

คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนาระบบราชการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลลา

ชัยพร มณีชาติย์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญาใหญ่)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา
ชื่อผู้เขียน	นายชัยพร มณีขัติย์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อศึกษาการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนขนาด 50 100 และ 200 ลิตร โดยใช้เตาเผาแบบอนิลา ศึกษาผลของชนิดวัสดุฉนวน ขนาดเตา และเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน ปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ และหาสหสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพจะมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวน 15 24 และ 44 รูเจาะตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 51.1 เปอร์เซ็นต์ และมีความคลาดเคลื่อนของการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 1.4 ± 1.2 % ถึงแม้ว่ากะลากาแฟ ชังข้าวโพด และเปลือกกล้วย จะให้อุณหภูมิจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังขอบของเตาเผาถ่านชีวภาพและการกระจายอุณหภูมิที่ดีกว่า แต่แกลบก็ยังให้ผลผลิตที่มากกว่าอยู่ดี เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ชีวมวลที่ใช้เป็น ชังข้าวโพด แกลบ กะลากาแฟ และ เปลือกกล้วย มีการกระจายอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากแหล่งกำเนิดความร้อนจะเพิ่มสูงสุดถึง 690.4 องศาเซลเซียส แต่การกระจายอุณหภูมิไปยังขอบของเตาเผาถ่านชีวภาพมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพียง 459.42 468.78 และ 353.02 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากสมการสหสัมพันธ์พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาเผาไม่ได้มีผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับเป็นตัวแปรมิติของเตา เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน ค่าความร้อนของชีวมวล ค่าการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และ ความหนาแน่น ที่ส่งผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง จากผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาที่มีขนาดแตกต่างกันและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

คำสำคัญ : การจำลองทางความร้อน, ถ่านชีวภาพ, สหสัมพันธ์, เตาเผาแบบอนิลา

Title	THERMAL CHARACTERISTICS OF ANILA-TYPE BIOCHAR KILN
Author	Mr. Chaiyaphorn Maneekhat
Degree	Master of Engineering in Agricultural Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Tipapon Khamdaeng

ABSTRACT

The objectives of this research were to study the temperature distribution simulation in insulated Anila-type biochar kiln with size of 50, 100 and 200 liters and to study the effects of biomass material types, kiln size, and pyrolysis time on temperature distribution in the insulated biochar kiln, biochar yield, and biochar property. The correlations between the variables related to the biochar production were furthermore investigated. The core of the kiln had a puncture diameter of 3.17 mm, number of the puncture of 15, 24 and 44, respectively. The results showed that a 200-liter biochar kiln with biomass as the rice husk had the highest biochar yield of 51.1% and there was a deviation of the average temperature distribution of 1.4 ± 1.2 %, Although coffee husks, corncobs and longan husks provided the better temperature distribution from the heat source to the edge of the biochar kiln, the rice husk had still produced a higher yield. When comparing the temperature distribution at 1, 2 and 3 hours, the biochar derived from corncobs, rice husks, coffee husks and longan husks had the same temperature distribution. Although the mean temperature from the heat source increased to 690.4 °C, the temperature distribution to the edge of the biochar kiln averaged only 459.42, 468.78 and 353.02 °C, respectively. From the correlation equation, the mean temperature in the kiln had no significant effect on the biochar yield and pH. But instead, it was the dimensional variable of the furnace, pyrolysis time, calorific value of biomass, heat conductivity, specific heat capacity and density affecting the biochar yield and pH. From the results of this analysis, the temperature distribution characteristics of different size kilns and various factors affecting the biochar yield and pH of the biochar obtained

from the production process were known.

Keywords : Thermal Simulation, Biochar, Correlation, Anila Stove



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานที่ผู้ทำวิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ กำลังกาย กำลังใจ และสติปัญญา จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา และคอยช่วยเหลือ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยตรวจสอบ และแก้ไขงานวิจัยฉบับนี้ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญาใหญ่ ซึ่งเป็นคณะกรรมการร่วมประเมินผลงานวิจัยฉบับนี้ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ ประธานหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเกษตร ที่ช่วยให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.นิตติ คำเมืองลือ ที่ได้ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้ความสะดวกในด้านสถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เพื่อนๆ พี่ๆ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและมีส่วนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาและเป็นกำลังใจให้อย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้จัดทำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ชัยพร มณีขัติย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	22
1.1 ที่มาและความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	22
1.2 วัตถุประสงค์โครงการ.....	24
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ.....	24
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	25
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	22
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ.....	22
2.1.1 เตาเผาถ่านชีวภาพ.....	22
2.1.2 เตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา.....	22
2.1.3 การผลิตถ่านชีวภาพ.....	22
2.1.4 ถ่านชีวภาพ.....	27
2.1.5 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ.....	28
2.1.6 กระบวนการไพโรไลซิส.....	28
2.1.7 สมบัติทางเคมีของชีวมวล.....	29
2.1.8 ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	29

2.1.9 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	29
2.2 ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม.....	29
2.2.1 โปรแกรม Solidworks	30
2.2.2 โปรแกรม Unified Finite Element Analysis	31
2.2.3 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	31
2.3 สมการสหสัมพันธ์	32
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	38
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	39
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพ.....	39
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เก็บข้อมูล และบันทึกข้อมูล	40
3.1.3 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองสภาพ.....	40
3.2 วิธีการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพ	40
3.2.1 การออกแบบโครงสร้างของเตาเผาถ่านชีวภาพ.....	40
3.2.2 การออกแบบแกนกลางเตาเผาถ่านชีวภาพ.....	41
3.2.3 การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริง	43
3.2.4 การเก็บอุณหภูมิจากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริง	46
3.3 วิธีการจำลองสภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	50
3.3.1 หลักการจำลองสภาพเตาเผาถ่านชีวภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	51
3.3.2 ขั้นตอนในการกำหนดค่าในโปรแกรม	51
ก. สร้าง Part	51
ข. กำหนด Material	52
ค. กำหนด Section	53
ง. Assembly.....	54

จ. กำหนด Step	54
ฉ. Interaction	56
ช. กำหนด Loads.....	56
ซ. กำหนด BCs	57
ณ. Constraints.....	57
ญ. Model	58
ฎ. Mesh.....	58
ฏ. Jobs	60
3.4 วิธีการสร้างสมการสหสัมพันธ์	67
3.4.1 ขั้นตอนการสร้างสมการสหสัมพันธ์.....	68
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ.....	70
3.5.1 การทดสอบประสิทธิภาพการเผาจริงจากเตาต้นแบบ	70
3.5.2 การทดสอบประสิทธิภาพการเผาโดยการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์.....	70
3.6 การเก็บข้อมูลและการประเมินผล.....	71
3.7 สถานที่และระยะเวลาในการทำโครงการ.....	71
3.7.1 สถานที่ทำโครงการ.....	71
3.7.2 ระยะเวลาในการทำโครงการ.....	71
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	35
4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองการกระจายอุณหภูมิโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	35
4.1.1 การศึกษาการกระจายอุณหภูมิโดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร	73
4.1.1.1 ข้อมูลการทดสอบของซังข้าวโพด	73
4.1.1.2 ข้อมูลการทดสอบของแกลบ.....	74
4.1.1.3 ข้อมูลการทดสอบของกิ่งไม้ลำไย	75

4.1.1.4	ข้อมูลการทดสอบของเปลือกลำไย	76
4.1.1.5	ข้อมูลการทดสอบของกะลากาแฟ	77
4.1.2	การศึกษาการกระจายอุณหภูมิต่อการใช้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร	78
4.1.2.1	ข้อมูลการทดสอบของซังข้าวโพด	78
4.1.2.2	ข้อมูลการทดสอบของแกลบ	79
4.1.2.3	ข้อมูลการทดสอบของกิ่งไม้ลำไย	80
4.1.2.4	ข้อมูลการทดสอบของเปลือกลำไย	81
4.1.2.5	ข้อมูลการทดสอบของกะลากาแฟ	82
4.1.3	การศึกษาการกระจายอุณหภูมิต่อการใช้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร	83
4.1.3.1	ข้อมูลการทดสอบของซังข้าวโพด	83
4.1.3.2	ข้อมูลการทดสอบของแกลบ	84
4.1.3.3	ข้อมูลการทดสอบของกิ่งไม้ลำไย	85
4.1.3.4	ข้อมูลการทดสอบของเปลือกลำไย	86
4.1.3.5	ข้อมูลการทดสอบของกะลากาแฟ	87
4.1.4	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสภาพทางคอมพิวเตอร์ของการกระจาย อุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร	88
4.1.4.1	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของซังข้าวโพด	88
4.1.4.2	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของแกลบ	91
4.1.4.3	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกิ่งไม้ลำไย	94
4.1.4.4	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของเปลือกลำไย	97
4.1.4.5	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกะลากาแฟ	100
4.1.5	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสภาพทางคอมพิวเตอร์ของการกระจาย อุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร	103
4.1.5.1	การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของซังข้าวโพด	103

4.1.5.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของแกลบ	106
4.1.5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกิ่งไม้ลำไย	109
4.1.5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของเปลือกลำไย	112
4.1.5.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกะลากาแฟ	115
4.1.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสภาพทางคอมพิวเตอร์ของการกระจาย อุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร	118
4.1.6.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของซังข้าวโพด	118
4.1.6.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของแกลบ	121
4.1.6.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกิ่งไม้ลำไย	124
4.1.6.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของเปลือกลำไย	127
4.1.6.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกะลากาแฟ	130
4.1.5 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร	133
4.1.6 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	134
4.1.7 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด	135
4.2 สมการสหสัมพันธ์	136
4.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและความเป็นกรด-ด่าง	136
บทที่ 5 สรุป	140
5.1 สรุปผลวิจัย	140
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำการวิจัย	141
5.3 ข้อเสนอแนะ	142
บรรณานุกรม	143
ประวัติผู้วิจัย	161

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดวัสดุอุปกรณ์ในการสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพ	39
ตารางที่ 2 รายละเอียดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เก็บข้อมูลและบันทึกข้อมูล ..	40
ตารางที่ 3 รายละเอียดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองสภาพ	40
ตารางที่ 4 ขั้นตอนการสร้างแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ.....	42
ตารางที่ 5 ขั้นตอนการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบ	43
ตารางที่ 6 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรม	53
ตารางที่ 7 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและระยะตามแนวรัศมีที่ใช้วัดการกระจายอุณหภูมิในโปรแกรม abacus	61
ตารางที่ 8 ข้อมูลของซังข้าวโพดที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์	62
ตารางที่ 9 ข้อมูลของแกลบที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์	63
ตารางที่ 10 ข้อมูลของเปลือกกล้วยที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์.....	64
ตารางที่ 11 ข้อมูลของกิ่งไม้ลำไยที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์.....	65
ตารางที่ 12 ข้อมูลของกะลากาแฟที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์.....	66
ตารางที่ 13 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด.....	73
ตารางที่ 14 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ	74
ตารางที่ 15 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย.....	75
ตารางที่ 16 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย	76
ตารางที่ 17 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ.....	77
ตารางที่ 18 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด.....	78
ตารางที่ 19 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ	79
ตารางที่ 20 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย.....	80

ตารางที่ 21	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย	81
ตารางที่ 22	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ	82
ตารางที่ 23	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด	83
ตารางที่ 24	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ	84
ตารางที่ 25	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย	85
ตารางที่ 26	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย	86
ตารางที่ 27	ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ	87
ตารางที่ 28	อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพดที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	89
ตารางที่ 29	อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นแกลบที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	92
ตารางที่ 30	อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไยที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	95
ตารางที่ 31	อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วยที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	98
ตารางที่ 32	อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	101
ตารางที่ 33	อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพดที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	104

ตารางที่ 44 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้น ของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ 137

ตารางที่ 45 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้น ของปัจจัยที่มีผลต่อ ค่า pH 138



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การจำลองการทดลองของเตาเผาถ่านชีวภาพ.....	24
ภาพที่ 2 ตัวอย่างถัง 50 ลิตร, ฝาถัง, ด้านล่างถัง	22
ภาพที่ 3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
ภาพที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานการทดสอบจริง	38
ภาพที่ 5 เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตรถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks (หน่วยเป็นเซนติเมตร).....	41
ภาพที่ 6 แกนกลางเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตรออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks (หน่วยเป็นเซนติเมตร).....	41
ภาพที่ 7 ฝาถังที่เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร.....	44
ภาพที่ 8 ก้นถังที่เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 11 เซนติเมตร	45
ภาพที่ 9 แกนกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตรที่เจาะรูแล้ว	45
ภาพที่ 10 นำชีวมวลใส่ลงไปในเตาเผา.....	46
ภาพที่ 11 บรรจุเชื้อเพลิงลงในแกนกลางเตาเผาถ่านชีวภาพ	46
ภาพที่ 12 อุปกรณ์รับสัญญาณ Analog Input (Analog Input Module AI210).....	47
ภาพที่ 13 Wisco AI Utility ใช้สำหรับการอ่านค่าและการตั้งค่า	48
ภาพที่ 14 โปรแกรม OD04 แสดงค่าอุณหภูมิระหว่างการทดลอง.....	48
ภาพที่ 15 โปรแกรม OD04 แสดงกราฟอุณหภูมิระหว่างการทดลอง	49
ภาพที่ 16 การเก็บอุณหภูมิจากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริง (หน่วยที่ใช้เป็นหน่วย เซนติเมตร).....	49
ภาพที่ 17 ขั้นตอนการดำเนินงานการจำลองการทดลอง.....	50
ภาพที่ 18 การสร้าง Part เตาเผาขนาด 50 ลิตร ในโปรแกรม Abaqus.....	51
ภาพที่ 19 การ Partition ในโปรแกรม Abaqus.....	52

ภาพที่ 20	การสร้างขอบเขตของอากาศในโปรแกรม Abaqus	52
ภาพที่ 21	การกำหนด Material ในโปรแกรม Abaqus.....	53
ภาพที่ 22	การกำหนด Section ในโปรแกรม Abaqus.....	54
ภาพที่ 23	การ Assembly ในโปรแกรม Abaqus	54
ภาพที่ 24	การกำหนด Step ในโปรแกรม Abaqus.....	55
ภาพที่ 25	การกำหนด History Output ในโปรแกรม Abaqus	55
ภาพที่ 26	การ Interaction ในโปรแกรม Abaqus	56
ภาพที่ 27	การกำหนด Loads ในโปรแกรม Abaqus	56
ภาพที่ 28	การกำหนด BCs ในโปรแกรม Abaqus.....	57
ภาพที่ 29	การ Constraints ในโปรแกรม Abaqus.....	57
ภาพที่ 30	การตั้งค่า Model ในโปรแกรม Abaqus.....	58
ภาพที่ 31	การ Mesh ในโปรแกรม Abaqus	58
ภาพที่ 32	การกำหนดค่า Element Type ในโปรแกรม Abaqus	59
ภาพที่ 33	การกำหนด Mesh Controls ในโปรแกรม Abaqus.....	59
ภาพที่ 34	การทำกร Jobs ในโปรแกรม Abaqus.....	60
ภาพที่ 35	การกระจายอุณหภูมิจากการจำลองการทดลอง	60
ภาพที่ 36	การวัดการกระจายอุณหภูมิจากการจำลองการทดลอง.....	61
ภาพที่ 37	ขั้นตอนการดำเนินงานการสร้างสมการสหสัมพันธ์	67
ภาพที่ 38	การป้อนข้อมูลตัวแปรเพื่อทำการวิเคราะห์ ในโปรแกรม Design-Expert.....	68
ภาพที่ 39	การกำหนดค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในโปรแกรม Design-Expert	68
ภาพที่ 40	การนำข้อมูลที่ทำการทดลองมาใส่ในตาราง ในโปรแกรม Design-Expert.....	69
ภาพที่ 41	การกำหนดรูปแบบสมการเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ในโปรแกรม Design-Expert.....	69
ภาพที่ 42	ผลการวิเคราะห์ ในโปรแกรม Design-Expert	70

ภาพที่ 43 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลของเตาเผาขนาด 50 ลิตร (หน่วยเซนติเมตร)	35
.....	
ภาพที่ 44 อุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพโดยใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด	73
ภาพที่ 45 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของซังข้าวโพด ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	73
ภาพที่ 46 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นแกลบ	74
ภาพที่ 47 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของแกลบ ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	74
ภาพที่ 48 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย	75
ภาพที่ 49 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของกิ่งไม้ลำไย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	75
ภาพที่ 50 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นเปลือกลำไย	76
ภาพที่ 51 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของเปลือกลำไย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	76
ภาพที่ 52 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกะลาเผา	77
ภาพที่ 53 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของกะลาเผา ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	77
ภาพที่ 54 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด	78
ภาพที่ 55 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของซังข้าวโพด ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	78
ภาพที่ 56 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นแกลบ	79
ภาพที่ 57 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของแกลบ ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	79
ภาพที่ 58 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย	80
ภาพที่ 59 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของกิ่งไม้ลำไย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง	80

ภาพที่ 113 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของเปลือกลำไย	127
ภาพที่ 114 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของเปลือกลำไย	127
ภาพที่ 115 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของเปลือกลำไย	127
ภาพที่ 116 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกะลาเฒาเฒา	130
ภาพที่ 117 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกะลาเฒาเฒา	130
ภาพที่ 118 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกะลาเฒาเฒา	130
ภาพที่ 119 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาใช้ข้อมูลจากเทอร์โมคัพเปิลที่ ตำแหน่งกลางเตาหมายเลข 6 4 และ 2 ของเตาเฒาเฒาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซีมวลเป็นกะลาเฒาเฒา	133
ภาพที่ 120 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาใช้ข้อมูลจากเทอร์โมคัพเปิลที่ ตำแหน่งกลางเตาหมายเลข 6 4 และ 2 ของเตาเฒาเฒาขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซีมวลเป็นเฒาเฒา	134
ภาพที่ 121 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิตะเฒาเฒาใช้ข้อมูลจากเทอร์โมคัพเปิลที่ ตำแหน่งกลางเตาหมายเลข 6 4 และ 2 ของวัสดุซีมวล 5 ชนิด ที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร	135

บทที่ 1

บทนำ

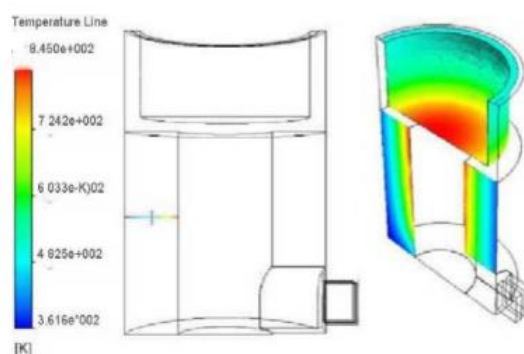
1.1 ที่มาและความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาด้านความมั่นคงทางด้านอาหาร และความต้องการด้านพลังงาน ซึ่งทั้งหมดนี้มีความเกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากรที่จะนำมาช่วยแก้ไขปัญหเหล่านี้ ในปัจจุบัน เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าวไปพร้อมๆกันคือ เทคโนโลยี ไบโอชาร์ (รัตนชล อ่างมณี และคณะ 2017) ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ชังข้าวโพดที่ได้จากการสีเอาเมล็ดออกไปถึงจะมีการนำไปใช้ประโยชน์อยู่บ้าง เช่น นำไปเป็นปุ๋ยหมัก แต่ก็ไม่เพียงพอที่จะลดปริมาณเหลือทิ้งอยู่ดี (Zhang et al. 2012, Budai et al. 2016) แกลบที่เป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวเปลือกจะมีประมาณร้อยละ 22-25 โดยน้ำหนักจากเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้การสีข้าวเปลือกแต่ละครั้งจะเกิดแกลบจำนวนมาก (Mishra et al. 1986) กิ่งไม้ลำไยที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งนอจากการนำไปเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงอย่างศูนย์เปล่าแล้วยังสามารถนำมาใช้เพื่อเกิดประโยชน์ได้โดยการเปลี่ยนเป็นชีวมวลนั่นเอง (Panyoyai et al. 2019) เปลือกลำไยที่ได้จากการผลิตลำไยทั้งสดและอบแห้ง ทำให้เหลือเปลือกลำไยเป็นจำนวนมากถึงจะมีการนำไปแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์อยู่บ้างแต่ก็ไม่เพียงพอต่อปริมาณเปลือกลำไยที่เหลือทิ้งอยู่ดี กะลาจากกาแฟที่ได้จากกาแฟสุกที่เอาส่วนของเปลือกชั้นนอกและเนื้อออก แต่ยังคงมีเปลือกชั้นในหรือที่เรียกว่ากะลาติดอยู่การกำจัดกะลาจากกาแฟคือการนำไปเผาในที่โล่ง หรือการนำไปใช้ประโยชน์สามารถนำไปเป็นปุ๋ยได้ แต่ก็ยังเหลือปริมาณที่มากอยู่ดี (Cho et al. 2017, Mengesha and Ramayya 2017, Mosisa et al. 2019) จึงนำชีวมวลเหล่านี้มาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และควบคุมอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้ นี้ เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) (Wallace 2019) มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธี คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) (Petchaihan et al. 2020, Srisophon et al. 2020) โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า เนื่องจากปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะอยู่ที่ 25-35% ซึ่งต่างจากการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็วที่จะได้ปริมาณถ่านอยู่ที่ 15-25% การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียส (Budai et al. 2014) ในสภาวะที่มีอากาศน้อยที่สุด

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตรจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าว เปลือกลำไย ได้จากการผลิตลำไยอบแห้ง เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้วเปลี่ยนพลังงาน จากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้น เมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง เราก็จะได้พลังงานออกมา

การออกแบบเตาแบบอนิลา (Anila Stove) โดยเตาชนิดนี้ออกแบบและคิดค้นโดย Dr. Ravi Kumar ของมหาวิทยาลัย Mysore ในอินเดีย (Mengesha and Ramayya 2015, รัตชล อ่างมณี และคณะ 2017) อุปกรณ์นี้จะมีแกนกลางที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ ด้านในและมีพื้นที่สำหรับบรรจุชีวมวลอยู่ภายในที่ถูกแยกออกจากแกนกลาง ด้านล่างของแกนกลางจะมีช่องให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ เมื่อให้ความร้อนแก่แกนกลางด้วยเชื้อเพลิงจนแกนกลางร้อนขึ้น (Mengesha and Ramayya 2015, Intagun et al. 2018) จะส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนที่บรรจุชีวมวลมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวใช้เวลาทั้งสิ้น ประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง (Daosukho and Rodprasert 2015)

โปรแกรมจำลอง (Simulation Software) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการออกแบบ วางแผนการทำงาน รวมถึงคาดการณ์กระบวนการและผลลัพธ์ที่อาจเกิดขึ้นได้ ด้วยการวิเคราะห์และทดลองผ่านการทำงานในกระบวนการต่าง ๆ จากระบบจำลองทำให้ลดเวลา ลดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ความแม่นยำของการจำลองการทำงานขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ใส่ลงไป ในซอฟต์แวร์ ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันการใช้งานโปรแกรมจำลองสามารถใช้งานได้สะดวก และง่ายดายด้วยการแสดงผลเป็นภาพ 3 มิติ และการแสดงผลด้วยกราฟหรือข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบทำให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น จากงานวิจัยของ (Mengesha and Ramayya 2015) ได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตถ่านชีวภาพโดยมีเตาเผาอยู่ 4 แบบคือ 1. Continuous feed flange less Anila stove. 2. Continuous feeding Anila type stove. 3. Cornel design stove. 4. The normal Anila stove. โดยใช้ชีวมวลที่ต่างกัน 4 ชนิดคือ กะลาเผา, ชังข้าวโพด, แกลบและขี้เลื่อย จากการทดลองทำให้ทราบ The normal Anila stove ให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพสูงที่สุด ค่าความร้อนจากการจำลองการทดลองทำให้เห็นการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวด้านในซึ่งอยู่ที่ประมาณ 845 K เป็นค่าที่สูงสุดไปยังพื้นผิวด้านนอกซึ่งอยู่ที่ประมาณ 361.6 K เป็นค่าต่ำสุดจากการสังเกตการกระจายความร้อนที่พื้นผิวของหม้อหุงต้มจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ตรงกลางด้านล่าง ของหม้อหุงต้ม



ภาพที่ 1 การจำลองการทดลองของเตาเผาถ่านชีวภาพ

ที่มา (Mengesha and Ramayya 2015)

จากงานวิจัยดังกล่าวและการผลิตถ่านชีวภาพในระดับครัวเรือนที่ได้ใช้เตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา ขนาด 50 ลิตรผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้ผลผลิตต่อครั้งเพียง 25-30% จึงเป็นแนวทางในการศึกษาเตา Anila แบบปกติที่ได้มีการเพิ่มในส่วนของคุณภาพเตาเผาในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเป็น 100 และ 200 ลิตรพร้อมกับการติดฉนวนกันความร้อนว่าหากมีฉนวนกันความร้อนแล้ว การกระจายอุณหภูมิจะเป็นอย่างไรและผลผลิตที่ได้มีเพิ่มมากขึ้นหรือไม่รวมถึงการศึกษาชนิดของชีวมวลและเวลาในการแยกสลายด้วยความร้อนที่ขนาดเตาแตกต่างกัน และนำมาสร้างเป็นสมการสหสัมพันธ์เพื่อใช้อธิบายปัจจัยของตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน
2. เพื่อศึกษาผลของคุณภาพเตาเผา ชนิดวัสดุชีวมวล และเวลาในการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน
3. เพื่อหาสหสัมพันธ์ของตัวแปรในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1. ทดสอบโดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลาแบบหุ้มฉนวนขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และใช้เวลาในการทดสอบ 3 ชั่วโมง
2. ในการทดสอบใช้วัสดุชีวมวลได้แก่ ชังข้าวโพด, แกลบ, กิ่งลำไย, เปลือกลำไย และ กะลา กากแผล
3. ปริมาตรวัสดุชีวมวลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบ โดยจะใส่ให้เต็มเตาเผา
4. อุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อนไม่เกิน 350-600 องศาเซลเซียส

5. ใช้โปรแกรม Solid work ในการออกแบบเตาเผาและแกนกลางแล้วใช้โปรแกรม Abaqus ในการจำลองการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการเผาไหม้และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้โปรแกรม Design Expert

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาของการผลิตถ่านชีวภาพ ที่ผลิตจากชีวมวลชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งกล้วย และกะลากาแฟ
2. สามารถทำนายปริมาณและสมบัติของถ่านชีวภาพในการผลิตถ่านชีวภาพได้



บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ

2.1.1 เตาเผาถ่านชีวภาพ

สำหรับเตาเผาถ่านวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยจะใช้ถังน้ำมันเหล็กขนาด 50 ลิตร นำฝาดังน้ำมันมาเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร แต่งขอบรูให้มีขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตรเพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างแกนกลางกับตัวถัง และทำแบบเดียวกันกับด้านล่างของถัง ถังนี้สามารถใช้เผาถ่านได้หลายชนิด เช่น ชังข้าวโพด แกลบ กิ่งไม้ ใบไม้ หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยที่วัสดุที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงต้องแห้ง หรือมีความชื้นประมาณ 10% เพื่อให้สามารถเผาเป็นถ่านชีวภาพได้ง่าย ไม่ต้องใช้ความร้อนไปกับกระบวนการไล่ความชื้นอีก ซึ่งช่วยให้ไม่เกิดควันมาก



ภาพที่ 2 ตัวอย่างถัง 50 ลิตร, ฝาดัง, ด้านล่างถัง

2.1.2 เตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา

เตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลา (anila Stove) เป็นเตาที่ใช้เทคโนโลยีที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน และใช้ต้นทุนไม่สูง สำหรับแปลงชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพในระดับครัวเรือนได้ดี ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นโดย Dr. Ravi Kumar ของมหาวิทยาลัย Mysore ในอินเดีย (Mengesha and Ramayya 2015) เตาประกอบด้วยตัวของเตาเผาที่ฝาและก้นเตาถูกตัดที่จุดศูนย์กลางเพื่อทำเป็นแกนกลาง โดยทั้ง 2 อย่างทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีตัวของเตาเผาบรรจุชีวมวลและด้านในเป็นแกนกลางที่ใส่ฟืน หลังจากเผาฟืนเป็นเวลา 30-40 นาที กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลจึงเริ่มต้นขึ้น

2.1.3 การผลิตถ่านชีวภาพ

วิธีการผลิตถ่านชีวภาพ คือ นำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือชีวมวลมาลดความชื้นให้ต่ำกว่าหรือประมาณ 10 % จากนั้นนำชีวมวลใส่ลงถังให้เต็มแล้วปิดฝาให้แน่น นำเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้ใส่

ลงในแกนเหล็ก ให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงจากด้านบนตัวถังเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ ใช้เวลาในการเผาไหม้ประมาณ 3 ชั่วโมงจนการลุกไหม้ที่เกิดจากแก๊สดับลง ปล่อยให้ถังไว้จนถังเย็นลงจึงจะเปิดฝาดังเพื่อนำถ่านชีวภาพออกจากถัง ทำความสะอาดถัง

2.1.4 ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตจากมวลชีวภาพหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น เศษไม้ ใบไม้ หรือ เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกไม้ แม้กระทั่งมูลสัตว์นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อน” (Pyrolysis) มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธี คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) และแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 °C ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งเตาเผาที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นเทคโนโลยีแบบดั้งเดิม นำมาพัฒนาร่วมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพสังคมในปัจจุบัน ส่วนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็วจะใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที ในกระบวนการเผาไหม้มีเครื่องมือและอุปกรณ์ควบคุมการทำงานทุกขั้นตอน ใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500-1,000 °C ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ จะได้ผลผลิตแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. ส่วนที่เป็นน้ำมัน (Bio-Oil) 2. ส่วนที่เป็นแก๊ส (Bio-Gas) และ 3. ส่วนที่เป็นถ่านชีวภาพ (Bio-char) ซึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้นี้จะแตกต่างกันไป

ถ่านชีวภาพมีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และซีลีเนียม แต่จะเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาทำถ่านชีวภาพ เมื่อนำมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม ถ่านชีวภาพช่วยปรับสภาพดินมีสถานะเป็นประจุลบ สามารถดูดซับหรือจับธาตุอาหารที่เป็นบวกได้ดี ช่วยทำให้ดินมีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์เมื่อทำการเพาะปลูกพืชจะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดี นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีพื้นที่ผิวภายในมาก โดยมีค่า ประมาณ 10-400 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและอุณหภูมิในการเผา ถ่านชีวภาพมีความคงตัวสูงย่อยสลายได้ช้าจึงช่วยกักเก็บคาร์บอนไว้ในดินได้ยาวนานและไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ด้วยลักษณะทางกายภาพมีประจุไฟฟ้าและมีความพรุนสูง เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นตัวสร้างสารอาหารในดินทำให้ดินอุดมสมบูรณ์ ปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชแบบช้า ๆ เพิ่มคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ให้สูงขึ้นสร้างความสมดุลให้กับระบบนิเวศน์ แทนที่จะเผากลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศอันเป็นตัวการหนึ่งของภาวะโลกร้อน ทางกลุ่มเราจึงได้นำเศษวัสดุทางการเกษตร เช่น แกลบ ชังข้าวโพด และเปลือกกล้วย มาผ่านกระบวนการแปรสภาพเป็นไบโอชาร์โดยใช้ความรู้ ทักษะ และเทคโนโลยีทำให้เกิดประหยัดการใช้ปุ๋ย

2.1.5 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ มีลักษณะพื้นผิวที่มีความพรุนสูง มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินทั้งการเพิ่มค่าการดูดซับน้ำ การแลกเปลี่ยนประจุบวกเพื่อยึดธาตุอาหาร ปรับความเป็นกรด-ด่าง และการเพิ่มธาตุอาหารในดิน สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. องค์ประกอบของธาตุ ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฯลฯ
2. ความคงตัว สลายตัวได้ช้ามีอายุการใช้งานได้ยาวนาน
3. พื้นผิวจำนวนมาก ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนพื้นที่ผิวทั้งภายนอกและภายในรูพรุนได้
4. มีความพรุนจำนวนมาก ช่วยกักเก็บน้ำทำให้ดินมีรูพรุนไม่จับตัวแน่นและเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์
5. มีสถานะเป็นประจุลบ ช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกทำให้มีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ ช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชอย่างช้า ๆ ช่วยปรับค่า pH ของดินและน้ำ และช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาโลกร้อน

2.1.6 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และควบคุมอากาศให้เข้าไปเผาไหม้ที่น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้ นี้ เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) การเผาไหม้ นี้จะเป็นการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิประมาณ 350-600 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีอากาศน้อยที่สุด และจะได้ผลผลิตออกมาเป็นถ่านชีวภาพ (Bio-char) ซึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้นี้จะแตกต่างกันไปตามวัสดุชีวมวลที่นำมาใช้ในการผลิต

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization Pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional Pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาสั้น โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15 - 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว

เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีซิว หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

2.1.7 สมบัติทางเคมีของชีวมวล

สมบัติทางเคมีของชีวมวล ตัวอย่างเช่น ชั่งข้าวโพดที่ได้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (รัตถชล อ่างมณี และคณะ 2017) จะมีคุณสมบัติมีความเป็นกรด-ด่าง 7.76 มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 46.06 cmol/kg ถือว่ามีค่าสูงมาก มีปริมาณโซเดียม 240 mg/kg ปริมาณโปแทสเซียม 23,323 mg/kg ปริมาณแมกนีเซียม 1,407 mg/kg และปริมาณแคลเซียม 990 mg/kg มีปริมาณคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ 52.77 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจน 1.09 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณซัลเฟอร์ 0.049 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) 48.41 จากคุณสมบัติที่กล่าวมาพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชั่งข้าวโพดมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในดินที่ไม่สามารถกักเก็บน้ำและธาตุอาหารของพืชหรือมีค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำ เช่น ดินทรายจัด หรือดินเสื่อมโทรมอื่น ๆ

2.1.8 ไฟไนต์เอลิเมนต์

ไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ วิธีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ในเชิงพฤติกรรมของวัสดุ ความร้อน หรือของไหล ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น โดยอาศัยการแก้ ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) เพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่กำหนดผ่านอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

2.1.9 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดย 1.การนำความร้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ 2.การพาความร้อนเกิดขึ้นในสสารสองสถานะ คือ ของเหลวและก๊าซ เมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูงกว่า) ก็จะลงมาแทนที่ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลผ่านของแข็งหรือผ่านของไหลที่อยู่กับที่ อันเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3.การแผ่รังสีความร้อน เมื่อวัตถุสองวัตถุมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ถูกแยกออกจากกันโดยสุญญากาศ กรณีดังกล่าววัตถุจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น โดยพลังงานที่ให้ออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ของวัตถุนั้นๆ

2.2 ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม

ปัจจุบันมีโปรแกรมด้านการเขียนแบบและออกแบบทางวิศวกรรม มากมายหลายโปรแกรมให้เลือกใช้งาน เช่น CAD, CAM, Sketch Up, Autodesk Inventor, SolidWorks ซึ่งเป็นการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการสร้าง ,การปรับเปลี่ยน ,การวิเคราะห์ หรือ การเพิ่มประสิทธิภาพ

ของการออกแบบ ซึ่งโปรแกรม Solidworks นั้นเป็นซอฟต์แวร์หนึ่งที่ถูกพัฒนาและนิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

2.2.1 โปรแกรม Solidworks

โปรแกรม SolidWorks เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์ด้าน CAD ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1995 โดยบริษัท Dassault System ประเทศฝรั่งเศส เพื่อใช้สร้างแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถสูงและใช้งานได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะขึ้นรูปชิ้นงานเป็น Solid หรือ Surface มีเครื่องมือที่รองรับเป็นอย่างดี ทำให้ประหยัดเวลาในการทำงานและยังสนุกกับการทำงานอีกด้วย โปรแกรม SolidWorks มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายดังต่อไปนี้

1. สร้าง Solid Model หรือแบบจำลอง 3 มิติบนคอมพิวเตอร์ สามารถแสดงมุมมองของชิ้นงานได้ทุกมุมมอง สามารถกำหนดวัสดุ และบอกคุณสมบัติต่าง ๆ ของแบบจำลองได้ เช่น มวลน้ำหนัก ความหนาแน่น หรือจุดศูนย์กลางมวล เป็นต้น โดยมีเงื่อนไขการสร้าง Feature - Based Modeling และ Parametric ซึ่งมีความหมายดังนี้

- 1.1 Feature - Based Modeling คือ การออกแบบซอฟต์แวร์ให้สามารถทราบถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของ Solid Model ที่สร้างขึ้นมา เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงชิ้นงาน ในลำดับการทำงานแต่ละขั้นตอนได้ง่ายและรวดเร็ว

- 1.2 Parametric Model คือ การออกแบบซอฟต์แวร์ซึ่งใช้เงื่อนไขหรือสมการทางคณิตศาสตร์ในการแก้ไขขนาดรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่สร้างขึ้นมา

2. Assembly modeling ให้นำเข้าชิ้นส่วน 3 มิติเพื่อประกอบกันเป็นกลไกหรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ และมีเงื่อนไขเป็น Feature - Based Modeling และ Parametric เช่นกัน

3. Drawing สร้างแบบแปลนภาพฉาย 2 มิติจากชิ้นงาน 3 มิติ โดยอัตโนมัติ และบันทึกไฟล์เป็น *.dwg ได้

4. Simulation ใช้ทดสอบการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน และตรวจสอบหาชิ้นส่วนที่ขัดกัน

5. Animation สร้างภาพเคลื่อนไหวแสดงการทำงานของชิ้นส่วน หรือเครื่องจักรกล และสามารถบันทึกไฟล์เป็น *.AVI (ไฟล์วิดีโอ) ได้

6. Sheet Metal Design สามารถสร้างงานพับแบบต่าง ๆ และทำแผนคลี่งานโลหะได้

7. Module การใช้งานอื่น ๆ เช่น Simulation Xpress Analysis Wizard และ Solidworks Simulation ที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2.2 โปรแกรม Unified Finite Element Analysis

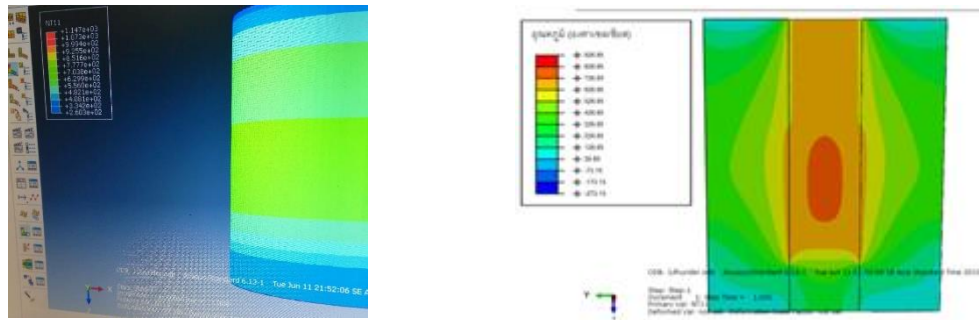
ชุดโปรแกรม Abaqus เป็นชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพและครบวงจร สามารถใช้ตั้งแต่การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีลักษณะทั่วไปจนถึงปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง และสามารถใช้อย่างกว้างขวางหลากหลายกลุ่มอุตสาหกรรม

ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมด้านวิศวกรรมยานยนต์สามารถนำชุดโปรแกรม Abaqus ไปช่วยวิเคราะห์ปัญหาได้ในทุก ๆ รูปแบบ เช่น Dynamic Vibration, Multibody Systems, Impact/Crash, Nonlinear Static, Thermal Coupling, และ Acoustic-structural Coupling โดยนำไปวิเคราะห์ปัญหาทางด้านโครงสร้างของแบบจำลองทั่วไป และมีการผสมผสานเทคโนโลยีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาหลาย ๆ ด้านได้อย่างสมบูรณ์แบบ

หลาย ๆ บริษัทชั้นนำในแต่ละกลุ่มอุตสาหกรรมได้นำความสามารถที่เหนือกว่าของชุดโปรแกรม Abaqus มาผนวกใช้ในขั้นตอนการทำงานเพื่อให้ได้ขั้นตอนการทำงานที่ดีกว่าเดิม และใช้ร่วมกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว เพื่อให้เครื่องมือหรืออุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น ช่วยลดต้นทุน และสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน

2.2.3 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้เข้าถึงได้ง่าย ซึ่งมีหลากหลายตามสายงาน เช่น งานวิเคราะห์โครงสร้าง งานวิเคราะห์การไหล และ อื่น ๆ เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมของวัสดุ และทำนายความเป็นไปได้ของพฤติกรรมวัสดุที่มีรูปร่างต่าง ๆ และเปลี่ยน ไปจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะใหม่ ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแผ่นเหล็กตรงไปเป็นแผ่นเหล็ก โค้งด้วยแรงดัดขนาดต่าง ๆ เป็นต้น จุดเด่นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ลดต้นทุนในขั้นตอนของการออกแบบ โดยการลองผิดลองถูก ด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง 3 มิติบนคอมพิวเตอร์แทนการสร้างต้นแบบ จริง แม้ว่าไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นเครื่องมือที่ดีสำหรับการระบุจุดอ่อนแอจากรูปร่างของชิ้นงานได้อย่างดี แต่ ผู้วิเคราะห์ก็จำเป็นต้องมีความรู้ ความเข้าใจในหลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย เพื่อวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง และนำเชื่อถือตามหลักการและเหตุผล



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3 สมการสหสัมพันธ์

สมการสหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหรือตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับใด และมีความสัมพันธ์ในทิศทางใด เช่นเวลาในการเผาไหม้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ มีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยและมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะมีความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันยกกำลังดังสมการต่อไปนี้

$$y = cx^a$$

เมื่อ x คือ ตัวแปรอิสระ
 y คือ ตัวแปรตาม
 c คือ ค่าคงที่
 a คือ เลขชี้กำลัง

เมื่อมีตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัวซึ่งเรียกว่า “Correlation” จะเขียนสมการใหม่เป็น

$$y = cx_1^{a_1} x_2^{a_2} x_3^{a_3} \dots x_m^{a_m}$$

เมื่อ m คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

เมื่อวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น จึงต้องแก้ไขรูปแบบฟังก์ชันเชิงเส้นโดยการใส่ลอการิทึม (logarithmic) ทั้งสองด้านของสมการ

$$\log y = \log(cx_1^{a_1} x_2^{a_2} x_3^{a_3} \dots x_m^{a_m})$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\log y = \log c + a_1 \log x_1 + a_2 \log x_2 + a_3 \log x_3 + \dots + a_m \log x_m$$

เมื่อ $\log y = Y$; $\log c = C$; $\log x_1 = X_1$; $\log x_2 = X_2$; $\log x_3 = X_3$; ... ; $\log x_m = X_m$
 จะได้ว่า

$$Y = C + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + a_m X_m$$

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Mengesha and Ramayya 2015) เปรียบเทียบการผลิตถ่านชีวภาพโดยมีเตาเผาอยู่ 4 แบบคือ 1. Continuous feed flange less Anila stove. 2. Continuous feeding Anila type stove. 3. Cornel design stove. 4. The normal Anila stove. และใช้โปรแกรม ANSYS 14.5 สำหรับจำลอง CFD(Computational Fluid Dynamic) โดยใช้ชีวมวลที่ต่างกัน 4 ชนิดคือ กะลา กาแฟ, ชั่งข้าวโพด, แกลบและขี้เลื่อย พบว่าผลผลิตชีวมวลสูงสุด 38.91% ได้จากแกลบ 9.83% ได้จากชั่งข้าวโพดและกะลากาแฟ และ 6.43% ได้จากขี้เลื่อยและใช้เตา Anila แบบปกติ

(Wallace 2019) ทำการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพจากการใช้คลื่นไมโครเวฟกับกระบวนการไพโรไลซิสตลอดจนการผลิตการทดสอบและการสร้างแบบจำลองของไบโอคอมโพสิตสามส่วนใหม่โดยการเติมถ่านชีวภาพเป็นตัวเติมเสริมแรงให้กับโพลีเมอร์เสริมใยแก้วทั่วไป (GFRP) คอมโพสิต ไบโอชาร์ผลิตจากทั้งไม้เนื้ออ่อน จากการทดสอบทางกลพบว่าการเติมถ่านชีวภาพจะเพิ่มความแข็งแรงของการดัดงอและโมดูลัสของไบโอคอมโพสิตสูงสุด 34 และ 6.5% ตามลำดับ การทดสอบแรงดึงพบว่าการเพิ่มถ่านชีวภาพมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงของไบโอคอมโพสิต โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสเพิ่มขึ้นเป็น 12.5 และ 2.6% ตามลำดับ และแบบจำลองทางกลของการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันได้รับการประเมินเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องมีความแตกต่างกันมากที่สุดคือ 13% แบบจำลององค์ประกอบถูกสร้างและวิเคราะห์ผ่านซอฟต์แวร์ Abaqus FEA สำหรับการสร้างแบบจำลองการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน

(Zhang et al. 2012) วิเคราะห์องค์ประกอบการผลิตถ่านชีวภาพในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและกระบวนการไพโรไลซิสโดยชีวมวลที่คือ ชั่ง, ใบและก้านของข้าวโพดในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 6.38, 7.92 และ 6.40% ความหนาแน่นเฉลี่ย 282.38, 81.61 และ 127.32 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ารพุนเฉลี่ย 67.93, 86.06 และ 58.51% สำหรับชั่งข้าวโพดใบและก้านตามลำดับ

(Pinto et al. 2016) เนื่องจากได้มีการนำชั่งข้าวโพดมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ถ่านถนนวนกันความร้อนหรือคอนกรีต จึงได้ทดสอบการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากชั่งข้าวโพด พบว่าผลที่ได้จากการทดลองค่าการนำความร้อนของชั่งข้าวโพดแบบเม็ดและแบบแผ่นอัดละเอียด ค่าที่ได้คือ 0.058 และ 0.101 W/m °C ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน 1.99 W/m² °C สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบไม่มีโครงสร้างของชั่งข้าวโพดและสรุปได้ว่ามีศักยภาพเป็นผลิตภัณฑ์ถนนวนความร้อน

(Mishra et al. 1986) นำแกลบ 2 รูปแบบคือ แกลบที่บดและไม่บด มาหาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพคือความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นที่แท้จริง มุมของการ

ปล่อยความร้อน ความชื้น ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อน พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพจะมีความสัมพันธ์กับแกลบที่ไม่บด มากกว่าแกลบที่บด

(Bellow et al. 2016) ได้ทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบร้อยละของผลมะพร้าวโดยใช้ตัวอย่างผลมะพร้าวที่แตกต่างกัน 5 ตัวอย่าง ผลการวิจัยพบว่า กะลามะพร้าวมีสัดส่วน 15% ในขณะ ที่เนื้อและของเหลวจะอยู่ที่ 30% ของผลมะพร้าวทั้งหมด ความแตกต่างของกะลามะพร้าวที่ผ่านการแปรรูปแล้วนั้นการลดความชื้นและสารระเหยนั้นส่งผลให้ความแข็งและความเปราะบางของกะลามะพร้าวที่ผ่านกระบวนการแตกหักดีกว่ากะลามะพร้าวแบบไม่ผ่านกระบวนการ

(Perez-Alegria et al. 2001) ประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและการนำความร้อนของ เมล็ดกาแฟ ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟอยู่ในช่วง 4.2% ถึง 56.0% พื้นฐานเปียก ผลการวิจัยพบว่าความหนาแน่นรวมความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเมล็ด คุณสมบัติทางเรขาคณิตเช่นรัศมีมีความยาวความกว้างและความหนาไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช

(กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ 2017) เปรียบเทียบผลของกระบวนการแก๊สซิไฟเออร์กับ กระบวนการไพโรไลซิส โดยจะแสดงถึงผลด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน เพื่อนำไปพัฒนาเตาชีวมวล ต้นแบบซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในระดับครัวเรือน ชีวมวลที่ใช้ทดสอบ คือ ชังข้าวโพด แกลบ และถ่าน ไม้ ซึ่งจะให้ค่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 24, 21 และ 13 ตามลำดับ เมื่อผสมแกลบกับถ่าน ไม้ และแกลบกับชังข้าวโพด จะทำให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงขึ้นร้อยละ 27 และ 41 ตามลำดับ

(กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ 2016) เปรียบเทียบผลของเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีการควบคุม อากาศที่เข้าไปภายในเตากับไม่ควบคุมการไหลเวียนของอากาศ โดยชีวมวลที่ใช้ทดสอบ คือ ชัง ข้าวโพด กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน ผลการทดลองพบว่าเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีการควบคุม อากาศที่เข้าไปภายในเตาจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาที่ไม่มีควบคุมการไหลเวียน อากาศ ซึ่ง จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยร้อยละ 16.58 และ 14.51 ตามลำดับ และกะลา กาแฟจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า ชังข้าวโพด และเมล็ดมะไฟจีน คือ ร้อยละ 20.93, 18.39 และ 10.42 ตามลำดับ

(รัตถชล อ่างมณี และคณะ 2017) ได้ทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ผลิต จากชีวมวลคือ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และ ศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ถ่านชีวภาพที่ใช้ใน การศึกษานี้ได้จากการใช้เตาแบบแอนนิลา ผลการศึกษา พบว่าถ่านชีวภาพมีลักษณะพื้นผิวที่มีความ พรุณสูง มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $93.36 \text{ m}^2/\text{g}$ ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพพบว่ามี ความเป็นกรดต่าง 7.76 ซึ่ง สามารถนำไปใช้ปรับดินที่มีความเป็นกรดเล็กน้อยได้ มีค่าการ

แลกเปลี่ยนประจุบวก เมื่อใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมี จากการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน

(Budai et al. 2014) ประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิประมาณ 250–800 °C การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับตัวบ่งชี้ลักษณะปัจจุบัน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีทางชีวภาพได้จากสสารระเหย ของซึ่งข้าวโพดและหญ้าพิตแมสแคนดัส ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนของสสารระเหยและอัตราส่วนของ H / C และ O / C เป็นตัวบ่งชี้ที่ดีของการทำให้เป็นถ่านชีวภาพของทั้งสองชีวมวล

(Daosukho and Rodprasert 2015) การพัฒนาคุณภาพดินในพื้นที่ราบที่สูงโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลจากเปลือกทุเรียน เปลือกกล้วย และเปลือกแมคคาตีเมีย เผาที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส โดยเตาชีวมวลแบบแก๊สซิไฟเออร์ (Anila Stove type) พบว่าการปรับปรุงดินโดยใช้ถ่านชีวภาพร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถปรับค่า pH ของดินจาก 6 เป็น 7 ได้และดินที่ได้มีความเสถียรมากกว่า การใช้ปูนขาวที่อัตราส่วนเดียวกัน

(Liu et al. 2018) เปรียบเทียบผลของการปรับเปลี่ยนธาตุเหล็กในกะลามะพร้าวต่อปริมาณของโลหะหลายชนิดคือ แคดเมียม, นิกเกิล และสังกะสี เทียบกับถ่านชีวภาพที่ได้จากกะลามะพร้าว โดยการนำตัวอย่างดินทรายถูกบดที่ 25 °C ซึ่งใช้การปรับเปลี่ยนธาตุเหล็กในกะลามะพร้าว หรือ ถ่านชีวภาพที่ได้จากกะลามะพร้าว โดยเพิ่มที่ละ 0%, 2.5% และ 5% โดยใช้เวลา 63 วันตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า แคดเมียม, นิกเกิล และ สังกะสีที่ละลายในกรด ลดลง 30.1%, 57.2% และ 12.7% ตามลำดับในกลุ่มที่มีการเพิ่มการปรับเปลี่ยนธาตุเหล็กในกะลามะพร้าว 5% ซึ่งบ่งชี้ว่าการปรับเปลี่ยนธาตุเหล็กในกะลามะพร้าว มีผลดีกว่าโลหะที่ไม่ทำให้ละลายเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพที่ได้จากกะลามะพร้าว ดังนั้นผลลัพธ์ของเราชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้เป็นสารช่วยในการตรึงโลหะหนักในดินที่ปนเปื้อนและปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพเคมีและชีวภาพของดิน

(Cho et al. 2017) เปรียบเทียบผลของกระบวนการไพโรไลซิสของแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ช่วยในการเป็นสื่อกลางในการดูดซับ โดยชีวมวลที่ใช้คือกาแพบ ผลการวิจัยพบว่าในสภาวะของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะผลิตถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนสูงซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า produced 70 เท่าของที่ผลิตในสภาวะ ของแก๊สไนโตรเจน อย่างไรก็ตามแม้จะมีพื้นที่ผิวขนาดเล็ก แต่ถ่านชีวภาพที่ผลิตในแก๊สไนโตรเจนนั้นมีความสามารถในการดูดซับ มากกว่า

(ทิวา ต้นสถิต และคณะ 2016) ได้ทดสอบการอุ้มน้ำในดิน โดยการผลิตถ่านชีวภาพจากตอซังและฟางข้าวจากถัง 200 ลิตร พบว่าผลผลิตจากเตา 200 ลิตรมีปริมาณ 45% สามารถนำถ่านชีวภาพมาใช้ในการอุ้มน้ำในดินได้ จากการทดสอบนำถ่านชีวภาพมาผสมทรายในอัตราส่วน 0, 5, 10, 15 และ 20 กรัม ได้ค่าเฉลี่ยการอุ้มน้ำเท่ากับ 32 , 50, 80, 88 และ 99% ตามลำดับ หากเลือกใช้

อัตราส่วนที่ 10% ถ้าเป็นดินทรายผ่านตะแกรงเบอร์ 100 จะสามารถอุ้มน้ำได้เท่ากับ 80% และจะเก็บความชุ่มชื้นไว้ได้ 104 ชั่วโมง

(Puttanakul et al. 2019) เปรียบเทียบผลของเศษพืช และถ่านชีวภาพต่อการกักเก็บอินทรีย์วัตถุ และไนโตรเจนในดิน โดยเศษพืชที่ใช้คือ เปลือกมังคุด, เปลือกไม้โกงกาง และเมล็ดสะเดา ชีวมวลที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพคือ กะลามะพร้าว, เปลือกมะพร้าว และซังข้าวโพด ผลการวิจัยพบว่าการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพโดยใช้ชีวมวลเป็นเปลือกมะพร้าวมีค่าอินทรีย์วัตถุสูงสุด แต่การปรับปรุงดินด้วยเปลือกไม้โกงกางมีไนโตรเจนสูงสุด เท่ากับ 949.38 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกิโลกรัม เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกซึ่งมีความสามารถในการยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน

(Panyoyai et al. 2018) ศึกษาออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีการเจาะแกนกลางที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพในปริมาณสูงสุด จากนั้นทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการกระจายอุณหภูมิและเปรียบเทียบกับกรทดลอง จากผลการจำลองสามารถเผยให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตและคุณภาพของไบโอชาร์

(Panyoyai et al. 2019) ศึกษาความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพคือ ซังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย โดยใช้เตาเผาขนาด 50 ลิตร ขนาดรูเจาะ 6.35 มม. ผลการทดลองทำให้ทราบว่า ผลผลิตที่ได้เท่ากับ 15.7 wt.%, 24.3wt.%, และ 11.4wt.% สำหรับ ซังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย ตามลำดับ

(Kanouo et al. 2018) ศึกษาเตาเผาแบบ A pilot-scale retort kiln โดยใช้ชีวมวล 2 แบบคือ ซังข้าวโพดและเปลือกต้นยูคาลิปตัส ประสิทธิภาพการผลิตมีความแตกต่างกันระหว่าง 33-68% เมื่อเทียบกับ 10-20% ที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมและมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์ของ European Biochar Certificate (EBC) และ International Biochar Initiative (IBI)

(Wijitkosum and Jiwonok 2019) ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำเพื่อเกษตรกรในท้องถิ่น โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตคือ ลำต้นมันสำปะหลังและซังข้าวโพด พบว่าลำต้นมันสำปะหลังให้พื้นที่ผิว Brunauer-Emmett-Teller มากที่สุดและในการผลิตถ่านชีวภาพซังข้าวโพดให้ผลผลิตสูงสุด

ปัจจุบันมีการผลิตถ่านชีวภาพในระดับครัวเรือนที่ได้ใช้เตาเผาถ่านชีวภาพแบบอนิลานขนาด 50 ลิตร การออกแบบด้วยเตาแบบอนิลาน (Anila Stove) โดยเตาชนิดนี้ออกแบบและคิดค้นโดย Dr. Ravi Kumar ของมหาวิทยาลัย Mysore ในอินเดีย (Mengesha and Ramayya 2015, รัตชล อ่างมณี และคณะ 2017) อุปกรณ์นี้จะมีแกนกลางที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ ด้านในและมีพื้นที่สำหรับบรรจุชีวมวลอยู่ภายในที่ถูกแยกออกจากแกนกลาง ด้านล่างของแกนกลางจะมีช่องให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ เมื่อให้ความร้อนแก่แกนกลางด้วยเชื้อเพลิงจนแกนกลางร้อนขึ้น (Mengesha and

Ramayya 2015, Intagun et al. 2018) จะส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนที่บรรจุชีวมวลมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวใช้เวลาทั้งสิ้น ประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง (Daosukho and Rodprasert 2015) สามารถผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เรียกว่า ชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ชังข้าวโพด (Zhang et al. 2012, Budai et al. 2016) แกลบ กิ่งไม้ลำไย (Panyoyai et al. 2019) เปลือกลำไยที่ กะลากาแฟ จึงนำชีวมวลเหล่านี้มาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียส (Budai et al. 2014) ในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยที่สุด ซึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้นี้จะแตกต่างกันไปตามวัสดุชีวมวลที่นำมาใช้ในการผลิต ในด้านปัจจัยหนึ่งของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ คือ อุณหภูมิจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน บางชนิดมีคุณสมบัติคลายฉนวนที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อนทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูง แต่ก็ไม่ได้ทำให้ผลผลิตที่ได้มากตามไปด้วย เช่น กะลากาแฟ (Cho et al. 2017, Mengesha and Ramayya 2017, Mosisa et al. 2019) เป็นต้น โดยจากการศึกษาเหล่านี้เผยให้เห็นว่า ไม่เพียงแต่คุณสมบัติต่าง ๆ ของชีวมวลที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ แต่ยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของการกระจายอุณหภูมิที่มาจากรูเจาะแกนกลางที่มีขนาดแตกต่างกันยังส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิที่ไม่เหมือนกัน (Panyoyai et al. 2018, Panyoyai et al. 2019) และการควบคุมอุณหภูมิจากแหล่งกำเนิดความร้อนก็เป็นปัจจัยของกระบวนการทดสอบอีกด้วย เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันเมื่อได้รับความร้อนใน เวลาไม่เท่ากัน เช่น ชังข้าวโพด (Budai et al. 2014) แกลบ (Mishra et al. 1986) เป็นต้น

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานการทดสอบจริง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

จากการศึกษาทางทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางความร้อนและสมบัติทางกายภาพของเตาเผาถ่านชีวภาพ ทำให้รู้ถึงหลักการทำงาน ชนิดวัสดุ และลักษณะของเตาเผาถ่านชีวภาพ ที่เป็นแนวทางในการพัฒนาเตาเผาถ่านชีวภาพให้มีประสิทธิภาพ โดยศึกษาจากการค้นคว้าหนังสือตำราเอกสารที่เกี่ยวข้อง รวมถึงงานวิจัยอย่างละเอียด ดังปรากฏในบทที่ 2 เตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบที่ออกแบบเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลหาค่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตา ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้โครงการนี้มีดังนี้

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพ

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดวัสดุอุปกรณ์ในการสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพ

ลำดับ	รายการวัสดุ - อุปกรณ์	จำนวน	หน่วย
1	ถังเหล็ก ขนาด 50 ลิตร	1	ถัง
2	ถังเหล็ก ขนาด 100 ลิตร	1	ถัง
3	ถังเหล็ก ขนาด 200 ลิตร	1	ถัง
4	ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 46.7 เซนติเมตรหนา 0.2 เซนติเมตร	1	ท่อ
5	ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.18 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร	1	ท่อ
6	ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.3 เซนติเมตร สูง 82.7 เซนติเมตรหนา 0.2 เซนติเมตร	1	ท่อ
7	ตลับเมตร	1	ตลับ
8	ดอกสว่าน	3	ดอก
9	เครื่องเจาะตั้งโต๊ะ	1	เครื่อง
10	เครื่องไฟเบอร์ตัดเหล็ก	1	เครื่อง
11	เครื่องเจียรมือ	1	เครื่อง
12	ค้อน	1	ค้อน
13	เหล็กตอกนำศูนย์	1	เข็ม
14	แท่นวางเตาเผาชีวภาพ	1	แท่น

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เก็บข้อมูล และบันทึกข้อมูล
 ตารางที่ 2 รายละเอียดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เก็บข้อมูลและบันทึกข้อมูล

ลำดับ	รายการวัสดุ - อุปกรณ์	จำนวน	หน่วย
1	ซังข้าวโพด	เต็ม	ถัง
2	แกลบ	เต็ม	ถัง
3	เปลือกลำไย	เต็ม	ถัง
4	กิ่งไม้ลำไย	เต็ม	ถัง
5	กะลาเผา	เต็ม	ถัง
6	เชื้อเพลิงแข็งอัดก้อน ของถัง 50 ลิตร	2	กิโลกรัม
7	เชื้อเพลิงแข็งอัดก้อน ของถัง 100 ลิตร	3	กิโลกรัม
8	เชื้อเพลิงแข็งอัดก้อน ของถัง 200 ลิตร	6	กิโลกรัม
9	เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	8	หัววัด
10	Data Logger	2	โปรแกรม
11	คอมพิวเตอร์	1	เครื่อง
12	เครื่องชั่งดิจิตอล	1	เครื่อง

3.1.3 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองสภาพ
 ตารางที่ 3 รายละเอียดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองสภาพ

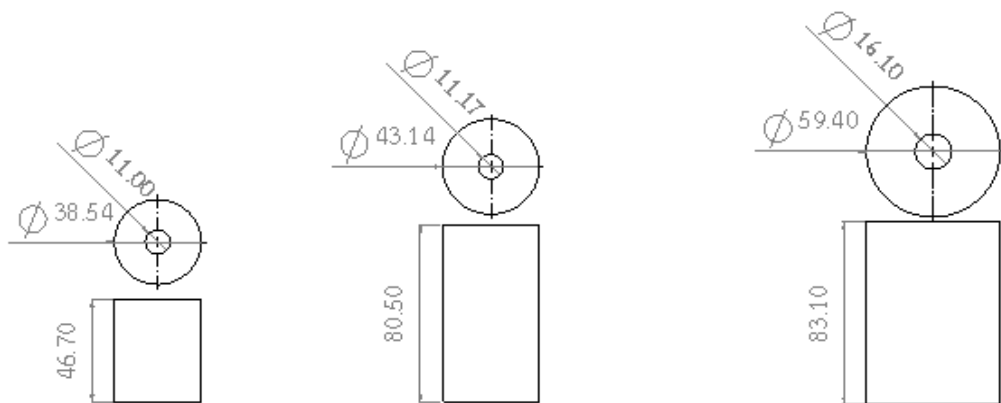
ลำดับ	รายการวัสดุ - อุปกรณ์	จำนวน	หน่วย
1	โปรแกรมที่ใช้ทดสอบ	2	โปรแกรม
2	เครื่องคอมพิวเตอร์	1	เครื่อง

3.2 วิธีการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพ

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์การศึกษาดังกล่าวข้างต้น จึงมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้คือ การออกแบบโครงสร้างของเตาเผา การออกแบบแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ การสร้างและการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การออกแบบโครงสร้างของเตาเผาถ่านชีวภาพ

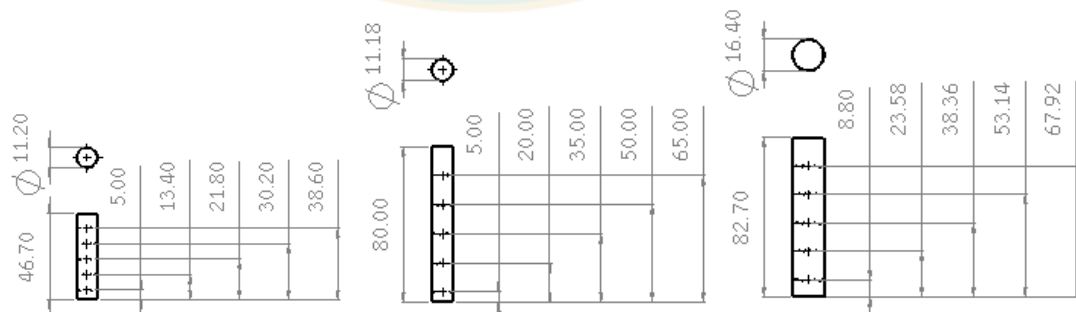
ส่วนประกอบหลักของเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบ จะประกอบด้วยตัวเตาเผาและแกนกลางบรรจุเชื้อเพลิง ซึ่งแต่ละส่วนจะมีการออกแบบตามหลักการและทฤษฎีทางวิศวกรรม เพื่อนำแบบที่ได้ไปสร้างเป็นเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบ ที่สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพสูงได้ โดยส่วนที่เป็นตัวเตาเผาจะมีลักษณะดังต่อไปนี้ และมีความหนา 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5 เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตรถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks (หน่วยเป็นเซนติเมตร)

3.2.2 การออกแบบแกนกลางเตาเผาถ่านชีวภาพ

แกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก คิดเป็นขนาด 1 ใน 3 ของตัวเตาเผา แกนกลางของตัวเตาใช้สำหรับการเผาไหม้และใช้ส่งผ่านความร้อนให้กับบริเวณของการควบคุมสภาวะอากาศเพื่อให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวลที่บรรจุอยู่ในเตาเผา ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพโดยเตาขนาด 50 ลิตร จะใช้แกนเหล็กดัดในที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรขนาดรูเจาะ 1 หุน (3.175 มิลลิเมตร) จำนวน 15 รูเจาะ มีทั้งหมด 5 แถว แถวละ 8.4 เซนติเมตร, เตาขนาด 100 ลิตรจะใช้แกนเหล็กดัดในที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรขนาดรูเจาะ 1 หุน (3.175 มิลลิเมตร) จำนวน 24 รูเจาะ มีทั้งหมด 5 แถว แถวละ 15 เซนติเมตร และ เตาขนาด 200 ลิตรจะใช้แกนเหล็กดัดในที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรขนาดรูเจาะ 1 หุน (3.175 มิลลิเมตร) จำนวน 44 รูเจาะ มีทั้งหมด 5 แถว แถวละ 14.78 เซนติเมตร เพื่อให้อากาศสามารถไหลผ่านรูเจาะของแกนกลางมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยวัสดุแกนกลางที่ใช้ทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอน



ภาพที่ 6 แกนกลางเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตรออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks (หน่วยเป็นเซนติเมตร)

ตารางที่ 4 ขั้นตอนการสร้างแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ

ลำดับ	รายการ
1	ตัดท่อเหล็กกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 11.00 เซนติเมตร สูง 46.7 เซนติเมตร 1 ชิ้นด้วยเครื่องไฟเบอร์ตัดเหล็ก เพื่อทำแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ
2	ตัดท่อเหล็กกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 11.18 เซนติเมตร สูง 80.00 เซนติเมตร 1 ชิ้นด้วยเครื่องไฟเบอร์ตัดเหล็ก เพื่อทำแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ
3	ตัดท่อเหล็กกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 16.30 เซนติเมตร สูง 82.7 เซนติเมตร 1 ชิ้นด้วยเครื่องไฟเบอร์ตัดเหล็ก เพื่อทำแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ
4	เจียรเศษเหล็กบริเวณขอบล่างและขอบบนของท่อเหล็กที่จะนำมาทำแกนกลาง
5	ทำการเจาะรู เพื่อระบายแก๊สและเป็นรูผ่านของอากาศในขณะที่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่แกนกลาง ขนาด 3.17 มิลลิเมตร หรือ 1 หุน เป็น 5 ระดับ โดยให้ห่างจากขอบด้านล่างขึ้นไป 5.00 เซนติเมตร 13.40 เซนติเมตร 21.80 เซนติเมตร 30.20 เซนติเมตร และ 38.60 เซนติเมตร เจาะรูด้วยดอกสว่านรอบท่อเหล็ก ในแต่ละระดับ จะเจาะรูรอบท่อเหล็กเป็นจำนวน 15 รูเจาะ
6	ทำการเจาะรู เพื่อระบายแก๊สและเป็นรูผ่านของอากาศในขณะที่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่แกนกลาง ขนาด 3.17 มิลลิเมตร หรือ 1 หุน เป็น 5 ระดับ โดยให้ห่างจากขอบด้านล่างขึ้นไป 5.00 เซนติเมตร 20.00 เซนติเมตร 35.00 เซนติเมตร 50.00 เซนติเมตร และ 65.00 เซนติเมตร เจาะรูด้วยดอกสว่านรอบท่อเหล็ก ในแต่ละระดับ จะเจาะรูรอบท่อเหล็กเป็นจำนวน 24 รูเจาะ
7	ทำการเจาะรู เพื่อระบายแก๊สและเป็นรูผ่านของอากาศในขณะที่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่แกนกลาง ขนาด 3.17 มิลลิเมตร หรือ 1 หุน เป็น 5 ระดับ โดยให้ห่างจากขอบด้านล่างขึ้นไป 8.80 เซนติเมตร 23.58 เซนติเมตร 38.36 เซนติเมตร 53.14 เซนติเมตร และ 67.92 เซนติเมตร เจาะรูด้วยดอกสว่านรอบท่อเหล็ก ในแต่ละระดับ จะเจาะรูรอบท่อเหล็กเป็นจำนวน 44 รูเจาะ

ตารางที่ 5 ขั้นตอนการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบ

ลำดับ	รายการ
1	ประกอบเตาเผาถ่านชีวภาพโดยการนำเอาแกนกลางที่เจาะรูสมบูรณ์แล้วมาใส่ลงในเตาเผาที่ทำการเจาะรูแล้ว ตรวจสอบดูให้เส้นผ่าศูนย์กลางของรูแกนกลางตรงกับก้นของเตาเผาถ่านชีวภาพ
2	ปิดฝาถังที่ทำการเจาะรูให้ตรงกับแกนกลางที่ใส่ลงไปในถัง
3	ทำการล๊อคฝาให้สนิท
4	ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อทำการวัดอุณหภูมิข้างในระหว่างการทดลอง
5	เจาะข้างถังด้านขวา 3 ตำแหน่ง เพื่อติดตั้งตัววัดเทอร์โมคัปเปิล ใช้วัดอุณหภูมิขอบถังของเตาเผาถ่านชีวภาพ ที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลาง และด้านล่าง ของขอบถัง
6	เจาะฝาถังด้านบน 1 ตำแหน่ง เพื่อติดตั้งตัววัดเทอร์โมคัปเปิล ใช้วัดอุณหภูมิตรงกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ ที่ตำแหน่งของแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพระดับกลางถึง ระหว่างแกนกลางกับขอบถังด้านใน
7	เจาะข้างถังด้านซ้าย 3 ตำแหน่ง เพื่อติดตั้งตัววัดเทอร์โมคัปเปิล ใช้วัดอุณหภูมิแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ ที่ตำแหน่งของแกนกลางด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของแกนกลาง

3.2.3 การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริง

การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริงมีวิธีการ ดังนี้

1. เตรียมเตาเผาที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน โดย มีความหนา 0.2 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางถึงขนาด 11 เซนติเมตร ทั้งด้านบน (ฝาถัง) ดังภาพที่ 7 และด้านล่างเตา (ก้นถัง) ภาพที่ 8
2. นำแกนกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 46.7 เซนติเมตร ที่เจาะรูเตรียมไว้ ใส่เข้าไปในเตาเผา ดังภาพที่ 9
3. นำวัสดุที่ต้องการเผาเป็นถ่านชีวภาพมาตากแห้งให้แห้งหรือมีความชื้นน้อยที่สุด
4. นำชีวมวลใส่เข้าไปในเตาเผา บริเวณรอบ ๆ แกนกลางจนเต็ม ดังภาพที่ 10 แล้วปิดฝาล๊อคให้แน่นแล้วชั่งน้ำหนักของวัสดุก่อนทำการเผาและทำการหุ้มฉนวน
5. บรรจุเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ เชื้อเพลิงแข็งอัดก้อน 2,000 กรัม และชั่งข้าวโพด 1,000 กรัม สำหรับเตาเผา 50 ลิตร เชื้อเพลิงแข็งอัดก้อน 3,000 กรัม และชั่งข้าวโพด 1,000 กรัม สำหรับเตาเผา 100 ลิตร และ เชื้อเพลิงแข็งอัดก้อน 6,000 กรัม และชั่งข้าวโพด 1,000 กรัม

สำหรับเตาเผา 200 ลิตร โดยแบ่งลงในแกนกลางโดยจะทำการเติมเชื้อเพลิงทุกๆครึ่งชั่วโมง จนครบ 3 ชั่วโมง

6. ดัดเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งดังระบุในตารางที่ 5
7. ใช้ก้อนอิฐ หรือข้อเหล็กวางรองด้านล่างของตัวถังให้อยู่สูงกว่าเตาเผาเชื้อเพลิงประมาณ 3 เซนติเมตรเพื่อให้ความร้อนผ่านได้ซึ่งจะทำให้ถังที่บรรจุวัสดุได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง
8. จุดไฟด้านบนของเตาเผาชีวภาพที่เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนโดยใช้เวลาประมาณ 0 - 15 นาที และใช้เวลาเผาประมาณ 3 ชั่วโมง ในการเผาถ่านชีวภาพ
9. คัดแยกถ่านชีวภาพที่ได้จากการเผา ซึ่งน้ำหนักหาน้ำหนักวัสดุหลังการเผา
10. ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงหลังจากการเผาไหม้เสร็จสิ้นลง
11. เปลี่ยนเตาเผาที่มีขนาดอื่น และแกนกลางสำหรับเตานั้น ๆ แล้วทำการทดลองซ้ำใหม่เพื่อหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีที่สุด เมื่อเปลี่ยนขนาดเตาเผาครบแล้ว ให้เปลี่ยนชนิดของวัสดุชีวมวลเป็น แล้วทำการทดลองใหม่ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ฝาถังที่เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร



ภาพที่ 8 ก้นถังที่เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 11 เซนติเมตร



ภาพที่ 9 แกนกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตรที่เจาะรูแล้ว



ภาพที่ 10 นำซีมวอลใส่ลงไปในเตาเผา



ภาพที่ 11 บรรจุเชื้อเพลิงลงในแกนกลางเตาเผาถ่านชีวภาพ

3.2.4 การเก็บข้อมูลจากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริง

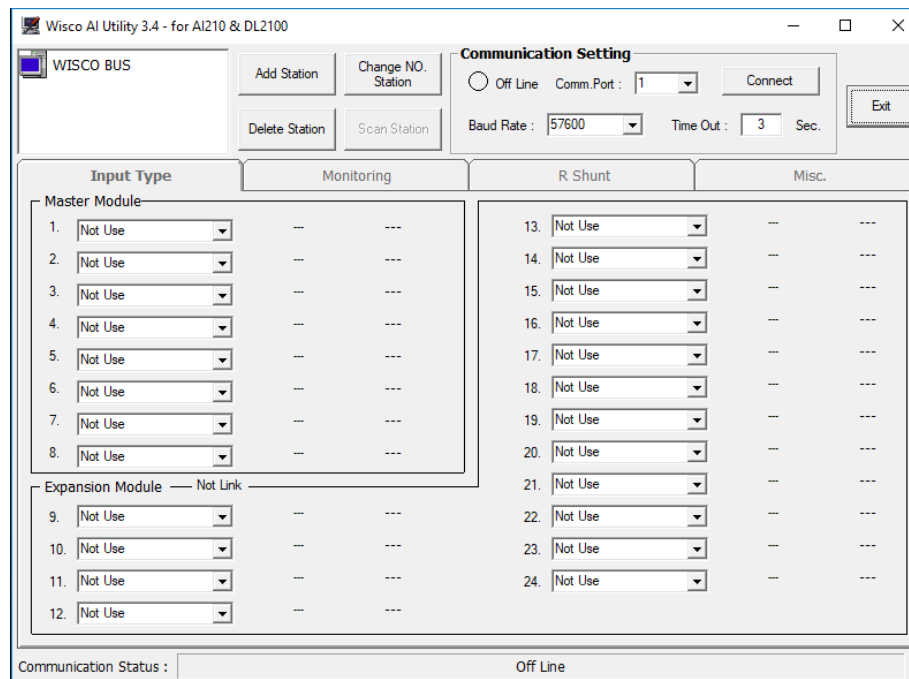
ขั้นตอนการเก็บข้อมูลจากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริงมีดังนี้

1. ในการทดสอบแต่ละรอบจะใส่ซีมวอลเต็มถัง โดยกำหนดปริมาณของน้ำหนักเชื้อเพลิงแข็งอัดก้อนที่ 2 กิโลกรัม ซังข้าวโพดแห้งประมาณ 1 กิโลกรัม สำหรับเตาเผาขนาด 50 ลิตร น้ำหนักเชื้อเพลิงแข็งอัดก้อนที่ 3 กิโลกรัม ซังข้าวโพดแห้งประมาณ 1 กิโลกรัม สำหรับเตาเผาขนาด 100 ลิตร น้ำหนักเชื้อเพลิงแข็งอัดก้อนที่ 6 กิโลกรัม ซังข้าวโพดแห้งประมาณ 1 กิโลกรัม สำหรับเตาเผาขนาด 200 ลิตร

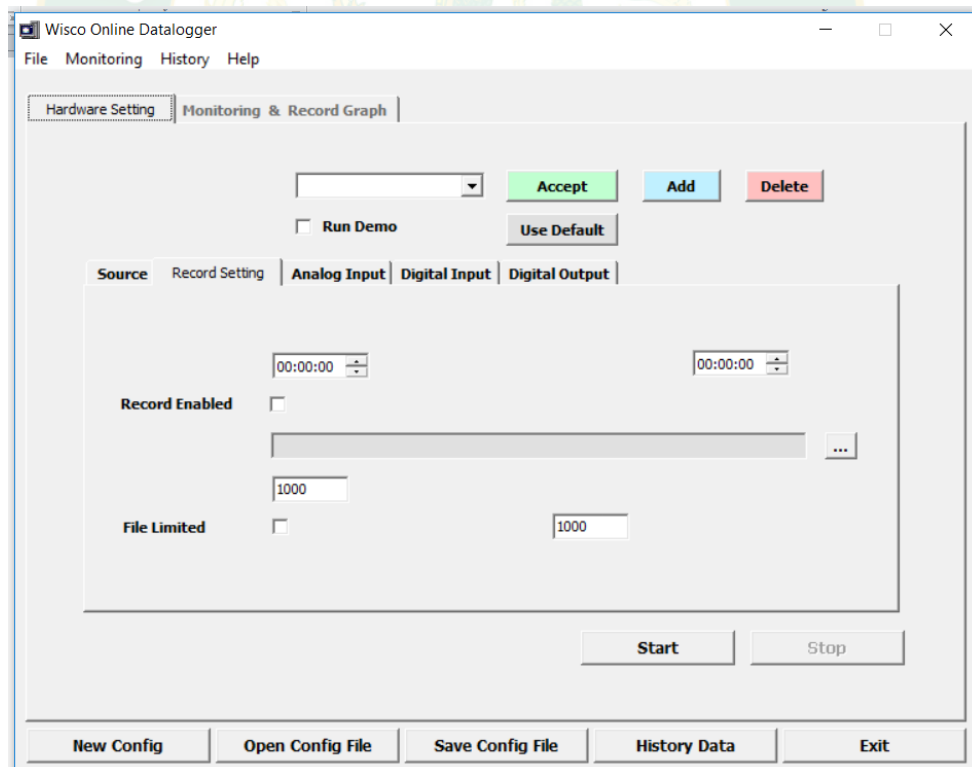
2. อุปกรณ์รับสัญญาณ Analog Input (Analog Input Module AI210) 8 Channels Analog Input ดังภาพที่ 12
3. โปรแกรม Wisco AI Utility จะมีหน้าที่หลักคือการทดสอบการทำงานของโมดูลว่าถูกต้องหรือไม่ และเลือกชนิดของ Analog Input ที่ต้องการใช้งานให้กับโมดูล โดยโมดูลที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม ดังภาพที่ 13
4. โปรแกรม Wisco Online Datalogger OD04 ใช้สำหรับอ่านค่าวัดในขณะนั้น (Real Time) และการบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยแสดงข้อมูลได้ทั้งแบบตารางข้อมูล ดังภาพที่ 14 และกราฟข้อมูล ดังภาพที่ 15 อีกทั้งยังสามารถแปลงไฟล์ข้อมูลเป็นชนิด *.csv เพื่อนำไปใช้งานใน Microsoft Excel
5. ในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจะติดกับตัวยึดที่ได้เจาะบริเวณเตาเผาผ่านชีวภาพ โดยจะวัดอุณหภูมิบริเวณตรงกลางเตาเผา ระหว่างแกนกลางและขอบถังด้านใน และผนังด้านในถัง จะแบ่งวัดอุณหภูมิด้านบนถึง กลางถึง และด้านล่างถึง ส่วนแกนกลางจะแบ่งวัดอุณหภูมิด้านบนตรงกลาง และด้านล่างของแกนกลาง ดังภาพที่ 16



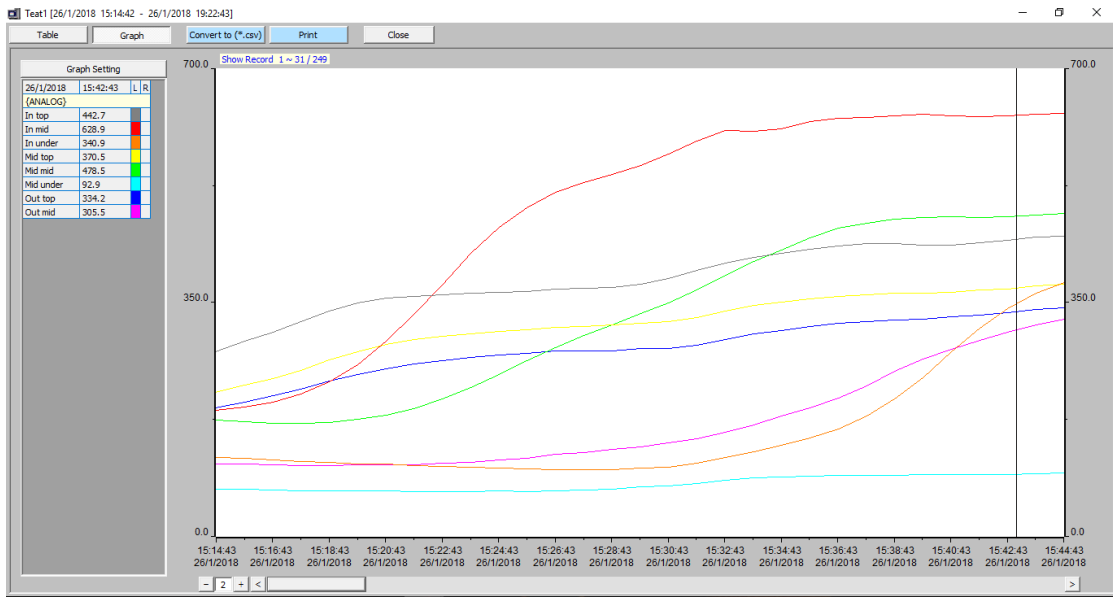
ภาพที่ 12 อุปกรณ์รับสัญญาณ Analog Input (Analog Input Module AI210)



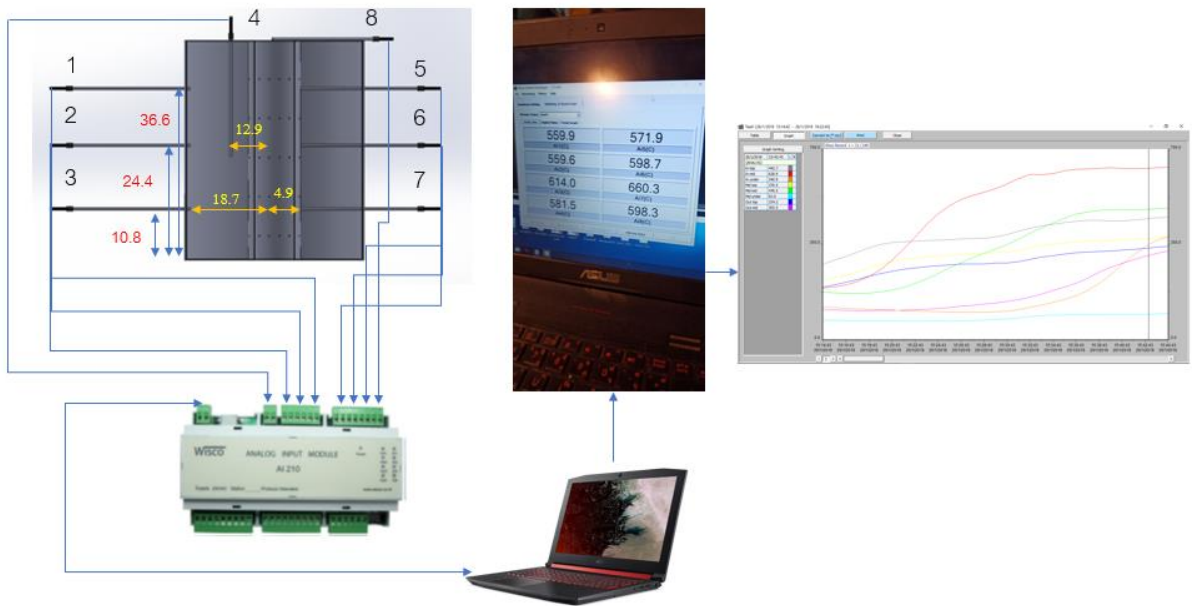
ภาพที่ 13 Wisco AI Utility ใช้สำหรับการอ่านค่าและการตั้งค่า



ภาพที่ 14 โปรแกรม OD04 แสดงค่าอุณหภูมิระหว่างการทดลอง

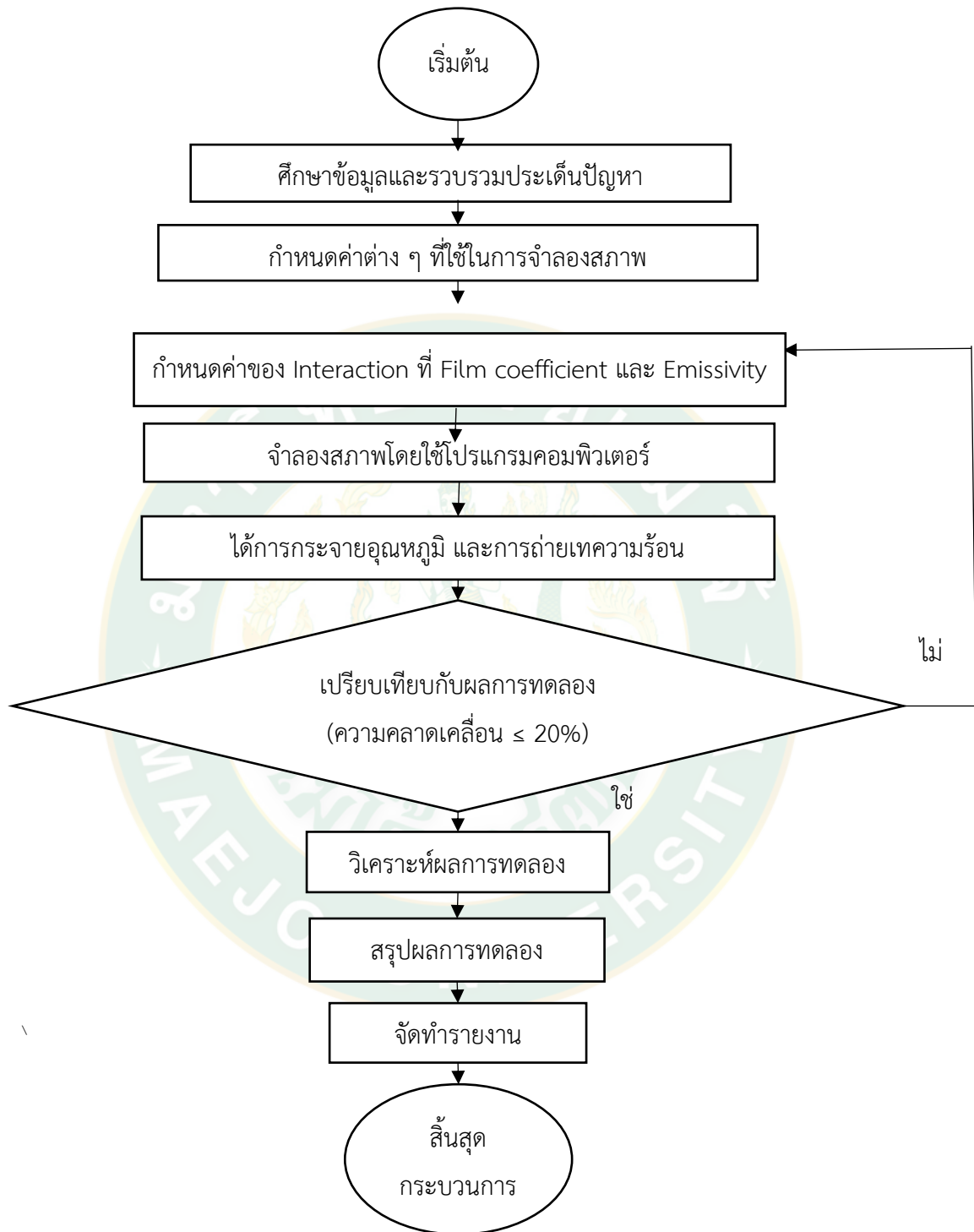


ภาพที่ 15 โปรแกรม OD04 แสดงกราฟอุณหภูมิระหว่างการทดลอง



ภาพที่ 16 การเก็บอุณหภูมิจากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบจริง (หน่วยที่ใช้เป็นหน่วยเซนติเมตร)

3.3 วิธีการจำลองสภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการดำเนินงานการจำลองการทดลอง

3.3.1 หลักการจำลองสภาพเตาเผาผ่านชีวภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองสภาพเตาเผาผ่านชีวภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้นำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองเผาชีวภาพในทางปฏิบัติจริง ซึ่งขั้นตอนทดสอบคือนำแบบที่เขียนโดยโปรแกรม SolidWorks มาทำการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ชอบของเตาเผาที่ได้จากการวัดในการเผาจริง ซึ่งทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผล เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในช่วงเวลาที่ อุณหภูมิเกิดความร้อนที่คงที่ จากนั้นทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเตาเผาชีวภาพที่ได้จากการ จำลองสภาพกับผลการทดลองเผาในเตาเผาต้นแบบจริง ในโครงการนี้ได้ทำการติดตั้งฉนวนเพื่อดูการ กระจายอุณหภูมิในเตาเผา สำหรับทำถ่านชีวภาพ

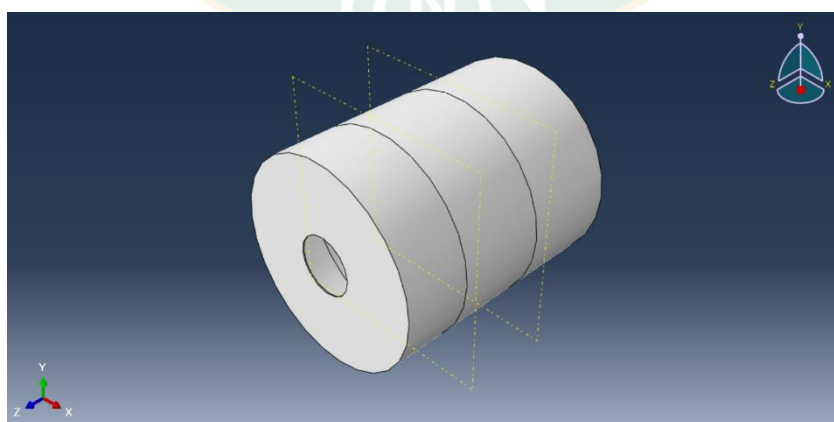
การเปรียบเทียบผลการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองที่ได้จากการ ทดลองเผาจริงนั้นจะต้องมีผลไปในทิศทางเดียวกัน ด้วยพิจารณาจากการแสดงแนวโน้มของกราฟทั้ง สอง

3.3.2 ขั้นตอนในการกำหนดค่าในโปรแกรม

ทำการวาดแบบในโปรแกรมที่จะใช้ทดสอบซึ่งเป็นในรูปแบบ 3 มิติ ซึ่งเราจะทำการกำหนด พื้นที่ของอากาศที่ไหลผ่านรูออกบริเวณรอบ ๆ ของแกนกลางที่ใช้เป็นห้องเผาไหม้ให้สอดคล้องกับ แบบของเตาเผาที่ใช้ในการทดสอบจริง

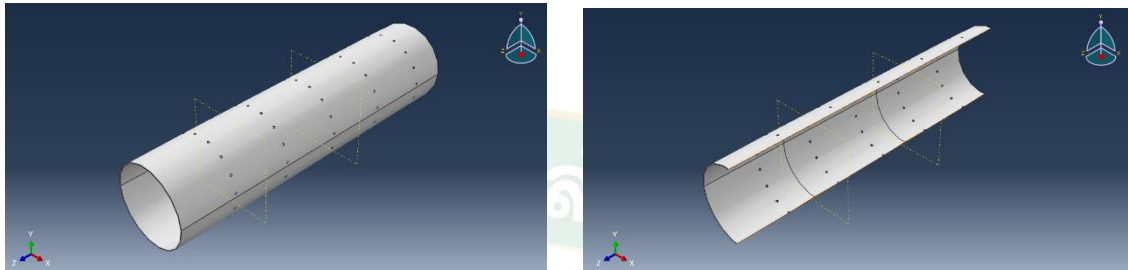
ก. สร้าง Part

สร้างถังบรรจุชีวมวล โดยมีค่า Dimension ของรัศมีภายในของถัง 5.5 เซนติเมตร รัศมี ภายนอกของถัง 19.27 เซนติเมตร ความสูงของถัง 46.7 เซนติเมตร และความหนาถัง 2 เซนติเมตร

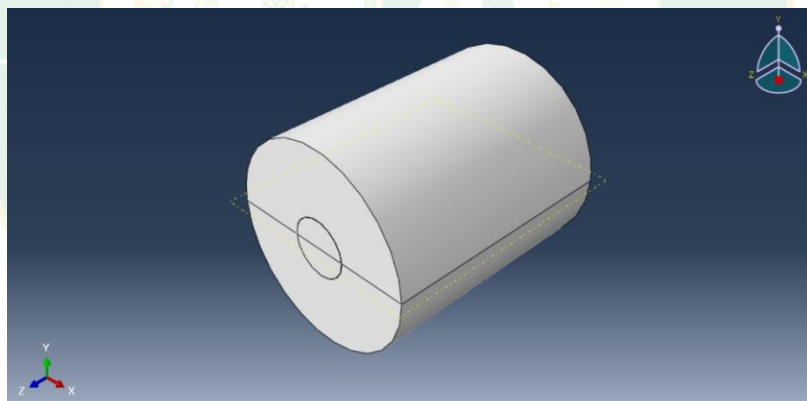


ภาพที่ 18 การสร้าง Part เตาเผาขนาด 50 ลิตร ในโปรแกรม Abaqus

สร้างแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ โดยมีค่า Dimension ของรัศมีภายในของแกนกลาง 5.5 เซนติเมตร รัศมีภายนอกของแกนกลาง 5.6 เซนติเมตร และความสูงของแกนกลาง 46.7 เซนติเมตร กำหนดรูเจาะแกนกลางจำนวน 15 รู ซึ่งมีขนาดของรูเจาะแกนกลางเท่ากับ 3.175 มิลลิเมตร จากนั้นทำการ Partition แกนกลางให้เป็น 3 ส่วน เพื่อใช้เป็นพื้นผิวในการระบุเงื่อนไขที่ขอบ (BCs) ในแบบจำลอง



ภาพที่ 19 การ Partition ในโปรแกรม Abaqus สร้างขอบเขตของอากาศ โดยเป็นส่วนที่อยู่ในเตาเผาถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 20 การสร้างขอบเขตของอากาศในโปรแกรม Abaqus

ข. กำหนด Material

กำหนดสมบัติของวัสดุในการจำลองสภาพทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแบ่งออกเป็น 7 วัสดุ ตามตัวแปรต้นที่กำหนดไว้ ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน ชิงช้าวัตต์ แกลบ กิ่งไม้ลำไย เปลือกลำไย กะลากาแฟ และฉนวน

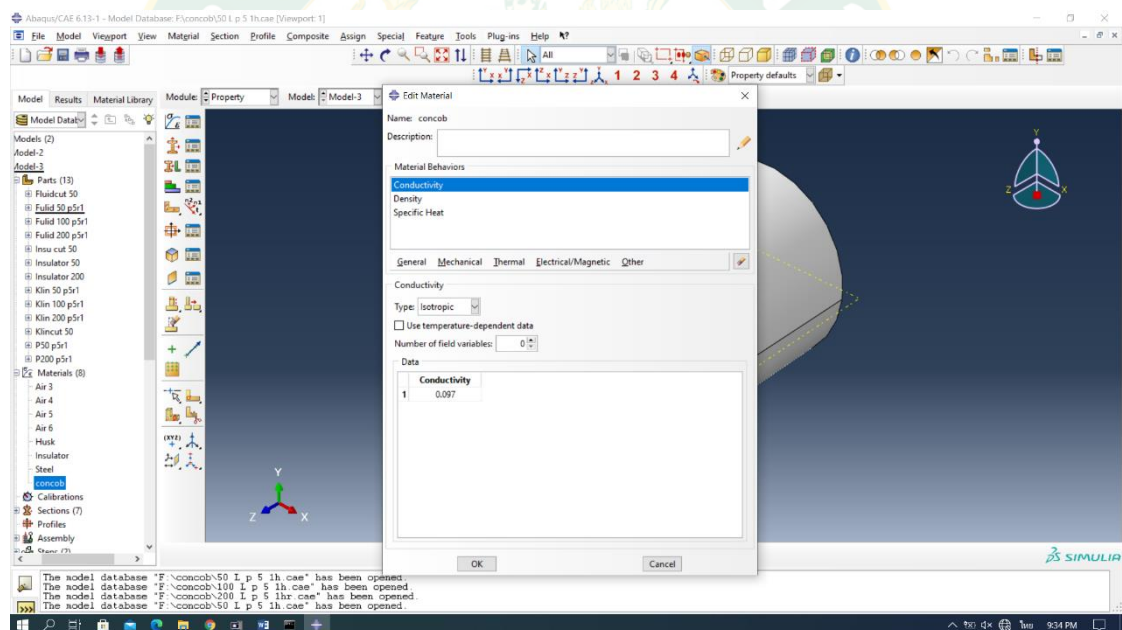
ข.1 Conductivity

ข.2 Density

ข.3 Specific Heat (กำหนดเป็น Constant Pressure)

ตารางที่ 6 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรม
 ทิมา (Petchaihan et al. 2020, Srisophon et al. 2020)

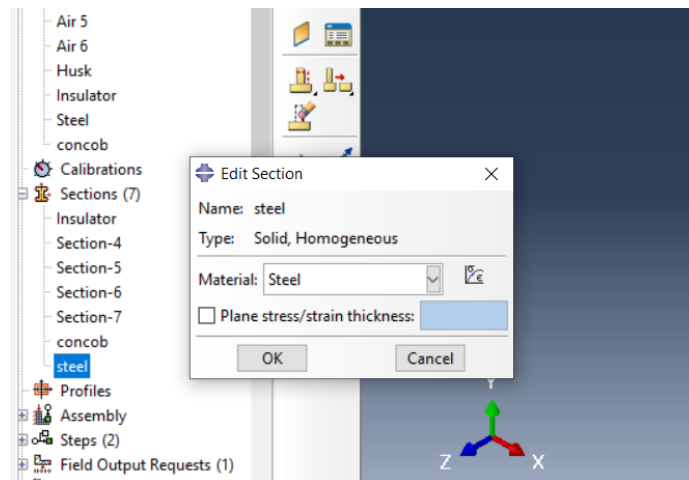
	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg-K)
เหล็กกล้าคาร์บอน	54	8050	490
ซีเมนต์	0.097	300	2021.05
แกลบ	0.046	150	1087.31
กิ่งไม้ลำไย	0.192	165.9	1253
เปลือกลำไย	0.2992	84.47	2800
กะลาภาแพ	0.108	63.8	1431
ฉนวน	0.114	128	921.096



ภาพที่ 21 การกำหนด Material ในโปรแกรม Abaqus

ค. กำหนด Section

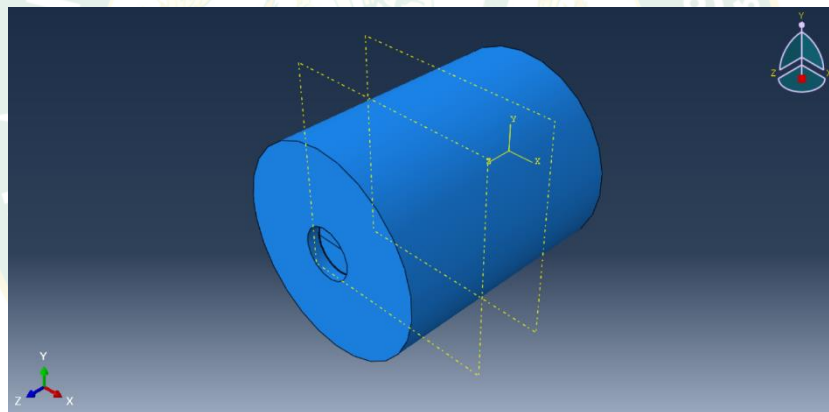
กำหนด Section Assignment แต่ละ Part ตาม Material ที่กำหนดไว้ข้างต้นให้ครบทุกชนิดวัสดุ โดยถึงบรรจขีวมวลกำหนดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน แกนกลางกำหนดเหล็กกล้าคาร์บอน ฉนวนกำหนดเป็นคุณสมบัติของฉนวน และด้านในถึงกำหนดให้ใช้สมบัติของขีวมวลแต่ละชนิด



ภาพที่ 22 การกำหนด Section ในโปรแกรม Abaqus

ง. Assembly

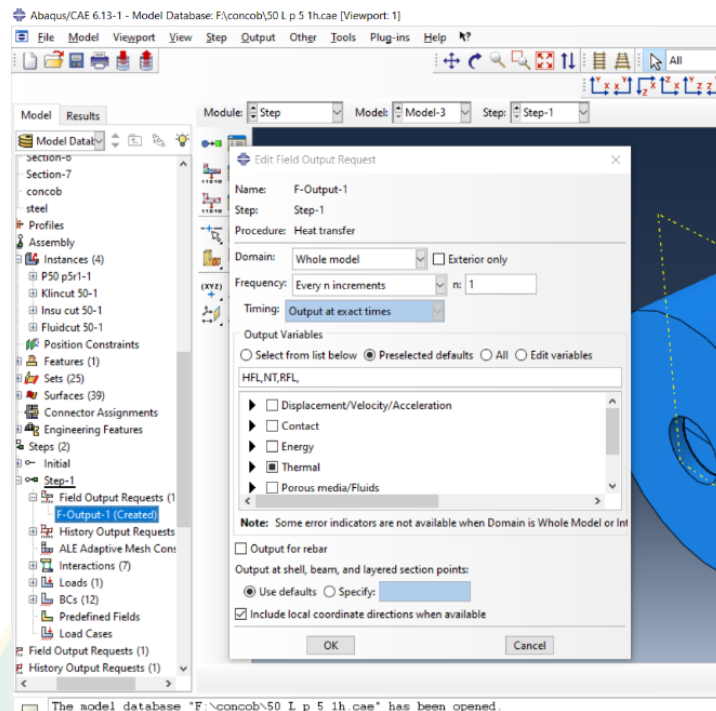
เป็นการประกอบ Part ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ให้เป็นแบบจำลองเตาเผาถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 23 การ Assembly ในโปรแกรม Abaqus

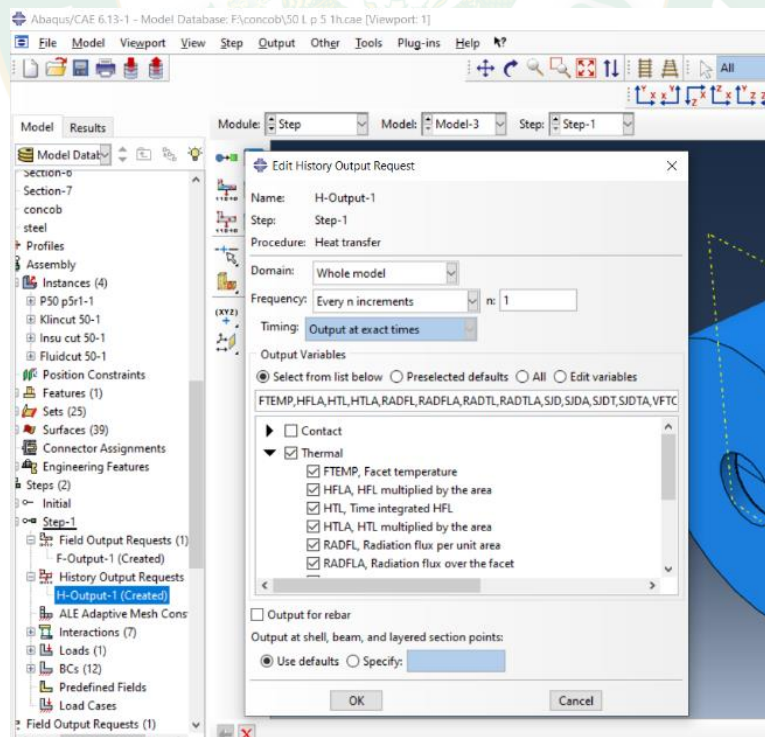
จ. กำหนด Step

กำหนด Field Output Requests ในส่วนของของ Thermal เลือก Nodal Temperature, Heat Flux Vector และ Radiations Fluxes



ภาพที่ 24 การกำหนด Step ในโปรแกรม Abaqus

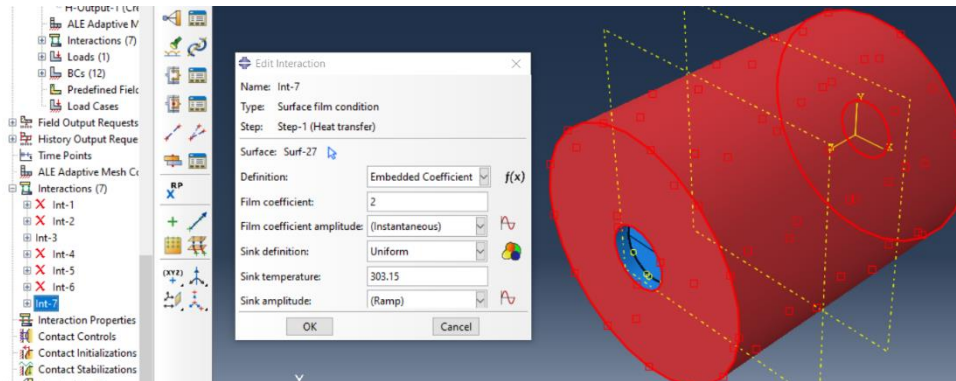
กำหนด History Output ในส่วนของของ Thermal เลือก Facet Temperature และ Multiplied by the Area



ภาพที่ 25 การกำหนด History Output ในโปรแกรม Abaqus

ฉ. Interaction

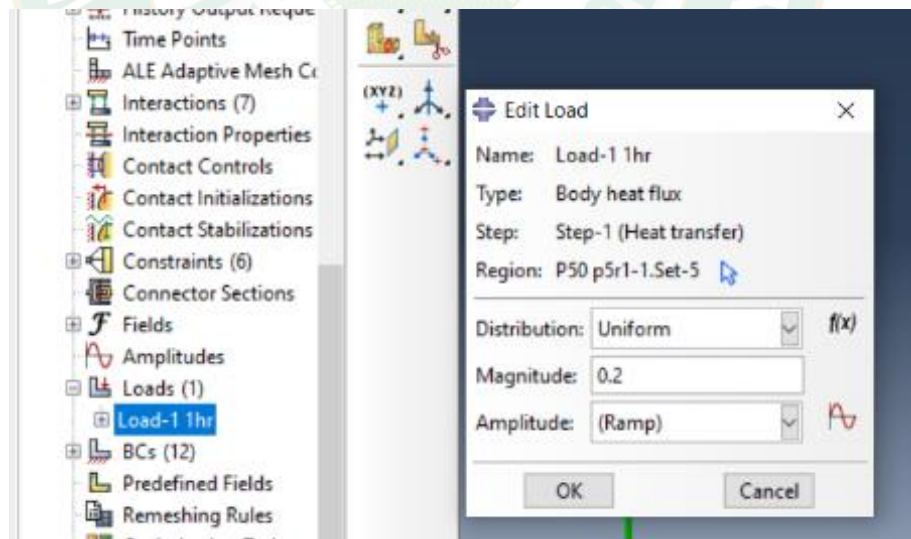
กำหนด Interaction เลือกชนิด Surface Film Condition โดยด้านนอกของฉนวน กำหนด Sink Temperature ที่ 30 องศาเซลเซียส หรือ 303.15 เคลวิน และเลือกชนิด Surface Radiation โดยมี Core ด้านนอกใช้อุณหภูมิผิวที่ตำแหน่งตรงกลางของแกนกลางเตาเผาผ่านชีวภาพที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลเช่นกัน



ภาพที่ 26 การ Interaction ในโปรแกรม Abaqus

ช. กำหนด Loads

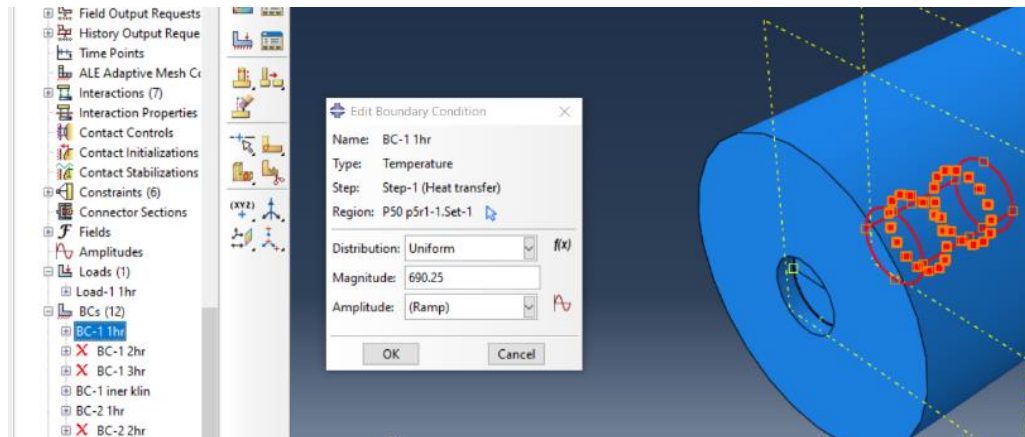
กำหนด Loads ให้เป็น Body Heat Flux ให้ค่า Magnitude เท่ากับ 0.2



ภาพที่ 27 การกำหนด Loads ในโปรแกรม Abaqus

ข. กำหนด BCs

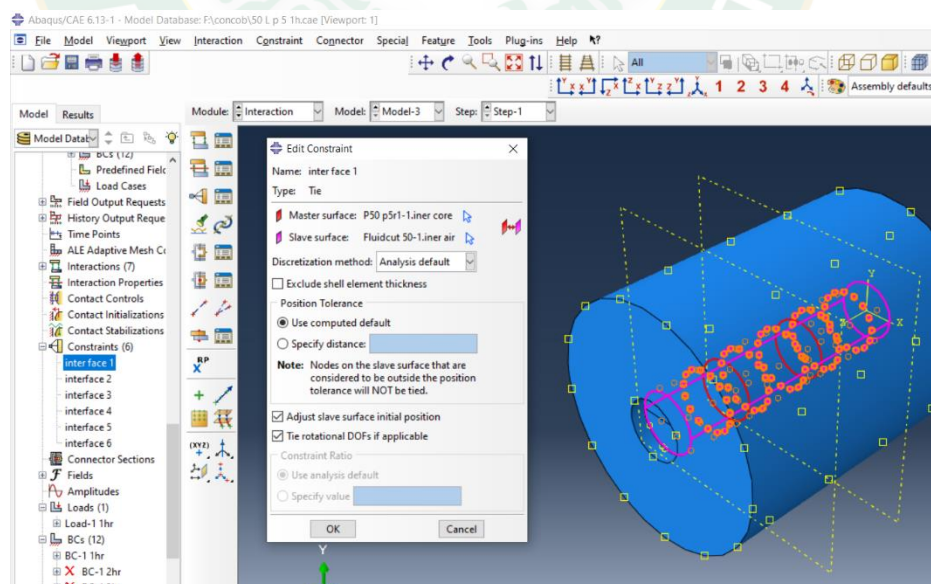
กำหนดเงื่อนไขที่ขอบหรือ BCs โดยเลือกเป็นชนิด Temperature กำหนดค่าอุณหภูมิผิวแกนกลางให้เท่ากับกับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลาง ด้านล่าง ของเตาเผาถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 28 การกำหนด BCs ในโปรแกรม Abaqus

ฉ. Constraints

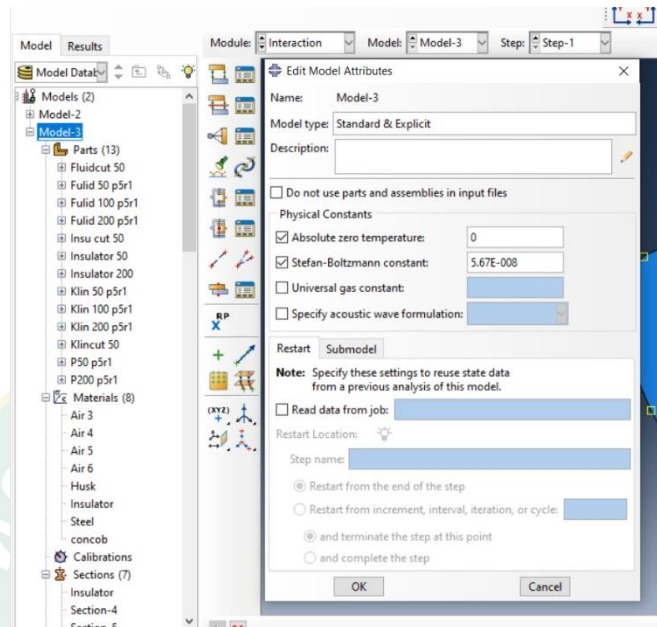
กำหนดค่าเป็นชนิด Tie เลือก Master Surface และ Slave Surface ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 29 การ Constraints ในโปรแกรม Abaqus

ญ. Model

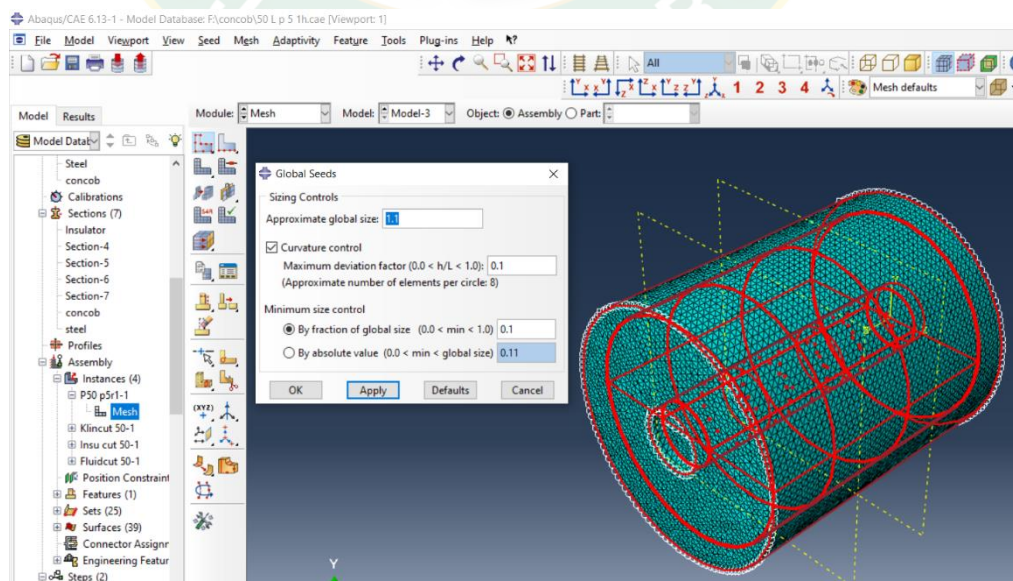
ตั้งค่าโมเดลให้เป็นตามชนิดของการทดสอบชิ้นงานให้ถูกต้อง



ภาพที่ 30 การตั้งค่า Model ในโปรแกรม Abaqus

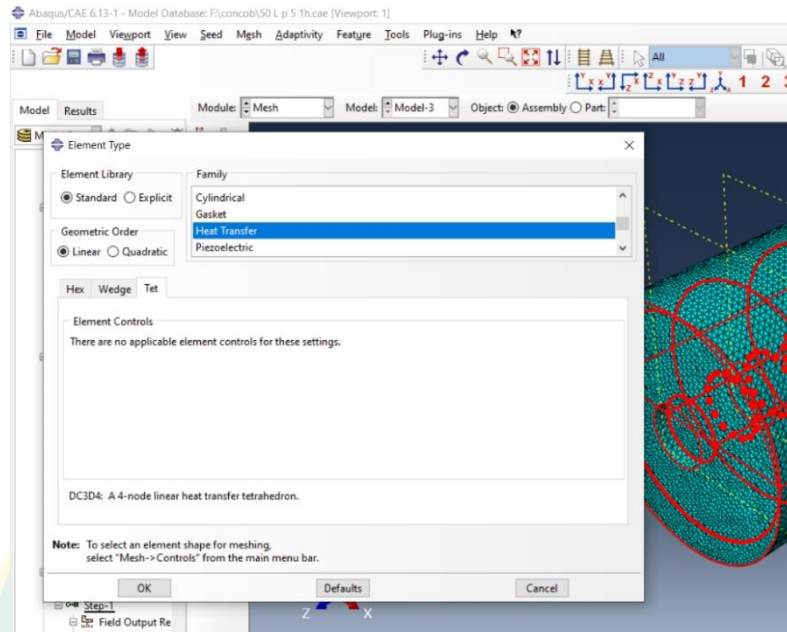
ฎ. Mesh

กำหนด Global Controls ให้ Approximate Global Size เท่ากับ 1.1 หากกำหนดค่าน้อย ชิ้นงานก็จะมีเอลิเมนต์ที่ละเอียดมาก ถ้ากำหนดค่ามาก ชิ้นงานก็จะมีเอลิเมนต์ที่หยาบ ซึ่งความละเอียดของเอลิเมนต์จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการประมวลผลโปรแกรม



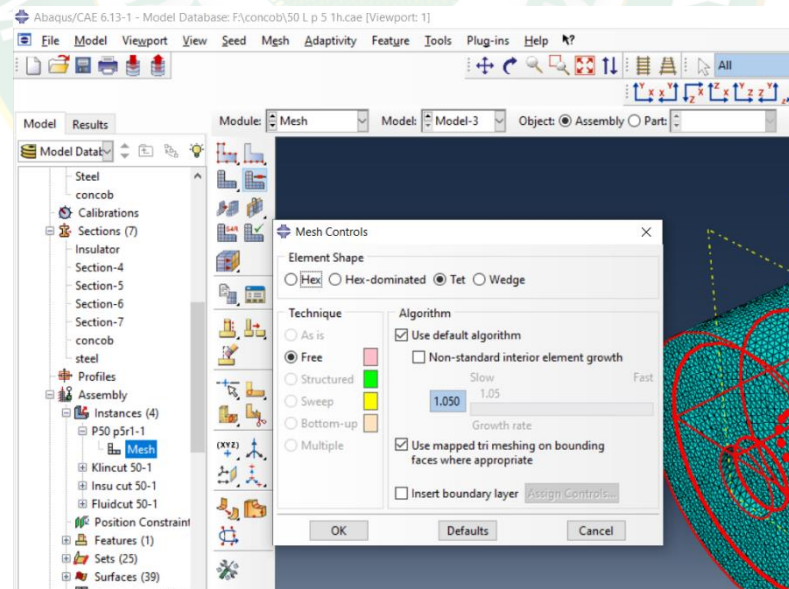
ภาพที่ 31 การ Mesh ในโปรแกรม Abaqus

กำหนดค่า Element Type ให้เป็น Heat Transfer



ภาพที่ 32 การกำหนดค่า Element Type ในโปรแกรม Abaqus

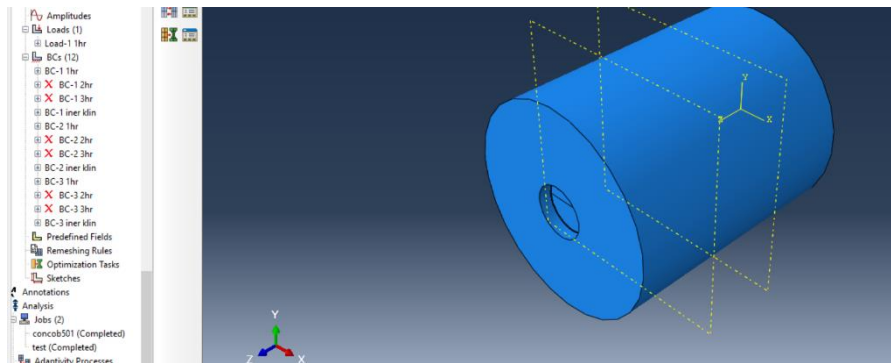
กำหนด Mesh Controls เลือกเป็น Tet จากนั้นให้คลิกที่ Mesh Part Instance จะได้
ชิ้นงานที่ทำการ Mesh เป็นที่เรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ 33 การกำหนด Mesh Controls ในโปรแกรม Abaqus

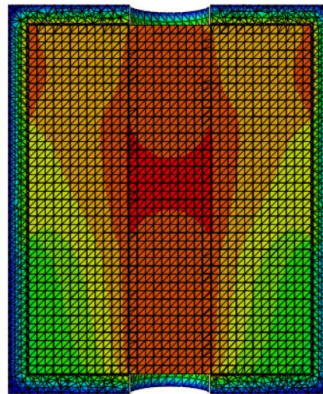
ฉ. Jobs

คลิกที่ Jobs แล้วตั้งชื่องานของเรา คลิกขวา กด Submit ออกมา โปรแกรมจะทำการประมวลผล (Running) ซึ่งในบางครั้งอาจจะต้องใช้เวลานาน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้อยู่ เมื่อโปรแกรมประมวลผลเสร็จแล้ว จะแสดงผลว่า Completed ซึ่งแสดงว่าการประมวลผลเสร็จสมบูรณ์แล้ว



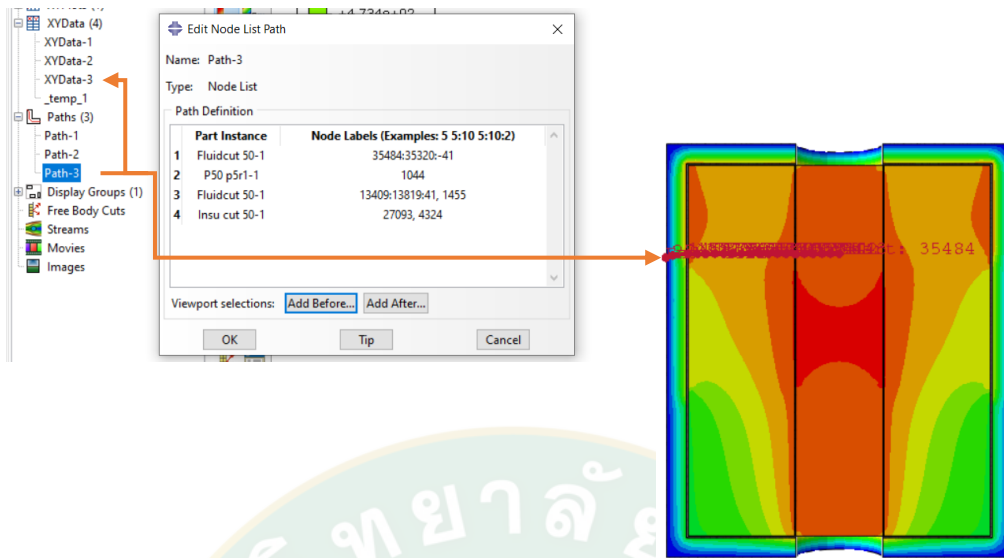
ภาพที่ 34 การทำการ Jobs ในโปรแกรม Abaqus

เมื่อโปรแกรมแสดงผลว่า Completed ซึ่งแสดงว่าการประมวลผลเสร็จสมบูรณ์แล้ว ให้ทำการคลิกขวา กด Results โปรแกรมจะแสดงผลการกระจายอุณหภูมิออกมาดังภาพที่ 33



ภาพที่ 35 การกระจายอุณหภูมิจากการจำลองการทดลอง

จากนั้นจะไปที่ Path เพื่อวัดอุณหภูมิที่ได้จากการจำลอง ณ ตำแหน่งเดียวกันกับที่ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ ดังภาพที่ 36 และจะได้ข้อมูลจากการนำข้อมูลจาก Node ไปใส่ใน XYData



ภาพที่ 36 การวัดการกระจายอุณหภูมิจากการจำลองการทดลอง

ตารางที่ 7 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและระยะตามแนวรัศมีที่ใช้วัดการกระจายอุณหภูมิในโปรแกรม abaqus

ขนาดของเตาเผาผ่านชีวภาพ	ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (หน่วยเซนติเมตร)	ระยะตามแนวรัศมี (หน่วยเซนติเมตร)
50 ลิตร	10.8, 24.4, 36.6	4.9, 12.9, 18.7
100 ลิตร	17.6, 43.9, 63.7	4.9, 15.7, 20.6
200 ลิตร	21.2, 44.4, 74.8	5.2, 18.9, 27.6

ตารางที่ 8 ข้อมูลของซังข้าวโพดที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์
ที่มา (Petchaihan et al. 2020)

วัสดุ	ตัวแปรต้น (X_1, X_2, \dots, X_n)										ตัวแปรตาม (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)	
	time (h)	A/Ap	L/D	temp เฉลี่ย (°C)	HHV (MJ/kg)	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg-K)	BC Yield (%)	pH		
ซังข้าวโพด					16.38	0.097	300	2021.05				
	1	274.53	1.302	264.34					3.00	7.02		
	2	274.53	1.302	312.15					17.80	7.05		
	3	274.53	1.302	326.64					34.50	7.08		
	1	296.00	1.860	301.92					14.50	7.33		
	2	296.00	1.860	355.64					27.90	7.45		
	3	296.00	1.860	324.55					38.40	7.52		
	1	295.63	1.433	414.90					14.40	8.47		
	2	295.63	1.433	453.54					30.30	8.53		
	3	295.63	1.433	362.77					44.40	8.64		

ตารางที่ 9 ข้อมูลของแก๊สที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสสัมพัทธ์
ที่มา (Petchaihan et al. 2020)

วัสดุ	ตัวแปรต้น (X_1, X_2, \dots, X_n)										ตัวแปรตาม (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)	
	time (h)	A/Ap	L/D	temp เฉลี่ย (°C)	HHV (MJ/kg)	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg-K)	BC Yield (%)	pH		
แก๊ส					14.4	0.046	150	1087.31				
	1	274.53	1.302	303.02					11.5	6.13		
	2	274.53	1.302	301.11					16.4	6.25		
	3	274.53	1.302	263.90					45.6	6.46		
	1	296.00	1.860	332.45					18.5	7.24		
	2	296.00	1.860	388.25					34.2	7.39		
	3	296.00	1.860	290.68					47.8	7.59		
	1	295.63	1.433	459.42					24	7.39		
	2	295.63	1.433	468.78					37.9	7.48		
	3	295.63	1.433	353.02					51.1	7.55		

ตารางที่ 10 ข้อมูลของเปลือกกล้วยที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์
ที่มา (Petchaihan et al. 2020)

วัสดุ	ตัวแปรต้น (X_1, X_2, \dots, X_n)										ตัวแปรตาม (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)	
	time (h)	A/Ap	L/D	temp เฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	HHV (MJ/kg)	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg-K)	BC Yield (%)	pH		
เปลือกกล้วย					8.37	0.2992	84.47	2800				
	1	274.53	1.302	289.20					10.6	6.69		
	2	274.53	1.302	421.42					16.4	6.81		
	3	274.53	1.302	319.68					31.5	6.96		
	1	296.00	1.860	313.62					15.7	7.35		
	2	296.00	1.860	495.18					30.4	7.52		
	3	296.00	1.860	267.28					40.7	7.64		
	1	295.63	1.433	396.98					20.3	7.65		
	2	295.63	1.433	330.27					38.6	8		
	3	295.63	1.433	314.70					46.2	8.1		

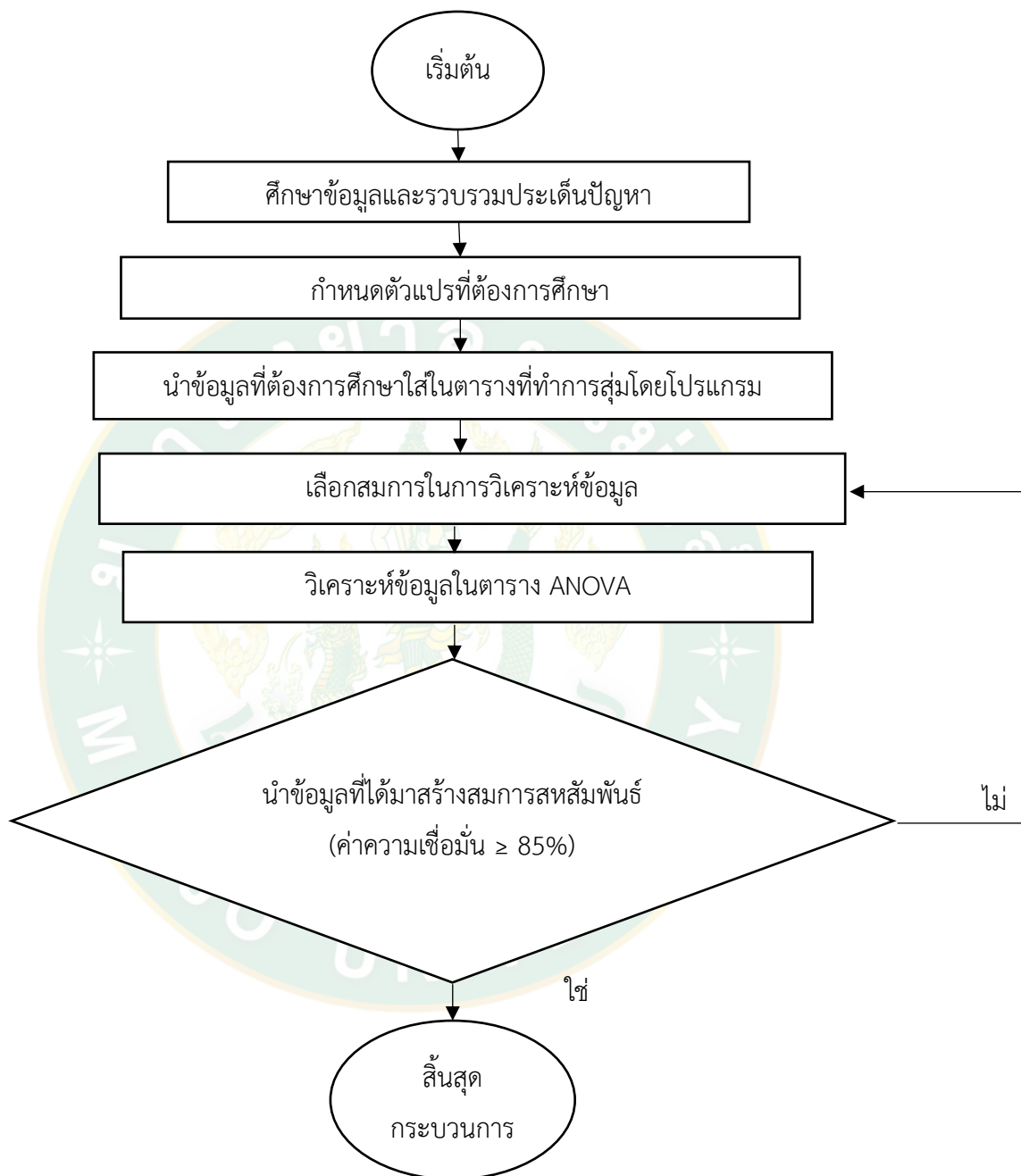
ตารางที่ 11 ข้อมูลของกึ่งไม้ล้าที่ใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์
ที่มา (Petchaihan et al. 2020)

วัสดุ	ตัวแปรต้น (X_1, X_2, \dots, X_n)										ตัวแปรตาม (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)	
	time (h)	A/Ap	L/D	temp เฉลี่ย (°C)	HHV (MJ/kg)	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg-K)	BC Yield (%)	pH		
กึ่งไม้ล้า					28.95	0.192	165.9	1253				
	1	274.53	1.302	226.58					1.6	7.05		
	2	274.53	1.302	306.67					4.6	7.29		
	3	274.53	1.302	433.5					30.6	7.44		
	1	296.00	1.860	126.85					6.3	7.34		
	2	296.00	1.860	246.08					19.5	7.4		
	3	296.00	1.860	358.62					34.5	7.46		
	1	295.63	1.433	244.81					12.3	8.05		
	2	295.63	1.433	366.57					28.5	8.28		
	3	295.63	1.433	291.48					45.3	8.47		

ตารางที่ 12 ข้อมูลของกะลาแก๊พที่นำไปใช้ในการคำนวณสมการสหสัมพันธ์
ที่มา (Petchaihan et al. 2020)

วัสดุ	ตัวแปรต้น (X_1, X_2, \dots, X_n)										ตัวแปรตาม (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)	
	time (h)	A/Ap	L/D	temp เฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	HHV (MJ/kg)	Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg-K)	BC Yield (%)	pH		
กะลาแก๊พ					10.65	0.108	63.8	1431				
	1	274.53	1.302	261.21					5.4	6.79		
	2	274.53	1.302	239.72					8.6	7.25		
	3	274.53	1.302	378.94					27.6	7.34		
	1	296.00	1.860	344					8.6	7.23		
	2	296.00	1.860	690.94					14.7	7.3		
	3	296.00	1.860	582.45					32.9	7.38		
	1	295.63	1.433	510.05					9.7	7.96		
	2	295.63	1.433	499.1					20.6	8.12		
	3	295.63	1.433	255					34.9	8.21		

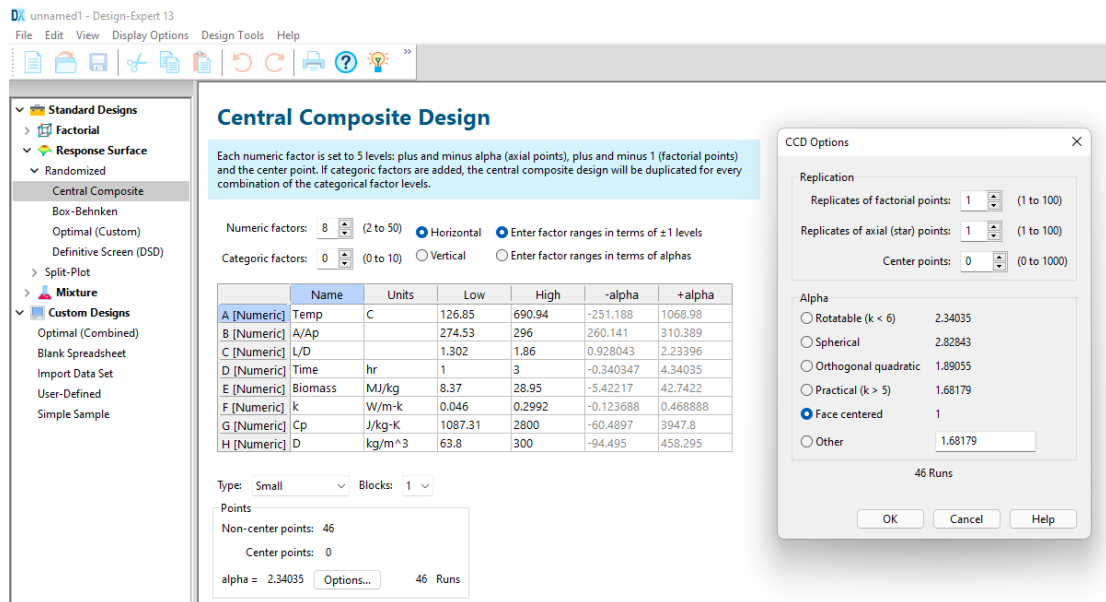
3.4 วิธีการสร้างสมการสหสัมพันธ์



ภาพที่ 37 ขั้นตอนการดำเนินงานการสร้างสมการสหสัมพันธ์

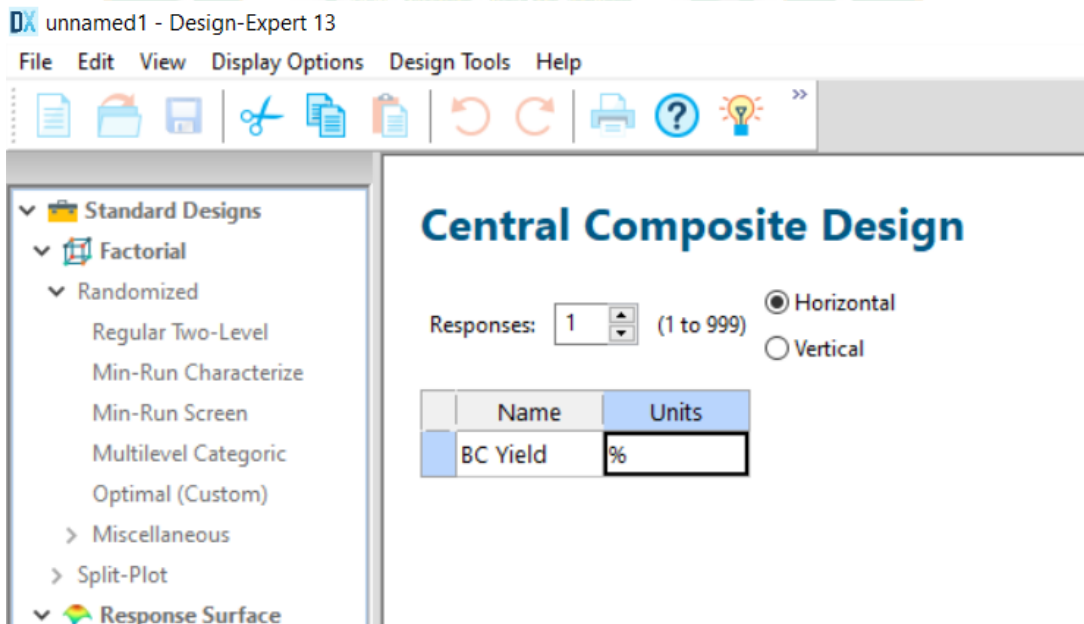
3.4.1 ขั้นตอนการสร้างสมการสหสัมพันธ์

1. ทำการป้อนข้อมูลตัวแปรที่ต้องการนำไปวิเคราะห์เพื่อดูว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลมากน้อยเพียงใดกับตัวแปรที่เราต้องการศึกษา จากนั้นกด Next



ภาพที่ 38 การป้อนข้อมูลตัวแปรเพื่อทำการวิเคราะห์ ในโปรแกรม Design-Expert

2. กำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษา จากนั้นกด Finish



ภาพที่ 39 การกำหนดค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในโปรแกรม Design-Expert

3. นำข้อมูลการทดลองมาใส่ในตารางตามที่โปรแกรมทำการสุ่ม จากนั้นไปที่ BC Yield

(Analysis)

Std	Run	Factor 1 A:Temp C	Factor 2 B:A/Ap	Factor 3 C:L/D	Factor 4 D:Time hr	Factor 5 E:Biomass MJ/kg	Factor 6 F:k W/m-k	Factor 7 G:cP J/kg-K	Factor 8 HD kg/m ³	Response 1 BC %
18	1	332.45	296	1.86	1	14.4	0.046	1087.31	150	18.5
2	2	330.27	295.63	1.433	2	8.37	0.2992	2800	84.47	38.6
43	3	255	295.63	1.433	3	10.65	0.108	1431	63.8	34.9
7	4	433.5	274.53	1.302	3	28.95	0.192	1253	165.9	30.6
9	5	453.54	295.63	1.433	2	16.38	0.097	2021.05	300	30.3
28	6	263.9	274.53	1.302	3	14.4	0.046	1087.31	150	45.6
29	7	246.08	296	1.86	2	28.95	0.192	1253	165.9	19.5
32	8	126.85	296	1.86	1	28.95	0.192	1253	165.9	6.3
40	9	226.58	274.53	1.302	1	28.95	0.192	1253	165.9	1.6
33	10	291.48	295.63	1.433	3	28.95	0.192	1253	165.9	45.3
13	11	421.42	274.53	1.302	2	8.37	0.2992	2800	84.47	16.4
21	12	388.25	296	1.86	2	14.4	0.046	1087.31	150	34.2
16	13	261.21	274.53	1.302	2	10.65	0.108	1431	63.8	8.6
26	14	495.18	296	1.86	2	8.37	0.2992	2800	84.47	30.4
17	15	313.62	296	1.86	1	8.37	0.2992	2800	84.47	15.7
30	16	264.34	274.53	1.302	1	16.38	0.097	2021.05	300	3
8	17	396.98	295.63	1.433	1	8.37	0.2992	2800	84.47	20.3
37	18	362.77	295.63	1.433	3	16.38	0.097	2021.05	300	44.4
14	19	353.02	295.63	1.433	3	14.4	0.046	1087.31	150	51.1
11	20	303.02	274.53	1.302	1	14.4	0.046	1087.31	150	11.5
38	21	244.81	295.63	1.433	1	28.95	0.192	1253	165.9	12.3
25	22	499.1	295.63	1.433	2	10.65	0.108	1431	63.8	20.6
24	23	319.68	274.53	1.302	3	8.37	0.2992	2800	84.47	31.5
39	24	326.64	274.53	1.302	3	16.38	0.097	2021.05	300	34.5
12	25	261.21	274.53	1.302	1	10.65	0.108	1431	63.8	5.4
15	26	378.94	274.53	1.302	3	10.65	0.108	1431	63.8	27.6
27	27	312.15	274.53	1.302	2	16.38	0.097	2021.05	300	17.8
3	28	344	296	1.86	1	10.65	0.108	1431	63.8	8.6
1	29	306.67	274.53	1.302	2	28.95	0.192	1253	165.9	4.6
20	30	501.05	295.63	1.433	1	10.65	0.108	1431	63.8	9.7
4	31	301.11	274.53	1.302	2	14.4	0.046	1087.31	150	16.4
35	32	366.57	295.63	1.433	2	28.95	0.192	1253	165.9	28.5
22	33	324.55	296	1.86	3	16.38	0.097	2021.05	300	38.4
23	34	414.9	295.63	1.433	1	16.38	0.097	2021.05	300	14.4
6	35	582.45	296	1.86	3	10.65	0.108	1431	63.8	32.9
31	36	289.2	274.53	1.302	1	8.37	0.2992	2800	84.47	10.6
44	37	290.68	296	1.86	3	14.4	0.046	1087.31	150	47.8
36	38	459.42	295.63	1.433	1	14.4	0.046	1087.31	150	24
41	39	355.64	296	1.86	2	16.38	0.097	2021.05	300	27.9
34	40	314.7	295.63	1.433	3	8.37	0.2992	2800	84.47	46.2
10	41	301.92	296	1.86	1	16.38	0.097	2021.05	300	14.5

ภาพที่ 40 การนำข้อมูลที่ทำการทดลองมาใส่ในตาราง ในโปรแกรม Design-Expert

4. ทำการเลือกสมการในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการเลือกสมการที่เหมาะสมจะดูค่าที่ตาราง

ANOVA

Process Order: Linear

Auto Select...

Add Term

The term will be quadratic model.

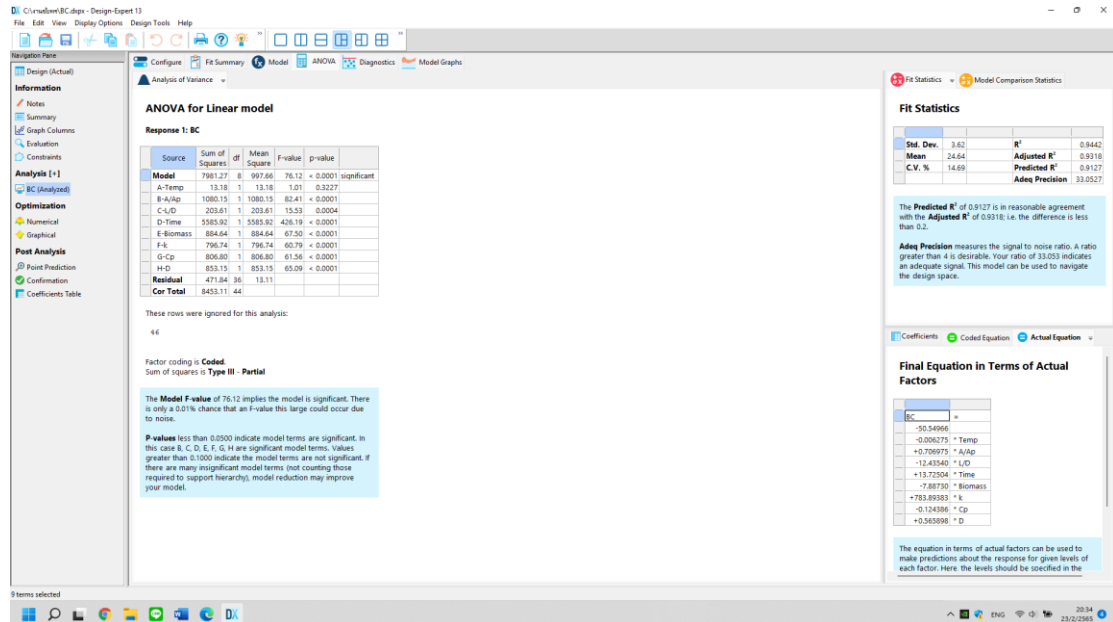
Indicates the term is quadratic, cubic, or quartic, or another term, or was not estimated in the Fit Summary table. The term in the model is not recommended.

A user-forced term. Automatic model selection will always produce a model that includes this term.

Indicates that the term is required to be in the model by the program.

ภาพที่ 41 การกำหนดรูปแบบสมการเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ในโปรแกรม Design-Expert

5.1. เช็คค่า R^2 และ Final Equation in terms of Actual Factors ว่าสมการที่ทำการวิเคราะห์มีความถูกต้องหรือไม่ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์



ภาพที่ 42 ผลการวิเคราะห์ ในโปรแกรม Design-Expert

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการคำนวณจากโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจากการเผาจากเตาดั้งแบบ เพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิในเตาเผาชีวภาพแบบหุ้มฉนวน ตัวแปรเตาและชนิดของวัสดุที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน

3.5.1 การทดสอบประสิทธิภาพการเผาจริงจากเตาดั้งแบบ

ได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตามผิวหน้าสัมผัสของวัสดุที่สัมผัสกับชีวมวลทั้งหมด เพื่อวัดอุณหภูมิการเผาไหม้แบบคงที่ทั้งบริเวณภายในเตาและภายนอกเตาเผาชีวภาพ โดยการใส่ชีวมวลให้เต็มถัง หลังจากมีการเผาไหม้เสร็จสิ้นจะทำการตรวจสอบชีวภาพภายในเตาเผาว่ามีการเผาไหม้ที่ดีหรือไม่ และนำอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลไปกำหนดค่าในโปรแกรมเปรียบเทียบการเผาไหม้ที่ได้จากการจำลองสภาพในโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบเผาจริง ทำการทดลองด้วยการเปลี่ยนขนาดถังทั้งหมด 3 ขนาด คือ 50 100 และ 200 ลิตร และบันทึกผล

3.5.2 การทดสอบประสิทธิภาพการเผาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ทำการกำหนดค่าตามฟังก์ชันต่าง ๆ ในโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมได้ประมวลผลตามค่าที่กำหนดไว้โดยใช้ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดอุณหภูมิตามผิวชิ้นงานทั้งอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในเตาเผาทั้ง 3 ขนาดที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล และแสดงผลที่ได้จากการจำลองสภาพของโปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์ และบันทึกข้อมูล

3.6 การเก็บข้อมูลและการประเมินผล

ทำการประเมินผลข้อมูลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงในการทดสอบการเผาถ่านชีวภาพจากเตาต้นแบบ โดยใช้ข้อมูลที่วัดได้จริงจากเตาต้นแบบในแต่ละจุดมากำหนดและตั้งค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.7 สถานที่และระยะเวลาในการทำโครงการ

3.7.1 สถานที่ทำโครงการ

การดำเนินการออกแบบชุดการทดลองและเก็บข้อมูล ที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมและอาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

3.7.2 ระยะเวลาในการทำโครงการ

ระยะเวลาในการทำโครงการ 4 เดือน ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2562 ถึง เดือนกุมภาพันธ์

2563



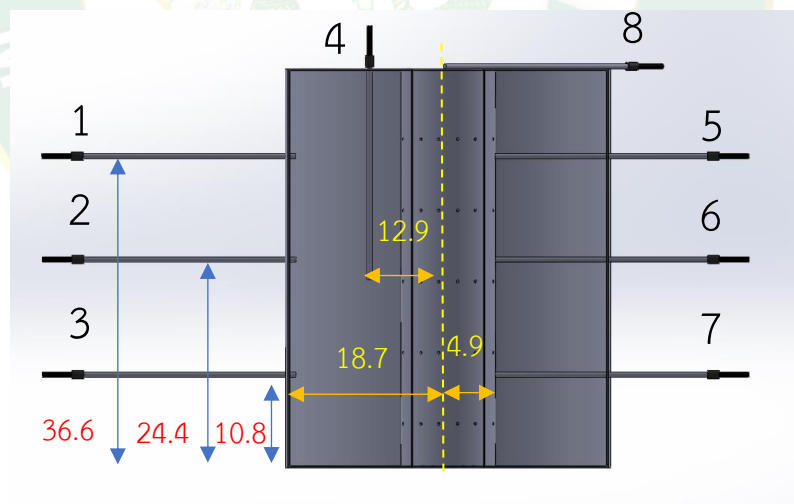
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองการกระจายอุณหภูมิโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองประสิทธิภาพเตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้แกนกลางเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ตามหัวข้อ 3.2.2 โดยใช้ซังข้าวโพด แกลบ กิ่งไม้ลำไย เปลือกลำไย และกะลากาแฟเป็นชีวมวลในการทดสอบโดยเงื่อนไขการทดสอบคือการหุ้มฉนวน จากนั้นจะนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทดลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

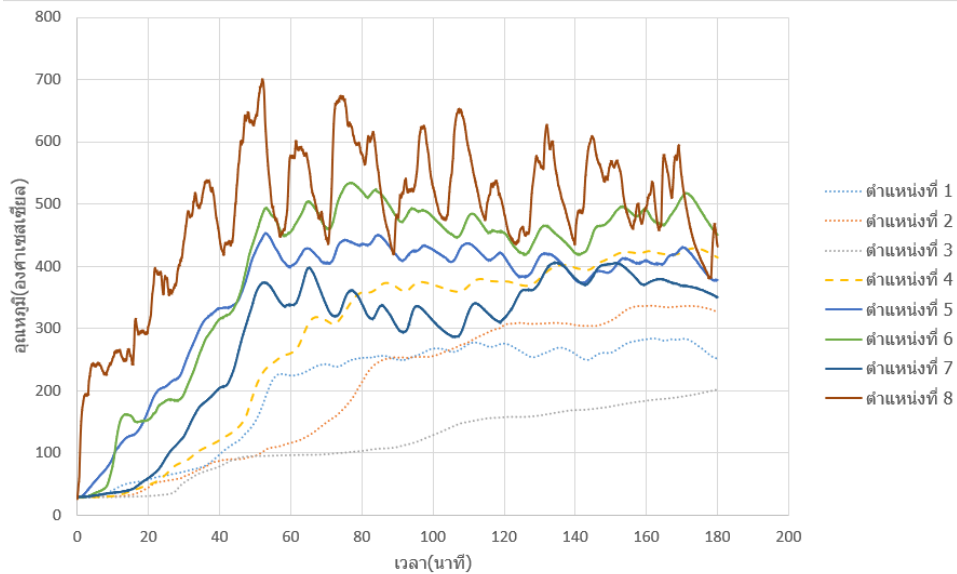
โดยในการทดสอบได้มีการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด 8 จุด โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ทำการวัดอุณหภูมิที่หมายเลข 1 2 และ 3 วัดอุณหภูมิของขอบด้านในของเตาเผา หมายเลข 4 วัดอุณหภูมิตรงกลางถัง หมายเลข 5 6 และ 7 วัดอุณหภูมิของขอบด้านนอกของแกนกลาง และ หมายเลข 8 วัดอุณหภูมิเปลวไฟจากแหล่งกำเนิดความร้อน ดังภาพที่ 43 บันทึกค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดสอบจนกระทั่งใช้เวลาในการเผาไหม้ครบ 3 ชั่วโมง จากนั้นเลือกอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 43 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลของเตาเผาขนาด 50 ลิตร (หน่วยเซนติเมตร)

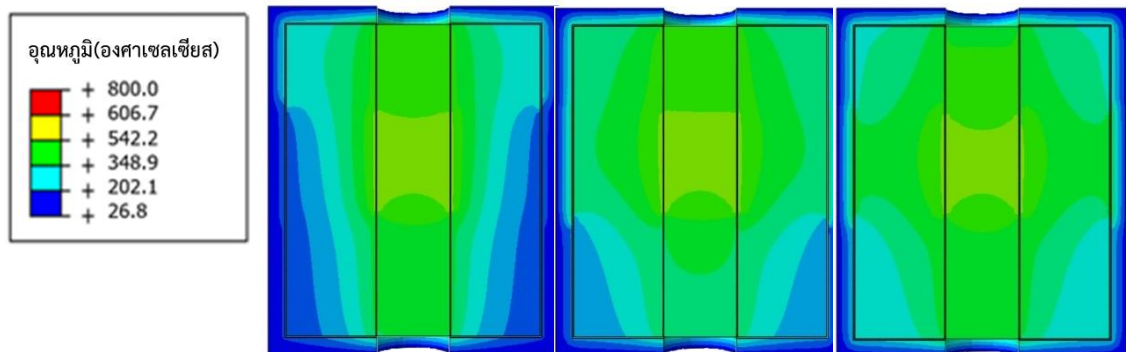
4.1.1 การศึกษาการกระจายอุณหภูมิโดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร

4.1.1.1 ข้อมูลการทดสอบของซังข้าวโพด



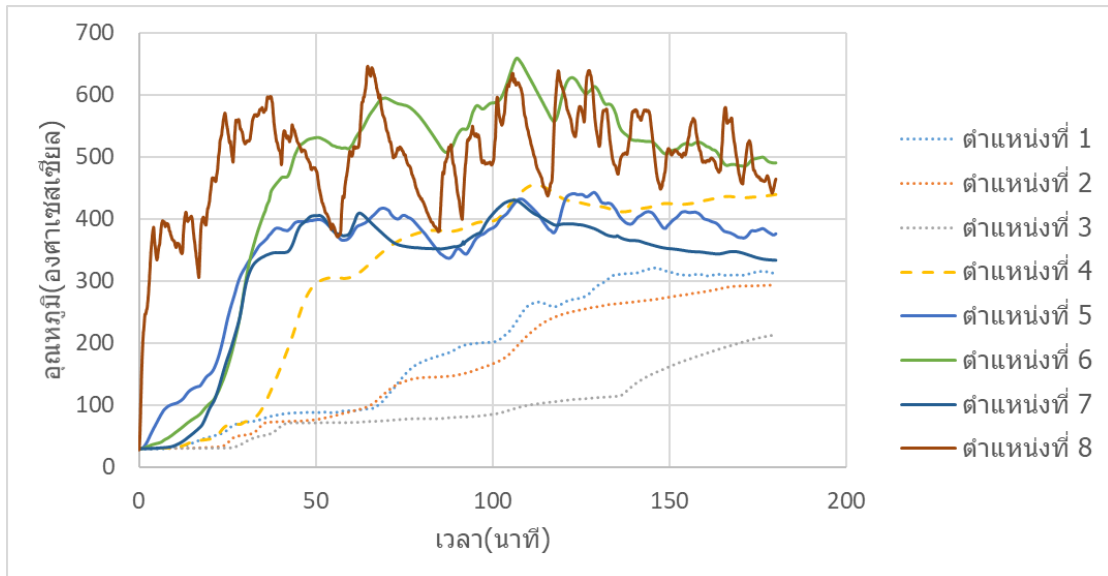
ภาพที่ 44 อุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพโดยใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด
ตารางที่ 13 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	399.4	455.1	337.6	415.7	453.7	316.1	378.0	450.4	350.3
12.9		260.2			375.7			414.2	
18.7	224.2	116.1	96.4	275.8	305.1	157.4	251.7	326.9	202.0



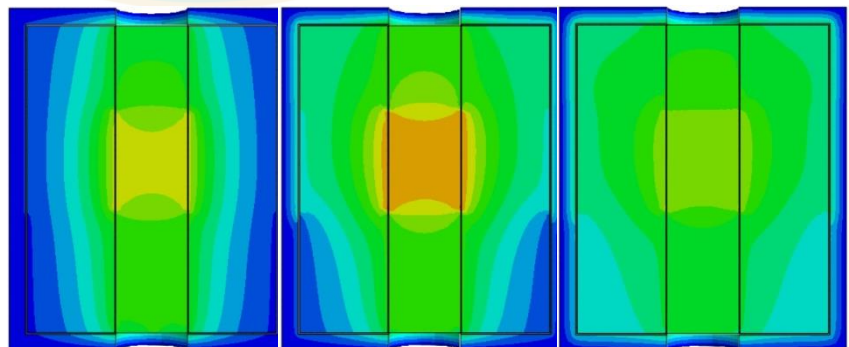
ภาพที่ 45 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของซังข้าวโพด ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.1.2 ข้อมูลการทดสอบของแกลบ



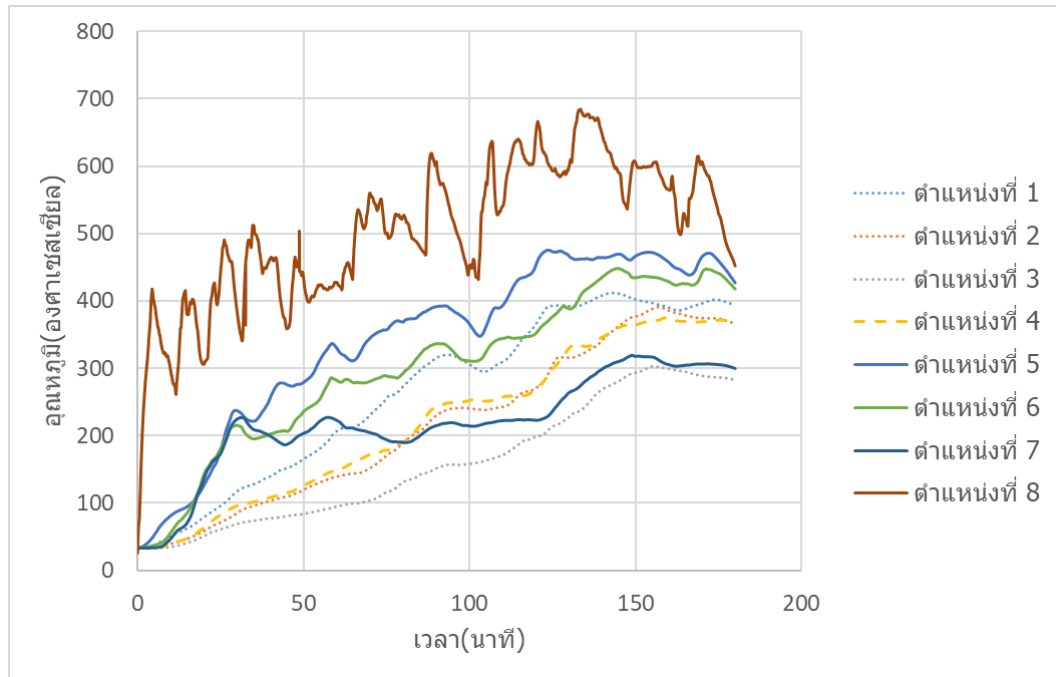
ภาพที่ 46 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นแกลบ
ตารางที่ 14 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	373.8	517.9	382.9	424.4	606.5	392.1	376.5	490.8	333.8
12.9		306.6			432.7			439.7	
18.7	91.7	90.2	72.4	265.1	247.3	107.6	311.4	294.3	214.1



ภาพที่ 47 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของแกลบ
ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

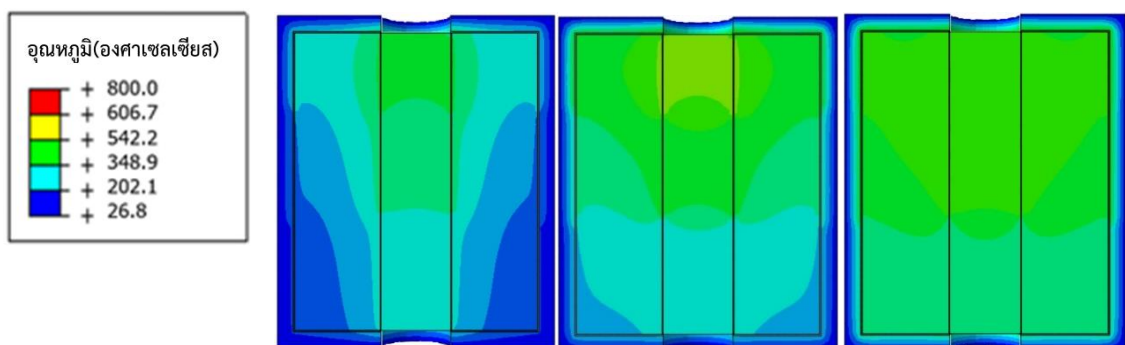
4.1.1.3 ข้อมูลการทดสอบของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 48 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย

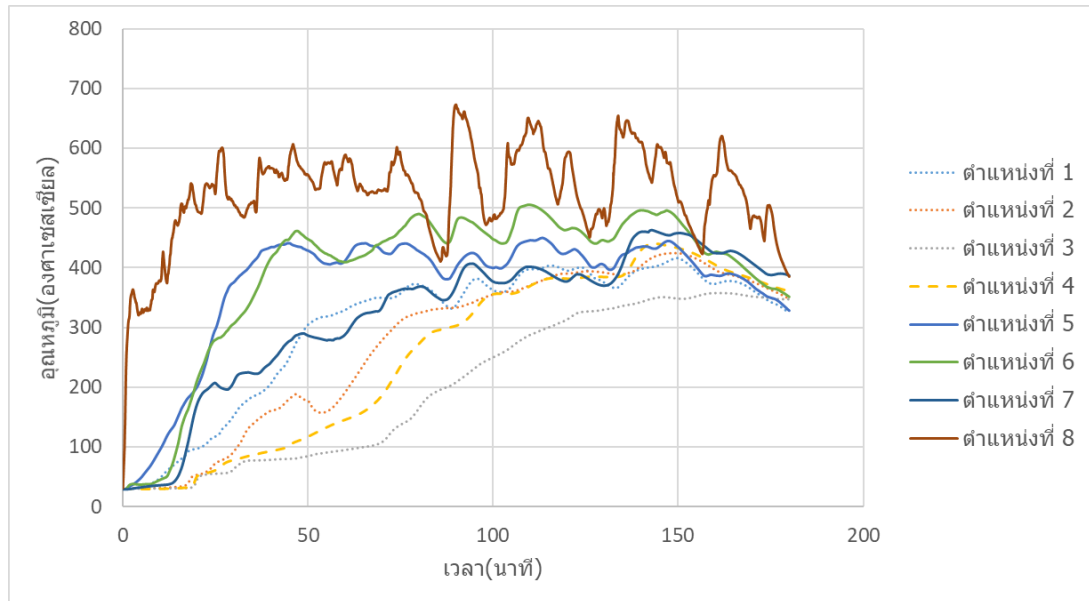
ตารางที่ 15 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	330.0	282.3	222.7	453.6	352.1	222.9	427.0	417.9	299.8
12.9		149.3			269.4			369.8	
18.7	206.8	139.4	94.9	365.6	270.7	198.9	393.2	366.0	282.7



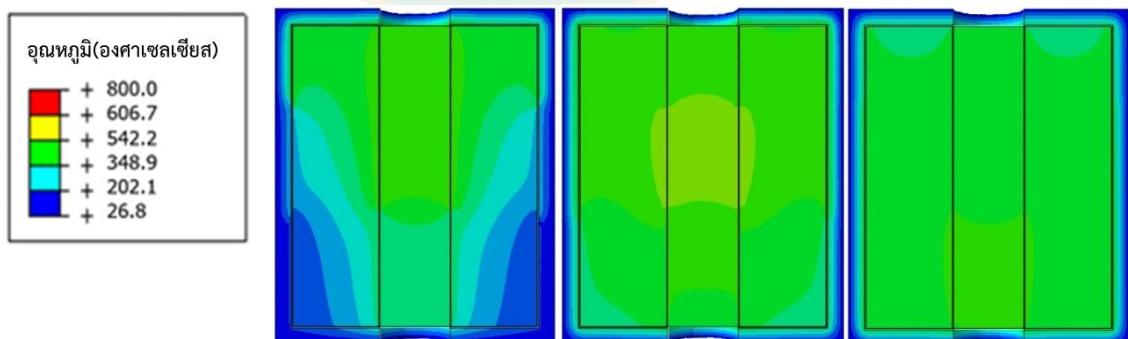
ภาพที่ 49 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของกิ่งไม้ลำไย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.1.4 ข้อมูลการทดสอบของเปลือกกล้วย



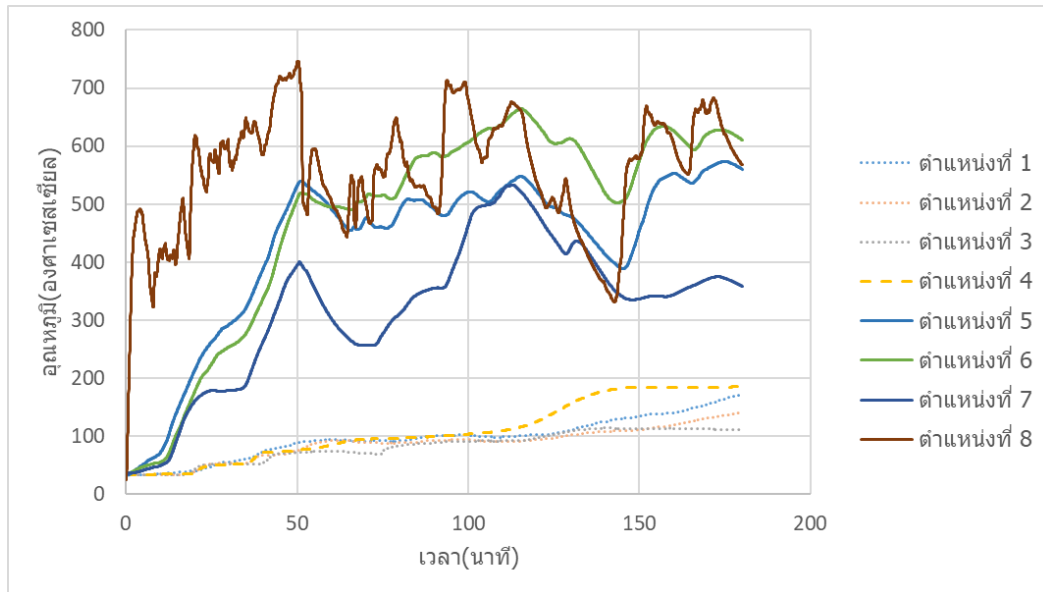
ภาพที่ 50 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย
ตารางที่ 16 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	411.6	409.4	288.0	425.0	463.7	377.1	328.2	351.3	386.9
12.9		145.5			381.6			360.7	
18.7	329.0	191.5	94.9	394.9	390.1	313.4	324.1	348.2	347.3



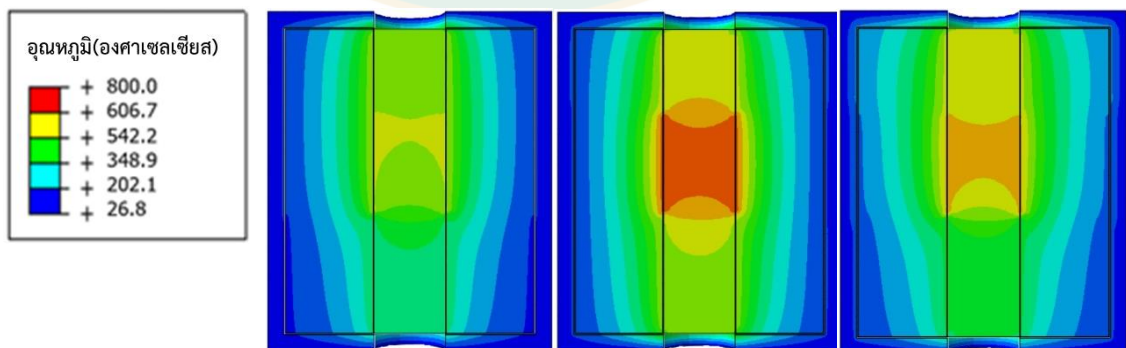
ภาพที่ 51 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของเปลือกกล้วย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.1.5 ข้อมูลการทดสอบของกะลากาแฟ



ภาพที่ 52 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ ตารางที่ 17 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ

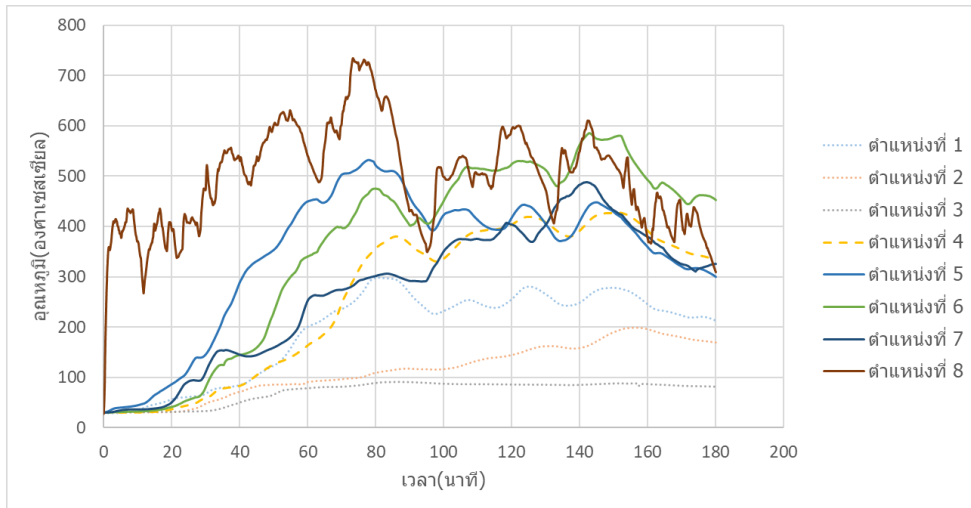
ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	492.0	494.9	303.2	522.3	639.1	485.2	560.4	610.6	358.5
12.9		85.2			125.1			186.2	
18.7	93.9	92.7	74.1	103.1	94.1	96.7	173.1	141.6	111.9



ภาพที่ 53 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรของกะลากาแฟ ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

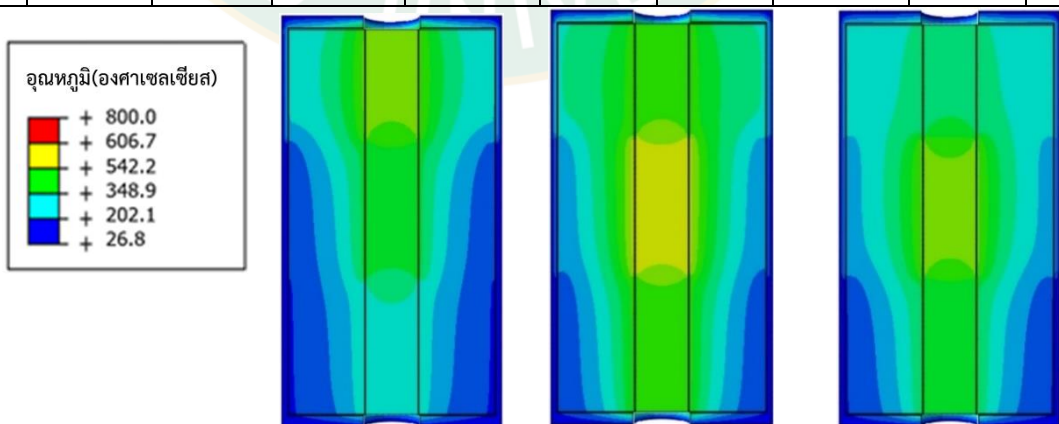
4.1.2 การศึกษาการกระจายอุณหภูมิโดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร

4.1.2.1 ข้อมูลการทดสอบของซังข้าวโพด



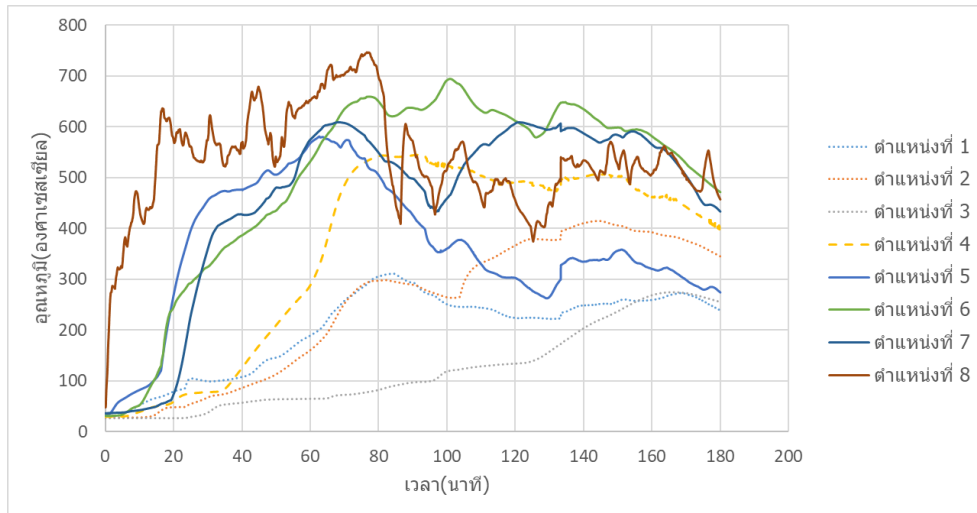
ภาพที่ 54 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด ตารางที่ 18 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด

ระยะตามแนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรงกลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรงกลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรงกลาง	ด้านบน
4.9	449.8	340.3	252.6	417.6	523.8	403.8	299.8	452.5	325.7
15.7		163.7			403.4			333.1	
20.6	200.7	90.8	78.4	255.5	144.7	85.9	212.7	169.5	81.7



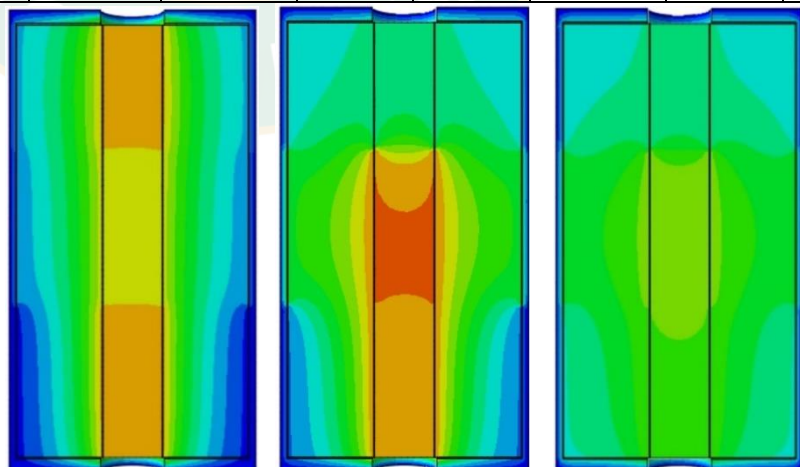
ภาพที่ 55 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของซังข้าวโพด ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.2.2 ข้อมูลการทดสอบของแกลบ



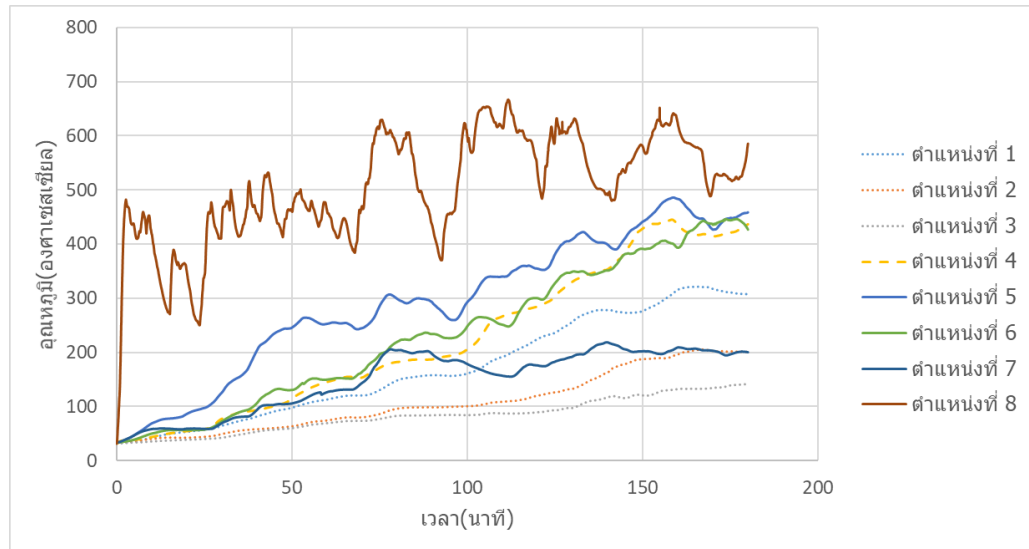
ภาพที่ 56 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นแกลบ
ตารางที่ 19 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	567.8	532.1	574.9	302.9	611.6	606.6	274.2	471.5	433.3
15.7		288.5			490.4			400.4	
20.6	189.4	160.8	64.9	223.9	366.6	134.1	238.2	345.2	255.3



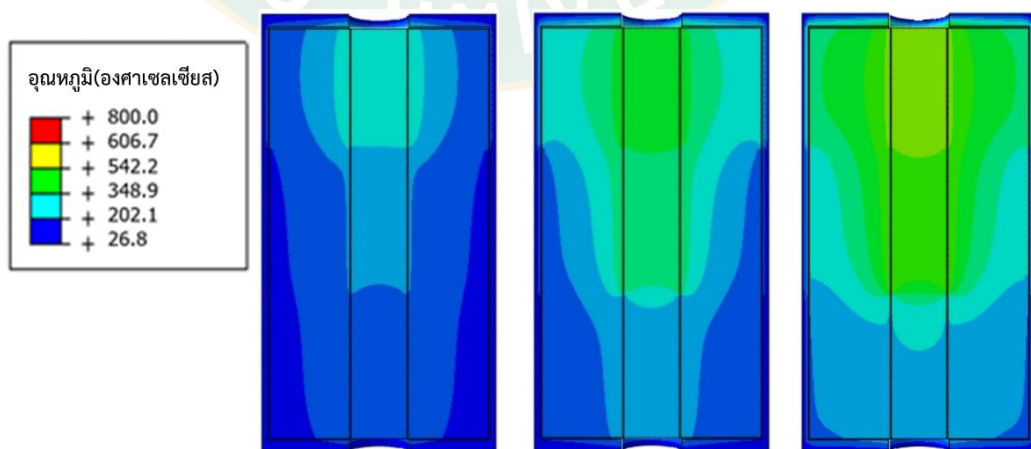
ภาพที่ 57 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของแกลบ
ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.2.3 ข้อมูลการทดสอบของกิ่งไม้ลำไย



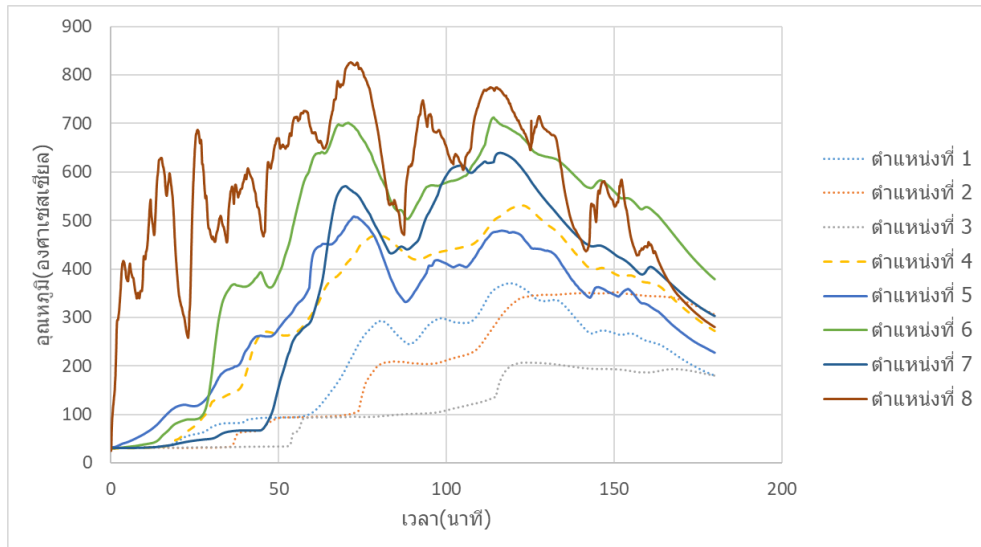
ภาพที่ 58 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย
ตารางที่ 20 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	252.9	149.8	126.7	354.8	300.2	176.1	458.7	427.0	200.3
15.7		145.5			285.1			436.8	
20.6	113.1	74.5	69.3	224.6	120.0	89.4	307.9	201.2	141.6



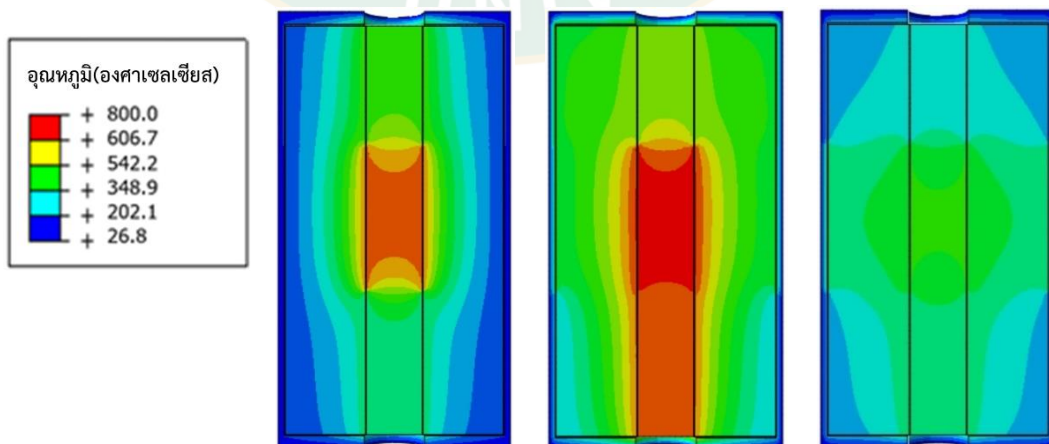
ภาพที่ 59 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของกิ่งไม้
ลำไย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.2.4 ข้อมูลการทดสอบของเปลือกกล้วย



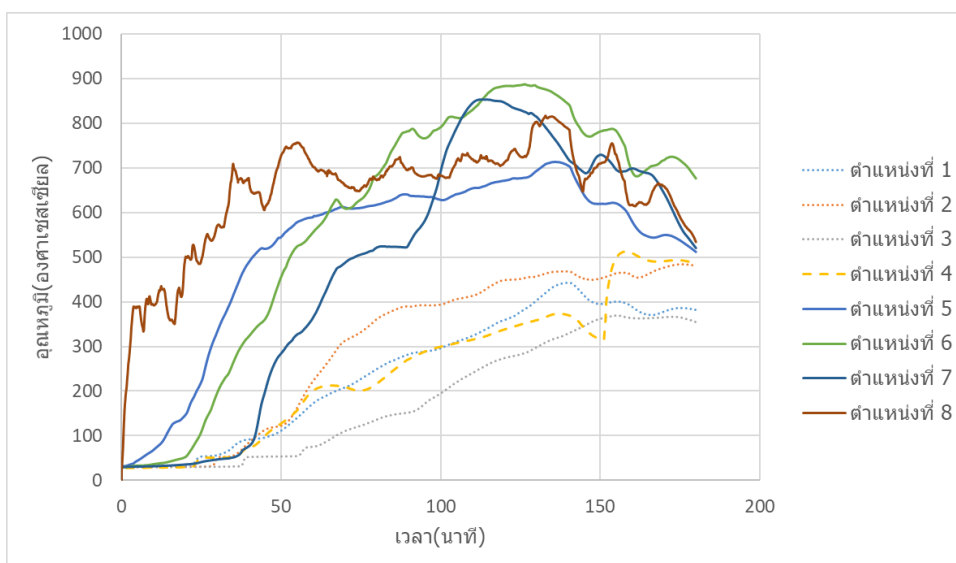
ภาพที่ 60 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย
ตารางที่ 21 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	423.0	623.6	299.7	476.1	684.5	626.6	227.6	379.1	303.3
15.7		308.4			526.9			272.3	
20.6	103.8	95.0	93.8	369.7	329.8	202.6	180.6	306.1	180.1



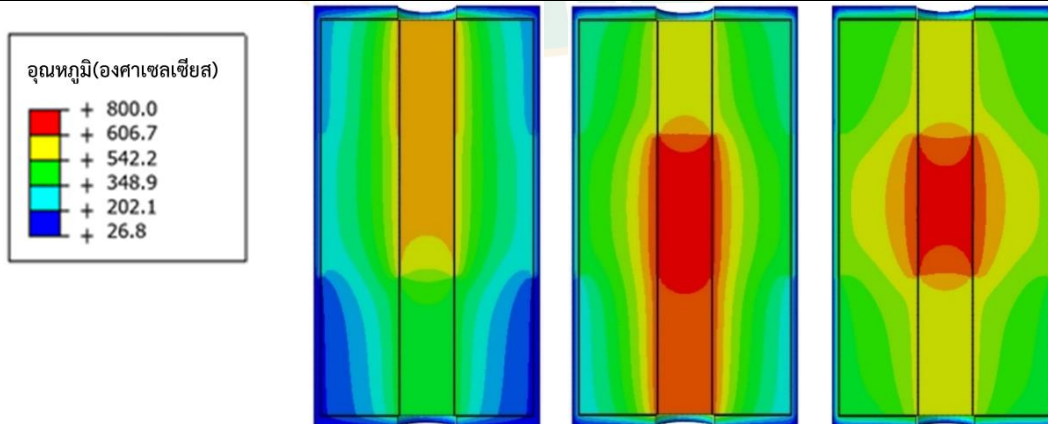
ภาพที่ 61 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของ
เปลือกกล้วย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.2.5 ข้อมูลการทดสอบของกะลากาแฟ



ภาพที่ 62 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ ตารางที่ 22 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ

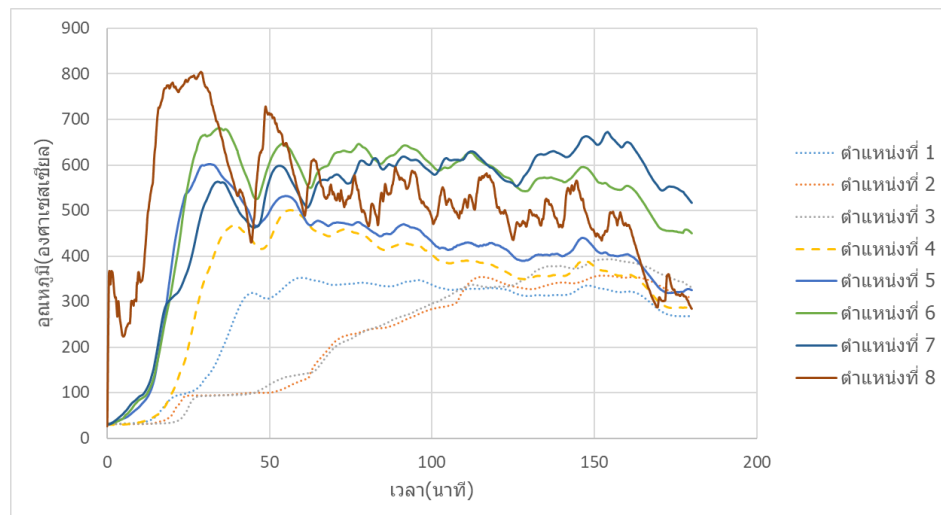
ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
4.9	590.4	555.9	364.9	671.5	883.5	846.3	511.6	676.2	520.3
15.7		200.9			338.2			485.6	
20.6	172.5	222.5	75.4	359.5	448.7	274.0	381.7	480.2	354.4



ภาพที่ 63 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรของกะลากาแฟ ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

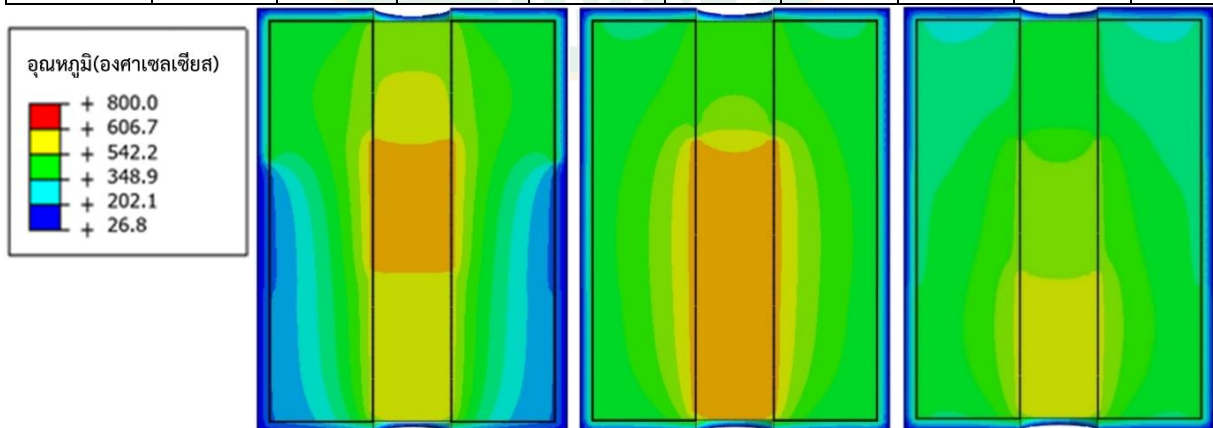
4.1.3 การศึกษาการกระจายอุณหภูมิโดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร

4.1.3.1 ข้อมูลการทดสอบของซังข้าวโพด



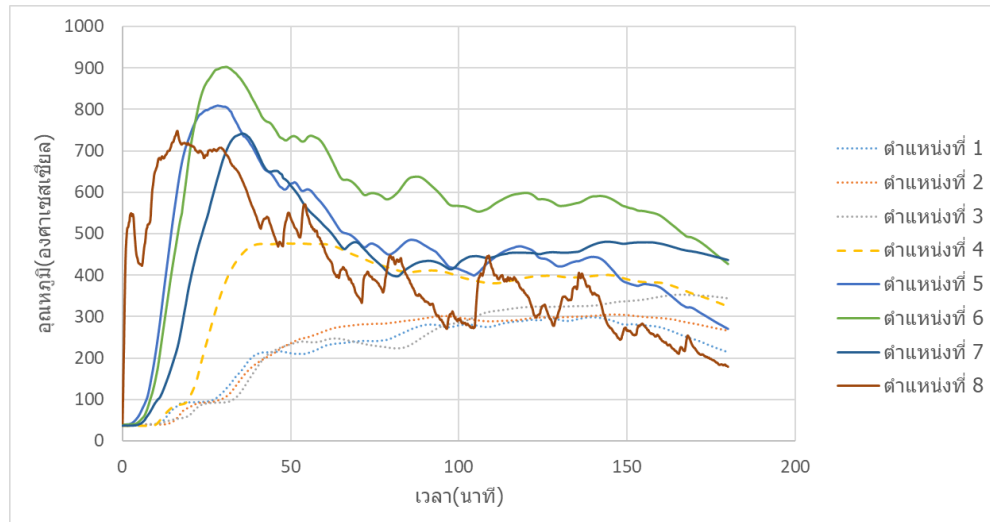
ภาพที่ 64 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด
ตารางที่ 23 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพด

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)		ด้านบน	T (°C)		ด้านบน	T (°C)		ด้านบน
	ด้านล่าง	ตรง กลาง		ด้านล่าง	ตรง กลาง		ด้านล่าง	ตรง กลาง	
5.2	492.9	582.0	522.0	424.2	588.7	582.9	325.1	450.0	517.0
18.9		487.2			375.3			283.6	
27.6	352.4	126.9	140.5	329.0	345.8	332.5	267.1	308.6	331.1



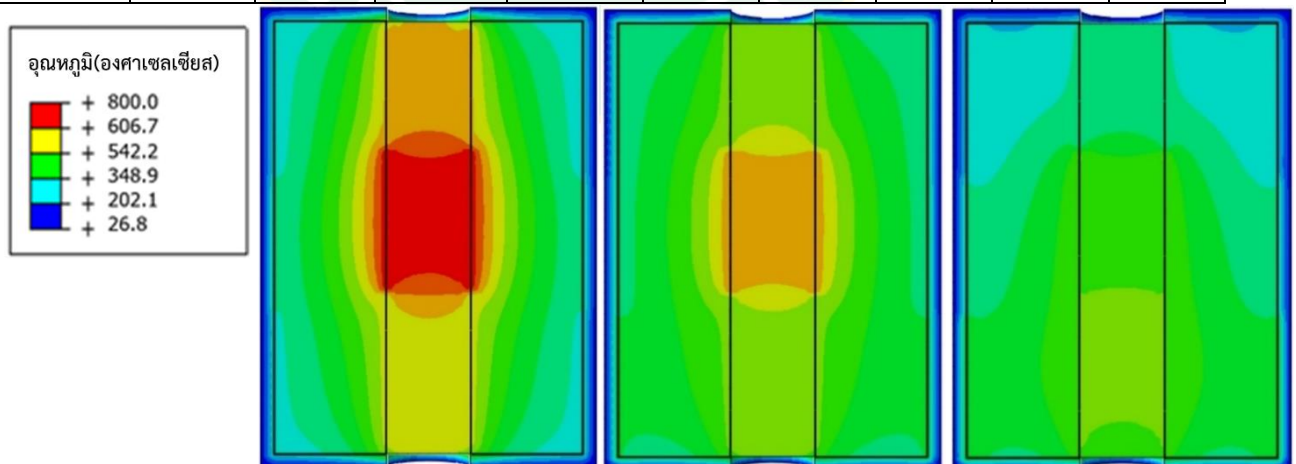
ภาพที่ 65 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรของซังข้าวโพด ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.3.2 ข้อมูลการทดสอบของแกลบ



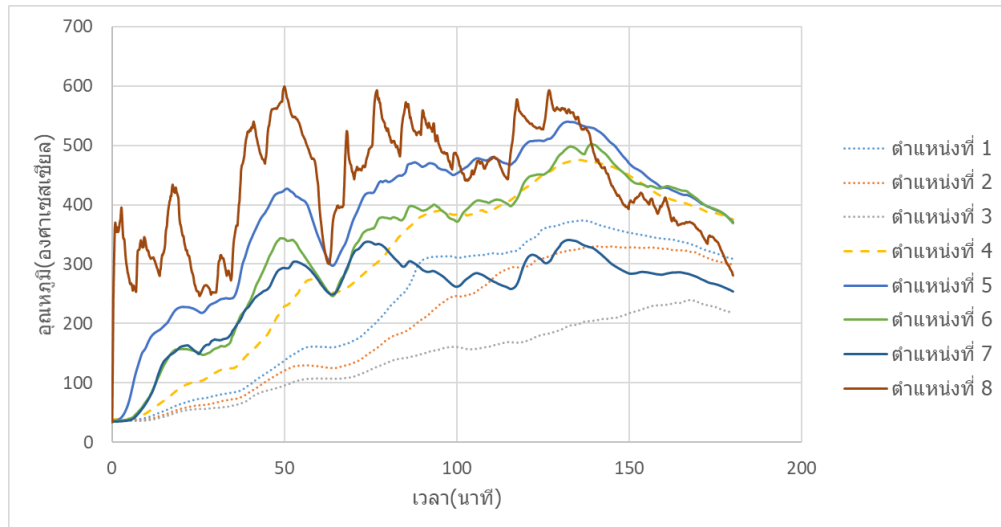
ภาพที่ 66 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นแกลบ
ตารางที่ 24 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
5.2	565.8	711.7	519.0	466.3	598.7	454.2	270.7	427.3	436.9
18.9		475.1			394.3			324.6	
27.6	229.4	265.1	243.1	290.9	294.9	323.1	214.3	266.3	344.3



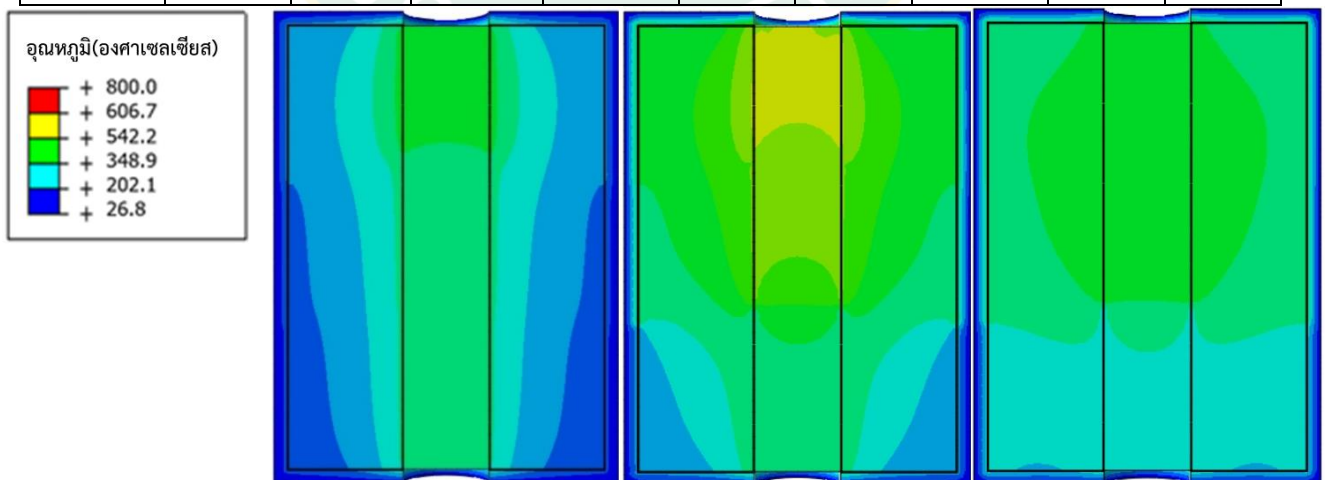
ภาพที่ 67 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรของกะลา
กาแฟ ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.3.3 ข้อมูลการทดสอบของกิ่งไม้ลำไย



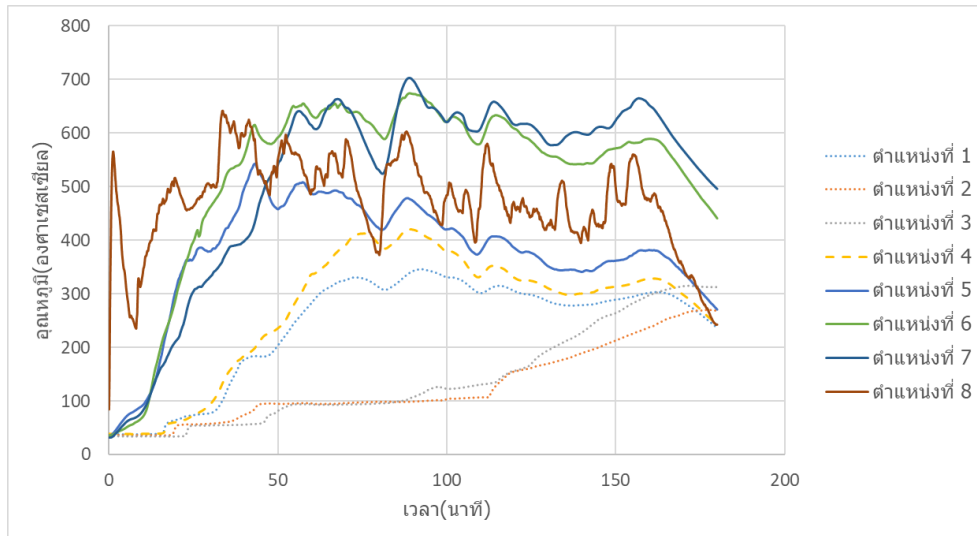
ภาพที่ 68 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย ตารางที่ 25 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไย

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
5.2	343.1	276.7	271.3	502.3	441.9	306.1	370.6	368.8	253.9
18.9		269.1			428.7			375.3	
27.6	160.8	127.6	107.4	337.1	295.8	170.5	308.8	299.3	219.3



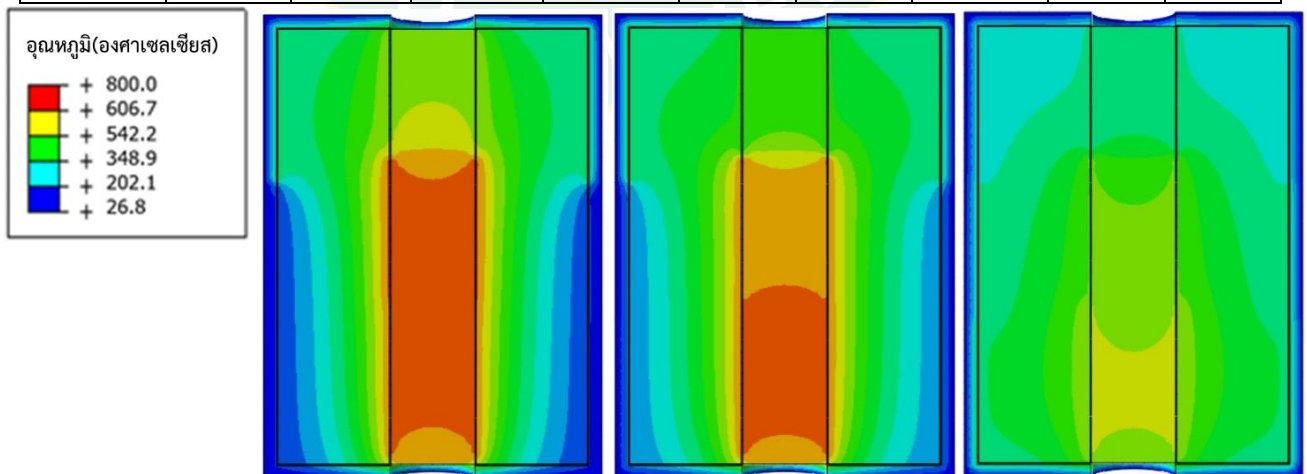
ภาพที่ 69 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรของกิ่งไม้ลำไย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.3.4 ข้อมูลการทดสอบของเปลือกกล้วย



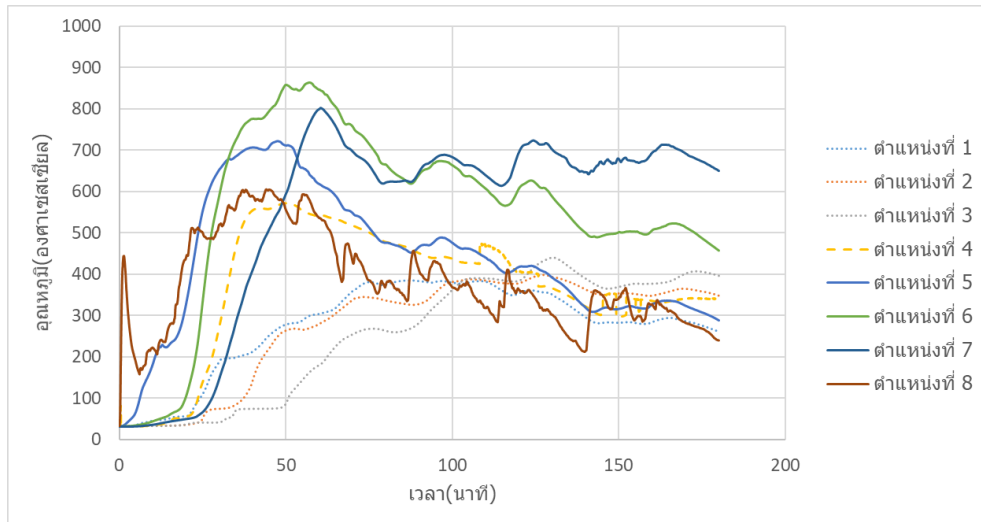
ภาพที่ 70 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย
ตารางที่ 26 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วย

ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	T (°C)			T (°C)			T (°C)		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
5.2	487.3	633.4	614.1	385.6	608.3	615.9	270.9	441.0	496.0
18.9		336.9			330.0			243.1	
27.6	283.8	95.6	93.8	305.5	155.1	156.5	236.7	268.1	312.7



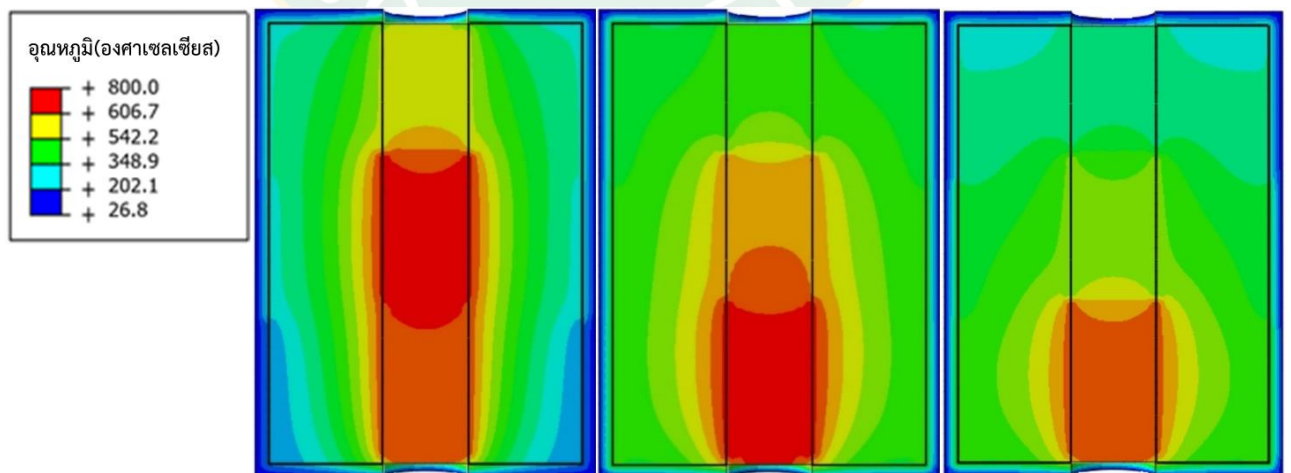
ภาพที่ 71 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรของ
เปลือกกล้วย ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.3.5 ข้อมูลการทดสอบของกะลากาแฟ



ภาพที่ 72 อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเผาถ่านชีวภาพใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ
ตารางที่ 27 ค่าอุณหภูมิของการทดลองเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ชีวมวลเป็นกะลากาแฟ

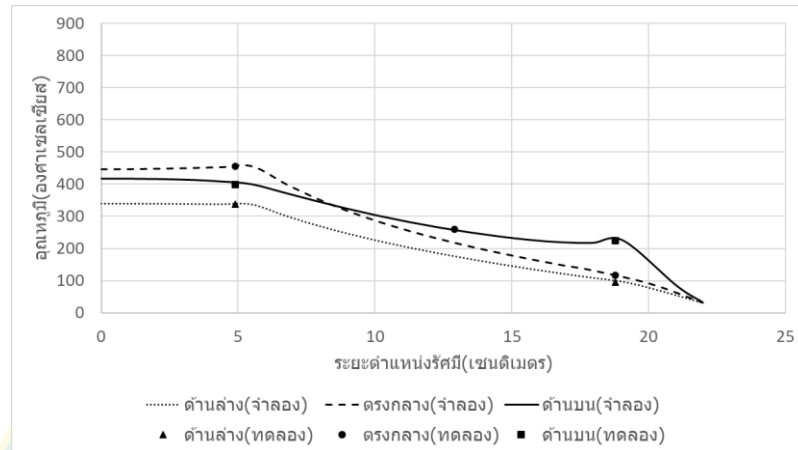
ระยะตาม แนวรัศมี (cm)	ที่เวลา 1 ชั่วโมง			ที่เวลา 2 ชั่วโมง			ที่เวลา 3 ชั่วโมง		
	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน	ด้านล่าง	ตรง กลาง	ด้านบน
5.2	618.0	846.3	799.5	417.5	607.6	695.4	288.1	457.0	650.0
18.9		544.2			407.0			340.1	
27.6	303.8	279.6	180.0	353.5	378.0	384.2	260.7	347.9	396.0



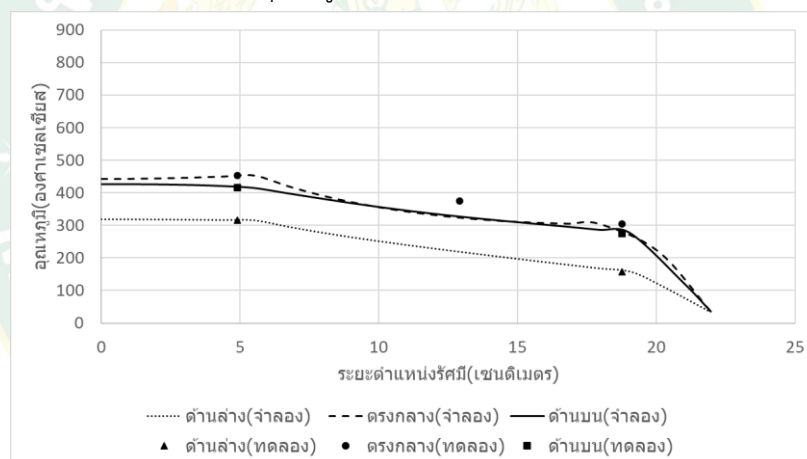
ภาพที่ 73 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรของกะลา
กาแฟ ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

4.1.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสภาพทางคอมพิวเตอร์ของการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร

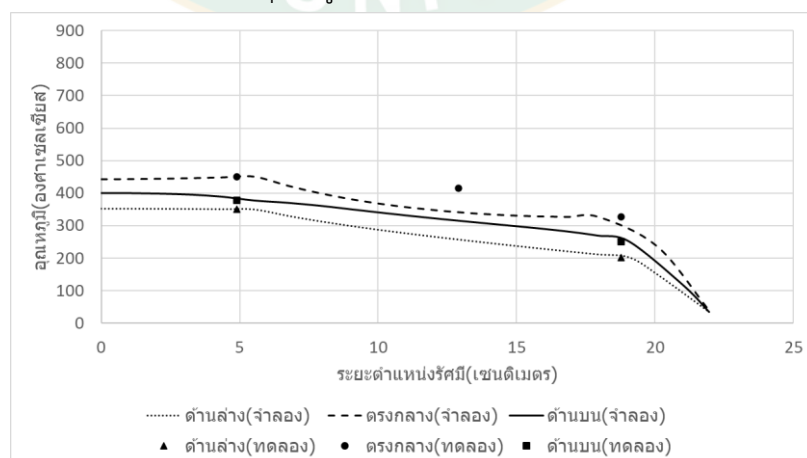
4.1.4.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของซังข้าวโพด



ภาพที่ 74 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด



ภาพที่ 75 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด



ภาพที่ 76 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด

ตารางที่ 28 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นซังข้าวโพดที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

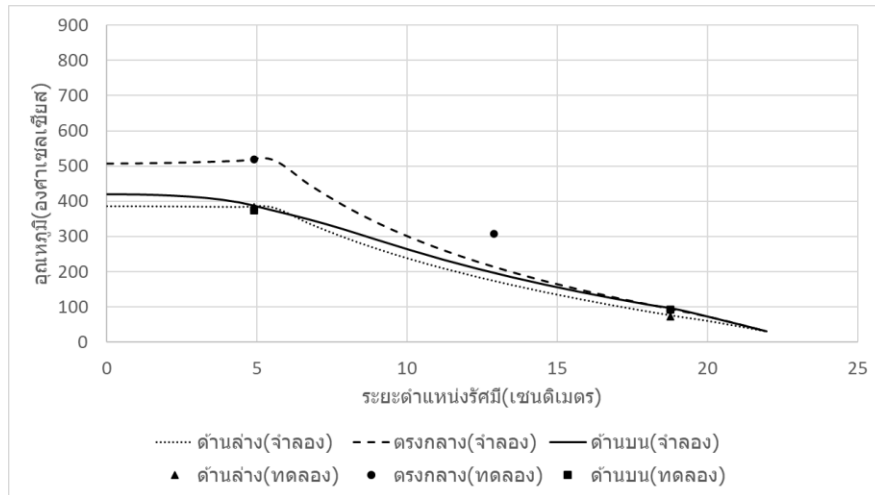
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	337.7	316.1	350.3	338.4	316.6	350.6	0.2	0.1	0.1
18.7	96.4	157.4	202.0	99.8	160.2	201.2	3.4	1.8	0.0
ตรงกลาง									
4.9	455.1	453.7	450.4	453.6	452.0	449.1	0.3	0.4	0.3
12.9	260.2	375.7	414.2	206.1	324.6	341.0	20.8	13.6	17.7
18.7	116.2	305.1	326.9	115.6	272.9	291.7	0.5	10.6	10.8
ด้านล่าง									
4.9	399.5	415.7	378.0	404.2	418.9	384.1	1.2	0.8	1.6
18.7	224.3	275.8	251.7	222.3	278.8	251.7	0.9	1.1	0.0
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	269.9±136.4								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	328.5±98.5								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	339.1±87.8								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	3.9±7.5								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	4.1±5.6								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	4.3±7.1								

การกระจายอุณหภูมิที่กระจายออกมาจากแกนกลางไปถึงขอบของเตาเผาด้านล่างข้างที่สุด เป็นผลมาจาก เมื่อทำการทดลองจะทำการจุดไฟจากด้านบนของเตาเผาเพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้จาก ด้านบนลงสู่ด้านล่าง ทำให้อุณหภูมิด้านบนของเตาเผากระจายไปถึงขอบของเตาเผาเร็วกว่าจุดอื่นๆทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดที่อยู่ด้านในของเตาเผาเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพเกือบ ทั้งหมด โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 269.9±136.4 328.5±98.5 และ 339.1±87.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากตารางที่ 28 แสดงถึงความคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิที่

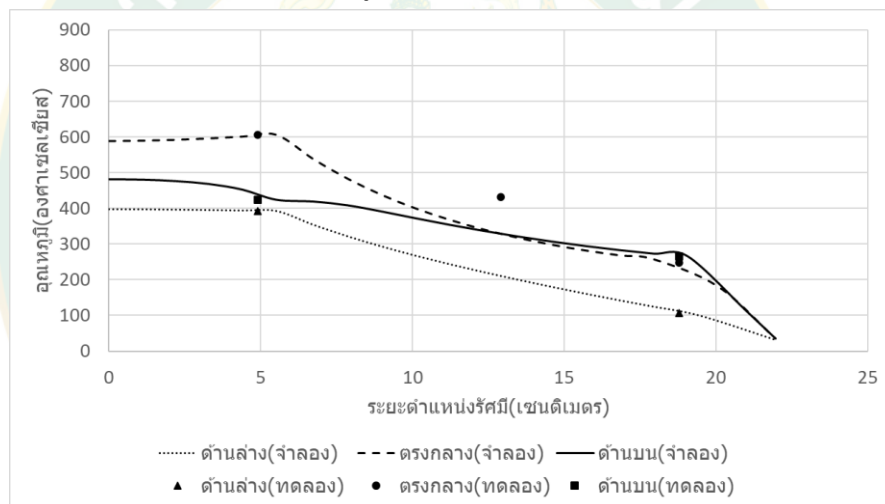
ได้จากการทดสอบจริงและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดคือ ตรงกลางของเตาเผาที่ระยะตามแนวรัศมี 12.9 เซนติเมตรคือ 20.8% เป็นผลมาจากการทดสอบในโปรแกรม นั้นจะมีการกำหนดค่าตัวแปรควบคุมจากการสมมติฐานและมีค่าที่คงที่ จึงทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบในโปรแกรมได้ โดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 3.9 ± 7.5 4.1 ± 5.6 และ 4.3 ± 7.1 ตามลำดับ



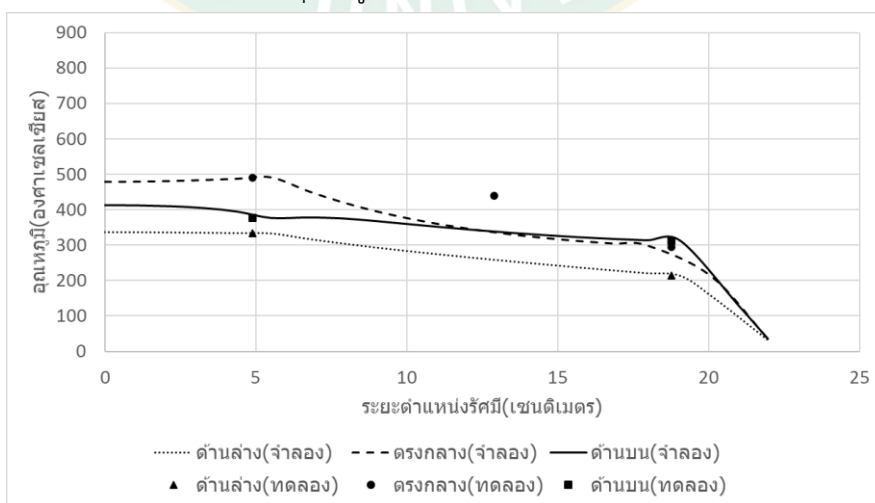
4.1.4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของแกลบ



ภาพที่ 77 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของแกลบ



ภาพที่ 78 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของแกลบ



ภาพที่ 79 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของแกลบ

ตารางที่ 29 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นแกสที่วัดได้จากการทดลอง และจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

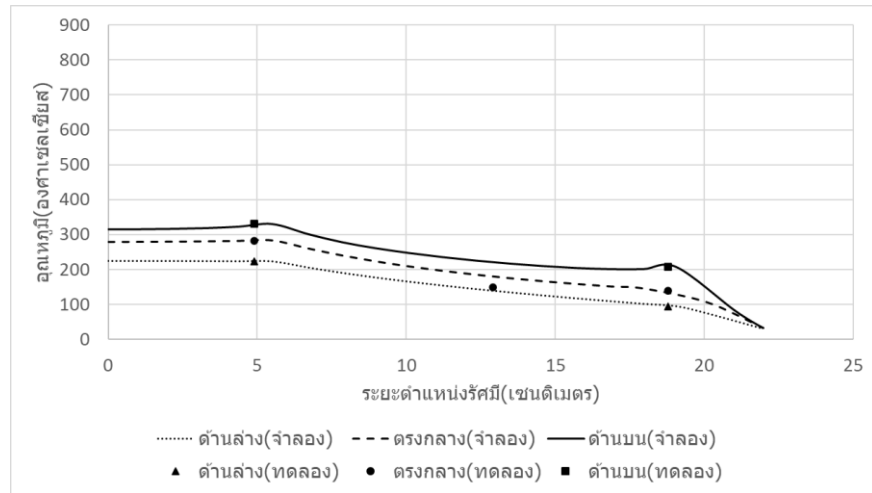
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	382.9	392.1	333.8	383.7	392.8	334.4	0.2	0.2	0.2
18.7	72.4	107.6	214.1	76.7	112.1	255.2	5.8	4.2	19.2
ตรงกลาง									
4.9	517.9	606.5	490.8	516.1	603.7	488.7	0.3	0.5	0.4
12.9	306.6	432.7	439.7	214.1	329.3	336.2	30.2	23.9	23.5
18.7	90.2	247.3	294.3	94.5	227.7	266.2	4.8	7.9	9.6
ด้านล่าง									
4.9	373.8	424.4	376.5	386.0	439.7	386.1	3.3	3.6	2.6
18.7	91.7	265.1	311.4	96.0	267.2	311.9	4.7	0.8	0.2
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	262.2±177.5								
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
เวลา (ชั่วโมง)	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	353.7±161.4								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	351.5±92.9								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	7.1±10.4								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	5.8±8.4								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	7.9±9.8								

การกระจายอุณหภูมิในช่วง 1 ชั่วโมงแรกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่น้อยมาก เป็นผลมาจากแกสมีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการอัดตัวกันและมีช่องอากาศที่น้อยเกินไปความร้อนที่แผ่ของจากแกนกลางจึงส่งผ่านไปด้านขอบเตาเผาได้ช้า แต่เมื่อถึงช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิก็ได้กระจาย

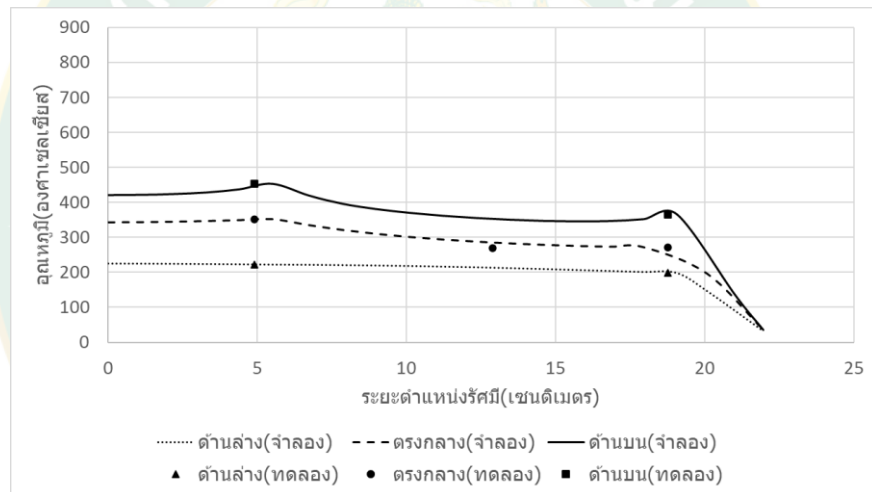
ไปถึงขอบของเตาเผาทั้งด้านบนและตรงกลางของเตาเผา ยกเว้นด้านล่างของขอบเตาเผา เป็นผลมาจากในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมงนี้ขนาดของเกลบได้หดตัวลงจากด้านบนลงสู่ด้านล่างทำให้เกิดการอัดแน่นกันของชีวมวลอุณหภูมิจากที่กระจายไปไม่ถึงด้านล่างของขอบเตาเผา และเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง อุณหภูมิจากด้านล่างก็มีการเพิ่มขึ้นจากการรวมตัวกันของถ่านชีวภาพ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของเกลบที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 262.2 ± 177.5 353.7 ± 161.4 353.7 ± 161.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าสูงสุดที่ 30.2% ที่ตรงกลางเตาเผา ระยะรัศมี 12.3 เซนติเมตร และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 7.1 ± 10.4 5.8 ± 8.4 7.9 ± 9.8 %ตามลำดับ



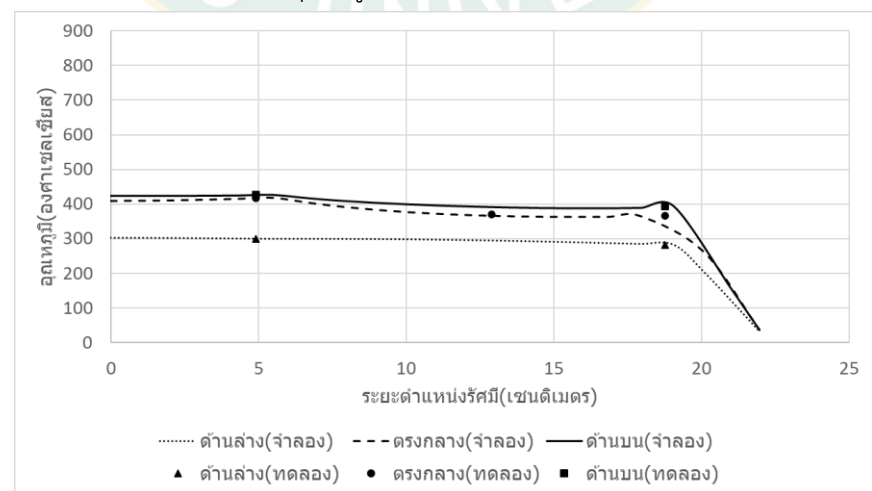
4.1.4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 80 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 81 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 82 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย

ตารางที่ 30 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกึ่งไม้ลำไยที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

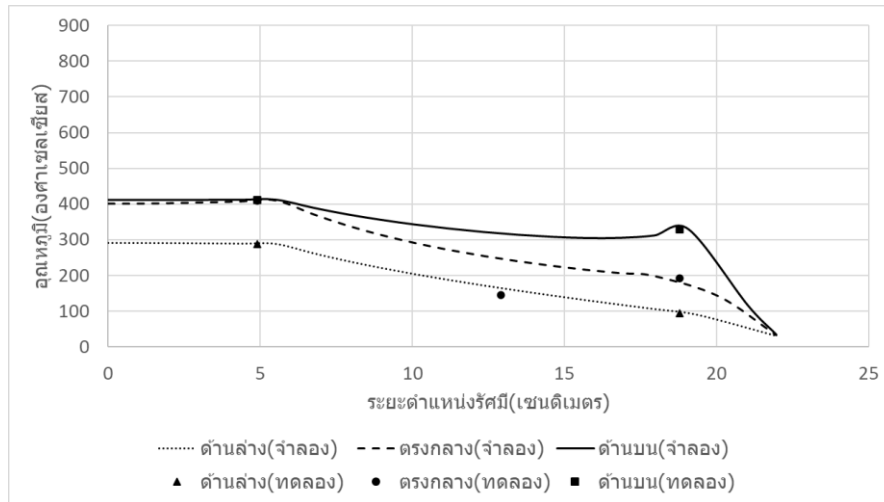
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	222.7	222.9	299.8	222.9	223.3	300.2	0.1	0.2	0.1
18.7	94.9	198.9	282.7	96.8	199.7	283.3	2.0	0.4	0.2
ตรงกลาง									
4.9	282.3	352.1	417.9	281.6	350.6	416.4	0.2	0.4	0.3
12.9	149.3	269.4	369.8	179.5	285.3	366.2	20.2	5.9	1.0
18.7	139.4	270.7	366.0	129.9	243.1	325.6	6.8	10.2	11.0
ด้านล่าง									
4.9	330.0	453.6	427.0	326.0	445.0	426.2	1.2	1.9	0.2
18.7	206.8	365.6	393.2	205.3	362.6	392.3	0.7	0.8	0.2
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	203.6±83.1								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	304.7±89.8								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	365.2±55.5								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	4.5±7.3								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	2.8±3.8								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	1.9±4.1								

อุณหภูมิช่วงเวลาที่ 1 ชั่วโมงนั้นมีการกระจายตัวที่น้อยมากอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 203.6±83.1 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่ายังไม่เกิดกระบวนการไพโรไลซิสที่ต้องใช้อุณหภูมิในช่วง 350-600 องศาเซลเซียส ต่อมาในช่วง 2 ชั่วโมง อุณหภูมิได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผา เนื่องจากกึ่งไม้ลำไยมีขนาด ช่องว่างของอากาศจำนวนมากการแผ่ความร้อนจึงเป็นไปได้ด้วยดี แต่ขนาดและผิวที่แข็งของกึ่งไม้ ลำไยทำให้ต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพ ด้านบนที่โดนความร้อนจากการคายแก๊ส ของกึ่งไม้ลำไยมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากทำให้กึ่งไม้ลำไยเริ่มหดตัวลงและอัดตัวกันอยู่ด้านล่างของเตาเผา

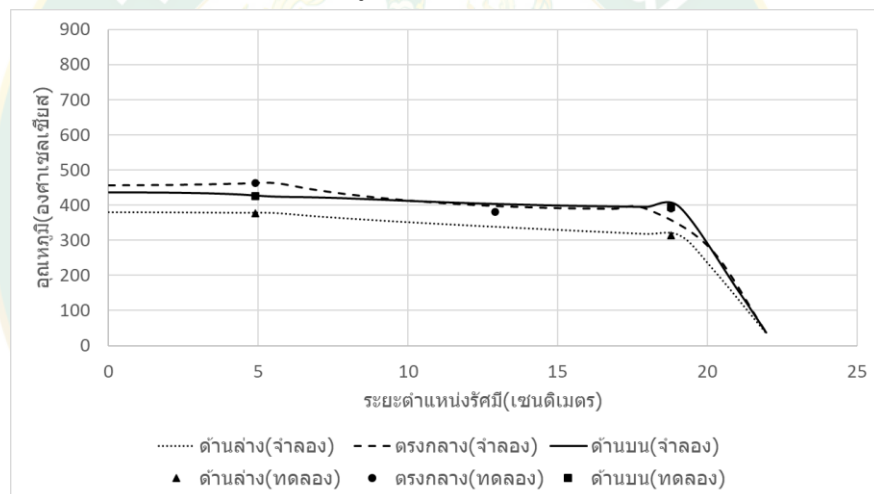
ที่เวลา 3 ชั่วโมงอุณหภูมิได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาเฉลี่ยอยู่ที่ 365.2 ± 55.5 องศาเซลเซียส แต่ก็ต้อง
สิ้นสุดกระบวนการก่อนทำให้กิ่งไม้ลำไยมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 203.6 ± 83.1
 304.7 ± 89.8 365.2 ± 55.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 4.5 ± 7.3
 2.8 ± 3.8 1.9 ± 4.1 % ตามลำดับ



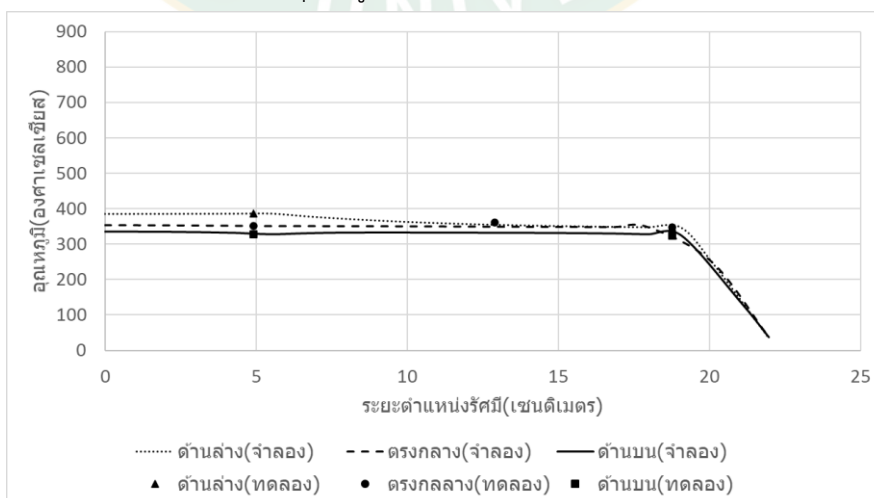
4.1.4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของเปลือกกล้วย



ภาพที่ 83 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของเปลือกกล้วย



ภาพที่ 84 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของเปลือกกล้วย



ภาพที่ 85 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของเปลือกกล้วย

ตารางที่ 31 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วยที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

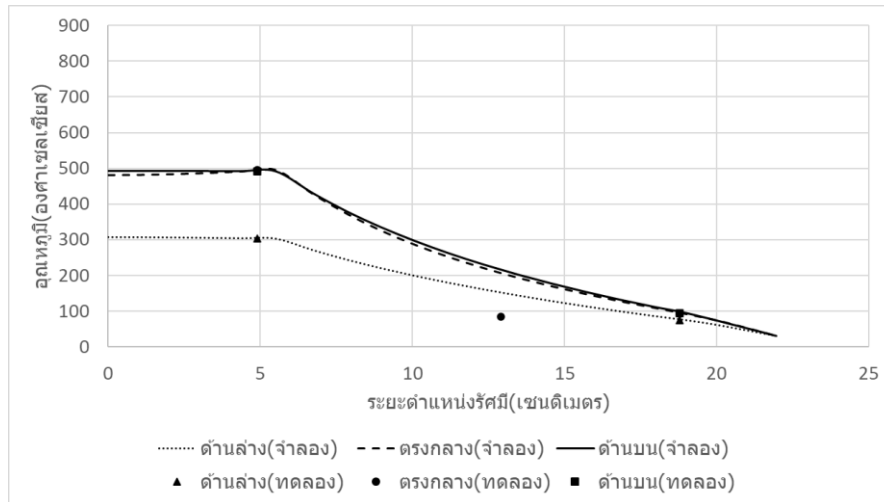
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	288.0	377.1	386.9	288.4	377.4	386.8	0.1	0.1	0.0
18.7	94.9	313.4	347.3	98.0	314.5	347.5	3.2	0.4	0.1
ตรงกลาง									
4.9	409.4	463.7	351.3	407.9	462.6	351.7	0.4	0.2	0.1
12.9	145.5	381.6	360.7	247.1	398.2	349.6	69.8	4.3	3.1
18.7	191.5	390.1	348.2	176.8	347.9	311.2	7.7	10.8	10.6
ด้านล่าง									
4.9	411.6	425.0	328.2	411.4	428.3	330.1	0.1	0.8	0.6
18.7	329.0	394.9	324.1	324.3	395.1	325.2	1.4	0.0	0.3
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	267.1±126.2								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	392.3±46.1								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	349.5±20.9								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	11.8±25.7								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	2.4±4.0								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	2.1±3.9								

ในช่วง 1 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิได้กระจายไปเกือบทั้งเตาเผาแล้ว เนื่องจากเปลือกกล้วยมี รูปทรงคล้ายวงกลมและมีช่องว่างขนาดใหญ่การกระจายอุณหภูมิจึงกระจายได้อย่างทั่วถึงต่อมา ในช่วง 2 ชั่วโมงอุณหภูมิก็ดได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาเกิดการคายแก๊สทั้งเตาเผาทำให้ช่วงเวลานี้เป็น ช่วงที่อุณหภูมิสูงที่สุดและที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยทั่วทั้งเตาเผาเกือบจะคงที่และมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 267.1±126.2

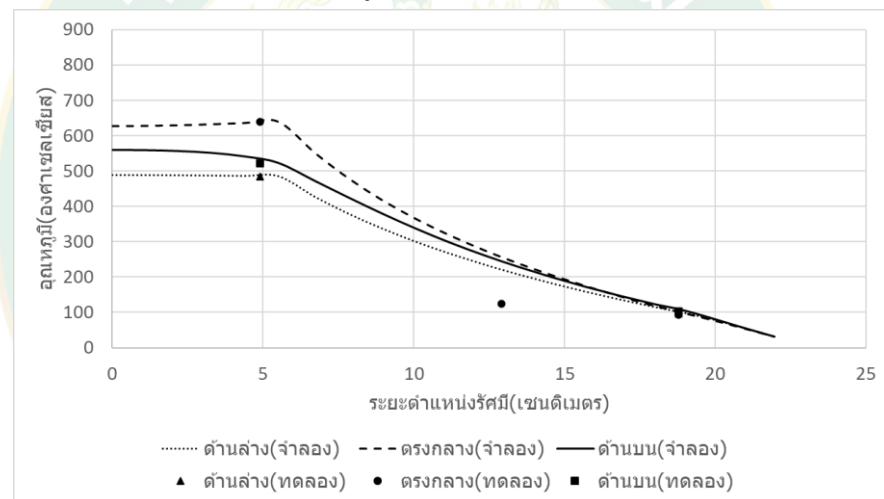
392.3±46.1 และ 349.5±20.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 11.8±25.7 2.4±4.0 และ 2.1±3.9 % ตามลำดับ



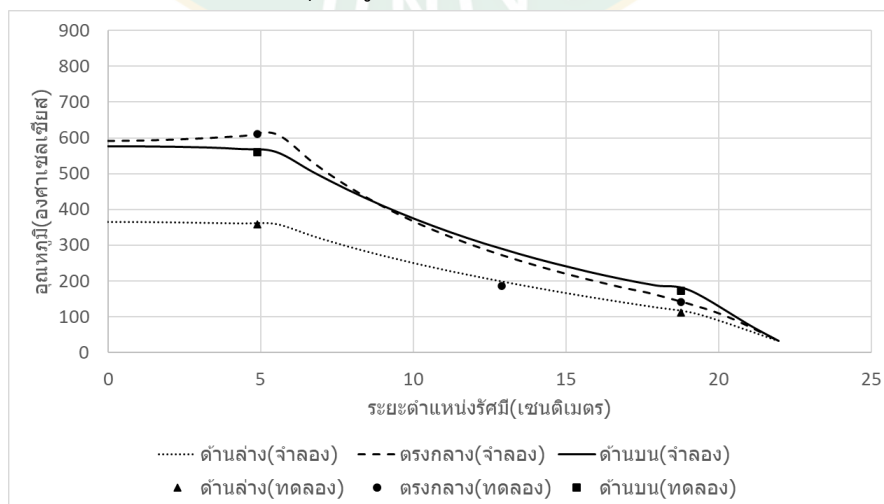
4.1.4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกะลาปากแพ



ภาพที่ 86 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ



ภาพที่ 87 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ



ภาพที่ 88 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 50 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ

ตารางที่ 32 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกะลาเผาที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	303.2	485.2	358.5	303.9	485.7	359.3	0.2	0.1	0.2
18.7	74.1	96.7	111.9	77.4	101.8	115.6	4.5	5.3	3.3
ตรงกลาง									
4.9	494.9	639.1	610.6	492.5	637.1	607.5	0.5	0.3	0.5
12.9	85.2	125.1	186.2	207.5	257.2	272.6	143.6	105.5	46.4
18.7	92.7	94.1	141.6	95.9	85.5	140.4	3.4	9.1	0.9
ด้านล่าง									
4.9	492.0	522.3	560.4	492.2	532.1	564.6	0.0	1.9	0.7
18.7	93.9	103.1	173.1	98.9	108.7	176.9	5.3	5.4	2.2
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	233.7±194.4								
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
เวลา (ชั่วโมง)	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	295.1±242.1								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	306.1±206.9								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	22.5±53.4								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	18.2±38.6								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	7.7±17.1								

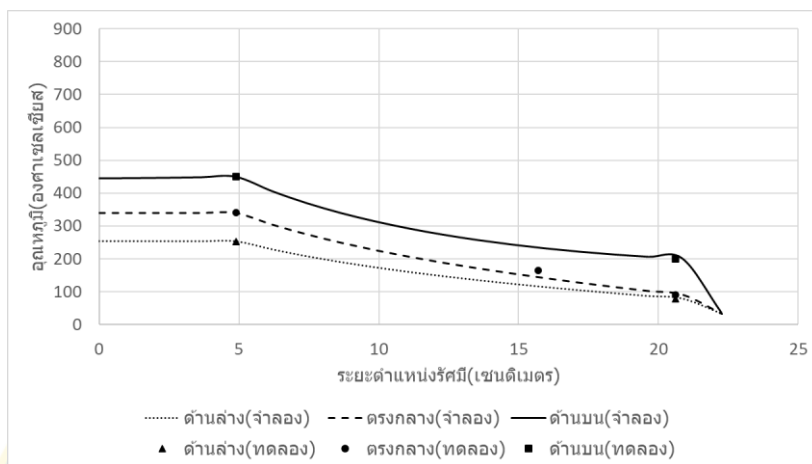
อุณหภูมิที่กระจายตัวออกมาจากแกนกลางแทบจะไปถึงขอบของเตาเผาเลยเนื่องจาก กะลาเผาเมื่อรับพลังงานความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพจะคายแก๊สออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้อุณหภูมิแกนกลางสูงขึ้น แก๊สที่คายออกมาใช้เวลานานกว่าจะเปลี่ยนกะลาเผาเป็นถ่าน

ชีวภาพได้ ในช่วง 1 ชั่วโมงแรก กะลาการแพเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพเพียง 5.4 % และในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมง กะลาการแพเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพเพียง 8.6 % แต่เมื่อครบ 3 ชั่วโมง กะลาการแพเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพมากถึง 27 % กะลาการแพที่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพที่ได้อยู่ด้านบนของเตาเผาเพียงเล็กน้อยแต่ในส่วนที่ใกล้กับแกนกลางมีถ่านชีวภาพจำนวนมากในส่วนที่ไม่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพ พบว่า อยู่ที่ด้านล่างและขอบของเตาเผาตั้งแต่ตรงกลางของเตาเผาลงมาแทบไม่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพเลย เพราะความละเอียดของแกลบและกะลาการแพ ที่มีลักษณะทางกายภาพที่มีลักษณะคล้ายฉนวนความร้อน ซึ่งหากบรรจุลงในเตาเผาถ่านชีวภาพส่วนที่อยู่รอบๆขอบของเตาเผาจึงมีลักษณะคล้ายฉนวนที่หุ้มเตาผนวกกับการหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนด้านนอกเตาเผาทำให้สามารถลดการสูญเสียความร้อนรอบเตา อุณหภูมิในเตาเผาจึงเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 233.7 ± 194.4 295.1 ± 242.1 306.1 ± 206.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 22.5 ± 53.4 18.2 ± 38.6 7.7 ± 17.1 % ตามลำดับ

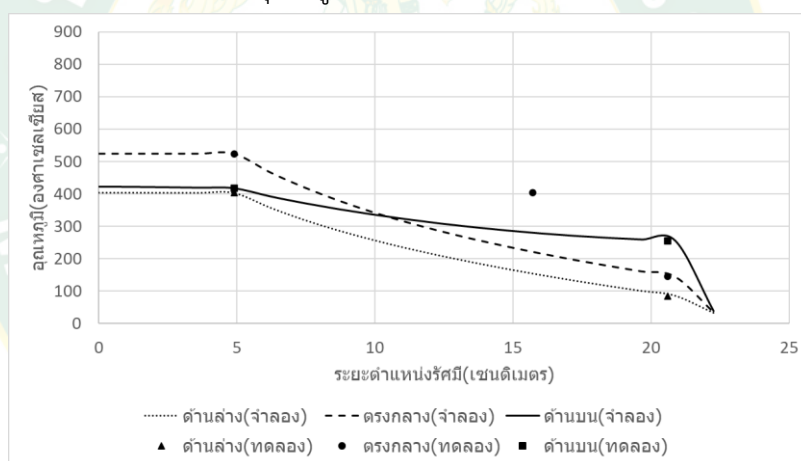


4.1.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสภาพทางคอมพิวเตอร์ของการกระจาย อุณหภูมิตะกั่วในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร

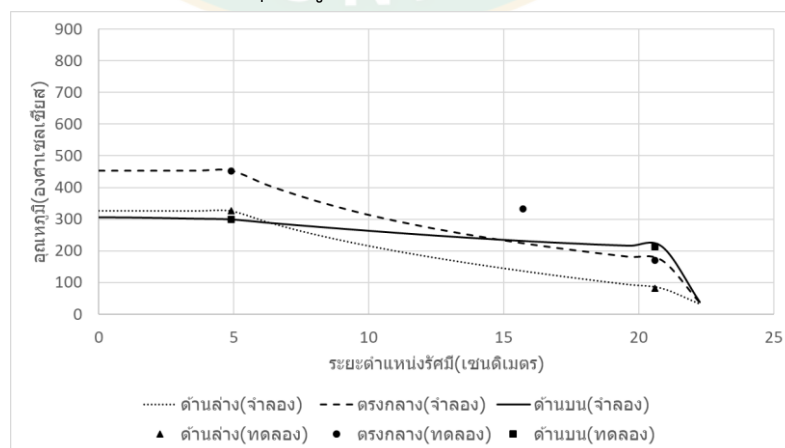
4.1.5.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของซังข้าวโพด



ภาพที่ 89 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะกั่วในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด



ภาพที่ 90 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะกั่วในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด



ภาพที่ 91 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะกั่วในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด

ตารางที่ 33 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

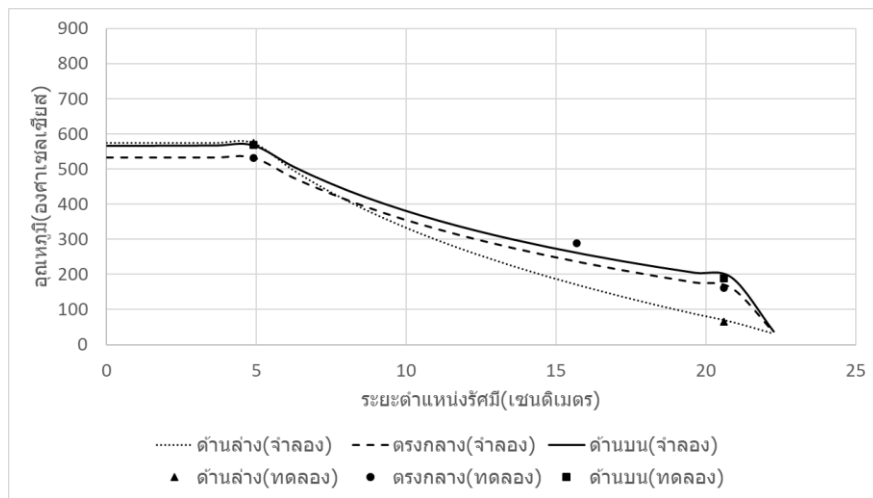
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	252.6	403.8	325.7	252.3	403.1	325.2	0.2	0.2	0.2
20.6	78.4	85.9	81.7	80.1	89.0	84.2	2.2	3.6	3.1
ตรงกลาง									
4.9	340.3	523.8	452.5	339.8	523.0	451.9	0.2	0.2	0.1
15.7	163.7	403.4	333.1	144.5	221.3	223.9	11.7	45.1	32.8
20.6	90.8	144.7	169.5	93.3	148.2	172.0	2.8	2.5	1.5
ด้านล่าง									
4.9	449.8	417.6	299.8	449.2	417.2	299.7	0.1	0.1	0.1
20.6	200.7	255.5	212.7	202.1	256.5	213.5	0.7	0.4	0.4
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	225.2±134.4								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	319.2±160.6								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	2.5±4.2								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	7.4±16.7								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	5.4±12.1								

การกระจายอุณหภูมิของเชื้อเพลิงชีวภาพทำให้ทราบว่าในช่วง 1 ชั่วโมงแรกด้านบนของเตาเผา มีอุณหภูมิที่สูงและเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นเร็วกว่าจุดอื่นๆ ทำให้ขนาดของเชื้อเพลิงชีวภาพ หดตัวลงส่งผลให้เกิดการอัดแน่นกันของเชื้อเพลิงชีวภาพ เชื้อเพลิงชีวภาพที่อยู่ด้านล่างจึงได้รับความร้อนช้าที่สุด

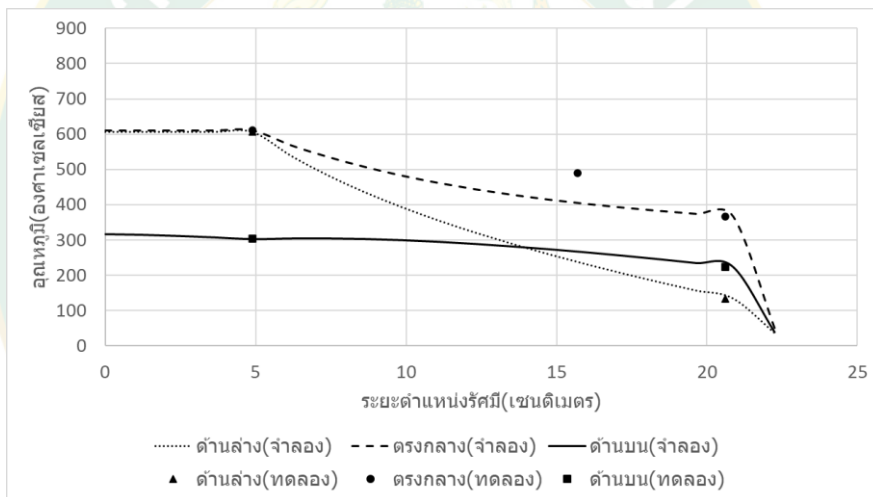
อุณหภูมิในจุดนี้จึงต่ำกว่าจุดอื่นๆ ในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมง เชื้อเพลิงได้ลุกไหม้ทั้งแกนกลางเนื่องจากการคายแก๊สของซังข้าวโพดที่อยู่รอบๆแกนกลางส่งผลให้อุณหภูมิในแกนกลางสูงขึ้นอย่างมาก แต่ขอบตรงกลางและด้านล่างของเตาเผากลับมีอุณหภูมิที่ต่ำผลมาจากการอัดตัวกันของซังข้าวโพดที่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพอัดตัวกันแน่นจนเกินไปความร้อนที่จะส่งผ่านไปยังขอบของเตาเผามีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยเนื่องจากซังข้าวโพดที่มีอุณหภูมิสูง และในช่วงเวลาที่ 3 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 225.2 ± 134.4 319.2 ± 160.6 และ 267.8 ± 122.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 2.5 ± 4.2 7.4 ± 16.7 และ 5.4 ± 12.1 ตามลำดับ



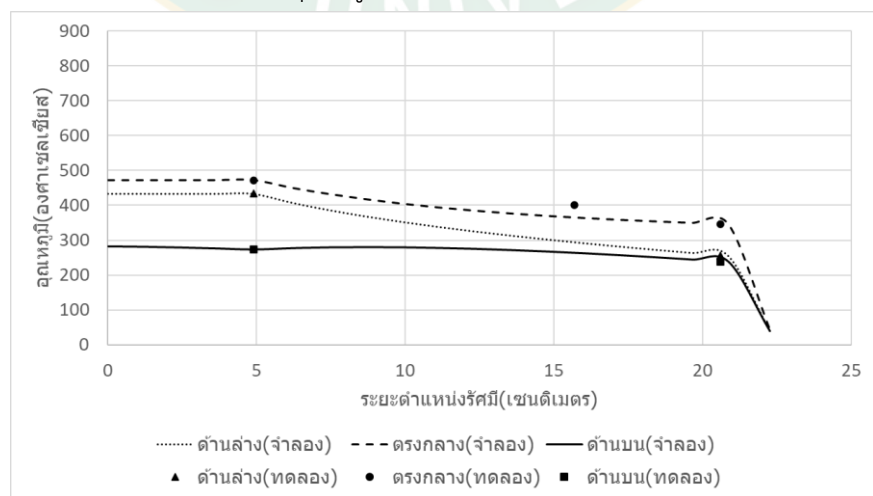
4.1.5.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของแกลบ



ภาพที่ 92 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจากในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของแกลบ



ภาพที่ 93 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจากในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของแกลบ



ภาพที่ 94 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจากในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของแกลบ

ตารางที่ 34 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นแกลบที่วัดได้จากการทดลอง และจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

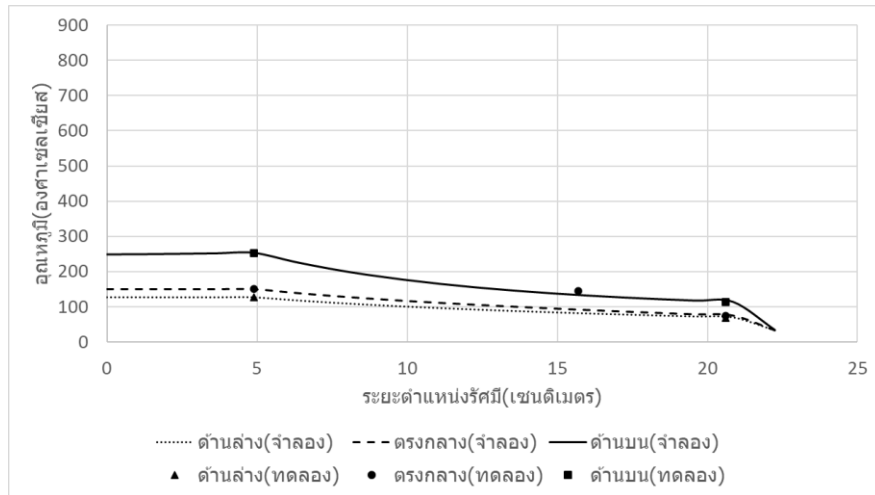
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
เวลา (ชั่วโมง)									
ด้านบน									
4.9	574.9	606.6	433.3	573.7	606.6	433.3	0.2	0.0	0.0
20.6	64.9	134.1	255.3	69.7	138.9	257.1	7.4	3.6	0.7
ตรงกลาง									
4.9	532.1	611.6	471.5	531.2	611.6	471.2	0.2	0.0	0.1
15.7	288.5	490.4	400.4	236.3	405.6	364.4	18.1	17.3	9.0
20.6	160.8	366.6	345.2	164.3	368.4	346.0	2.2	0.5	0.2
ด้านล่าง									
4.9	567.8	302.9	274.2	567.8	302.9	276.8	0.0	0.0	0.1
20.6	189.4	223.9	238.2	192.7	226.3	239.7	1.7	1.1	0.6
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	339.7±214.9								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	390.9±185.9								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	345.4±92.5								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	4.3±6.6								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	3.2±6.3								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	1.7±3.3								

จะเห็นได้ว่าในช่วง 1 ชั่วโมงแรกนั้นอุณหภูมิได้เพิ่มสูงขึ้นจากการคายแก๊สของแกลบ โดยแกลบที่อยู่รอบๆแกนกลางได้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นการกระจายอุณหภูมิเกือบจะทั่วทั้งเตาเผาแล้ว ในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจากการคายแก๊สของแกลบถึงแม้ขอบด้านล่างเพิ่งจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็ตาม และ พบว่า แกลบได้มีการหดตัวลงทำให้อุณหภูมิด้านบนของเตาเผาตกลงอย่างมาก กลับกันอุณหภูมิตรงกลางของเตาเผามีการเพิ่มขึ้น

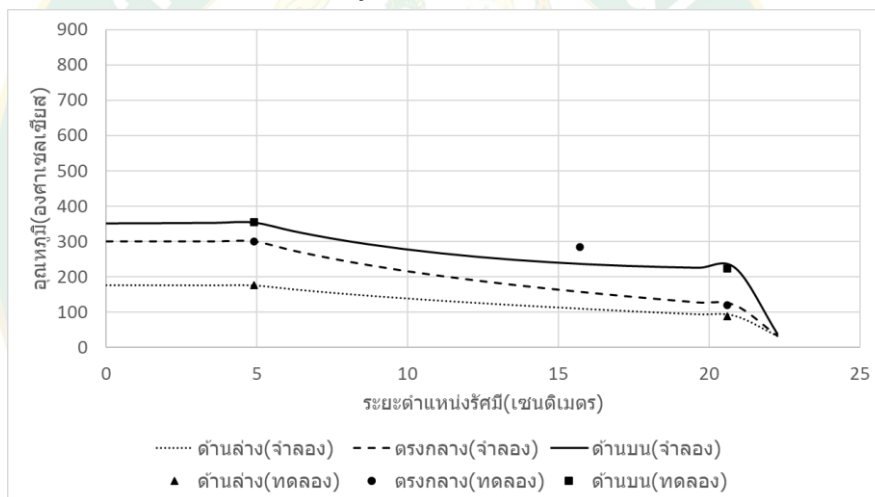
และในช่วงเวลาที่ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิก็ได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาแล้วแต่กระบวนการไพโรไลซิสนั้น
เกิดขึ้นช้าเกินไปทำให้ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 339.7 ± 214.9 390.9 ± 185.9
และ 345.4 ± 92.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 4.3 ± 6.6 3.2 ± 6.3 และ
 $1.7 \pm 3.3\%$ ตามลำดับ



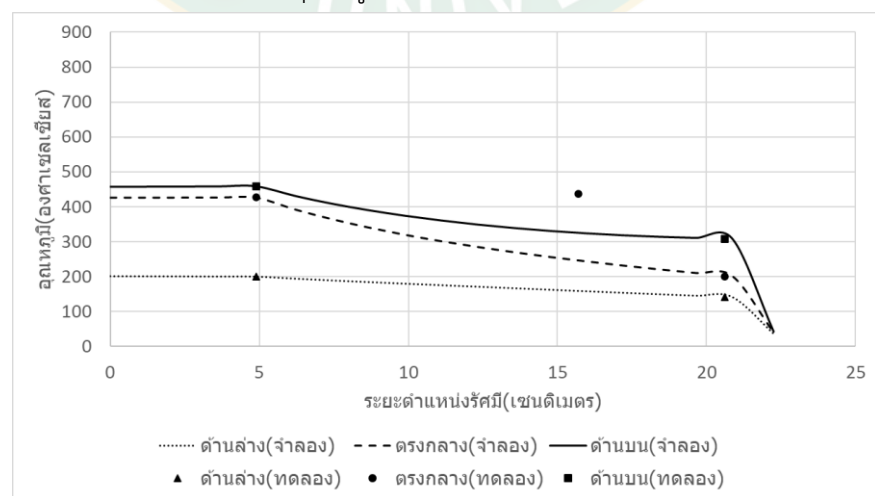
4.1.5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 95 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจากการทดลองและการจำลองในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 96 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจากการทดลองและการจำลองในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 97 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจากการทดลองและการจำลองในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย

ตารางที่ 35 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกิ่งไม้ลำไยที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

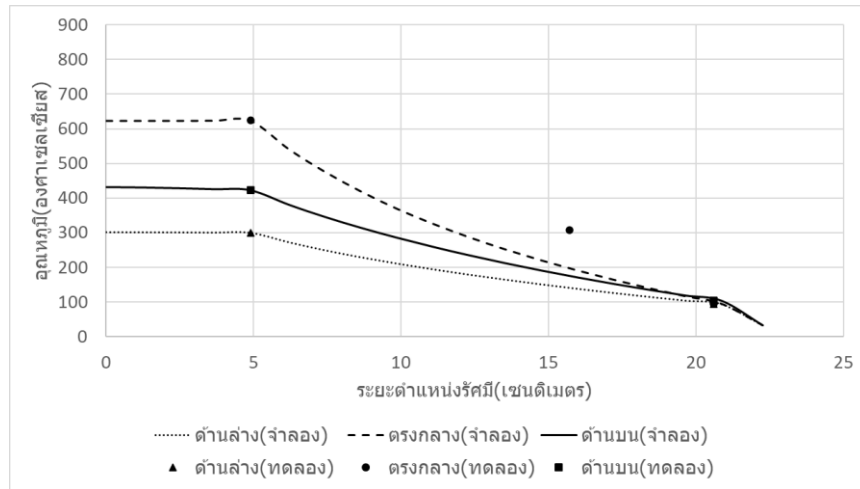
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	เวลา (ชั่วโมง)	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr
ด้านบน									
4.9	126.7	176.1	200.3	126.5	175.9	200.2	0.1	0.1	0.0
20.6	69.3	89.4	141.6	69.9	90.4	142.4	0.8	1.1	0.6
ตรงกลาง									
4.9	149.8	300.2	427.0	149.7	299.8	426.4	0.1	0.1	0.1
15.7	145.5	285.1	436.8	91.7	158.2	247.0	37.0	44.5	43.5
20.6	74.5	120.0	201.2	75.3	121.8	203.4	1.1	1.5	1.1
ด้านล่าง									
4.9	252.9	354.8	458.7	252.5	354.4	458.2	0.2	0.1	0.1
20.6	113.1	224.6	307.9	113.9	225.0	308.5	0.7	0.1	0.2
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	133.1±61.54								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	221.5±98.2								
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	เวลา (ชั่วโมง)	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	310.5±131.7								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	5.7±13.8								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	6.8±16.6								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	6.5±16.3								

ในช่วงเวลาที่ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิมีการกระจายตัวที่น้อยมากโดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 133.1±61.54 องศาเซลเซียส ไม่สามารถทำให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ เนื่องจากกิ่งไม้

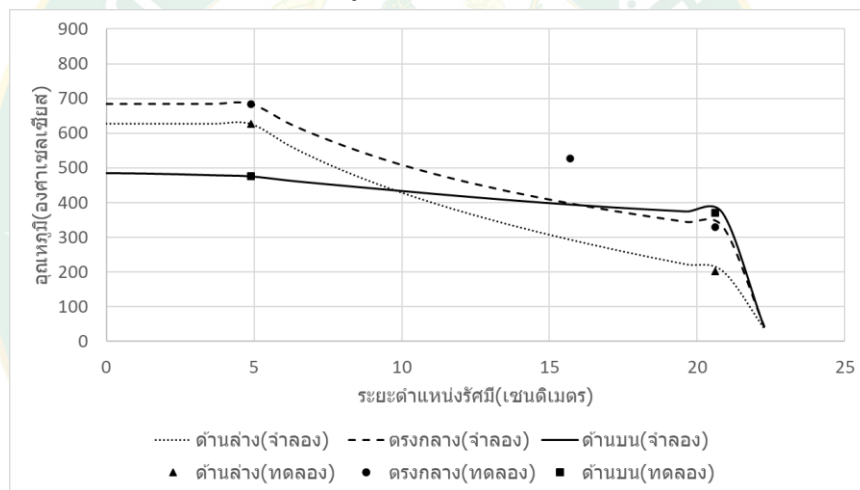
ลำไยมีความแข็งและหนามากต้องใช้อุณหภูมิที่สูงและเวลาที่มากขึ้นเพื่อที่จะส่งความร้อนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน จึงทำให้ใน 1 ชั่วโมงแรกไม่เกิดการคายแก๊สหรือเกิดการคายแก๊สน้อยมากอุณหภูมิเลยต่ำ และในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมงกึ่งไม้ลำไยเริ่มมีการคายแก๊สเพิ่มมากขึ้นอุณหภูมิจึงสูงขึ้นมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 221.5 ± 98.2 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 3 ชั่วโมง กึ่งไม้ลำไยจากกลางเตาเผาที่เพิ่งจะส่งผ่านความร้อนไปถึงขอบของเตาเผา ทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้จะอยู่ด้านบนและส่วนที่ใกล้กับแกนกลางเป็นส่วนมาก แต่ในส่วนของตรงกลางขอบเตาเผาลงไปแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการจะเกิดกระบวนการไพโรไลซิสนั้นต้องใช้อุณหภูมิในช่วง 350-600 องศาเซลเซียส แต่ขอบเตาเผาตรงกลางลงไปมีอุณหภูมิเพียง 201.2-141.6 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 133.1 ± 61.54 221.5 ± 98.2 และ 310.5 ± 131.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 5.7 ± 13.8 6.8 ± 16.6 และ 6.5 ± 16.3 % ตามลำดับ



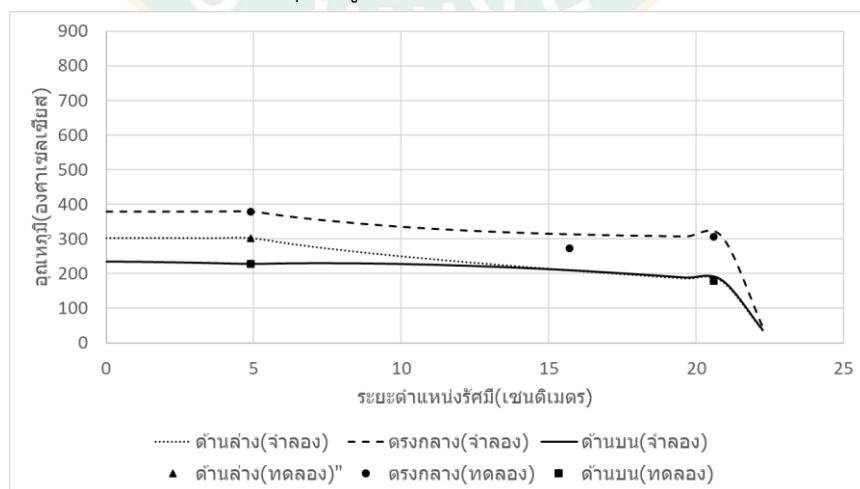
4.1.5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของเปลือกลำไย



ภาพที่ 98 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของเปลือกลำไย



ภาพที่ 99 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของเปลือกลำไย



ภาพที่ 100 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของเปลือกลำไย

ตารางที่ 36 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วยที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

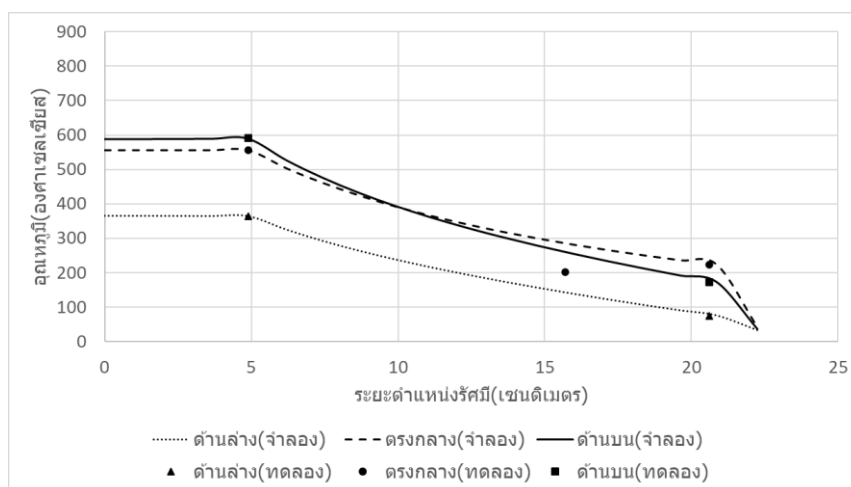
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	299.7	626.6	303.3	299.2	625.6	303.0	0.2	0.2	0.1
20.6	93.8	202.6	180.1	96.0	206.8	181.5	2.4	2.1	0.8
ตรงกลาง									
4.9	623.6	684.5	379.1	622.3	683.6	378.8	0.2	0.1	0.1
15.7	308.4	526.9	272.3	197.7	397.5	313.5	35.9	24.6	15.1
20.6	95.0	329.8	306.1	99.7	332.9	306.3	5.0	0.9	0.1
ด้านล่าง									
4.9	423.0	476.1	227.6	422.3	475.9	227.6	0.2	0.0	0.0
20.6	103.8	369.7	180.6	107.1	370.8	182.2	3.2	0.3	0.9
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	278.2±199.8								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	459.4±170.4								
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
เวลา (ชั่วโมง)	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	264.1±72.9								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	6.7±13.0								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	4.0±9.1								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	2.4±5.6								

ในช่วง 1 ชั่วโมงแรกอุณหภูมิใกล้แกนกลางเพิ่มขึ้นสูงส่งผลให้เปลือกกล้วยเริ่มมีการคายแก๊ส ออกมาและส่วนอื่นๆของเตาเผาเริ่มมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมงเปลือกกล้วยทั่วทั้ง

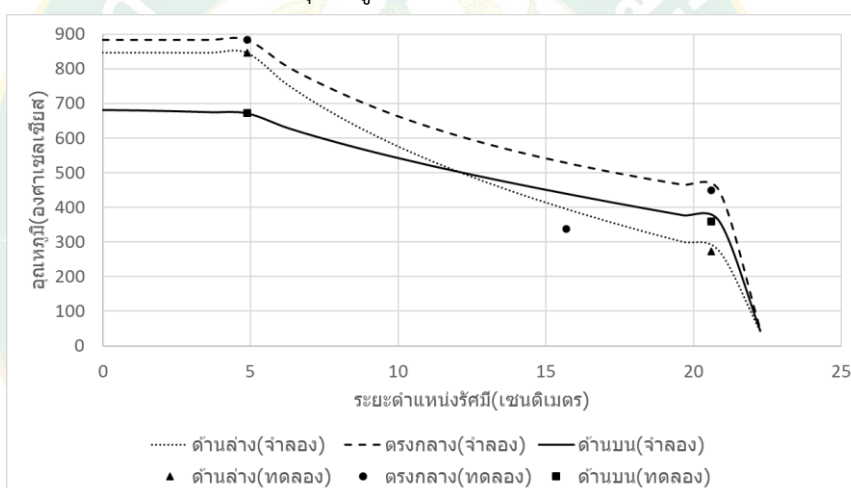
เตาเผามีการคายแก๊สออกมาเป็นจำนวนมากส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นถึง 459.4 ± 170.4 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิตรงกลางและด้านล่างของแกนกลางเพิ่มขึ้นอย่างมากถึงแม้ว่าในส่วนขอบเตาเผาด้านล่างอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้น และในช่วงเวลาที่ 3 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากแกนกลางถึงขอบของเตาเผาเกือบจะเท่ากันก็ตามแต่อุณหภูมิก็ได้ลดลงอย่างมาก โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 278.2 ± 199.8 459.4 ± 170.4 และ 264.1 ± 72.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 6.7 ± 13.0 4.0 ± 9.1 และ 2.4 ± 5.6 % ตามลำดับ



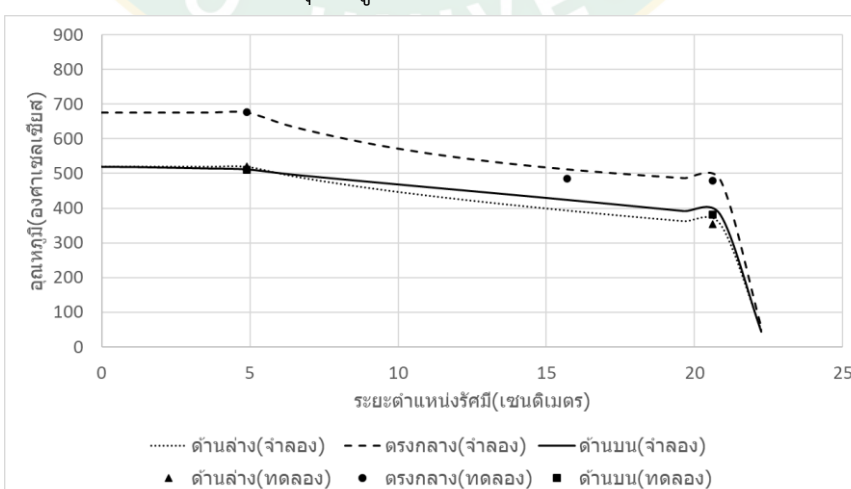
4.1.5.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกะลาปากแพ



ภาพที่ 101 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ



ภาพที่ 102 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ



ภาพที่ 103 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 100 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ

ตารางที่ 37 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกะลาเผาที่วัดได้จากการทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
4.9	364.9	846.3	520.3	364.3	845.0	519.9	0.2	0.2	0.1
20.6	75.4	274.0	354.4	78.5	279.5	356.3	4.1	2.0	0.5
ตรงกลาง									
4.9	555.9	883.5	676.2	555.1	882.3	675.6	0.1	0.1	0.1
15.7	200.9	338.2	485.6	285.4	528.5	512.1	42.1	56.2	5.4
20.6	222.5	448.7	480.2	225.4	452.4	481.7	1.3	0.8	0.3
ด้านล่าง									
4.9	590.4	671.5	511.6	589.4	670.9	511.4	0.2	0.1	0.1
20.6	172.5	359.5	381.7	176.8	363.6	383.9	2.4	1.1	0.6
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	311.8±198.1								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	545.9±252.1								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	487.1±105.1								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	7.2±15.4								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	8.7±21.0								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	1.0±2.0								

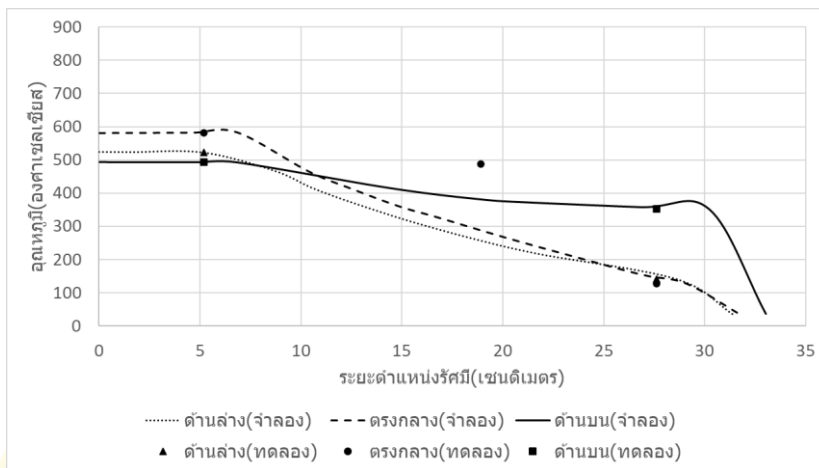
ช่วงเวลาที่ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิได้กระจายไปเกือบทั้งเตาเผาแล้วกะลาเผาที่อยู่ใกล้กับแกนกลางมีการคายแก๊สออกมาส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมากและในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมง ความร้อนก็ได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาแก๊สที่คายออกมาส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดถึง 883.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ย 545.9±252.1 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 3 ชั่วโมงอุณหภูมิก็ยังคงสูงถึง 676.2 องศาเซลเซียสที่ตำแหน่งด้านล่างของแกนกลาง แต่ก็ยังมีแก๊สที่คายออกมาไม่หมดทำให้กะลาเผาไม่สามารถเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมด ทำให้กะลาเผาที่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพจะอยู่ด้านบน

และใกล้เคียงกับแกนกลางของเตาเผาแต่ในส่วนขอบตรงกลางและด้านล่างของเตาเผามีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากกะลาปากาแฟมีแก๊สจำนวนมากการคายแก๊สออกทั้งหมดจึงใช้เวลานานและขนาดของกะลาปากาแฟมีขนาดเล็กปริมาณในเตาเผาจึงมากตามไปด้วย ถึงแม้จะเกิดกระบวนการไพโรไลซิสและการกระจายอนุภาคนิวเคลียสที่รวดเร็วแต่ก็ไม่ทำให้กะลาปากาแฟเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมด โดยอนุภาคนิวเคลียสที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 311.8 ± 198.1 545.9 ± 252.1 และ 487.1 ± 105.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 7.2 ± 15.4 8.7 ± 21.0 และ 1.0 ± 2.0 % ตามลำดับ

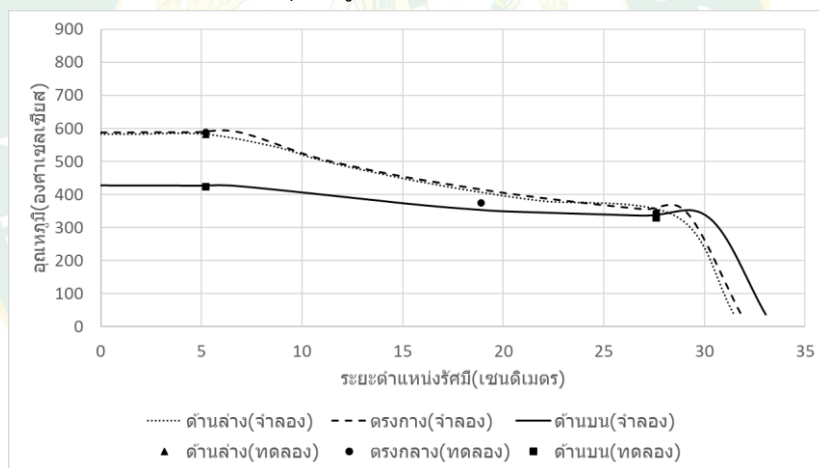


4.1.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสภาพทางคอมพิวเตอร์ของการกระจาย
อุณหภูมิตะในเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร

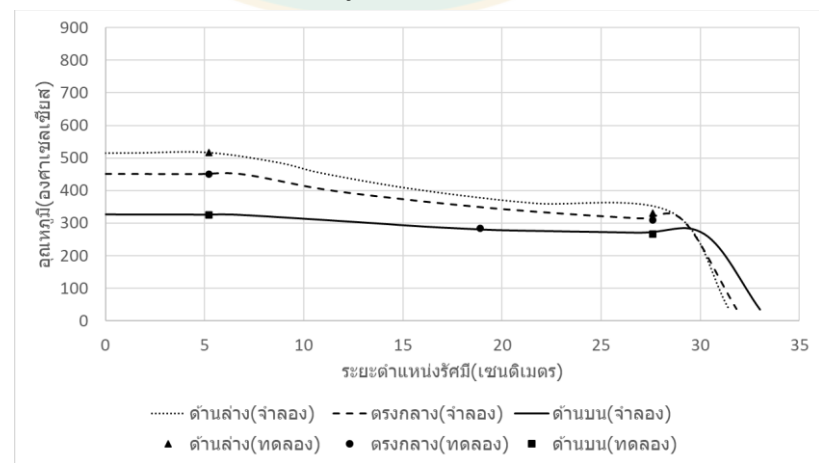
4.1.6.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของซังข้าวโพด



ภาพที่ 104 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด



ภาพที่ 105 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด



ภาพที่ 106 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตะในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของซังข้าวโพด

ตารางที่ 38 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นขังข้าวโพดที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

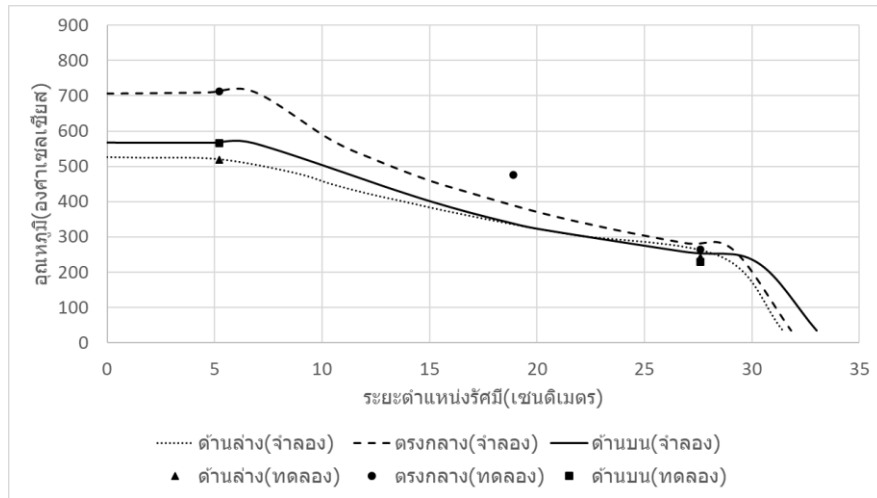
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
5.2	522.0	582.9	517.0	525.3	582.6	516.0	0.6	0.0	0.2
27.6	140.5	332.5	331.1	151.9	339.8	335.4	8.1	2.2	1.3
ตรงกลาง									
5.2	582.0	588.7	450.0	581.6	588.4	450.1	0.1	0.1	0.0
18.9	487.2	375.3	283.6	288.1	415.7	349.3	40.9	10.8	23.1
27.6	126.9	345.8	308.6	145.3	352.7	312.5	14.5	2.0	1.2
ด้านล่าง									
5.2	492.9	424.2	325.1	525.3	426.1	326.6	0.2	0.4	0.4
27.6	352.4	329.0	267.1	356.9	334.2	270.4	1.3	1.6	1.2
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	386.3±185.8								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	425.5±114.2								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	354.6±92.8								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	9.4±14.9								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	2.4±3.8								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	3.9±8.5								

การกระจายอุณหภูมิในช่วงเวลาที่ 1 ชั่วโมง มีการกระจายที่สูงมากเนื่องจากแกนกลางมีขนาดใหญ่ทำให้สามารถดูดอากาศจากด้านล่างไปแทนที่อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ดีอุณหภูมิจึงสูงขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและการคายแก๊สของขังข้าวโพดเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง อุณหภูมิก็ได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงนี้อยู่ที่ 425.5±114.2 ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเกิดกระบวนการไพโรไลซิสได้ทั้งเตาเผา และเมื่อเวลาเผาไหม้ครบ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิเริ่มมีการลดลงจากด้านบนลงสู่ด้านล่างแต่อุณหภูมิก็กังสูงอยู่ดี เนื่องจากแก๊สที่คายออกมาจากขังข้าวโพดยังไม่หมด

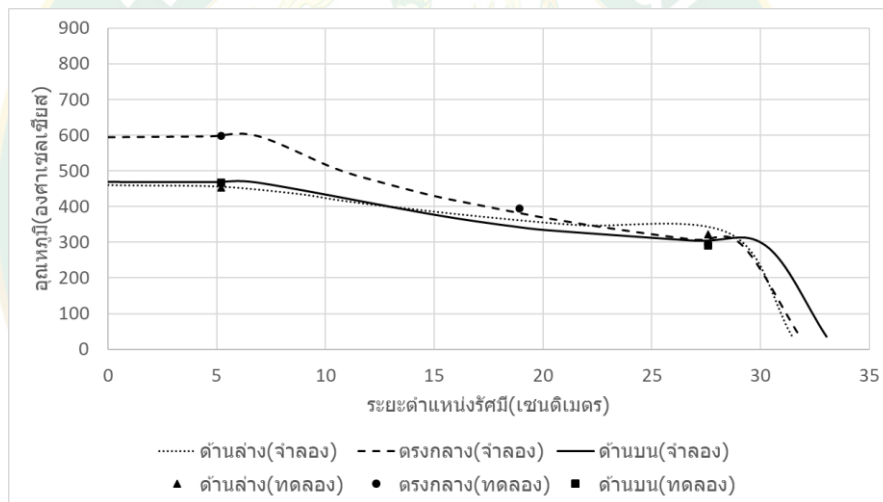
เมื่อนำชีวมวลออกจากเตาเผาถ่านชีวภาพที่ได้จะเกือบจะเป็นทั้งเตาเผาถ่านส่วนที่อยู่ด้านล่างและ
ขอบด้านล่างของเตาเผา โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 386.3 ± 185.8
 386.3 ± 185.8 และ 354.6 ± 92.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ
 9.4 ± 14.9 2.4 ± 3.8 และ 2.4 ± 3.8 % ตามลำดับ



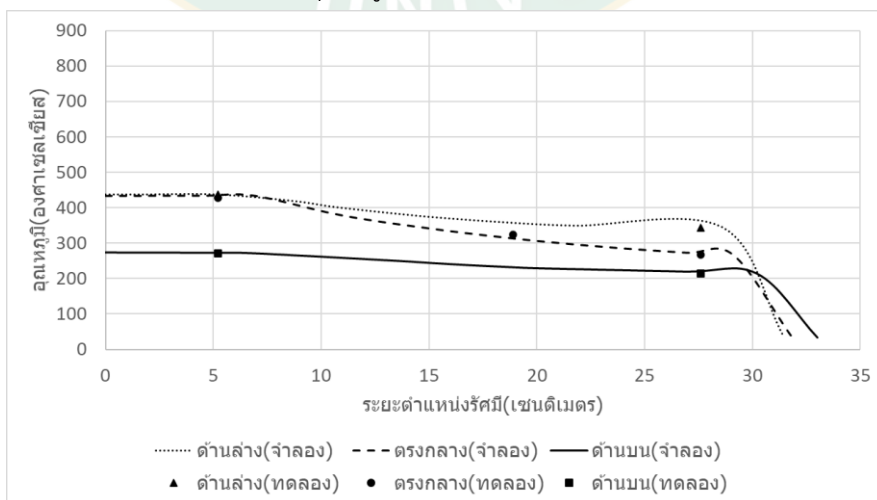
4.1.6.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของแกลบ



ภาพที่ 107 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของแกลบ



ภาพที่ 108 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของแกลบ



ภาพที่ 109 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของแกลบ

ตารางที่ 39 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นเกลบที่วัดได้จากการทดลอง และจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

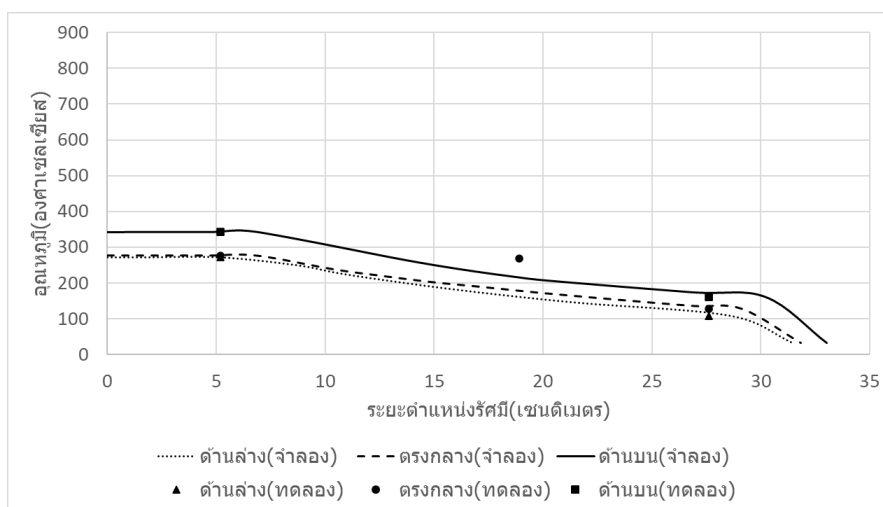
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
5.2	519.0	454.2	436.9	520.7	455.7	436.7	0.3	0.3	0.0
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
เวลา (ชั่วโมง)	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
27.6	243.1	323.1	344.3	252.4	326.8	345.0	3.8	1.1	0.2
ตรงกลาง									
5.2	711.7	598.7	427.3	710.6	597.8	434.0	0.2	0.1	1.6
18.9	475.1	394.3	324.6	390.9	383.0	313.6	17.7	2.9	3.4
27.6	265.1	294.9	266.3	277.4	303.8	270.8	4.6	3.0	1.7
ด้านล่าง									
5.2	565.8	466.3	270.7	567.2	467.6	272.6	0.2	0.3	0.7
27.6	229.4	290.9	214.3	251.7	301.2	218.7	9.7	3.6	2.0
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	429.9±187.2								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	403.2±112.3								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	326.3±83.6								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	5.2±6.5								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	1.6±1.5								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	1.4±1.2								

อุณหภูมิแกนกลางในช่วง 1 ชั่วโมงแรกสูงมากเป็นผลมาจากเกลบมีการคายแก๊สออกมาเป็นจำนวนมากและอุณหภูมิได้กระจายไปเกือบทั่วทั้งเตาเผาแล้วนั้นจึงทำให้เกลบเกิดกระบวนการไฟ

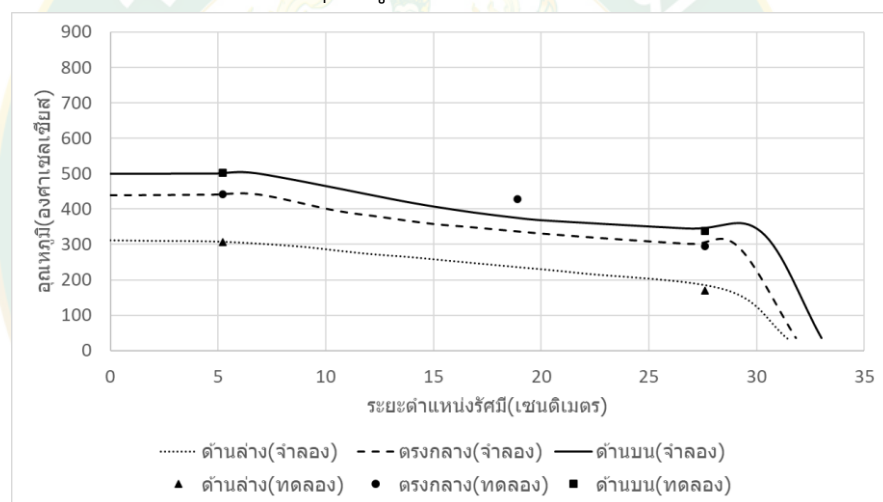
โรไลซิสและคายแก๊สออกมาจำนวนมากทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงถึง 429.9 ± 187.2 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปครบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิที่กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาก็เริ่มลดลงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 403.2 ± 112.3 องศาเซลเซียส แต่กลับก็ยิ่งคายแก๊สออกมาอย่างต่อเนื่อง และช่วงเวลาที่ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิก็ได้ลดลงอย่างมากด้านบนของเตาเผาอุณหภูมิลดลงเหลือเพียง $270.7-214.3$ องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 429.9 ± 187.2 403.2 ± 112.3 และ 326.3 ± 83.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 5.2 ± 6.5 1.6 ± 1.5 และ 1.4 ± 1.2 % ตามลำดับ



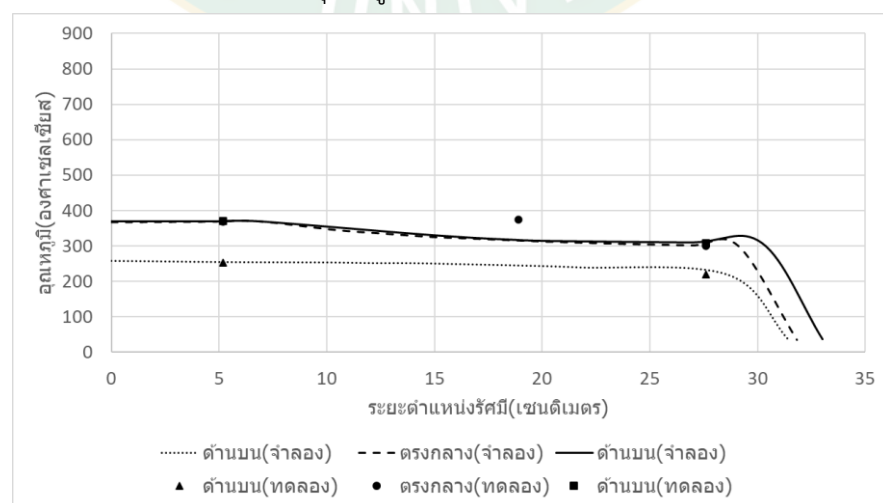
4.1.6.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 110 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 111 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย



ภาพที่ 112 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกิ่งไม้ลำไย

ตารางที่ 40 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกึ่งไม้ลำไยที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

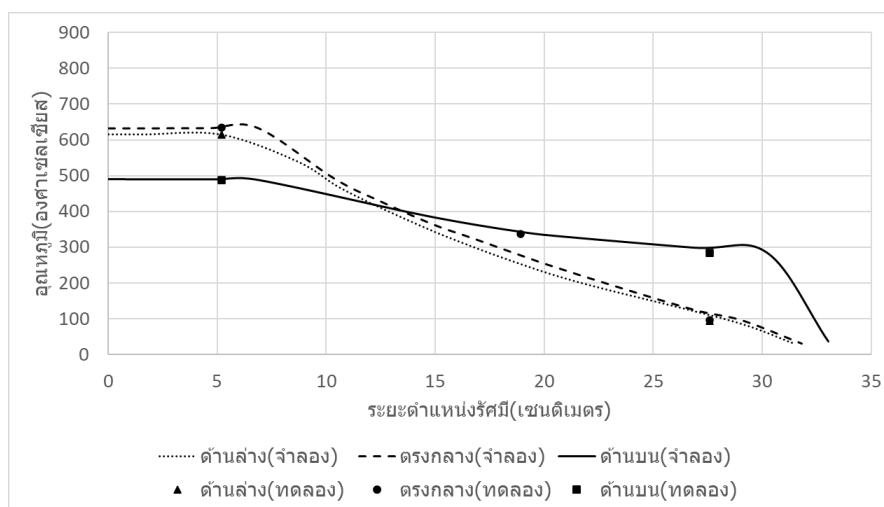
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
5.2	271.3	306.1	253.9	271.2	307.4	255.0	0.1	0.4	0.5
27.6	107.4	170.5	219.3	112.7	177.7	222.4	5.0	4.2	1.4
ตรงกลาง									
5.2	276.7	441.9	368.8	276.8	441.4	268.3	0.0	0.1	27.3
18.9	269.1	428.7	375.3	178.4	337.5	315.2	33.7	21.3	16.0
27.6	127.6	295.8	299.3	133.1	300.0	300.7	4.3	1.4	0.5
ด้านล่าง									
5.2	343.1	502.3	370.6	342.1	501.2	370.5	0.3	0.2	0.0
27.6	160.8	337.1	308.8	171.0	343.8	310.0	6.3	2.0	0.4
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	222.2±89.5								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	354.6±111.7								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	313.7±61.6								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	7.1±12.0								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	4.2±7.6								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	6.6±10.8								

ในช่วง 1 ชั่วโมงแรกกึ่งไม้ลำไยแทบไม่มีการคายแก๊สออกมาเลยทำให้อุณหภูมิของแกนกลางต่ำไปด้วย โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพียง 222.2±89.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากกึ่งไม้ลำไยต้องใช้เวลาในการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องแกนกลางที่มีการกระจายของอุณหภูมิต่ำจึงเกิดกระบวนการไพโรไลซิสช้า และในช่วงเวลาที่ 2 ชั่วโมงกึ่งไม้ลำไยที่รับความร้อนอย่างต่อเนื่องก็ได้เกิดการคายแก๊สออกมาทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น กึ่งไม้ลำไยก็เกิดการหดตัวลงและอัดแน่นกันอยู่ด้านล่างทำให้ด้านล่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอื่นโดยมีอุณหภูมิ 271.3-107.4 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป

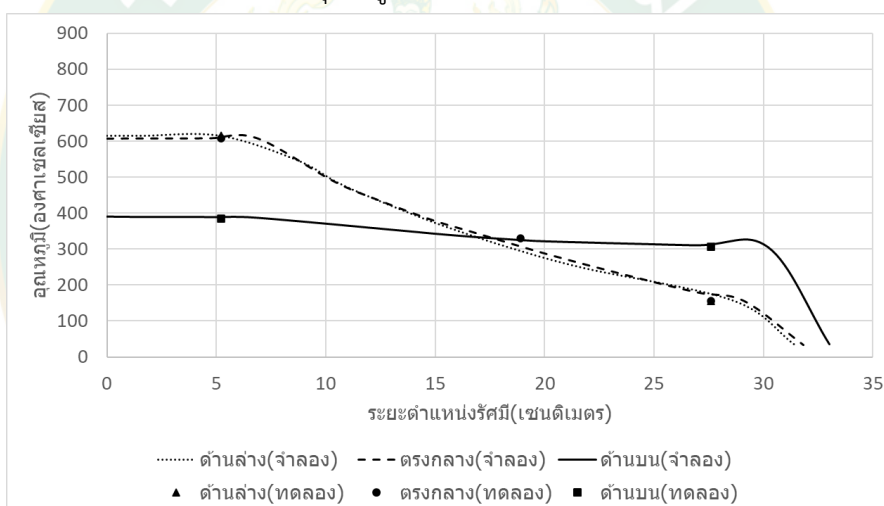
ครบ 3 ชั่วโมง จะเห็นว่าจุดที่เกิดกระบวนการไฟโรไลซิสนั้นมีเพียงแค่ตรงกลางเตาเผาขึ้นไปเท่านั้น เมื่อนำชีวมวลออกมาจะพบว่า มีเพียงส่วนที่อยู่ตรงกลางและด้านบนของเตาเผาที่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพเพียงเท่านั้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 222.2 ± 89.5 354.6 ± 111.7 และ 313.7 ± 61.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 7.1 ± 12.0 4.2 ± 7.6 และ 6.6 ± 10.8 %ตามลำดับ



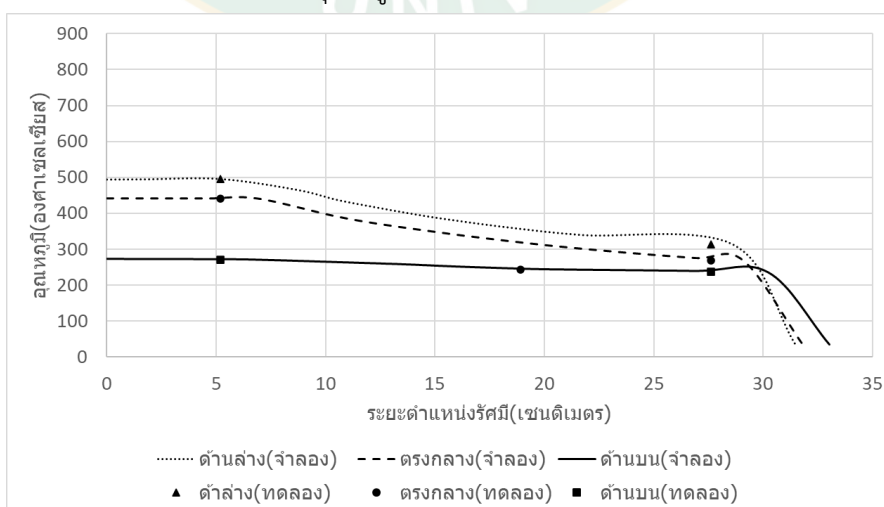
4.1.6.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของเปลือกกล้วย



ภาพที่ 113 เปรียบเทียบการกระจายออกซิเจนในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของเปลือกกล้วย



ภาพที่ 114 เปรียบเทียบการกระจายออกซิเจนในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของเปลือกกล้วย



ภาพที่ 115 เปรียบเทียบการกระจายออกซิเจนในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของเปลือกกล้วย

ตารางที่ 41 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นเปลือกกล้วยที่วัดได้จากการ ทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

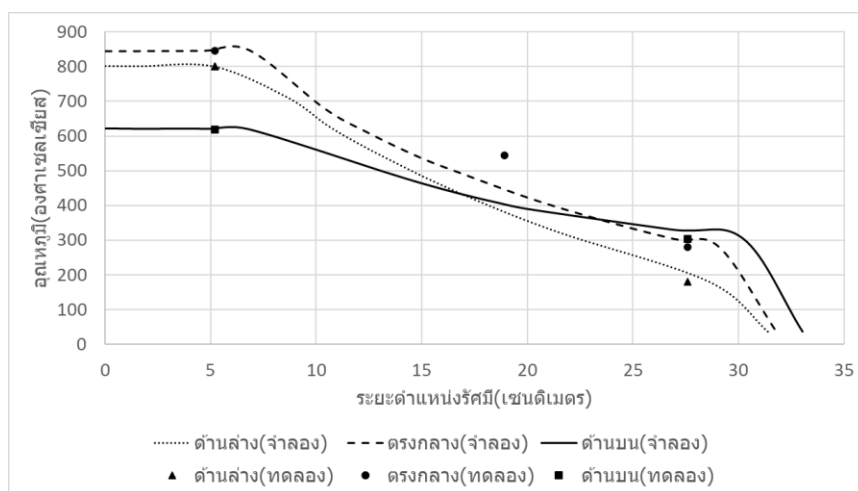
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
5.2	614.1	615.9	496.0	613.4	615.0	495.1	0.1	0.1	0.2
27.6	93.8	156.5	312.7	109.5	170.1	316.6	16.7	8.6	1.3
ตรงกลาง									
5.2	633.4	608.3	441.0	633.1	608.0	440.9	0.1	0.1	0.0
18.9	336.9	330.0	243.1	278.5	307.3	319.2	17.3	6.9	31.3
27.6	95.6	155.1	268.1	115.9	171.2	273.2	21.3	10.3	1.9
ด้านล่าง									
5.2	487.3	385.6	270.9	488.8	388.2	272.9	0.3	0.7	0.8
27.6	283.8	305.5	236.7	297.4	309.2	239.4	4.8	1.2	1.1
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	363.5±224.5								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	365.3±189.2								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	324.1±102.8								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	8.7±9.4								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	4.0±4.5								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	5.2±11.5								

ในช่วงเวลาที่ 1 ชั่วโมงนั้นการแผ่ความร้อนจากแกนกลางทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเพิ่มสูงขึ้นเปลือกกล้วยรอบๆแกนกลางเริ่มมีการคายแก๊สและด้านบนของเตาเผาการกระจายอุณหภูมิได้ไปถึงขอบของเตาเผาแล้ว และเมื่อครบ 2 ชั่วโมงเปลือกกล้วยมีการหดตัวลงทำให้เปลือกกล้วยที่อยู่ด้านล่างอัดแน่นกันการกระจายอุณหภูมิจึงเป็นไปได้ไม่ดันทันแต่อุณหภูมิก็ยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลาที่ 3 ชั่วโมงเปลือกกล้วยทั่วทั้งเตาเผาเกิดกระบวนการไพโรไลซิสแล้วแต่ก็มีบางส่วนที่เกิดกระบวนการเข้าไป เช่นขอบของเตาเผาตรงกลางลงไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านบน

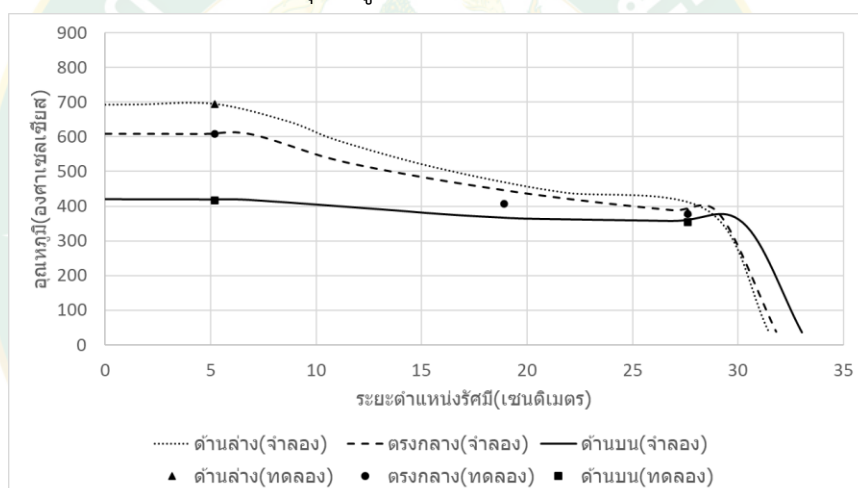
ของเตาเผา และส่วนที่ใกล้กับแกนกลางที่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพเรียบร้อยแล้ว โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่ เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 363.5 ± 224.5 365.3 ± 189.2 และ 324.1 ± 102.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 8.7 ± 9.4 4.0 ± 4.5 และ 5.2 ± 11.5 ตามลำดับ



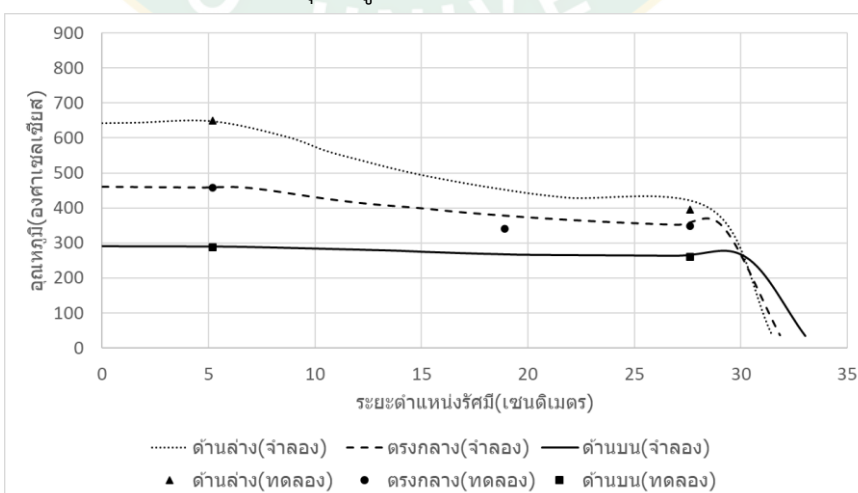
4.1.6.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองของกะลาปากแพ



ภาพที่ 116 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 1 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ



ภาพที่ 117 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 2 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ



ภาพที่ 118 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่ 3 ชั่วโมง ของกะลาปากแพ

ตารางที่ 42 อุณหภูมิเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผา ถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลเป็นกะลาปากแพที่วัดได้จาก การทดลองและจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

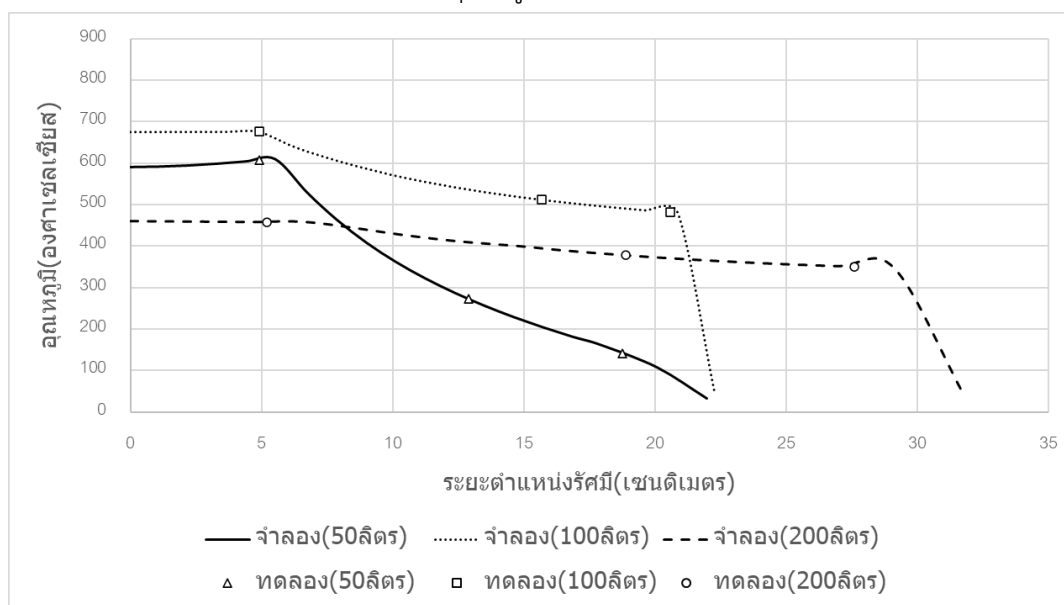
ระยะ (เซนติเมตร)	อุณหภูมิจากการทดสอบ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)			ความคลาดเคลื่อน (%)		
	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr	1 hr	2 hr	3 hr
ด้านบน									
5.2	799.5	695.4	650.0	799.2	694.0	647.6	0.0	0.2	0.4
27.6	180.0	384.2	396.0	200.4	392.3	401.1	11.3	2.1	1.3
ตรงกลาง									
5.2	846.3	607.6	457.0	845.6	607.7	457.6	0.1	0.0	0.1
18.9	544.2	407.0	340.1	447.9	446.1	378.0	17.7	9.6	11.2
27.6	279.6	378.0	347.9	296.7	384.8	350.4	6.1	1.8	0.7
ด้านล่าง									
5.2	618.0	417.5	288.1	620.3	419.6	290.1	0.4	0.5	0.7
27.6	303.8	353.5	260.7	324.2	356.8	263.1	6.7	0.9	0.9
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	510.2±262.8								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	463.3±132.6								
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)									
ที่เวลา 1 ชั่วโมง	6.0±6.7								
ที่เวลา 2 ชั่วโมง	2.2±3.4								
ที่เวลา 3 ชั่วโมง	2.2±4.0								

ช่วงเวลาที่ 1 ชั่วโมง กะลาปากแพมีการคายแก๊สออกมาจำนวนมากทำให้อุณหภูมิแกนกลางสูงขึ้น และแกนกลางขนาดใหญ่ทำให้สามารถดูดอากาศจากด้านล่างได้ดีความร้อนจึงส่งผ่านไปยังกะลาปากแพอย่างสม่ำเสมอ โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงถึง 510.2±262.8 องศาเซลเซียส เมื่อถึงเวลาที่

2 ชั่วโมงอุณหภูมิได้กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาแล้วกะลาภาแพไฟได้หดตัวลงทำให้อุณหภูมิด้านล่างสูงอย่างมากเนื่องจากการคายแก๊สออกมาจากระบบการไพโรไลซิสผนวกกับปริมาณที่มากขึ้นตามขนาดของเตาเผาทำให้กะลาภาแพไฟต้องใช้เวลาในการคายแก๊สที่เพิ่มขึ้นอุณหภูมิจึงสูงอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าจะครบเวลา 3 ชั่วโมงแล้วแต่กะลาภาแพไฟก็ยังคายแก๊สไม่หมดนั้นจึงทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้จากกะลาภาแพอยู่ด้านบนของเตาเผา และส่วนที่ใกล้กับแกนกลางแต่ในส่วนของขอบเตาเผาและด้านล่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงคือ 510.2 ± 262.8 463.3 ± 132.6 และ 391.4 ± 131.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 6.0 ± 6.7 2.2 ± 3.4 และ 2.2 ± 4.0 % ตามลำดับ



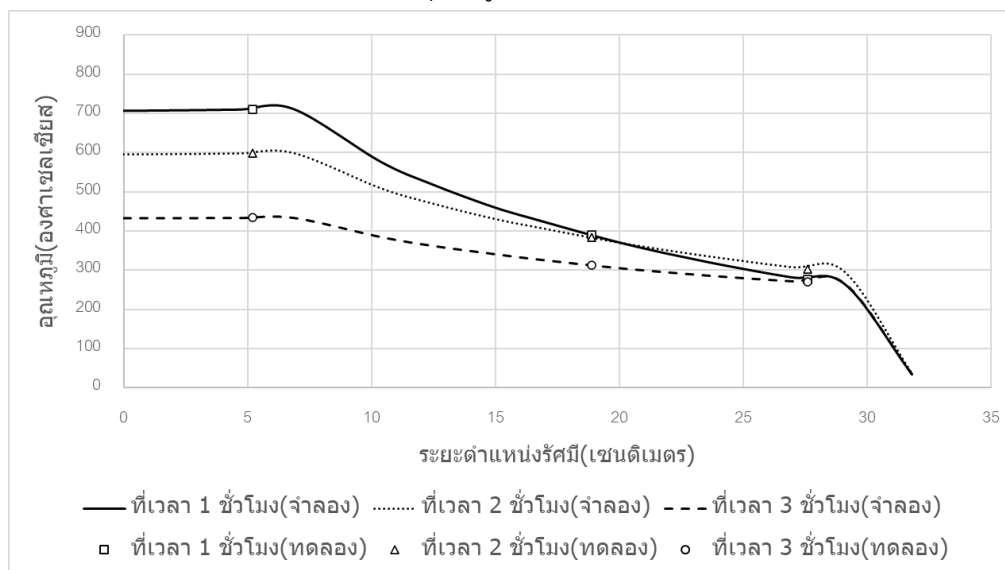
4.1.5 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร



ภาพที่ 119 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิที่ใช้ข้อมูลจากเทอร์โมคัปเปิลที่ ตำแหน่งกลางเตาหมายเลข 6 4 และ 2 ของเตาเผาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ชีวมวลเป็นกะลาเผา

เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาก่อนชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร พบว่าชีวมวลที่ใช้เป็นแกลบ กิ่งไม้ลำไย และกะลาเผา มีการกระจายอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกันดังภาพที่ 119 โดยที่อุณหภูมิสูงสุดคือเตาเผาขนาด 100 50 และ 200 ลิตร ตามลำดับ เตาเผาขนาด 50 และ 100 ลิตรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันทำให้การกระจายอุณหภูมิล้าๆกัน คือ ในช่วงแรกของการทดสอบ อุณหภูมิจะสูงที่แหล่งกำเนิดความร้อนและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ เตาเผาขนาด 50 ลิตร มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 340.2 ± 240.7 องศาเซลเซียส เตาเผาขนาด 100 ลิตร มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 556.4 ± 104.3 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่เมื่อเริ่มการทดสอบต้องใส่เชื้อเพลิงสูงเนื่องจากมีแกนกลางที่ใหญ่ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นสูงมากมีการกระจายอุณหภูมิที่ดีและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 395.3 ± 55.6 องศาเซลเซียส เตาเผาขนาด 200 ลิตร ให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตามแนวรัศมีและให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับเตาเผาขนาด 50 และ 100 ลิตร จึงสรุปได้ว่า เตาเผาขนาด 200 ลิตรเป็นเตาเผาที่ดีที่สุด และให้ผลผลิตของชีวมวลมากที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากบทความงานวิจัยอื่นๆ (Mengesha and Ramayya 2015, กัญยาพร ไชยวงศ์ และคณะ 2016) พบว่า การเพิ่มฉนวนกันความร้อนช่วยให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาก่อนชีวภาพกระจายตัวดีกว่าและสม่ำเสมอกว่าการที่ไม่ใส่ฉนวน และทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามขนาดเตาเผาที่เพิ่มขึ้น ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้เพิ่มขึ้นตามขนาดของเตาเผาอีกด้วย

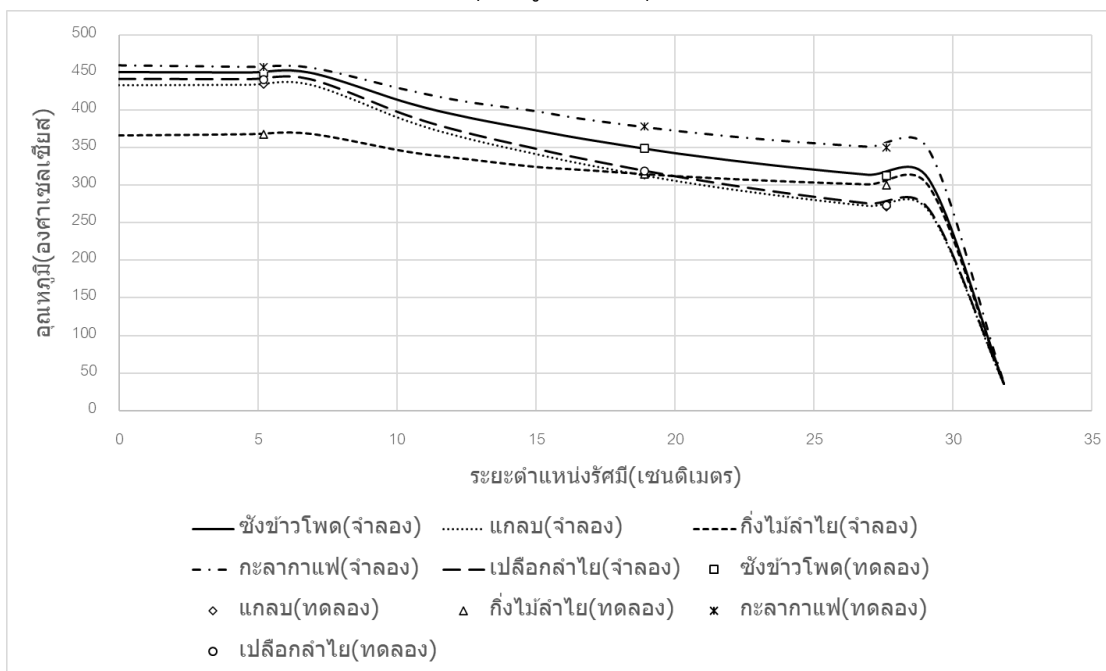
4.1.6 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 120 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิจะใช้ข้อมูลจากเทอร์โมคัปเปิลที่ ตำแหน่งกลางเตาหมายเลข 6 4 และ 2 ของเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ชีวมวลเป็นแกลบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า ชีวมวลที่ใช้เป็น ชังข้าวโพด แกลบ กะลากาแฟ และ เปลือกกล้วย จากที่กล่าวมาแล้วว่าเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีการให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงอุณหภูมิแกนกลางในช่วง 1 ชั่วโมงแรกสูงมากเป็นผลมาจากชีวมวลมีการคายแก๊สออกมาเป็นจำนวนมากและอุณหภูมิได้กระจายไปเกือบทั่วทั้งเตาเผาแล้วกระบวนการไพโรไลซิสและการคายแก๊สทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงถึง 459.6 ± 224.6 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปครบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิที่กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาาก็เริ่มลดลงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 428.2 ± 152.1 องศาเซลเซียส ชีวมวลก็ยังคายแก๊สออกมาอย่างต่อเนื่องและช่วงเวลาที่ 3 ชั่วโมง อุณหภูมิก็ได้ลดลงอย่างมากอุณหภูมิเฉลี่ยเหลือเพียง 339.5 ± 84.6 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อสรุปจากบทความงานวิจัยอื่นๆ (Petchaihan et al. 2020, Srisophon et al. 2020) พบว่า เวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผา และเมื่อเตาเผาที่มีขนาดเพิ่มขึ้นการกระจายอุณหภูมียิ่งดีขึ้นถึงแม้ว่าจะใช้วัสดุชนิดเดียวกันก็ตาม และที่เตาเผาขนาด 200 ลิตร ก็มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตามระยะเวลาการทดสอบดังภาพที่ 120

4.1.7 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด



ภาพที่ 121 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิใช้ข้อมูลจากเทอร์โมคัปเปิลที่ ตำแหน่งกลางเตาหมายเลข 6 4 และ 2 ของวัสดุชีวมวล 5 ชนิด ที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด พบว่า ซังข้าวโพด แกลบ กะลากาแพ และ เปลือกลำไย มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมือนกันคืออุณหภูมิจะสูงเมื่อเริ่มการทดสอบ และจะค่อยๆลดลงตามระยะเวลาการทดสอบแต่จะแปรผกผันกับการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาที่จะค่อยๆสม่ำเสมอขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการทดสอบ ซึ่งต่างจากกิ้งไม้ลำไยที่อุณหภูมิเฉลี่ยเมื่อเริ่มการทดสอบจะต่ำและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบและแปรผันตรงกับการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาที่จะค่อยๆสม่ำเสมอขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการทดสอบ ชีวมวลที่ได้จากการทดสอบจะมากที่สุดเมื่อใช้เตาเผาขนาด 200 ลิตร เวลาในการเผาไหม้ 3 ชั่วโมง โดยแกลบจะให้ผลผลิตสูงที่สุดคือ 51.1% ตามด้วยเปลือกลำไย 46.2% กิ้งไม้ลำไย 45.3% ซังข้าวโพด 44.4% และ กะลากาแพ 34.9% เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อสรุปจากบทความงานวิจัยอื่นๆ (Cho et al. 2017, Mengesha and Ramayya 2017, Mosisa et al. 2019, Petchaihan et al. 2020, Srisophon et al. 2020) พบว่า กะลากาแพ มีลักษณะทางกายภาพที่มีลักษณะคล้ายฉนวนความร้อน ซึ่งหากบรรจุลงในเตาเผาถ่านชีวภาพส่วนที่อยู่รอบๆขอบของเตาเผาสามารถ ลดการสูญเสียความร้อนรอบเตา อุณหภูมิในเตาเผาจึงเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังภาพที่ 121 ทำให้มีถ่านชีวภาพต่ำ ซึ่งต่างจาก ซังข้าวโพด แกลบ และเปลือกลำไย ที่ไม่มีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายฉนวนทำให้มีการกระจายอุณหภูมิที่ดี ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้จึงสูงตามขนาดของเตาเผา

4.2 สมการสหสัมพันธ์

สมการสหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหรือตัวแปร ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับใด และมีความสัมพันธ์ในทิศทางใด เช่นเวลาในการเผาไหม้กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ มีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยและมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม

วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ จากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือซังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลากาแฟ โดยการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต พื้นที่ผิว แลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/A_p), ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D), เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ 1 2 และ 3 ชั่วโมง (Time), ค่าความร้อนของชีวมวล (HHV), การนำความร้อน (k), ความร้อนจำเพาะ (C_p) และ ความหนาแน่น (d) วางแผนการทดลองแบบสมการเชิงเส้น โดยศึกษาปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 43 และวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูล เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการผลิตถ่านชีวภาพ จากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

4.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและความเป็นกรด-ด่าง

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ จากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด มีปัจจัยสำหรับการศึกษาประกอบด้วย Temp (X_1), A/A_p (X_2), L/D (X_3), Time (X_4), HHV (X_5), k (X_6), C_p (X_7) และ d (X_8) ตามลำดับ ตารางที่ 43 ปัจจัยและระดับที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ

Factors	Levels	
	Low	High
Temp (C), X_1	126.85	690.94
A/A_p , X_2	274.53	296.00
L/D , X_3	1.302	1.86
Time (hr), X_4	1	3
Biomass (HHV) (MJ/kg), X_5	8.37	28.95
Conductivity (k) (W/m-k), X_6	0.0460	0.2992
Specific Heat (C_p) (J/kg-K), X_7	1087.31	2800.00
Density(d) (kg/m ³), X_8	63.80	300.00

ผลจากการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการเชิงเส้น เพื่อใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 8 และการตอบสนอง (Y) สามารถคำนวณปริมาณถ่านชีวภาพ (Y_1) และ pH (Y_2) ตามสมการที่ 1 คือ $Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_4X_4 + \beta_5X_5 + \beta_6X_6 + \beta_7X_7 + \beta_8X_8$ (1) โดยที่ Y คือ ค่าทำนายการตอบสนอง; β_0 เป็นค่าคงที่; $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ เป็นตัวแปรอิสระ; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ เป็น ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น ซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลผลิตสูงสุดโดย สมการแบบเชิงเส้น จะพิจารณาจากค่า R^2

ตารางที่ 44 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้น ของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ

Factors	P-value
Intercept	<0.0001
Temp (C), X_1	0.3227
A/Ap, X_2	<0.0001
L/D, X_3	0.0004
Time (hr), X_4	<0.0001
HHV (MJ/kg), X_5	<0.0001
k (W/m-k), X_6	<0.0001
Cp (J/kg-K), X_7	<0.0001
d (kg/m ³), X_8	<0.0001

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายปริมาณถ่านชีวภาพได้ดังสมการที่ 2

$$\text{ปริมาณถ่านชีวภาพ } (Y_1) = - 50.549 - 0.006X_1 + 0.706X_2 - 12.435X_3 + 13.725X_4 - 7.887X_5 + 783.893X_6 - 0.124X_7 + 0.565X_8 \quad (2)$$

โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ $R^2 = 0.9442$ และจากผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ (ตารางที่ 44) พบว่า พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap) (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D) (X_3) เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ 1 2 และ 3 ชั่วโมง (X_4) ค่าความร้อนของชีว

มวล (HHV) (X_5) การนำความร้อน (k) (X_6) ความร้อนจำเพาะ (C_p) (X_7) และ ความหนาแน่น (d) (X_8) ให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ (Y_1) ที่ได้จากการผลิต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Wallace 2019)พบว่าปริมาณถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยที่อุณหภูมิแปรผกผันกับปริมาณถ่านชีวภาพ เป็นการทดสอบในเตาเผาไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ แต่อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าเฉลี่ยภายในเตาเผาแบบอนินลาซึ่งแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน การจะควบคุมอุณหภูมิให้แม่นยำเหมือนเตาไฟฟ้าไม่สามารถทำได้ ในส่วนนี้คือข้อจำกัดของงานวิจัย แต่อย่างไรก็ตามเตาที่ทดสอบสามารถผลิตถ่านชีวภาพได้อยู่ในช่วง 27.6 ถึง 51.1 เปอร์เซ็นต์ ตามขนาดของเตาเผาและชนิดวัสดุชีวมวล ซึ่งสามารถผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงดินได้ (Panyoyai et al. 2019)

ตารางที่ 45 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้น ของปัจจัยที่มีผลต่อ ค่า pH

Factors	P-value
Intercept	<0.0001
Temp (C), X_1	0.5768
A/Ap, X_2	<0.0001
L/D, X_3	<0.0001
Time (hr), X_4	0.0024
HHV (MJ/kg), X_5	<0.0001
k (W/m-k), X_6	<0.0001
C_p (J/kg-K), X_7	<0.0001
d (kg/m ³), X_8	<0.0001

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพได้ดังสมการที่ 3

$$\text{ความเป็นกรด-ด่าง (pH) (Y}_2\text{)} = -15.049 - 0.0002X_1 + 0.064X_2 - 1.589X_3 + 0.132X_4 + 0.334X_5 - 33.049X_6 + 0.005X_7 - 0.023X_8 \quad (3)$$

โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ $R^2 = 0.8776$ จากตารางที่ 45 แสดงผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่า พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รู้เจาะของแกนกลาง (A/Ap) (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D) (X_3) เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ 1 2 และ 3 ชั่วโมง (X_4) ค่าความร้อนของชีวมวล (HHV) (X_5) การนำความร้อน (k) (X_6) ความร้อนจำเพาะ (C_p) (X_7) และ ความหนาแน่น (d) (X_8) ให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่า pH ของถ่านชีวภาพ (Y_2) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากงานวิจัยก่อนหน้านี (Budai al. 2014) พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่า pH โดยอุณหภูมิแปรผันตรงกับค่า pH คือ pH เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสสาเหตุหลักมาจากการแยกเกลืออัลคาไลน์ออกจากสารอินทรีย์ (Petchaihan et al. 2020) ส่วนค่าความร้อนของชีวมวลหรือ HHV แปรผกผันกับอัตราส่วนของธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และแปรผันตรงกับค่า pH ซึ่งค่า pH ที่ได้เป็นผลจากหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ซึ่งจากข้อจำกัดของเตาแอนิลาตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ผลของอุณหภูมิและค่าความร้อนของชีวมวลไม่ส่งผลต่อค่า pH

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลวิจัย

จากการทดสอบผลิตถ่านชีวภาพจากเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนแบบอนิลา ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่มีขนาดของเตาเผาแตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 50 100 และ 200 ลิตร เวลาการทดสอบ 1 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ชีวมวลที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ชังข้าวโพด แกลบ กิ่งไม้ลำไย เปลือกลำไย และกะลากาแฟ สามารถสรุปได้ว่า

แกลบเป็นวัสดุที่ให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากที่สุด ตามด้วย เปลือกลำไย กิ่งไม้ลำไย ชังข้าวโพด และ กะลากาแฟ ตามลำดับ โดยแกลบให้ผลผลิตถึง 51.1% และใช้เตาเผาขนาด 200 ลิตร เวลาในการเผาไหม้ 3 ชั่วโมง โดยเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนของการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ $1.4 \pm 1.2\%$

การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร พบว่าชีวมวลที่ใช้เป็นแกลบ กิ่งไม้ลำไย และกะลากาแฟ มีการกระจายอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิสูงสุดคือเตาเผาขนาด 100 50 และ 200 ลิตร ตามลำดับ เตาเผาขนาด 50 และ 100 ลิตรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันทำให้การกระจายอุณหภูมิลำๆกัน คือ ในช่วงแรกของการทดสอบ อุณหภูมิจะสูงที่แหล่งกำเนิดความร้อนและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบเตาเผาขนาด 50 ลิตร มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 340.2 ± 240.7 องศาเซลเซียส เตาเผาขนาด 100 ลิตร มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 556.4 ± 104.3 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่เมื่อเริ่มการทดสอบต้องใส่เชื้อเพลิงสูงเนื่องจากมีแกนกลางที่ใหญ่ทำให้ อุณหภูมิเริ่มต้นสูงมากมีการกระจายอุณหภูมิที่ดีและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ย 395.3 ± 55.6 องศาเซลเซียส เตาเผาขนาด 200 ลิตร ให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตามแนวรัศมีและให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับเตาเผาขนาด 50 และ 100 ลิตร จึงสรุปได้ว่า เตาเผาขนาด 200 ลิตรเป็นเตาเผาที่ดีที่สุด และให้ผลผลิตของชีวมวลมากที่สุด

การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า ชีวมวลที่ใช้เป็น ชังข้าวโพด แกลบ กะลากาแฟ และ เปลือกลำไย จากที่กล่าวมาแล้วว่าเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีการให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงอุณหภูมิแกนกลางในช่วง 1 ชั่วโมงแรกสูงมากเป็นผลมาจากชีวมวลมีการคายแก๊สออกมาเป็นจำนวนมากและอุณหภูมิได้กระจายไปเกือบทั่วทั้งเตาเผาแล้วกระบวนการไพโรไลซิสและการคายแก๊สทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงถึง 459.6 ± 224.6 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปครบ 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิที่กระจายไปทั่วทั้งเตาเผาที่เริ่มลดลงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 428.2 ± 152.1 องศาเซลเซียส ซึ่งมวลก็ยังคงคายแก๊สออกมาอย่างต่อเนื่องและช่วงเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิก็ได้ลดลงอย่างมากอุณหภูมิเฉลี่ยเหลือเพียง 339.5 ± 84.6 องศาเซลเซียส

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้นสามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายปริมาณถ่านชีวภาพ โดยมีค่า $R^2 = 0.9442$ และความเป็นกรด-ด่าง โดยมีค่า $R^2 = 0.8776$ ได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณถ่านชีวภาพ (Y}_1\text{)} = -50.549 - 0.006X_1 + 0.706X_2 - 12.435X_3 + 13.725X_4 - 7.887X_5 + 783.893X_6 - 0.124X_7 + 0.565X_8$$

$$\text{ความเป็นกรด-ด่าง (pH) (Y}_2\text{)} = -15.049 - 0.0002X_1 + 0.064X_2 - 1.589X_3 + 0.132X_4 + 0.334X_5 - 33.049X_6 + 0.005X_7 - 0.023X_8$$

โดยที่ X_1 คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap)

X_2 คือ ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D)

X_3 คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ 1 2 และ 3 ชั่วโมง (Time)

X_4 คือ ค่าความร้อนของชีวมวล (HHV)

X_5 คือ การนำความร้อน (k)

X_6 คือ ความร้อนจำเพาะ (Cp)

X_7 คือ ความหนาแน่น (d)

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำการวิจัย

5.2.1 สภาพอากาศ ถ้าหากเกิดฝนตก มักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับชีวมวลที่รับความชื้นจากละอองฝนหรือชีวมวลที่กำลังตากแดดอยู่ เกิดการเปียกทำให้ต้องทำการลดความชื้นใหม่หรืออาจจะใช้ชีวมวลนั้นไม่ได้ก็เป็นผลให้การทดลองล่าช้าผนวกกับปัญหาไฟฟ้าดับ ทำให้ไม่สามารถดำเนินงานทดลองได้ ซึ่งในบางครั้งเกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ส่งผลให้การดำเนินงานในครั้งนั้นต้องทำการทดสอบใหม่ จึงอยากให้มีไฟฟ้าสำรอง

5.2.2 เครื่องมือที่มีน้อยจนเกินไป เมื่อถึงเวลาทดสอบจริงคนใช้งานเครื่องมือมีจำนวนมากกว่าเครื่องมือที่ต้องการใช้งาน ทำให้บางการทดลองต้องขยายเวลาทำการทดสอบออกไปเพื่อให้เครื่องมือว่างจึงจะทำการทดสอบต่อได้ จึงอยากให้มีการจัดการสำรองเครื่องมือในการทดสอบด้วยหรือเพิ่มจำนวนเครื่องมือให้มากขึ้นให้พอกับจำนวนของผู้ใช้งาน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การผลิตถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนเหมาะสมกับเตาเผาขนาด 200 ลิตร โดยอาจจะศึกษาเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มเป็น 4 5 และ 6 ชั่วโมง เพื่อดูปริมาณของถ่านชีวภาพ ซึ่งอาจจะมีปริมาณของถ่านชีวภาพและคุณสมบัติที่เพิ่มขึ้น ดีกว่าที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

5.3.2 การควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาโดยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีการควบคุมให้แม่นยำที่ยาก ควรจะเปลี่ยนเป็น การใช้ไฟฟ้า หรือเครื่องมือ ที่มีความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิที่สูง เพื่อให้เกิดผลของการทดลองที่เพิ่มมากขึ้น



บรรณานุกรม

- Bellow, S., et al. (2016). "Physical properties of coconut shell nanoparticles." Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology 12(1): 63-79.
- Budai, A., et al. (2016). "Biochar persistence, priming and microbial responses to pyrolysis temperature series." Biology and Fertility of Soils 52(6): 749-761.
- Budai, A., et al. (2014). "Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars: effects of production temperature and method." Journal of agricultural and food chemistry 62(17): 3791-3799.
- Cho, D.-W., et al. (2017). "Fabrication of magnetic biochar as a treatment medium for As (V) via pyrolysis of FeCl₃-pretreated spent coffee ground." Environmental Pollution 229: 942-949.
- Daosukho, S. and S. Rodprasert (2015). "การพัฒนา คุณภาพ ดิน โดยใช้ ถ่าน ชีวภาพ ที่ ผลิต จาก วัสดุ เหลือ ทิ้ง ทาง การเกษตร The development of soil quality using biochar amendment from agricultural waste."
- Intagun, W., et al. (2018). "Effect of core puncture diameter on bio-char kiln efficiency." International Journal of Biotechnology and Bioengineering 12(11): 435-439.
- Kanouo, B. M. D., et al. (2018). "Quality of biochars made from Eucalyptus tree bark and corncob using a pilot-scale retort kiln." Waste and Biomass Valorization 9(6): 899-909.
- Liu, H., et al. (2018). "Effect of modified coconut shell biochar on availability of heavy metals and biochemical characteristics of soil in multiple heavy metals contaminated soil." Science of the Total Environment 645: 702-709.

Mengesha, T. T. and A. V. Ramayya (2015). "Heat Transfer Validation and Comparative Evaluation of Biochar Yield from Pyrolysis Cook Stove."

Mengesha, T. T. and A. V. Ramayya (2017). "Performance Evaluation of Pyrolysis Cookstove Using Water Boiling Test." American Journal of Modern Physics 6(5): 108-116.

Mishra, P., et al. (1986). "Studies on physical and thermal properties of rice husk related to its industrial application." Journal of materials science 21(6): 2129-2132.

Mosisa, F. T., et al. (2019). "BIOCHAR PRODUCTION USING PYROLYSIS COOK STOVE FROM COFFEE HUSK, WOOD WORKING WASTES AND WASTES FROM BEDELE BREWERY." Editorial Board 8(5): 178.

Panyoyai, N., et al. (2019). "Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types." Engineering Access 5(2): 59-64.

Panyoyai, N., et al. (2018). Temperature distribution inside biochar kiln for biochar production. 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018), Vientiane, Lao PDR.

Perez-Alegria, L., et al. (2001). "Physical and thermal properties of parchment coffee bean."

Petchaihan, L., et al. (2020). Test of a modified small-scale biochar kiln. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.

Pinto, J., et al. (2016). "Possible applications of corncob as a raw insulation material." Insulation Materials in Context of Sustainability, InTech: 25-43.

Puttanakul, P., et al. (2019). "The effect of plant residues and biochars on organic matter and nitrogen retention in soil." Veridian E-journal Science and Technology

Silpakorn University 6(6): : 40-Field: Environmental Technology.

Srisophon, M., et al. (2020). Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.

Wallace, C. (2019). Microwave pyrolysis biochar characterization and modeling of char reinforced GFRP biocomposites, University of New Brunswick.

Wallace, C. A. (2019). Master of Science in Engineering, UNIVERSITY OF NEW BRUNSWICK.

Wijitkosum, S. and P. Jiwonok (2019). "Elemental composition of biochar obtained from agricultural waste for soil amendment and carbon sequestration." Applied Sciences 9(19): 3980.

Zhang, Y., et al. (2012). "Physical properties of corn residues." American Journal of Biochemistry and Biotechnology 8(2): 44-53.

รัตถชล อ่างมณี และคณะ (2017). "สมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษข้าวโพดและศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน." VRU Research and Development Journal Science and Technology 12(1): 53-63.

กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ (2017). "การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาแก๊สซีไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน."

กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ (2016). "ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร." วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา 1(1): 37-42.

ทิวา ตันสถิต และคณะ (2016). "Biochar Production from Stubble and Rice Straw for Water Holding in Soil."



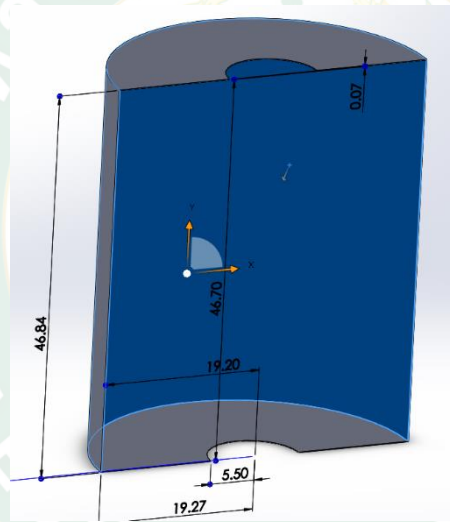


ภาคผนวก

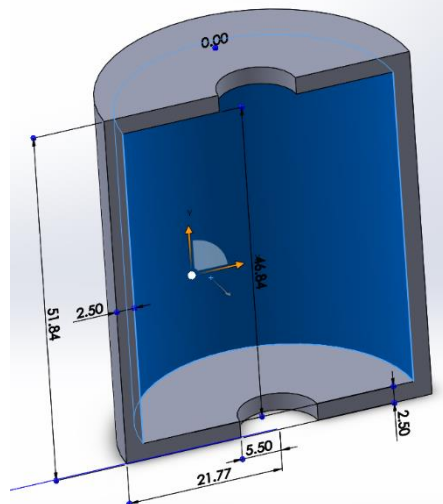
ก. เครื่องมือและอุปกรณ์



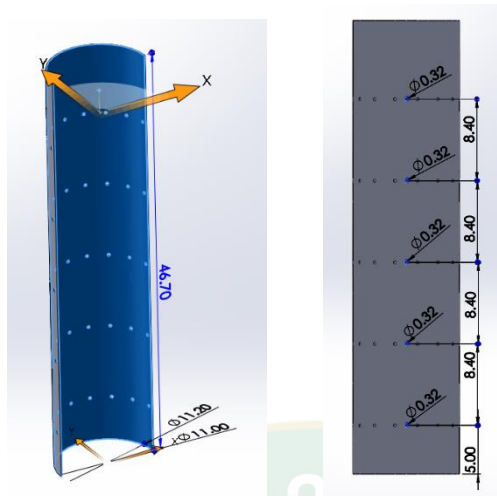
ภาคผนวกที่ 1 เตาเผาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร



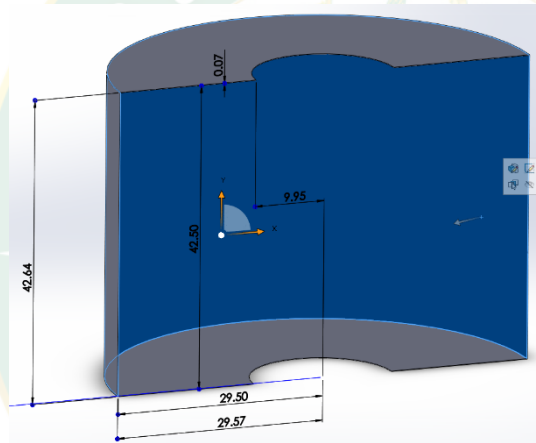
ภาคผนวกที่ 3 โครงสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร



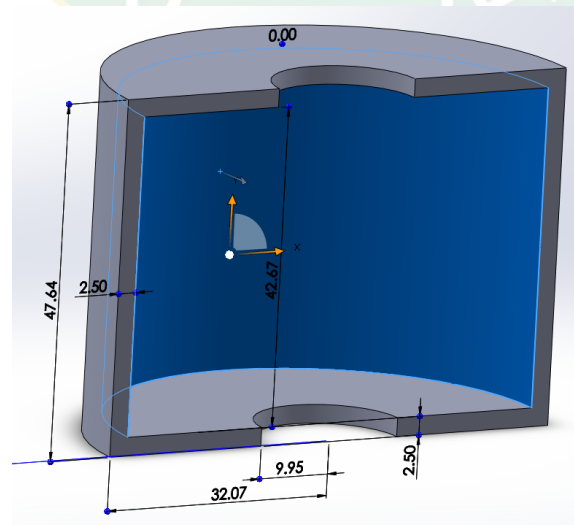
ภาคผนวกที่ 4 โครงสร้างฉนวนของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร



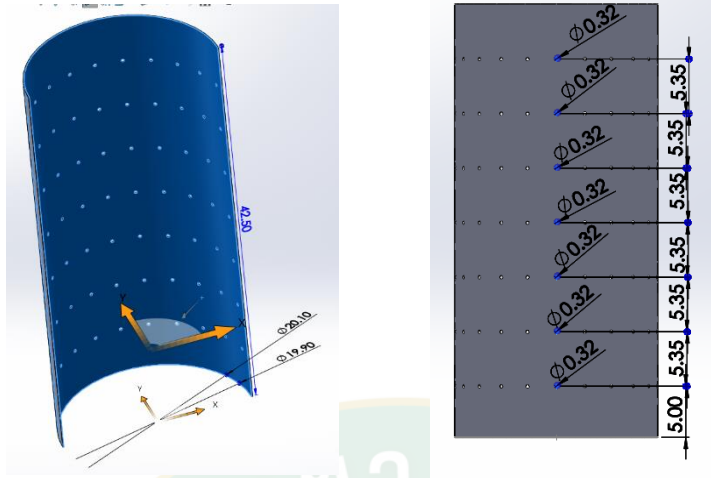
ภาคผนวกที่ 5 โครงสร้างแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร



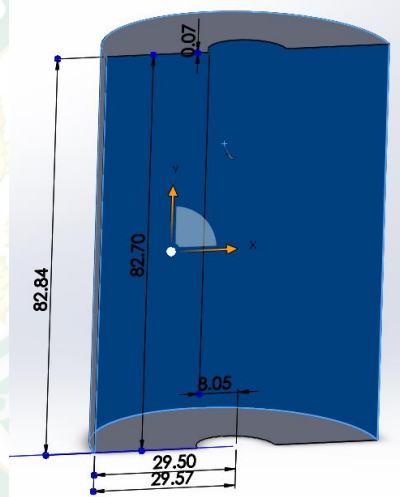
ภาคผนวกที่ 6 โครงสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร



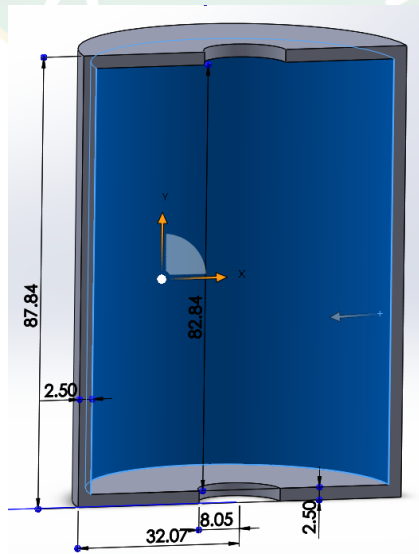
ภาคผนวกที่ 7 โครงสร้างฉนวนของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร



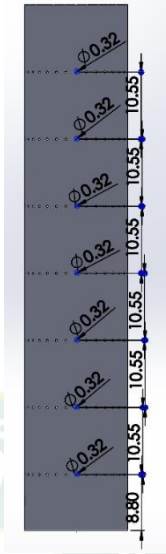
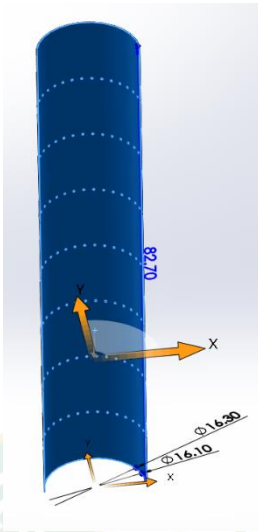
ภาคผนวกที่ 8 โครงสร้างแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร



ภาคผนวกที่ 9 โครงสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร



ภาคผนวกที่ 10 โครงสร้างฉนวนของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร



ภาคผนวกที่ 11 โครงสร้างแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร



ข. การนำเสนอผลงานวารสาร

RMUTL. Eng. J

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนนิลาและปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

Thermal Characteristics of Anila-type Biochar Kiln and Factors Affecting Biochar Production

ชัยพร มณีขัติย์¹, ทิพาพร คำแดง^{1*}, นำพร ปัญญ์ใหญ่¹, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนาจ¹ และ ประชา ยืนยงกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Chaiyaphorn maneechat¹, Tipaporn Khamdaeng^{1*}, Numpon Panyoyai¹, Thanasit Wongsiriamnuay¹ and Pracha Yeunyongkul²

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

63 Moo 4, Nong Harn, San Sai, Chiang Mai, Thailand, 50290

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

*ผู้รับผิดชอบบทความ: tipaporn@mju.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อศึกษาการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนขนาด 50 100 และ 200 ลิตร โดยใช้เตาเผาแบบแอนนิลา ศึกษาผลของชนิดวัสดุชีวมวล ขนาดเตา และเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน ปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพจะมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวน 15 24 และ 44 รูเจาะตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่ใช้ชีวมวลเป็นเกล็ดไม้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 51.1 เปอร์เซ็นต์ โดยจากการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิตพบว่าการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง คือ 459.4 ± 184.9 468.7 ± 100.3 และ 353.1 ± 97.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดสอบให้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.5 ± 6.2 3.9 ± 4.1 และ 0.9 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากสมการสหสัมพันธ์พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาเผาไม้ได้มีผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับเป็นตัวแปรไม่มีความสำคัญ ได้แก่ A/Ap และ L/D เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน และชนิดของชีวมวล ที่ส่งผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ยังพบว่า A/Ap L/D และเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพด้วย จากผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาที่มีขนาดแตกต่างกันและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

คำสำคัญ: การจำลองทางความร้อน เตาเผาแบบแอนนิลา ถ่านชีวภาพ สหสัมพันธ์



Abstract

The objectives of this research were to study the temperature distribution simulation in insulated Anila-type biochar kiln with size of 50, 100 and 200 liters and to study the effects of biomass material types, kiln size, and pyrolysis time on temperature distribution in the insulated biochar kiln, biochar yield, and biochar property. The correlations between the variables related to the biochar production were furthermore investigated. The core of the kiln had a puncture diameter of 3.17 mm, number of the puncture of 15, 24 and 44, respectively. The results showed that a 200-liter biochar kiln with biomass as the husk rice had the highest biochar yield of 51.1%. Based on the simulation results, the average temperature distribution at pyrolysis time of 1, 2 and 3 hours was 459.4 ± 184.9 °C, 468.7 ± 100.3 °C and 353.1 ± 97.8 °C, respectively, when compared with the experiment results the error was 6.5 ± 6.2 , 3.9 ± 4.1 and $0.9 \pm 0.9\%$, respectively. From the correlation equation, it was found that average temperature inside the kiln had no significant effect on the biochar yield and acidity-alkalinity. On the other hand, the kiln dimensional parameters, i.e. A/A_p , L/D , pyrolysis time and biomass material type had an effect on the biochar yield. Furthermore, the A/A_p , L/D and pyrolysis time had an effect on the acidity-alkalinity of biochar as well. From the results of this research, the temperature distribution characteristics of different kiln sizes and conditions affecting the biochar yield and acidity-alkalinity obtained from the biochar production were revealed.

Keywords: Thermal Simulation, Anila Stove, Biochar, Correlation

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาด้านความมั่นคงทางด้านอาหาร และความต้องการด้านพลังงาน ซึ่งทั้งหมดนี้มีความเกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากรที่จะนำมาช่วยแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าวไปพร้อม ๆ กันคือ เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ (Biochar) ถ่านชีวภาพเป็นถ่านที่ผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ช้างข้าวโพด [1] เปลือกลำไย กะลากาแฟ [2, 3] นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และควบคุมอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) [4] มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธี คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) [5, 6] โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าเนื่องจากจะได้ผลผลิตถ่านชีวภาพมากกว่าการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว ซึ่งเป็นการเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้

ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียส [7] ในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยที่สุด

เตาแบบแอนนิลา (Anila Stove) เป็นเตาประเภทหนึ่งที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งถูกออกแบบให้มีแกนกลางที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ด้านในและมีพื้นที่สำหรับบรรจุชีวมวลอยู่ภายในที่ถูกแยกออกจากแกนกลาง ด้านล่างของแกนกลางจะมีช่องให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ เมื่อให้ความร้อนแก่แกนกลางด้วยเชื้อเพลิงจนแกนกลางร้อนขึ้น [8, 9] ส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนที่บรรจุชีวมวลมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง [10] ซึ่งเตาแบบแอนนิลาได้ถูกนำมาวิจัยเพื่อพัฒนาปรับปรุงและนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม ครัวเรือนที่มีสวน ไร่ นา เป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แปรสภาพให้เป็นถ่านชีวภาพและนำไปใช้ประโยชน์ได้

Cho et al. [11] ศึกษาถ่านชีวภาพที่ได้จากกากกาแฟมาทดสอบเป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ใช้เตาเผาชีวมวลแบบแก๊สซิไฟเออร์ในการผลิตถ่านชีวภาพมีเป้าหมายเพื่อใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้ง



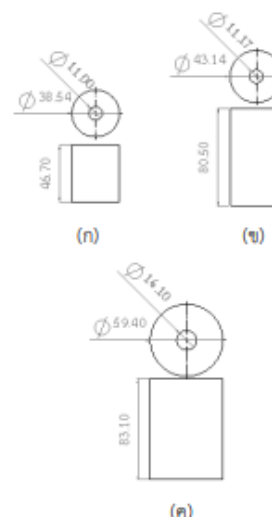
ทางการเกษตรในการปรับปรุงคุณภาพของดินแทนการใช้สารเคมีสามารถปรับค่า pH ของดินจาก 6 เป็น 7 ได้และดินที่ได้มีความเสถียรมากกว่าการใช้ปูนขาวที่อัตราส่วนเดียวกัน Panyoyai et al. [12] ศึกษาออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีการกระจายแกนกลางที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพในปริมาณสูงสุด ทำการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และตรวจสอบความถูกต้องของการกระจายอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับกราฟทดลอง จากผลการจำลองสามารถเผยให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตและคุณภาพของถ่านชีวภาพ Panyoyai et al. [13] ศึกษาความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพ คือ ชังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย โดยใช้เตาเผาขนาด 50 ลิตร ขนาดรูเจาะ 6.35 มิลลิเมตร ผลการทดลองทำให้ทราบว่า ผลผลิตที่ได้เท่ากับ 15.7 24.3 และ 11.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับชังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย ตามลำดับ Kanouo et al. [14] ศึกษาเตาเผาแบบ pilot-scale retort kiln โดยใช้ชีวมวล 2 ชนิด คือ ชังข้าวโพดและเปลือกคั้นยูคาลิปตัส ประสิทธิภาพการผลิตของเตามีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง 33-68 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิม และมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์ของ European Biochar Certificate (EBC) และ International Biochar Initiative (IBI) Wijitkosum et al. [15] ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำเพื่อเกษตรในท้องถิ่น โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตคือ ลำต้นมันสำปะหลังและชังข้าวโพด พบว่าลำต้นมันสำปะหลังให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) มากที่สุดและในการผลิตถ่านชีวภาพชังข้าวโพดให้ผลผลิตสูงสุด

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่าชนิดวัสดุชีวมวล ลักษณะเตา และอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ล้วนเป็นปัจจัยในการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านชีวภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีขนาดแตกต่างกัน และหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพ ชนิดวัสดุชีวมวล เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน ที่มีต่อปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 รูปแบบเตาเผาถ่านชีวภาพ

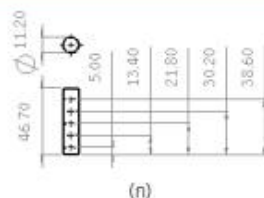
เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดลองหุ้มฉนวนด้วยเซรามิกไฟเบอร์ โดยทุกขนาดเตาทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีความหนา 2 มิลลิเมตร ความสูงและขนาดรูเจาะแกนกลางเตาเพื่อใส่ท่อแกนกลางแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด (ก) 50 ลิตร (ข) 100 ลิตร และ (ค) 200 ลิตร (ขนาดมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

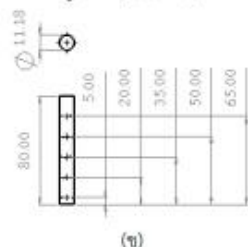
2.2 แกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ

จากรูปที่ 2 แสดงแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดลอง ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีความหนา 2 มิลลิเมตร และมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวนรูเจาะเท่ากับ 15 24 และ 44 รูเจาะ ตามลำดับ

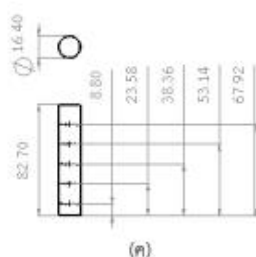


(ก)

รูปที่ 2 (หน้าถัดไป)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 แกนกลางของเดาเดาน้ำชีวภาพที่มีจำนวนรูเจาะ (ก) 15 รูเจาะ (ข) 24 รูเจาะ และ (ค) 44 รูเจาะ (ขนาดมิติหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

2.3 การทดสอบเดาเดาน้ำชีวภาพ

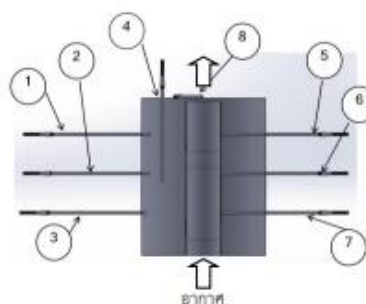
ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 5 ชนิด คือ ช้าง ข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลากาแฟ เริ่มต้นการทดสอบโดยการนำชีวมวลไปตากแดดเพื่อลดความชื้นให้มีความชื้นต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเบี่ยงนำชีวมวลที่จะใช้ในการทดสอบใส่ลงในเดาเดาน้ำชีวภาพจนเต็ม ใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจำนวน 3 กิโลกรัม และช้างข้าวโพดแห้งอีก 1 กิโลกรัม เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ใส่ลงในแกนกลางของเดาเดา จุดไฟจากทางด้านบนเดา ใช้เวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด 3 ชั่วโมง (6) ชีวมวลภายในเดาจะเกิดการแยกสลายด้วยความร้อนและคายแก๊สออกมาเผาไหม้

เชื้อเพลิงที่อยู่ในแกนกลาง จนการลุกไหม้ที่เกิดจากแก๊สดับลง ปล่องทิ้งไว้จนเตาเย็นลง จากนั้นจึงเปิดฝาเดาเพื่อนำถ่านชีวภาพออกจากเดาและทำการคัดแยกหาปริมาณของชีวมวลที่เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพ นำถ่านชีวภาพที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณถ่านชีวภาพ

จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตามมาตรฐาน DIN ISO 10390 ใช้อัตราส่วน 1:5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของถ่านชีวภาพต่อสารละลาย CaCl_2 0.01 โมลาร์ โดยนำมาเขย่าเป็นเวลา 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

2.4 การทดสอบการกระจายอุณหภูมิ

ทำการวัดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทดสอบทั้งหมด 8 จุด โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-1,000 องศาเซลเซียส และมีค่าความผิดพลาด ± 2.5 องศาเซลเซียส ติดตั้งที่ตำแหน่งตามแนวแกนเดา (ด้านบนตรงกลาง และด้านล่างเดา) และตามแนวรัศมี (ตำแหน่งแกนกลาง ตรงกลาง และผนังเดาด้านใน) โดยระยะของเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งตามแนวแกนเท่ากับ 1/4 2/4 และ 3/4 ของความสูงเดาแต่ละขนาด ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเดาแสดงในรูปที่ 3 โดยแบ่งเป็นวัดอุณหภูมิภายในเดา 7 จุด (ตำแหน่งที่ 1-7) และอุณหภูมิเปลวไฟ 1 จุด (ตำแหน่งที่ 8) ซึ่งอุณหภูมิภายในเดาตำแหน่งที่ 1-7 จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพและคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการสร้างสมการสหสัมพันธ์ต่อไป



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล



อุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทดสอบจะถูกบันทึกไว้โดยใช้อุปกรณ์ Wisco Online Datalogger OD04 โดยจะเก็บอุณหภูมิทุก ๆ 2 วินาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งจบการทดสอบ และเลือกอุณหภูมิจากตำแหน่งต่าง ๆ ที่วัดค่าได้ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา และนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพ

2.5 การจำลองสภาพด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ทำการจำลองสภาพภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว มีการถ่ายเทความร้อนจากเชื้อเพลิงผ่านผนังท่อแกนกลางด้วยการนำความร้อน และมีการส่งถ่ายความร้อนจากผนังท่อแกนกลางด้านในไปสู่ชีวมวลในเตาด้วยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ส่วนผนังเตาไม่มีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเตามีการหุ้มฉนวน จำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนแบบแกนสมมาตร และแสดงผลการกระจายอุณหภูมิแบบ 2 มิติ ตัวแปรในการจำลองสภาพ ได้แก่ ชนิดวัสดุชีวมวลและขนาดของเตาเผา ที่เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน 1 2 และ 3 ชั่วโมง ขั้นตอนการจำลองสภาพคือใช้แบบจำลองที่เขียนโดยโปรแกรม SolidWorks จากนั้นใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองสภาพ กำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ และวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิ โดยกำหนดให้แบบจำลองมีการส่งถ่ายความร้อนแบบคงตัว มีการนำความร้อนจากผนังแกนกลางด้านในไปสู่ผนังแกนกลางด้านนอก มีการนำพาความร้อนในเตาเผา และมีการพาความร้อนแบบอิสระออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนเงื่อนไขขอบ กำหนดให้อุณหภูมิผนังแกนกลางด้านนอกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผาตามแนวแกนที่ตำแหน่งแกนกลาง อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าในเตาเผาผ่านชีวภาพที่ได้จากการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองสภาพ

2.6 วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตด้านชีวภาพ

วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตด้านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือ ชิงช้าไพล่ แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย

และกะลากาแฟ โดยการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน และค่าความร้อนของชีวมวล ที่มีต่อปริมาณด้านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วางแผนการทดลองโดยศึกษาปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์แบบถดถอย เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการผลิตด้านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ส่งผลต่อการผลิตด้านชีวภาพ

Factors	Levels	
	Low	High
Temp, X_1 (°C)	126.85 [12]	690.94 [12]
A/Ap, X_2	274.53	296
L/D, X_3	1.302	1.86
Time, X_4 (hr)	1	3
HHV, X_5 (MJ/kg)	8.37 [6]	28.95 [6]

2.7 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปร

การออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตด้านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด มีปัจจัยสำหรับการศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต (X_1) พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/Ap, (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D, (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) และค่าความร้อนของชีวมวล (X_5) ตามลำดับ

ผลจากการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการเชิงเส้น เพื่อใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 5 และการตอบสนอง (Y) สามารถคำนวณปริมาณด้านชีวภาพ (Y_1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง, pH, (Y_2) ตามสมการที่ (1) คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าทำนายการตอบสนอง; β_0 เป็นค่าคงที่; X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 เป็นตัวแปรอิสระ; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$



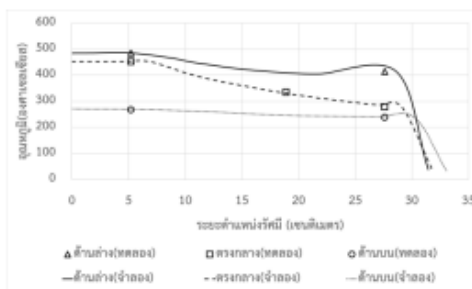
เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลผลิตสูงสุดโดยสมการเชิงเส้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทำการทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิกายในเตาเผา ถ่านชีวภาพ และหาปริมาณถ่านชีวภาพและสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งได้แก่ ช้าง ขี้วัวโพต แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาจากแพ โดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนาลิทัมจนวน ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร และใช้เวลาในการแยกสลายด้วยความร้อน 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลที่ได้การทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพกับผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มจนวน ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร จากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือ ช้าง ขี้วัวโพต แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาจากแพ พบว่าแกลบเป็นชีวมวลที่ให้ปริมาณถ่านชีวภาพที่ดีที่สุดคือ 45.6 47.8 และ 51.1 เปอร์เซ็นต์ และกะลาจากแพเป็นชีวมวลที่ให้ปริมาณถ่านชีวภาพน้อยที่สุดคือ 27.6 32.9 และ 34.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เตาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ตามลำดับ

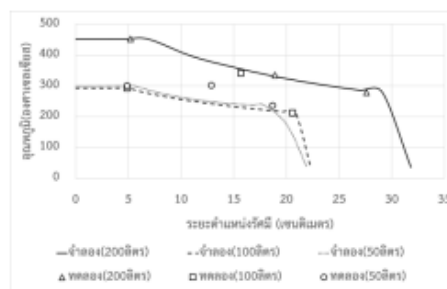


รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิตั้งตำแหน่งบน กลาง ล่าง ของเตา ขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ชีวมวลเป็นแกลบ

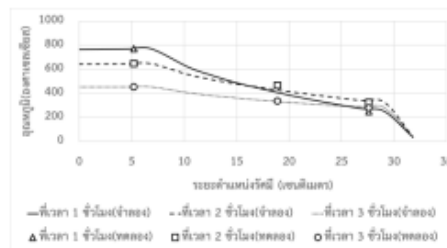
เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตั้งจากการจำลองสภาพกับผลการกระจายอุณหภูมิตั้งจากการทดสอบ จากรูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิตั้งของเตาขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิตั้งจากการ

จำลองสภาพที่ตำแหน่งบน กลาง ล่างของเตา มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.9 ± 0.1 0.9 ± 0.9 และ 0.2 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงการกระจายอุณหภูมิตั้งของเตาที่เวลา 3 ชั่วโมง ที่ตำแหน่งกลางเตา ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิตั้งจากการจำลองสภาพที่ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.3 ± 6.7 5.1 ± 12.1 และ 0.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิตั้งขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ตำแหน่งกลางเตา ชีวมวลเป็นแกลบ



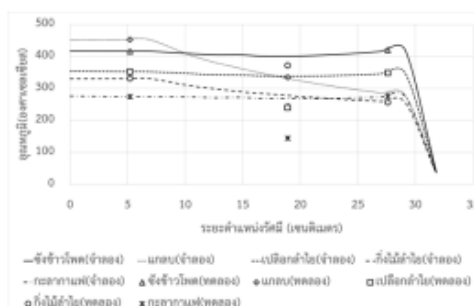
รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิตั้งเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา ชีวมวลเป็นแกลบ

รูปที่ 7 แสดงการกระจายอุณหภูมิตั้งของเตาขนาดเตา 200 ลิตร ที่ตำแหน่งกลางเตา ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิตั้งจากการจำลองสภาพที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.5 ± 6.2 3.9 ± 4.1 และ 0.9 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และรูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิตั้งของเตาที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา



อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพของวัสดุชีวมวล 5 ชนิดคือ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กิ่งไม้ลำไย และกะลากาแฟ มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 21.6 ± 36.8 0.9 ± 0.9 13.9 ± 23.5 8.7 ± 14.3 และ 28.6 ± 49.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ค่าความเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพและผลการทดสอบเกิดจากสมมติฐานของแบบจำลองที่กำหนดขึ้น จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ อุณหภูมิใกล้แหล่งกำเนิดความร้อน (แกนกลาง) จะสูงสุด แล้วค่อยลดลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งไม่ซับซ้อนเหมือนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบจริง จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพและผลการทดสอบทำให้ทราบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.2 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ด้านชีวภาพจากแกลบที่ผลิตด้วยเตาเผาผ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่เวลาในการแยกสลายด้วยความร้อน 3 ชั่วโมง และให้ผลผลิตสูงที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของวัสดุชีวมวล 5 ชนิด ที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณด้านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของด้านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณด้านชีวภาพ (ตารางที่ 2) พบว่า พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/A_p , (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D , (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) และค่าความร้อนของชีวมวล (X_5) ให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผล

ต่อปริมาณด้านชีวภาพ (Y_1) ที่ได้จากการผลิต อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.835

จากผลงานวิจัยก่อนหน้า [4] พบว่าปริมาณด้านชีวภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยที่อุณหภูมิแปรผกผันกับปริมาณด้านชีวภาพ เป็นการทดสอบในเตาเผาไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ แต่อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าเฉลี่ยภายในเตาเผาแบบแอนนิลาซึ่งแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน การจะควบคุมอุณหภูมิให้แม่นยำเหมือนเตาไฟฟ้าไม่สามารถทำได้ ในส่วนนี้คือข้อจำกัดของงานวิจัย แต่อย่างไรก็ตามเตาที่ทดสอบสามารถผลิตด้านชีวภาพได้อยู่ในช่วง 27.6 ถึง 51.1 เปอร์เซ็นต์ ตามขนาดของเตาเผาและชนิดวัสดุชีวมวล ซึ่งสามารถผลิตด้านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงดินได้ [13]

ตารางที่ 2 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณด้านชีวภาพ

Factors	P-value
Intercept	0.0001
Temp, X_1 (°C)	0.1008
A/A_p , X_2	0.0001
L/D , X_3	0.0171
Time, X_4 (hr)	0.0001
HHV, X_5 (MJ/kg)	0.0315

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายปริมาณด้านชีวภาพได้ดังสมการที่ (2)

$$Y_1 = -187.600 - 0.016X_1 + 0.744X_2 - 12.940X_3 + 13.843X_4 - 0.294X_5 \quad (2)$$

ตารางที่ 3 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

Factors	P-value
Intercept	0.0001
Temp, X_1 (°C)	0.9715
A/A_p , X_2	0.0001



L/D, X_3	0.0001
Time, X_4 (hr)	0.0279
HHV, X_5 (MJ/kg)	0.1177

จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์ จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่าพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/Ap, (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D, (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) ให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่า pH ของถ่านชีวภาพ (Y_2) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.737 โดยที่จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่า pH โดยอุณหภูมิแปรผันตรงกับค่า pH ส่วนค่าความร้อนของชีวมวลหรือ HHV แปรผกผันกับอัตราส่วนของธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และแปรผันตรงกับค่า pH ซึ่งค่า pH ที่ได้เป็นผลจากหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ซึ่งจากข้อจำกัดของเตาแอนาลิตที่ได้ออกมาแล้ว ทำให้ผลของอุณหภูมิและค่าความร้อนของชีวมวลไม่ส่งผลต่อค่า pH

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพได้ดังสมการที่ (3)

$$Y_2 = -8.925 - (0.018 \cdot 10^{-3})X_1 + 0.063X_2 - 1.579X_3 + 0.129X_4 - 0.011X_5 \quad (3)$$

4. สรุปผล

จากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด (50 100 และ 200 ลิตร) เวลาการทดสอบ 3 ค่า (1 2 และ 3 ชั่วโมง) และชนิดชีวมวลแตกต่างกัน 5 ชนิด (ซึ่งข้าวโพด แกลบ เปลือกสาลี กิ่งไม้ สาลี และกะลาเผา) ได้ผลสรุปดังนี้

- แกลบเป็นวัสดุที่ให้ปริมาณของถ่านชีวภาพมากที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์ ที่เตาขนาด 200 ลิตร และเวลา 3 ชั่วโมง โดยจากการเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกลางเตาจากการจำลองสภาพกับการทดลอง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์

- จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์จึงพบว่า พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap) มีผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพ อย่างมีนัยสำคัญ

โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนาลิตเพื่อผลิตถ่านชีวภาพให้ได้ปริมาณสูงที่สุดและกำหนดคุณภาพของถ่านชีวภาพให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ซึ่งขอบเขตสภาวะที่สามารถนำสมการสหสัมพันธ์ไปใช้งานได้ กำหนดอยู่ในตารางที่ 1

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกและสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Budai A, Rasse DP, Lagomarsino A, Lerch TZ, Paruch L. Biochar persistence, priming and microbial responses to pyrolysis temperature series. *Biology and Fertility of Soils*. 2016;52(6):749-61.
- [2] Mengesha TT, Ramayya AV. Performance Evaluation of Pyrolysis Cookstove Using Water Boiling Test. *American Journal of Modern Physics*. 2017;6(5):108-16.
- [3] Mosisa FT, Tibba GS, Bayisa B. Biochar Production using pyrolysis cook stove from coffee husk, Wood working waster and wastes from bedele brewery. *Editorial Board*. 2019;8(5):178.



- [4] Wallace C. Microwave pyrolysis biochar characterization and modeling of char reinforced GFRP biocomposites: University of New Brunswick; 2019.
- [5] Petchaihan L, Panyoyai N, Khamdaeng T, Wongsiriamnuay T, editors. Test of a modified small-scale biochar kiln. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2020: IOP Publishing.
- [6] Srisophon M, Khamdaeng T, Panyoyai N, Wongsiriamnuay T, editors. Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2020: IOP Publishing.
- [7] Budai A, Wang L, Gronli M, Strand LT, Antal Jr MJ, Abiven S, et al. Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars: effects of production temperature and method. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2014;62(17):3791-9.
- [8] Intagun W, Khamdaeng T, Prom-Ngarm P, Panyoyai N. Effect of core puncture diameter on bio-char kiln efficiency. *World Acad Sci Eng Technol Int J Biotechnol Bioeng*. 2018;12:435-9.
- [9] Mengesha TT, Ramayya AV. Heat Transfer Validation and Comparative Evaluation of Biochar Yield from Pyrolysis Cook Stove. 2015.
- [10] Daosukho S, Rodprasert S. The development of soil quality using biochar amendment from agricultural waste. 2015.
- [11] Cho D-W, Yoon K, Kwon EE, Biswas JK, Song H. Fabrication of magnetic biochar as a treatment medium for As (V) via pyrolysis of FeCl₃-pretreated spent coffee ground. *Environmental Pollution*. 2017;229:942-9.
- [12] Panyoyai N, Wongsiriamnuay T, Khamdaeng T, editors. Temperature distribution inside biochar kiln for biochar production. 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018), Vientiane, Lao PDR; 2018.
- [13] Panyoyai N, Petchaihan L, Wongsiriamnuay T, Hiransatitpoom B, Khamdaeng T. Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types. *Engineering Access*. 2019;5(2):59-64.
- [14] Kanouo BMD, Allaire SE, Munson AD. Quality of biochars made from Eucalyptus tree bark and corncob using a pilot-scale retort kiln. *Waste and Biomass Valorization*. 2018;9(6):899-909.
- [15] Wjitkosum S, Jiwonok P. Elemental composition of biochar obtained from agricultural waste for soil amendment and carbon sequestration. *Applied Sciences*. 2019;9(19):3980.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายชัยพร มณีชัย
เกิดเมื่อ	19 มีนาคม 2539
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2562 ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2558 ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2555 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนป่าตอลบ้านธิพิทยา พ.ศ. 2552 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนป่าตอลบ้านธิพิทยา

