

การศึกษาผลของส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลต่อลักษณะการเผาไหม้และ
การปล่อยมลพิษในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนวน

STUDY ON THE EFFECTS OF BIOMASS COMPONENT ON COMBUSTION
CHARACTERISTICS IN A SWIRLING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-108-074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON THE EFFECTS OF BIOMASS COMPONENT ON COMBUSTION
CHARACTERISTICS IN A SWIRLING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMUTL-2021-EN-D-108-074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลต่อลักษณะการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบดแบบหมุนวน
นักศึกษา	นางจรรยา อุดมทรัพย์
รหัสประจำตัว	57601075
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล และพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบดแบบหมุนวน เมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกัน โดยศึกษาหาชีวมวลที่มีทั่วไปในเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งได้แก่กะลาตาล กระจินยักษ์ และ ผักตบชวา ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานพบว่า การวิเคราะห์โดยประมาณกะลาตาลมีปริมาณคาร์บอนคงตัวรวมกับปริมาณสารระเหยมากที่สุด คือ 97.97% (%wt.บนฐานแก๊สแห้ง) ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุกะลาตาลมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุด คือ 50.31% ปริมาณไฮโดรเจนมีมากที่สุดในการกระจินยักษ์ คือ 6.01% ในขณะที่ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณซัลเฟอร์และไนโตรเจนต่ำมาก สำหรับค่าส่วนประกอบองค์รวมพบว่ากะลาตาลมีค่าสูงสุดที่ 58.61% ผลการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน พบว่า กะลาตาลให้ค่าพลังงานสูงสุดที่ 18,670 kJ.kg⁻¹ และมีการสลายตัวทางความร้อนโดยประเมินจากการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 330 °C

ในการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ พบว่าค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกะลาตาลและกระจินยักษ์สูงถึง 99% (ผักตบชวา ประสิทธิภาพมากกว่า 80%) ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนมอนนอกไซด์จะลดต่ำลง ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบองค์รวม และปริมาณอากาศส่วนเกิน ต่อค่ามลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้ถูกนำมาสร้างแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองโดยให้ค่าความแม่นยำ R² เท่ากับ 0.9452 และ 0.9234 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ชีวมวล, ส่วนประกอบองค์รวม, ฟลูอิดไอดีซ์เบดแบบหมุนวน, มลพิษ, การเผาไหม้

Thesis	STUDY ON THE EFFECTS OF BIOMASS COMPONENT ON COMBUSTION CHARACTERISTICS IN A SWIRLING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR
Student	Ms. Janya Udomsup
Student ID.	57601075
Degree	Doctor of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Prasan Choomjaihan

ABSTRACT

The research focused on biomass properties, components, thermal behavior and combustion characteristics in a swirling fluidized-bed combustor using palmyra palm shell, leucaena and water hyacinth, which are widely grown in Phetchaburi province, as raw materials for this experiment. The results showed that biomass properties, proximate analysis were found that fixed carbon and volatile matter were highest found in palmyra palm shell with 97.97%wt db. For the ultimate analysis of selected biomass were found highest percentage of carbon with 50.31% in palmyra palm shell and highest percentage of hydrogen content with 6.01% in Leucaena. While, the three biomasses contained low percentage of sulfur and nitrogen content. Additionally, biomass component of palmyra palm shell was found highest with 58.61%. The net calorific value in terms of heat generation, palmyra palm shell produced the highest value of 18,670 kJ.kg⁻¹ and the thermal degradation behavior evaluated from the weight loss was maximum in the range of temperature of 330 °C, of palmyra palm shell.

Under working conditions, combustion efficiency can be achieved at highest with higher than 99% for, palmyra palm shell and Leucaena, while the water hyacinth was higher than 80%. The empirical model of biomass component and excessed air to CO and No_x were produced and gave R² of 0.9452 and 0.9234 respectively.

Keywords: Biomass, Biomass component, Swirling fluidized-bed, Emission, Combustion

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ประสันต์ ชุ่มใจหาญและ คณะกรรมการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และ ประสบการณ์อันเป็นประโยชน์สูงยิ่งทางวิชาการแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ และพี่น้องภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้ความสนใจ และ สนับสนุน ตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์ รวมถึง ดร.รัชดาภรณ์ แก้วกล้า ที่ให้คำปรึกษาและ ชี้แนะแนวทางการหาหัวข้อสำหรับงานวิจัยและสอนการใช้เตาเผาที่ใช้ในการทดลองจนทำให้การทดลอง สำเร็จลงได้อย่างราบรื่นและ ผศ.ดร. ทรงวุฒิ แสงจันทร์ ที่ให้คำแนะนำเรื่องหลักสูตรให้แก่ผู้วิจัยและเป็น กำลังใจให้อย่างสม่ำเสมอ ดร.จิตรภาพร กังสวัสดี (พี่ต๊ีก) และพี่น้องๆเพื่อนร่วมชั้นเรียน ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะและเป็นกำลังใจที่สำคัญเสมอมา

ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ในการให้ความ ช่วยเหลือ จัดเตรียม ชีวมวลสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อ.เตย และ อ.วรพล ที่มีความยินดี ยิ่งในการให้ยืมเครื่องบดชีวมวลทั้ง 2 เครื่องเป็นเวลาหลายสัปดาห์ อ.แหวน ที่กรุณาให้ผู้วิจัยยืมรถกระบะ เพื่อขนชีวมวลไปรวบรวมไว้ที่อาคารของ รร.สาธิตฯ และคุณปุ่นเจ้าหน้าที่คุมเครื่องบดของสาขาเกษตร ที่ ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องบดเป็นอย่างดี คุณกร เจ้าหน้าที่ห้องสมุด ที่ช่วยรวบรวมกะลาตาล จากชาวบ้านในหมู่บ้านเพื่อนำมาให้ผู้วิจัยนำไปทดลอง รวมทั้งนักศึกษาอีกกว่า 100 คน ที่ผลัดเปลี่ยน หมุนเวียนกันเข้ามาช่วยงานผู้วิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ โดยนักศึกษาเหล่านี้ทำงานกันอย่างไม่รู้จักเหน็ด เหนื่อย เช่น นักศึกษาสาขาสัตวศาสตร์ที่ลงไป คูคลอง ด้านหลังมหาวิทยาลัย เพื่อไปเก็บผักตบชวา ขึ้นมา และนำเข้าเครื่องบด จนได้จำนวนมากพอ จึงนำไปตากแห้ง พร้อมกับกระถินยักษ์ และบรรจุใส่ กระสอบ ส่วนนักศึกษาสาขาการตลาดและสาขาการพัฒนาชุมชนที่ช่วยกันนำกะลาตาลเข้าเครื่องบด และ คัดแยกขนาดที่เหมาะสม บรรจุใส่กระสอบ โดยนักศึกษาสาขาการพัฒนาชุมชนนี้เป็นหัวเรี่ยวหัวแรงหลัก ในการใช้แรงงานและขนชีวมวลที่รวบรวมไว้ที่อาคาร รร.สาธิตฯ ไป ยัง ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สจล. เป็นที่ทราบซึ่งใจแก่ผู้วิจัยอย่างหาที่สุดมิได้

สิ่งสำคัญที่สุดที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้คือครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งของผู้วิจัย บิดา มารดา ลูกทั้ง 2 คน และสามีของผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนอย่างเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จรรยา อุดมทรัพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พืชกับพลังงาน.....	5
2.2 ศักยภาพของจังหวัดเพชรบุรีต่อการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	7
2.2.1 กะลาตาล.....	7
2.2.2 กระจินยักษ์.....	11
2.2.3 ผักตบชวา.....	14
2.3 ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล.....	16
2.3.1 เซลลูโลส.....	18
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส.....	19
2.3.3 ลิกนิน.....	20
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลเพื่อการแปลงเป็นพลังงาน.....	23
2.4.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	24
2.4.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ	24
2.4.3 ค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล.....	28
2.5 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล.....	32
2.6 กระบวนการการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง.....	41

2.6.1	กระบวนการเผาไหม้ชีวมวล.....	43
2.6.2	ระบบฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	45
2.6.3	อากาศส่วนเกิน.....	54
2.6.4	ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	60
2.7	มลพิษหลักซึ่งเกิดจากกระบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	61
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	69
3.1	การเตรียมชีวมวล.....	69
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	70
3.3	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	79
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	81
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล.....	81
4.2	ผลการทดลองหาส่วนประกอบองค์รวมและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล.....	87
4.3	ผลของพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	93
4.3.1	ผลของพฤติกรรมของอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนในเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	93
4.3.2	ผลของความเข้มข้นและมลพิษที่เกิดขึ้น (CO และ NO) ในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	96
4.3.3	ผลของมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	105
4.3.4	ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	112
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	116
5.1	คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล (กระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา) ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้.....	116
5.2	ส่วนประกอบองค์รวมและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล.....	117
5.3	ประสิทธิภาพการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล.....	117
5.4	ข้อเสนอแนะ.....	118
	บรรณานุกรม.....	119

ภาคผนวก.....	127
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณต่างๆ.....	127
ภาคผนวก ข วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของชีวมวล.....	133
ภาคผนวก ค การหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลพิษ สัดส่วนของส่วนประกอบ องค์รวมของชีวมวลแต่ละชนิดและปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อน ให้กับเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	137
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างอากาศส่วนเกินกับมลพิษใน ชีวมวลแต่ละชนิดระหว่างการเผาไหม้.....	147
ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดลอง.....	152
ภาคผนวก ฉ เอกสารผลการวิเคราะห์ชีวมวล.....	162
ภาคผนวก ช งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	170
ประวัติผู้เขียน.....	196



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณผลผลิตเฉลี่ยของกระถินยักษ์ คิดเป็นน้ำหนักสดต่อไร่ต่อปี โดยจำแนกตามปริมาณน้ำฝน และระยะปลูก.....	12
2.2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของพีชพลังงาน (dry basis)	23
2.3 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนฐานสำหรับหอนกประกอบ ณ ฐานต่างๆ.....	28
2.4 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ด้วย TGA ของเชื้อเพลิงต่างๆ.....	39
2.5 ตารางเปรียบเทียบมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และประสิทธิภาพระหว่างการเผาไหม้ในเตาเผาแบบต่างๆ.....	68
4.1 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (air dry basis)	82
4.2 ตารางเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (สภาวะอบแห้ง 0%, dry basis และ air dry basis)	83
4.3 ตารางเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ฐานต่างๆ (as received, air dry basis และ dry basis).....	84
4.4 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง และค่าความร้อนต่ำ ที่ระดับความชื้นต่างๆ.....	86
4.5 ตารางเปรียบเทียบค่าความร้อนที่วัดจากเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยวิธีการต่างๆ.....	87
4.6 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล.....	88
4.7 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ด้วย TGA ของกระถินยักษ์ กะลาตาลและผักตบชวา.....	93
4.8 แสดงปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมที่แตกต่างกัน.....	107
4.9 แสดงปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมที่แตกต่างกัน.....	110
4.10 แสดงประสิทธิภาพเตาและ Unburned Carbon จากการเผาไหม้ในเตา SFBC.....	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กะลาตาลโตนด	9
2.2 กระถินยักษ์ <i>Leucaena leucocephala</i> (lam.)	12
2.3 โครงสร้างในเซลล์พืชซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน	17
2.4 ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล.....	18
2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส	19
2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	19
2.7 โครงสร้างของลิกนิน	21
2.8 โครงสร้างของหน่วยย่อยของลิกนิน	22
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์โดยประมาณและโดยแยกธาตุและพื้นฐานของ เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันบนฐานต่างๆในการวิเคราะห์เชื้อเพลิงทั้ง 4 ฐาน.....	26
2.10 โครงสร้างภายในของ Bomb calorimeter.....	29
2.11 กราฟการลดลงของน้ำหนัก (TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก (DTG).....	35
2.12 การวิเคราะห์แบบประมาณของทะเลาะปาล์มด้วยเครื่อง TGA.....	37
2.13 แสดงวิธีการหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่สิ้นสุด การเผาไหม้ (T_p) ของถ่านหิน/ชีวมวล.....	38
2.14 การหาอุณหภูมิติดไฟจากกราฟวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA)...	38
2.15 กระบวนการ ผลิตภัณฑ์ และการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล...	42
2.16 กระบวนการ ผลิตภัณฑ์ และการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล...	44
2.17 รูปแบบการไหลในระบบฟลูอิดไอเซชันระหว่างอากาศ-ของแข็ง.....	47
2.18 $\Delta p - u$ diagram สำหรับแก๊สในเบดทรงกรวย	49
2.19 ความสัมพันธ์ของมวลเบดต่อแรงดันตกคร่อมในเตาแบบ swirling fluidized-bed	50
2.20 Diagram ทั่วไปของแรงดันตกคร่อมต่อความเร็วสำหรับการฟลูอิดไอเซชันเบด ทรงกรวยแบบหมุนวน.....	51
2.21 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart	53
2.22 เส้นทางของเชื้อเพลิงไนโตรเจน ซึ่งมีผลต่อการเกิดและสลายของ NO_x ในเตาฟลูอิดไอเซชันเบดเมื่อเผาไหม้ถ่านหิน	64
3.1 เครื่องบดลดขนาดทางแนวยาว.....	70
3.2 เครื่องบดลดขนาดทางแนวตั้ง.....	70

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล.....	72
3.4 เครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C.....	73
3.5 เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน.....	74
3.6 โครงร่างเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน.....	75
3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนของสกรูป้อน (Screw feeder) และหัวเผา (Burner).....	75
3.8 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนพัดลมและหัวกระจายลมแบบหมุนวน.....	76
3.9 ตำแหน่ง probe และไซโคลน.....	77
3.10 เครื่องวิเคราะห์ฟลูแก๊ส (Flue gas) Testo 350XL.....	77
4.1 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	90
4.2 ผลกระทบของ excess air ต่อ axial temperature (a) และ O_2 concentration (b) profiles ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	95
4.3 ผลกระทบของส่วนประกอบองค์รวมต่อ axial CO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนเมื่ออากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80%.....	97
4.4 ผลกระทบของอากาศส่วนเกินต่อ axial CO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	101
4.5 ผลกระทบของส่วนประกอบองค์รวมต่อ axial NO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนเมื่ออากาศส่วนเกิน 40% 60% และ 80%.....	102
4.6 ผลกระทบของอากาศส่วนเกินต่อ axial NO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	105
4.7 การปล่อยมลพิษ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไนโตรเจนมอนนอกไซด์จากเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนที่ทดสอบที่ส่วนประกอบองค์รวมที่ต่างกันและอากาศส่วนเกินที่ต่างกัน.....	106
4.8 ผลกระทบของอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมต่อมลพิษ คาร์บอนมอนนอกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45\text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$	109
4.9 ผลกระทบของอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมต่อมลพิษ ไนโตรเจนมอนนอกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45\text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$	112

4.10 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่เกิดจากอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบ
องค์รวมในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ 115



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฟฟ้าถือว่าเป็นสาธารณูปโภคพื้นฐานของการดำเนินชีวิตที่รัฐต้องจัดหาให้ทั่วถึงกับการใช้งานของประชากร แต่สำหรับในพื้นที่ห่างไกลการใช้ระบบสายไฟฟ้าพื้นฐานอาจเป็นสิ่งที่ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ดังนั้นการใช้แหล่งพลังงานทางเลือกอย่างอื่นจึงอาจมีความคุ้มค่าที่มากกว่า เช่น การสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การสร้างโรงไฟฟ้าแก๊สชีวภาพ การสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวล และการสร้างโรงไฟฟ้าแบบไฮบริด (อุทัยวรรณ ของสิริวัฒนกุล. 2563) ทั้งนี้การคัดเลือกประเภทของโรงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมและความพร้อมของแต่ละพื้นที่ซึ่งอาจมีลักษณะแตกต่างกันไปกับการลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าสำหรับ ประเทศไทยความเหลื่อมล้ำทางด้านพลังงานยังคงกระจายอยู่ตามพื้นที่ห่างไกลทั่วประเทศ ซึ่งถือเป็นปัญหาสำคัญที่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาเศรษฐกิจทั้งในระดับรากหญ้าและในระดับประเทศ จากการศึกษาของกระทรวงพลังงานในปี พ.ศ. 2560 พบว่า จังหวัดเพชรบุรีเป็นจังหวัดที่มีครัวเรือนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้สูงเป็นอันดับ 5 ของประเทศ (อุทัยวรรณ ของสิริวัฒนกุล. 2563) เพื่อแก้ปัญหาการไม่มีไฟฟ้าใช้ หน่วยงานภาครัฐจึงได้จัดตั้งโครงการโรงไฟฟ้าชุมชนเพื่อเศรษฐกิจฐานราก ที่ถือเป็นโครงการสำคัญภายใต้ นโยบายด้านพลังงาน ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับเศรษฐกิจฐานราก ซึ่งไม่เพียงมุ่งส่งเสริมให้เกิดการผลิตไฟฟ้าใช้เองในชุมชน เพื่อให้ประชาชนทุกคนเข้าถึงไฟฟ้า แต่ยังช่วยเพิ่มรายได้และลดความเหลื่อมล้ำให้กับประชาชนในระดับฐานราก ในปี พ.ศ. 2550 จังหวัดเพชรบุรีได้เริ่มมีโครงการปลูกตาล ล້านต้นเพื่อถวายเป็นหลวงรัชกาลที่ 9 ของ ดร.สุเมธ ตันติเวชกุล คนในพื้นที่จึงหันมาสนใจใช้ประโยชน์จากต้นตาลมากขึ้น

ด้วยสภาพพื้นที่โดยทั่วไปของจังหวัดเพชรบุรีมีสภาพดินเสื่อมโทรม แห้งแล้ง และมีแหล่งน้ำปิดจำนวนมาก ทำให้มีพืชอีก 2 ชนิดที่เจริญเติบโตได้ดี ซึ่งคือ กระจินยักษ์ และผักตบชวา สำหรับกระจินยักษ์ถือว่าเป็นพืชโตเร็วเติบโตได้ตามธรรมชาติ ทำให้พบได้ทั่วไปในจังหวัดเพชรบุรี และกระจินยักษ์สดยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์ได้อีกด้วย (สำนักความหลากหลายทางชีวภาพ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ม.ป.ป. ; ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีอุทัยธานี. 2556) ส่วนผักตบชวานั้นเจริญเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำปิด จึงทำให้มีผักตบชวาเป็นจำนวนมากจากระบบรายงานติดตามการกำจัดผักตบชวาของกรมโยธาธิการและผังเมืองในปี พ.ศ. 2564 พบว่า จังหวัดเพชรบุรีมีปริมาณผักตบชวาสูงถึง 10,565 ton จากข้อมูลข้างต้นจึงมีความเป็นไปได้ที่พืชทั้ง 3 ชนิดมีศักยภาพในการเป็นพืชพลังงานของจังหวัดเพชรบุรี

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยการใช้เทคโนโลยีการแปรรูปเชิงความร้อน (thermal conversion technology) โดยใช้กระบวนการเผาไหม้หรือการสันดาป

ซึ่งเป็นวิธีการเก่าแก่ ง่าย และสะดวกที่สุดในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงาน พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะมีค่าประสิทธิภาพความร้อนค่อนข้างสูง เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่เหมาะสม มีการออกแบบและการดูแลที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และที่สำคัญมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ทำให้วิธีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดจึงเป็นที่นิยมใช้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลกันอย่างแพร่หลายทั้งต่างประเทศและในประเทศไทย นอกจากนี้เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด สามารถทำการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศเป็นไปอย่างเหมาะสม และสามารถควบคุมมลพิษที่เกิดขึ้นได้ดี (รัชดาภรณ์ แก้วกล้า. 2556) อุปกรณ์ที่เป็นตัวควบคุมการไหลของอากาศ เบด และชีวมวล ในห้องเผาไหม้ของระบบฟลูอิดไธด์เบดคือหัวจ่ายลม หัวจ่ายลมแบบหมุนวนเป็นอุปกรณ์นอกจากควบคุมให้อากาศ เบด และชีวมวลเคลื่อนที่แบบหมุนวนภายในห้องเผาไหม้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ชีวมวลส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นและมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้มลภาวะลดลง รวมถึงเชื้อเพลิงขนาดเล็กไม่หลุดลอยออกไปจากเตา ในขณะที่เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ก็สามารถเผาไหม้ได้ดีเพราะมีเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาหาชีวมวลที่หาได้สะดวกในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี (กะลาตาล ผักตบชวา กระถินยักษ์) เพื่อนำมาเป็นพลังงานทางเลือก โดยมุ่งศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล พฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน (Swirling)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลและสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อปริมาณมลพิษและประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้
- 1.2.2 เพื่อศึกษาส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน (พฤติกรรมของอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจน ความเข้มข้นและมลพิษที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพการเผาไหม้) เมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันโดยใช้เตาเผาฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานเพื่อใช้ในการเลือกชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ได้
- 1.3.2 ทำให้ทราบส่วนองค์ประกอบองค์รวมของชีวมวล และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล
- 1.3.3 ทำให้ทราบพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนวน (พฤติกรรมของอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจน ความเข้มข้นและมลพิษที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพการเผาไหม้) เมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันโดยใช้เตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนวน

ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อหาชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ได้ในอนาคตโดยการศึกษจากส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล และอาจจะถึงระดับการพัฒนาแบบจำลองปริมาณมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลโดยใช้ข้อมูลจากสัดส่วนส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลในการคำนวณต่อไป

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ชีวมวลที่นำมาศึกษาเป็นชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและไม่โตเร็วในเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี (กะลาตาล ผักตบชวา กระถินยักษ์)
- 1.4.2 การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ทำการทดลองในเตาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนวน (Swirling) จะใช้ชีวมวล 3 ชนิด โดยผ่านการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 5 mm. โดยในการทดสอบทั้งหมดจะใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงในระดับคงที่ ที่ประมาณ $45 \text{ kg} \cdot \text{hr}^{-1}$ ขณะที่ปริมาณอากาศส่วนเกินจะเพิ่มที่ประมาณ 40% 60% และ 80%
- 1.4.3 ปริมาณมลพิษที่ศึกษาคือคาร์บอนมอนนอกไซด์ และไนโตรเจนมอนนอกไซด์เท่านั้น

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ทำการศึกษาชีวมวลในเขตพื้นที่การศึกษา (กะลาตาล ผักตบชวา กระถินยักษ์)
- 1.5.2 ทำการเตรียมตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาโดยผ่านการลดความชื้นและบดละเอียดเพื่อให้ได้ความชื้นและขนาดที่เหมาะสม
- 1.5.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทั้งแบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล การวิเคราะห์ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลแต่ละชนิดรวมถึงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

- 1.5.4 นำชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาเผาในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวน เพื่อศึกษาพฤติกรรม
การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น
- 1.5.5 นำผลจากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของชีวมวล ไปสร้างกราฟแสดงข้อมูลต่างๆ และ
คำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวนโดยใช้ชีวมวล 3 ชนิด
รวมถึงหาปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาชีวมวลทั้ง 3 ชนิด และสร้างกราฟแสดงข้อมูล
สามมิติ
- 1.5.6 สรุปผลการศึกษาและจัดทำรายงานผลการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พืชกับพลังงาน

พืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารได้เอง โดยกระบวนการที่เรียกว่าการสังเคราะห์แสง พืชใช้รงควัตถุที่เรียกว่าคลอโรฟิลล์เป็นตัวนำพลังงานแสงเปลี่ยนเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปของพลังงานเคมี โดยมีน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปของน้ำตาลและเปลี่ยนเป็นคาร์โบไฮเดรต แต่ที่กล่าวมาเป็นลักษณะการที่พืชเป็นพลังงาน ในรูปแบบของพลังงานสำหรับสิ่งมีชีวิตอื่นที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ เช่น มนุษย์ หรือ สัตว์อื่นๆ แต่ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเองจะผลิตไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งการใช้พลังงานในรูปแบบนี้ส่วนใหญ่ต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนเป็นหลัก โดยเฉพาะการนำเผาไหม้ ดังนั้นพืชจึงไม่เพียงพืชพลังงานของสิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ แต่ยังเป็นพืชพลังงานในอีกรูปแบบซึ่งเราจะเรียกกลุ่มนี้ว่าชีวมวล

เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นแหล่งให้ความร้อนและแสงสว่างที่สำคัญแหล่งแรกที่มนุษยชาติได้ใช้ ปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย แสดงถึงวิธียุคใช้ประโยชน์จากชีวมวล ตั้งแต่การใช้พื้นฐานในการเผาไหม้ จนถึงการใช้ระดับการใช้ด้วยการแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจจะหมดลงได้ ชีวมวลอาจถูกมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ (นคร ทิพย์วงศ์, 2552) หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะแหล่งตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจึงมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

ภาพรวมของพลังงานชีวมวล ประมาณ 12% ของพลังงานของโลกมาจากพลังงานชีวมวล เช่น ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์และพืชให้พลังงานบางชนิด ในประเทศอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงเหล่านี้ได้ถูกนำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (เช่น โรงงานกระดาษ และโรงงานน้ำตาล เป็นต้น) ตรงกันข้ามกับประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ซึ่งใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพ และสร้างมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม แต่การเพิ่มขึ้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายได้และอุตสาหกรรมจะเป็นตัวผลักดันให้มีการใช้เทคโนโลยีชีวมวลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสะอาดขึ้น (นฤมล ชูบัวทอง. 2550)

ประโยชน์ของการใช้แหล่งพลังงานชีวมวลมีอยู่ 3 ด้านคือ 1) ประโยชน์ในแง่พลังงานหมุนเวียนคือชีวมวลนั้นจะเติบโตและหมุนเวียนได้ถ้าเราเก็บเกี่ยวพืชใช้ในป็นปีหน้าก็จะโตขึ้นมาทดแทน ซึ่งต่างจากพลังงานฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป เรื่องที่ 24 ใน 100 ร้อยเรื่องต้องรู้เกี่ยวกับการอนุรักษ์โลกของเราโดย Hall et al. (2020) กล่าวว่า การตัดต้นไม้สามารถช่วยลดปริมาณคาร์บอนลงได้แม้ว่าต้นไม้จะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทางใบซึ่งนักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ยอมรับว่าการปลูกต้นไม้ช่วยอนุรักษ์โลกใบนี้โดยการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ แต่การตัดต้นไม้ก็อาจจะช่วยอนุรักษ์โลกได้เหมือนกันเนื่องจากต้นไม้จะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากในช่วงการเจริญเติบโต (Fast growth stage) คาร์บอนจะถูกเก็บไว้ที่ลำต้น กิ่ง และใบ เมื่อต้นไม้โตเต็มที่แล้ว ต้นไม้จะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง นั้นหมายความว่า ถ้าเราตัดต้นไม้ลงแล้วปลูกใหม่จะดีกว่าปล่อยให้ต้นไม้ที่ค่อยๆแก่และตายไป ที่สำคัญก็คือถ้าทิ้งเศษซากไม้เหล่านั้นมันก็จะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสู่บรรยากาศเช่นกรณีการเกิดไฟไหม้ป่าหรือจะก่อให้เกิดแก๊สมีเทน การนำเศษซากไม้ที่ตายแล้วมาผลิตเป็นพลังงานชีวมวลก็จะเกิดสมดุลของวัฏจักรคาร์บอน ซึ่งจะเป็นการลดการก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกได้ ทางเลือกที่ดีที่สุดคือ การเลือกปลูกพืชชีวมวลสำหรับใช้เป็นชีวมวลโดยเฉพาะจำพวกไม้โตเร็วเช่น หญ้าสวิตช์ (switch grass) และหญ้าช้าง (miscanthus) ซึ่งพืชเหล่านี้ใช้เวลาในการเจริญเติบโตสั้น (Basu. 2010) แนวคิดนี้สอดคล้องกับสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานที่มีการสนับสนุนให้ปลูกไม้โตเร็วเพื่อผลิตเป็นชีวมวลโดยสนับสนุนให้ปลูกกระถินยักษ์ ซึ่งเป็นไม้ที่ปลูกง่าย แม้เป็นพื้นที่สภาพดินเสื่อมโทรม เติบโตเร็ว ทนต่อสภาพแห้งแล้ง ที่สำคัญเนื้อไม้ให้ค่าความสูง (สุรัตน์ อัดตะ. 2555)

2) ประโยชน์ในแง่สิ่งแวดล้อม มีหลักฐานมากมายว่าโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงมีความต้องการที่จะลดแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากมนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้น และยังรวมถึงมลพิษจำพวก NO₂, SO₂ และ Hg อีกด้วย ในโรงเรียนประถมและในองค์กรต่างๆ ตระหนักถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยปัญหาใหญ่คือ ไอเสียที่มาจากรถยนต์ จึงทำให้องค์กรต่างๆหันมาสนใจพลังงานชีวมวลเนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้อีกด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นการเผาชีวมวลจึงไม่ถือว่าเป็นการก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก รวมถึงกฎหมายสำหรับการควบคุมราคาแก๊สชีวมวลในหลายๆ ประเทศให้มีราคาถูกลง ตัวอย่างเช่นถ้าชีวมวลถูกนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในโรงงานอุตสาหกรรมโรงงานนั้นจะได้รับคาร์บอนเครดิต ซึ่งเครดิตเหล่านี้สามารถขายในตลาดเพื่อเพิ่มทุนในการดำเนินการทางธุรกิจได้ เมื่อเราทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ออกสู่บรรยากาศและเจือจางไปซึ่งต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ยังคงอยู่เป็นล้านปี เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในการเผาชีวมวลจึงนับว่าน้อยมากจนเกือบจะเป็นศูนย์ ในชีวมวลส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของกำมะถันน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้ก็จะมี SO_2 ออกมาแต่อยู่ในปริมาณน้อยมาก ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะเกิดแก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์และไนตริกออกไซด์ซึ่งปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องฝนกรด และภาวะเรือนกระจก ซึ่งแก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์และไนตริกออกไซด์จะถูกกำจัดออกได้ยากมาก แต่เมื่อวัดค่าแก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์และไนตริกออกไซด์ในระบบการเผาไหม้ชีวมวลพบว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์และไนตริกออกไซด์ ที่ต่ำมาก (Van Loo and Koppejan. 2008) ในมลพิษจำพวกฝุ่นละออง หรืออนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล จะถูกดักจับไว้บางส่วนของไซโคลอน ซึ่งจะทำการลดปริมาณการปล่อยฝุ่นละอองออกมาได้ระดับหนึ่งก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ 3) ประโยชน์ด้านสังคม โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้โดยใช้ต้นทุนต่ำ คนที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกล ทุรกันดาร ยากจน ก็สามารถมีไฟฟ้าใช้ได้ และยังช่วยต่อขยายอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับชีวมวลได้อีกด้วย เช่น การทำไร่ การปลูกพืชชีวมวล การเก็บเกี่ยว การขนส่งชีวมวล และสร้างงานให้กับคนในท้องถิ่น (จากข้อมูลของ Van Loo and Koppejan. 2008 พบว่าจะมีการใช้แรงงานเพิ่มมากขึ้น 20 เท่าของแรงงานที่อยู่ในโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันและถ่านหิน) รวมถึงลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลและไม่ต้องเผชิญกับความผันผวนของราคาน้ำมันอีกด้วย

จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ชีวมวลเป็นสิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้ แต่ชีวมวลมีหลายชนิด บางชนิดเคยมีการศึกษาวิจัยแล้ว บางชนิดเมื่อนำมาทดลองขั้นต้นก็ไม่เหมาะสมในการทำการวิจัยเนื่องจากเมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานแล้วให้ค่าความร้อนต่ำมาก และมีปริมาณไม่มากพอสำหรับการนำมาทำเป็น ชีวมวล รวมถึงราคาสูง ชีวมวลบางชนิดมีข้อจำกัดในการปลูกเฉพาะพื้นที่ และเจริญเติบโตได้ในบางฤดูกาลเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้อย่างเหมาะสมและเกิดคุณค่าอย่างมหาศาลต่อท้องถิ่นและประเทศชาติ

2.2 ศักยภาพของจังหวัดเพชรบุรีต่อการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

2.2.1 กะลาตาล

ตาลโตนดหรือตาล เป็นพืชตระกูลปาล์มชนิดหนึ่งอยู่ในสกุล *Borassus* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Borassus Flabellifer* เป็นพืชยืนต้นที่มีอายุยาว 100-150 ปี เมื่ออายุประมาณ 10-15 ปี จะเริ่มออกดอกและมีผล (Kularatnam. 1971) ตาลโตนดนอกจากเป็นพืชเศรษฐกิจของท้องถิ่นในหลายจังหวัด เช่น สงขลา เพชรบุรี สุพรรณบุรี พืชญโลก และสุโขทัย ยังเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของคนไทยเป็นอย่างมาก เพราะคนไทยรู้จักและคุ้นเคยกับตาลโตนดมาแต่ครั้งบรรพกาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ประโยชน์ในการประกอบอาหารทั้งเครื่องต้ม อาหารหวาน อาหารคาว และเครื่องปรุงรส อีกทั้งการใช้ประโยชน์จากไม้ของต้นตาลเป็นเฟอร์นิเจอร์ตกแต่งบ้านเรือน จากการประกอบอาชีพขายตาลอ่อนจะมีผลทำให้ส่วนที่เหลือทิ้งได้แก่ ชั่วตาล ก้านตาล และเปลือกตาลอ่อนเหลือทิ้งถึง 90% ต่อ 1 ทะลาย

ตาล (1 ทะลายตาลจะมีผลตาลอ่อน 1-20 ผล) และจากการยี่/สกัดเนื้อตาล และการฉะจาวตาล จากผลตาลสุกจะส่งผลทำให้มีส่วนที่เหลือทิ้ง คือ กะลาตาล ร้อยละ 60 ต่อ 1 เมล็ด และส่วนของกะลาตาลที่เหลือทิ้งจากการยี่ (สกัดเนื้อตาล) ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรค และที่อยู่อาศัยของพาหะนำโรคได้ วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว มีศักยภาพสูงต่อการพัฒนาและนำมาใช้ให้เกิดความพอเพียง ความสมดุลทั้งมิติเศรษฐกิจสังคมวัฒนธรรมและสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ประชาชนในท้องถิ่นสามารถพึ่งตนเองได้ในด้านพลังงานทดแทน และสร้างรายได้เพิ่มจากวัสดุที่เหลือทิ้งจากผลตาลโตนด

จากงานวิจัยของจันทร์เพ็ญ ชุมแสง (2554) เรื่องการมีส่วนร่วมของประชาชนในการผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งของตาลโตนดเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกในเขตอำเภอคีรีมาศ จังหวัดสุโขทัย โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประเภททุนวิจัยนวัตกรรมด้านพลังงานทดแทน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกตาลและขี้ตาลอ่อน และกะลาตาล ให้ได้ถ่านอัดแท่งที่ได้ต้องมีสมบัติทางกายภาพและสมรรถนะทางความร้อนได้ตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช. 238/2547) และศึกษาผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่าสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของเปลือกตาลและขี้ตาลอ่อน และกะลาตาลมีคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับกะลามะพร้าว กะลาปาล์มน้ำมัน และผลจากการทดลองนำวัสดุทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว มาผสมกัน 6 อัตราส่วนโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน สัดส่วนการผสมแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำหนักวัตถุดิบ 1:10 โดยกำหนดใช้ความเร็วรอบเครื่องรีดประมาณ 140 r.p.m. ลักษณะถ่านอัดแท่งเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm. มีครีบโดยรอบจำนวน 5 ครีบ และมีรูกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm. ความยาว 10 cm. พบว่าถ่านอัดแท่งทั้ง 6 อัตราส่วน (ระหว่างอัตราส่วนผสมของถ่านเปลือก และขี้ตาลอ่อนกับถ่านกะลาตาล) มีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช. 238/2547) ในทุกอัตรา ผลจากการศึกษาวิจัยควรถ่ายทอดเทคโนโลยีและเผยแพร่เป็นข้อมูลส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือใช้จากตาลโตนดในจังหวัดต่างๆ ที่มีต้นตาลโตนดเป็นพืชเศรษฐกิจประจำท้องถิ่น ซึ่งคาดว่าจะนำไปใช้ในการพัฒนาใช้เป็นพลังงานทางเลือกในครัวเรือน และส่งเสริมรายได้ในระดับวิสาหกิจชุมชน

พื้นที่ที่มีต้นตาลโตนดเป็นพืชเศรษฐกิจในท้องถิ่นเช่น บ้านถ้ำรงค์ อำเภอบ้านลาด จังหวัดเพชรบุรี เป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่ยังมีการประกอบอาชีพและหารายได้จากการยี่ (สกัด) เนื้อตาลสุกและการขึ้นตาลอ่อนเพื่อขายจาวตาลอ่อน หัวตาลอ่อน น้ำตาลสดและน้ำตาลปึกจำหน่าย ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ประจำจังหวัดเพชรบุรี ดังนั้นจากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นพบว่าก้านตาล ขี้ตาล และเปลือกตาลอ่อน เป็นวัสดุที่เหลือทิ้งในท้องถิ่น เมื่อแห้งจะใช้วิธีเผาเพื่อใช้ไถ่ขี้ให้สัตว์เลี้ยง (วัวและแพะ) ส่วนเปลือกตาลอ่อนบางส่วนใช้เป็นอาหารให้กับวัวและแพะ แต่ส่วนใหญ่จะขนไปทิ้งตามกองขยะไหลทางถนน เช่นเดียวกับ

กะลาตาล (รูปที่ 2.1) ที่นำไปทิ้งตามกองขยะมีเพียงบางส่วนที่ใช้วิธีการเผาเป็นถ่านเพื่อใช้ในครัวเรือนในบางครั้ง จากที่ได้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาจะเห็นว่ามียวตฤติบที่เหลือทิ้งจากตาลโตนดและปริมาณต้นตาลโตนดเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง เช่น ถ่านอัดแท่งจากเปลือกตาลและก้านตาลอ่อน และกะลาตาล หรือนำมาเผาเพื่อสร้างพลังงานความร้อน และน่าจะส่งผลให้มีการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมจากวัสดุที่เหลือทิ้งจากตาลโตนดได้อย่างยั่งยืนในเชิงพื้นที่ ทั้งในมิติทางสังคม มิติเศรษฐกิจ และมิติสิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาศักยภาพของชีวมวล พบว่า จังหวัดเพชรบุรี มีจำนวนต้นตาลประมาณ 1,570,704 ต้น (เพชรบุรี, 2551) แบ่งเป็นตาลตัวผู้ครึ่งหนึ่งและตาลตัวเมียครึ่งหนึ่งเพื่อความสมดุลในการสืบพันธุ์ของพืชในอนาคต ดังนั้น ต้นตาลตัวเมียอาจมีจำนวนอยู่ประมาณ 750,000 ต้น ซึ่งตาลตัวเมียมีลูกเป็นช่อ ๆ หรือเรียกว่า "ทะลายตาล" ต้นตาล 1 ต้น จะมีทะลายตาลประมาณ 10 ทะลาย และใน 1 ทะลาย จะมี 10 ผล และใน 1 ผล จะมี 3 เมล็ด ซึ่งเมล็ดนี้ก็คือ ส่วนที่มีกะลาตาลหุ้มอยู่ ลูกตาล 1 ลูกจะน้ำหนักประมาณ 1 kg. ซึ่งใน 1 kg. จะมีกะลาตาล อยู่ 20 g. (รัตนพล มงคลรัตนาสีทธิ. 2558) ดังนั้นต้นตาล 1 ต้น จะมีกะลาตาลอยู่ประมาณ 2 kg. ในพื้นที่ 1 rai จะปลูกต้นตาลได้ประมาณ 80 ต้น จะได้ผลผลิตประมาณ 160 kg•rai⁻¹



รูปที่ 2.1 กะลาตาลโตนด

อนุรักษ์ เกษวิฒนากุล และสุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์ (2559) เมื่อนำผลการทดลองของวัสดุเหลือใช้จากตาลโตนดมาเปรียบเทียบกับแกลบและขี้เลื่อยพบว่า วัสดุเหลือใช้จากตาลโตนดส่วนใหญ่ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าแกลบ แต่ให้ผลด้อยกว่าขี้เลื่อยในบางหัวข้อของการทดลองเล็กน้อย จากนั้นได้ประเมินหาความเหมาะสมของวัสดุเหลือใช้จากตาลโตนดที่จะนำมาใช้ทดสอบกับตัวเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง จากการประเมินผลพบว่าทางตาลโตนดมีความเหมาะสมที่สุด เมื่อนำทางตาลโตนดทำการทดลอง

หาค่าประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และการผลิตกระแสไฟฟ้า และนำผลมาเทียบกับเชื้อเพลิง แกลบและขี้เลื่อยผลที่ได้คือ ในด้านอุณหภูมิมีค่าที่ต่ำกว่า แต่ระยะเวลาการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงที่ยาวนานกว่า ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ยาวนานขึ้น และมีปริมาณสารมลพิษใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทางตาลโตนดสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงให้กับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบเบตนิ่งไหลลงได้เป็นอย่างดี

อาคม ปะหลามานิต และคณะ (2561) พบว่าการอบแห้งถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสามารถอบถ่านอัดแท่งให้มีความชื้นต่ำกว่า 8% ฐานเปียกได้ภายใน 2 วัน ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลเล็กน้อยต่อองค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง ถ่านอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) $25.48-27.43 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด ความหนาแน่นและความร้อน การผสมตัวประสานแต่ละชนิดด้วยสัดส่วน 4% โดยน้ำหนัก ไม่เหมาะสำหรับการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง เนื่องจากทำให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีความร้อนสูง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ตัวประสานทั้ง 3 ชนิด ที่สัดส่วน 7% และ 10% โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ ชุมชนถ่านอัดแท่ง การใช้สัดส่วนตัวประสานเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ส่งผลให้เกิดควันมากขึ้นในระหว่างการลุกไหม้ของ ถ่านอัดแท่ง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้กากมันที่สัดส่วน 7% โดยน้ำหนัก เป็นตัวประสานทำให้ต้นทุนการผลิตและระยะเวลาคืนทุนต่ำสุด

ศุภกร กตาทิการกุล และคณะ (2558) ศึกษาสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงและประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานของวัสดุตาลโตนด โดยการตรวจวัดสัดส่วนของชีวมวลจากต้นตาลโตนด ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าองค์ประกอบของธาตุ ของวัสดุตาลโตนดประกอบด้วย ทางลูกแห้ง กาบทะเลายตัวผู้ และทะเลายตัวเมีย พบว่าชีวมวลจากตาลโตนดต่อต้นมีสัดส่วนโดยมวลรวมกันเท่ากับ 13.07% หรือคิดเป็นมวล 219.2 กิโลกรัมต่อต้น ความชื้นของวัสดุตาลโตนดมีค่า 26.25-27.49% มาตรฐานแห้งและมีความหนาแน่นเฉลี่ย $806.69 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของวัสดุตาลโตนดมีค่าอยู่ในช่วง $1.65-2.16 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ซึ่งค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะมีค่าที่แปรผันตรงกับความหนาแน่น อัตราการเกิดเถ้าพบว่าอัตราการเกิดเถ้าของวัสดุตาลโตนดทั้ง 5 ชนิดมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าระหว่าง 3.5-6.5% โดยมวล องค์ประกอบที่ติดไฟได้ของวัสดุตาลโตนดกรณีการเผาไหม้ในอากาศปกติมีค่าเท่ากับ 65.98 – 69.70 % โดยมวล ค่าความร้อนสูงของวัสดุตาลโตนดมีค่าเฉลี่ย $21.97 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน มีค่า 41-45% โดยมวล ไนโตรเจน 4.2-5.5% โดยมวล และออกซิเจน 27.5-31.0% โดยมวล และมีค่ากำมะถันในสัดส่วน น้อยกว่า 0.02% โดยมวล

2.2.2 กระจินยักษ์

กระจิน (Leucaena) เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีการเจริญเติบโตเร็วและประการสำคัญเป็นพืชที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้ ดังนั้นการปลูกกระจินจึงช่วยปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ให้สูงขึ้น โดยเฉพาะไนโตรเจนในดิน ซึ่งดินส่วนใหญ่จะมีอยู่ในปริมาณต่ำ สำหรับธาตุอื่นที่จำเป็นจึงมีเพียงฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและธาตุอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะดินนั้นๆ ว่ามีธาตุเหล่านี้อยู่ในปริมาณมากน้อยเพียงใด จึงเห็นได้ว่าการผลิตกระจินสามารถลดค่าใช้จ่ายได้โดยผ่านการลดการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและลดมลภาวะของสารเคมีที่จะใส่ลงไปในดิน นอกจากนี้กระจินเป็นไม้ยืนต้นมีอายุหลายปี แต่ในทางปฏิบัติสามารถตัดได้ทุกปีเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานและใช้ส่วนเหลือในการเลี้ยงสัตว์ ทำให้เกษตรกรทั่วไปสามารถยึดเป็นอาชีพได้อย่างมั่นคง ระบบรากของกระจินลึกทำให้ทนแล้งได้ดีมากและยังช่วยลดปัญหาดินเค็ม โดยเฉพาะยิ่ง ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยอาศัยการดูดซับน้ำฝนที่มากเกินไปไม่ให้ลงไปได้ดิน จนทำให้น้ำใต้ดินสูงขึ้น ส่งผลทำให้ความเค็มมีค่าลดลงเพราะน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินไปที่จะละลายแร่เกลือที่อยู่ใต้ดินขึ้นมาบนดินได้ กระจินที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 2.1

กระจินยักษ์เป็นไม้ยืนต้นที่สัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถใช้ใบ และส่วนต้นอ่อนเป็นอาหารได้อย่างดี ทำให้งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งประเด็นไปในแง่ของการเลี้ยงสัตว์มากกว่าจะศึกษาถึงมวลชีวภาพของส่วนเนื้อไม้ที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นอกจากกระจินยักษ์จะใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์แล้ว เกษตรกรยังใช้ไม้จากกระจินยักษ์นำไปขายเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้น

ปริมาณผลผลิตกระจินยักษ์จะแตกต่างกันตามปริมาณน้ำฝนและระยะการปลูก ซึ่งกระจินยักษ์ที่ปลูกในบริเวณที่มีปริมาณน้ำฝนต่อปี 1,200 mm. ที่ระยะปลูก $1 \times 1 \text{ m}^2$. มีปริมาณผลผลิตสดมากที่สุดต่อปีคือ $6.144 \text{ ton} \cdot \text{rai}^{-1}$ รองลงมาคือกระจินยักษ์ที่ปลูกในบริเวณที่มีปริมาณน้ำฝนต่อปี 1,000 - 1,200 mm. และบริเวณที่มีปริมาณน้ำฝนต่อปี 800 - 1,000 mm. ตามระยะปลูกที่ห่างขึ้นตามลำดับ (เชิงชัย วิริยะบัญชา และวิเชียร สุมนัตกุล. 2550) ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 กระจินยักษ์ *Leucaena leucocephala* (lam.)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณผลผลิตเฉลี่ยของกระจินยักษ์ คิดเป็นน้ำหนักสดต่อไร่ต่อปี โดยจำแนกตามปริมาณน้ำฝน และระยะปลูก

ปริมาณน้ำฝนต่อปี (mm.)	ผลผลิตสดต่อปี (ton·rai ⁻¹) แยกตามระยะปลูก				
	1×1 m ² .	1×2 m ² .	2×2 m ² .	2×3 m ² .	4×4 m ² .
800 – 1,000	3.589	2.050	1.910	2.965	0.944
1,000 – 1,200	6.144	3.234	2.700	2.164	1.628
มากกว่า 1,200	7.213	4.405	3.488	2.965	2.442

จากปริมาณผลผลิตกระจินยักษ์เฉลี่ยต่อไร่ตามที่ได้กล่าวมานั้น พัสตราภรณ์ วรรณอาภา (2553) ได้ใช้ข้อมูลทำการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและเศรษฐกิจของการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลโดยใช้กระจินยักษ์เป็นเชื้อเพลิงซึ่งพบว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุนเป็นอย่างมากที่จะนำกระจินยักษ์มาเป็นชีวมวลในการผลิตไฟฟ้า อีกทั้ง สาเหตุการเลือกใช้ กระจินยักษ์ เพราะเป็นไม้ที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดย 1 ปี จะมีอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตอย่างน้อย 5 ตันต่อไร่ต่อปี (ในจังหวัดเพชรบุรีมีพื้นที่ที่ใช้ปลูกกระจินยักษ์สำหรับทดลองเป็นพืชพลังงานในศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริประมาณ 1,000 ไร่) และสามารถตัดได้รอบละประมาณ 2 – 3 ปี ส่วนอีกคุณสมบัติหนึ่งคือการแตกหน่อ เพราะไม้โตเร็วที่นำไปใช้เพื่อเป็นพลังงานมีข้อจำกัดที่ว่า พลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งในกระบวนการการผลิตของอุตสาหกรรม ฉะนั้นปัจจัยการผลิตจะมีราคาสูงไม่ได้ ดังนั้นการปลูกใหม่เรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ต้นทุนค่อนข้างสูง จึงเลือกชนิดพันธุ์ที่ตัดแล้วสามารถแตกหน่อขึ้นมาใหม่ เพื่อที่จะเก็บเกี่ยวได้หลายๆ ครั้ง และทำให้ต้นทุนถูกลง

มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันต์ และคณะ (2562) วางแผนการทดลองแบบ CRD เพื่อปลูกเปรียบเทียบศักยภาพในการเป็นไม้พลังงานของไม้โตเร็ว 4 ชนิดได้แก่ กระจินยักษ์ ยูคาลิปตีส กระจินเทพา และ กระจินเทพณรงค์ ปลูกในพื้นที่บริษัทสหโคเจน กรีน จำกัด อำเภอบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี โดยใช้ระยะปลูก 1x1 m. พบว่า ยูคาลิปตีสมีการเจริญเติบโตโดยรวมดีที่สุด และมีมวลชีวภาพของลำต้นและน้ำหนักสดของส่วนที่เป็นสินค้าได้ต่อไร่เมื่อตัดที่อายุ 24 เดือน สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 5,916 และ 12,857 kg·rai⁻¹ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังให้ค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 27,225,432 kcal·rai⁻¹ ในรอบการตัดแรกอายุ 24 เดือน รองลงมาได้แก่ กระจินเทพณรงค์ กระจินเทพาและกระจินยักษ์มีค่าเท่ากับ 19,920,672, 19,401,571 และ 15,297,132 kcal·rai⁻¹ ตามลำดับ

สรารุณี คงมันทวีทรัพย์ (2553) ศึกษาผลของสภาวะดำเนินการที่มีต่อปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพและร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง ที่อุณหภูมิระหว่าง 350 - 400 °C ทั้งแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาคือไม้ กระจินยักษ์ และตัวแปรในการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอัตราส่วนของน้ำต่อชีวมวล ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการดังกล่าวต่อองค์ประกอบและร้อยละผลได้และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้ วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบ (CHN analyzer) และแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) และวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 375 °C ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด อีกทั้งเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและอัตราส่วนของน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงร้อยละผลออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ร้อยละองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้น ร้อยละองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นความสามารถในการขจัดองค์ประกอบออกซิเจนออกจากน้ำมันชีวภาพลดลง ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวภาพคือ อุณหภูมิ 375 °C เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 min. อัตราส่วนของน้ำต่อชีวมวล 4 ต่อ 1 พร้อมทั้งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

2.2.3 ผักตบชวา

ผักตบชวา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Eichhornia crassipes* เป็นพืชที่เจริญอยู่บนผิวน้ำ จัดเป็นประเภทลอยน้ำ (Floating plant) โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินจึงถูกกระแสนลมหรือน้ำพัดพาไปได้ไกลๆ แต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากจะหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ ลักษณะทรงต้นประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุกในต้นหนึ่งๆ จะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไปโคนก้านใบจะมีกาบใบ (Sheath) ลักษณะเป็นเยื่อบางๆ สีขาวแกมเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล บริเวณของกาบใบเป็นสีน้ำตาลแกมม่วง จะเชื่อมติดต่อกันโดยมีไหล (Stolon) ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำช่วยในการขยายตัวของผักตบชวาให้เพิ่มขึ้น ต้นหนึ่งๆของผักตบชวาจะมีไหลแตกออกไปได้หลายอันเมื่อไหลแตกออกไปแล้ว ก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่แต่ยังติดกับต้นเดิมอยู่และเกิดเป็นกอขึ้นพร้อมทั้งมีรากเกิดขึ้น รากของผักตบชวาเป็นแบบรากฝอย (Fibrous root) คือมีรากย่อยๆเป็นกระจุกรากที่แทงออกจะมีลักษณะอวบสีเขียวเมื่อมีอายุมากขึ้นจึงจะมีรากขนอ่อนที่มีสีน้ำตาลอ่อน ใบเป็นแบบใบเดี่ยว (Simple leaf) ประกอบด้วยแผ่นใบ (Blade) และก้านใบ (Petiole) แผ่นใบมีลักษณะคล้ายรูปไต (Reniform) หรือคล้ายรูปหัวใจ (Cordate) มักมีความกว้างมากกว่ายาวหรือเกือบจะเท่าๆกันเมื่อยังอ่อนปลายใบมักจะมน แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นปลายใบจะแหลมมีสีเขียวเข้มขึ้น ขอบใบเรียบระบบเส้นใบ (Venation) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหารเป็นแบบเส้นใบขนาน ก้านใบมีลักษณะกลม เรียบ อวบน้ำ ถ้าต้นผักตบชวาเจริญอยู่ห่างๆกันลำต้นจะเล็กและก้านใบมักจะพองออกเป็นท่อนลอยน้ำ (ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Buoyancy leaf) แต่ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ในที่เบียดชิดกันมาก โดยเฉพาะในน้ำนิ่ง ก้านใบจะไม่พอง นอกจากนั้น ก้านใบยังยาวมาก บางแห่งพบว่ายาวถึงหนึ่งเมตร การเกิดใบอ่อน จะเกิดตรงกลางกอ โดยแผ่นใบของใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบใกล้เคียงและมีกาบใบบางใบหุ้มรอบอีกทีหนึ่ง ปลายกาบใบนี้ จะมีลักษณะคอด แล้วบางขอบหยักเล็กน้อยเป็นเยื่อบางๆ เมื่อใบอ่อนโตขึ้นก้านใบก็จะขยายขึ้นต้นกาบใบที่ห่อหุ้มนั้นออก แผ่นใบก็จะค่อยคลี่เป็นอิสระจากโคนก้านใบเดิมในระยะแรกใบจะมีสีเขียวอ่อน ต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้นก้านใบนั้นก็ยังคงติดอยู่ตรงโคนก้านใบ

โดยทั่วไปผักตบชวาจะไม่สืบพันธุ์โดยเมล็ด วิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดก็คือ การแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้นติดอยู่กับต้นแม่เป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นกอใหญ่หลังจากที่ต้นอ่อนเกิดตาและใบของตนเองได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่วัน ต้นอ่อนเหล่านี้ก็จะเริ่มสร้างต้นอ่อนต่อไปเป็นช่วงที่สาม ได้มีผู้รายงานว่าต้นผักตบชวาเพียง 2 ต้นสามารถสร้างลูกหลานได้เป็นจำนวนถึง 300 ต้นภายในเวลาเพียง 20 วัน และเพิ่มเป็น 1,200 ต้น ภายใน 4 เดือน แต่ในสภาพตามธรรมชาติ มีผู้สังเกตว่าผักตบชวาจะเพิ่มปริมาณเป็นสองเท่าภายใน 10 วัน ถ้าหากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ต้นผักตบชวา 10 ต้นจะสร้างลูกหลานได้ถึง 600,000 ต้น ครอบคลุมพื้นที่น้ำ 2.5 rai ภายในเวลา 8 เดือน

ผักตบชวาเป็นพืชที่มีความสามารถพิเศษในการสร้าง โครงสร้างของมันดียิ่งกว่าพืชอื่นๆทุกชนิดที่

มีอยู่ในโลกนี้ ยกตัวอย่างเช่นในพื้นที่หนึ่งไร่ผักตบชวาสามารถสร้างสารอินทรีย์ได้ถึง $24 \text{ ton}\cdot\text{yr}^{-1}$ ในด้านความรวดเร็วในการเจริญเติบโตเราอาจจะสังเกตการยึดของก้านใบหรือไหลภายในเวลาเพียงชั่วโมงเดียว สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะความสามารถพิเศษในการสร้างอาหาร และเปลี่ยนโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยน้ำถึง 19 ส่วนต่อสารแห้งเพียงหนึ่งส่วน การที่โครงสร้างของผักตบชวาสดมีน้ำอยู่ถึง 95% นี้เองเป็นสาเหตุใหญ่ที่ผักตบชวาระบาดแผ่กระจายอาณาเขตในแหล่งน้ำได้อย่างรวดเร็วกว่าพืชอื่นๆทั้งหมดในโลก (สุพจน์ แหวนเพ็ชร. 2552)

จากที่กล่าวมากำลังการผลิต (Productivity) ของผักตบชวาถือว่ามีปริมาณมากในแต่ละปี งานวิจัยนี้จึงนำผักตบชวามาศึกษาความเป็นไปได้โดยวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานเพื่อเทียบเคียงกับถ่านหินเพื่อเป็นอีกแหล่งพลังงานหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลต่อไป ในปี พ.ศ.2564 ระบบรายงานติดตามการกำจัดผักตบชวา รายงานว่า ในจังหวัดเพชรบุรี มีปริมาณผักตบชวา 10,565 ton ในพื้นที่ 856 rai ดังนั้นในพื้นที่ 1 rai จะมีผักตบชวา 12.35 ton ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็ว ในระยะเวลา 1 yr. จะมีปริมาณมากขึ้น 11 เท่า ดังนั้น จะมีจำนวนผักตบชวา $135.85 \text{ ton}\cdot\text{yr}\cdot\text{rai}^{-1}$ ผักตบชवादังกล่าวเมื่อนำมาตากแห้งแล้วจะเหลือน้ำหนัก $5.43 \text{ ton}\cdot\text{yr}\cdot\text{rai}^{-1}$

ปิยณัฐ โตอ่อน และคณะ (2559) ศึกษาและวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนจากถ่านชีวมวล โดยศึกษาหาส่วนผสมระหว่างผักตบชวากับถ่านแกลบที่ให้ค่าความร้อนสูงสุด จากการศึกษา พบว่าผักตบชวาแห้งมีค่าพลังงานความร้อน $2963.8 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ และถ่านแกลบมีค่าพลังงานความร้อน $3,300 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงที่ดี จากการออกแบบการทดลองส่วนผสม 5 สูตร พบว่าสูตรที่เหมาะสมคือ สูตรที่มีอัตราส่วนผสมผักตบชวาต่อถ่านแกลบ 40:60 มีค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ $3,223.33 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ต่อไปได้

เจษฎาพร กิจเจตน์ (2561) ศึกษาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก โดยใช้ถัง PVC ขนาด 20 L มีปริมาตรทำงาน (work volume) 16 L. โดยทำการทดลองในห้องควบคุมอุณหภูมิในสภาวะเมโซฟิลิก $37\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และในสภาวะเทอร์โมฟิลิก $51\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในระยะเวลาที่กักเก็บ (hydraulic retention time : HRT) 60 วัน โดยใช้วิธีการแทนที่น้ำในการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และใช้เครื่องมือวัดแก๊สชีวภาพในการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ ได้แก่ มีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และออกซิเจน (O_2) จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 5 อัตราส่วน ได้แก่ 4:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:4 พบว่าการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ในสภาวะเมโซฟิลิกที่อัตราส่วน 1:1 ให้ผลผลิตแก๊สมีเทน (specific methane yield : SMY) สูงสุดถึง $0.2387 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg V}_{\text{Sadded}}$ มีศักยภาพในการผลิตมีเทน (biochemical methane potential : BMP) สูงสุดถึง 51.89% นอกจากนี้ปริมาณร้อยละของแก๊สมีเทนสูงสุด 73.07% เกิดขึ้นในวันที่ 37 ของกระบวนการทั้งหมด 60 วัน สำหรับ

การทดลองในสภาวะเทอร์โมฟิลิก พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 ให้ผลผลิตแก๊สมีเทน (specific methane yield : SMY) สูงสุดถึง $0.1176 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg V}_{\text{Sadded}}$ มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (biochemical methane potential : BMP) สูงสุดถึง 61.67% มีปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนสูงสุด 73.20% ในวันที่ 32 ของกระบวนการทั้งหมด 60 วัน จากผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนมีผลต่อศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวา โดยพบว่าอัตราส่วนที่มีศักยภาพที่ดีที่สุดในการผลิตแก๊สชีวภาพในสภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก คือ อัตราส่วน 1:1

หฤทัย บงแก้ว และคณะ (2563) ทำการปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากผักตบชวา ให้มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านหินด้วยกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 200 230 260 และ 290 °C ที่เวลา 20 40 และ 60 min. ซึ่งกระบวนการทอริแฟคชันจะใช้ทำภายใต้สภาวะอับอากาศในเบดที่เป็นทรายละเอียดและในสภาวะอับอากาศปกติโดยคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงที่ทำการวิเคราะห์ คือ ความชื้น เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน พบว่าในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวากับกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 290 °C เวลา 20 min. สภาวะอับอากาศในเบดทรายละเอียด เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงเชื้อเพลิง ให้ค่าความร้อนสูงถึง $3,833.40 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนที่ไม่ผ่านการทอริแฟคชันที่มีค่าเพียง $3,019.86 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ ซึ่งค่าความร้อนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 28.64 ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากผักตบชวากับกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 290 °C ระยะเวลา 20 min. ในสภาวะอับอากาศในเบดที่เป็นทรายละเอียด เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอริแฟคชันในอนาคต

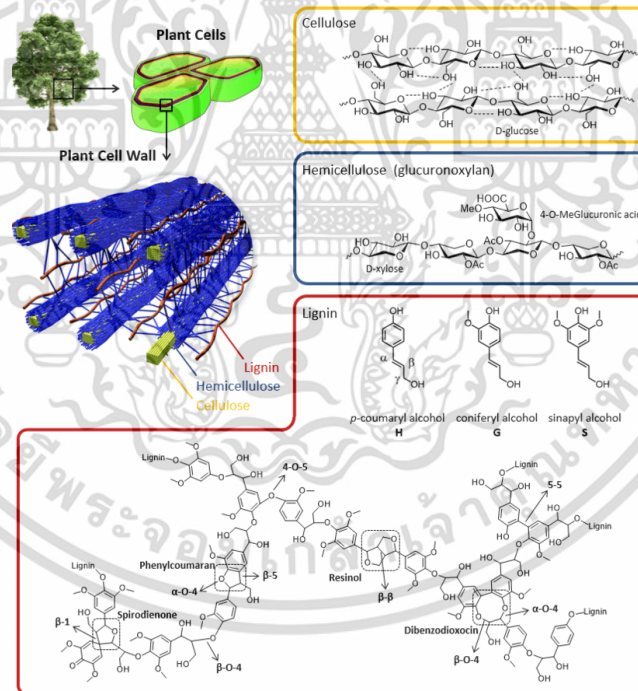
2.3 ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล

การแบ่งกลุ่มประเภทเชื้อเพลิงคือกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงที่อาจถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่มีความเหมือนกันนี้ ไม่จำเป็นต้องเป็นชีวมวลชนิดเดียวกันหรือชีวมวลที่มีต้นกำเนิดเดียวกัน (ส่วนต่างๆของพืชไม่ว่าจะเป็นลำต้น ใบ หรือ ดอกมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน) ดังนั้นเมื่อเราเลือกชีวมวลสำหรับนำมาทำการทดลองเผาไหม้ เราสามารถตรวจสอบการแบ่งกลุ่มประเภทเชื้อเพลิงจากสัดส่วนขององค์ประกอบองค์รวมของชีวมวลได้ (Basu. 2010) ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกการแบ่งกลุ่มชีวมวลโดยการใช้สัดส่วนขององค์ประกอบองค์รวมซึ่งชีวมวลสามารถถูกจำแนกบนพื้นฐานของสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

ส่วนประกอบองค์รวมที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและภาวะที่เจริญเติบโตของพืชนั้นๆ การนำส่วนประกอบของพืชชนิดต่างๆมาใช้ให้เหมาะสมกับงานและเกิดประโยชน์สูงสุด จึงจำเป็นต้องทราบลักษณะโครงสร้างของพืชและปริมาณส่วนประกอบต่างๆที่มีในพืช

นั้นๆด้วย

โครงสร้างหลักของเนื้อไม้ พบเซลลูโลสมากที่สุดประมาณ 40-50% ของน้ำหนักแห้ง เซลลูโลสพบได้ตามผนังเซลล์ของพืชทุกชนิดในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall) มีหน้าที่ช่วยทำให้พืชมีโครงสร้างแข็งแรง ส่วนเฮมิเซลลูโลสพบเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส จะยึดติดกับเซลลูโลสในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และลิกนินพบประมาณ 20-30% รองจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พบในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall) และมิดเดิล ลามลลา (middle lamella) โดยโครงสร้างกระจายรอบเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เกิดเป็นสารประกอบลิกโนเซลลูโลสที่มีกิ่งก้านสาขามากมายมีโมเลกุลขนาดใหญ่ตั้งแต่ 600,000-1,000,000 ดาลตัน (Krik and Farrell. 1987) ลิกนินทำหน้าที่เชื่อมเซลล์เข้าด้วยกัน สร้างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นให้กับเนื้อเยื่อพืชและลดการซึมผ่านของน้ำข้ามผนังเซลล์ จึงทำให้ลิกนินเป็นตัวป้องกันการติดเชื้อที่ทำให้เกิดโรคต่างๆ (Boominathan and Reddy. 1991)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างในเซลล์พืชซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Ballesteros et al. 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

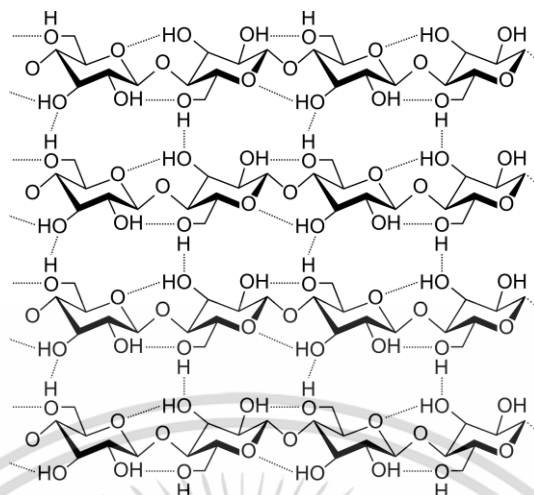


รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล

(ปราณี สติรพิพัฒนกุล. 2532)

2.3.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่เกิดจากโมเลกุลของดี-กลูโคส (D-glucose) มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวแต่ละสายของเซลลูโลสเรียงขนานกันไป และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใยแสดงดังรูปที่ 2.5 เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีจำนวนมาก สามารถสังเคราะห์ได้โดยพืช สาหร่าย และแบคทีเรียบางชนิด เช่นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (cyanobacteria) ราเมือกเซลล์เดี่ยว (cellular slime mold) และเพรียงหอม (ascidians) หน้าที่หลักของเซลลูโลสคือการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพืชในผนังเซลล์ ในผนังเซลล์ของพืชประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทิน รวมถึงลิกนิน และโปรตีน ทุกๆเซลล์ของพืชจะมีเซลล์ปฐมภูมิที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกทินและโปรตีน แต่อย่างไรก็ตามบางเซลล์ก็จะมีเซลล์ทุติยภูมิซึ่งมีเซลลูโลส และลิกนินเป็นส่วนประกอบหลัก ความสำคัญของเซลลูโลส คือ เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นของพืช และใช้ในการดำรงชีวิตในแต่ละวัน เป็นที่ที่น่าสนใจว่าเซลลูโลสเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมพอลิแซคคาไรด์และยังมีสมบัติทางกายภาพที่เฉพาะตัว (Michelle. 2007)

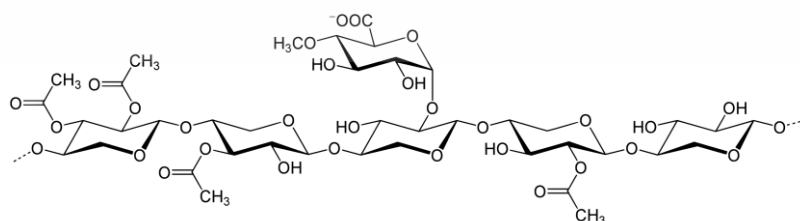


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส (นคร ทิพยาวงค์. 2552)

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส คือ พอลิแซคคาไรด์ที่มีลักษณะเป็นกิ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 มีองค์ประกอบของน้ำตาลเพนโตส (pentose) พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส พบได้ในพืชชีวมวล สิ่งหนึ่งที่เฮมิเซลลูโลสต่างจากเซลลูโลส คือเฮมิเซลลูโลสสามารถสลายตัวได้ที่สภาวะไม่รุนแรงมาก (สามารถถูกย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจาง) ซึ่งก่อให้เกิดองค์ประกอบของน้ำตาลที่หลากหลาย โดยน้ำตาลเพนโตส (pentose) ส่วนมากเป็นดี-ไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (xylose) หลายๆโมเลกุลต่อกัน (Michelle. 2007)

ข้อแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลสอีกประการหนึ่งคือสายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขามากกว่า สามารถดูดซับน้ำได้ดี และมีความยาวของสายพอลิเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส (TAPP, 2000-2001) มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ โดยทั่วไปเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกลุ่มกัน เรียกว่า โฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของเส้นใยไม้

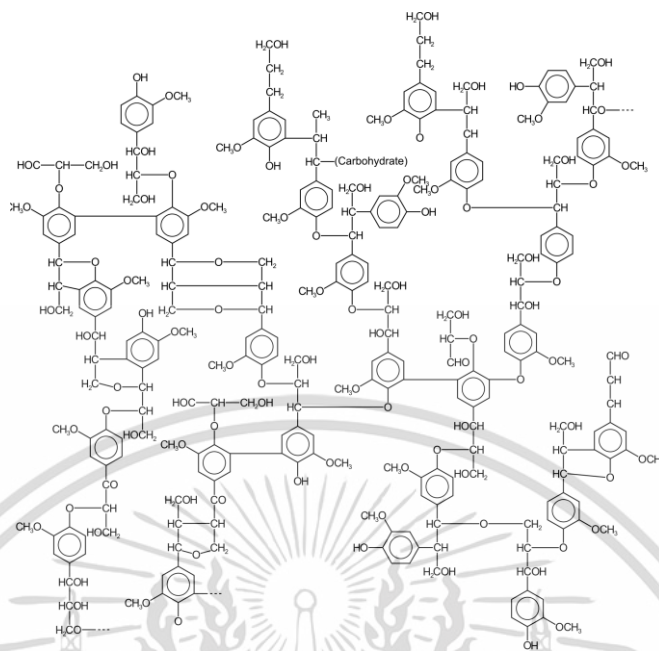


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (นคร ทิพยาวงค์. 2552)

2.3.3 ลิกนิน (lignin)

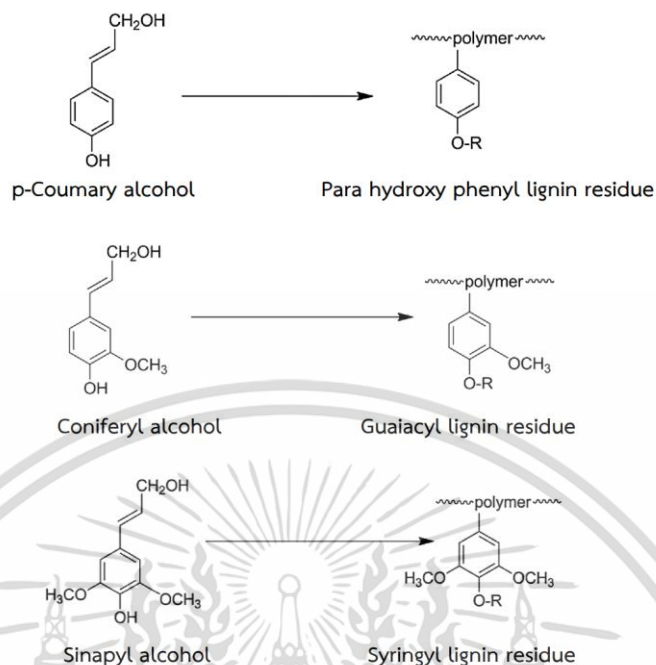
ลิกนิน (Lignin) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_{12}O_4$ ลิกนินเป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดดังแสดงในรูป 2.7 จนกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลิกนินมีสมบัติไม่ละลายน้ำ (ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไลม. ม.ป.ป.) ไม่ยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงทนทานสูง โดยลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในผนังเซลล์พืชชั้นสูง (ทั้งพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่) เช่น ลำต้น หน่อกิ่ง ฟางข้าวสาธิต แคนฝักข้าวโพด ฯลฯ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืช แสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ลิกนินยังมีโครงสร้างเป็นร่างแหเพื่อทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้ติดกันภายในผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างพืชมีความแข็งแรงทนทานสูงนั่นเอง ลิกนินเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในเซลล์พืชประมาณ 20-30% ซึ่งมีปริมาณรองลงมาจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยส่วนใหญ่สามารถพบลิกนิน บริเวณผนังชั้นที่สองของผนังเซลล์และระหว่างชั้นเส้นใย (Middle lamella) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งนอกจากลิกนินจะมีหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้ติดกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแล้ว ยังช่วยลดการระเหยของน้ำที่อยู่ระหว่าง เนื้อเยื่อไซเลมและผนังเซลล์ ป้องกันการถูกทำลายเนื้อเยื่อของพืชจากจุลินทรีย์ได้ด้วย (Krik and Farrell, 1987) ลิกนินยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเนื้อไม้ โดยเฉพาะไม้ยืนต้น ซึ่งจะช่วยให้ต้นไม้มีความแข็งแรงและทำให้ผนังเซลล์กันน้ำและมีคุณสมบัติป้องกันโรคได้

สำหรับหน่วยย่อยของลิกนิน (Monolignols) จะมีโครงสร้างแบบอะโรมาติกและมักพบได้ในธรรมชาติทั้งหมด 3 โมโนเมอร์ ได้แก่ พารา-คูมาริลแอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol) พบมากในพืชตระกูลหญ้า ส่วนโคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) พบมากในพืชใบแคบ (Softwood) ประมาณ 26-32% และพืชใบกว้าง (Hardwood) ประมาณ 20-28% และไซนาพิลแอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol) จะพบมากในพืชใบกว้าง (ประมุข ภาวกรกุลสุขสถิตย์, 2555) โครงสร้างของหน่วยย่อยของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยหน่วยย่อยทั้ง 3 โมโนเมอร์คือ p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol, และ sinapyl alcohol สามารถเกิดการเชื่อมต่อกัน จนได้เป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ Para hydroxy phenyl lignin residue, Guaiacyl lignin residue และ Syringyl lignin residue ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนิน (นคร ทิพยาวงศ์. 2552)

โดยปกติ ไม้เนื้ออ่อนมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 45-50% เฮมิเซลลูโลส 25-35% และลิกนิน 25-35% ขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีเซลลูโลส 40-55% เฮมิเซลลูโลส 24-40% และลิกนิน 18-25% โดยอาจจะมี สารสกัดอื่นซึ่งเป็นสารประกอบธรรมชาติที่พบในไม้อีกประมาณ 1-5% เป็นที่น่าสนใจว่าสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นกลุ่มอะลิฟาติกที่มีอะตอมออกซิเจนรวมจะพบเป็นส่วนใหญ่ในมวลเนื้อไม้ แต่ไม่พบ สารประกอบอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้มีกลุ่มฟังก์ชันนัล (functional group) สำคัญ คือ ไฮดรอกซิล (-OH) และเมทานอล (-CH₂OH) แต่ในลิกนินกลับพบกลุ่มของวงแหวนเบนซีนอยู่ โดย สารประกอบอะโรมาติกเหล่านี้พบว่าเป็นหน่วยเดี่ยวไม่ได้รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่เหมือนกับใน เชื้อเพลิงฟอสซิล กลุ่มฟังก์ชันนัลหลักในลิกนิน คือ เมทอกซี (-OCH₃) โดยมีกลุ่มไฮดรอกซิลและเมทานอล อยู่บ้างเล็กน้อย สำหรับส่วนที่เป็นสารสกัดจะมีโครงสร้างของอะลิฟาติกและอะโรมาติกที่มีความไวต่อการ เกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆ เช่นไนโตรเจน ก็สามารถพบได้ในชีวมวลโดยจะอยู่ในรูปของโปรตีน



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหน่วยย่อยของลิกนิน (Roopan, 2017)

เศษวัสดุการเกษตร จะมีส่วนประกอบแตกต่างจากไม้ วัสดุเหล่านี้มีไฮโดรเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ มีลิกนินน้อยหรือไม่มีเลย และมีโปรตีนสูง โดยทั่วไปพืชตระกูลหญ้า เช่น ข้าว อ้อย จะมีเซลลูโลส 25-40% เฮมิเซลลูโลส 25-50% และลิกนิน 10-30% พืชอื่นๆ เช่น ใฝ่ฝ้ายมีเซลลูโลส 80-95% เฮมิเซลลูโลส 5-20% และไม่มีลิกนินเลย ต้นข้าวโพดมีลิกนินเพียง 3% เท่านั้น สำหรับปริมาณโปรตีนนั้นมีต่ำมากเพียง 0.2-0.5% แต่พืชที่ไม่ใช่ไม้ เช่น ฝ้าย มีโปรตีน 1.3% ต้นทานตะวัน 2.1% ต้นถั่วเหลือง 5.5% หญ้าหวาน 24.7% ส่วนกลุ่มอะโรมาติก ในเศษวัสดุการเกษตรที่ไม่ใช่ไม้มีปริมาณน้อยกว่าในไม้กลุ่มฟางชั้นนัลจะเป็นพวกไฮดรอกซิลและเอมีน (-NH₂) เพราะพบในโปรตีนนั่นเอง ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของพืชพลังงานตัวอย่าง โดยส่วนประกอบอื่นๆ หมายถึง โปรตีน น้ำมัน และแร่ธาตุต่างๆ

งานวิจัยนี้เลือกชีวมวลเป็นกระถินยักษ์ เนื่องมาจากกลุ่มงานพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ (2548) ระบุว่ากระถินยักษ์เป็นไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานกรมป่าไม้ที่มีความแข็งแรงสูงดังนั้นเมื่อเทียบกับตาราง 2.2 จึงจัดประเภทวัสดุกลุ่มลำต้นไม้เนื้อแข็งจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำกระถินยักษ์มาศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นชีวมวล

สำหรับกะลาตาลและผักตบชวาซึ่งเป็นชีวมวลที่เลือกศึกษาในงานวิจัยนี้ไม่พบว่ามีการทำวิจัยเรื่องการเผาไหม้กะลาตาลและผักตบชวาโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวนมาก่อนดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงอ้างอิงงานวิจัยเกี่ยวกับการไพโรไลซิสที่เกี่ยวข้องกับชีวมวลจำพวกกะลาตาลและผักตบชวาเช่นงานของจันทร์เพ็ญ ชุมแสง (2554) ที่ศึกษาเรื่องการมีส่วนร่วมของประชาชนในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งของตาลโตนดเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกในเขตอำเภอ ศิริมาศ จังหวัด สุโขทัย ผลการวิจัยพบว่าผลการวัดค่าความร้อนของกะลาตาลมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับกะลามะพร้าว และกะลาปาล์ม และงานวิจัยของอาามานี สามะ นูร์ซีลา และนู และโรสลีนา จาราแเว (2560) ทำการศึกษา เรื่องถ่านอัดแท่งจากผักตบชวาเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนและอัตราการเผาไหม้ของถ่าน ผักตบชวากับถ่านไม้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงอาจนำคุณสมบัติที่ค้นพบในงานวิจัย ดังกล่าวมาศึกษาความเป็นไปได้ในการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวน

ตารางที่ 2.2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของพืชพลังงาน (dry basis)
(นคร ทิพย์วงศ์. 2552)

วัสดุ	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ลำต้นไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ลำต้นไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
แกนข้าวโพด	45	35	15
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ใบไม้	15-20	80-85	0
ใยเมล็ดฝ้าย	80-95	5-20	0
กระดาษหนังสือพิมพ์	40-55	25-40	18-30
มูลวัว ควาย ปศุสัตว์	1.6-4.7	1.4-3.3	2.7-5.7
หญ้า	25-40	35-50	10-30

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลเพื่อการแปลงเป็นพลังงาน

คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลถือเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำชีวมวลมาแปลงเป็นพลังงาน เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ชีวมวล ดังนั้น คุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางอุณหพลศาสตร์จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาเพราะการออกแบบ การเผาไหม้ชีวมวลจำเป็นต้องมีความถูกต้องแม่นยำ และเชื่อถือได้เพื่อเลือกกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงานให้เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะชีวมวลประเภทไม้ (woody biomass) เป็นกลุ่มที่หลากหลายที่สุด การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลทั่วไปจึงมีพื้นฐานมาจากชีวมวลกลุ่มนี้ ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับ งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis) วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน

2.4.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

เนื่องจากชีวมวลมีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ไนโตรเจน กำมะถัน และกลุ่มธาตุอื่นๆ ในรูปของเถ้า และ น้ำ ดังนั้น การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) จะเป็นการหาสัดส่วนของธาตุพื้นฐานทั้ง 5 ร่วมกับกำมะถัน และซีเถ้า โดยผลรวมขององค์ประกอบทั้งหมดจะเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามแสดงด้านล่าง

$$C + H + O + N + S + A + W = 100\%$$

สัดส่วนของ C, O, H, N, และ S คิดในหน่วย % โดยน้ำหนักของ C, O, H, N, และ S ตามลำดับในชีวมวล แต่อย่างไรก็ตามชีวมวลส่วนใหญ่อาจจะมี S เป็นองค์ประกอบ ทำให้สัดส่วนของ กำมะถันมีค่าน้อยมาก จนบางครั้งอาจปรับให้เป็นศูนย์ได้ ความชื้นหรือน้ำในเชื้อเพลิง คือ W ที่ถูกแยกออกมาจากสมการ ดังนั้น H หรือ O ในการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะไม่รวม O และ H ในความชื้น แต่จะมี O และ H ขององค์ประกอบสารอินทรีย์ในชีวมวลเท่านั้น การวิเคราะห์แบบแยกธาตุค่อนข้างทำได้ยาก และมีราคาสูงเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบประมาณ โดยใช้เครื่อง CHNS elemental analyzer ตาม ASTM D5373

โดยทั่วไป มีการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พื้นฐานอยู่ 4 ฐาน คือ

As-received basis: $C^r + H^r + O^r + N^r + S^r + A^r + W^r = 100\%$ ($W^r = W^e + W^h$)

Analytical (air dry) basis: $C^a + H^a + O^a + N^a + S^a + A^a + W^h = 100\%$

Dry (moisture-free) basis: $C^d + H^d + O^d + N^d + S^d + A^d = 100\%$

Combustible (dry and ash-free) basis: $C^c + H^c + O^c + N^c + S^c = 100\%$

2.4.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

เนื่องจากชีวมวลมีองค์ประกอบทางเคมีที่ค่อนข้างซับซ้อน มีทั้งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ (ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิง) และสารอนินทรีย์ (ส่วนที่เป็นแร่ธาตุและความชื้น) ทำให้การวิเคราะห์แบบละเอียดค่อนข้างยุ่งยากและบางครั้งไม่มีความจำเป็น จึงมักนิยมใช้การวิเคราะห์แบบประมาณแทน ซึ่งการวิเคราะห์แบบประมาณแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ส่วนที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ สารที่ระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือส่วนเฉื่อย ได้แก่ ความชื้น และเถ้า การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแบบพื้นฐานเปียก (wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) และแบบพื้นฐานแห้ง (dry basis) ชีวมวลแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ตามสภาพ (as-received basis) จะไม่สามารถนำค่าการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากสภาวะ

ความชื้นที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องคำนวณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงให้อยู่ในฐานเดียวกันคือที่สภาวะมีเฉพาะความชื้นในชีวมวล (air dry basis) และความชื้นอบแห้ง (dry basis) โดยส่วนใหญ่แล้วชีวมวลมักมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกิน 20%

ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustion substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) โดยสารระเหย คือ ส่วนที่เผาไหม้ง่ายและสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวนั้นเป็นคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งไม่รวมกับคาร์บอนในสารระเหยและส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือขี้เถ้า (ash) เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วจะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้นั้น คือขี้เถ้า โดยชีวมวลแต่ละประเภทนั้นจะมีสัดส่วนของปริมาณขี้เถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์แบบประมาณเป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและราคาถูก กระบวนการได้มาของ Proximate analysis มีดังนี้

ความชื้น (moisture, W^i) คือน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการอบชีวมวล ในตู้อบที่อุณหภูมิ 104-110 °C เป็นเวลา 1 hr. ความชื้นในเชื้อเพลิงบนฐาน as-received สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความชื้นภายนอกหรือความชื้นพื้นผิวหรือความชื้นอิสระ (free moisture, W^e) เป็นความชื้นที่ได้รับตอนถ่านหินผ่านกระบวนการทำเหมืองแร่ การขนส่ง และการเก็บในอากาศเปิด สามารถเอาความชื้นชนิดนี้ออกจากเชื้อเพลิงได้โดยการอบด้วยอากาศที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น เชื้อเพลิงที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยวิธีนี้จะต้องวิเคราะห์ในฐาน analytical (air dry basis) ส่วนความชื้นอีกอย่างคือความชื้นภายใน (inherent moisture, W^i) จะผูกติดกับสารต้นกำเนิด

ขี้เถ้า (ash) เป็นน้ำหนักที่คงอยู่หลังจากการเผาชีวมวลภายใต้สภาวะออกซิไดซ์ที่กำหนดที่อุณหภูมิ 700-750 °C เถ้า คือส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์ ดังนั้น น้ำหนักของเถ้าจึงน้อยกว่าน้ำหนักของส่วนประกอบอนินทรีย์ (แร่ธาตุ) ที่มีอยู่ในถ่านหินเดิม เพราะสารประกอบประเภทคาร์บอนेट ซัลไฟด์และอื่นๆถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสารออกไซด์ทั้งหมด

สารระเหย (volatile matter) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไป (หักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการอบชีวมวลภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min. โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อให้ส่วนที่ระเหยได้ออกมา เพื่อทำให้เกิด fuel pyrolysis หรือ thermal destruction แก๊สองค์ประกอบ (CO , CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4) และไฮโดรคาร์บอนหนัก จะระเหยออกมาจากถ่านหิน ซึ่งแก๊สองค์ประกอบเหล่านี้ จะถูกเรียกว่า volatile matter

คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) คือสิ่งที่เหลืออยู่หลังจากการระเหยของ สารระเหย คือ ชาร์ ซึ่งกำลังถูกเผาในเข้าหลอม มวลของชาร์ ที่สูญเสียไปจากการเผาไหม้ เรียกว่า คาร์บอนคงตัว ปริมาณ

คาร์บอนคงตัว=100 - (ความชื้น+ขี้เถ้า+สารระเหย) ซึ่งเป็นค่าที่วัดปริมาณสารที่สามารถเผาได้ (solid combustible material) เหลืออยู่ใน burning equipment และเป็นค่าหนึ่งที่ใช้ ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเครื่องมือด้วย

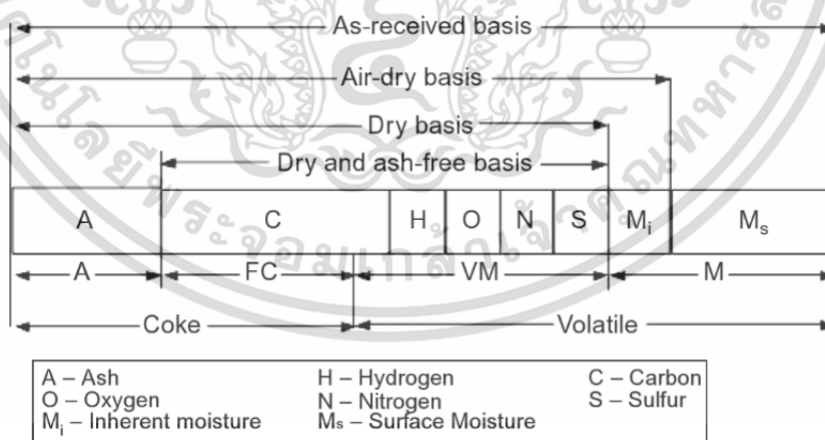
ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์เชื้อเพลิงและฐาน 4 ฐาน คือ แบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) สภาวะที่ความชื้นภายนอกหรือที่ผิวหายไปเหลือแต่ความชื้นภายใน (inherent moisture, W^i) เพียงอย่างเดียว (air dry basis) สภาวะความชื้นอบแห้ง (dry basis) และสภาวะที่ไม่มีทั้งความชื้นและขี้เถ้า (Combustible basis: dry and ash-free)

แบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) คือผลการวิเคราะห์ชีวมวลตามสภาพจริงที่ได้รับชีวมวลมาซึ่งประกอบไปด้วยความชื้นภายนอกจากการขนส่ง และการเก็บในอากาศเปิดและความชื้นภายในที่มีอยู่ในชีวมวลเองซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ } C' + H' + O' + N' + S' + A' + W' = 100\% \quad (W' = W^e + W^i)$$

$$\text{การวิเคราะห์แบบประมาณ } VM' + FC' + W' + A' = 100$$

สำหรับการวิเคราะห์แบบประมาณ VM, FC, W และ A คือ % โดยน้ำหนักของสารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้น และขี้เถ้า ตามลำดับ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ C, H, O, N และ S คือ % โดยน้ำหนักของ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ตามลำดับ ซึ่งแบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) สามารถคำนวณเปลี่ยนเป็นฐานอื่นๆได้ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฐานต่างๆในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์โดยประมาณและโดยแยกธาตุและพื้นฐานของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันบนฐานต่างๆในการวิเคราะห์เชื้อเพลิงทั้ง 4 ฐาน

Air dry basis สภาวะที่ความชื้นภายนอกหรือที่ผิวหายไปเหลือแต่ความชื้นภายใน (inherent moisture, W^h) เพียงอย่างเดียว ตัวอย่างเช่น %คาร์บอน บนฐาน air dry basis สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$C_{ad} = \frac{100C}{100 - W^e} \% \quad (2.1)$$

สภาวะความชื้นอบแห้ง (dry basis) เนื่องจากสภาพของชีวมวลแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ตามสภาพ จะไม่สามารถนำค่าการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้ เพราะสภาวะความชื้นที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องคำนวณองค์ประกอบของชีวมวลให้อยู่ในฐานเดียวกันคือสภาวะความชื้นแบบอบแห้ง (0%) หรือ dry basis ตัวอย่างเช่น % คาร์บอน บนฐาน dry basis สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$C_{td} = \frac{100C}{100 - W^r} \% = \frac{100C_{ad}}{100 - W^h} \% \quad (2.2)$$

โดยที่ ความชื้นทั้งหมดคือ $W^r = W^e + W^h$

สภาวะที่ไม่มีทั้งความชื้นและขี้เถ้า (Combustible basis: dry and ash-free) ตัวอย่างเช่น % คาร์บอน บนฐาน dry and ash-free basis สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$C_{adf} = \frac{100C}{100 - W^r - A} \% \quad (2.3)$$

และเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบอื่นๆได้จากสมการ 2.4

$$C_{adf} + H_{adf} + O_{adf} + N_{adf} + S_{adf} = 100\% \quad (2.4)$$

จากความสัมพันธ์ของฐาน ทั้ง 3 ฐาน พบว่าตารางที่ 2.3 จะแสดงสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนฐาน สำหรับหาองค์ประกอบ ฐานต่างๆ เช่นถ้าเราต้องรู้ %คาร์บอน บนฐาน as received เราสามารถนำสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนฐานไปคูณเพื่อแปลงเป็นค่า %คาร์บอน บนฐาน dry basis ได้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนฐานสำหรับหาค่าประกอบ ฐานต่างๆ

Given	Basis required for determining the fuel analysis:		
	As-received	Dry basis	Combustible
As-received	1	$100/(100-W^r)$	$100/(100-W^r-A^r)$
-Dry basis (moisture-free)	$(100-W^r)/100$	1	$100/(100-A^d)$
Combustible (dry and ash-free)	$(100-W^r-A^r)/100$	$(100-A^d)/100$	1

2.4.3 ค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ ซึ่งตัววัดปริมาณพลังงานของชีวมวลคือการวัดค่าความร้อน (heating value หรือ calorific value) ที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซึ่งค่าความร้อนคือปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงนั้นอยู่ในสถานะเริ่มต้นที่ 25 °C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 25 °C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือ ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV หรือ gross calorific value, gross C.V.) หรือค่าความร้อนรวม (Total heating value, THV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) หรือ net calorific value (net C.V.) (สำเร็จ จักรใจ. 2547) หน่วยของค่าความร้อน เช่น $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Btu}\cdot\text{lb}^{-1}$, $\text{Cal}\cdot\text{g}^{-1}$ หรือ $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$

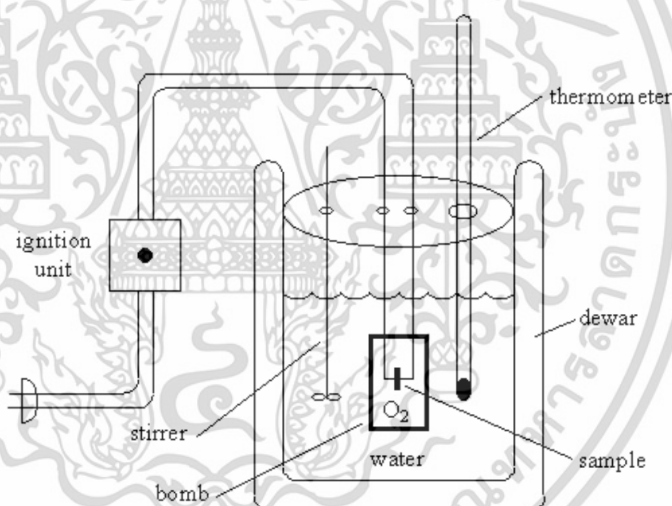
ค่าความร้อนสูง higher heating value, HHV (Gross calorific value) คือ ปริมาณความร้อนที่จะให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่ตัวทำปฏิกิริยาเริ่มต้นและสารผลิตภัณฑ์สุดท้ายทั้งหมดอยู่ภายใต้ความดันหนึ่งบรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้อยู่ในรูปของเหลว (ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์การเผาไหม้กลั่นตัวเป็นน้ำ) ยกตัวอย่างเช่น เมื่อน้ำที่ปะปนอยู่ในสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้เกิดการควบแน่นอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น HHV จึงเป็นค่าความร้อนที่รวมค่าความร้อนแฝงในการทำให้ไอน้ำระเหยกลายเป็นไอ ความชื้นในเชื้อเพลิงและไอน้ำที่อยู่ในรูปของ fuel-H ออกซิเจนชั้นไว้ทั้งหมด โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ซึ่งปกติแล้วเรียกว่า แก๊สไอเสีย (fuel gas) ที่ถูกปล่อยออกมาจากระบบการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 °C ด้วยเหตุผลนี้ ค่าความร้อนแฝงส่วนนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในระบบการเผาไหม้ได้ โดยค่าความร้อนทั้งหมด หรือค่าความร้อนสูง สามารถหาได้โดยใช้เครื่องบอมบ์ แคลอริมิเตอร์ ตามสภาพตัวอย่างที่ได้รับ (as-received)

บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 2.10) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดลองหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยอาศัยหลักการทำงานด้วยกระบวนการปริมาตรคงที่ เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้แล้วจะให้พลังงาน

ความร้อนออกมา ซึ่งจะกำหนดให้อยู่ในรูปของค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนัก การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ เป็นการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักแล้วมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับย้าหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณหาได้จาก

$$Q = mc\Delta T$$

โดย Q คือ ปริมาณความร้อน (kJ)
 m คือ มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์
 c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$)
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (K)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในของ Bomb calorimeter (กัญญา บุญเกียรติ. 2544)

ปริมาณความร้อนที่คำนวณได้จากสมการยังมีใช้ความร้อนที่ถูกต้อง เพราะตัวของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ยังสามารถดูดค่าความร้อนบางส่วนไว้ในตัวมันเอง และความร้อนบางส่วนก็สูญเสียไปให้กับบรรยากาศรอบๆ ไอน้ำบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และยังกลั่นตัวไม่หมด ซึ่งไอน้ำดังกล่าวจะดูดความร้อนเอาไว้ นอกจากนี้ยังมีความร้อนบางส่วนที่มาจากขดลวดขณะจุดติดเชื้อเพลิงและเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศของออกซิเจน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิสูงมาก และจะรวมตัวเป็นกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก จากลักษณะดังกล่าว เพื่อให้ทราบค่าความร้อนที่แท้จริงของเชื้อเพลิงควรปรับข้อผิดพลาดต่างๆ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องตรวจสอบค่าน้ำสมบูรณ์ของเครื่องทดสอบ ให้อุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าบรรยากาศโดยรอบประมาณครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากการเผาไหม้ ต้องหยดน้ำลงบนบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ เพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำได้ หาปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้ของขดลวดแล้วนำไปลบออก หรือใช้ปริมาณเชื้อเพลิงทดสอบน้อย เพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นเพียง 2-3 °C ทำให้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีความผิดพลาดน้อยที่สุด (กัญจนา บุญเกียรติ. 2544)

รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างภายใน Bomb calorimeter ประกอบด้วย stainless steel bomb (ภายในบรรจุตัวอย่างที่ต้องการหาค่าพลังงาน และออกซิเจน) น้ำ เทอร์โมมิเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวน (stirrer) โดย บอมบ์จะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจาก บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ถ่ายเทไปยังสถานะแวดล้อม เนื่องจาก โครงสร้างของ บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ทำจาก stainless steel ปฏิกริยาการเผาไหม้จะเกิดภายใต้สถานะที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

ส่วนค่าความร้อนต่ำ lower heating value, LHV (Net calorific value) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนต่ำสามารถหาค่าได้จากค่าความร้อนสูงโดยหักค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่าความร้อนสูง ซึ่งตรงนี้จะทำให้ค่าความร้อนต่ำแตกต่างจากค่าความร้อนสูงตรงปริมาณความร้อนของการกลายเป็นไอของไอน้ำในเชื้อเพลิง สามารถนำไปใช้ในระบอบการเผาไหม้ได้ซึ่ง LHV จะแตกต่างจาก HHV สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5

$$LHV = HHV - r m_w \quad (2.5)$$

เมื่อ r คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิมาตรฐานมีค่าเท่ากับ $2,442 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ และ m_w คือ มวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งรวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นและที่เกิดจากการออกซิเดชันของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (สมการการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของไฮโดรเจนได้น้ำ ใน 1 kg ไฮโดรเจน)

ทั้ง HHV และ LHV สามารถคำนวณได้ บนฐาน as-received, dry และ combustible (dry and ash-free) จากการวิเคราะห์บนฐาน dry และ combustible ซึ่งจะมีความชื้นรวมอยู่ด้วย m_w ของเชื้อเพลิงบนฐาน as-received จะมากกว่าของทั้งสองฐาน เมื่อคำนึงถึงผลกระทบของความชื้นและไฮโดรเจนในมวลของไอน้ำ ค่าความชื้น LHV, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ จะหาได้จากการคำนวณหาค่าความร้อนสุทธิที่ระดับความชื้นต่างๆ ดังนี้

On as-received basis:

$$LHV^r = HHV^r - rm_w$$

$$LHV^r = HHV^r - 2,442 \left(\frac{W^e}{100} + \frac{8.94H^r}{100} \right) \quad (2.6)$$

$$LHV^r = HHV^r - 24.42(W^e + 8.94H^r)$$

On dry basis: $LHV^d = HHV^d - 218H^d \quad (2.7)$

On combustible basis: $LHV^c = HHV^c - 218H^d \quad (2.8)$

ค่าความร้อนสูงมักจะหาจากการทดลองโดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยมีหลักการทำงานคือใส่ตัวอย่างภายในลูกบอมบ์ เพื่อเผาจนตัวอย่างลุกไหม้ ให้ความร้อนออกมา ความร้อนจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ล้อมรอบลูกบอมบ์ เทอร์มิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์จะวัดการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สจะใช้แคลอริมิเตอร์ที่มีน้ำไหลผ่าน (water flow calorimeter) (กัญญา บุญเกียรติ. 2544) และ ใช้สมการคำนวณในการคำนวณหาค่าความร้อนต่ำ แต่มีนักวิจัยพยายามหาค่า HHV ของถ่านหินบนพื้นฐานของการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ไว้ดังสมการที่ 2.9, 2.10, และ 2.11

Mendeleeev's formula for the HHV on as-received basis:

$$HHV^r = 339C^r + 1256H^r - 109(O^r - S^r) \quad (2.9)$$

Delong's formula for the HHV on dry basis:

$$HHV^d = 338.3C^d + 1444.5(H^d - 0.125O^d) + 93.8S^d \quad (2.10)$$

IGT's (Institute of Gas Technology, USA) formula for the HHV on dry basis:

$$HHV^d = 341C^d + 1323H^d + 68.5S_v^d - 15.3A^d - 120(O^d + N^d) \quad (2.11)$$

ถ้าทราบค่า LHV^d และ LHV^c, LHV^r จะสามารถหาได้อย่างรวดเร็ว โดยคำนึงถึงปริมาณความชื้นและซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงบนฐาน as-received จากสมการ 2.12 และ 2.13

$$LHV^r = LHV^d(1 - 0.01W^r) - 24.42W^r \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$LHV' = LHV^c(1 - 0.01W' - 0.01A') - 24.42W' \quad (2.13)$$

2.5 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

ส่วนประกอบของชีวมวลโดยเฉพาะ H/C มีความสำคัญเพราะทำให้เกิดผลผลิตจากการไพโรไลซิส องค์ประกอบหลักของชีวมวลคือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อน องค์ประกอบเหล่านี้ของไม้จะย่อยสลายทางความร้อนในวิถีที่แตกต่างกันออกไป (Demirbas. 2000; Yang et al. 2004) ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจาก Thermogravimetric apparatus (TGA), Differential thermogravimetry (DTG) กับชีวมวลบางชนิดได้ผลดังนี้ เฮมิเซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 150 – 350 °C เซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 275 – 350 °C และลิกนิน มีช่วงอุณหภูมิ 250 – 500 °C (Kumar and Pratt. 1996) ส่วนการทดลองของ Cagnon et al. (2009) พบว่า การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลส่วนใหญ่มีอยู่ 4 ช่วงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคือ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C เป็นการกำจัดความชื้นที่อยู่ในชีวมวล ช่วงที่ 2 อุณหภูมิระหว่าง 220-300 °C เป็นการสลายตัวโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส ช่วงที่ 3 อุณหภูมิระหว่าง 300 - 340 °C เป็นการสลายตัวของโครงสร้างเซลลูโลส และช่วงที่ 4 อุณหภูมิสูงกว่า 340 °C เป็นการสลายตัวของโครงสร้างลิกนิน

ส่วนประกอบองค์รวมแต่ละชนิดเมื่อผ่านการไพโรไลซิสทำให้เกิดผลผลิตที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊ส และน้ำมัน ทาร์ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกับการไพโรไลซิสเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสทำให้ได้สารที่สามารถควบแน่นได้ จะพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับการไพโรไลซิสเซลลูโลส ส่วนการสลายตัวของลิกนินอย่างช้าๆจะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์เป็นหลัก

การสลายตัวของเซลลูโลสจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300 – 400 °C โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งใดๆ เซลลูโลสเมื่อถูกไพโรไลซิสแล้วจะได้เลโวกลูโคแซน (levoglucosan) (Bridgwater et al. 1999) และที่อุณหภูมิมากกว่า 500 °C เลโวกลูโคแซนจะถูกระเหยกกลายเป็นไอ (Reed. 2002) ดังนั้นผลผลิตหลักที่ได้เป็นสถานะแก๊ส ส่วนเฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนประกอบที่มีความเสถียรของไม้เพราะไม่มีความเป็นผลึกของสาร การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะไม่เหมือนกับของเซลลูโลสและลิกนิน คือการไพโรไลซิสชีวมวลที่อุณหภูมิถึง 280 – 500 °C จะพบว่าเฮมิเซลลูโลสมีอัตราการสลายสูงสุดที่อุณหภูมิ 350 - 450 °C (Kudo and Yoshida. 1957) ซึ่งการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสนี้เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างมากนักและผลิตภัณฑ์ที่ได้คือถ่านชาร์และน้ำมันดินแต่ผลผลิตที่ได้นี้น้อยกว่าการไพโรไลซิสเซลลูโลส การไพโรไลซิลิกนินทำให้เกิดสารอะโรมาติกและถ่านชาร์ในปริมาณที่มากกว่าการไพโรไลซิสเซลลูโลส ซึ่งการไพโรไลซิลิกนินด้วยการให้ความร้อนอย่างช้าๆ (slow heating rate) ที่อุณหภูมิ 400 °C ผลผลิตเป็นถ่านชาร์ประมาณ 40% (Klass. 1998) และจะได้ผลผลิตที่เป็นของเหลวประมาณ 35% ซึ่งของเหลวนี้นี้จะประกอบด้วยไอน้ำและ

น้ำมันดิน (Mohan et al. 2006)

ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการสลายตัวของชีวมวล จึงจำเป็นต้องพิจารณาพฤติกรรมการสลายตัวของส่วนประกอบองค์รวมหลักแต่ละองค์ประกอบก่อนทำการเผาไหม้จริง และในงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลของ Cagnon et al. (2009) เป็นเกณฑ์ในการอธิบายพฤติกรรมของการสลายตัวของชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้เนื่องจากงานวิจัยของ Cagnon et al. (2009) มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกิดขึ้นในประเทศไทยเช่นงานวิจัยของ นฤมล ชูบัวทอง (2550) และศิวพรรณ มหาสุภาพ (2553) ทั้งนี้การศึกษาการสลายตัวของชีวมวลมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Cagnon et al. (2009) ทำการศึกษาคุณสมบัติของรพูนของของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูลิกประเภทต่างๆ ใช้การคำนวณแบบพยากรณ์ที่ถูกต้องแม่นยำโดยหาผลลัพธ์จากการทดลอง 3 เรื่องโดยการ 1) ทดลองคาร์บอนในเซชัน 2) ผลที่ได้จากการแอกทิเวชันและ 3) ผลที่เกิดขึ้นกับถ่านชาร์รวมถึงผลที่ตามมาหลังจากการแอกทิเวชันคาร์บอนโดยใช้น้ำหนักสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าลิกนินสามารถทำให้เกิดถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยของรพูนเปรียบเทียบกับปริมาณความพรุนแสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบองค์รวมและน้ำหนักของสารตั้งต้นมีผลต่อความพรุนของถ่านชาร์

นฤมล ชูบัวทอง (2550) ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบทางเคมี (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ในชีวมวล 7 ชนิดต่อพฤติกรรมการสลายตัวในการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ และหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีกับปริมาณน้ำหนักที่เหลือที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อน โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) พบว่า ชีวมวลต่างชนิดกันจะมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจะมีโครงสร้างที่ต่างชนิดกันด้วย จึงทำให้มีค่าการสลายตัวทางความร้อนที่ต่างกัน โดยองค์ประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลสสลายตัวได้ง่ายที่สุด รองลงมาคือ เซลลูโลส ส่วนลิกนินสลายตัวยากที่สุด โดยชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินสูงทำให้อัตราการสลายในการไพโรไลซิสช้ากว่าชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินต่ำ องค์ประกอบหลักที่มีผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส คือ ลิกนินเทียบกับปริมาณรวมของลิกนินกับเซลลูโลส โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมการสลายตัวในกระบวนการไพโรไลซิสจากชีวมวลชนิดอื่นได้ นอกจากนี้พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลมีอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยเฮมิเซลลูโลสกับลิกนินมีผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวของเซลลูโลส แต่เฮมิเซลลูโลสกับลิกนินมีผลต่อการสลายตัวระหว่างกันน้อยมาก ส่วนพฤติกรรมการสลายตัวของชีวมวลในกระบวนการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของชาร์ที่เกิดขึ้น

Bridgwater et al. (1999) ศึกษาภาพรวมของการไพโรไลซิสและสมบัติของเชื้อเพลิง พบว่า

ชีวมวลมีองค์ประกอบหลัก คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน การสลายตัวของลิกนินในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ตัวแปรสำคัญในการสลายตัวของแต่ละองค์ประกอบคือ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ และความดันแก๊สไนโตรเจน ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ควรมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี การเตรียมชีวมวลถือว่ามีความสำคัญเช่นกัน เพราะนอกจากชีวมวลต้องมีขนาดเล็กเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดีแล้ว ชีวมวลยังต้องมีความชื้นที่ต่ำกว่า 10% ซึ่งในไฟโรไลซิสครั้งหนึ่งได้นำออกมาไม่ต่ำกว่า 15% และไม่สามารถแยกได้โดยวิธีปกติ เช่น การกลั่น ดังนั้นการที่มีน้ำในน้ำมันชีวภาพทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพ ค่าความร้อน ความหนืด ความเป็นกรด การกัดกร่อนเป็นต้น และควรให้ไอรอะเหวนเวียนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้เวลาน้อยที่สุด เพื่อป้องกันการแตกตัวครั้งที่ 2 (secondary cracking) ถ้าไม่มีการป้องกันจะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีปริมาณลดลง เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไฟโรไลซิสไม้ (wood) พบว่ามีออกซิเจนสูงถึง 37.1% ค่าความร้อน $17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (ปกติน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมมีค่าความร้อน $41\text{-}43 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ

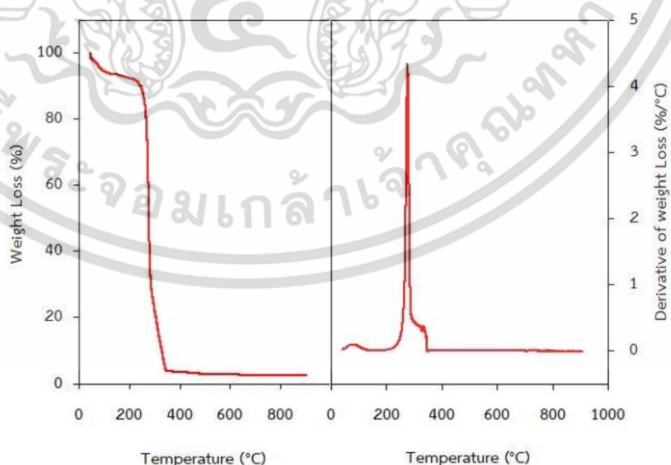
อานัญชัย วงศ์จักร (2554) ได้ศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ พางข้าว ต้นกระถินยักษ์ แกลบ และกะลาปาล์ม ต่อการไฮโดรตี้ออกซิเจนชั้นเชิงเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าการไฟโรไลซิสชีวมวลที่ $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วรอบการหมุนसरูของเครื่องไฟโรไลซิสชีวมวลแบบต่อเนื่องที่อัตรา 20 r.p.m. ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมากที่สุด (32.5%) และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นในชีวมวลที่ป้อนเข้า โดยใช้โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับไฮโดรตี้ออกซิเจนชั้นเพื่อลดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซลเจลร่วมกับวิธีการเคลือบฝัง พบว่าอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ $340 \text{ }^{\circ}\text{C}$ การลดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพที่ $380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 bar ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10% โดยมวล เวลา 3 hr. ให้เปอร์เซ็นต์ไฮโดรตี้ออกซิเจนชั้นสูงที่สุด (95.3%) และเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนตี้ออกซิเจนชั้นลดลงตามปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำน้ำมันชีวภาพที่ผ่านการลดออกซิเจนไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าสารประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนเป็นฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล

ศิริพรรณ มหาสุภาพ (2553) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน ชั้นแรกศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะตัวของทาร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิในช่วง $400 - 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ชั้นที่สองศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไฟโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งแบบใช้และไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิไฟโรไลซิสสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ที่เกิด

จากกระบวนการ ไพโรไลซิสมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่อุณหภูมิ 600 °C เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไม้กระถินยักษ์และซีลี้อยู่ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าซีลี้อยู่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ที่สูงกว่าแต่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สที่ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ นอกจากนี้ยังพบว่าซีลี้อยู่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นทาร์ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ด้วย สามารถสรุปได้ว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนทาร์ที่เกิดจากซีลี้อยู่มีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์

อีกทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลจาก Thermogravimetric apparatus (TGA) ใช้เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบอุณหภูมิทางความร้อนและการเผาไหม้ของชีวมวลที่แตกต่างกัน (Kastanaki and Vamvuka, 2006; Haykiri-Acma et al. 2010; Varol et al. 2010) ผลที่ได้จาก TGA จะอยู่ในรูปกราฟ TG ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชีวมวลตัวอย่าง

การทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป (TG) หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่าง (DTG) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ภายใต้เงื่อนไขของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อน



รูปที่ 2.11 กราฟการลดลงของน้ำหนัก (TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก (DTG)
(คีต สร้อยทอง. 2563)

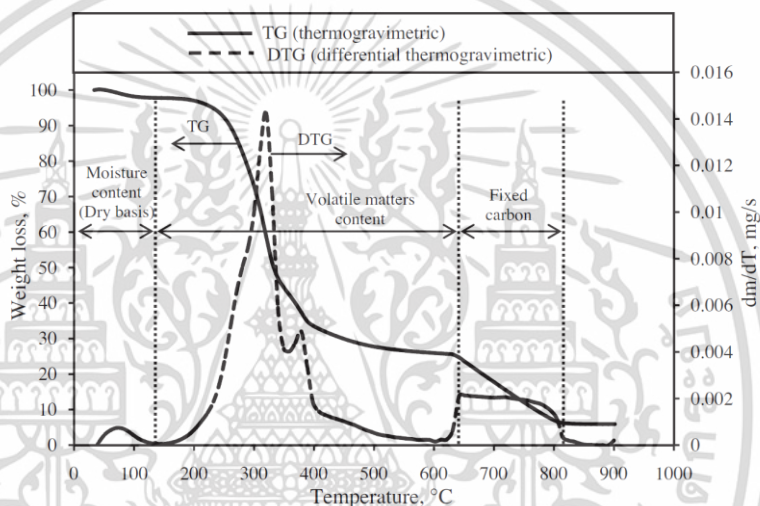
โดยเส้นกราฟ TG และ DTG ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ที่จุดวิกฤตต่างๆของกราฟทั้ง 2 โดยเริ่มจากการลดลงของน้ำหนักจะลดลงเพียงเล็กน้อยแสดงถึงการเริ่มปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilize) ก่อนที่สารระเหยจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศโดยรอบเกิดการติดไฟของสารระเหยแล้วเกิดการเผาไหม้ของชาร์ทำให้เกิดการลดลงของน้ำหนักอย่างรวดเร็วในท้ายที่สุดเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เหลืออยู่แสดงให้เห็นถึง เปอร์เซ็นต์ของเถ้าในองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

หรือจะกล่าวอีกได้ว่าการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) คือเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดและเปรียบเทียบอุณหภูมิในปฏิกิริยาการเผาไหม้ของชีวมวลแต่ละชนิดได้ ผลที่ได้จากการวัด TGA นั้นโดยปกติแล้วจะแสดงอยู่ในรูปกราฟ TG ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชีวมวลที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในระบบ TGA กราฟ TG จะถูกจับคู่กับลักษณะกราฟ DTG อื่นๆ อันดับแรกคือ อัตราการลดลงของน้ำหนัก เรียกว่ากราฟ DTG ซึ่งแสดงเวลาที่ความร้อนทำให้สารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์กราฟ TG/DTG จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ คือ อุณหภูมิการระเหยน้ำ (Dewatering temperature, T_w) อุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ (Ignition temperature, T_{ign}) อุณหภูมิช่วงการสลายตัว (Peak(s) temperature, T_p) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (Burnout temperature, T_b) โดยที่

อุณหภูมิการระเหยน้ำ (Dewatering temperature, T_w) คือ อุณหภูมิซึ่งความชื้นของชีวมวลระเหยออกไปจนหมดซึ่งใช้บอกพฤติกรรมช่วงที่ความชื้นถูกกำจัดออกไป อุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ (Ignition temperature, T_{ign}) คือ ช่วงที่ใช้อธิบายว่าเชื้อเพลิงติดไฟได้ง่ายเพียงใด อุณหภูมิช่วงการสลายตัว (Peak(s) temperature, T_p) จะสอดคล้องกับอัตราการสลายตัวสูงสุดของชีวมวล (บ่อยครั้งถูกใช้สำหรับการวัดปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง) อุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (Burnout temperature, T_b) คือ อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์แล้ว ซึ่งกระบวนการตั้งแต่การระเหยน้ำจนถึงสิ้นสุดการเผาไหม้จะเกิดขึ้นภายในเวลาอันรวดเร็ว และสามารถใช้เป็นตัวแปรสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมในระบบการเผาไหม้ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

จากรูปที่ 2.12 อธิบาย TG (เส้นทึบ) และ DTG (เส้นปะ) ของทะเลสาบปาล์มที่แสดงช่วงการสลายตัวของชีวมวลที่แตกต่างกันในสภาวะอากาศแห้ง จากกราฟ TG/DTG ในรูป 2.12 แต่ละช่วงของการสลายตัวทางความร้อนที่สามารถสังเกตได้ จะแสดงพฤติกรรมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการการสลายตัวของชีวมวล เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำๆคือ เฮมิเซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 160 – 360 °C เซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 240 – 400 °C ลิกนินมีอัตราการสลายตัวต่ำแต่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวกว้าง มีช่วงอุณหภูมิ 150 – 900 °C และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 °C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (DTG peak) ในช่วงแรก กราฟ DTG สูงขึ้นเล็กน้อย พบที่

ประมาณ 100 °C ซึ่งแสดงถึงช่วงที่มีการกำจัดความชื้นออกมากที่สุด ในช่วงที่สอง 180 – 400 °C พันธะทางเคมีในชีวมวลเริ่มแตกตัวออกตามด้วยการปลดปล่อยสารระเหย ตามที่อธิบายช่วงอุณหภูมิข้างต้นของสารประกอบเชิงโครงสร้างหลักขั้นนี้มีความสอดคล้องกับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ซึ่งจากในรูป 2.11 การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นตั้งแต่ 180 – 260 °C เซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 260 – 410 °C มีอัตราการลดลง 60% ช่วงที่สาม การสลายตัวของทะเลาะลายปาล์มเกิดขึ้นที่ 410 – 680 °C ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของลิกนินและเกิดการออกซิเดชันของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนที่เหลือจากการสลายตัวคือ ขี้เถ้า



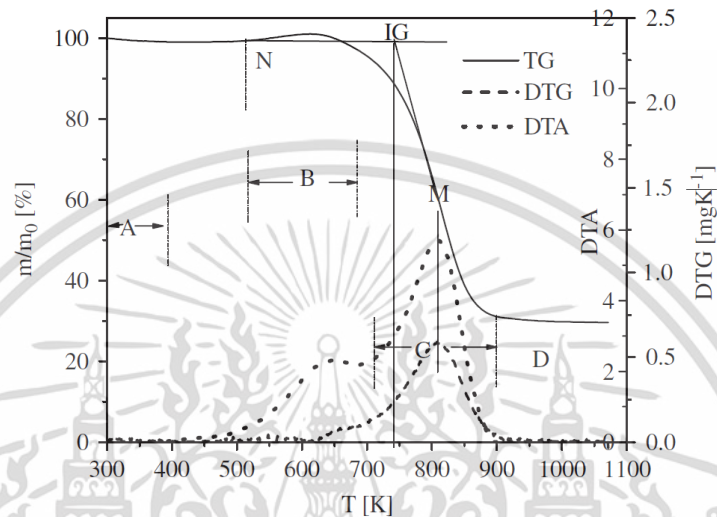
รูปที่ 2.12 การวิเคราะห์แบบประมาณของทะเลาะลายปาล์มด้วยเครื่อง TGA (Mohammed et al. 2012)

Wang et al. (2008) ได้เสนอวิธีการอธิบาย T_{ign} และ T_b ของเชื้อเพลิงแบบผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวล โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ TG และ DTG ดังแสดงในรูป 2.13

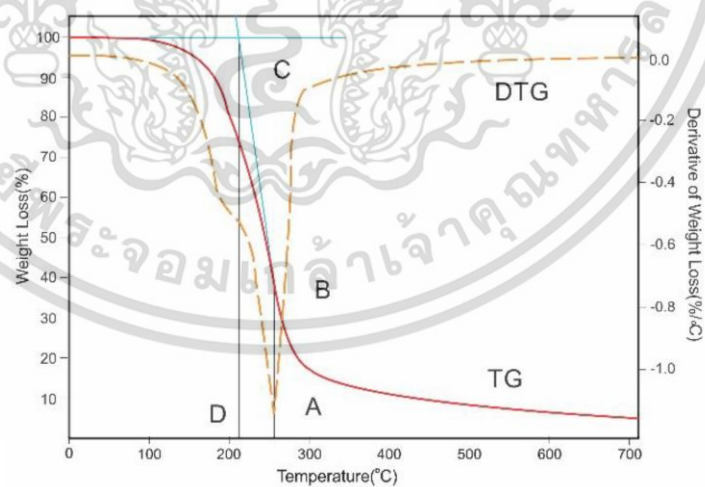
การหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ (T_{ign}) ทำได้จากการกำหนดจุด 2 สองจุดจาก กราฟ TG โดยจุดแรก แทนด้วย M ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการสลายตัวสูงสุดของเชื้อเพลิงแบบผสม (จุดสูงสุดบนกราฟ DTG) อีกจุดคือ N ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มมีการระเหยเกิดขึ้นซึ่งเป็นจุดที่เส้นสัมผัสกันบนกราฟ TG จุดเส้นตรง N และ M ตัดกันคือ จุดที่เกิดอุณหภูมิของการติดไฟได้ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) คือ จุดที่สอดคล้องกับอุณหภูมิสูงสุดบนกราฟ TGA เมื่อกระบวนการสลายตัวสิ้นสุด

Muthuraman et al. (2010) ได้แสดงการหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้จากการใช้จุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสารมากที่สุดจากกราฟ (DTG จุด A) แล้วจึงลากตามแนวแกนตั้งไปตัดกับ

กราฟ TG (จุด B) จากนั้นลากตามความชันของกราฟ TG เพื่อหาจุดตัดกับเส้นแกนนอนของจุดที่มีการเริ่มปลดปล่อยสารระเหย (จุด C) แล้วจึงลากเส้นตามแนวแกนตั้งอีกครั้งเพื่อดูจุดตัดแกนนอน (จุด D) ทำให้สามารถหาอุณหภูมิของการติดไฟได้จากกราฟ TG และ DTG จากการวิเคราะห์ TGA ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) ของถ่านหิน/ชีวมวล (Wang and Yan. 2008)



รูปที่ 2.14 การหาอุณหภูมิติดไฟจากกราฟวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA) (Muthuraman et al. 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.4 สรุปลักษณะการเผาไหม้ด้วย TGA ของเชื้อเพลิงต่างๆที่ถูกทดสอบภายใต้ อากาศแห้งที่ อัตราการให้ความร้อนที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิดมีอุณหภูมิการจุดติดไฟ ต่ำกว่าถ่านหิน ซับบิทูมินัส อย่างมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงว่าชีวมวลเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านหิน

ตารางที่ 2.4 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ด้วย TGA ของเชื้อเพลิงต่างๆ (Pichet and Vladimir. 2015)

เชื้อเพลิง	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)				อุณหภูมิที่สิ้นสุด การเผาไหม้ (T_b)	อ้างอิง
	อุณหภูมิติดไฟ (T_{ign})	Peak 1	Peak 2	Peak 3		
ซับบิทูมินัส	398	471	-	-	700	Idris et al. (2012)
ก้านฝ้าย	220	260	360	-	505	Sun et al. (2010)
ชิ้นไม้	180	310	360	-	730	Varol et al. (2010)
มะกอก	190	330	440	770	880	Varol et al. (2010)
เฮเซลนัต	185	330	370	440,760	860	Varol et al. (2010)
ลำต้นยาสูบ	250	300	380	520	600	Yang et al. (2012)
เปลือกทานตะวัน	260	310	485	-	620	Arromdee and Kuprianov (2012b)
เปลือกถั่วเปลือก	290	335	530	-	600	Kuprianov and Arromdee (2013)
เปลือกมะขาม	250	350	500	820	830	Kuprianov and Arromdee (2013)
แกลบ	273	315	500	-	584	Zhang et al. (2015)

Xiang-guo et al. (2549) ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ร่วมของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิง ถ่านหินที่มีค่าสูงกับยางเสี่ย โดยทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป (TG) หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่าง (DTG) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ภายใต้เงื่อนไขของ อัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวล และอุณหภูมิ และหาได้ว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมของเชื้อเพลิงถ่านหิน มีจุดติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่า ยางเสี่ย ดังนั้นจึงใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเป็นหลักแล้วผสมยางเสี่ยเข้าไปตามอัตราส่วน 10 30 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิของการติดไฟต่ำลงและใช้เวลาในการเผาไหม้ลดลงอีกด้วย

Vamvuka et al. (2011) ได้สังเกตจุดติดไฟและพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสม นิกไนต์ โดยมีการหาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกัน และยังอธิบายพฤติกรรม การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดรวมถึงเชื้อเพลิงผสมด้วยกราฟ TG และ DTG เทียบอยู่กับอุณหภูมิที่ ได้จากการวิเคราะห์ TGA โดยจากการทดลองสรุปได้ว่า อุณหภูมิของการติดไฟและการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น หากอนุภาคของเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงมากขึ้น อีกทั้งยังสรุปว่า เชื้อเพลิงลิกไนต์เมื่อผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆจะสามารถเร่งกระบวนการทางเคมีความร้อนโดยพิสูจน์ จากดัชนีการจุดติด จุดที่น้ำหนักลดลงมากที่สุด (จุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด) และเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ใน การเผาไหม้ โดยจะสามารถหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ เมื่อทราบอุณหภูมิของการติดไฟ ได้มี การเปรียบเทียบการจุดติดไฟในเชิงตัวเลขด้วยดัชนีของการติดไฟซึ่งหาได้จาก อัตราการเผาไหม้ที่มาก ที่สุด เทียบกับเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนถึงจุดติดไฟและเวลาที่ใช้จนถึงจุดที่มีการเผาไหม้มาก ที่สุด

Muthuraman et al. (2010) ศึกษาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ถ่านจากประเทศอินโดนีเซีย และถ่านที่มีสัดส่วนถ่านสูงจากประเทศอินเดียผสมกับขยะมูลฝอยด้วยการวิเคราะห์ TGA พบว่าการบำบัด ขยะมูลฝอยด้วยความร้อนทำให้ขยะมูลฝอยเป็นผงเหมือนเชื้อเพลิงแข็งทั่วไป ซึ่งทำให้ง่ายต่อการผสมและ เผาไหม้กับถ่าน โดยอุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงถ่านผสมขยะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สารระเหย ปล่อยออกมา ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิติดไฟ พบว่า ขยะมูลฝอยมีการปลดปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิต่ำทำให้อุณหภูมิตดไฟมีค่าต่ำกว่าถ่านจากประเทศ อินโดนีเซียและประเทศอินเดีย ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าอุณหภูมิตดไฟนั้นจะแปรผันตามอุณหภูมิของการ ปลดปล่อยสารระเหย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนของขยะมูลฝอยมีมากกว่าถ่านหินที่เป็นส่วนช่วยให้ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเร็วขึ้น เป็นการสนับสนุนการให้ถ่านหินมีอุณหภูมิตดไฟต่ำลงเมื่อนำเชื้อเพลิงขยะ มูลฝอยมาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงถ่าน ดังนั้นการผสมขยะมูลฝอยกับถ่านหินอาจช่วยลดระยะเวลาและ ปริมาณเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาของโรงงาน

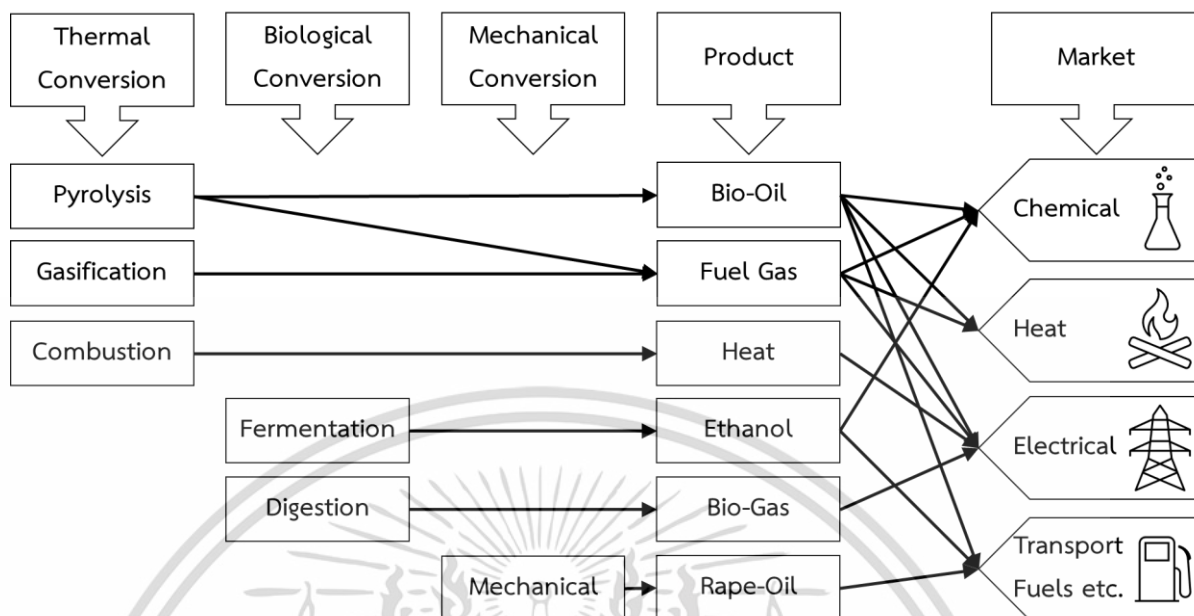
Liu et al. (2016) ค้นคว้าพฤติกรรมของการเผาไหม้ของไม้ไผ่ ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ถ่าน และการผสมของ เชื้อเพลิงข้างต้นด้วยการวิเคราะห์ TGA รวมถึงหาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ของเครื่องวิเคราะห์ TGA พบว่าอัตราการไหลของอากาศเป็นตัวเพิ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้และสนับสนุน การเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังกล่าวว่าการทอรีไฟด์ทำให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์มี สารระเหยน้อยลงแต่มีค่าความร้อน สัดส่วนของถ่าน และสัดส่วนคาร์บอนที่สูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิจุดติดไฟ และการเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งทำให้พฤติกรรมของการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของถ่าน ดังนั้นพฤติกรรมของการเผาไหม้ของถ่าน และไม้ไผ่ทอรีไฟด์จึงแสดงที่พฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นการ

ยืนยันว่าในภาคอุตสาหกรรมสามารถใช้ไม้ไฟทอรีไฟต์ผสมกับถ่านเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้เพิ่ม

Mi et al. (2016) ได้ทำการค้นหาลักษณะเฉพาะของการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ของไม้ไฟทอรีไฟต์และไม้สนทอรีไฟต์ ซึ่งเขาพบว่าหลังจากเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (การปลดปล่อยสารระเหย) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความร้อนสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่น้อยลงของเชื้อเพลิงทอรีไฟต์ทำให้กระบวนการเผาไหม้เกิดได้ดีมากขึ้น

2.6 กระบวนการการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง

ชีวมวลและของเสียทางการเกษตรสามารถแปรรูปไปเป็นพลังงานได้โดยผ่านกระบวนการเชิงความร้อน เองหรือเชิงกายภาพดังแสดงโดยสรุปในรูปที่ 2.15 กระบวนการเชิงความร้อนในปัจจุบันนี้เป็นที่นิยมในยุโรปและแคนาดา ขณะที่การผลิตเอทานอลนิยมในสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันนี้การแกซิฟิเคชันยังอยู่ในขั้นพัฒนาและทำการทดลอง (RD&D) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ ส่วนการไพโรไลซิสแบบเร็วยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา แต่การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงต้องมีสมบัติในการจัดเก็บและการขนส่งที่ดี การใช้งานของเชื้อเพลิงเหลว ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้งานกับโรงงานขนาดเล็ก ระบบการเผาไหม้เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเหมาะกับโรงงานขนาดเล็ก กระบวนการแปรรูปเชิงชีวภาพ(การหมักและการย่อย) กระบวนการเชิงกล เช่น น้ำมันพืชเป็นกระบวนการที่ถูกนำเสนอว่ามีประสิทธิภาพที่ดี (Bridgewater et al. 2006)



รูปที่ 2.15 กระบวนการ ผลิตภัณฑ์ และการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล
(ดัดแปลงมาจาก Bridgewater et al. 1999)

สรุปคือการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูป 2 เทคโนโลยีหลัก คือ 1) กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (biochemical conversion process) เช่น การหมัก (fermentation) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) 2) กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (thermochemical conversion process) สามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆได้อีก 3 กระบวนการคือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) กระบวนการแกซิฟิเคชัน (gasification) และกระบวนการเผาไหม้ (combustion)

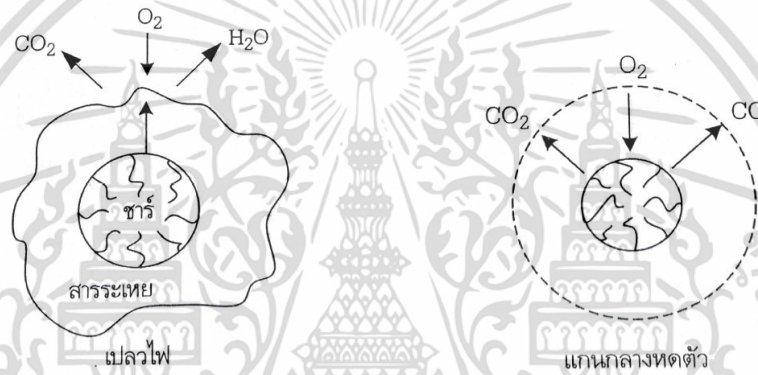
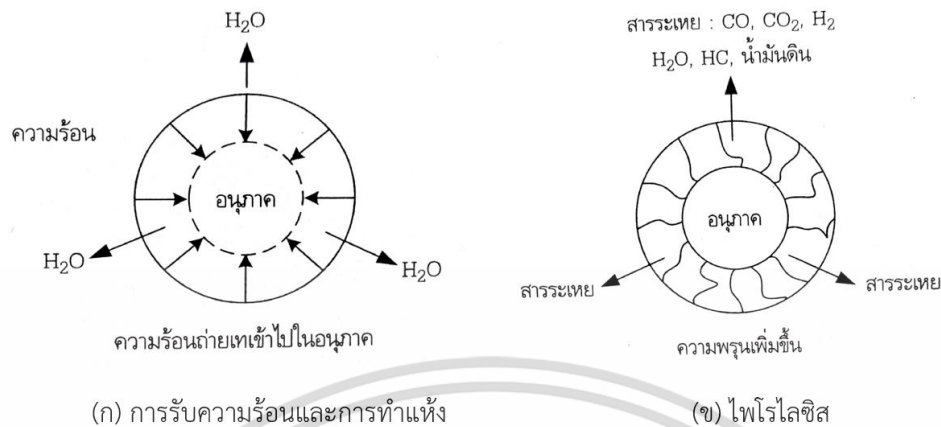
ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สถานะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ทำให้กระบวนการการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีความหลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

2.6.1 กระบวนการเผาไหม้ชีวมวล

การเผาไหม้หรือการสันดาป เป็นวิธีการที่เก่าแก่และง่ายที่สุดในการแปรรูป ชีวมวลเป็นพลังงาน (Yang. 2004) การเผาไหม้ส่วนใหญ่จะใช้วัตถุดิบที่เป็นไม้หรือเปลือกไม้ชนิดต่างๆในรูปของฟืน

พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้คือพลังงานหลักที่มนุษย์ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ พลังงานความร้อนมากกว่า 90% มาจากชีวมวล ความร้อนและกระแสไฟฟ้าคือผลที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวล ความร้อนที่ได้จากชีวมวลนี้มีความจำเป็นสำหรับชาวชนบทในการประกอบอาหารและให้ความอบอุ่น ส่วนภาคอุตสาหกรรมจะใช้ความร้อนจากหม้อไอน้ำ (boiler) ที่มีชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง คนที่อาศัยในประเทศหนาวเย็นได้รับความอบอุ่นจากเตาผิงและเตาผิงโดยตรง ส่วนกระแสไฟฟ้าที่อาจมีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลก็คือจุดเริ่มต้นของกิจกรรมทางเศรษฐกิจยุคใหม่ ซึ่งโดยปกติแล้วภาคอุตสาหกรรมจะใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวลมาต้มน้ำให้เป็นไอความดันสูงเพื่อไปขับเคลื่อนกังหันให้หมุนเป็นพลังงานกล และต่อเพลาเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นชีวมวลจึงถูกนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

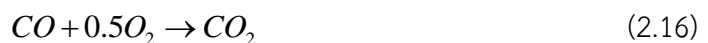
การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นความร้อนและแสงออกมา และมีผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเถ้า เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการเผาไหม้ จะสูญเสียมวลใน 3 ช่วงได้แก่ 1) การทำแห้ง (drying) และ Devolatilization หรือกระบวนการของการปลดปล่อยความชื้นและสารระเหยออกมาจากเชื้อเพลิง โดยทั่วไปกระบวนการนี้เกิดขึ้นภายใน 0.1 s จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส 2) การเผาไหม้สารระเหย (combustion of volatile) เกิดจากไพโรไลซิสของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวล ได้ระเหยสารอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ จะถูกออกซิไดซ์ โดยออกซิเจนในอากาศที่ถูกจ่ายเข้าเตาพร้อมกับเชื้อเพลิง เป็นผลทำให้อุณหภูมิรอบๆอนุภาคเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีอุณหภูมิเพียงพอที่จะทำให้ของแข็งส่วนที่เหลือติดไฟได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ถ่านหินที่มีสารระเหยน้อย ถ่านจะไม่สามารถติดไฟได้ ด้วยเหตุผลนี้ ความร้อนเสริมจากแหล่งอื่นๆ เช่น จากน้ำมันเตา หรือแก๊ส จะถูกใช้เผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงเพื่อทำให้การเผาไหม้เป็นไปด้วยดี 3) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) เกิดขึ้นหลังจากไพโรไลซิสสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยเกิดการเผาไหม้พร้อมๆ กันกับกระบวนการการเผาไหม้ของถ่านชาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ผลของแต่ละช่วงต่อการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่ามีความชื้น สารระเหย อินทรีย์ คาร์บอนคงตัว และเศษเถ้า อยู่มากน้อยเพียงใด สำหรับเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก กระบวนการทั้งสามจะเกิดขึ้นตามลำดับ แต่ในเชื้อเพลิงแข็งที่ใหญ่ขึ้นจะเกิดทั้งสามกระบวนการขึ้นพร้อมๆกัน (Borman and Rangland. 1998 อ้างถึงใน นคร ทิพยาวงศ์. 2552)



รูปที่ 2.16 กระบวนการ ผลิตภัณฑ์ และการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล

(นคร ทิพย์วงศ์. 2552)

กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเริ่มจากออกซิเจนจะเข้าสัมผัสกับผิวคาร์บอน เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ให้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมา หลังจากนั้นจะมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาที่ผิว และสุดท้ายจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกเร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิง (volatile matter) ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น (นฤมล ชูบัวทอง. 2550) ดังขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจากสมการที่ 2.14, 2.15 และ 2.16 ต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นว่าการออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง ควรทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น (รัชดาภรณ์ แก้วกล้า. 2556) ซึ่งในงานวิจัยนี้ขนาดชีวมวลจะอยู่ที่ขนาด 5 mm. ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน

เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้สองชนิดคือ ชนิดที่เป็นสารระเหย (volatile matter) เช่น น้ำ ไฮโดรเจน คาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แก่ ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊ส หลังจากเกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ แก๊สและของแข็ง สถานะแก๊สประกอบด้วย CO, CO₂, H₂, O₂, H₂O เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (surface flux to volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ของแก๊สแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมากจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดน้อยหรือไม่เกิด ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากแก๊สที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่างๆ เกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยาและมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.17



จะเห็นได้ว่าจากปัญหาดังกล่าวข้างต้น เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ภายในเตาเผาจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเผาไหม้ ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน เพื่อให้เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผานานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ให้ได้มากที่สุด

2.6.2 ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน (Swirling fluidization)

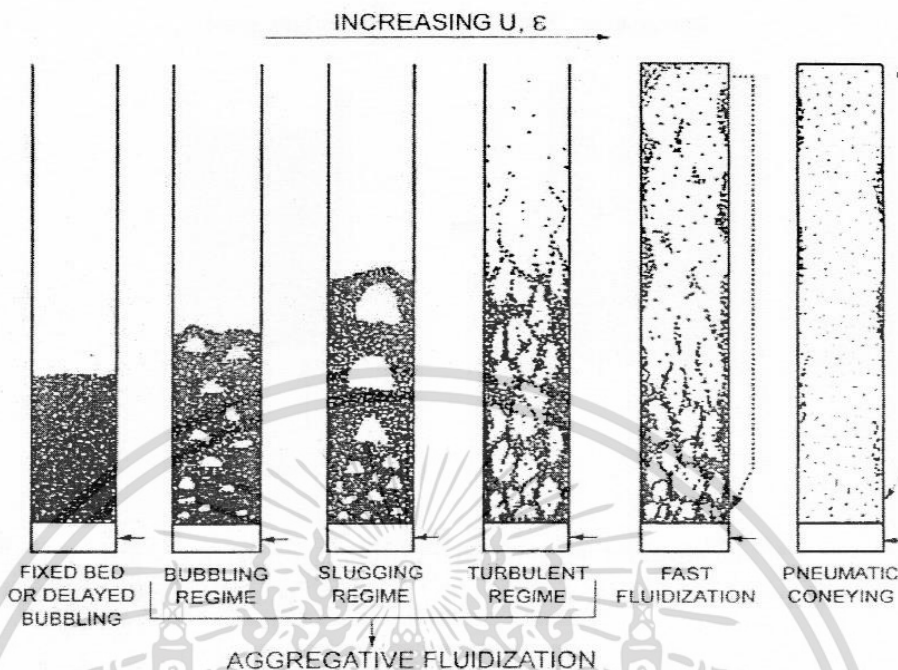
เทคนิคฟลูอิดไคซ์เบด เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและ

ทำให้กระบวนการการผลิตมีประสิทธิภาพดีขึ้น เครื่องมือฟลูอิดไชน์เบดที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลภายในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊ส (Gas distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. 2528)

ฟลูอิดเซชัน (Fluidization) คือ ปรากฏการณ์ที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นเมื่อสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะประพฤติตัวคล้ายของไหล เนื่องจากการสัมผัสของของแข็งกับของไหล ซึ่งได้แก่อากาศหรือของเหลว โดยการสัมผัสของไหลแต่ละชนิดจะส่งผลต่อลักษณะของฟลูอิดเซชัน คือ ฟลูอิดเซชันที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆเรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดเซชันที่ของไหลเป็นอากาศลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแล้ว อากาศส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของของแข็ง แต่อีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองอากาศขึ้น ฟองอากาศลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองอากาศขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวาย

ลักษณะของฟลูอิดเซชันเบดที่เกิดเนื่องจากการสัมผัสกันระหว่างอากาศและของแข็งมีความสลับซับซ้อน โดยเมื่อมีของแข็งวางบนตัวกระจายแก๊ส (Gas distributor) และมีอากาศเคลื่อนที่ผ่านและค่อยๆเพิ่มความเร็วอากาศทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถจำแนกขอบเขตของฟลูอิดเซชัน (Regime of fluidization) ได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 รูปแบบการไหลในระบบฟลูอิดเซชันระหว่างอากาศ-ของแข็ง (Grace et al. 1997)

2.6.2.1 เบดนิ่ง (Packed bed และ Fixed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบดขึ้นมาจากความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด เรียกลักษณะเบดแบบนี้ว่า เบดนิ่ง หรือเบด อาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า เบดเคลื่อนที่ (Moving bed)

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure drop) ตกคร่อมเบดไว้ ความดันตกคร่อมตลอดความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.18 Ergun equation ดังนี้ (Kunii and Levenspiel. 1991)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U}{(\phi d_p)^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2}{(\phi d_p)^2} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.18)$$

2.6.2.2 เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วที่จุดนี้เรียกความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพุดตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด ดังนั้นแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.19

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.19)$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด และ

L คือ ความสูงของเบด

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization condition) ดังสมการ 2.20

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.20)$$

โดยที่ ตัวห้อย mf แทนภาวะต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.21 และ 2.22

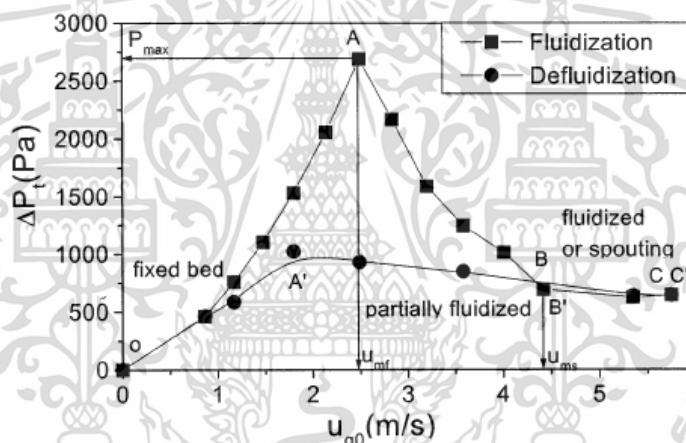
$$- \text{Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.21)$$

$$- \text{Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.22)$$

โดยเมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่าเบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) และเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) ซึ่งความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟองขึ้นอยู่กับสมบัติของของแข็งเป็นอย่างมาก โดยของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม A จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mb} มากกว่า U_{mf}) ส่วนของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม B และ D จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองแก๊สเท่ากับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mb} เท่ากับ U_{mf}) ดังนั้นรูปแบบการเกิดฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองแก๊ส (Bubble-free fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ใน Geldart กลุ่ม A เท่านั้น

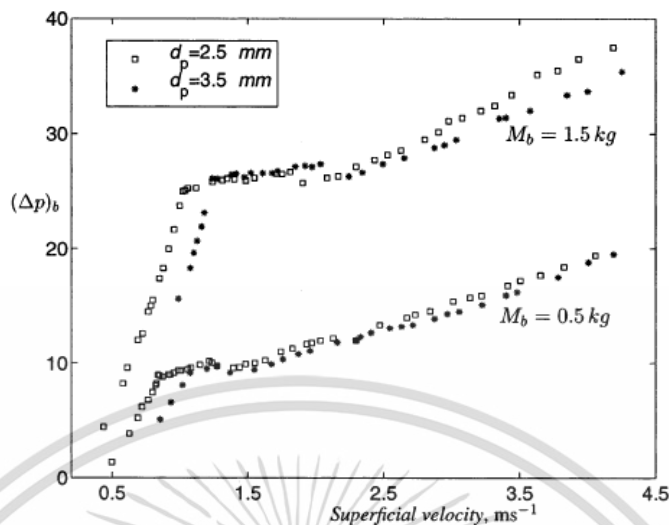
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบฟลูอิดไชน์เบด กระบวนการทำให้เบดเกิดการเคลื่อนที่หรือ fluidization โดยทั่วไปแล้วจะเกิดกับอนุภาคในกลุ่ม B และ D ของ Geldart ซึ่งการจะเกิดการฟลูอิดไชน์ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับการเลือกขนาดของอนุภาคและปริมาณแก๊สที่จ่ายเข้าที่เหมาะสมตามความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไชน์ (U_{mf}) และความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการไหลที่สมบูรณ์ (Minimum fully fluidization velocity, U_{mff}) และความดันตกคร่อมเบดสูงสุด (Pressure drop maximum, Δp_{max}) ลักษณะดังกล่าวสามารถแบ่งแยกได้ 3 ช่วง (Jing et al. 2000) คือ ช่วงที่เบดอยู่นิ่ง (Fixed bed regime), ส่วนที่เกิดการไหลบางส่วน (Partially fluidized regime), และช่วงที่เกิดการไหลสมบูรณ์ (Fully fluidized bed regime), ดังแสดงในรูปที่ 2.18 bubbling ฟลูอิดไชน์เบด เป็นพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเบดที่นิยมถูกนำมาใช้ในเตาเผาไหม้ เนื่องจากแรงดันตกคร่อมเบดหลังจากความเร็วแก๊สมีค่าสูงกว่า U_{mf} จะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง จึงง่ายที่จะควบคุม



รูปที่ 2.18 $\Delta p - u$ diagram สำหรับแก๊สในเบดทรงกรวย (Jing et al. 2000)

การฟลูอิดไชน์เบดแบบ swirling จะแตกต่างกับแบบ bubbling คือ แรงดันตกคร่อมเบดใน swirling fluidized-bed regime จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้น ไม่เหมือนกับ fully fluidization bed regime ซึ่งแรงดันจะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งได้จากการศึกษาการหมุนวนของเบดที่เกิดขึ้นในเตาแบบ swirling fluidized-bed ของ Sreenivasan and Raghavan (2002) ในขณะที่เพิ่มอัตราการไหลของอากาศ พบการผลการทดลองดังรูปที่ 2.19



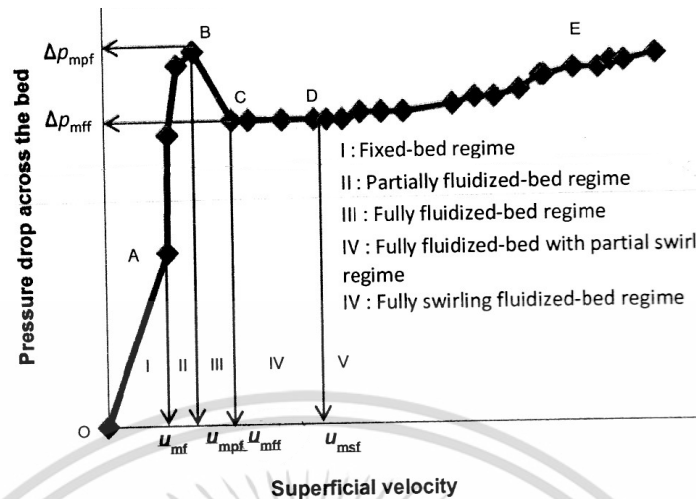
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของมวลเบตต่อแรงดันตกคร่อมในเตาแบบ swirling fluidized-bed (Sreenivasan and Raghavan. 2002)

ช่วงพฤติกรรมการณ์ฟลูอิด์เบตแบบหมุนวน

แรงดันตกคร่อมเบตต่อความเร็วในการไหลของอากาศหรือที่อยู่ในรูปของ $\Delta p - u$ diagraph จะถูกแสดงโดยมีเงื่อนไขในการทดสอบที่แตกต่างกัน จากการทดสอบอุทกพลศาสตร์ของอากาศ-เบต (รัชดาภรณ์ แก้วกล้า. 2556) โดยเบตที่ใช้ทดสอบ คือ ทราย พบว่า ช่วงพฤติกรรมการณ์ของฟลูอิด์เบตทรงกรวยแบบหมุนวนจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.20

$O \rightarrow A$ ช่วงเบตหยุดนิ่ง (Fixed bed regime) ในช่วงนี้ความเร็วของอากาศมีค่าน้อยในขณะที่แรงดันตกคร่อมเบตมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วเพียงเล็กน้อย แต่พฤติกรรมการณ์ของเบตยังคงหยุดนิ่งอยู่กับที่ มีการเคลื่อนไหว จนความเร็วอากาศสูงขึ้นถึงความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิด์เบต U_{mf} เบตชั้นล่างสุดเริ่มเกิดการเคลื่อนไหว

$A \rightarrow B$ ช่วงเบตบางส่วนเริ่มเคลื่อนที่ (Partially fluidized bed regime) ยังคงมีการเพิ่มความเร็วจนตามมาด้วยแรงดันตกคร่อมเบตที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เบตบางส่วนเริ่มมีการเคลื่อนไหว ซึ่งสามารถสังเกตเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นเล็กๆที่ผิวด้านบนสุดของเบต จนกระทั่งความเร็วของอากาศมีค่าเท่ากับ U_{mpf} หรือ minimum partially fluidized bed velocity ซึ่งที่ความเร็วนี้แรงดันตกคร่อมเบตจะถูกเรียกว่า Δp_{mpf} (pressure drop at minimum partially fluidization velocity) และมีค่าสูงชันชัดเจน



รูปที่ 2.20 Diagram ทั่วๆ ไปของแรงดันตกคร่อมเบตต่อความเร็วสำหรับการฟลูอิด์เบตทรงกรวยแบบหมุนวน

$B \rightarrow C$ เบตทุกส่วนเกิดการเคลื่อนที่ (Fully fluidized bed regime) เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เบตเช่นอย่างสมบูรณ์ (minimum fully fluidization velocity), U_{mff} ความเร็วตกคร่อมเบตจะลดลงอย่างรวดเร็ว หรือ Δp_{mff} (pressure drop at minimum fully fluidization velocity)

$C \rightarrow D$ เบตด้านบนเกิดฟองอากาศในขณะที่เบตด้านล่างเกิดการหมุน (Fully fluidized bed regime with partial swirl motion) เบตทุกส่วนยังคงเคลื่อนที่และเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กและใหญ่ที่ผิวด้านบนของเบตอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ด้านล่างของเบตเกิดการหมุนวน ความเร็วของอากาศยังคงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หรือมากกว่า U_{mff} ในขณะที่แรงดันตกคร่อมเบตยังคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งความเร็วเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่า U_{msf} (minimum velocity of swirl-fluidization)

$D \rightarrow E$ เบตหมุนวนอย่างสมบูรณ์ (Fully swirl-fluidization) ในช่วงนี้แรงดันตกคร่อมเบตจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น เบตเกิดการหมุนวนทั้งหมดแต่การหมุนวนจะสลายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วในการหมุนวนจะเปลี่ยนไปเป็นความเร็วแนวตั้ง

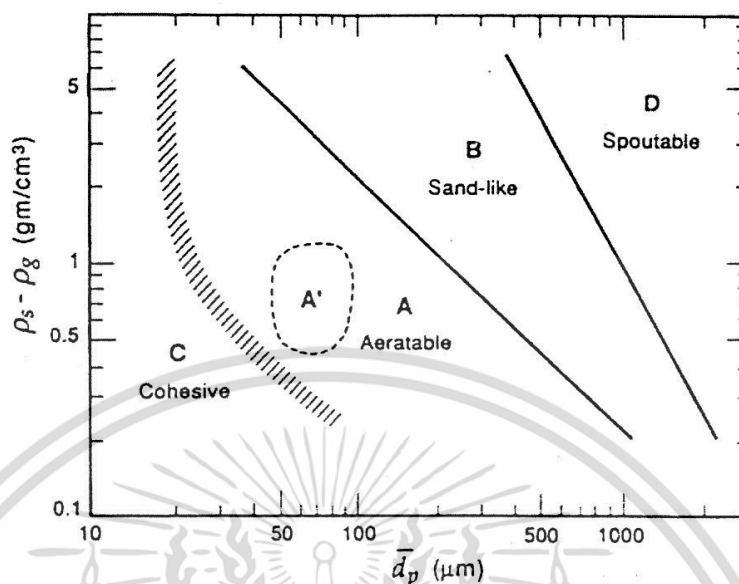
2.6.2.3 เบตแบบสลัก (Slugging bed)

เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศในเบตแบบฟองแก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นมาของแข็งจะถูกฟองแก๊สสลักขึ้นไปและอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สลักกิ้ง (Slugging) และเรียกความเร็วแก๊สที่นี้ว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสลักกิ้ง (Minimum slugging velocity; U_{ms}) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของอากาศ และความสูงของเบต ถ้าเบตมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมี

ขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด ซึ่งจะทำให้เกิดความแปรปรวนของความดันภายในเบดอย่างมาก เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของของแข็งกับแก๊สซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส เรียกว่า เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed) และเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สสูงขึ้นอีก อนุภาคและฟองอากาศจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนทั่วทั้งเบด จนไม่สามารถสังเกตเห็นผิวหน้าของเบดได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Turbulent อนุภาคจะหลุดออกจากเบดเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเกินความเร็วตกอิสระ (Terminal velocity, U_t) ของอนุภาค เรียกเบดในขณะนี้ว่า Fast fluidized bed หรือฟลูอิดาไลเซชันที่ความเร็วสูง โดยความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากเบดแบบปั่นป่วนเป็นฟลูอิดาไลเซชันที่ความเร็วสูง เรียกว่า ความเร็ว Transport velocity, U_{tr} และสุดท้ายเมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจนมากกว่า U_{tr} พบว่าความหนาแน่นของแข็งภายในเบดเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นมากจนเป็นการขนส่งของแข็งด้วยแก๊ส ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของแข็งในแนวแกน ยกเว้นในส่วนล่างที่มีความเร่ง และของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆผนังของเบด เรียกเบดสถานะนี้ว่า การขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime) หรือการขนส่งด้วยแก๊ส (Pneumatic conveying)

การเลือกขนาดของเบดในระบบฟลูอิดาไลเซชันแบบหมุนวน

ในระบบฟลูอิดาไลเซชัน คุณสมบัติของของแข็ง เช่น ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่น มีผลต่อการแขวนลอยของของแข็งในอากาศ หรือการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างของแข็งและอากาศ จึงได้มีการศึกษาถึงผลของสมบัติของของแข็ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบหรือปฏิบัติการในเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยทั่วไปของแข็งในระบบฟลูอิดาไลเซชัน สามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่ม ตามวิธีของ Geldart (Geldart Power Classification) โดยวิเคราะห์ผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับอากาศและขนาดของของแข็งเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.21 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.21 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart (Grace et al. 1997)

Group C คือ Cohesive หรือ very fine powders เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน เช่น ผงแป้ง หรือซีเมนต์ เป็นต้น

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กแต่ใหญ่กว่ากลุ่ม C และความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่าย เป็นแบบผสม (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วอากาศต่ำๆ (U_{mf}) และที่ความเร็วอากาศสูงๆก็สามารถควบคุมการเกิดฟองอากาศได้ โดยที่ในการเกิดฟลูอิดเซชันจะไม่เกิดฟองอากาศ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมัน (FCC) เป็นต้น แต่จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดเซชันแบบ เบดฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed)

Group B คือ Sand-like เป็นของแข็งที่มีขนาดอยู่ในช่วง $50 \leq d_p \leq 500$ ไมโครเมตร และความหนาแน่นในช่วง $1.4 \leq \rho_s \leq 4$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเร็วของแก๊สมากกว่า ความเร็วต่ำสุด การเกิดฟลูอิดเซชันยังเกิดได้ง่าย แต่อิทธิพลของฟองอากาศจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโตขึ้น เช่น ททราย เป็นต้น ซึ่งก็คือช่วงการเกิดฟลูอิดเซชันแบบเบดฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed)

Group D คือ Spoutable เป็นของแข็งที่มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก และมักจะเกิดปรากฏการณ์ spouting หรือ เกิดช่องว่างของทางไหลอากาศ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณทางด้านล่างของเบด เช่น เม็ดกาแฟ หรือเม็ดถั่วเขียว เป็นต้น

ซึ่งขนาดของเบดในระบบฟลูอิดเซชันแบบหมุนวนที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 600-850 μm . ซึ่งขนาดของเบดอยู่ใน Group D (Geldart Power Classification) ขนาดของเบดนี้จะส่งผลต่อการเลือก

ความสูงเบตเนื่องจากความสูงเบตมีผลกระทบต่อค่าทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดไคซ์เบต (ความเร็วและแรงดันตกคร่อมเบต) และแรงดันตกคร่อมเบตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบตสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันตกคร่อมเบตที่เกิดขึ้นในช่วงของการฟลูอิดไคซ์บางส่วน (partially fluidized bed regime) ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกขนาดของเบตที่ใช้ในการทดลองคือ 600 – 800 μm . ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับความสูงที่ 20 cm. และสามารถคัดแยกขนาดเบตผ่านตะแกรงร่อนได้

งานวิจัยชิ้นนี้ได้คำนึงถึงระบบการเผาไหม้ที่เหมาะสมกับชีวมวลและก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จึงเลือกระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบต อีกทั้งได้รับคำแนะนำและการสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ดร.รัชดาภรณ์ แก้วกล้า ผู้ที่ได้นำเทคนิคการหมุนวน (swirling) เข้ามาใช้กับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต โดยการจ่ายอากาศปฐมภูมิผ่านหัวกระจายลมแบบใบพัดเพื่อให้เกิดการไหลของอากาศ-เชื้อเพลิงแบบหมุนวน เพราะการหมุนวนภายในเตาจะช่วยเพิ่มระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาได้นานขึ้น ซึ่งหมายถึงทำให้มีเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้นานขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นและลดมลภาวะได้มากขึ้น และอีกหนึ่งข้อดีของการนำเทคนิคการหมุนวนมาใช้กับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต คือ เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก เช่น ผงซีลี้อย สามารถถูกเผาไหม้ได้โดยไม่หลุดลอยออกไปจากเตา เพราะความแรงของการหมุนจะกักเก็บเชื้อเพลิงไว้ในเตา ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ เช่น เปลือกไม้ ก็สามารถเผาไหม้ได้ดีเพราะมีเวลาในการเผาไหม้นานขึ้นจึงสามารถนำสิ่งที่คิดว่าไม่สามารถเป็นเชื้อเพลิงได้มาเป็นเชื้อเพลิง เพื่อขยายขอบเขตของเชื้อเพลิงชีวมวลให้กว้างขึ้น และยังนำมารวมกับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตทรงกรวย ซึ่งมีข้อดีคืออากาศที่ถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างจะมีความเร็วสูงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดทรงกรวยเล็กลงในขณะที่เมื่ออากาศลอยตัวขึ้นสูงความเร็วจะลดลง เพราะพื้นที่หน้าตัดทรงกรวยที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนวนสำหรับการทดลอง

2.6.3 อากาศส่วนเกิน (excess air)

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสม (fuel-to-air ratio) กล่าวคือจะต้องผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้อง ณ เวลาหนึ่ง ภายใต้สภาวะเงื่อนไขของเวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้และความปั่นป่วนหรือการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (turbulence) ที่เหมาะสม

ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ของการเผาไหม้เป็นเรื่องเกี่ยวกับดุลของมวลในปฏิกิริยาการเผาไหม้ช่วยให้สามารถคำนวณหาปริมาณของออกซิไดซ์เซอร์หรืออากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ แต่ในทางปฏิบัติจริงอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ไม่พอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการเผาไหม้จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของอากาศซึ่งจำนวนอากาศที่เพิ่มเข้าไปนี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นซึ่งเรียกอากาศที่เพิ่มเข้าไปนี้ว่า อากาศส่วนเกิน (excess air)

ในพื้นฐานการคำนวณการเผาไหม้ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกคำนวณจาก สมมติฐานของการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ดังนั้น การคำนวณการเผาไหม้จะมีพื้นฐานมาจาก ปฏิกิริยาเคมีทั้งหมด โดยสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้สมบูรณ์ได้แก่ CO_2 , H_2O และ SO_2

การทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ปริมาณอากาศที่ถูกจ่ายเข้าเตาเผาหม้อไอน้ำจะต้องเพียงพอ (แต่น้อยที่สุด) ตามปริมาณอากาศ สัมพันธ์ (stoichiometric air)
2. อุณหภูมิ และเวลาในการเผาไหม้สำหรับบ่อนุภาคถ่านหินจะต้องเหมาะสม
3. เชื้อเพลิงและอากาศต้องมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์

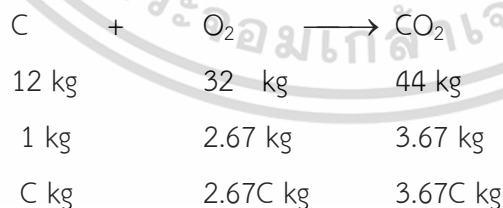
สูตรในการคำนวณเพื่อหาปริมาณผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้และ ปริมาณอากาศสัมพันธ์ จะได้มา จากการวิเคราะห์การเผาไหม้ แบบปริมาณสัมพันธ์ โดยการสมดุลอะตอมของแต่ละธาตุองค์ประกอบ ตาม ปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดของการออกซิเดชันคาร์บอน ซัลเฟอร์ และไฮโดรเจน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างองค์ประกอบต่างๆในเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ในรูปของแก๊สเผาไหม้ และความร้อนดังแสดงในสมการ 2.23 (กัญญา บุญยเกียรติ. 2544)

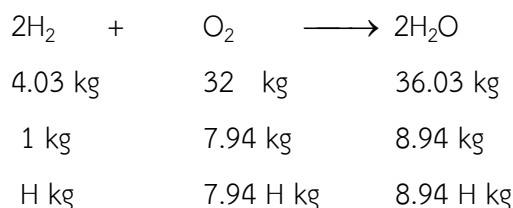


ในกระบวนการเผาไหม้ สารที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้หรือเรียกอีกอย่างว่าตัวทำปฏิกิริยา ได้แก่ เชื้อเพลิงและอากาศ สารประกอบที่ได้หลังจากเผาไหม้ได้แก่แก๊สเผาไหม้ โดยปฏิกิริยาเผาไหม้พื้นฐาน ดังต่อไปนี้

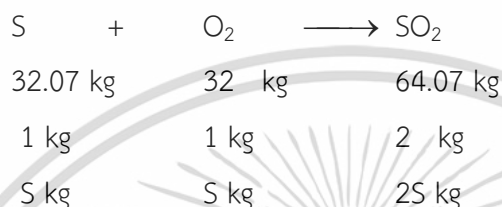
1. คาร์บอนเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



2. การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของไฮโดรเจนได้น้ำ



3. การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของกำมะถันได้แก๊สกำมะถัน



ปริมาณอากาศน้อยที่สุดที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ สำหรับเชื้อเพลิง 1 kg (บนฐาน as-received) จะเรียกว่า ปริมาตรอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี, V° , ในหน่วย m^3 ที่อุณหภูมิและแรงดันมาตรฐาน ต่อ 1 kg เชื้อเพลิง

ตามพื้นฐานของการวิเคราะห์ปริมาณสัมพันธ์ข้างต้น ทฤษฎีมวลของออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg ให้เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์, $L_{\text{O}_2}^0$ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), หาได้จากสมการ 2.24

$$L_{\text{O}_2}^0 = \frac{8}{3} \frac{C^r}{100} + \frac{S_v^r}{100} + 7.94 \frac{H^r}{100} - \frac{O^r}{100} \quad (2.24)$$

พิจารณา สัดส่วนมวลของออกซิเจนในอากาศบรรยากาศ (0.231) ทฤษฎีมวลของอากาศ, L^0 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), สามารถหาได้จากสมการ 2.25

$$L^0 = 0.115(C^r + 0.375S_v^r) + 0.342H^r - 0.0431O^r \quad (2.25)$$

หารสมการด้วยความหนาแน่นของอากาศแห้งที่อุณหภูมิและแรงดันมาตรฐาน (หารด้วย $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ปริมาตรอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี, V° , สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.26

$$V^\circ = 0.0889(C^r + 0.375S_v^r) + 0.265H^r - 0.0333O^r \quad (2.26)$$

จากที่กล่าวมา การผสมกันอย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ในการเผาไหม้จริง การเผาไหม้สมบูรณ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าจะจ่ายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ปริมาณอากาศสัมพันธ์เข้าสู่เตาเผาแล้วก็ตาม เพื่อให้มั่นใจว่าการเผาไหม้สมบูรณ์จะสามารถเกิดขึ้นได้ในเตาเผาหม้อไอน้ำ ปริมาณอากาศจริงที่จ่ายเข้าเตาเผา, $V_a (m^3 \cdot kg^{-1})$, ควรจะต้องมากกว่าปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี, V° จึงทำให้ได้มาซึ่งค่าอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน, excess air ratio หรือ excess air coefficient ซึ่งมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการคำนวณจากสมการ 2.27

$$\alpha = V_a / V^\circ \quad (2.27)$$

อัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่แนะนำให้ใช้ในเตาเผาหม้อไอน้ำ, α_f จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงและวิธีการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น เมื่อเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียด (pulverized form) อัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่ $\alpha_f = 1.25$ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ดีที่สุดเมื่อเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซต์ ในขณะที่ $\alpha_f = 1.2$ และ $\alpha_f = 1.15$ จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส และลิกไนต์ตามลำดับ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่อก้าวถึงการเผาไหม้สมบูรณ์ แก๊สไอเสียไหลออกจากเตาเผา พร้อมด้วยผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชันสมบูรณ์ของคาร์บอน ซัลเฟอร์ และไฮโดรเจน ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งได้แก่ CO_2 , SO_2 , และ H_2O นอกจากนี้ ยังมีไอน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน โดยปริมาณของน้ำที่ได้จะมาจากความชื้นในเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (สัมพันธ์กับความชื้นในอากาศ) รวมทั้ง ปริมาณแก๊สไนโตรเจน ที่เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างธาตุไนโตรเจนกับออกซิเจนในอากาศ และ ก๊าซออกซิเจนที่เหลืออยู่ในแก๊สไอเสีย (โดยจากอากาศส่วนเกิน) จะปนออกมากับแก๊สไอเสียด้วยเหมือนกัน เมื่อพิจารณาเฉพาะการเผาไหม้สมบูรณ์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และสารประกอบที่เผาไหม้ได้อื่นๆ (ไฮโดรคาร์บอน และไฮโดรเจน) จะไม่นำมาพิจารณา

แก๊สไอเสียเปียก (wet flue gas) คือ แก๊สไอเสียที่มีไอน้ำปนอยู่ โดยทั่วไป ปริมาตรของแก๊สไอเสียเปียก, $V_g (m^3 \cdot kg^{-1})$ จะถูกแสดงในรูปของปริมาตรทั้งหมดโดยแยกตามแต่ละประเภทของแก๊ส:

$$V_g = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} \quad (2.28)$$

จาก combustion stoichiometry, 1 kg-mol (หรือ 12 kg) ของ fuel-C จะได้ 1 kg-mol (หรือ 22.4 m^3) แก๊ส CO_2 ดังนั้นปริมาตรของ carbon dioxide, $V_{CO_2} (m^3 \cdot kg^{-1})$, สามารถคำนวณจากสมการ 2.29

$$V_{CO_2} = \frac{22.4}{12} \frac{C^r}{100} = 0.018666C^r \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกันกับ ปริมาตรของ Sulphur dioxide, $V_{SO_2} (m^3 \cdot kg^{-1})$, ซึ่งได้จากการ oxidation ของ fuel-S จะสามารถหาได้จาก:

$$V_{SO_2} = 0.007S^r = 0.375 \times 0.01866S^r \quad (2.30)$$

ทั้ง CO_2 และ SO_2 จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ บางครั้งปริมาตรของแก๊สทั้งสองจะถูกรวมอยู่ในเทอมๆเดียว เรียกว่า volume of tri-atomic gases, โดยคิดที่ standard conditions, $V_{RO_2} (m^3 \cdot kg^{-1})$, จะสามารถหาได้จาก:

$$V_{RO_2} = 0.01866(C^r + 0.375S^r) \quad (2.31)$$

อย่างที่เห็นชัด V_{H_2O} , V_{O_2} , และ V_{N_2} จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนอากาศส่วนเกิน เมื่อ $\alpha = 1$ (เช่น ที่เงื่อนไขปริมาณสัมพันธ์), ปริมาตรไอน้ำตามทฤษฎีที่เงื่อนไขมาตรฐาน, $V_{H_2O}^\circ (m^3 \cdot kg^{-1})$, สามารถหาได้จาก

$$V_{H_2O}^\circ = 0.111H^r + 0.0124W^r + 0.0161V^r \quad (2.32)$$

โดยเทอมที่หนึ่งและสองจะสัมพันธ์กับการออกซิเดชันของไฮโดรเจนและความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ขณะที่เทอมที่สาม จะสัมพันธ์กับความชื้นในอากาศที่ใช้เผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยมีค่าอากาศส่วนเกิน ($\alpha > 1$), ปริมาตรจริงของไอน้ำ $V_{H_2O} (m^3 \cdot kg^{-1})$, จะแตกต่างจากปริมาตรของไอน้ำ ตามทฤษฎี ดังนี้:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^\circ + 0.0161(\alpha - 1)V^r \quad (2.33)$$

สำหรับการเผาไหม้แบบปริมาณสัมพันธ์ ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ได้จากการเผาไหม้ตามทฤษฎี, $V_{N_2}^\circ (m^3 \cdot kg^{-1})$, รวมถึงแก๊สไนโตรเจนที่ได้จากอากาศที่จ่ายเข้าเตาเผาและจากไนโตรเจนในถ่านหิน:

$$V_{N_2} = 0.79V^r + 0.008N^r \quad (2.34)$$

สำหรับการเผาไหม้ที่มีอากาศส่วนเกิน ($\alpha > 1$), ปริมาตรของแก๊สไอเสีย จะหาได้จาก $V_{RO_2}, V_{N_2}^\circ, V_{H_2O}^\circ$ และปริมาตรอากาศส่วนเกินที่รวมไอน้ำ (ความชื้น) ในอากาศส่วนเกินนี้:

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^\circ + V_{H_2O}^\circ + 1.0161(\alpha - 1)V^\circ \quad (2.35)$$

หรือ

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^\circ + V_{H_2O}^\circ + (\alpha - 1)V^\circ \quad (2.36)$$

แก๊สไอเสียแห้ง (Dry flue gas) ในระหว่างการทดสอบหม้อไอน้ำ การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สต่างๆโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ แก๊สไอเสียแห้ง ปริมาตรของแก๊สไอเสียแห้ง V_{dg} ($m^3 \cdot kg^{-1}$), จะแตกต่างจากแก๊สไอเสียเปียกตรงปริมาตรของไอน้ำ V_{H_2O} , โดย V_{dg} สามารถหาได้จาก

$$V_{dg} = V_{RO_2} + V_{N_2}^\circ + (\alpha - 1)V^\circ$$

ดังนั้น ค่าความเข้มข้นต่างๆของแก๊สไอเสียแห้งจะมีมากกว่าในแก๊สไอเสียเปียก จากที่เห็นในสมการข้างต้น อัตราส่วนอากาศส่วนเกินมีผลต่อปริมาตรของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ และเป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหม้อไอน้ำ โดยทั่วไป อัตราส่วนอากาศส่วนเกินจะสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียถ้าทราบปริมาตรความเข้มข้นของออกซิเจน, O_2 (vol.%), และไนโตรเจน, N_2 (vol.%), ในก๊าซไอเสียแห้ง อัตราส่วนอากาศส่วนเกินจะหาได้จาก

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3.76(O_2 / N_2)} \quad (2.37)$$

เมื่อปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมาก, ($N^r < 2\%$), อัตราส่วนอากาศส่วนเกินจะคิดจากออกซิเจนเท่านั้น

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (2.38)$$

ทั้งสองสมการนี้ใช้ได้กับการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ก๊าซไอเสียที่ได้จะมีสารประกอบของก๊าซที่ยังเผาไหม้ได้ปนอยู่ เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์, CO (vol.%), มีเทน, CH_4 (vol.%), และไฮโดรเจน, H_2 (vol.%), ยังคงมีอยู่ในการวิเคราะห์ของก๊าซไอเสียแห้ง อัตราส่วนเกินจะรวมผลกระทบของก๊าซเหล่านี้พร้อมกับออกซิเจนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO - 2CH_4 - 0.5H_2)} \quad (2.39)$$

2.6.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency)

ประสิทธิภาพ คือ เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้ดี โดยมีองค์ประกอบสำคัญคือเปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาไหม้ที่สมบูรณ์แบบ (ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%) เป็นไปได้เฉพาะในทางทฤษฎี ซึ่งในความเป็นจริงเป็นไปได้ไม่ได้เลยเพราะมี heat loss เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) ในเตาเผาแบบฟลูอิดเบดแบบหมุนวนเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทราบหลังจากการเผาเนื่องจากในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะเกิดการสูญเสียความร้อนออกมา (Heat loss) และอีกส่วนหนึ่งจะมีไอเสีย (fuel gas) ที่ปล่อยทิ้ง ปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกมาและจากไอเสียขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การออกแบบเตา การเลือกใช้หัวกระจายลม ขนาดของชีวมวล ความชื้นของชีวมวล และอัตราของอากาศส่วนเกิน ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่าเตาเผาไหม้เผาไหม้ได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากสมการ (รัชดาภรณ์ แก้วกล้า. 2557)

$$\eta_c = 100 - (q_{uc} + q_{ic}) \quad (2.40)$$

โดยที่ q_{uc} คือความร้อนที่สูญเสียให้กับคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้

คาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ (unburned carbon) สำหรับเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวนในการเผาชีวมวลจะได้ออกมาจากการสูมตัวอย่างซีเถ้าจากตัวเก็บ (ash collector) ที่ถูกติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของไซโคลนมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่ยังเหลือในส่วนที่ไม่ถูกเผา C_{fa} และปริมาณซีเถ้าที่มีอยู่เดิมในชีวมวล (A) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมาใช้ในการคำนวณตามสมการ 2.41

$$q_{uc} = \frac{32866}{LHV} \left(\frac{C_{fa}}{100 - C_{fa}} \right) A \quad (2.41)$$

ในขณะเดียวกันในส่วนการการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา (CO) จึงทำให้มีความร้อนสูญเสียในส่วนของเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เรียกว่า q_{ic} ซึ่งจะถูกรคำนวณจากความเข้มข้นของ CO ในไอเสียแห้งที่ออกจากไซโคลน

$$q_{ic} = 126.4CO \times V_{dg} \frac{(100 - q_{uc})}{LHV} \quad (\text{Eq. 2.42})$$

2.7 มลพิษหลักซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนซึ่งประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและธาตุคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ นั้น เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ยิ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเท่าไร (เหมือนที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน) ก็จะทำให้สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยการเผาไหม้เพื่อดำรงอยู่ของมนุษย์จะไม่มี ความหมายเลยถ้ามนุษย์ละเลยและไม่ตระหนักถึงผลกระทบจากมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษเหล่านี้สะท้อนออกมาในรูปของปัญหาหมอกควันซึ่งเรียกว่าหมอกทางโฟโตเคมิ (Photochemical Smog)

ความอันตรายของหมอกทางโฟโตเคมิ (Photochemical Smog) เกิดจากแก๊ส CO, VOC (สารอินทรีย์ที่ระเหยได้ เช่น เบนซิน บิวเทนและไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น), NO จากการเผาไหม้ ซึ่ง NO_x ที่เป็นสาเหตุของการเกิด O₃ ในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้วยังทำลาย O₃ ในชั้นบรรยากาศอีกด้วย (Warnatz et al. 2006) ซึ่งในงานวิจัยของ Van Loo และ Koppejaw (2008) อ้างถึงใน Basu (2010) พบว่ามลพิษจาก ไนโตรสออกไซด์มาจากการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ส่วน CO นี้คือผลผลิตจากการเผาไหม้ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ซึ่งจะทำให้สิ่งมีชีวิตเสียชีวิตได้หากได้รับในปริมาณมากเกินไป ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณแก๊สพิษเหล่านี้ จึงเป็นเรื่องจำเป็นแม้ว่าจะทำการเผาไหม้ชีวมวลก็ตาม ส่วน SO₂ ที่ออกมาจากการเผาไหม้นั้น Bhattacharya (2006) พบว่ามลพิษจากการเผาไหม้ชีวมวลมีปริมาณ SO₂ เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมากหรือแทบไม่มีเลยและเมื่อเผาไหม้ชีวมวลโดยผสมกับถ่านหิน SO₂ ที่เกิดขึ้นในฟลูแก๊สมีปริมาณที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานการปล่อยมลพิษ

ดังนั้นจากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามลพิษจากการเผาไหม้จะก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ยังมีแก๊สอื่นๆที่เกิดจากการเผาไหม้และเป็นมลพิษอย่างมากคือออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ฝุ่นเขม่า และออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) แต่ประเด็นสำคัญคือแก๊สชนิดใดเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและมีปริมาณที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาเฉพาะปริมาณมลพิษหลักคือออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) โดยจะหาสภาวะที่จะลดปริมาณมลพิษให้น้อยลงและให้เหลือในปริมาณที่มาตรฐานยอมรับได้ว่าจะไม่เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการหลักจากการเผาไหม้ชีวมวลจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แก๊สและซีเล้าจากการเผาไหม้ที่อยู่ในกระบวนการกลั่นสลาย (Devolatilization) ของโมเลกุล เชื้อเพลิงจะส่งผ่านความร้อนทำให้เกิดการระเหยในกระบวนการสลายตัว (Decomposition) ซึ่งช่วงอุณหภูมิในการ

ปลดปล่อยสารระเหยจะเริ่มขึ้นประมาณ 160 – 300 °C (ปิยะณัฐ เจริญพร. 2557) ซึ่งสิ่งที่ได้จากการเผาไหม้โมเลกุลในกระบวนการกลั่นสลาย (Devolatilization) คือแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเทียบเท่ากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ซึ่งได้จากคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลนั้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงประมาณ 400 – 500 °C อุณหภูมิของถ่านนั้นจะมีคาร์บอนอยู่ประมาณ 60-75% จากปฏิกิริยาแรกคือ ปฏิกิริยาออกซิไดซ์โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจน ซึ่งได้จากแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ หลังจากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อโดยน้ำหรือออกซิเจนได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถสรุปได้ว่า ทั้งหมดของ fuel-C ในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ถึงแม้ว่าจะเป็นกาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในเตาเผา (ดังนั้นจะเกิดเป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์ CO และถูกปล่อยออกมา) หลังจากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) จะถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในบรรยากาศ

ส่วนในการเกิดและการสลายตัวของมลพิษอีกสองตัวที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง คือ แก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์ (NO) และ แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ถูกเรียกโดยรวมว่า NO_x ในความเป็นจริง NO_x จะถูกปล่อยออกมาจากระบบการเผาไหม้ในรูปของ NO (95% หรือมากกว่า) ซึ่งไนตริกออกไซด์จะเกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วกลายเป็น NO₂ ในบรรยากาศ ดังนั้น NO_x emission จึงมักถูกแสดงในรูปของ NO₂ NO_x มีส่วนช่วยสนับสนุนให้เกิดฝนกรด (acid rain) ที่ระดับพื้นดินภายใต้แสงแดด แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) อาจจะถูกปล่อยอะตอมของออกซิเจน ซึ่งสามารถฟอร์มตัวเป็นโอโซน (O₃) หลังจากนั้นได้ และโอโซนนี้ถือว่าเป็นแก๊สอันตรายสำหรับระบบการหายใจของมนุษย์ การฟอร์มตัวของ NO ในกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเกิดจากกลไกในการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ Thermal-NO_x, Prompt-NO_x, และ Fuel-NO_x

Thermal-NO_x เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างโมเลกุลของออกซิเจนกับโมเลกุลของไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงการเผาไหม้สูง เกิดเป็นแก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์ขึ้นในห้วงเผาไหม้ดังแสดงในสมการที่ 2.42 และ 2.43



ในขณะที่ Prompt-NO_x เกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (โดยทั่วไปคือ CH หรือ CH₃) ที่ก่อตัวขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้และทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนในอากาศ ในขณะที่การเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาตะแกรง (Grate Furnance) และเตาแบบฟลูอิดเบด

(Fluidized-bed combustor) จะเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีไนโตรเจนผสมอยู่ (HCN หรือ CN) และมีธาตุไนโตรเจนเกิดขึ้นมาด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2.44



Fuel-NO_x เกิดมาจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งเป็นกลไกหนึ่งของการเกิดแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) และ แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) อันเนื่องมาจากเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนทำให้เกิดเป็นแก๊สมลพิษ ดังสมการ 2.45, 2.46 และ 2.47

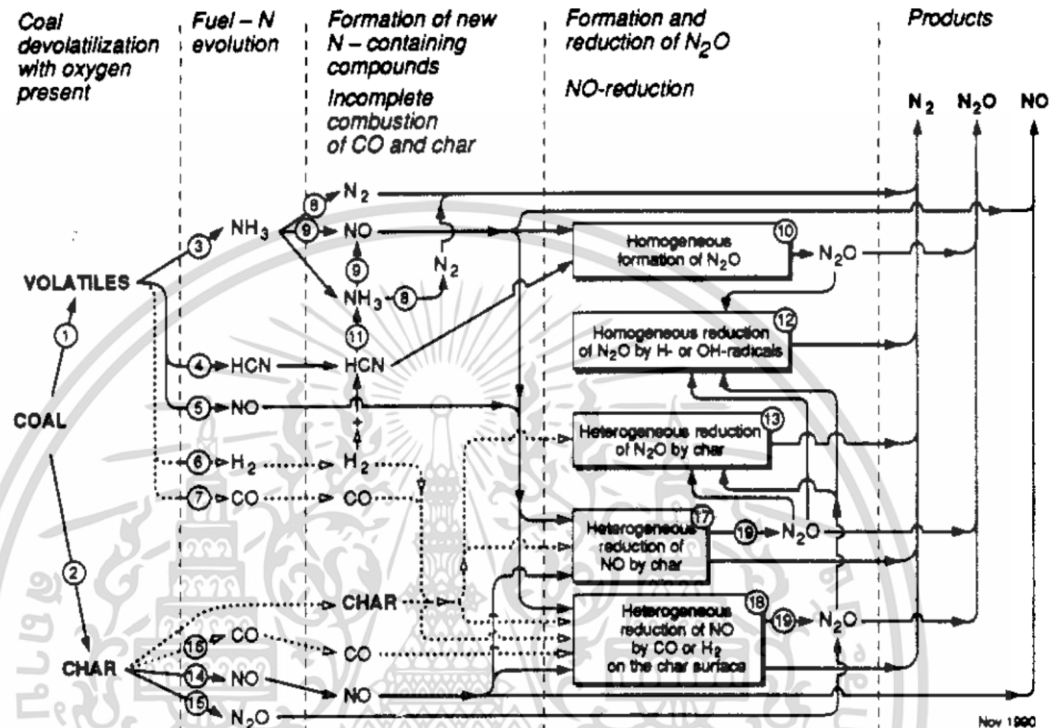


การเกิดการสลายตัวของแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ในกลไกเชื้อเพลิงไนโตรเจน Fuel-NO_x แสดงดังรูปที่ 2.22 แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์จะมีรูปแบบกระบวนการเกิดที่ซับซ้อน แต่การเกิดปฏิกิริยาจะแตกต่างกันในกลไก Fuel-NO_x กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงไนโตรเจนในกระบวนการสารระเหยไนโตรเจน เช่น ไฮโดรไซยาไนด์ และแอมโมเนียจะถูกปลดปล่อยออกมาในภาวะแก๊ส ภายใต้ภาวะแก๊สในปฏิกิริยาเดียวกัน ไฮโดรไซดัยาไนด์และแอมโมเนียถูกทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจน และละอองน้ำ ได้เป็นแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สไนตรัสออกไซด์ตามลำดับ (ปิยะณัฐ เจริญพร. 2557)

อัตราการฟอร์มตัวของ Fuel-NO_x ยังจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอีกด้วย โดยมลพิษ NO_x จะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Fuel-NO_x จะมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งตรงนี้ทำให้เชื้อเพลิงได้เปรียบกว่าเชื้อเพลิงที่มาจากถ่านหินเป็นอย่างมาก เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนในชีวมวลมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณไนโตรเจนในถ่านหินมาก

ในส่วนอนุมูล O เป็นส่วนร่วมสำคัญในการฟอร์มตัวของ fuel NO อัตราการเปลี่ยน fuel-N เป็น NO_x จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (อากาศต่อเชื้อเพลิง) ที่โซนการเผาไหม้เป็นสำคัญ ผลกระทบของอากาศส่วนเกินจะค่อนข้างเห็นได้ชัดในการฟอร์มตัวของ NO จากสารระเหยไนโตรเจน ในขณะที่การออกซิเดชันของ char-N จะได้รับผลกระทบจากอากาศส่วนเกินขึ้นน้อยมาก ดังนั้น การลดลงของ ปริมาณ fuel-N, ความเข้มข้น O₂ ในโซนการแตกสารระเหยของถ่านหินและโซนการเผาไหม้สารระเหย และ

อุณหภูมิการเผาไหม้ จะส่งผลนำไปสู่การลดลงของการฟอร์ม fuel NO และรวมถึงทำให้มลพิษ NO_x จากการเผาไหม้ลดลงด้วย (รัชตากรณ์ แก้วกล้า. 2556)



รูปที่ 2.22 เส้นทางของเชื้อเพลิงไนโตรเจน ซึ่งมีผลต่อการเกิดและสลายของ NO_x ในเตาฟลูอิดไคซ์เบด เมื่อเผาไหม้ถ่านหิน (Leckner et al. 2004)

มีงานวิจัยหลายฉบับศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยระบบฟลูอิดไคซ์เบดในรูปแบบต่างๆที่มีทั้งศึกษาตัวเชื้อเพลิงทั้งเชื้อเพลิงถ่านหิน พลังงานทดแทน หรือแบบผสม หรือแม้กระทั่งตัวมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการเผาไหม้และปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้มีดังนี้

ปิยะพันธ์ จะกอ (2548) ทำการศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินผสมแกลบโดยใช้เครื่องเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่าสามารถผสมแกลบกับถ่านหินได้มากที่สุดที่ 13% โดยน้ำหนัก เนื่องจากข้อจำกัดของระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองที่อัตราส่วนผสมของแกลบที่ 23.19% โดยน้ำหนัก จะเกิดการไหม้ของเชื้อเพลิงย้อนเข้าไปในถังบรรจุเชื้อเพลิง ปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิส่วนล่างของท่อโรเตอร์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (ไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากแกลบมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าถ่านหิน และแกลบมี

ปริมาณคาร์บอนคงตัวและซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านหิน

ธีระชัย สายแก้ว (2552) ได้ศึกษาการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ถ่านหินซับบิทูมินัสและชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อย ไรเซอร์หรือห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. สูง 3 m. ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของชีวมวล อัตราส่วนของชีวมวลกับถ่านหิน จาก 0 ถึง 70% โดยน้ำหนัก และตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของแคลเซียมออกไซด์ต่อการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซไนตรัสออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้ของถ่านหินกับกะลาปาล์มจะให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดความสูงของเตาสูงกว่าการเผาไหม้ของถ่านหินกับกะลามะพร้าว แกลบและขี้เลื่อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานความร้อนของกะลาปาล์ม การเพิ่มอัตราส่วนของชีวมวลกับถ่านหินจะส่งผลให้ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลง การป้อนอากาศทุติยภูมิที่ตำแหน่ง 1 m. จะทำให้การปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซไนตรัสออกไซด์มีปริมาณมากที่สุด นอกจากนี้การเติมแคลเซียมออกไซด์ในขณะเผาไหม้จะส่งผลทำให้เกิดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นในขณะที่การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินและชีวมวลส่งผลให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มากกว่าก๊าซไนตรัสออกไซด์

Madhiyanon et al. (2010) ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นและศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศส่วนปฐมภูมิซึ่งเป็นอากาศที่ก่อให้เกิดการฟลูอิดไคซ์เซชัน ในการทดลองนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 สถานะการทดลอง คือ สถานะการทดลองการหาผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มความเร็วของอากาศปฐมภูมิ และมีการลดอัตราส่วนการใช้ทุติยภูมิลง จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพความร้อนมีค่าระหว่าง 77-82% ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศส่วนปฐมภูมิเพิ่มขึ้นเกินกว่า $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สอดคล้องกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ และปริมาณแก๊สไนตริกออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณแก๊สมลพิษแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไนตริกออกไซด์เมื่อคิดเทียบเท่าที่ปริมาณออกซิเจน 6% มีค่าดังนี้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าระหว่าง 50-550 ppm และแก๊สไนตริกออกไซด์มีค่าระหว่าง 230-350 ppm พบว่า การเพิ่มความเร็วของอากาศปฐมภูมิจะแปรผันตรงกับการลดอัตราส่วนการใช้อากาศทุติยภูมิส่งผลให้ปริมาณแก๊สไนตริกออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น

Leckner et al. (2004) ทำการศึกษาการปล่อยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของสิ่งปฏิกูลแห้ง เศษไม้อัดแท่ง และถ่านหิน จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเผาไหม้ถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวลหลายชนิดในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวนโดยใช้สถานะการทดลองคือมีการใช้อากาศปฐมภูมิที่อัตราส่วนอากาศรวม

เท่ากับ 1.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยมลพิษจากการใช้อากาศทุติยภูมิเข้าร่วมในการเผาไหม้โดยใช้อัตราส่วนอากาศเท่ากับ 1.00 1.05 1.10 และ 1.15 พบว่าที่ใช้ปริมาณอากาศปฐมภูมิอัตราส่วนอากาศรวมเท่ากับ 1.2 นั้นถ่านหินเกิดการลดลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ อีกทั้งปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิที่อัตราส่วนอากาศรวม ในส่วนของสภาวะการป้อนอากาศทุติยภูมิที่การป้อนอากาศทุติยภูมิโดยใช้อากาศ 50% ของอากาศที่ใช้ทำการเผาไหม้ สามารถลด NO ได้ถึง 64% ที่อัตราส่วนอากาศรวมเท่ากับ 1.05 นั้นเป็นจุดที่ดีที่สุดของสภาวะการทำงาน

Fang et al. (2004) ได้ศึกษาการนำแกลบมาเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยทำการทดลองในระบบ cold model พบว่าแกลบทำการฟลูอิดไอซ์ได้ยากแต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ทรายและถ่านหินเป็นตัวช่วยให้เกิดการฟลูอิดไอซ์ ผลจากการศึกษาขนาดทราย ความเร็วของอากาศ พบว่าขนาดของทรายที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมได้ดีอยู่ช่วง 0.3-0.8 mm. ความเร็วอากาศ 0.8-2 m·s⁻¹ เผาไหม้ที่อุณหภูมิ 340 °C ซึ่งใช้อุณหภูมิน้อยกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน จากการศึกษาพบว่าแกลบมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 97% มีปริมาณคาร์บอนที่พบในถ้ำอยู่ระหว่าง 3-8% โดยที่ปริมาณ CO ที่ปล่อยออกมามีค่า 200-800 ppm ปริมาณ SO₂ มีค่า 50-100 ppm และ NO_x มีค่า 150-220 ppm

Amand and Leckner (2001) ได้ศึกษาการลดปริมาณของ NO_x, N₂O ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหิน ไม้ และกากของเสีย โดยศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างถ่านหินหรือไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักโดยมีกากของเสียเป็นเชื้อเพลิงผสม และผลของกากของเสียแห้งกับกากของเสียเปียกต่อการปล่อย NO_x และ N₂O โดยประยุกต์ใช้วิธี Advanced air staging method มาใช้กับเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB) พบว่าทั้งถ่านหินและไม้นั้นปล่อย NO_x ออกมาในปริมาณน้อยแต่กากของเสียแห้งกับกากของเสียเปียกยังไม่สามารถที่จะหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ วิธีนี้ใช้ได้ดีในกรณีที่กากของเสียที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมกับเชื้อเพลิงหลักมีสัดส่วนที่ไม่สูงเกินไป (ไม่เกิน 25%) และวิธีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหย (Volatile) สูง

กัลยา คุปต์นันทรักษ์ และวรภัทร วรณไพศาล (2549) ทำการทดลองการเผาไหม้ร่วมระหว่างเปลือกกาแฟและถ่านหิน ในเตาฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของเปลือกกาแฟและถ่านหินที่ผสมกันพบว่าสัดส่วนของเปลือกกาแฟที่สามารถผสมได้มากที่สุดคือ 33% โดยน้ำหนัก และการผสมเปลือกกาแฟมากขึ้นจะทำให้แก๊สออกซิเจน, แก๊สไนโตรเจน, และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นแต่การทดลองดังกล่าวไม่สามารถสรุปผลได้เกี่ยวกับผลของหินปูนต่อแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ได้

Pichet and Vladimir (2014) ได้ศึกษาขนาดของกะลาปาล์มที่มีผลสภาวะการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบบทรงกรวย ซึ่งจากการทดลองขนาดที่แตกต่างกัน (1.5 mm., 4.5 mm., 7.5 mm., และ

10.5 mm.) ถูกป้อนที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ที่อากาศส่วนเกิน 20 – 80% พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดของการเผาไหม้คือ ขนาดเชื้อเพลิงที่ 4.5 mm. ที่อากาศส่วนเกิน 40-50% ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงถึง 99.4 - 99.7%

Pichet and Vladimir (2015) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดไธด์แบบทรงกรวยที่ใช้สำหรับการเผาไหม้กะลาปาล์ม จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า การใช้ทรายซิลิกา สำหรับการเผาไหม้กะลาปาล์มเกิดปัญหาการเกาะตัวกันของเบด ดังนั้นทรายอะลูมินาจึงถูกใช้เป็นวัสดุเบดเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบดในเตาเผาแทนทรายซิลิกา โดยในระหว่างการเผาไหม้มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราคงที่ $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ เพื่อควบคุมปริมาณความร้อนป้อนเข้าเตาเผาที่ประมาณ $200 \text{ kg}\cdot\text{W}$ ความร้อน และมีการควบคุมอากาศส่วนเกินในช่วง 20-80% ในทุกๆ การทดลอง มีการวัดอุณหภูมิและความชื้นของแก๊สมลพิษในแนวแกนกลางของเตาเผาและที่ปลายปล่องไอเสีย จากการทดลองพบว่า อากาศส่วนเกินมีผลกระทบต่ออัตราการปล่อยมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเป็นอย่างมาก การปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์สามารถทำได้โดยการเพิ่มอากาศส่วนเกินในทางตรงกันข้าม ไนตริกออกไซด์สามารถควบคุมโดยการลดอากาศส่วนเกิน ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาอยู่ที่ประมาณ 99% นอกจากนี้ยังพบว่า ไม่เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของทรายอะลูมินาตลอดการทดลอง 30 hr.

รัชดาภรณ์ แก้วกล้า (2556) ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดเชื้อเพลิงกะลามะพร้าวต่อมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไธด์ทรงกรวยแบบหมุนวน โดยเลือกใช้กะลามะพร้าวขนาด 0.5-5.0 mm. ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ ทหารายขนาด 600 – 850 μm ถูกใช้เป็นเบด ที่ความสูง 20 cm. ที่อากาศส่วนเกิน 40 – 100% ใช้หัวกระจายลม 3 หัว พบว่า อุณหภูมิภายในเตาเผามีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน มลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ สูงสุดมีค่าไม่เกิน 220 และ 110 ppm ตามลำดับ เมื่อเพิ่มขนาดเชื้อเพลิงกะลามะพร้าว มลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง ในขณะที่มลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 99% จากตารางที่ 2.5 แสดงผลการทดสอบที่เตาเผาแบบฟลูอิดไธด์เบดรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้สูงถึงประมาณ 99% เนื่องจากมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และมีการปล่อย CO ในปริมาณที่ต่ำ

ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และประสิทธิภาพระหว่างการเผาไหม้ในเตาเผาในรูปแบบต่างๆ (Pichet and Vladimir. 2015)

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน ต่ำ LHV (kJ•kg ⁻¹)	สภาวะการเผาไหม้		อุณหภูมิ เบด (°C)	ปริมาณมลพิษ CO (ppm)	ประสิทธิภาพ การเผาไหม้ (%)	อ้างอิง
		อัตราการป้อน เชื้อเพลิง (kg•h ⁻¹)	อากาศ ส่วนเกิน (%)				
คอลัมน์ฟลูอิดไชน์เบดแบบบับเบิลโดยมีเบดเป็นทราย Columnar bubbling fluidized-bed combustors using silica sand as the bed material							
เม็ดลูกพีช	20,390	0.9	50	631	1459	97.5	Kaynak et al. (2008)
เม็ดแอสปิริคอท	21,796	0.9	46	674	5428	96.2	Kaynak et al. (2008)
ไม้สน	19,700	2.7	40-91	780	170-350	99.50-99.88	Shimizu et al. (2006)
เปลือกถั่ว	19,728	9.3	53	615	n/a	99.2	Rao and Reddy et al. (2011)
คอลัมน์ฟลูอิดไชน์เบดแบบบับเบิลโดยมีเบดเป็นอลูมินา Columnar bubbling fluidized-bed combustors using alumina as the bed material							
ไม้สน	19,700	2.7	40-91	880	30-95	99.92-99.93	Shimizu et al. (2006)
ไม้สน	19,700	n/a	35	850	190	98.7	Han et al. (2008)
เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบบับเบิลสองคอลัมน์ที่หน้าตัดต่างกันโดยมีเบดเป็นอลูมินา Bubbling fluidized-bed combustors with two prismatic modules of different cross-sectional areas using alumina as the bed material							
ก้านฝ้าย	17,531	35	36	875	190	99.88	Sun et al. (2009)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลของส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลและภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อปริมาณมลพิษและประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน โดยมีวิธีการหาค่าต่างๆของคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลโดยใช้การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลแต่ละชนิด ทำได้โดยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI T204 cm-88 มาตรฐาน TAPPI T204 cm-97 (Acid detergent) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลตรวจวัดด้วยเครื่อง Thermogravimetric /Differential Thermal Analyzer (TG/DTA) ประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณมลพิษหาได้จากเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวนโดยวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นแก๊ส (CO และ NO) และขี้เถ้าจากตัวเก็บ (ash collector)

3.1 การเตรียมชีวมวล

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสำรวจพื้นที่และพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหมาะสมมีลักษณะใกล้เคียงกับชีวมวลที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ทดสอบเอาไว้ อีกทั้งยังหาได้ง่าย เป็นวัชพืชที่มีอยู่ทั่วไปและมีปริมาณมากในจังหวัดเพชรบุรี คือ กระจินยักษ์ กระจาดาล และผักตบชวา

เชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิดถูกนำไปบดด้วยเครื่องบดย่อยที่แตกต่างกันเพื่อให้มีขนาดโดยประมาณ 5 mm. (เป็นขนาดที่สามารถนำไปผลิตเป็นชีวมวลได้ดีที่สุดสำหรับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุน)

3.1.1 กระจินยักษ์

วิธีการดำเนินการเกี่ยวกับกระจินยักษ์เริ่มตั้งแต่จัดซื้อกระจินยักษ์สดจากพื้นที่อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี จำนวน 10 ton. จากนั้นดำเนินการลดขนาดด้วยเครื่องบดลดขนาดแนวยาวให้ได้ขนาดโดยประมาณ 5 mm. หลังจากนั้นนำไปทำแห้งโดยการตากแดด แล้วจึงแบ่งส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ส่วนประกอบองค์รวม อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล และที่เหลือจึงนำไปเผาในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุน

3.1.2 ผักตบชวา

ผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้นำมาจากแหล่งน้ำในบริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี มีน้ำหนักโดยประมาณ 20 ton. หลังจากนั้นใช้เครื่องบดลดขนาดแบบแนวยาวให้ได้ขนาดประมาณ 5 mm. แล้วนำไปทำแห้งโดยการตากแดด แล้วจึงแบ่งส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล

ส่วนประกอบของคร่อม อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล และที่เหลือจึงนำไปเผาในเตาเผาฟลูอิดไชต์เบดแบบหมุน

3.1.3 กะลาตาล

งานวิจัยฉบับนี้ได้รวบรวมกะลาตาลจากชาวบ้าน โดยเฉพาะจากผู้ผลิตลูกตาลเชื่อมจำนวน 10 ton. แล้วนำมาทำความสะอาดเพื่อนำเส้นใยและสิ่งเจือปนออก แล้วทำการบดลดขนาดด้วยเครื่องลดขนาดแบบแนวตั้งให้มีขนาดสุดท้ายประมาณ 5 mm. แบ่งส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ส่วนประกอบของคร่อม อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล และที่เหลือจึงนำไปเผาในเตาเผาฟลูอิดไชต์เบดแบบหมุน



รูปที่ 3.1 เครื่องบดลดขนาดทางแนวยาว



รูปที่ 3.2 เครื่องบดลดขนาดทางแนวตั้ง

3.2 อุปกรณ์การทดลองและการดำเนินงานทดลอง

3.2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล

3.2.1.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) คือ การวิเคราะห์เกี่ยวกับธาตุทางเคมีที่ส่งผลต่อการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของธาตุทางเคมีกับอากาศ ผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นร้อยละของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยผู้วิจัยทำการส่งตัวอย่างชีวมวล (ผ่านกระบวนการบดย่อยให้ได้ขนาดประมาณ 5 mm. และผ่านการตากแห้ง) ไปยังแผนกห้องปฏิบัติการ กองธรณีวิทยา ฝ่ายวางแผนและบริหารเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้เครื่อง CHNS elemental analyzer ตาม ASTM D5373 ตัวอย่างถูกเผาในเตาเผาโดยใช้ออกซิเจนซึ่งจะได้แก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และน้ำ โดยที่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะถูกรีดิวซ์เป็นแก๊สไนโตรเจน (N₂) จากนั้นปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไอน้ำจะถูกคำนวณเป็นปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมี IR (Infrared) cells เป็น detector สำหรับแก๊สไนโตรเจน (N₂) จะถูกตรวจสอบโดยเครื่องตรวจวัด (thermal conductivity detector: TCD) แล้วคำนวณเป็นปริมาณไนโตรเจน

3.2.1.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) คือการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพโดยรวมของเชื้อเพลิงโดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 7582-10 โดยผู้วิจัยทำการส่งตัวอย่างชีวมวล (ผ่านกระบวนการบดย่อยให้ได้ขนาดประมาณ 5 mm. และผ่านการตากแห้ง) ไปยังแผนกห้องปฏิบัติการ กองธรณีวิทยา ฝ่ายวางแผนและบริหารเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้เครื่อง TGA ในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์จะเริ่มจากการตรวจหาความชื้น สารระเหย และซีเถ้า ตามลำดับ เริ่มจากการหาความชื้น โดยให้ความร้อนกับชีวมวล 1 g. ที่อุณหภูมิ 107 °C เป็นเวลา 1 hr. และคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักที่หายไป หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สารระเหย ทำการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6-7 min. และคำนวณร้อยละของน้ำหนักที่หายไปลบด้วยความชื้น สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยมากจะเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน น้ำ และสารระเหยจากทาร์ (tar) ต่อไปคือการวิเคราะห์ซีเถ้า ทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C และคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่ยังคงเหลืออยู่ (การคำนวณร้อยละของน้ำหนักอยู่ในภาคผนวก ข) และสุดท้ายปริมาณคาร์บอนคงตัว หาได้โดยนำปริมาณความชื้น ซีเถ้า สารระเหย ลบออกจาก 100 และทุกค่าต้องอยู่ในสถานะความชื้นเดียวกัน

3.2.1.3 การวิเคราะห์พลังงานความร้อน คือการหาค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 5865-10a โดยผู้วิจัยทำการส่งตัวอย่างชีวมวล (ผ่านกระบวนการบดย่อยให้ได้ขนาดประมาณ 5 mm. และผ่านการตากแห้ง) ไปยังแผนกห้องปฏิบัติการ กองธรณีวิทยา ฝ่ายวางแผนและบริหารเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter ภายใต้ control condition (Isoperibol calorimeter) คือใส่ตัวอย่างภายในลูกบอมบ์ เพื่อเผาจนตัวอย่างลุกไหม้ ให้ความร้อนออกมา ความร้อนจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ล้อมรอบลูกบอมบ์ เทอร์โมมิเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์จะวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ ค่าความร้อนที่วัดได้จาก Bomb calorimeter คือค่าความร้อนสูง และเราสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำได้ (ภาคผนวก ก)

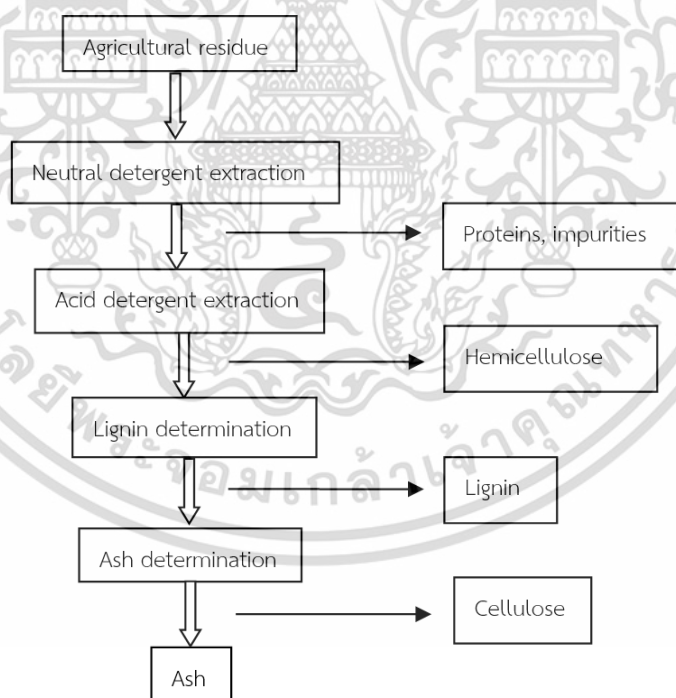
3.2.2 ส่วนประกอบองค์รวมและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

3.2.2.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล ทำได้โดยการวิเคราะห์ตามวิธีของ Van Soest (1991) (ภาคผนวก ข) ผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นร้อยละของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โดยผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างชีวมวล (ผ่านกระบวนการบดย่อยให้ได้ขนาดประมาณ 5 mm. และผ่าน

การตากแห้ง) ที่ฝ่ายปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งมีขั้นตอนโดยย่อดังรูปที่ 3.3

3.2.2.2 ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวล ด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C (ดังรูปที่ 3.4) โดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิ

สภาวะที่ใช้ในการทดลองชีวมวล (กระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา) ทำให้มีขนาดประมาณ 200 μm . น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น ประมาณ 15-20 mg. และเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 - 1000°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10°C $\cdot\text{min}^{-1}$ สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้บรรยากาศภายในใช้เป็นอากาศเพียงอย่างเดียวตลอดทั้งกระบวนการทดสอบ (Pichet et al. 2015; Song et al. 2019; Xei et al. 2020) กราฟที่แสดง (TG/DTG) เป็นการแสดงกราฟของข้อมูลเฉลี่ยของข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง พฤติกรรมที่สำคัญคือ อุณหภูมิการจุดติดไฟ อุณหภูมิการสลายตัว และอุณหภูมิการเผาไหม้หมด (ทั้งหมดนี้ถูกใช้สำหรับการหาพฤติกรรมทางความร้อนและความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาของชีวมวล) ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟ TG/DTG (Wang and Yan. 2008)



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล



รูปที่ 3.4 เครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C

การหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) สามารถหาได้จาก รูปที่ 2.12 (บทที่ 2)

3.2.3 การทดสอบพฤติกรรมของการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน โดยแบ่งวิธีการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การเตรียมเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน 2) การจุดเตาและดำเนินการวัดผลการทดลองเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน 3) การศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด และ 4) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.2.3.1 การเตรียมเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน (Swirling Fluidized-bed)

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาทั้งสามส่วนของการทดสอบที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดได้แก่ กะลาตาล กระจินยักษ์ และ ผักตบชวา กับอากาศส่วนเกินที่ป้อนในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน (Swirling Fluidized-bed) แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 โดยเตาเผาที่ถูกออกแบบให้สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย เช่น ถ่านหิน และชีวมวลชนิดต่างๆโดยมีขนาดการออกแบบให้สามารถรับภาระความร้อนได้สูงสุดประมาณ 350 kW_{th} จากภาพที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า

เตาเผาประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 มีลักษณะเป็นเตาเผาทรงกระบอกที่ทำจากเหล็กหนา 4.5 mm. มีความสูง 2.5 m. ซึ่งประกอบมาจาก ทรงกระบอก 5 ชั้น แต่ละชั้นสูง 0.5 m. เตาเผาสร้างมาจากเหล็กเคลือบกันสนิม (galvanized steel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.9 m. และมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

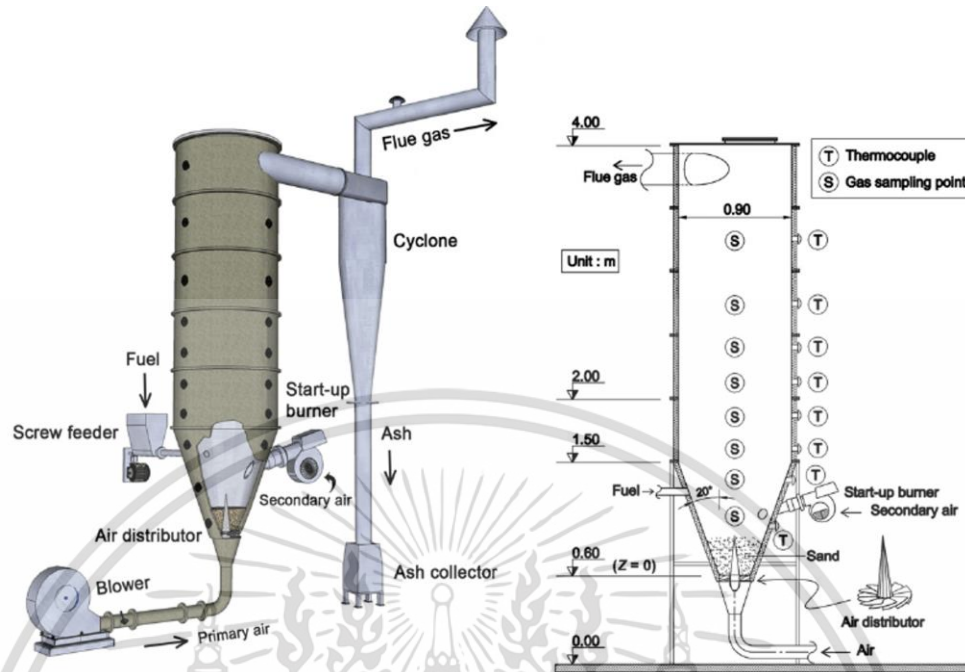
ฉนวนซีเมนต์ทนไฟหนา 5 cm. อยู่ที่ผนังเตา และส่วนที่ 2 ฐานเป็นทรงกรวยขนาดความสูง 0.9 m. ทำมุมกรวย 40° มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนทรงกรวย 0.9 m. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างทรงกรวย 0.25 m. ติดตั้งอยู่ด้านล่างของเตา ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 นอกจากตัวเตาเผาแล้ว มีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 8 ตัว (thermocouple type K) ตลอดความสูงของเตาและที่ปล่องไอเสียเพื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาระหว่างการเผาไหม้ โดยหัววัดอุณหภูมิทุกตัวเชื่อมต่อกับ data logger ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิทุกจุดได้พร้อมกัน

หัวเผาดีเซล (Burner) จะถูกใช้ในการให้ความร้อนกับเบตระหว่างทำการเผาไหม้ หัวเผาถูกติดตั้งที่ความสูง 0.5 m. เหนือหัวกระจายลมและทำมุม 45° กับแนวระนาบ ดังรูปที่ 3.7

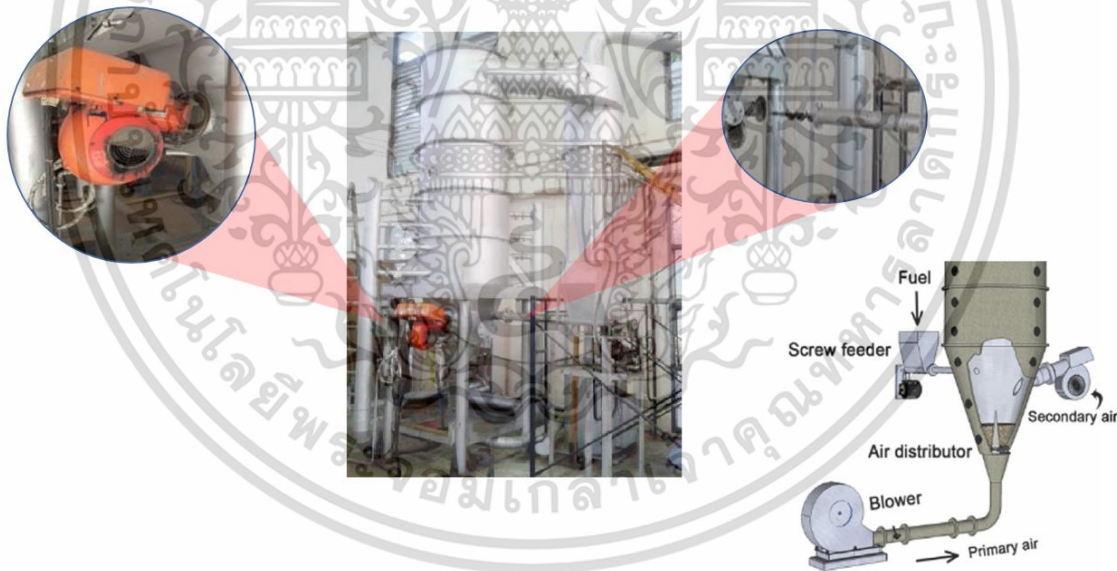
สกรูป้อน (Screw feeder) ถูกติดตั้งบริเวณทรงกรวยที่ระดับ 0.6 m. เหนือหัวกระจายลม และสามารถเปลี่ยนอัตราการป้อนสกรูโดยผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟส



รูปที่ 3.5 เตาเผาฟลูอิดเบตทรงกรวยแบบหมุนวน



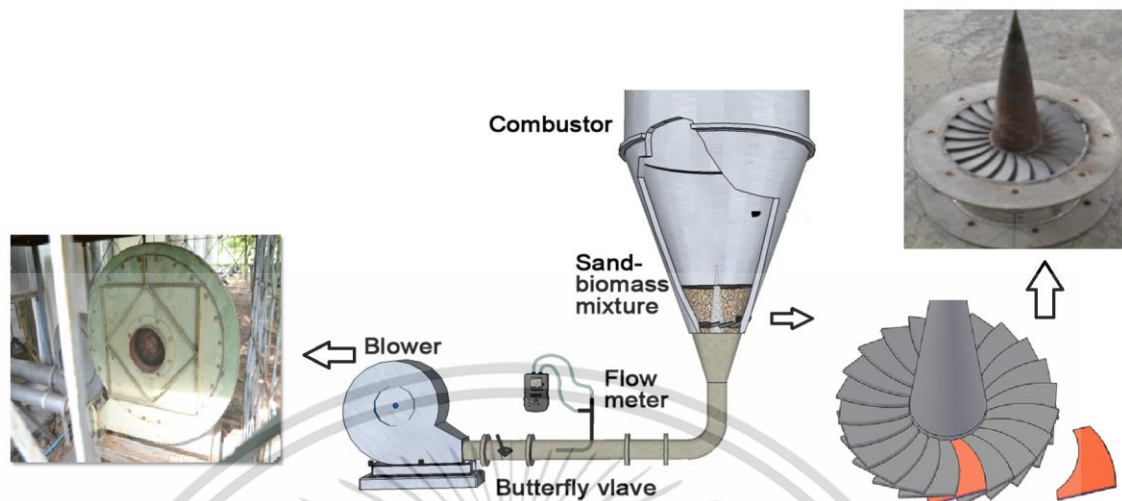
รูปที่ 3.6 โครงสร้างเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน



รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนของสกรูป้อน (Screw feeder) และหัวเผา (Burner)

พัดลม (Blower) ขนาด 25 hp. อากาศจะเคลื่อนที่ผ่านหัวกระจายลมแบบหมุนวน โดยมีวาล์วปีกผีเสื้อที่ถูกใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศในท่อลมซึ่งวาล์วปีกผีเสื้อจะถูกติดตั้งอยู่ด้านหน้าของพัดลม (Blower) ดังรูปที่ 3.8

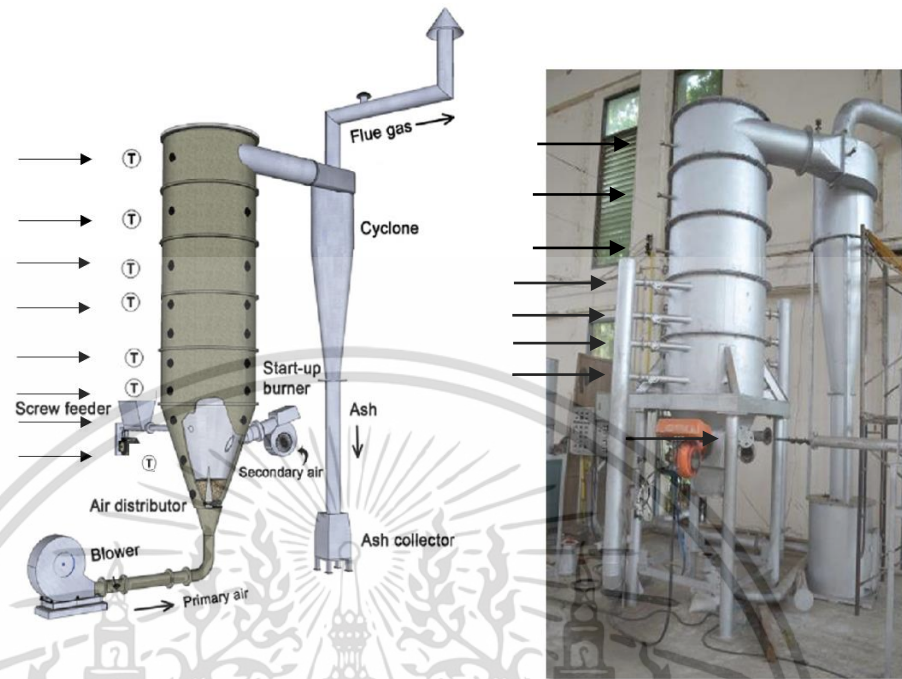
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนพัฒนาและหัวกระจายลมแบบหมุนวน

หัวกระจายลมจะเป็นหัวกระจายลมแบบใบพัด มีจำนวน 22 ใบ รูปแบบของใบพัดจะมีลักษณะ axial impeller blade ดังแสดงในรูป 3.8 โดยจะมีมุมมองของใบพัดกระทำกับแนวตั้งคือ 76° หัวกระจายลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.25 m. เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในทรงกรวยของเตาเผา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางคอกของหัวกระจายลม 0.09 m. เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและเบด

เทอร์โมคัปเปิลชนิด type K ซึ่งมีที่อุณหภูมิ 0.5 inch. ที่เรียกว่า probe สำหรับใช้วัดอุณหภูมิฟลูแก๊ส (Flue gas) การวัดอุณหภูมิทำได้โดยสอด probe เข้าไปยังกลางเตาเผาตามแนวความสูงของเตาเผาและตำแหน่งทางเข้าไซโคลน ซึ่งมีการเจาะรูจำนวน 8 ช่อง (รูปที่ 3.9) สำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของฟลูแก๊ส (O_2 , CO และ NO) ที่ตำแหน่งต่างๆจะใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo-350XL ดังแสดงในรูป 3.10



รูปที่ 3.9 ตำแหน่ง probe และไซโคลน



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์ฟลูแก๊ส (Flue gas) Testo 350XL

ไซโคลน เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดจากเตาเผาออกจากแก๊สเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายอากาศ ไซโคลนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 3 mm. ถูกติดตั้งไว้แยกออกจากเตาเผา โดยด้านล่างสุดของไซโคลนคือตัวเก็บขี้เถ้า (ash collector) ดังแสดงในรูป 3.9 ซึ่งเป็นอุปกรณ์สุดท้ายของเตาเผาที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างขี้เถ้าเพื่อนำไปวิเคราะห์คาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ (unburned carbon)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 การจุดเตาเพื่อทำการทดลองเตาเผาฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน

เริ่มจากป้อนเบด (ทราย) โดยเบดที่ใช้เป็นทรายซิลิกาขนาด 0.6-0.8 mm. เข้าด้านบนของเตาเผาโดยกำหนดความสูง 20 cm. เหนือหัวกระจายลม (Air distributor) อุณหภูมิของเตาเผา โดยใช้น้ำมันดีเซล โดยป้อนอากาศที่อุณหภูมิปกติเข้าเตาเผาผ่านท่ออากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. ที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของเตาเผา โดยใช้พัดลม (Blower) ขนาด 25 hp. อากาศจะเคลื่อนที่ผ่านหัวกระจายลมแบบหมุนวน (Air distributor) โดยมีวาล์วปีกผีเสื้อที่ถูกใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศในท่อลมซึ่งวาล์วปีกผีเสื้อจะถูกติดตั้งอยู่ด้านหน้าของพัดลม (Blower) ดังรูป 3.8 ในขณะที่หัวเผาดีเซล (Burner) จะถูกใช้ในการให้ความร้อนกับเบด จนเบดมีอุณหภูมิประมาณ 650 °C ซึ่งสูงเพียงพอต่อการติดไฟของชีวมวล จึงเริ่มการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ชนิด ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อ 3.2.3.3

3.2.3.3 การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน

เมื่อทำการจุดเตาเรียบร้อยแล้ว เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนผ่านสกรูป้อน (Screw feeder) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่ระดับ 0.6 m. เหนือหัวกระจายลม (Air distributor) และสามารถเปลี่ยนอัตราการป้อนชีวมวลผ่านสกรูป้อน (Screw feeder) โดยใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟส ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงในระดับคงที่ (ประมาณ $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ซึ่งได้ทำการวัดเทียบก่อนทำการทดลอง) อากาศหุติยภูมิถูกจ่ายเข้าหัวเผา (Burner) เพื่อทำการเผาไหม้โดยใช้น้ำมันดีเซล ที่ความสูง 0.5 m. เหนือหัวกระจายลมและทำมุม 45° โดยจะถูกฉีดเข้าสู่เตาเผาในแนวระนาบ (horizon) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนความร้อนในเตาเผาอยู่ในสถานะคงที่ ($500-600^\circ\text{C}$) แล้วจึงทำการปิดหัวเผาให้เหลือแต่เชื้อเพลิงชีวมวลเพียงอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงในขณะเดียวกันอากาศหุติยภูมิยังคงจ่ายเข้าสู่เตาเผาเพื่อลดความเสียหาย (เนื่องจากความร้อนของของแข็งที่เกิดจากชีวมวลและเบด ที่อยู่ในเตาเผามีอุณหภูมิสูง) ที่จะเกิดขึ้นกับหัวเผา โดยที่อากาศส่วนเกินจะถูกป้อนที่ประมาณ 40%, 60% และ 80% ตามลำดับ โดยในการปฏิบัติการแต่ละครั้ง ปริมาณอากาศส่วนเกินสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ทางออกไซโคลน อุปกรณ์ที่ใช้คือ Testo 350XL ในการวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน (การคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ อยู่ในภาคผนวก ก) จากนั้นทำการปรับปริมาณอากาศส่วนเกินตามที่กำหนด จาก blower แล้วรอจนภายในเตาอุณหภูมิคงที่ จึงวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ทางออกไซโคลนอีกครั้ง ถ้าระบบนิ่ง (steady state) แล้วบันทึกค่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ แก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์ และออกซิเจนตามแนวความสูงและที่ทางออกไซโคลน สุดท้ายทำการเก็บตัวอย่างซีเถ้าที่ได้จากไซโคลนเพื่อวิเคราะห์คาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ (unburned carbon) เพื่อใช้หาประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนมอนอกไซด์เมื่อจ่ายอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกัน 40% 60% 80% โดยใช้การวิเคราะห์วิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics นำเสนอข้อมูลการทดลองโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ทดสอบความแตกต่างระหว่างปริมาณมลพิษเมื่อจ่ายอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อตรวจสอบความผันแปรที่ได้จากแบบจำลองจะใช้วิธี Analysis of variance (ANOVA) การทดสอบนี้ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ จากค่า p-value ค่าการทดสอบ Lack of Fit และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y ที่สามารถอธิบายโดยความแปรผันใน X หรือ อธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไรถ้า R^2 มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น

3.3 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินการวางแผนครั้งนี้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ต่อไปนี้เป็น การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล การศึกษาส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล และพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน เมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกัน จึงกำหนดแผนการดำเนินงานวิจัยที่แบ่งออกเป็น 3 ระยะได้แก่

แผนการดำเนินงานระยะที่ 1

1. ทำการศึกษาชีวมวลในเขตพื้นที่การศึกษา (กะลาตล ผักตบชวา กระถินยักษ์)
2. ทำการเตรียมตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาโดยผ่านการลดความชื้นและบดละเอียดเพื่อให้ได้ความชื้นและขนาดที่เหมาะสม

แผนการดำเนินงานระยะที่ 2

1. การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทั้งแบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล
2. การวิเคราะห์ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลรวมถึงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

3. นำชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาเผาในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น

แผนการดำเนินงานระยะที่ 3

นำผลจากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของชีวมวล ไปสร้างกราฟแสดงข้อมูลต่างๆ และคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนโดยใช้ชีวมวล 3 ชนิดรวมถึงหาปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาชีวมวลทั้ง 3 ชนิด และสร้างกราฟแสดงข้อมูล สามมิติ และสรุปผลการศึกษาและจัดทำรายงานผลการศึกษา



บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาผลของส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลและสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อ ปริมาณมลพิษและประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน โดยมีวัตถุประสงค์ ของการศึกษาดังนี้ 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้ 2) เพื่อศึกษาส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล ที่ สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้ 3) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบหมุนวน เมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกัน

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล

คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลที่ทำการศึกษา คือ กระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา ที่ผ่าน การลดขนาดให้ได้ประมาณ 5 mm. สามารถหาได้จากการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล (กระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา) บนฐาน as-received (เป็นการคำนวณที่มีความชื้นรวมอยู่ด้วย) ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์ธาตุต่างๆที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ซึ่งธาตุที่ ทำปฏิกิริยาแล้วให้พลังงานความร้อน คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่าง ระหว่าง 100 กับผลรวมของ ความชื้น เถ้า และธาตุต่างๆ เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน คือเครื่อง CHNS elemental analyzer ตัวอย่างถูกเผาในเตาเผาโดยใช้ ออกซิเจนในอากาศแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องตรวจวัด (thermal conductivity detector: TCD) ซึ่งได้นำเสนอในหัวข้อ 3.2.1.1 การรายงานผลแบบแยกธาตุแสดงเป็นร้อยละโดยมวล และรายงานร้อยละความชื้นภายในและร้อยละเถ้าร่วมด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (air dry basis)

ชีวมวล	Ultimate analysis (wt.%, air dry basis)						
	W ^h	A	C	H	O	N	S
กะลาตาล	6.31	1.90	47.14	6.26	44.42	0.2	0.08
ผักตบชวา	6.33	32.02	27.79	4.55	34.39	0.93	0.32
กระถินยักษ์	6.96	4.93	44.18	6.37	42.25	2.01	0.26

หมายเหตุ W คือ Moisture Content

A คือ Ash

C คือ Carbon

H คือ Hydrogen

O คือ Oxygen

N คือ Nitrogen

S คือ Sulfur

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงชีวมวลที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ที่ผ่านการเอาความชื้นภายนอกออก มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน อยู่ในช่วง 27.279-47.14%, 4.55-6.37%, 0.2-2.01%, 34.39-44.42%, และ 0.08-0.32% ตามลำดับ โดยกะลาตาลมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุด คือ 47.14% รองลงมาคือ กระถินยักษ์ 44.18% และผักตบชวา 27.79% ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนสามารถใช้ในการคำนวณในปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยอัตราส่วนระหว่าง C:O จากสมการ $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta H$ ซึ่งถ้าจ่ายอากาศน้อยเกินไปจะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งถือว่าเป็นมลพิษจากการเผาไหม้ได้ ปริมาณไฮโดรเจนมีมากที่สุดในกระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา คือ 6.37% 6.26% และ 4.55% ตามลำดับ ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำมาก โดยปริมาณซัลเฟอร์ของผักตบชวา กระถินยักษ์ และกะลาตาล คือ 0.32% 0.26% และ 0.08% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาไนโตรเจนพบว่าชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีไนโตรเจนต่ำเช่นกัน ในปริมาณ 0.2% 0.93% และ 2.01% ตามลำดับ การที่ชีวมวลทั้งสามชนิดมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำคือเมื่อทำการเผาไหม้แล้วจะปล่อยมลพิษในรูป SO_x และ NO_x ออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอกน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหิน (SO_x ประมาณ 20%)

จากตารางที่ 4.2 ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวลที่สภาวะอบแห้ง 0%, dry basis และ air dry basis (ตัวอย่างการคำนวณการเปลี่ยนฐานอยู่ในภาคผนวก ก)

เนื่องจากสภาพของชีวมวลแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ตามสภาพจะไม่สามารถนำค่าการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้ เพราะสภาวะความชื้นที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องคำนวณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงให้อยู่ในฐานเดียวกันคือสภาวะความชื้นแบบอบแห้ง (0%) หรือ dry basis เชื้อเพลิงชีวมวลที่วิจัย ที่สภาวะอบแห้ง มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน อยู่ในช่วง 30-50%, 4-6%, 0.2-2.2%, 30-42%, 0.09-0.34% ตามลำดับ โดยส่วนที่ให้พลังงานความร้อนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน และกำมะถัน แต่เนื่องจากในชีวมวลจะมีออกซิเจนประกอบอยู่ด้วย ซึ่งออกซิเจนในส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิดเป็นน้ำที่แฝงอยู่ในชีวมวลนอกเหนือจากความชื้นโดยทั่วไป ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนในการทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำ ดังนั้นชีวมวลที่มีปริมาณไฮโดรเจน คาร์บอน และกำมะถันสูง จะให้ค่าความร้อนสุทธิที่สูงกว่า และเมื่อพิจารณาผลรวมปริมาณไฮโดรเจน คาร์บอน และกำมะถันในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่ากะลาตาลให้ค่าผลรวมสูงสุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ และผักตบชวา (56.33%, 53.77%, และ 34.11% ตามลำดับ) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความร้อนทั้งหมดของเชื้อเพลิงที่สภาวะอบแห้ง

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (สภาวะอบแห้ง 0%, dry basis และ air dry basis)

Ultimate analysis	กะลาตาล		ผักตบชวา		กระถินยักษ์	
	(wt.%, adb)	(wt.%, db)	(wt.%, adb)	(wt.%, db)	(wt.%, adb)	(wt.%, db)
W	6.31	0	6.33	0	6.96	0
A	1.90	2.03	32.02	34.18	4.93	5.30
C	47.14	50.31	27.79	29.67	44.18	47.48
H	6.26	5.93	4.55	4.10	6.37	6.01
O	44.42	41.43	34.39	30.71	42.25	38.77
N	0.2	0.21	0.93	0.99	2.01	2.16
S	0.08	0.09	0.32	0.34	0.26	0.28
C+H+S		56.33		34.11		53.77

หมายเหตุ W คือ Moisture Content
 A คือ Ash
 C คือ Carbon
 H คือ Hydrogen
 O คือ Oxygen
 N คือ Nitrogen
 S คือ Sulfur
 adb คือ air dry basis

db คือ dry basis

4.1.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล แบบประมาณ (Proximate analysis)

เนื่องจากเชื้อเพลิงแข็งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ค่อนข้างซับซ้อน มีทั้งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ (ส่วนที่เป็นเชื้อเพลิง) และสารอนินทรีย์ (ส่วนที่เป็นแร่ธาตุและความชื้น) ทำให้การวิเคราะห์แบบละเอียดค่อนข้างยุ่งยากและบางครั้งไม่มีความจำเป็น จึงมักนิยมใช้การวิเคราะห์แบบประมาณแทน ซึ่งการวิเคราะห์แบบประมาณแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ส่วนที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ สารที่ระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือส่วนเฉื่อย ได้แก่ ความชื้น และเถ้า การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการประมาณจะใช้วิธีการคำนวณโดยใช้ผลการวิเคราะห์พื้นฐานสถานะความชื้นอบแห้ง (0%) หรือ dry basis เนื่องจากสภาพของชีวมวลแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ตามสภาพ (as received basis) จะไม่สามารถนำค่าการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบของค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ฐานต่างๆ (as received, air dry basis และ dry basis)

Proximate analysis	กะลาตาล			ผักตบชวา			กระถินยักษ์		
	(wt.%, arb)	(wt.%, adb)	(wt.%, db)	(wt.%, arb)	(wt.%, adb)	(wt.%, db)	(wt.%, arb)	(wt.%, adb)	(wt.%, db)
W ^r	9.67	0	0	9.24	0	0	12.15	0	0
W ^h	-	6.31	0	-	6.33	0	-	6.96	0
A	1.83	1.90	2.03	31.02	32.02	34.18	4.65	4.93	5.30
VM	71.68	74.35	79.36	57.31	59.15	63.15	71.49	75.72	81.38
FC	16.81	17.44	18.61	2.42	2.50	2.67	11.70	12.39	13.32
VM+FC			97.97			65.82			94.70

หมายเหตุ W^r คือ Moisture Content

W^h คือ inherent moisture

A คือ Ash

VM คือ Volatile matter

FC คือ Fixed Carbon

arb คือ as received basis

adb คือ air dry basis

db คือ dry basis

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า ปริมาณส่วนที่เผาไหม้ได้ (สารระเหยและคาร์บอนคงตัว) ของ เชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยนี้ที่มีค่ามากที่สุดคือ กะลาตาล รองลงมาคือ กระจินยักษ์ และผักตบชวา ตามลำดับ (97.97%, 94.70% และ 65.82% ตามลำดับ) ส่วนปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัย จะเห็นว่า ผักตบชวามีปริมาณเถ้าสูงสุด รองลงมาคือกระจินยักษ์ และกะลาตาล ตามลำดับ (34.18%, 5.30% และ 2.03% ตามลำดับ) การที่ผักตบชวา มีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง ส่งผลให้มีค่าพลังงานต่ำกว่า พืชยืนต้นที่ปลูกเพื่อใช้เนื้อไม้เป็นพลังงานหรือวัตถุประสงค์อื่นๆโดยเฉพาะ เช่น กะลาตาลและกระจินยักษ์ การมีส่วนเถ้าในเชื้อเพลิงชีวมวลที่สูงนอกจากจะมีผลต่อค่าความร้อนแล้ว ยังส่งผลต่อปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นเถ้าลอยหรือเถ้าหนักก็ตาม ส่วนปริมาณสารที่ระเหยได้และคาร์บอนคงตัว นั้น แสดงว่ากะลาตาลสามารถติดไฟได้ง่ายและถูกเผาไหม้อยู่ได้นานกว่ากระจินยักษ์ และผักตบชวา ชีวมวลทุกชนิดจะมีปริมาณสารระเหยมากกว่าถ่านหินแสดงได้ว่า ชีวมวลติดไฟและถูกเผาไหม้ได้ง่ายกว่า ถ่านหินถึงแม้ว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและควบคุมได้ยาก ปริมาณสารระเหยที่สูงมากอาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเผาไหม้ทั้งหมด จากตารางที่ 4.3 ปริมาณสารระเหยของกะลาตาลมีปริมาณมากที่สุดจึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งสอดคล้องกับการตลาดที่กำหนดราคาชีวมวลจาก ปริมาณสารระเหยในชีวมวลนั้นๆ แทนการกำหนดราคาจากน้ำหนักชีวมวล (เลขฐาน 10, 2560) ใน ส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในกะลาตาลปริมาณคาร์บอนคงตัวมากที่สุด ปริมาณคาร์บอนคงตัวนี้มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล ถ้ามีค่ามากขึ้นความเป็นเชื้อเพลิงก็จะมีค่ามากขึ้นตามไป ด้วย ในส่วนความชื้นในชีวมวลถ้ามีปริมาณมากจะส่งผลต่อให้ค่าความร้อนที่ต่ำลง ชีวมวลในงานวิจัยนี้ที่มีค่าความชื้นในชีวมวลน้อยที่สุดคือ กะลาตาล รองลงมาคือ ผักตบชวา และกระจินยักษ์ ตามลำดับ (6.31%, 6.33% และ 6.96% ตามลำดับ) ดังนั้นค่าความร้อนสุทธิสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการทำให้ชีวมวลนั้นแห้งก่อน

4.1.3 ผลการวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Heating Value)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ บอมบ์ แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้สำหรับการวัดค่าพลังงานความร้อน โดยมีการแสดงค่าพลังงานความร้อนมี 2 แบบ คือ 1) ค่าความร้อนทั้งหมด (Gross Calorific Value, GCV) หรือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value: HHV) และ 2) ค่าความร้อนสุทธิ (Net Calorific Value, NCV) หรือค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value: LHV) ความแตกต่างระหว่างค่าความร้อนทั้งหมดและค่าความร้อนสุทธิ จึงมีค่าเท่ากับความร้อนของการระเหยน้ำทั้งที่เกิดขึ้นขณะเผาไหม้และที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเริ่มต้น (จากของเหลวกลายเป็นไอ) โดยค่าความร้อนสูง สามารถหาได้โดยใช้เครื่องบอมบ์ แคลอริมิเตอร์ ตามสภาพตัวอย่างที่ได้รับ (as-received) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ส่วนค่าความร้อนต่ำ สามารถหาได้โดยใช้วิธีการคำนวณจากค่าความ

ร้อนทั้งหมด โดยนำค่าความร้อนทั้งที่ระดับความชื้นต่างๆที่ได้มาคำนวณหาค่าความร้อนสุทธิที่ระดับความชื้นต่างๆ ดังนี้

$$LHV^r = HHV^r - 24.42(W^e + 8.94H^r)$$

จากตารางที่ 4.4 สามารถแสดงค่าความร้อนทั้งหมดและค่าความร้อนสุทธิ ที่ระดับความชื้นต่างๆ ได้ที่สภาพอบแห้ง (0%) dry basis ได้อีกด้วย (ตัวอย่างการคำนวณการเปลี่ยนฐานอยู่ในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง และค่าความร้อนต่ำ ที่ระดับความชื้นต่างๆ

ค่าความร้อน	กะลาตาล		ผักตบชวา		กระถินยักษ์	
	(kJ•kg ⁻¹ ,arb)	(kJ•kg ⁻¹ ,db)	(kJ•kg ⁻¹ ,arb)	(kJ•kg ⁻¹ ,db)	(kJ•kg ⁻¹ ,arb)	(kJ•kg ⁻¹ ,db)
HHV	18,010	19,940	10,700	11,790	17,000	19,350
LHV	16,630	18,670	9,670	10,900	15,570	18,060

หมายเหตุ : LHV คือ Low heating value

HHV คือ High heating value

arb คือ as received basis

db คือ dry basis

เมื่อนำค่าความร้อนทั้งหมดของเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยมาเปรียบเทียบกับ ที่สภาวะอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า กะลาตาลให้ค่าความร้อนมากที่สุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ และ ผักตบชวาให้ค่าความร้อนต่ำที่สุด (LHV เท่ากับ 18,670 kJ•kg⁻¹, 18,060 kJ•kg⁻¹, และ 10,900 kJ•kg⁻¹ ตามลำดับ) เนื่องจากองค์ประกอบภายในของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน โดยองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้เช่น สารที่ระเหยได้และคาร์บอนคงตัว เป็นองค์ประกอบที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วให้พลังงานความร้อน ซึ่งจากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าสารระเหยและคาร์บอนคงตัวในกะลาตาลและกระถินยักษ์มีปริมาณมากกว่าผักตบชวา จึงทำให้พลังงานความร้อนที่ได้ออกมาสูงกว่า ส่วนถ้าเป็นองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้จึงไม่ได้ให้พลังงานความร้อน แสดงให้เห็นแล้วว่ากะลาตาลและกระถินยักษ์มีปริมาณที่ได้น้อยกว่าในผักตบชวา ทำให้ผักตบชวาซึ่งมีส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ค่อนข้างมากจึงส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ต่ำกว่ากะลาตาลและกระถินยักษ์

ค่าความร้อนสูงที่แสดงในตารางที่ 4.4 ได้มาจากการใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) ในการวัดค่าความร้อน แต่มีนักวิจัยพยายามหาค่า HHV ของถ่านหินบนพื้นฐานของการ

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ ซึ่งสามารถนำค่ามาเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความร้อนทั้งหมด (HHV) และค่าความร้อนสุทธิ (LHV) มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันโดยสมการของ Mendeleev, Dulong, และ IGT จะคิดส่วนที่ให้พลังงานความร้อนเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน และกำมะถันเป็นหลัก โดยทั่วไปเรานิยมรายงานค่าจากผลของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ เนื่องการวิเคราะห์แบบแยกธาตุค่อนข้างยุ่งยากมีราคาสูงและใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่า (Basu. 2010)

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบค่าความร้อนที่วัดจากเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยวิธีการต่างๆ

วิธีการ	กะลาตาล		ผักตบชวา		กระถินยักษ์	
	HHV (kJ·kg ⁻¹ , db)	LHV (kJ·kg ⁻¹ , db)	HHV (kJ·kg ⁻¹ , db)	LHV (kJ·kg ⁻¹ , db)	HHV (kJ·kg ⁻¹ , db)	LHV (kJ·kg ⁻¹ , db)
บอมบ์ แคลอริมิเตอร์	19,940	18,670	11,790	10,900	19,350	18,060
Mendeleev	20,004.04	18,711.3	11,896.82	11,003.02	19,449.15	18,138.97
DeLong	18,113.50	16,820.76	10,446.63	9,552.83	17,769.78	16,459.60
IGT	19,979.41	18,686.67	11,238.11	10,344.31	19,168.4	17,858.22

หมายเหตุ : LHV คือ Low heating value

HHV คือ High heating value

db คือ dry basis

4.2 ผลการทดลองหาส่วนประกอบองค์รวมและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

การหาส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล ผู้ศึกษาทำการหาเฉพาะส่วนประกอบหลักคือเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) โดย ส่วนประกอบองค์รวมทั้ง 3 นี้จะเป็นปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล ผู้ศึกษาทำการวิเคราะห์ค่า thermogravimetric characteristics (กราฟ TG และ DTG) ของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด โดยในการทดสอบ TGA ผู้ศึกษาควบคุมน้ำหนักของตัวอย่างให้เท่ากันๆ และใช้อัตราการเพิ่มความร้อนที่ 10 °C · min⁻¹ และใช้อากาศเป็นตัวกลางในการทดสอบ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลแต่ละชนิด

ชีวมวลแต่ละชนิดจะมีปริมาณส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลซึ่งได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ที่แตกต่างกัน โดยส่วนประกอบองค์รวมทั้ง 3 นี้จะเป็นปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์

หาปริมาณของส่วนประกอบองค์รวมในชีวมวลทั้ง 3 ชนิดซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.6 (วิธีการสกัดและการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล

ชีวมวล	ปริมาณ (wt.%, dry basis)				รวม
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ	
กระถินยักษ์	38.64	9.9	11.90	39.56	100
กะลาताल	46.01	12.6	21.69	19.7	100
ผักตบชวา	24.37	19.83	25.34	30.46	100

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่า ชีวมวลที่มีปริมาณโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) คือ เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลสมากที่สุดคือกะลาतालซึ่งเท่ากับ 58.61% รองลงมาคือกระถินยักษ์ และผักตบชวา ซึ่งมีปริมาณโฮโลเซลลูโลสเท่ากับ 48.54% และ 44.2% ตามลำดับ เนื่องจากเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสพบมากในไม้เนื้ออ่อน ซึ่งกะลาतालเป็นหนึ่งในพืชตระกูลไม้เนื้ออ่อน จึงมีปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสมากกว่ากระถินยักษ์ สำหรับชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุด คือ ผักตบชวา รองลงมาคือกะลาताल และกระถินยักษ์มีปริมาณลิกนินต่ำที่สุด (25.34%, 21.69%, และ 11.90% ตามลำดับ) จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของอโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์ และคณะ (2562) ที่ระบุว่ากระถินยักษ์มีค่าลิกนินต่ำ ซึ่งจะพบลิกนินในส่วนแกนไม้และเปลือกไม้ ส่วนอื่นๆของกระถินยักษ์พบลิกนินในปริมาณที่น้อยมาก เมื่อพิจารณาปริมาณลิกนินในกะลาतालและกระถินยักษ์พบว่า กะลาतालมีปริมาณลิกนินที่สูงกว่า ซึ่งปริมาณดังกล่าวจะส่งผลต่อค่าความร้อนสูง (HHV) หมายถึงปริมาณลิกนินสูง ปริมาณ HHV ก็สูงตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับของ Demirbas (2000) ที่ได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูง (HHV) กับ ปริมาณลิกนิน อีกทั้งในกระถินยักษ์มีค่าความร้อนค่อนข้างสูงเป็นผลให้ค่าความร้อนต่ำกว่า ทั้งนี้จะเห็นว่าผักตบชวามีปริมาณลิกนินที่สูงที่สุดแต่ให้ค่าความร้อนสูง (HHV) น้อยกว่ากระถินยักษ์และกะลาतालเนื่องมาจากผักตบชวามีปริมาณชี้เถ้าสูงมากเช่นกันซึ่งแสดงในตาราง 4.3 ชี้เถ้ามีผลกระทบต่อค่าความร้อนของชีวมวล ปริมาณชี้เถ้าสูงจะให้ค่าความร้อนต่ำ

ไม้แต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีค่าความแข็งสูงคือมากกว่า $1,000 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (กรมป่าไม้, 2548) และสำหรับไม้ชนิดเดียวกันแล้ว ไม้ที่มีอายุมากกว่าจะมีปริมาณลิกนินมากกว่าเช่นกัน (Robert, 2000) ชีวมวลที่ทำการทดสอบทั้ง 3 ชนิดที่มีปริมาณส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลคือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รวมกันมีปริมาณสูงที่สุดคือกะลาताल ผักตบชวา และกระถินยักษ์ ในปริมาณ 80.3%,

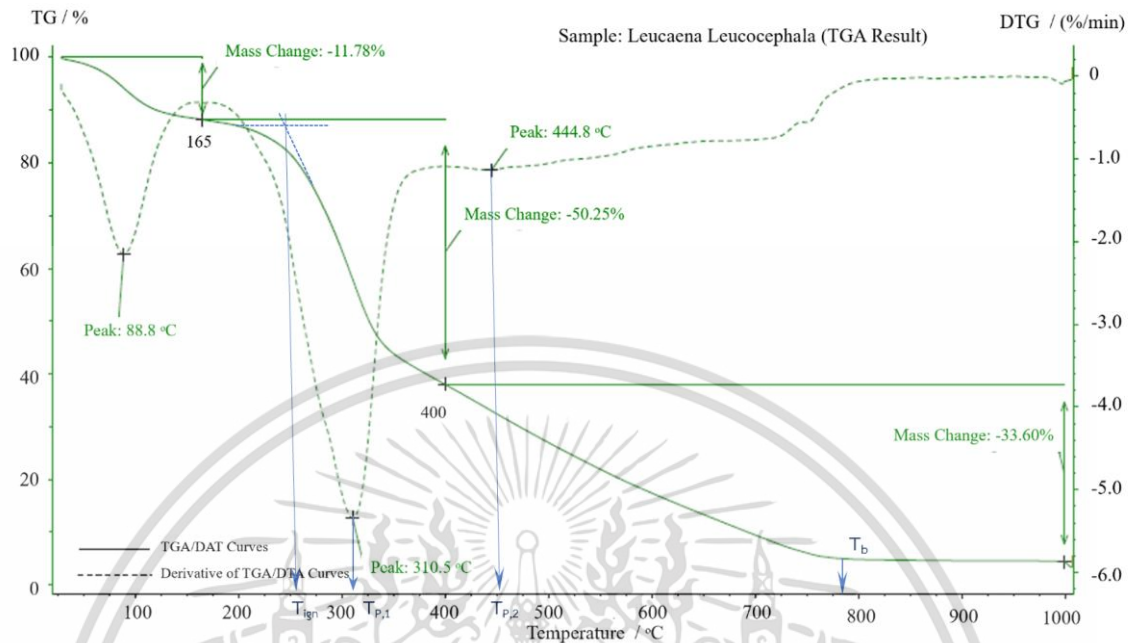
69.54% และ 60.44% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวจะส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อน (ค่าความร้อนโดยรวม) ของชีวมวลตัวนั้นด้วย ดังเช่นปริมาณส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลของกะลาตาลมีค่าสูงสุดน่าจะมีแนวโน้มให้ค่าพลังงานความร้อนสูงตามไปด้วย

4.2.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

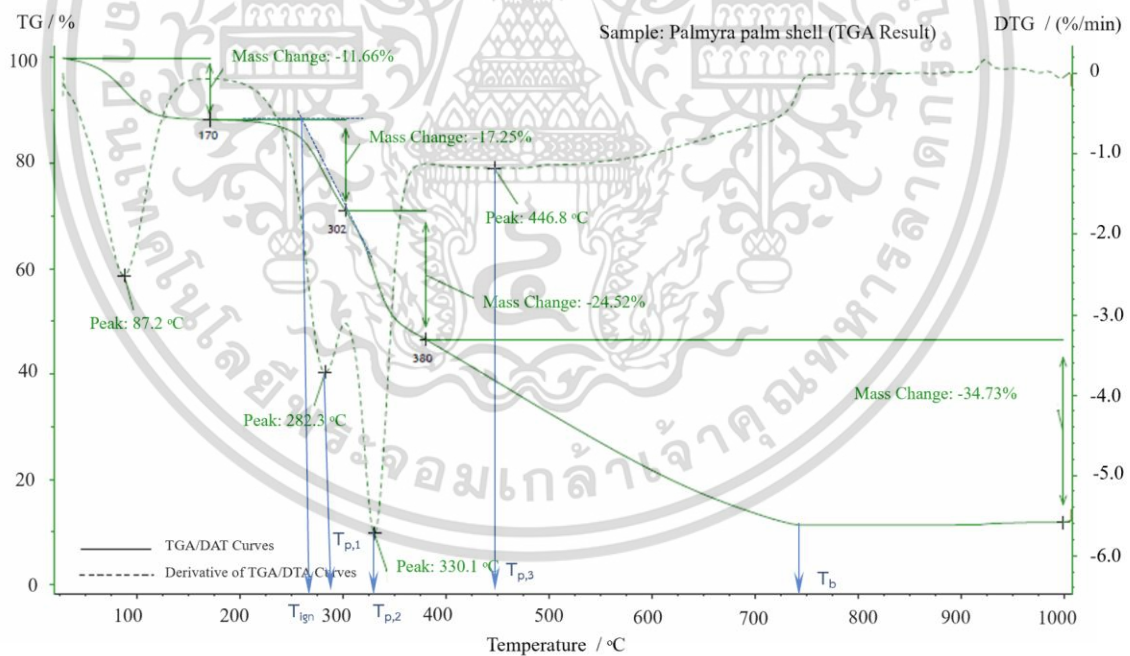
จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C โดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์คืออุณหภูมิ 30 °C ถึง 1000 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C \cdot min⁻¹ ทดสอบภายใต้บรรยากาศอากาศ (air) การสลายตัวทางความร้อนที่สามารถสังเกตได้ จะแสดงพฤติกรรมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการการสลายตัวของชีวมวล เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำๆคือ เฮมิเซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 160 – 360 °C เซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ 240 – 400 °C ลิกนินมีอัตราการสลายตัวต่ำแต่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวกว้าง คือช่วงอุณหภูมิ 150 – 900 °C

รูปที่ 4.1 แสดง TG/DTG ของ กระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา (รูปที่ 4.1a, b, และ c ตามลำดับ) มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุดอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200 – 400 °C โดยที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C พบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากชีวมวลทั้ง 3 ชนิดถูกกำจัดความชื้น เมื่อพิจารณาผักตบชวาพบการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 285 – 290 °C ซึ่งเป็นการสลายตัวของโครงสร้างเซลลูโลส

กระถินยักษ์และกะลาตาล เป็นพืชที่มีปริมาณโครงสร้างไฮโดรเซลลูโลสจำนวนมาก (เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลส) ทำให้พบการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 310 °C และ 330 °C อุณหภูมิการสลายตัวของโครงสร้างไฮโดรเซลลูโลสในกระถินยักษ์และกะลาตาล สูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และกะลาตาลมีปริมาณสารระเหยมากที่สุด ปริมาณ 71.65% ซึ่งโดยปกติกลไกการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 200 – 430 °C จะเป็นกระบวนการเอาสารระเหยออก (devolatilization) และที่อุณหภูมิ 440 – 700 °C เป็นช่วงการเผาไหม้สารระเหยและถ่านชาร์ (Cagnon et al. 2009) ซึ่งพบว่ากะลาตาลมีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 280 °C และที่ 330 °C (เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลส) ซึ่งเป็นการสลายตัวของโครงสร้างไฮโดรเซลลูโลส



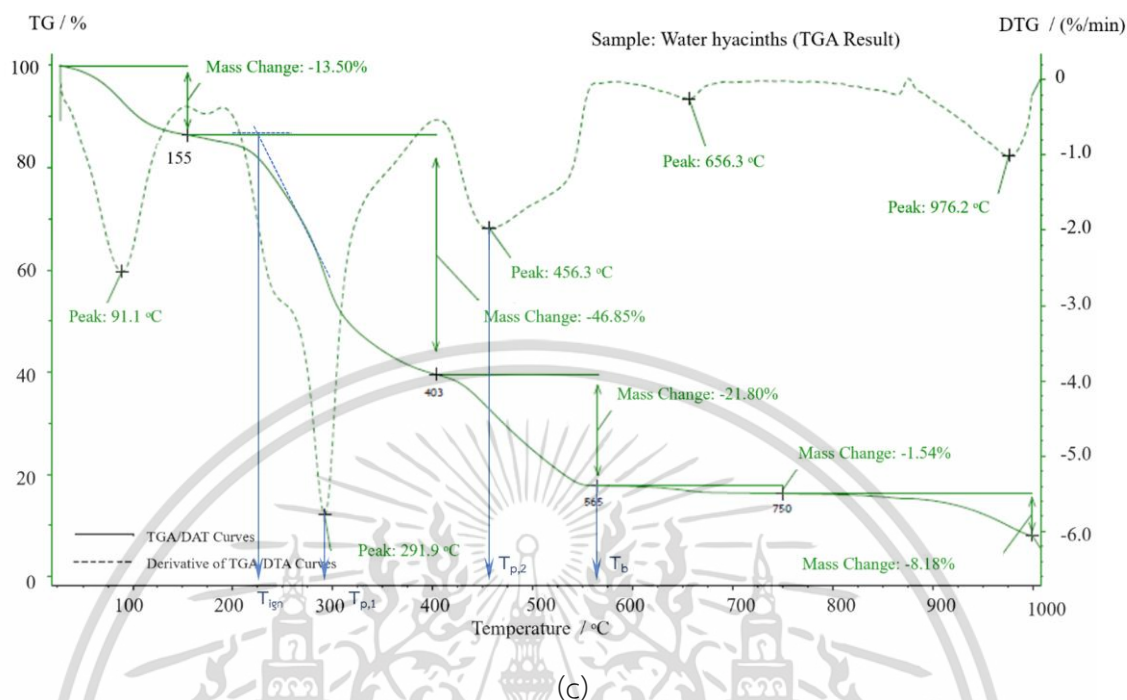
(a)



(b)

รูปที่ 4.1 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$
(a คือ กระจินยักษ์ b คือ กะลาตาล c คือ ผักตบชวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer (STA), NETZSCH: STA449C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$
(a คือ กระจินยักษ์ b คือ กะลาตาล c คือ ผักตบชวา) (ต่อ)

การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ด้วย TGA ของกระจินยักษ์ กะลาตาลและผักตบชวา จากรูปที่ 4.1 คือกราฟ TG/DTG ของกระจินยักษ์ กะลาตาลและผักตบชวา เมื่อข้อมูล TG (เส้นทึบ) แสดงการสูญเสียน้ำหนักต่ออุณหภูมิในเครื่องวิเคราะห์ TGA กราฟ DTG (เส้นปะ) แสดง อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของชีวมวลต่ออุณหภูมิภายในเตา จากการวิเคราะห์กราฟ TG/DTG พบว่ากระจินยักษ์และผักตบชวาเกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วงหลัก ส่วนกะลาตาลเกิดการเปลี่ยนแปลง 3 ช่วงหลักซึ่งไม่รวมช่วงการระเหยหรือกำจัดความชื้นในชีวมวล สังเกตจากการทดสอบ TGA อุณหภูมิภายในเตาเพิ่มขึ้น การสูญเสียน้ำหนักจากการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบทางโครงสร้างของชีวมวลจะเกิดขึ้นตามลำดับซึ่งบางส่วนจะเห็นได้อย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

จากที่กล่าวมาในบทที่ 2 การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ $160 - 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามด้วยการสลายของเซลลูโลส มีช่วงอุณหภูมิ $240 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และลิกนินมีอัตราการสลายตัวต่ำแต่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวกว้าง มีช่วงอุณหภูมิ $150 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ การอ้างอิงอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะแสดงถึงลักษณะของช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างที่ชีวมวลทั้ง 3 มีการสลายตัว

จากรูปที่ 4.1 ที่ช่วงอุณหภูมิ $160 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสซึ่ง

เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน รูปที่ 4.1 (a) แสดงการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์ เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วงหลัก ตามอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด อุณหภูมิที่ 1 ($T_{p,1}$) คือ $310.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิที่ 2 ($T_{p,2}$) คือ $444.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่า อุณหภูมิที่ 1 ($T_{p,1}$) เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเป็นหลักและรวมถึงการสลายตัวของสารอื่นและลิกนินบางส่วน

รูปที่ 4.1 (b) แสดงการสลายตัวทางความร้อนของกะลาตาล เกิดการเปลี่ยนแปลง 3 ช่วงหลัก อุณหภูมิที่ 1 ($T_{p,1}$) คือ $282.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส อุณหภูมิที่ 2 ($T_{p,2}$) คือ $330.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงการสลายตัวของเซลลูโลส ซึ่งในกะลาตาลมีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างสูง และ อุณหภูมิที่ 3 ($T_{p,3}$) คือ $446.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน

รูปที่ 4.1 (c) แสดงการสลายตัวทางความร้อนของผักตบชวา เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วงหลัก อุณหภูมิที่ 1 ($T_{p,1}$) คือ $291.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิที่ 2 ($T_{p,2}$) คือ $456.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้าย (ที่อุณหภูมิมากกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) การสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ถูกกระตุ้นโดยการสลายตัวของลิกนินตามด้วยการเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านชาร์ (ออกซิเดชัน ชาร์)

เนื่องจากในปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดเบดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีความร้อนสูง และเกิดการปั่นป่วนภายในเตา (Turbulent) ในงานวิจัยไม่สามารถมองเห็นภายในเตาเผาได้เราจึงต้องหาพฤติกรรมของการเผาไหม้เบื้องต้นโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ผ่านกราฟ TG และ DTG ร่วมกัน ซึ่งจะช่วยให้เรารู้ค่าอุณหภูมิการเริ่มติดไฟ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ชีวมวลหมด (T_b) พบว่า กระถินยักษ์มี อุณหภูมิติดไฟ (T_{ign}) (สามารถหาได้ตามวิธีของ Wang and Yan (2008) โดยได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 รูปที่ 2.12) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) (คืออุณหภูมิเชื้อเพลิงเผาไหม้ได้หมดสิ้น โดยสังเกตจากไม่มีการสูญเสียน้ำหนักบนกราฟ TG) ที่ $256\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ กะลาตาลมี อุณหภูมิติดไฟ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) ที่ $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $745\text{ }^{\circ}\text{C}$ และผักตบชวามี อุณหภูมิติดไฟ (T_{ign}) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) ที่ $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.7 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า จากอุณหภูมิการติดไฟ, อุณหภูมิที่ 1 ($T_{p,1}$), อุณหภูมิที่ 2 ($T_{p,2}$), อุณหภูมิที่ 3 ($T_{p,3}$), และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (T_b) ของชีวมวลทั้ง 3 ชนิดเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงในระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดเบดที่ อุณหภูมิสูง (ประมาณ $700 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) อีกทั้งจะเห็นว่าการเผาไหม้ผักตบชวาสามารถเกิดขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระถินยักษ์และกะลาตาล ที่มีโครงสร้างแข็ง และน้ำหนักเป็นอุปสรรคเนื่องจากขณะเผาอาจเกิดการรวมตัวหรือกองรวมกันที่บริเวณก้นเตาทำให้อุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้สูง การที่ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดในงานวิจัยมีอุณหภูมิการจุดติดไฟต่ำกว่า ถ่านหินซับบิทูมินัสมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงว่าชีวมวลเกิดหรือไวต่อปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าถ่านหิน

ตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ด้วย TGA ของกระถินยักษ์ กะลาตาลและ ผักตบชวา

เชื้อเพลิง	อุณหภูมิ (°C)				อุณหภูมิที่สิ้นสุด การเผาไหม้ (T _b)
	อุณหภูมิตั้ง ไฟ (T _{ign})	Peak 1	Peak 2	Peak 3	
กระถินยักษ์	256	310.5	444.8	-	780
กะลาตาล	270	282.3	330.8	446.8	745
ผักตบชวา	225	291.9	456.3	-	565

4.3 ผลของพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน

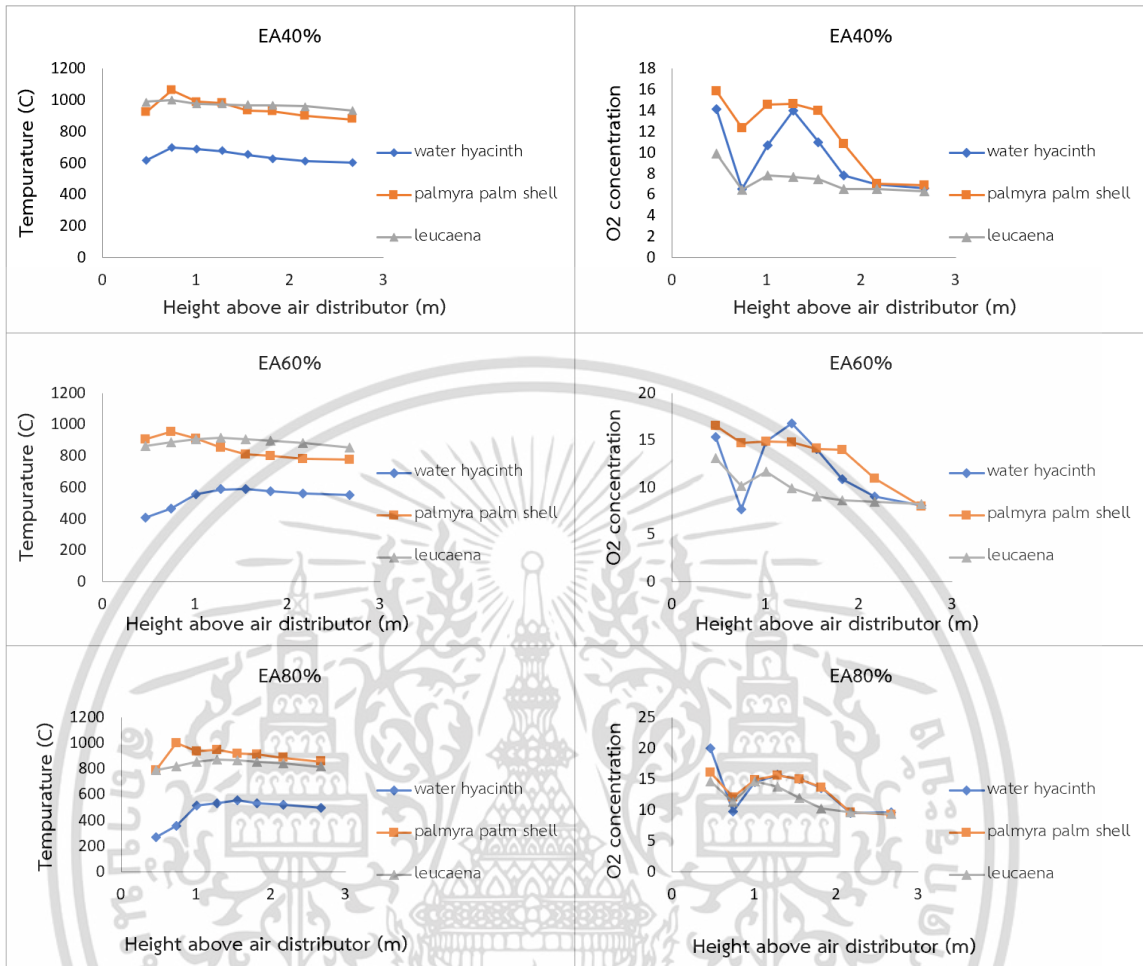
การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดได้แก่ กะลาตาล กระถินยักษ์ และ ผักตบชวา (ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีสัดส่วนส่วนประกอบองค์รวมที่ แตกต่างกัน) กับอากาศส่วนเกินที่ป้อนในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน โดยจะแบ่งการ ทดสอบออกเป็นสามส่วน คือ

- (1) พฤติกรรมของอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน
- (2) ความเข้มข้นและมลพิษที่เกิดขึ้น (CO และ NO) ในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน
- (3) การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน

4.3.1 ผลของพฤติกรรมของอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน

รูปที่ 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิ (a) และความเข้มข้นของออกซิเจน (b) ที่เกิดขึ้นตามระดับความสูงของเตา (axial temperature and O₂ concentration profiles) ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน ที่มีเบดเป็นทราย ใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงในระดับคงที่ประมาณ 45 kg·hr⁻¹ เมื่อทดสอบที่อากาศส่วนเกินแตกต่างกันประมาณ 40% 60% และ 80% (วิธีการคำนวณปริมาณอากาศส่วนเกินตามทฤษฎีอยู่ในภาคผนวก ก) ของแต่ละชีวมวลที่มีส่วนประกอบองค์รวมแตกต่างกัน ตามลำดับ จากรูปที่ 4.2a พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของทุกการทดลองมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในส่วนทรงกรวยของเตาเผา (ความสูงต่ำกว่า 90 cm.) จากนั้นค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงของเตา เตาเผา

อุณหภูมิสูงขึ้นและสูงที่สุดบริเวณความสูงประมาณ 70 - 90 cm. ซึ่งเป็นบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งการติดตั้ง screw feeder ที่ใช้ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต ระดับนี้จะมีค่าความร้อนที่ปลดปล่อยมาจากห้องเผาไหม้ค่อนข้างสูง และจะเกิดการถ่ายเทไปสู่บริเวณด้านบนของเตาทำให้ค่าความร้อนจะลดลงตามความสูงของเตา เช่นเดียวกับอุณหภูมิ ซึ่งทำให้มีค่าลดลงในส่วนที่เป็นทรงกระบอกของเตาเผา (ระยะตั้งแต่ 90 cm. ขึ้นไป) มีการลดลงของอุณหภูมิทุกการทดลองเนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา และจากการทดสอบเมื่อศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบองค์รวมพบว่าถ้าทำการทดสอบที่อากาศส่วนเกินปริมาณโดยประมาณ 40% 60% และ 80% ตามลำดับ พบว่าส่วนประกอบองค์รวมมีผลกระทบต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากระหว่างการทดลองพบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบองค์รวม (เซลลูโลส+เฮมิเซลลูโลส+ลิกนิน) ปริมาณมากจะได้อุณหภูมิเผาไหม้ที่สูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้กะลาตาลีอุณหภูมิเผาไหม้ที่สูงสุดเท่ากับ 1,062 °C รองลงมาคือกระถินยักษ์ และผักตบชวา ซึ่งได้อุณหภูมิเผาไหม้เท่ากับ 1,000 °C และ 698 °C ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชีวมวลแต่ละชนิดมีไม่มากนัก (จากรูปที่ 4.2a อุณหภูมิของกะลาตาลีวัดตามความสูงของเตาเผาได้ค่าอุณหภูมิไม่ต่างกันมากนัก อุณหภูมิของกระถินยักษ์และผักตบชวาเป็นไปในลักษณะเดียวกัน) ในขณะที่ถ้าศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนเกินในชีวมวลชนิดเดียวกันกับความเข้มข้นออกซิเจนตลอดความสูงเตา (แสดงในรูปที่ 4.2b) พบว่าการกระจายตัวของออกซิเจนภายในเตามีแนวโน้มลดลงตลอดความสูงของเตาเนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะสังเกตได้ว่า การลดลงของออกซิเจนในส่วนกรวยมีอัตราการลดลงสูงกว่าส่วนทรงกระบอกของเตา เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นในส่วนทรงกรวยเป็นหลัก และออกซิเจนในส่วนทรงกรวยก็ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้มากขึ้น ดังสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของเส้นกราฟ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตนี้ใช้หัวเผาในการเพิ่มความร้อนให้แก่เบต ซึ่งในการใช้งานพัฒนาของหัวเผาจะต้องทำงานอยู่ตลอดเวลาถึงแม้ว่าจะดับหัวเผาไปแล้ว เบตที่มีความร้อนในเตาเผาอาจจะทำความเสียหายแก่หัวเผาได้ จึงจำเป็นต้องเปิดพัดลมอยู่ตลอดเวลา ซึ่งพัดลมนี้ถือว่าเป็นพัดลมที่ใช้จ่ายอากาศหุติยภูมิให้กับเตาเผาด้วยในเวลาเดียวกัน ทำให้เมื่อทำการวัดความเข้มข้นออกซิเจนตลอดความสูงของเตา จะพบว่ามีผลกระทบจากอากาศหุติยภูมิดังกล่าว กล่าวคือ ความเข้มข้นของออกซิเจนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในตำแหน่งที่ติดตั้งหัวเผา (ความสูงประมาณ 90 - 100 cm.) และหลังจากนั้นความเข้มข้นของออกซิเจนก็จะลดลงเรื่อยๆตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อยู่บริเวณทรงกระบอกของเตา



(a)

(b)

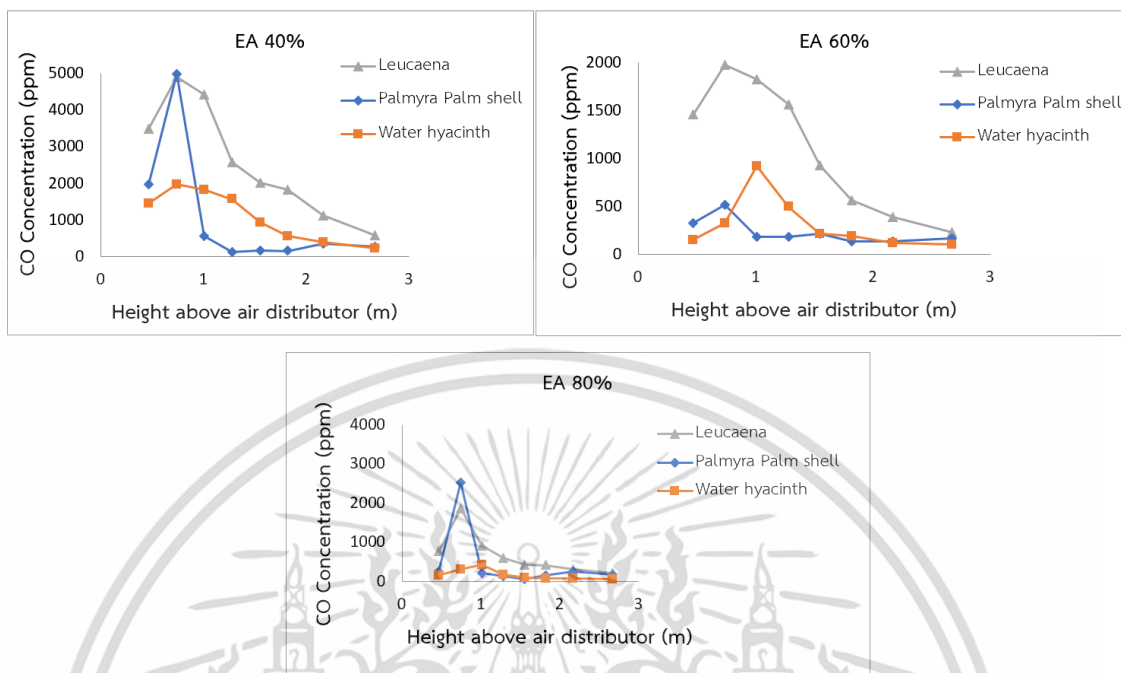
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของ excess air ต่อ axial temperature (a) และ O₂ concentration (b) profiles ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน

4.3.2 ผลของความเข้มข้นและมลพิษที่เกิดขึ้น (CO และ NO) ในการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน

ความอันตรายของหมอกทางโฟโตเคมี (Photochemical Smog) เกิดจากแก๊สต่างๆ (CO, VOC, NO) จากการเผาไหม้ ซึ่ง NO_x นี้เป็นสาเหตุของการเกิด O₃ ในระดับต่ำที่เป็นพิษอีกทั้งยังทำลาย O₃ ในบรรยากาศอีกด้วยซึ่งในงานวิจัยของ Van Loo and Koppejaw (2008) อ้างถึงใน Basu (2010) พบว่ามลพิษจากไนตรัสออกไซด์มาจากการออกซิเดชั่นเชื้อเพลิงไนโตรเจนจากการเผาไหม้ ชีวมวล ส่วน CO นี้คือผลผลิตจากการเผาไหม้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งจะทำให้สิ่งมีชีวิตเสียชีวิตได้หากได้รับในปริมาณมาก

เกินไป ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณแก๊สดังกล่าวจึงเป็นเรื่องจำเป็นเมื่อชีวมวลถูกนำมาใช้โดยการเผาไหม้ เพื่อให้ได้พลังงานที่มนุษย์ต้องการ

รูปที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์ตามแนวความสูงของเตา (axial CO concentration profiles) ทำการทดสอบโดยมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบโดยรวม โดยทดสอบที่อากาศส่วนเกินที่ประมาณ 40% 60% และ 80% สามารถแบ่งการกระจายตัวของคาร์บอนมอนนอกไซด์ ออกเป็น 2 ช่วงตามระดับความสูงของเตา คือ ในช่วงแรก (ความสูงน้อยกว่า 70 cm.) เป็นช่วงที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิง ความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 60-70 cm. เนื่องจากการปล่อยสารระเหย (devolatilization) ของเชื้อเพลิงและออกซิเดชัน และคาร์บอนในถ่าน (Char-C) (Turn. 2006) ในช่วงที่สอง (ความสูงมากกว่า 70 cm.) ความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด อันเป็นผลเนื่องจากอากาศที่ถูกจ่ายเข้าสู่เตาเผา ทำให้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อได้รับอากาศหรือออกซิเจนเพิ่มเกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง CO กับ O และไอน้ำ) ซึ่งพบทั้งการทดสอบที่อากาศส่วนเกิน 40% 60% และ 80% และถ้าพิจารณาในแต่ละอากาศส่วนเกินพบว่ากระถินยักษ์ มีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์สูงที่สุด สาเหตุมาจากการที่กระถินยักษ์มีปริมาณคาร์บอน และปริมาณความชื้นสูง ส่งผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้การเผาไหม้แล้วได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์สูงตามไปด้วย ถ้าเทียบกับกะลาตาลซึ่งมีปริมาณคาร์บอนสูงสุดแต่มีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่ากระถินยักษ์มาก ซึ่งปริมาณความชื้นจะมีผลต่อการเผาไหม้ ดังนั้นรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์มีเกิดขึ้นจากการเผาไหม้กะลาตาลจะมีปริมาณที่ต่ำกว่ากระถินยักษ์



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของส่วนประกอบของครวมต่อ axial CO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนวนเมื่ออากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80%

จากรูปที่ 4.4 เมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% ของกระถินยักษ์พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆถึงบริเวณความสูง 70 cm. เหนือหัวกระจายลมซึ่งเป็นจุดที่ติดตั้งตัวจ่ายอากาศ (secondary air) และเป็นจุดที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้สูงที่สุด คือ 4,895 ppm เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อวัดปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน (2.67 m. ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง) วัดค่าได้เพียง 586 ppm ในการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ของกระถินยักษ์พบว่ากราฟมีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% โดยวัดค่าที่ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 1,976 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 230 ppm และเมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 80% ก็พบว่ามีลักษณะกราฟและค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ซึ่งที่จุดตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 1,857 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 220 ppm

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics เพื่อหาความแตกต่างในการใช้
อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% ตามลำดับ โดยผู้วิจัยทำการจับคู่อากาศส่วนเกินแต่ละคู่ของการ
เผาไหม้กระถินยักษ์ดังนี้

คู่ที่ 1 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% ได้ค่า t เท่ากับ 4.609**

คู่ที่ 2 อากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 3.096*

คู่ที่ 3 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 4.941**

ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันจะสร้างมลพิษ
คาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% ของกะลาตาลพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอน
นอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงบริเวณความสูง 70 cm. เหนือหัวกระจายลมซึ่งเป็นจุดที่
ติดตั้งตัวจ่ายอากาศ (secondary air) และเป็นจุดที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์
ได้สูงที่สุด คือ 4,492.4 ppm เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง
อย่างเห็นได้ชัดและเมื่อวัดปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อน
เข้าสู่ไซโคลน (2.67 m. ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง) วัดค่าได้เพียง 270.6 ppm ใน
การทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ของกะลาตาลพบว่ากราฟมีลักษณะเดียวกันกับการ
ทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% โดยวัดค่าที่ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 516.4 ppm และ
บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 163.6 ppm และเมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศ
ส่วนเกินที่ 80% ก็พบว่า มีลักษณะกราฟและค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ซึ่งที่จุด
ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 2,523.9 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า
176.8 ppm

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics เพื่อหาความแตกต่างในการใช้
อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% โดยผู้วิจัยทำการจับคู่อากาศส่วนเกินแต่ละคู่ของการเผาไหม้
กะลาตาลดังนี้

คู่ที่ 4 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% ได้ค่า t เท่ากับ 1.579

คู่ที่ 5 อากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ -0.940 (เนื่องมาจาก ค่า
 \bar{d} หรือ the mean difference เท่ากับ -239.05 ซึ่งมาจากค่า ผลต่างของค่าเฉลี่ยของอากาศส่วนเกินที่
60% กับอากาศส่วนเกินที่ 80% เมื่อแทนค่าในสูตรคำนวณ t-test จึงมีค่าออกมาเป็นลบ ค่า t อาจจะ
เป็นค่าบวกหรือลบก็ได้ เพราะเวลาพิจารณา เราจะพิจารณาจากค่า sig. เพียงอย่างเดียวก็สามารถสรุป
ผลได้ เนื่องจากค่าสัมบูรณ์ของค่า t จะมีค่าเท่ากัน)

คู่ที่ 6 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 1.896

ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันจะสร้างมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันหมายถึงไม่ว่าผู้วิจัยจะใช้อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% หรือ 80% ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณที่เท่าๆกัน ในบทความของ Sadaka and Johnson (2017) ซึ่งเป็นบทความเกี่ยวกับการเผาไหม้ชีวมวลอธิบายว่าการเพิ่มอากาศส่วนเกินจะทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง โดยตัวอย่างของอากาศส่วนเกินที่จำเป็นสำหรับระบบการเผาไหม้ต่างๆอาจอยู่ในช่วง 5-50% ขึ้นอยู่กับลักษณะของเชื้อเพลิง (fuel characteristics) และการติดตั้งระบบต่างๆ (system configuration) ผลการคำนวณค่า t-test ของกะลาตาลนี้้อธิบายได้ว่าระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลมีการจ่ายอากาศส่วนเกินที่ประมาณ 40% 60% และ 80% ให้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ไม่แตกต่างกันเนื่องมาจากลักษณะของเชื้อเพลิง (fuel characteristics) จากตารางที่ 4.1 พบว่ากะลาตาลมีค่าปริมาณคาร์บอน และคาร์บอนคงตัว ที่มีค่าสูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นอยู่มาก จึงทำให้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่จะทำให้ประมาณคาร์บอนลดลงอย่างมีนัยสำคัญจะต้องเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากกว่า 80% ทั้งนี้อากาศส่วนเกินที่มากกว่า 80% อยู่นอกเหนือจากขอบเขตของงานวิจัยชิ้นนี้และ เมื่อพิจารณาเรื่องประสิทธิภาพการเผาไหม้พบว่าการจ่ายอากาศส่วนเกินตั้งแต่ 60% ก็ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงถึง 99.89% แล้ว ส่วนการติดตั้งระบบต่างๆ (system configuration) อาจจะไม่มิต่อระดับนัยสำคัญเนื่องจากรูปแบบการติดตั้งระบบต่างๆของการเผาไหม้ทำแบบเดียวกันในชีวมวลทุกชนิดที่ทำการทดลอง

เมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% ของผักตบชวาพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงบริเวณความสูง 70 cm. เหนือหัวกระจายลมซึ่งเป็นจุดที่ติดตั้งตัวจ่ายอากาศ (secondary air) และเป็นจุดที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้สูงสุด คือ 1,043 ppm เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อวัดปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน (2.67 m. ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน 6% บนฐานก๊าซแห้ง) วัดค่าได้เพียง 121 ppm ในการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ของผักตบชวาพบว่าการเผาไหม้มีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% โดยวัดค่าที่ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 321 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 98 ppm และเมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 80% ก็พบว่ามิลักษณะกราฟและค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ซึ่งที่จุดตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 302 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 54 ppm จากการทดลองจะสังเกตเห็นว่า ในส่วนล่างของเตา ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของสารระเหย (devolatilization) ที่มีอยู่ในชีวมวลและการเผาไหม้ถ่านที่เกิดขึ้น (char oxidation) ในขณะที่เดียวกันก็มีการออกซิเดชันของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่เกิดขึ้น

ในช่วงนี้เช่นกัน (ส่วนล่างของเตา) โดยปกติแล้วคาร์บอนมอนนอกไซด์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วย ออกซิเจนและไฮดรอกไซด์ (Turns. 2006 อ้างถึงใน Pichet. 2015) เมื่อทำการเพิ่มอากาศส่วนเกินจะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่ทุกตำแหน่งความสูงของเตาจะมีค่าน้อยกว่าอากาศส่วนเกินที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะมีปริมาณออกซิไดเซอร์ (ออกซิเจน) เข้าไปในระบบเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics เพื่อหาความแตกต่างในการใช้อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% โดยผู้วิจัยทำการจับคู่อากาศส่วนเกินแต่ละคู่ของการเผาไหม้ ผักตบชวดังนี้

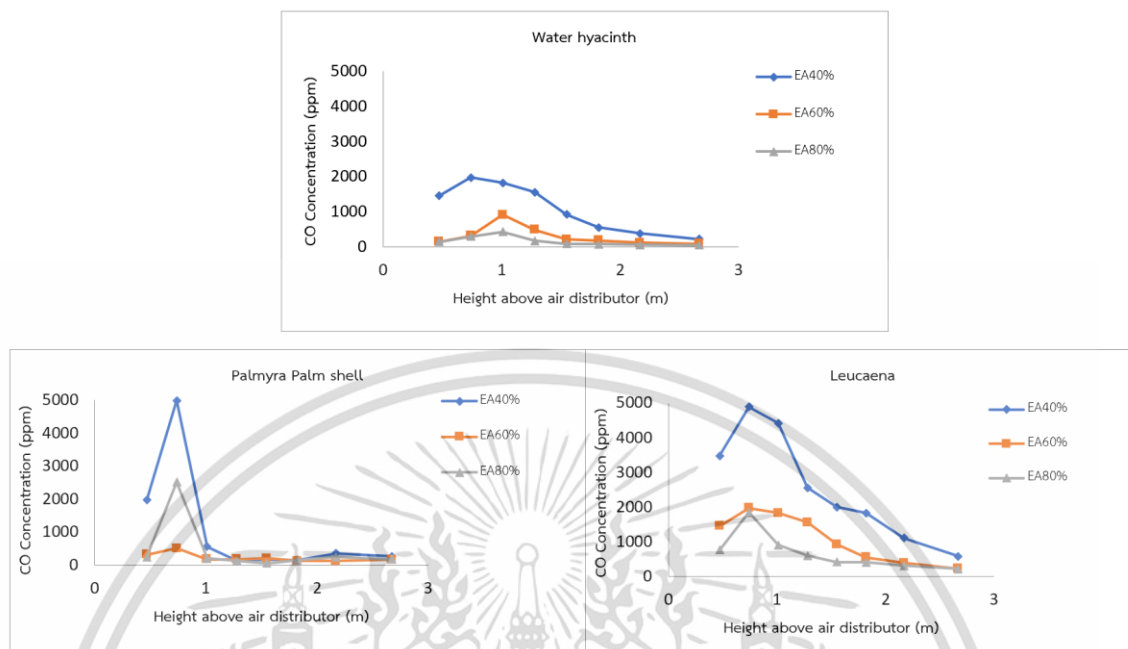
คู่ที่ 7 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% ได้ค่า t เท่ากับ 0.71

คู่ที่ 8 อากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 2.372*

คู่ที่ 9 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 2.618*

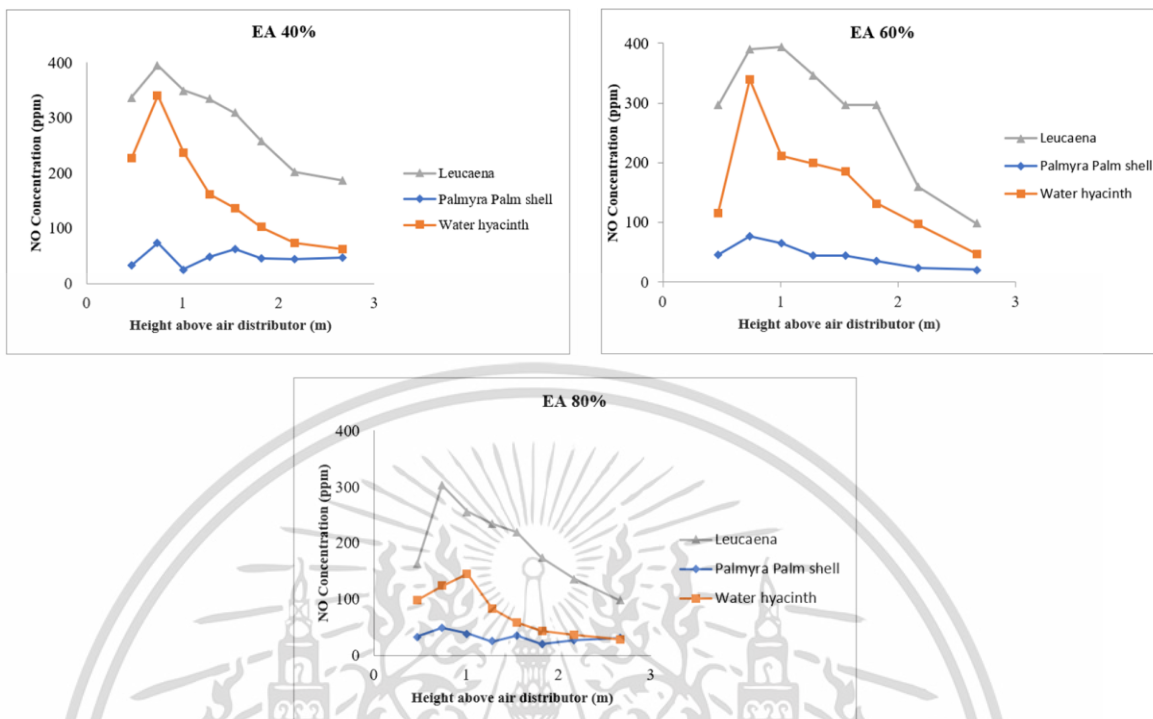
ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% จะสร้างมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% รวมถึงการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% จะสร้างมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากกราฟรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์ตลอดความสูงเตาเผา (axial CO concentration profiles) โดยเมื่อทดสอบที่อากาศส่วนเกินที่ต่างกันคือ 40% 60% และ 80% ของแต่ละชีวมวลเปรียบเทียบกับ พบว่าความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด อันเป็นผลเนื่องมาจากอากาศทุติยภูมิที่ถูกจ่ายเข้าสู่เตาเผาโดยผ่านพัดลมของหัวเผา ทำให้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อได้รับอากาศหรือออกซิเจนเพิ่มเกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์แต่เมื่อทดสอบโดย Paired Samples Statistics พบว่าในกรณีนี้ยกอากาศส่วนเกินทั้ง 40% 60% และ 80% ทำให้เกิดมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่มีปริมาณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญคือ ในผักตบชวาพบว่าเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% จะให้มลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน ถ้าเพิ่มอากาศส่วนเกินที่ 80% จะให้มลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของอากาศส่วนเกินต่อ axial CO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน

รูปที่ 4.5 แสดงค่าความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์ตลอดความสูงเตา (axial NO concentration profile) ทำการทดสอบโดยมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบโดยรวม โดยทดสอบที่อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% พบว่าปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่วัดได้มีค่าน้อยมาก เนื่องจากในชีวมวลทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณไนโตรเจนในองค์ประกอบของชีวมวลต่ำส่งผลให้เกิดแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ต่ำตามไปด้วย และจากกราฟพบว่าผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์สอดคล้องกับปริมาณไนโตรเจนของชีวมวล คือ ไนโตรเจนพบมากในกระถินยักษ์ รองลงมาคือผักตบชวา และต่ำสุดคือกะลาตาล ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์พบมากในกระถินยักษ์ รองลงมาคือผักตบชวา และพบน้อยมากในกะลาตาล ในทุกๆการทดสอบที่อากาศส่วนเกินที่เปลี่ยนไปที่ 40% 60% และ 80% จากรูปที่ 4.5 สามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์ มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจาก การปล่อยสารระเหยของชีวมวลและการออกซิเดชันของสารระเหยที่มีไนโตรเจน N เป็นส่วนประกอบ เช่น HCN NH₃ และกลายเป็น NO ในที่สุด (Werther et al. 2000)



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของส่วนประกอบของครวมต่อ axial NO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนวนเมื่ออากาศส่วนเกิน 40% 60% และ 80%

ในส่วนการทดสอบการเผาไหม้แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 โดยจ่ายอากาศส่วนเกินที่ 40% ในการเผาไหม้กระถินยักษ์พบว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณความสูง 70 cm. เหนือหัวกระจายลมซึ่งเป็นจุดที่ติดตั้งตัวจ่ายอากาศ (secondary air) และเป็นจุดที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์ได้สูงที่สุด คือ 395 ppm เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์มีค่าลดลงและเมื่อวัดปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน (2.67 m. ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน 6% บนฐานก๊าซแห้ง) วัดค่าได้เพียง 187 ppm ในการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ของกระถินยักษ์พบว่ากราฟมีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 40% โดยวัดค่าที่ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 390 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 98 ppm และเมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 80% ก็พบว่ามีลักษณะกราฟและค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ซึ่งที่จุดตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 303 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 98 ppm

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics เพื่อพิจารณาความแตกต่างในการใช้อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% โดยผู้วิจัยทำการจับคู่อากาศส่วนเกินแต่ละคู่ของการเผาไหม้กระถินยักษ์ดังนี้

คู่อุณหภูมิ 10 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% ได้ค่า t เท่ากับ 0.733

คู่อุณหภูมิ 11 อากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 4.793**

คู่อุณหภูมิ 12 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 8.721**

ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% รวมถึงการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสูง

เมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% ของกะลาตาลพบว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนถึงบริเวณความสูง 70 cm. เหนือหัวกระจายลมซึ่งเป็นจุดที่ติดตั้งตัวจ่ายอากาศ (secondary air) และเป็นจุดที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์ได้สูงที่สุด คือ 73.1 ppm เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อวัดปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนอกไซด์บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน (2.67 m. ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง) วัดค่าได้เพียง 47.3 ppm ในการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ของกะลาตาลพบว่ามีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 40% โดยวัดค่าที่ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 76.6 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 21 ppm และเมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 80% ก็พบว่ามีลักษณะกราฟและค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 60% ซึ่งที่จุดตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 49.4 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 31.9 ppm

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics เพื่อพิจารณาความแตกต่างในการใช้อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% โดยผู้วิจัยทำการจับคู่อากาศส่วนเกินแต่ละคู่ของการเผาไหม้กะลาตาลดังนี้

คู่อุณหภูมิ 13 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% ได้ค่า t เท่ากับ 0.347

คู่อุณหภูมิ 14 อากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 2.521**

คู่อุณหภูมิ 15 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 2.861**

ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 60% และ

80% รวมถึงการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสูง

เมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% ของผักตบชวาพบว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงบริเวณความสูง 70 cm. เหนือหัวกระจายลมซึ่งเป็นจุดที่ติดตั้งตัวจ่ายอากาศ (secondary air) และเป็นจุดที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนนอกไซด์ได้สูงที่สุด คือ 341 ppm เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนนอกไซด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อวัดปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนมอนนอกไซด์บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน (2.67 m. ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง) วัดค่าได้เพียง 62 ppm ในการทดสอบการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 60% ของผักตบชวาพบว่ามีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 40% โดยวัดค่าที่ตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 340 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 47 ppm และเมื่อทดสอบการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 80% ก็พบว่ามีลักษณะกราฟและค่าใกล้เคียงกับการเผาไหม้ที่ส่วนเกินที่ 60% ซึ่งที่จุดตำแหน่งความสูง 70 cm. ได้ 124 ppm และบริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลนได้ค่า 29 ppm

เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ Paired Samples Statistics เพื่อพิจารณาความแตกต่างในการใช้อากาศส่วนเกินที่ 40% 60% และ 80% โดยผู้วิจัยทำการจับคู่อากาศส่วนเกินแต่ละคู่ของการเผาไหม้ผักตบชวาดังนี้

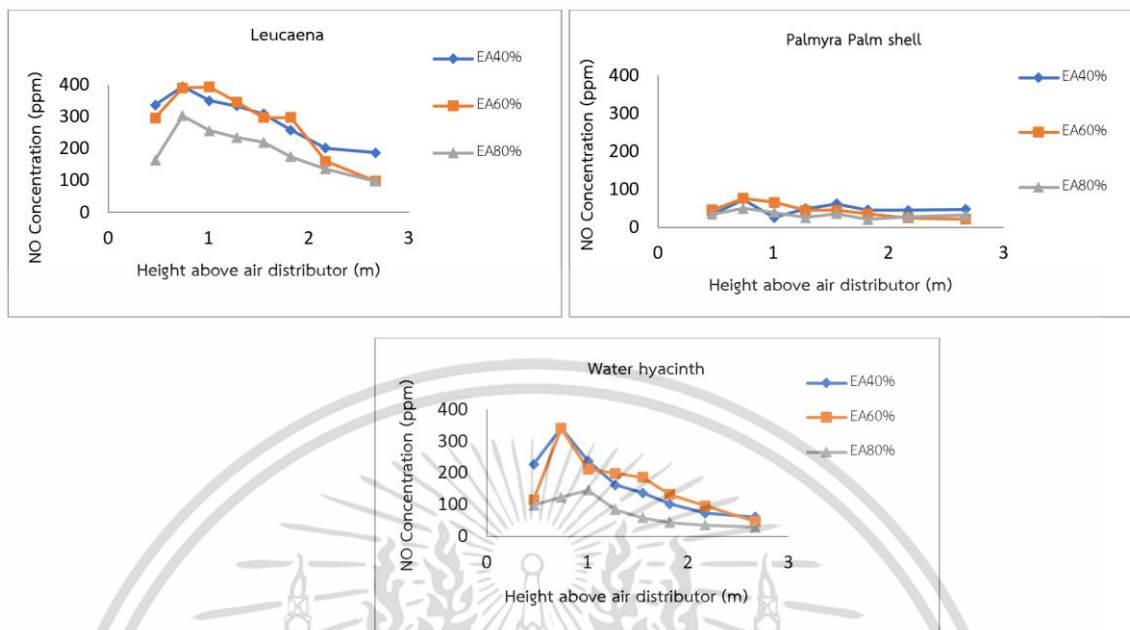
คู่ที่ 16 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% ได้ค่า t เท่ากับ 0.096

คู่ที่ 17 อากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 3.820**

คู่ที่ 18 อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% ได้ค่า t เท่ากับ 4.255**

ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 60% และ 80% รวมถึงการทดสอบอากาศส่วนเกินที่ 40% และ 80% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสูง

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นไนโตรเจนมอนนอกไซด์ตลอดความสูงเตาเผา (axial NO concentration profiles) โดยเมื่อทดสอบจ่ายอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันคือ 40% 60% และ 80% ของแต่ละชีวมวลเปรียบเทียบกัน พบว่าความเข้มข้นไนโตรเจนมอนนอกไซด์มีค่าที่วัดได้น้อยมากไม่เกิน 100 ppm เมื่อทดสอบโดย Paired Samples Statistics พบว่าชีวมวลทั้งสามชนิดที่อากาศส่วนเกินที่ 40% และ 60% จะสร้างมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่ที่อากาศส่วนเกินที่ 80% จะให้มลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสูง



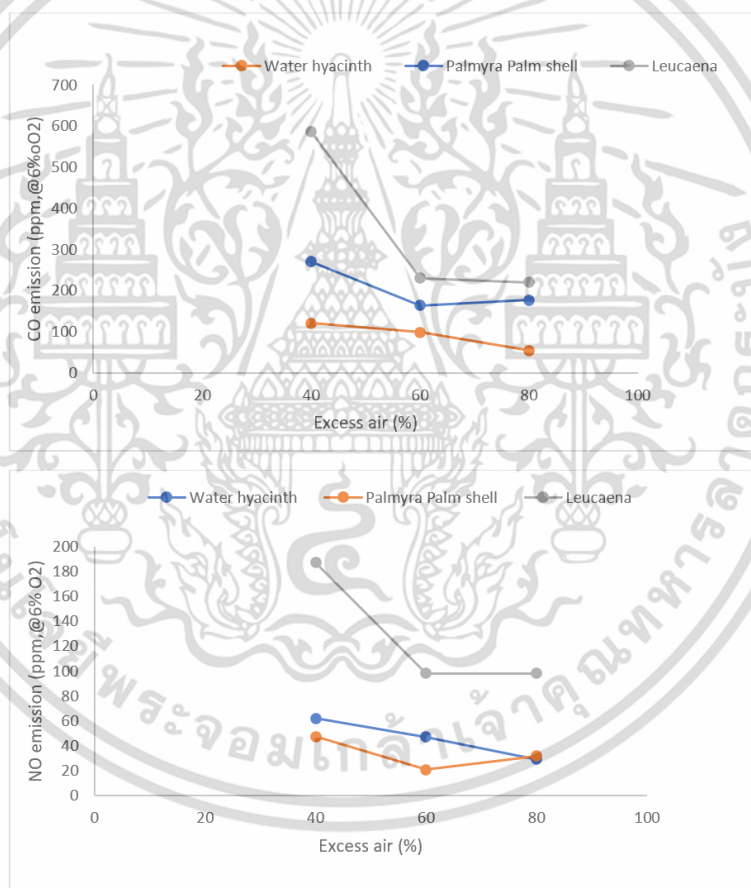
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของอากาศส่วนเกินต่อ axial NO concentration profiles ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน

4.3.3 ผลของมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน

สารมลพิษหลักที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 5 ชนิดได้แก่ อนุภาคแขวนลอยที่มาจากองค์ประกอบอินทรีย์และเชื้อเพลิง แก๊สกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ แก๊สกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยเลือกพิจารณาเฉพาะ CO และ NO ซึ่งเป็นมลพิษที่มีส่วนสำคัญที่ได้จากการเผาไหม้ โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2558) ได้ทำการกำหนดมาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยจำกัดให้มีการปล่อย CO และ NO ไม่เกินกว่า 740 ppm และ 205 ppm คิดที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง CO ที่ฟอร์มตัวจากการเผาไหม้เกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น การเผาไอดิหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้าไม่เพียงพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ ซึ่งเกิดขึ้นในรถยนต์ ส่วนในหม้อไอน้ำสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินจะมีอัตราการปล่อย CO emission ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณ fuel-C และโหลดของหม้อไอน้ำที่มีผลต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ส่วน NO ที่ได้จากการเผาไหม้นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจน และวิธีการเผาไหม้ (สำเร็จ จักรใจ, 2547) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมของชีวมวลแต่ละชนิด ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนเข้าเตาเผา เป็นตัวแปรต้นที่ใช้ในการทดลอง ส่วนปริมาณมลพิษ

คาร์บอนมอนนอกไซด์ และปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน) เป็นตัวแปรตามในการทดลองครั้งนี้

จากรูปที่ 4.7 แสดงปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ และไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ถูกปล่อยจากเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนที่ทดสอบที่ส่วนประกอบของครวมที่ต่างกันและอากาศส่วนเกินที่ต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าส่วนประกอบของครวมและอากาศส่วนเกินมีผลกระทบต่อ การปล่อยมลพิษเป็นอย่างมาก เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน ความเข้มข้นคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนมอนนอกไซด์ลดลงเป็นอย่างมาก และเมื่อเพิ่มสัดส่วนส่วนประกอบของครวม (จากตารางที่ 4.4) ที่อากาศส่วนเกินคงที่จะทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนมอนอกไซด์ มีค่ามากขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.7 การปล่อยมลพิษ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไนโตรเจนมอนนอกไซด์จากเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนที่ทดสอบที่ส่วนประกอบของครวมที่ต่างกันและอากาศส่วนเกินที่ต่างกัน

รูปที่ 4.8 แสดงมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (อัตราส่วนระหว่างโฮโลเซลลูโลสกับลิกนิน) ที่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิง จากรูปที่ 4.8 การทดสอบทั้งหมด มลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าสูงที่สุดถูกพบเมื่อทำการทดสอบโดยใช้อากาศส่วนเกิน 40% และใช้เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมที่ 4.08 (กระถินยักษ์) เป็นเชื้อเพลิง โดยค่ามลพิษที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 586 ppm (ค่ามาตรฐานอากาศเสียประเภทคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่เกิน 740 ppm) ผลก็มาจากที่ได้กล่าวมาคือ กระถินยักษ์มีสัดส่วนองค์ประกอบโดยรวมสูง นั่นคือมีปริมาณคาร์บอนสูง และมีความชื้นสูงกว่ากะลาตาล และผักตบชวา ซึ่งค่ามลพิษที่ได้นี้ถือว่ามากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลภายใต้อากาศส่วนเกินอื่นๆ ในขณะที่เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน จาก 40% เป็น 60% และ 80% ค่ามลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมที่แตกต่างกัน

ชีวมวล	ผักตบชวา			กะลาตาล			กระถินยักษ์		
สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (Holocellulose:Lignin) ; X_1	1.74	1.74	1.74	2.7	2.7	2.7	4.08	4.08	4.08
อากาศส่วนเกิน (%) ; X_2	40	60	80	40	60	80	40	60	80
ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ; Y	121	98	54	270.6	163.6	176.8	586	230	220

ในการศึกษามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล เราไม่สามารถจะเอาสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมของชีวมวลแต่ละชนิดมาเป็นตัวกำหนดเพียงอย่างเดียว จะต้องคำนึงถึงปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับเตาเผาด้วยซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงผลกระทบของอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมต่อมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายแนวโน้มที่จะใช้ในการควบคุมการทำงานของเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวนเมื่อใช้ชีวมวลที่มีสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมแตกต่างกันโดยถ้าเพิ่มสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมมากขึ้นและลดอากาศส่วนเกินให้น้อยลง จะ

ทำให้ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปที่ 4.8 จะทำให้เราสามารถเลือกใช้ชีวมวลสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวนที่เหมาะสมกับการควบคุมการทำงานของเตาเผาเพื่อให้ได้ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่น้อยที่สุด

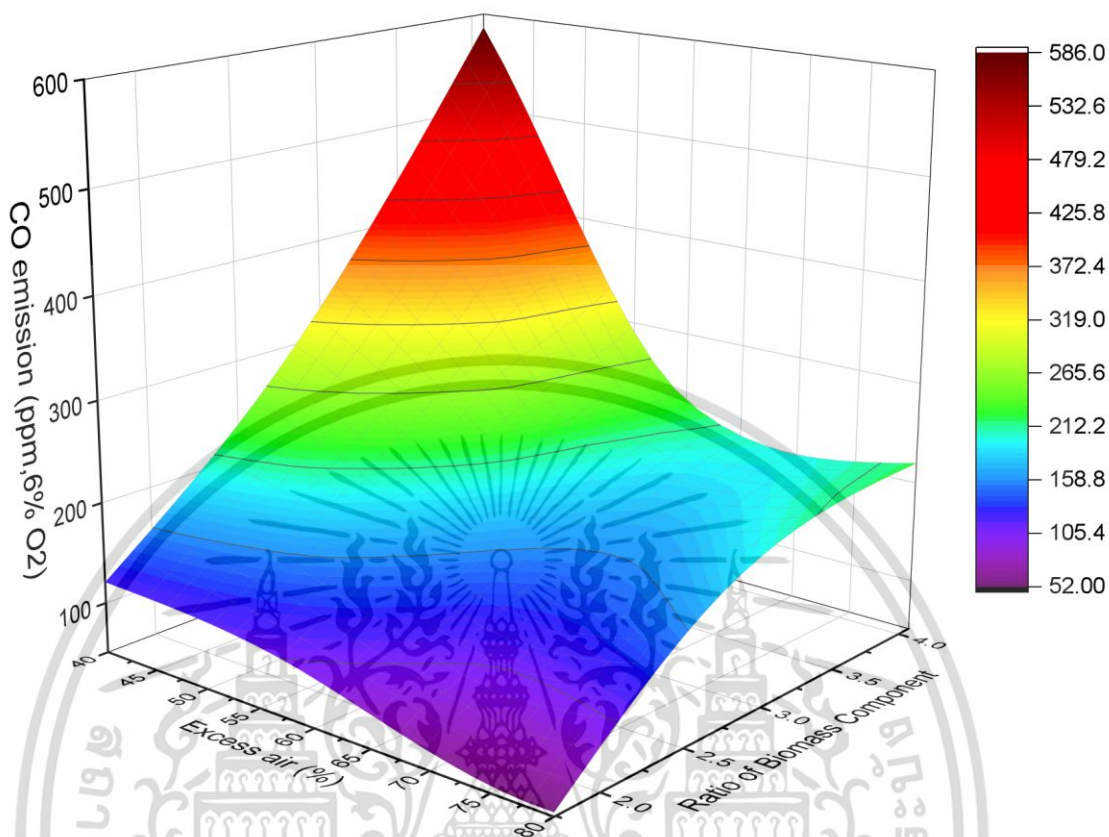
การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way analysis of variance; one-way ANOVA) ใช้สำหรับศึกษาความเหมาะสมของสมการและปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันค่า F-value ที่สูงและค่า p-value ที่ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าสมการและปัจจัยมีความสำคัญ จากผลการวิเคราะห์ในตารางสามารถสรุปได้ว่าสมการแบบ Quadratic เข้ากันได้กับผลของค่าปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง จากการทดลองเนื่องจากมีค่า p-value = 0.017 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 หมายความว่า สัดส่วนองค์ประกอบโดยรวม และปริมาณอากาศส่วนเกินมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

อีกทั้งผู้วิจัยต้องการพยากรณ์ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน 45 kg·hr⁻¹ ดังนั้นการทดลองในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวนจึงต้องคำนึงถึงตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวแปร ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีตัวแปรต้นอยู่มากกว่าหนึ่งตัวแปร โดยในงานวิจัยจะแสดงการวิเคราะห์กรณีที่มีตัวแปรต้นเพียงสองตัว โดยรูปแบบความสัมพันธ์หรือ Regression model จะเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (4.1)$$

$$Y = 169.278 + 108.258 X_1 - 4.390 X_2 \quad (4.2)$$

ผลจากการหาความสัมพันธ์พบว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นแสดงดังสมการที่ 4.2 เป็นการทำนายปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ซึ่งเรียกว่าตัวแปรตาม (Y) โดยมีตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวแปรต้นนั้นคือ สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (%) (X_1) และอากาศส่วนเกิน (%) (X_2) ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9452 จากสมการสามารถระบุถึงอิทธิพลของส่วนประกอบโดยรวมต่อปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ว่าทุกๆ สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมเพิ่มขึ้น 1% จะทำให้เกิดปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ 108.258 ppm แต่ถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินทุกๆ 1% จะช่วยลดปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ 4.39 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างคร่าวๆ ได้ว่า หากต้องการให้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ไม่เพิ่มขึ้นควรจะมีการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินประมาณ 25 เท่าของสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม



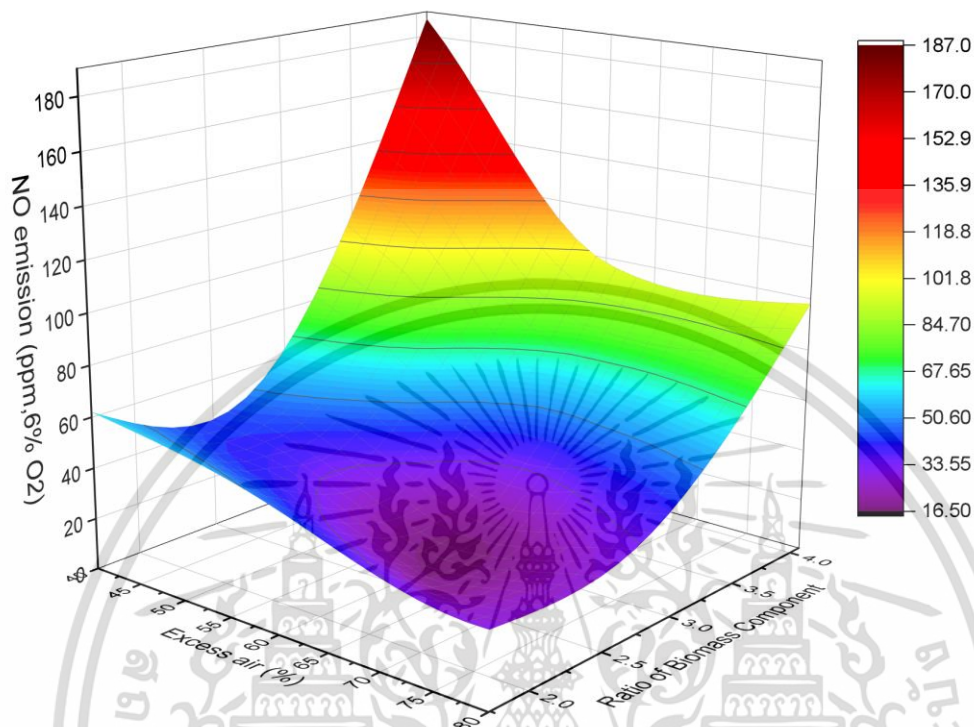
รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมต่อมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way analysis of variance; one-way ANOVA) ใช้สำหรับศึกษาความเหมาะสมของสมการและปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันค่า F-value ที่สูงและค่า p-value ที่ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าสมการและปัจจัยมีความสำคัญ จากผลการวิเคราะห์ในตารางสามารถสรุปได้ว่าสมการแบบ Quadratic เข้ากันได้กับผลของค่าปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง จากการทดลองเนื่องจากมีค่า p-value = 0.036 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 หมายความว่า สัดส่วนองค์ประกอบองค์รวม และปริมาณอากาศส่วนเกินมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

รูปที่ 4.9 แสดงมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ในเตาเผาฟลูอิดไธด์แบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเซลลูโลสกับลิกนิน) ที่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิง จากรูปที่ 4.9 การทดสอบทั้งหมด มลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์มีค่าสูงที่สุดถูกพบเมื่อทำการทดสอบโดยใช้อากาศส่วนเกิน 40% และใช้เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมที่ 4.08 (กระถินยักษ์) เป็นเชื้อเพลิง โดยค่ามลพิษที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 187 ppm (ค่ามาตรฐานอากาศเสียประเภทไนโตรเจนมอนอกไซด์ ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่เกิน 205 ppm) อันเป็นผลมาจาก กระถินยักษ์มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่ากะลาตาลและผักตบชวา ซึ่งค่ามลพิษที่ได้นี้ถือว่ามามีค่ามากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลภายใต้อากาศส่วนเกินอื่นๆ ในขณะที่เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกิน จาก 40% เป็น 60% และ 80% ค่ามลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ในเตาเผาฟลูอิดไธด์แบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมที่แตกต่างกัน

ชีวมวล	ผักตบชวา			กะลาตาล			กระถินยักษ์		
สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (Holocellulose:Lignin) ; X_1	1.74	1.74	1.74	2.7	2.7	2.7	4.08	4.08	4.08
อากาศส่วนเกิน (%) ; X_2	40	60	80	40	60	80	40	60	80
ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ; Y	62	47	29	47.3	21	31.9	187	98	98



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมต่อมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$

ในการศึกษามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล เราไม่สามารถจะเอาสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลแต่ละชนิดมาเป็นตัวกำหนดเพียงอย่างเดียว จะต้องคำนึงถึงปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับเตาเผาด้วยซึ่งผู้วิจัยได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลกระทบของอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมต่อมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ซึ่งจากรูปที่ 4.9 สามารถอธิบายแนวโน้มที่จะใช้ในการควบคุมการทำงานของเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนเมื่อใช้ชีวมวลที่มีสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมแตกต่างกันโดยถ้าเพิ่มสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมมากขึ้นและลดอากาศส่วนเกินให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปที่ 4.9 จะทำให้เราสามารถเลือกใช้ชีวมวลสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนได้เหมาะสมกับการควบคุมการทำงานของเตาเผาเพื่อให้ได้ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่น้อยที่สุดได้

อีกทั้งผู้วิจัยต้องการพยากรณ์ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง เช่นเดียวกับปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ (บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ดังนั้นการทดลองในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวนจึงต้องคำนึงถึงตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวแปร ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีตัวแปรต้นอยู่มากกว่าหนึ่งตัวแปร โดยในงานวิจัยจะแสดงการวิเคราะห์ถดถอยที่มีตัวแปรต้นเพียงสองตัว โดยรูปแบบความสัมพันธ์หรือ Regression model เช่นเดียวกับกับสมการที่ 4.1

$$Y = 31.979 + 37.233X_1 - 1.145X_2 \quad (4.3)$$

ผลจากการหาความสัมพันธ์พบว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นดังแสดงดังสมการที่ 4.3 เป็นการทำนายปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ซึ่งเรียกว่าตัวแปรตาม (Y) โดยมีตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวแปรต้นนั้นคือ สัดส่วนของส่วนประกอบของคาร์บอน (%) (X_1) และอากาศส่วนเกิน (%) (X_2) ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9234 จากสมการสามารถระบุถึงอิทธิพลของส่วนประกอบของคาร์บอนต่อปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ได้ว่าทุกๆ สัดส่วนของส่วนประกอบของคาร์บอนเพิ่มขึ้น 1% จะทำให้เกิดปริมาณไนโตรเจนมอนนอกไซด์ได้ 37.233 ppm แต่ถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินทุกๆ 1% จะช่วยลดปริมาณไนโตรเจนมอนนอกไซด์ได้ 1.145 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างคร่าวๆ ได้ว่า หากต้องการให้ปริมาณไนโตรเจนมอนนอกไซด์ไม่เพิ่มขึ้นควรจะมีการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินประมาณ 30 เท่าของสัดส่วนของส่วนประกอบของคาร์บอน

4.3.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ η_c ในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวนเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทราบหลังจากการเผาไหม้เนื่องจากในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะเกิดการสูญเสียความร้อนออกมา (heat loss) และอีกส่วนหนึ่งจะมีไอเสีย (fuel gas) ที่ปล่อยทิ้ง ปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกมาและจากไอเสียขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น การออกแบบเตา การเลือกใช้หัวกระจายลม ความชื้น ขนาดชีวมวล สัดส่วนส่วนประกอบของคาร์บอนของชีวมวล และอากาศส่วนเกิน ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่าเตาเผา และชีวมวลนั้นเหมาะสมและเผาไหม้ได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

$$\eta_c = 100 - (q_{uc} + q_{ic}) \quad (4.4)$$

โดยที่ η_c คือประสิทธิภาพการเผาไหม้
 q_{uc} คือความร้อนที่สูญเสียให้กับคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้
 q_{ic} คือความร้อนสูญเสียในส่วนของกาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

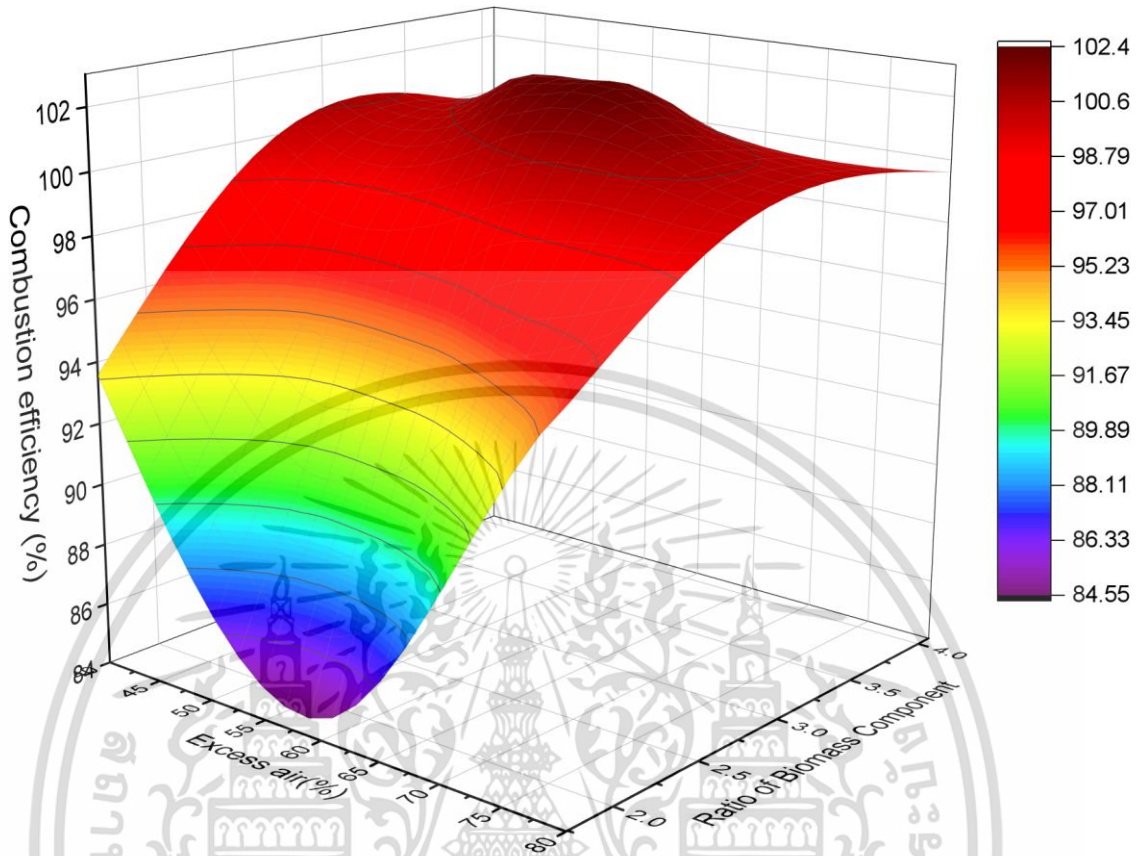
คาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ (unburn carbon) สำหรับเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์แบบหมุนวนในการเผาชีวมวลจะได้มาจากการสูมตัวอย่างซีเถ้าจากตัวเก็บ (ash collector) ที่ถูกติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของไซโคลนมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่ยังเหลือในส่วนที่ไม่ถูกเผา C_{fa} และปริมาณซีเถ้าที่มีอยู่เดิมในชีวมวล (A) ในขณะเดียวกันในส่วนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา (CO) จึงทำให้มีความร้อนสูญเสียในส่วนของกาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เรียกว่า q_{ic} ซึ่งจะถูกราคำนวณจากความเข้มข้นของ CO ในไอเสียแห้งที่ออกจากไซโคลน

ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์แบบหมุนวน ที่ได้จากการทดสอบจากเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมและอากาศส่วนเกินถูกแสดงในตารางที่ 4.10 ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้มีค่าสูงถึง 99% โดยถูกพบจากการทดสอบการเผาไหม้ชีวมวลกะลาตาลและกระถินยักษ์ (ผักตบชวา มีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มากที่สุดที่ 96.36%) ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมที่มีในชีวมวล และเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินให้สูงขึ้น ที่อากาศส่วนเกิน 40%, 60% และ 80% จะพบว่าที่อากาศส่วนเกิน 80% ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์แบบหมุนวนจะสูงที่สุด เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอากาศเข้าไปในเตาเผาทำให้มีออกซิเจนมากเพียงพอที่จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ (คาร์บอนมอนอกไซด์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์) และการเพิ่มอากาศไม่ได้ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเตานั้นลด จึงทำให้มีคาร์บอนมอนอกไซด์และ unburned carbon มีน้อย ประสิทธิภาพของเตาจึงสูงขึ้น จากตารางที่ 4.10 พบว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยกว่ากะลาตาลและกระถินยักษ์เล็กน้อย เนื่องมาจากมีค่าปริมาณซีเถ้า (A ที่ได้จกตารางที่ 4.1) เท่ากับ 31.02% โดยน้ำหนัก (สูงกว่าชีวมวลชนิดอื่น) ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ค่า q_{uc} (ความร้อนที่สูญเสียให้กับคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้) มีค่าสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยกว่ากะลาตาลและกระถินยักษ์เล็กน้อย ดังนั้นอากาศส่วนเกินที่ทำให้การเผาไหม้ชีวมวลทุกชนิดที่ทำการทดสอบมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ อากาศส่วนเกินที่ 80%

ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพเตาและ Unburned Carbon จากการเผาไหม้ในเตา SFBC

สัดส่วน ส่วนประกอบ องค์รวม	ตัวอย่าง ชีวมวล	ตามทฤษฎี		ค่าที่วัดได้จริง		C_{fa} (%)	q_{uc}	q_{ic}	η_c (%)
		EA	ปริมาณ	EA	ปริมาณ				
		(%)	O ₂ (%vol)	(%)	O ₂ (%vol)				
1.74	ผักตบชวา	40	6	46	6.57	5.88	6.352	0.067	93.58
		60	7.9	62	8.03	13.06	15.274	0.054	84.67
		80	9.3	84	9.61	3.42	3.601	0.043	96.36
2.7	กะลาตาล	40	6	49	6.90	1.00	0.039	0.101	99.86
		60	7.9	61	7.97	1.10	0.035	0.074	99.89
		80	9.3	79	9.25	0.87	0.030	0.092	99.89
4.08	กระถินยักษ์	40	6	43	6.34	4.38	0.425	0.173	99.40
		60	7.9	64	8.23	3.81	0.367	0.109	99.52
		80	9.3	82	9.43	3.61	0.347	0.042	99.61

รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการทดสอบเมื่อใช้ชีวมวลที่อัตราการป้อน 45 kg·hr⁻¹ ในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน และเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมและอากาศส่วนเกิน จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้จะลดลง เมื่อทำการทดสอบที่สัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวม 1.74 และอากาศส่วนเกินน้อยกว่า 60% แต่เมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินมากกว่า 60% และเพิ่มสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวม จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นชัด แต่อย่างไรก็ตามรูปที่ 4.10 เป็นเพียงรูปที่ใช้ในการบอกสถานะหรือจุดเหมาะสมในการทำงานของเตาเผาเมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในสัดส่วนองค์ประกอบองค์รวมต่างๆ เพื่อจะได้เลือกหาสถานะที่เหมาะสมกับสิ่งที่เราต้องการนั่นคือประสิทธิภาพ แต่การเผาไหม้ยังคงต้องคำนึงถึงมลพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน ซึ่งอาจจะต้องดูไปควบคู่กันทั้งประสิทธิภาพและปริมาณมลพิษที่จะเกิดขึ้น



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่เกิดจากอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนของส่วนประกอบของครวมในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวนที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ 3 ข้อคือ 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้ 2) เพื่อศึกษาส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้ และ 3) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบดแบบหมุนวน เมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกัน ซึ่งการสรุปผลการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะได้ดำเนินการอธิบายตามลำดับของการวัตถุประสงค์ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล (กระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา) ที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลทางเลือกใหม่ได้

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) ของชีวมวลทั้ง 3 ชนิดได้แก่ กระถินยักษ์ กะลาตาลและผักตบชวา พบว่ากะลาตาลมีปริมาณคาร์บอนคงตัวรวมกับปริมาณสารระเหยมากที่สุด คือ 97.97% (%wt. db) รองลงมาคือ กระถินยักษ์ คือ 94.70% (%wt. db) และผักตบชวามีปริมาณสารระเหยคิดเป็น 65.82% (%wt. db) ฉะนั้นหากพิจารณาจากปริมาณคาร์บอนคงตัวรวมกับปริมาณสารระเหยแล้วชีวมวลที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตชีวมวลมากที่สุด คือ กะลาตาล

ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุ (ultimate analysis) ของชีวมวล พบว่ากะลาตาลมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุด คือ 50.31% รองลงมาคือ กระถินยักษ์ 47.48% และผักตบชวา 29.67% ตามลำดับ ปริมาณไฮโดรเจนมีมากที่สุดในกระถินยักษ์ กะลาตาล และผักตบชวา คือ 6.01%, 5.93% และ 4.10% ตามลำดับ ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำมาก โดยปริมาณซัลเฟอร์ของผักตบชวา กระถินยักษ์ และกะลาตาล คือ 0.34%, 0.28% และ 0.09% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาไนโตรเจนพบว่าชีวมวลทุกตัวมีไนโตรเจนต่ำเช่นกันคือในกระถินยักษ์พบ 2.16% รองลงมาคือผักตบชวา 0.99% และ กะลาตาล 0.21% ตามลำดับ การที่ชีวมวลทั้งสามชนิดมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำคือเมื่อทำการเผาไหม้แล้วจะปล่อยมลพิษในรูป SO_x และ NO_x ออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอกน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหิน (SO_x ประมาณ 20%)

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล พบว่ากะลาตาลให้ค่าพลังงานความร้อนมากที่สุดคือ $18,670 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ และรองลงมาคือกระถินยักษ์ ให้ค่าพลังงานความร้อน $18,060 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ผักตบชวาให้ค่าพลังงานความร้อนต่ำกว่าชีวมวลชนิดอื่น คือ $10,900 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ถ้าจำเป็นต้องเผาชีวมวล ผักตบชวาอาจจะต้องมีการผสมกับชีวมวลชนิดอื่นที่ช่วยให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ส่วนประกอบองค์รวมและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

ส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวล คือเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) พบว่าชีวมวลที่มีปริมาณโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) คือ เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลสมากที่สุดคือกะลาตาลซึ่งเท่ากับ 58.61% รองลงมาคือกระถินยักษ์ และผักตบชวา ซึ่งมีปริมาณโฮโลเซลลูโลสเท่ากับ 48.54% และ 44.2% ตามลำดับ สำหรับชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุด คือ ผักตบชวา กะลาตาล และกระถินยักษ์ ตามลำดับ ชีวมวลที่ทำการทดสอบทั้ง 3 ชนิดที่มีปริมาณส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลคือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รวมกันมีปริมาณสูงที่สุดคือกะลาตาล ผักตบชวา และกระถินยักษ์ ในปริมาณ 80.3%, 69.54% และ 60.44% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวจะส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อน (ค่าความร้อนโดยรวม) ของชีวมวลตัวนั้นด้วย ดังเช่นปริมาณส่วนประกอบองค์รวมของชีวมวลของกะลาตาลมีค่าสูงสุด ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงตามไปด้วย

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล พบว่ากระถินยักษ์และกะลาตาล เป็นพืชที่มีปริมาณโครงสร้างโฮโลเซลลูโลสจำนวนมาก (เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลส) ทำให้พบการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 310 °C และ 330 °C อุณหภูมิการสลายตัวของโครงสร้างโฮโลเซลลูโลสในกระถินยักษ์และกะลาตาล สูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และกะลาตาลมีปริมาณสารระเหยมากที่สุดในปริมาณ 71.65% ซึ่งโดยปกติกลไกการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 200 - 430 °C จะเป็นกระบวนการเอาสารระเหยออก (devolatilization) และที่อุณหภูมิ 440 - 700 °C เป็นช่วงการเผาไหม้สารระเหยและถ่านชาร์ (Cagnon et al. 2009) ซึ่งกะลาตาลพบการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 280 °C และที่ 330 °C (เซลลูโลสรวมกับเฮมิเซลลูโลส) ซึ่งเป็นการสลายตัวของโครงสร้างโฮโลเซลลูโลส

5.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณมลพิษเมื่อใช้ชีวมวล ที่มีส่วนประกอบองค์รวมและปริมาณอากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันโดยใช้เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน

ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการทดสอบเมื่อใช้ชีวมวลที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$ ในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน และเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมและอากาศส่วนเกิน ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกะลาตาลและกระถินยักษ์สูงถึง 99% (ผักตบชวา ประสิทธิภาพมากกว่า 80%) ทั้งนี้ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมที่มีในชีวมวล และเมื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินให้สูงขึ้น ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนมอนนอกไซด์จะลดต่ำลง ในการทดสอบนี้ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดเมื่อทำการเผาไหม้และจ่ายอากาศส่วนเกิน 40% 60% และ 80% จะมีปริมาณมลพิษต่ำกว่าค่ามาตรฐานการปล่อยอากาศเสียออกสู่บรรยากาศทุกการทดสอบ

และผลจากการหาความสัมพันธ์พบว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น เป็นการทำนายปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ และปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9452 และ 0.9234

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกชีวมวลมาเพียง 3 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นหากมีการทำวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ชีวมวลอาจจะเลือกชีวมวลชนิดอื่นเพื่อให้หลากหลายมากขึ้น เช่น ทางตาลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เหลือจากการตัดแต่งต้นตาล รวมทั้งชีวมวลที่เหมาะสมกับท้องถิ่นนั้นๆ หรืออาจจะรวมถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐาน และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลในแต่ละท้องถิ่นนั้น

5.4.2 ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจจะทำการศึกษาอากาศส่วนเกินให้มากกว่า 80% เนื่องจากการทดสอบหาค่าปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์จากการเผาไหม้กะลาตาลแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินที่แตกต่างกันจะสร้างมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันหมายถึงไม่ว่าผู้วิจัยจะทำการเผาไหม้ชีวมวลและจ่ายอากาศส่วนเกินที่ 40% 60% หรือ 80% ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศปริมาณยังคงมีเท่าๆกัน

5.4.3 ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจจะทำการศึกษา co-firing ระหว่างชีวมวลในงานวิจัยนี้กับเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อให้ได้พลังงานที่มีศักยภาพสูงสุดและสามารถนำไปใช้ทดแทนโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้โดยไม่ต้องออกแบบหรือสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นมาใหม่

5.4.4 จากผลการทดลองพบว่าฝักตบชวาให้ค่าพลังงานความร้อนต่ำกว่าชีวมวลชนิดอื่น คือ $9,670 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ดังนั้นถ้าจำเป็นต้องเผาชีวมวลฝักตบชวาอาจจะต้องมีการผสมกับชีวมวลชนิดอื่นที่ช่วยเพิ่มค่าความร้อนสูงขึ้นหรืออาจจะผสมชีวมวลในงานวิจัยในอัตราส่วนต่างๆและทำการทดสอบวัดค่าพลังงานความร้อนและมลพิษที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกต่อไป

5.4.5 ทำการทวนสอบสมการโดยหาชีวมวลชนิดอื่นมาทดลองหรือทวนสอบสมการโดยใช้ชีวมวลผสม เพื่อดูปริมาณอากาศส่วนเกินและมลพิษที่เกิดขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป. **ข้อมูลทั่วไป; 2564.** [Online]. Available: http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html#
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2564. **รายงานติดตามการกำจัดผักตบชวา; 2564.** [Online]. Available: <http://hyacinth.dpt.go.th/wh/app/Hyacinth/GetHyacinth/77>
- กลุ่มงานพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้. 2548. **ไม้เนื้อแข็งของประเทศไทย.** พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: สุขุมวิทมีเดีย มาร์เก็ตติ้ง.
- กัญญา บุญยเกียรติ. 2544. **เชื้อเพลิงและการเผาไหม้.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัลยา คุปต์นันท์ทักษ์ และวรัทธร วรณไพศาล. 2549. “การวัดการปลดปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน และชีวมวลในฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน.” ปรินซิพส์ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คีต สร้อยทอง. 2563. “พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทร์เพ็ญ ชุมแสง. 2554. **การมีส่วนร่วมของประชาชนในการผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งของตาลโตนด เพื่อเป็นพลังงานทางเลือก ในเขตอำเภอคีรีมาศ จังหวัดสุโขทัย.** สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- เจษฎา โพธิ์สม. 2560. “การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของชีวมวลแบบรวดเร็วโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เจษฎาพร กิจเจตน์. 2561. “การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานภาควิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ชิงชัย วิริยะบัญชา และวิเชียร สมนันตกุล. 2550. **โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร.** สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ธีระชัย สายแก้ว, เรืออากาศเอก. 2552. “ผลของชนิดชีวมวลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นคร ทิพยาวงศ์. 2552. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- นฤมล ชูบัวทอง. 2550. “ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลต่อไพโรไลซิสและการเผาไหม้”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประมุข กระจุกสุขสถิตย์. 2555. **การผลิตไบโอเอทานอลจากชีวมวล**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ปราณี สติรพิพัฒนกุล. 2532. “การผลิตอะซีโตน-บิวทานอลจากผักตบชวาที่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยณัฐ โตอ่อน, จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ และสวลี อุดรา. 2559. “การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมระหว่างผักตบชวากับถ่านแกลบให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด.” **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 10(2): 99-107.
- ปิยะณัฐ เจริญพร. 2557. “การลดก๊าซไนตริกออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไธด์”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะพันธ์ จะกอ. 2548. “การควบคุมการปล่อยแก๊สของการเผาไหม้ถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัสดราภรณ์ วรรณภา. 2553. “การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและเศรษฐกิจของโครงการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลโดยใช้กระถินยักษ์เป็นเชื้อเพลิง”. วิทยานิพนธ์เศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มะลิวัลย์ หลุทัยธนาสันต์, เกษม หลุทัยธนาสันต์, เอกพงษ์ ธนะวัตติ, ศักดา พรหมเลิศ และเอกชัย บ่ายแสงจันทร์. 2562. “ศักยภาพของกระถินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา และกระถินเทพณรงค์ ในการปลูกเป็นสวนป่าพืชพลังงาน.” หน้า 579-586. **ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 สาขาพืช**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รัชดาภรณ์ แก้วกล้า. 2556. **การพัฒนาและศึกษาเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการฟลูอิดไธด์แบบหมุนวน** สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย.

รัชดาภรณ์ แก้วกล้า. 2557. **เอกสารประกอบการสอน วิชาการสันดาป**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล. มปป. **ลิกนิน-แทนนิน**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

ศิวพรรณ มหาสุภาพ. 2553. “ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์
จากชีวมวลในเบดนิ่งสองชั้นตอน”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภกร กตาทิการกุล, สุเจนต์ พรหมเหมือน, สุประดิษฐ์ ยวนทอง, ชีรเดช ใหญ่บึก และธเนศ ไชยชนะ.

2558. “การวิเคราะห์สมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของวัสดุตาลโตนด.” **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
กองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยทักษิณ**. สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ.

ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีอุทัยธานี. 2013. **โครงการศึกษาการเลี้ยงแพะขุนโดยใช้กระถินสด;**

2564. [Online]. Available: http://xn--v3c0b9b.blogspot.com/2013/02/blog-post_2.html

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. 2528. **ฟลูอิดไดเซชัน**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สรารุติ คงมั่นทวีทรัพย์. 2553. “การผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำจากกระถินยักษ์”.

วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

สำนักความหลากหลายทางชีวภาพ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ม.ป.ป. **เขตห้ามล่าสัตว์ป่าเขากระปุก-เขาเตาหม้อ; 2564**. [Online]. Available:

http://chmthai.onep.go.th/chm/data_province/petburi/index02_3.html

สำเร็จ จักรใจ. 2547. **การเผาไหม้**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุพจน์ แหวนเพชร. 2552. “การผลิตไบโอออยล์จากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว”.

วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

สุรัตน์ อัดตะ. 2555. **ปลูกกระถินยักษ์ป้อนโรงไฟฟ้าชีวมวล ทางสร้างอาชีพ-รายได้บ้านดงดินแดง;**

2564. [Online]. Available: <https://www.komchadluek.net/news/lifestyle/142428>

หฤทัย บงแก้ว, วรณชาติ ม่วงจันทร์ และศิรินุช จินดารักษ์. 2563. “การปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ด

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน.” **วารสารวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชน**. 3(2): 35-42.

อโณทัย โกวิทวิวัฒน์, พันชวศ สัมพันธ์พานิช และพินิจภณ ปิตุยะ. 2562. “ไม้กระถินเหลือใช้ มวล

ชีวภาพสำหรับการฟื้นฟูดินปนเปื้อน”. **วารสารสิ่งแวดล้อม**. ฉบับที่ 4: 1-9.

- อนุรักษ์ เกษวัฒนากุล และสุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์. 2559. “การใช้วัสดุเหลือใช้จากตาลโตนดเป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิไฟเออร์เบดนิ่งแบบไหลลง.” **วารสารวิจัยและพัฒนา วลัยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์**. 11(2): 141-151.
- อาคม ปะหลามานิต, พิสิฐ ทรงเลิศ, ภคินี ธงไชย, รวิสุดา แดงเปีย และสุเมธ ไชยประพัทธ์. 2561. “ชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก.” **Thai Science and Technology Journal**. 28(6): 1107-1125.
- อาณัฐชัย วงศ์จักร. 2554. “ผลของโครงสร้างทางเคมีของชีวมวลต่อไดออกซิเจนชั้นเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชีวภาพ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อามานี สามะ นูร์ซีลา และนู และโรสลีนา จาราแว. 2560. “การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา”. **รายงานการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช**. เล่ม 1 ด้านวิทยาศาสตร์: 187-196.
- อุทัยวรรณ ของสิริวัฒนกุล. 2563. **โรงไฟฟ้าชุมชนเพื่อเศรษฐกิจฐานราก; 2564**. [Online]. Available: https://www.gsbresearch.or.th/wpcontent/uploads/2020/07/GR_hotissue_PowerPlant_6_63_inter_detail.pdf
- Amand, L. E. and Leckner, B. 2001. “Co-Combustion of Sewage Sludge with Wood/Coal in a Circulating Fluidized Boiler-A study of gaseous Emissions.” **Goteborg**. 65: 154-162.
- Antal, Jr. M.J. 1982. **Biomass Pyrolysis: A Review of Literature Part 1-Carbohydrate Pyrolysis. Part 2-Lignocellulose Pyrolysis**. Advance in Solar Energy. New York: American Soar Energy Society.
- Ballesteros, M. Oliva J.M. Negro, M.J. Manzanares, P. and Ballesteros, I. 2004. “Ethanol from Lignocellulose Materials by a Simultaneous Saccharification and Fermentation Process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875.” **Journal of Process Biochemical**. 39: 1843-1848.
- Basu, P. 2010. **Biomass Gasification and Pyrolysis**. The United States: Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Bhattachrya, S. C. and Abdul, P. 2006. **A Review of Selected Biomass Energy Technologies**. Thailand: Regional Energy Resources Information Centre.

- Boominthan, K. and Reddy, C.A. 1991. **Handbook of Applied Mycology: Fungal Biotechnology vol 4**. New York: Marcel Dekker.
- Borman, L. and Rangland, W. 1998. **Combustion Engineering**. Michigan: McGraw-Hill.
- Bridgwater, A.V. Meier, D. and Radlein, D. 1999. "Overview of fast pyrolysis of biomass." **Organic Geochemistry**. 30: 1479-1493.
- Cagnon, B. Py, X. Guillot, A. Stoeckli, F. and Chambat, G. 2009. "Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors." **Bioresource Technology**. 100: 292-298.
- Demirbas, A. 2000. "Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass." **Energy Conversion and Management**. 41(6): 633-646.
- Fang, M. Yang, L. and Chen, G. 2004. "Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed." **Fuel Processing Technology**. 85: 1273-1282.
- Grace, J.R. Knowlton, T.M. and Avidan, A.A. 1997. **Circulating Fluidized Beds**. New York: Blackie Academic & Professional.
- Hall, R. Martin, J. James, A. Stobbart, D. Frith, A. Mumbray, T. and Reynolds, E. 2020. **100 THINGS TO KNOW ABOUT SAVING THE PLANET**. London: Usborne.
- Haykiri-Acma, H. Yaman, S. and Kucukbayrak, S. (2010). "Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis." **Elsevier**. 91(7): 759 - 764.
- Jing, S. Hu, Q. Wang, J. and Jin, Y. 2000. "Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds." **Chemical Engineering and Processing**. 39: 379-387.
- Kastanaki, E. and Vamvuka, D. (2006). "A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal-biomass char blends." **Fuel**. 85: 1186-1193.
- Klass, D.L. 1998. **Biomass for Renewable Energy, Fuel and Chemicals**. Academic Press.
- Krik, T.K. and Farrell, R.L. 1987. "Enzymatic "combustion": The Microbial Degradation of Lignin." **Annual Review of Microbiology**. 41: 465-505,
- Kudo, K. and Yoshida, E. 1957. "The decomposition process of wood constituents in the course of carbonization I: the decomposition of carbohydrate and lignin in Mizunara." **Journal of the Japan Wood Research Society**. 3(4): 125-127.

- Kularatnam, P.K. 1971. "Some Effects about the Plamara Palm (tan) and its future importance." **Food**. 3(4): 19-23.
- Kumar, J.V. and Pratt, B.C. 1996. "Compositional analysis of some renewable biofuels." **American Laboratory**. 28(8): 15-20.
- Kunii, D. and Levenspiel, O. 1991. **Fluidization Engineering 2nd Edition**. Stoneham: Butterworth Heinemann.
- Leckner, B. Amanda, L. Lücke, K. and Werther, J. 2004. "Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed." **Fuel**. 83: 477-486.
- Liu, Z. Hu, W. Jiang, Z. Mi, B. and Fei, B. 2016. "Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis." **Renewable Energy**. 87(1): 346-352.
- Madhiyanon, T. Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. 2010. "Combustion characteristics of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustion (SFBC)." **Thermal Engineering**. 30: 347-353.
- Mi, B. Liu, Z. Hu, W. Wei, P. Jiang, Z. and Fei, B. 2016. "Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo, torrefied wood and their blends." **Bioresource Technology**. 209: 50-55.
- Michelle, C.C. 2007. "Harnessing energy from plant biomass." **Chemical Biology**. 11: 677-684.
- Mohammed, M.A. Salmiaton, A. Azlina, W. and Mohamad, A. (2012). "Gasification of oil palm empty fruit bunches: A characterization and kinetic study." **Bioresource Technology**. 110: 628-636.
- Mohan, D. Charles, U. Pittman, J. and Philip, H.S. 2006. "Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review." **Energy and Fuels**. 20(3): 848-889.
- Muthuraman, M. Namioka, T. and Yoshikawa, K. (2010). "Characteristics of co-combustion and kinetic study on hydrothermally treated municipal solid waste with different rank coals: A thermogravimetric analysis." **Applied Energy**. 87(1): 141-148.
- Pichet, N. and Vladimir, I. 2014. "Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions." **Energy**

- Conversion and Management.** 85: 800-808.
- Pichet, N. and Vladimir, I. 2015. "Combustion of oil palm empty fruit bunch in fluidized bed using alternative bed materials: performance, emissions, and time-domain change in the bed condition." **In Proceedings of the 23rd European Biomass Conference in and Exhibition (EUBCE 2015).** 1(4): 529-539.
- Pichet, N. Vladimir, I. Eui, Y. and Rujira, K. 2015. "Thermogravimetric Studies of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Palm Kernel Shell: TG/DTG Analysis and Modeling." **Energy Procedia.** 79: 453-458.
- Reed, T.B. 2002. **Kinetics of char gasification reaction above 500 °C.** Encyclopedia of Biomass Thermal Conversion, 3rd ed, Biomass Energy Foundation Press.
- Robert, A.B. 2000. "A review of microbial deterioration found in archaeological wood from different environments." **International Biodeterioration & Bioderadation.** 46:189-204.
- Roopan, S. M. 2017. "An overview of natural renewable bio-polymer lignin towards nano and biotechnological applications." **Elsevier.** 103: 508-514.
- Sadaka, S. and Johnson, DM. 2017. "Biomass Combustion." **Agriculture and Natural Resources.** FSA1056.
- Song, C. Liu, K. Gong, Z. and Liu, Y. 2019. "Thermogravimetric analysis of combustion characteristics of coal gangue and petroleum coke mixture." **Journa of Physics: Conf.Series.** 1324.
- Sreenisan, B. and Raghavan, V.R. 2002. "Hydrodynamics of a swirling fluidized bed." **Chemical Engineering and Processing.** 41: 99-106.
- Turn, S. 2006. **An Introduction to Combustion.** Boston: McGrwaw-Hill.
- Vamvuka, D. Chatib, N. and Sfakiotakis, S. 2011. "Measurements of Ignition Point and Combustion Characteristics of Biomass Fuels and their Blends with Lignite." **Combustion Institute.** [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/232168026>.
- Van Loo, S. and Koppejan, J. 2008. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing.** London: Earthscan.

- Varol, M. Atimtay, A.T. Bay, B. and Olgun, H. (2010). "Investigation of co-combustion characteristics of low-quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis." **Elsevier**. 510(1-2): 195 - 201.
- Wang, Y. and Yan, L. 2008. "CFD studies on biomass thermochemical conversion." **International Journal of Molecular Sciences**. 9(6): 1108-1130.
- Warnatz, J. Maas, U. and Dibble, R.W. 2006. **Combustion**. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Werther, J. Saenger, M. Hartge, E.U. Ogada, T. and Siagi, Z. 2000. "Combustion of agricultural residues." **Progress in Energy and Combustion Science**. 26(1): 1-27.
- Xei, T. Wei, R. Gong, Z. and Wang, J. 2020. "Thermal Oxidative Decomposition of soybean straw: Thermo-Kinetic Analysis via Thermogravimetric Analysis and Artificial Neural Networks." **Earth and Environmental Science**. 581.
- Xiang-guo, L. Bao-guo, M. Li, X. Zhen-wu, H. and Xin-gang, W. 2006. "Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blend with high ash coal and waste tyres." **Thermochimica Acta**. 441(1): 79-83.
- Yang, H. Yan, R. Chin, T. Liang, D.T. Chen, H. and Zheng, C. 2004. "Thermogravimetric analysis-Fourier transform infrared analysis of palm oil waste pyrolysis." **Energy & Fuels**. 18: 1814-1821.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณต่างๆ

1. การคำนวณการเปลี่ยนฐานการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบแยกธาตุจากฐาน air dry basis เป็น dry basis

เลือกใช้ตัวอย่างจากค่าซีเฝ้าของกะลาตาล จากสมการ 2.2

$$A_{td} = \frac{100A_{ad}}{100 - W^h} \%$$

$$A_{td} = \frac{100(1.90)}{100 - 6.31}$$

$$A_{td} = 2.03$$

2. การคำนวณการเปลี่ยนฐานการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณธาตุจากฐาน as-received เป็น air dry basis และ dry basis

2.1 เปลี่ยนฐานจาก as-received เป็น air dry basis เลือกใช้ตัวอย่างจากค่าสารระเหยของกะลาตาล จากสมการ 2.1

$$VM_{ad} = \frac{100VM}{100 - W^e} \%$$

$$VM_{ad} = \frac{100(71.68)}{100 - 3.36}$$

$$VM_{ad} = 74.35$$

2.2 เปลี่ยนฐานจาก air dry basis เป็น dry basis เลือกใช้ตัวอย่างจากค่าสารระเหยของกะลาตาล จากสมการ 2.2

$$VM_{td} = \frac{100VM_{ad}}{100 - W^h} \%$$

$$VM_{td} = \frac{100(74.35)}{100 - 6.31}$$

$$VM_{td} = 79.36$$

3. การคำนวณค่าความร้อนต่ำจากค่าความร้อนสูงจากฐาน as-received เป็น dry basis

3.1 เลือกใช้ตัวอย่างจากค่าความร้อนสูงของกะลาตาล จากสมการ 2.6 เนื่องจากสมการ 2.6 ต้องใช้ค่า H^r (ไฮโดรเจนบนฐาน as-received) จึงต้องคำนวณค่า H^r ก่อน

$$H_{ad} = \frac{100H^r}{100 - W^e} \%$$

$$6.26 = \frac{100H^r}{100 - 3.36}$$

$$H^r = 6.05$$

คำนวณค่าความร้อนต่ำของกะลาตาล จากสมการ 2.6

$$LHV^r = HHV^r - 24.42(W^e + 8.94H^r)$$

$$LHV^r = 18010 - 24.42(3.36 + (8.94 \times 6.05))$$

$$LHV^r = 16630$$

3.2 เปลี่ยนฐานจาก as-received เป็น dry basis ใช้สัมประสิทธิ์จากตาราง 2.3

$$HHV^d = \frac{100}{100 - W^r} HHV^r$$

$$HHV^d = \frac{100}{100 - 9.67} (18010)$$

$$HHV^d = 19940$$

หา LHV จากสมการ 2.7

$$LHV^d = HHV^d - 218H^d$$

$$LHV^d = 19940 - 218(5.93)$$

$$LHV^d = 18670$$

4. การคำนวณค่าความร้อนสูงของกะลาตาล จากสมการ 2.9, 2.10, และ 2.11

Mendeleev's formula for the HHV on as-received basis:

$$HHV^r = 339C^r + 1256H^r - 109(O^r - S^r)$$

$$HHV^r = 339(45.45) + 1256(5.36) - 109(37.42 - 0.08)$$

$$HHV^r = 18069.65$$

$$HHV^d = 18069.65 \left(\frac{100}{100 - 9.67} \right) = 20004.04$$

$$LHV^d = HHV^d - 218H^d$$

$$LHV^d = 20004.04 - 218(5.93)$$

$$LHV^d = 18711.3$$

Delong's formula for the HHV on dry basis:

$$HHV^d = 338.3C^d + 1444.5(H^d - 0.125O^d) + 93.8S^d$$

$$HHV^d = 338.3(50.31) + 1444.5(5.93 - (0.125 \times 41.43)) + 93.8(0.09)$$

$$HHV^d = 18113.50$$

IGT's (Institute of Gas Technology, USA) formula for the HHV on dry basis:

$$HHV^d = 341C^d + 1323H^d + 68.5S_v^d - 15.3A^d - 120(O^d + N^d)$$

$$HHV^d = 341(50.31) + 1323(5.93) + 68.5(0.09) - 15.3(2.03) - 120(41.43 + 0.21)$$

$$HHV^d = 19979.41$$

5. การคำนวณปริมาณอากาศส่วนเกิน

ในงานวิจัยต้องใช้อากาศส่วนเกิน 40% 60% และ 80% จึงต้องนำมาคำนวณเพื่อหาค่าออกซิเจนที่ทางออกไซโคลนก่อนทำการทดลอง จะมีการคำนวณดังนี้

$$EA = 100(\alpha - 1)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \alpha = \left(\frac{EA}{100} \right) + 1$$

$$= \left(\frac{40}{100} \right) + 1$$

$$= 1.4$$

$$\text{และ} \quad \alpha = \frac{21}{21 - O_2}$$

$$O_2 = 21 - \left(\frac{21}{\alpha} \right)$$

$$= 21 - \left(\frac{21}{1.4} \right)$$

$$= 6$$

เพราะฉะนั้นที่ EA = 40% ได้ค่า $\alpha = 1.4$ และค่า $O_2 = 6 \text{ vol\%}$

6. การคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้

ประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_c = 100 - (q_{uc} + q_{ic})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการจะได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพมีขั้นตอนการคำนวณหาค่าโดยการยกตัวอย่างชีวมวลผักตบชวามาอธิบายดังต่อไปนี้

6.1 การคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี

$$V^\circ = 0.0889(C + 0.375S) + 0.265H - 0.0333O$$

$$V^\circ = 0.0889(27.79 + (0.375 \times 0.32)) + (0.265 \times 4.55) - (0.0333 \times 34.39)$$

$$V^\circ = 2.54 m^3 \cdot kg^{-1}$$

โดยที่ ค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ที่ได้จากคุณสมบัติพื้นฐาน โดยวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลที่ยกตัวอย่างคือ ผักตบชวา บนฐาน as-receive

6.2 การคำนวณหาค่าปริมาตรของไนโตรเจน

$$V_{N_2}^\circ = 0.79V^\circ + 0.008N^r$$

$$V_{N_2}^\circ = (0.79 \times 2.54) + (0.008 \times 0.93)$$

$$V_{N_2}^\circ = 2.01 m^3 \cdot kg^{-1}$$

6.3 การคำนวณหาค่าปริมาตรของแก๊ส (tri-atomic)

$$V_{RO_2} = 0.01866(C^r + 0.375S^r)$$

$$V_{RO_2} = 0.01866(27.79 + (0.375 \times 0.32))$$

$$V_{RO_2} = 0.52 m^3 \cdot kg^{-1}$$

6.4 การคำนวณหาค่าอากาศส่วนเกิน คำนวณโดยคิด CO ในแก๊สไอเสียแห้ง

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO)}$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - (3.82 - (0.5 \times 0.0121))}$$

$$\alpha = 1.49$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การคำนวณหาค่าปริมาณแก๊สไอเสียแห้งภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน

$$V_{dg} = V_{RO_2} + V_{N_2}^\circ + (\alpha - 1)V^\circ$$

$$V_{dg} = 0.52 + 2.02 + (1.49 - 1)2.54$$

$$V_{dg} = 3.7846$$

6.6 การคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

$$q_{uc} = \frac{32886}{LHV} \left(\frac{C_c}{100 - C_c} \right) A$$

$$q_{uc} = \frac{32886}{9670} \left(\frac{5.88}{100 - 5.88} \right) 31.02$$

$$q_{uc} = 6.591\% LHV$$

6.7 การคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียสำหรับการเผาไหม้

$$q_{ic} = 126.4 COV_{dg} \frac{(100 - q_{uc})}{LHV}$$

$$q_{ic} = (126.4 \times 0.01210 \times 3.7846) \frac{(100 - 6.5906)}{9670}$$

$$q_{ic} = 0.0559\% LHV$$

6.8 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ (%LHV)

$$\eta_c = 100 - (q_{uc} - q_{ic})$$

$$\eta_c = 100 - (6.691 - 0.0559)$$

$$\eta_c = 93.36\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบของชีวมวล

1. การวิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบของชีวมวลพืช (Goering and Van Soest. 1970)

1.1 การสกัดด้วยสารละลาย Neutral detergent

(1) นำ Sintered crucible เบอร์ 1 ขนาด 50 ml. ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 hr. แล้วนำมาใส่ในหม้อดูดความชื้น (desiccator) ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก

(2) ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียดขนาด 20-30 mesh หรือ 1 ml. ประมาณ 1 g ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 ml.

(3) เติมสารละลาย Neutral detergent 100 ml. Sodium sulfite 0.5 g. และ Decahydronaphthalene 2 ml. นำไป reflux เป็นเวลา 1 hr. โดยนับตั้งแต่เริ่มเดือด

(4) เทส่วนผสมที่ reflux เสร็จแล้วลงใน Sintered glass crucible ที่วางอยู่บนชุดกรอง ล้างตัวอย่างใน crucible ด้วยน้ำร้อน (90 - 100 °C) 3 - 4 ครั้ง แล้วล้างด้วย อะซิโตน 2 ครั้ง ดูดสารละลายออกด้วยเครื่อง เครื่องปั๊มสุญญากาศจนแห้ง จากนั้นนำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 hr.

(5) นำ crucible ออกมาทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือ ปริมาณ Neutral detergent fiber (NDF)

1.2 การสกัดด้วยสารละลาย Acid detergent

(1) นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการสกัดด้วย Neutral detergent มาถ่ายใส่บีกเกอร์เพื่อทำการ reflux ด้วย acid detergent โดยเติม acid detergent 10 ml. และ Decahydronaphthalene 2 ml. เป็นเวลา 1 hr. นับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือด

(2) กรองตัวอย่างพืชใน crucible ใบดีม เพื่อลดการสูญเสียตัวอย่างให้น้อยที่สุดแล้วล้างด้วยน้ำร้อน (90 - 100 °C) 3 - 4 ครั้ง แล้วล้างด้วย 80% เอทานอล 2 ครั้ง

(3) นำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 hr. จากนั้นนำมาปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้คือ น้ำหนักของ acid detergent fiber (ADF) น้ำหนักที่แตกต่างระหว่าง NDF และ ADF คือน้ำหนักของเฮมิเซลลูโลส

1.3 การวิเคราะห์ Permanganate lignin (PML)

(1) เติมสารละลาย Combined permanganate 25 ml. ลงใน crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งผ่านการสกัดด้วย acid detergent แล้วแช่ crucible ลงในภาชนะที่มีน้ำเย็นสูง ประมาณ 2 cm. คนด้วยแท่งแก้วเพื่อไม่ให้ตัวอย่างจับเป็นก้อน ทิ้งไว้ 45 min. โดยคนเป็นบางครั้งจากนั้นดูดสารละลายออกให้หมด โดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ

(2) เติมสารละลาย Combined permanganate 25 ml. ลงใน crucible อีกครั้ง ทิ้งไว้อีก 45 min. แล้วดูดสารละลายออกให้หมดโดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ

(3) เติมสารละลาย Demineralizing ลงใน crucible แต่ละถ้วยแช่ไว้ 5 min. แล้วดูดสารละลายออกโดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ ทำซ้ำจนตัวอย่างพืชเป็นสีขาวภายในเวลา 20 min. จากนั้นล้างด้วย 80% เอทานอล และอะซิโตน แล้วดูดให้แห้งโดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ

(4) นำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 hr. จากนั้นนำมาปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่แตกต่างระหว่าง ADF และน้ำหนักตัวอย่างพืชที่ผ่านการสกัดลิกนินออก คือ น้ำหนักของลิกนิน คือน้ำหนักของเฮมิเซลลูโลส

1.4 การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสด้วยการเผาเถ้า

นำ crucible ที่มีตัวอย่างพืชซึ่งผ่านการสกัดลิกนินออกแล้ว ไปเผาในเครื่องเผาเถ้า ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 hr. จากนั้นนำมาปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่แตกต่างระหว่าง น้ำหนักตัวอย่างพืชที่ผ่านการสกัดลิกนินออก และน้ำหนักหลังการเผาเถ้า คือ น้ำหนักของเซลลูโลส ส่วนน้ำหนักเถ้าคือ ผลต่างระหว่างน้ำหนักหลังการเผาเถ้าและน้ำหนัก crucible ดังนั้นสามารถคำนวณได้ว่า

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

$$\% \text{Cellulose} = \% \text{ADF} - \% \text{ADL}$$

$$\% \text{Lignin} = \% \text{ADL}$$

ซึ่งงานวิจัยนี้มีตัวอย่างดังตาราง ข.1

ตาราง ข.1 แสดงค่าผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ของ Goering and Van Soest, 1970

ชีวมวล	%NDF	%ADF	%ADL
กระถินยักษ์	60.44	50.54	11.90
กะลาตาล	80.30	67.70	21.69
ผักตบชวา	69.54	49.71	25.34

ตัวอย่างการคำนวณ โดยยกตัวอย่างเป็นผักตบชวา

$$\% \text{ Lignin} = \% \text{ ADL} = 25.34$$

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

$$\% \text{ Hemicellulose} = 69.54 - 49.71 = 19.83$$

$$\% \text{ Cellulose} = \% \text{ ADF} - \% \text{ ADL}$$

$$\% \text{ Cellulose} = 49.71 - 25.34 = 24.37$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลพิษ สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม
ของชีวมวลแต่ละชนิดและปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับ
เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน**

**1. วิธีการหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม
ของชีวมวลแต่ละชนิดและปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน**

ในการศึกษามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล เราไม่สามารถจะเอาสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมของชีวมวลแต่ละชนิดมาเป็นตัวกำหนดเพียงอย่างเดียวจะต้องคำนึงถึงปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับเตาเผาด้วยซึ่งถ้าต้องการพยากรณ์ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน 45 kg·hr⁻¹ ดังนั้นการทดลองในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนจึงต้องคำนึงถึงตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวแปร ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีตัวแปรต้นอยู่มากกว่าหนึ่งตัวแปร โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะแสดงการวิเคราะห์กรณีที่มีตัวแปรต้นเพียงสองตัว โดยรูปแบบความสัมพันธ์หรือ Regression model จะเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

เมื่อ e คือ Error ของ Model ซึ่งจะมีค่าเข้าหา 0 (ไม่มี error) ซึ่งเราจะมองเป็น Normal distribution ที่อยู่รอบๆค่า 0 และมี variance อยู่ค่าหนึ่ง เมื่อเราใช้ Least square method จะได้สมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i2}y_i \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 แสดงปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ในเตาเผาฟลูอิดไบล์แบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างชีวมวล	ผักตบชวา			กะลาตาล			กระถินยักษ์		
สัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวม (Holocellulose:Lignin) ; X_1	1.74	1.74	1.74	2.7	2.7	2.7	4.08	4.08	4.08
อากาศส่วนเกิน (%) ; X_2	40	60	80	40	60	80	40	60	80
ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ; Y	121	98	54	270.6	163.6	176.8	586	230	220

ขั้นตอนที่ 1 หาสมการที่จะใช้คำนวณ จากตารางที่ 1 มีตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ(X) อยู่สองตัว จำนวนข้อมูล (n) 9 ข้อมูล ดังนั้น Regression model จึงมีค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ต้องหาคือ β_0, β_1 และ β_2 โดยสมการที่ใช้หาจึงเป็นดังนี้

$$n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n xi1 + \beta_2 \sum_{i=1}^n xi2 = \sum_{i=1}^n yi$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n xi1 + \beta_1 \sum_{i=1}^n xi1^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n xi1xi2 = \sum_{i=1}^n xi1yi$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n xi2 + \beta_1 \sum_{i=1}^n xi2xi1 + \beta_2 \sum_{i=1}^n xi2^2 = \sum_{i=1}^n xi2yi$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าเพื่อแทนลงในสมการ จากตารางที่ 1 จะทำการคำนวณค่าต่างๆตามสมการทั้งสาม โดยใช้ตาราง excel ช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ ค-2 ค่าต่างๆตามสมการทั้งสาม โดยใช้ตาราง excel ช่วยในการคำนวณ

	X ₁	X ₂	Y	X ₁ X ₂	(X ₁) ²	(X ₂) ²	Y ²	X ₁ Y	X ₂ Y
	1.74	40	121	69.6	3.0276	1600	14641	210.54	4840
	1.74	60	98	104.4	3.0276	3600	9604	170.52	5880
	1.74	80	54	139.2	3.0276	6400	2916	93.96	4320
	2.7	40	270.6	108	7.29	1600	73224.36	730.62	10824
	2.7	60	163.6	162	7.29	3600	26764.96	441.72	9816
	2.7	80	176.8	216	7.29	6400	31258.24	477.36	14144
	4.08	40	586	163.2	16.6464	1600	343396	2390.88	23440
	4.08	60	230	244.8	16.6464	3600	52900	938.4	13800
	4.08	80	220	326.4	16.6464	6400	48400	897.6	17600
sum	25.56	540	1920	1533.6	80.892	34800	603104.56	6351.6	104664

จากตารางที่ 2 เมื่อนำค่าที่ได้ใส่สมการทั้งสาม จะได้สมการใหม่ 3 สมการเรียงลำดับดังนี้

$$9\beta_0 + 25.56\beta_1 + 540\beta_2 = 1920$$

$$25.56\beta_0 + 80.892\beta_1 + 1533.6\beta_2 = 6351.6$$

$$540\beta_0 + 1533.6\beta_1 + 34800\beta_2 = 104664$$

เมื่อแทนค่าแล้วจะได้ Matrix เป็น

$$\begin{bmatrix} 1920 \\ 6351.6 \\ 104664 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 25.56 & 540 \\ 25.56 & 80.892 & 1533.6 \\ 540 & 1533.6 & 34800 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการหา Inverse matrix จะได้ Matrix เป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.58268 & -0.342103 & -0.025 \\ -0.342103 & 0.120459 & 7.8 \times 10^{-18} \\ -0.025 & 0 & 0.000416667 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1920 \\ 6351.6 \\ 104664 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า β_0, β_1 และ β_2 ได้ค่า 169.278, 108.258 และ -4.38997 ตามลำดับ ดังนั้นสมการ Regression model ที่ได้เป็น

$$Y = 169.278 + 108.258X_1 - 4.38997X_2$$

โดยที่ Y แทนด้วย ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานก๊าซแห้ง (ppm)

X_1 แทนด้วย สัดส่วนของส่วนประกอบของครวม (%)

X_2 แทนด้วย อากาศส่วนเกิน (%)

ขั้นตอนที่ 3 การหา Coefficient of Determination

$$R^2 = \frac{(SS_{Regression})100\%}{SS_{total}}$$

$$R^2 = \frac{(SS_{Regression})100\%}{SS_{Regression} + SS_{Error}}$$

$$SS_{Regression} = [\beta][Y] - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n}$$

$$= [169.278 \quad 108.258 \quad -4.38997] \begin{bmatrix} 1920 \\ 6351.6 \\ 104664 \end{bmatrix} - \frac{(1920)^2}{9}$$

$$= 553143 - \frac{(1920)^2}{9}$$

$$= 143543$$

$$MS_{Regression} = \frac{143543}{2} = 71771.5$$

$$SS_{Error} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - [\beta][Y]$$

$$= 603105 - 553143$$

$$= 49962$$

$$MS_{Error} = \frac{49962}{6} = 8327$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$MS_{Regression} = \frac{SS_{Regression}}{k}$$

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{n - p}$$

และค่า degree of freedom หาได้จาก

$$\text{Total} = n - 1 = 9 - 1 = 8$$

$$\text{Error} = n - p = 9 - 3 = 6$$

$$\text{Regression} = k = \text{Total} - \text{Error} = 8 - 6 = 2$$

$$\text{สุดท้าย } R^2 = \frac{143543}{143543 + 8327} \times 100 = 94.52\%$$

ค่า R^2 เท่ากับ 94.52% แสดงได้ว่าสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (%) และ อากาศส่วนเกิน (%) ใช้ในการพยากรณ์ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ได้ประมาณ 95% และทั้งสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวม (%) และอากาศส่วนเกิน (%) ส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ (contribute significantly) ต่อปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm)

2. วิธีการหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ สัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมของชีวมวลแต่ละชนิดและปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวน

ในการศึกษามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล เราไม่สามารถจะเอาสัดส่วนของส่วนประกอบโดยรวมของชีวมวลแต่ละชนิดมาเป็นตัวกำหนดเพียงอย่างเดียว จะต้องคำนึงถึงปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนให้กับเตาเผาด้วยซึ่งถ้าต้องการพยากรณ์ปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (บริเวณด้านบนสุดของเตาเผา ก่อนเข้าสู่ไซโคลน) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน $45 \text{ kg} \cdot \text{hr}^{-1}$ ดังนั้นการทดลองในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวนจึงต้องคำนึงถึงตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวแปร ผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีตัวแปรต้นอยู่มากกว่าหนึ่งตัวแปร โดยในงานวิจัยจะแสดงการวิเคราะห์กรณีที่มีตัวแปรต้นเพียงสองตัว โดยรูปแบบความสัมพันธ์หรือ Regression model จะเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ e คือ Error ของ Model ซึ่งจะมีค่าเข้าหา 0 (ไม่มี error) ซึ่งเราจะมองเป็น Normal distribution ที่อยู่รอบๆค่า 0 และมี variance อยู่ค่าหนึ่ง เมื่อเราใช้ Least square method จะได้สมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik} = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} = \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{ik} = \sum_{i=1}^n x_{i2}y_i$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i$$

ตารางที่ ค-3 แสดงปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ในเตาเผาฟลูอิดไบลัดแบบหมุนวน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอากาศส่วนเกินและสัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างชีวมวล	ผักตบชวา			กะลาตาล			กระถินยักษ์		
สัดส่วนของส่วนประกอบองค์รวม (Holocellulose:Lignin) ; X_1	1.74	1.74	1.74	2.7	2.7	2.7	4.08	4.08	4.08
อากาศส่วนเกิน (%) ; X_2	40	60	80	40	60	80	40	60	80
ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ; Y	62	47	29	47.3	21	31.9	187	98	98

ขั้นตอนที่ 1 หาสมการที่จะใช้คำนวณ จากตารางที่ 1 มีตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ(X) อยู่สองตัว จำนวนข้อมูล (n) 9 ข้อมูล ดังนั้น Regression model จึงมีค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ต้องหาคือ β_0, β_1 และ β_2 โดยสมการที่ใช้หาจึงเป็นดังนี้

$$n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} = \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 = \sum_{i=1}^n x_{i2}y_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าเพื่อแทนลงในสมการ จากตารางที่ 1 จะทำการคำนวณค่าต่างๆตามสมการทั้งสาม โดยใช้ตาราง excel ช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ ค-4 ค่าต่างๆตามสมการทั้งสาม โดยใช้ตาราง excel ช่วยในการคำนวณ

	X_1	X_2	Y	$X_1 X_2$	$(X_1)^2$	$(X_2)^2$	Y^2	$X_1 Y$	$X_2 Y$
	1.74	40	62	69.6	3.0276	1600	3844	107.88	2480
	1.74	60	47	104.4	3.0276	3600	2209	81.78	2820
	1.74	80	29	139.2	3.0276	6400	841	50.46	2320
	2.7	40	47.3	108	7.29	1600	2237.29	127.71	1892
	2.7	60	21	162	7.29	3600	441	56.7	1260
	2.7	80	31.9	216	7.29	6400	1017.61	86.13	2552
	4.08	40	187	163.2	16.6464	1600	34969	762.96	7480
	4.08	60	98	244.8	16.6464	3600	9604	399.84	5880
	4.08	80	98	326.4	16.6464	6400	9604	399.84	7840
sum	25.56	540	621.2	1533.6	80.892	34800	64766.9	2073.3	34524

จากตารางที่ 2 เมื่อนำค่าที่ได้ใส่สมการทั้งสาม จะได้สมการใหม่ 3 สมการเรียงลำดับดังนี้

$$9\beta_0 + 25.56\beta_1 + 540\beta_2 = 621.2$$

$$25.56\beta_0 + 80.892\beta_1 + 1533.6\beta_2 = 2073.3$$

$$540\beta_0 + 1533.6\beta_1 + 34800\beta_2 = 34524$$

เมื่อแทนค่าแล้วจะได้ Matrix เป็น

$$\begin{bmatrix} 621.2 \\ 2073.3 \\ 34524 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 25.56 & 540 \\ 25.56 & 80.892 & 1533.6 \\ 540 & 1533.6 & 34800 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการหา Inverse matrix จะได้ Matrix เป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.58268 & -0.342103 & -0.025 \\ -0.342103 & 0.120459 & 7.8 \times 10^{-18} \\ -0.025 & 0 & 0.000416667 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 621.2 \\ 2073.3 \\ 34524 \end{bmatrix}$$

หาค่า β_0, β_1 และ β_2 ได้ค่า 31.9787, 37.2333 และ -1.14499 ตามลำดับ ดังนั้นสมการ Regression model ที่ได้เป็น

$$Y = 31.9787 + 37.2333X_1 - 1.14499X_2$$

โดยที่ Y แทนด้วย ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm)

X_1 แทนด้วย สัดส่วนของส่วนประกอบของคาร์บอน (%)

X_2 แทนด้วย อากาศส่วนเกิน (%)

ขั้นตอนที่ 3 การหา Coefficient of Determination

$$R^2 = \frac{(SS_{Regression})100\%}{SS_{total}}$$

$$R^2 = \frac{(SS_{Regression})100\%}{SS_{Regression} + SS_{Error}}$$

$$SS_{Regression} = [\beta][Y] - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n}$$

$$= [31.9787 \quad 37.2333 \quad -1.14499] \begin{bmatrix} 621.2 \\ 2073.3 \\ 34524 \end{bmatrix} - \frac{(621.2)^2}{9}$$

$$= 57531.3 - \frac{(621.2)^2}{9}$$

$$= 14654.70$$

$$MS_{Regression} = \frac{14654.70}{2} = 7327.35$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 SS_{Error} &= \sum_{i=1}^n Y_i^2 - [\beta][Y] \\
 &= 64766.9 - 57531.3 \\
 &= 7235.6 \\
 MS_{Error} &= \frac{7235.6}{2} = 1205.93
 \end{aligned}$$

โดยที่

$$MS_{Regression} = \frac{SS_{Regression}}{k}$$

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{n - p}$$

และค่า degree of freedom หาได้จาก

$$\text{Total} = n - 1 = 9 - 1 = 8$$

$$\text{Error} = n - p = 9 - 3 = 6$$

$$\text{Regression} = k = \text{Total} - \text{Error} = 8 - 6 = 2$$

$$\text{สุดท้าย } R^2 = \frac{14654.70}{14654.70 + 1205.93} \times 100 = 92.34\%$$

ค่า R^2 เท่ากับ 92.34% แสดงได้ว่าสัดส่วนของส่วนประกอบของครวม (%) และ อากาศส่วนเกิน (%) ใช้ในการพยากรณ์ปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm) ได้ประมาณ 92% และทั้งสัดส่วนของส่วนประกอบของครวม (%) และอากาศส่วนเกิน (%) ส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ (contribute significantly) ต่อปริมาณมลพิษไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ออกซิเจน 6% บนฐานแก๊สแห้ง (ppm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างอากาศส่วนเกินกับมลพิษในชีวมวล
แต่ละชนิดระหว่างการเผาไหม้

T-Test

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair	LEU40CO	2612.8750	8	1540.52750	544.65872
1	LEU60CO	1116.7500	8	678.22431	239.78850
Pair	LEU60CO	1116.7500	8	678.22431	239.78850
2	LEU80CO	688.5000	8	525.32847	185.73166
Pair	LEU40CO	2612.8750	8	1540.52750	544.65872
3	LEU80CO	688.5000	8	525.32847	185.73166
Pair	PA40CO	1014.0750	8	1532.41076	541.78902
4	PA60CO	229.6250	8	130.95963	46.30122
Pair	PA60CO	229.6250	8	130.95963	46.30122
5	PA80CO	468.6750	8	832.90230	294.47543
Pair	PA40CO	1014.0750	8	1532.41076	541.78902
6	PA80CO	468.6750	8	832.90230	294.47543
Pair	HY40CO	387.0000	8	313.71780	110.91599
7	HY60CO	312.3750	8	276.09778	97.61530
Pair	HY60CO	312.3750	8	276.09778	97.61530
8	HY80CO	170.2500	8	133.23958	47.10731
Pair	HY40CO	387.0000	8	313.71780	110.91599
9	HY80CO	170.2500	8	133.23958	47.10731
Pair	LEU40NO	296.5000	8	73.84346	26.10761
10	LEU60NO	284.8750	8	105.39238	37.26183
Pair	LEU60NO	284.8750	8	105.39238	37.26183
11	LEU80NO	198.2500	8	67.24316	23.77405
Pair	LEU40NO	296.5000	8	73.84346	26.10761
12	LEU80NO	198.2500	8	67.24316	23.77405
Pair	PA40NO	47.5375	8	14.91930	5.27477
13	PA60NO	44.9000	8	18.83401	6.65883
Pair	PA60NO	44.9000	8	18.83401	6.65883
14	PA80NO	32.9875	8	9.01957	3.18890
Pair	PA40NO	47.5375	8	14.91930	5.27477
15	PA80NO	32.9875	8	9.01957	3.18890

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 16	HY40NO HY60NO	167.7500 166.0000	8 8	95.56112 89.73612	33.78596 31.72651
Pair 17	HY60NO HY80NO	166.0000 77.7500	8 8	89.73612 42.78768	31.72651 15.12773
Pair 18	HY40NO HY80NO	167.7500 77.7500	8 8	95.56112 42.78768	33.78596 15.12773

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	LEU40CO & LEU60CO	8	.952	.000
Pair 2	LEU60CO & LEU80CO	8	.818	.013
Pair 3	LEU40CO & LEU80CO	8	.887	.003
Pair 4	PA40CO & PA60CO	8	.973	.000
Pair 5	PA60CO & PA80CO	8	.888	.003
Pair 6	PA40CO & PA80CO	8	.932	.001
Pair 7	HY40CO & HY60CO	8	.498	.209
Pair 8	HY60CO & HY80CO	8	.887	.003
Pair 9	HY40CO & HY80CO	8	.734	.038
Pair 10	LEU40NO & LEU60NO	8	.935	.001
Pair 11	LEU60NO & LEU80NO	8	.918	.001
Pair 12	LEU40NO & LEU80NO	8	.902	.002
Pair 13	PA40NO & PA60NO	8	.203	.629
Pair 14	PA60NO & PA80NO	8	.758	.029
Pair 15	PA40NO & PA80NO	8	.361	.380
Pair 16	HY40NO & HY60NO	8	.848	.008
Pair 17	HY60NO & HY80NO	8	.731	.039
Pair 18	HY40NO & HY80NO	8	.903	.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Paired Samples Test

		Paired Differences				
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Pair 1	LEU40CO - LEU60CO	1496.1250	918.21417	324.63773	728.4787	2263.7713
Pair 2	LEU60CO - LEU80CO	428.2500	391.20975	138.31353	101.1905	755.3095
Pair 3	LEU40CO - LEU80CO	1924.3750	1101.55124	389.45717	1003.4551	2845.2949
Pair 4	PA40CO - PA60CO	784.4500	1405.29439	496.84659	-390.4055	1959.3055
Pair 5	PA60CO - PA80CO	-239.0500	719.18804	254.27137	-840.3062	362.2062
Pair 6	PA40CO - PA80CO	545.4000	813.63429	287.66316	-134.8153	1225.6153
Pair 7	HY40CO - HY60CO	74.6250	297.16851	105.06494	-173.8141	323.0641
Pair 8	HY60CO - HY80CO	142.1250	169.48783	59.92300	.4296	283.8204
Pair 9	HY40CO - HY80CO	216.7500	234.17988	82.79509	20.9707	412.5293
Pair 10	LEU40NO - LEU60NO	11.6250	44.84875	15.85643	-25.8695	49.1195
Pair 11	LEU60NO - LEU80NO	86.6250	51.11873	18.07320	43.8887	129.3613
Pair 12	LEU40NO - LEU80NO	98.2500	31.86467	11.26586	71.6105	124.8895
Pair 13	PA40NO - PA60NO	2.6375	21.51617	7.60711	-15.3505	20.6255
Pair 14	PA60NO - PA80NO	11.9125	13.36343	4.72469	.7404	23.0846
Pair 15	PA40NO - PA80NO	14.5500	14.38372	5.08541	2.5249	26.5751
Pair 16	HY40NO - HY60NO	1.7500	51.40525	18.17450	-41.2259	44.7259
Pair 17	HY60NO - HY80NO	88.2500	65.34250	23.10206	33.6223	142.8777
Pair 18	HY40NO - HY80NO	90.0000	59.82594	21.15166	39.9843	140.0157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Paired Samples Test

		t	df	Sig. (2-tailed)
Pair 1	LEU40CO - LEU60CO	4.609	7	.002
Pair 2	LEU60CO - LEU80CO	3.096	7	.017
Pair 3	LEU40CO - LEU80CO	4.941	7	.002
Pair 4	PA40CO - PA60CO	1.579	7	.158
Pair 5	PA60CO - PA80CO	-.940	7	.378
Pair 6	PA40CO - PA80CO	1.896	7	.100
Pair 7	HY40CO - HY60CO	.710	7	.501
Pair 8	HY60CO - HY80CO	2.372	7	.049
Pair 9	HY40CO - HY80CO	2.618	7	.035
Pair 10	LEU40NO - LEU60NO	.733	7	.487
Pair 11	LEU60NO - LEU80NO	4.793	7	.002
Pair 12	LEU40NO - LEU80NO	8.721	7	.000
Pair 13	PA40NO - PA60NO	.347	7	.739
Pair 14	PA60NO - PA80NO	2.521	7	.040
Pair 15	PA40NO - PA80NO	2.861	7	.024
Pair 16	HY40NO - HY60NO	.096	7	.926
Pair 17	HY60NO - HY80NO	3.820	7	.007
Pair 18	HY40NO - HY80NO	4.255	7	.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

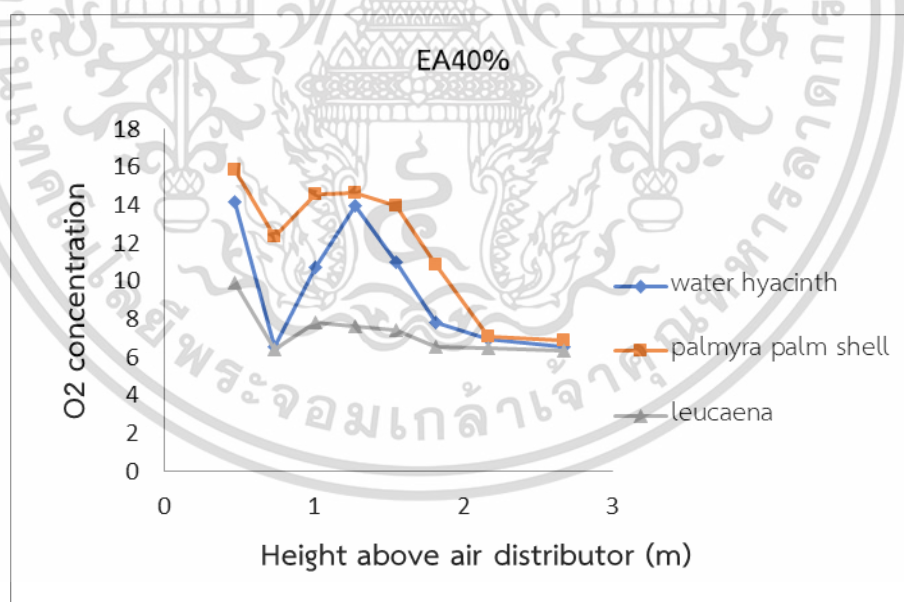


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

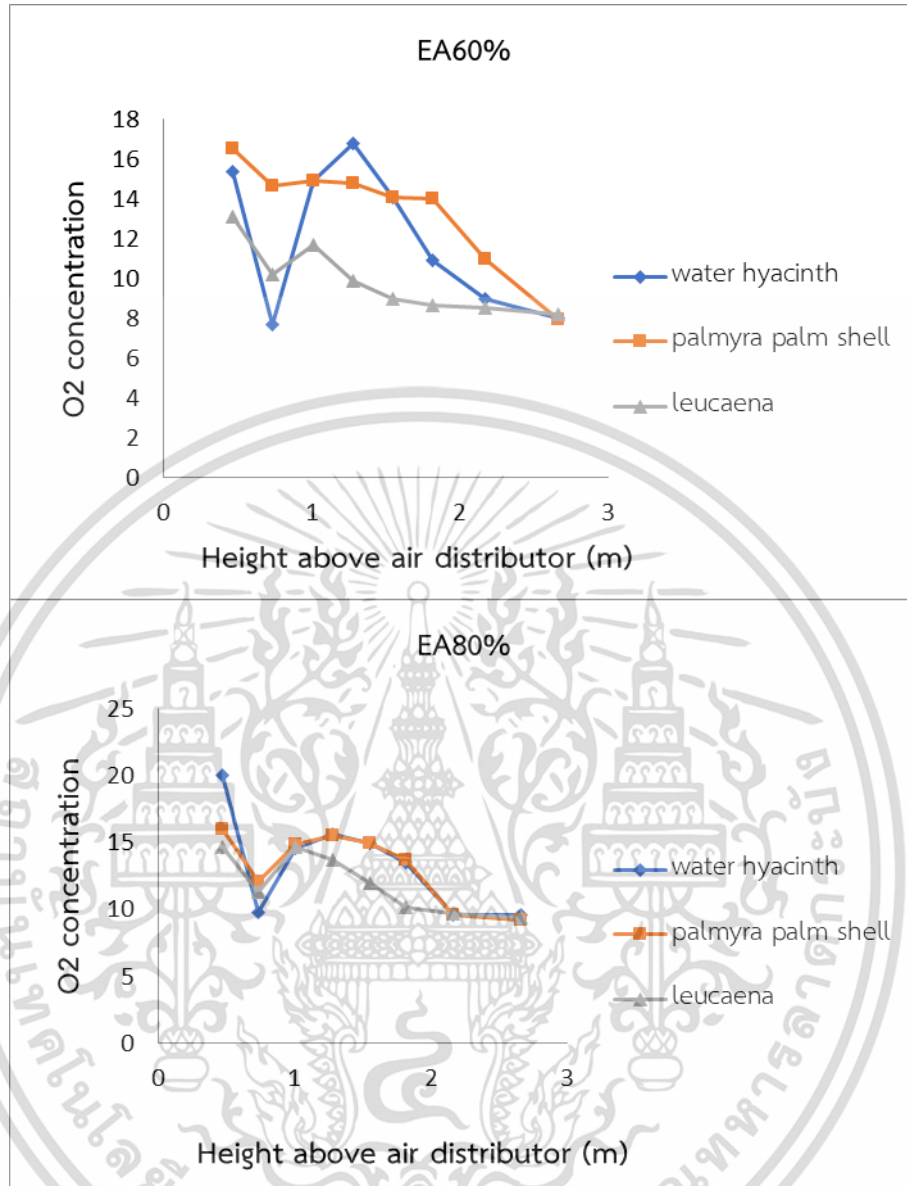
ข้อมูลการทดลอง

ตาราง จ-1 แสดงข้อมูลก๊าซ O₂ ที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตาเผา

จุดความ สูง	กะลาตาล			กระถินยักษ์			ผักตบชวา		
	อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน		
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0.47	15.86	16.54	16.05	9.9	13.1	14.65	9.9	15.34	20
0.74	12.34	14.67	12.08	6.42	10.18	11.34	6.42	7.67	9.8
1.01	14.56	14.89	14.89	7.85	11.67	14.67	7.85	14.89	14.53
1.28	14.66	14.76	15.56	7.65	9.88	13.74	7.65	16.78	15.66
1.55	13.98	14.100	15	7.43	8.99	11.96	7.43	14.09	14.99
1.82	10.87	14	13.67	6.54	8.65	10.2	6.54	10.89	13.55
2.17	7.05	10.98	9.63	6.5	8.5	9.65	6.5	8.99	9.56
2.67	6.9	7.965	9.25	6.34	8.23	9.43	6.34	8.03	9.61



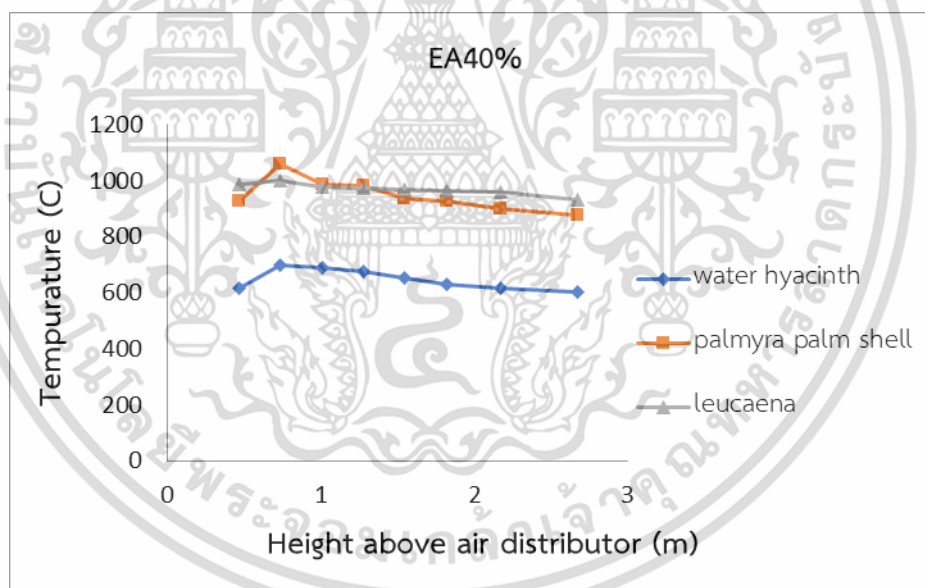
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



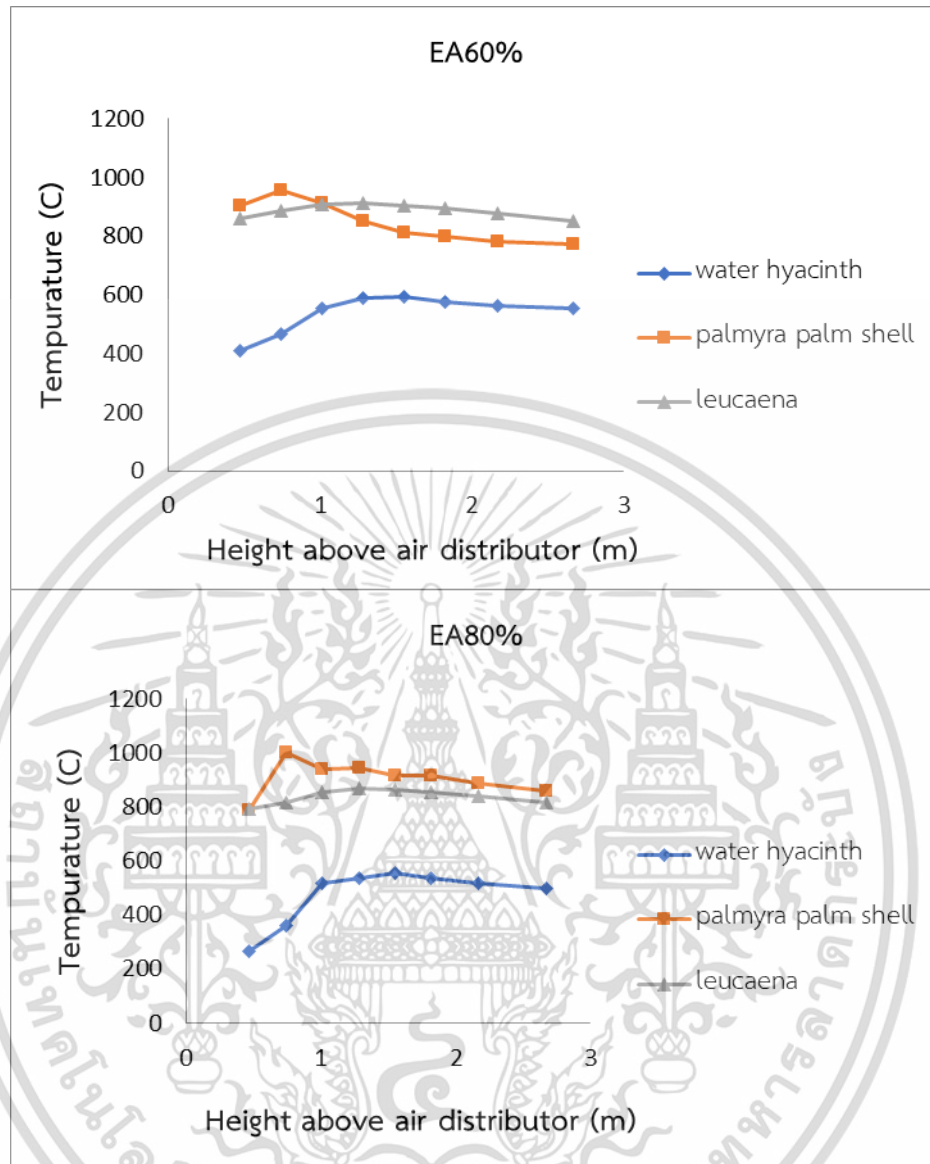
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-2 แสดงข้อมูลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตา

จุดความ สูง	กะลาตาล			กระถินยักษ์			ผักตบชวา		
	อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน		
	40	60	80	989	862	792	617	408	267
0.47	925	904	789	1000	886	818	698	465	360
0.74	1062	956	1001	978	908	856	688	554	516
1.01	989	912	938	974	915	869	677	587	535
1.28	981	853	945	969	906	864	652	591	556
1.55	935	812	916	966	897	856	629	574	534
1.82	928	799	915	960	880	840	614	561	519
2.17	900	781	886	932	851	816	603	552	500
2.67	877	775	857	917	832	800	591	531	480



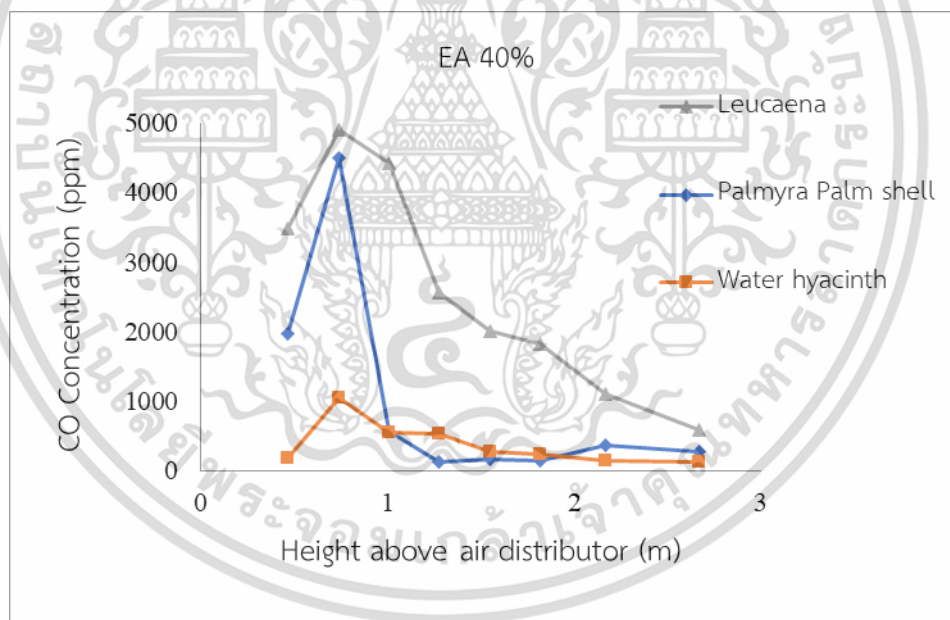
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



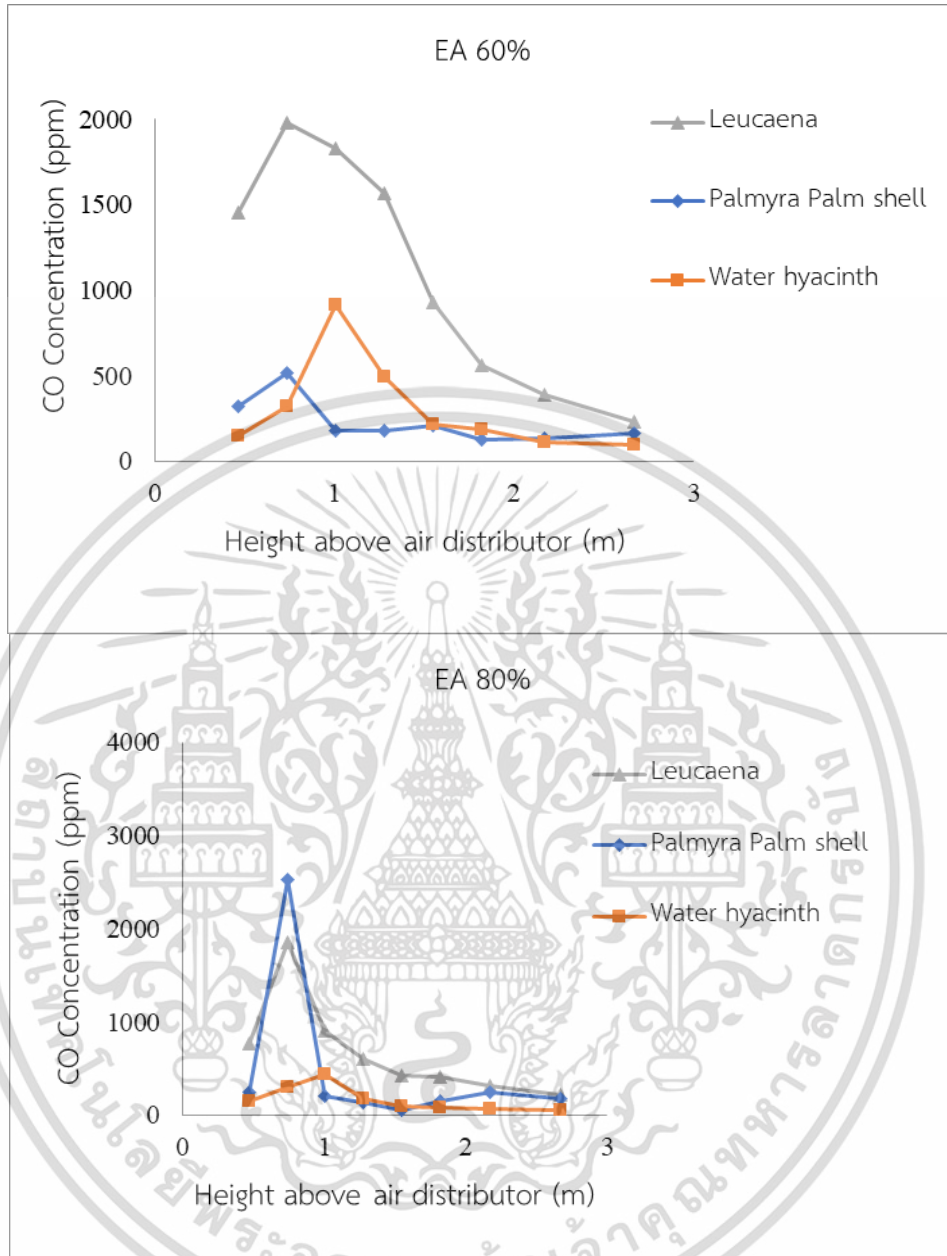
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-3 แสดงข้อมูลก๊าซ CO ที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตาเผา

จุดความ สูง	กะลาตาล			กระถินยักษ์			ผักตบชวา		
	อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน		
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0.47	1973.3	323.1	246.9	3487	1456	766	1455.6	151	149
0.74	4986	516.4	2523.9	4895	1976	1857	1975.9	321	302
1.01	563.5	179.6	210.1	4427	1828	907	1828	916	432
1.28	129.6	179.1	137.7	2565	1565	607	1565.1	495	182
1.55	170	212.8	56.2	2002	929	424	929.4	216	96
1.82	154	130	145.7	1828	560	415	559.8	186	79
2.17	359.2	132.4	252.1	1113	390	312	390	116	68
2.67	270.6	163.6	176.8	586	230	220	230	98	54



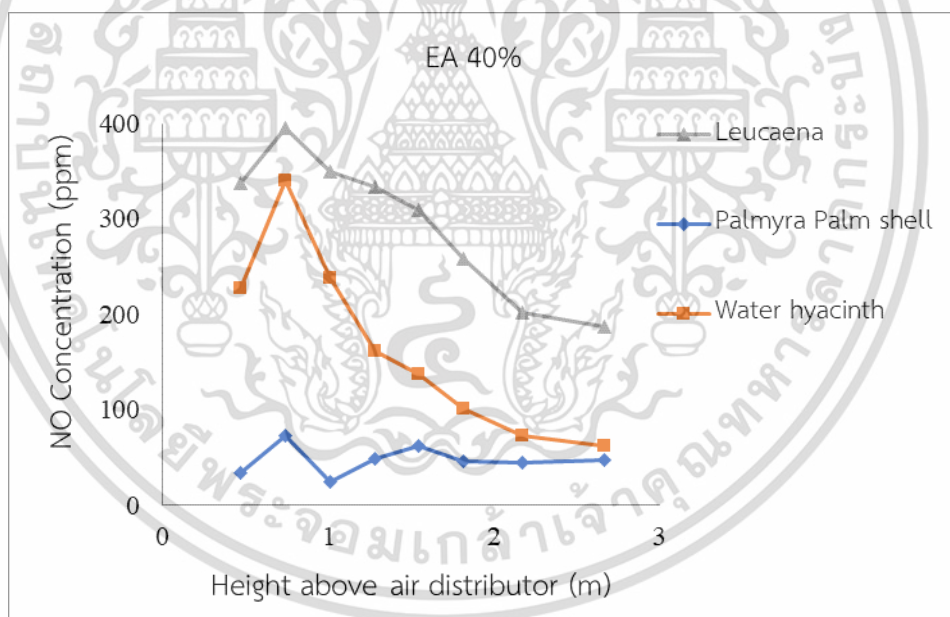
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



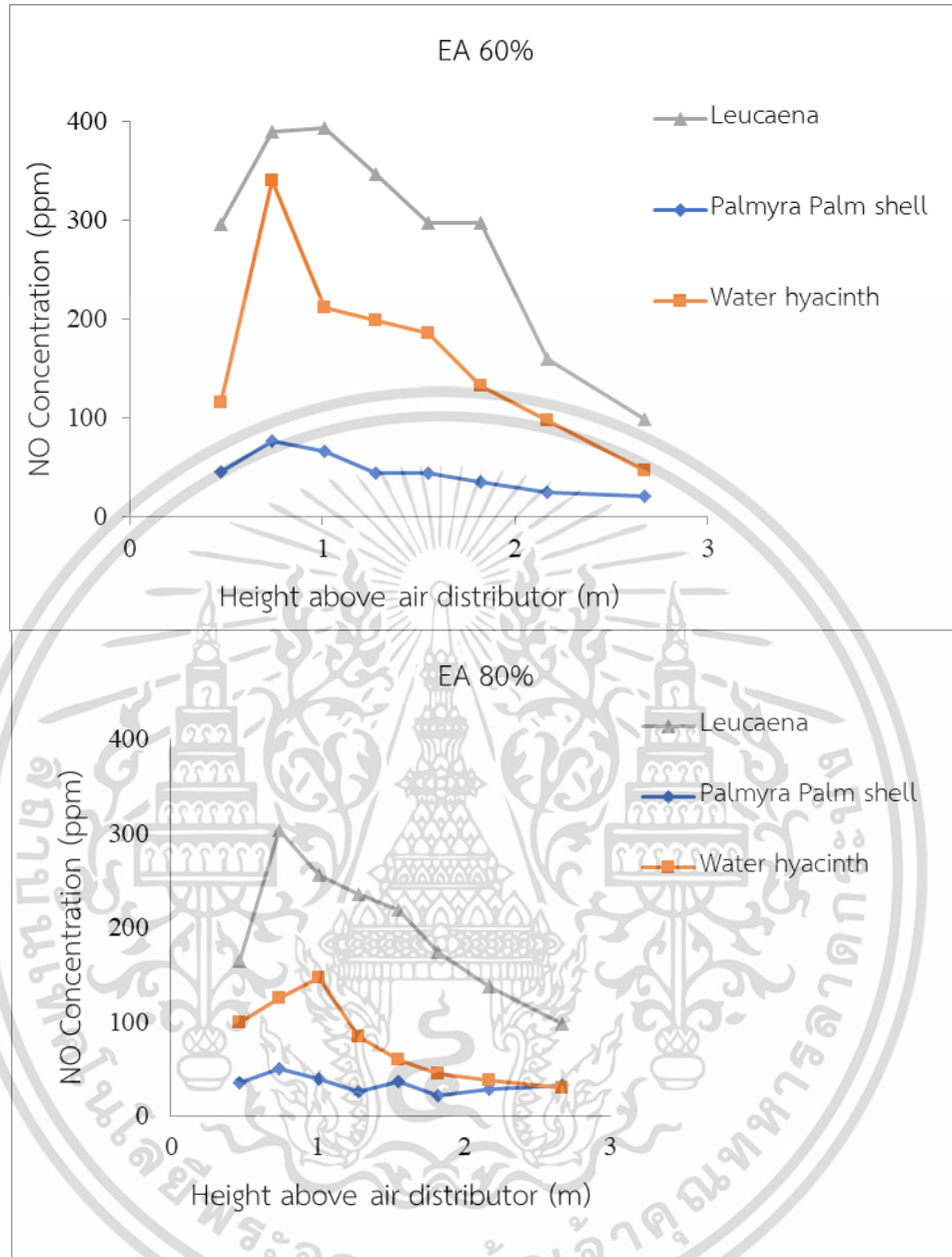
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-4 แสดงข้อมูลก๊าซ NO ที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตาเผา

จุดความ สูง	กะลาตาล			กระถินยักษ์			ผักตบชวา		
	อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน			อากาศส่วนเกิน		
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0.47	33.6	45.8	34.1	337	296	164	227	116	99
0.74	73.1	76.6	49.4	395	390	303	341	340	124
1.01	25.3	65.9	39.2	350	394	256	238	211	146
1.28	48.7	44.5	25	334	347	235	162	199	84
1.55	61.8	44.4	36.2	309	297	219	137	186	59
1.82	45.8	35.5	20.5	258	297	174	102	132	44
2.17	44.7	24.5	27.6	202	160	137	73	97	37
2.67	47.3	21	31.9	187	98	98	62	47	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-5 แสดงข้อมูลมลพิษ CO และ NO ที่ปล่อยออกจากเตาเผา

อากาศ ส่วนเกิน	กะลาตาล		กระถินยักษ์		ผักตบชวา	
	มลพิษที่ปล่อยออกจากเตา		มลพิษที่ปล่อยออกจากเตา		มลพิษที่ปล่อยออกจากเตา	
	NO	CO	NO	CO	NO	CO
40	47.1	270.6	187	586	62	121
60	21	163.6	98	230	47	98
80	31.9	176.8	98	220	29	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารผลการวิเคราะห์ชีวมวล

ตารางที่ ฉ-1 แสดงผลการวิเคราะห์ Proximate analysis ของ กระจินยักษ์

LF - 044

Report No. C.144/58

Page 1 of 2

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND

TEST REPORT

FOR PROXIMATE ANALYSIS

CUSTOMER : **นางสาวจรรยา เวชชอนันต์ชัย**

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LAB NO.				58X0241	58X0242	58X0243
SAMPLE NAME				กระจินยักษ์	หญ้านเปียร์	ขุยมะพร้าว
SAMPLE DESCRIPTION				-	-	-
SAMPLE CONDITION				normal	normal	normal
SAMPLED DATE				-	-	-
RECEIVED DATE				16/06/2015	16/06/2015	16/06/2015
ANALYSED DATE				17-30/06/2015	17-30/06/2015	17-30/06/2015
BASIS	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT		
	AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302 M-10	12.15	11.32
ASH		% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	4.65	8.28	1.87
VOLATILE MATTER		% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	71.49	70.97	39.76
FIXED CARBON		% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	11.70	9.43	8.20
SULPHUR		% by weight	ASTM D4239-12	0.25	0.09	0.02
GROSS CALORIFIC VALUE		MJ/Kg	ASTM D5865-11a	17.00	15.73	9.90
		Kcal/Kg		4063	3760	2367
* NET CALORIFIC VALUE		MJ/Kg	ASTM D5865-11a	15.57	14.39	8.14
	Kcal/Kg		3721	3438	1946	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	5.30	9.33	3.74
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	81.38	80.03	79.80
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	13.32	10.64	16.46
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.28	0.10	0.04
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	19.35	17.74	19.88
		Kcal/Kg		4625	4240	4750
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	18.06	16.53	18.77
		Kcal/Kg		4316	3951	4487
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	6.96	7.31	10.81
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	4.93	8.65	3.34
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	75.72	74.18	71.17
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10 ^{E1}	12.39	9.86	14.68
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.26	0.09	0.04
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	18.01	16.45	17.73
		Kcal/Kg		4303	3930	4237
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1-2002	-	-	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Chemist :

(Ms. Wirunchana Akkarut)

7 / 7 2015

Laboratory Section, Geology Department, Mae Moh Mine Planning and Administration Division, EGAT
801 M.6 T. Mae Moh, A. Mae Moh, Lampang, 52220 Tel. 66-054-254136, 66-054-254037 Fax. 66-054-254037

Rev.12 03/06/57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-2 แสดงผลการวิเคราะห์ Proximate analysis ของ กะลาตาล ผักตบชวา




Report No. C.029/58
Page 1 of 2

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT
FOR PROXIMATE ANALYSIS

CUSTOMER : **มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LAB NO.		58X0029		58X0030	
SAMPLE NAME		กะลาตาลอบ		ผักตบชวาอบ	
SAMPLE DESCRIPTION		-		-	
SAMPLE CONDITION		normal		normal	
SAMPLED DATE		-		-	
RECEIVED DATE		24/01/2015		24/01/2015	
ANALYSED DATE		28/01/2015-05/02/2015		28/01/2015-05/02/2015	
AS RECEIVED BASIS	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT	
		MOISTURE	% by weight	ASTM D3302 M-10	9.67
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	1.83	31.02
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	71.68	57.31
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	16.81	2.42
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.08	0.31
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	18.01	10.70
		Kcal/Kg		4306	2557
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	16.63	9.67
		Kcal/Kg		3974	2312
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	2.03	34.18
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	79.36	63.15
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	18.61	2.67
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.09	0.34
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	19.94	11.79
			Kcal/Kg	4767	2817
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	18.67	10.90
		Kcal/Kg		4461	2606
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	6.31	6.33
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	1.90	32.02
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	74.35	59.15
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10E ¹	17.44	2.50
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.08	0.32
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	18.69	11.04
			Kcal/Kg	4466	2639
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.2.1.1-2002	-	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Chemist : 
(Ms. Wiruchana Akkarut)
24 / 2 / 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-3 แสดงผลการวิเคราะห์ Ultimate analysis ของ กระถินยักษ์

LF - 112

Report No.C.144/58

Page 2 of 2

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT
FOR ULTIMATE ANALYSIS

CUSTOMER : นางสาวจรรยา เวชหาญชัย

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LAB NO.	58X0241		58X0242		58X0243	
SAMPLE NAME	กระถินยักษ์		หญ้านเปียรี		ขุยมะพร้าว	
SAMPLE DESCRIPTION	-		-		-	
SAMPLE CONDITION	normal		normal		normal	
SAMPLED DATE	-		-		-	
RECEIVED DATE	16/06/2015		16/06/2015		16/06/2015	
ANALYSED DATE	17/06/2015-04/07/2015		17/06/2015-04/07/2015		17/06/2015-04/07/2015	
	ULTIMATE ANALYSIS	UNIT	METHOD	RESULT		
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10 ^{e1}	6.96	7.31	10.81
	ASH	%	ASTM D7582-10 ^{e1}	4.93	8.65	3.34
	CARBON	%	ASTM D5373-08	44.18	40.24	44.52
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.37	6.03	5.77
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	2.01	1.92	0.16
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.26	0.09	0.04
	* OXYGEN	%	(plus errors)	42.25	43.07	46.17
DRY BASIS	ASH	%	ASTM D7582-10 ^{e1}	5.30	9.33	3.74
	CARBON	%	ASTM D5373-08	47.48	43.41	49.92
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.01	5.62	5.11
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	2.16	2.07	0.18
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.28	0.10	0.04
* OXYGEN	%	(plus errors)	38.77	39.46	41.00	
DRY ASH-FREE BASIS	CARBON	%	ASTM D5373-08	50.14	47.88	51.86
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.35	6.20	5.31
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	2.28	2.28	0.19
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.30	0.11	0.05
	* OXYGEN	%	(plus errors)	40.94	43.52	42.60

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Chemist : Ms. Wirunchana Akkarut

(Ms. Wirunchana Akkarut)

7 7 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-4 แสดงผลการวิเคราะห์ Ultimate analysis ของ กะลาตาล ผักตบชวา

LF - 112

Report No.C.029/58

Page 2 of 2


ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT
FOR ULTIMATE ANALYSIS

CUSTOMER : มณฑลจระเข้

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LAB NO.				58X0029	58X0030
SAMPLE NAME				กะลาตาลบด	ผักตบชวาบด
SAMPLE DESCRIPTION				-	-
SAMPLE CONDITION				normal	normal
SAMPLED DATE				-	-
RECEIVED DATE				24/01/2015	24/01/2015
ANALYSED DATE				28/01/2015-05/02/2015	28/01/2015-05/02/2015
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	ULTIMATE ANALYSIS	UNIT	METHOD	RESULT	
	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10 ^{e1}	6.31	6.33
	ASH	%	ASTM D7582-10 ^{e1}	1.90	32.02
	CARBON	%	ASTM D5373-08	47.14	27.79
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.26	4.55
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.20	0.93
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.08	0.32
	* OXYGEN	%	(plus errors)	44.42	34.39
	DRY BASIS				
	ASH	%	ASTM D7582-10 ^{e1}	2.03	34.18
CARBON	%	ASTM D5373-08	50.31	29.67	
HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	5.93	4.10	
NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.21	0.99	
TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.09	0.34	
* OXYGEN	%	(plus errors)	41.43	30.71	
DRY ASH-FREE BASIS					
CARBON	%	ASTM D5373-08	51.36	45.08	
HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.05	6.23	
NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.22	1.51	
TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.09	0.52	
* OXYGEN	%	(plus errors)	42.29	46.66	

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

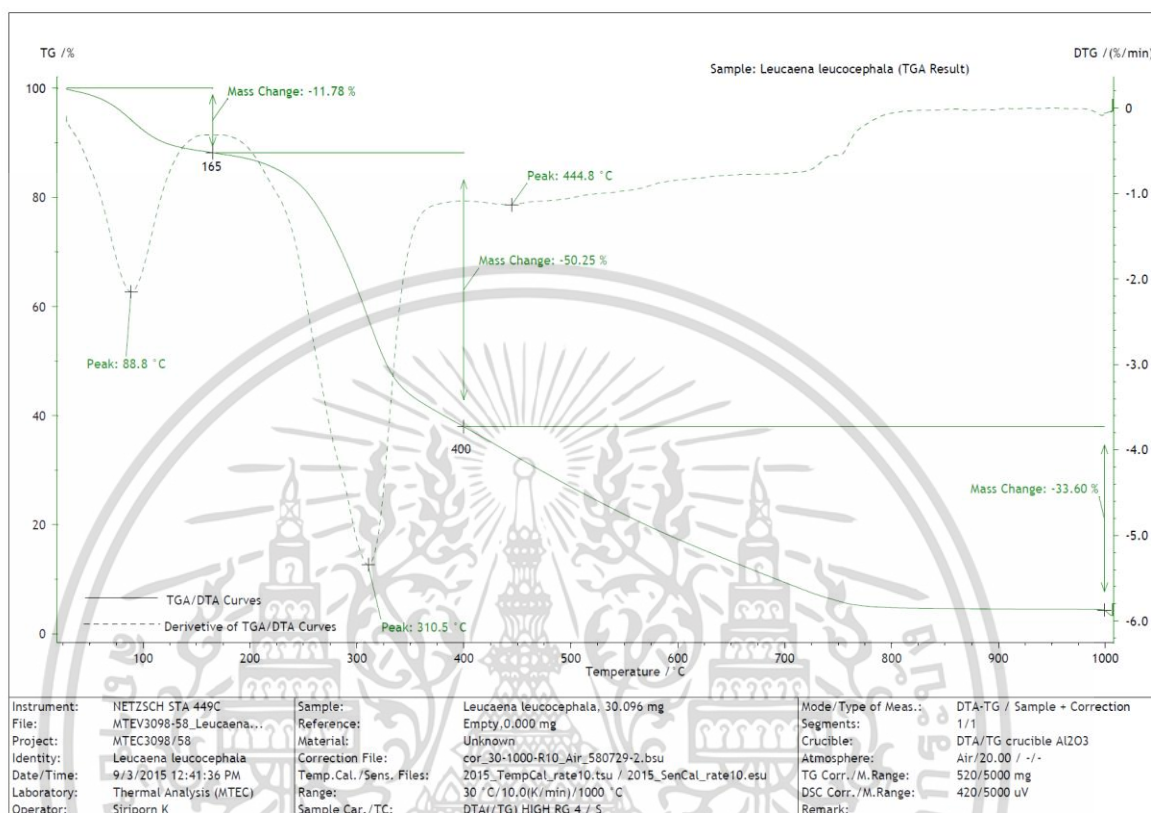
Chemist : 

(Ms. Wirunchana Akkarut)

24.1.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

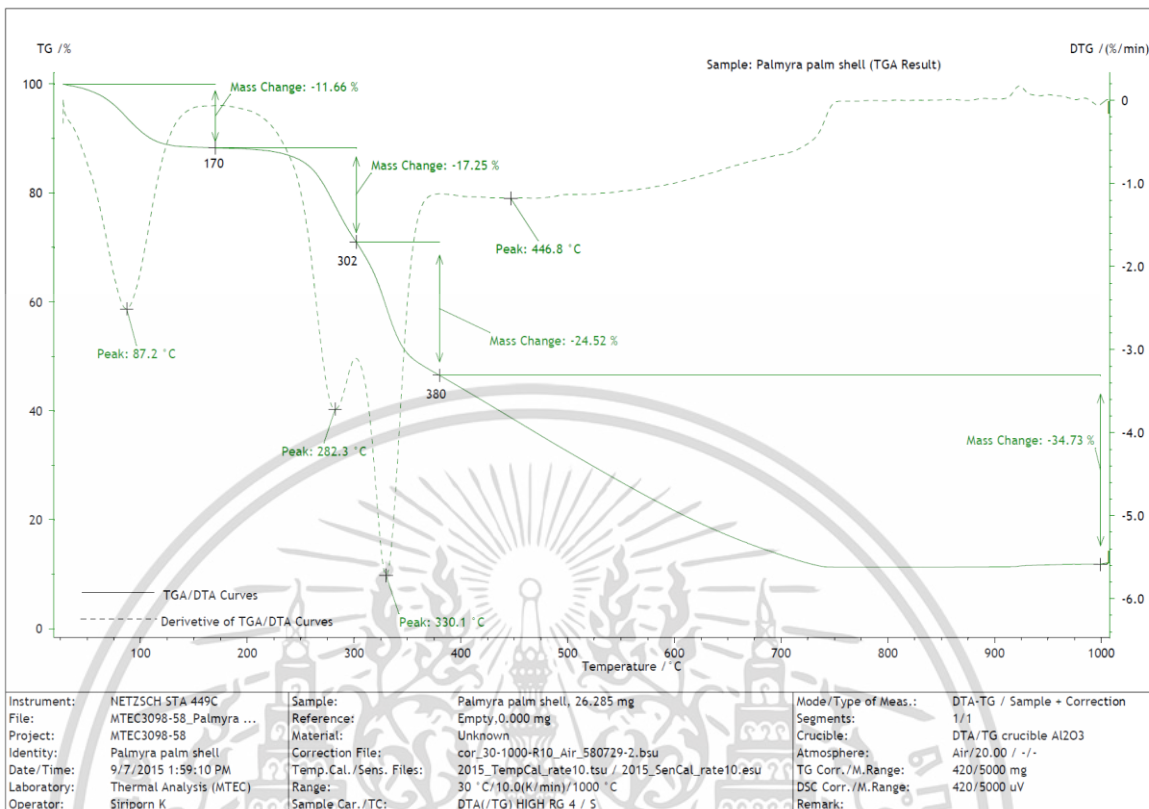
รายงานผลการทดสอบด้วยเทคนิค DTA จากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ หน่วยวิเคราะห์
ลักษณะเฉพาะของวัสดุศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ



รูปที่ ๑-1 TGA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างกระถินยักษ์

อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่าง
1. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 1 (30-165°C)	~ 11.78
2. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 (165-400°C)	~ 50.25
3. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 3 (400-1,000°C)	~ 33.60
4. ปริมาณองค์ประกอบที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (เช่น ถ้ำหลังการเผา และสารอนินทรีย์บางประเภท)	~ 4.37

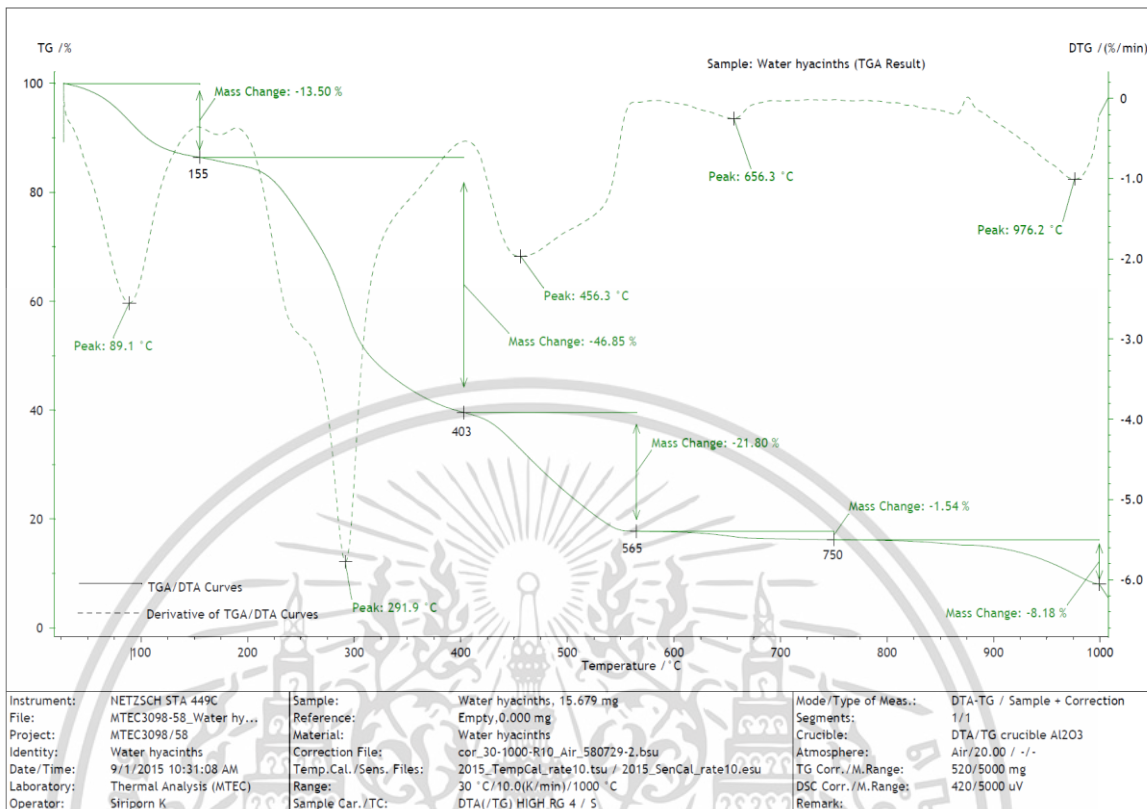
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑-2 TGA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างกะลาตาล

อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่าง
1. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 1 (30-170°C)	~ 11.66
2. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 (170-302°C)	~ 17.25
3. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 3 (302-380°C)	~ 24.52
4. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 4 (380-1,000°C)	~ 34.73
5. ปริมาณองค์ประกอบที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (เช่น เถ้าหลังการเผา และสารอนินทรีย์บางประเภท)	~ 11.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓-3 TGA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างผักตบชวา

อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่าง
1. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 1 (30-155°C)	~ 13.50
2. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 (155-403°C)	~ 46.85
3. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 3 (403-565°C)	~ 21.80
4. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 4 (565-750°C)	~ 1.54
5. ปริมาณองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 5 (750-1,000°C)	~ 8.18
6. ปริมาณองค์ประกอบที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (เช่น เถ้าหลังการเผา และสารอนินทรีย์ขี้บางประเภท)	~ 8.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of biomass size on combustion efficiency and emission performance of a swirling fluidized-bed combustor firing coconut shell

Janya Vechpanich,* Rachadaporn Kaewklum, Prasan Choompajaihan
 Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
 *e-mail: kwang_janya@hotmail.com

Abstract:

This research was aimed to study the effect of biomass size on emission and combustion efficiency in swirling fluidized-bed combustor (SFBC). Coconut shell was shredded and sized into three sizes (df =0.5, 2.5 and 5.0 mm) for using as fuel in the tests. Quartz sand of 600–850 μm and static bed height of 20 cm was used as inert bed material. For all of the tests, the feed rate was fixed at 45 kg/hr for variable excess air (of 40, 60, 80 and 100%), using an annular spiral air distributor as the swirl generator. Axial temperature, CO and NO concentrations inside the combustor and the emission at cyclone outlet were investigated. As the experimental results, the temperature profiles in SFBC were obviously seen deviate when tested with higher excess air. In all tests run, CO and NO emissions were found in quite stable level (less than 220 and 100 ppm, respectively). Increasing the coconut shell size found reduction of CO emission; meanwhile, NO emission was constant but significantly decreased with lower excess air. The combustion efficiency more than 99% could be achieved in this work.

1. Introduction

Biomass is considered an environmentally friendly alternative to fossil fuels because it is naturally produced by photosynthesis from CO_2 and H_2O ¹. Productions of gas and liquid fuels from biomass can be achieved through thermal conversion processes. These processes can be categorized in to combustion, gasification, and pyrolysis according to the operating condition. Fluidized-bed combustion technology is proven to be the most effective technologies for energy conversion of different kinds of biomass²⁻⁷. Various kinds of biomass have been extensively investigated for fluidized-bed combustion, including palm kernel, sunflower, rice husk, sugar cane, and coconut shell.⁸ Coconut shell, accounting for approximately 25 wt. % of a coconut, offers uniqueness of low ash and high alkaline contents. Because of the catalytic activity of alkali for gasification, coconut has been used as an activated carbon precursor. The low ash content allows

coconut char to serve as an excellent fuel for carbon fuel cells.⁹ However, the combustion efficiency and emission performance (the latter being mainly represented by CO and NO emissions) of a fluidized-bed combustion system (furnace/combustor) fuelled with biomass are reported to depend on fuel analysis and particle size, as well as on the system design features and operating parameters, particularly excess air.^{3,6,10-14} When burning biomass in a well-designed combustion system, the CO emissions from this system can be effectively decreased via increasing the amount of excess air within a reasonable range. Along with a decrease of unburned carbon content in the fly ash (generally observed with increasing excess air), a reduction in the CO emissions leads to the improvement of the system combustion efficiency²⁻⁵. On the contrary, the emission of NO shows a substantial increase with a higher level of excess air.^{2,4,6} Recently, two novel combustion techniques ensuring

PACCON Proceedings 2016: Chemistry for Alternative Energy (CAE-3704)

fuel oxidation in a strongly swirled flow (a vortex combustor and a cyclonic fluidized-bed combustor) have been studied for firing rice husk.^{15,16} Under optimum operating conditions, high (>99%) combustion efficiency is achievable in these two reactors, while controlling CO emission at a reasonable level (below 400 ppm). However, NO_x emission from the combustors are reported to be elevated, mainly because of the significant combustion intensity of these relatively "short" devices operated at high excess air. Another innovative combustion technique integrating the bed fluidization with its swirl motion (a swirling fluidized-bed combustor) has been tested for firing rice husk^{17,18}. In this device, a swirling fluidized-bed is generated by primary air introduced into the bed through an annular spiral air distributor, while rotational gas-solid flow in the combustor freeboard is sustained by secondary air injected tangentially into the bed splash zone. High combustion efficiency at rather low major emissions is ensured in this swirling fluidized-bed combustor firing rice husk over wide ranges of fuel properties and operating condition.¹⁸

This work was aimed at studying the combustion of coconut shell in the swirling fluidized-bed combustor using quartz sand as the bed material to prevent bed agglomeration. Effect of excess air (a key operating parameter of the combustor) and biomass size on the behavior of major gaseous pollutants (CO and NO) in different regions inside the combustor were the focus of experimental tests. Effects of biomass size on combustion efficiency and emission performance of a swirling fluidized-bed combustor firing coconut shell were the main focus of this study.

2. Materials and Methods

2.1 Experimental set-up

Figure 1. shows schematic diagram of experimental set-up of the swirling fluidized-bed combustor. The combustor

was made from 4.5-mm-thick steel covered internally with 50-mm-thick refractory cement. A combustor body consisted of two part, a conical section with a 40° cone angle, 1 m height and 0.25 m diameter at the bottom base, and a cylindrical section with 2.5 m height and 0.9 m inner diameter. An annular spiral distributor for the combustor was made of stainless steel and had the same geometrical characteristics as those of the swirl generator in the 'cold' model. Quartz sand of 0.6-0.8 mm size and 20-cm static bed height was used as the inert bed material. To stabilize the swirl motion of the gas-solid bed, a steel cone with 80-mm diameters at its lower base was fixed on the top of the air distributor, as shown in Figure 1. A screw-type feeder delivered biomass over the bed at a 0.6 m level above the air distributor, which a 25-hp blower supplied primary air into the combustor through the distributor. An external cyclone at the top of the SFBC served for separation of particulate matters (char, ash and carryover sand particles) from the flue gas leaving the combustor.

2.2 The fuel

Table 1 shows major fuel properties, the ultimate and proximate analyses as well as the lower heating value (LHV), of coconut shell used in this study as fuel. It can be seen in Table 1 that the biomass included a significant amount of volatile matter, whereas fuel moisture and ash were at quite low level, which resulted in a substantial heating value of the shell.

To investigate the effects of biomass particle size on combustion and emission performance of the SFBC, combustion tests were carried out for three sizes ($d_f = 0.5, 2.5$ and 5.0 mm).

2.3 Experimental method for the combustion tests

In the combustion study, the mean particle size of coconut shell and excess air were chosen as independent variable, whereas the fuel feed rate was maintained to be constant, 45 kg/h, in all the combustion tests.

PACCON Proceedings 2016: Chemistry for Alternative Energy (CAE-3704)

Table 1. Ultimate and proximate analyses and lower heating value of coconut shell fired in the SFBC (W=fuel moisture; A=fuel-ash; VM=volatile matter; FC=fixed carbon; LHV=lower heating value).

Ultimate analysis(wt%,on"as-received" basis)					Proxiimate analysis(wt%,on"as-received" basis)				
C	H	O	N	S	W	A	VM	FC	LHV(kJ/kg)
45.0	6.4	45.1	0.17	0.03	13.5	3.3	63.8	19.4	16,873

For each size, the experimental tests for characterization of major gaseous emissions (CO and NO) and combustion efficiency of the SFBC were performed at four excess air values: 40%, 60%, 80% and 100%.

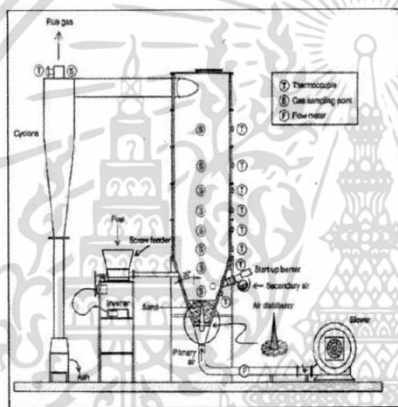


Figure 1. Schematics of the experimental set-up with a laboratory-scale conical SFBC.¹⁷

For measuring the gas concentrations (CO and NO) and temperature, the Testo-350XL was employed. They were measured along axial directions in the SFBC, as well as at the exit of an ash-collecting cyclone downstream from the combustor. The relative measurement errors were of 0.5% for the temperature, 5% for CO ranged from 100-2000 ppm, 10% for higher than 2000 ppm, 5% for NO and 0.2% for. Chromel-alumel thermocouples were fixed at difference levels along the combustor height and at the cyclone outlet to monitor the temperatures (in relative error of about 1%) in the flue gas. In addition, fly ash

was sampled at cyclone exit to determine unburned carbon in the ash, which together with CO emission was used to quantify the combustion efficiency.

3. Results & Discussion

3.1 Axial temperature and gas concentration profiles in the SFBC

The axial temperature profiles in the SFBC of coconut shell are shown in Figure 2. It has four value of excess air, of 40, 60, 80 and 100%. As seen in Figure 3 (a-d), the profiles were rather uniform and independent of the particle size ($z < 0.7$ m). This fact indicates an occurrence of turbulent fluidization regime of the expanded fluidized bed ensuring excellent mixing of sand, chars, and gases in the bed. At upper levels ($z > 0.7$ m), the profiles exhibited a diminishing temperature trend along the combustor height, likely caused by heat losses across the reactor walls. With decreasing biomass particle size, temperatures at all the locations in the cylindrical section were somewhat higher. This fact can be generally explained by elevated carryover of relatively light biomass particles from the combustor bottom into the freeboard. As can be compared between Figure 2a-2d, an increase in excess air from 40% to 100% led to a local temperature drop (by 50-60 °C) at all points inside the reactor, which can be explained by air dilution effects.

Figure 3 shows the axial profiles of CO and NO in the SFBC for the same condition, as in Figure 2. All the profiles in Figure 3 are seen to exhibit two specific regions in the reactor pointing at predominant formation of the pollutants at the combustor bottom and their oxidation

PACCON Proceedings 2016: Chemistry for Alternative Energy (CAE-3704)

(for CO) or reduction (for NO) in the freeboard. In the first region ($z < 0.8$ m), CO exhibited a tremendous increase (axial gradient) along the combustor height, mainly caused by the rapid devolatilization of biomass and further oxidation of light hydrocarbons (C_xH_y) and char-C¹⁹. The peak of CO (at $z \approx 0.8$ m), was apparently higher at all the levels above the air distributor, likely due to the greater contribution of the char oxidation to formation of CO in this region. In the section region ($z > 0.8$ m), where secondary (decomposition) reactions were predominant, CO decreased along the combustor height, and the highest reduction rate was observed at $0.8 < z < 1.0$ m. The CO oxidation in both regions likely occurred via chemical reactions involving O_2 and water vapor¹⁹.

It can be seen in Figure 3 that NO rapidly increased in the first region ($z < 0.8$ m) along the reactor height, generally due to the biomass devolatilization and further oxidation of volatile nitrogenous species to NO via the fuel-NO formation mechanism². However, a part of the NO was simultaneously reduced in this region due to the catalytic reactions of NO with CO and light hydrocarbons on the surface of char, ash, and bed material particles^{2,19}. In the upper region ($z > 0.8$ m), a significant reduction of NO was observed, mainly due to the above-mentioned catalytic reduction that was predominant in this region. Note that the gradual diminishing of CO and C_xH_y in the freeboard caused an apparent decrease in the rate of NO reduction along the combustor height.

Due to the higher levels of CO facilitating the catalytic reduction, NO at all point inside the combustor fired with coarser fuel particles was noticeably lower, compared to small-size coconut shell. It can be also seen that the influence of excess air on the behavior of NO in the axial direction was substantial. With increasing excess air from 40% to 100%, NO increased by 30–40 ppm at different

points inside the reactor, indicating the occurrence of the fuel-NO formation mechanism at the combustor bottom and the decreased contribution of CO to reduction of NO in the freeboard.

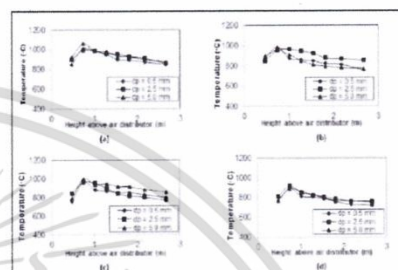


Figure 2. Axial profiles of temperature and in the SFBC when 45 kg/h coconut shell with different mean particle size at excess air of (a) 40%, (b) 60%, (c) 80% and (d) 100%.

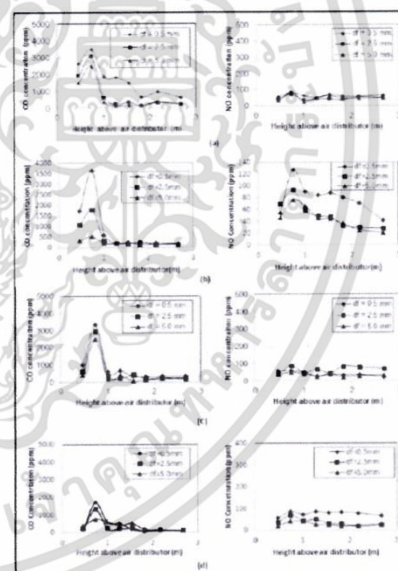


Figure 3. Axial profiles of CO and NO in the SFBC when firing 45 kg/h coconut shell with different mean particle sizes at excess air of (a) 40%, (b) 60%, (c) 80% and (d) 100%.

3.3 Emissions

Figure 4 depicts the CO and NO emission, all on a dry gas basis and at 6% O₂, of the SFBC for the ranges of coconut shell particle size and excess air. These emissions represent, in effect, a net result of the chemical processes in different regions of the reactor.

It can be seen in Figure 4 that all the emissions exhibited the substantial effects of both biomass particle size and excess air. With increasing particle size (at fixed excess air), the CO emission was found to be significantly increased, attaining extremely high level high levels at the lowest amount of excess air. This result is attributed mainly to the higher peaks of CO in the vicinity of fuel injection as well as to the lower rate of biomass oxidation in the combustor freeboard when burning coarser coconut shell. However, an increase in excess air (at fixed biomass particle size) from about 40%–60% led to a significant reduction of these emission, exhibiting however quite weak effects at excess air of 60–80%

On the contrary, the NO emission was noticeably decreased with coarser biomass particles at any arbitrary level of excess air. This result was achieved mainly due to the enhanced catalytic reduction of NO, because of the increased levels of CO in both the bottom and freeboard regions of the reactor. A significant NO reduction was therefore achieved at the lowest excess air when burning the coarsest

shells. In accordance with the fuel-NO formation mechanism, excess air had quite substantial (proportional) effects on NO for all the size of coconut shell.

Thus, when burning coconut shell of a given particle size, the emission of CO can be minimized to an acceptable/reasonable level via increasing excess air of the combustor, whereas controlling of the NO emission can be ensured by minimizing excess air at the region of NO formation (i.e., at the reactor bottom) regardless of the shell particle size.

3.4 Combustion Efficiency

As shown by analysis of fly ash (collected at the cyclone) for unburned carbon, this conical SFBC secures quite high fuel-burnout rate. Depending in excess air, the unburned carbon content in the fly ash was in the ranges of excess air (or O₂ at stack). Figure 5 shows the combined effects of biomass particle size and excess air on the combustion efficiency of the SFBC. Like the heat losses, combustion efficiency of the proposed technique exhibited substantial effects of the biomass particle size and excess air. As seen in Figure 5, the combustion efficiency can be improved by increasing excess air. For the range of biomass particle size, high (99.5-99.6%) combustion efficiency can be achieved by maintaining excess air at 40-60%. Higher combustion efficiency is associated with higher coconut shell particles.

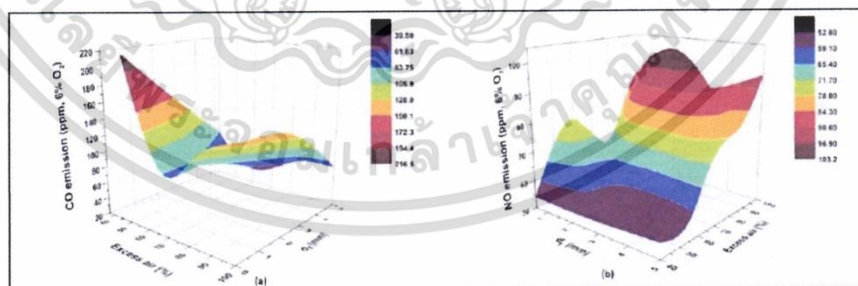


Figure 4. Effects of biomass particle size and excess air on the (a) CO, (b) NO emission of the SFBC when firing 45 kg/h coconut shell.

PACCON Proceedings 2016: Chemistry for Alternative Energy (CAE-3704)

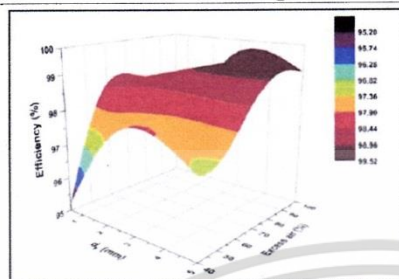


Figure 5. Effects of biomass particle size and excess air on the combustion efficiency of the SFBC when 45 kg/h coconut shell.

4. Conclusion

The coconut shell could be effectively utilized for energy conversion in wide range of biomass particle size and operating condition (excess air) through burning in a swirling fluidized bed combustor. This innovative combustion technique had been successfully tested for 45kg/h at different values of excess air of 40–100%.

The best combustion an emission performance of the SFBC was achievable during the combustion of coconut shell with a particle size of size about 5 mm via maintaining excess air at 40–80%. Under these optimal condition, the combustor could be operated with high (99.5–99.6%) combustion efficiency ensuring the minimum emission (or “external”) costs of the proposed combustion technique.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge sincerely the financial support from Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand.

References

1. Davis, S. C.; Anderson-Teixeira, K. J.; Delucia, E. H. *Trends Plant Sci.* **2009**, *14*, 140–146.
2. Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E.-U.; Ogada, T.; Siagi, Z. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2000**, *26*, 1–27.
3. Fang, M.; Yang, L.; Chen, G.; Shi, Z.; Luo, Z.; Cen, K. F. *Fuel Process. Technol.* **2004**, *85*, 273–282.
4. Permchart, W.; Kouprianov, V. I. *Bioresour. Technol.* **2004**, *92*, 83–91.
5. Kaynak, B.; Topal, H.; Atimtay, A. T.; Chyang, C.-S.; Qian, F.-P.; Lin, Y.-C.; Yang, S.-H. *Energy Fuels* **2008**, *22*, 1004–1011.
6. Youssef, M. A.; Wahid, S. S.; Mohamed, M. A.; Askalany, A. A. *Appl. Energy* **2009**, *86*, 2644–2650.
7. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> (accessed 09/10/2014).
8. Siengchum, T.; Guzman, F.; Chuang, S. S. C. *J. Power Sources* **2012**, *213*, 375–381.
9. Arromdee, P.; Kuprianov, V. I. *Appl. Energy* **2012**, *97*, 470–482.
10. Suranani, S.; Reddy, G. V. *Int. J. Chem. Eng. Appl.* **2012**, *3*, 147–151.
11. Singh, R. I.; Mohapatra, S. K.; Gangacharyulu, D. *Energy Convers. Manage.* **2008**, *49*, 86–103.
12. Patumsawad, S.; Cliffe, K. R. *Energy Convers. Manage.* **2002**, *43*, 2329–2340.
13. Kuprianov, V. I.; Kaewklum, R.; Chakritthakul, S. *Energy* **2011**, *36*, 2038–2048.
14. Eaimsa-ard, S.; Kaewkohkiet, Y.; Thianpong, C.; Promvong, P. *Heat Mass Transfer* **2008**, *35*, 1134–1140.
15. Madhiyanon, T.; Lapirattanakun, A.; Sathitruangsuk, P.; Soponronnarit, S. *Combust. Flame* **2006**, *146*, 232–245.
16. Kaewklum, R.; Kuprianov, V. I. *Fuel* **2010**, *89*, 43–52.
17. Kuprianov, V. I.; Kaewklum, R.; Sirisomboon, K.; Arromdee, P.; Chakritthakul, S. *Appl. Energy* **2010**, *87*, 2899–2906.
18. Turn S. An introduction to combustion. Boston: McGraw-Hill; **2006**.



The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

Letter from TSAE President

The TSAE 2016 Conference is The 17th TSAE National Conference and the 9th TSAE International Conference. We go by the theme "Beyond Great Agro". We are proud to organise along with SIMA ASEAN Thailand 2016 which provide wider vision than just conference. Since the SIMA show is one of biggest Agri-business Show in the world held in Paris from 1870. I hope that the technology shows in this exhibition will build our perspective Beyond Great Agro.



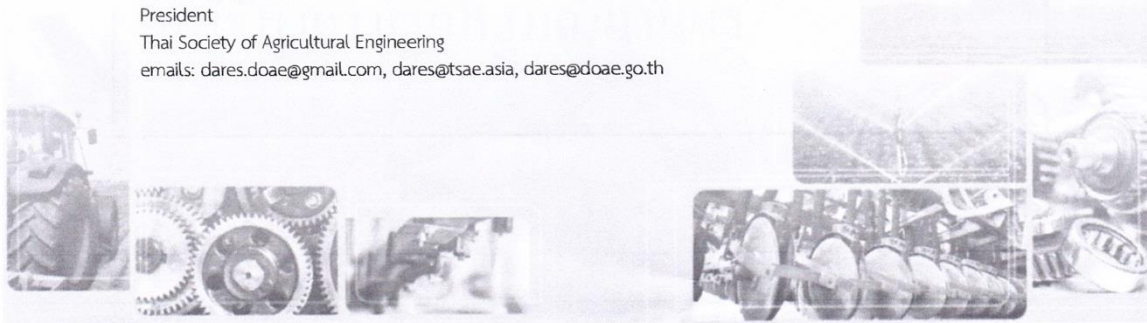
In my point of view regarding agricultural technology, Farm Machinery and Agricultural Engineering is heading to Precision Farming. Labor shortage is the first signal to tell us that we need agricultural machineries instead. Climate changes effect farming seasons, are the second signal to tell us using data information and forecasting models for farm system. Facing short preparation period and long drought or big flood forces us to use high performance machineries. The high quality along with high price of seeds confirm the need of high precision farm machineries. Experience of operators has been changed, new generation farmers are familiarly with auto-controller than manually control. The auto-pilot systems are the need for next generation farm.

In the view of farm machinery management, the cyber is the most influence in technologies transfer. Manufacturers and Trader can contact without face to face meeting as ever. The country boundaries has dissolved. Cross boundary farming will be common business in the future. We need to be in networking. In this moment, TSAE has networked with many of farm machinery associations and organisations such as CSAM, AMA, ANTAM, ACABE, FTI, KAMICO, TMA, TAMMA, PSAE, MSAE, VSAGE, research associations, etc. That is our preparation to go smart in our future agriculture world.

In the 17th TSAE National Conference and the 9th TSAE International Conference, TSAE arrange 82 articles of research papers in the field of Power and Machinery, Soil and Water Engineering, Energy and Environment, Electronics and Information Technology and Post-harvest and Food Engineering. We are proud to express our keynote speakers consists of: Dr. Katinka Weinberger, the OIC of CSAM in "Perspectives on Agricultural Machinery in Asia-Pacific Region", Assoc. Prof. Ahamed Tofael, University of Tsukuba, Japan in "Precision Agriculture and Remote Sensing Technologies", and Mr. Tawat Sutasineenon, Head of Technology and Development, Global Innovation Incubator, Thai Union Group Public Co., Ltd. in "What the Food Industry is Expecting from Academic Researchers".

I believe that the success of farming and agi-business develop from knowledge, technologies, planning, and management. Agricultural engineering is all of them.

Dares Kittiyopas
 President
 Thai Society of Agricultural Engineering
 emails: dares.doae@gmail.com, dares@tsae.asia, dares@doae.go.th



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

EE-02

Effects of Operating Conditions and Fuel Properties on Combustion Efficiency and Emission Performance of A Swirling Fluidized-bed Combustor Firing *Leucaena leucocephala*

Janya Vechpanich^{1*}, Prasan Choompajaihan¹

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.

Corresponding author: Janya Vechpanich. E-mail: kwang_janya@hotmail.com

Abstract

This research was aimed to study the effect of operating conditions on emission and combustion efficiency in swirling fluidized-bed combustor (SFBC). *Leucaena leucocephala* was shredded and sized into one size (df =5.0 mm) for using as fuel in the tests. Quartz sand of 600-850 μm and static bed height of 20 cm was used as inert bed material. For all of the tests, the feed rate was fixed at 45 kg/hr for variable excess air (of 20, 40, 60 and 80%), using an annular spiral air distributor as the swirl generator. Axial temperature, CO and NO concentrations inside the combustor and the emission at cyclone outlet were investigated. As the experimental results, the temperature profiles in SFBC were obviously seen deviate when tested with higher excess air. In all tests run, CO and NO emissions were two in quite stable level (less than 400 and 200 ppm, respectively). The combustion efficiency more than 95% could be achieved in this work

Keywords: *Leucaena leucocephala*, Swirling, Fluidized-bed, Combustion efficiency

1 Introduction

Development of alternative renewable energy continues to grow in recent times because of the fear of energy insecurity in the near future and environmental cumsociopolitical issues associated with the use of fossil fuels. Biomasses in term of agricultural resources supply energy in two forms from energy crops and residue of crops. So, a fast growing energy crops are needed which can mitigate the current energy crisis having less impact on environmental pollution. In such case, *Leucaena leucocephala* can be a crucial plant as it is one of the most fast growing, production and versatile multipurpose tree which can be grow in wide range of soil and tolerate drought [1]. Among a variety of combustion technologies, fluidized-bed combustion has proven suitable for burning alternative solid fuel, due to its efficiency in converting fuels to clean energy, fuel flexibility, and clean operation [2-5]. Recently, two novel combustion techniques ensuring fuel oxidation in a strongly swirled flow (a vortex combustor and a cyclonic fluidized-bed combustor) have been studied for firing biomass [6-7]. Under optimum operating conditions, high (>99%) combustion efficiency is achievable in these two reactors, while controlling CO

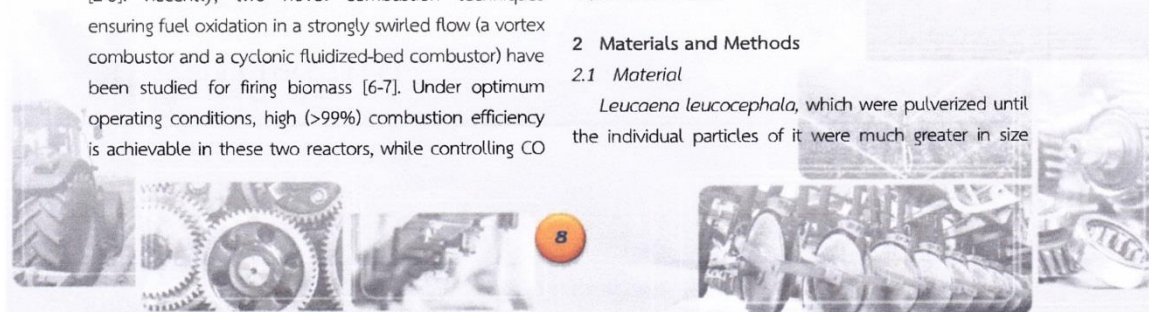
emission at a reasonable level (below 400 ppm). In this device, a swirling fluidized-bed is generated by primary air introduced into the bed through an annular spiral air distributor, while rotational gas-solid flow in the combustor freeboard is sustained by secondary air injected tangentially into the bed splash zone. High combustion efficiency at rather low major emissions is ensured in this swirling fluidized-bed combustor firing rice husk over wide ranges of fuel properties and operating condition [8].

This work was aimed at studying the combustion of *Leucaena leucocephala* in the swirling fluidized-bed combustor using quartz sand as the bed material to prevent bed agglomeration. Effect of excess air (a key operating parameter of the combustor) on the behavior of major gaseous pollutants (CO and NO) in different regions inside the combustor was the focus of experimental tests.

2 Materials and Methods

2.1 Material

Leucaena leucocephala, which were pulverized until the individual particles of it were much greater in size



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

($df=5$ mm) and reduced the moisture (10-15% moisture content) The collected samples were analyzed to determine their proximate and ultimate analysis. The parameters to be analyzed according to ASTM standard were moisture (ASTM D 3173), ash content (ASTM D 3174), volatile matter (ASTM D 3175), fixed carbon (ASTM D 3176), total sulphur content (ASTM D 3177), and thermal value (ASTM D 3286) [9-11].

2.2 Experimental TGA

The pulverized samples were subjected for thermogravimetric analysis. The combustion characteristic of biomass was performed in the thermogravimetric analyzer in a room temperature of 25°C and the thermogravimetric (TG) profile and differential thermogravimetric (DTG) profile were analyzed using Proteus 6.0.0. At the heating rate of 10°Cmin⁻¹, the temperature of furnace was increased from 30°C to 900°C an air flux (O₂) of 20 mLmin⁻¹. The mass of the sample was monitored continuously as a function of temperature and time.

2.3 Experimental set-up

Fig.1 shows schematic diagram of experimental set-up of the swirling fluidized-bed combustor. The combustor was made from 4.5-mm-thick steel covered internally with 50-mm-thick refractory cement. A combustor body consisted of two part, a conical section with a 40° cone angle, 1 m height and 0.25 m diameter at the bottom base, and a cylindrical section with 2.5 m height and 0.9 m inner diameter. An annular spiral distributor for the combustor was made of stainless steel and had the same geometrical characteristics as those of the swirl generator in the 'cold' model. Quartz sand of 0.6-0.8 mm size and 20-cm static bed height was used as the inert bed material. To stabilize the swirl motion of the gas-solid bed, a steel cone with 80-mm diameters at its lower base was fixed on the top of the air distributor, as shown in Fig.1 A screw-type feeder delivered biomass over the bed at a 0.6 m level above the air distributor, which a 25-hp blower supplied primary air into the combustor through the distributor. An external cyclone at the top of the SFBC served for separation of

particulate matters (char, ash and carryover sand particles) from the flue gas leaving the combustor.

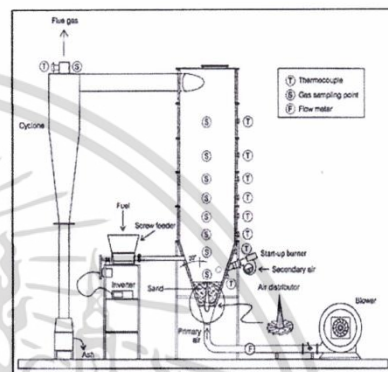


Figure1. Schematics of the experimental set-up with a laboratory-scale conical SFBC [12]

2.4 Experimental procedures

The concentrations of major gaseous pollutants (CO and NO) in flue gas were measured in the experimental tests along the combustor height above the air distributor when firing the selected biomass fuels. In addition, concentrations as well as temperatures were detected along the combustor height and in the flue gas at the cyclone outlet (see Fig.1). For each test run, the value of excess air in the flue gas was determined using the O₂ and CO concentrations at the cyclone outlet.

For measuring the gas concentrations (CO, NO, and O₂) and temperature, the Testo-350XL was employed. They were measured along axial directions in the conical SFBC, as well as at the exit of an ash-collecting cyclone downstream from the combustor. The relative measurement errors were of 0.5% for the temperature, 5% for CO ranged from 100-2000 ppm, 10% for higher than 2000 ppm, 5% for NO and 0.2% for O₂. Chromel-alumel thermocouples were fixed at difference levels along the combustor height and at the cyclone outlet to monitor the temperatures (in relative error of about 1%) in the flue gas.

Percent excess air (EA) was selected to be an independent variable in this work, while the fuel feed rate (FR) was adjusted at a constant value, of 45 kg/h, in



The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

all the test runs. The detail investigations, of the axial profiles in the conical SFBC were carried out for four values of excess air, of about 20, 40, 60, and 80%, which (at fixed value of secondary air: SA) were ensured by corresponding percent of primary air (PA). For these four test series, CO, NO and O₂ concentrations were also recoded in dry flue gas at the cyclone outlet with the aim to characterize emission performance of the combustor. In addition, fly ash was sampled at cyclone exit to determine unburned carbon in the ash, which together with CO emission was used to quantify the combustion efficiency.

3 Results and Discussion

3.1 Proximate analysis and the ultimate analysis

The results of the ultimate analyses and the low heating value (LHV) are provided in table 1. The *Leucaena leucocephala* exhibited the quite highest C content, and the highest LHV. Table 1 also shows that *Leucaena leucocephala* has 0.26% sulfur content. As expected, the sulfur content in the biomass is lower than 0.4%, which indicates these materials should be treated with great caution, due to the emission of pollutant gas (SO_x) and corrosion problems of the equipment.

Among the biomass samples in this study, only the N content is higher than 0.9%, therefore its contribution to NO_x emission from combustion processes will be higher than the contribution of the others. This is an important issue to be considered because the NO_x formation depends on both fuel and thermal conditions. Thermal NO_x has significance at temperature above 1540 C [13]. In fluidized beds, the combustion occurs at temperature between 850 C and 950 C, consequently, the thermal NO_x production is not significant in these combustion processes. However, Qian et al. [14] reported results of high nitrogen content biomass emission in pilot scale vortexing fluidized bed combustor and concluded that there is no obvious relation between NO emission and fuel-N content. They speculated that the chemical structure of the fuel may be an important factor that should also be evaluated.

Table 1 Proximate analysis and the ultimate analysis of *Leucaena leucocephala*

Analysis (wt% as-received basis)	<i>Leucaena leucocephala</i>
Ultimate	
C	44.18
H	6.37
O	42.25
N	2.01
S	0.26
Proximate	
W	6.96
A	4.93
LHV(kJ/kg)	17,000

3.2 TGA of *Leucaena leucocephala*

The combustion mechanisms of *Leucaena leucocephala* can be explained according to thermogravimetric (TG) and the first derivative of TG (rate of weight-change, DTG) curves, which represent the combustion characteristics of the fuel, as shown in Fig. 2; these results is clear that the devolatilization of *Leucaena leucocephala* started at around 200-400°C, volatile and char combustion took place at around 400-800°C, and at around 800°C, no further changes in weight were observed, implying that devolatilization and combustion of biomass with high volatile matter content, such as *Leucaena leucocephala*, occurred instantaneously with feeding into the combustor and exposure to high combustor temperature (more than 1000°C).

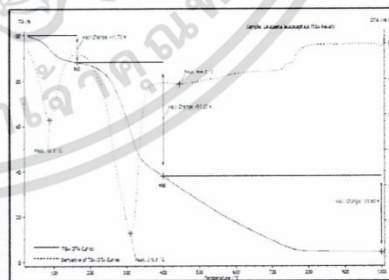
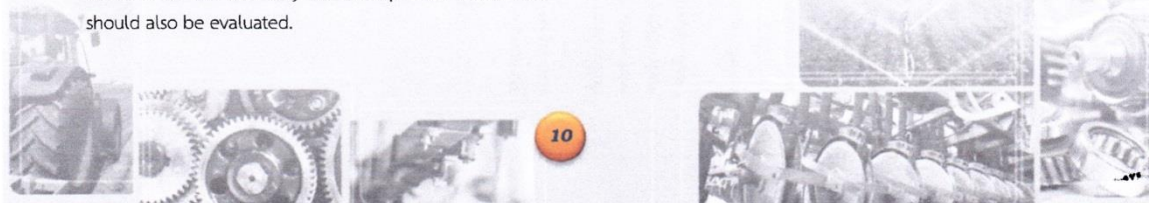


Figure 2 TG and DTG profiles of *Leucaena leucocephala*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.3 Axial temperature and gas concentration profiles in the SFBC

The axial temperature and concentration profiles in the SFBC of *Leucaena leucocephala* was burned in SFBC are shown in Fig. 3(a). *Leucaena leucocephala* has four value of excess air, of 20, 40, 60, and 80%. As seen in Fig. 3 (a), the profiles were rather uniform. All the temperature profiles showed small negative gradient in the bed region due to the influence of the secondary air. However, for the applied operating condition, the profiles showed quite similar axial gradients at any fixed point on the centerline. The bed temperature was found to decrease by about 80°C, when excess air increased from 20-80%. In distinct test runs, the axial temperature maximum was found at nearly the same level 3.2 m above the air distributor, despite the axial velocity component varied with variation of EA. The maximum temperature was rather high, ranging from 1100 and 800 °C, when excess air varied from 20 and 80%.

As can be seen in Fig.3 (b), the axial concentrations were noticeably influenced by the operating condition, particularly, in the bed region. Because of the elevated temperature and the air deficiency in the bed, the effects of secondary air were stronger when testing the combustor at EA=20% compared to those for other test runs. However, at level more than 2.9 m, the regaining of the concentration (due to air staging) occurred quite rapidly.

3.4 Emission profiles in the SFBC

Fig. 4 depicts the axial CO (Fig.4a) and NO (Fig. 5b) concentration profiles in the conical SFBC for the same operating condition, as Fig. 3. Due to the high volatile matter and small amount of ash in cofiring, the fuel devolatilization occurred primarily in the swirling fluidized bed. However, responding to the secondary air injection, CO concentration along the combustor axis reduced at significant rate in the region of Z=0.5-1.2 m, mainly, via their homogeneous reactions with O₂. The increase of EA resulted in the lower peak of CO occurring in the bed region, due to enhancing of the secondary (CO oxidation) reaction. The axial NO concentration profiles revealed three specific regions along the combustor height. In the

first region, below the level of Z=0.5 m (including the dense bed and splash zones), NO was basically formed from volatile-NH₃, a major precursor of NO formation in biomass combustion [15]. In the second region, of Z=0.2-1.2 m, the chemical reactions responsible for NO decomposition, such as catalytic reduction of NO by CO (on chars surface) and also reaction of NO with NH₃ at oxygen deficiency, prevailed the NO formation, which resulted in reduction of NO. At levels higher than 1.2 m (the third region), the diminishing of NO concentration occurred at a quite low rate compared to that in the second region, likely, due to the lowered CO in the freeboard region.

3.5 Combustion Efficiency in the conical SFBC

As shown by analysis of fly ash (collected at the cyclone) for unburned carbon, this conical SFBC secures quite high fuel-burnout rate. Depending in excess air, the unburned carbon content in the fly ash was in the range from 3-13%, the minimum being found for EA=80%. Table 2 shows the combustion heat losses and combustion efficiency (all as percent LHV) for the four EA values. As seen in Table 2, high combustion efficiency, 96.33% could be achieved when cofiring in this combustor at EA =80%

4 Conclusions

The *Leucaena leucocephala* can be effectively utilized through burning in a conical swirling fluidized bed combustor. But this paper has more effectively when biomass is cofiring. This innovative combustion technique has been successfully tested for 45kg/h cofiring at different values of excess air of 20-80%.

The specific conclusions derived from this study are as follow:

- The combustion profile can be categorized into four stages: moisture removal (110°C); devolatilization (200-400°C); char combustion (400-800°C) and residue decomposition (800°C).
- Low heating value (LHV) was found to be 17 MJ/kg hence it was mixed with rice husk.
- CO and NO were found to be reducing significantly, resulting in quite low CO and NO emission from the





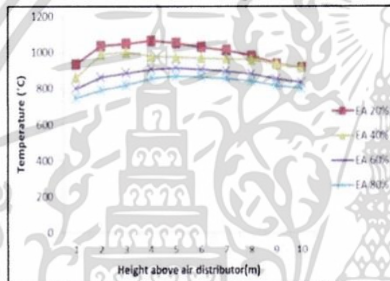
The 17th TSAB National Conference and The 9th TSAB International Conference : TSAB 2016
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

reactor within 300-400 ppm and 100-200 ppm respectively.

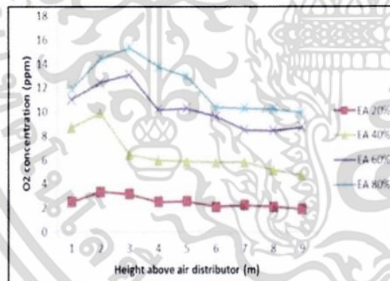
- High combustion efficiency, 96.33%, is achievable when burning the cofiring in the proposed SFBC at 50 kg/h feed rate and excess air of 80%.

5 Acknowledgements

The authors wish to acknowledge sincerely the financial support from Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand.

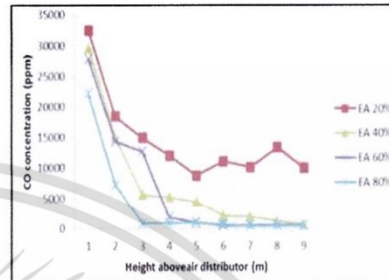


(a)

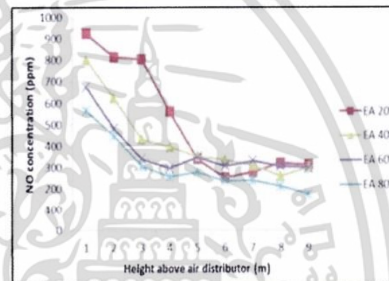


(b)

Figure 3. Axial temperature (a) and concentration (b) profiles in the SFBC cofiring 45 kg/h at different values of excess air.



(a)



(b)

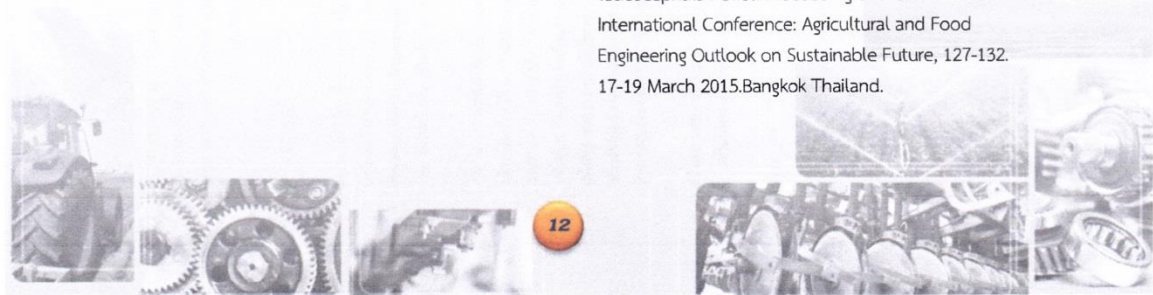
Figure 4. Effects of excess air on the axial CO (a) and NO (b) concentration profiles in the conical SFBC cofiring 55 kg/h

Table 2 Heat losses and combustion efficiency (%) of the conical SFBC cofiring 55 kg/h at difference values of percent excess air

%EA	UC	q _{sc}	CO	q _c	η _{comb}
20	8.91	10.025	181.8	0.06229	89.91
40	5.88	6.400	150.8	0.06567	93.53
60	13.06	15.400	119.0	0.05188	84.55
80	3.42	3.630	67.4	0.04170	96.33

6 References

Amrit, S., Wanphut, S., and Panmanus, S. 2015. Some Physical and Combustion Characteristic of Leucaena leucocephala Pellet. Proceeding of the 8th TSAB International Conference: Agricultural and Food Engineering Outlook on Sustainable Future, 127-132. 17-19 March 2015. Bangkok Thailand.

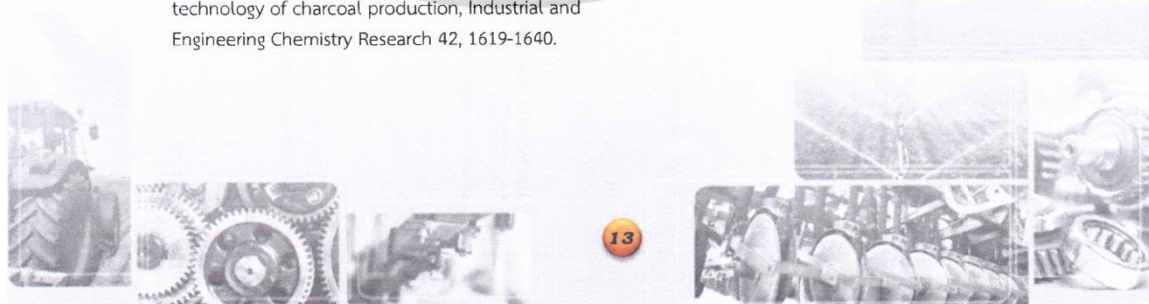


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

- Natarajan, E., and Nordin, A. 1998. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactor, *Biomass Bioenergy* 14, 533-546.
- Anthony, E.J. 1995. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels: status, success and problems of technology, *Prog. Energy Combust. Sci* 21, 239-268.
- Fabrizio, S., and Riccardo, C. 2004. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels: Exp. Therm, Fluid Sci 28, 691-699.
- Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., and Cabanillas, A. 2002. Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidized bed, *Biomass Bioenergy* 23, 171-179.
- Eaimsa-ard S, Kaewkohkiet Y, Thianpong C, Promvongse P. 2008. Combustion behavior in a dual-staging vortex rice husk combustor with snail entry. *Int. Commum. Heat Mass Transfer* 35, 1134-1140.
- Madhiyanon T, Lapirattanakun A, Sathitruangsuk P, Sophonronarit S. 2006. A novel cyclonic fluidized-bed combustor (CFBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distribution, combustion intensity, and emission of pollutants. *Combust. Flame* 146, 232-245.
- Kuprianov VI, Kaewklum R, Sirisomboon K, Arromdee P, Chakritthakul S. 2010. Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk. *Appl. Energy* 8, 2899-2906.
- Thakunmahachai, B. 1993. Production of Activated Carbon from Palmyra Palm Shell in Fluidized Bed, M.Sc. graduate school Chulalongkorn University.
- Ackerman, F., and Fernandes de Almeida, P.E., Iron and charcoal: The industrial fuelwood crisis in Minas Gerais, *Energy policy*, 1990.
- Antal, M.J., and Gronl, M. 2003. The art, science and technology of charcoal production, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 42, 1619-1640.
- Kaewklum R, Kuprianov VI. 2010. Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor. *Fuel* 89, 43-52.
- Basu, P. 2006. *Combustion and Gasification in Fluidized beds*, Taylor and Francis Group, 473.
- Qian, F.P., Chyang, C.S., Huang, K.S., and Tso, J. 2011. Combustion and NO emission of high nitrogen content biomass in a pilot-scale vortexing fluidized bed combustor, *Technol* 102, 1892-1898.
- Werther, J., Saenger, M., and Siagi, Z. 2000. Combustion of agricultural residues, *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 1-27.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Manuscript Acceptance Certificate of CIGR Journal

March 21, 2021

To the Authors of CIGR Journal,

This certificate confirms that the following manuscript has officially been accepted for publication in the CIGR Journal in Vol. 23, No. 2 after serious peer review:

Manuscript Title: The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using

Author: Janya Udomsup, Prasan Choomjaihan

Affiliation: Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

Date Submitted: 2019-08-13

Date Accepted: 2020-02-10

Zhao Fengmin

Prof. Fengmin Zhao
Editor-in-Chief, CIGR Journal

Mailing Address:
CIGR Journal Editorial Office
No. 11 Beishatan, Deshengmen Wai, Beijing 100083, China
Tel: 86-10-64880301
Email: cigjournal@aliyun.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using

Janya Udomsup¹, Prasan Choomjaihan²

^{1,2} Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand
Janya.udo@mail.pbru.ac.th, prasan.ch@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This work presents a study for biomass possible to bring renewable energy in a swirling fluidized bed combustor (SFBC). The main objective of this experimental work was to study the biomass component and excess air of biomass. Palmyra palm shell, Leucaena (lam.), and Water hyacinth are using as fuel in the tests. Quartz sand of 600-850 μm and static bed height of 20 cm was used as inert bed material. For all of the tests, the feed rate was fixed as 45 kg/hr for variable excess air (of 40 60 and 80%). As the experimental results, the temperature profiles in SFBC were obviously seen deviate when tests with higher excess air. In the test run, the highest cellulose (palmyra palm shell) for 80% excess air had CO and NO emissions were found in quite stable level (less than 250 and 300 ppm, respectively). The combustion efficiency more than 99% could be achieved in this work.

Keywords: Biomass, Biomass Component, Efficiency, Emission, Fluidized-bed, Combustion, Swirling

1. INTRODUCTION

Development of alternative renewable energy has been continuously improved in recent times because of the rapidly increasing of the use of energy which is leaded to the energy insecurity and environmental cum sociopolitical issues associated with the use of fossil fuels. Biomasses in term of agricultural resources supply energy in two forms from energy crops and their residue. Therefore, the fast-growing energy crops, biomasses, with less impact on environmental pollution has been intensively explored which hope of that they can be substituted with the current fossil energy source issue. Significant researches have been devoted to the production of activated carbons from agricultural waste materials and based on biomass main components (hemicellulose, cellulose and lignin). In this research, the tree biomasses represented the crop residue and fast growing tree (both land crop and aquatic plant) were selected. Palmyra palm shell, Leucaena (lam.), and Water hyacinth were, then, used as the raw material throughout this research. Among the varieties of combustion technologies, fluidized-bed combustion has proven that it is suitable for burning alternative solid fuel, due to its highly efficiency in converting fuels to clean energy, fuel flexibility, clean operation and so on (Natarajan et al.,1998; Anthony et al., 1995; Fabrizio et al.,2004; Armesto et al.,2002). Recently, two novel combustion techniques ensuring fuel oxidation in a strongly swirled flow have been developed and tested for burning biomass (Eaimsa-ard et al.,2008; Madhiyanon et al., 2006). The swirled flow in the combustor is controlled by two sections a vortex combustor and a cyclonic fluidized-bed combustor which

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

gives more than 99% of combustion efficiency and lower than 400 ppm of CO emission. In the combustor, a swirling fluidized-bed is generated by primary air introduced into the bed through an annular spiral air distributor, as rotational gas-solid flow in the combustor freeboard is sustained by secondary air injected tangentially into the bed splash zone. High combustion efficiency at rather low major emissions is ensured in this swirling fluidized-bed combustor firing rice husk over wide ranges of fuel properties and operating condition (Kuprianov et al., 2010).

Therefore, this work was aimed to study the combustion of Palmyra palm shell, *Leucaena* (lam.), and Water hyacinth, of some biomass component, in the swirling fluidized-bed combustor using quartz sand as the bed material to prevent bed agglomeration. Effect of excess air (a key operating parameter of the combustor) on the behavior of major gaseous pollutants (CO and NO) in different regions inside the combustor was the focus of experimental tests.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Experimental set-up

In the combustion tests, the mean particle size of biomasses and excess air were chosen as independent variable, whereas the fuel feed rate was maintained to be constant 45 kg/h, in all the combustion tests. The SFBC were carried out for three values of excess air, of about 40, 60, and 80%.

Figure 1 depicts schematic diagram of experimental set-up of the SFBC. The combustor was made from 4.5 mm thick steel covered internally with 50 mm thick insulation fabricated from refractory cement. A combustor body consisted of two part, a conical section with a 40° cone angle, 1 m height and 0.25 m diameter at the bottom base, and a cylindrical section with 2.5 m height and 0.9 m inner diameter. An annular spiral distributor for the combustor was made up of stainless steel with the same geometrical characteristics as those of the swirl generator in the 'cold' model. Quartz sand with the size of 0.6 to 0.8 mm set at 20 cm static bed height were used as the inert bed material in the combustor. To stabilize the swirl motion of the gas-solid bed, a steel cone with 80-mm diameters at its lower base was set at the top of the air distributor, as shown in Figure1. A screw-type feeder delivered biomass over the bed at a 0.6 m level above the air distributor, which a 25 hp blower supplied primary air (at ambient condition) into the combustor through the distributor. An external cyclone at the top of the SFBC served for separation of particulate matters (char, ash and carryover sand particles) from the flue gas leaving the combustor.

The concentrations of gaseous pollutants (CO and NO) in flue gas were measured in the experimental tests along the height of combustor above the air distributor when firing the selected biomass fuels. In addition, concentrations as well as temperatures were detected along the combustor height and in the flue gas at the cyclone outlet (see Figure1.) For each test run, the value of excess air in the flue gas was determined using the O₂ and CO concentrations at the cyclone outlet. The Testo-350XL gas analyzer was employed for measuring the gas concentrations (CO, NO, and O₂) and temperature. They were measured along axial directions in the conical SFBC, as well as at the exit of an ash-collecting cyclone downstream from the

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

combustor. The relative measurement errors were of 0.5% for the temperature, 5% for CO ranged from 100-2000 ppm, 10% for higher than 2000 ppm, 5% for NO and 0.2% for O₂. Chromel-alumel thermocouples were set at difference levels along the combustor height and at the cyclone outlet to monitor the temperatures (in relative error of about 1%) in the flue gas.

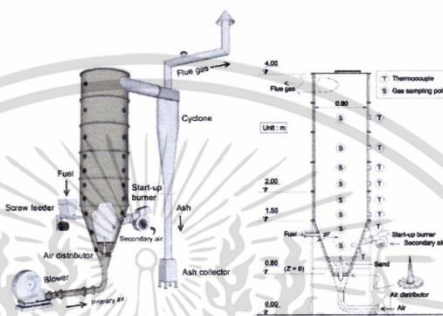


Figure 1. Schematics of the experimental set-up with a laboratory-scale conical SFBC (Kaewklum et al., 2010.)

2.2 Fuel Ultimate Analysis and Heating Value

The results of the ultimate, proximate analyses and the low heating value (LHV) were provided in table 1. It was illustrated in table 1 that the biomass included a significant amount of volatile matter, whereas fuel moisture and ash were at quite low level, which resulted in a substantial heating value of the biomass.

Table 1: The ultimate, proximate analyses and the low heating value (LHV) of biomasses (W=fuel moisture; A=fuel ash; VM=volatile matter; FC= fixed carbon).

Biomass	Ultimate analysis (wt.%, on "as-received" basis)					Proximate analysis (wt.%, on "as-received" basis)				LHV (kJ/kg)
	C	H	O	N	S	W	A	VM	FC	
Leucaena (lam.)	44.18	6.37	42.25	2.01	0.26	12.15	4.65	71.49	11.70	15,570
Palmyra Palm shell	47.14	6.26	44.42	0.20	0.08	9.65	1.82	71.65	16.80	16,630
Water hyacinth	27.79	4.55	34.39	0.93	0.32	9.24	31.02	57.31	2.42	9,670

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >, < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

2.3 Method for TG/DTG analysis of biomass

The ground samples left from higher heating value determination were subjected for thermogravimetric analysis. The combustion characteristic of biomasses was performed in the thermogravimetric analyzer. At the heating rate of 10°Cmin-1, the temperature of furnace was increased from 30 °C to 1000 °C in an air flux(O₂) of 20 mLmin-1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Biomass compositions

The hemicellulose, cellulose and lignin weight fractions present within those nature lignocellulosic materials have been also determined following procedure described in detail elsewhere (Seaman et al.,1954). As shown in Figure 2, the raw materials presented very different compositions. The highest holocellulose (the cellulose combined with hemicellulose) is Palmyra Palm shell. For the biomass that has the most lignin content is water hyacinth, Palmyra Palm shell and Leucaena (lam.), respectively. The total composition (the hemicellulose, cellulose and lignin) of the biomass of Palmyra Palm shell is the highest. The low heating value of Palmyra Palm shell will be high as well.

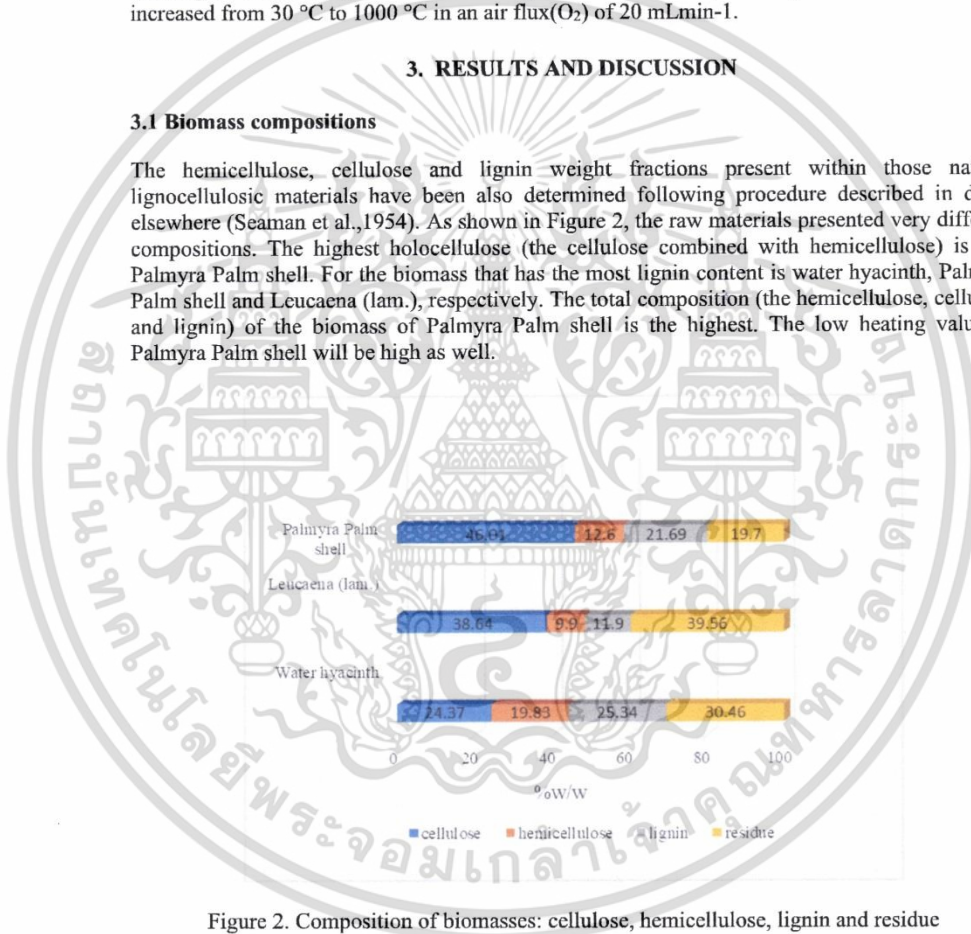
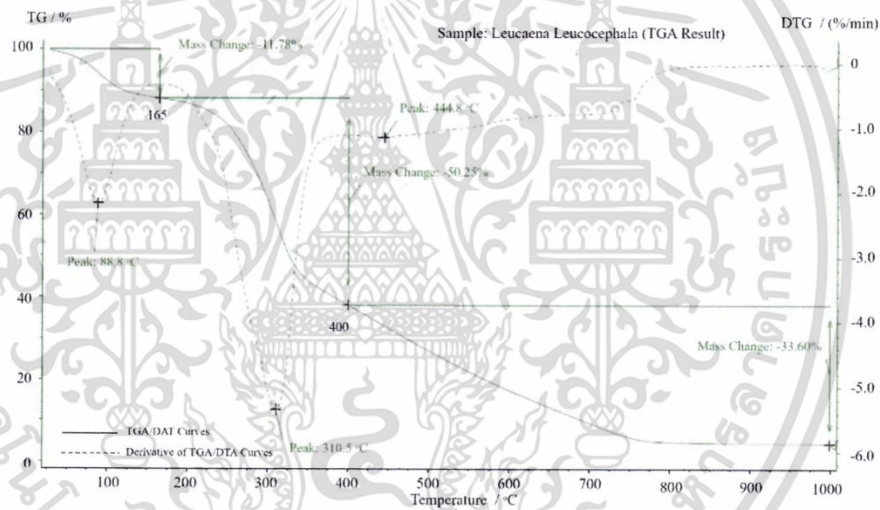


Figure 2. Composition of biomasses: cellulose, hemicellulose, lignin and residue

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

3.2 Thermogravimetric characteristics of biomasses

Thermogravimetric (TG) analyzer was employed to obtain TG and derivative thermogravimetric (DTG) curves of biomass (Leucaena (lam.), Palmyra palm shell, water hyacinth) for the characteristics of them. During each TG test, sample were heated from 30°C to 900 °C at a constant heating rate of 20 °C/min, typical for a TG analysis of various biomasses (Kuprianov et al.,2013, Ninduangdee et al.,2014). Figure 3 illustrated that the thermal decomposition of biomass has 4 ranges. The first phase, the removal of moisture in the biomass material, was set the temperature between 30-200 °C. Phase 2: The temperature between 220-300 °C was for the decomposition of hemicellulose structure. Phase 3: The temperature between 300-340 °C was for the decomposition of cellulose structure. Finally, the temperature over 340 °C was for the decomposition of lignin structure.



(a)

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

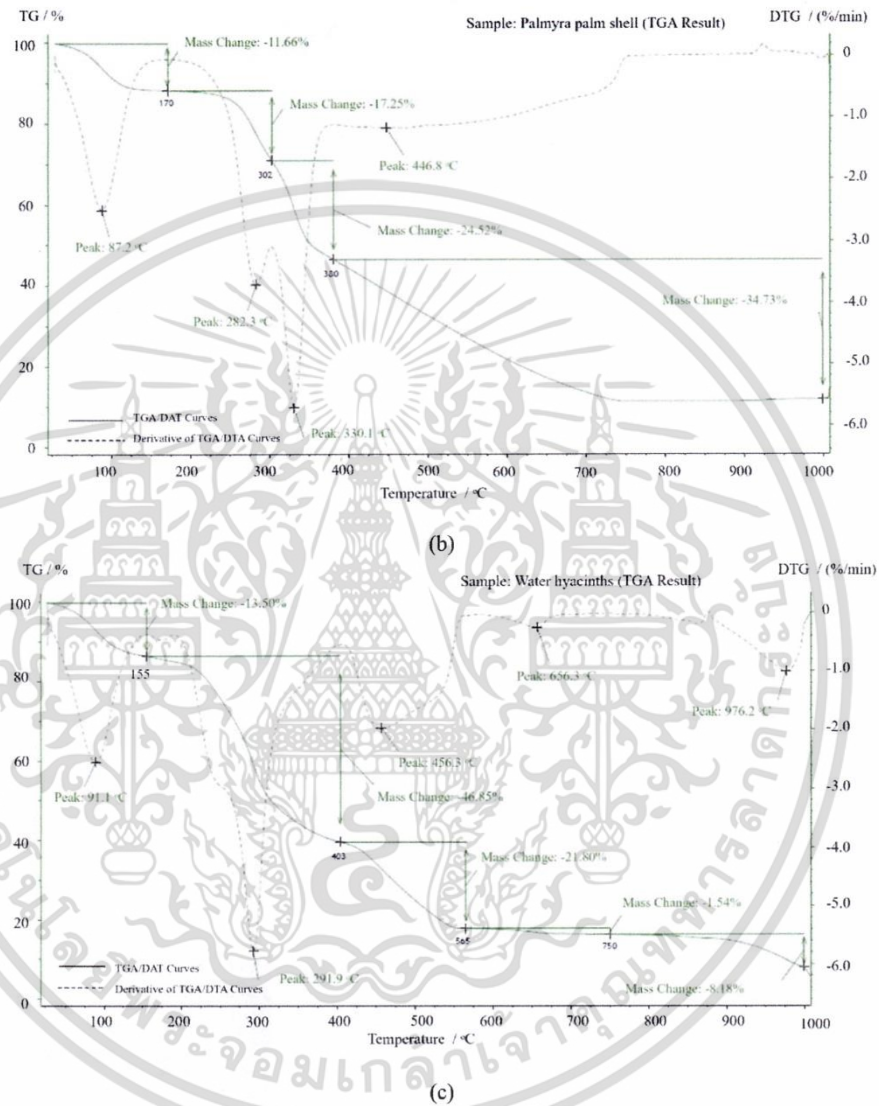


Figure 3. TG/DTA profile of biomass a is *Leucaena* (lam.), b is Palmyra palm shell, c is water hyacinth

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 Emission profiles in the SFBC

Figure 4 shows the effects of excess air (40 % 60% and 80%) and biomass components on the axial CO and NO concentration profiles. In all the test runs, the axial CO concentration profile were found to have a maximum, CO_{max} , at a certain location above the air distributor (at $Z=0.6$ m). The rate of CO formation for the high biomass components (Palmyra Palm Shell) was higher than water hyacinth and Leucaena (lam.), which resulted in difference CO_{max} values for these fuels. CO exhibited a tremendous increase (axial gradient) along the combustor height, mainly caused by the holocellulose (the cellulose combined with hemicellulose) (Cagnon et al. 2009). The apparent difference in the axial CO concentration profiles for difference biomass components confirms a significant role of heterogeneous reaction (on the char surface) of char-carbon with CO_2 and water vapor (Cagnon et al. 2003). These reactions basically follow the fuel “in-bed devolatilization” ($Z \leq 0.6$ m) and further oxidation of the carbonaceous components (released from the fuel particles with volatiles) to CO (Werther et al. 2000, Turn S. 2006). In the reduction region, the CO was basically oxidized in the reaction with OH radicals as well as by oxygen directly (Tillman et al. 1981). The rates of CO reduction in the freeboard region were in apparent correlation with CO concentration, as confirmed by the profiles in Figure 4a.

Simultaneously, significant reduction in the CO concentration along the combustor height occurred in the freeboard region, where CO was likely oxidized in homogeneous with OH radicals and O_2 . For the fuel option, CO concentrations at all the locations of the combustor were lowered with higher EA values. However, the effects of EA on the CO concentrations were found to be rather strong for relatively low excess air values (40%), whereas they were almost negligible for EA= 80%.

In NO measurement, NO concentration in the flue gas at different combustor locations did not exceed 1 ppm. That was why the NO in the discussion below was represented by NO only. Figure 4b compares the axial NO concentration profiles in the SFBC for the same, as in Figure 4a, fuel options and operating conditions. Like CO, all the axial NO concentration profiles possessed a maximum, NO_{max} , where location made it possible to distinguish conventionally the formation and reduction regions for this pollutant.

As shown in Figure 4b, the rates of both NO formation (in the bed region) and NO reduction (in the freeboard region) for firing Leucaena (lam.) were found to be higher than those for Palmyra palm shell and water hyacinth. This difference in the NO formation was apparently correlated to the fuel-N content, while the NO reduction was affected by the ash, catalytic reaction of NO with CO on the surface of char.

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

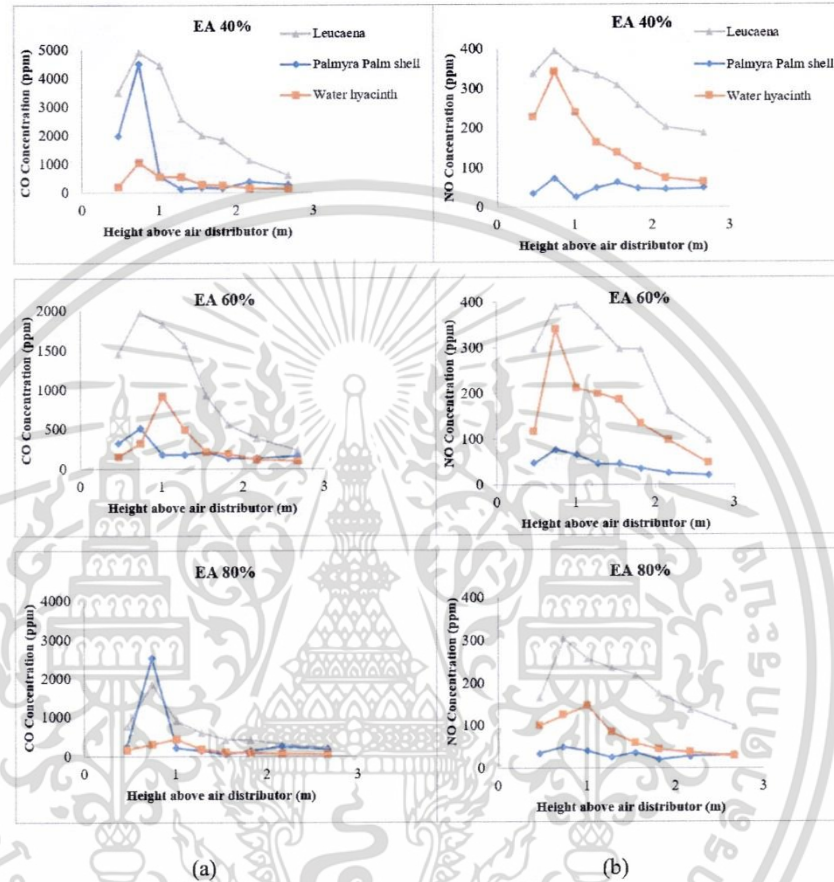


Figure 4. Effects of excess air and biomass component (a) the axial CO concentration profile and (b) the axial NO concentration profile in SFBC.

3.4 Combustion Efficiency

Table 2 compares the heat losses with unburned carbon and owing to incomplete combustion as well as the combustion efficiencies of the SFBC for firing biomasses. Within the range of applied operating conditions (EA), the decreasing in the cellulose content led to deterioration of the combustion efficiency, accompanied, however, by the reduction in NO emissions from the combustor. The reduction in the combustion efficiency could be explained by the noticeably

<Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

increase in the heat loss with unburned carbon, while the heat loss owing to incomplete with unburned carbon was weakly affected by cellulose content.

As may be generally concluded, the best performance of the SFBC could be achieved at different values of EA: while high cellulose content could be burned at EA =40-60%, the combustion of biomass of deteriorated quality (low cellulose content) require higher values of excess air, EA =80%

Table 2: Heat Losses and Combustion Efficiency for the SFBC Firing Biomasses with Different component and Different value of excess air.

Cellulose content	Biomass	Excess air (%)	Heat loss with unburned carbon (%)	Heat loss owing to incomplete with unburned carbon (%)	Combustion efficiency (%)
46	Palmyra palm shell	40	0.039	0.101	99.86
		60	0.035	0.074	99.89
		80	0.03	0.092	99.89
39	Leucaena (lam.)	40	0.425	0.173	99.4
		60	0.367	0.109	99.52
		80	0.347	0.042	99.61
24	Water hyacinth	40	6.352	0.067	93.58
		60	15.274	0.054	84.67
		80	3.601	0.043	96.36

4. CONCLUSIONS

The SFBC has been successfully tested for firing 45 kg/h, the biomass with variable cellulose content, from 20 to 50%, at different percentages of excess air (of about 40, 60 and 80%).

During the experimental tests, data on CO and NO concentrations along the combustor height were generated for the above fuel qualities and operating conditions.

The following major conclusions have been derived from this work:

- The biomass component and excess air have important effects on formation of pollutions at the SFBC bottom and their oxidation (for CO) or reduction (for NO) in freeboard, and consequently, on the combustion efficiency and emissions of the SFBC. The emission of CO can be effectively mitigated by decreasing the biomass composition and/or increasing excess air, whereas the NO emission can be reduced by increasing the biomass component and/or via lowering the amount excess air. Thus, both biomass component and excess air have sensible effects on the formation/reduction of CO and NO in the bottom/freeboard regions of the combustor.
- The temperature profiles in SFBC were obviously seen deviate when tests with higher excess air. In the test run, the highest cellulose (Palmyra Palm Shell) for 80% excess air had CO and NO emissions were found in quite stable level (less than 250 and 300 ppm, respectively). The combustion efficiency more than 99% could be achieved in this work.

<Janya Udumsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

From optimal conditions, the biomass, which is highest cellulose (Palmyra Palm Shell) could be operated with high (99%) combustion efficiency ensuring the minimum emission (or “external”) costs of the proposed combustion biomass for SFBC.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge sincerely the financial support from Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand.

6. REFERENCES

- Anthony, E.J. 1995. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels: status, success and problems of technology, *Prog. Energy Combust. Sci* 21, 239-268.
- Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., and Cabanillas, A. 2002. Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidized bed, *Biomass Bioenergy* 23, 171-179.
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F. 2003. The effect of carbonization/activation procedure on the microporous texture of the subsequent chars and active carbons. *Microporous and Mesoporous Materials* 57, 273-282.
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F. 2009. Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors. *Bioresource Technology* 100, 292-298.
- Eiamsa-ard S, Kaewkohkiet Y, Thianpong C, Promvong P. 2008. Combustion behavior in a dual-staging vortex rice husk combustor with snail entry. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 35, 1134-1140.
- Fabrizio, S., and Riccardo, C. 2004. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels: Exp. Therm, Fluid Sci 28, 691-699.
- Kuprianov VI, Kaewklum R, Sirisomboon K, Arromdee P, Chakritthakul S. 2010. Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk. *Appl. Energy* 8, 2899-2906.
- Kuprianov VI, Arromdee P. 2013. Combustion of peanut and tamarind shells in a conical fluidized-bed combustor: a comparative study. *Bioresour Technol* 140, 199-210.
- Madhiyanon T, Lapirottanakun A, Sathitruangsuk P, Soponronnarit S. 2006. A novel cyclonic fluidized-bed combustor (CFBC): Combustion of thermal efficiency, temperature distribution, combustion intensity, and emission of pollutants. *Combust. Flame* 146, 232-245.
- Natarajan, E., and Nordin, A. 1998. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactor, *Biomass Bioenergy* 14, 533-546.
- Ninduangdee, P, Kuprianov VI. 2014. Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions. *Energy Conversion and Management* 85, 800-808.
- Saeman, J.F., Moore, W.E., Mitchell, R.L., Millett, M.A. 1954. Techniques for the determination of pulp constituents by quantitative paper chromatography. *Tappi* 37, 336-343.
- Werther, J., Saenger, M., and Siagi, Z. 2000. Combustion of agricultural residues, *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 1-27.
- Tillman DA, Rossi AJ, Kitto WD. 1981. *Wood combustion*. New York: Academic Press.
- Turn S. 2006. *An introduction to combustion*. Boston: McGraw-Hill.
- <Janya Udomsup and Prasan Choomjaihan >. < The Effects of Operating Conditions and The Biomass Component on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Swirling Fluidized-bed Combustor Fired Using >. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript number. Vol. number. Month, Year.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางจรรยา อุดมทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	22 สิงหาคม 2526
ที่อยู่	45/85 หมู่บ้านพฤษ์พิมาน ซอย 13 หมู่ 1 ตำบลนาเวียง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี รหัสไปรษณีย์ 76000 หมายเลขโทรศัพท์มือถือ 0836999626
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมีวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การสอนเคมีระดับมัธยมปลาย 2) การสอนคณิตศาสตร์ระดับมัธยม 3) พลังงานทางเลือก 4) การสกัดสารธรรมชาติ
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2552-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
ผลงานวิจัย	พ.ศ. 2549-ปัจจุบัน -ปริญญาานิพนธ์ เรื่อง “Effect of co-solvent on biodiesel in supercritical methanol”. -Extraction and Purification of Lutein fatty acid ester in Marigold flower -Recovery of Free Lutein from Tagetes erecta: Determination of Suitable Saponification and Crystallization Conditions (2011) - γ -Oryzanol Recovery from Rice Bran Oil Soapstock (2010) - Medicinal herbal plants of Phetchaburi with anti-diabetic potential (2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้