



การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร
ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์

PERFORMANCE AND EMISSION STUDY OF 200L
CHARCOAL KILN WITH GASIFIER BURNER

กำพล ถาวร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร
ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบรินเนอร์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

PERFORMANCE AND EMISSION STUDY OF 200L
CHARCOAL KILN WITH GASIFIER BURNER



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF ENGINEERING (Mechanical Engineering)
Faculty of Engineering Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาศมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร

ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์

ของ

กำพล ถาวร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน)

..... ที่ปรึกษาร่วม

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีรวมรื่น)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์
ผู้วิจัย	กำพล ถาวร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมาศ แก้วล้วน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาคภูมิ ศรีมรินทร์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลิตภาพของถ่านและน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่ที่เหลือใช้โดยใช้เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์ และลดมลพิษที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม แก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์สามารถผลิตแก๊สร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 1000 °C และมีออกซิเจนต่ำเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการเผาถ่าน กระบวนการเผาถ่านจะสิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิแก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านสูงถึง 500°C แก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านถูกทำให้เย็นลงโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ แก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านส่วนหนึ่งเกิดการควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ดิบ ในขณะที่แก๊สอีกส่วนหนึ่งที่ควบแน่นไม่ได้ซึ่งมีส่วนผสมของกลุ่มแก๊สที่สามารถติดไฟได้ ถูกนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลเพื่อผลิตความร้อนและลดมลพิษ การทดลองผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นไม้ไผ่ต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากเศษไม้ไผ่ที่ความชื้นร้อยละ 30.17, 21.49 และ 12.80 ผลการทดลองพบว่าปริมาณร้อยละของผลผลิตถ่านมีค่า 22.95, 23.33 และ 23.79 เทียบกับน้ำหนักไม้เผาถ่านฐานแห้ง ตามลำดับ ใช้เวลาในการเผาถ่าน 364, 290, 226 นาที เมื่อพิจารณาถึงปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบที่เกิดจากการควบแน่นแก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านพบว่ามีค่าคิดเป็นร้อยละ 59.60, 56.23 และ 54.89 ตามลำดับ เทียบกับน้ำหนักไม้เผาถ่านฐานเปียก คุณสมบัติของถ่านไม้ไผ่และน้ำส้มควันไม้ที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานชุมชน จากการตรวจวิเคราะห์ค่ามลพิษหลังจากนำแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลเพื่อผลิตความร้อน พบว่าแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้สามารถติดไฟได้ดีและมีปริมาณมลพิษที่วัดได้ในแก๊สไอเสียอยู่ในปริมาณที่ต่ำ

คำสำคัญ : ไม้ไผ่เลี้ยง, ถ่าน, น้ำส้มควันไม้, แก๊สซีไฟเออร์-เบิร์นเนอร์

Title	PERFORMANCE AND EMISSION STUDY OF 200L CHARCOAL KILN WITH GASIFIER BURNER
Author	KUMPHOL THAWORN
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sommas Kaewluan
Co Advisor	Assistant Professor Dr. Prakpum Srirompuen

This study aims to (1) increase the productivity of charcoal and wood vinegar from bamboo residue using the gasifier burner, assembled in a 200L charcoal kiln; and (2) to reduce the pollution released into the environment. The biomass gasifier burner used in this study can produce hot gases at a temperature of up to 1,000 °C and with a low oxygen content. These high temperature gases were used as the heat source for charcoal kilns. Each carbonization process was completed when the temperature of the carbonization gases, which exited the charcoal kiln and reached a temperature of up to 500 °C. The carbonization gases (condensable gases) were then cooled by the water in the heat exchanger and condensed to form raw wood vinegar, while another part of carbonization gases (non-condensable gases) was used as a co-fuel in a biomass gas stove to generate heat and reduce gas emissions. The experimental results revealed that the percentage by weight of charcoal products (from the bamboo residue with moisture content of 30.17, 21.49 and 12.80 percent) were 22.95, 23.33 and 23.79 of dry wood weight using the carbonization time at 364, 290 and 226 min, respectively. The amount of wood vinegar collected during the operation time at 59.60, 56.23 and 54.89% of wet wood weight, respectively. The quality of charcoal and wood vinegar obtained from this work was in accordance with Thai community product standards. The exhaust gases had low emissions.

Keyword : Hedge bamboo, Charcoal, Wood vinegar, Gasifier-burner

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีรมรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ระหว่างการศึกษาในครั้งนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากนักน้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากปริญญาานิพนธ์นี้ ขอมอบให้กับ ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

กำพล ถาวร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวความคิดที่สำคัญหรือสมมุติฐาน.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัตถุประสงค์สำหรับเผาถ่าน.....	3
2.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process)	7
2.3 ถ่าน (Charcoal)	8
2.4 น้ำส้มควันไม้ (Wood vinegar)	10
2.5 ปัจจัยเสี่ยงด้านมลพิษทางอากาศที่มีผลต่อสุขภาพ	13
2.6 ระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล.....	15
2.7 การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงจากเตาชีวมวล	17
2.8 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer).....	20
2.9 หลักการพาความร้อน (Principle of convection)	21

2.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchangers)	26
2.11 ทฤษฎีของไซโคลน	31
2.12 ทบทวนวรรณกรรม	33
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองและวิธีการทดลอง	48
3.1 การหาค่าความชื้นของไม้ไผ่.....	48
3.2 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเตาเผาถ่าน	50
3.3 เงื่อนไขการทดลอง	51
3.4 สมดุลมวลของชุดเตาเผาถ่าน	53
3.5 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ	60
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษทางปล่องไอเสีย	61
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	62
4.1 ผลการทดลองหาสมรรถนะของเตาเผาถ่าน	62
4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้และแก๊สไอเสียจากกระบวนการเผาถ่าน	70
4.3 การวิเคราะห์ผลผลิตที่ได้จากการเผาถ่าน	78
4.4 ผลวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.2 อภิปรายผล	95
5.3 ข้อเสนอแนะ	97
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง	101
ภาคผนวก ข. ตารางบันทึกผลการวัดมลพิษ	162
ภาคผนวก ค. ผลงานตีพิมพ์.....	167

ภาคผนวก ง. ชิ้นส่วนอุปกรณ์เตาเผาถ่าน.....	188
ภาคผนวก จ. ขั้นตอนการเผาถ่าน	198
รายการสัญลักษณ์.....	216
ประวัติผู้เขียน.....	217



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 พื้นที่ปลูกไม้ไผ่ตง ระหว่างปี 2536–2540 ในจังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดใกล้เคียง	4
ตาราง 2 แสดง AFR_T ของเชื้อเพลิงบางชนิดที่คำนวณจากสมการ (2-13) สำหรับธาตุอื่นหรือแก๊สอื่นที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงเช่น N, O ₂ และ CO ₂ ค่า AFR_T เท่ากับศูนย์	18
ตาราง 3 ตัวอย่างองค์ประกอบอัตราผลผลิตของแก๊ส	20
ตาราง 4 โครงแบบของไซโคลอน (แบบอากาศไหลเข้าตามแนวสัมผัส)	33
ตาราง 5 สำหรับบันทึกค่าน้ำหนักของชิ้นไม้ไผ่ที่หายไปจากการอบแต่ละครั้ง	49
ตาราง 6 บันทึกค่าจากการทดลองหาความชื้นของไม้ไผ่เลี้ยง	49
ตาราง 7 Proximate analysis ของไม้ไผ่เลี้ยง (ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%)	52
ตาราง 8 Ultimate analysis ของไม้ไผ่เลี้ยง (ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%)	52
ตาราง 9 Proximate Analysis ของไม้ฟืน	53
ตาราง 10 Ultimate Analysis ของไม้ฟืน	53
ตาราง 11 ตารางสรุปผลการสมดุลมวลเตาเผาถ่านของทั้ง 3 กรณี	60
ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยแก๊สไอเสียที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) เทียบกับพลังงาน	74
ตาราง 13 ค่าเฉลี่ยแก๊สไอเสียที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) หลังการเผาไหม้	76
ตาราง 14 ปริมาณผลผลิตถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กลาง และสูง	79
ตาราง 15 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านตามความต้านทานไฟฟ้า (Dry basis)	81
ตาราง 16 คุณสมบัติของถ่านที่ได้จากกระบวนการผลิต	81
ตาราง 17 องค์ประกอบของถ่านจากการทดลอง	83
ตาราง 18 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ	88
ตาราง 19 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่าน ชุดควบแน่น และเตาเผาชีวมวล	89

ตาราง 20 เปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มทุน 92



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ลักษณะและองค์ประกอบของไม้ไผ่	5
ภาพประกอบ 2 องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป	6
ภาพประกอบ 3 แสดงโซนการเกิดปฏิกิริยาของเตาเผาแบบ Downdraft.....	15
ภาพประกอบ 4 แสดงการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในหัวเผา	20
ภาพประกอบ 5 แสดงการไหลขนานกับผนังราบ	24
ภาพประกอบ 6 แสดงการไหลตั้งฉากกับท่อกลม	25
ภาพประกอบ 7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	27
ภาพประกอบ 8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด	28
ภาพประกอบ 9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก	29
ภาพประกอบ 10 Thermal resistance network ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	29
ภาพประกอบ 11 ลักษณะการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	30
ภาพประกอบ 12 การเปลี่ยนแปลงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	31
ภาพประกอบ 13 การทำงานของไซโคลน	32
ภาพประกอบ 14 อัตราส่วนขนาดของไซโคลน	32
ภาพประกอบ 15 เตา Updraft fixed bed gasifier ที่ทำงานร่วมกับเตาเผาถ่านอิฐบราซิล.....	34
ภาพประกอบ 16 เตาเผาถ่าน Mechanical furnaces	35
ภาพประกอบ 17 เตาเผาถ่านด้วยท่อกระจายความร้อน (เตาเผาถ่าน - HDP)	36
ภาพประกอบ 18 เตาเผาถ่าน Low-cost retort unit (ICPS) or adam-retort.....	37
ภาพประกอบ 19 เตาเผาถ่านแนวตั้งแบบเคลือบย้าย	38
ภาพประกอบ 20 เตาเผาถ่านแบบ Natural draft	39

ภาพประกอบ 21 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบปรับปรุงรูปแบบและเทคนิคการผลิตถ่านที่ทำการเพิ่มฉนวนกันความร้อน..... 40

ภาพประกอบ 22 เตาเผาถ่านแนวตั้งให้ความร้อน 3 ทาง 41

ภาพประกอบ 23 เตาเผาถ่านถังเดี่ยวกรมป่าไม้..... 41

ภาพประกอบ 24 เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่มีการติดตั้งระบบจัดการควันแบบเผาซ้ำและผนัง 2 ชั้น (เตาแบบใหม่)..... 42

ภาพประกอบ 25 เตาดักกลาสและเครื่องวิเคราะห์แก๊ส 44

ภาพประกอบ 26 ปริมาณการเกิดมลพิษระหว่างการเผาถ่านแบบควันย้อนกลับและแบบดั้งเดิม 45

ภาพประกอบ 27 การผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบเทียบกับ เวลา และอุณหภูมิเผาใหม่ 46

ภาพประกอบ 28 สารประกอบที่มีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง 47

ภาพประกอบ 29 ส่วนประกอบของเตาเผาถ่าน 50

ภาพประกอบ 30 การทำงานของชุดแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์ 54

ภาพประกอบ 31 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 61

ภาพประกอบ 32 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาใหม่ 61

ภาพประกอบ 33 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลากับอุณหภูมิและปริมาณน้ำส้มควันไม้ของการเผาถ่านครั้งที่ 1 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%..... 62

ภาพประกอบ 34 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลากับอุณหภูมิและปริมาณน้ำส้มควันไม้ของการเผาถ่านครั้งที่ 2 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%..... 63

ภาพประกอบ 35 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลากับอุณหภูมิและปริมาณน้ำส้มควันไม้ของการเผาถ่านครั้งที่ 3 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%..... 64

ภาพประกอบ 36 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของ Burner และอุณหภูมิห้องไม้พินสำรวจที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ..... 65

ภาพประกอบ 37 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเตาเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ..... 66

ภาพประกอบ 38 กราฟเปรียบเทียบเวลา อุณหภูมิบนเตา และผลผลิตน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ..... 67

ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบสะสมที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ.....	68
ภาพประกอบ 40 กราฟเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตรวมที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ.....	69
ภาพประกอบ 41 การวัดองค์ประกอบของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) และแก๊สไอเสีย (Exhaust Gases: EG).....	71
ภาพประกอบ 42 แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) และแก๊สไอเสีย (Exhaust Gases: EG) จากความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ	75
ภาพประกอบ 43 รูปปล่องเผาแก๊สที่ทำงานร่วมกับเตาชีวมวล.....	76
ภาพประกอบ 44 แยกผลผลิตถ่านส่วนบนของเตาและส่วนล่างของเตา.....	78
ภาพประกอบ 45 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของถ่าน.....	79
ภาพประกอบ 46 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้	84
ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบ และความเป็นกรด-ด่าง ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ.....	84
ภาพประกอบ 48 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้	85
ภาพประกอบ 49 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบ และความถ่วงจำเพาะ ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ.....	86
ภาพประกอบ 50 กราฟเปรียบเทียบความเป็นกรด-ด่าง และความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้	87
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ .	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวความคิดที่สำคัญหรือสมมุติฐาน

การใช้ถ่านในประเทศไทยยังมีความต้องการอีกเป็นจำนวนมากอันเนื่องมาจากวิถีชีวิตที่มีการใช้ประโยชน์จากถ่านในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มอาหาร ช่วยปรับปรุงบำรุงดิน และเป็นส่วนผสมของสารเคมีทางอุตสาหกรรมบางชนิด กระบวนการเผาถ่านได้มีวิวัฒนาการมาโดยตลอดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการพัฒนาเตาเผาถ่านจากแบบดั้งเดิม เช่น เตาหลุม เตาดิน และเตาอิฐ เป็นต้น เตาเหล่านี้จะใช้ไม้ขนาดใหญ่ในการเผาทำให้ต้องมีการตัดต้นไม้ซึ่งจะส่งผลให้มีการตัดไม้ทำลายป่าตามความต้องการในการใช้ถ่านที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นการทำลายธรรมชาติที่ส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน ต่อมาได้มีการพัฒนาเตาเผาถ่านแบบใช้ถัง 200 ลิตร ที่ใช้ในการเผาไม้ที่มีขนาดเล็ก เช่น กิ่งไม้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวล การเผาถ่านด้วยเตาเผาแบบใช้ถัง 200 ลิตร เป็นที่นิยมของชาวบ้าน อย่างไรก็ตามการเผาถ่านด้วยเตาลักษณะนี้ยังมีปัญหาและข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง ทั้งระยะเวลาในการเผาที่ยาวนานประมาณ 8-10 ชั่วโมง ในการเผาถ่าน (อนุสรณ์, 2017) ทำให้เสียเวลาในการเผาเตา ซึ่งระหว่างการเผาถ่านนั้นมีการสูญเสียความร้อนค่อนข้างมาก เพราะไม่มีการหุ้มฉนวนกันความร้อน ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งนี้การเผาถ่านแบบเตาขนาด 200 ลิตร ยังปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ในที่นี้มลพิษที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้น ส่วนหนึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่สามารถควบแน่นออกมาในรูปแบบของน้ำส้มควันไม้ได้ แต่เตาเผาถ่านที่ใช้ถัง 200 ลิตร ยังไม่สามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ยังมีองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้บางส่วนหลุดออกมาในรูปแบบของมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และถ้าเราสามารถเก็บเกี่ยวน้ำส้มควันไม้ได้ในปริมาณที่สูงที่สุด ก็จะสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมลงได้ และจากปัญหาที่ได้กล่าวมานั้นยังจะสังเกตได้ว่าปัญหาด้านการสูญเสียความร้อนและการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมนั้น เป็นปัจจัยที่สามารถนำมาปรับแก้ได้และยังสามารถเปลี่ยนให้เป็นประโยชน์ได้อีกด้วย ซึ่งถ้าสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนได้ ก็จะทำให้เราสามารถเผาถ่านได้ในเวลาที่น้อยลง เมื่อพิจารณาศักยภาพในการผลิตถ่านไม้ภายในประเทศพบว่าประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลที่สามารถนำมาผลิตถ่านไม้ได้เพียงพอต่อความต้องการ ทั้งนี้ในเขตจังหวัดนครนายกและจังหวัดใกล้เคียงนั้นเป็นพื้นที่ทำอาชีพเกษตรกรรม ทำให้มีกิ่งไม้ที่เหลือจากการปลูกไม้ไผ่ และมะยมชนิด ซึ่งบางส่วนได้มีการเผาทำลาย แต่อีกส่วนหนึ่งก็ได้ถูกนำมาเผาถ่าน ถ่านที่ได้จากการเผา

ไม้ไผ่ นั้นจะมีคุณสมบัติคือเนื้อถ่านที่อัดแน่น จึงสามารถใช้ได้นานกว่าถ่านไม้ทั่วไป ทั้งยังเป็นถ่านที่ไม่มีควันอีกด้วย

ดังนั้นการศึกษาทางวิศวกรรม เรื่องการทดสอบสมรรถนะของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีฟิเออร์เบิร์นเนอร์ สำหรับผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ ซึ่งเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเผาถ่านไม้ไผ่เพื่อให้ได้ผลผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ ทั้งนี้ผู้ทำการศึกษาทางวิศวกรรมคาดว่าการศึกษาทางวิศวกรรมนี้จะเป็นประโยชน์กับเกษตรกร ช่วยให้เกษตรกรหารายได้เพิ่มได้มากขึ้น สามารถลดปริมาณมลพิษที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม และยังสามารถประหยัดเวลาในการเผาถ่าน ทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการเผาถ่านต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร พร้อมชุดควบคุมแน่นน้ำส้มควันไม้ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้

1.2.3 เพื่อหาสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษจากเตาเผาถ่านและผลิตน้ำส้มควันไม้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้ไม้ไผ่ในการผลิตถ่าน

1.3.2 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร

1.3.3 ทำให้ได้ถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

1.3.4 ใช้เครื่องควบคุมชนิด Shell and Coil

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อให้ได้เตาเผาถ่านที่มีประสิทธิภาพและสะดวกในการเคลื่อนย้าย

1.4.2 เพื่อให้ได้น้ำส้มควันไม้ที่มีคุณภาพ

1.4.3 เพื่อลดมลพิษที่ปล่อยจากกระบวนการเผาถ่าน

1.4.4 เพื่อเป็นต้นแบบเตาเผาถ่านให้กับเกษตรกร

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัตถุประสงค์สำหรับเผาถ่าน

2.1.1 ไม้ไผ่

ไม้ไผ่ นับว่าเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญด้านความหลากหลายทางชีวภาพ ระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และ สังคมของไทย ในประเทศไทยพบชนิดไม้ไผ่ที่หลากหลายขึ้นกระจายตามภูมิภาคต่างๆ มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตทั้งในวิถีบริโภค อาหารการกิน ขนม ของเล่นเด็ก เครื่องมือ เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องจักรสานหัตถกรรม เครื่องมือจับสัตว์น้ำ แหล่งผลิตถ่าน และไม้ฟืน ไม้ไผ่ยังมีศักยภาพในการเก็บกัก คาร์บอนและช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง

สถานการณ์ไม้ในประเทศไทยจากอดีตถึงปัจจุบัน ประเทศไทยสำรวจพบไม้มากกว่า 72 ชนิด ใน 17 สกุลที่การกระจายตามภูมิภาคต่างๆ จากรายงานของกรมป่าไม้ ปี พ.ศ. 2545 พบว่า ภาคตะวันตกและภาคเหนือมีการกระจายของพื้นที่ป่าไผ่สูงสุด มีพื้นที่ทั้งสิ้น 939,687 ไร่ หรือ 1,503 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.29 ของพื้นที่ป่าทั้งหมด จากรายงานการนำเข้าและส่งออกไม้ไผ่ล่าสุดของกรมป่าไม้ ในปี พ.ศ. 2550 มีมูลค่านำเข้า 40 ล้านบาท และส่งออก 60 ล้านบาท ในส่วนของหน่อไม้ มีมูลค่าการแปรรูปภายในประเทศประมาณ 1,400 ล้านบาท และส่งออกไม่ต่ำกว่า 1,000 ล้านบาท ซึ่งยังไม่มีการรวบรวมข้อมูลภาพรวมมูลค่าเศรษฐกิจ ระบบการตลาดภายในประเทศ และที่เชื่อมโยงกับการค้าระหว่างประเทศ ปัจจุบันมีผู้รับซื้อไผ่ราว 40-50 ราย โดยแต่ละรายรับซื้อปีละ 12,000 ตัน ปริมาณรวมในการซื้อขายประมาณ 480,000-600,000 ตันต่อปี (ศูนย์ฝึกอบรมวนศาสตร์ชุมชนแห่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก, 2557)

ไม้ไผ่เป็นพันธุ์ไม้ที่มีการเจริญเติบโตผิดปกติแตกต่างจากไม้ชนิดอื่น หน่อไม้ไผ่จะพุ่งตัวเจริญเติบโตทางความสูงเต็มที่ภายในฤดูเดียว โดยเริ่มเจริญในช่วงต้นฤดูฝนและสิ้นสุดเมื่อหมดฝน หลังจากนั้นจะไม่มีการเจริญทางความสูงเพิ่มขึ้น ในอดีตไม้ไผ่ที่นิยมปลูกเป็นพืชเศรษฐกิจคือ ไผ่ตง ไผ่รวก ไผ่สีสุก และไผ่เลี้ยง โดยนิยมปลูกไผ่ตงมากที่สุด ไผ่ตงมีทั้งสิ้น 5 พันธุ์ (ตงเขียว ตงดำ ตงหม้อ ตงหนู และตงลาย) แต่ที่นิยมปลูกอย่างกว้างขวางเพียงสองพันธุ์คือ ตงเขียว และ ตงดำ ส่วนใหญ่ปลูกที่จังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดใกล้เคียง โดยมีพื้นที่ปลูกระหว่าง ปี 2536 – 2540 ดังนี้

ตาราง 1 พื้นที่ปลูกไม้ไผ่ตง ระหว่างปี 2536-2540 ในจังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดใกล้เคียง

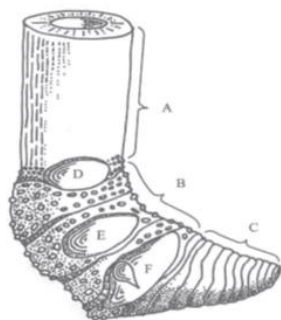
ชนิดไม้	ปี(ไร่)				
	2536	2537	2538	2539	2540
ไผ่ตงเขียว	391,499	430,767	253,080	232,615	194,998
ไผ่ตงดำ	134,537	173,973	133,184	60,292	58,064
ไผ่อื่นๆ	5,887	7,285	4,795	4,626	4,433
รวมพื้นที่ปลูก	531,923	612,025	391,059	297,533	257,495

ที่มา: ศูนย์ฝึกอบรมวนศาสตร์ชุมชนแห่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก (2557)

จากเหตุการณ์เมื่อเดือนพฤศจิกายน 2537 ไผ่ตงเขียวทั่วประเทศได้ออกดอกและยืนต้นตายในเวลา 1-2 ปี (ตายชุก) เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันพบไม้ไผ่ตงและไม้ไผ่ชนิดอื่นๆ ไม่ถึง 200,000 ไร่ และไม้ไผ่ที่นิยมปลูกในเมืองไทย ได้แก่ ไผ่ตง ไผ่เลี้ยง ไผ่หวาน ไผ่ซาง ไผ่รวก ไผ่หมาจู ไผ่กิมชุง และไผ่เปาะ (ศูนย์ฝึกอบรมวนศาสตร์ชุมชนแห่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก, 2557)

ไม้ไผ่ยังสามารถนำมาใช้เป็นพืชเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีหรือกล่าวได้ว่าเป็นพืชพลังงานของคนยากในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย มีการนำไม้ไผ่มาเพื่อใช้เป็นไม้ฟืนและเผาถ่าน โดยในชนบทอาจมีการนำไม้ไผ่มาใช้เป็นไม้ฟืนโดยตรงหรือนำมาเผาเป็นถ่านไม้ไผ่ โดยส่วนที่นำมาเผาเป็นถ่านไม้ไผ่โดยตรงหรืออาจเป็นเศษเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ส่วนข้อ นำมาเผาจนเป็นถ่านแล้วบดอัดเป็นถ่านอัดแท่งจำหน่ายได้ทั้งในและต่างประเทศ โดยราคาถ่านไม้ไผ่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานหากต้องการนำไปเพื่อเป็นเชื้อเพลิงราคาอยู่ที่กิโลกรัมละ 150 บาท หากแต่เป็นถ่านไม้ไผ่ที่มีคุณภาพสูง ส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นถ่านเพื่อสุขภาพ ราคาประมาณ 300-500 บาทต่อกิโลกรัม ถ้าเป็นถ่านคุณภาพทั่วไปราคาจะอยู่ที่กิโลกรัมละ 20 บาท ซึ่งไม้ไผ่สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงถ่านคุณภาพดีได้ตลอดทั้งลำจากการทดสอบพบว่าถ่านไม้ไผ่สามารถให้พลังงานถึง 7,730 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม สูงกว่าถ่านทั่วไป ดังนั้นผลิตภัณฑ์จากไม้ไผ่สามารถนำไปสร้างเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันที่มาจากฟอสซิลได้ ถ่านที่ได้จะมีปริมาณสารมลพิษน้อยกว่าที่เกิดขึ้นกับพลังงานจากซากฟอสซิล (ถ่านหิน หรืออื่นๆ) นอกจากนี้ถ่านยังสามารถนำไปผลิตเป็นสารทางยาได้อีก ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์จากถ่านไม้ไผ่สู่ตลาดโลก

ได้ในจำนวนที่ยังไม่สูงมากนัก และยังมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดเนื่องจากเรายังมีการผลิตไม่มาก



A = ลำต้น (Culm)

B = ตั้วเหง้า (Rhizome proper)

C = คอเหง้า (Rhizome neck)

D, E , F= ตาเหง้า (Rhizome buds)

ภาพประกอบ 1 ลักษณะและองค์ประกอบของไม้ไผ่

ที่มา: ศูนย์ฝึกอบรมวนศาสตร์ชุมชนแห่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก (2557)

ไม้ไผ่เลี้ยง เป็นชนิดไผ่ที่มีการปลูกเป็นจำนวนมาก นอกจากจะปลูกไว้ใช้สอยแล้ว ยังสามารถใช้หน่อเป็นอาหารได้ กอไผ่เลี้ยงจะต้องมีการตัดแต่งกอให้มีระบบแตกกอให้สวยงามด้วยการใช้เลื่อยตัดแต่งกอจากภายในโดยตัดไม้ที่แก่ออกไปใช้ ถ้าไม้ไผ่เลี้ยงสามารถเป็นไม้ตกแต่งสวยงามได้เช่นกัน นอกจากนั้นลำไม้ไผ่เลี้ยงยังสามารถนำมาห่อหุ้มมัดเชือกตกแต่งเสาเหล็กหรือเสาปูน เพื่อให้เกิดความสวยงามได้อีกด้วย หรือจัดทำเป็นขาตั้งบอร์ดแสดงนิทรรศการ เป็นหลักค้ำต้นไม้ เป็นหลักธง นำมาสร้างบ้าน เป็นรั้วกันห้อง เป็นไม้พินทุ้มอาหาร ยาสมุนไพร และเผาเป็นถ่านสำหรับหุงต้มอาหาร

ประเทศไทยเราสามารถพบเห็นไม้ไผ่ได้ทั่วประเทศ โดยจะพบในภาคกลางมากที่สุด (458,500 ไร่) รองลงมาคือภาคอีสาน (248,312 ไร่) ภาคเหนือ (125,500 ไร่) ภาคตะวันออก (97,875 ไร่) และภาคใต้ (9,437 ไร่) ในปี พ.ศ. 2550 กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืชได้จัดทำฐานข้อมูลเกี่ยวกับไม้ไผ่ในประเทศไทยทำให้มีการ ศึกษาความหลากหลายของไม้ไผ่ในประเทศไทยมากขึ้น

2.1.2 องค์ประกอบของไม้

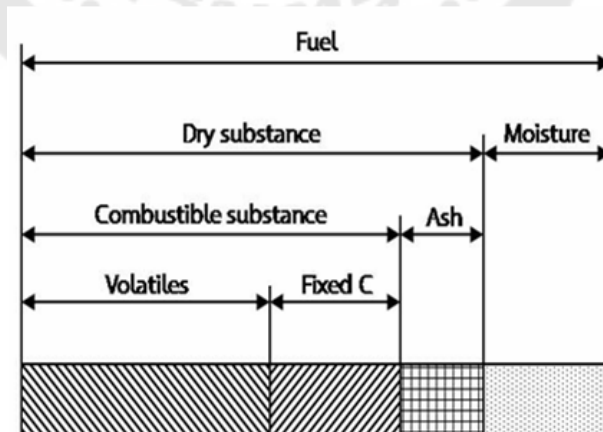
องค์ประกอบของไม้ทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

2.1.2.1 ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวลส่วนมาก จะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลมาเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์

2.1.2.2 คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวลประกอบด้วย คาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ชีวมวลที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวต่ำหรือน้อยจะสันดาปได้ไม่ดีมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำความเร็วในการติดไฟช้า เนื่องจากความชื้นมากปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งจะระเหยได้ยาก โดยจะคงเหลืออยู่ในของเสียหลังจากที่เผาสารระเหยออกไปแล้วที่อุณหภูมิ 750 °C ของเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน

2.1.2.3 สารระเหย (Volatile Matter) คือ ส่วนที่ไม่เลกุลลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดมีค่า Volatile Matter สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

2.1.2.4 ชี้อัด (Ash) เป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในชีวมวลที่ถูกออกซิไดส์สมบูรณ์ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีชี้อัดประมาณ 1-3% ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนชี้อัดประมาณ 10-20% ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้ จากการสันดาปภายในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้นั่นเอง ดังนั้นหากของเสียมีชี้อัดปริมาณมากจะเป็นปัญหาในการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยาก ในการกำจัดชี้อัดที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 2 องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2555)

สำหรับสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศไทย ที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 8-16% ดังนั้นจึงต้องมีความจำเป็นในการผึ่งและอบไม้ให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์กับอากาศของแต่ละท้องถิ่น เพื่อให้ไม่มีการคงรูปแน่นอนเมื่อนำไม้ไปใช้จะไม่มีการยืดหรือหดตัว ซึ่งอาจทำความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างได้ เช่น การเข้ารางลิ้น ข้อต่อ การบิดงอไปจากแนวระดับ และการแตกเสียหายของไม้

2.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process)

คาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพอัดอากาศ ซึ่งมีกระบวนการ ดังนี้

2.2.1 การไล่ความชื้น เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิบรรยากาศจนถึง 110°C ช่วงนี้ชีวมวลจะคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free water) และน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ (Bound water) คว้นที่ออกมาจะมีสีขาวปนน้ำเงินอ่อนซึ่งจะมีแต่ไอน้ำ ไม่มีกลิ่นฉุน ไม่แสบตาและจมูก

2.2.2 เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิประมาณ $110-270^{\circ}\text{C}$ ช่วงนี้เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) จะสลายตัวออกมาจนไปหมดที่อุณหภูมิประมาณ 270°C เต่าเผาถ่านที่ดีจะรักษาอุณหภูมิระดับนี้ไว้นานและใกล้เคียงกันทั่วทุกจุดของเตา คว้นที่ออกมาในช่วงนี้จะเริ่มมีสีจางๆ เจือปนอยู่ด้วย และจะมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) กรดน้ำส้ม (Acetic acid) และเมธานอล (Methanol) เจือปนออกมากับคว้นด้วย แต่มีปริมาณต่ำมาก

2.2.3 การสลายตัวและคายความร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ $270-290^{\circ}\text{C}$ วิวัฒนาการความร้อนจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเองจากไม้อย่างต่อเนื่อง แก๊สผสมไฮโดรเจนและทาร์ บางส่วนจะได้รับการคายตัวออก

2.2.4 การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน อุณหภูมิจะอยู่ประมาณ $290-400^{\circ}\text{C}$ ช่วงนี้ชีวมวลสลายตัวด้วยตัวเองจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) อันเกิดจากความร้อนที่สะสมไว้ เซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 275°C คว้นที่ออกมาจะมีสีขาวปนเหลือง มีกลิ่นฉุนจัด สามารถติดไฟได้ การดักเก็บน้ำส้มคว้นไม้ที่มีคุณภาพจะทำได้ในช่วงนี้ ลิกนิน (Lignin) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 310°C จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400°C หลังจากกระบวนการนี้ชีวมวลจะกลายเป็นถ่านทั้งหมดแล้ว

2.2.5 การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ แม้ว่าซีวมวลจะกลายเป็นถ่านแล้วที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C แต่ยังคงมีน้ำมันดินในปริมาณที่สูง เมื่อนำไปใช้ปิ้งย่าง น้ำมันดินที่เผาไหม้ในเตาถ่านจะเกิดเป็นสารประกอบเบนโซไพเรน (Benzopyrene) และไดเบนซานทราเซน (Dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงยังเป็นถ่านที่มีคุณภาพต่ำ ควรอบถ่านต่อไปที่อุณหภูมิในช่วง 500-600°C ต่อไปอีกระยะหนึ่งเพื่อไล่น้ำมันดินให้หมดไป

2.3 ถ่าน (Charcoal)

ถ่านเป็นวัสดุทางธรรมชาติ ถ่านมีทั้งถ่านที่เกิดตามธรรมชาติและเกิดจากกระบวนการผลิตโดยมนุษย์ ถ่านมีลักษณะเป็นสีดำ มีความเปราะ มีขนาดแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบตั้งต้น การผลิตถ่านนั้นสามารถทำได้จากการเผาไม้ชนิดต่างๆ โดยความชื้นของไม้ที่เหมาะสมในการใช้เผาถ่านจะอยู่ที่ 17-28% ถ่านส่วนใหญ่ที่ถูกผลิตขึ้นในประเทศไทยจะเกิดจากการเผาด้วยอุณหภูมิต่ำ ตัวถ่านจะมีค่ามลพิษที่สูง ส่วนถ่านที่ได้จากการผลิตที่อุณหภูมิสูงจะเป็นถ่านบริสุทธิ์ ซึ่งถ่านชนิดนี้นั้นมีประโยชน์มากทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม ประโยชน์ของถ่านนั้นมีมากมาย เช่น การใช้ดูดซับความชื้น การดูดซับกลิ่น สิ่งที่ทำให้ถ่านนั้นมีความสามารถในการดูดกลิ่นได้นั้นก็คือรูพรุนเล็กๆที่อยู่ในตัวถ่าน ยิ่งมีรูพรุนมากจะยิ่งสามารถดูดซับกลิ่นได้มากยิ่งขึ้น

2.3.1 คุณสมบัติของถ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

2.3.1.1 จากประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม มาตรฐานเลขที่ มผช.657/2547 ได้ระบุคุณสมบัติของถ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ไว้ดังนี้

1) ลักษณะทั่วไป

ต้องมีสีดำสม่ำเสมอ ไม่มีเศษดินและไม้ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปนอยู่

2) ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3) ค่าความร้อน

ต้องไม่น้อยกว่า 6,000 แคลอรีต่อกรัม

4) เถ้า

ต้องไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

5) สารระเหย

ต้องไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

6) การใช้งาน

เมื่อติดไฟต้องไม่มีสะเก็ดไฟกระเด็น มีควันได้เล็กน้อย

2.3.1.2 จากประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้ปิ้งย่าง มาตรฐานเลขที่ มผช.658/2547 ได้ระบุคุณสมบัติของถ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ไว้ดังนี้

1) ลักษณะทั่วไป

ต้องมีสีดำสม่ำเสมอ ไม่มีเศษดินและไม้ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปนอยู่

2) ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

3) ค่าความร้อน

ต้องไม่น้อยกว่า 7,000 แคลอรีต่อกรัม

4) เถ้า

ต้องไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

5) สารระเหย

ต้องไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

6) การใช้งาน

เมื่อติดไฟต้องไม่มีสะเก็ดไฟกระเด็น มีควันได้เล็กน้อย

2.3.1.3 จากประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านคูดกลิ้ง มาตรฐานเลขที่ มผช.180/2560 ได้ระบุคุณสมบัติของถ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ไว้ดังนี้

1) ลักษณะทั่วไป

ต้องแห้ง อาจเป็นชิ้น ท่อน เม็ด ผง ไม่มีสิ่งแปลกปลอม ไม่มีราปรากฏ กรณีรูปทรงตามธรรมชาติของวัสดุที่นำมาใช้ทำ หรืออัดขึ้นรูป อาจแตกหักได้บ้างเล็กน้อย

2) ภาชนะบรรจุหรือวัสดุหุ้มห่อที่ใช้ (ถ้ามี)

ต้องเหมาะสม เรียบร้อย สวยงาม สามารถป้องกันไม่ให้ถ่านคูดกลิ้งที่บรรจุในผลิตภัณฑ์ร่วงออกมา

3) ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

4) ค่าไอโอดีน

ต้องมีค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า 150

2.3.2 ประโยชน์ของถ่าน

2.3.2.1 ใช้เป็นเชื้อเพลิง

2.3.2.2 ใช้เป็นวัสดุตกแต่งบ้านเรือน (Decorate)

2.3.2.3 ลดการเน่าเสียของน้ำ ช่วยบำบัดน้ำเสีย

2.3.2.4 ช่วยดูดซับคลอรีน และสิ่งที่มีพิษ เพิ่มแร่ธาตุ แคลเซียม โปตัสเซียม แมกนีเซียม ฯลฯ

2.3.2.5 ช่วยฟอกอากาศ ดูดกลิ่น ความชื้น ปลดปล่อยประจุลบ (Negative ions) และ อินฟราเรดยาว (Far infrared ray) ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยผ่อนคลายกล้ามเนื้อ กระตุ้นการไหลเวียนของเลือดทำให้จิตใจสงบเย็นในขณะพักผ่อนและช่วยให้นอนหลับได้ดี ร่างกายสดชื่น

2.3.2.6 ดูดซับและหักเหคลื่นไฟฟ้า (Adsorption of electromagnetic wave) ช่วยดูดซับและหักเหคลื่นไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจาก ทีวี คอมพิวเตอร์ จอมอนิเตอร์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่เปิดใช้งานอยู่ภายในบ้านและสถานที่ทำงาน

2.3.2.7 ใช้ผสมอาหารสัตว์ ช่วยเพิ่มแร่ธาตุ ดูดซับสารพิษ กำจัดแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหาร ลดกลิ่นเหม็นของมูลสัตว์

2.3.2.8 ใช้ผสมดินเพื่อการเพาะปลูก ช่วยปรับสภาพของดิน เพิ่มแร่ธาตุที่พืชต้องการ

2.4 น้ำส้มควันไม้ (Wood vinegar)

น้ำส้มควันไม้เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่าน เป็นส่วนของควันที่เกิดจากการเผาถ่าน ในช่วงที่ไม้กำลังเปลี่ยนเป็นถ่านเมื่อทำให้เย็นลงจนควบแน่นแล้วกลิ่นตัวเป็นหยดน้ำ ประโยชน์และการนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ประโยชน์ น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบต่างๆ มากมาย เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรจะมีคุณสมบัติ เช่น เป็นสารปรับปรุงดิน สารป้องกันกำจัดศัตรูพืช และสารเร่งการเติบโตของพืช นอกจากนี้ มีการนำน้ำส้มควันไม้ ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผลิตสารดับกลิ่นตัว ผลิตสารปรับผิวนุ่ม ใช้ผลิตยารักษาโรคผิวหนัง เป็นต้น ช่วงเวลาที่เหมาะสมของการเก็บน้ำส้มควันไม้คือช่วงไม้กำลังกลายเป็นถ่าน (Carbonization) โดยอุณหภูมิในเตาประมาณ 300-450 °C ก่อนการนำน้ำส้มควันไม้มาใช้ต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อนโดยมี 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 การปล่อยให้ตกตะกอน โดยน้ำส้มควันไม้มาเก็บในถัง และทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 90 วัน น้ำส้มควันไม้จะตกตะกอนแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นบนสุดจะเป็นน้ำมันใส (Light oil) ชั้นกลางเป็นของเหลวสีขาว คือ น้ำส้มควันไม้ และชั้นล่างสุดจะเป็นของเหลวข้นสีดำคือน้ำมันดิน วิธีที่ 2 การกรอง โดยใช้ผ้ากรองหรือถ่านกรองที่ใช้ผงถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) ซึ่งคุณสมบัติแตกต่างกันไป เพราะถ่านกัมมันต์จะลดความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้ และ วิธีที่ 3 การกลั่น โดยกลั่นได้ทั้งใน

ความดันบรรยากาศ และกลั่นแบบลดความดันรวมทั้งกลั่นแบบลำดับส่วนเพื่อแยกเฉพาะสารใดสารหนึ่งในน้ำส้มควันไม้มาใช้ประโยชน์ ส่วนมากมักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยา (ณัฐวัฒน์, อนุชา, & ปิยะวัฒน์, 2554)

2.4.1 คุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

จากประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของน้ำส้มควันไม้ มาตรฐานเลขที่ มผช. 659/2553 ได้ระบุคุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ไว้ดังนี้

1) ลักษณะทั่วไป

ต้องเป็นของเหลวใสเนื้อเดียวกัน มีสีน้ำตาลแดงหรือสีเหลืองอมน้ำตาล ไม่แยกชั้น ไม่มีตะกอนหรือสารแขวนลอย ไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช้ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราาย กรวด

2) กลิ่น

ต้องมีกลิ่นเหมือนควันไฟ ปราศจากกลิ่นอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นเหม็นเปรี้ยว

3) ความเป็นกรด-ด่าง

ต้องอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 3.0

4) ความถ่วงจำเพาะ

ต้องอยู่ระหว่าง 1.010 ถึง 1.025 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2.4.2 การใช้ประโยชน์ของน้ำส้มควันไม้ (วินัย, 2547; สุพรชัย, 2551)

เนื่องจากน้ำส้มควันไม้มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่จำนวนหลายกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มกรดอินทรีย์ กลุ่มสารประกอบฟีนอล กลุ่มแอลกอฮอล์ กลุ่มคาร์บอนิล กลุ่มสารเป็นกลาง และสารประกอบทั่วไป จึงทำให้น้ำส้มควันไม้มีทั้งข้อดีและข้อจำกัดในการนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ทางด้านปศุสัตว์ และในครัวเรือน การนำไปใช้ประโยชน์จะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต อัตราความเข้มข้นของสาร และวิธีการใช้น้ำส้มควันไม้

2.4.2.1 การใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

น้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 20 ลิตร ใช้ฉีดพ่นลงดินเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้เดือนผอมและแมลงในดิน แต่ควรทำและทิ้งไว้ก่อนการเพาะปลูกอย่างน้อย 10 วัน น้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 50 ลิตร ใช้ฉีดพ่นลงดินเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เข้าทำลายพืช และน้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 200 ลิตร ความเข้มข้นระดับนี้ สามารถใช้ประโยชน์หลากหลาย เช่น ฉีดพ่นใบพืช และพ่นดินรอบๆ ต้นพืชทุกๆ 15 วัน เพื่อขับไล่แมลงและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชฉีกพ่นกอง

ปุ๋ยหมักเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ ที่ช่วยย่อยกองปุ๋ยหมักให้ได้ประสิทธิภาพดีและรวดเร็วยิ่งขึ้น ใช้หมักร่วมกับสะเดาหรือตะไคร้หอม เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขับไล่แมลงและป้องกันโรคต่างๆได้

2.4.2.2 การใช้ประโยชน์ทางด้านปศุสัตว์

ใช้ลดกลิ่นและแมลงในฟาร์มปศุสัตว์ โดยการใช้ครั้งแรกควรผสมในอัตราส่วนน้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 100 ลิตร หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น น้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 200 ลิตร จะสามารถกำจัดกลิ่นและลดจำนวนแมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และใช้ผสมอาหารสัตว์ เพื่อช่วยย่อยอาหารและป้องกันโรคท้องเสีย แต่การให้โดยตรงโดยการผสมน้ำแล้วนำไปให้สัตว์กิน สัตว์จะรังเกียจกลิ่นควันไฟ จึงควรนำน้ำส้มควันไม้ไปผสมกับผงถ่านก่อนในอัตราส่วนน้ำส้มควันไม้ 2 ลิตร ผสมผงถ่าน 8 กิโลกรัม จากนั้นนำผงถ่านที่ผสมน้ำส้มควันไม้ไปผสมอาหารสัตว์ 990 กิโลกรัม จะได้อาหารสัตว์ในปริมาณ 1 ตัน พอดี ซึ่งจะมีคุณสมบัติช่วยทำให้การย่อยและการใช้ประโยชน์จากอาหารดีขึ้นยับยั้งการเกิดแก๊ส และดูดซึมโลหะหนักในกระเพาะอาหาร ทำให้สัตว์มีสุขภาพดี ป้องกันและรักษาอาการท้องเสีย ปรับปรุงคุณภาพและลดปริมาณน้ำในเนื้อสัตว์ ทำให้คุณภาพของเนื้อสัตว์ดีขึ้น ทั้งรสชาติ สี และกลิ่น ยับยั้งการฟักไข่ของแมลงในมูลสัตว์ ทำให้ปริมาณของแมลงในบริเวณฟาร์มลดลง โดยเฉพาะแมลงวัน

2.4.2.3 การใช้ประโยชน์ในครัวเรือน

น้ำส้มควันไม้ 100 % ใช้รักษาแผลสด แผลถูกน้ำร้อนและไฟลวก รักษาโรคน้ำกัดเท้าและเชื้อราที่ผิวหนัง น้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 20 ลิตร ใช้ราดทำลายปลวกและมด น้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 50 ลิตร ใช้ราดป้องกันปลวก มด แมลง เช่น ตะขาบ แมงป่อง กิ้งกือ และน้ำส้มควันไม้ 1 ลิตร ผสมน้ำ 100 ลิตร ใช้ฉีดพ่นถึงขยะเพื่อดับกลิ่นขยะและไล่แมลงวัน ใช้ราดดับกลิ่นห้องน้ำ ห้องครัวและบริเวณที่ขึ้นแฉะ ใช้ดับกลิ่นกรงสัตว์เลี้ยง รวมทั้งใช้หมักขยะสดและเศษอาหารสำหรับใช้ทำปุ๋ย

2.4.2.4 การใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม

- 1) ใช้ผลิตสารดับกลิ่นตัว
- 2) ใช้ผลิตสารปรับปรุงผิวหนัง ทั้งใช้โดยตรงทางผิวหนัง หรือผสมน้ำอาบ
- 3) ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารรมควัน
- 4) ใช้ในอุตสาหกรรมย้อมผ้า
- 5) ใช้ผลิตสารป้องกันเนื้อไม้จากราและแมลง

6) ใช้ผลิตภัณฑ์รักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อไทพอยด์ อาหารเสริมเพิ่มภูมิ
ต้านทาน อาหารเสริมการทำงานของตับ

7) ใช้ผลิตภัณฑ์ช่วยย่อยประเภทพรีไบโอติก

2.4.2.5 ข้อควรระวัง

1) ก่อนที่จะนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ประโยชน์จะต้องตั้งน้ำส้มควันไม้ดิบ
หลังจากดักเก็บทิ้งไว้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3 เดือน เพื่อให้เกิดการตกตะกอน และให้เกิดการ
แยกชั้นของน้ำมันใส น้ำส้มไม้ และน้ำมันดิบออกจากกันก่อน

2) การนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ประโยชน์นั้นควรระวังอย่าให้เข้าตา
เนื่องจากน้ำส้มควันไม้มีคุณสมบัติเป็นกรดสูง

3) น้ำส้มควันไม้ไม่ใช่ปุ๋ย แต่เป็นเพียงตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการนำน้ำส้ม
ควันไม้ไปใช้ในการเกษตรนั้น จะเป็นเพียงตัวเสริมประสิทธิภาพให้กับพืชที่ปลูกเท่านั้น ซึ่งไม่
สามารถใช้แทนปุ๋ยได้

4) การใช้น้ำส้มควันไม้เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และแมลงในดินนั้นมีโทษต่อ
พืชที่ปลูกควรทำการเพาะปลูกอย่างน้อย 10 วัน

5) การนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรจะต้องผสมน้ำ
ให้เจือจางตามความเหมาะสม หากใช้กับแมลงกินใบ ควรมีการฉีดพ่นได้ใบร่วมด้วย เพื่อช่วยขับ
ไล่แมลงที่อยู่ตามใต้ใบพืช

2.5 ปัจจัยเสี่ยงด้านมลพิษทางอากาศที่มีผลต่อสุขภาพ

เตาเผาถ่านจะมีการปล่อยแก๊สที่เกิดจากกระบวนการผลิตถ่านทำให้เกิดมลพิษต่อ
ร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันทำให้เกิดแก๊สมีเทน (CH₄) แก๊ส
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีความเข้มข้นในอากาศเฉลี่ยประมาณ 12% (Fagbemi, Khezami,
& Capart, 2001) และแก๊สที่ได้จากการสลายตัวขององค์ประกอบต่างๆของไม้ แก๊สเหล่านี้มีทั้ง
แก๊สที่ควบแน่นได้และควบแน่นไม่ได้ โดยแก๊สที่ควบแน่นได้จะสามารถควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้
ดิบและแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีบางส่วนที่สามารถติดไฟได้ซึ่งสามารถนำมาเผาเพื่อลดมลพิษก่อน
ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม หรือใช้ระบบหมุนเวียนแก๊สเพื่อนำกลับมาเผาที่เตาเผาถ่านช่วยใน
กระบวนการให้ความร้อนในเตาและยังสามารถช่วยลดระยะเวลาในการผลิตถ่านได้ (Adam,
2009; Sparrevik, Adam, Martinsen, Jubaedah, & Cornelissen, 2015) ปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญที่

ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ของไม้ ได้แก่ เขม่าควัน ฝุ่นละออง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ (สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม, 2555)

1. สารทาร์ (Tar) เกิดจากถ่านที่มีคุณภาพไม่ดี คือ ถูเผาในที่อุณหภูมิไม่สูงพอ มีปริมาณถ่าน (Fixed carbon) ไม่ถึงร้อยละ 85 จึงมีสารระเหยปะปนออกมาในขณะที่ติดไฟ ทาร์หรือน้ำมันดิน ประกอบด้วย สารอินทรีย์หลายชนิด เกาะกันเป็นสีน้ำตาลเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งของอวัยวะต่าง ๆ ได้ เช่น มะเร็งปอด กล้องเสียง หลอดลม หลอดอาหาร ไต กระเพาะปัสสาวะ โดย 50% ของทาร์จะไปจับที่ปอด ทำให้เกิดการระคายเคืองอันเป็นสาเหตุของการไอเรื้อรัง มีเสมหะ

2. เบนโซไพรีน (Benzopyrene) และ ไดเบนซานทราซีน (Dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในกลุ่มโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons :PAH) มักพบในเขม่าที่เกิดจากการเผาชีวมวล ได้แก่ ไม้ ถ่านหิน น้ำมันเชื้อเพลิง คนที่ทำงานสัมผัสกับเขม่าควันจากการเผาไหม้ และถ่านเป็นเวลานาน เช่น อาชีพเผาถ่าน ทำความสะอาดปล่องไฟ หรือแม้แต่ผู้จำหน่าย และผู้บริโภคอาหารปิ้งย่างด้วยเตาถ่าน เป็นต้น จะได้สัมผัสกับเขม่าซึ่งมีสารเบนโซไพรีน และสารไดเบนซานทราซีน ก็จะมีโอกาสทำให้เกิดมะเร็งในอวัยวะหลายชนิด

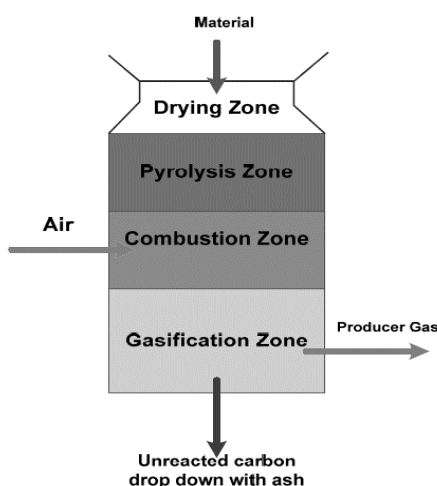
3. ฝุ่นละออง สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ พืช เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน ทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญต่อประชาชน บดบังทัศนวิสัยทำให้เกิดอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง ฝุ่นละอองขนาดเล็กจะมีผลกระทบต่อสุขภาพเป็นอย่างมากเมื่อหายใจเข้าไปในปอดจะเข้าไปอยู่ในระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง ผู้ที่ได้รับฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในระดับหนึ่งจะทำให้เกิดโรคภูมิแพ้ (Asthma) ส่วนผู้ที่ได้รับฝุ่นขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน จะทำให้มีผู้ป่วยที่เป็นโรคเกี่ยวกับหัวใจและโรคปอด และเกี่ยวข้องกับการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรโดยเฉพาะผู้ป่วยที่เป็นผู้สูงอายุ ผู้ป่วยโรคหัวใจ โรคหืดหอบ และเด็กจะมีอัตราเสี่ยงสูงกว่าคนปกติด้วย

4. โลหะหนัก ในการเผาถ่านไม้ มักพบสารแคดเมียมในสถานะเป็นไอ เมื่อมีการเผาไม้ถึงอุณหภูมิ 600 °C หรือสูงกว่า แต่ไอจะก่อกวจากการเผาไม้ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1,000 °C หรือสูงกว่า โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกัน เป็นเวลานาน เช่น โรคปอดเรื้อรัง โรคหัวใจ โรคไตอักเสบ โรคกระดูก โรค ความดันโลหิตสูง และโรคมะเร็ง เป็นต้น

5. แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดขณะการเผาถ่านถึงขั้นตอนการไล่สารระเหิด แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อเข้าสู่ร่างกายทางระบบ ทางเดินหายใจจะเป็นพิษต่อร่างกาย เพราะเข้าแทนที่ออกซิเจน

2.6 ระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล

เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลง (Downdraft gasifier) เตาชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อขจัดปัญหา น้ำมันดินในแก๊สชีวมวล ซึ่งพบมากในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลขึ้น โดยเฉพาะ ลักษณะของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลงอากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างโดยผ่านกลุ่มของหัวฉีด (Nozzle) บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณโซนการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากโซนการเผาไหม้จะถูกรีดิวซ์ (Reduce) ในขณะที่ไหล ลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน อยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ในขณะเดียวกันชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบน ของโซนการเผาไหม้จะเกิดการกลั่น สลาย และจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สแก๊สที่ผ่านโซนการเผาไหม้ในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลง จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดิน และน้ำมัน ลดลงจนเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดินที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลขึ้น ดังนั้นแก๊สชีวมวลที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลง จึงสะอาดกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลขึ้น



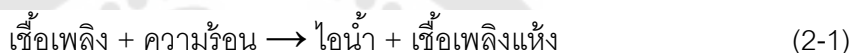
ภาพประกอบ 3 แสดงโซนการเกิดปฏิกิริยาของเตาเผาแบบ Downdraft

หลักการเกิดปฏิกิริยา

ภายในเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลง สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 4 โซน ได้แก่ โซนอบแห้ง (Drying zone) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) โซนเผาไหม้ (Combustion zone) และโซนรีดักชัน (Reduction zone) โดยหลักการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละโซนมีดังนี้

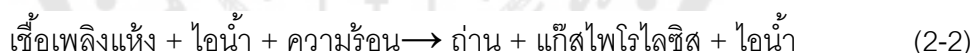
1) โซนอบแห้ง (Drying zone)

คือโซนที่ความชื้นในเชื้อเพลิงระเหยออกด้วยความร้อนที่เกิดจากโซนเผาไหม้ ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาเป็นไอน้ำ อุณหภูมิภายในโซนนี้จะอยู่ระหว่าง 200–500 °C โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโซนอบแห้ง แสดงดังสมการที่ (2-1)



2) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis zone)

คือโซนที่เกิดกระบวนการย่อยสลายตัวของสารเหยต่าง ๆ ที่อยู่ในเชื้อเพลิงแห้งด้วยความร้อนที่เกิดจากโซนเผาไหม้ อุณหภูมิภายในโซนนี้มีค่าประมาณ 500–700 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ได้แก่ ทาร์ แก๊สไพโรไลซิสและถ่าน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโซนไพโรไลซิส แสดงดังสมการที่ (2-2)



3) โซนการเผาไหม้ (Combustion zone)

โซนนี้สามารถเรียกอีกอย่างว่าโซนออกซิเดชัน (Oxidation zone) คือโซนที่ถ่านและแก๊สที่ได้จากโซนไพโรไลซิสไหลลงมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา อุณหภูมิในโซนนี้มีค่าประมาณ 1,000–1,400 °C แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาในโซนนี้ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไอน้ำ (H₂O) และถ่าน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโซนการเผาไหม้ แสดงดังสมการที่ (2-3)



4) โซนรีดักชัน (Reduction zone)

โซนนี้สามารถเรียกอีกอย่างว่าโซนแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification zone) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งเป็นโซนที่แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ทำปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่ใช้อากาศ อุณหภูมิภายในโซนนี้จะอยู่ในระหว่าง 800-1000 °C โดย

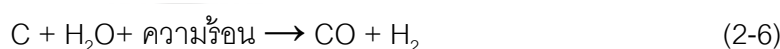
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโซนรีดักชันแสดงดังสมการที่ (2-4) นอกจากนี้แล้วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังมีอีกหลายปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไป แสดงดังสมการที่ (2-5)–(2-8)



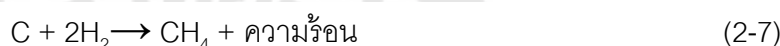
ปฏิกิริยานูดุยาร์ด (Boudouard reaction)



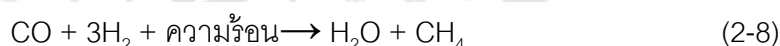
ปฏิกิริยาอวเตอ์แก๊ส (Water gas reaction)



ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydro-genation reaction)



ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สมีเทน (Methanation reaction)



2.7 การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงจากเตาชีวมวล

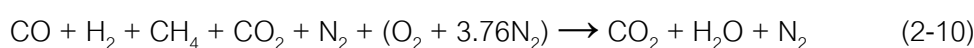
การเผาไหม้ คือ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนซึ่งให้ความร้อนออกมา องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ คือ เชื้อเพลิง ออกซิเจน ความร้อน และปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดนี้จะต้องเกิดขึ้นพร้อมกันในเวลาเดียวกันจึงจะทำให้ มีการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ออกซิเจนนั้นจะได้มาจากอากาศที่อยู่ภายในบริเวณของการเผาไหม้ การควบคุมการเผาไหม้ ก็คือการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิง และอากาศ ให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ในอัตราที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาควันดำหรือมีปริมาณอากาศมากเกินไปด้วยการใช้ ชุดควบคุมการเผาไหม้

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาชีวมวลแบบอากาศไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) จะมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังนี้

แก๊สผลผลิต (Producer gas)



เมื่อนำมาผสมกับอากาศและเกิดการเผาไหม้



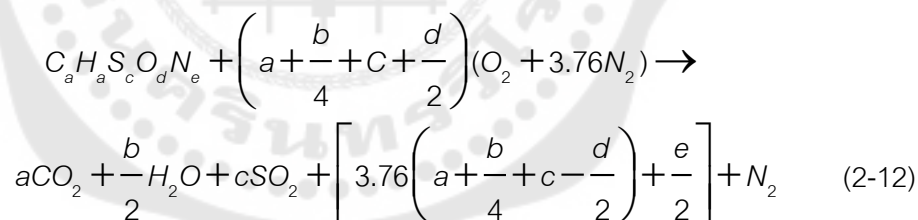
2.7.1 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี

ในการทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ อากาศที่ใช้จะต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าปริมาณพอดี อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศพอดีและเชื้อเพลิงเรียกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี (Theoretical air-fuel ratio) ซึ่งมีสัญลักษณ์ AFR_T อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎีอาจเป็นอัตราส่วนเชิงมวลหรืออัตราส่วนเชิงโมลก็ได้ การระบุค่า AFR_T จึงควรระบุหน่วยด้วยว่าเป็น kg_{air}/kg_{fuel} หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงมวลและอัตราส่วนเชิงโมล (สมชาติ, 2558) เป็นดังนี้

$$\text{อัตราอากาศไหลเชิงมวล} = \frac{2.84 \times \text{อัตราส่วนเชิงมวล}}{M_{fuel}} \quad (2-11)$$

โดยที่ 28.84 คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศทฤษฎีและ M_{fuel} คือน้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงประกอบด้วย C, H หรือ S ซึ่งเผาไหม้ในอากาศ นอกจากนี้เชื้อเพลิงอาจมีส่วนประกอบของ ออกซิเจน (O) และ ไนโตรเจน (N) ด้วย ดังนั้นโมเลกุลของเชื้อเพลิงอาจเขียนเป็นสูตรเคมี $C_a H_b S_c O_d N_e$ อย่างไรก็ตามสูตรเคมีนี้ไม่ได้หมายความว่าธาตุต่างๆ สร้างพันธะเคมีต่อกัน ธาตุบางธาตุเช่น C อยู่ในรูปของคาร์บอนอิสระในเชื้อเพลิงแข็ง สมการเผาไหม้พอดีของเชื้อเพลิงเป็นดังนี้



จากสมการ (2.11) แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงนี้มี

$$AFR_T = 4.76 \left(a + \frac{b}{4} + c + \frac{d}{2} \right) \frac{mol_{air}}{mol_{fuel}} \quad (2-13)$$

ตาราง 2 แสดง AFR_T ของเชื้อเพลิงบางชนิดที่คำนวณจากสมการ (2-13) สำหรับธาตุอื่นหรือแก๊สอื่นที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงเช่น N, O_2 และ CO_2 ค่า AFR_T เท่ากับศูนย์

เชื้อเพลิง	$AFR_T (mol_{air}/mol_{fuel})$
C	4.76

ตาราง 2 (ต่อ) แสดง AFR_T ของเชื้อเพลิงบางชนิดที่คำนวณจากสมการ (2-13) สำหรับธาตุอื่นหรือแก๊สอื่นที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงเช่น N, O₂ และ CO₂ ค่า AFR_T เท่ากับศูนย์

เชื้อเพลิง	AFR_T (mol _{air} /mol _{fuel})
H	1.19
S	4.76
CH ₄	9.52
C ₂ H ₆	16.66
C ₃ H ₈	23.8
CO	2.38

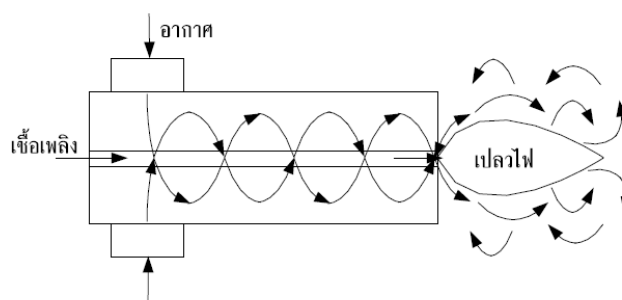
ที่มา: สมชาติ (2558)

ในการหา AFR_T ของเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบหลายชนิดจะต้องทราบสัดส่วนโดยโมลของส่วนประกอบแต่ละชนิด สมมุติว่าเชื้อเพลิงมี k ส่วนประกอบโดยมีสัดส่วนโดยโมลเป็น y_1, y_2, \dots, y_k และส่วนประกอบแต่ละชนิดมีค่า AFR_T เท่ากับ $AFR_{T,1}, AFR_{T,2}, \dots, AFR_{T,k}$ ตามลำดับ ค่า AFR_T ของเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$AFR_T = y_1 AFR_{T,1} + y_2 AFR_{T,2} + \dots + y_k AFR_{T,k} \quad (2-14)$$

2.7.2 อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง

อุปกรณ์หลักคือ หัวเผา (Burner) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศทำให้มีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้พอเพียง เพื่อไม่ให้สูญเสียเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ออกไปจากห้องเผาไหม้ และทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในระหว่างเกิดการเผาไหม้สูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับสัดส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงกับอากาศ เพื่อให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูง จะเห็นว่าเชื้อเพลิงและอากาศไหลแยกกันภายในหัวเผาและจะผสมกันนอกหัวเผา การที่เชื้อเพลิงไม่ผสมกับอากาศภายในหัวเผาทำให้การเผาไหม้ไม่เกิดขึ้นภายในหัวเผา อย่างไรก็ตามหัวเผาต้องได้รับอากาศออกแบบให้เชื้อเพลิงต้องผสมกับอากาศนอกหัวเผา อากาศมีการไหลวนซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ นอกจากนี้อากาศบางส่วนยังไหลย้อนกลับเข้าเปลวไฟซึ่งทำให้มีการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 4 แสดงการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในหัวเผา

ที่มา: Panwar et al. (2011)

ตาราง 3 ตัวอย่างองค์ประกอบอัตราผลผลิตของแก๊ส

Sample number	Gas compositions					Heating value MJ N-1 m-3
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	N ₂	
1	17.33	15.18	1.82	12.50	50.23	4.69
2	16.84	17.30	1.85	12.88	51.21	4.83
3	15.56	16.85	1.92	12.14	50.88	4.72

ที่มา: Panwar et al. (2011)

2.8 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนคือการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุดๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้น ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นแต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกันซึ่งอธิบายความนำความร้อนโดยวิธีการพา และมีอากาศเป็นสารตัวกลาง

1) การนำความร้อน (Conduction) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของ

ความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกันแต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อนความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง

2) การพาความร้อน (Convection) คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล

3) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือการที่ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพา ในการแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีในสุญญากาศ

2.9 หลักการพาความร้อน (Principle of convection)

การพาความร้อน คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของการไหล การพายังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) และการพาโดยการบังคับ (Forced convection) อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 2-15 ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$Q = h(T_K - T_e) \quad (2-15)$$

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ในกรณีทั่วไป ปริมาณที่สำคัญที่สุดในสมการนี้ก็คือ h (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) ถ้ารู้ค่าของ h จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ จะเห็นว่ามีปริมาณต่างๆ มากมายที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อน เช่น ลักษณะและการวางตัวของพื้นผิว ความเร็วของของไหล (ในกรณีของการพาโดยการบังคับ) ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างพื้นผิวและของไหล (ในกรณีของการพาตามธรรมชาติ) เพราะปริมาณนี้จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลขึ้น คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ เป็นต้น การที่จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ เราจะต้องรู้ว่าแต่ละปริมาณที่กล่าวมาแล้ว มีอิทธิพลอย่างไรต่อค่าของ h วิธีการที่จะคำนวณหาค่า h จึงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน การจะหาสมการทั่วไปสมการเดียวมาใช้สำหรับคำนวณ h ให้ใช้ได้ในทุกกรณีนั้น ยังทำไม่ได้ จุดมุ่งหมายที่สำคัญของ

การศึกษาเรื่องการพาความร้อนสำหรับวิศวกรก็คือ การหาวิธีที่จะคำนวณค่า h ในกรณีที่สำคัญๆ ซึ่งพบกันบ่อยๆในทางวิศวกรรมศาสตร์

1) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or Free convection)

คือการเคลื่อนที่ของความร้อน ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหล ซึ่งอยู่หนึ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ติดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ติดผนังต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้น ของไหลที่อยู่ต่ำกว่า ก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณต่างๆหลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่างๆของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสาร ซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสารก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย ถ้าจะหาสมการมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่ยากมาก และทำได้ในกรณีง่ายๆ บางกรณีเท่านั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ

2) การพาโดยการบังคับ (Forced convection)

ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือสูบน้ำ เมื่อของเหลวมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ของของไหลก่อน โดยปกติเราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งของไหลไหลเป็นชั้นๆ ชานานกับความเร็วนั้นจะถ่ายเทจากผิวของของแข็ง โดยการนำและถ่ายเทต่อกันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหลในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่ระเบียบมีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลด้วยการเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้นยิ่งการไหลแบบปั่นป่วนมากเท่าใด การเคลื่อนที่ของความร้อนจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการพาโดยการบังคับของการเคลื่อนที่ของของไหล

3) การพาความร้อนภายนอก (External convection heat transfer)

การพาความร้อนภายนอกเกิดจากของไหลเป็นสารตัวกลาง โดยของไหลมิได้ถูกจำกัดให้ไหลในบริเวณที่กำหนด แต่เป็นการไหลผ่านผิวนอกของของแข็ง เช่น การไหลผ่านผนังราบ

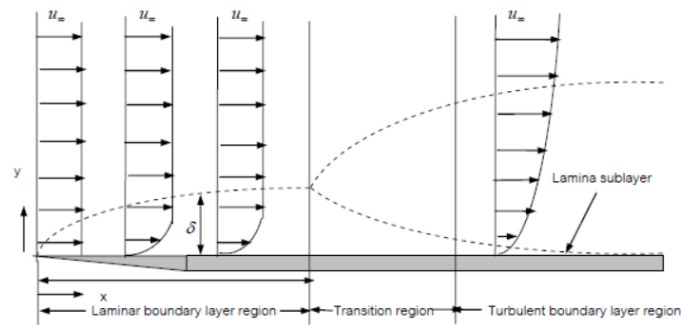
การไหลตั้งฉากกับวัตถุทรงกระบอก การไหลของของไหลมากระทบกับของแข็งรูปร่างลักษณะต่างๆ ในทิศทางใดก็ได้

การพิจารณาการไหลของของไหลผ่านผนังราบ จะเห็นได้ว่าการที่มีผนังอยู่ในของไหลทำให้ความเร็วของของไหลส่วนที่อยู่ใกล้กับผนังเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาแล้วอาจจะแบ่งของไหลออกเป็นสองบริเวณ บริเวณแรกอยู่ใกล้กับผนังเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการที่ผนังราบมาอยู่ในของไหล ทำให้ความเร็วของของไหลในบริเวณนี้เปลี่ยนไป บริเวณที่สองเป็นบริเวณที่ของไหลไม่ได้รับอิทธิพลจากผนังราบ ของไหลบริเวณแรกซึ่งได้รับอิทธิพลจากผนังนั้น เรียกกันว่าบาวดารีเลเยอร์ (Boundary layer) จะเห็นว่าความเร็วของของไหลที่ผิวของผนังนี้มีค่าเป็นศูนย์ แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความเร็วของของไหลภายนอก บาวดารีเลเยอร์ u_∞ หรือที่เรียกว่า ความเร็วของฟรีสตรีม (Free stream velocity) จะเห็นได้ว่า บาวดารีเลเยอร์เกิดขึ้นที่ปลายของผนังแล้วค่อยๆ มีความหนาเพิ่มขึ้นไปตามทิศทางของการไหลของของไหล ในช่วงแรก บาวดารีเลเยอร์จะเป็นแบบลามินาร์ เมื่อบาวดารีเลเยอร์มีความหนาเพิ่มขึ้นถึงจุดๆ หนึ่ง การไหลจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน และบาวดารีเลเยอร์จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นเทอร์บูเลนซ์ที่บาวดารีเลเยอร์ (Turbulent boundary layer) การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้การไหลจะเป็นแบบราบเรียบและปั่นป่วนผสมกันบริเวณนี้เรียกว่า ทรานซิชันโซน (Transition zone) ถึงแม้ว่าการไหลจะเปลี่ยนจากราบเรียบเป็นปั่นป่วนแล้ว การไหลในชั้นบางๆ ของของไหลส่วนที่อยู่ติดกับผนังก็ยังเป็นแบบราบเรียบอยู่ บริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า ลามินาร์ซับเลเยอร์ (Laminar sub layer)

ในเชิงของความเร็วอาจกล่าวได้ว่า บาวดารีเลเยอร์ คือบริเวณของของไหลที่ค่าของ du/dy ไม่เท่ากับศูนย์ ในกรณีนี้ ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) หรือแรงที่ของไหลกระทำที่ผิวของผนังต่อหน่วยพื้นที่ ในกรณีที่การไหลในบาวดารีเลเยอร์เป็นแบบราบเรียบให้ได้โดยสมการ

$$\tau_o = \mu \left[\frac{du}{dy} \right]_{y=0} \quad (2-16)$$

โดยที่ u_∞ คือความหนืด (Dynamic viscosity) ของของไหล



ภาพประกอบ 5 แสดงการไหลขนานกับผนังราบ

เนื่องจากการไหลแบบราบเรียบคือ การไหลที่ของไหลเคลื่อนที่เป็นชั้นๆ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอนุภาคของไหลในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางของการไหล การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของบาวดารีเลเยอร์ และตั้งฉากกับผนังในกรณีของลามินาร์บาวดารีเลเยอร์ จึงเป็นการเคลื่อนที่แบบการนำความร้อน ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้คือ

$$Q = -k \left(\frac{dT}{dy} \right) \quad (2-17)$$

จะเห็นได้ว่าการไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบ ความเค้นและอัตราการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้จากสมการที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในสมการที่ (2-16) และ (2-17) เมื่อการไหลของของไหลเปลี่ยนไปเป็นแบบปั่นป่วนแล้ว จะมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในทิศทางอื่นนอกจากทิศทางของการไหล การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น และสมการที่ (2-16) จะใช้ในการคำนวณค่าของการถ่ายเทความร้อนไม่ได้ เพราะการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้มิได้เป็นไปโดยวิธีการนำความร้อนอย่างเดียว ในทำนองเดียวกัน ความเค้นก็ไม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-16) เช่นเดียวกัน หากการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ถึงแม้บาวดารีเลเยอร์จะเปลี่ยนจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน แต่ของไหลชั้นบางๆ ที่อยู่ติดกับผนังซึ่งเรียกว่า ลามินาร์ซับเลเยอร์นั้นยังมีลักษณะเป็นแบบลามินาร์บาวดารีเลเยอร์อยู่ ดังนั้นสำหรับชั้นบางๆ นี้สมการที่ (2-16) และ (2-17) ยังใช้คำนวณค่าความเค้นและการถ่ายเทความร้อนได้ จากภาพประกอบ 5 แสดงให้เห็นว่า มีบาวดารีเลเยอร์อยู่สามแบบ คือ แบบลามินาร์ เทอร์บูเลนต์ และ ทรานิชัน ปริมาณที่มีความสำคัญมากในการที่จะกำหนดว่า บาวดารีเลเยอร์จะเป็นแบบไหน คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{u_{\infty} d_x}{\nu} \quad (2-18)$$

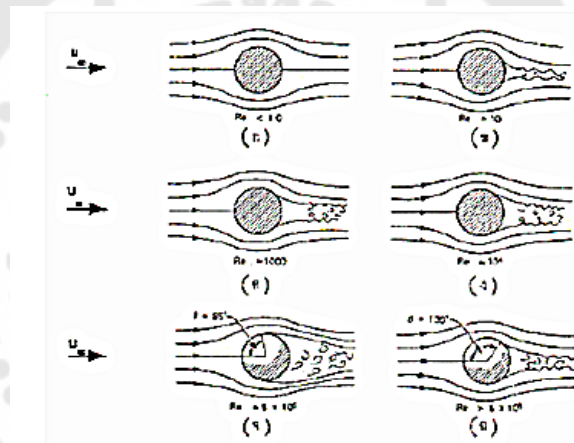
โดยที่ x คือระยะทางที่วัดจากปลายของผนังไปตามทิศทางการไหลของของไหลได้มีการกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับบาวดารีเลเยอร์แบบต่างๆ ในกรณีของการไหลนานกับผนังราบไว้ดังนี้

บาวดารีเลเยอร์แบบลามินาร์ $0 < Re < 5 \times 10^3$

บาวดารีเลเยอร์แบบทรานซิชัน $5 \times 10^3 < Re < 3 \times 10^5$

บาวดารีเลเยอร์แบบเทอร์บูเลนซ์ $Re > 5 \times 10^5$

หากผิวของผนังหยาบมาก บาวดารีเลเยอร์แบบลามินาร์จะเริ่มเปลี่ยนเป็นแบบทรานซิชันที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำกว่า 5×10^5 และบางครั้งบาวดารีเลเยอร์หยุดเป็นแบบลามินาร์ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำลงถึง 10^5



ภาพประกอบ 6 แสดงการไหลตั้งฉากกับท่อกลม

ในกรณีของการไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอกนั้นจะเห็นได้ว่า วัตถุมีอิทธิพลต่อการไหลของของไหลค่อนข้างมาก ลักษณะการไหลของของไหลขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลหรือค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งคำนวณโดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อเป็นความยาวดังนี้ คือ

$$Re = \frac{u_{\infty} d_h}{\nu} \quad (2-19)$$

จะเห็นได้ว่า ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำมากๆ ของไหลเกาะผิวของผนังท่อโดยรอบ จุดหน้าสุดของวงกลมที่สัมผัสกับของไหลเป็นจุดที่ของไหลหยุดนิ่ง (Stagnation point) จุดที่อยู่ตรงกันข้ามกับจุดๆ นี้ซึ่งอยู่ด้านหลังก็เป็นจุดซึ่งของไหลนิ่งเช่นเดียวกัน เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นบาวดา

รีเลย์เยอร์ เริ่มแยกตัวออกจากผิวของท่อที่บริเวณจุดที่ของไหลหยุดนิ่งทางด้านหลัง และแยกตัวมากขึ้นเรื่อยๆ และบริเวณที่ของไหลแยกตัวเริ่มเคลื่อนที่มาจากด้านหน้า ในกรณีนี้การไหลที่แยกตัวออกการไหลเป็นแบบปั่นป่วน บริเวณที่ของไหลแยกตัวออกนี้อุณหภูมิของของไหลเคลื่อนที่ที่ทิศทางต่างๆกันและผสมกันอย่างรุนแรงบริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า เทอร์บูเลนซ์ เวค (Turbulent wake) บริเวณการแยกตัวจะใหญ่ขึ้นและเคลื่อนที่มาจากด้านหน้าเรื่อยๆ ในขณะที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณนี้จะใหญ่ที่สุดเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่า 5×10^3 และหลังจากนั้นก็จะมีผลลดขนาดลง

สำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นได้พบว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวของท่อกับของไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความเร็วของของไหลที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อลักษณะการไหลของของไหลเป็นแบบปั่นป่วน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจะมีค่าสูงกว่า เมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบ เพราะอุณหภูมิของของไหลเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ และผสมกันอย่างรุนแรง

2.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchangers)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ที่จะคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิศวกรต้องมีความรู้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อน และความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล ในปัจจุบันกระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสถานะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือแก๊ส ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่หน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้นวิธีใช้และเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับต้นทุนของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์ การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำอย่างระมัดระวัง เงื่อนไขที่

สำคัญอย่างหนึ่งในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมก็คือ ความมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงและราคาถูก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double pipe exchanger) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้อยู่ในลักษณะที่ท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกัน ส่วนการไหลของของไหลอาจไหลสวนทางกัน เรียกว่า Counter flow หรือไหลขนานกัน เรียกว่า Parallel flow ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การจำแนกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อาจแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ตามลักษณะการไหลของของไหล และแบ่งตามลักษณะรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1) แบ่งตามลักษณะการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

- การไหลแบบทางเดียวกัน (Parallel flow)
- การไหลสวนทางกัน (Counter flow)
- การไหลตั้งฉากกัน (Cross flow)

2) แบ่งตามลักษณะของรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

-แบบท่อสองชั้น (Double pipe) เป็นชนิดที่สามารถสร้างได้ง่ายที่สุด ลักษณะเป็นท่อสองท่อสวมกัน โดยของไหลในแต่ละท่ออาจเป็นของไหลต่างชนิดกัน หรือชนิดเดียวกันก็ได้ แต่อุณหภูมิต้องแตกต่างกัน ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสอง ลักษณะการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ ยังแบ่งการไหลได้อีกสองแบบ คือ การไหลแบบทางเดียวกัน (Parallel flow) และ การไหลแบบสวนทางกัน (Counter flow)

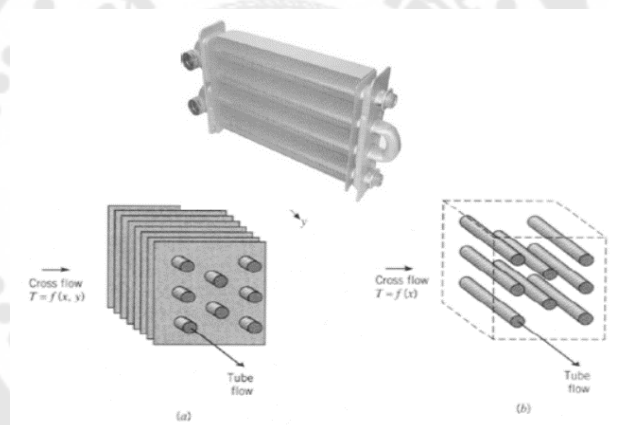


1)การไหลแบบสวนทางกัน

2)การไหลแบบทางเดียวกัน

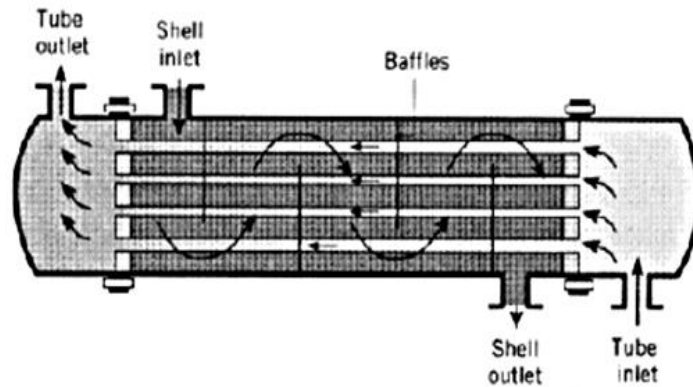
ภาพประกอบ 7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

-แบบกะทัดรัด (Compact) โดยส่วนใหญ่ลักษณะการไหลในเครื่องชนิดนี้จะเป็นการไหลแบบตั้งฉากกัน (Cross flow) และมักจะเป็นการในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับของเหลว เช่น หม้อน้ำในรถยนต์ เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับอากาศเย็น จากภาพประกอบ 8 จะพบว่ามี การติด Fin เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ เพราะค่าความหนาแน่นของอากาศต่ำกว่าน้ำประมาณ 1,000 เท่า ดังนั้นถ้าต้องการดึงความร้อนที่เท่ากันก็จำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน แต่ผลที่ตามมาคือเมื่อเพิ่มพื้นที่แรงเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วย จึงจำเป็นต้องให้งานในการขับอากาศเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มักจะพบว่ามี การติดพัดลมช่วยในการขับการไหลของอากาศ จากภาพประกอบ 8 มีครีปและของไหลแต่ละชนิดไม่ผสมผสานกัน แบบไม่มีครีปทำให้ของไหลนอกท่อผสมผสานกัน



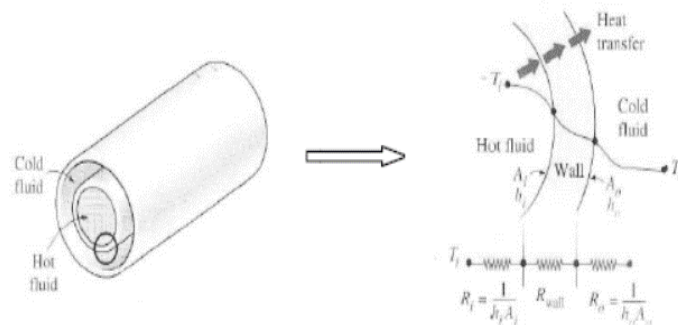
ภาพประกอบ 8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

-แบบท่อและเปลือก (Shell and tube) การไหลของไหลชนิดหนึ่งจะอยู่ในท่อ (Tube) และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะอยู่ในเปลือก (Shell) และมักจะพบว่าการจับยึดระหว่างผนังกับท่อโดยใช้แผ่นกั้น (Baffles) หน้าที่สำคัญอีกประการที่สำคัญของ Baffles คือช่วยไม่ให้เกิดการไหลใน Shell รั่ววงจรร กล่าวคือให้ของไหลใน shell ถ่ายเทความร้อนกับของไหลที่อยู่ในท่อได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจะทำให้การไหลเป็นการไหลแบบตั้งฉากกัน และสวนทางกันหรือขนานกันในบางตำแหน่ง

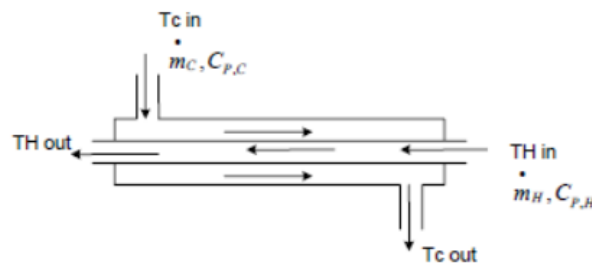


ภาพประกอบ 9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ 2 ชั้นที่ใช้ทดลองในปฏิบัติการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อน กับน้ำเย็น โดยการทดลองเพื่อหาค่า U (Overall heat transfer coefficient) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ทฤษฎี การถ่ายเทความร้อนในการวิเคราะห์อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็น โดยที่น้ำร้อนกับน้ำเย็นจะไม่สัมผัสกัน



ภาพประกอบ 10 Thermal resistance network ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น การวิเคราะห์อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์



ภาพประกอบ 11 ลักษณะการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

จากภาพประกอบ 11 สามารถวิเคราะห์ โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ได้ดังนี้

อัตราความร้อนที่น้ำร้อนปล่อยออก (Heat power emitted)

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2-20)$$

อัตราความร้อนที่น้ำเย็นได้รับ (Heat power absorbed)

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2-21)$$

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นเนื่องจากลักษณะของ Thermal resistance network เป็นการต่อแบบอนุกรม ดังนั้นค่า Heat power emitted กับค่า Heat power absorbed ควรที่จะเท่ากัน (ถ้าไม่มีการสูญเสีย) แต่ในทางปฏิบัติแล้วมีการสูญเสียเกิดขึ้นดังนั้น

$$\text{Heat power lost} = \text{heat power emitted} - \text{heat power absorbed} \quad (2-22)$$

และค่าความสามารถในการดึงความร้อนออกจากน้ำร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือที่เรียกว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน หาได้จาก

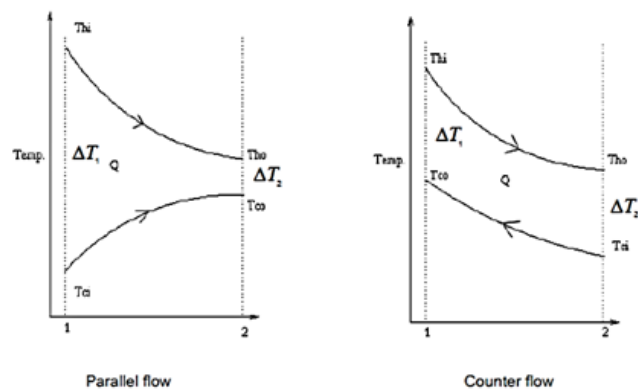
$$\text{Efficiency} = \frac{\text{heat power emitted}}{\text{heat power absorbed}} \times 100\% \quad (2-23)$$

จากการวิเคราะห์โดยใช้ First law of thermodynamics สามารถคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้สามารถดึงออกได้ (Heat power absorbed) ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากันด้วย ดังนั้น ก็สามารถหาค่า U (Overall heat transfer coefficient) ได้เป็น

$$\text{Overall heat transfer coefficient } U = \frac{\text{heat power absorbed}}{\text{heat transmission area} \times \Delta T_{lm}} \quad (2-24)$$

$$\text{Log mean temperature difference } \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (2-25)$$

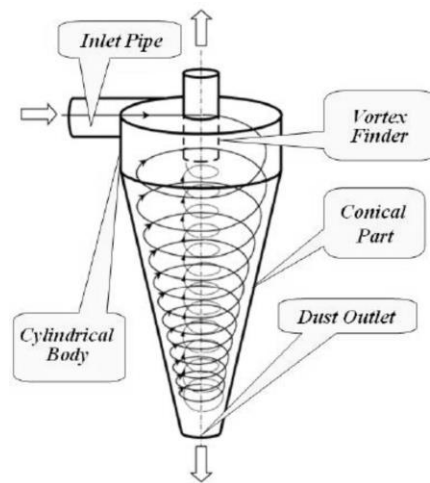
โดย ΔT_1 และ ΔT_2 Temperature difference ขึ้นกับลักษณะการไหลว่าเป็นการไหลแบบขนานกัน หรือสวนทางกันซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 การเปลี่ยนแปลงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

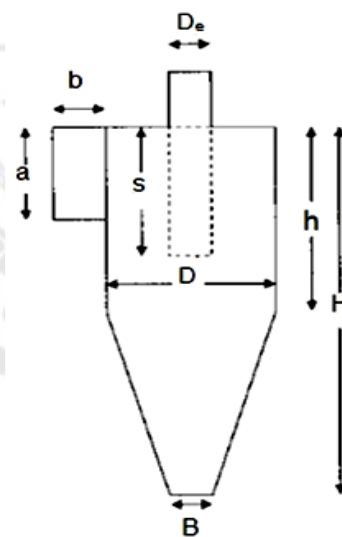
2.11 ทฤษฎีของไซโคลน

เครื่องแยกอนุภาคด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือไซโคลน มีหลักการโดยการอาศัยหลักการหมุนของแก๊สทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อแยกอนุภาคออกจากแก๊ส การหมุนของแก๊สทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อย (Inertia force) เข้าหาผนังของเครื่องแยกหรือไซโคลน แล้วตกสู่ที่สำหรับรองรับอนุภาค (Hopper) โดยทั่วไปแล้วไซโคลนจะเป็นเครื่องที่สำคัญ ในกระบวนการที่ทำให้อากาศสะอาด การทำให้อากาศสะอาดแบบนี้อากาศจะถูกป้อนเข้าส่วนบนของเครื่องแยกโดยสามารถไหลเข้าได้ทั้งในแนวเส้นสัมผัส (Tangential inlet) หรือไหลเข้าตามแนวแกน (Axial inlet) โดยที่ตัวเครื่องแยกจะมีลักษณะเป็นกรวยที่ตั้งเอียงอดแหลมลง ที่บริเวณกลางของฝานมีท่อเรียกว่า ท่อขั้ว (Vortex finder) ติดอยู่ โดยอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปช่วงแรกจะเคลื่อนลงไปตามกรวยโดยอนุภาคจะตกลงไปในที่รองรับด้านล่างแล้วอากาศจึงถูกดูดขึ้นมาตามท่อขั้วเพื่อปล่อยสู่บรรยากาศ



ภาพประกอบ 13 การทำงานของไซโคลน

ที่มา: S. I. Pishbin (2010)



ภาพประกอบ 14 อัตราส่วนขนาดของไซโคลน

ที่มา : พิพัฒน์พงศ์, อภากร, and เกรียงศักดิ์ (2014)

ตาราง 4 โครงแบบของไซโคลน (แบบอากาศไหลเข้าตามแนวสัมผัส)

Term	Description	“High Efficiency”		“General Purpose”	
		Starirmand	Swift	Swift	Peterson and Whitby
D	Body diameter	1.0	1.0	1.0	1.0
a	Inlet height	0.5	0.44	0.5	0.5
b	Inlet width	0.2	0.21	0.25	0.25
S	Outlet length	0.5	0.5	0.625	0.6
D _e	Outlet diameter	0.5	0.4	0.5	0.5
h	Cylinder height	1.5	1.4	2.0	1.75
H	Overall height	4.0	3.9	4.0	3.75
B	Dust outlet diameter	0.375	0.4	0.25	0.4

ที่มา: พิพัฒน์พงษ์ et al. (2014)

2.12 ทบทวนวรรณกรรม

Lin (2006) เตาเผาอิฐบราซิลที่ใช้ในการเผาถ่านไม้ไผ่ ที่มีขนาด 0.3 m³ แบบดั้งเดิม นำมาพัฒนาโดยใช้เตา Updraft fixed bed gasifier ที่มีการติดตั้งพัดลมป้อนอากาศขนาด 5 แรงม้า เพื่อสร้างอัตราการไหล 35 m³/min ผลิตความร้อนให้กับเตาเผาถ่านโดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ต่อเข้ากับเตาเผาถ่าน โดยไม้ที่ใช้ในเผาถ่านในครั้งนี้จะเป็นไม้ Acacia confuse และ หญ้า Miscanthus spp. จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเตาเผาถ่านสูงถึง 650 °C ภายในเวลา 2 ชั่วโมง และพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งโดยอุณหภูมิที่ 80-120 °C เสมือนจะเป็นช่วงไอน้ำออกจากไม้ ที่อุณหภูมิ 250-450 °C เส้นอุณหภูมิจะมีความลาดชันจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และที่อุณหภูมิ 650 °C นั้นแสดงได้ว่าไม้ได้กลายเป็นถ่านสมบูรณ์แล้วจาก

กระบวนการเผาถ่านใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เตาเย็นตัวลงพบว่าอุณหภูมิเตาเผาถ่านลดต่ำลงน้อยกว่า 60 °C ภายในเวลา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งสามารถเปิดเตาได้ รวมเวลาที่ใช้เผาถ่านทั้งหมด 4 ชั่วโมง ได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 35 เดิมจะใช้เวลาในการเผาถ่าน 7 วัน และได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 15-25 สรุปได้ว่าถ่านจากหญ้า Miscanthus spp. อุณหภูมิสุดท้าย 683-716 °C จะมีคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ 91.2-94.1% ค่าความต้านทานไฟฟ้า 7.6-10.2 โอห์ม-เมตร และถ่านจากไม้ Acacia confuse อุณหภูมิสุดท้าย 698-738 °C จะมีคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ 82.8-88.4% ค่าความต้านทานไฟฟ้า 7.6-10.2 โอห์ม-เมตร จะเห็นได้ว่าการใช้เตา Updraft fixed bed gasifier ที่ควบคุมให้ปราศจากออกซิเจนตลอดเวลาในกระบวนการเผาถ่านทำให้เวลาในการเผาถ่านลดลง ได้ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นและคุณภาพถ่านที่ดี



ภาพประกอบ 15 เตา Updraft fixed bed gasifier ที่ทำงานร่วมกับเตาเผาถ่านอสิฐบราซิล

ที่มา: Lin (2006)

Guan (2004) เตาเผาถ่านแบบกลที่มีขนาดความสูงของเตา 2.5 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 เมตร ทำด้วยเหล็กหนาโดยมีท่อปล่องไฟเรียงอยู่ และหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือไม้ไผ่ การใส่วัสดุจะใส่ในช่องด้านล่าง และมีหลุมสำหรับป้อนเชื้อเพลิงและทางออกของถ่าน โดยเตาจะมีการวัดอุณหภูมิ 4 จุด ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิเตาได้ดีและเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองอุณหภูมิจะขึ้นไป 120-150 °C ในเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะเกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 150-280 °C เป็นช่วงที่น้ำส้มควันไม้จะเริ่มเก็บผลผลิตได้ และเมื่ออุณหภูมิเตาสูงถึง 450 °C จะมีควันออกมาเป็นสีฟ้า

อ่อนและสิ่งนี้จะบ่งบอกว่าไม่ได้กลายเป็นถ่านแล้ว แต่ต้องทำให้ถ่านมีความบริสุทธิ์จึงต้องทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้นโดยทั่วไปการทำให้ถ่านบริสุทธิ์จะต้องมีอุณหภูมิสูงถึง 850 °C โดยต้องปล่อยให้เย็น ในระยะเวลาหนึ่งจากกระบวนการเผาถ่านนี้ใช้เวลา 5 วัน และหลังจากนั้นเปิดเตาและให้ถ่านเย็น ตัวลงโดยปล่อยให้ให้อุณหภูมิเตาต่ำกว่า 60 °C ถึงจะเปิดเตาได้ รวมการเผาจะใช้เวลาทั้งหมด 7 วัน คุณสมบัติของถ่านไม้ไฟจะได้ผลผลิตร้อยละ 26.91 ถ้ำ 4.64% สารระเหย 2.7% คาร์บอนคง ตัว 92.66% ความหนาแน่น 0.699 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานไฟฟ้า 1.8×10^{-2} โอห์ม-เมตร

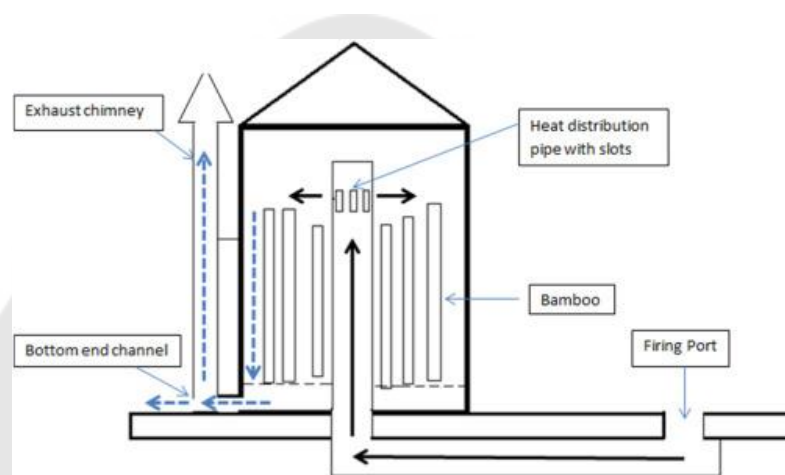


ภาพประกอบ 16 เตาเผาถ่าน Mechanical furnaces

ที่มา: Guan (2004)

Sangsuk et al. (2018) เตาเผาถ่านด้วยท่อกระจายความร้อน (เตาเผาถ่าน - HDP) คอนเดนเซอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ตัวเครื่องทำจากเหล็ก แผ่นเคลือบด้วยไฟเบอร์กลาสและเหล็กชุบสังกะสีเป็นฉนวน จะมีช่องส่งไฟใช้สำหรับส่งความร้อน เข้าไปในเตา ในเตาติดตั้งท่อกระจายความร้อนในส่วนตรงกลาง ท่อทำหน้าที่เป็นช่องระบายความร้อนจากไม้เชื้อเพลิงเพื่อให้มีการกระจายตัวของความร้อน ด้วยวิธีนี้ความร้อนจะถูกกระจายไปยัง ชีวมวลได้อย่างรวดเร็ว ท่อทางออกของควันมีทางออกทั้งหมด 6 ช่อง ต่อเชื่อมกันที่ด้านล่างของ เตาและด้านบนของปล่องไอเสียจะมีที่ควบแน่นแก๊สเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ อุณหภูมิภายในเตาเผา

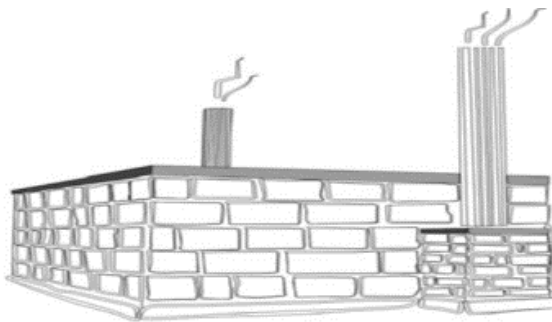
มีอุณหภูมิมากกว่า $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาในการเผาถ่าน 27 ชั่วโมง หลังจากปิดเตาไม่ให้อากาศเข้าแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวโดยธรรมชาติใช้เวลา 15 ชั่วโมง ให้อุณหภูมิต่ำกว่า $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ รวมใช้เวลาทั้งหมด 42 ชั่วโมง วัสดุบดที่ใส่ 1,725 กิโลกรัม แยกออกเป็นไม้ไผ่ผลิตถ่าน 1,446 กิโลกรัม (คิดเป็นน้ำหนักไม้แห้ง 1,207 กิโลกรัม) และไม้พิน 279 กิโลกรัม ที่ความชื้น 30% ได้ผลผลิตถ่านไม้ไผ่ 315 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 26.10 โดยมีความชื้น 8.5% ปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลว (น้ำส้มควันไม้ดิบ) ประมาณ 900 ลิตร มีองค์ประกอบของถ่าน คาร์บอนคงตัว 81%, สารระเหย 7.7% และ เถ้า 11.3% ค่าความร้อนของถ่านที่ได้ 30.347 kJ/kg .



ภาพประกอบ 17 เตาเผาถ่านด้วยท่อกระจายความร้อน (เตาเผาถ่าน - HDP)

ที่มา: Sangsuk et al. (2018)

Adam (2009) เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมจากระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะมีแก๊ส CH_4 , CO และ CO_2 ที่มีการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมที่ทำให้ทีม ICPS ได้พัฒนาเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมโดยการสร้างเตาที่มีผนังสองชั้นโดยผนังชั้นนอกจะเป็นฉนวนและเตาเผาถ่านจะอยู่ด้านใน ทำให้อุณหภูมิที่เผาถ่านของผนังด้านนอกจะวัดอุณหภูมิระหว่างการเผาถ่านได้ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ การทำงานจะนำแก๊สจากระบวนการคาร์บอนไนเซชันส่งกลับไปให้เป็นเชื้อเพลิงร่วมที่เตาเผาถ่าน จากการทดลองนี้ใช้ไม้ผลิตถ่านที่มีความชื้น 10-22% ของน้ำหนักไม้ ผลิตที่ได้คิดเป็นร้อยละ 30-42 (น้ำหนักไม้แห้ง) เมื่อเทียบกับกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบบดั้งเดิมพบว่าสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมสูงสุดถึง 75% ใช้เวลาทั้งหมดในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 12 ชั่วโมง ซึ่งจะดีกว่าเตาแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้เวลา 4-7 วัน



ภาพประกอบ 18 เตาเผาถ่าน Low-cost retort unit (ICPS) or adam-retort

ที่มา: Adam (2009)

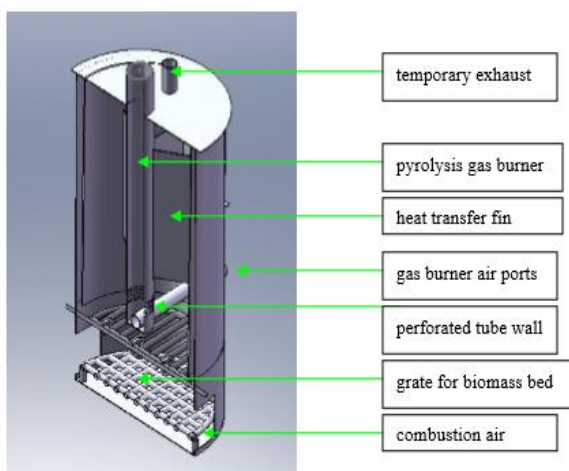
Michael et al. (2011) เตาปฏิกรณ์ถูกออกแบบเป็นเตาเผาที่ใช้ถึงขนาด 55 แกลลอน และถึง 35 แกลลอน ถึงด้านในจะถูกรวบรวมให้มีระยะห่างจากถังใบใหญ่ขึ้นมา 5 นิ้ว ถึงด้านนอกเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว จำนวน 14 รู ตามเส้นรอบวงที่ระยะห่างเท่าๆ กันเพื่อให้อากาศไหลผ่าน โดยถังใบใหญ่จะส่งความร้อนไปยังถังด้านในคือใบเล็กที่ปิดฝาทั้งด้านล่างและบน แต่ด้านล่างของถังใบเล็กจะมีช่องที่ฝาเล็กน้อยเพื่อไม่ให้เกิดความดันภายในถังด้านในและยังช่วยในการควบคุมปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้ในเตา และเป็นช่องระบายแก๊สที่ได้จากการเผาถ่านส่งแก๊สที่ติดไฟได้มาที่ห้องเชื้อเพลิง เพื่อเผาไหม้เป็นความร้อนให้เตาก่อนปล่อยสู่บรรยากาศภายนอกเพื่อลดการปล่อยมลพิษ จากการทดลองพบว่าหลังให้ความร้อนเตาไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 40 นาที ผลปรากฏว่าในเตาเป็นถ่าน 100% จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไปต้องมีอุณหภูมิระหว่าง 300-400 °C และต้องรักษาอุณหภูมิไว้อย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพ โดยพบว่าอุณหภูมิเตาในการทดลองครั้งนี้มีอุณหภูมิ 300 °C ที่เวลาโดยประมาณ 36 นาที และมีความผันผวนระหว่าง 320-340 °C เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งจะเป็นไปตามทฤษฎี และพบว่าได้ผลผลิตถ่าน 0.73 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 30.8 อุปกรณ์เตาสามารถถอดออกเป็นชิ้นส่วนได้เพื่อสามารถเคลื่อนย้ายไปยังที่ต่างๆ ได้ง่าย



ภาพประกอบ 19 เตาเผาถ่านแนวตั้งแบบเคลื่อนย้าย

ที่มา: Michael et al. (2011)

Tippayawong et al. (2010) เตาเผาถ่านได้รับการออกแบบเป็นทรงกระบอกที่มีรูปทรงสูง 1.2 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 เมตร ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นฉนวนใช้ล้อมรอบภายนอกมีความหนาของวัสดุ 3 มิลลิเมตร ส่วนภายในเตาจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3-0.5 เมตร มีความสูง 1 เมตร ความจุวัตถุดิบสำหรับเชื้อเพลิง 5 กิโลกรัม หลักการทำงานความร้อนจากเชื้อเพลิงจะถูกส่งผ่านตะแกรงและที่ปล่องแรงไฟ โดยปล่องแรงไฟจะมีช่องไว้เผาไหม้แก๊สที่ติดไฟที่ได้จากการระเหยของกระบวนการเผาไหม้ภายในเตา วัตถุดิบที่ใช้เผาถ่านคือไม้และไม้ไผ่ จากผลการทดลองวัตถุดิบที่เป็นไม้มีความชื้น 3.5% ได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 35.1-36.8 คาร์บอนคงตัว 53.5-60% สารระเหย 21.6-32.2% และเถ้า 5.8-9.7% มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 46.52% ส่วนวัตถุดิบที่เป็นไม้ไผ่มีความชื้น 5.7% ได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 32.7-33.9 คาร์บอนคงตัว 55.9-59% สารระเหย 25.7-28.4% และเถ้า 7.0-9.8% มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 46.60% จะเห็นได้ว่าสามารถผลิตถ่านที่มีคุณภาพดีเหมือนกับการผลิตจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม แต่กระบวนการใช้เวลาไม่เกิน 12-14 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ 76 ชั่วโมงสำหรับเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม และแก๊สไอเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะไม่มีแก๊สที่ทำให้เกิดการติดไฟออกจากปล่องควันทำให้ช่วยลดมลพิษที่ปล่อยออกมา



ภาพประกอบ 20 เต้าเผาถ่านแบบ Natural draft

ที่มา: Tippayawong et al. (2010)

พิสิษฐ์, ประพิธาร์, สหัตถยา, and บงกช (2558) เต้าเผาถ่าน ขนาด 200 ลิตร แบบแนวตั้ง โดยใช้เทคนิคแก๊สซิฟิเคชัน โดยกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านไม้ ถ่านหิน แกลบ ชี้เลื่อย และวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร ที่สามารถติดไฟได้ให้กลายเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในที่มีออกซิเจนอยู่อย่างจำกัด ซึ่งแก๊สที่ได้มีส่วนประกอบหลักคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรเจน (H_2), แก๊สมีเทน (CH_4) และพวงสารระเหยต่างๆ ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้ เรียกว่า โปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาถ่าน จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิภายในเต้าเผา 754.4 °C อุณหภูมิหน้าเต้าเผา 566.7 °C อุณหภูมิที่ปล่องควัน 678.4 °C อุณหภูมิด้านบนสุดของเต้าโดยเฉลี่ย 618.6 °C ถ่านไม้ที่ผลิตได้ 7.1 กิโลกรัม จากไม้พื้น 30-35 กิโลกรัม ใช้เวลาในการผลิต 2 ชั่วโมง 30 นาที

ลุตฟี and พิสิษฐ์ (2018) เต้าเผาถ่าน ขนาด 200 ลิตร แบบแนวตั้ง โดยใช้เทคนิคแก๊สซิฟิเคชัน เพิ่มฉนวนกันความร้อน 3 ชนิด คือ ดิน ทราช และแกลบดำ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเต้าเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบปรับปรุงรูปแบบและเทคนิคการเผาถ่าน โดยใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่าน จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิภายในเต้าเผา 787.2 °C อุณหภูมิด้านบนของเต้า 371.2 °C อุณหภูมิด้านบนสุดของเต้า 704.9 °C เวลาที่ใช้ในการปิดเต้า 70 นาที และเวลาที่ใช้ทั้งสิ้นของกระบวนการผลิตถ่าน 267 นาที หรือประมาณ 4 ชั่วโมง เต้า

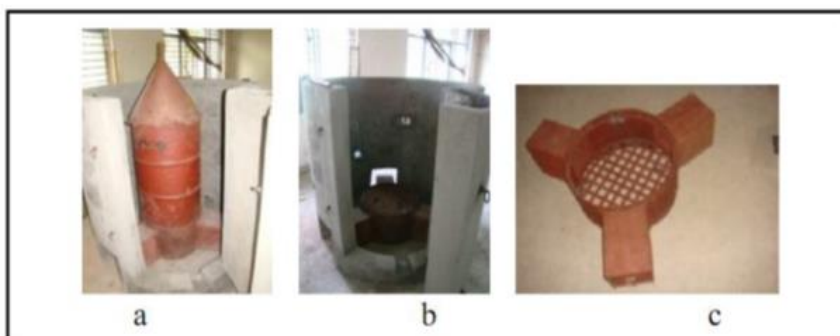
จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม จากการทดสอบปริมาณไม้เริ่มต้น (กะลามะพร้าว) 25 กิโลกรัม จะได้ถ่าน 4.6 กิโลกรัม จากการเพิ่มฉนวนกันความร้อน 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ททราย และแกลบดำ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเตาเผาถ่านแบบใส่ฉนวนกันความร้อนจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าเตาเผาถ่านแบบไม่มีฉนวนกันความร้อน เนื่องจากเตาเผาถ่านที่ได้ใส่ฉนวนกันความร้อนนั้น จะทำให้เตาเผาถ่านมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาสูงขึ้น และจากการทดสอบค่าความร้อนของถ่าน กะลามะพร้าวที่ได้จากเตาเผา 200 ลิตร พบว่าเตาเผาถ่านที่ใส่ฉนวนแกลบดำ จะมีค่าความร้อน สูงสุดเท่ากับ 30.05 MJ/kg. มีค่าการดูดซับไฮโดรเจนมากที่สุดเท่ากับ 910.4461 มิลลิกรัมต่อกรัม



ภาพประกอบ 21 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบปรับปรุงรูปแบบและเทคนิคการผลิตถ่านที่ทำการเพิ่มฉนวนกันความร้อน

ที่มา: ลุตพี and พิสิษฐ์ (2018)

Mahanta (2013) เตาเผาถ่านถูกออกแบบให้มีการกระจายตัวของความร้อนเพื่อการเผาไหม้ให้ทั่วถึงโดยการออกแบบช่องใส่เชื้อเพลิงด้านล่างของเตาแบ่งออกเป็น 3 ช่อง ส่งผ่านความร้อนไปยังห้องเผาไหม้ที่ปิดกั้นด้วยตะแกรง และเตาเผาที่มีการหุ้มฉนวนโดยใช้วัสดุทำเป็นผนังเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกจากห้องเผาไหม้ จากผลการทดลองพบว่าจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมที่ใช้เวลา 3 วัน เตาแบบใหม่นี้จะลดเวลาดลงเหลือ 12-14 ชั่วโมง ในการทดลองใช้ไม้ไผ่ที่มีความชื้น 20-30% น้ำหนักไม้ผลิตถ่านที่ใส่เข้าไปในเตา 75-90 กิโลกรัม อุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีการกระจายตัวที่ทั่วถึงทำให้ความร้อนในการผลิตถ่านที่สูงขึ้น ได้ผลิตถ่าน 26-33% และยังพบว่าค่าความร้อนของถ่านอยู่ที่ 28.76 – 29.05 MJ/kg.



ภาพประกอบ 22 เตาเผาถ่านแนวตั้งให้ความร้อน 3 ทาง

ที่มา: Mahanta (2013)

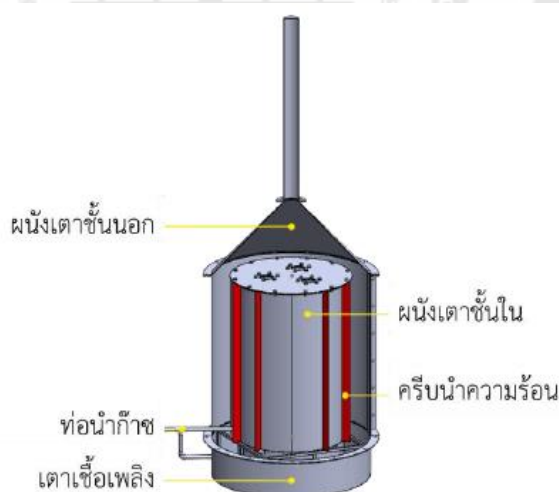
จิระพงษ์ (2555) เตาตั้งเดี่ยวกรมป่าไม้เป็นเตาเผาถ่านที่มีการประยุกต์มาจากการนำถ่านน้ำมัน 200 ลิตร มาเจาะรูทะลุทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยปล่อยควันแบ่งเป็น 3 ระดับ ตามแนวตั้ง ระดับละ 8 รู รวม 24 รู ฝาปิดด้านบนทำจากแผ่นเหล็กเจาะรูขนาดเดียวกับปล่องควัน จำนวน 4 รู หรืออีกวิธีหนึ่งเจาะรูฝาปิดด้านบนเพียง 1 รู บริเวณ กึ่งกลางมีขนาด 10 เซนติเมตร สามารถผลิตและเผาถ่านได้ด้วยตนเองและได้ถ่านในระยะเวลาเพียง 1-2 วัน เป็นการให้ความร้อน เตาเผาถ่านแบบเผาตรง ค่าใช้จ่ายในการสร้าง 1,000-1,500 บาท อายุการใช้งาน 2-3 ปี ผลผลิตที่ได้ร้อยละ 12-20 ไม่สามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้



ภาพประกอบ 23 เตาเผาถ่านตั้งเดี่ยวกรมป่าไม้

ที่มา: จิระพงษ์ (2555)

ธนัญชัย et al. (2016) การออกแบบเตาเผาถ่านไร้ควันแบบใหม่ของงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเตาเผาถ่านที่มีการติดตั้งระบบการจัดการควันแบบเผาซ้ำ ด้วยการติดตั้งผนังเตาชั้นนอกเพื่อควบคุมการลุกไหม้ของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ควันบ้ำและติดตั้งครีบนำความร้อนที่ผนังเตาเผาถ่านชั้นใน เพื่อเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของผนังเตากับแก๊สร้อน ที่เกิดจากการเผาไหม้ควันบ้ำที่กระจายสู่ด้านข้างของเตาในระหว่างกระบวนการคาร์บอนในเซชั่นทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เตาเผาถ่านมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อีกทั้งการติดตั้งครีบยังช่วยระบายความร้อนออกจากเตาในขั้นตอนการทำถ่านให้เย็นลงทำให้ลดระยะเวลาในการผลิตถ่านได้อีกด้วย ส่วนประกอบของเตาเผาถ่านไร้ควันที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ 1. เตาเผาถ่านดัดแปลงจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ทำการติดตั้งท่อนำความร้อนภายในขนาด 3 นิ้ว จำนวน 3 ท่อ, 2. ผนังเตาชั้นนอกออกแบบให้ครอบเตาเผาถ่านเดิม ระยะห่างระหว่างผนังเตาทั้งสองประมาณ 15 ซม., 3. เตาเชื้อเพลิง, 4. ท่อนำแก๊ส (ควันบ้ำ) และ 5. ครีบนำความร้อน จากผลการทดลองเตาเผาถ่านแบบใหม่มีอุณหภูมิภายในเตาเฉลี่ยเท่ากับ 689.6°C ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของเตาแบบเดิม 51.0°C เนื่องด้วยอุณหภูมิภายในเตาที่สูงกว่าจึงทำให้เตาแบบใหม่ที่ได้รับการออกแบบในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มที่จะผลิตถ่านไม้ที่มีค่าคาร์บอนเสถียรสูงกว่าถ่านที่ผลิตได้จากเตาแบบเดิม



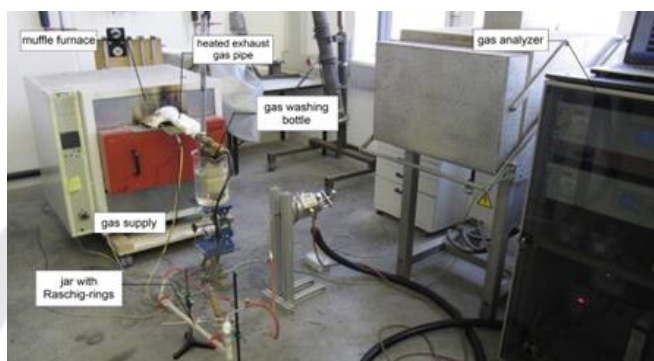
ภาพประกอบ 24 เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่มีการติดตั้งระบบจัดการควันแบบเผาซ้ำและผนัง 2 ชั้น (เตาแบบใหม่)

ที่มา: ธนัญชัย et al. (2016)

Fuwape (1996) การศึกษาความแตกต่างอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสุดท้ายเพื่อผลิตถ่านที่ได้ โดยการทดลองใช้ไม้ 3 ชนิด *Gliricidia sepium*, *Gmelina arborea* และ *Leucaena leucocephala* โดยทดลองที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 250, 300, 350, 400, 500 และ 600 °C จากการทดลองไม้ *Gliricidia sepium* พบว่าได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 94-29.6 มีสารประกอบ สารระเหย 73-31%, เถ้าคงตัว 1.56-3.8% คาร์บอนคงตัว 26-62% และมีค่าพลังงานความร้อน HV 22.29-31.70 MJ/kg. ตามลำดับ ส่วนไม้ *Gmelina arborea* พบว่าได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 96-18.9 มีสารประกอบ สารระเหย 79-41% เถ้าคงตัว 1.2-4.5% คาร์บอนคงตัว 19.8-18.9% และมีค่าพลังงานความร้อน HV 21.24-32.66 MJ/kg. ตามลำดับ และไม้ *Leucaena leucocephala* พบว่าได้ผลผลิตถ่านร้อยละ 94-25.78 มีสารประกอบ สารระเหย 69-36% เถ้าคงตัว 1.0-4.0% คาร์บอนคงตัว 30-59% และมีค่าพลังงานความร้อน HV 22.75-32.76 MJ/kg. ตามลำดับ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นผลผลิตถ่านจะลดลง โดยคาร์บอนคงตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาของอุณหภูมิ 250-300 °C อาจเกิดจากสารสกัดและเฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 190-270 °C โดยเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบของไม้เนื้อแข็งประมาณ 45% จะถูกย่อยสลายที่อุณหภูมิระหว่าง 270-325 °C และลิกนินมีส่วนประกอบทางเคมีของไม้ 25-30% จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 270-400 °C จากผลทดลองเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้นไปมากกว่า 300 °C ปริมาณคาร์บอนจะมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่พบว่าเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้นสายระเหยในถ่านจะลดลง และมีแนวโน้มค่าพลังงานความร้อนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

Griessacher et al. (2012) การผลิตถ่านโดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิ 300–400 °C ซึ่งจะได้ถ่านที่มีคุณภาพปานกลาง โดยถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนคงที่มากกว่า 85% จะเป็นถ่านที่มีคุณภาพดีและต้องมีสารระเหยต่ำ การทดลองนี้จะเผาถ่านด้วยเตาตัดกกลาสและเครื่องวิเคราะห์แก๊สที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงสุด 1000 °C จากการทดลองจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มสูงขึ้นผลผลิตถ่านจะมีแนวโน้มลดลงเป็นเพราะการสลายตัวของไม้ที่อุณหภูมิสูงและการปลดปล่อยสารระเหย ที่อุณหภูมิที่น้อยกว่า 500 °C จะพบว่าผลผลิตถ่านจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความแตกต่างของผลผลิตก็จะแตกต่างกันโดยจะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่าคาร์บอนไนเซชันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้การปลดปล่อยสายระเหยที่มีปริมาณที่สูง โดยสรุปได้ว่าการผลิตถ่านที่มีผลต่อความต้องการของกระบวนการทางโลหะที่เป็นถ่านมีคุณภาพ จะต้องใช้อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 700 °C และนอกจากผลิตภัณฑ์ถ่านแล้วยังสามารถวิเคราะห์แก๊สไพโรไลซิสที่ปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการผลิตถ่าน โดยในการวิเคราะห์จะไม่นำ N₂ มาวิเคราะห์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการผลิตแก๊ส

เฉลี่ยสูงสุดที่อุณหภูมิ 1000 °C ซึ่งสูงถึง 19% โดยแต่ละส่วนประกอบของแก๊สที่ถูกปล่อยที่ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น แก๊ส CO₂ จะมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 350 °C , แก๊ส H₂ มี ปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 800 °C, และแก๊ส CO สามารถตรวจจับได้โดยเกือบจะตลอดของช่วง อุณหภูมิทั้งหมด โดยรวมแล้วจะพบว่า CO₂ และ CO จะพบมากที่อุณหภูมิต่ำกว่าแก๊สชนิดอื่นใน ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น CO และ H₂ จะมีประมาณของแก๊สสูงกว่าแก๊สอื่นๆ

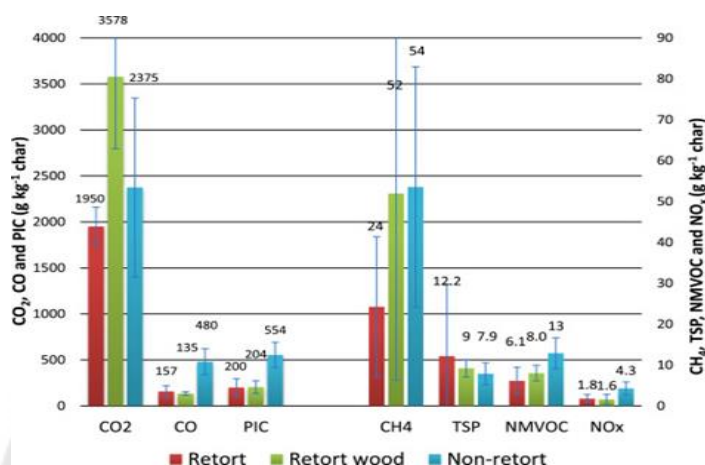


ภาพประกอบ 25 เตาตัดก๊าสและเครื่องวิเคราะห์แก๊ส

ที่มา: Griessacher et al. (2012)

Sparrevik et al. (2015) จากเทคโนโลยีเตาเผาถ่านดั้งเดิมได้มีการปลดปล่อยมลพิษส่ง ผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม แก๊สที่เป็นอันตรายเหล่านี้จะประกอบไปด้วย แก๊สมีเทน แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ และอนุภาค เตาเผาถ่านแบบใช้แก๊สหมุนเวียนและเผาไหม้แก๊สไพโรไลซิสใน การเผาไหม้ภายในได้รับการยอมรับว่าช่วยลดมลพิษจากการเผาถ่าน โดยค่าเฉลี่ยในการปล่อย แก๊สจากเตาเผาแบบย้อนกลับพบว่า จะมีปริมาณแก๊ส (กรัมต่อกิโลกรัมถ่าน) แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 1950 ± 209, แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 157 ± 64, แก๊สไม่ใช่ มีเทนเป็นส่วนประกอบอินทรีย์ระเหยได้ (NMVOC) 6.1 ± 3.4, มีเทน (CH₄) 24 ± 17, อนุภาค ของแข็งทั้งหมด (TSP) 12 ± 18, ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (PIC) 200 ± 97, และไนตริก กออกไซด์ (NO_x) 1.8 ± 1 โดยเทียบกับเตาเผาถ่านทั่วไปจะมี CO₂ 2380 ± 973, CO 480 ± 141, NMVOC 13 ± 138, และ NO_x 4.3 ± 1.6 ความแตกต่างระหว่างประเภทของเตาเผาถ่านมี นัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.05) สำหรับ CO, NMVOC, PIC และ NO_x อย่างไรก็ตามเตาเผาแบบ

ย้อนกลับยังต้องใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงเริ่มแรกเพื่อให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิส ส่งผลให้ความแตกต่างของผลผลิตมีเพียงเล็กน้อย



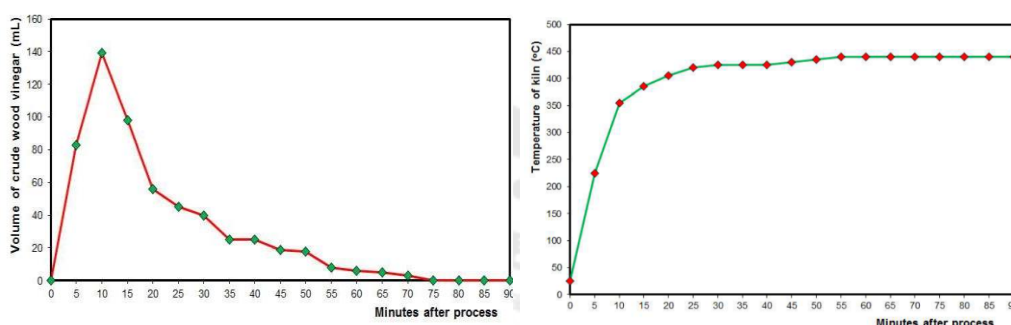
ภาพประกอบ 26 ปริมาณการเกิดมลพิษระหว่างการเผาถ่านแบบคว้นย้อนกลับและแบบดั้งเดิม

ที่มา: Sparrevik et al. (2015)

Y.C. Danarto (2010) การทดลองหาผลผลิตที่ได้จากกระบวนการการไพโรไลซิส กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สรุปได้ว่าการไพโรไลซิสของไม้เริ่มต้นด้วยการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและสารอินทรีย์ในสภาพความร้อน (โดยไม่มีออกซิเจน) ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยโดยทั่วไปการไพโรไลซิสจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 200 ถึง 260 °C จากนั้นเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 240 ถึง 350 °C และลิกนินจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 280 ถึง 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแก๊สของเหลวและของแข็ง จากการไพโรไลซิสเร็วจะพบว่าได้ผลผลิตที่เป็นแก๊สร้อยละ 13 ได้ผลผลิตที่เป็นของเหลว (สารประกอบอินทรีย์) ร้อยละ 75 ผลผลิตที่เป็นของแข็ง(ถ่าน) ร้อยละ 12 โดยที่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน จะได้ผลผลิตที่เป็นแก๊สร้อยละ 35 ได้ผลผลิตที่เป็นของเหลว(สารประกอบอินทรีย์) ร้อยละ 30 ผลผลิตที่เป็นของแข็ง(ถ่าน) ร้อยละ 35 และจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะได้ผลผลิตที่เป็นแก๊สร้อยละ 85 ได้ผลผลิตที่เป็นของเหลว(สารประกอบอินทรีย์) ร้อยละ 5 ผลผลิตที่เป็นของแข็ง(ถ่าน) ร้อยละ 10

Rahmat et al. (2014) ทดสอบโดยใช้วัตถุดิบเป็นเศษไม้สักน้ำหนัก 1,000 กรัม ที่ความชื้น 20% ให้ความร้อนเศษไม้จากอุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงอุณหภูมิ 450 °C ภายในเวลา 90

นาที่ ผลการทดลองในช่วงของการคอนเดนเสทพบว่าได้ผลผลิตน้ำส้มควันไม้สูงสุดในช่วงเวลา 10 นาทีแรก อุณหภูมิเตาจะอยู่ที่ 300 °C จะให้ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ 130 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปผลผลิตที่ได้จะลดลงจนถึงเวลา 75 นาที หลังจากนั้นจะไม่ได้ผลผลิต จนถึง 90 นาที จากการทดลองเศษไม้สัก 1,000 กรัม จะได้ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ 482.67 มิลลิลิตร น้ำมันซีวภาพ 2.93 มิลลิลิตร น้ำมันดิน 41.76 กรัม และถ่าน 222 กรัม ตามลำดับ

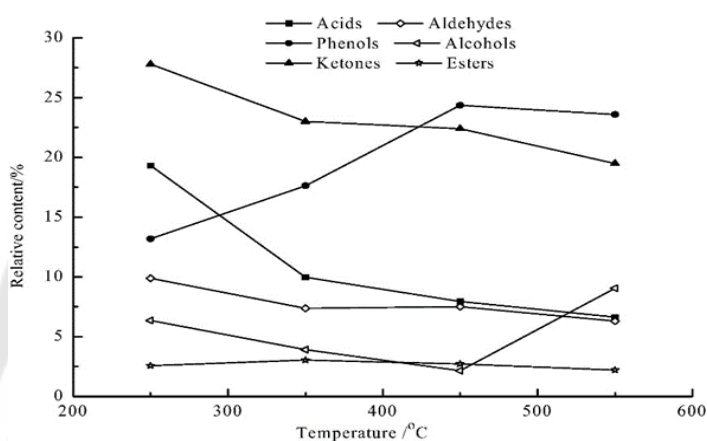


ภาพประกอบ 27 การผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบเทียบกับ เวลา และอุณหภูมิเตาใหม่

ที่มา: Rahmat et al. (2014)

Wu et al. (2015) จากการทดลองที่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 300-350 °C ผลผลิตน้ำส้มควันไม้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 19.8 เป็น 42.3 (ร้อยละต่อน้ำหนักวัตถุดิบ) น้ำส้มควันไม้ดิบส่วนใหญ่เกิดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและแลคตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราของผลผลิตน้ำส้มควันไม้จะลดลงถึงร้อยละ 25 ในช่วงอุณหภูมิ 350-450 °C และเมื่ออุณหภูมิจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันสูงกว่า 450 °C ผลผลิตจะลดลงร้อยละ 21.22 องค์ประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย Acids, Phenols, Ketones, Aldehydes, Alco-hols and Esters ส่วนประกอบที่มีปริมาณที่สูงคือ Acids, Phenols และ Ketones จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระบวนการคาร์บอนไนเซชันกับความเป็นกรดจะลดลงจาก 19.31% เป็น 6.64% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 250 ถึง 550 °C สารประกอบ Acids จะพบค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 250 °C คิดเป็น 19.31% และจะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส คิดเป็น 9.96% ความเป็นกรดเมื่อเทียบกับสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดจะลดลงอาจเนื่องมาจากสารระเหยที่ออกมาในช่วง 250-350 °C ส่วนสารประกอบ

Ketones เริ่มจะมีค่าน้ำหนักสูงและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และ Phenols จะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะสรุปได้ว่าผลผลิตของน้ำส้มควันไม้สูงสุดจะได้ในช่วงอุณหภูมิ 350-450 °C ของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ส่วนสารประกอบอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ที่ความเป็นกรดจะสามารถผลิตได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 250 °C และ Phenols จะสามารถผลิตได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 350-450 °C



ภาพประกอบ 28 สารประกอบที่มีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ที่มา: Wu et al. (2015)

บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 การหาค่าความชื้นของไม้ไผ่

วิธีการหาค่าความชื้นของชีวมวลที่เป็นที่นิยมคือการทำให้ความร้อนด้วยเตาอบตามมาตรฐาน ASTM D4442-07 หรือเรียกว่า The oven-drying method ซึ่งมีเงื่อนไขในการอบแห้งคือต้องใช้อุณหภูมิในการอบ 101 ถึง 105 °C ซึ่งการอบด้วยวิธีนี้ต้องใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนาน โดยใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง ดังนั้นในการทดลองนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาค่าความชื้นอีกวิธีการหนึ่งคือวิธี Microwave oven drying ตามมาตรฐาน ASTM E1358-97 แต่เมื่อทำการอบไม้ไผ่ตามเวลาตามมาตรฐาน ASTM E1358-97 ทำให้พบปัญหาไม้ไผ่ที่อบเกิดการไหม้จึงทำการปรับเวลาการอบให้เหมาะสมตามน้ำหนักไม้ไผ่ที่ลดลง ซึ่งการอบจะกำหนดตัวแปรในการหาค่าความชื้นที่เหมาะสมในการทำไม้ไผ่ถ่านตามเวลาในการตากไม้ไผ่เพื่อลดความชื้นตามธรรมชาติ โดยการทดลองจะเริ่มจากการตัดไม้ไผ่สด ทำการทดลอง 3 เงื่อนไข (1) ไม้ไผ่มีความชื้นร้อยละ 30 ± 5 (2) ไม้ไผ่มีความชื้นร้อยละ 20 ± 5 และ (3) ไม้ไผ่มีความชื้นร้อยละ 10 ± 5 โดยจัดเตรียมไม้ไผ่มาตัดให้มีมีความยาว 7.5 เซนติเมตร และนำมาตากแดดทิ้งไว้ซึ่งได้ทำการทดลองเบื้องต้นพบว่า เมื่อไม้ไผ่สดมาตากแดดไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ ความชื้นลดลงเหลือ 20 ± 5 และผ่านไป 2-3 สัปดาห์ ความชื้นจะลดลงเหลือร้อยละ 10 ± 5

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมทดสอบ

3.1.1.1 จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

- 1) ทำการตัดไม้ไผ่เลี้ยง โดยเลือกต้นที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีอายุของลำต้นไม่น้อยกว่า 3 ปี จำนวน 5 ต้น จากนั้นนำมาตัดแบ่งเพื่อใช้ทดสอบหาค่าความชื้น ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ โคน และปลาย ตัดให้ได้ความยาวขนาด 75 มิลลิเมตร
- 2) ไมโครเวฟ ที่ใช้ในการทดลอง ปรับค่าความร้อนไปที่ 600 วัตต์
- 3) ตาชั่งที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 0.01 กรัม
- 4) ภาชนะสำหรับใส่ชิ้นไม้ไผ่ที่จะนำไปอบแห้ง
- 5) เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล

3.1.1.2 การอบ

- 1) หน้ไม้ไผ่เป็นแผ่นบางๆ หลายๆชิ้น ให้มีน้ำหนักประมาณ 50 กรัม

2) ชั่งน้ำหนักและวัดความชื้นของไม้ไผ่ที่หั่นเพื่อเตรียมอบตามข้อที่ 1 โดยใช้เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล จุดค่าเริ่มต้นของน้ำหนักและความชื้นก่อนอบ

3) อบด้วยเตาไมโครเวฟ ครั้งแรก 1 นาที 1 ครั้ง, 45 วินาที 1 ครั้ง, 30 วินาที 2 ครั้ง และ 10 วินาที ตามลำดับจนน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง

ซึ่งเวลาข้างต้นที่จะเลือกใช้ต้องเลือกจากความเหมาะสมของวัสดุเป็นสำคัญ เนื่องจากพื้นที่ผิวและปริมาณความชื้นก่อนการนำไปอบในไมโครเวฟมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันจึงทำให้มีชิ้นไม้บางลักษณะจะไหม้ก่อน ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการอบแต่ละครั้งแตกต่างกันไปตามความเหมาะสม

ตาราง 5 สำหรับบันทึกค่าน้ำหนักของชิ้นไม้ไผ่ที่หายไปจากการอบแต่ละครั้ง

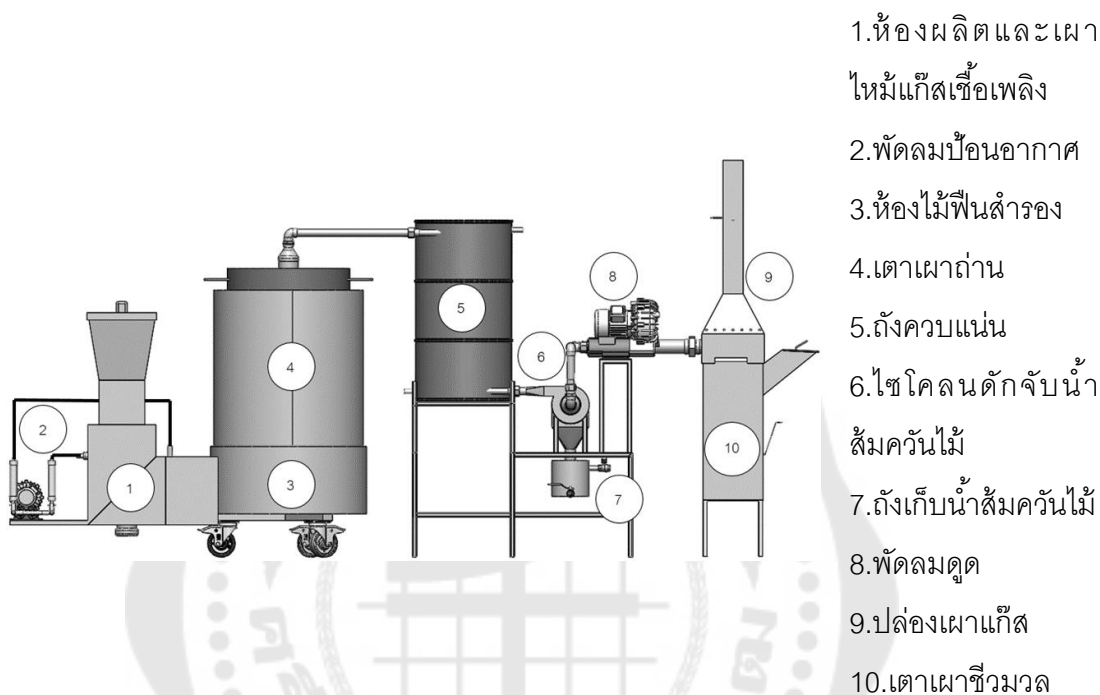
อบครั้งที่	เวลาอบ (วินาที)	น้ำหนักชิ้นส่วนไม้ (กรัม)
1	60	-
2	45	-
3	30	-
4	30	-
5	10	-
6	10	-
7	10	-

ตาราง 6 บันทึกค่าจากการทดลองหาความชื้นของไม้ไผ่เลี้ยง

ขนาด	ระยะเวลาตากแห้ง	ความชื้น
75 มิลลิเมตร	0 อาทิตย์	47.54%
	1 อาทิตย์	20.84%
	2 อาทิตย์	13.08%
	3 อาทิตย์	10.56%

3.2 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่านจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ 1.เตาเผาถ่าน 2.ชุดควบคุม 3.เตาเผาชีวมวล ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 ส่วนประกอบของเตาเผาถ่าน

การทำงานของชุดเตาเผาถ่านมีลำดับการดำเนินงานดังนี้ เริ่มต้นโดยการใส่ไม้พินหลักไปยังห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) ใส่ไม้พินสำรวจไปยังห้องไม้พินสำรวจ (3) และใส่ไม้เผาถ่านในเตาเผาถ่าน (4) ตามลำดับ จุดเตาห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (1) หลังจากห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) เกิดการลุกไหม้ให้เปิดท่อส่งพัดลมบ่อนอากาศ (2) ในขณะที่อากาศถูกบ่อนเข้าสู่ห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) โดยอากาศถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน อากาศส่วนแรกถูกบ่อนเข้าไปบริเวณส่วนล่างของห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) เพื่อให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ในขณะที่อากาศส่วนที่สองถูกบ่อนเข้าไปบริเวณทางออกของห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้ได้แก๊สร้อนที่มีระดับอุณหภูมิสูงเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาถ่าน จากนั้นแก๊สร้อนที่มีระดับอุณหภูมิสูงไหลผ่านห้องไม้พินสำรวจ (3) เพื่อดักจับออกซิเจนทำให้ได้แก๊สที่มีความร้อนสูงปราศจาก

ออกซิเจนก่อนส่งไปยังเตาเผาถ่าน (4) เพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออกจากไม้เตาเผาถ่าน (4) และจากไม้เผาถ่านภายในเตาเผาถ่าน (4) ช่วงท้ายของการเผาถ่านเมื่อไม้พืนหลักในห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) ถูกเผาไหม้หมด อากาศที่บ่อนยังห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) ก็จะผ่านเข้าไปยังห้องไม้พืนสำรอง (3) ซึ่งขณะนั้นไม้พืนสำรองถูกเปลี่ยนเป็นถ่านแล้ว อากาศที่ผ่านเข้ามาจะทำปฏิกิริยาเผาไหม้ถ่านบริเวณห้องไม้พืนสำรอง (3) ทำให้เกิดความร้อนเพื่อไล่สารระเหยจากไม้เผาถ่านไปยังบริเวณส่วนบนสุดของเตาเผาถ่าน (4) ซึ่งแก๊สร้อนจากห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) ความชื้น สารระเหย จากห้องไม้พืนสำรอง (3) และเตาเผาถ่าน (4) จะไหลออกบริเวณส่วนบนสุดของเตาเผาถ่าน (4) ไปยังถังควบแน่น (5) เพื่อควบแน่นเป็นของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำส้มควันไม้และสารประกอบอื่นๆ และไหลไปทางเดียวกับแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ น้ำส้มควันไม้และสารประกอบอื่นๆที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่จะถูกแยกออกจากแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้บริเวณไซโคลน (6) ซึ่งน้ำส้มควันไม้และสารประกอบอื่นๆที่เป็นของเหลวจะไหลลงด้านล่างของไซโคลน (6) เข้าสู่ถังเก็บน้ำส้มควันไม้ (7) และในขณะที่แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกพัดลมดูด (8) ไปที่ปล่องเผาแก๊ส (9) เพื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล (10) ก่อนปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม

3.3 เงื่อนไขการทดลอง

ข้อกำหนดเงื่อนไขในการทดลองจะใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่ตัดให้ได้ขนาด 7.5 cm. กำหนดไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัม และไม้พืนสำรองต่อการเผาถ่านแต่ละครั้งอย่างละ 4.0 กิโลกรัม โดยเปลี่ยนความชื้นของไม้ไผ่เลี้ยงที่ความชื้น 3 กรณีและทั้งหมดจะนำมาประเมินหาประสิทธิภาพเตาเผาถ่าน ปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้ (น้ำส้มควันไม้) และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้

3.3.1 การทดลองหาประสิทธิภาพเตาเผาถ่าน

กรณีที่ 1 ต้องการเผาถ่านโดยใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่มีความชื้นร้อยละ 30 ± 5 ขนาด 7.5 cm. กำหนดให้ไม้เผาถ่านเต็มเตา และกำหนดให้ไม้พืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่านประมาณ 11.0 กิโลกรัม โดยแยกเป็นไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัมและไม้พืนสำรอง 4.0 กิโลกรัม

กรณีที่ 2 ต้องการเผาถ่านโดยใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่มีความชื้นร้อยละ 20 ± 5 ขนาด 7.5 cm. กำหนดให้ไม้เผาถ่านเต็มเตา และกำหนดให้ไม้พืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่านประมาณ 11.0 กิโลกรัม โดยแยกเป็นไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัมและไม้พืนสำรอง 4.0 กิโลกรัม

กรณีนี้ที่ 3 ต้องการเผาถ่านโดยใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่มีความชื้นร้อยละ 10±5 ขนาด 7.5 cm. กำหนดให้ไม้เผาถ่านเต็มเตา และกำหนดให้ไม้พืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่านประมาณ 11.0 กิโลกรัม โดยแยกเป็นไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัมและไม้พืนสำรอง 4.0 กิโลกรัม

3.3.2 การประเมินหาปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้ (น้ำส้มควันไม้) และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้

กรณีนี้ที่ 1 ต้องการเผาถ่านโดยใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่มีความชื้นร้อยละ 30±5 ขนาด 7.5 cm. กำหนดให้ไม้เผาถ่านเต็มเตา และกำหนดให้ไม้พืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่านประมาณ 11.0 กิโลกรัม โดยแยกเป็นไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัมและไม้พืนสำรอง 4.0 กิโลกรัม

กรณีนี้ที่ 2 ต้องการเผาถ่านโดยใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่มีความชื้นร้อยละ 20±5 ขนาด 7.5 cm. กำหนดให้ไม้เผาถ่านเต็มเตา และกำหนดให้ไม้พืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่านประมาณ 11.0 กิโลกรัม โดยแยกเป็นไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัมและไม้พืนสำรอง 4.0 กิโลกรัม

กรณีนี้ที่ 3 ต้องการเผาถ่านโดยใช้ไม้ไผ่เลี้ยงที่มีความชื้นร้อยละ 10±5 ขนาด 7.5 cm. กำหนดให้ไม้เผาถ่านเต็มเตา และกำหนดให้ไม้พืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่านประมาณ 11.0 กิโลกรัม โดยแยกเป็นไม้พืนหลัก 7.0 กิโลกรัมและไม้พืนสำรอง 4.0 กิโลกรัม

3.3.3 คุณสมบัติของไม้ไผ่เลี้ยง

ตาราง 7 Proximate analysis ของไม้ไผ่เลี้ยง (ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%)

Proximate Analysis	Value (%)
Moisture content	12.80
Ash content	1.71
Volatile matter	68.31
Fixed carbon	17.18

ตาราง 8 Ultimate analysis ของไม้ไผ่เลี้ยง (ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%)

Ultimate Analysis	Value (%)
Carbon	44.60
Hydrogen	6.68

ตาราง 8 (ต่อ) Ultimate analysis ของไม้ไผ่เลี้ยง (ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%)

Ultimate Analysis	Value (%)
Nitrogen	0.00
Oxygen	47.01

ตาราง 9 Proximate Analysis ของไม้ฟืน

Proximate Analysis	Value (%)
Moisture content	10.48
Ash content	2.69
Volatile matter	71.34
Fixed carbon	15.49

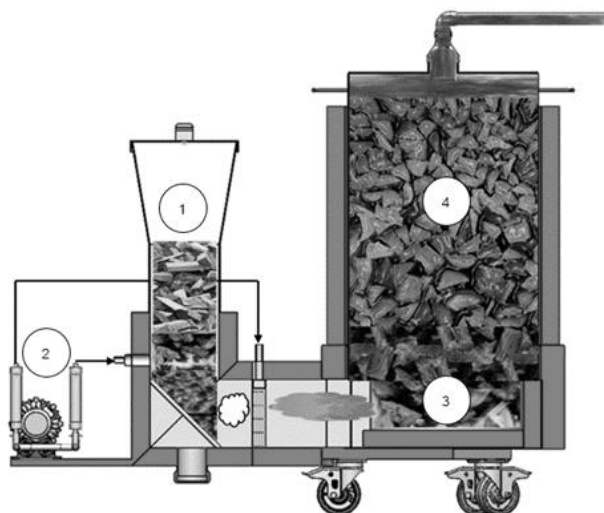
ตาราง 10 Ultimate Analysis ของไม้ฟืน

Ultimate Analysis	Value (%)
Carbon	45.34
Hydrogen	6.26
Nitrogen	0.05
Oxygen	45.66

3.4 สมดุลมวลของชุดเตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่านจะประกอบไปด้วย ส่วนของห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (1) ส่วนนี้จะใช้หลักการทำงานของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลง (Downdraft gasifier) เพื่อผลิตแก๊สออกมาแล้วเกิดการเผาไหม้แก๊สทางออก จุดไฟให้ความร้อนที่ไม้เชื้อเพลิงจะทำให้ไม้เชื้อเพลิงเกิดการลุกไหม้หลังจากนั้น เปิดพัดลมป้อนอากาศ (2) เข้าที่ห้องเชื้อเพลิงหลักอากาศอีกส่วนจะถูกป้อนเข้าไปที่เบิร์นเนอร์แล้วส่งความร้อนที่ได้ไปยังห้องไม้ฟืนสำรอง (3) ความร้อนจะไล่ความชื้น (Moisture) ของไม้ฟืนสำรองหลังจากนั้นจะไล่สารระเหย (Volatile) เมื่อสารระเหยถูกไล่ด้วยความ

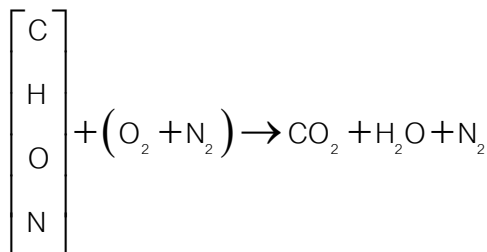
ร้อนไปหมดแล้วจะคงเหลือคาร์บอน (Carbon) จากการส่งผ่านความร้อนนี้จะถูกส่งต่อไปยังเตาเผาถ่าน (4) ความร้อนจะไล่ความชื้น (Moisture) ของไม้ฟืนเผาถ่านหลังจากนั้นจะไล่สารระเหย (Volatile) เมื่อสารระเหยถูกไล่ด้วยความร้อนไปหมดแล้วจะคงเหลือคาร์บอน (Carbon) จากกระบวนการที่กล่าวมาจะได้แก๊สที่ควบแน่นได้ และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้



ภาพประกอบ 30 การทำงานของชุดแก๊สซิฟิเคชันเบอร์เบรินเนอร์

3.4.1 สมดุลมวลในห้องไม้ฟืนหลัก

ผลผลิตแก๊สควบแน่นได้และแก๊สควบแน่นไม่ได้ ซึ่งเกิดจากไม้ฟืนหลัก 7.0 กิโลกรัม ในห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง เมื่ออากาศถูกบ้อนเข้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ดังนี้



ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไม้ฟืนแสดงให้เห็นว่ามี ไฮโดรเจน 6.26% มีคาร์บอน 45.34% มีออกซิเจน 45.66% และไนโตรเจน 0.05% ความชื้น 10.48% โดยเทียบกับน้ำหนักไม้ 1 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นถ้าไม้เชื้อเพลิงหนัก 7.0 กิโลกรัมจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 H &= 6.26\% \\
 &= \frac{6.26 \times 7.0}{100} \text{ กิโลกรัม} \\
 &= 0.438 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= 45.34\% \\
 &= \frac{45.34 \times 7.0}{100} \text{ กิโลกรัม} \\
 &= 3.174 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

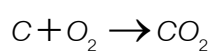
$$\begin{aligned}
 O &= 45.66\% \\
 &= \frac{45.66 \times 7.0}{100} \text{ กิโลกรัม} \\
 &= 3.196 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N &= 0.05\% \\
 &= \frac{0.05 \times 7.0}{100} \text{ กิโลกรัม} \\
 &= 0.004 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

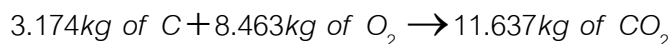
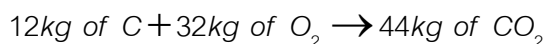
$$\begin{aligned}
 \text{Moiture} &= 10.48\% \\
 &= \frac{10.48 \times 7.0}{100} \text{ กิโลกรัม} \\
 &= 0.734 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

จากสมการปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะสามารถคำนวณผลผลิตแก๊ส
 ควบแน่นได้และแก๊สควบแน่นไม่ได้ ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และน้ำซึ่ง
 เกิดจากไม้เชื้อเพลิง 7.0 กิโลกรัมได้ดังนี้

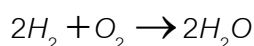
สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนในอากาศ



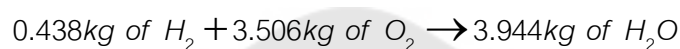
จะได้



สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน



จะได้



เพราะฉะนั้นออกซิเจนที่ต้องการป้อนเข้า

$$(8.463 + 3.506) - 3.196 = 8.773 \text{ กิโลกรัม}$$

สัดส่วนออกซิเจนต่อไนโตรเจน 23.3 : 76.7

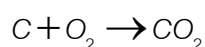
$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= 8.773 \times \left(\frac{76.7}{23.3} \right) \\ &= 28.879 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

จากสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะสามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเข้าเตาได้เท่ากับ 37.652 kg. และสามารถหาปริมาณความชื้นในแก๊สร้อนได้เท่ากับ 3.944 kg. และแก๊สร้อนแห้ง 40.516 kg. เนื่องจากไม้ฟืนหลักถูกใช้หมดในช่วงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศจึงมีค่า 18.826 kg/hr. เทียบเท่า 0.005229 kg/s. และสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของความชื้นในแก๊สร้อนได้เท่ากับ 1.972 kg/hr. เทียบเท่า 0.000548 kg/s. อัตราการไหลของแก๊สร้อนแห้งเท่ากับ 20.258 kg/hr. เทียบเท่า 0.005627 kg/s.

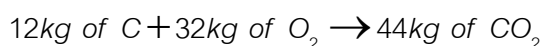
หลังจากเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง จะทำให้ไม้ฟืนหลักถูกไล่ความชื้นและสารระเหยออกไปหมด เหลือเพียงคาร์บอนคงตัว ซึ่งจะถูกนำไปเผาต่อเพื่อให้ความร้อนแก่เตาเผาถ่านต่อไป สามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเข้าเตาและปริมาณแก๊สแก๊สร้อนแห้งได้จากสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังนี้

$$\begin{aligned} \text{คาร์บอนคงตัว} &= 15.49\% \\ &= \frac{15.49 \times 7}{100} \\ &= 1.084 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนในอากาศ



จะได้



เพราะฉะนั้นออกซิเจนที่ต้องการป้อนเข้า = 2.891 กิโลกรัม

สัดส่วนออกซิเจนต่อไนโตรเจน 23.3 : 76.7

$$N_2 = 2.891 \times \left(\frac{76.7}{23.3} \right)$$

$$= 9.518 \text{ กิโลกรัม}$$

จากสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะสามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเข้าเตาได้เท่ากับ 12.409 kg. และสามารถหาปริมาณแก๊สร้อนแห้งได้เท่ากับ 13.493 kg. เนื่องจากคาร์บอนคงตัวถูกใช้หมดในช่วงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศจึงมีค่า 6.205 kg/hr. เทียบเท่า 0.001724 kg/s. และสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สร้อนแห้งเท่ากับ 6.747 kg/hr. เทียบเท่า 0.001874 kg/s.

3.4.2 พิจารณาในห้องไม่พ่นสำรวจ

ผลผลิตแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ซึ่งเกิดจากไม่เชื้อเพลิง 4.0 กิโลกรัมในห้องเผาไหม้ไม่พ่นสำรวจ ซึ่งความร้อนและแก๊สที่ควบแน่นได้และควบแน่นไม่ได้จากห้องผลิตแก๊สและเผาแก๊สจะถูกส่งมายังห้องเผาไหม้ไม่พ่นสำรวจ ทำให้มีออกซิเจนบางส่วนมาเผาไหม้ไม่พ่นเพื่อเป็นความร้อนให้แก่เตาเผาถ่าน แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้และน้ำจะถูกส่งผ่านไปยังเตาเผาถ่านต่อไปซึ่งจาก Proximate analysis ของไม้พ่นแสดงให้เห็นว่า มีความชื้น 10.48 % สารระเหย 71.34 % คาร์บอนคงตัว 15.49 % และเถ้า 2.69% โดยเทียบกับน้ำหนักไม้ 1 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นเชื้อเพลิงหนัก 4.0 กิโลกรัมจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชื้น} &= 10.48\% \\ &= \frac{10.48 \times 4}{100} \\ &= 0.419 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\text{สารระเหย} = 71.34\%$$

$$= \frac{71.34 \times 4}{100}$$

$$= 2.854 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 15.49\%$$

$$= \frac{15.49 \times 4}{100}$$

$$= 0.620 \text{ กิโลกรัม}$$

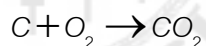
$$\text{เถ้า} = 2.69\%$$

$$= \frac{2.69 \times 4}{100}$$

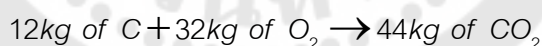
$$= 0.108 \text{ กิโลกรัม}$$

หลังจากเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง จะทำให้ไม้พินสำรวจถูกไล่ความชื้นและสารระเหยออกไปหมด เหลือเพียงคาร์บอนคงตัว ซึ่งจะถูกนำไปเผาต่อเพื่อให้ความร้อนแก่เตาเผาถ่านต่อไป สามารถคำนวณหาปริมาณแก๊สควบแน่นได้และควบแน่นไม่ได้จากสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังนี้

สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนในอากาศ



จะได้



เพราะฉะนั้นออกซิเจนที่ต้องการป้อนเข้า = 1.652 กิโลกรัม

สัดส่วนออกซิเจนต่อไนโตรเจน 23.3 : 76.7

$$N_2 = 1.652 \times \left(\frac{76.7}{23.3} \right)$$

$$= 5.438 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้นปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้ของห้องไม้พินสำรวจที่ได้จากการไล่ความชื้นและสารระเหยมีค่าประมาณ 3.273 kg. เมื่อพิจารณาแก๊สควบแน่นได้ที่ออกจากห้องไม้พินสำรวจหมดภายในเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงครึ่ง ดังนั้นอัตราการไหลของแก๊สควบแน่นได้มีค่า

1.309 kg/hr. เทียบเท่า 0.000364 kg/s. และเมื่อพิจารณาการเผาคาร์บอนคงตัวจากสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะถูเผาหมดในช่วงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงครึ่ง จะสามารถคำนวณหาปริมาณอากาศเข้าเตาได้เท่ากับ 7.091 kg. และปริมาณแก๊สควบแน่นไม่ได้มีค่าประมาณ 7.711 kg. ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศจึงมีค่า 2.837 kg/hr. เทียบเท่า 0.000788 kg/s. และสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สควบแน่นไม่ได้เท่ากับ 3.084 kg/hr. เทียบเท่า 0.000857 kg/s.

3.4.3 พิจารณาในเตาเผาถ่าน

ผลผลิตแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ซึ่งเกิดจากไม้เผาถ่านในเตาเผาถ่าน 200 ลิตร น้ำหนักประมาณ 70.77 กิโลกรัม ซึ่งความร้อนจากห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงทำให้เกิดแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จากห้องผลิตแก๊ส การเผาแก๊สและห้องเผาไหม้ไม่พินสำรวจ จะถูกส่งต่อไปยังถังควบแน่นและไซโคลนดักจับ ดังนั้นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเผาไหม้จะทำให้ได้ผลผลิตคือ สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้นและเถ้า สามารถหาได้จาก Proximate analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงแสดงให้เห็นว่า มีความชื้น 12.80% สารระเหย 68.31% คาร์บอนคงตัว 17.18% และเถ้า 1.71% โดยเทียบกับน้ำหนักไม้ 1 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นไม้เผาถ่านหนัก 70.77 กิโลกรัม จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชื้น} &= 12.80\% \\ &= \frac{12.80 \times 70.77}{100} \\ &= 9.059 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมมุติฐานว่าความชื้นที่คงเหลือ 3\%} &= 9.059 \times \left(\frac{3}{100} \right) \\ &= 0.272 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สารระเหย} &= 68.31\% \\ &= \frac{68.31 \times 70.77}{100} \\ &= 48.343 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมมุติฐานว่าสารระเหยที่คงเหลือ 3\%} &= 48.343 \times \left(\frac{3}{100} \right) \\ &= 1.450 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 17.18\%$$

$$= \frac{17.18 \times 70.77}{100}$$

$$= 12.158 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ถ้ำ} = 1.71\%$$

$$= \frac{1.71 \times 70.77}{100}$$

$$= 1.210 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้นปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้จากเตาเผาถ่านมีค่าประมาณ 55.68 kg. เมื่อพิจารณาแก๊สควบแน่นได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านหมดภายในเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง 46 นาที ดังนั้นอัตราการไหลของแก๊สควบแน่นได้มีค่า 12.65 kg/hr. เทียบเท่า 0.00352 kg/s.

ตาราง 11 ตารางสรุปผลการสมดุลมวลเตาเผาถ่านของทั้ง 3 กรณี

หัวข้อ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
ไม้ฟืนที่ใช้สำหรับการเผาถ่าน	7 kg	7 kg	7 kg
ไม้ฟืนสำรอง	4 kg	4 kg	4 kg
ไม้เผาถ่าน	200 liter	200 liter	200 liter
ความชื้นไม้เผาถ่าน	30 (± 5)%	20 (± 5)%	10 (± 5)%
ปริมาณอากาศเข้าเตาของไม้ฟืน	57.152 kg	57.152 kg	57.152 kg
แก๊สร้อนแห้งของไม้ฟืน	61.720 kg	61.720 kg	61.720 kg
ปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้	0.00430 kg/s	0.00461 kg/s	0.00443 kg/s
ปริมาณแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้	0.00836 kg/s	0.00836 kg/s	0.00836 kg/s

3.5 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ

เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาถ่านระหว่างเตาเผาถ่านกับชุดควบแน่น ดังภาพประกอบ 31 โดย

T_1 คือ อุณหภูมิเบิร์นเนอร์

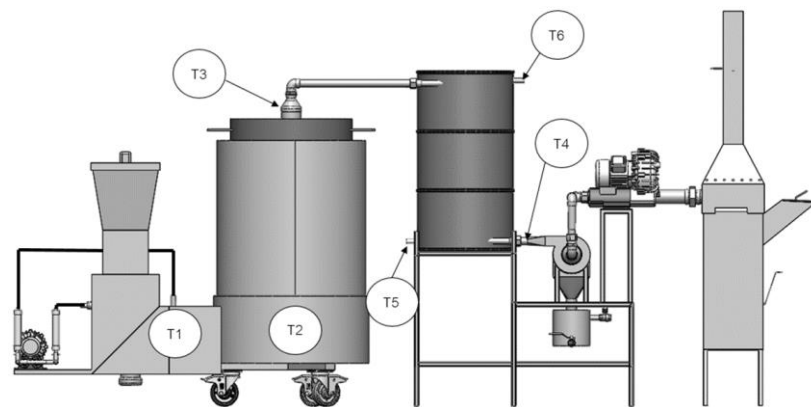
T_2 คือ อุณหภูมิห้องเชื้อเพลิงสำรอง

T_3 คือ อุณหภูมิบนเตา

T_4 คือ อุณหภูมิแก๊สออกจากถังควบแน่น

T_5 คือ อุณหภูมิน้ำเข้าถังควบแน่น

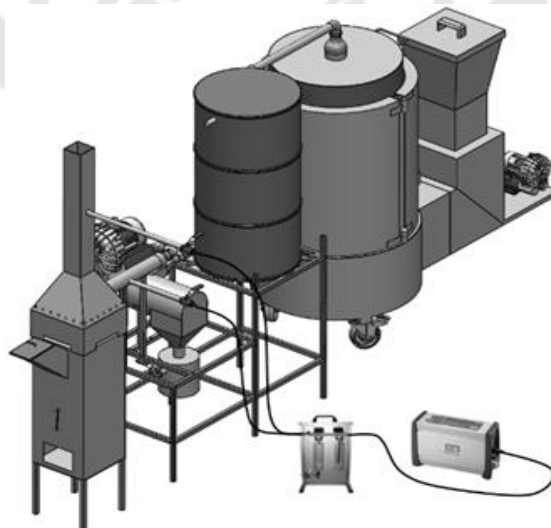
T_6 คือ อุณหภูมิน้ำออกจากถังควบแน่น



ภาพประกอบ 31 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

3.6 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษทางปล่องไอเสีย

เพื่อพิจารณาปริมาณการปล่อยมลพิษทางปล่องไอเสียของเตาเผาถ่าน ดังภาพประกอบ 32 ติดตั้งเครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ในตำแหน่งของปล่องไอเสีย



ภาพประกอบ 32 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้

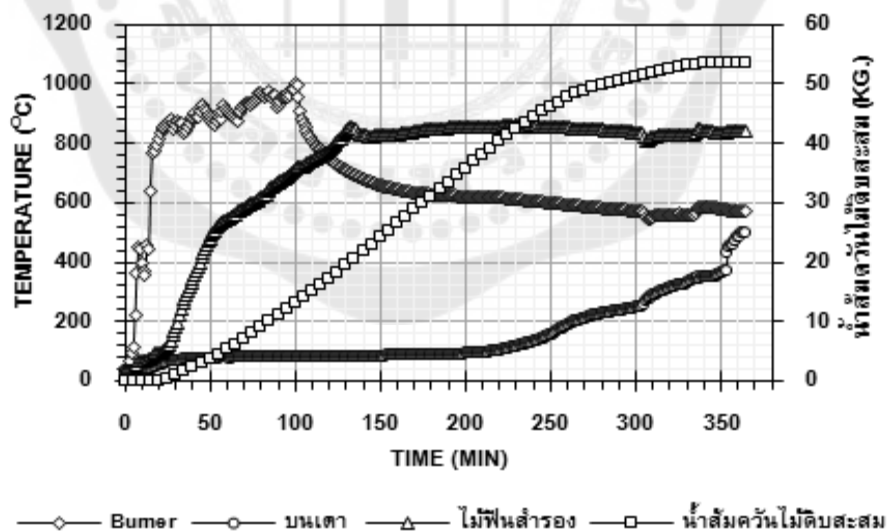
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการเผาถ่านไม้ไผ่ด้วยเตาเผาถ่านที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบิร์นเนอร์ โดยตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองในครั้งนี้คือ ความชื้นของไม้ไผ่เลี้ยง ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 30.17%, 21.49% และ 12.80% โดยระยะเวลาในการเผาถ่านร่วมกับผลผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติตามมาตรฐานชุมชน ส่วนมลพิษที่ได้หลังจากใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาเผาชีวมวลจะถูกนำมาวิเคราะห์การปล่อยมลพิษตามเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน

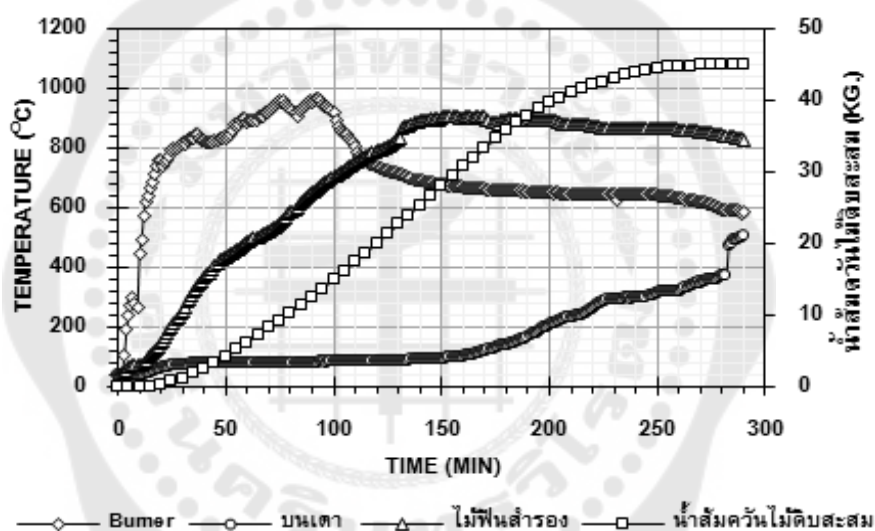
4.1 ผลการทดลองหาสมรรถนะของเตาเผาถ่าน

จากการทดลองเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงโดยมีค่าความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%, 21.49% และ 12.80% ซึ่งได้ผลการทดลองตามนี้



ภาพประกอบ 33 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลา กับอุณหภูมิและปริมาณน้ำส้มควันไม้ของการเผาถ่านครั้งที่ 1 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%

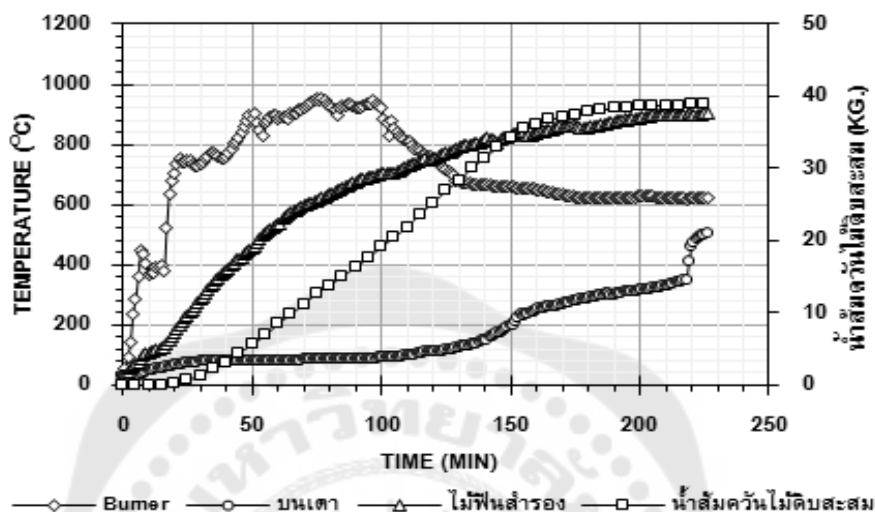
ในการเผาถ่านครั้งนี้ใช้ไม้เผาถ่านปริมาณ 89.92 กิโลกรัม และใช้ไม้เชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 12.23% ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน แบ่งเป็นไม้พื้หลัก 7 กิโลกรัม และไม้พื้สำรอง 4 กิโลกรัม ซึ่งในการเผาถ่านครั้งนี้ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 6 ชั่วโมง 4 นาที โดยสามารถทำอุณหภูมิ Burner ได้สูงสุด 999.6 °C อุณหภูมิได้เตาสูงสุดอยู่ที่ 859.4 °C และอุณหภูมิบนเตาสูงสุดอยู่ที่ 500.4 °C สามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้ทั้งหมด 53.59 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 59.60 ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน มีค่าความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้อยู่ที่ 2.9 และค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้อยู่ที่ 1.013 ส่วนปริมาณถ่านที่ได้จากการเผาครั้งนี้อยู่ที่ 14.41 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 22.95 ของน้ำหนักไม้แห้ง



ภาพประกอบ 34 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลากับอุณหภูมิและปริมาณน้ำส้มควันไม้ของการเผาถ่านครั้งที่ 2 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%

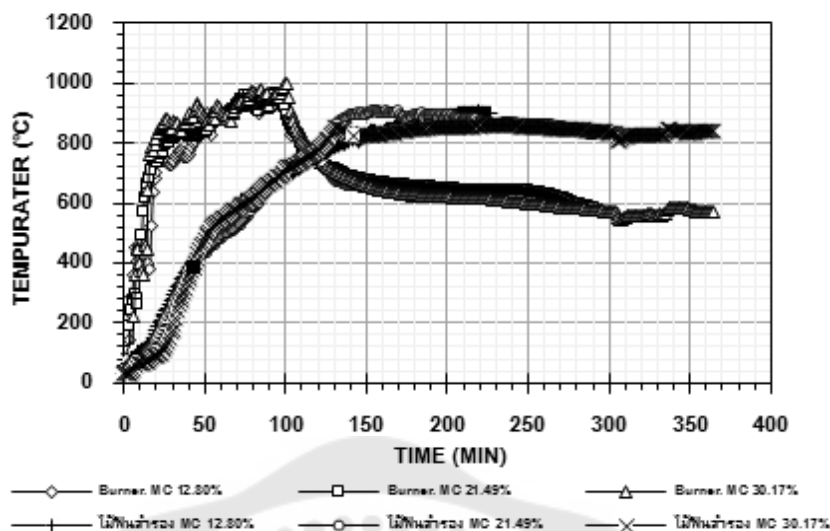
ในการเผาถ่านครั้งนี้ใช้ไม้เผาถ่านปริมาณ 79.92 กิโลกรัม และใช้ไม้เชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 13.76% ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน แบ่งเป็นไม้พื้หลัก 7 กิโลกรัม และไม้พื้สำรอง 4 กิโลกรัม ซึ่งในการเผาถ่านครั้งนี้ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 4 ชั่วโมง 50 นาที โดยสามารถทำอุณหภูมิ Burner ได้สูงสุด 964.2 °C อุณหภูมิได้เตาสูงสุดอยู่ที่ 906.1 °C และอุณหภูมิบนเตาสูงสุดอยู่ที่ 504.9 °C สามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้ทั้งหมด 44.94 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 56.23 ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน มีค่าความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้อยู่ที่ 2.68 และค่าความ

ถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้อยู่ที่ 1.015 ส่วนปริมาณถ่านที่ได้จากการเผาครั้งนี้อยู่ที่ 14.64 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 23.33 ของน้ำหนักไม้แห้ง



ภาพประกอบ 35 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลา กับอุณหภูมิและปริมาณน้ำส้มควันไม้ของการเผาถ่านครั้งที่ 3 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%

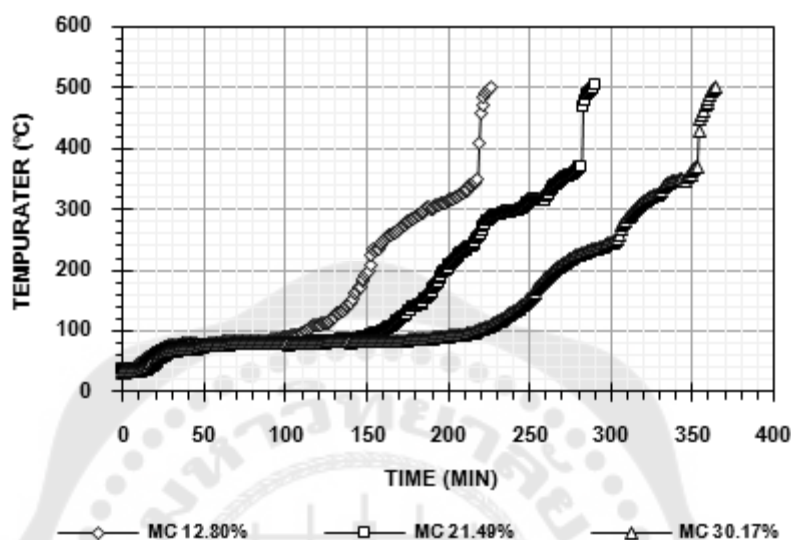
ในการเผาถ่านครั้งนี้ใช้ไม้เผาถ่านปริมาณ 70.77 กิโลกรัม และใช้ไม้เชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 15.54% ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน แบ่งเป็นไม้พินหลัก 7 กิโลกรัมและไม้พินสำรอง 4 กิโลกรัม ซึ่งในการเผาถ่านครั้งนี้ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 3 ชั่วโมง 46 นาที โดยสามารถทำอุณหภูมิ Burner ได้สูงสุด 956.1 °C อุณหภูมิได้เตาสูงสุดอยู่ที่ 903.6 °C และอุณหภูมิบนเตาสูงสุดอยู่ที่ 502.7 °C สามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้ทั้งหมด 38.85 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 54.89 ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน มีค่าความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้อยู่ที่ 2.59 และค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้อยู่ที่ 1.022 ส่วนปริมาณถ่านที่ได้จากการเผาครั้งนี้อยู่ที่ 14.68 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 23.79 ของน้ำหนักไม้แห้ง



ภาพประกอบ 36 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของ Burner และอุณหภูมิห้องไม้พินสำรองที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

จากการทดลองผลิตแก๊สร้อนด้วยชุดแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์ที่ใช้ไม้พินหลัก 7 กิโลกรัม และไม้พินสำรอง 4 กิโลกรัม ภาพประกอบ 36 พบว่าจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง แก๊สร้อนที่ Burner ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49% และ 30.17% สามารถทำอุณหภูมิได้ประมาณ 800 °C ภายในเวลา 43, 28 และ 20 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ 956.1, 964.2 และ 999.6 °C จะพบว่าการผลิตแก๊สร้อนด้วยชุดแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์สามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุด 950-1,000 °C ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Sparrevik et al., 2015; พิธิษฐิ์ et al., 2558) ที่ใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์ผลิตความร้อนเพื่อป้องกันความร้อนให้เตาเผาถ่านพบว่าจะสามารถทำอุณหภูมิได้สูงในระยะเวลาดังนั้นทำให้อุณหภูมิเตาเผาถ่านสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจากการทดลองนี้เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 นาที อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงมาอยู่ที่ 600 °C เนื่องจากไม้พินหลักถูกเผาไหม้จนหมด ส่วนอุณหภูมิของไม้พินสำรองจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ในห้องไม้พินสำรองและจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของ Burner ที่เวลา 120, 114 และ 110 นาที ตามลำดับ และจะเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ระดับสูงกว่า 800 °C โดยสามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุดที่ 903.6, 906.1 และ 859.4 °C ตามลำดับ และสิ้นสุดกระบวนการเผาถ่านที่เวลา 226, 290 และ 364 นาที ตามลำดับ จากอุณหภูมิที่กล่าวมาพบว่าการผลิตแก๊สร้อนด้วยชุดแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากมีแนวโน้มของอุณหภูมิที่ทำการทดลองทั้ง 3 ครั้ง เป็นไปในทิศทาง

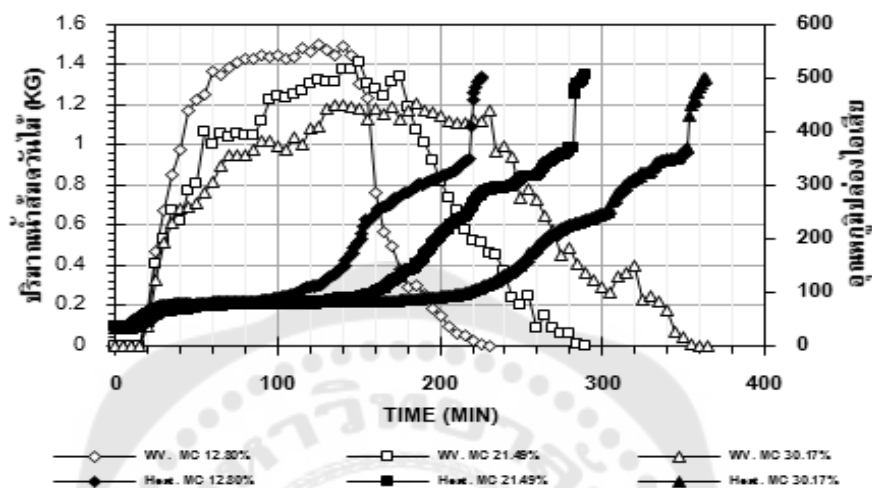
เดียวกัน มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันจะมีเพียงเวลาในการเผาถ่านจะใช้เวลาที่เพิ่มขึ้นตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น



ภาพประกอบ 37 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเวลาเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิต่อเวลาเผาถ่านพบว่าอุณหภูมิช่วงเวลาที่เริ่มต้น ภาพประกอบ 37 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49% และ 30.17% มีแนวโน้มของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยพบว่าหลังจาก 30 นาทีผ่านไป อุณหภูมิต่อเวลาเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ อยู่ที่ 80-100 °C ช่วงนี้อุณหภูมิต่อเวลาเผาถ่านจะคงที่ ซึ่งจะเป็นช่วงของกระบวนการไล่ความชื้นออกจากไม้เผาถ่าน จนถึงเวลา 120, 160 และ 230 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิจะเริ่มจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นช่วงไล่สารประกอบในไม้เผาถ่าน (Panwar et al., 2011; Wu et al., 2015; Y.C. Danarto 2010) ได้กล่าวไว้ว่าช่วง 200-350 °C จะเป็นช่วงการไล่สารประกอบเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนิน ที่มีอยู่ในไม้เผาถ่าน และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 340, 370 และ 380 °C ที่เวลา 220, 280 และ 350 นาที ตามลำดับ เป็นช่วงที่ไม่ได้กลายเป็นถ่านแล้วและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงอุณหภูมิ 502.7, 504.9 และ 500.4 °C ที่เวลา 226, 290 และ 364 นาที ตามลำดับ เป็นอุณหภูมิที่กำหนดของการสิ้นสุดกระบวนการเผาถ่าน จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิกระบวนการเผาถ่านบนเตาเผาถ่านมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะคงที่อยู่ที่ระยะเวลาหนึ่ง

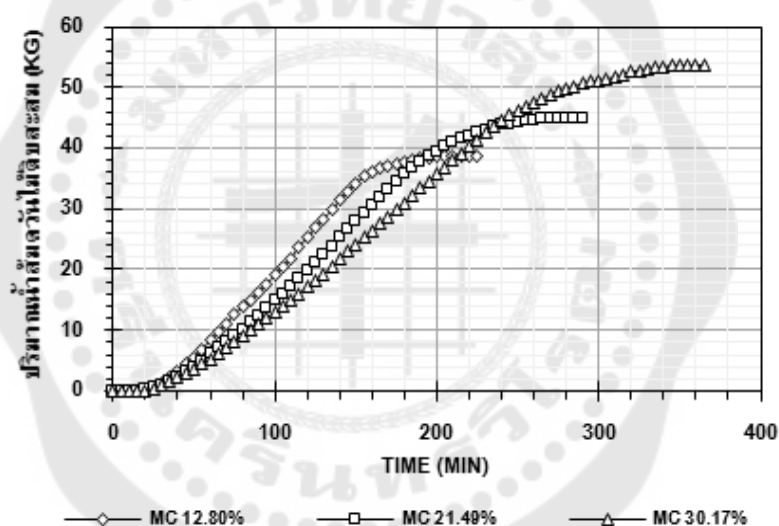
หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้น และจะมีระยะห่างของเวลาในการเผาถ่านประมาณ 60 นาที ต่อความชื้นไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น 10%



ภาพประกอบ 38 กราฟเปรียบเทียบเวลา อุณหภูมิบนเตา และผลผลิตน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านและผลผลิตน้ำส้มควันไม้ที่ควบคุมได้ทุกๆ 5 นาที ของการทดลอง จากภาพประกอบ 38 พบว่าที่เวลา 20 นาทีแรกของการทดลอง จะเริ่มเก็บผลผลิตของน้ำส้มควันไม้ได้ โดยอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านจะมีอุณหภูมิโดยประมาณ 50-60 °C โดยที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49%, และ 30.17% จะได้ผลผลิต 0.1, 0.18, และ 0.15 กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อแบ่งช่วงเวลาของอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านออกเป็น 5 ช่วง จะพบว่าอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านช่วงที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 50-100 °C เป็นช่วงที่ผลผลิตของน้ำส้มควันไม้สะสมมีแนวโน้มได้ผลผลิตสูงสุดโดยคิดเป็นร้อยละ 56.58, 60.08 และ 72.92 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับช่วงอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านในช่วงเวลาอื่น ช่วงที่สองที่อุณหภูมิบนเตา 101-200 °C สามารถเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ได้คิดเป็นร้อยละ 29.86, 17.98 และ 15.99 ตามลำดับ ช่วงที่สามที่อุณหภูมิบนเตาเผาถ่าน 201-300 °C สามารถเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ได้คิดเป็นร้อยละ 10.37, 11.92 และ 7.80 ตามลำดับ ช่วงที่สี่ที่อุณหภูมิบนเตาเผาถ่าน 301-400 °C สามารถเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ได้คิดเป็นร้อยละ 2.08, 2.00 และ 3.27 ตามลำดับ และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิบนเตาเผาถ่านมากกว่า 400 °C สามารถเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ได้คิดเป็นร้อยละ 0.10, 0.02

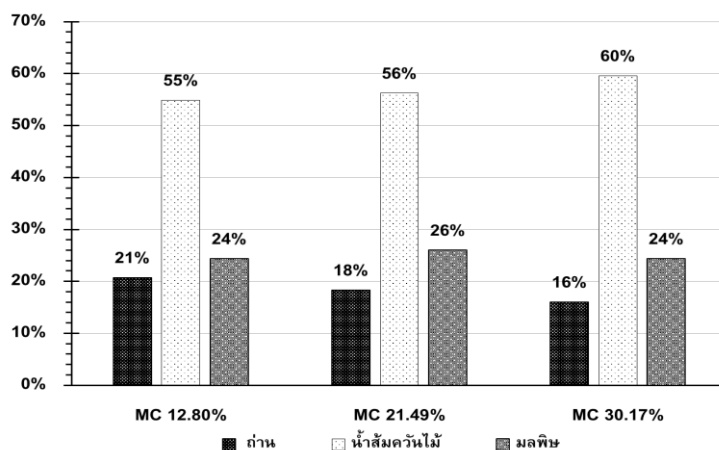
และ 0.02 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 100 °C แนวน้ำของ ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ก็จะลดลงอย่างต่อเนื่องและอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านก็จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Wu et al., 2015) ที่สามารถเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ได้สูงสุดในช่วงเวลาแรกและจะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และจากผลการทดลองพบว่าผลผลิตน้ำส้มควัน ไม้ที่สามารถกักเก็บได้สูงสุดในเวลาของกระบวนการเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ พบว่า ที่เวลา 125, 150 และ 185 นาที วัดอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านได้ 114.6, 90.6 และ 85.7 °C ผลผลิต น้ำส้มควันไม้ที่ได้ 1.5, 1.49 และ 1.25 กิโลกรัม ตามลำดับ และไม่สามารถเก็บผลผลิตได้ที่เวลา 225, 285 และ 360 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิบนเตาเผาถ่านจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึง 500 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการเผาถ่านที่กำหนดไว้



ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบสะสมที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบสะสม ภาพประกอบ 39 จากการทดลองที่ความชื้นไม้เผา ถ่าน 3 ระดับ จากผลการกักเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ทุกๆ 5 นาที พบว่าจะมีแนวโน้มของผลผลิต สอดคล้องกัน และพบว่าที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49% และ 30.17% สามารถเก็บ ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบได้ 38.85, 44.94 และ 53.59 กิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 54.89, 56.23 และ 59.59 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อความชื้นไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้น 10% จะสามารถเก็บ ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 7 กิโลกรัม คิดเป็น 18% โดยพบว่าเมื่อไม้เผาถ่านมี

ความชื้นเพิ่มขึ้นจะสามารถเก็บผลผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบได้เพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากความชื้นที่อยู่ในไม้เผาถ่านนั้นคือน้ำ นั้นหมายความว่าเมื่อความชื้นสูงปริมาณน้ำที่อยู่ในไม้เผาถ่านจะมีมากขึ้น ทำให้ผลผลิตน้ำส้มควันไม้เพิ่มขึ้น



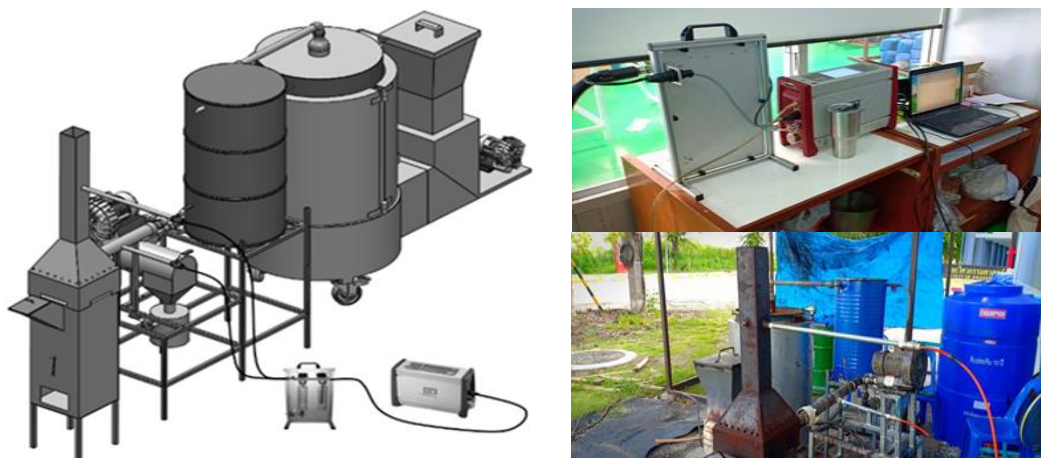
ภาพประกอบ 40 กราฟเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตรวมที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

จากผลการทดลองจะได้ผลผลิตแบ่งออกเป็น 3 ผลิตภัณฑ์คือ ถ่าน น้ำส้มควันไม้ (แก๊สที่ควบแน่นได้) และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ จากภาพประกอบ 40 จากการเผาถ่านไม้ไฟที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับคือ 12.80%, 21.49% และ 30.17% ผลผลิตถ่านที่ได้เมื่อเทียบกับน้ำหนักไม้ที่ใช้เผาถ่านคิดเป็นร้อยละ 21, 18 และ 16 ตามลำดับ (เทียบกับมาตรฐานเปียก) เมื่อนำผลผลิตถ่านมาเทียบกับน้ำหนักแห้งของไม้ผลัดถ่านจะได้ผลผลิตร้อยละ 23.79, 23.33 และ 22.95 ตามลำดับ จากการพิจารณาเมื่อนำความชื้นออกจากไม้เผาถ่านผลผลิตที่ได้จะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เพราะความชื้นที่อยู่ในไม้เมื่อถูกให้ความร้อนสูงจะเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สร้อนรวมกับสารประกอบอื่นๆด้วยที่มีอยู่ในไม้เผาถ่าน ซึ่งแก๊สร้อนที่ได้สามารถแยกออกมาเป็นแก๊สร้อนที่ควบแน่นได้และความชื้นไม่ได้ แก๊สร้อนที่ควบแน่นได้จะควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ดิบ ซึ่งพบว่าจากผลการทดลองเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ สามารถเก็บผลผลิตเป็นน้ำส้มควันไม้ดิบได้ร้อยละ 55, 56 และ 60 ตามลำดับ จากการควบแน่นแก๊สที่สามารถควบแน่นได้มีแนวโน้มเก็บผลผลิตได้มากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักไม้เผาถ่าน และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความชื้นไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น หลังจากกักเก็บแก๊สที่ควบแน่นได้แล้วนั้นแก๊สอีกชนิด คือแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้และแก๊สที่ควบแน่นได้ที่หลุดออกไป

บางส่วนจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล โดยพบว่าที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ จะมีผลผลิตร้อยละ 24, 26 และ 24 ตามลำดับ ซึ่งผลของปริมาณแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ นั้นแสดงได้ว่าประสิทธิภาพของชุดควบแน่นมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี

4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้และแก๊สไอเสียจากระบบการเผาถ่าน

แก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านประกอบด้วยแก๊สที่สามารถควบแน่นได้ (Condensable gases) และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-Condensable gases) เมื่อแก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านไหลผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) แก๊สที่สามารถควบแน่นได้ (Condensable gases) ถูกแยกออกเพื่อนำไปใช้เป็นน้ำส้มควันไม้ ในขณะที่แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-Condensable gases) ถูกดูดด้วยพัดลมดูดและจ่ายเข้าสู่เตาชีวมวล องค์ประกอบของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-Condensable gases) ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (MRU Vario Plus) ซึ่งแก๊สที่วิเคราะห์ได้สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gases) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) และกลุ่มแก๊สที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Non-Combustible gases) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไนโตรเจน (N_2) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุดและลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีการจ่ายแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-Condensable gases) เข้าสู่เตาชีวมวลเพื่อใช้ประโยชน์จากกลุ่มแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้โดยนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลเพื่อผลิตความร้อนและเปลี่ยนแก๊สที่เผาไหม้ได้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม วิธีการดังกล่าวจึงมีส่วนช่วยให้กระบวนการเผาถ่านเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นโดยเตาชีวมวลเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เป็นน้ำ (H_2O) และเปลี่ยนมีเทน (CH_4) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ต่อไป แก๊สไอเสีย (Exhaust gases) ที่ออกจากเตาชีวมวลถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (MRU Vario Plus) เช่นเดียวกัน



ภาพประกอบ 41 การวัดองค์ประกอบของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) และแก๊สไอเสีย (Exhaust Gases: EG)

4.2.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้

แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gases) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-Condensable gases) โดยมีสัดส่วนเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของชุดแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์ เชื้อเพลิงสำรองและไม้เผาถ่าน โดยสภาวะการทำงานของเตาเผาถ่านด้วยแหล่งความร้อนจากแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์สามารถแบ่งช่วงการทำงานแบ่งได้เป็น 5 ช่วง

- 1) ช่วงการจุดเตาแก๊สซีไฟเออร์จนกระทั่งผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถติดไฟได้
- 2) ช่วงการเผาแก๊สเชื้อเพลิงที่เบิร์นเนอร์เพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้ห้องเชื้อเพลิงสำรองและเตาเผาถ่านเพื่อไล่ความชื้น
- 3) ช่วงการเผาแก๊สเชื้อเพลิงที่เบิร์นเนอร์เพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้ห้องเชื้อเพลิงสำรองและเตาเผาถ่านเพื่อไล่ความชื้นและไล่สารระเหย
- 4) ช่วงการเผาแก๊สเชื้อเพลิงที่เบิร์นเนอร์เพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้ห้องเชื้อเพลิงสำรองและเตาเผาถ่านเพื่อไล่สารระเหย
- 5) ช่วงการเผาไหม้ถ่านที่แก๊สซีไฟเออร์และเผาไหม้ถ่านในห้องเชื้อเพลิงสำรองเพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้เตาเผาถ่านเพื่อไล่สารระเหยและทำถ่านให้บริสุทธิ์

ผลการวิเคราะห์แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเปลี่ยนแปลง 3 ระดับแสดงในภาพประกอบ 42

จากผลการทดลองในช่วงเริ่มต้นกระบวนการเผาถ่าน (0-35 นาที) ซึ่งช่วงที่แก๊สซีไฟเออร์เริ่มทำงานแต่เบิร์นเนอร์ยังไม่ทำงาน แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านมีสัดส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้เพิ่มขึ้นตามเวลาการทำงานที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรสูงประมาณร้อยละ 9.89-11.65 ไฮโดรเจน (H_2) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรสูงประมาณร้อยละ 8.12-9.50 และมีเทน (CH_4) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรสูงประมาณร้อยละ 2.55-3.30 โดยสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีอิทธิพลมาจากแก๊สผลิตจากแก๊สซีไฟเออร์เป็นหลัก

ในช่วงที่สองของกระบวนการเผาถ่าน ซึ่งแก๊สผลิตที่ออกจากแก๊สซีไฟเออร์ไหลมายังเบิร์นเนอร์และเกิดการเผาไหม้ได้แก๊สร้อนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตามคุณสมบัติของการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น ความร้อนที่ไหลไหลเข้าสู่ห้องไม้พินสำรองและเตาเผาถ่านเพื่อไล่ความชื้นเป็นหลักและเริ่มต้นไล่สารระเหยในห้องไม้พินสำรอง แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านมีสัดส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้ลดลงตามอิทธิพลจากการทำงานงานเบิร์นเนอร์และระดับความชื้นของไม้เผาถ่าน โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ประมาณร้อยละ 6.72-7.99 ไฮโดรเจน (H_2) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ประมาณร้อยละ 4.50-5.41 ในขณะที่มีเทน (CH_4) ยังคงมีสัดส่วนเชิงปริมาตรที่สูงขึ้นที่ประมาณร้อยละ 3.92-4.46 โดยสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีอิทธิพลมาจากแก๊สผลิตจากการเผาไหม้แก๊สผลิตที่เบิร์นเนอร์และการเริ่มต้นกระบวนการไล่สารระเหยในห้องไม้พินสำรอง

ในช่วงที่สามของกระบวนการเผาถ่าน ความร้อนที่ไหลไหลเข้าสู่ห้องไม้พินสำรองและเตาเผาถ่านเพื่อไล่สารระเหยในห้องไม้พินสำรองและไล่ความชื้นในเตาเผาถ่านพร้อมเริ่มต้นไล่สารระเหยในเตาเผาถ่าน แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านมีสัดส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้เพิ่มขึ้นตามอิทธิพลจากกระบวนการเผาถ่านและระดับความชื้นของไม้เผาถ่าน โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรสูงขึ้นไปจนมีค่าสูงสุดที่ประมาณร้อยละ 8.03-9.28 ไฮโดรเจน (H_2) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรสูงขึ้นไปจนมีค่าที่ประมาณร้อยละ 5.29-6.78 ในขณะที่มีเทน (CH_4) ยังคงมีสัดส่วนเชิงปริมาตรที่สูงขึ้นที่ประมาณร้อยละ 3.96-5.02 โดยสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีอิทธิพลมาจากกระบวนการไล่สารระเหยในห้องไม้พินสำรองและไล่ความชื้นในเตาเผาถ่านพร้อมเริ่มต้นไล่สารระเหยในเตาเผาถ่าน

ในช่วงที่สี่ของกระบวนการเผาถ่าน ในห้องไม้พินสำรองเริ่มต้นการเผาไหม้ของคาร์บอน (C) และเข้าสู่กระบวนการไล่สารระเหยในเตาเผาถ่าน แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านมีสัดส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้ลดลงตามอิทธิพลจากกระบวนการเผาถ่าน โดยแก๊ส

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ประมาณร้อยละ 6.68-8.50 ไฮโดรเจน (H_2) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงจนมีค่าที่ประมาณร้อยละ 5.71-8.36 ในขณะที่มีเทน (CH_4) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงที่ประมาณร้อยละ 2.32-4.36 โดยสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีอิทธิพลมาจากกระบวนการเผาไหม้คาร์บอน (C) ในห้องไม้พินสำรวจและไล่สารระเหยในเตาเผาถ่าน

ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการเผาถ่าน เข้าสู่กระบวนการเพื่อทำให้ถ่านบริสุทธิ์ แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านมีสัดส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้ตามอิทธิพลจากกระบวนการเผาถ่าน โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ประมาณร้อยละ 11.10-12.21 ไฮโดรเจน (H_2) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงจนมีค่าที่ประมาณร้อยละ 5.11-7.62 ในขณะที่มีเทน (CH_4) มีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงที่ประมาณร้อยละ 1.79-2.38 โดยสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีอิทธิพลมาจากกระบวนการทำให้ถ่านบริสุทธิ์

จากกระบวนการเผาถ่านแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gases) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-Condensable gases) ซึ่งมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิบนเตา ภาพประกอบ 37 ช่วงเริ่มต้นถึงช่วงที่สองของกระบวนการเผาถ่าน อุณหภูมิบนเตาค่อยๆไต่ระดับเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีอิทธิพลมาจากแก๊สผลผลิตจากเตา แก๊สซิไฟเออร์เป็นหลักและการเผาไหม้ของแก๊สผลผลิตพร้อมไล่ความชื้นในห้องไม้พินสำรวจ ในช่วงที่สามจะเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อนเพื่อไล่สารระเหยในห้องไม้พินสำรวจและไล่ความชื้นในเตาเผาถ่านพร้อมเริ่มต้นกระบวนการไล่สารระเหยในเตาเผาถ่านทำให้อุณหภูมิช่วงที่สามมีอุณหภูมิบนเตาอยู่ที่ 80-100 °C อุณหภูมิในช่วงนี้ค่อนข้างคงที่และระยะเวลาก่อนอุณหภูมิจะไต่ระดับขึ้นซึ่งระยะเวลาของความชื้นของไม้เผาที่สูงจะใช้ระยะเวลาที่มากกว่า ในช่วงที่สี่อุณหภูมิบนเตามีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากความชื้นในไม้เผาถ่านได้ถูกไล่จนหมดซึ่งจะเข้าสู่กระบวนการไล่สารระเหยในเตาเผาถ่าน ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการเผาถ่านเพื่อทำให้ถ่านบริสุทธิ์ในช่วงนี้สารระเหยจะถูกไล่จนมีสัดส่วนเชิงปริมาตรลดลงทำให้อุณหภูมิบนเตาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดกระบวนการเผาถ่านที่อุณหภูมิบนเตา 500 °C

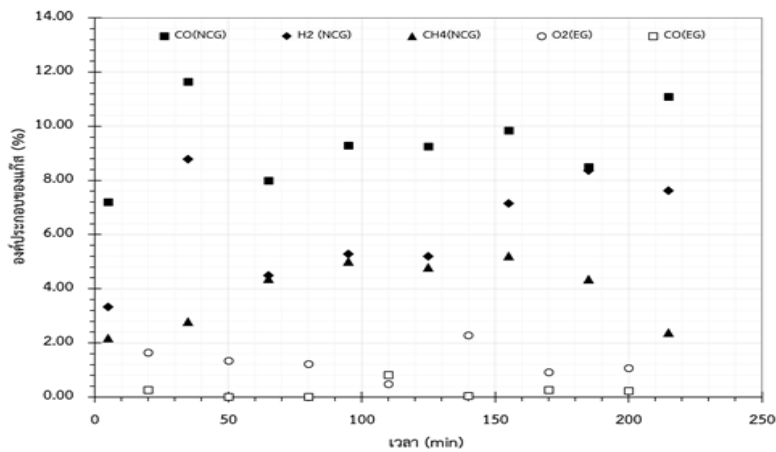
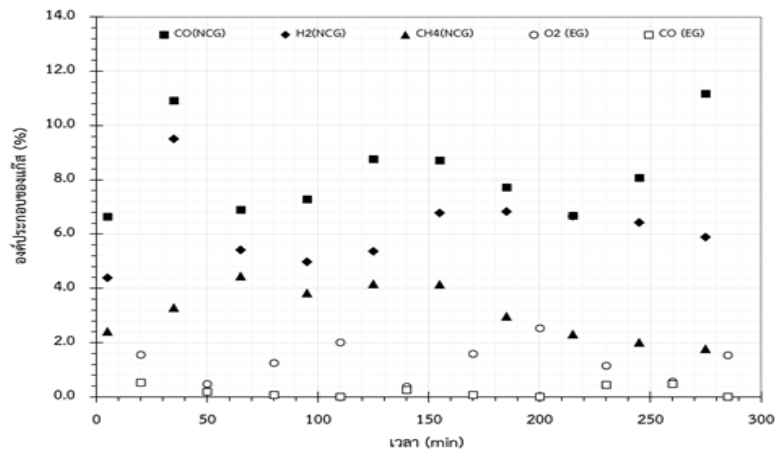
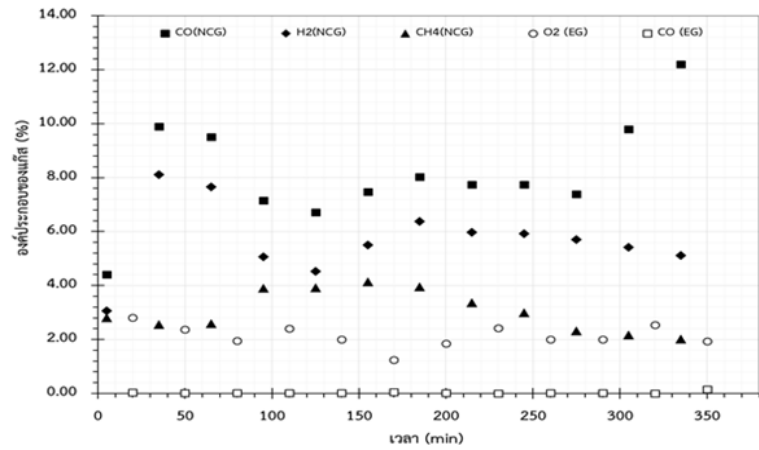
ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยแก๊สไอเสียที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) เทียบกับพลังงาน

ความชื้นไม้เผาถ่าน	Avg. Combustible Gas			พลังงาน (MJ/m ³)
	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	
30.17%	8.17	5.71	3.06	2.98
21.49%	8.29	6.22	3.14	3.09
12.80%	9.35	6.40	3.89	3.45

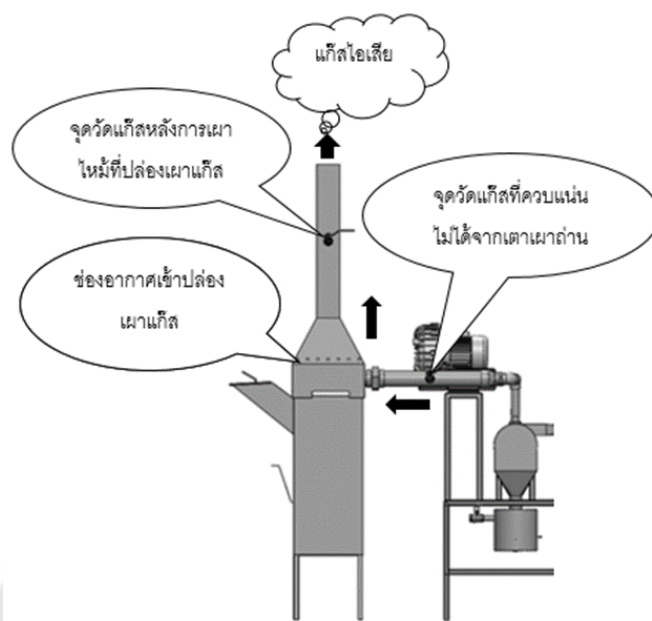
จากกระบวนการเผาถ่านแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable gases: NCG) ที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) จากตาราง 12 เมื่อพิจารณาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ พบว่าค่าเฉลี่ยของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีปริมาณสูงเป็นอันดับหนึ่งโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8.17-9.35% ไฮโดรเจน (H₂) มีปริมาณสูงเป็นอันดับที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.71-6.40% และมีเทน (CH₄) มีปริมาณเป็นอันดับที่ 3 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.06-3.89% เมื่อนำแก๊สที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) มาหาค่าพลังงานจะได้ค่าพลังงานอยู่ที่ 2.98-3.45 MJ/m³ โดยความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% ค่าเฉลี่ยของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) และพลังงาน มีปริมาณมากที่สุดและมีแนวโน้มลดลงตามความชื้นไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น

4.2.2 แก๊สไอเสีย (Exhaust gases: EG)

จากผลการวิเคราะห์กลุ่มแก๊สจากกระบวนการเผาถ่านแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable gases: NCG) ที่สามารถเผาไหม้ได้ ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลองเมื่อความชื้นเริ่มต้นของไม้ไผ่แตกต่างกัน 3 ระดับ แสดงในภาพประกอบ 42 และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองแสดงดังตาราง 12 การนำแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้เพื่อใช้ประโยชน์จากกลุ่มแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้โดยนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลเพื่อผลิตความร้อนและเปลี่ยนแก๊สที่เผาไหม้ได้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม วิธีการดังกล่าวจึงมีส่วนช่วยให้กระบวนการเผาถ่านเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น



ภาพประกอบ 42 แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) และแก๊สไอเสีย (Exhaust Gases: EG) จากความชื้นไม่เผาถ่าน 3 ระดับ



ภาพประกอบ 43 รูปปล่องเผาแก๊สที่ทำงานร่วมกับเตาชีวมวล

ตาราง 13 ค่าเฉลี่ยแก๊สไอเสียที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) หลังการเผาไหม้

ความชื้นไม้เผาถ่าน	Avg. Combustible Gas		
	O ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)
30.17%	2.13	0.03	20.28
21.49%	1.31	0.21	21.35
12.80%	1.29	0.24	21.44

จากผลการทดลองแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable gases: NCG) ซึ่งมีส่วนของแก๊สที่สามารถติดไฟได้ (Combustible gas) ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลเพื่อผลิตความร้อนและเปลี่ยนแก๊สที่เผาไหม้ได้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ (แก๊สไอเสีย) ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ถ้าแก๊สเผาไหม้ผสมกับออกซิเจน (O₂) ในอากาศจะได้แก๊สไอเสียประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ (H₂O) ออกซิเจน (O₂) และไนโตรเจน (N₂) อย่างไรก็ตามการเผาไหม้จริงมักเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งอาจเกิดจากออกซิเจน (O₂) ไม่เพียงพอหรือการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนไม่ดีเพียงพอเป็นผลให้ธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH₄) และแก๊สไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y)

จึงทำให้แก๊สไอเสียมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปรากฏอยู่ ดังนั้นผลของการวิเคราะห์แก๊สไอเสียจากเตาชีวมวลที่ทำงานร่วมกับปล่องเผาแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านเมื่อไม้เผาถ่านที่ความชื้น 30.17% พบว่าแก๊สไอเสียที่ปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลมีองค์ประกอบของออกซิเจน (O_2) ส่วนเกินมีค่าเฉลี่ย 2.13% แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าเฉลี่ย 0.03% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 20.28% เมื่อป้อนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านเมื่อไม้เผาถ่านที่ความชื้น 21.49% เข้าสู่เตาชีวมวลที่ทำงานร่วมกับปล่องเผาแก๊ส พบว่าแก๊สไอเสียที่ปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลมีองค์ประกอบของออกซิเจน (O_2) ส่วนเกินมีค่าเฉลี่ย 1.31% แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าเฉลี่ย 0.21% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 21.35% และเมื่อป้อนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านเมื่อไม้เผาถ่านที่ความชื้น 12.80% เข้าสู่เตาชีวมวลที่ทำงานร่วมกับปล่องเผาแก๊ส พบว่าแก๊สไอเสียที่ปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลมีองค์ประกอบของออกซิเจน (O_2) ส่วนเกินมีค่าเฉลี่ย 1.29% แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าเฉลี่ย 0.24% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 21.44% เมื่อพิจารณาแก๊สไอเสียที่ออกจากปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลจากตาราง 13 จะพบว่าเมื่อป้อนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านเมื่อไม้เผาถ่านที่ความชื้น 30.17% มีแนวโน้มการเผาไหม้ที่ปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลมีค่าค่อนข้างสมบูรณ์โดยพบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากไอเสียมีปริมาณต่ำและยังพบว่าออกซิเจนส่วนเกินสูง เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สไอเสียที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% พบว่ายังมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากไอเสียที่ปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลมากกว่าและออกซิเจนส่วนเกินน้อยกว่า และพบว่าเมื่อป้อนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ออกจากเตาเผาถ่าน เมื่อไม้เผาถ่านที่ความชื้น 12.80% มีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากไอเสียที่ปล่องเผาแก๊สเหนือเตาชีวมวลมากกว่าและออกซิเจนส่วนเกินน้อยกว่า ไอเสียที่ได้จากความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% และ 21.49% เมื่อพิจารณาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ แนวโน้มจากประสิทธิภาพของชุดปล่องเผาแก๊สพบว่าความสมบูรณ์ในการเผาไหม้แก๊สจะดีเมื่อความชื้นไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากตาราง 12 พบว่าปริมาณของแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่าน 12.80% มีค่าองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เฉลี่ยสูงที่สุด ซึ่งอาจทำให้ปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่ปล่องเผาแก๊สจ่ายเข้าผสมเพื่อเผาไหม้กับแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (ส่วนแก๊สที่เผาไหม้ได้) มีไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่าน 30.17% จะมีค่าองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เฉลี่ยน้อยกว่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้สามารถเพิ่มช่องอากาศของชุดปล่องเผาแก๊สสภาพประกอบ 43 เพื่อให้ออกซิเจน (O_2) ที่ป้อนให้กับแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (ส่วนแก๊สที่เผาไหม้ได้) จากเตาเผาถ่านที่ใช้ไม้เผาถ่านที่มีความชื้นต่ำซึ่งให้ได้

สัดส่วนเชิงปริมาตรของแก๊สที่เผาไหม้ได้สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการทดลองวัดไอเสียที่ปากปล่องเหนือเตาชีวมวลที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ พบว่าบางช่วงเวลาจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ที่กำหนดไว้การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไม่เกิน 690 ppm

4.3 การวิเคราะห์ผลผลิตที่ได้จากการเผาถ่าน

4.3.1 การวิเคราะห์สมบัติความต้านทานไฟฟ้าของถ่าน



ภาพประกอบ 44 แยกผลผลิตถ่านส่วนบนของเตาและส่วนล่างของเตา

ก่อนการวิเคราะห์สมบัติความต้านทานไฟฟ้าของถ่านต้องแยกผลผลิตถ่านจากเตาเผาถ่านออกเป็น 2 ส่วน เท่าๆกันโดยประมาณ ภาพประกอบ 44 โดยแบ่งผลผลิตถ่านส่วนบนของเตาและถ่านส่วนล่างของเตา ซึ่งจากการแยกผลผลิตถ่านสามารถพิจารณาลักษณะของถ่านเบื้องต้นได้ พบว่าส่วนล่างของเตาผลผลิตถ่านเกิดการไหม้เล็กน้อยทำให้ถ่านมีสภาพแฉะแฉ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตถ่านส่วนบนของเตาพบว่าถ่านจะมีรูปร่างและลักษณะใกล้เคียงกับไม้ก่อนเผาถ่าน แต่เมื่อพิจารณาสีของถ่านส่วนบนของเตาและส่วนล่างของเตาเผาถ่านจะมีสีที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการพิจารณาลักษณะของถ่านและสีของถ่าน จะพบว่าเตาเผาถ่านมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนในกระบวนการเผาถ่านได้ดีทั่วถึงทั้งเตา



ภาพประกอบ 45 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของถ่าน

การวิเคราะห์คุณภาพของถ่านเบื้องต้นนั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของถ่านเป็นวิธีที่สามารถทำได้โดยทั่วไป โดยนำผลผลิตถ่านที่ได้จากการกระบวนการเผาถ่าน ภาพประกอบ 44 มาทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยใช้โอห์มมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัด ภาพประกอบ 45 ซึ่งค่าที่ได้จะออกมาในหน่วยโอห์ม (Ω) ถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 1,000 โอห์ม จะถูกจำแนกออกมาเป็นถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ส่วนถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 1,000 โอห์ม จะถูกจำแนกออกมาเป็นถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้ากลาง ส่วนถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม ซึ่งจะเป็นถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ การทดสอบนี้จะเป็นการวัดคุณภาพของถ่านโดยถ่านที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำและมีคุณภาพที่ดีกว่าถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

ตาราง 14 ปริมาณผลผลิตถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กลาง และสูง

ความต้านทานไฟฟ้า	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	12.80%	21.49%	30.17%
ส่วนบนของเตา			
น้อยกว่า 20 Ω (kg)	3.10	4.25	5.40
น้อยกว่า 1,000 Ω (kg)	2.07	1.56	1.07
มากกว่า 1,000 Ω (kg)	1.83	1.40	0.93

ตาราง 14 (ต่อ) ปริมาณผลผลิตถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กลาง และสูง

ความต้านทานไฟฟ้า	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	12.80%	21.49%	30.17%
ส่วนล่างของเตา			
น้อยกว่า 20 Ω (kg)	2.13	4.52	5.01
น้อยกว่า 1,000 Ω (kg)	1.55	1.27	0.80
มากกว่า 1,000 Ω (kg)	4.00	1.64	1.45
รวมผลผลิตถ่าน	14.68	14.64	1.41

จากผลผลิตถ่านที่ได้พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม จะพบมากที่สุดที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% โดยมีปริมาณถ่าน 10.41 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 72.24 และที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% และ 21.49% พบว่ามีปริมาณถ่าน 5.23 และ 8.77 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 35.63 และ 59.90 ตามลำดับ ที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 1,000 โอห์ม จะพบมากที่สุดที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% โดยมีปริมาณถ่าน 3.62 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 24.66 และที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% และ 30.17% พบว่ามีปริมาณถ่าน 2.83 และ 1.87 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 19.33 และ 12.97 ตามลำดับ ที่ค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 1,000 โอห์ม จะพบมากที่สุดที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% โดยมีปริมาณถ่าน 5.83 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 39.71 และที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% และ 30.17% พบว่ามีปริมาณถ่าน 3.04 และ 2.13 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 20.77 และ 14.82 ตามลำดับ จากตาราง 14 เมื่อพิจารณาปริมาณของสัดส่วนถ่านระหว่างด้านบนของเตาและส่วนล่างของเตามีสัดส่วนของถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม ของแต่ละความชื้นไม้เผาถ่านในปริมาณที่ใกล้เคียงกันแสดงให้ว่าเตาเผาถ่านมีประสิทธิภาพดี ส่วนคุณภาพถ่านสรุปได้ว่าเมื่อความชื้นไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มผลผลิตถ่านจะเป็นถ่านที่มีคุณภาพสูงและคุณภาพจะลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่ลดลง จากการส่งตัวอย่างของถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม และความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 1,000 โอห์ม เพื่อวิเคราะห์ค่าไอโอดีนตามเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านดูดกลิ่น (มผช.180/2560) พบว่าถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม จะมีค่าไอโอดีน 250 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 1,000 โอห์ม จะมีค่าไอโอดีนน้อยกว่า 200 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 15 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านตามความต้านทานไฟฟ้า (Dry basis)

องค์ประกอบของถ่าน	ความต้านทานไฟฟ้า	
	<20 Ω	>1,000 Ω
Fixed carbon (%)	89.22	82.02
Volatile matter (%)	3.69	12.33
Ash (%)	7.09	5.67

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านตามความต้านทานไฟฟ้า จากตาราง 15 พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม มีคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) อยู่ที่ 89.22% ซึ่งจะลดลงตามค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าสารระเหย (Volatile matter) ที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 โอห์ม มีค่า 3.69% ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของถ่านตามค่าความต้านทานไฟฟ้าจะพบว่า ถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำจะมีปริมาณของคาร์บอนคงตัวสูงและมีสารระเหยต่ำซึ่งจะได้ถ่านที่มีบริสุทธิ์กว่า ถ่านที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

4.3.2 ผลวิเคราะห์คุณภาพพลังงาน

ตาราง 16 คุณสมบัติของถ่านที่ได้จากกระบวนการผลิต

คุณสมบัติของถ่าน	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	12.80%	21.49%	30.17%
น้ำหนักของไม้ผลิตถ่าน (kg)	70.77	79.92	89.92
น้ำหนักแห้งของไม้ผลิตถ่าน (kg)	61.71	62.75	62.79
ค่าความร้อนของไม้แห้ง (MJ/kg)	17.25	17.25	17.25
พลังงานความร้อนของวัตถุดิบ (MJ)	1,064.65	1,082.59	1,083.28
น้ำหนักผลิตภัณฑ์ถ่าน (kg)	14.68	14.64	14.41
ค่าความร้อนของถ่าน (MJ/kg)	31.62	31.86	31.93
พลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ (MJ)	464.03	466.45	460.05
ร้อยละของผลผลิตถ่าน (%)	23.79	23.33	22.95

ตาราง 16 (ต่อ) คุณสมบัติของถ่านที่ได้จากกระบวนการผลิต

คุณสมบัติของถ่าน	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	12.80%	21.49%	30.17%
ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%)	43.58	43.09	42.47

จากการทดลองผลผลิตที่ได้จากการเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ จากตาราง 16 จะพบว่าน้ำหนักไม้เผาถ่านเมื่อนำความชื้นออกปริมาณน้ำหนักแห้งของไม้เผาถ่านจะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันโดยประมาณ 62 กิโลกรัม เมื่อนำปริมาณไม้เผาถ่านเทียบกับการทดลองของ (Michael et al., 2011; Tippayawong et al., 2010; ลุตฟี & พิธิษฐ, 2018) ที่มีขนาดของเตาเผาถ่านใกล้เคียงกันจะพบว่าเตาเผาถ่านในการทดลองครั้งนี้จะสามารถบรรจุไม้เผาถ่านได้ในปริมาณที่มากกว่าทำให้การเผาถ่านต่อครั้งจะได้ผลผลิตถ่านที่มากกว่า เมื่อพิจารณาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% จะได้ผลผลิตที่สูงที่สุดคือ 14.68 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 23.79 เทียบกับน้ำหนักแห้งของไม้ผลิตถ่าน ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% และ 30.17% จะได้ผลผลิตถ่าน 14.64 และ 14.41 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 23.33 และ 22.95 ตามลำดับ เทียบกับน้ำหนักแห้งของไม้เผาถ่านสรุปได้ว่าความชื้นไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้นแนวโน้มผลผลิตถ่านจะมีปริมาณที่ลดลงเล็กน้อย ซึ่งจะสอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่านสูงจะใช้เวลาที่มากกว่าไม้เผาถ่านที่มีความชื้นที่ต่ำกว่า จะส่งผลต่อการเผาไหม้ผลผลิตถ่านในส่วนล่างของเตา จากการวิเคราะห์คุณภาพและการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของถ่าน ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความชื้น, คาร์บอนคงตัว, สารระเหย และเถ้า พบว่าค่าความร้อนของไม้แห้งมีค่า 17.25 MJ/kg. หลังจากเปลี่ยนไม้ให้กลายเป็นถ่านพบว่าค่าความร้อนของถ่านเพิ่มสูงขึ้นโดยที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49% และ 30.17% มีค่า 31.62, 31.86 และ 31.93 MJ/kg. ตามลำดับ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 43.58%, 43.09% และ 42.47% ตามลำดับ จากคุณสมบัติของถ่านพบว่าเมื่อไม้เผาถ่านมีความชื้นที่สูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของพลังงานส่งผลให้มีค่าลดน้อยลงตามความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้น

ตาราง 17 องค์ประกอบของถ่านจากการทดลอง

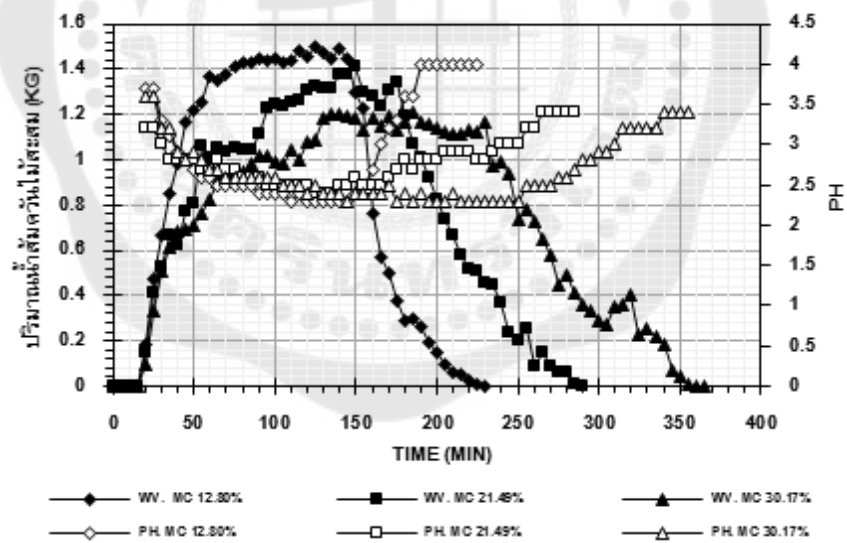
ความชื้นไม้ เผาถ่าน (%)	น้ำหนักผลิต ภัณฑ์ถ่าน (kg)	Moisture content (%)	Fixed carbon (%)	Ash (%)	Volatile matter (%)
12.80	14.68	4.04	83.05	6.08	6.84
21.49	14.64	3.61	84.70	6.41	5.30
30.17	14.41	3.43	85.23	6.55	4.80

ผลการวิเคราะห์ จากตาราง 17 พบว่าองค์ประกอบของถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% จะมีปริมาณ Fixed carbon และ Ash ที่สูงที่สุด โดย Fixed carbon สูงถึง 85.23% ทำให้ผลิตผลิตภัณฑ์ถ่านที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% ซึ่งจะเป็นถ่านที่ (Griessacher et al., 2012) ระบุไว้ว่าถ่านที่มีคุณภาพสูงจะต้องมี Fixed carbon ไม่น้อยกว่า 85% และยิ่งพบว่า Fixed carbon และ Ash จะลดลงตามความชื้นไม้เผาถ่านที่ลดลง 21.49% และ 12.80% ตามลำดับ และยังพบว่าที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% จะมีปริมาณ Moisture content และ Volatile matter น้อยกว่าไม้เผาถ่านที่มีความชื้น 21.49% และ 12.80% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของถ่านจะพบว่าเมื่อความชื้นไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้นแนวโน้มของ Fixed carbon และ Ash จะเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นไม้เผาถ่านลดลง Moisture content และ Volatile matter มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของถ่านที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ถ่านชุมชน ถ่านหุงต้ม (มผช.657/2547) แต่ด้วย Ash ที่มีแนวโน้มที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นทำให้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านบั้งย่าง (มผช.658/2547) อันเนื่องมาจากในตัวไม้ไผ่เลี้ยงโดยปกติจะมีองค์ประกอบของเถ้าสูงถึงร้อยละ 1.96 เมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ใช้ไม้เผาถ่านที่เป็นไม้ไผ่เช่นเดียวกันจะพบว่าผลทดลองของ (Tippayawong et al., 2010) ผลผลิตถ่านจะมีเถ้า (Ash) 7.0-9.8% จากองค์ประกอบของไม้ไผ่ก่อนเผาถ่านมีเถ้า 5.5 % ซึ่งพบว่าไม้เผาไม้ไผ่หลังจากผ่านกระบวนการเผาถ่านจะส่งผลให้องค์ประกอบของเถ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น

4.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างและความถ่วงจำเพาะ



ภาพประกอบ 46 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้



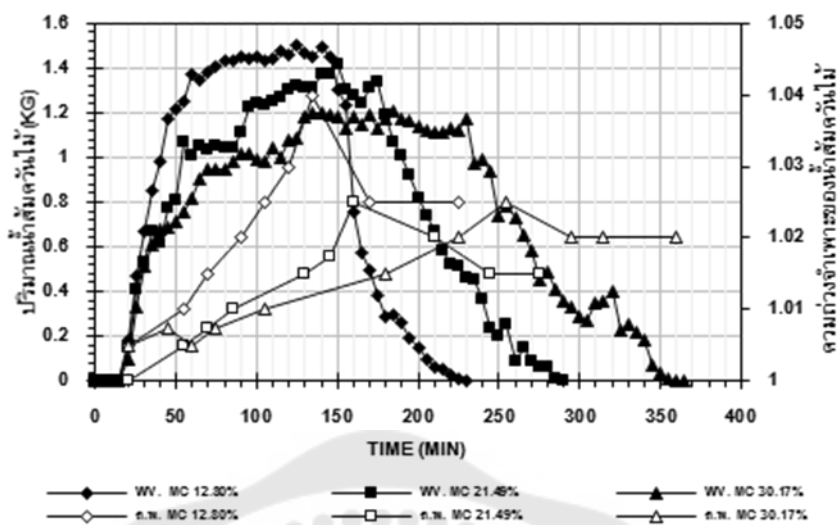
ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบ และความเป็นกรด-ด่าง ที่ความเข้มข้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

จากผลการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้ที่ถูกบ่มไว้ในที่มีด เป็นเวลา 3 เดือน ภาพประกอบ 46 ใช้เครื่องทดลองยี่ห้อ HANNA รุ่น HI98103 จากผลการวัดใน

ช่วงแรกของผลผลิตน้ำส้มควันไม้ ภาพประกอบ 47 จะมีค่าความเป็นกรดน้อยและจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิเตาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Wu et al., 2015) ที่พบสารประกอบที่เป็นกรดมากที่สุดที่อุณหภูมิของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 250 °C และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าความเป็นกรด-ด่างในช่วงแรกนั้นจะเป็นส่วนประกอบของน้ำเป็นหลักและมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณสัดส่วนของน้ำจะลดลงและสารประกอบอื่นที่มีความเป็นกรดจะเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันของความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ ซึ่งจากผลผลิตน้ำส้มควันไม้รวมจะมีความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้ ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% มีความเป็นกรด-ด่าง 2.59 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% มีความเป็นกรด-ด่าง 2.68 และที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% มีความเป็นกรด-ด่าง 2.90 เมื่อพิจารณาความเป็นกรด-ด่าง ที่วัดได้จากความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานชุมชน น้ำส้มควันไม้ (มผช.659/2553) ที่กำหนดไว้ให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วงระหว่าง 2.0-3.0 ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าค่าความเป็นกรด มีแนวโน้มลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแนวโน้มปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไม้เผาถ่านที่มีปริมาณสูงทำให้น้ำส้มควันไม้ส่วนประกอบหลักจะเป็นน้ำซึ่งทำให้มีความเป็นกรดน้อยลง

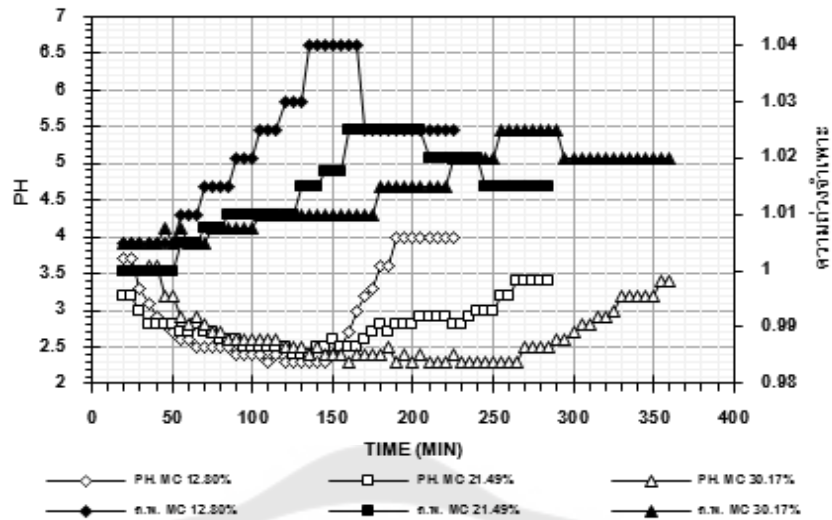


ภาพประกอบ 48 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้



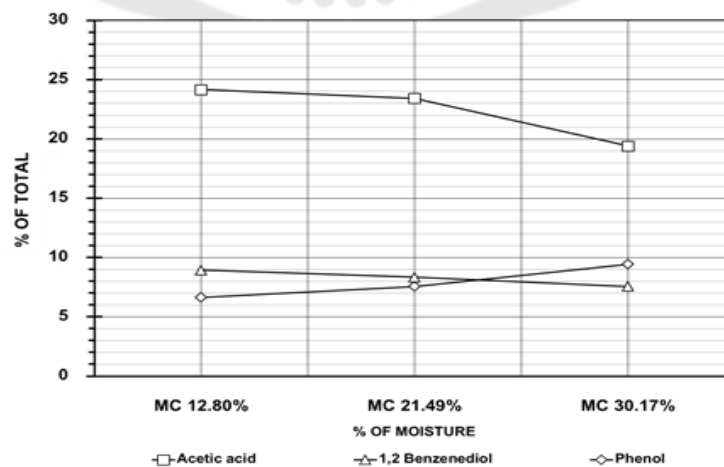
ภาพประกอบ 49 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ดูดซับโดยไม้ดิบ และความถ่วงจำเพาะ ที่ความชื้นไม้ เผ่าถ่าน 3 ระดับ

จากผลการทดลองพบว่าน้ำที่ดูดซับโดยไม้ที่ถูกบ่มไว้ในที่มืดเป็นเวลา 3 เดือน ภาพประกอบ 48 วัดด้วยเครื่อง Hydrometer จากผลการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่ดูดซับโดยไม้ ภาพประกอบ 49 ในช่วงแรกจะมีแนวโน้มส่วนผสมหลักเป็นน้ำและจะมีสารประกอบอื่นๆปะปนมา จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำคือ 1.000 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในกระบวนการเผาถ่านเพิ่มขึ้นและจะมีแนวโน้มลดลงในช่วงท้ายของกระบวนการเผาถ่าน โดยผลผลิตรวมน้ำที่ดูดซับโดยไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.022 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.015 และที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.013 จากผลการวัดค่าความถ่วงจำเพาะพบว่าความถ่วงจำเพาะจากผลผลิตรวมของน้ำที่ดูดซับโดยไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำที่ดูดซับโดยไม้ (มผช.659/2553) ซึ่งกำหนดให้ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่ดูดซับโดยไม้ ต้องอยู่ระหว่าง 1.000-1.025 เมื่อพิจารณาจากค่าความถ่วงจำเพาะ จะพบว่าเมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มสูงขึ้น



ภาพประกอบ 50 กราฟเปรียบเทียบความเป็นกรด-ด่าง และความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้

เมื่อพิจารณาความเป็นกรด-ด่างและความถ่วงจำเพาะของผลผลิตน้ำส้มควันไม้ จากภาพประกอบ 50 ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ พบว่าเมื่อน้ำส้มควันไม้มีความเป็นกรดสูงค่าความถ่วงจำเพาะมีแนวโน้มสูงสอดคล้องกัน เมื่อความเป็นกรดลดลงค่าความถ่วงจำเพาะก็มีแนวโน้มลดลง ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์นี้บอกได้ว่าในส่วนประกอบของน้ำส้มควันไม้ช่วงแรกๆ จะมีส่วนประกอบของน้ำเป็นหลักและมีสารประกอบอื่นๆปะปนอยู่ และหลังจากเวลาผ่านไปจะมีสารประกอบอื่นๆที่มีความเป็นกรดสูงทำให้แนวโน้มของความเป็นกรดและความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

จากการวิเคราะห์หาสารประกอบที่อยู่ในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากผลผลิต ภาพประกอบ 51 พบว่าสารประกอบหลักจะมี Acetic acid, Phenol และ 1,2 Benzenediol ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Wu et al., 2015) ที่พบว่าสารประกอบหลักในน้ำส้มควันไม้จะมี Acetic acid, Phenol และ Ketones จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49% และ 30.17% จะมีปริมาณ Acetic acid อยู่ที่ 24.162%, 23.431% และ 19.411% ตามลำดับ แนวโน้มของกรดน้ำส้มจะลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับการวัดค่าความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้ ส่วนสารประกอบ 1,2 Benzenediol ที่พบมีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ 8.944%, 8.347% และ 7.549% ตามลำดับ และพบสารประกอบ Phenol ที่มีอยู่ในน้ำส้มควันไม้ 6.652%, 7.569% และ 9.447% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสารประกอบสามารถสรุปได้ว่า Acetic acid และ 1,2 Benzenediol จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้น แต่สารประกอบ Phenol จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้น

ตาราง 18 ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ

ความชื้นไม้เผาถ่าน	ปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบ (kg)	ค่าความเป็นกรด	ความถ่วงจำเพาะ
12.80%	38.85	2.59	1.022
21.49%	44.94	2.68	1.015
30.17%	53.59	2.90	1.013

จากผลการทดลองหาค่าความเป็นกรด-ด่างและความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ จากตาราง 18 พบว่าที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%, 21.49% และ 30.17% จะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.59, 2.68 และ 2.90 ตามลำดับ โดยความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น จะพบว่าค่าความเป็นกรดจะมีแนวโน้มลดลง และค่าความถ่วงจำเพาะมีค่า 1.022, 1.015 และ 1.013 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างและความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำส้มควันไม้ มพช.659/2553 แต่พบว่าถ้าความชื้นไม้เผาถ่านสูงกว่า 30% มีแนวโน้มที่จะไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

4.4 ผลวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

4.4.1 ต้นทุนที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่าน ชุตควบแน่น และเตาเผาชีวมวล

ตาราง 19 ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่าน ชุตควบแน่น และเตาเผาชีวมวล

อุปกรณ์	จำนวน	ราคา
เหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร	2 แผ่น	2,046 บาท
เหล็กแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร	1 แผ่น	1,562 บาท
Stainless steel 1 มิลลิเมตร	1 แผ่น	1,900 บาท
เหล็กกล่อง 1.25 นิ้ว	3 เส้น	720 บาท
ล้อเลื่อนขนาด 5 นิ้ว	3 ลูก	171 บาท
ฉนวนขนาด 5 มิลลิเมตร	1 กล่อง	1,600 บาท
ผ้าห่มฉนวน	1 ผืน	1,500 บาท
ถังขนาด 100 ลิตร	1 ถัง	250 บาท
ถังขนาด 200 ลิตร	1 ถัง	350 บาท
สแตนเลสทำคอยล์พร้อมม้วน	3 เส้น	2,490 บาท
Blower NVT-085	1 ตัว	6,950 บาท
Blower NVT-020	1 ตัว	5,900 บาท
Ball valve 1.5 นิ้ว	1 ตัว	160 บาท
Ball valve 1 นิ้ว	1 ตัว	69 บาท
Ball valve 0.5 นิ้ว	1 ตัว	35 บาท
Gate valve 0.5 นิ้ว	3 ตัว	435 บาท
ข้อลด 3x2 นิ้ว	1 ตัว	132 บาท
ข้อลด 2x1 นิ้ว	1 ตัว	45 บาท
ข้อลด 1x0.5 นิ้ว	1 ตัว	95 บาท
ข้อลด 1.5x1.25 นิ้ว	2 ตัว	64 บาท
ข้อลด 2x1.25 นิ้ว	1 ตัว	106 บาท
ข้อต่อตรง 1.25 นิ้ว	2 ตัว	94 บาท
ข้อต่อตรง 1 นิ้ว	2 ตัว	54 บาท

ตาราง 19 (ต่อ) ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตาเผาถ่าน ชุตควบแน่น และเตาเผาชีวมวล

อุปกรณ์	จำนวน	ราคา
ข้อต่อตรงเกลียวนอก 0.5 นิ้ว	1 ตัว	17 บาท
ข้อต่อตรงเกลียวใน 0.5 นิ้ว	1 ตัว	259 บาท
ท่อเกลียว 1 นิ้ว 100 มิลลิเมตร	1 ท่อน	70 บาท
ท่อเกลียว 0.5 นิ้ว 100 มิลลิเมตร	1 ท่อน	43 บาท
ข้องอ 1.25 นิ้ว 90 องศา	2 อัน	76 บาท
ข้องอ 1 นิ้ว 90 องศา	2 อัน	54 บาท
ข้องอ 0.5 นิ้ว 90 องศา	2 อัน	38 บาท
ยูเนียน 1 นิ้ว	5 อัน	535 บาท
หางไหล 1.25 นิ้ว	1 อัน	24 บาท
หางไหล 0.5 นิ้ว	6 อัน	270 บาท
หางไหล 3 นิ้ว	1 อัน	64 บาท
ฝาครอบเกลียว 3 นิ้ว	1 อัน	112 บาท
รวมทั้งสิ้น		28,490 บาท

4.4.2 ต้นทุนที่ใช้ในการเผาของแต่ละความชื้นแต่ละครั้ง

4.4.2.1. ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%

$$\text{พัดลมเป่า} \quad 0.20kW \times 1 \times 6hr5min = 1.21 \frac{\text{unit}}{6hr4min}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าหน่วยละ} \quad 4.4217 \times 1.22 = 5.35 \text{ บาท}$$

$$\text{พัดลมดูด} \quad 0.85kW \times 1 \times 6hr4min = 5.16 \frac{\text{unit}}{6hr4min}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าหน่วยละ} \quad 4.4217 \times 15.16 = 22.80 \text{ บาท}$$

$$\text{น้ำที่ใช้ประมาณ} \quad 1.46m^3 \approx 15.16 \text{ บาท}$$

$$\text{รวมเป็นเงินทั้งสิ้น} \quad 5.35 + 22.80 + 15.16 = 43.31 \text{ บาท}$$

4.4.2.2. ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%

$$\text{พัดลมเป่า} \quad 0.20kW \times 1 \times 4hr50min = 0.97 \frac{\text{unit}}{4hr50min}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าหน่วยละ} \quad 4.4217 \times 0.97 = 4.27 \text{ บาท}$$

$$\text{พัดลมดูด} \quad 0.85kW \times 1 \times 4hr50min = 3.87 \frac{\text{unit}}{4hr50min}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าหน่วยละ} \quad 4.4217 \times 3.87 = 17.10 \text{ บาท}$$

$$\text{น้ำที่ใช้ประมาณ} \quad 1.16m^3 \approx 12.04 \text{ บาท}$$

$$\text{รวมเป็นเงินทั้งสิ้น} \quad 4.27 + 17.10 + 12.04 = 33.41 \text{ บาท}$$

4.4.2.3. ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%

$$\text{พัดลมเป่า} \quad 0.20kW \times 1 \times 3hr46min = 0.75 \frac{\text{unit}}{3hr46min}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าหน่วยละ} \quad 4.4217 \times 0.75 = 3.32 \text{ บาท}$$

$$\text{พัดลมดูด} \quad 0.85kW \times 1 \times 3hr46min = 3.20 \frac{\text{unit}}{3hr46min}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้าหน่วยละ} \quad 4.4217 \times 3.20 = 14.16 \text{ บาท}$$

$$\text{น้ำที่ใช้ประมาณ} \quad 0.90m^3 \approx 9.34 \text{ บาท}$$

$$\text{รวมเป็นเงินทั้งสิ้น} \quad 3.32 + 14.16 + 9.34 = 26.82 \text{ บาท}$$

4.4.3 ปริมาณน้ำส้มควันไม้และถ่านที่ได้จากการเผาเทียบกับค่าใช้จ่ายของการเผาแต่ละ

ครั้ง

4.4.3.1. กรณีความชื้น 30.17%

ได้ถ่าน 14.41 kg. ซึ่งราคาขายประมาณ กิโลกรัมละ 20 บาท เท่ากับ

$$14.41 \times 20 = 288 \text{ บาท}$$

ได้น้ำส้มควันไม้ 53.59 kg. ซึ่งราคาขายประมาณ กิโลกรัมละ 60 บาท เท่ากับ

$$53.59 \times 60 = 3,215 \text{ บาท}$$

ค่าแรงงาน เท่ากับ 300 บาท/ครั้ง

กำไรสุทธิ

$$\text{รายได้} - \text{รายจ่าย} \quad (288 + 3,215) - (43.31 + 300) = 3,160 \text{ บาท}$$

4.4.3.2. กรณีความชื้นร้อยละ 20.73

ได้ถ่าน 14.64 kg. ซึ่งราคาขายประมาณ กิโลกรัมละ 20 บาท เท่ากับ

$$14.64 \times 20 = 292 \text{ บาท}$$

ได้น้ำส้มควันไม้ 44.94 kg. ซึ่งราคาขายประมาณ กิโลกรัมละ 60 บาท เท่ากับ

$$44.94 \times 60 = 2,696 \text{ บาท}$$

ค่าแรงงาน เท่ากับ 250 บาท/ครั้ง

กำไรสุทธิ

$$\text{รายได้} - \text{รายจ่าย} \quad (292 + 2,696) - (33.41 + 150) = 2,805 \text{ บาท}$$

4.4.3.3.กรณีความชื้น 12.80%

ได้ถ่าน 14.68 kg. ซึ่งราคาขายประมาณ กิโลกรัมละ 20 บาท เท่ากับ

$$14.68 \times 20 = 293 \text{ บาท}$$

ได้น้ำส้มควันไม้ 38.58 kg. ซึ่งราคาขายประมาณ กิโลกรัมละ 60 บาท เท่ากับ

$$38.58 \times 60 = 2,314 \text{ บาท}$$

ค่าแรงงาน เท่ากับ 200 บาท/ครั้ง

กำไรสุทธิ

$$\text{รายได้} - \text{รายจ่าย} \quad (293 + 2,314) - (26.82 + 120) = 2,460 \text{ บาท}$$

4.4.4 วิเคราะห์ความคุ้มค่า

ตาราง 20 เปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มค่า

ความชื้นไม้เผา ถ่าน (%)	รายจ่าย (บาท) (ครั้ง)	รายรับ (บาท) (ครั้ง)	จำนวนครั้ง ในการเผา เพื่อคืนทุน (ครั้ง)	เวลาในการ เผาเพื่อคืน ทุน
30.17	343.43	3,160	9	9
21.49	283.3	2,805	10	5
12.80	226.76	2,460	12	5

เมื่อพิจารณาค่าลงทุนที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่าน ชุดควบคุม และเตาเผาชีวมวล เป็นเงินทั้งสิ้นโดยประมาณ 28,490 บาท เมื่อนำมาเทียบกับรายรับและรายจ่าย จากตาราง 20 พบว่าที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% จะมีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด และมีรายรับที่มากที่สุด โดยเมื่อความชื้นไม้เผาถ่านลดลงรายจ่ายและรายรับก็จะลดลง จากผลกำไรสุทธิต่อครั้งที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% จะสามารถคืนทุนได้เร็วที่สุด และจะคืนทุนในการเผาถ่านต่อครั้งลดลงตามความชื้นไม้เผาถ่านที่ลดลง ซึ่งพบว่ารายจ่ายจะขึ้นอยู่กับเวลาในการเผาถ่านส่วนรายรับจะขึ้นอยู่กับ

ปริมาณของน้ำส้มควันไม้ ดังนั้นจึงทำให้จำนวนครั้งในการเผาถ่านที่ความชื้นสูงสุดจะสามารถคืนทุนได้เร็ว แต่เมื่อพิจารณาที่เรื่องของระยะเวลาจะพบว่า 1 วัน จะมีระยะเวลาในการทำงาน 8-9 ชั่วโมง ทำให้ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% และ 21.49% ใน 1 วัน จะสามารถเผาถ่านได้ 2 ครั้ง ซึ่งสามารถคืนทุนได้เร็วกว่า



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1.จากการเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงที่น้ำหนักไม้แห้งประมาณ 62 กิโลกรัม มีความชื้นไม้เผาถ่านเริ่มต้น 3 ระดับ คือ 12.80%, 21.49% และ 30.17% (ความชื้นมาตรฐานเปียก) ด้วยเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบรินเนอร์ พบว่าร้อยละของถ่านที่ได้มีแนวโน้มลดลงจาก 23.79, 23.33 และ 22.95 ตามลำดับ เมื่อความชื้นไม้เผาถ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการเผาถ่าน โดยไม้ที่มีค่าความชื้นมากจะมีระยะเวลาในการเผาถ่านนานกว่าไม้ที่มีค่าความชื้นน้อยซึ่งระยะเวลาการเผาถ่านที่เพิ่มขึ้นจาก 226, 290 และ 364 นาทีตามลำดับ

2.ถ่านที่ได้จากการเผาถ่านด้วยเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบรินเนอร์ เป็นถ่านที่มีค่าความชื้น ค่าความร้อน ค่าและสารระเหย ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชุมชนถ่านหุงต้ม(มผช.657/2547) มาตรฐานถ่านคูดกลืน(มผช.180/2560)บางส่วนของผลผลิตและหากพิจารณาตามมาตรฐานถ่านบั้งย่าง(มผช.658/2547) พบว่ามีเพียงค่าของค่าที่ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากไม้ไผ่แห้งมีค่าสูงถึงร้อยละ 1.96 ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณถ่านที่ได้จากการวิเคราะห์ถ่านไม้ไผ่ มีค่าร้อยละ 6.06-6.76 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานถ่านบั้งย่างที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 3

3.น้ำส้มควันไม้ดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่าน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 54.89, 56.23 และ 59.59 ตามลำดับ เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นในไม้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่ควบแน่นได้มีปริมาณมากขึ้น

4.คุณภาพน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงที่ความชื้น 12.80%, 21.49% และ 30.17% มีค่าความเป็นกรด 2.59, 2.68 และ 2.90 ตามลำดับ และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.022, 1.015 และ 1.013 ตามลำดับ โดยมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำส้มควันไม้ (มผช. 659/2553)

5.มลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศมีแนวโน้มที่ลดลงหลังจากใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล โดยแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้(ที่ติดไฟได้)ก่อนใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลมีองค์ประกอบ CO, H₂ และ CH₄ ในปริมาณที่สูง และหลังจากใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลพบว่าองค์ประกอบแก๊ส CO, H₂ และ CH₄ มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ส่วนบางช่วงเวลาที่ยังคงมีปริมาณของ

องค์ประกอบแก๊ส CO, H₂ และ CH₄ ในปริมาณที่สูงอยู่ มีแนวโน้มมาจากปริมาณออกซิเจน O₂ ที่นำมาเผาไหม้มีปริมาณไม่เพียงพอทำให้ปริมาณแก๊ส CO, H₂ และ CH₄ ยังคงเหลือจากการเผาไหม้ แต่โดยรวมแนวโน้มของแก๊สที่ไม่สามารถควบคุมได้ถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล ส่งผลให้ลดปริมาณการปลดปล่อยมลพิษจากกระบวนการเผาถ่านให้ต่ำลง

5.2 อภิปรายผล

ในงานวิศวกรรมครั้งนี้เป็นการทดสอบหาประสิทธิภาพของเตาเผาถ่านและการผลิตน้ำส้มควันไม้โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านและผลิตน้ำส้มควันไม้ให้ได้มากที่สุด และคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน โดยการเผาถ่านจะใช้เวลาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงจากไม้ฟืนและจะทำการแบ่งความชื้นของไม้เผาถ่านออกเป็น 3 ระดับ คือ 12.80%, 21.49% และ 30.17% โดยทางผู้จัดทำได้เลือกไม้ไผ่เลี้ยงที่มีค่าความชื้นที่แตกต่างกัน และได้ทำการตัดให้มีขนาดความยาวที่ 7.5 เซนติเมตร มาใช้ในการทดลองโดยควบคุมวิธีการเผาถ่านให้มีวิธีการเหมือนกัน คือ กำหนดปริมาณไม้เชื้อเพลิงหลักและไม้เชื้อเพลิงสำรอง ปริมาณ 7 กิโลกรัม และ 4 กิโลกรัม ตามลำดับ และกำหนดความแรงของพัดลมบ้อนอยู่ที่ 40 เฮิร์ตซ์ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C และอยู่ที่ 35 เฮิร์ตซ์ ในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 800 °C ส่วนพัดลมดูดอยู่ที่ไม่ต่ำกว่า 35 เฮิร์ตซ์ ขึ้นอยู่กับการรั่วของควันจากถังใส่ไม้เผาถ่าน จากผลการทดลองชุดแก๊สซีไฟเออร์ เบิร์นเนอร์สามารถผลิตแก๊สร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูง โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 950-1,000 °C เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการเผาถ่าน โดยความร้อนไหลผ่านห้องเชื้อเพลิงสำรองและเตาเผาถ่าน ซึ่งแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงนี้ช่วยให้กระบวนการเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่านมีระยะเวลาที่สั้นลง ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Lin, 2006) ที่ใช้ชุดแก๊สซีไฟเออร์เป็นแหล่งความร้อน บ้อนให้กับเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมทำให้ระยะเวลาจาก 7 วัน เหลือเวลาเผาถ่านเป็น 4 ชั่วโมง แต่ทั้งนี้ระยะเวลาจะขึ้นอยู่กับความชื้นของไม้เผาถ่านด้วย เมื่อพิจารณาที่ความชื้นวัตถุดิบใกล้เคียงกันที่ 30% พบว่าเวลาในการเผาถ่านไม้ไผ่ลดลงจาก 27 ชั่วโมง เหลือเพียง 6 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่าน (Sangsuk et al., 2018) เนื่องจากความแตกต่างของแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาถ่านโดย (Sangsuk et al., 2018) ใช้การเผาเชื้อเพลิงหน้าเตาและส่งถ่ายความร้อนเข้าสู่เตาเผาถ่าน

เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้น 10% ทำให้เวลาในการเผาถ่านเพิ่มขึ้นประมาณ 1 ชั่วโมง ผลผลิตถ่านมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น คุณภาพถ่านเมื่อพิจารณาที่ค่าความร้อน (พลังงานต่อหน่วยน้ำหนักถ่าน) พบว่าถ่านไม้ไผ่ที่ได้จากไม้ไผ่ที่

ความชื้นเริ่มต้นสูงจะให้ค่าความร้อนที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย จาก 31.62 เป็น 31.93 MJ/kg. แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานจากพลังงานในไม้เป็นพลังงานในถ่านพบว่า มีค่าประมาณ 43.58% ที่ความชื้นของไม้เผาถ่าน 12.80% และค่าประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้นและเวลาในการเผาถ่านเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Sangsuk et al., 2018) ที่เผาถ่านไม้ไผ่ที่ค่าความชื้น 30% ด้วยระยะเวลาในการเผาถ่าน 27 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานลดลงเป็น 40.59% และสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Tippayawong et al., 2010) ที่เผาถ่านไม้ไผ่ที่ค่าความชื้น 5.7% ด้วยระยะเวลาในการเผาถ่าน 4 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานลดลงเป็น 46.60% เมื่อพิจารณาองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านที่ได้จากการทดลองพบว่าที่ความชื้นไม้ไผ่เผาถ่านระหว่าง 12.80-30.17% จะมีค่า Fixed carbon ระหว่าง 83.05-85.23% Moisture content ระหว่าง 4.04-3.43% และ Volatile matter มีค่าอยู่ในช่วง 4.48-6.84% ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ถ่านซุ่มซน ถ่านหุงต้ม (มผช.657/2547) แต่ด้วย Ash ที่มีแนวโน้มที่สูงตั้งแต่เริ่มต้น ทำให้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ซุ่มซน ถ่านปิ้งย่าง (มผช.658/2547) อันเนื่องมาจากในตัวไม้ไผ่เลี้ยงโดยปกติจะมีองค์ประกอบของเถ้าสูงถึงร้อยละ 1.96 จึงทำให้ปริมาณเถ้าในถ่านหลังจากการเปลี่ยนไม้เป็นถ่านมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเป็นร้อยละ 6.08-6.55 ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Sangsuk et al., 2018) จะพบว่าถ่านไม้ไผ่จะมีเถ้า 11.3% และการทดลองของ (Tippayawong et al., 2010) จะพบว่าถ่านไม้ไผ่จะมีเถ้า 7.0-9.8% ซึ่งพบว่าวัตถุดิบที่เป็นไม้ไผ่เมื่อเป็นถ่านแล้วจะมีแนวโน้มเถ้าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ถ่านไม้ไผ่เลี้ยงมีค่าร้อยละของเถ้าสูงกว่าค่ามาตรฐานของเถ้าในถ่านปิ้งย่างที่กำหนดค่าไว้ไม่เกินร้อยละ 3 และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ถ่านซุ่มซน ถ่านดูดกลิ่น (มผช.180/2560) ที่กำหนดค่าไอโอดีนไว้ต้องไม่น้อยกว่า 150 จะพบว่าที่คุณสมบัติของถ่านที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า 20 โอห์ม จะมีค่าไอโอดีน 250 ทำให้มีถ่านที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานบางส่วนโดยพบมากที่สุดที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% คิดเป็นร้อยละ 72.24 และที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% และ 21.49% คิดเป็นร้อยละ 35.63 และ 59.90 ตามลำดับ ในขณะที่น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการควบแน่นแก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่าน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่าน โดยทั่วไปแก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านจะถูกปล่อยทิ้งไปพร้อมกับแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ ส่งผลให้กระบวนการเผาถ่านแบบเดิมปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมสูง การควบแน่นสารที่ควบแน่นได้ออกจากแก๊สร้อนที่ออกจากเตาเผาถ่านจะได้ น้ำส้มควันไม้ดิบ (Raw wood vinegar) โดยปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบที่ได้จากการควบแน่นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามความชื้นของไม้เผาถ่าน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 54.89-59.59 โดยน้ำส้ม

ควันไม้ถูกบ่มไว้ในที่มีด 3 เดือน จากนั้นแยกเฉพาะส่วนของน้ำส้มควันไม้ออกมาวัดคุณภาพ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 2.59-2.90 เมื่อพิจารณาที่ความชื้นวัตถุดิบใกล้เคียงกันที่ 30% พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้จะมีค่าเท่ากับ 3 เมื่อเทียบกับการทดลองของ (Sangsuk et al., 2018) และค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 1.022-1.013 โดยมีแนวโน้มค่าความเป็นกรดและค่าความถ่วงจำเพาะลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น โดยน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงที่ค่าความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำส้มควันไม้ (มผช.659/2553) ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีบางส่วนที่สามารถติดไฟได้ซึ่งจะถูกเผาเพื่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยใช้เตาชีวมวลที่ทำงานร่วมกับ ปล่องเผาแก๊สช่วยในการเผาเพื่อลดมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองของ (Adam, 2009; Sparrevik et al., 2015) ที่ได้นำแก๊สที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านที่มีสารประกอบบางส่วนสามารถติดไฟได้ย้อนกลับมาเผาให้ความร้อนกับเตาเผาถ่านซึ่งผลที่ได้ก็สามารถลดมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิศวกรรมในครั้งนี้อผลการทดลองมีแนวโน้มที่จะนำมาพัฒนาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาถ่านและผลิตน้ำส้มควันไม้ที่ดีขึ้น ซึ่งมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาดังนี้คือ

5.3.1. การสร้างเตาเผาถ่านนี้ควรใช้วัสดุเป็นสแตนเลส เพื่อให้สามารถทนความร้อนและลดการเกิดสนิม จะสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น (แบบ SWU-ENG-ME-002)

5.3.2. ไม่ควรนำไม้ที่มีความชื้นสูงเกิน 30% มาเผาถ่านเนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำส้มควันไม้ทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างและความถ่วงจำเพาะลดน้อยลง

5.3.3. เพิ่มเวลาในการเผาหลังปากปล่องเตามีอุณหภูมิ 500 °C เพื่อให้ถ่านที่ได้กลายเป็นถ่านดุดกิ้นและมีความบริสุทธิ์ที่สูงมาก เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม

5.3.4. สร้างระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นของเครื่องควบแน่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้

5.3.5. ควรเพิ่มช่องอากาศที่ปล่องเผาแก๊สที่เผาพร้อมกับเตาชีวมวลเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (แบบ SWU-ENG-ME-007)

5.3.6. ควรนำความร้อนที่ได้จากการใช้แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล ไปใช้ประโยชน์

บรรณานุกรม

- Adam, J. C. (2009). Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort–kiln (Eco-charcoal). *Renewable Energy*, 34(8), 1923-1925. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.009>
- Fagbemi, L., Khezami, L., & Capart, R. (2001). Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. *Applied Energy*, 69(4), 293-306. doi:[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(01\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(01)00013-7)
- Fuwape, J. A. (1996). Effects of carbonisation temperature on charcoal from some tropical trees. *Bioresource Technology*, 57(1), 91-94. doi:[https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00027-2](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00027-2)
- Griessacher, T., Antrekowitsch, J., & Steinlechner, S. (2012). Charcoal from agricultural residues as alternative reducing agent in metal recycling. *Biomass and Bioenergy*, 39, 139-146. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.043>
- Guan, M. (2004). *Manual for Bamboo Charcoal Production and Utilization*. E. Nanjing Forestry University.
- Lin, J.-C. M. (2006). Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. *Fuel Processing Technology*, 87(6), 487-495. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.07.009>
- Mahanta, A. B. P. (2013). DESIGN AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FURNACE FOR THE PRODUCTION OF BAMBOO CHARCOAL *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)*, 6.
- Michael, M., Megan, M., Andrew, M., & Wesley, W. (2011). *Acrest mobile charcoal kiln final report*. Retrieved from
- Panwar, N. L., Salvi, B. L., & Reddy, V. S. (2011). Performance evaluation of producer gas burner for industrial application. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1373-1377. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.046>
- Rahmat, B., Pangesti, D., Natawijaya, D., & Sufyadi, D. (2014). *Generation of Wood-waste Vinegar and Its Effectiveness as a Plant Growth Regulator and Pest Insect*

Repellent (Vol. 9).

S. I. Pishbin , M. M. (2010). Optimization of Cyclone Separators Using Genetic Algorithm.

Praise Worthy Prize S.r.l.

Sangsuk, S., Suebsiri, S., & Puakhom, P. (2018). The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production. *Energy for Sustainable Development*, 47, 149-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.10.002>

Development, 47, 149-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.10.002>

Sparrevik, M., Adam, C., Martinsen, V., Jubaedah, & Cornelissen, G. (2015). Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved "retort" kilns. *Biomass and Bioenergy*, 72, 65-73.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.016>

Tippayawong, N., Saengow, N., Chaiya, E., & Srisang, N. (2010). Production of charcoal from woods and bamboo in a small natural draft carbonizer. *International Journal of Energy and Environment*, 1.

Wu, Q., Zhang, S., Hou, B., Zheng, H., Deng, W., Liu, D., & Tang, W. (2015). Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process.

Bioresource Technology, 179, 98-103.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.026>

Y.C. Danarto , P. B. U., Ferry Sasmita. (2010). Pirolisis Limbah Serbuk Kayu dengan Katalisator Zeolit. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อแปรรูปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงและปล้ือกประสาน. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม.

จิระพงษ์, ค. (2555). คู่มือเตาถ่านเดี่ยวกรรมป้าไม้. กรุงเทพฯ: หจก. อักษรสยามการพิมพ์.

ณัฐวัฒน์, ค., อนุชา, ท., & ปิยะวัฒน์, จ. (2554). การทำน้ำส้มควันไม้ (ฉบับที่ 2 ed.). กรุงเทพฯ: ฝ่ายส่งเสริมและเผยแพร่ สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนัญชัย, ส., ปริญ, ค., & อัครินทร์, อ. (2016). The Study of Fumeless Charcoal Retort with Rectangular Fin Installation for Thermal Efficiency and Energy Saving Optimization. *12th Conference on Energy Network of Thailand*.

พิพัฒน์พงศ์, ว., อาภากร, ว., & เกียรติศักดิ์, เ. (2014). การศึกษาการออกแบบและสร้างไซโคลนสำหรับเตาชีวมวลแบบอากาศไหลลง. *RSU JET*, 9(4).

- พิสิษฐ์, ม., ประพิธาร์, ธ., สหัตถยา, ท., & บงกช, ป. (2558). การพัฒนาเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบแนวตั้ง ด้วยเทคนิคแก๊สซิฟิเคชัน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ลุตฟี, ส., & พิสิษฐ์, ม. (2018). การปรับปรุงรูปแบบและเทคนิคการผลิตถ่าน ด้วยเตาขนาด 200 ลิตร. วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม.
- วินัย, ป. (2547). เทคนิคการผลิตถ่านไม้ไผ่: กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยเศรษฐกิจและผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้.
- ศูนย์ฝึกอบรมวนศาสตร์ชุมชนแห่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก. (2557). ไม้กับวิถีชีวิตคนไทย:องค์ความรู้ และรูปแบบการจัดการของท้องถิ่น.
- สมชาติ, ฉ. (2558). วิศวกรรมโรงไฟฟ้า (Power Plant Engineering). Retrieved from สืบค้นจาก <http://somchart.me.engr.tu.ac.th/pplant.pdf>
- สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม. (2555). แนวทางการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภท การเผาถ่านหรือการสะสมถ่าน. กรุงเทพฯ: สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม.
- สุพรชัย, ม. (2551). คู่มือการผลิตถ่านคุณภาพสูงและน้ำส้มควันไม้เพื่อใช้ในครัวเรือน (พิมพ์ครั้งที่ 1.. ed.): นครปฐม : สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อนุสรณ์, ส. (2017). การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว. Retrieved from <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.A2D370AC&site=eds-live&authtype=ip.uid>



ภาคผนวก ก.
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง ก.1 ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
เข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
1	35.8	35.7	29.9	33.6	32.8	58.5	8.135	8.116
2	35.7	37.3	30	33.5	32.7	58.6	8.136	8.117
3	35.9	40.6	30	33.4	32.7	58.4	8.135	8.117
4	35.9	69.3	31.4	33.2	32.6	58.4	8.135	8.117
5	36	91.1	33.8	33.2	32.4	58.2	8.135	8.117
6	36.3	116.2	36.7	33.2	32.3	57.9	8.135	8.118
7	36.2	221.8	44.4	33.2	32.2	57.6	8.134	8.117
8	36	361.1	56.4	33.3	32.2	57.2	8.134	8.118
9	36.3	452.8	67.4	33.9	32.3	56.9	8.135	8.118
10	36.5	442.4	69.2	34.6	32.2	56.5	8.115	8.119
11	36.6	398.3	67	35.4	32.2	56.1	8.115	8.118
12	36.2	372.2	65.6	35.7	32.2	55.9	8.115	8.118
13	35.8	357.6	66.5	36.5	32.1	55.7	8.114	8.118
14	36.5	460.2	69.9	37.1	32	54.7	8.114	8.117
15	36.7	444.2	71.1	38.8	32	54.1	8.114	8.118
16	36.9	641.8	73.4	39	31.9	53.7	8.114	8.118
17	37	763.9	78.2	42.3	32	53	8.114	8.118
18	37.7	790.1	86.9	47.8	32	52.4	8.113	8.117
19	38.2	776.3	91	45.2	32.1	51.9	8.112	8.117
20	38.9	793.1	91.6	47.9	32.2	51.5	8.113	8.117

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
21	39.1	811.3	91.9	50.9	32.3	50.9	8.113	8.118
22	38.3	834.7	93.5	53.8	32.5	50.4	8.113	8.118
23	39	846.9	96	56	32.6	50	8.114	8.117
24	40.7	855.4	99.4	58.2	32.6	49.5	8.113	8.119
25	41.4	861.2	107.4	60.2	32.6	49.3	8.113	8.117
26	41.9	867.8	113.9	61.8	32.7	49.2	8.113	8.117
27	43	876.8	121.6	63.9	32.8	49.1	8.113	8.118
28	44.4	878.7	134	64.9	33.1	49.1	8.113	8.118
29	46	864.7	152.2	65.5	33.3	49	8.113	7.125
30	47.3	848.6	166.5	66.7	33.5	49.5	8.113	7.125
31	48.5	864.4	178.8	67.4	33.7	50	8.113	7.125
32	49.4	874.1	196.2	66.8	33.8	50.1	8.113	7.125
33	50.3	867.3	218.3	67.1	33.8	50	8.113	7.126
34	51.1	866.2	240.3	67.7	34	49.9	8.113	7.126
35	51.8	848.4	258.9	70.5	34	49.8	8.113	7.126
36	52.5	834	273.2	71.1	34.2	49.8	8.114	7.125
37	53	841.4	287.6	71	34.2	49.9	8.114	7.125
38	53.5	857.4	302.2	71.3	34.2	50.2	8.114	7.126
39	54	867.9	316.8	71.1	34.1	50.5	8.114	7.126
40	54.5	880.2	331.1	70.5	34.2	50.5	8.114	7.126

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
41	54.5	888.4	345.2	71.8	34.4	50.9	8.115	7.126
42	55.3	900.3	359.6	71.5	34.7	51.1	8.114	7.126
43	54.2	886.3	372.9	71	34.7	51	8.114	7.126
44	54.7	885.1	384.9	70.7	34.7	51	8.114	7.126
45	54.8	909.4	398.2	71.3	34.7	51.3	8.115	7.126
46	54.9	929.3	415	71.6	34.9	51.4	8.115	7.126
47	55.2	927.2	430.2	72.1	35	51.5	8.115	7.126
48	55.4	915.5	443.8	72.7	34.9	51.5	8.116	7.126
49	55.1	905.8	456.1	73.6	35.1	51.8	8.116	7.126
50	55.7	894.8	467.5	75.1	35.1	52	8.116	7.126
51	55.9	886.3	478.3	75.7	35.3	52.3	8.117	7.126
52	56.5	878	488.7	75.3	35.2	52.4	8.117	7.126
53	56.8	870.9	498.6	76.2	35.2	52.7	8.117	7.126
54	57	862.1	507.3	75.5	35	52.6	8.117	7.126
55	57.4	878	515.7	76.9	35.1	52.8	8.115	7.125
56	57.6	889.3	523.3	76.2	35.3	52.9	8.115	7.125
57	58.1	878.4	529.7	77.6	35.3	53.2	8.115	7.125
58	58.4	908.1	533.3	78.9	35.6	53.5	8.115	7.125
59	58.4	928.5	535.7	77.4	35.5	53.7	8.116	7.126
60	58.5	917.8	538.4	77.7	35.6	54	8.116	7.125

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
61	58.2	909.2	542.4	77.2	35.7	54.1	8.115	7.125
62	58.7	900.9	547.6	76.6	35.6	53.8	8.115	7.124
63	58.1	896.9	550.8	76.5	35.3	53.3	8.114	7.124
64	58.9	894.7	553.5	77.5	35.4	53.1	8.115	7.124
65	58.1	890.6	557.2	77.9	35.5	52.8	8.114	7.124
66	58.1	880.7	561.5	77.5	35.4	52.6	8.114	7.123
67	57.6	871.5	568.7	78.9	35.7	52.8	8.115	7.124
68	56.6	898.6	574.8	78.8	35.9	52.9	8.114	7.123
69	56.6	908.4	574.2	78.7	36.1	52.8	8.115	7.124
70	56.7	921.5	576	80	36.3	53	8.116	7.124
71	57.6	929.6	580.1	79.8	35.8	53.1	8.116	7.126
72	58.1	935.8	587	79.8	35.6	53.1	8.117	7.126
73	58.2	933.5	592.2	79.4	35.7	53.2	8.118	7.127
74	58.4	935.9	595.5	79.3	35.6	53.2	8.118	7.126
75	58.4	928	594.4	79.9	35.9	53.6	8.118	7.127
76	58.3	933.2	596.3	80.3	36.1	53.7	8.118	7.127
77	57.6	939.1	598.9	80.3	36	53.6	8.118	7.127
78	57.8	948.3	604.1	80	36	53.5	8.118	7.127
79	57.5	958.3	608.5	79.7	35.8	53.5	8.118	7.128
80	57.5	970	612.9	79.6	35.6	53.5	8.119	7.128

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
81	58.2	972	618.5	79.4	35.7	53.1	8.118	7.128
82	58.6	964.1	621.9	78.9	35.8	53	8.119	7.129
83	58.6	957.9	624.6	78.8	35.8	53.2	8.119	7.129
84	58.6	965.4	627.4	79	35.8	53.2	8.118	7.129
85	59.3	971	637.3	79	35.9	53.4	8.119	7.129
86	58.9	977	646.2	79.4	35.9	53.5	8.119	7.129
87	58.7	957.1	649.8	79.3	35.8	53.5	8.118	7.129
88	59	960.7	654.6	79.5	35.4	53.5	8.119	7.13
89	59.3	964.2	662.3	79.4	35.6	53.6	8.118	7.129
90	59.3	922.6	662.7	79.4	35.8	53.3	8.118	7.129
91	58.8	929	665.3	79.4	35.9	53.2	8.119	7.129
92	57.9	944.6	670.3	79.4	36	53.5	8.12	7.13
93	58.2	953.7	674.7	79.7	36.1	53.6	8.119	7.13
94	59	955	676.2	79.9	36.1	53.6	8.12	7.13
95	59.4	956	678.8	79.6	36	53.8	8.12	7.13
96	49.7	965.9	686.3	79.3	35.7	54	8.12	7.13
97	50.6	955.4	687.5	79.3	35.7	54	8.119	7.13
98	50.4	962.6	690.5	79	35.6	53.9	8.119	7.13
99	50.2	979.7	697.7	78.9	35.6	53.9	8.12	7.129
100	50	982.7	703.7	78.7	35.6	53.8	8.119	7.129

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
101	50.6	999.6	714	78.9	35.9	53.7	8.118	7.128
102	51	998.6	722.3	79	36	53.5	8.118	7.128
103	50.8	955.3	721	78.4	35.8	53.1	8.119	7.127
104	50.4	907	722.1	78.9	36	53.5	8.118	7.127
105	49.6	883.6	721.2	79.1	36	53.7	8.118	7.128
106	48.6	870.2	721.8	79.4	36	53.8	8.119	7.128
107	47.8	856.8	725.8	79.1	35.9	53.9	8.119	7.128
108	47.7	840.7	730.7	79	35.9	53.9	8.119	7.128
109	48.9	829	733.3	79.3	36	54	8.119	7.128
110	49.6	819.4	738.4	79.8	36.1	54.3	8.119	7.128
111	50.4	810.7	741.5	79.4	36.1	54.3	8.119	7.128
112	51.1	802.8	744.5	79.4	36.2	54.1	8.118	7.127
113	51.8	796.1	749.1	79.6	36.4	54.1	8.118	7.127
114	52.1	789.9	752.7	79.8	36.5	54.2	8.118	7.128
115	52.2	783.8	756.6	79.5	36.6	54.2	8.118	7.128
116	52.4	777.5	758.4	79.1	36.5	54.2	8.119	7.129
117	52.6	771.4	760.2	79.6	36.5	54.2	8.12	7.129
118	52.7	765.2	763.9	79.4	36.5	54.2	8.12	7.129
119	53	759.7	765.4	79.4	36.6	54.2	8.12	7.129
120	53.1	754.1	767.9	79.5	36.7	54.1	8.12	7.129

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
121	53.2	748.7	773.1	79.6	36.7	54.2	8.12	7.129
122	53.2	743.8	779.8	80.2	36.8	54.1	8.12	7.129
123	53.4	739.1	788	80.2	36.8	54	8.12	7.128
124	53.8	735.4	793.6	81.4	37	53.6	7.107	7.128
125	54.1	731.2	799.5	81.8	37.1	52.8	7.106	7.127
126	54.4	726.9	804.9	82.1	37.1	52.4	7.107	7.128
127	54.6	722.4	815.1	82.3	37.1	52.1	7.107	7.128
128	54.8	717.7	815.7	81.9	37.3	52.3	8.119	7.128
129	55	713.9	825.8	82.3	37.3	52.6	8.119	7.129
130	55.2	710.4	834.1	82.4	37.3	52.9	8.119	7.129
131	55.3	706.9	842.6	82.2	37.3	53.3	8.12	7.129
132	55.4	703.6	850.5	82.3	37.2	53.4	8.12	7.13
133	55.9	700.4	853.2	82.2	37.3	53.6	8.121	7.13
134	56	697.2	851.7	82.3	37.3	53.9	8.121	7.13
135	56.4	694.5	848.4	82.5	37.4	54.3	8.121	7.13
136	56.6	692.2	848.9	83.2	37.3	53.9	7.109	7.13
137	56.6	689.8	845.2	82.8	37.2	53.3	7.109	7.131
138	56.6	687.3	836	82.5	37.1	53.2	7.108	7.13
139	56.4	685.6	829.6	82.1	37.1	53.3	7.108	7.131
140	56.2	681.8	829.9	82	37	53.1	7.108	7.131

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวล
ของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
141	55.9	679.9	830.6	81.8	36.9	53	7.615	7.13
142	55.8	677.5	826.7	82.3	36.9	52.8	7.615	7.131
143	55.7	675.9	824.6	82.5	37	52.9	7.614	7.13
144	55.8	673.6	823.5	82.7	37	53.1	7.615	7.13
145	56	670.6	822.6	82.9	37.1	53.3	7.614	7.13
146	56.1	668.6	823	83.1	37.2	53.5	7.615	7.13
147	56.1	666.7	822.6	83.1	37.1	53.6	7.615	7.13
148	56.1	664.4	824.4	83	37.2	53.7	7.615	7.13
149	56.2	662.5	824.7	83.1	37.4	53.9	7.615	7.13
150	56.3	660.9	824.3	83.2	37.4	54.2	7.615	7.13
151	56.4	659.3	825.2	83.4	37.5	54.3	7.615	7.13
152	56.5	657.4	825	83.4	37.5	54.3	7.616	7.13
153	56.3	655	825.8	83.2	37.4	54.1	7.616	7.13
154	56.4	654.1	826.6	83.4	37.5	54.3	7.616	7.13
155	56.2	652.2	827.1	83.5	37.4	54.3	7.616	7.13
156	56.1	650.5	827.4	83.6	37.4	54.3	7.615	7.13
157	56	649.4	827.9	83.8	37.4	54.3	7.614	7.13
158	56.1	647	828.1	84	37.4	54.4	7.615	7.13
159	56.3	645.9	828.4	84.1	37.6	54.7	7.615	7.13
160	56.2	645.2	828.7	83.9	37.5	54.8	7.615	7.13

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
161	56.2	643.9	830.7	83.8	37.5	55	7.616	7.131
162	56.1	642.7	831	83.9	37.4	55.2	7.616	7.13
163	55.9	640.9	832.9	84.1	37.3	54.8	7.616	7.13
164	55.8	640	832.4	83.8	37.4	54.9	7.616	7.13
165	55.9	639	833.3	83.6	37.5	55.5	7.616	7.13
166	55.9	638.6	834.1	83.7	37.6	55.8	7.617	7.13
167	55.9	637.2	833.6	83.9	37.4	55.8	7.616	7.13
168	55.8	636.1	835.8	83.8	37.5	55.8	7.615	7.129
169	55.7	635.7	836.9	83.6	37.5	55.9	7.615	7.129
170	55.7	635.1	837.2	83.6	37.4	55.9	7.615	7.129
171	55.5	633.9	838.8	83.6	37.4	55.9	7.614	7.129
172	55.5	633.1	840	84.1	37.3	55.5	7.614	7.129
173	55.6	633	840.5	84.2	37.4	55.2	7.613	7.129
174	55.6	633	840.5	84.2	37.5	55.4	7.613	7.129
175	55.7	632	841.8	84.6	37.6	55.8	7.614	7.129
176	55.9	632.1	841.8	84.9	37.7	55.9	7.614	7.129
177	55.8	631.7	845.6	85.3	37.5	55.4	7.615	7.129
178	55.7	630.7	845.1	85.2	37.5	55.1	7.614	7.129
179	55.7	629.7	845.2	85.5	37.5	55.1	7.613	7.129
180	55.6	628.8	845.4	85.7	37.6	55.2	7.613	7.128

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
181	55.8	628.6	844.5	85.9	37.7	55.4	7.613	7.128
182	55.8	628.1	846.4	85.8	37.6	55.1	7.613	7.129
183	55.8	627.7	846.1	85.9	37.6	55.1	7.613	7.129
184	55.9	626.7	846.4	85.8	37.7	55.4	7.614	7.129
185	55.8	626.5	847.2	85.7	37.6	55.4	7.613	7.129
186	55.7	626.2	848.4	85.7	37.6	55.3	7.613	7.129
187	55.6	625.2	849.6	86.2	37.6	55.2	7.612	7.128
188	55.8	625.5	850.3	86.8	37.7	54.8	7.612	7.128
189	56.1	625	849.8	87.2	37.8	55	7.612	7.128
190	56.2	623.3	851.1	88.2	37.8	55.3	7.613	7.128
191	56.2	623.6	852.3	88.4	37.9	55.5	7.613	7.128
192	56.3	623.4	853.7	88.5	37.9	55.7	7.613	7.129
193	56.4	623.8	854.9	88.9	38	55.3	7.614	7.129
194	56.4	623.7	855.1	89.2	38	55.2	7.614	7.129
195	56.3	622.9	854.3	89.1	37.9	55.3	7.614	7.129
196	56	621.5	854.9	88.9	37.9	55.5	7.613	7.128
197	55.8	621.6	854.1	89.2	37.8	55.4	7.613	7.128
198	55.9	621.6	853.2	89.6	37.8	54.9	7.612	7.128
199	55.9	620.9	851.6	89.5	37.8	55.1	7.612	7.128
200	55.7	620.7	852.1	90.2	37.8	55.1	7.611	7.128

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
201	55.5	620.2	852.3	91.1	37.7	55	7.611	7.128
202	55.3	620.6	853.9	92.1	37.6	54.5	7.611	7.127
203	55.7	620.7	853.8	92.5	37.7	54.5	7.612	7.127
204	55.6	619.7	853.6	92.5	37.9	54.9	7.612	7.127
205	55.6	619.5	853.9	93.1	37.8	55.1	7.612	7.127
206	55.6	619.5	854.5	93.6	37.9	55.1	7.612	7.128
207	55.4	619.9	855.5	93.7	37.8	54.7	7.612	7.128
208	55.5	619.1	855.4	94.2	37.8	54.4	7.613	7.128
209	55.3	618.6	853	94.4	37.8	54.3	7.613	7.128
210	55.3	617.9	852.1	94.7	37.8	54.7	7.613	7.128
211	55.3	617.3	852.4	94.6	37.8	54.9	7.614	7.128
212	55.2	617.7	853.1	95.1	37.8	55	7.613	7.128
213	55.2	617.9	854.3	95.4	37.8	54.7	7.613	7.128
214	55.2	617.7	854.6	95.9	37.8	54.1	7.613	7.129
215	55.2	617.2	855.1	96.6	37.8	54.3	7.613	7.129
216	55.2	616.5	855.6	97.3	37.9	54.6	7.613	7.128
217	55.3	616.1	856.1	98	38	54.7	7.613	7.128
218	55.5	616.2	856.9	98.6	38	54.8	7.613	7.128
219	55.7	616.9	857.2	100	38.1	54.6	7.614	7.128
220	55.7	616.9	857.3	101.9	38.1	54.3	7.614	7.128

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวล
ของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
221	55.7	616.4	856.8	103.1	38	54.5	7.614	7.128
222	55.6	615.6	857.6	103.6	37.9	54.5	7.613	7.128
223	55.4	615.6	858.7	104.8	37.9	54.4	7.612	7.128
224	55.4	615.4	859.4	106.1	37.9	53.8	7.612	7.127
225	55.3	614.3	858.6	107.3	37.8	53.9	7.612	7.127
226	55.1	613.6	857.9	108	37.8	54.1	7.611	7.127
227	55.1	613.7	859.2	109.7	37.7	54	7.611	7.127
228	55.1	613.6	859	111.4	37.8	53.6	7.611	7.127
229	55.1	612.6	857.3	113.2	37.7	53.5	7.611	7.127
230	54.8	611.2	858.1	114.2	37.8	53.9	7.611	7.127
231	54.6	611.3	858.7	115.1	37.7	53.8	7.61	7.126
232	54.5	610.5	859	116.9	37.7	53.5	7.61	7.126
233	54.6	610.3	859.2	117.9	37.7	53.1	7.609	7.126
234	54.5	609	857.5	119.2	37.8	53.6	7.61	7.126
235	54.4	608.3	857.8	120.4	37.9	53.7	7.61	7.126
236	54.3	608.7	858	122.2	37.8	53.2	7.61	7.126
237	54.4	608.1	857.5	124.6	37.8	53	7.61	7.126
238	54.3	607.4	857	126	37.8	53	7.61	7.126
239	54.1	606.8	858	128.1	37.8	53.3	7.61	7.126
240	54.1	606.2	858.9	130.3	37.7	52.8	7.61	7.126

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
241	53.8	606.1	858.7	132	37.7	52.6	7.61	7.126
242	53.6	605.6	858	133.4	37.7	52.6	7.61	7.126
243	53.4	605.1	858.1	135.4	37.6	52.4	7.609	7.125
244	53	603.6	857.4	137.1	37.6	52.8	7.609	7.126
245	52.8	602.7	857.2	139	37.5	52.3	7.609	7.126
246	52.5	602.3	856.8	141.1	37.5	52.1	7.608	7.125
247	52.3	601.2	856.1	143.3	37.4	52	7.609	7.125
248	52.1	600.4	855.7	145.8	37.4	51.9	7.609	7.125
249	52	600.4	855.8	148.6	37.4	51.8	7.609	7.125
250	51.8	600.1	855.3	151	37.4	51.7	7.609	7.125
251	51.7	599.5	855.2	153.6	37.5	51.5	7.609	7.125
252	51.6	598.1	854.9	157	37.5	51.7	7.611	7.125
253	51.6	597.8	855.2	160.4	37.5	51.8	7.611	7.125
254	51.5	597.3	854.8	163.7	37.5	51.7	7.611	7.126
255	51.6	596.8	853.2	167.6	37.5	51.8	7.611	7.126
256	51.6	595.9	853	171.5	37.4	51.9	7.612	7.127
257	51.4	595.9	852.5	174.4	37.4	52.2	7.613	7.127
258	51.2	594.3	852.3	177.7	37.4	52.4	7.612	7.127
259	51.2	595.1	851.9	181.1	37.3	51.9	7.613	7.127
260	51.2	594.2	851.9	184.3	37.3	51.7	7.613	7.126

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
261	51.2	593.8	852.2	187.3	37.4	51.7	7.613	7.127
262	51	593.3	851.5	189.8	37.3	51.5	7.613	7.128
263	50.7	592.5	851	192	37.2	51.4	7.613	7.128
264	50.7	593	850.5	195.6	37.2	51.3	7.613	7.128
265	50.5	590.6	849.2	198.2	37.2	51.3	7.613	7.128
266	50.5	589.1	849.3	200.1	37	51.1	7.613	7.128
267	50.3	589.3	848.8	202.5	37.1	50.9	7.613	7.127
268	50.2	589.2	850.2	204.5	37.1	51	7.613	7.128
269	50.2	588.4	849.7	206.7	37.1	50.8	7.613	7.127
270	50	587.6	850	207.8	37.1	50.7	7.613	7.127
271	49.9	586.8	848.7	208.9	37.1	50.6	7.613	7.128
272	49.8	586.4	847.8	210.6	37.1	50.6	7.614	7.128
273	49.7	586.1	848.9	212.7	37.1	50.4	7.614	7.128
274	49.5	585.1	847.8	215.1	36.9	50.1	7.614	7.128
275	49.6	585.4	846.3	216.9	36.9	49.9	7.614	7.128
276	49	584.6	846.5	218.3	36.7	49.7	7.613	7.128
277	48.8	584.3	846.2	219.7	36.7	49.7	7.614	7.128
278	48.6	584.2	845.6	221.9	36.6	49.5	7.613	7.128
279	48.3	583.7	845.4	223.4	36.5	49.2	7.613	7.128
280	47.9	582.9	845.1	224.8	36.4	49	7.613	7.128

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
281	47.8	581.7	844.5	226	36.2	48.7	7.613	7.128
282	47.4	581.2	844.5	226.5	36.1	48.3	7.613	7.128
283	47.2	580.9	843.8	226.8	36.1	48.2	7.613	7.128
284	47.2	580.8	844.1	228	36.1	48.1	7.613	7.128
285	47	581.2	844.2	229.1	36	48	7.612	7.127
286	46.9	580.5	844	230.2	36	47.9	7.612	7.128
287	46.6	580.1	843.6	231.1	35.9	47.6	7.612	7.128
288	46.3	579.4	843.2	232.3	35.9	47.5	7.612	7.128
289	46.1	579	842.4	233.5	35.9	47.3	7.611	7.128
290	46	578.5	841.8	233.9	35.9	47.2	7.611	7.128
291	45.7	578	840.5	234.9	35.8	47.1	7.611	7.127
292	45.6	577.4	840.8	235.2	35.7	46.9	7.611	7.127
293	45.2	576.6	840.4	236.2	35.6	46.7	7.61	7.127
294	45.2	576.6	840	237.7	35.6	46.6	7.611	7.127
295	45	575.4	839.3	238.8	35.6	46.6	7.61	7.127
296	44.7	574.7	839.2	239.5	35.6	46.6	7.61	7.127
297	44.5	574.8	838.9	241.2	35.7	46.6	7.61	7.127
298	44.7	573.7	838	242.7	35.7	46.7	7.611	7.126
299	44.4	572.6	837.2	243.4	35.7	46.8	7.611	7.126
300	44.2	572.6	836.3	244.7	35.6	46.8	7.611	7.126

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
301	44	571.8	836.3	245.3	35.5	46.8	7.61	7.126
302	44	571.4	836.1	246.2	35.4	46.8	7.61	7.126
303	43.7	571.2	835.8	248	35.5	46.7	7.61	7.126
304	43.8	569.9	835	249.3	35.4	46.7	7.101	7.125
305	43.5	570.3	835.1	251.6	35.4	46.6	7.102	7.125
306	43.5	565.3	823.4	256.3	35.4	46.5	7.101	7.124
307	43.8	552.9	810.2	268.5	35.3	46.1	7.1	7.124
308	44.2	545	810.7	273.3	35.4	45.7	7.1	7.124
309	44.7	545.4	813.1	277.3	35.5	45.3	7.1	7.123
310	45.1	550.4	818.8	281.9	35.5	44.7	7.1	7.123
311	45.6	553	820.8	286.1	35.5	44.2	7.1	7.123
312	45.8	556.8	822.5	289.1	35.5	43.8	7.099	7.122
313	46	558	824.1	291.6	35.5	43.7	7.099	7.123
314	46.1	558.8	825	294.5	35.5	43.5	7.098	7.122
315	46.2	560.4	824.7	298.1	35.6	43.4	7.099	7.123
316	46.3	559.4	824.5	300.7	35.6	43.3	7.099	7.123
317	46.2	560.7	825.8	304.5	35.6	43.1	7.099	7.122
318	46.2	560	826.6	305.7	35.6	43.1	7.098	7.121
319	46	560	825.5	308.3	35.6	43.1	7.098	7.122
320	45.9	560.2	826.5	310.5	35.5	43.1	7.099	7.122

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
321	45.8	560.2	827.5	312.2	35.6	43.1	7.099	7.122
322	45.6	560.2	827.3	312.6	35.5	43.1	7.099	7.121
323	45.6	560.4	827.4	315.6	35.5	43	7.099	7.121
324	45.4	560.2	828.4	317.4	35.4	43	7.099	7.121
325	45.2	561.1	827.4	321.2	35.5	43.1	7.099	7.122
326	45.2	560.9	826.8	321.9	35.5	43.1	7.099	7.121
327	45	562.2	827.9	322.8	35.4	43	7.099	7.121
328	45	560.2	827.4	323.7	35.5	43.1	7.099	7.122
329	44.9	560.4	828	324.3	35.4	43.1	7.098	7.122
330	44.8	559.6	828.4	325.1	35.5	43.2	7.099	7.122
331	44.8	560	828.8	327.1	35.4	43.2	7.1	7.122
332	44.8	561.6	829.5	331.8	35.4	43.1	7.099	7.122
333	44.7	560	828.1	336.2	35.4	43.3	7.099	7.122
334	44.8	560.5	829.4	338.6	35.4	43.3	7.098	7.122
335	44.8	560.8	829.8	341.4	35.3	43.3	7.099	7.122
336	44.6	563.9	834.8	343	35.3	43.3	7.099	7.121
337	44.5	578.1	846.7	344.4	35.3	43.5	7.099	7.121
338	44.2	584.1	846	346.4	35.4	43.7	7.098	7.121
339	44	585.1	844.6	346	35.3	43.9	7.099	7.121
340	43.6	586	842.8	346.3	35.3	44.2	7.1	7.121

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
341	43.2	586.3	841.9	347.9	35.2	44.5	7.1	7.121
342	42.8	585.1	840.8	347.6	35.2	44.8	7.1	7.121
343	42.3	585.5	839.7	348.6	35.1	45.3	7.099	7.121
344	42.1	585.3	839.3	348.8	35.1	45.8	7.1	7.122
345	42.2	583.5	838.3	349.8	35	46.2	7.1	7.122
346	41.9	583.5	838.2	348.2	35	46.8	7.1	7.122
347	41.7	582.9	837.3	348.2	34.9	47.3	7.099	7.121
348	41.1	582.2	837.1	352.1	34.7	47.8	7.1	7.122
349	40.8	581.4	837	357.1	34.6	48.4	7.099	7.122
350	40.7	581.3	836.4	357.8	34.3	49.1	7.099	7.122
351	40.4	579.8	836.9	362.5	34.1	49.5	7.099	7.121
352	40.2	579.4	836.6	366.3	33.9	50	7.099	7.122
353	40.2	578	836.9	368.1	33.7	50.3	7.098	7.122
354	40.1	578.2	836.8	369.4	33.6	50.6	7.098	7.122
355	40.6	573.7	839.2	430.5	34.4	51	7.099	7.122
356	40.9	571.3	837.9	447.5	34.3	51.2	7.098	7.122
357	41.4	571.2	838.4	456.8	34.3	51.4	7.097	7.121
358	41.8	571.3	838.5	460.2	34.4	51.6	7.097	7.122
359	41.8	571.4	839.1	471.1	34.4	51.8	7.098	7.122
360	42.4	570.9	839.5	473.9	34.4	51.9	7.097	7.121

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
361	42.5	572.1	839.7	481.4	34.4	51.9	7.096	7.12
362	42.2	572.2	840.1	487.4	34.4	51.9	7.096	7.121
363	42.6	571	839.6	494.6	34.3	52	7.096	7.121
364	42.6	571	840.1	500.4	34.2	52	7.095	7.12

ตาราง ก.2 ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
เข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
1	32.7	36.8	32.7	36.1	32.8	56.6	8.11	811
2	32.6	44	33.2	35.9	32.9	56.9	8.111	8.11
3	32.3	101.4	40.3	35.9	32.7	56.7	8.111	8.11
4	32.5	187.3	52.7	35.9	32.8	57	8.111	8.11
5	32.3	238.9	61.1	35.9	32.8	57	8.111	8.11
6	32.3	272.9	63.6	35.5	32.7	55.8	7.12	8.111
7	32	295.1	67.3	35.4	32.5	54.7	7.119	8.11
8	31.8	278.1	68.2	35.5	32.5	54.2	7.119	8.11
9	31.8	264.5	68	35.8	32.4	53.6	7.118	8.109
10	31.8	442.3	69.3	36.1	32.4	52.9	7.118	8.109
11	31.8	489.7	73.2	37.1	32.4	52.3	7.118	8.109
12	32.2	573.4	77.7	38.9	32.7	51.9	7.118	8.109
13	32.6	614.9	85.2	40.9	32.9	51.4	7.118	8.109
14	32.9	634.6	94.1	42.8	33	51.2	7.118	8.11
15	33.4	661.3	101.9	46.1	33.2	51	7.119	8.111
16	33.6	683.9	109.5	48.3	33.3	50.5	7.121	8.112
17	33.8	711.3	115.7	50.6	33.1	50	7.121	8.113
18	34.9	739.2	120.7	54.8	33.4	49.5	7.122	8.114
19	35.3	759	129.4	56.5	33.5	48.9	7.122	8.115
20	35.9	759.8	140.5	59.5	33.6	48.6	7.122	8.115

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
21	37.2	735.3	151.8	61.2	34	48.6	7.122	8.114
22	38	748.7	162.7	62.3	34.2	48.2	7.123	8.116
23	38.6	760.5	174.9	63.7	34.5	48	7.123	8.116
24	39.5	770.6	187.8	65.6	34.7	48.1	7.123	8.116
25	40.3	787.8	199.5	67.3	34.9	48.2	7.123	8.116
26	40.8	796.7	210.9	67.4	34.8	48	7.123	8.115
27	41.2	798.4	221.4	68.8	34.9	47.9	7.122	8.115
28	41	804.2	232.1	70	34.4	47.3	7.122	8.114
29	42.1	813.7	241.4	70.3	35.1	47.9	7.122	8.114
30	42.1	816.7	252	71.4	34.7	47.6	7.122	8.114
31	42.9	811.5	264.3	72.2	35.2	47.9	7.122	8.114
32	43.4	822.2	281	72.8	35.2	47.7	7.122	8.114
33	44.1	828	292.1	72.5	35.4	47.9	7.122	8.114
34	44.2	827.7	302.5	73.5	35.4	48.6	7.621	7.103
35	45	833	314	74	36	49.6	7.622	7.104
36	45.9	842.2	326	74.7	36.3	50.4	7.623	7.105
37	46.2	841.5	336.6	74.6	36.5	50.8	7.624	7.115
38	46.7	828	345.1	75.8	36.4	51	7.624	7.127
39	46.9	826.9	353.1	76	36.4	51	7.625	7.126
40	46.9	824.4	364.7	76.5	36.3	51.1	7.625	7.128

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
41	47.5	818.7	371.7	76.6	36.5	51.4	7.625	7.128
42	47.8	819.2	377.4	76.1	36.6	51.6	7.626	7.129
43	47.2	820.2	380	75.9	35.9	51.2	7.626	7.129
44	46.6	819.3	390.6	74.6	35.3	50.9	7.624	7.126
45	46.7	821.2	402.5	74.6	35.3	51.4	8.116	7.123
46	46.6	825.2	413.3	75.2	35.5	52.4	8.115	7.125
47	47.4	829.8	420.8	74.6	36	53.5	8.115	7.125
48	47.3	831	425.9	75.6	35.9	53.9	8.115	7.124
49	47.8	835.2	429	75	36.3	54.8	8.114	7.124
50	47.6	833.5	430.9	74.6	36	54.7	8.113	7.122
51	47.6	839.2	434.4	75.3	36	54.8	8.113	7.118
52	48.2	843.3	440.6	74.5	36	55	8.113	7.122
53	48.6	858.1	445.9	74.4	36.1	55.2	8.114	7.123
54	48.7	876.2	450.4	74	36.1	55.4	8.113	7.122
55	48.8	869.5	455.7	75.5	36.1	55.8	8.114	7.123
56	48.9	877.3	459.6	75.2	36.3	56	8.113	7.123
57	48.7	888.7	464.3	75.6	36.2	55.8	8.114	7.122
58	48.5	897	470.4	76.2	36.2	56	8.114	7.123
59	48.8	895	475.6	76.3	36.5	56.5	8.114	7.123
60	48.7	884.7	481.7	76.5	36.6	56.6	8.115	7.124

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
61	48.6	893.8	485.4	75.7	36.5	56.3	8.115	7.124
62	48.4	892.1	489.6	76.1	36.5	56.4	8.115	7.124
63	48.9	889.4	495.7	76.6	36.9	56.6	8.115	7.124
64	49.3	887.4	499	76.7	37.1	56.6	8.115	7.125
65	49.2	901.9	500.3	75.4	36.9	56.2	8.115	7.125
66	48.6	905.6	503.5	74.9	36.5	55.9	8.114	7.124
67	48	901.5	507.1	75.3	36.1	55.5	8.112	7.123
68	48.6	915.2	510.4	75.5	36.6	55.8	8.112	7.122
69	48.2	915.7	514.4	75.9	36.3	55.6	8.113	7.122
70	48.2	924.7	518.9	76.2	36.3	55.3	7.619	7.122
71	48.4	930.6	522.8	76.6	36.5	55.3	7.619	7.122
72	48.5	936.1	527.5	76.7	36.4	55.1	7.62	7.123
73	48.6	943	533	76.5	36.4	55.1	7.62	7.123
74	48.4	948	539.5	76.7	36.4	55	7.62	7.123
75	48.7	955.8	546.9	76.2	36.6	55.4	7.62	7.123
76	49	947.8	553.4	76.2	37	55.5	7.619	7.123
77	49.1	956.1	559.9	76.2	36.9	55.1	7.619	7.123
78	48.6	946.6	566.8	75.6	36.4	54.1	7.619	7.122
79	48.4	936.8	573.9	75.6	36.2	53.6	7.619	7.119
80	48.1	928.8	581	75.9	36	53.5	7.619	7.122

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
81	48.5	924.5	587	76.2	36.5	54	7.619	7.122
82	48.8	915.5	592.8	76	36.7	54	7.619	7.119
83	48.7	906.5	598.7	76	36.7	53.7	7.619	7.121
84	48.2	924.7	607.4	76.3	36.3	53.4	7.618	7.12
85	48.6	930.6	615.3	76.5	36.5	53.6	7.618	7.121
86	49	936.1	622.8	76.7	36.7	53.9	7.619	7.122
87	49.3	943	629.5	76.7	36.9	54.1	7.619	7.122
88	49.6	948	635	77.2	36.9	54.1	7.62	7.122
89	49.5	955.8	641.7	77.7	36.5	53.8	7.619	7.121
90	50.3	947.8	647.9	77.8	36.9	54.3	7.62	7.123
91	50.4	957.1	653.6	78	36.6	54.1	7.62	7.123
92	51	960.7	659.3	78.5	36.6	54.3	7.621	7.123
93	51.6	964.2	665.2	79.6	36.7	54.5	7.621	7.124
94	52.6	959.8	671.6	80.1	37.1	54.9	7.621	7.124
95	53.7	944.2	677.2	80.3	37.5	55.4	7.622	7.125
96	54.3	940.3	682	80.3	37.5	55.4	7.623	7.126
97	54.4	940.3	685.3	79.6	37.3	55.2	7.623	7.125
98	54.1	929	689.8	80.3	36.6	54.5	7.622	7.124
99	54.4	924.4	694.9	81.1	36.7	54.9	7.622	7.125
100	55.3	919.8	700.8	81.5	37.3	55.6	7.622	7.125

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
101	56	890.2	705.2	81.1	37.6	56	7.624	7.126
102	55.9	872.8	709.3	81	37.4	55.7	7.625	7.127
103	55.4	859.1	714.1	81	37.1	55.6	7.624	7.126
104	54.1	850.1	719	80.9	37.2	55.8	7.624	7.126
105	53.8	846.3	724.3	80.8	37.1	55.6	7.623	7.126
106	54.2	842.4	728.6	80.7	37.2	55.7	7.623	7.126
107	53.9	833.6	734	80.6	37	55.6	7.623	7.126
108	53.7	824.1	738.8	80.6	37.2	55.7	7.623	7.126
109	53.6	815.1	743.2	80.7	37.4	56	7.623	7.126
110	53.9	801.3	747.6	81	37.5	56.2	7.623	7.126
111	54.3	781.7	750.2	80.4	37.9	56.7	7.624	7.126
112	53.4	773.3	754.7	81	37.3	56.6	7.624	7.126
113	53.6	766.3	758.6	80.9	37.3	56.6	7.623	7.125
114	53.3	760.1	763.4	81	37.2	56.5	7.623	7.125
115	53.6	754.9	768.5	81.5	37.4	56.9	7.623	7.124
116	54.3	750.3	772.8	81.9	37.8	57.4	7.623	7.125
117	54.9	746.1	776	82.2	37.9	57.5	7.622	7.125
118	55	741.6	780.8	82.3	38	57.6	7.623	7.126
119	54.9	737.5	784.8	82.8	38.1	57.7	7.624	7.126
120	55.6	734.3	788.2	83	38.4	57.7	7.623	7.126

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
121	55.8	730.9	789.8	82.5	38.5	57.5	7.623	7.126
122	55.6	728.5	790.9	82.6	38.2	57.1	7.623	7.126
123	55.4	725.8	794.4	82.9	37.7	56.4	7.623	7.125
124	55.8	722.9	798	83.3	37.8	56.7	7.623	7.125
125	56.1	721.8	802.6	83.6	38	57.1	7.623	7.125
126	56.1	719.6	805.8	83.2	38.3	57.5	7.623	7.125
127	55.9	717.2	810.1	83.2	37.9	57.3	7.623	7.125
128	55.5	716.1	818	83.8	37.7	57.1	7.623	7.125
129	55.9	714.2	823.3	84.3	38.3	57.6	7.623	7.126
130	56.6	713.6	825.8	83.8	38.5	57.7	7.624	7.127
131	55	711	831.8	84.3	37.8	56.9	7.624	7.127
132	56.1	709.7	861.3	84.9	37.7	56.7	7.125	7.126
133	56.6	706.2	867.6	85.1	38.3	56.7	7.125	7.126
134	56.8	701.2	871	85.9	38.5	56.7	7.125	7.126
135	56.9	700.1	873.9	86.6	38.6	56.7	7.126	7.127
136	56.9	695.9	880.4	86.9	38.5	56.4	7.126	7.127
137	56.8	693.7	881.2	87.6	38.4	56.1	7.126	7.128
138	57	691.6	881.6	88.1	38.5	56.1	7.127	7.129
139	56.7	689.9	884	88.1	38.3	56	7.127	7.129
140	56.8	689.2	890.3	88.2	38.5	56.3	7.127	7.129

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
141	57.2	688	891.4	87.6	38.8	56.6	7.127	7.129
142	56.5	685.3	891.6	87.7	38.2	56	7.127	7.129
143	56.1	683.8	892.9	87.3	38	55.7	7.126	7.128
144	55.9	683.3	893.4	87.6	38	55.8	7.125	7.127
145	56.1	681.7	898.2	88.3	38.4	56.1	7.125	7.127
146	56.5	680.7	893.6	88.3	38.7	56.3	7.125	7.128
147	56.3	678.7	896.2	89.3	38.3	56	7.125	7.128
148	56.4	678.2	896.9	89.9	38.5	56.3	7.125	7.127
149	56.4	676.9	892.7	90.6	38.4	56.3	7.125	7.127
150	56.7	675.6	895.3	90.6	38.6	56.7	7.127	7.128
151	57.4	675	900.6	91.3	39	57.2	7.127	7.129
152	57.7	674.6	902.5	92.6	39.1	57.3	7.128	7.13
153	58.5	673.5	900.9	93.8	39.3	57.5	7.129	7.131
154	58.8	672.3	906.1	94.6	39.3	57.4	7.13	7.132
155	58.8	671.7	906.1	95	38.9	57	7.131	7.133
156	59	671	903.8	95.4	39	57.2	7.13	7.133
157	59	669.9	903.5	96.3	38.8	57.2	7.13	7.132
158	59.3	667.8	899.3	96.6	38.9	57.2	7.13	7.132
159	58.9	667.9	899.2	97.6	38.6	56.9	7.129	7.132
160	59	666.4	900.4	99.4	38.8	57.2	7.129	7.132

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
161	58.8	666.2	901.9	101.4	38.6	56.9	7.128	7.13
162	58.7	665.1	901.8	102.6	38.6	56.8	7.128	7.13
163	58.7	664.5	904.7	104.3	38.7	56.7	7.128	7.129
164	59.1	664.6	899.3	104.9	39.2	57.1	7.127	7.129
165	58.9	664.1	900.5	105.8	39.1	56.9	7.127	7.129
166	59	664.1	900.6	107	39.2	57	7.127	7.129
167	58.6	663.4	902.4	108.9	39.1	56.8	7.127	7.129
168	58.1	662.2	896.7	112	38.7	56.4	7.127	7.129
169	57.9	661.7	901.4	114.8	38.7	56.6	7.127	7.129
170	57.6	660.9	903.6	118	38.6	56.7	7.128	7.129
171	57.5	659.9	893.4	119.9	38.6	56.8	7.128	7.129
172	57.1	660	888.7	121.7	38.3	56.6	7.128	7.13
173	56.9	659.9	886.8	123.9	38.3	56.9	7.127	7.128
174	56.7	659	885.3	125.3	38.2	56.4	7.126	7.127
175	56.3	659.4	882	127.3	38	55.9	7.125	7.127
176	56.1	659.2	879.6	131.2	38	55.8	7.124	7.125
177	56.8	659	887.7	134.4	38.5	56.1	7.124	7.126
178	56.6	658.6	887.4	137.8	38.6	56.2	7.125	7.126
179	56.8	659	888.7	139.9	38.8	56.5	7.125	7.126
180	56.4	658.8	891.7	140	38.9	56.6	7.125	7.126

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวล
ของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
181	56.4	658	895.8	139.9	39	56.6	7.125	7.126
182	55.7	657.3	894.7	141.7	38.8	56.2	7.125	7.126
183	55	655.9	892.5	142.8	38.7	55.9	7.126	7.127
184	54.6	656.1	894.6	144.2	38.7	55.6	7.125	7.127
185	54	655.4	896.5	147.3	38.6	55.2	7.125	7.126
186	53.5	653.9	889	151.3	38.5	55	7.125	7.126
187	53.5	653.4	890.8	153.7	38.7	55	7.124	7.126
188	53.6	653.9	890.2	155.5	39	54.7	7.124	7.125
189	53.8	653	891.9	159.1	39.2	54.6	7.124	7.125
190	53.9	653	893	163.3	39.2	54.6	7.125	7.126
191	53.6	652	895	168.7	39	54.3	7.125	7.126
192	53.8	651.7	891	173.6	39.2	54.2	7.126	7.127
193	53.7	650.8	891.8	175.5	39.1	53.9	7.126	7.127
194	53.1	650	888	179.6	38.6	53.2	7.126	7.127
195	53.1	649.3	889.1	184.6	38.3	53	7.126	7.128
196	53.2	648.6	891.4	189.6	38.2	52.8	7.127	7.128
197	53.4	648.4	891.2	194	38.2	52.7	7.126	7.128
198	54.3	648.4	889.5	197.5	38.3	52.4	7.126	7.128
199	55.2	648.6	890.7	199.7	38.3	52.5	7.127	7.129
200	55.2	647.6	892.5	202.9	38.1	52.3	7.127	7.129

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
201	55.4	647.3	891.4	207	38	52.2	7.127	7.129
202	55.5	646.6	889.7	209.7	37.9	51.6	7.127	7.129
203	55.8	647.3	891.1	212.9	38	51.6	7.128	7.129
204	56.2	647.2	886.4	214.9	38.3	51.8	7.128	7.13
205	56.4	645.3	885	217.5	38.3	51.6	7.128	7.13
206	56.6	644.8	880.1	220.9	38.4	51.7	7.128	7.129
207	56.2	644.8	878.3	224.5	38	50.9	7.128	7.13
208	56.3	644.5	878.3	227.2	38.2	51	7.129	7.131
209	56.6	644.7	876.3	229.8	38.4	50.8	7.13	7.132
210	56.7	643.9	877.2	232	38.5	50.5	7.13	7.133
211	55.9	643.1	876.3	232.9	38.1	49.9	7.131	7.133
212	55	643	877.3	235.1	37.9	49.5	7.13	7.133
213	54.5	643.4	878.6	237.3	38.1	49.6	7.131	7.133
214	53.9	643.5	878.4	238.7	38.2	49.5	7.131	7.134
215	52.2	643.2	877.8	239.1	37.3	48.6	7.131	7.134
216	50.5	643.3	879.5	240.5	36.7	48	7.13	7.132
217	50.1	643.2	879.2	244.2	37.3	48.4	7.129	7.131
218	50.5	644.1	879.5	249.9	37.6	48.6	7.129	7.131
219	50.1	644	867.6	255.1	37.6	48.4	7.129	7.131
220	50	643.9	873.2	258.2	37.5	48.2	7.129	7.131

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
221	50.1	644	871.3	265.6	37.7	48.3	7.129	7.132
222	49.9	643.8	868.9	270.6	37.7	48.1	7.13	7.132
223	49.9	643.2	867.9	274.5	37.8	48.3	7.13	7.132
224	49.3	643.9	866.4	279.7	37.5	47.8	7.129	7.132
225	49.3	644.5	865.5	281	37.6	47.9	7.129	7.132
226	48.8	643.7	864.9	284.3	37.5	47.8	7.129	7.132
227	48.1	641.9	863.6	287.2	37.1	47.4	7.128	7.131
228	47.9	642.5	862.3	288.7	37.1	47.5	7.128	7.13
229	47.6	642.8	862.9	289.4	37.1	47.5	7.127	7.129
230	47.6	642.6	861.9	289.5	37.2	47.8	7.127	7.129
231	46.9	625.9	862.6	291.2	36.8	47.5	7.127	7.129
232	46.9	640.8	861.5	289.3	37.2	47.8	7.126	7.129
233	46.7	644.6	861.5	291.5	37.3	47.9	7.127	7.129
234	46.8	645.9	862.7	292.6	37.5	48.3	7.126	7.129
235	46.8	645.3	863.5	295.4	37.8	48.7	7.126	7.129
236	46.7	645.7	863.5	296.9	37.8	48.9	7.126	7.128
237	46.6	645.9	863.8	294.1	37.7	48.9	7.126	7.129
238	46.4	644.5	862.8	292.8	37.9	49.1	7.127	7.129
239	46.4	643.7	863.8	294.3	37.8	49.3	7.127	7.129
240	46.6	643.6	863.8	296.2	37.8	49.6	7.127	7.129

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
241	46.7	643.3	863.2	296.5	37.9	49.8	7.127	7.13
242	46.1	642.6	863.5	296	37.2	49.4	7.127	7.13
243	45.7	642.7	861.5	295.7	37	49.4	7.127	7.129
244	45	642.1	862.2	296.2	36.5	48.9	7.126	7.128
245	44.5	642.2	862.3	299	36.2	48.6	7.126	7.127
246	43.8	642	863	300.7	36	48.5	7.124	7.126
247	44.3	641.4	862.6	303.1	36.8	49.1	7.124	7.125
248	43.7	641.4	861.5	306.1	36.5	48.7	7.123	7.125
249	43.8	640.8	861.8	309.7	36.3	48.6	7.123	7.124
250	43.3	640	861.4	312	36.1	48.5	7.122	7.123
251	43.1	639.5	861.6	313.8	35.8	48.2	7.122	7.123
252	43	639.3	862	315.5	36.3	48.5	7.121	7.122
253	43.4	638.4	862.7	315.7	36.3	48.7	7.121	7.122
254	43.3	636.9	862	314.8	36.3	48.8	7.121	7.122
255	43.7	635.2	861.5	315.3	36.7	49.1	7.12	7.121
256	43.4	635.1	861.9	315.2	36.5	48.8	7.12	7.12
257	43.2	634	860.6	314.6	36.6	48.7	7.119	7.12
258	42.5	632.9	860.9	314.6	36.5	48.5	7.118	7.119
259	42.4	631.4	860.6	314.7	36.4	48.5	7.118	7.118
260	42	630.9	859.5	315.3	36.6	48.8	7.118	7.119

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
261	42.1	629.6	859.7	318.8	36.5	48.7	7.119	7.119
262	42.3	628.5	859.1	324	36.7	48.9	7.12	7.12
263	42.5	627	857.7	330.1	36.6	48.8	7.12	7.121
264	42.5	625.8	857.2	332.3	36.5	48.7	7.12	7.121
265	42.3	624.1	857.1	336.4	36.4	48.5	7.12	7.121
266	42.4	623.3	856.6	339.5	36.5	48.5	7.119	7.12
267	42.4	621.6	855.3	341	36.4	48.1	7.119	7.12
268	43.3	619.6	854.3	344.2	36.5	48	7.119	7.12
269	42.6	619.1	852.9	347.6	36.5	47.7	7.119	7.121
270	42.5	615.6	851.1	345.3	35.8	47	7.119	7.12
271	43.8	614.7	851.5	350	35.4	46.6	7.118	7.12
272	44.8	614.6	850.6	352.6	35.6	46.8	7.119	7.119
273	46	612.1	850	354.2	36.1	47.2	7.119	7.12
274	48.4	610.5	848.4	354.9	36.4	47.2	7.119	7.119
275	49.4	609.2	847.7	356	36	46.8	7.119	7.12
276	50	606.4	846.8	358	35.9	46.8	7.119	7.12
277	50.3	604.6	845.3	357.1	35.7	46.4	7.12	7.121
278	50.9	599.2	843.6	359.9	35.7	46.4	7.12	7.121
279	51.5	595.5	842.1	362.7	35.9	46.5	7.12	7.121
280	50.3	593.3	841.3	367.6	35.2	46.2	7.12	7.12

ตาราง ก.2 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
281	49.2	590.8	839.6	370.4	35.1	45.9	7.12	7.121
282	48.6	593.7	838.4	370.9	35.4	46.1	7.119	7.12
283	47.8	587.2	837.2	467.5	35.6	46.4	7.12	7.12
284	46.6	589.8	835.5	478.3	35.7	46.8	7.12	7.121
285	45.8	590.4	834.4	488.7	35.9	47.1	7.121	7.122
286	44.8	589.7	832.8	488.9	35.6	46.9	7.121	7.122
287	44.3	588.8	831	492.4	35.4	47	7.121	7.121
288	43.8	582	830	495.7	35.2	47	7.12	7.121
289	43.5	578.2	828.9	498.8	35.2	47.2	7.12	7.12
290	43.4	580.6	827.2	504.9	35.1	47.4	7.12	7.12

ตาราง ก.3 ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
เข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
1	29.5	54.9	31.6	31.7	31.3	57.8	8.109	8.109
2	29	94	40.7	31.6	31.2	57.4	8.109	8.109
3	28.4	144.1	52.2	31.6	31	57.1	8.109	8.109
4	28.3	236.4	62.8	31.6	31	57.5	8.109	8.109
5	28.4	286.5	67.4	31.9	30.9	57.6	8.108	8.109
6	28.8	358.5	72.9	33.2	30.9	57.7	8.108	8.109
7	28.7	449.1	88.2	36	30.7	57.4	8.108	8.109
8	28.8	433.1	96.6	39.1	30.7	56.8	8.108	8.109
9	29	402.9	103.4	43	30.8	56	8.108	8.11
10	29	367.1	106	46.4	30.9	55.4	8.109	8.11
11	28.7	375.1	109.7	48.9	31	54.3	8.108	8.11
12	28.1	374.7	111.7	50.6	31.1	53.6	8.108	8.11
13	28.4	391.1	116	54.3	31.2	52.8	8.109	8.11
14	28.2	394.6	119.8	55.2	31.3	52.5	8.109	8.11
15	28	400.2	123.7	57.3	31.4	51.8	8.108	8.11
16	28.1	382	126	57.4	31.5	51.7	8.108	8.11
17	28.1	522.7	133.4	59.4	31.6	51.8	8.109	8.11
18	28.1	637	148.9	61	31.8	51.7	8.109	8.111
19	28.3	680.3	162.9	63	31.8	51.3	8.109	8.111
20	27.9	705.1	175.8	64.9	31.9	50.9	8.11	8.111

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
21	28	732.5	188.9	66.6	32	50.7	8.11	8.111
22	28.1	752.3	201.3	68.3	32.1	50.6	8.11	8.111
23	28.1	741.6	211.3	69.1	32.3	50.5	8.11	8.111
24	28.5	743.1	220.7	70.8	32.6	50.6	8.111	8.112
25	28.8	745.1	229.4	72.5	32.9	50.6	8.111	8.112
26	28.7	745.1	239.5	74	33.1	50.6	8.112	8.112
27	40.9	736.2	249.5	75.2	33.4	50.9	8.112	8.112
28	41.6	730.1	259.6	75.9	33.4	51.1	8.113	8.113
29	42.6	726.8	271.3	76.9	33.8	51.5	8.114	8.114
30	43.5	732.3	283.4	77.6	34	51.6	8.114	8.114
31	43.9	741.3	294.5	77.9	33.9	51.5	8.114	8.114
32	29	752.4	306.8	77.7	33.9	51.8	8.113	8.113
33	29	761.5	318.1	77.7	34.2	52.2	8.113	8.113
34	29.2	772	329	77.8	34.3	52.3	8.113	8.113
35	29.4	775.3	336.9	77	34.3	52.3	8.113	8.113
36	29.2	764.6	345.6	78.7	34.5	52.5	8.112	8.112
37	31.5	757.6	356	79.6	34.7	53.3	8.112	8.112
38	29.8	753.6	365	80.2	34.8	53.8	8.113	8.113
39	29.8	756.6	372.7	80.5	34.8	54	8.113	8.113
40	29.5	762.1	378.4	80.2	34.9	54.2	8.113	8.113

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
41	29.5	773.6	386.1	80.5	35.1	54.5	8.113	8.113
42	29.8	785.7	397.9	80.1	35	54.2	8.113	8.113
43	49.2	801.3	405.7	79.3	34.8	54	8.113	8.113
44	49.3	808.8	414.1	79.1	34.7	53.6	8.113	8.113
45	49.2	822	419.6	78.6	34.5	53.3	8.113	8.113
46	49	838.5	425.5	78.2	34.4	53.1	8.112	8.113
47	49	862.4	432.8	78	34.4	53.1	8.112	8.114
48	49.2	879.9	441.4	78	34.5	53.2	8.113	8.115
49	49.4	896.3	448.5	77.9	34.6	53.2	8.114	8.115
50	49.5	886.5	455	78.5	34.7	53.1	8.114	8.116
51	29.3	902.3	462.3	78.2	34.6	53.1	8.114	8.115
52	27.9	871.2	473	78.3	34.6	53.1	8.114	8.116
53	27.8	848	487.4	79.2	34.7	53.1	8.114	8.116
54	28.1	829.3	498.4	79.1	35	53.4	8.115	7.123
55	28.1	869.5	506	79.4	34.9	53.3	8.115	7.124
56	28.3	877.3	510.2	79.6	34.8	53.3	8.114	7.123
57	29	888.7	516.8	80.1	35	53.5	8.115	7.123
58	28.8	897	523.1	80.6	35.2	53.8	8.115	7.123
59	29	895	529.7	81.2	35.2	54	8.115	7.124
60	29	884.7	534.5	81.7	35.3	54.3	8.115	7.124

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวล
ของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
61	28.6	893.8	538.2	82.1	35.4	54.5	8.115	7.123
62	28.7	892.1	554	82.7	35.6	54.6	8.115	7.123
63	28.9	889.4	559.8	83.1	35.6	54.7	8.115	7.123
64	29.2	887.4	568	83.1	35.6	54.8	8.116	7.124
65	29.2	901.9	573.6	82.8	35.6	55	8.117	7.125
66	29.1	905.6	577.9	82.9	35.5	55.2	8.117	7.125
67	29.3	901.5	582.1	83.1	35.6	55.5	8.117	7.124
68	29.1	915.2	586.6	83.1	35.4	55.5	8.117	7.124
69	29	915.7	591	83.1	35.4	55.5	8.117	7.125
70	28.9	924.7	595.3	83.3	35.4	55.7	8.117	7.125
71	28.6	930.6	599.3	83.5	35.3	55.8	8.117	7.125
72	28.6	936.1	603.8	83.7	35.4	55.9	8.117	7.125
73	28.8	943	607	83.6	35.4	55.8	8.117	7.125
74	29	948	609.1	83.5	35.4	55.9	8.117	7.125
75	29.1	955.8	612	83.4	35.3	56.1	8.117	7.125
76	28.8	947.8	616.5	83.7	35.6	56.6	8.117	7.125
77	29	956.1	620.4	83.8	35.7	57	8.118	7.125
78	29	946.6	624.2	83.9	35.6	57.1	8.118	7.125
79	29.3	936.8	629.5	83.8	35.8	57.4	8.119	7.126
80	29.3	928.8	633.5	84.2	35.9	57.6	8.119	7.126

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
81	29.6	924.5	638.1	83.7	35.8	57.6	8.119	7.126
82	29	915.5	642.4	83.5	35.9	57.7	8.118	7.125
83	29	898.3	645.9	83.8	35.9	57.7	8.118	7.125
84	29.3	922.6	649.8	83.7	35.8	57.7	8.118	7.126
85	29.3	929	654.3	83.9	35.8	57.7	8.119	7.126
86	29.4	928.1	657.6	83.5	35.7	57.8	8.119	7.126
87	29.3	935.5	661.2	83.5	35.6	57.7	8.119	7.127
88	29.6	934.5	665.1	83.3	35.6	57.9	8.12	7.127
89	29.5	930.1	669.7	83.4	35.7	58.1	8.12	7.127
90	29.3	922.7	673.5	85	35.8	58.2	8.119	7.126
91	29.5	920.9	678.7	86.1	35.9	58.4	8.119	7.126
92	29.1	923.6	682.1	86.2	35.8	58.4	8.118	7.126
93	29.3	928.1	685.1	86.5	35.9	58.2	8.118	7.125
94	52.9	935.5	687.1	86.9	36	58.3	8.117	7.125
95	53	936.3	689.2	87.2	36	58.3	8.117	7.125
96	53.1	937.1	692.1	87.7	36	58.4	8.117	7.125
97	28.9	946.6	693.8	88.2	36	58.5	8.117	7.125
98	28.9	936.8	696.7	89.1	35.8	58.5	8.118	7.126
99	29.1	928.8	698.6	89.8	35.9	58.7	8.117	7.125
100	29.2	924.5	701.3	90.7	35.9	58.9	8.117	7.125

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
101	29.4	886.5	703.4	90.7	36	58.9	8.118	7.125
102	29.6	871.2	704.9	91.1	36	59	8.117	7.125
103	29.8	829.3	706.1	91.8	36.5	59.5	8.117	7.125
104	29.9	876.3	705.5	92.3	36.6	59.7	8.118	7.125
105	30.2	850.4	706.4	92.7	36.8	60	8.118	7.125
106	30.2	842.1	709.5	93.5	36.8	60	8.118	7.125
107	30	828.4	712.4	94.2	36.7	60	8.118	7.126
108	30.3	821	715.9	94.9	36.7	60	8.119	7.126
109	30.3	817.7	722	96	36.6	59.9	8.119	7.126
110	30	810.4	728.3	96.4	36.5	60	8.118	7.126
111	30	808.5	729.8	98.1	36.5	60.1	8.118	7.126
112	30.3	795.7	732.5	99.8	36.8	60.5	8.119	7.126
113	30.4	786.8	734.6	101.2	36.7	60.7	8.119	7.127
114	30.6	782	740.8	103.6	36.9	60.9	8.12	7.126
115	30.9	779.4	745.5	105.6	36.9	61.1	8.12	7.127
116	30.7	769.1	748.6	107.4	36.9	61.3	8.121	7.127
117	30.3	765.5	751.5	108.3	36.5	61.3	8.12	7.127
118	29.5	761.8	748.2	108.5	36.4	61.1	8.119	7.127
119	29.6	757.8	750.1	109.4	36.5	61.2	8.119	7.127
120	29.5	746.8	754.1	110.4	36.4	61.2	8.119	7.127

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
121	29.8	746.4	756.2	112.1	36.4	61.3	8.118	7.126
122	30.1	739.8	762.1	111.3	36.6	61.5	8.119	7.126
123	30.3	726.4	765	112.7	36.7	61.6	8.119	7.126
124	30.2	721.4	767.9	114	36.7	61.6	8.118	7.126
125	29.7	715.6	771.2	114.6	36.5	61.5	8.117	7.126
126	29.6	710.3	772.7	114.4	36.5	61.5	8.117	7.126
127	30.1	705	775.5	117.1	36.7	61.6	8.118	7.126
128	30.4	696.4	779.5	120	36.6	61.4	8.117	7.126
129	30.4	680	785	121.8	36.7	61	8.116	7.124
130	30.2	676.6	788.9	124.1	36.6	60.2	8.115	7.122
131	30.6	675.5	791.8	129.6	36.9	60.1	8.114	7.121
132	30.5	673.6	794.4	131	36.9	59.9	8.113	7.121
133	53.5	673	796.1	129.1	37	59.8	8.112	7.12
134	53.4	671.8	798.3	131.3	36.9	59.6	8.112	7.12
135	53.3	669.3	800.4	133.6	36.7	59.4	8.112	7.12
136	53.1	667.6	803.2	137.4	36.6	59.3	8.111	7.119
137	44.9	665.7	804.2	138.8	36.7	59.3	8.111	7.119
138	53	663.7	805.3	143.2	36.6	59.1	8.11	7.119
139	52.9	665.6	809.3	146.9	36.6	58.8	8.11	7.118
140	52.9	665.8	819	147.5	36.7	58.6	8.11	7.118

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
141	52.8	665.2	820	151.1	36.8	58.2	8.109	7.117
142	30.3	663.3	814.5	161.2	36.7	57.9	8.109	7.117
143	52.7	661.9	818	163.5	36.8	57.7	8.109	7.117
144	52.5	661	812	166.8	36.9	57.4	8.109	7.117
145	52.5	659.4	804.6	172.6	37	57.1	8.109	7.116
146	52.3	658.6	814.4	173.2	36.9	56.7	8.108	8.107
147	52.2	658.2	820	183	36.8	56.2	8.108	8.107
148	52.1	657.5	823.6	186.1	36.9	56	8.109	8.107
149	51.8	658.7	824	191.2	36.8	55.6	8.108	8.107
150	51.4	659.1	829.1	196.4	36.6	55.2	8.108	8.107
151	51.2	657.6	833.8	199.8	36.5	54.6	8.108	8.107
152	50.8	656.4	837.8	208.9	36.2	53.9	8.108	8.107
153	50.7	656.4	840.4	223.5	36	53	8.107	8.107
154	50.8	655.1	842.8	235.4	36	52.2	8.107	8.107
155	50.8	654.1	843.3	232.9	36	51.5	8.107	8.107
156	50.5	653.9	831.1	235.4	35.9	50.7	8.107	8.107
157	50.1	653.1	828.7	235	35.8	49.6	8.106	8.106
158	49.7	652.8	830.3	240.4	35.7	48.5	8.106	8.107
159	49	650.8	832	244.1	35.5	47.1	8.105	8.106
160	48.6	649.4	832.7	247.7	35.6	46.5	8.104	8.105

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
161	48.3	648.2	838.4	252.4	35.5	45.6	8.103	8.105
162	47.8	646.3	844.2	255.3	35.3	43.9	8.102	8.105
163	47	644.8	842.8	257.1	35	42.4	8.101	8.104
164	46.8	643.7	846.4	258.6	34.9	41	8.101	8.104
165	46.5	642	849.2	259.3	34.8	40.2	8.102	8.105
166	45.9	640	850.2	260.1	34.5	39.4	8.102	8.105
167	45.4	637.7	852.8	262.2	34.2	38.8	8.102	8.104
168	45.1	636.3	854.4	262.9	34	38.8	8.103	8.106
169	44.8	633.9	859.1	264.2	34.1	39	8.102	8.105
170	44.5	632.7	859.3	267.4	34.1	39.1	8.102	8.105
171	44	631.7	859.6	271.4	33.9	39	8.104	8.106
172	43.6	629.7	860.6	274.6	33.9	39.2	8.103	8.105
173	43.2	628.9	862.2	275.8	33.9	39.4	8.104	8.106
174	42.9	627.6	862.9	277.4	33.9	39.5	8.105	8.106
175	42.4	625.4	859.7	279.4	33.8	39.7	8.105	8.105
176	41.9	624.6	859.3	282.3	33.6	39.9	8.106	8.106
177	41.7	623.7	855.8	283.9	33.6	40.3	8.104	8.104
178	41.5	623.4	852.5	284.8	33.6	40.6	8.104	8.105
179	41.5	623.7	854	286.5	33.6	40.8	8.104	8.105
180	41.4	624.1	855	287.3	33.4	40.9	8.103	8.104

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
181	41.2	625.2	856.7	289.3	33.4	41.1	8.103	8.104
182	41	624.6	858.5	291	33.4	41.2	8.103	8.104
183	41	624	860.5	293.5	33.3	41.5	8.103	8.104
184	41.2	623.7	862.8	295.5	33.5	41.9	8.104	8.106
185	41.2	623.3	864.3	296.9	33.7	42.2	8.104	8.105
186	41.5	623.4	866.7	300.2	33.9	42.4	8.105	8.105
187	41.6	623.4	868	303.4	34	42.5	8.106	8.106
188	41.2	623.7	869.2	303.6	33.8	42.5	8.105	8.106
189	41.2	624.6	871.5	300.9	34	42.8	8.105	8.106
190	41.3	624.1	873.6	301.2	34.2	43	8.106	8.106
191	41.5	623.9	876.6	303.9	34.3	43.1	8.106	8.106
192	41.6	623.8	879.1	306	34.3	43.2	8.106	8.106
193	41.1	624.5	880.9	307.6	34.1	43.1	8.107	8.107
194	40.9	624.7	882.9	308.8	34	43.1	8.106	7.751
195	40.6	621.9	881.2	309.6	33.9	43.3	8.106	8.107
196	40.2	623.2	881.9	310.7	33.7	43.6	8.107	8.107
197	39.8	623.9	882.9	311.2	33.8	44.1	8.107	8.106
198	39.6	624.8	884.4	311.5	33.8	44.8	8.107	8.107
199	39	626.2	884.5	312.7	33.5	45.3	8.108	8.107
200	39.2	627.1	886.7	315.1	33.6	46.2	8.107	8.106

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวล
ของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
201	39.1	627.6	888.2	316.9	33.8	47	8.107	8.106
202	38.7	628	890	317.7	33.8	47.6	8.108	8.107
203	38.7	627.6	891.6	318	33.8	47.9	8.107	8.106
204	38.8	627.4	892.9	319.1	33.7	48.3	8.107	8.107
205	38.8	626.9	894.3	321.1	33.6	48.7	8.108	8.107
206	38.2	623.9	894.9	322.4	33.4	48.9	8.108	8.107
207	37.8	623.7	896.6	324.3	33.1	49.1	8.108	8.107
208	37.5	624.4	896.4	325.9	32.7	49.2	8.108	8.108
209	37.1	625.1	897.9	327.4	32.7	49.8	8.108	8.108
210	37.2	624.1	898.8	329.8	32.8	50.3	8.107	8.108
211	37.1	623.8	899.1	331.4	32.6	50.6	8.107	8.108
212	37.1	623.2	899.4	334.7	32.6	51	8.107	8.108
213	37.2	623	899.6	338.8	32.7	51.4	8.106	8.107
214	37.4	621.9	900	341	32.6	51.7	8.107	8.108
215	37.3	622	899.6	342.9	32.6	52.1	8.107	8.108
216	36.9	620.1	899.4	344.4	32.4	52.3	8.106	8.107
217	36.9	620.2	899.5	346.7	32.4	52.7	8.107	8.108
218	36.9	619.2	900	348.4	32.4	53.1	8.107	8.108
219	37.1	623.3	903.6	408.2	32.5	53.5	8.107	8.107
220	38.1	621.4	898.8	458.1	32.5	53.7	8.107	8.107

ตาราง ก.3 (ต่อ) ผลการทดลองของการเผาที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80% (อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเข้าถัง Condenser เฉลี่ยอยู่ที่ 0.067 kg/s)

เวลา (min)	อุณหภูมิ น้ำออก (°C)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิ ใต้เตา (°C)	อุณหภูมิ บนเตา (°C)	อุณหภูมิ ออก คอนเดน เซอร์ (°C)	อุณหภูมิ ปาก ปล่อง (°C)	โวลต์ blower พัดลม ดูด (Volt)	โวลต์ blower พัดลม เป่า (Volt)
221	38.7	620.2	897.2	473.2	32.3	53.7	8.106	8.107
222	39.1	620.6	897.7	483.6	32.3	53.9	8.105	8.107
223	39.7	620.6	898.2	492.4	32.6	54.3	8.105	8.106
224	40.2	621	899.2	495.7	32.8	54.8	8.105	8.107
225	40.6	621.5	900.5	498.8	32.9	55.2	8.106	8.107
226	40.5	622.3	900.3	502.7	33	55.3	8.105	8.107

ตาราง ก.4 ผลผลิตของน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ ทุกๆ 5 นาที

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
20	0.1	0.15	0.18
25	0.33	0.41	0.47
30	0.51	0.53	0.67
35	0.61	0.67	0.85
40	0.68	0.62	0.98
45	0.69	0.77	1.17
50	0.71	0.81	1.22
55	0.76	1.06	1.25
60	0.82	1.00	1.37
65	0.9	1.05	1.35
70	0.95	1.03	1.38
75	0.95	1.05	1.41
80	0.95	1.04	1.43
85	0.98	1.04	1.43
90	1.02	1.11	1.45
95	1.02	1.22	1.44
100	0.99	1.24	1.45
105	0.98	1.23	1.43
110	1.04	1.25	1.44
115	1	1.26	1.48
120	1.08	1.30	1.46
125	1.09	1.32	1.5
130	1.18	1.31	1.47
135	1.2	1.31	1.45
140	1.2	1.37	1.49

ตาราง ก.4 (ต่อ) ผลผลิตของน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ ทุกๆ 5 นาที

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
145	1.19	1.37	1.45
150	1.18	1.41	1.30
155	1.13	1.3	1.23
160	1.18	1.28	0.76
165	1.15	1.24	0.57
170	1.19	1.31	0.50
175	1.13	1.34	0.38
180	1.17	1.19	0.29
185	1.21	1.07	0.30
190	1.17	1.01	0.26
195	1.16	0.92	0.19
200	1.14	0.82	0.15
205	1.12	0.74	0.10
210	1.11	0.67	0.06
215	1.11	0.58	0.05
220	1.13	0.52	0.03
225	1.12	0.51	0.01
230	1.17	0.46	0
235	0.97	0.45	-
240	0.99	0.37	-
245	0.94	0.24	-
250	0.74	0.2	-
255	0.78	0.25	-
260	0.73	0.09	-
265	0.65	0.15	-

ตาราง ก.4 (ต่อ) ผลผลิตของน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 3 ระดับ ทุกๆ 5 นาที

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
270	0.58	0.09	-
275	0.45	0.06	-
280	0.49	0.06	-
285	0.41	0.01	-
290	0.36	0	-
295	0.33	-	-
300	0.29	-	-
305	0.27	-	-
310	0.35	-	-
315	0.36	-	-
320	0.4	-	-
325	0.23	-	-
330	0.25	-	-
335	0.22	-	-
340	0.18	-	-
345	0.07	-	-
350	0.04	-	-
355	0.01	-	-
360	0	-	-
รวม	53.59	44.94	38.85

ตาราง ก.5 ผลการทดลองวัดค่าความความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
20	3.6	3.2	3.7
25	3.6	3.2	3.7
30	3.2	3	3.3
35	3.2	2.8	3.1
40	2.9	2.8	2.9
45	2.8	2.8	2.8
50	2.9	2.8	2.7
55	2.8	2.7	2.6
60	2.7	2.7	2.6
65	2.7	2.8	2.5
70	2.6	2.7	2.5
75	2.6	2.7	2.5
80	2.6	2.6	2.5
85	2.6	2.6	2.5
90	2.6	2.6	2.4
95	2.6	2.5	2.4
100	2.6	2.5	2.4
105	2.5	2.5	2.4
110	2.5	2.5	2.3
115	2.5	2.5	2.4
120	2.4	2.5	2.3
125	2.5	2.4	2.3
130	2.4	2.3	2.3
135	2.4	2.4	2.3
140	2.4	2.5	2.3

ตาราง ก.5 (ต่อ) ผลการทดลองวัดค่าความความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
145	2.3	2.5	2.3
150	2.4	2.6	2.4
155	2.4	2.5	2.5
160	2.4	2.5	2.7
165	2.4	2.5	3
170	2.5	2.6	3.2
175	2.3	2.7	3.3
180	2.4	2.8	3.6
185	2.3	2.7	3.6
190	2.4	2.8	4
195	2.3	2.8	4
200	2.3	2.8	4
205	2.3	2.8	4
210	2.4	2.8	4
215	2.3	2.8	4
220	2.3	2.9	4
225	2.3	2.9	4
230	2.3	2.9	-
235	2.3	2.9	-
240	2.3	2.9	-
245	2.3	2.9	-
250	2.3	3.2	-
255	2.5	3.2	-
260	2.5	3.2	-
265	2.5	3.2	-

ตาราง ก.5 (ต่อ) ผลการทดลองวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
270	2.5	3.2	-
275	2.6	3.4	-
280	2.6	3.4	-
285	2.7	3.4	-
290	2.8	-	-
295	2.8	-	-
300	2.9	-	-
305	2.9	-	-
310	3.0	-	-
315	3.2	-	-
320	3.2	-	-
325	3.2	-	-
330	3.2	-	-
335	3.2	-	-
340	3.4	-	-
345	3.4	-	-
350	3.4	-	-
355	3.4	-	-

ตาราง ก.6 ผลการทดลองวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
20	1.005	1.000	1.005
25	1.005	1.000	1.005
30	1.005	1.000	1.005
35	1.005	1.000	1.005
40	1.005	1.000	1.005
45	1.0075	1.000	1.005
50	1.005	1.000	1.005
55	1.0075	1.005	1.010
60	1.005	1.005	1.010
65	1.005	1.005	1.010
70	1.005	1.0075	1.015
75	1.0075	1.0075	1.015
80	1.0075	1.0075	1.015
85	1.0075	1.010	1.015
90	1.0075	1.010	1.020
95	1.0075	1.010	1.020
100	1.0075	1.010	1.020
105	1.010	1.010	1.025
110	1.010	1.010	1.025
115	1.010	1.010	1.025
120	1.010	1.010	1.030
125	1.010	1.010	1.030
130	1.010	1.015	1.030
135	1.010	1.015	1.040
140	1.010	1.015	1.040

ตาราง ก.6 (ต่อ) ผลการทดลองวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
145	1.010	1.0175	1.040
150	1.010	1.0175	1.040
155	1.010	1.0175	1.040
160	1.010	1.025	1.040
165	1.010	1.025	1.040
170	1.010	1.025	1.025
175	1.010	1.025	1.025
180	1.015	1.025	1.025
185	1.015	1.025	1.025
190	1.015	1.025	1.025
195	1.015	1.025	1.025
200	1.015	1.025	1.025
205	1.015	1.025	1.025
210	1.015	1.020	1.025
215	1.015	1.020	1.025
220	1.015	1.020	1.025
225	1.020	1.020	1.025
230	1.020	1.020	-
235	1.020	1.020	-
240	1.020	1.020	-
245	1.020	1.015	-
250	1.020	1.015	-
255	1.025	1.015	-
260	1.025	1.015	-
265	1.025	1.015	-

ตาราง ก.6 (ต่อ) ผลการทดลองวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
270	1.025	1.015	-
275	1.025	1.015	-
280	1.025	1.015	-
285	1.025	1.015	-
290	1.025	-	-
295	1.020	-	-
300	1.020	-	-
305	1.020	-	-
310	1.020	-	-
315	1.020	-	-
320	1.020	-	-
325	1.020	-	-
330	1.020	-	-
335	1.020	-	-
340	1.020	-	-
345	1.020	-	-
350	1.020	-	-
355	1.020	-	-
360	1.020	-	-
315	1.020	-	-
320	1.020	-	-
325	1.020	-	-
330	1.020	-	-
335	1.020	-	-
340	1.020	-	-

ตาราง ก.6 (ต่อ) ผลการทดลองวัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้

เวลา (min)	ความชื้นไม้เผาถ่าน		
	30.17%	21.49%	12.80%
345	1.020	-	-
350	1.020	-	-
355	1.020	-	-

ตาราง ก.7 Proximate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%

Proximate Analysis	Value (%)
Moisture content	30.17
Ash content	1.37
Volatile matter	54.70
Fixed carbon	13.76

ตาราง ก.8 Ultimate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%

Ultimate Analysis	Value (%)
Carbon	35.72
Hydrogen	7.56
Nitrogen	0.00
Oxygen	55.35

ตาราง ก.9 Proximate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%

Proximate Analysis	Value (%)
Moisture content	21.49
Ash content	1.54

ตาราง ก.9 (ต่อ) Proximate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%

Proximate Analysis	Value (%)
Volatile matter	61.50
Fixed carbon	15.49

ตาราง ก.10 แสดง Ultimate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%

Ultimate Analysis	Value (%)
Carbon	40.16
Hydrogen	7.12
Nitrogen	0.00
Oxygen	51.18

ตาราง ก.11 แสดง Proximate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%

Proximate Analysis	Value (%)
Moisture content	12.80
Ash content	1.71
Volatile matter	68.31
Fixed carbon	17.18

ตาราง ก.12 แสดง Ultimate Analysis ของไม้ไผ่เลี้ยงความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%

Ultimate Analysis	Value (%)
Carbon	44.60
Hydrogen	6.68
Nitrogen	0.00
Oxygen	47.01

การคำนวณปริมาณสารระเหยและสารที่คงอยู่ในเตาเผาถ่าน

พิจารณาในเตาเผาถ่านที่บรรจุไม้ไผ่ความชื้นไม้เผาถ่าน 30.17%

ผลผลิตแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ซึ่งเกิดจากไม้เผาถ่านในเตาเผาถ่าน 89.92 กิโลกรัม ซึ่งความร้อนจากห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ทำให้เกิดแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ จากห้องผลิตแก๊ส การเผาแก๊ส และห้องเผาไหม้ไม้ฟืนสำรองจะถูกส่งต่อไปยังถังควบแน่นและไซโคลนดักจับ ดังนั้นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเผาไหม้จะทำให้ได้ผลผลิตคือ สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้นและเถ้า สามารถหาได้จาก Proximate Analysis ของไม้ไผ่แสดงให้เห็นว่า มีความชื้น 30.17% สารระเหย 54.70% คาร์บอนคงตัว 13.76% และเถ้า 1.37% โดยเทียบกับน้ำหนักไม้ 1 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นไม้เผาถ่านหนัก 89.92 กิโลกรัม จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความชื้น} = 30.17\%$$

$$= \frac{30.17 \times 89.92}{100}$$

$$= 27.129 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{สมมุติฐานว่าความชื้นที่คงเหลือ 3\%} = 27.129 \times \left(\frac{3}{100} \right)$$

$$= 0.814 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{สารระเหย} = 54.70\%$$

$$= \frac{54.70 \times 89.92}{100}$$

$$= 49.186 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{สมมุติฐานว่าสารระเหยที่คงเหลือ 3\%} = 49.186 \times \left(\frac{3}{100} \right)$$

$$= 1.476 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 13.76\%$$

$$= \frac{13.76 \times 89.92}{100}$$

$$= 12.373 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{เถ้า} &= 1.37\% \\ &= \frac{1.37 \times 89.92}{100} \\ &= 1.232\% \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้จากเตาเผาถ่านมีค่าประมาณ 74.03 kg. เมื่อพิจารณาแก๊สควบแน่นได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านหมดภายในเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง 4 นาที ดังนั้นอัตราการไหลของแก๊สควบแน่นได้มีค่า 12.202 kg/hr. เทียบเท่า 0.00339 kg/s.

พิจารณาในเตาเผาถ่านที่บรรจุไม้ไผ่ความชื้นไม้เผาถ่าน 21.49%

ผลผลิตแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ซึ่งเกิดจากไม้เผาถ่านในเตาเผาถ่าน 79.92 กิโลกรัม ซึ่งความร้อนจากห้องผลิต และเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงทำให้เกิดแก๊สที่ควบแน่นได้และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ จากห้องผลิตแก๊ส การเผาแก๊ส และห้องเผาไหม้ไม้ฟืนสำรองจะถูกส่งต่อไปยังถังควบแน่นและไซโคลนดักจับ ดังนั้นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเผาไหม้จะทำให้ได้ผลผลิตคือ สารระเหย คาร์บอนคงตัว ความชื้นและเถ้า สามารถหาได้จาก Proximate Analysis ของไม้ไผ่แสดงให้เห็นว่า มีความชื้น 21.49% สารระเหย 61.50% คาร์บอนคงตัว 15.47% และเถ้า 1.54% โดยเทียบกับน้ำหนักไม้ 1 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นไม้เผาถ่านหนัก 79.92 กิโลกรัม จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชื้น} &= 21.49\% \\ &= \frac{21.49 \times 79.92}{100} \\ &= 17.175 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมมุติฐานว่าความชื้นที่คงเหลือ 3\%} &= 17.175 \times \left(\frac{3}{100} \right) \\ &= 0.515 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สารระเหย} &= 61.50\% \\ &= \frac{61.50 \times 79.92}{100} \\ &= 49.515 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\text{สมมุติฐานว่าสารระเหยที่คงเหลือ 3\%} = 49.515 \times \left(\frac{3}{100} \right)$$

$$= 1.475 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 15.47\%$$

$$= \frac{15.47 \times 79.92}{100}$$

$$100$$

$$= 12.364 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{เถ้า} = 1.54\%$$

$$= \frac{1.54 \times 79.92}{100}$$

$$100$$

$$= 1.231 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้นปริมาณแก๊สที่ควบแน่นได้จากเตาเผาถ่านมีค่าประมาณ 64.34 kg. เมื่อพิจารณาแก๊สควบแน่นได้ที่ออกจากเตาเผาถ่านหมดภายในเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง 50 นาที ดังนั้นอัตราการไหลของแก๊สควบแน่นได้มีค่า 13.312 kg/hr. เทียบเท่า 0.00370 kg/s.



ภาคผนวก ข.
ตารางบันทึกผลการวัดมลพิษ

ตาราง ข.1 ผลการตรวจวัดแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) ของการทดลองที่ความชื้นไม่เผ่าถ่าน 30.17%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
5	0.00	23.23	4.40	3.07	2.81	66.43
35	0.00	21.54	9.89	8.12	2.55	57.89
65	0.00	21.66	9.51	7.66	2.59	58.58
95	0.00	22.64	7.15	5.07	3.90	61.24
125	0.00	23.66	6.72	4.53	3.92	61.17
155	0.00	23.45	7.48	5.51	4.13	59.44
185	0.00	22.82	8.03	6.38	3.96	58.81
215	0.00	21.67	7.73	5.98	3.36	61.26
245	0.00	19.33	7.73	5.92	3.00	64.02
275	0.00	16.68	7.39	5.71	2.33	67.90
305	0.00	15.89	9.79	5.42	2.17	66.72
335	0.00	15.03	12.21	5.11	2.02	65.63

ตาราง ข.2 ผลการตรวจวัดแก๊สเสีย (Exhaust Gases: EG) ของการทดลองที่ความชื้นไม่เผ่าถ่าน 30.17%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
20	2.81	19.97	0.04	0.00	0.37	76.81
50	2.38	20.10	0.02	0.00	0.37	77.12
80	1.95	20.79	0.01	0.00	0.35	76.90
110	2.41	20.84	0.01	0.00	0.36	76.08
140	2.00	21.48	0.02	0.00	0.42	75.17
170	1.25	22.09	0.04	0.00	0.43	76.19
200	1.86	21.73	0.02	0.00	0.42	75.98

ตาราง ข.2 (ต่อ) ผลการตรวจวัดแก๊สเสีย (Exhaust Gases: EG) ของการทดลองที่ความชื้นไม่เผา
ถ่าน 30.17%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
230	2.42	20.17	0.00	0.00	0.37	77.04
260	2.00	19.37	0.01	0.00	0.37	78.26
290	2.06	18.97	0.01	0.00	0.32	78.85
320	2.53	18.40	0.00	0.00	0.27	78.79
350	1.93	19.44	0.15	0.05	0.13	78.30

ตาราง ข.3 ผลการตรวจวัดแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) ของการ
ทดลองที่ความชื้นไม่เผาถ่าน 21.49%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
5	0.00	21.80	6.64	4.39	2.42	65.75
35	0.00	22.08	10.92	9.50	3.30	54.20
65	0.00	23.72	6.90	5.41	4.46	59.51
95	0.00	23.80	7.28	4.98	3.83	60.11
125	0.00	25.68	8.77	5.37	4.17	56.01
155	0.00	23.28	8.72	6.78	4.16	57.06
185	0.00	20.82	7.73	6.83	2.97	61.64
215	0.00	18.65	6.68	6.66	2.32	65.68
245	0.00	18.75	8.08	6.42	2.01	64.73
275	0.00	13.44	11.17	5.89	1.79	67.71

ตาราง ข.4 ผลการตรวจวัดแก๊สเสีย (Exhaust Gases: EG) ของการทดลองที่ความชื้นไม่เผาถ่าน 21.49%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
20	1.57	22.59	0.53	0.42	0.50	74.39
50	0.49	23.13	0.20	0.08	0.44	75.65
80	1.26	21.89	0.08	0.01	0.44	76.32
110	2.01	21.92	0.01	0.00	0.44	75.62
140	0.38	24.03	0.26	0.13	0.49	74.70
170	1.59	21.71	0.09	0.03	0.53	76.05
200	2.53	19.28	0.01	0.00	0.49	77.68
230	1.15	20.52	0.46	0.03	0.58	77.27
260	0.06	20.05	0.98	0.23	0.55	78.13
285	1.55	18.42	0.01	0.00	0.42	79.60

ตารางที่ ข.5 ผลการตรวจวัดแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable Gases: NCG) ของการทดลองที่ความชื้นไม่เผาถ่าน 12.80%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
5	0.00	17.52	7.21	3.32	2.19	69.75
35	0.00	19.68	11.65	8.78	2.79	57.10
65	0.00	27.50	7.99	4.50	4.37	55.64
95	0.00	27.74	9.28	5.29	5.02	52.67
125	0.00	28.31	9.25	5.19	4.80	52.44
155	0.00	25.63	9.84	7.16	5.21	52.16
185	0.00	17.34	8.50	8.36	4.36	61.44
215	0.00	14.52	11.10	7.62	2.38	64.38

ตาราง ข.6 ผลการตรวจวัดแก๊สเสีย (Exhaust Gases: EG) ของการทดลองที่ความชื้นไม้เผาถ่าน 12.80%

เวลา(min)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)
20	1.64	20.68	0.26	0.15	0.17	77.11
50	1.35	23.15	0.02	0.00	0.38	75.11
80	1.23	23.25	0.02	0.00	0.39	75.11
110	0.49	24.55	0.83	0.73	0.65	72.76
140	2.30	21.85	0.05	0.91	0.84	74.06
170	0.92	18.55	0.28	1.71	1.18	77.37
200	1.08	18.05	0.23	0.04	0.33	80.27





ที่ อว 8722.2/159

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

30 มกราคม 2563

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความวิจัยการประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13

เรียน นายกำพล ถาวร

สิ่งที่ส่งมาด้วย รายละเอียดผลการพิจารณาบทความ

ตามที่ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดย สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย กำหนดจัดการประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13 ในวันที่ 25 - 26 มีนาคม 2563 ณ อาคารนวัตกรรม ศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บัวศรี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร กรุงเทพมหานคร เพื่อเป็นเวทีให้นักวิจัย คณาจารย์ นิสิต/นักศึกษา ได้เผยแพร่ผลงานวิจัย โดยแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ นวัตกรรม เพื่อนำไปสู่การพัฒนาทางวิชาการของประเทศ และสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านการวิจัยเพื่อพัฒนาประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั้น

ในการนี้ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้พิจารณาคัดเลือกบทความเพื่อนำเสนอในการประชุมดังกล่าวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยบทความของท่านตามรหัสบทความ SWURES13-192 ผ่านการพิจารณาให้นำเสนอในรูปแบบ Oral โดยมีข้อเสนอแนะตามสิ่งที่ส่งมาด้วย ซึ่งท่านจะต้องดำเนินการปรับแก้ตามข้อเสนอแนะอย่างเคร่งครัด ทั้งนี้ ขอให้ท่านปรับแก้บทความจากไฟล์ต้นฉบับที่มหาวิทยาลัยส่งแนบให้ทางอีเมลท่านนั้น โดยส่งบทความฉบับแก้ไขทาง E-mail : ketchol@g.swu.ac.th ภายในวันพุธที่ 5 กุมภาพันธ์ 2563 หากไม่ส่งบทความฉบับแก้ไขมาตามวันที่กำหนดจะถือว่าท่านสละสิทธิ์ในการนำเสนอผลงาน สำหรับไฟล์ฉบับแก้ไขขอให้ส่งเป็นไฟล์ Microsoft word พร้อมทั้งตั้งชื่อไฟล์แก้ไขเป็น SWURES13- รหัสบทความedit ตัวอย่างเช่น SWURES13-001edit และขอให้ท่านยืนยันการเข้าร่วมนำเสนอผลงานในระบบ ระหว่างวันที่ 3 - 7 กุมภาพันธ์ 2563 สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ ฝ่ายบริหารจัดการวิจัย โทรศัพท์ 02-649-5000 ต่อ 11017-11018, 11082

จึงเรียนมาเพื่อโปรดดำเนินการ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ)

ผู้อำนวยการสถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย

ปฏิบัติการแทน อธิการบดีมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ฝ่ายบริหารจัดการวิจัย สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย

โทร. 0-2649-5000 ต่อ 11017 - 11018 , 11082 , 11091 และ 11096

โทรสาร 0-2259-1822



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ขอมอบเกียรติบัตรนี้ไว้ให้เพื่อแสดงว่า

กำพล ถาวร ภาคภูมิ ศรีธรรมรินทร์
และสมมาส แก้วล้วน

ได้นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ มศว วิจัย ครั้งที่ 13
ระหว่างวันที่ 25 - 26 มีนาคม 2563 ณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ให้ไว้ ณ วันที่ 26 มีนาคม 2563

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปoomกietน์ จิระเดชะ)
ผู้อำนวยการสถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย

(อาจารย์ ดร.สนธิธิป สุ่มรัมย์)
บรรณารักษาร



เครือข่ายวิจัยประชาชน
Prachachuen Research Network



เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนงานวิจัย



การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหกรรมวิจัย

CONFERENCE PROCEEDINGS

ครั้งที่
13



ISBN : 978-616-296-209-7

The 13th Srinakharinwirot University Research Conference
สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



CONFERENCE PROCEEDINGS

การประชุมวิชาการระดับชาติ “มศว วิจัย” ครั้งที่ 13

จัดโดย

สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย ร่วมกับ เครือข่ายวิจัยประชาชน
เครือข่ายวิจัยเครือข่ายอุดมศึกษาภาคกลางตอนบน และสมาคมวิศวกรที่ปรึกษาเครื่องกล
และไฟฟ้าไทย

พิมพ์ครั้งที่ 1 เดือนมีนาคม 2563

จัดพิมพ์โดย สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ลิขสิทธิ์เป็นของ สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

114 สุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

โทรศัพท์ (02) 649-5000 ต่อ 11014 - 11019

โทรสาร (02) 259-1822

ออกแบบปก นายปกรณ์ แดงเพียร

จัดทำเล่ม สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ISBN: 978-616-296-209-7


การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เวลา	วันพุธที่ 25 มีนาคม 2563 กลุ่มสาขา : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้องนำเสนอ C ชั้น 12 ห้องประชุมทางไกล 1 อาคารนวัตกรรมการศึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บัวศรี	
13.00 – 13.20 น.	SWURES13-032	การประเมินโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธี สถิติไม่เชิงเส้น: กรณีศึกษาอาคารเรียน 4 ชั้น ณัฐฤกษ์ อักษรณรงค์ และศุภชัย สันถาวร
13.20 – 13.40 น.	SWURES13-043	คุณสมบัติของมอร์ตาร์ซ่อมแซมและความเข้ากันได้ของการ ซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต ภัทรพล ไทจิตรวิจารณ์ และศุภชัย สันถาวร
13.40 – 14.00 น.	SWURES13-158	การประเมินดินบวมตัวในเขตพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดสระแก้ว อัฐสิทธิ์ ศิริวัชรารักษ์ ชัยศิริ วัฒนชาญณรงค์ และเอกรินทร์ เหลืองวิไลย์
14.00 – 14.20 น.	SWURES13-192	การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบิร์นเนอร์ กัณฑ์ ภาควิชา ภาควิชาเคมี ศรีธรรมรัตน์ และสมมาส แก้วล้วน
14.20 – 14.40 น.	รับประทานอาหารว่าง	



****กำหนดการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม****

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

- SWURES13-191:** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพช่วงเชื่อมั่นสำหรับประมาณค่าเฉลี่ย
เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา
จิรภา ธรรมนิทรา วาณิชย์ ศรีทองสม ธนวัฒน์ มนูญกิตติวงศ์ ชนาพันธุ์ ชนาเนตร 1409 - 1419
-  **SWURES13-192:** การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร
ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบิร์นเนอร์
กำพล ถาวร ภาคภูมิ ศรีมรินทร์ สมมาส แก้วล้วน 1420 - 1432
- SWURES13-195:** ความรับผิดชอบต่อสังคมขององค์กร ที่มีผลต่อการเสริมสร้างภาพลักษณ์ที่ดี
และความภาคภูมิใจต่อตราสินค้าให้กับองค์กรของลูกค้าบริษัท โอเอสสภา จำกัด (มหาชน)
เมทินี ปานแก้ว จัก พิริยะพรสิริ เกียรติศักดิ์ จันทร์แก้ว 1433 - 1445
- SWURES13-197:** การบริหารงานวิชาการเพื่อพัฒนาความสามารถด้านการอ่านการเขียน
ของผู้เรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 ในโรงเรียนสังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษา
พิษณุโลก เขต 3
พรประภา ศิลารักษ์ สติรพร เขาวนัชัย 1446 - 1455
- SWURES13-198:** ความหลากหลายชนิดและการกระจายพันธุ์ของหอยน้ำจืดฝาดเดียว
ในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์
สิทธิชัย ชูณหะขจร พงศ์พิสิษฐ์ รุ่งเรืองเดชะวัฒนา สุรัตน์ ชื่นรัมย์ ศุภกร สุดเลิศ สุชีรา บุญโชติศิริณู
ธนิต ศิริบุญ 1456 - 1463
- SWURES13-199:** การบริหารหลักสูตรและการจัดประสบการณ์ของครูปฐมวัย
ในโรงเรียนสังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษาตาก เขต 1
พัชรภรณ์ กุณแสงคำ สติรพร เขาวนัชัย 1464 - 1472
- SWURES13-200:** การศึกษาหัตถกรรมसानวัสดุและการผลิตร่วมสมัยสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์
ปภาวรินทร์ วัฒนา 1473 - 1481
- SWURES13-201:** การสื่อสารการตลาดแบบบูรณาการ ความไว้วางใจ และการรับรู้คุณค่า
ของช่องทางออนไลน์ที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้าประเภทเครื่องสำอางผ่านเฟซบุ๊กของผู้บริโภค
ในกรุงเทพมหานคร
พิมพ์ กฤตยาไชยวัฒน์ นิตนา รุณิตชนกร 1482 - 1490

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

**SWURES13-192 การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร
ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซิฟิเออร์เบิร์นเนอร์**

**PERFORMANCE AND EMISSION STUDY OF 200 L CHARCOAL KILN WITH GASIFIER
BURNER**

กัภาพ ทาวอร์* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Kumphol Thaworn, Parkpoom Sriomreun, Sommas Kaewluan*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University.

**Corresponding author, Email: t.kumphol_me@windowslive.com*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนไม้ไผ่ที่เหลือใช้ให้เป็นถ่านไม้ไผ่และน้ำส้มควันไม้โดยใช้เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งทำงานร่วมกับแก๊สซิฟิเออร์เบิร์นเนอร์ เตาชีวมวลแก๊สซิฟิเออร์เบิร์นเนอร์ที่มีออกซิเจนต่ำสามารถผลิตแก๊สร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงสุด 950-1000°C เป็นแหล่งความร้อนได้เตาใช้ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน กระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะสิ้นสุดลงเมื่ออุณหภูมิแก๊สไอเสียสูงถึง 500°C แก๊สไอเสียที่ควบแน่นได้จากเตาเผาถ่านถูกทำให้เย็นลงด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ดิบ แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้มีบางส่วนที่สามารถติดไฟได้ถูกนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลเพื่อผลิตความร้อนและลดมลพิษ จากการทดลองปริมาณร้อยละของผลผลิตถ่าน 23.79, 23.33 และ 22.95 ที่ได้จากไม้ไผ่ที่เหลือใช้ที่ความชื้นแตกต่างกัน 12.80%, 21.49% และ 30.17% ตามลำดับ โดยปริมาณถ่านที่ได้มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ค่าความร้อนของถ่านมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นของไม้ไผ่ที่เหลือใช้จะสามารถผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบได้มากขึ้น คุณสมบัติของถ่านไม้ไผ่และน้ำส้มควันไม้ที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานชุมชน

คำสำคัญ: ไม้ไผ่เลี้ยง ถ่าน น้ำส้มควันไม้ แก๊สซิฟิเออร์เบิร์นเนอร์

Abstract

This study aimed to produce the charcoal and wood vinegar from bamboo residue by using the gasifier burner built in the 200 liters charcoal kiln. In this work, biomass gasifier-burner can be able to produce the high temperature of hot gas at 950-1000 °C with low oxygen content. This hot gas was used as the heat source in charcoal kiln for carbonization process. Each carbonization process would be completed when the exhaust gas temperature of charcoal kiln reached to 500 °C. The exhaust gas was then cooled in the heat exchanger, a first part of exhaust gas (condensable gas) was condensed to the raw wood vinegar while another part of exhaust gas (non-condensable gas) was used as co-fuel in biomass gas stove to produce heat and reduce emission. In the experiment, the percentage by weight of charcoal

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

products are 23.79, 23.33 and 22.95 obtained from the different moisture contents of bamboo residues at 12.80%, 21.49% and 30.17%, respectively. The result showed that amount of charcoal tends to decrease while the calorific value of the charcoal tends to increase with increasing bamboo moisture content. In additions, higher moisture content of bamboo residue can be produced higher amount of raw wood vinegar. Both charcoal and raw wood vinegar properties are in the range of standard value.

Keywords: Hedge bamboo, Charcoal, Wood vinegar, Gasifier-burner.

บทนำ

ฟืนและถ่านไม้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์มาเป็นเวลานานแล้ว โดยเฉพาะในการหุงต้มเพื่อประกอบอาหาร แต่การใช้ฟืนนั้นมักนำมาซึ่งปัญหาทั้งด้านควัน เขม่าและความสกปรก ที่มีมากกว่าถ่านไม้จึงทำให้ผู้ที่ใช้ฟืนเห็นมาใช้ถ่านไม้กันมากขึ้นโดยเฉพาะในส่วนของภาคครัวเรือน แม้ต่อมา มีการส่งเสริมให้ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวในการหุงต้มทดแทน ซึ่งให้ความร้อนได้ดีกว่าถ่านไม้มาก ทำให้การใช้ถ่านไม้ในครัวเรือนลดน้อยลง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการใช้ถ่านไม้ก็ยังคงมีบทบาทที่สำคัญอยู่ในครัวเรือนตามชนบท และการทำอาหารประเภทบึงย่างในสังคมเมือง ซึ่งนอกจากถ่านไม้จะได้มีการใช้ภายในประเทศแล้วยังเป็นสินค้าที่ส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศด้วย โดยในช่วงปี 2561 มีการส่งออกถ่าน 1.4 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ [1]

กระบวนการเผาถ่านได้มีวิวัฒนาการมาโดยตลอดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการพัฒนาเตาเผาถ่าน จากแบบดั้งเดิม เช่น เตาหลุม เตาดิน และเตาอิฐ เป็นต้น โดยเตาเหล่านี้จะใช้ไม้ขนาดใหญ่ในการเผาซึ่งจะส่งผลให้มีการตัดไม้ทำลายป่าตามความต้องการในการใช้ถ่านไม้ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการทำลายธรรมชาติที่ส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเตาเผาถ่านแบบใช้ถ่าน 200 ลิตร ที่ใช้ในการเผาถ่านโดยใช้ไม้ที่มีขนาดเล็ก เช่น กิ่งไม้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวล การเผาถ่านด้วยเตาเผาแบบใช้ถ่าน 200 ลิตร จึงเป็นที่นิยมของชาวบ้าน อย่างไรก็ตามการเผาถ่านด้วยเตาลักษณะนี้ยังมีปัญหาและข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง ทั้งระยะเวลาในการเผาถ่านที่ยาวนานประมาณ 8-10 ชั่วโมง [2] ทำให้เสียเวลาในการเผ่าเตา ระหว่างการเผาถ่านนั้น จะมีการสูญเสียความร้อนค่อนข้างมากออกจากผนังเตาเนื่องจากไม้มีการหุ้มฉนวนกันความร้อน ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้เผาถ่านโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งนี้การเผาถ่านแบบเตาขนาด 200 ลิตร ยังปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ในที่นี้มลพิษที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้น ส่วนหนึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่สามารถควบแน่นออกมาในรูปแบบของน้ำส้มควันไม้ได้โดยอุณหภูมิช่วง 350-450 °C จะให้ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ได้มากที่สุด [3] ในปัจจุบันเตาเผาถ่านที่ใช้ถ่าน 200 ลิตร ยังไม่สามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ยังมีองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้บางส่วนหลุดออกมาในรูปแบบของมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และถ้าสามารถเก็บเกี่ยวน้ำส้มควันไม้ได้ในปริมาณที่สูงที่สุด ก็จะสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทั้งยังมีการสูญเสียมวลถ่านจากการควบคุมความร้อนหน้าเตาด้วยการเผาเชื้อเพลิงจึงมีออกซิเจนส่วนเกินผ่านเข้าไปภายในเตาเผาถ่านทำให้ถ่านบางส่วนถูกเผาไหม้กลายเป็นแก๊ส และจากปัญหาที่ได้กล่าวมานั้นยังจะสังเกตได้ว่าปัญหาการสูญเสียมวลถ่าน การสูญเสียความร้อนและการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมนั้น เป็นปัจจัยที่สามารถนำมาปรับปรุงชุดอุปกรณ์การเผาถ่านให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า อุณหภูมิเตาส่งผลต่อระยะเวลาของการผลิตถ่าน การใช้เทคนิคแก๊สซิฟิเคชันในกระบวนการผลิตถ่านจะช่วยเพิ่มความร้อนภายในเตาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นเทคนิคและกระบวนการที่ลดเวลาการผลิตถ่าน [4] คุณสมบัติของถ่านไม้ที่มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับใช้ในครัวเรือน (ถ่านหุงต้ม) จะต้องมีค่าความหนาแน่น ปริมาณคาร์บอนคงที่ และค่าความร้อนสูง ขณะที่ค่าความชื้น สารระเหยและปริมาณแฉะต่ำ

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

[5] อิทธิพลที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไม้ เช่น ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น ขนาดของชิ้น ส่วนองค์ประกอบทางเคมีกายและตัวแปรของกระบวนการคาร์ไบไนเซชันเช่นอุณหภูมิ [6-7] โดยปกติอุณหภูมิของไม้ที่จะกลายเป็นถ่านจะอยู่ที่ 400 °C ถ้าจะลดปัญหาของสารระเหยและน้ำมันดิน หรือ ทาร์ จะต้องทำให้อุณหภูมิสูงถึง 500 °C [8] ยิ่งอุณหภูมิของกระบวนการคาร์ไบไนเซชันสุดท้ายสูงเท่าใดปริมาณคาร์บอนคงที่ก็จะสูงขึ้น ผลผลิตมีน้ำหนักลดลงและปริมาณสารระเหยของถ่านลดลง [7] อิทธิพลที่มีผลต่อกระบวนการผลิตถ่านและคุณภาพของถ่านขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเตา อุณหภูมิของถ่านไม้ และคุณสมบัติของไม้ที่นำมาผลิตถ่าน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นที่จะศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบียร์เนอร์ ซึ่งเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเผาถ่านไม้ไฟเลี้ยงที่มีความชื้นแตกต่างกัน 3 ระดับ เพื่อให้ได้ผลผลิตถ่านที่มีคุณภาพและมีผลพลอยได้เป็นน้ำส้มควันไม้ โดยให้มีมลพิษปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต่ำสุด ทั้งนี้ทางคณะผู้วิจัยคาดว่าผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์กับเกษตรกร โดยช่วยให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้นจากการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ อีกทั้งยังสามารถลดปริมาณมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมและยังสามารถลดระยะเวลาในการเผาถ่านได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบียร์เนอร์ พร้อมชุดควบคุมและน้ำส้มควันไม้
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้
3. เพื่อหาสมรรถนะและการปล่อยมลพิษจากเตาเผาถ่านและผลิตน้ำส้มควันไม้

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ (Material)

ไม้ไฟนั้นเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญด้านความหลากหลายทางชีวภาพ ระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และสังคมของไทย ในประเทศไทยพบชนิดไม้ไฟที่หลากหลายขึ้นกระจายตามภูมิภาคต่าง ๆ มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตทั้งในวิถีบริโภค อาหารการกิน ขนมหางของเด็ก เครื่องมือ เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องจักรสานหัตถกรรม เครื่องมือจับสัตว์น้ำ แหล่งผลิตถ่าน และไม้ฟืน ไม้ไฟยังมีศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนและช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง

ไม้ไฟเลี้ยง เป็นไม้เศรษฐกิจที่นิยมปลูกเพื่อขายลำต้นและหน่อ มีอายุยืนยาว ลำต้นตรง สีเขียวเข้ม ไม่มีหนาม เนื้อลำหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 3-7 เซนติเมตร สูง 8-12 เมตร มีเหง้าใต้ดิน แดงออกขึ้นเป็นกอ ออกหน่อเหนือดิน ไม้ไฟที่มีอายุมากกว่า 3 ปี จะนิยมตัดส่วนของลำต้นที่ตรงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ส่วนโคน ปลาย และลำต้นที่คดงอ จะถูกทิ้งไว้ที่สวนโดยไม้ไฟนำมาใช้ประโยชน์ชาวสวนจะนิยมกำจัดส่วนนี้ทิ้งโดยการเผาทำลาย ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

องค์ประกอบของไม้ทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

1. ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไม้ โดยไม้ส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์
2. สารระเหย (Volatile Matter) คือ ส่วนที่โมเลกุลถูกเผาไหม้ได้ง่ายดังนั้นไม้ไฟไม่มีค่า Volatile Matter สูง แสดงว่าติดไฟได้ง่าย
3. คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของไม้ ประกอบด้วย คาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงที่ต่ำหรือจะสันดาปได้ไม่ดี มีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำ ความเร็วในการ

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ติดไฟช้าเนื่องจากความชื้นมากปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยาก โดยจะคงเหลืออยู่ในของเสียหลังจากที่เผาสารระเหยออกไปแล้วที่อุณหภูมิ 750 °C ของเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน

4. ซี้ดำ (Ash) เป็นส่วนประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในไม้ที่ถูกออกซิไดซ์สมบูรณ์ ไม้ส่วนใหญ่จะมีซี้ดำประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของไม้ไผ่เลี้ยง

คุณสมบัติ	เปอร์เซ็นต์
ความชื้น (Moisture)	0
สารระเหย (Volatile Matter)	78.34
ถ่านคงตัว (Fixed Carbon)	19.70
เถ้า (Ash)	1.96
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	6.03
คาร์บอน (Carbon)	51.15
ไนโตรเจน (Nitrogen)	0.00
ออกซิเจน (Oxygen)	40.86
ซัลเฟอร์ (Sulfur)	0.00
ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)	19,120.88
ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)	17,614.64

ไม้ไผ่ ไม้พิน และถ่านไม้ไผ่

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) โดยหลักการเผาไหม้ (CHNS/O Analyzer) มีวิธีทดสอบ/วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน (ASME D5373 D4239) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ LECO-CHN628S การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) มีวิธีทดสอบ/วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน (ASTM D3172-3175) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ CARBOLITE-Tube Furnace Model CFT12/75/700 และ CARBOLITE-Ashing Furnace Model AAF12/18, การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Higher Heating Value) มีวิธีทดสอบวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASME D5865 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Bomb Calorimeter LECO-AC500 โดยส่งวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม และศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำส้มควันไม้ วิธีทดสอบ/วิเคราะห์

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำส้มควันไม้ มผช.659/2553 วิเคราะห์ลักษณะ, กลิ่น, ความเป็นกรด-ด่าง, ความต่างจำเพาะ โดยการทดสอบความเป็นกรด-ด่าง จะใช้เครื่องทดลองยี่ห้อ HANNA รุ่น HI98103 วิธีการทดสอบ ต้องมีการเทียบวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ตามค่ามาตรฐานในช่วง 2.0 และ 3.0 ก่อนทำการทดลอง การวัดค่าความต่างจำเพาะจะวัดด้วยเครื่อง Hydrometer วิธีการทดสอบต้องมีการเทียบวัดความต่างจำเพาะ ตามค่ามาตรฐาน โดยสารตัวกลางคือน้ำ ให้ได้ค่าเท่ากับ 1.000

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

แก๊สไอเสีย วิธีทดสอบ/วิเคราะห์

หาปริมาณแก๊สไอเสียที่ควบแน่นไม่ได้ก่อนและหลังใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล เพื่อวิเคราะห์หาแก๊สไอเสีย CH_4 , CO , H_2 และ N_2 ด้วยเครื่อง Gas Analyzer ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process)

คาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการสลายตัวของไม้ด้วยความร้อนในสภาพจำกัดอากาศซึ่งมีกระบวนการดังนี้

1. การไล่ความชื้น เป็นการให้ความร้อนแก่ไม้ที่อุณหภูมิบรรยากาศจนถึง $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงนี้ไม้จะคายน้ำควันที่ออกมาจะมีสีขาวปนน้ำเงินอ่อนซึ่งจะมีแต่ไอน้ำ ไม่มีกลิ่นฉุน ไม่แสบตาและจุก

2. การไล่สารระเหย เป็นการให้ความร้อนแก่ไม้ที่อุณหภูมิประมาณ $110\text{-}270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ควันที่ออกมาในช่วงนี้จะเริ่มมีสีจางๆ เจือปนอยู่ด้วย และจะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กรดน้ำส้ม (Acetic acid) และเมทานอล (Methanol) เจือปนออกมากับควันด้วย แต่มีปริมาณต่ำมาก

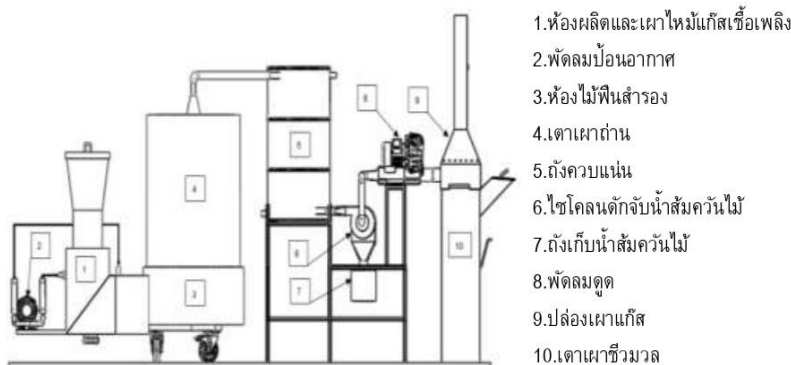
3. การเริ่มสลายตัว เป็นการคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $270\text{-}290\text{ }^{\circ}\text{C}$ วิวัฒนาการความร้อนจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเองจากไม้อย่างต่อเนื่อง แก๊สผสมไอระเหยและทาร์บางส่วนจะสลายตัวออกจากไม้

4. การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน อุณหภูมิจะอยู่ประมาณ $290\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงนี้ชีวมวลสลายตัวด้วยตัวเองควันที่ออกมาจะมีสีขาวปนเหลือง มีกลิ่นฉุนจัด สามารถติดไฟได้ การดักเก็บน้ำส้มควันไม้ที่มีคุณภาพจะทำได้ในช่วงนี้ อุณหภูมิประมาณ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ หลังจากกระบวนการนี้ชีวมวลจะกลายเป็นถ่านทั้งหมดแล้ว

5. การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ แม้ว่าชีวมวลจะกลายเป็นถ่านแล้วที่อุณหภูมิประมาณ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่ยังคงมีน้ำมันดินในปริมาณที่สูง เมื่อนำไปใช้ปิ้งย่าง น้ำมันดินที่เผาไหม้ในเตาถ่านจะเกิดเป็นสารประกอบเบนโซไพ-เรน (Benzopyrene) และไดเบนซานทราเซน (Dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงยังเป็นที่คุณภาพต่ำควรอบถ่านต่อไปที่อุณหภูมิในช่วง $500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อไปอีกระยะหนึ่งเพื่อไล่น้ำมันดินให้หมดไป

เตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่าน 200 ลิตร เป็นเตาที่ผลิตขึ้นจากวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องถิ่นปัจจุบันได้มีเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร หลากหลายแบบ โดยส่วนใหญ่จะใช้กิ่งไม้และวัสดุเหลือใช้ในการเกษตรเป็นวัสดุค้ำในการเผาถ่านและสามารถเคลื่อนย้ายได้ซึ่งเป็นจุดเด่นของเตาชนิดนี้ ภาพที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองและหลักการเผาถ่านเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบิร์นเนอร์ ของงานวิจัยในครั้งนี้



ภาพที่ 1 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบิร์นเนอร์

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การทำงานของชุดเตาเผาถ่านมีลำดับการดำเนินงานดังนี้ เริ่มต้นโดยการใส่ไม้พินหลักไปยังห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง(1) ใส่ไม้พินสำรองไปยังห้องไม้พินสำรอง(3) และใส่ไม้เผาถ่านในเตาเผาถ่าน(4) ตามลำดับจุดเตาห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิง(1) หลังจากห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง(1) เกิดการลุกไหม้ให้เบ็ดลมจากพัดลมป้อนอากาศ(2) ในขณะที่อากาศถูกป้อนเข้าสู่ห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง(1) โดยอากาศจากพัดลมป้อนอากาศถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน อากาศส่วนแรกถูกป้อนเข้าไปบริเวณห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ในขณะที่อากาศส่วนที่ 2 ถูกป้อนเข้าบริเวณห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง เพื่อให้ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้ได้แก๊สร้อนที่มีระดับอุณหภูมิสูงเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาถ่าน จากนั้นแก๊สร้อนที่มีระดับอุณหภูมิสูงไหลผ่านห้องไม้พินสำรอง(3) และเตาเผาถ่าน(4) เพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออกจากไม้พินสำรองในห้องไม้พินสำรอง(3) และจากไม้เผาถ่านภายในเตาเผาถ่าน(4) ช่วงท้ายของการเผาถ่านเมื่อไม้พินหลักในห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง(1) ถูกเผาไหม้หมด อากาศที่ป้อนยังห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง(1) ก็จะผ่านเข้าไปยังห้องไม้พินสำรอง(3) ซึ่งขณะนั้นไม้พินสำรองถูกเปลี่ยนเป็นถ่านแล้ว อากาศที่ผ่านเข้ามาจะทำปฏิกิริยาเผาไหม้ถ่านบริเวณห้องไม้พินสำรอง(3) ทำให้เกิดความร้อนเพื่อไล่สารระเหยจากไม้เผาถ่านบริเวณส่วนบนสุดของเตาเผาถ่าน(4) ซึ่งแก๊สร้อนจากห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง(1) ความชื้น สารระเหย จากห้องไม้พินสำรอง(3) และเตาเผาถ่าน(4) จะไหลออกบริเวณส่วนบนสุดของเตาเผาถ่าน(4) ไปยังถังควบแน่น(5) เพื่อควบแน่นเป็นของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำส้มควันไม้และสารประกอบอื่นๆ และไหลไปทางเดียวกับแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ น้ำส้มควันไม้และสารประกอบอื่นๆ ที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่จะถูกแยกออกจากแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้บริเวณไซโคลอน(6) ซึ่งน้ำส้มควันไม้และสารประกอบอื่นๆที่เป็นของเหลวจะไหลลงด้านล่างของไซโคลอน(6) เข้าสู่ถังเก็บน้ำส้มควันไม้(7) และในขณะที่แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกพัดลมดูด(8) ดูดไปที่ปล่องเผาแก๊ส(9) โดยปล่องเผาแก๊สจะอาศัยความร้อนจากเตาเผาชีวมวล(10) เพื่อทำการเผาแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ที่สามารถติดไฟได้ให้กลายเป็นแก๊ส CO₂ และ H₂O แล้วจึงปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ความชื้นของวัตถุดิบ

$$\% \text{ ความชื้น (ต่อน้ำหนักเปียก)} = (\text{มวลไม้ดิบเริ่มต้น} - \text{มวลที่ไม้ดิบแห้ง}) \times 100 / \text{มวลไม้ดิบเริ่มต้น} \quad (1)$$

พลังงานความร้อนของวัตถุดิบ

$$\text{พลังงานความร้อนของวัตถุดิบ (MJ)} = \text{ค่าความร้อนของไม้แห้ง (MJ/kg)} \times \text{น้ำหนักแห้งของไม้ผลิตถ่าน (kg)} \quad (2)$$

พลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์

$$\text{พลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ (MJ)} = \text{ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่าน (MJ/kg)} \times \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ถ่าน (kg)} \quad (3)$$

ร้อยละของผลผลิตถ่าน

$$\text{ร้อยละของผลผลิตถ่าน (\%)} = \text{ผลผลิตถ่าน (kg)} / \text{มวลไม้ดิบแห้ง (kg)} \quad (4)$$

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

$$\text{ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (\%)} = \text{พลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ (MJ)} / \text{พลังงานความร้อนของวัตถุดิบ (MJ)} \quad (5)$$

วิธีการทดลอง

1. ไม้เชื้อเพลิงหลัก จะใช้เศษไม้ทั่วไปที่หาได้ในพื้นที่ ตัดให้เป็นก้อนที่ขนาดเล็กลง จำนวน 7 กิโลกรัม
2. ไม้เชื้อเพลิงสำรอง จะใช้ไม้เหมือนกันกับไม้เชื้อเพลิงหลัก จำนวน 4 กิโลกรัม
3. ไม้ไฟที่ใช้ผลิตถ่าน ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข.,ค.และง.) ไม้ไฟสดจะถูกนำมาตัดให้มีขนาด 7.5 เซนติเมตร แล้วนำไปตากแดดเพื่อลดความชื้นที่อยู่ในตัวของไม้ไฟ จากการตากไม้ไฟโดยปล่อยให้ตามธรรมชาติพบว่าไม้ไฟที่ความชื้น 30% ± 5%, 20% ± 5% และ 10% ± 5% จะใช้เวลาในการตากไม้ไฟโดยประมาณ 1, 2 และ 4 สัปดาห์ตามลำดับ ก่อนการทดลองจะต้องทำการหาความชื้นของไม้ไฟ เพื่อหาความชื้นก่อนเผาโดยเป็นการสุ่มเลือกไม้ไฟ

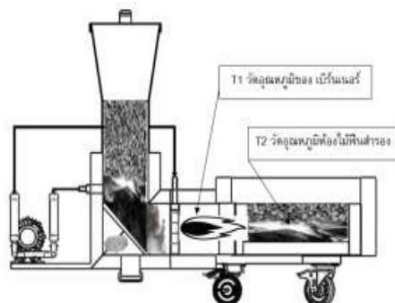
การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ออกมาวัดหาความชื้น โดยจะหาค่าความชื้น 2 ส่วนของไม้ฝืดคือส่วนโคนและส่วนปลายแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเทียบกับน้ำหนักไม้แล้วจะได้ความชื้นเฉลี่ยก่อนการเผาถ่าน



ภาพที่ 2 วัดดูดิบ ชุดอุปกรณ์เตาเผาถ่าน ผลิตภัณฑ์ถ่าน น้ำส้มควันไม้ดิบและเตาน้ำส้มควันไม้

การทำงานของชุดแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์



ภาพที่ 3 ชุดแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์แบบแก๊สไหลลง (Downdraft Gasifier)

เตาแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์แบบแก๊สไหลลง (Downdraft Gasifier) ลักษณะของเตาผลิตแก๊ส ชีวมวลแบบแก๊สไหลลงอากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างโดยผ่านกลุ่มของหัวฉีด (nozzle) บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณโซนการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากโซนการเผาไหม้จะถูกรีดิวซ์ (reduce) ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบน ของโซนการเผาไหม้จะเกิดการกลั่น สลาย และจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส แก๊สที่ผ่านโซนการเผาไหม้ในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลง จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมันลดลงจนเหลือน้อยกว่า 10 % ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลง

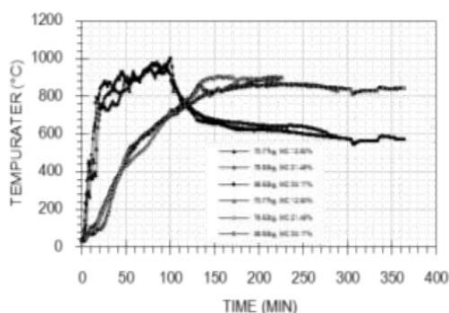
การทำงานของชุดแก๊สซิไฟเออร์เบิร์นเนอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลาดังนี้ ช่วงที่1 เป็นช่วงเวลาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากห้องเชื้อเพลิงหลัก โดยการจุดเตาห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหลักให้เกิดการลุกไหม้

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

แล้วให้เปิดวาล์วควบคุมลมจากพัดลมป้อนอากาศที่มีอัตราการไหล 14 m³/hr. เข้าห้องเชื้อเพลิงหลักขณะที่วาล์วควบคุมอากาศที่ป้อนให้ชุดเบิร์นเนอร์ถูกปิดอยู่ เมื่ออุณหภูมิของเบิร์นเนอร์(T1) ภาพที่ 3 สูงไม่น้อยกว่า 400 °C ให้เปิดวาล์วควบคุมการป้อนอากาศที่มีอัตราการไหล 7 m³/hr. ให้อากาศไหลเข้าไปยังเบิร์นเนอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้แก่สกร๊อนที่มีระดับอุณหภูมิสูงไปใช้ในกระบวนการเผาถ่าน

ช่วงที่ 2 เมื่อไม่ที่ห้องเชื้อเพลิงหลักกลายเป็นถ่านและถ่านลดปริมาณลงมาต่ำกว่าช่องป้อนอากาศให้ทำการปรับวาล์วเพื่อลดอากาศให้มีอัตราการไหล 2 m³/hr. ส่วนที่เบิร์นเนอร์จะมีอัตราการไหล 12 m³/hr. ทำให้อุณหภูมิของ(T1) ลดต่ำลงจนอุณหภูมิเริ่มคงที่ที่ประมาณ 600 °C ภาพที่ 4 อากาศที่ป้อนไปที่เบิร์นเนอร์จะไปเผาไหม้ถ่านที่ห้องไม้พินสำรองทำในช่วงนี้อุณหภูมิ(T2) ภาพที่ 3 มีอุณหภูมิสูงขึ้นและจะเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C ภาพที่ 4 จนเสร็จสิ้นกระบวนการเผาถ่าน

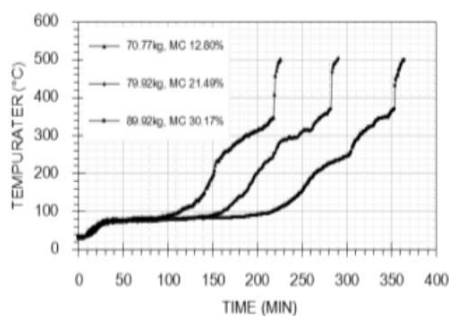
ผลการวิจัย



ภาพที่ 4 อุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลัก

จากการทดลองผลิตแก๊สสกร๊อนด้วยชุดแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์ ที่ไม่เชื้อเพลิงหลัก 7kg. ไม้พินสำรอง 4kg. พบว่าแก๊สสกร๊อนก่อนที่ไหลผ่านห้องเชื้อเพลิงสำรอง(T1) ภาพที่ 3 มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกจนสามารถทำอุณหภูมิได้ประมาณ 800°C และสามารถทำอุณหภูมิของกระบวนการได้สูงสุด 950-1,000°C ภาพที่ 4 เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100นาที อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงและจะคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 600°C ตลอดการทดลอง ในขณะที่อุณหภูมิที่ห้องเชื้อเพลิงสำรอง(T2) ภาพที่ 3 เวลาผ่านไปประมาณ 120นาที อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นจนสูงกว่า(T1) ภาพที่ 4 อุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 800°C และจะคงที่ตลอดการทดลอง อุณหภูมิไม้เผาถ่านที่ความชื้น 12.80% จะใช้ระยะเวลาในการเผาถ่านน้อยกว่าเส้นของอุณหภูมิไม้เผาถ่านที่ความชื้น 21.49% และ 30.17% เวลาที่ใช้ในการเผาถ่าน 226, 290 และ 364 นาทีตามลำดับ ซึ่งเวลาในการเผาจะยาวขึ้นตามความชื้นของไม้ไฟที่สูงขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาน้ำหนักแห้งของไม้เผาถ่านเทียบกับน้ำหนักถ่านหลังเผาถ่านแล้ว พบว่า การเผาที่ความชื้น 12.80%, 21.49% และ 30.17% จะได้ปริมาณของถ่านต่อไม้เผาถ่านแห้ง 23.78%, 23.33% และ 22.95% ตามลำดับ จากผลการทดลองถ่านมีแนวโน้มลดลงตามความชื้นของไม้ไฟที่สูงขึ้นและเวลาในการเผาถ่านที่ยาวนานขึ้น

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ภาพที่ 5 อุณหภูมิของปากปล่องเตา

จากการวัดอุณหภูมิที่ปากปล่องของเตาเผาผ่านพบว่าอุณหภูมิซึ่งเวลาเริ่มต้น ภาพที่ 5 จะมีค่าใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกันจะเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากไม้เผาถ่าน เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที อุณหภูมิของความชื้นไม้เผาถ่านที่ 12.80% จะเพิ่มสูงขึ้น และอุณหภูมิของไม้เผาถ่านที่ 21.49%, และ 30.17% จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามเวลาที่เวลา 160 และ 240 นาทีตามลำดับ ช่วงนี้เป็นกระบวนการไล่สารระเหยและการเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่าน เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 220, 280 และ 350 นาทีตามลำดับ อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนสิ้นสุดกระบวนการ โดยอุณหภูมิสุดท้ายก่อนปิดเตาสามารถวัดอุณหภูมิได้ 502.7, 504.9 และ 500.4 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณถ่านที่ได้จากกระบวนการผลิต

คุณสมบัติ	ระดับความชื้น		
	12.80%	21.49%	30.17%
น้ำหนักของไม้ผลิตถ่าน (kg)	70.77	79.92	89.92
น้ำหนักแห้งของไม้ผลิตถ่าน (kg)	61.71	62.75	62.79
ค่าความร้อนของไม้แห้ง (MJ/kg)	17.25	17.25	17.25
พลังงานความร้อนของวัตถุดิบ (MJ)	1,064.65	1,082.59	1,083.28
น้ำหนักผลิตภัณฑ์ถ่าน (kg)	14.68	14.64	14.41
ค่าความร้อนของถ่าน (MJ/kg)	31.62	31.86	31.93
พลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ (MJ)	464.03	466.45	460.05
ร้อยละของผลผลิตถ่าน (%)	23.79	23.33	22.95
ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%)	43.58	43.09	42.47

จากการทดลองผลผลิตที่ได้จากการเผาถ่านที่ความชื้น 3 ระดับ ตารางที่ 2 พบว่าที่ความชื้นของไม้เผาถ่าน 12.80%จะได้ผลผลิตที่สูงที่สุดและจะลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่าน จากการวิเคราะห์คุณภาพและการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของถ่าน ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความชื้น, คาร์บอนคงตัว, สารระเหย และเถ้า พบว่าค่าความร้อนของไม้แห้งมีค่า 17.25 MJ/kg หลังจากเปลี่ยนไม้ให้กลายเป็นถ่านพบว่าค่าความร้อนของถ่านเพิ่มสูงขึ้นโดยที่ความชื้น 12.80%, 21.49% และ 30.17% มีค่า 31.62, 31.86 และ 31.93 MJ/kg ตามลำดับ จากคุณสมบัติ

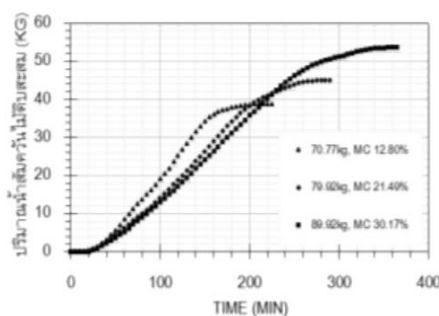
การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ของถ่านพบว่าเมื่อไม้เผาถ่านมีความชื้นที่สูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของพลังงานส่งผลให้มีค่าลดลงเรื่อยๆตามความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบของถ่าน

ความชื้นของไม้ผลิตถ่าน	น้ำหนักผลิตถ่าน (kg)	Moisture Content (%)	Fixed Carbon (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)
12.80%	14.68	4.04	83.05	6.08	6.84
21.49%	14.64	3.61	84.70	6.41	5.30
30.17%	14.41	3.43	85.23	6.55	4.48

ผลการทดลอง จากตารางที่ 3 พบว่าองค์ประกอบของถ่านที่ความชื้นของไม้ผลิตถ่านที่ 30.17% จะมีค่าของ Fixed Carbon และ Ash ที่สูงที่สุดและจะลดต่ำลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่ 21.49% และ 12.80% ตามลำดับ และยังพบว่าที่ความชื้น 30.17% จะมีค่าของ Moisture Content และ Volatile Matter น้อยกว่าไม้เผาถ่านที่มีความชื้น 21.49% และ 12.80% ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ปริมาณน้ำที่ระเหยในไม้ดิบสะสม

จากผลการทดลองพบว่า ที่ความชื้น 12.80%, 21.49% และ 30.17% สามารถเก็บน้ำที่ระเหยในไม้ดิบได้ 38.85, 44.94 และ 53.59 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 54.89%, 56.23% และ 59.60% ตามลำดับ ภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาไม้ที่ระเหยน้ำที่เก็บได้จากการกระบวนการเผาถ่าน พบว่าเมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลผลิตของน้ำที่ระเหยในไม้ดิบมีปริมาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของน้ำที่ระเหยในไม้ที่ได้จากการกระบวนการเผาถ่าน

ความชื้นของไม้เผาถ่าน	ปริมาณน้ำที่ระเหยในไม้ดิบ (kg)	ค่าความเป็นกรด	ค่าความต่างจำเพาะ
12.80%	38.85	2.59	1.022
21.49%	44.94	2.68	1.015
30.17%	53.59	2.90	1.013

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

จากตารางที่ 4 พบว่าค่า ความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้ที่ความชื้น 12.80%, 21.49% และ 30.17% จะมีค่า 2.59, 2.68 และ 2.90 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความชื้นของไม้เผาถ่านที่สูงขึ้นค่าความเป็นกรดจะมีแนวโน้มลดลงตาม และค่าความต่างจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่สูงขึ้นคือ 1.022, 1.015 และ 1.013 ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้ค่าความเป็นกรดและความต่างจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำส้มควันไม้ มผช.659/2553

แก๊สไอเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตถ่านจะสามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิด คือแก๊สที่สามารถควบแน่นได้และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ซึ่งแก๊สที่สามารถควบแน่นได้จะได้ผลผลิตออกมาเป็นน้ำส้มควันไม้ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งมีปริมาณ 24.37%, 25.45% และ 24.38% ตามความชื้นของไม้เผาถ่าน ที่จะต้องปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นบางส่วนสามารถดัดไฟได้จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล พบว่าก่อนการเผาไม้มีปริมาณ CO_2 , CO , H_2 และ CH_4 มีค่า 13.4%, 11.18%, 7.35% และ 1.758% ตามลำดับ หลังจากการเผาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวล พบว่าปริมาณแก๊ส CO_2 , CO , H_2 และ CH_4 มีค่า 19.8%, 0.06%, 0% และ 0.409% ตามลำดับ ดังนั้นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ก็นำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเตาชีวมวลจะส่งผลต่อการลดมลพิษก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดลองชุดแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์สามารถผลิตแก๊สร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูง โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 950-1,000 °C เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการเผาถ่าน โดยความร้อนไหลผ่านห้องเชื้อเพลิง สารรองและเตาเผาถ่าน ซึ่งแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงนี้ช่วยให้กระบวนการเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่านมีระยะเวลาที่สั้นลงแต่ทั้งนี้ระยะเวลาขึ้นอยู่กับความชื้นของไม้เผาถ่านด้วย เมื่อพิจารณาที่ความชื้นวัตถุดิบใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 30 พบว่าเวลาในการเผาถ่านไม้ไม่ผลลดลงจาก 27 ชั่วโมง เหลือเพียง 6 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่าน [9] เนื่องจากความแตกต่างของแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาถ่านโดย [9] ใช้การเผาเชื้อเพลิงหน้าเตาและส่งถ่ายความร้อนเข้าสู่เตาเผาถ่าน

เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้น 10% ทำให้เวลาในการเผาถ่านเพิ่มขึ้นประมาณ 1 ชั่วโมง ผลผลิตถ่านมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มขึ้น คุณภาพถ่านเมื่อพิจารณาที่ค่าความร้อน (พลังงานต่อหน่วยน้ำหนักถ่าน) พบว่าถ่านไม้ไฟที่ได้จากไม้ไฟที่ความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นไปจะให้ค่าความร้อนที่มีแนวโน้มสูงขึ้นไปเล็กน้อย จาก 31.62 เป็น 31.93 MJ/kg แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานจากพลังงานในไม้เป็นพลังงานในถ่านพบว่าไม้ค่าประมาณ 43.58% ที่ค่าความชื้นของไม้เผาถ่านร้อยละ 12.80 และค่าประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความชื้นของไม้เผาถ่านเพิ่มขึ้นและเวลาในการเผาถ่านเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ [9] ที่เผาถ่านไม้ไฟที่ค่าความชื้นร้อยละ 30 ด้วยระยะเวลาในการเผาถ่าน 27 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานลดลงเป็นร้อยละ 40.59 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านที่ได้จากการทดลองพบว่าที่ร้อยละของความชื้นไม้ไฟเผาถ่านระหว่าง 12.80-30.17 จะมีค่าร้อยละของ Fixed Carbon ระหว่าง 83.05-85.23 ค่าร้อยละของ Moisture Content ระหว่าง 3.43-4.04 และค่าร้อยละของ Volatile Matter มีค่าอยู่ในช่วง 4.48-6.84 ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ถ่านชุมชน ถ่านหุงต้ม (มผช.657/2547) แต่ด้วย Ash ที่มีแนวโน้มที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นทำให้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านบั้งย่าง (มผช.658/2547) อันเนื่องมาจากในตัวไม้ไฟเลี้ยงโดยปกติจะมีองค์ประกอบของถ่านสูงที่ร้อยละ 1.96 จึงทำให้ปริมาณถ่านในถ่านหลังจากการเปลี่ยนไม้เป็นถ่านมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเป็นร้อยละ 6.08-6.55 ทำให้ถ่านไม้ไฟเลี้ยงมีค่าร้อยละของถ่านสูงกว่าค่ามาตรฐานของถ่านในถ่านบั้งย่างที่กำหนดค่าไว้ไม่เกินร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการควบแน่นไอเสียที่ออกจากเตาเผาถ่านซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่าน

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โดยทั่วไปแก๊สไอเสียนี้จะถูกปล่อยทิ้งไปพร้อมกับแก๊สที่ควบแน่นไม่ทำให้ส่งผลให้กระบวนการเผาถ่านแบบเดิมปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมสูง การควบแน่นสารที่ควบแน่นได้ออกจากแก๊สไอเสียจากการเผาถ่านจะได้น้ำส้มควันไม้ดิบ (Raw wood vinegar) โดยปริมาณน้ำส้มควันไม้ดิบที่ได้จากการควบแน่นมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามความชื้นของไม้เผาถ่าน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 54.89-59.60 โดยน้ำส้มควันไม้ถูกต้มไว้ในที่มืด 3 เดือน จากนั้นแยกเฉพาะส่วนของน้ำส้มควันไม้ออกมาวัดคุณภาพ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 2.59-2.90 และค่าความตึงผิวเฉพาะมีค่าอยู่ในช่วง 1.013-1.022 โดยมีแนวโน้มค่าความเป็นกรดและค่าความตึงผิวเฉพาะลดลงตามความชื้นของไม้เผาถ่านที่เพิ่มสูงขึ้น โดยน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงที่ค่าความชื้น 3 ระดับมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำส้มควันไม้ มผช.659/2553 ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม้ได้มีบางส่วนที่สามารถติดไฟได้ซึ่งจะถูกเผาเพื่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยใช้เตาชีวมวลช่วยในการเผาเพื่อลดมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

สรุปผลการวิจัย

1. จากการเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงที่น้ำหนักไม้แห้งประมาณ 62 kg มีความชื้นเริ่มต้น 3 ระดับ คือร้อยละ 12.80, 21.49 และ 30.17 (ความชื้นมาตรฐานเปียก) ด้วยเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตรที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบียร์เนอร์ พบว่าร้อยละของถ่านที่ได้มีแนวโน้มลดลงจาก 23.79, 23.33 และ 22.95 ตามลำดับ เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการเผาถ่านไม้ที่มีค่าความชื้นมากมีระยะเวลาในการเผาถ่านที่มีค่าความชื้นน้อยซึ่งระยะเวลาการเผาถ่านที่เพิ่มขึ้นจาก 226, 290 และ 364 นาทีตามลำดับ
2. ถ่านที่ได้จากการเผาถ่านด้วยเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตรที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เบียร์เนอร์เป็นถ่านที่มีค่าความชื้น ค่าความร้อน แฉะ และสารระเหย ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชุมชนถ่านหุงต้ม (มผช.657/2547) และหากพิจารณาตามมาตรฐานถ่านบึงย่าง (มผช.658/2547) พบว่ามีเพียงค่าของแฉะที่ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากไม้ไผ่แห้งมีค่าสูงถึงร้อยละ 1.96 ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณแฉะที่ได้จากการวิเคราะห์ถ่านไม้ไผ่ มีค่าร้อยละ 6.08-6.55 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานถ่านบึงย่างที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 3
3. น้ำส้มควันไม้ดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่าน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 54.89, 56.23 และ 59.60 ตามลำดับ เมื่อความชื้นของไม้เผาถ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นในไม้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำส้มควันไม้ที่ควบแน่นได้มีปริมาณมากขึ้น
4. คุณภาพน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาถ่านไม้ไผ่เลี้ยงที่ความชื้นร้อยละ 12.80, 21.49 และ 30.17% มีค่าความเป็นกรด 2.59, 2.68 และ 2.90 ตามลำดับ และมีค่าความตึงผิวเฉพาะ 1.022, 1.015 และ 1.013 ตามลำดับ โดยมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำส้มควันไม้ (มผช. 659/2553)
5. มลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากแก๊สไอเสียจากเตาเผาถ่านถูกแยกแก๊สที่ควบแน่นได้ไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำส้มควันไม้ ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม้ได้ซึ่งมีองค์ประกอบแก๊ส CO₂, CO, H₂, และ CH₄ มีค่า 13.4%, 11.18%, 7.35% และ 1.758% ตามลำดับ ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับไม้ในเตาชีวมวล โดยพบว่าไอเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศมีองค์ประกอบของแก๊ส CO₂, CO, H₂, และ CH₄ มีค่า 19.8%, 0.06%, 0% และ 0.409% ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานฯ จากบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2563

การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 13
วันที่ 25-26 มีนาคม 2563 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2562). สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย เดือนมกราคม- ธันวาคม 2561. สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2562, จาก https://www.dede.go.th/download/stat62/sit_2_61_dec.pdf
- [2] อนุสรณ์ สินสะอาด. (2560, กรกฎาคม-ธันวาคม). การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว. วารสารวิชาการคณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. 10(2): 95-108.
- [3] Qiaomei Wu et al. (2015, March). Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process. *Bioresource Technology*. (179): 98-103.
- [4] พิสิษฐ์ มณีโชติ; และคณะ. (2558). การพัฒนาเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบแนวตั้ง ด้วยเทคนิคแก๊สซีพีเคชั่น. ใน เอกสารการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8. หน้า 114-117. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [5] Rafael Amorim Rosa et al. (2012, May). Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*. Tocantins. 2(3): 41-48.
- [6] Peter McKendry. (2002, May). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 1(83): 37-46.
- [7] M. R. Assis et al. (2016, March). *Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review*. *Wood Science and Technology*. 3(50): 519-536.
- [8] สำนักงานวิจัยสิ่งแวดล้อมกรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข. (2555). แนวทางการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภท การเผาถ่านหรือการสะสมถ่าน. กรุงเทพฯ: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
- [9] Supin Sangsuk et al. (2018, December). The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production. *Energy for Sustainable Development*. (47): 149-157



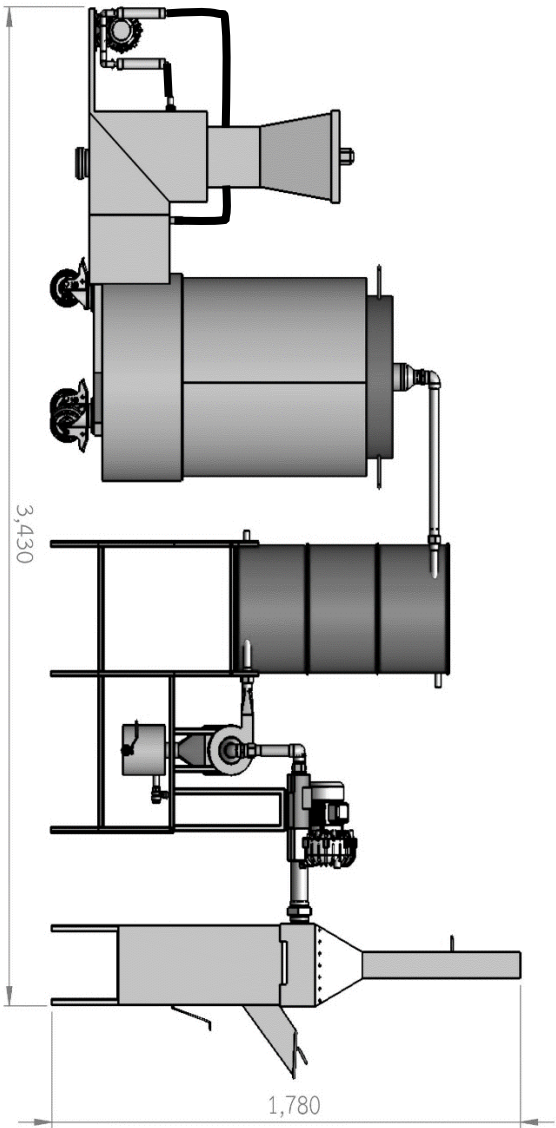
ISBN : 978-616-296-209-7

สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
114 สุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ
เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110
โทรศัพท์ (02) 649-5000 ต่อ 11014 - 11019
โทรสาร (02) 259-1822

Research
SWU



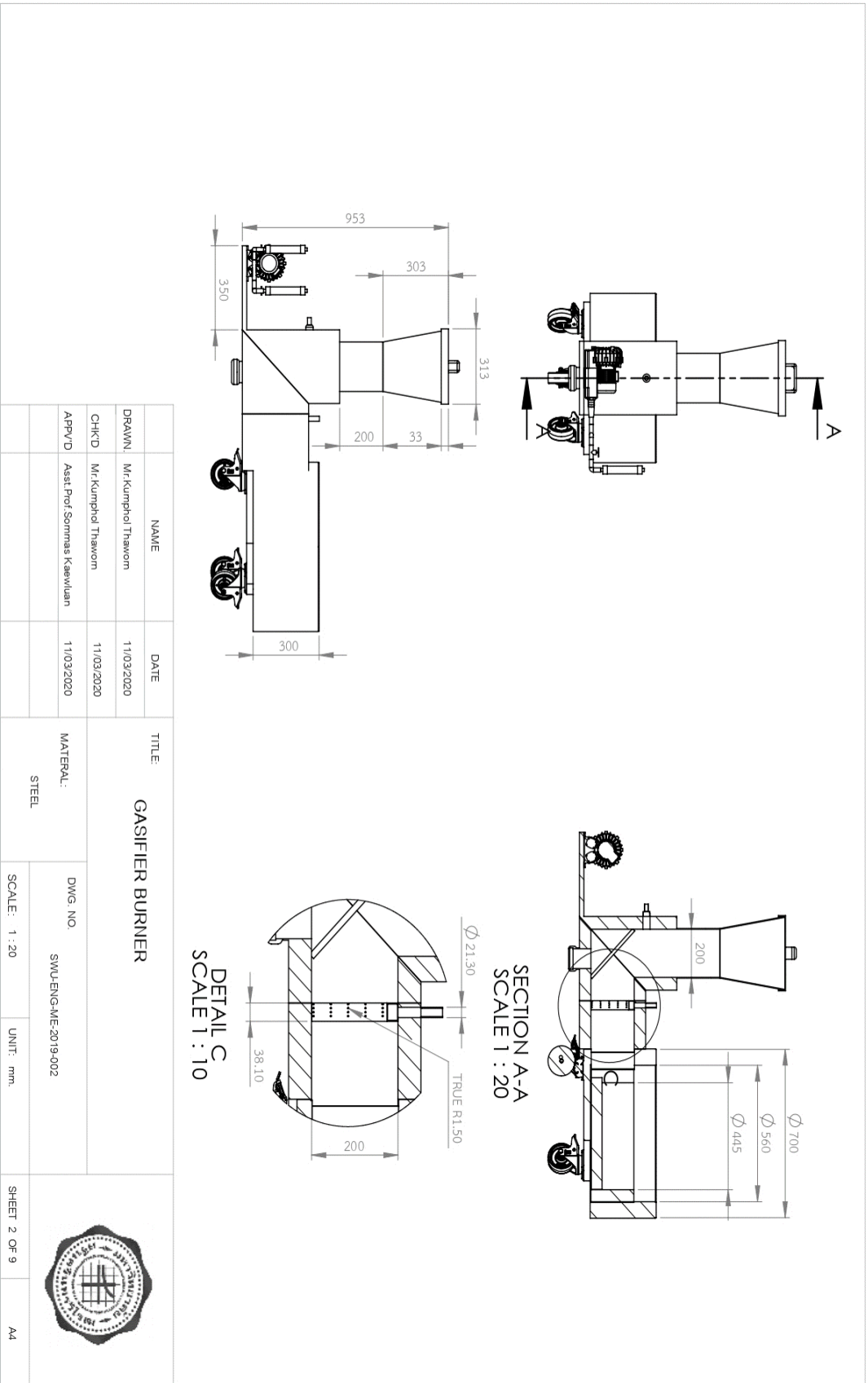
ภาคผนวก ง.
ชิ้นส่วนอุปกรณ์เตาเผาถ่าน

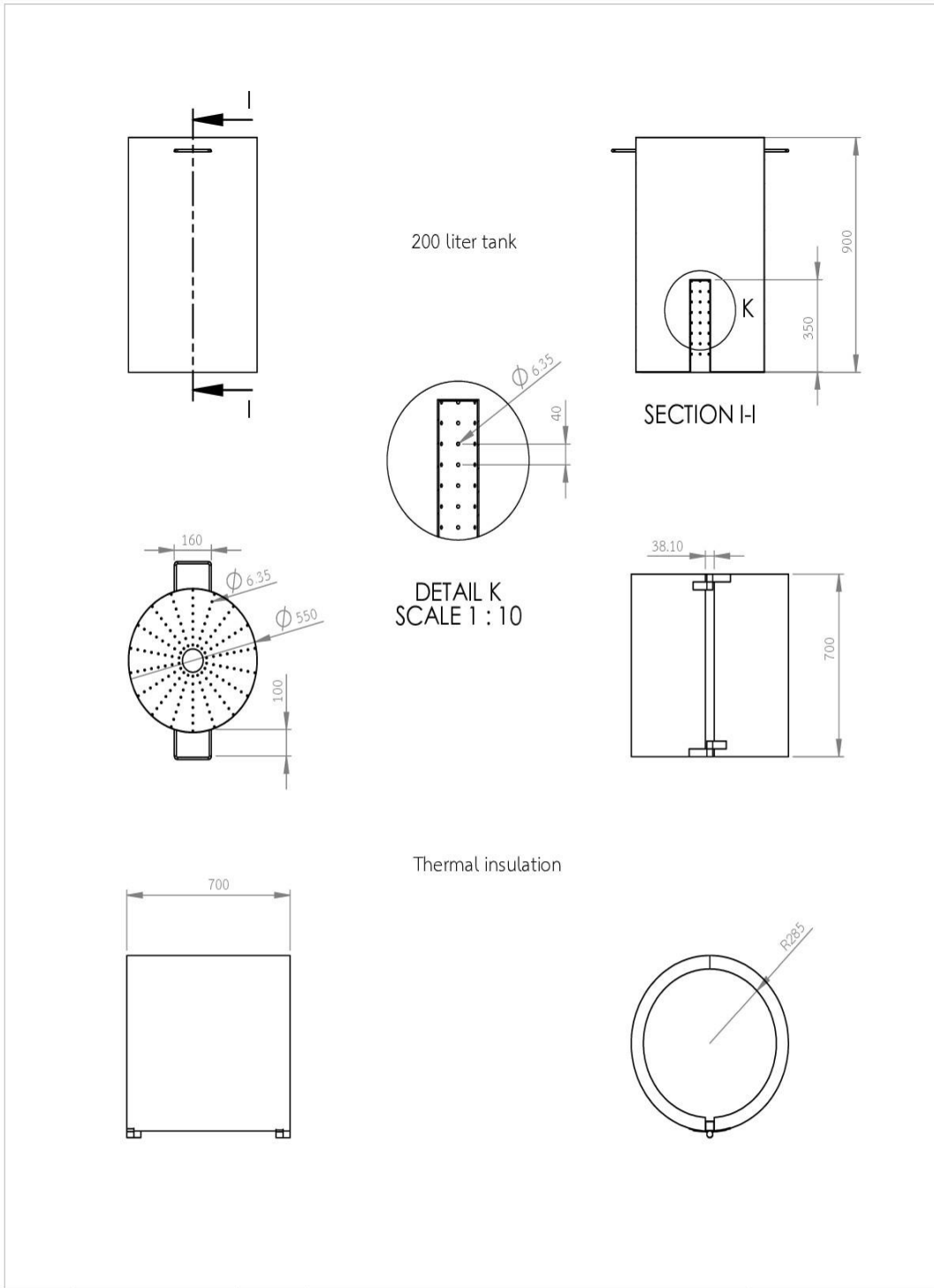


ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Kiln 200L	1
2	200 L Tank	1
3	Heat Insulation	1
4	Caps	1
5	Red. Couplings 3x1 1/4"	2
6	Bushings 1"	4
7	Nipples 1"	6
8	elbows 90 1"	6
9	Pipe 1 in 001	1
10	base charcoal.	1
11	condenser 100L Tank	1
12	cyclone horizontal 6"	1
13	Union Flat Seat 1"	4
14	Blower NVT-085	1
15	Pipe 1" 002	1
16	Pipe 1" 003	1
17	Red. Couplings 2x1"	1
18	Pipe 2 " 001	1
19	Biomass burners	1
20	Union Flat Seat 2 "	1
21	Biomass Base	1
22	Valve 1/2 "	4

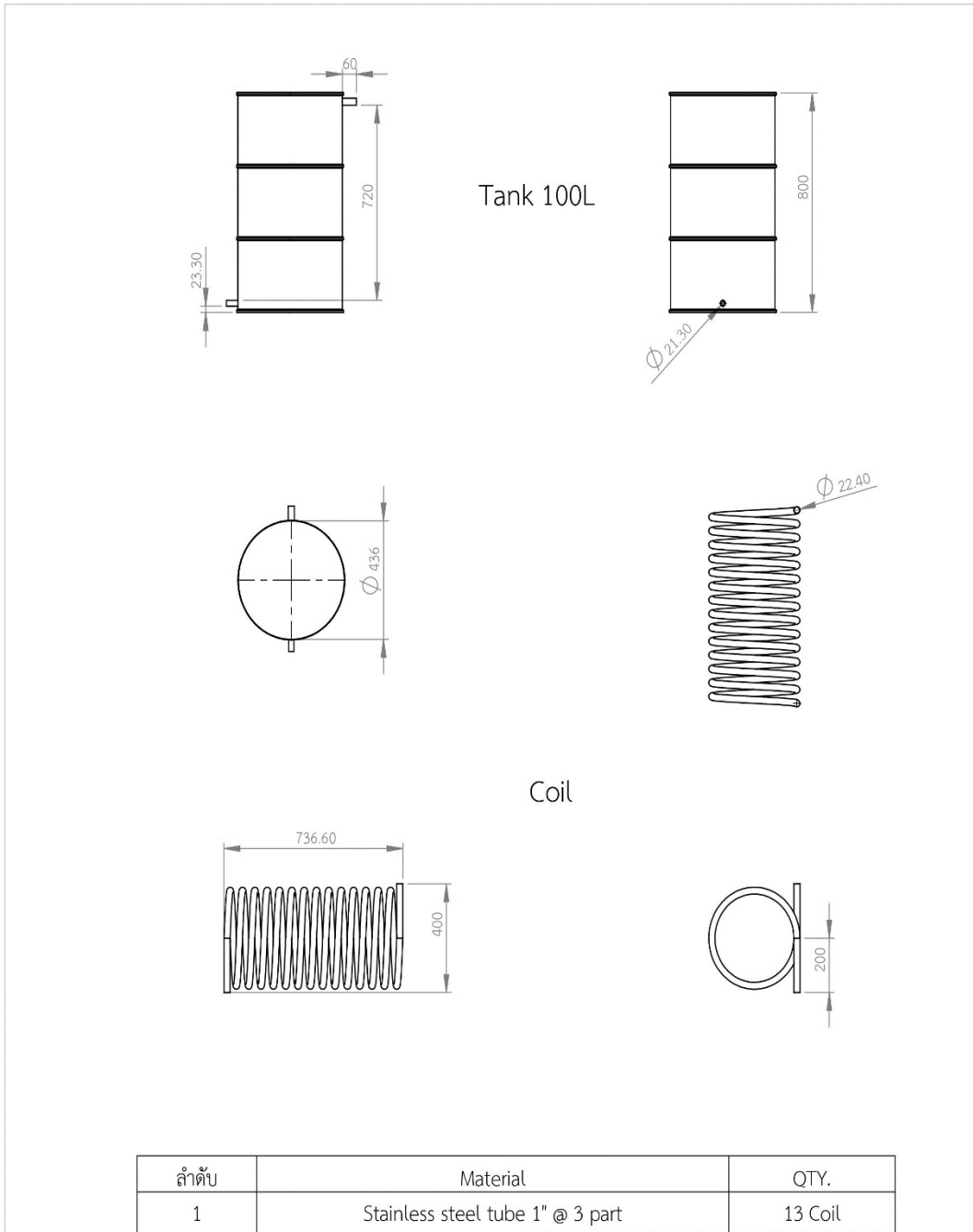
TITLE: 200 L CHARCOAL KILN WITH GASIFIER BURNER		DWG. NO. SWU-ENG-ME-2019-001		SHEET 1 OF 9	
NAME	DATE	MATERIAL:	SCALE: 1 : 20	UNIT: mm.	
DRAWN Mr.Kumpol Thaworn	11/03/2020	STEEL			
CHK'D Mr.Kumpol Thaworn	11/03/2020				
APP'VD Asst.Prof.Sommas Kaewulan	11/03/2020				




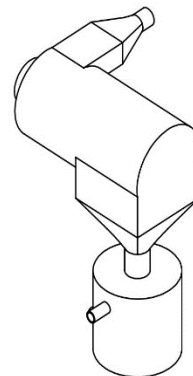
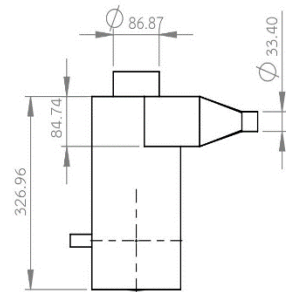
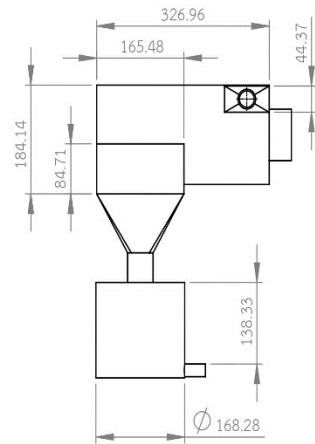
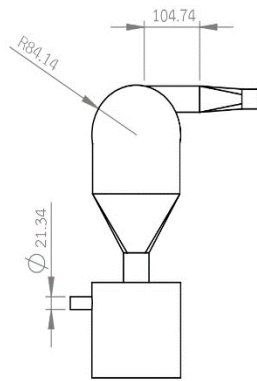





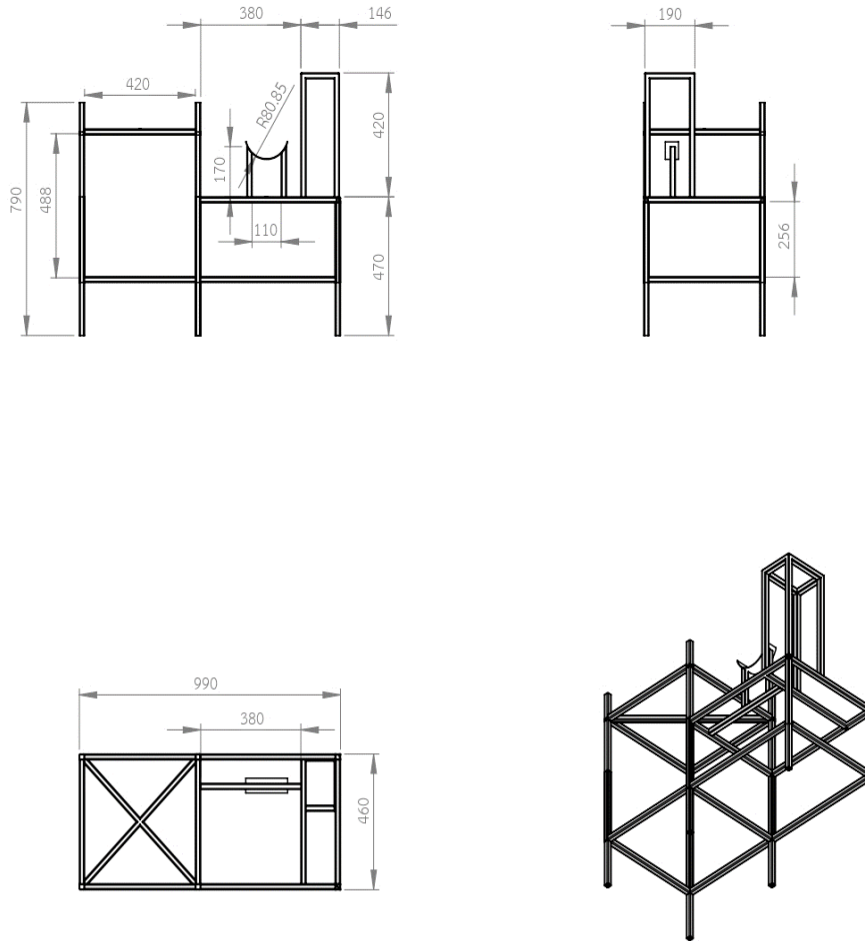
	NAME	DATE	TITLE:		
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	CHARCOAL KLIN AND HEAT INSULATION		
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020			
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020	MATERIAL:	DWG. NO.	
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-003	
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm.
					SHEET 3 OF 9
					A4




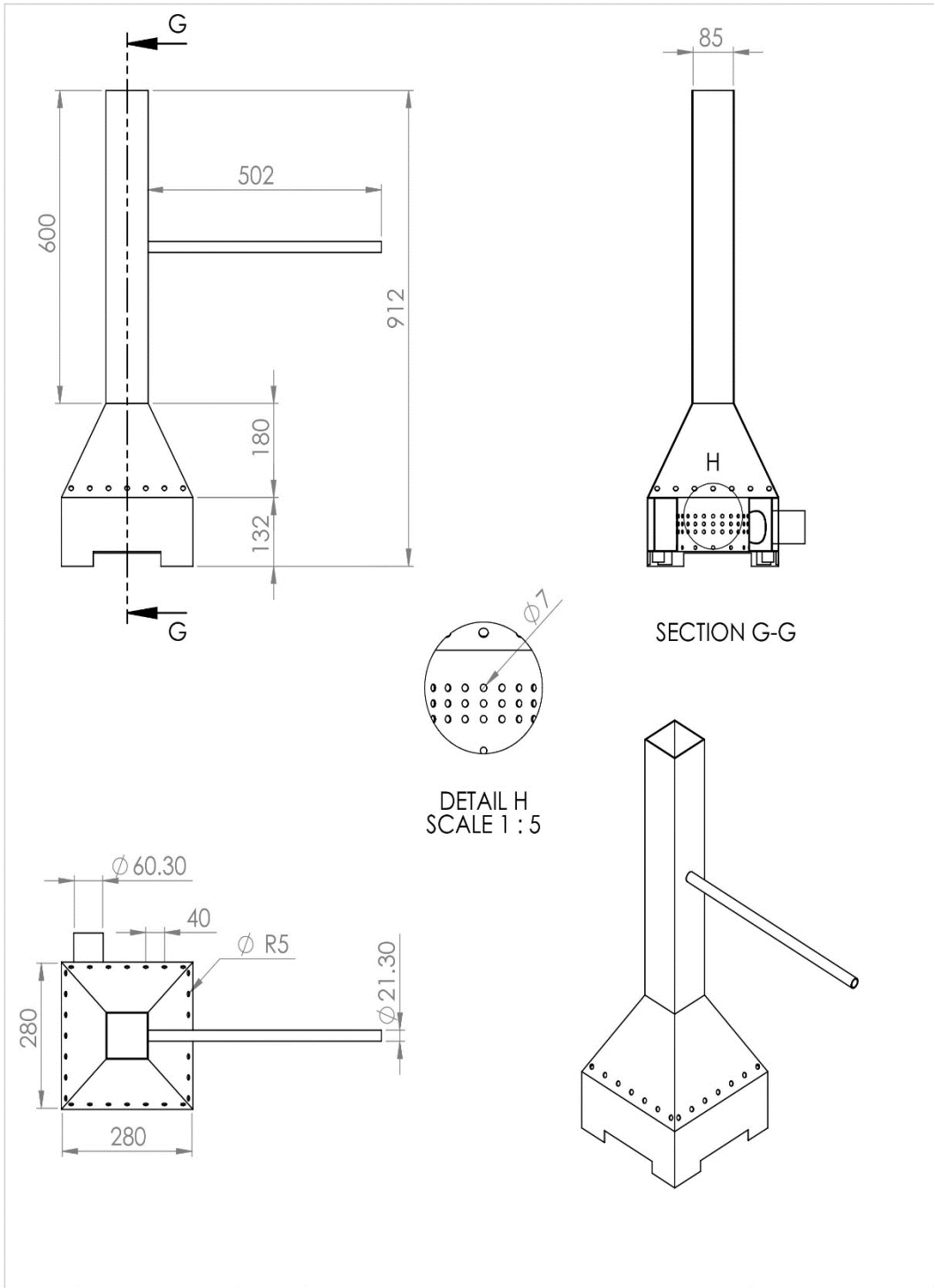
	NAME	DATE	TITLE:		
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	CONDENSER COIL		
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020			
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020	MATERIAL:	DWG. NO.	
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-004	
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm.
					SHEET 4 OF 9
					A4




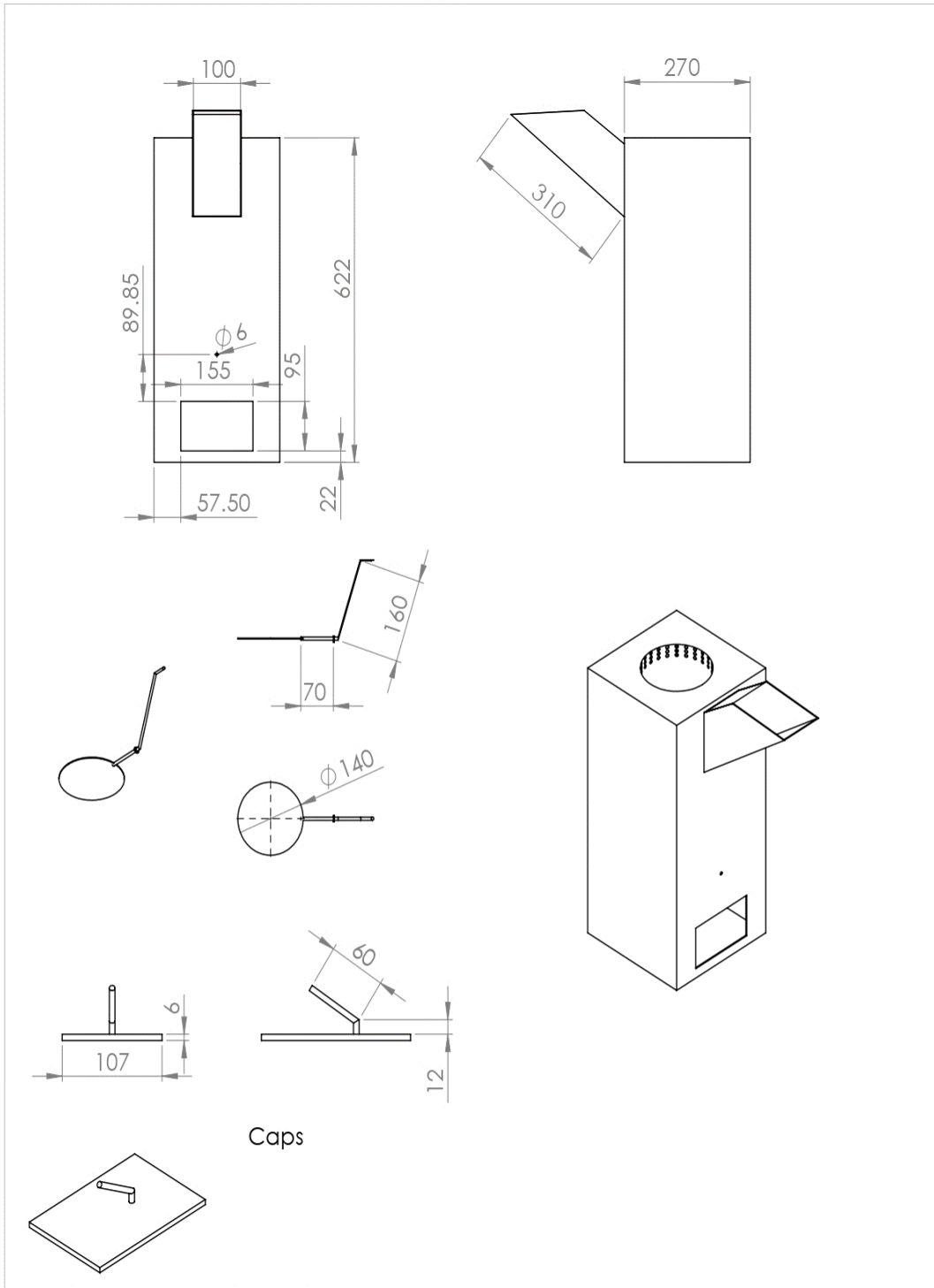
	NAME	DATE	TITLE:		
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	CYCLONE 6 "		
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020			
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020	MATERIAL:	DWG. NO.	
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-005	
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm. SHEET 5 OF 9 A4




	NAME	DATE	TITLE:		
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	CONDENSER BASE		
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020			
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020	MATERIAL:	DWG. NO.	
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-006	
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm.
					SHEET 6 OF 9
					A4

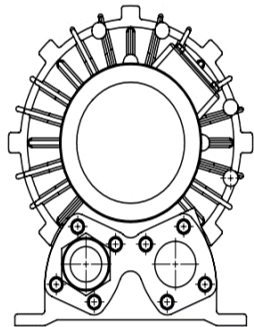
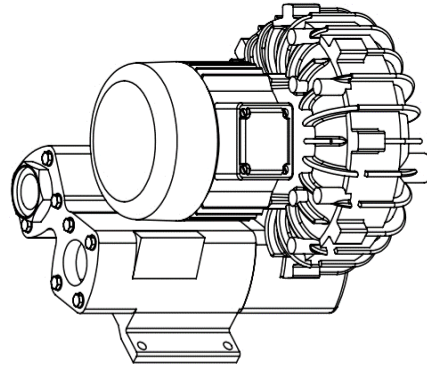
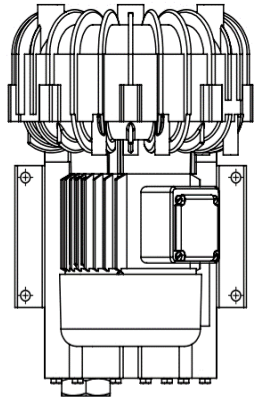


	NAME	DATE	TITLE:		
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	SMOKESTACK		
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020			
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020	MATERIAL:	DWG. NO.	
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-007	
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm.
					SHEET 7 OF 9
					A4




Caps

	NAME	DATE	TITLE:		
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	BIOMASS STOVE		
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020			
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020	MATERIAL:	DWG. NO.	
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-008	
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm.
					SHEET 8 OF 9
					A4

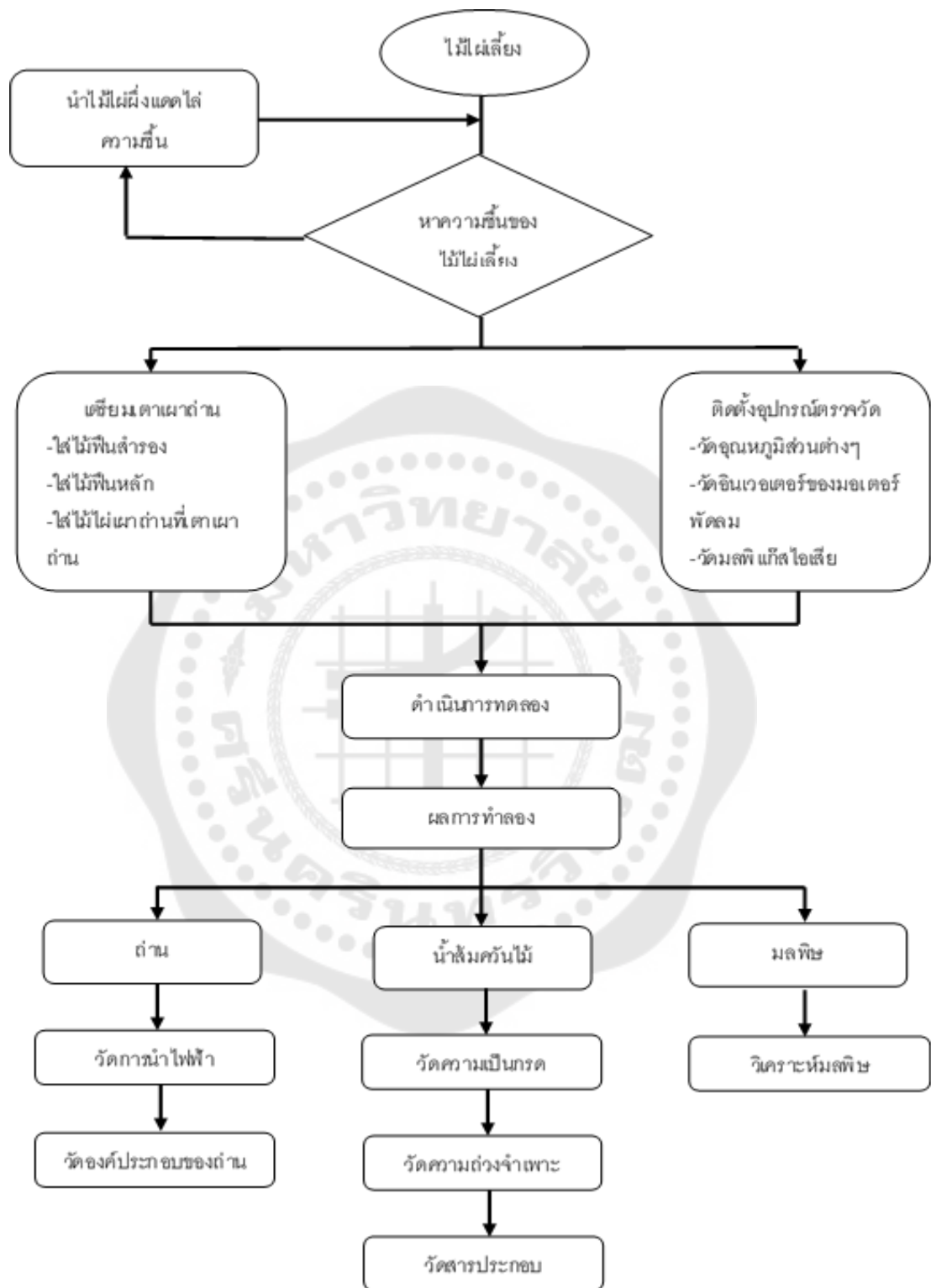


ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Blower NVT-085	1
2	Blower NVT-020	1

	NAME	DATE	TITLE:				
DRAWN.	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020	.BLOWER				
CHK'D	Mr.Kumphol Thaworn	11/03/2020					
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	11/03/2020					
			MATERIAL:	DWG. NO.			
			STEEL	SWU-ENG-ME-2019-009			
				SCALE: 1 : 10	UNIT: mm.	SHEET 9 OF 9	A4



ภาคผนวก จ.
ขั้นตอนการเผาถ่าน



ภาพประกอบ จ.1 ขั้นตอนการทดลอง



ภาพประกอบ จ.2 ไม้ไผ่เลื่อยที่ตัดไว้ขนาด 7.5 เซนติเมตร ที่ผึ่งแดดไว้



ภาพประกอบ จ.3 เตรียมชิ้นไม้ไผ่เลื่อยเพื่อหาความชื้นก่อนเผา



ภาพประกอบ จ.4 นำไม้ไฟเลี้ยงที่เตรียมไว้เข้าตู้อบไมโครเวฟ



ภาพประกอบ จ.5 ชั่งไม้ไฟเลี้ยงหลังการอบเพื่อดูน้ำหนักที่คงเหลือ



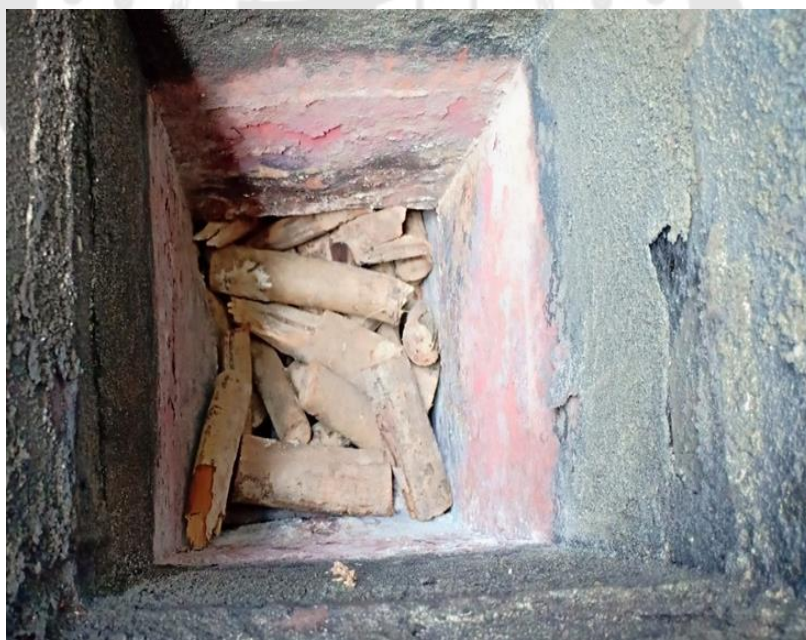
ภาพประกอบ จ.6 แยกส่วนโคนกับส่วนปลายแล้วทำการซั่งน้ำหนัก



ภาพประกอบ จ.7 เตรียมไม้พืนหัดัก 7 กิโลกรัม และไม้พืนสำรวจ 4 กิโลกรัม



ภาพประกอบ ๑.8 ไม้ไฟผงสำรอง 4 กิโลกรัม ที่ได้เตาเผาถ่าน



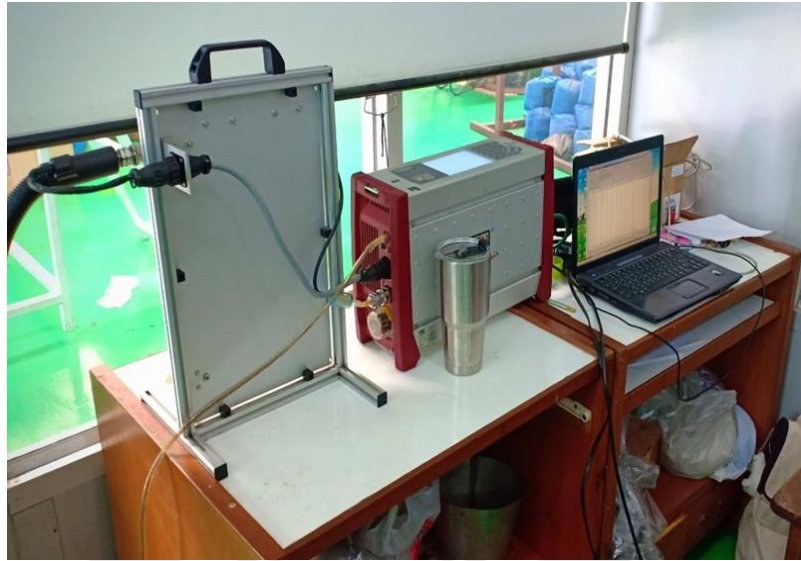
ภาพประกอบ ๑.9 ไม้ไฟผงหลักรอบแรก 2.5 กิโลกรัมโดยประมาณ ในส่วนเชื้อเพลิงหลัก



ภาพประกอบ จ.10 นำไม้ไผ่เลื่อยส่วนโคนใส่ด้านล่างเตาเผาจนหมด แล้วจึงใส่ส่วนปลายไว้
ด้านบนจนเต็มถึง



ภาพประกอบ จ.11 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิจุดต่างๆ เพื่อทำการเก็บข้อมูล



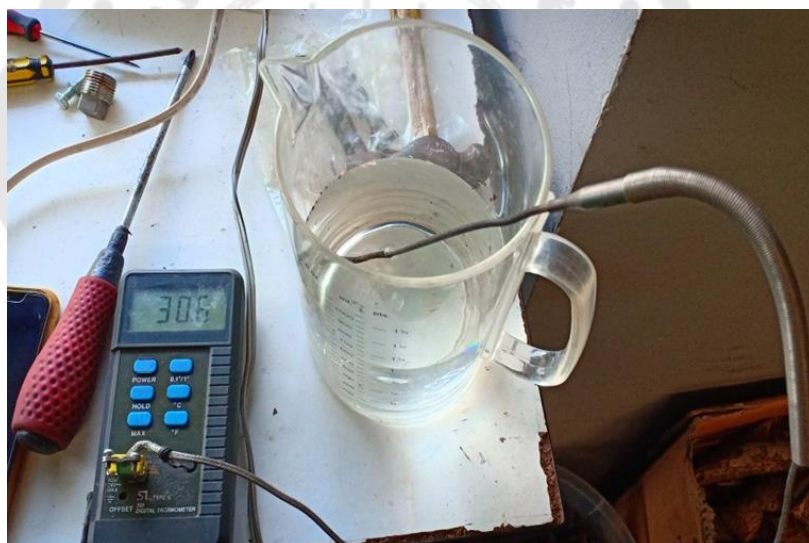
ภาพประกอบ จ.12 ติดตั้งอุปกรณ์วัดมลพิษเพื่อทำการเก็บข้อมูล



ภาพประกอบ จ.13 ตำแหน่งติดตั้งการวัดมลพิษที่ออกจากปล่องควัน



ภาพประกอบ ๑.14 วัดค่าอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากถังควบแน่นอยู่ที่ 4 ลิตรต่อนาที



ภาพประกอบ ๑.15 วัดอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังควบแน่น



ภาพประกอบ จ.16 ติดตั้งเตาเผาถ่านและอุปกรณ์เข้าด้วยกันและทำการจุดเตา



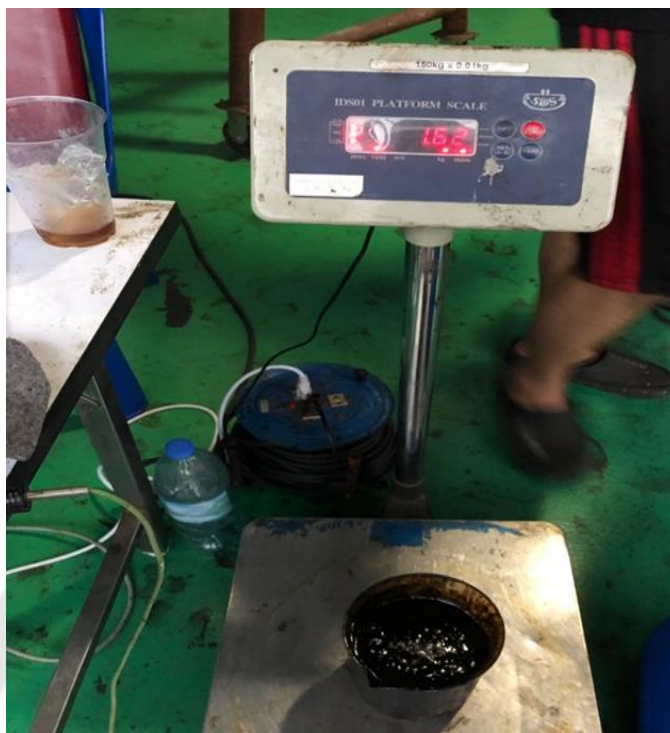
ภาพประกอบ จ.17 ดูเชื้อเพลิงหลักรอบแรกไม่ให้ต่ำกว่าช่องบ่อนอากาศ ถ้าต่ำกว่าให้เติมเชื้อเพลิงที่เหลือ



ภาพประกอบ ๑.18 เติมไม้เชื้อเพลิงหลักที่เหลือทั้งหมด



ภาพประกอบ ๑.19 เปิดวาล์วทุกๆ 5 นาที เพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้



ภาพประกอบ จ.20 นำน้ำส้มควินไม้ที่ได้จากการเปิดทุกๆ 5 นาที ไปซึ่งเพื่อบันทึกน้ำหนัก



ภาพประกอบ จ.21 เทใส่ถังที่บัสแสงเพื่อที่จะพักน้ำส้มควินไม้เพื่อรอตกตะกอน



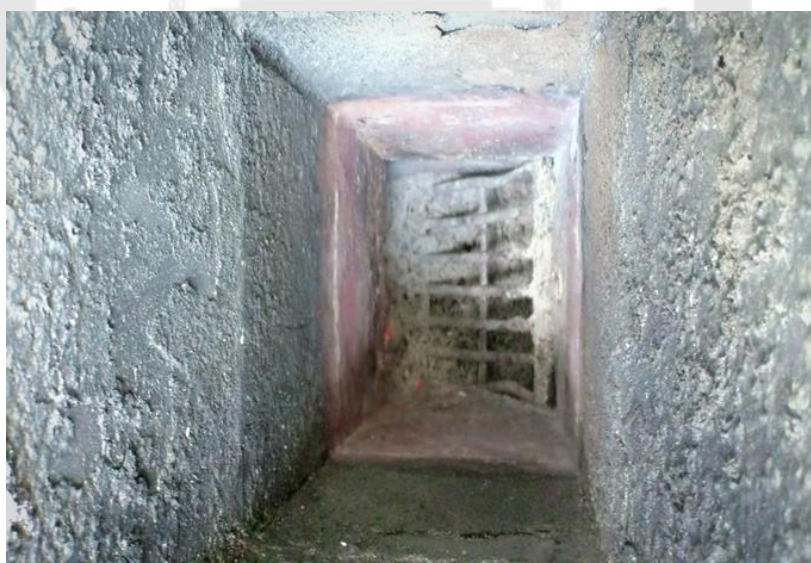
ภาพประกอบ จ.22 ช่วงก่อนปิดเตาสังเกตปริมาณน้ำส้มควันไม้จะไม่สามารถเก็บผลผลิตได้แล้ว
และรอให้อุณหภูมิบนเตาส่งถึง 500 °C



ภาพประกอบ จ.23 ปิดเตาเมื่ออุณหภูมิบนเตาส่งถึง 500 °C



ภาพประกอบ จ.24 ยกเตาเผาถ่าน ออกจากชุดเผาถ่านเพื่อที่จะพักเตาไปที่ที่ได้ขุดดินไว้เพื่อ
ป้องกันอากาศเข้า



ภาพประกอบ จ.25 ภายในห้องเชื้อเพลิงหลักหลังสิ้นสุดการเผาถ่าน



ภาพประกอบ จ.26 ภายในห้องเชื้อเพลิงสำรองหลังสิ้นสุดการเผาถ่าน



ภาพประกอบ ง.27 หลังจากเตาเผาถ่านเย็นตัวลงต่ำกว่า 50 °C ให้เปิดเตาเผาถ่าน



ภาพประกอบ ๑.28 ลักษณะถ่านที่อยู่ในเตาเผาถ่าน



ภาพประกอบ ๑.29 เถถ่านจากส่วนบนนไ้ลดลงมาส่วนล่างของเตาเผาถ่าน



ภาพประกอบ จ.30 วัดความต้านทานไฟฟ้าของถ่านแต่ละส่วน



ภาพประกอบ จ.31 ชั่งน้ำหนักถ่านที่ได้จากเตาเผาถ่านแต่ละความต้านทานไฟฟ้า



ภาพประกอบ จ.32 ชั่งน้ำหนักน้ำส้มควันไม้ทั้งหมดที่ได้จากการเก็บทุกๆ 5 นาที



รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	ตารางเมตร
C_p	ความร้อนจำเพาะของควันที่ความดันคงที่ความ	จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนท่อ	วัตต์ต่อเมตรเคลวิน
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	วัตต์ต่อเมตรเคลวิน
L	ความยาวท่อ	เมตร
l	ความหนาของผนังวัสดุ	เมตร
\dot{m}	มวลการไหล	กิโลกรัมต่อวินาที
n	จำนวนชั้นของแผ่นวัสดุ	เมตร
q	ฟลักซ์ความร้อน	วัตต์ต่อตารางเมตร
Q	พลังงานความร้อน	กิโลวัตต์
r	รัศมีของถังควบแน่น	เมตร
R_c	ความต้านทานการนำไฟฟ้า	ตารางเมตรเคลวินต่อวัตต์
T	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
ΔT_{lm}	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม	องศาเซลเซียส
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม	วัตต์ต่อตารางเมตร เคลวิน
π	ค่าคงที่พาย	-
λ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	วัตต์ต่อตารางเคลวิน
a	อากาศ	a
c	อุณหภูมิต่ำ	c
h	อุณหภูมิสูง	h
i	ทางเข้า	i
o	ทางออก	o
g	แก๊ส	g
<i>total</i>	รวม	<i>total</i>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กำพล ถาวร
วัน เดือน ปี เกิด	19 พฤศจิกายน 2525
สถานที่เกิด	บุรีรัมย์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2552 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ พ.ศ. 2563 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	119/114 หมู่บ้านเดอะทรีส์คอลลอง 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130
ผลงานตีพิมพ์	SWURES13-192 การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีไฟเออร์เบิร์นเนอร์