010). "Microwave-based alkali pretreatment of switchgrass and coastal bermudagrass for bioethanol production." Biotechnology Progress **26**(3): 644-652.
- Koekkoek, A. J., van Veen, J. R., Gerritsen, P. B., Giltay, P., Magusin, P. C. และ Hensen, E. J. (2012). "Brønsted acidity of Al/SBA-15." Microporous and Mesoporous Materials **151**: 34-43.
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J. และ Stroeve, P. (2009). "Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production." Industrial & Engineering Chemistry Research **48**(8): 3713-3729.
- Li, C., Knierim, B., Manisseri, C., Arora, R., Scheller, H. V., Auer, M., Vogel, K. P., Simmons, B. A. และ Singh, S. (2010). "Comparison of dilute acid and ionic liquid pretreatment of switchgrass: biomass recalcitrance, delignification and enzymatic saccharification." Bioresource Technology **101**(13): 4900-4906.
- Menon, V. และ Rao, M. (2012). "Trends in bioconversion of lignocellulose: biofuels, platform chemicals & biorefinery concept." Progress in Energy and Combustion Science **38**(4): 522-550.
- Montaser, A. (1998). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, John Wiley & Sons.

- Mukherjee, A., Dumont, M.-J. และ Raghavan, V. (2015). "Review: Sustainable production of hydroxymethylfurfural and levulinic acid: Challenges and opportunities." Biomass and Bioenergy **72**: 143-183.
- Nazari, L., Yuan, Z., Souzanchi, S., Ray, M. B. และ Xu, C. C. (2015). "Hydrothermal liquefaction of woody biomass in hot-compressed water: Catalyst screening and comprehensive characterization of bio-crude oils." Fuel **162**: 74-83.
- Nazarpour, F., Abdullah, D. K., Abdullah, N. และ Zamiri, R. (2013). "Evaluation of biological pretreatment of rubberwood with white rot fungi for enzymatic hydrolysis." Materials **6**(5): 2059-2073.
- Nikzad, M., Movagharnejad, K., Najafpour, G. และ Talebnia, F. (2012). "Comparative studies on the effect of pretreatment of rice husk on enzymatic digestibility and Bioethanol production." The International Journal of Engineering Science: 455-464.
- Pan, L.-t., Shen, Z., Wu, L., Zhang, Y.-l., Zhou, X.-f. และ Jin, F.-m. (2010). "Hydrothermal production of formic and acetic acids from syringol." Journal of Zhejiang University SCIENCE A **11**(8): 613-618.
- Paynter, Q. (2004). "Evaluating *Mimosa pigra* biological control in Australia." Research and Management of Mimosa pigra. CSIRO Entomology, Canberra: 141-148.
- Peng, L., Lin, L., Zhang, J., Zhuang, J., Zhang, B. และ Gong, Y. (2010). "Catalytic conversion of cellulose to levulinic acid by metal chlorides." Molecules **15**(8): 5258-5272.
- Pérez, J., Munoz-Dorado, J., de la Rubia, T. และ Martinez, J. (2002). "Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview." International Microbiology **5**(2): 53-63.
- Pramual, P., Khumkratok, S. และ Wongpakam, K. (2011). "Population genetics of invasive weed *Mimosa Pigra* L.(Mimosoideae) in Thailand." Pakistan Journal of Botany **43**(6): 2721-2726.

- Ramya, G., Sudhakar, R., Joice, J. A. I., Ramakrishnan, R. and Sivakumar, T. (2012). "Liquid hydrocarbon fuels from jatropha oil through catalytic cracking technology using AlMCM-41/ZSM-5 composite catalysts." Applied Catalysis A: General **433**: 170-178.
- Ren, H., Zhou, Y. and Liu, L. (2013). "Selective conversion of cellulose to levulinic acid via microwave-assisted synthesis in ionic liquids." Bioresource Technology **129**: 616-619.
- Ritter, S. (2006). "Biorefinery gets ready to deliver the goods." Chem. Eng. News (August 21) **47**.
- Salehian, P., Karimi, K., Zilouei, H. and Jeihanipour, A. (2013). "Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment." Fuel **106**: 484-489.
- Schniewind, A. P. (1989). Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials, Pergamon Press; MIT Press.
- Schultz, G. and Barrow, P. (1995). "The control of *Mimosa pigra* on the Oenpelli floodplains." Wetland Research in the Wet-Dry Tropics of Australia: 196-199.
- Seneesrisakul, K., Gulari, E. and Chavadej, S. (2014). "Study on Microbial Pretreatment for Enhancing Enzymatic Hydrolysis of Corncob."
- Shi, J., Chinn, M. S. and Sharma-Shivappa, R. R. (2008). "Microbial pretreatment of cotton stalks by solid state cultivation of *Phanerochaete chrysosporium*." Bioresource Technology **99**(14): 6556-6564.
- Shi, J., Sharma-Shivappa, R. R. and Chinn, M. S. (2009). "Microbial pretreatment of cotton stalks by submerged cultivation of *Phanerochaete chrysosporium*." Bioresource Technology **100**(19): 4388-4395.
- Sing, K. (2001). "The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects **187**: 3-9.

- Soler-Illia, G. J. d. A., Sanchez, C., Lebeau, B. และ Patarin, J. (2002). "Chemical strategies to design textured materials: from microporous and mesoporous oxides to nanonetworks and hierarchical structures." Chemical Reviews **102**(11): 4093-4138.
- Son, N. H., Van Lam, P., Van Cam, N. และ Thi, D. V. (2001). "Preliminary studies on control of *Mimosa pigra* in Vietnam." Strategic Weed Management in Vietnamese Wetlands; Weed Control and Occupational Health and Safety Issues: 110-116.
- Song, C., Lai, W.-C., Schmitz, A. และ Reddy, K. (1996). Characterization of acidic properties of microporous and mesoporous zeolite catalysts using TGA and DSC, American Chemical Society, Washington, DC (United States).
- Suacharoen, S. และ Tungasmita, D. N. (2013). "Hydrothermolysis of carbohydrates to levulinic acid using metal supported on porous aluminosilicate." Journal of Chemical Technology and Biotechnology **88**(8): 1538-1544.
- Sun, Y. และ Cheng, J. J. (2005). "Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production." Bioresource Technology **96**(14): 1599-1606.
- Tian, X. f., Fang, Z. และ Guo, F. (2012). "Impact and prospective of fungal pre-treatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis." Biofuels, Bioproducts and Biorefining **6**(3): 335-350.
- Tomás-Pejó, E., Alvira, P., Ballesteros, M. และ Negro, M. (2011). "Pretreatment technologies for lignocellulose-to-bioethanol conversion." Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes **7**: 149-176.
- Triantafyllidis, K., Komvokis, V., Papapetrou, M., Vasalos, I. และ Lappas, A. (2007). "Microporous and mesoporous aluminosilicates as catalysts for the cracking of Fischer-Tropsch waxes towards the production of "clean" bio-fuels." Studies in Surface Science and Catalysis **170**: 1344-1350.
- Tuor, U., Winterhalter, K. และ Fiechter, A. (1995). "Enzymes of white-rot fungi involved in lignin degradation and ecological determinants for wood decay." Journal of Biotechnology **41**(1): 1-17.

- Twaiq, F. A., Mohamed, A. R. และ Bhatia, S. (2003). "Liquid hydrocarbon fuels from palm oil by catalytic cracking over aluminosilicate mesoporous catalysts with various Si/Al ratios." Microporous and Mesoporous Materials **64**(1): 95-107.
- Vicentim, M. P. และ Ferraz, A. (2007). "Enzyme production and chemical alterations of Eucalyptus grandis wood during biodegradation by *Ceriporiopsis subvermispora* in cultures supplemented with Mn<sup>2+</sup>, corn steep liquor and glucose." Enzyme and Microbial Technology **40**(4): 645-652.
- Walden, D., Finlayson, C., van Dam, R. และ Storrs, M. (2000). "Managing weeds in tropical wetlands: Wetland risk assessment and *mimosa pigra*."
- Wang, Y., Deng, W., Wang, B., Zhang, Q., Wan, X., Tang, Z., Wang, Y., Zhu, C., Cao, Z. และ Wang, G. (2013). "Chemical synthesis of lactic acid from cellulose catalysed by lead (II) ions in water." Nature Communications **4**.
- Weingarten, R., Kim, Y. T., Tompsett, G. A., Fernández, A., Han, K. S., Hagaman, E. W., Conner, W. C., Dumesic, J. A. และ Huber, G. W. (2013). "Conversion of glucose into levulinic acid with solid metal (IV) phosphate catalysts." Journal of Catalysis **304**: 123-134.
- Wirf, L. A. (2006). "The effect of manual defoliation and *Macaria pallidata* (Geometridae) herbivory on *Mimosa pigra*: implications for biological control." Biological Control **37**(3): 346-353.
- Xu, J., Chen, Y., Cheng, J. J., Sharma-Shivappa, R. และ Burns, J. (2011). "Delignification of switchgrass cultivars for bioethanol production." BioResources **6**(1): 707-720.
- Ya'aini, N. และ Amin, N. A. S. (2013). "Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to levulinic acid in ionic liquid." BioResources **8**(4): 5761-5772.
- Ya'aini, N., Amin, N. A. S. และ Asmadi, M. (2012). "Optimization of levulinic acid from lignocellulosic biomass using a new hybrid catalyst." Bioresource Technology **116**: 58-65.



- Yao, W. และ Nokes, S. E. (2013). "The use of co-culturing in solid substrate cultivation and possible solutions to scientific challenges." Biofuels, Bioproducts and Biorefining **7**(4): 361-372.
- Yin, S. และ Tan, Z. (2012). "Hydrothermal liquefaction of cellulose to bio-oil under acidic, neutral and alkaline conditions." Applied Energy **92**: 234-239.
- Zeng, S., Lin, L., Liu, D. และ Peng, L. (2012). "Catalytic conversion of glucose to Levulinic acid by solid heteropolyacid salts." CIESC Journal **63**(12): 3875-3881.
- Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Liao, J. และ Zhang, Y. (2005). "Pretreatment by microwave/alkali of rice straw and its enzymic hydrolysis." Process Biochemistry **40**(9): 3082-3086.
- นงเยาว์ มาลัยทอง และ อภิวัฒน์ ชีรุฒิกุลรักษ์ ( 2544). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เอาระดาจากต้นไมยราบยักษ์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บัญญัติ โฉลกานนท์, อาทิตย์ พุทธิรักษา และ จันสุดา คำด้อย (2554). "พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์." วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น **16**: 11.

## ภาคผนวก

### 1. การเตรียมอาหารสูตร Malt extract agar (MEA)

Malt extract	20	กรัม
Peptone	5	กรัม
Glucose	10	กรัม
Agar	16	กรัม

ปรับปริมาณเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

### 2. การเตรียมอาหารสูตร Malt extract broth (MEB)

Malt extract	20	กรัม
Peptone	5	กรัม
Glucose	10	กรัม

ปรับปริมาณเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

### 3. การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของลิแกโนเซลลูโลส

#### 3.1 การเตรียมสารละลาย neutral detergent

Sodium lauryl sulphate	30	กรัม
Disodium ethylenediamine tetraacetate (EDTA) dehydrate	16.18	กรัม
Sodium borate decahydrate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	6.81	กรัม
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	4.56	กรัม
2-Ethoxyethanol (ethylene glycol monoethyl ether)	10	มิลลิลิตร

นำ EDTA และ  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  มาละลายในน้ำกลั่นพอประมาณ และนำไปต้มจนละลายหมด แล้วนำไปผสมกับ Sodium lauryl sulphate และ 2-Ethoxyethanol

จากนั้นนำ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  มาละลายในน้ำกลั่นพอประมาณ และนำไปต้มจนละลายหมด แล้วนำไปผสมกับสารละลายข้างต้น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร และปรับ pH อยู่ในช่วง 6.9-7.1

### 3.2 การเตรียมสารละลาย acid detergent

Sulfuric acid (% assay = 100)	49.04	กรัม
Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB)	20	กรัม

นำกรดซัลฟิวริกใส่ในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่พอประมาณ ผสมให้เข้ากัน และปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายด้วยวิธีการไตเตรท ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 N แล้วเติม cetyl trimethylammonium bromide ผสมให้เข้ากัน

### 3.3 การเตรียมสารละลาย Saturated potassium permanganate

KMnO <sub>4</sub>	50	กรัม
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.05	กรัม

ละลาย KMnO<sub>4</sub> และ Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ในน้ำกลั่น 1 ลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดแก้วสีชา เก็บไว้ในตู้เย็น อย่าให้โดนแสง

### 3.4 การเตรียมสารละลาย lignin buffer

Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	6	กรัม
AgNO <sub>3</sub>	0.15	กรัม
Potassium acetate	5	กรัม
Acetic acid, glacial	500	กรัม
Tertiary butyl alcohol	400	กรัม

ละลาย Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O และ AgNO<sub>3</sub> ในน้ำกลั่น แล้วนำไปผสมกับ acetic acid และ potassium acetate แล้วเติม tertiary butyl alcohol ผสมให้เข้ากัน

### 3.5 การเตรียมสารละลาย combined permanganate

ผสม saturated potassium permanganate กับ lignin buffer ในอัตราส่วน 2:1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) เตรียมใหม่ก่อนใช้ โดยเก็บไว้ไม่เกิน 1 สัปดาห์ ในตู้เย็นและไม่ให้ถูกแสง ถ้าสารกลายเป็นสีแดงจะใช้ไม่ได้

### 3.6 การเตรียมสารละลาย demineralizing

Oxalic acid dehydrate	50	กรัม
95% Ethanol	700	มิลลิลิตร

Hydrochloric acid (HCl)	50	มิลลิลิตร
น้ำกลั่น	250	มิลลิลิตร

ละลาย oxalic acid dehydrate ใน 95% ethanol แล้วเติม HCL และน้ำกลั่นตามลำดับผสมให้เข้ากัน

#### 4. การวิเคราะห์หองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส

##### 4.1 การสกัดด้วยสารละลาย neutral detergent

4.1.1 นำ sintered glass crucible เบอร์ 1 ขนาด 50 มิลลิลิตร ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาใส่โถดูดความชื้น (desiccator) ชั่งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก

4.1.2 นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดละเอียด ใส่ในบีกเกอร์ทรงสูง แล้วเติมสารละลาย neutral detergent 100 มิลลิลิตร, sodium sulfite 0.5 กรัม, decarhydronephthalene 2 มิลลิลิตร นำมารีฟลักซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.3 ถ่ายส่วนผสมที่ผ่านการรีฟลักซ์ลงใน sintered glass crucible ล้างตัวอย่างใน crucible ด้วยน้ำร้อน (90-100 องศาเซลเซียส) 3-4 ครั้ง แล้วล้างด้วย acetone 2 ครั้ง ดูดสารละลายออกด้วยเครื่อง vacuum pump จากนั้นนำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4.1.4 นำ crucible ออกมาทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือ ปริมาณของ neutral detergent fiber (NDF)

วิธีคำนวณ

$$\%NDF = \frac{[(\text{น้ำหนัก } crucible + \text{น้ำหนัก } NDF) - \text{น้ำหนัก } crucible]}{\text{น้ำหนักตัวอย่างพืช}} \times 100$$

##### 4.2 การสกัดด้วยสารละลาย acid detergent

4.2.1 นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการสกัดด้วย neutral detergent มาถ่ายใส่บีกเกอร์เพื่อทำการ reflux ด้วย acid detergent โดยเติม acid detergent 100 มิลลิลิตร และ decahydronaphthalene 2 มิลลิลิตร เป็น เวลา 1 ชั่วโมง โดยนับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือด

4.2.2 กรองตัวอย่างพืชใน crucible ใบเดิม เพื่อลดการสูญเสียตัวอย่างให้น้อยที่สุด แล้วล้างด้วยน้ำ ร้อน (90-100 องศาเซลเซียส) 3-4 ครั้ง แล้วล้างด้วย 80% ethanol 2 ครั้ง

4.2.3 นำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปล่อยให้เย็นใน desicator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้คือ น้ำหนักของ acid detergent fiber (ADF) น้ำหนักที่แตกต่างระหว่าง NDF และ ADF คือ น้ำหนักของ เฮมิเซลลูโลส

วิธีคำนวณ

$$\%ADF = \frac{[(\text{น้ำหนัก } crucible + \text{น้ำหนัก } ADF) - \text{น้ำหนัก } crucible]}{\text{น้ำหนักตัวอย่างพืช}} \times 100$$

$$\% \text{ Hemicellulose} = \% \text{ NDF} - \% \text{ ADF}$$

### 4.3 การวิเคราะห์หา permanganate lignin (PML)

4.3.1 เติมน้ำสารละลาย combined permanganate 25 มิลลิตร ลงใน crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งผ่านการสกัดด้วย acid detergent แล้วแช่ crucible ลงในภาชนะที่มีน้ำเย็นสูงประมาณ 2 เซนติเมตร คนด้วยแท่งแก้วเป็นบางครั้งเพื่อไม่ให้ตัวอย่างจับกันเป็นก้อน ทิ้งไว้ 45 นาที จากนั้นดูดสารละลายออกโดยใช้ vacuum pump

4.3.2 เติมน้ำสารละลาย combined permanganate 25 มิลลิตร ลงใน crucible อีกครั้ง ทิ้งไว้ 45 นาที แล้วดูดสารละลายออกโดยใช้ vacuum pump

4.3.3 เติมน้ำสารละลาย demineralizing ลงใน crucible แต่ละถ้วยแช่ไว้ 5 นาที แล้วดูดสารละลายออกโดยใช้ vacuum pump ทำซ้ำจนตัวอย่างเป็นสีขาวภายในเวลา 20 นาที จากนั้นล้างด้วย 80% ethanol และ acetone แล้วดูดให้แห้งด้วย vacuum pump

4.3.4 นำ crucible ไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปล่อยให้เย็นใน desicator แล้วชั่งน้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่าง acid detergent fiber (ADF) และน้ำหนักพืชที่ผ่านการสกัดลิกนินออก คือ น้ำหนักของลิกนิน

วิธีคำนวณ

$$\%Lignin = \frac{(A - B)}{\text{น้ำหนักตัวอย่างพืช}} \times 100$$

โดยที่ A = น้ำหนัก crucible + น้ำหนัก ADF

B = น้ำหนัก crucible + น้ำหนักพืชที่ผ่านการสกัดลิกนินออก

C = น้ำหนักตัวอย่างพืช

#### 4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสด้วยการเผาเถ้า

นำ crucible ที่ผ่านการสกัดลิกนินออกแล้วไปเผาในเครื่องเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปล่อยให้เย็นใน desicator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่าง น้ำหนักพืชที่ผ่านการสกัดลิกนินออก และน้ำหนักหลังการเผาเถ้า คือ น้ำหนักเซลลูโลส ส่วนน้ำหนักเถ้า คือ ผลต่างระหว่างน้ำหนักหลังการเผาและน้ำหนัก crucible

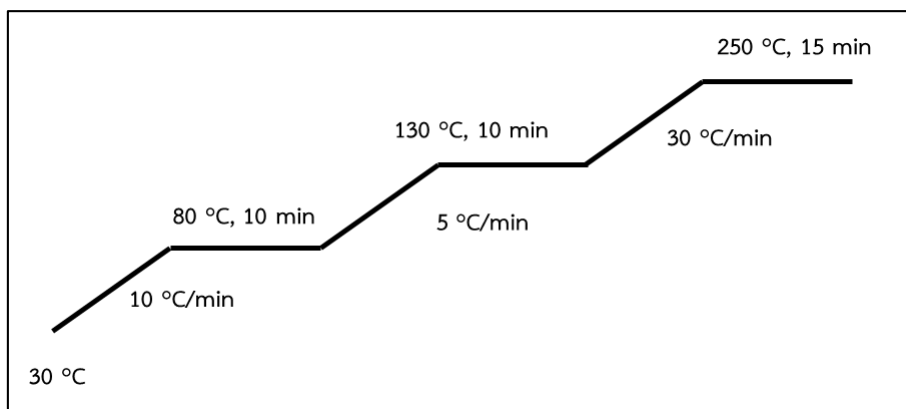
วิธีคำนวณ

$$\%Cellulose = \frac{(B - D)}{\text{น้ำหนักตัวอย่างพืช}} \times 100$$

โดยที่ D = น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างพืชหลังการเผา

#### 5. สภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS condition)

- 5.1. อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส
- 5.2. อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ทุก 1 นาที จนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- 5.3. อุณหภูมิคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- 5.4. อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียส ทุก 1 นาที จนถึงอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส
- 5.5. อุณหภูมิคงที่ที่ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- 5.6. อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 30 องศาเซลเซียส ทุก 1 นาที จนถึงอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
- 5.7. อุณหภูมิคงที่ที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



รูป 32 สภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS condition)

6. การหาค่าความจำเพาะและปริมาณผลผลิตสุทธิของกรดสีวลินิ

$$\text{ค่าความจำเพาะ} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของกรดสีวลินิ}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด}} \times 100$$

$$\text{ปริมาณผลผลิตสุทธิ} = \frac{\text{ของเหลวหลังการระเหยน้ำออก}}{\text{ของเหลวทั้งหมด}} \times 100$$

$$\text{ปริมาณสุทธิของกรดสีวลินิ} = (\text{ปริมาณผลผลิตสุทธิ} \times \text{ค่าความจำเพาะ}) \times 100$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นาย ชัยทัศน์ บุญจันทร์

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Chaithath Boonjan

วัน เดือน ปีเกิด 11 ตุลาคม พ.ศ. 2532

โทรศัพท์ 089-056-2652 E-mail Chaithath.t@outlook.com

ที่อยู่ปัจจุบัน ห้อง 509 อาคาร PS Mansion เลขที่ 89 ซอย ถนนอมจิตร ถนน สุทธิสารวินิจฉัย แขวง  
ดินแดง เขต ดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400

ประวัติการศึกษา ปริญญาวิทยาศาสตร (วท.บ.) ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย

การนำเสนอผลงาน

Biotechnology of Biomass Utilization for ASEAN Development, Institut Teknologi  
Sepuluh Nopember, Indonesia.

The 8th Korea-ASEAN Joint Symposium 2014: Biomass Utilization and Renewable  
Energy, Korea University, Seoul, Republic of Korea.

The 2nd Joint Seminar on Biotechnology of Biomass Utilization for ASEAN  
Development, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

MIE Bioforum 2014 Lignocellulose Degradation and Biorefinery, Nemunosato Hotel &  
Resort Shima, Mie, Japan.

The 26th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International  
Conference, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.

ASEAN Youth Exchange on Biotechnology of Biomass Utilization for ASEAN  
development, Mulawarman University, Samarinda, Indonesia.

The 65th Society for Industrial Microbiology and Biotechnology Annual Meeting and  
Exhibition, Sheraton philadelphia downtown, Philadelphia, United State.

รางวัลที่ได้รับ The Best Proceeding Paper Award of the 26th Annual Meeting of the  
Thai Society for Biotechnology and International Conference

ทุนวิจัย Louisiana State University Agricultural Center Summer Scholar Program,  
Louisiana State University