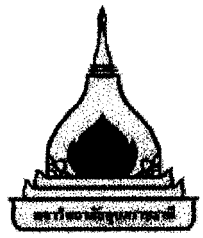


รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตและวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์จากฟางข้าว โดยใช้เตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง

Production and Analysis of Producer Gas from Rice Straw by Downdraft Gasifier

คณะผู้วิจัย

1. กุลเชษฐ์ เพียรทอง สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
2. กษมา เจนวิจิตรสกุล สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
3. นิรันดร์ หันไชยุงวา สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
4. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
5. อนิรุตต์ มัทธุจักร สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประจำปีงบประมาณ 2546

รายงานการวิจัยเรื่อง	การผลิตและวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์จากฟางข้าวโดยใช้เตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง
หัวหน้าโครงการวิจัย	ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง
ผู้ร่วมโครงการวิจัย	นางสาวกษมา เจนวิจิตรสกุล
	นายนิรันดร์ หันไชยุงวา
	ผศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีงบประมาณ	2546
งบประมาณที่ได้รับ	210,500 บาท
คำสำคัญ	ฟางข้าว การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาด้านการทดลองถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีอยู่มากในประเทศไทย มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอัดฟางแท่ง และ เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง ซึ่งเตาชนิดนี้มีลักษณะเด่นคือ แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวน pyrolysis และ drying ต่ำ จึงเหมาะที่จะนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ยังทำการทดลองผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ และศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตแก๊ส จากฟางใน 3 ลักษณะ คือ ฟางปกติ ฟางย่อย และ ฟางอัดแท่ง จากผลการทดลองพบว่า เตาที่ทำการออกแบบและสร้างสามารถผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดี จากกรณี ฟางย่อย และ ฟางอัดแท่ง และ จากการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ต่างกัน 3 ค่าคือ 8.83×10^{-4} m^3/s, 9.8×10^{-4} m^3/s และ 11.78×10^{-4} m^3/s โดยใช้ระยะเวลาทดลอง 100 นาทีต่อรอบการผลิต และใช้เชื้อเพลิง 10 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต พบว่า ที่อัตราการไหลของอากาศ 9.8×10^{-4} m^3/s สามารถผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาณมากและสม่ำเสมอที่สุด โดยมีปริมาณ CO ประมาณ 3500-5000 ppm และ มีแก๊สไฮโดรเจนเล็กน้อย (ในกรณีฟางอัดแท่ง) ในส่วนของพฤติกรรมการผลิตแก๊สภายในเตาได้ถูกตรวจสอบ โดยการวัดอุณหภูมิภายในเตาตามแนวแกนซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊ส จากการทดลองผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ในงานวิจัยนี้ ทำให้พบว่า ขนาดของเตา อัตราการไหลของอากาศ ความชื้น และความหนาแน่นของเชื้อเพลิง เป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดแก๊ส หากจะผลิตให้ได้ต่อเนื่อง และ นำไปใช้งานจริง

Production and Analysis of producer gas from Rice Straw by Downdraft Gasifier

Head of Project Asst. Prof. Dr. Kulachate Pianthong

Co-researchers Mrs. Kasama Janevijitsakul

Mr. Nirun Hunchaiyoongwa

Asst.Prof.Dr. Chawalit Thinvongpituk

Faculty of Engineering Ubon Ratchathani University

In Finance Year 2006 for 210,500.- Baht

Keyword Rice straw , Gasification, Downdraft gasifier.

Abstract

This research aims to investigate the possibility of gasification from rice straw which is abundantly available throughout Thailand. The rice straw packer and the downdraft gasifier is designed, constructed and tested. From the tests, producer gas can really be produced continuously in reasonable amount and period. The advantage of the downdraft gasifier is that the producer gas from pyrolysis and drying process are much more ready to be used because there is low dirt particulate. Three types of rice straw which are normal rice straw, chopped rice straw, and packed rice straw are used in the tests. Experiments of three different inlet air flow rates were investigated; 8.83×10^{-4} m^3/s, 9.8×10^{-4} m^3/s and 11.78×10^{-4} m^3/s, with operating time of 100 min/batch and feed of 10 kg fuel/bacth. The highest quantity and continuous flow of biomass gas is achieved from 9.8×10^{-4} m^3/s inlet air flow rate. This also offers the highest CO at about 3500-5000 ppm and some amount of H_2 was also achieved (from packed rice straw). Characteristics of gasification process were examined by temperature gradient along the gasifier axis using 4 thermocouples. From this investigation, it can be suggested that the volume of the gasifier, the air flow rate, the humidity, and the bulk density of the solid fuel are key parameters to achieve continuous and proper amount of the producer gas in order to use in the real practices.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ รวมทั้งการจัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน พื้นที่ 5 (จังหวัดมหาสารคาม) ที่ให้คำแนะนำและให้ข้อมูลในการสร้างเครื่องและผลิตฟางอัดแท่ง ขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่อนุเคราะห์ฟางแห้ง จำนวน 16 ก้อน และ เครื่องย่อยฟาง ขอขอบคุณนักศึกษาผู้ช่วยงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล นายชญานนท์ แสงมณี นายรักชาติ สุโพณะ นายอดิศักดิ์ บุตรวงษ์ ที่ช่วยสร้างชุดทดลอง ทำการทดลอง และรวบรวมผลการทดลอง อย่างขมักเขม้น ตลอดระยะในการทำวิจัยที่ผ่านมา การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

			หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย			ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ			ข
กิตติกรรมประกาศ			ค
สารบัญ			ง
สารบัญตาราง			ฉ
สารบัญภาพ			ช
บทที่ 1		**บทนำ**	
	1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
	1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
	1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
	1.4	ขอบเขตการวิจัย	2
	1.5	วิธีดำเนินการวิจัย	3
บทที่ 2		**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	
	2.1	แก๊สผลิตภัณฑ์จากชีวมวล	4
	2.2	เทคโนโลยีการเผาไหม้	7
	2.3	กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้อากาศ	9
	2.4	ปฏิกิริยาเคมีความร้อนของการเกิดแก๊สชีวมวล	9
	2.5	ชนิดของเตาผลิตแก๊สชีวมวล	12
บทที่ 3		**วิธีการและเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย**	
	3.1	การเตรียมฟางก้อนก่อนผลิตแก๊สชีวมวล	17
	3.2	การผลิตแก๊สชีวมวล	20
บทที่ 4		**ผลการทดลองและวิเคราะห์**	
	4.1	การทดลองผลิตฟางอัดก้อน	26
	4.2	การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์จากฟางข้าว	41
	4.3	การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์จากก้อนฟางอัดแท่ง	46
บทที่ 5		**สรุปผลการทดลอง**	
	5.1 การศึกษาการผลิตฟางอัดแท่ง		50
	5.2 การศึกษาการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์		50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก	54
ก การออกแบบเครื่องอัดฟางก้อน	55
ข การออกแบบเตาเผา	66
ค ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟางข้าว	69
ง ผลงานตีพิมพ์เกี่ยวเนื่องจากงานวิจัย	72
จ ประวัติคณะผู้วิจัย	77

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่าง ๆ 5

4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 อัดฟางที่ไม่ผ่านการสับ 25

4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 อัดฟางที่ผ่านการสับ 26

4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 อัดฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียด 27

4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ใช้ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียด 28

4.5 ตารางบันทึกลักษณะทางกายภาพก้อนฟาง 32

4.6 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน A 33

4.7 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน B 34

4.8 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน C 35

4.9 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน D 36

4.10 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน E 37

4.11 ตารางผลการทดลองหาค่าความร้อน 39

4.12 ตารางผลการทดลองหาค่าความร้อน 41

4.13 ผลการทดลองการผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางก้อน 47

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น 13
2.2 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลลง 14
2.3 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลตามขวาง 14
2.4 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลระบบฟลูอิดไดซ์เบด 15
2.5 เตา gasifier แบบ suspended 16
3.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดฟาง RSP-ME1 17
3.2 การทำงานของเครื่องอัดฟาง 18
3.3 ขนาดและส่วนประกอบหลักของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง DDG-ME2 19
3.4 ขนาดและส่วนประกอบหลักของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง DDG-ME2 20
3.5 K-type thermocouple และ data logger 20
3.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ 21
3.7 อุปกรณ์วัดแก๊สผลิตภัณฑ์และการติดตั้งขณะทดลอง 22
3.8 เครื่องอัดอากาสชนิดหอยโข่ง แบบใบพัดคู่ และใบพัดเดี่ยว 22
3.9 อุปกรณ์อื่น ๆ ในการทดลอง 23
4.1 เปรียบเทียบขนาดของฟาง 29
4.2 แสดงการทำงานของเครื่องอัดฟาง และ ฟางแท่งที่ได้ 30
4.3 ลักษณะของแท่งฟางอัดที่ผลิตได้ 38
4.4 ลักษณะของฟางข้าวที่ใช้ผลิตแก๊สชีวมวล 40
4.5 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศเผาไหม้ ต่อ Q_{out} 42
4.6 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณ CO 43
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับโครงสร้างทางความร้อน 43
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และปริมาณแก๊สชีวมวล Q_{out} 44
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณ CO 45
4.10 ลักษณะเปลวไฟของการติดไฟของแก๊สชีวมวล 45
4.11 ฟางแท่งและก้อนย่อยของฟางแท่งที่ใช้ในการทดลองผลิตแก๊ส 46
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณ CO 46
4.13 ภาพเปลวไฟของแก๊สชีวมวลที่ได้จากฟางก้อนขณะกลางวันและกลางคืน 48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

ก.1 เกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู 55
ก.2 มุมหลีด 55
ก.3 ขนาดต่าง ๆ ของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู 56
ก.4 ตัวอย่างการใช้สกรูส่งกำบังเป็นแม่แรง 57
ก.5 แผนภาพแรงปฏิกิริยาบนเกลียวเนื่องจากการยกน้ำหนัก W 58
ก.6 แรงปฏิกิริยาบนเกลียวสี่เหลี่ยม 60
ก.7 หัวอัด 62
ก.8 แบบอุปกรณ์ทำความร้อน 63
ก.9 อุปกรณ์ทำความร้อน 64
ก.10 อุปกรณ์หรี่ไฟ 64

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

การใช้พลังงานความร้อน ในปัจจุบันส่วนใหญ่แล้วได้จากการนำเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) จากใต้พิภพ เช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานหลัก ยังผลให้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ และส่งผลต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เช่น การสะสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศอันเป็นสาเหตุการเกิดสภาวะเรือนกระจก และทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น หรือ การเกิดซัลเฟอร์ออกไซด์ แล้วกลายเป็นฝนกรด เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีความพยายามในการนำพลังงานทดแทนชนิดต่าง ๆ มาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และ เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ ในประเทศไทย เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่อยู่ในรูปของวัตถุดิบที่เหลือใช้ในธรรมชาติและการเกษตร ซึ่งสามารถนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง ในรูปของของแข็ง หรือนำชีวมวลมาเปลี่ยนรูปเป็นแก๊ส (biomass energy conversion) ก่อนนำไปใช้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะการผลิตแก๊สชีวมวล (gasification process) และการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis process) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลทางความร้อน (thermo-chemical conversion) โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะเชื้อเพลิงชีวมวลจากเชื้อเพลิงแข็ง ให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส เรียกว่า กระบวนการผลิตแก๊ส (gasification) กระบวนการนี้เกิดได้จากการเผาไหม้ชีวมวลในสภาพของของแข็งในห้องเผาไหม้ที่จำกัดปริมาณออกซิเจน เกิดความร้อนบางส่วนขึ้น และความร้อนเหล่านี้จะไปเร่งปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องอื่น ๆ ให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ชีวมวลที่นิยมใช้ เช่น ถ่านไม้ ฟืน และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ เศษกิ่งไม้ เป็นต้น ก๊าซชีวมวลที่ได้จากกระบวนการ gasification เรียกว่า producer gas ซึ่งจะมีค่าความร้อนสูง และ เผาไหม้ได้สะอาด ใช้งานสะดวกกว่า เชื้อเชื้อแข็ง สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ อาทิเช่น การหุงต้ม ใช้ในระบบอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรือแม้แต่ใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊ส (gas engine) เป็นต้น

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของ producer gas โดยทั่ว ๆ ไป จะประกอบด้วย CO ประมาณ 20-30 %, H_2 ประมาณ 5-15%, N_2 ประมาณ 50-60 % โดยที่ค่าความร้อนของ producer gas ที่ได้ประมาณ 10-15% ของแก๊สธรรมชาติ โดยที่ค่าความร้อนจะอยู่ประมาณ 4,000-6,000 kJ/m^3 และมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ให้ความสนใจในการผลิตแก๊สชีวมวลจากวัตถุดิบทางการเกษตรที่ต่างชนิดกันไป แต่การนำเอาฟางข้าว ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีอยู่มากในประเทศไทย [1] มาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สชีวมวลยังมีการศึกษาน้อยมาก

จึงมีแนวคิดในการนำเอาฟางข้าวมาผลิตแก๊สชีวมวลโดยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางข้าว และหาแนวทางในการนำแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ อาทิ นำแก๊สชีวมวลที่ได้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรือ นำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น การทดลองในเอกสารนี้เป็นการทดลองในการผลิตแก๊สชีวมวล หรือ แก๊สผลิตภัณฑ์ (producer gas) โดยมุ่งเน้นถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตแก๊สชีวมวล ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุที่ป้อน และอัตราการเกิด producer gas ซึ่งเป็นแนวทางในการนำไปสู่การพัฒนาการผลิตแก๊สชีวมวลอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างเครื่องอัดฟางและศึกษาสภาวะของการอัดฟางที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวมวล โดยพิจารณาจากค่า bulk density
2. สร้างเตาผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ และศึกษาสภาวะในการผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิของก๊าซชีวมวลที่ได้ ระยะเวลาในการเผาไหม้และคุณภาพของแก๊ส

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แนวทางในการนำพลังงานจากชีวมวลซึ่งหาได้ง่ายในแหล่งเกษตรกรรม มาใช้ให้เป็นประโยชน์
2. สามารถช่วยลดปริมาณของเหลือจากกิจกรรมทางการเกษตร และช่วยลดปริมาณแก๊สมลพิษที่ปลดปล่อยเมื่อทำการเผาฟางข้าวที่เหลือใช้
3. เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาและวิจัยในการนำพลังงานจากสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตร ไปใช้ในกิจกรรมทางการเกษตรต่าง ๆ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องอัดฟาง พร้อมทั้งหาวัสดุประสานที่เหมาะสม หาค่า bulk density ที่เหมาะที่สุดเพื่อนำไปใช้กับเตาเผาชีวมวล
2. ออกแบบ สร้างและทดสอบเตาผลิตแก๊สแบบไหลลงโดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงชนิดก๊าซชีวมวล
3. วิเคราะห์ วิจารณ์ผลการวิจัย สรุปและข้อเสนอแนะ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบผลิตฟางอัดก้อน พร้อมทั้งหาวัสดุประสานที่เหมาะสม
2. ออกแบบ สร้างและทดสอบเตาผลิตก๊าซผลิตภัณฑ์ พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสม
3. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สผลิตภัณฑ์จากชีวมวล

การศึกษาการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์จากชีวมวลชนิดต่าง ๆ นั้นได้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม ทำการศึกษามาพอสมควร และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยหลายชิ้นเริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับฟางข้าวมากขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวพอสังเขปได้ ดังนี้

วิรัช อรุณลักษณดำรง [2] ศึกษาเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น เพื่อการเผาไหม้โดยตรง ใช้เตาผลิตแก๊สสูง 175 cm เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 65 cm ภายในเตาก่อด้วยอิฐทนไฟหนา 10 cm โดยรอบตลอดทั้งเตา พบว่าจุดที่เหมาะสมในด้านขนาดของเชื้อเพลิง และปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมของเตาผลิตแก๊ส อยู่ในช่วงขนาดความยาวของเชื้อเพลิง 2-3 cm ปริมาณการไหลของอากาศ 0.44-0.51 m^3/min ในช่วงนี้ให้ผลผลิตแก๊ส COไม่ต่ำกว่าร้อยละ 28.7

ชัชวาล วนิชผล และสามารถ พิริยะปัญญาพร [3] ศึกษาระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแกลบด้วยระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เซชั่น และการผลิตแก๊สชีวมวลแบบเบดเคลื่อนที่ พบว่าการเผาไหม้แกลบในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ของแกลบอยู่ที่อุณหภูมิเบดในช่วง 700-750°C อยู่ที่ 96-99 % ใช้อากาศเกินพอตั้งแต่ 22 % ขึ้นไป สำหรับการผลิตแก๊สชีวมวลจากแกลบโดยเครื่องผลิตแก๊สชีวมวล พบว่าแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของ CO 16-24 % และยังมี CH_4, H_2 เล็กน้อย และพบว่าอัตราส่วนอากาศ : เชื้อเพลิง ที่ 1:7 แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูงสุดถึง 3.347 kJ/m^3

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีความพยายามที่จะพัฒนาวิธีการแยกสารที่มีประโยชน์ออกจากฟางข้าว [4] เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ แทนการนำกลับไปเป็นปุ๋ยสำหรับเพาะปลูกครั้งต่อไป คณะนักวิทยาศาสตร์ในโครงการวิจัยนี้บอกว่า โครงการสกัดสารที่เป็นประโยชน์จากฟางข้าวจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย จากรายงานพบว่า ในประเทศอังกฤษแห่งเดียวมีฟางข้าวสาลีประมาณ 10 ล้านตัน แต่มีนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ๆ ไม่ถึง 20 % แต่จากการวิจัยล่าสุด พบว่าสามารถจะใช้ประโยชน์ จากฟางข้าวได้ถึง 4 ส่วนสำคัญ คือ ชั้นด้านนอกของฟางข้าวซึ่งมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ชั้นเซลลูโลส ชั้นเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สำหรับการใช้งานของแต่ละชั้นนั้น ชั้นภายนอกของฟางข้าวมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง สามารถนำมาผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ส่วนชั้นเซลลูโลสอาจนำมาทำเป็นกระดาษ ชั้นเฮมิเซลลูโลสนำมาสกัดเป็นวัสดุโพลิเมอร์ในการผลิตสี ในขณะที่ลิกนินนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานไฟฟ้าและความร้อนได้

นอกจากฟางข้าวจะมีองค์ประกอบดังที่กล่าวมาแล้ว จากการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของฟางข้าว พบว่าประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน (N) 0.94 % ฟอสฟอรัส (P) 0.20 % โพแทสเซี่ยม (K) 1.70% [2].

วินัย [5] ได้ทำการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่อง adiabatic oxygen bomb calorimeter ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2015 – 77 โดยนำตัวอย่างเชื้อเพลิงแต่ละชนิดไปบดด้วยเครื่องบดแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงแต่ละขนาด นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาผสมคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดี แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในเครื่อง adiabatic oxygen bomb calorimeter โดยมีเครื่องควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ อ่านค่าความร้อนจากเครื่องตัวอย่างที่ได้จากเครื่องควบคุม ซึ่งค่าความร้อนของตัวอย่างที่ได้นี้ จะเป็นค่าเฉลี่ยของความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่าง ๆ

ชนิดเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (แคลอรี / กรัม)
แกลบดิบ	3,407
ฟางข้าว	4,148
ซังข้าวโพด	4,351
กะลามะพร้าว	4,631
ขี้เลื่อย	4,461
เศษไม้ยางพารา	4,580

จากตารางที่ 2.1 พบว่าฟางข้าวซึ่งให้ค่าความร้อนสูงกว่าแกลบ แต่การลุกไหม้และการมอดของเปลวไฟ เป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง แต่อาจจะนำไปผ่านกรรมวิธีการอัดให้เป็นก้อนแน่น ก็อาจจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมได้ และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงกับการหุงต้มในเตาแต่ละชนิด พบว่า ฟางข้าว เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ได้กับเตาแบบมีปล่องเท่านั้น จุดติดไฟง่าย แต่มีควันและเขม่ามาก เหมาะสำหรับเป็นเชื้อไฟ ไม่เหมาะเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากเปลวไฟมอดเร็ว การใช้งานต้องมัดให้เป็นท่อนจึงจะดีขึ้น เวลาที่ทำให้น้ำเดือดเฉลี่ย 21 นาที ประสิทธิภาพการใช้งาน 2.9 – 6.8 %

McKendry [6] ได้อธิบายถึงกระบวนการและวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปชีวมวล ซึ่งพบว่ากระบวนเปลี่ยนรูปชีวมวล (biomass conversion) มี 2 กระบวนหลักคือ การเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (bio-chemical conversion) และ การเปลี่ยนรูปโดยความร้อน (thermo-chemical conversion) ซึ่งนิยมใช้มาก

ต่อมามีการผลิตแก๊สชีวมวล (gasification) จากขยะเหลือทิ้งโดยเตาผลิตการชนิดไหลลง (downdraft gasifier) โดย Dogru และคณะ [7] พบว่า สามารถผลิตแก๊สชีวมวลได้และ สามารถนำแก๊สชีวมวลที่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 5 kWe โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 40 % นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงมีข้อดี คือ แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีสิ่งปนเปื้อนน้อยทำให้สามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (internal combustion engine) และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้

นอกจากนี้แล้วยังมีการผลิตแก๊สชีวมวลจากเปลือกเมล็ดถั่วจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง โดย Dogru และคณะ [8] พบว่า แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ให้ค่าความร้อน (calorific value) สูงถึง 5 MJ/m^3 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

นอกจากเปลือกถั่วแล้ว ยังสามารถนำเศษไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงเช่นกัน โดย Zainal และคณะ [9] ซึ่งได้ศึกษาถึงอิทธิพลของ equivalence ratio ที่มีผลต่อส่วนประกอบของแก๊สชีวมวล ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลและการผลิตแก๊สชีวมวลพบว่า การเพิ่มขึ้นของการผลิตแก๊สชีวมวล (gas flow rate per unit weight) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า equivalence ratio ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลจะมีค่าสูงที่ค่า equivalence ratio ประมาณ 0.4 และส่วนประกอบของแก๊สชีวมวลจะมีค่าแตกต่างกันไปตาม equivalence ratio

ต่อมา Chen [10] ได้อธิบายเพิ่มเติมว่ายังมีตัวแปร (parameter) อื่นอีกเช่น reactor temperature เวลาของสารระเหยที่อยู่ภายใน reactor และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวมวล และยังพบว่าการผลิตแก๊สชีวมวลโดยกระบวนการ pyrolysis และ gasification ยังมีข้อเสีย คือ สามารถผลิตแก๊สชีวมวลได้ในปริมาณน้อย และเกิดการกัดกร่อน (corrosion) บริเวณท้ายน้ำ (downstream) ของอุปกรณ์

Wu และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาถึงผลทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวมวล ซึ่งพบว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวมวล แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม คือ (1) การกำจัดน้ำมันดิบ (tar) และมลภาวะที่เกิดจากการผลิต (2) การเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวมวลซึ่งจะเป็นการลดค่าไฟฟ้าลง และ (3) จำเป็นต้องคำนึงถึงการเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลด้วย

2.2 เทคโนโลยีการเผาไหม้

เราสามารถนำชีวมวลมาแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เช่น ไอน้ำเพื่อใช้กระบวนการผลิต พลังงานไฟฟ้า กระบวนการที่ใช้เปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงาน โดยทั่วไปมักอาศัยวิธีทางเคมีความร้อน (thermochemical) ซึ่งก็คือ การเผาไหม้ สำหรับเทคโนโลยีการเผาไหม้ เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) และ การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้อากาศ(air gasification)

2.2.1 การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion)

การเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการเผาให้ได้ความร้อนเพื่อเอา แก๊สร้อนไปใช้ในขบวนการผลิต เช่น การอบแห้ง หรือการนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำร้อนที่มีความดันสูงเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า ผลิต

2.2.2 ปฏิกิริยาเคมีความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดการลุกไหม้ และคาย ความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากแต่จะใช้อากาศแทน โดยอากาศจะมีออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วน แก๊สอื่นมีปะปนอยู่น้อยมาก (ในอากาศมี แก๊สออกซิเจน ประมาณร้อยละ 21 และ แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตรหรือแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ23 และแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก) ขั้นตอนของกระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

(1) เริ่มต้นด้วยแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับผิวเชื้อเพลิง

(2) เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

(3) มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาที่ผิว

(4) การทำปฏิกิริยากันระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับแก๊สออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), และธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่บ้าง เช่น ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ดังนั้นเมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO + 110380\,kJ/kg - mol \quad (2.1)$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 283180\,kJ/kg - mol \quad (2.2)$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 286470\,kJ/kg - mol \quad (2.3)$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{ความร้อน} \quad (2.4)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO_2 + \text{ความร้อน} \quad (2.5)$$

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้ มีอยู่ด้วยกัน 4 ประการ คือ

2.2.3.1 อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ตามสมการการเผาไหม้ข้างต้น ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (theoretical air) คือ ปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง และเปลี่ยนคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติอากาศที่ใช้ตามทฤษฎีมีแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เห็นได้อย่างชัดเจน 2 ประการของการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ และส่วนประกอบของคาร์บอนในแก๊สทิ้ง การแก้ปัญหาดังกล่าวคือต้องใช้ปริมาณอากาศมากกว่าเดิมให้เกินพอสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

2.2.3.2 การสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศหรือออกซิเจน คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจน ได้อย่างทั่วถึง ในกรณีนี้ เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นของแข็ง การบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มผิวสัมผัสให้มากขึ้น จะช่วยทำ ให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดได้ดี และรวดเร็วขึ้น

2.2.3.3 อุณหภูมิสูงเพียงพอต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง หรือการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศ นั้นมีผลโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดช้า ๆ ในตอนแรก และจะเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการ เผาไหม้จะเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิง และอากาศให้สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการ สำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นเองได้ และต่อเนื่อง (spontaneous combustion) นั้น จะต้องมีปริมาณความร้อน จากภายนอกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงพอต่อการเผาไหม้ แบบต่อเนื่องได้ โดยปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้เกิดการถ่ายเท ความร้อนได้เร็ว แต่การทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้มากน้อยแค่ไหนนั้น มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดข้อเสียได้เช่นกัน คือทำให้เกิดการ รวมกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่นสารประกอบของไนโตรเจน (NO_x) หรืออาจทำให้เกิดเถ้าหลอมรวมตัวเป็นขี้โลหะ (slag) เกาะติดอยู่บนผนังที่เป็นเหล็กที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อน

2.2.3.4 เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้สมบูรณ์ เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรมีเวลานานพอที่จะทำให้ เกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด แต่การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมดเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก เพราะ ต้องใช้เวลานานมากและเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้เตาเผาประสิทธิภาพสูง หรืออาจต้องมีระบบไหลเวียนของ เชื้อเพลิงกลับมาเผาไหม้ใหม่ (Recirculation system)

2.3 กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้อากาศ (air gasification)

กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลเป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งเกิดจากการ เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในที่ที่มีอากาศจำกัด (หรือ ออกซิเจนไม่เพียงพอ) โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องกลายเป็นแก๊สชีวมวล หรือ แก๊สผลิตภัณฑ์ แก๊สชีวมวลนี้มีองค์ประกอบหลักคือ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2)

2.4 ปฏิกิริยาเคมีความร้อนของการเกิดแก๊สชีวมวล (gasification)

กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลแบบใช้อากาศ เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแก๊ส โดยการเผาไหม้ ในห้องเผาไหม้ที่มีอากาศ (หรือ ออกซิเจน) ปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการเผาไม้อย่างสมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ประเภทต่างๆ ตามมา เช่น ปฏิกิริยารีดักชั่น (reduction) ไพโรไลซีส (pyrolysis) และการอบแห้ง (drying) ขึ้น โดยจะแยกเป็นโซนของปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดังนี้

2.4.1 โซนการเผาไหม้ (combustion zone)

โซนการเผาไหม้ บางทีอาจเรียกว่า โซนออกซิเดชั่น (oxidation zone) อากาศจะถูก ส่งผ่านเข้ามาในบริเวณนี้ และสัมผัสกับเชื้อเพลิงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังสมการ

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad (2.6)$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (2.7)$$

ปฏิกิริยา (2.6) และ (2.7) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ในโซนรีดักชั่น และโซนการกลั่นสลายต่อไป อุณหภูมิในโซนการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 1100-1500°C

2.4.2 โซนรีดักชั่น (reduction zone)

เมื่ออากาศผ่านเข้าสู่โซนการเผาไหม้ และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจน ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้ว ก็จะไหลผ่านสู่โซนรีดักชั่น ดังนั้นปฏิกิริยาหลักในโซนนี้จะเป็นปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน (reduction reaction) อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ระหว่าง 500-900 °C โซนการเผาไหม้นี้จะเปลี่ยน บางส่วนของแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ (คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ) ให้เป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยที่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่เกิดขึ้นไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ จะได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการต่อไป

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \tag{2.8}$$

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \tag{2.9}$$

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2 \tag{2.10}$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \tag{2.11}$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \tag{2.12}$$

ปฏิกิริยา (2.8) เรียกว่า boudouard reaction และปฏิกิริยา (2.9) เรียกว่า water gas reaction เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C และแก๊สที่ได้จาก 2 ปฏิกิริยานี้เป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบ หลักในแก๊สผสมที่ได้จากเตาผลิตแก๊ส แก๊สหลักนี้ก็คือแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งในหลักการแล้วควรมีให้ มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลนี้ขึ้นอยู่กับว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็น แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้มากแค่ไหนในโซนรีดักชั่น การเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วระหว่าง แก๊สกับเชื้อเพลิงแข็ง และพื้นที่ที่แก๊สสัมผัส ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ใส่ในเตาผลิตแก๊สจึงมีผลต่อการเกิดแก๊สเชื้อเพลิง กล่าวคือ ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงใหญ่เกินไปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรจะมีค่าต่ำ เมื่อจะทำการจุดเตาจึงยากกว่า ปกติ และช่องว่างระหว่างชั้นของเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่มากเกินไปทำให้เกิดช่องว่างมาก แก๊สออกซิเจนบางส่วนจะไหลผ่าน บริเวณช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงนี้โดยไม่สัมผัสกับเชื้อเพลิง เป็นผลให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพ ในการผลิตแก๊สต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงเล็กเกินไป จะเกิดความดันสูญเสียในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการขับพัดลม และแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากกว่าปกติ นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงที่ชื้น เล็กเกินไปทำให้เกิดโพรงเล็กๆ ขึ้นในตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง อากาศจะพยายามแทรกขึ้นตามโพรง

เหล่านี้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอากาศที่ไหลขึ้นตามโพรงนี้จึงไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงซึ่งเป็นต้นเหตุให้แก๊สที่ได้มีคุณภาพต่ำลง

จากปฏิกิริยา (2.8) ถ้าอุณหภูมิในโซนรีดักชั่นสูงกว่า 900°C แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะสามารถเปลี่ยนเป็น แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ประมาณ 90% และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า1,100°C แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะเปลี่ยน เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์หมด ดังนั้นประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซนรีดักชั่นในเตาผลิตแก๊ส

เมื่อแก๊สอุณหภูมิสูงจากโซนการเผาไหม้ไหลเข้าสู่โซนนี้ อุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในปฏิกิริยา (2.8) และ (2.9) ปฏิกิริยาไอน้ำกับคาร์บอนเพื่อที่จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยา (2.10) โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ คือประมาณ 500-600°C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญ เพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจน ในแก๊สมีมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น แต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยา กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนตามปฏิกิริยา (2.11) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า water shift reaction ทำให้เกิดความร้อนของแก๊สที่ได้ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระมัดระวังเกี่ยวกับความชื้น ของเชื้อเพลิงที่จะเข้าเตาผลิตแก๊ส ส่วนใหญ่แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในโซนรีดักชั่นนี้จะยังคงเป็นรูปไฮโรเจน แต่อย่างไรก็ตาม บางส่วนของไฮโดรเจน ก็จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนได้เล็กน้อยดังในปฏิกิริยา (2.12) ที่เรียกว่า การผลิตมีเธน (methane production)

2.4.3 โซนการกลั่นสลาย (pyrolysis zone)

ในโซนนี้จะได้รับความร้อนจากโซนรีดักชั่น เพื่อที่จะสลายสาร อินทรีย์ในเชื้อเพลิง ทำให้ได้ เมทานอล กรดน้ำส้ม และน้ำมันดิน (tar) อุณหภูมิในโซนนี้จะประมาณ 200-500°C ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้วคือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาต่อในโซนรีดักชั่น และโซนการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโซนนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{ชีวมวล} + \text{ความร้อน} \rightarrow \text{ถ่าน} + CO + CO_2 + H_2O + CH_4 + C_2H_6 + \text{pyroligneous} + \text{น้ำมันดิน} \qquad (2.13)$$

2.4.4 โซนการอบแห้ง (Drying zone)

ในบริเวณโซนนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้ระเหยออกมาในรูปของไอน้ำ โซนนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100-200°C ดังสมการต่อไปนี้

ชีวมวล + ความร้อน → ชีวมวลแห้ง + น้ำ (2.14)

2.5 ชนิดของเตาผลิตแก๊สชีวมวล

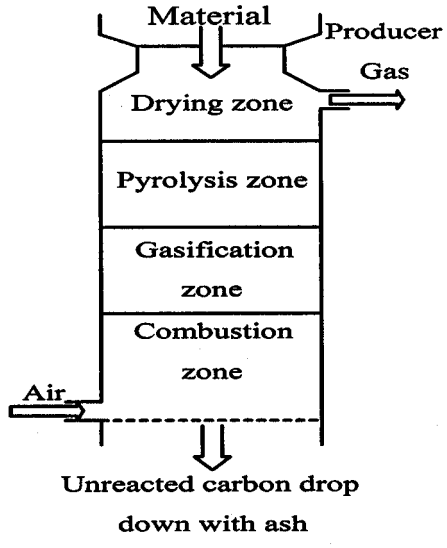
เตาผลิตแก๊สชีวมวล (gasifier) สามารถจำแนกได้หลายวิธีด้วยกัน แต่โดยปกติแล้วชนิดของเตาจะจำแนกตามลักษณะการไหลของ อากาศผ่านเตา ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิดคือ

2.5.1 เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น (updraft gasifier)

เป็นเตาผลิตแก๊สชีวมวลที่ใช้ตั้งแต่เริ่มแรก และเป็นแบบที่ง่ายที่สุด มีลักษณะดังรูปที่ 2.1 เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา อากาศจะถูกดูดผ่านตะแกรง เข้ามาทางด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไปจะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดขึ้น บริเวณนี้เรียกว่าโซนการเผาไหม้ เมื่ออากาศผ่านเข้าไปในโซนการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สที่ผ่านออกจากโซนการเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิสูงและเมื่อเข้าไปในโซนรีดักชั่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนที่มีอยู่อย่างเหลือเฟือ ในบริเวณนี้ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหล เข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นชีวมวล และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500°C ต่อจากนั้นแก๊สที่ยังคงมีอุณหภูมิสูง จะไหลเข้าสู่ชั้นชีวมวลชั้น และระเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวลเหล่านี้จึงทำให้แก๊สที่ออกจากเตามีอุณหภูมิต่ำลง

ข้อดี ของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้นนี้ คือส่วนประกอบไม่ซับซ้อน เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้มากและแก๊สที่ออกมาจากเครื่องจะมีอุณหภูมิไม่สูง

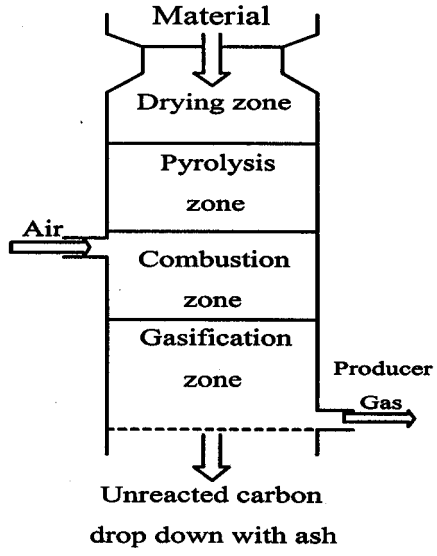
ข้อเสีย ที่สำคัญของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น คือแก๊สที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากมีน้ำมันดินและเขม่า ปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2.1 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น

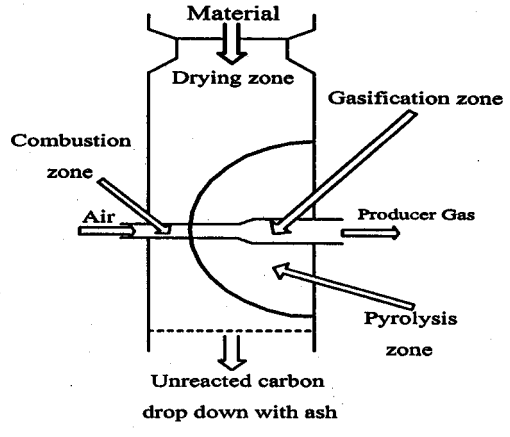
2.5.2 เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลลง (downdraft gasifier)

เตาชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อขจัดปัญหา น้ำมันดินในแก๊สชีวมวล ซึ่งพบมากในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้นโดยเฉพาะ ลักษณะของเตาผลิตแก๊ส ชีวมวลแบบอากาศไหลลงแสดงดังรูปที่ 2.2 อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างโดยผ่านกลุ่มของหัวฉีด (nozzle) บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณโซนการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากโซนการเผาไหม้จะถูกรีดิวซ์ (reduce) ในขณะที่ไหล ลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ในขณะเดียวกันชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบน ของโซนการเผาไหม้จะเกิดการกลั่นสลาย และจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส แก๊สที่ผ่านโซนการเผาไหม้ในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลลง จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมัน ลดลงจนเหลือน้อยกว่า 10 % ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น ดังนั้นแก๊สชีวมวล ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลลง จึงสะอาดกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น



รูปที่ 2.2 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลลง

2.5.3 เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลตามขวาง (crossdraft gasifier)



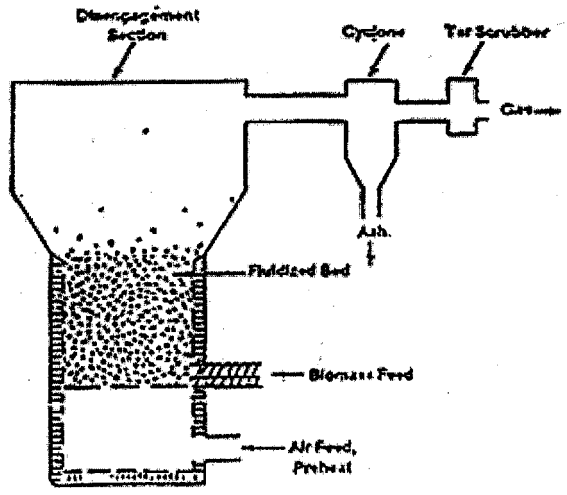
รูปที่ 2.3 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลแบบอากาศไหลตามขวาง

เตาเผาชนิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ โซนการเผาไหม้จะอยู่ถัด จากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็น โซนรีดักชั่น แก๊สที่ออกจากโซนรีดักชั่นแล้วจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้ง รอบ ๆ โซนการเผาไหม้ และโซนรีดักชั่นจะเป็นบริเวณโซนการกลั่นสลาย น้ำมันและน้ำมันดิบที่ได้จากโซนการกลั่นสลายนี้จะผ่านโซนรีดักชั่น ก่อนที่จะออกสู่ภายนอก ทำ

ให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก ทำให้แก๊สเชื้อเพลิง ที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ

2.5.4 เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed gassifier)

เตาผลิตแก๊สชีวมวลที่ได้กล่าวมาแล้วทั้ง 3 แบบข้างต้น การทำงานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก ซึ่งปัญหาที่มักพบบ่อย ๆ คือ ขี้โลหะ (slag) และ ความดันตกคร่อมมากเกินไปเมื่อแก๊สผ่านเตาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการพัฒนาเตาผลิตแก๊สชีวมวล แบบฟลูอิดไดซ์เบด (ดังแสดงในรูปที่ 2.4) เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบดนี้อากาศจะถูกดูดผ่านชั้นของเชื้อเพลิง เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นถึงค่าหนึ่ง ชั้นเชื้อเพลิงที่วางอยู่จะเริ่มลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ในตอนเริ่มติดเตานั้น เบดจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอการเผาไหม้จึงเกิดขึ้นทั่วทั้งบริเวณเตา โดยปกติภายในเตาผลิตแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะใส่สารเฉื่อย อาทิเช่น ทราย หรือ reaction material (หินปูนหรือตัวเร่ง ปฏิกิริยา) ซึ่งช่วยในด้านการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดแก๊ส



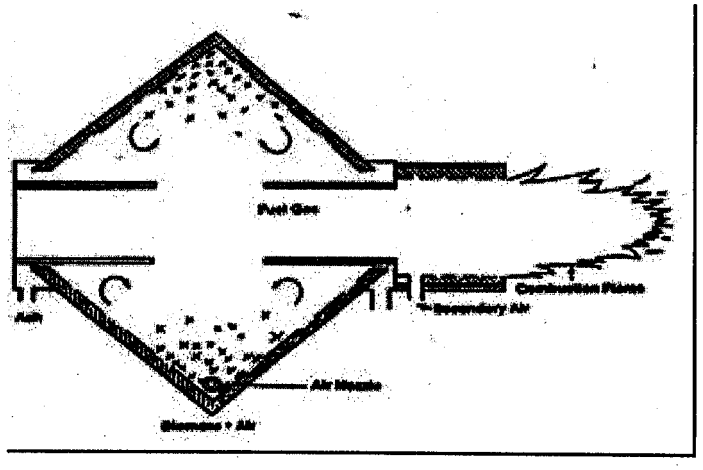
รูปที่ 2.4 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลระบบฟลูอิดไดซ์เบด

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเตาชนิดนี้ คือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สแบบนี้ทำได้ง่าย จึงรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอม เหลวของเถ้า ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของขี้โลหะ ดังนั้นเตาชนิดนี้สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีเถ้ามาก ซึ่งถ้านำไปใช้ใน เตาผลิตแก๊สแบบอื่นอาจเกิดปัญหามาก ข้อเสียของเตาผลิตแก๊สชนิดนี้ คือในแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเตาจะมีปริมาณเถ้าและฝุ่นออกมา เนื่องจากความเร็ว ของอากาศ

ภายในเตาสูงจึงต้องแยกออกโดยใช้เครื่องดักฝุ่น หรือ ถุงดักฝุ่น (cyclone หรือ baghouse) และยังไม่สามารถปรับตัว ให้ตอบสนองกับภาระ (load) ที่เปลี่ยนไปได้ดีนัก การควบคุมการทำงานของเตาค่อนข้างลำบาก ระบบการทำงานยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งมีราคาแพง ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้กับระบบขนาดใหญ่เท่านั้น

2.5.5 เตาแบบ suspended gasifier

การเผาไหม้ในเตาแบบนี้จะมีลักษณะแขวนลอย (suspended) โดยที่จะใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊ส ภายในเตาเผาจะใช้หลักการหมุนเวียนของอากาศในลักษณะแขวนลอยเพื่อที่จะให้แก๊สและเชื้อเพลิงแข็งมีโอกาสสัมผัสให้มากที่สุด เพื่อทำให้ การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กได้แก่ ขี้เลื่อย สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงใน เตาเผานี้ได้ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่2.5 เตา gasifier แบบ suspended

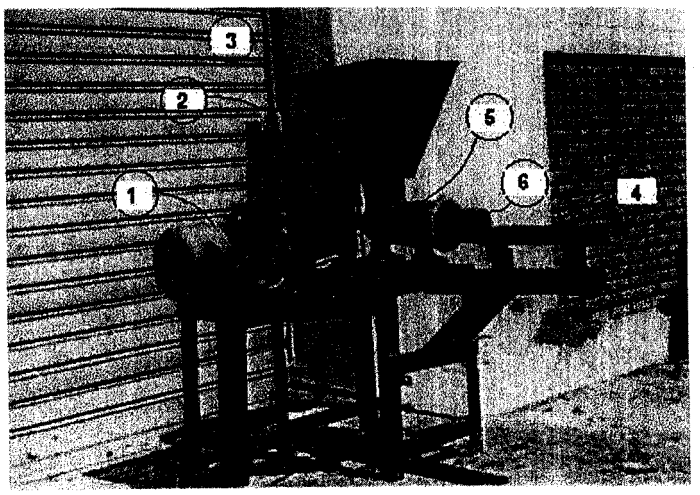
บทที่ 3
วิธีการและเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ สามารถแยกการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ (1) ขั้นตอนของการเตรียมฟางก้อน ศึกษาตัวแปรต่างๆในการอัดฟาง เพื่อเพิ่มความหนาแน่น (bulk density) ให้กับเชื้อเพลิง โดยสร้างเครื่องอัดฟาง และ ได้ทดสอบผลการอัด (2) การศึกษาการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์จากฟางที่อัดได้ โดยได้ออกแบบ สร้างเตาผลิตแก๊ส (gasifier) และทดสอบผลการผลิตแก๊ส

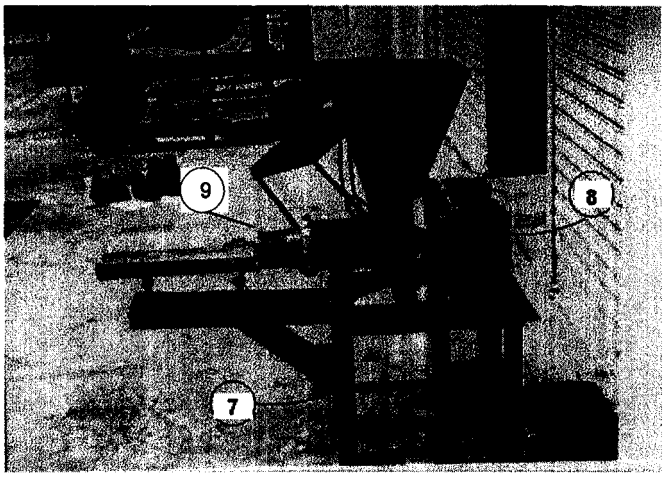
3.1 การเตรียมฟางก้อนก่อนผลิตแก๊สชีวมวล

ก่อนทำการผลิตแก๊สชีวมวล จำเป็นต้องมีการเตรียมฟางข้าวเพื่อให้มีลักษณะเหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวมวล เพื่อการเกิดแก๊สที่มากและต่อเนื่องที่สุด เนื่องจากฟางข้าวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดก้อน นั้นจะมีความหนาแน่น หรือ bulk density ต่ำมาก ไม่เหมาะอย่างยิ่งในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวมวลโดยไม่อัดแน่นเสียก่อน ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่ม bulk density โดยการอัดเป็นก้อนโดยใช้เครื่องอัดฟางดังรูปที่ 3.1 ซึ่งได้ถูกออกแบบและสร้าง โดยคณะผู้วิจัยตามงบประมาณที่พึงมี เครื่องนี้ให้ชื่อว่า (Rice Straw Packer Mechanical Engineering 1 หรือ RSP-ME1) โดยมีรายละเอียดของการออกแบบและแบบของเครื่องอัดฟางนี้ ดังแสดงใน ภาคผนวก ก โดยมีส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องอัดเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนี้

3.1.1 ส่วนประกอบเครื่องอัดฟาง RSP-ME1



(ก) ภาพด้านหน้า RSP-ME1



(ข) ภาพด้านข้าง RSP-ME1

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดฟาง RSP-ME1

โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ คือ

ส่วนที่ 1 คือ มอเตอร์ ใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 แรงม้า ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาที

ส่วนที่ 2 คือ สวิตซ์ เปิด-ปิด เครื่อง

ส่วนที่ 3 คือ ถาดป้อนฟาง

ส่วนที่ 4 คือ รางรองท่อนฟางที่ผ่านการอัด

ส่วนที่ 5 คือ กระบอกอัด

ส่วนที่ 6 คือ หัวอัด

ส่วนที่ 7 คือ โครงสร้างเครื่อง

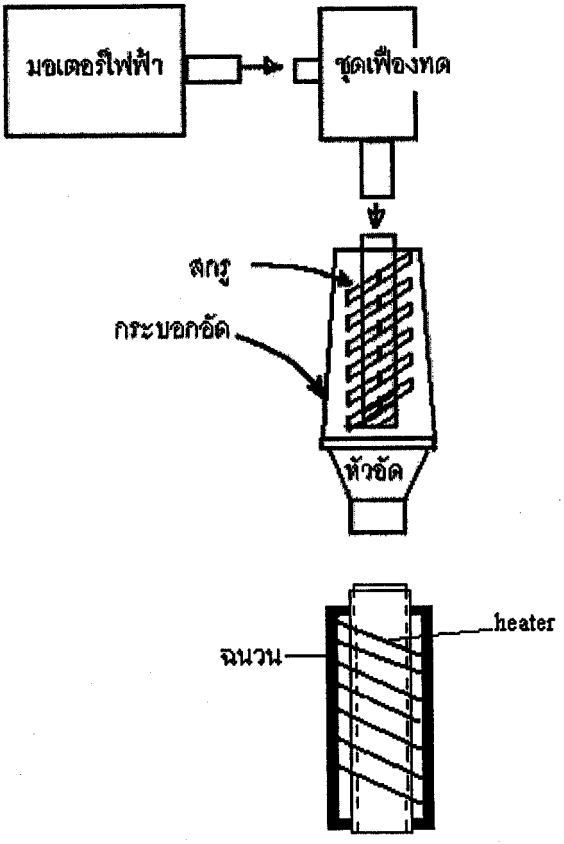
ส่วนที่ 8 คือ ชุดเฟืองทด อัตราทด 1:20

ส่วนที่ 9 คือ ขดลวดความร้อน (heater)

3.1.2 หลักการทำงานของเครื่องอัดฟาง

รูปที่ 3.2 แสดงการทำงานของเครื่องอัดฟาง โดยเครื่องอัดฟางจะอาศัยกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังผ่านชุดเฟืองทด ไปยังสกรู และสกรูจะเป็นตัวป้อน หรือ ผลักดัน ฟางเข้ากระบอกอัดฟางซึ่งเป็นการส่งกำลังอย่างต่อเนื่อง และอัดตัวบริเวณหัวอัดที่มีลักษณะเรียวลง (taper) ทำให้ฟางถูกลดปริมาตรทันทีทันใด ฟางจะถูกอัดผ่านหัวอัดเป็นทรงกระบอก ซึ่งมีขดลวดความร้อนเป็นตัวช่วยทำให้ฟางแห้งลงและประสานให้เกาะตัวกันแน่นขึ้น ไม่คลายตัวเมื่อผ่านออกจากแท่งอัดแล้ว เมื่อได้แท่งเชื้อเพลิงตามความยาวที่ต้องการจึงตัดแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง มอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวต้นกำลัง จะมีขนาดมอเตอร์ 1.5

แรงม้า ทำงานที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,450 รอบต่อนาที เมื่อมอเตอร์ส่งกำลังให้กับสกรู ความเร็วรอบของมอเตอร์จะถูกลดอัตราเร็วโดยเฟืองทดอัตรา 1:20 ซึ่งความเร็วจะลดลงเหลือ 72.5 รอบ/นาที สำหรับความยาวของแท่งเชื้อเพลิงที่เครื่องสามารถอัดได้จะมีความยาวของฟางตั้งแต่ 5 cm. ขึ้นไป สำหรับแท่งเชื้อเพลิงความยาวประมาณ 35 cm. จะใช้เวลาในการอัดตัวประมาณ 3-5 นาทีต่อแท่ง

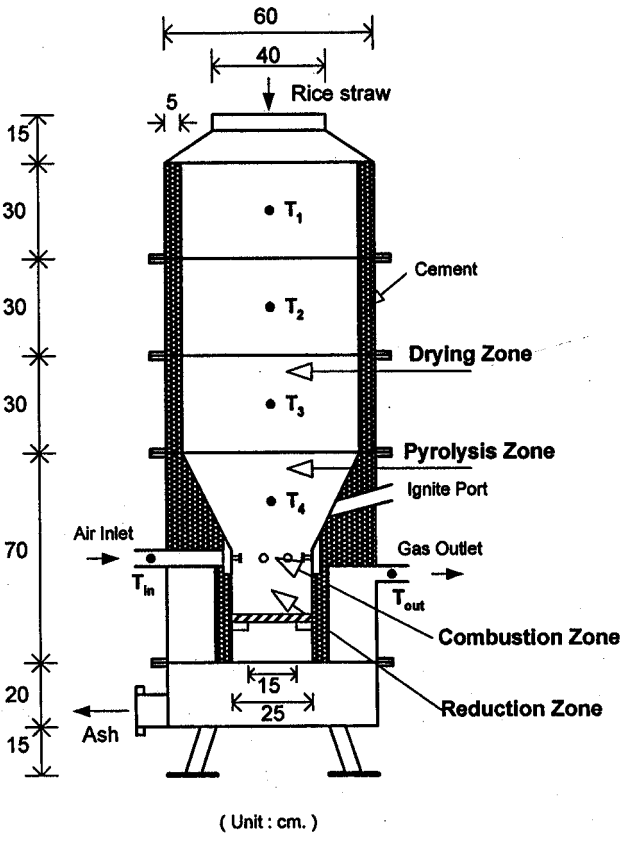


รูปที่ 3.2 การทำงานของเครื่องอัดฟาง

3.2 การผลิตแก๊สชีวมวล

ในการผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางข้าวนั้นได้ใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (down draft gasifier) ซึ่งได้ทำการออกแบบและสร้าง โดยคณะผู้วิจัย และให้ชื่อ ว่า DDG-ME2 (Down Draft Gasifier Mechanical Engineering 2) ขนาดและส่วนประกอบหลักของตัวเตา แสดงรูปที่ 3.3 ส่วนรายละเอียดในการออกแบบของตัวเตาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตแก๊สดังนี้คือ

3.2.1 เตาผลิตแก๊สชีวมวล DDG-ME2

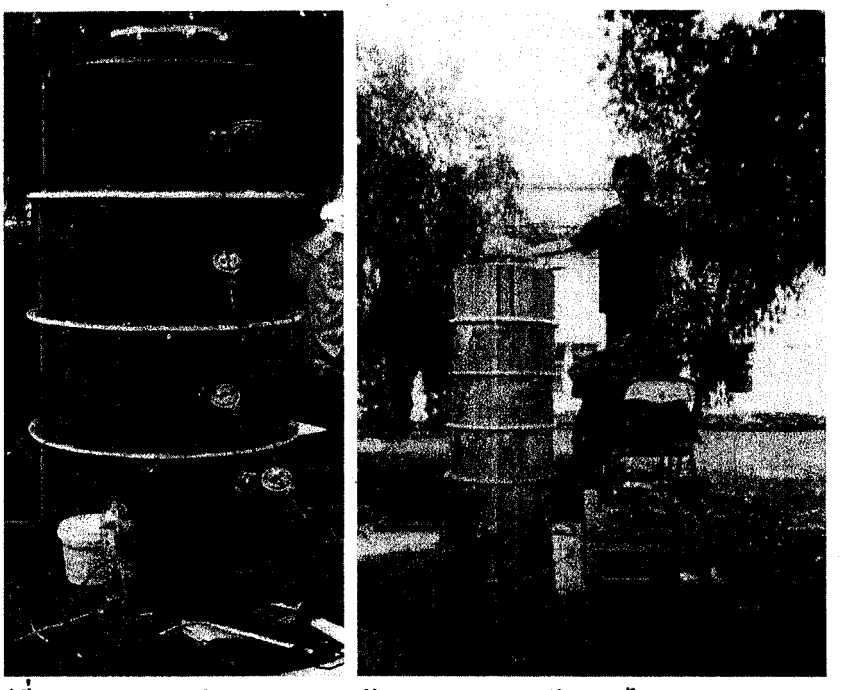


รูปที่ 3.3 ขนาดและส่วนประกอบหลักของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง DDG-ME2

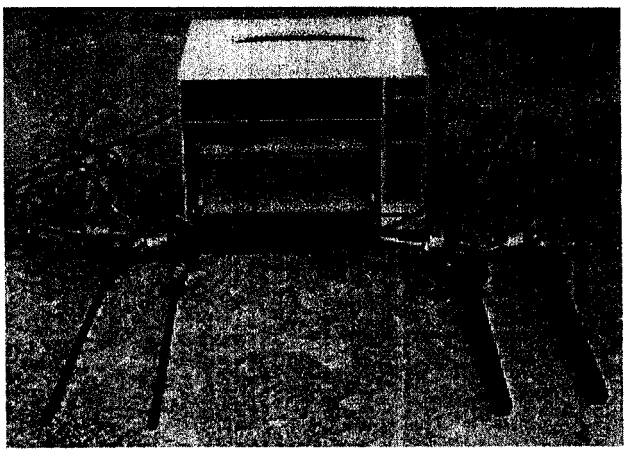
1. ตัวเตา

ตัวเตาทำด้วยเหล็กมีความหนา 2 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์ภายนอก 60 cm. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์ภายใน 40 cm. ภายในผนังเตามีฉนวนทำมาจากอิฐทนไฟหนา 10 cm. เตามีความสูง 2.05 m. โดยเตามีลักษณะเป็นชั้น ซึ่ง 3 ชั้นแรก สูงชั้นละ 30 cm. ภายในจะบรรจุฟางข้าว ชั้นต่อมาสูง 60 cm. เป็น

ชั้นของห้องเผาไหม้ ภายในจะมีความสูง 40 cm. โดยอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถูกจ่ายด้านข้างบริเวณด้านล่างของกรวย ท่อจ่ายอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm. ด้านล่างถัดจากฐานกรวยมีตะแกรงกั้นฟางข้าวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Gasification ให้มากที่สุด แก๊สชีวมวลที่ได้จะไหลผ่านตะแกรงและไหลออกนอกตัวเตาโดยท่อขนาด 5 cm . บริเวณด้านข้างเตา (ดังแสดงในรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 ขนาดและส่วนประกอบหลักของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง DDG-ME2



รูปที่ 3.5 K-type thermocouple และ data logger

2. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ ใช้ Thermocouple type k ในการทดลอง ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิตามแนวยาวของเตา (หรือ ที่ความสูงระดับต่างๆ) จำนวน 5 ตำแหน่ง ที่ T_1 ถึง T_4 และอุณหภูมิของอากาศทางเข้าที่ T_{in} โดยแสดงผลที่ data logger (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)

3. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

ในงานวิจัยนี้ ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ชนิด hot wire, portable air flow meter ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ทำหน้าที่วัดความเร็วของอากาศที่ท่อทางเข้าและทางออกโดยทำการวัดแบบจุด ที่ท่อทางเข้าและออกจะมีการเจาะรูเพื่อที่จะให้ Air flowmeter ได้ทำการวัดความเร็วของอากาศ พร้อมทั้งยังสามารถที่จะวัดอุณหภูมิทางเข้าของอากาศและทางออกของแก๊สได้ด้วย

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

4. อุปกรณ์วัดปริมาณแก๊สไอเสีย

ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ จะถูกวัด โดยใช้ Exhaust gas analyser (ดังแสดงในรูปที่ 3.7) ทำหน้าที่วัดปริมาณแก๊สว่า มีแก๊สชนิดใดผลิตออกมาจากเตา DDG-ME2 บ้าง เช่น CO, CO_2, O_2 และ CH_4 อีกทั้งยังสามารถวัดอุณหภูมิของอากาศที่ตรงขาออก (T_{out})ได้ด้วย

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดแก๊สผลิตภัณฑ์และการติดตั้งขณะทดลอง

5. เครื่องอัดอากาศ

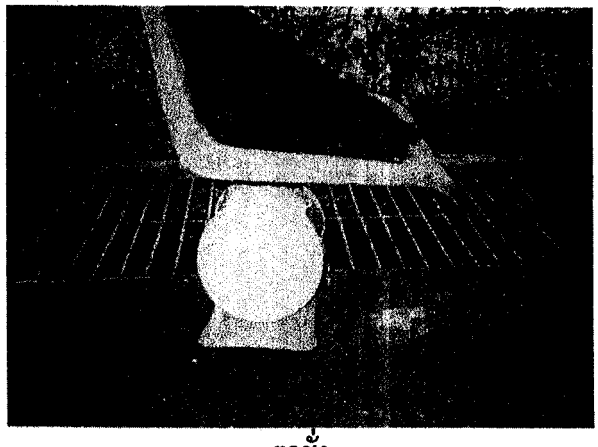
เครื่องอัดอากาศ (Blower) ใช้ทำหน้าที่ในการจ่ายอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ภายในเตา เป็น blower ชนิดหอยโข่ง ได้ทำการทดลองใช้ทั้ง แบบใบพัดคู่ (twin blade) และแบบใบพัดเดี่ยว (single blade) เพื่ออัดอากาศในปริมาฯที่มากขึ้นได้ (ดังแสดงในรูปที่ 3.8)

รูปที่ 3.8 เครื่องอัดอากาสชนิดหอยโข่ง แบบใบพัดคู่ และใบพัดเดี่ยว

ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ชุดกรองแก๊สผลิตภัณฑ์ เครื่องย่อยฟาง และ ตาชั่ง แสดงในรูปที่ 3.8

ชุดกรองแก๊สผลิตภัณฑ์

เครื่องย่อยฟาง



ตาชั่ง

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์อื่น ๆ ในการทดลอง

3.2.2 วิธีการทดลอง

1.จัดเตรียมและตรวจสอบอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ทั้งเทอร์โมคับเปิ้ล อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศแบบจุด และทำการตรวจสอบเตาโดยดูว่ามีบริเวณไหนบ้างที่มีการรั่ว หรือไม่ เพื่อความพร้อม

2.ทำการวัดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมรอบข้างและบันทึกค่าต่างๆ

3.ทำการชั่งน้ำหนักของฟางข้าวก่อนที่จะนำฟางข้าวบรรจุลงเตา

4.ทำการเปิดวาล์วให้มีการไหลเข้าของอากาศเต็มที่เพื่อที่จะช่วยให้เกิดการจุดติดไฟของฟางข้าว

5.จุดไฟโดยใช้หัวเชื่อมแก๊สเป็นตัวจุดไฟในตอนแรกที่ ignition port หลังจากนั้นทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการทำการศึกษา

6.ปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 5 นาทีแล้วทำการบันทึกข้อมูลต่างๆ ในตารางบันทึกผลการทดลอง และตรวจสอบว่าแก๊สที่ออกมามีการติดไฟหรือไม่ โดยการใช้ไฟล่อที่ปลายท่อแก๊สออกให้ติดไฟ และจะทำการบันทึกข้อมูลต่อจากครั้งแรกและครั้งต่อๆไป เป็นระยะเวลาที่ห่างกันครั้งละ 5 นาทีจนเชื้อเพลิงหมด

7. เก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ ไปวิคราะห์ หาค่าความร้อน

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์

การทดลองของการวิจัยนี้ สามารถแบ่งมากทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองผลิตฟางอัดก้อน

การทดลองการอัดฟางก้อนโดยเครื่องอัดฟางก้อนนี้ เพื่อหาความสามารถของการอัดฟางก้อนของเครื่องอัดฟาง และหาคุณลักษณะหรือสภาวะของฟางก้อนที่เหมาะสม ในการนำมาใช้เป็นเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวมวล ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1

4.1.1 การทดลองที่ 1

1. เตรียมฟางสำหรับนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ฟางที่ไม่ผ่านการสับ
2. ชั่งน้ำหนัก 1000 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง
3. ชั่งแป้งมัน 300 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 กรัม คนให้เข้ากันแล้วต้มจนน้ำแป้งสุก
4. ผสมแป้งที่ต้มจนสุกเหนียวลงกับฟางที่เตรียมไว้ คลุกให้ส่วนผสมเข้ากันเติมน้ำเล็กน้อยระหว่างที่ผสมจะช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้น
5. ทำเช่นเดียวกัน โดยใช้แป้ง 400 , 500 กรัม รวมเป็น 3 ตัวอย่าง
6. สังเกตการทำงานของเครื่องอัด

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 อัดฟางที่ไม่ผ่านการสับ

ลำดับที่	ฟาง (g)	แป้ง (g)	น้ำ (g)	ผงถ่าน (g)	อัตราส่วน ฟาง:แป้ง:น้ำ:ผงถ่าน	เวลา (min)	ผลการอัด
1	1000	300	1000	-	0.43 : 0.14 : 0.43 : 0	-	อัดไม่ออก
2	1000	400	1000	-	0.42 : 0.16 : 0.42 : 0	-	อัดไม่ออก
3	1000	500	1000	-	0.40 : 0.20 : 0.40 : 0	-	อัดไม่ออก

4.1.2 การทดลองที่ 2

1. เตรียมฟางสำหรับนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ฟางที่ผ่านการย่อย ชั่งน้ำหนัก 1000 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง
2. ชั่งแป้งมัน 300 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 กรัม คนให้เข้ากันแล้วต้มจนน้ำแป้งสุก
3. ผสมแป้งที่ต้มจนสุกเหนียวลงกับฟางที่เตรียมไว้ คลุกให้ส่วนผสมเข้ากันเติมน้ำเล็กน้อยระหว่างที่ผสมจะช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้น
4. ทำเช่นเดียวกัน โดยใช้แป้ง 300 , 400 และ 500 กรัม
5. สังเกตการทำงานของเครื่องอัด

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 อัดฟางที่ผ่านการสับ

ลำดับที่	ฟาง (g)	แป้ง (g)	น้ำ (g)	ผงถ่าน (g)	อัตราส่วน ฟาง:แป้ง:น้ำ:ผงถ่าน	เวลา (min)	ผลการอัด
1	1000	300	1000	-	0.43 : 0.14 :0.43 : 0	-	อัดไม่ออก
2	1000	400	1000	-	0.42 : 0.16 : 0.42 :0	-	อัดไม่ออก
3	1000	500	1000	-	0.40 : 0.20 : 0.40 :0	-	อัดไม่ออก

4.1.3 การทดลองที่ 3

1. เตรียมฟางสำหรับนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียดชั่งน้ำหนัก 1000 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง
2. ชั่งแป้งมัน 300 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 กรัม คนให้เข้ากันแล้วต้มจนน้ำแป้งสุก
3. ผสมแป้งที่ต้มจนสุกเหนียวลงกับฟางที่เตรียมไว้ คลุกให้ส่วนผสมเข้ากันเติมน้ำเล็กน้อยระหว่างที่ผสมจะช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้น
4. ทำเช่นเดียวกัน โดยใช้แป้ง 300 , 400 และ 500 กรัม
5. ทำการจับเวลาเป็นความยาวต่อเวลา(ความยาวประมาณ10cm)
6. สังเกตการทำงานของเครื่องอัด

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 อัดฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียด

ลำดับที่	ฟาง (g)	แป้ง (g)	น้ำ (g)	ผงถ่าน (g)	อัตราส่วน ฟาง:แป้ง:น้ำ:ผงถ่าน	เวลา (min)	ผลการอัด
1	1000	300	1000	-	0.43 : 0.14 : 0.43 : 0	-	อัดไม่ออก
2	1000	400	1000	-	0.42 : 0.16 : 0.42 : 0	32	เป็นแท่ง
3	1000	500	1000	-	0.40 : 0.20 : 0.40 : 0	20	ไม่เป็นแท่ง

4.1.4 การทดลองที่ 4

1. เตรียมฟางสำหรับนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียด ชั่งน้ำหนัก 1000 กรัม จำนวน 6 ตัวอย่าง
2. ชั่งแป้งมัน 400 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 กรัม ผสมถ่านบด 200 300 400 กรัม เป็น จำนวน 3 ตัวอย่าง คนให้เข้ากันแล้วต้มจนน้ำแป้งสุก
3. ผสมแป้งที่ต้มจนสุกเหนียวลงกับฟางที่เตรียมไว้ 3 ตัวอย่าง คลุกให้ส่วนผสมเข้ากันเติมน้ำเล็กน้อยระหว่างที่ผสมจะช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้น
4. ชั่งแป้งมัน 500 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 กรัมผสมถ่านบด 200 300 400 กรัม เป็น จำนวน 3 ตัวอย่าง คนให้เข้ากันแล้วต้มจนน้ำแป้งสุก
5. ผสมแป้งที่ต้มจนสุกเหนียวลงกับฟางที่เลือกอีก 3 ตัวอย่าง คลุกให้ส่วนผสมเข้ากันเติมน้ำเล็กน้อยระหว่างที่ผสมจะช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้น
6. ทำการจับเวลาเป็นความยาวต่อเวลา(ความยาวประมาณ10cm)
7. บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 4

ตารางที่ 4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ใช้ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียด

ลำดับที่	ฟาง (g)	แป้ง (g)	น้ำ (g)	ผงถ่าน (g)	อัตราส่วน ฟาง : แป้ง : น้ำ:ผงถ่าน	เวลา (sec)	ผลการอัด
1	1000	400	1000	200	0.38 :0.16 : 0.38 : 0.08	-	อัดไม่ออก
2	1000	400	1000	300	0.37 : 0.14 : 0.37 : 0.12	-	ไม่เป็นแท่ง
3	1000	400	1000	400	0.36 : 0.14 : 0.36 : 0.14	70	เป็นแท่ง
4	1000	500	1000	200	0.37 : 0.18 : 0.37 : 0.08	-	ไม่เป็นแท่ง
5	1000	500	1000	300	0.36 : 0.18 : 0.36 : 0.1	54	เป็นแท่ง
6	1000	500	1000	400	0.34: 0.18 : 0.34 : 0.14	36	เป็นแท่ง

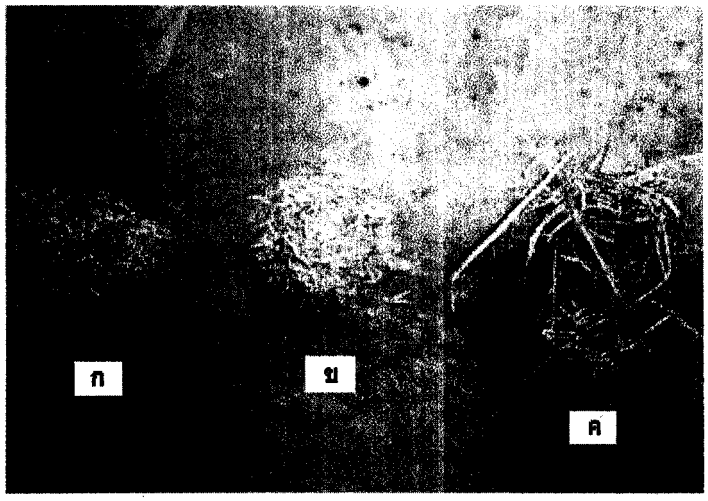
หมายเหตุ

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1 ใช้ฟางที่ไม่ผ่านการย่อยดังภาพที่ 4.1ค.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2 ใช้ฟางที่ผ่านการย่อยดังภาพที่ 4.1ข.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 ใช้ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียดดังรูปที่ 4.1ก.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4 ใช้ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียดดังรูปที่ 4.1ก.

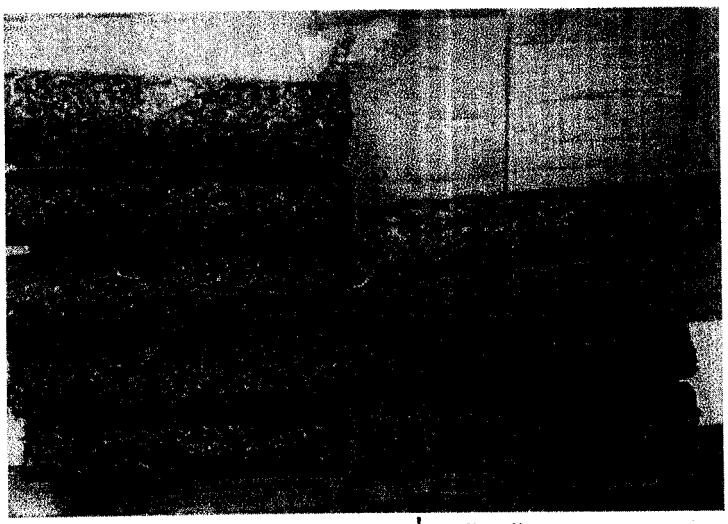


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดของฟาง

ก = ฟางที่ผ่านการย่อยและปั่นละเอียด ข = ฟางที่ผ่านการย่อย ค = ฟางที่ไม่ผ่านกาย่อย

จากการทดลองทั้ง 4 การทดลองใช้ฟางที่มีลักษณะต่างกันคือ ใช้ฟางไม่สับ ฟางสับ ฟางสับละเอียด จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือทดลองสามครั้ง คือ โดยเพิ่มน้ำแป้งขึ้นตามลำดับลักษณะของฟางที่ไม่สับ ผลการทดลองที่ 1 อัดไม่ออกจะเห็นได้ว่าลักษณะฟางที่ไม่สับจะมีแรงเสียดทานมากและฟางไม่สับการยุบตัวน้อย ทำให้อัดไม่ออก ผลการทดลองที่ 2 โดยใช้ฟางสับซึ่งการทดลองคล้ายกับการทดลองแรกซึ่งจะเพิ่มค่าของกาวแป้งขึ้นตามลำดับการทดลองนี้ให้ผลเหมือนเดิมคืออัดไม่ออกจากการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าลักษณะของฟางที่ถูกอัดทำให้ของเหลวคือกาวแป้งที่ไหลออกมา ทำให้อัดไม่ออกเพราะในกระบอกอัดมาก การทดลองที่ 3 ทำการทดลองเหมือนเดิมกับการทดลองครั้งแรกแต่ฟางที่ใช้เป็นฟางสับละเอียด ผลที่ได้จากการทดลองที่คือ ลำดับที่ 2 อัดออกเป็นแท่ง การวิเคราะห์จะเห็นไดว่าฟางที่ใช้มีลักษณะที่ละเอียดและการเรียงตัวของฟางสับละเอียดนั้นสามารถเรียงตัวกันทำให้อัดออก ลักษณะทีสังเกตคือกาวแป้งจะถูกรีดออกตามรอยต่อของกระบอกอัดและอีกส่วนหนึ่งจะออกมาตามส่วนผสมและทำให้แรงเสียดทานน้อยยอกว่าฟางชนิดที่ไม่มีการสับละเอียด การทดลองลำดับที่ 4 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของก้อนฟางไม่เป็นแท่งเนื่องจากกาวแป้งมาก การทดลองครั้งที่ 4 นั้นเป็นการทดลองนำค่าที่อัดออกเป็นแท่งในการทดลองครั้งที่ 3 มาทดลองซึ่งจะเห็นได้ว่าทำการทดลองทำ 6 ลำดับด้วยกันซึ่งในลำดับที่ 3 5 6 ลักษณะของก้อนฟางมีลักษณะเป็นแท่ง จะเห็นว่าส่วนผสมนั้นมีการจับตัวกันดีและการใช้เวลาในการอัดนั้นต่างกันเพราะผสมที่ต่างกัน รูปที่ 4.2 แสดงการทำงานของเครื่องอัดฟาง และ ฟางแท่งที่ได้

(ก) ฟางแห่งขณะถูกอัดออกมาจากเครื่องอัดฟาง RSP-ME1



(ข) ฟางแห่งเมื่อแห้งแล้ว

รูปที่ 4.2 แสดงการทำงานของเครื่องอัดฟาง และ ฟางแห่งที่ได้

การทดลองช่วงที่ 2

จากการทดลองช่วงที่ 1ได้ทำการทดลองที่มีส่วนผสมของ ฟาง :แป้งกาว:ผงถ่าน โดยแบ่งชนิดของฟางเป็น ฟางหยาบ ฟางสับ ฟางปั่นละเอียด ในการทดลองต่อไปนี้เป็นการทดลองที่ใช้ฟางสับ เพียงอย่างเดียว แต่เพิ่มรำข้าวไปในส่วนผสม

4.1.5 การทดลองที่ 5

1. เตรียมส่วนผสมสำหรับนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ฟางผ่านการย่อย รำข้าว และถ่านบดละเอียด
2. เตรียมกาวแป้ง กาวแป้งเปียกได้จากการต้มส่วนผสมระหว่างน้ำกับแป้งมัน ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการต้มประมาณ 10 นาที เคี่ยวให้แป้งมีลักษณะเหนียวข้นและใสจากนั้นจึงนำกาวเทลงผสมกับฟางที่เตรียมไว้ในถังผสม
3. นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ทั้งหมด คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากัน
4. ทำการจับเวลาเป็นความยาวต่อเวลา(ความยาวประมาณ40cm)
5. สังเกตการณ์ทำงานของเครื่องอัดและส่วนผสม

ทำการทดสอบโดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง ฟางสับ : รำข้าว: แป้งกาว : ถ่าน ดังนี้

ฟางสับ : รำข้าว: แป้งกาว: ถ่าน

ส่วนผสม A. 0.15: 0:0.77:0.08 (หน่วยกิโลกรัม)

ส่วนผสม B. 0.15: 0.08: 0.77 : 0

ส่วนผสม C. 0.10: 0.10: 0.80 :0

ส่วนผสม D. 0.1 : 0.15 :0.75 : 0

ส่วนผสม E. 0.09: 0.15 :0.74 :0.02

ผลการทดลองที่ 5

ตารางที่ 4.5 ตารางบันทึกลักษณะทางกายภาพก้อนฟาง

ส่วนผสม	ฟาง (kg)	รำข้าว (kg)	กาว (kg)	ถ่าน (kg)	เวลา/ ความยาว (Sec/m)	ลักษณะ ทาง กายภาพ	ความ หนาแน่น (kg/m3)
A	0.15	0	0.77	0.08	37	แตก	536
B	0.15	0.08	0.77	0	32	แตก	370.98
C	0.10	0.10	0.80	0	28	เป็นก้อน	306
D	0.10	0.15	0.75	0	29	เป็นก้อน	396
E	0.09	0.15	0.74	0.02	30	เป็นก้อน	380

นำแท่งฟางที่ได้ผึ่งแดดจนแห้งสนิท (เวลาประมาณ 1 วัน) จากนั้นเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปทดลองค่าความร้อน จากเครื่อง Bomb calorimeter แบบ 1341

4.1.6 ผลการทดลองที่ 6

ตัวอย่างที่อัดออกที่ส่วนผสมต่าง ๆ นำมาทดลองหาปริมาณความร้อนเพื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อน โดยใช้ตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง ผลที่ได้ตามตาราง

ตารางที่ 4.6 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน A

Time		Temperature	Remark	เชื้อเพลิง
minute	second	°C		
0	0	28	เริ่มกวนน้ำ	เชื้อเพลิงก้อน ชนิด A
1	0	28		น้ำหนัก 1กรัม
2	0	28		ลวดยาว 10 ซม
3	0	28		ฟิวส์ไม่ละลาย 2.3 ซม
4	0	28		
5	0	28	เริ่มกดสวิทช์	
5	30	28.1		
6	0	28.4		
6	30	28.8		
7	0	28.9		
7	30	28.9		
8	0	28.9		
8	30	28.9		
9	0			

ตารางที่ 4.7 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน B

Time		Temperature	Remark	เชื้อเพลิง
minute	second	C		
0	0	29.5	เริ่มกวนน้ำ	เชื้อเพลิงก้อน ชนิด B
1	0	29.5		น้ำหนัก 1กรัม
2	0	29.5		ลวดยาว 10 ซม
3	0	29.5		ฟิวส์ไม่ละลาย 3 ซม
4	0	29.5		
5	0	29.5	เริ่มกดสวิทช์	
5	15	29.5		
5	30	29.6		
5	45	29.9		
6	0	30		
6	15	30.2		
6	30	30.5		
6	45	30.7		
7	0	30.8		
7	15	30.8		
7	30	30.9		
7	45	30.9		
8	0	30.9		
8	15	30.9		
8	30	30.9		
8	45	30.9		
9	0	30.9		

ตารางที่ 4.8 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน C

Time		Temperature	Remark	เชื้อเพลิง
minute	second	°C		
0	0	29.8	เริ่มกวนน้ำ	เชื้อเพลิงก้อน ชนิด C
1	0	29.8		น้ำหนัก 1กรัม
2	0	29.8		ลวดยาว 10 ซม
3	0	29.8		ฟิวส์ไม่ละลาย 2.3 ซม
4	0	29.8		
5	0	29.8	กดสวิทช์	
5	15	29.9		
5	30	30		
5	45	30.1		
6	0	30.2		
6	15	30.6		
6	30	30.7		
6	45	3.9		
7	0	31		
7	15	31		
7	30	31		
7	45	31		
8	0	31		
8	15	31		
8	30	31		
8	45	31		
9	0	31		

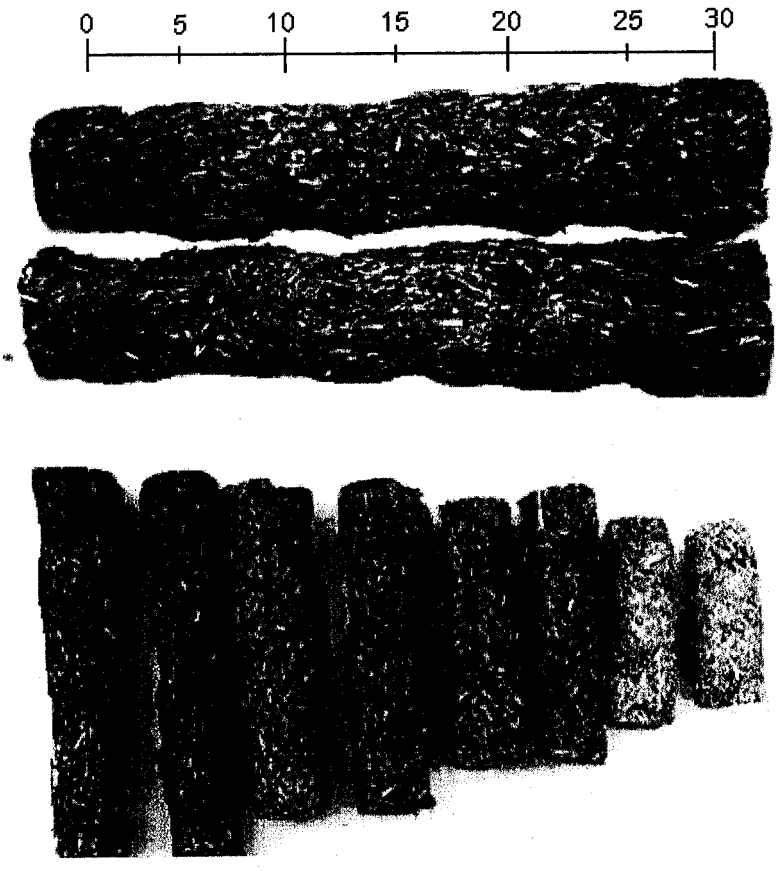
ตารางที่ 4.9 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน D

Time		Temperature	Remark	เชื้อเพลิง
minute	second	°C		
0	0	29.1	เริ่มกวนน้ำ	เชื้อเพลิงก้อน ชนิด D
1	0	29.1		น้ำหนัก 1กรัม
2	0	29.1		ลวดยาว 10 ซม
3	0	29.1		ฟิวส์ไม่ละลาย 5.7 ซม
4	0	29.1		
5	0	29.1	กดสวิทช์	
5	15	29.1		
5	30	29.2		
5	45	29.6		
6	0	29.9		
6	15	30.0		
6	30	30.2		
6	45	30.5		
7	0	30.6		
7	15	30.7		
7	30	30.8		
7	45	30.8		
8	0	30.8		
8	15	30.8		
8	30	30.8		
8	45	30.9		
9	0	30.9		

ตารางที่ 4.10 ชนิดเชื้อเพลิงก้อน E

Time		Temperature	Remark	เชื้อเพลิง
minute	second	°C		
0	0	28.9	เริ่มกวนน้ำ	เชื้อเพลิงก้อน ชนิด E
1	0	28.9		น้ำหนัก 1กรัม
2	0	28.9		ลวดยาว 10 ซม
3	0	28.9		ฟิวส์ไม่ละลาย 5.5 ซม
4	0	28.9		
5	0	28.9	กดสวิทช์	
5	15	28.9		
5	30	29		
5	45	29.2		
6	0	29.6		
6	15	29.9		
6	30	30.1		
6	45	30.2		
7	0	30.5		
7	15	30.6		
7	30	30.7		
7	45	30.8		
8	0	30.8		
8	15	30.8		
8	30	30.8		
8	45	30.8		
9	0	30.8		

ผลการทดลองช่วงที่ 2 เป็นการทดลองโดยเปลี่ยนส่วนผสมซึ่งต่างจากการทดลองช่วงที่ 1คือการเพิ่มรำข้าว และลักษณะฟางที่ใช้เป็นฟางสับความแตกต่างจากการทดลองครั้งที่ 1 คือเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟางน้อยกว่าเพราะไม่ต้องทำการปั่นละเอียด ลดค่าใช้จ่ายลง รวมไปถึงการใช้กาวแป้งเป็นส่วนผสมที่สำคัญ ส่วนผสมทั้ง 5 ส่วนผสมที่มีถ่านผสมจะทำให้เหนียวและจับตัวกันดีขึ้น ส่วนผสมที่ต่างกันทั้งนี้ลักษณะการป้อนส่วนผสมต้องทำการป้อนอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาแรกของการอัดจะต้องนำส่วนผสมที่อัดออกมาโดยที่ส่วนผสมผ่านอุปกรณ์ทำความร้อนจะนำกลับมาอัดอีกเพื่อให้น้ำที่อยู่ในตัวของกาวแป้งแห้งไปยิ่งนำส่วนผสมที่อัดออกโดยผ่านอุปกรณ์ทำความร้อนจะยิ่งทำให้ก้อนฟางจับตัวกันดีและใช้ระยะเวลาในการผึ่งแดดมีระยะเวลาที่สั้นลง รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของแท่งฟางอัดที่ผลิตได้



รูปที่ 4.3 ลักษณะของแท่งฟางอัดที่ผลิตได้

4.1.7 ค่าความร้อนของฟางอัดแท่ง

เมื่อนำแท่งฟางก้อนไปหาค่าความร้อน โดยใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์ จะได้ค่าความร้อนของส่วนผสมแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าส่วนผสม E ให้ค่าความร้อนสูงเพราะมีผงถ่านผสมและประสานเป็นก้อนดี ในขณะที่ความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง น่าจะเหมัสมที่จะนำไปเป็นเชื้อพลิงในเตาผลิตแก๊สได้ดี

ตารางที่ 4.11 ตารางผลการทดลองหาค่าความร้อน

ส่วนผสม	ฟาง (kg)	รำข้าว (kg)	กาว (kg)	ถ่าน (kg)	เวลา/ความยาว (Sec/m)	ลักษณะทางกายภาพ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าความร้อน (kcal/kg)
A	0.15	0	0.77	0.08	37	แตก	536	4251.39
B	0.15	0.08	0.77	0	32	แตก	370	3380.30
C	0.10	0.10	0.75	0	28	เป็นก้อน	306	3136.09
D	0.1	0.15	0.75	0	29	เป็นก้อน	396	4356.91
E	0.09	0.15	0.74	0.02	30	เป็นก้อน	380	4599.05

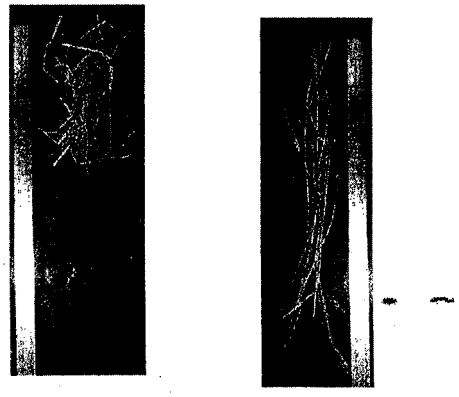
4.1.8 สรุปผลการผลิตฟางอัดแท่ง

จากผลการทดลองช่วงที่ 1 แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดจากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ฟางปั่นละเอียดมี 3 ส่วนผสม คือ 0.36:0.14:0.36:0.14 ส่วนผสม 0.36:0.18:0.34:0.14 และส่วนผสม 0.34: 0.18: 0.34:0.14 ซึ่งเป็นส่วนผสมถ่านบดในอัตราส่วนระหว่างฟางต่อแป้งต่อน้ำต่อถ่าน จะมีลักษณะเป็นแท่งที่คงรูป ผิวเรียบ และแน่นมากกว่าแท่งฟางที่ไม่ได้ผสมถ่าน สำหรับผลการทดลองที่ 1 และผลการทดลองที่ 2 ใช้ฟางที่ไม่ผ่านการปั่นละเอียด การทดลองไม่สามารถทำให้เป็นแท่งได้

จากผลการทดลองช่วงที่ 2 จากตารางที่ 4.5 ฟางสับ 0.4 kg คือส่วนผสมที่คงที่ของทุกส่วนผสม ที่ส่วนผสม A 0.15:0:0.77:0.08 มีลักษณะทางกายภาพคือ แตกไม่จับตัวเป็นก้อน ส่วนผสม B C D และ E ได้เพิ่มส่วนผสม รำข้าวเพิ่มขึ้น จากสังเกตลักษณะทางกายภาพจะพบว่าทำให้ลักษณะทางกายภาพจับตัวกันดีขึ้น ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเพิ่มรำข้าวในส่วนผสมทำให้เกาะตัวกันมากขึ้น

4.2 การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์จากฟางข้าว

ในการทดลองนี้ได้ทดลองผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางข้าวที่ยังไม่ผ่านการอัดเป็นก้อนจากเครื่องอัดก้อน เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถให้การผลิตแก๊สชีวมวลของเตาที่ได้รับการออกแบบและสร้าง เพื่อใช้ในการวิจัยนี้ ซึ่งลักษณะของฟางข้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองนี้ มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 โดยทำการทดลองผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางข้าว 2 ลักษณะคือ ฟางข้าวที่มีการย่อยขนาด และฟางข้าวที่ไม่มีการย่อยขนาด จากการทดลอง เมื่อใช้ฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการย่อยขนาด ซึ่งมีความยาวประมาณ 25-35 cm นำไปผลิตแก๊สชีวมวลพบว่า สามารถผลิตแก๊สชีวมวลได้ในช่วงสั้น ๆ คือประมาณ 5 นาทีแรก หลังจากนั้นก็ไม่มีการผลิตแก๊สชีวมวล เกิดการขาดช่วงของแก๊สผลิตภัณฑ์ ต้องมีการกระทุ้งฟางจากด้านบน จึงสามารถผลิตแก๊สต่อได้และต้องทำเช่นนี้อย่างเป็นระยะ เนื่องจากฟางข้าวที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวมาก จึงทำให้เกิดการสานตัวกัน และเกาะกันเป็นกลุ่มลอยตัวอยู่บนชั้นบรรจุเชื้อเพลิง และเนื่องจากน้ำหนักที่เบาของฟางเอง เพราะ bulk density ของฟางข้าวมีค่าต่ำมากประมาณ 80 kg/m^3 [12] จึงไม่มีการยุบตัวลงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง จากปัญหาดังกล่าวจึงทำการย่อยฟางข้าวให้มีขนาดสั้นลงเหลือประมาณ 10 cm ถึง 25 cm พบว่า มีการสานตัวของฟางข้าวน้อยลง ทำให้การไหลตัวลงของฟางข้าวเพื่อใช้ในการเผาไหม้และผลิตแก๊สต่อเนื่องมากขึ้น ดังนั้นในการทำการทดลองจึงจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องมีการเตรียมฟางข้าวก่อนการทดลอง



(a) ฟางย่อยแล้ว (b) ฟางปกติที่ยังไม่ย่อย

รูปที่ 4.4 ลักษณะของฟางข้าวที่ใช้ผลิตแก๊สชีวมวล

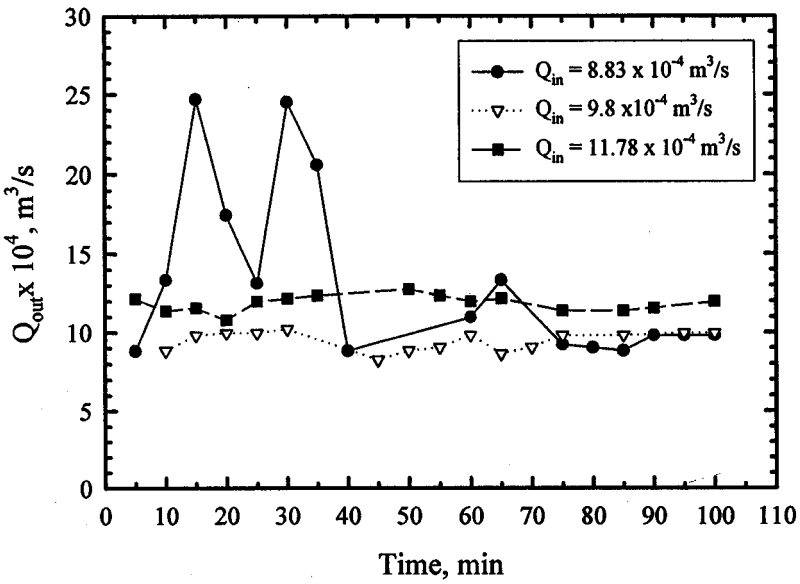
เพื่อให้ทราบส่วนประกอบตั้งต้นของฟาง ที่จะนำมาทำการอัดและผลิตแก๊ส ผู้วิจัย ได้เก็บตัวอย่างฟาง ซึ่งเป็น ฟางข้าวเหนียว ที่ปลูก ทั่วไปในจังหวัดอุบลราชธานี และทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดย กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เป็นผู้ดำเนินการวิเคราะห์ (รายละเอียด ดังแสดงในภาคผนวก ค) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตารางผลการทดลองหาค่าความร้อน

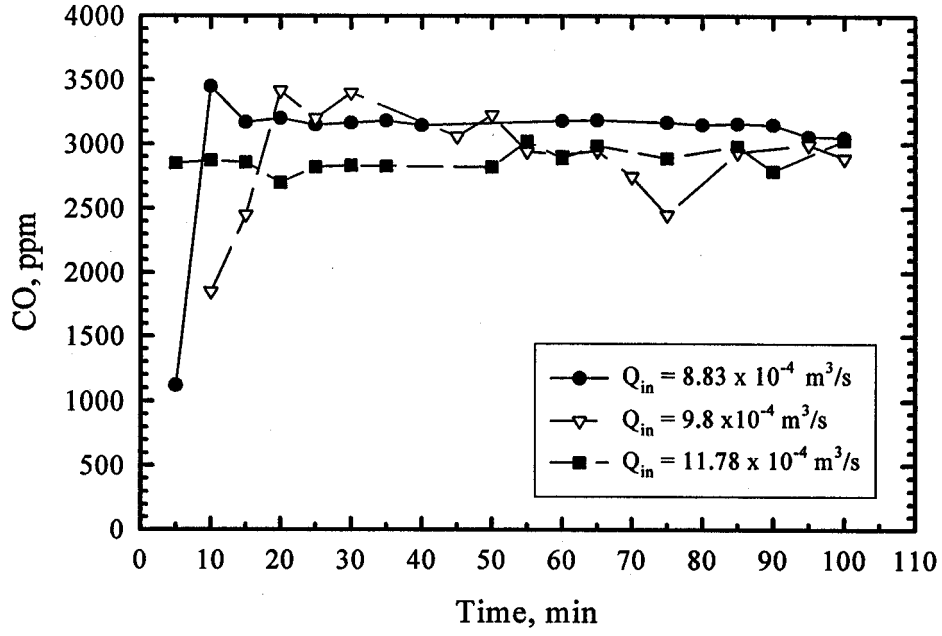
Component	As-received Basis	Dry Basis
Ash, %	11.8	13.0
Volatile matter, %	61.0	67.5
Fixed carbon, %	17.7	19.5
Carbon, %	39.2	43.3
Hydrogen, %	5.4	4.8
Nitrogen, %	0.63	0.70
Oxygen, %	42.9	38.1

รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Q_{in}) ต่ออัตราการไหลของแก๊สชีวมวล (Q_{out}) พบว่าที่อัตราการไหล Q_{in} = 8.83 x 10^{-4} m^3/s ในช่วงเวลา 40 นาทีแรก การผลิตแก๊สชีว-มวลเกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้น้อยจนเกินไป จึงส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้กลไกการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s และ Q_{in} = 11.78 x 10^{-4} m^3/s พบว่าแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้นั้นค่อนข้างต่อเนื่องตลอดช่วงการทดลอง และที่ Q_{in} = 11.78 x 10^{-4} m^3/s แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีปริมาณมากกว่าที่ Q_{in}= 9.8 x 10^{-4} m^3/s ตลอดการทดลอง เนื่องจากปริมาณอากาศใช้ในการเผาไหม้ที่มากว่านั่นเอง แต่จากรูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ Q_{in} ต่อปริมาณ CO กลับพบว่าปริมาณ CO ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของแก๊สชีวมวล และเป็นส่วนประกอบที่บ่งบอกถึงคุณภาพของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s มีปริมาณ CO เฉลี่ยเท่ากับ 2900 ppm ตลอดช่วงเวลาทำการทดลอง ซึ่งมีปริมาณมากกว่าที่ Q_{in} = 11.78 x 10^{-4} m^3/s อันเนื่องมาจากที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s เกิดการเผาไหม้

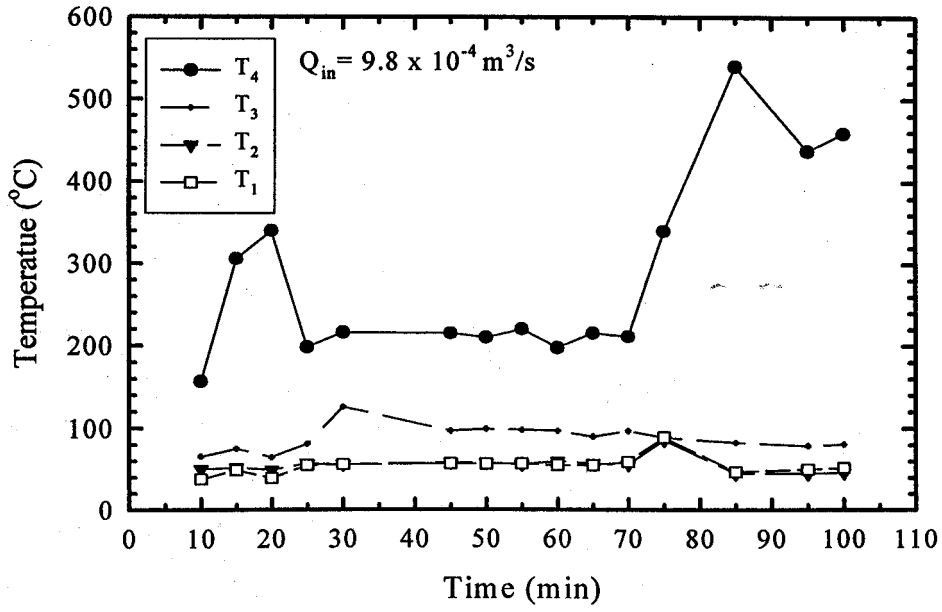
ที่ไม่สมบูรณ์มากกว่า ถึงแม้ว่าปริมาณ CO ที่ผลิตได้ที่ Q_{in} = 8.83 x 10^{-4} m^3/s จะมีปริมาณมากกว่าที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s คือ เฉลี่ยประมาณ3100 ppm ก็ตามแต่ที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s มีอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่สม่ำเสมอกว่าดังนั้นในการทดลองจึงใช้อัตราการไหล Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s ในการศึกษาพฤติกรรมการผลิตแก๊สชีวมวล



รูปที่4.5 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อ Q_{out}

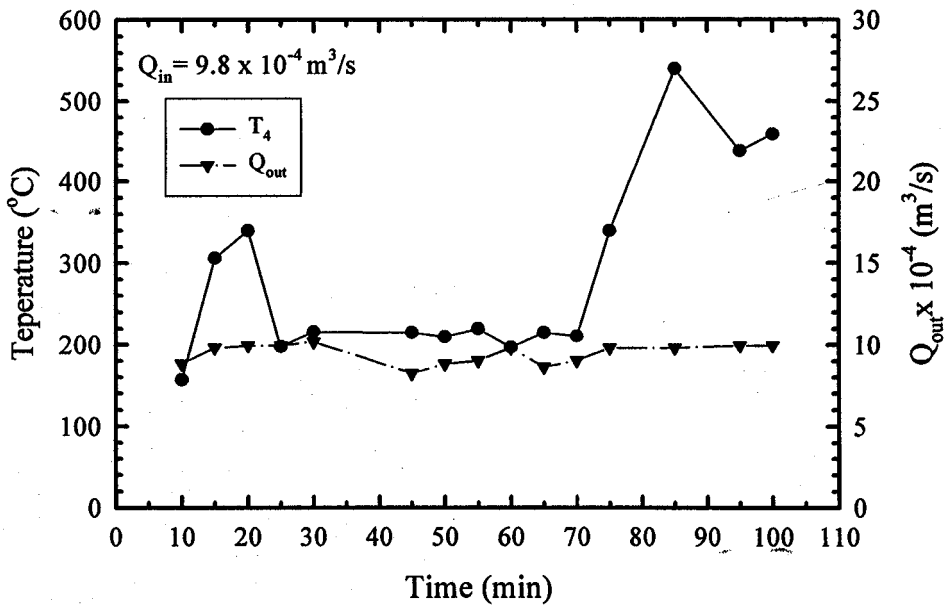


รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณ CO



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับโครงสร้างทางความร้อน

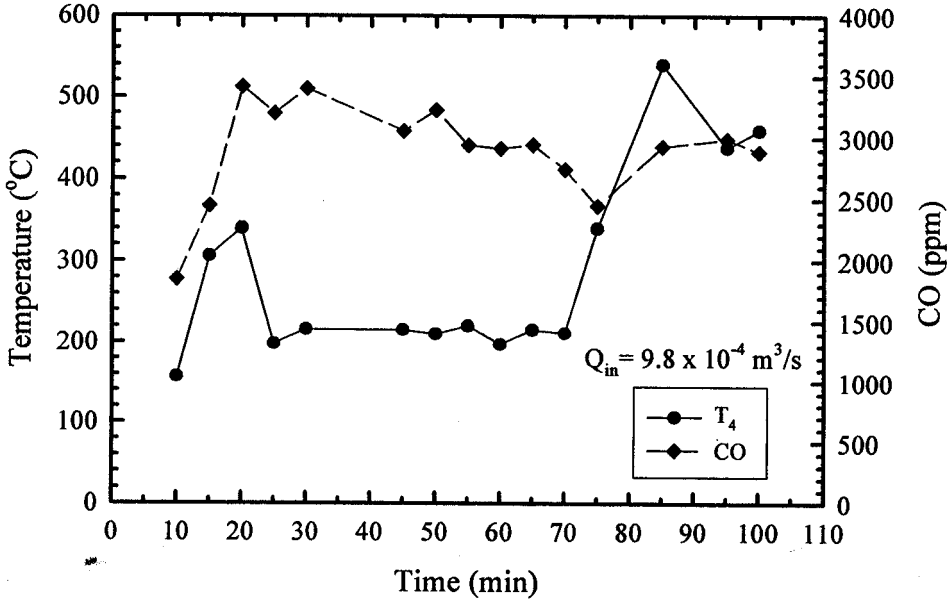
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับโครงสร้างทางความร้อน ที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_1 และ T_2 จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 50° ถึง 100 °C เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ T_3 ถึงแม้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าแต่มีค่าไม่เกิน 150 °C ตลอดการทดลอง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของพวกสารระเหย แต่ความชื้นในฟางข้าวจะถูกความร้อนทำให้ไอน้ำระเหยออกมา โดยทั่วไปไอน้ำจะเหยออกมาจากเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C ถึง 200 °C ดังนั้นเป็นไปได้ว่าน้ำภายในฟางข้าวจะระเหยที่บริเวณ T_1 ถึง T_3 โดยบริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า drying zone ส่วนที่ตำแหน่ง T_4 พบว่ามีอุณหภูมิประมาณ 150 °C ถึง 550 °C เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับบริเวณการเกิดกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึงได้รับความร้อนในปริมาณมากพอที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสาร organic ในฟางข้าวทำให้ได้น้ำมันดิบ (tar) ออกมา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ถึง 600 °C ดังนั้นบริเวณ T_3 จึงเป็นชั้น pyrolysis zone



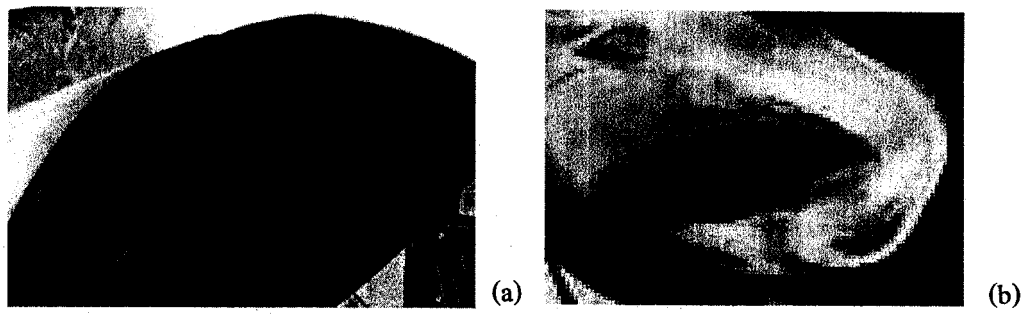
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และปริมาณแก๊สชีวมวล Q_{out}

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลอง กับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณแก๊สชีวมวล Q_{out} พบว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งT_4 (pyrolysis zone) ไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ตลอดช่วงการทดลอง อาจเนื่องมาจากตำแหน่งที่วัดอยู่ห่างจากบริเวณที่เกิดการผลิตแก๊สชีวมวลมาก จึงทำให้ผลของ T_4 ที่เปลี่ยนไปในช่วง 20 นาทีแรก และ ที่ช่วงเวลา 70 ถึง 110 นาที ซึ่งอาจเกิดจากการไหลของฟางข้าวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงไม่มีผลต่อปริมาณแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ และด้วยเหตุผลเดียวกัน

สำหรับปริมาณ CO ดังรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลอง กับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และปริมาณ CO ก็ไม่ได้รับผลกระทบจาก T_4 โดยตรงเช่นกัน จากผลการทดลองดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงโครงสร้างของอุณหภูมิภายในเตาเพิ่มเติม เพื่อบ่งชี้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณแก๊สชีวมวลต่อไป



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณ CO



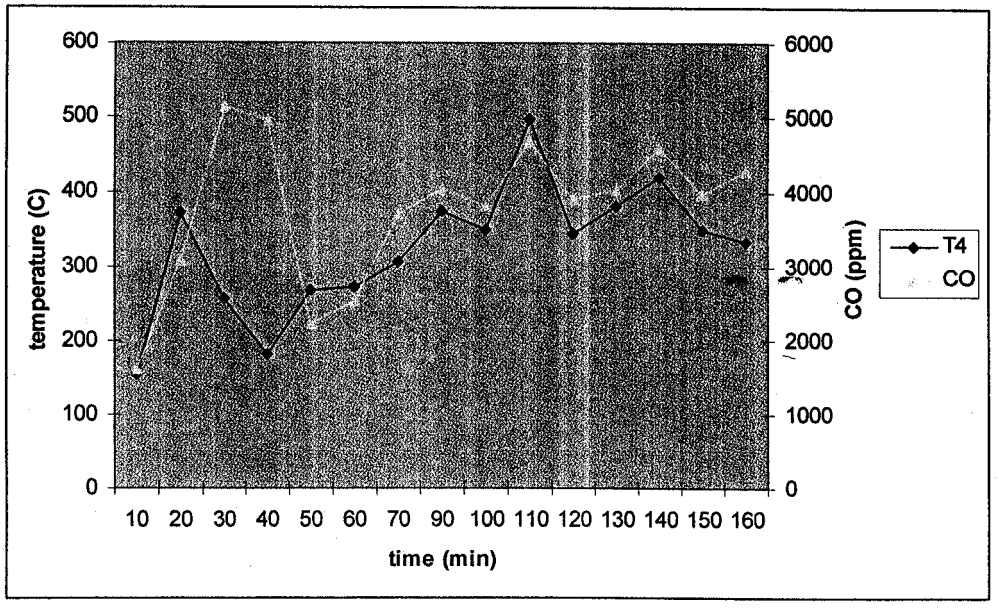
รูปที่ 4.10 ลักษณะเปลวไฟของการติดไฟของแก๊สชีวมวล

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะเปลวไฟของการติดไฟของแก๊สชีวมวลที่ อัตราการไหล Q_{in}= 9.8 x10^{-4} m^3/s พบว่า ในช่วง 30 นาทีแรก ลักษณะเปลวไฟที่ได้จะมีสีฟ้า ดังรูปที่ 4.10(a) ซึ่งจากสีของเปลวไฟของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ในช่วงแรกอาจมี CH_4 .ในปริมาณมาก แต่เมื่อทำการผลิตแก๊สชีวมวลต่อไปพบว่าสีเปลวไฟของแก๊สชีวมวลจะเป็นสีเหลืองดังรูปที่ 4.10(b) ซึ่งเป็นลักษณะการติดไฟของแก๊ส CO อนึ่ง ผลงานวิจัยในส่วนนี้ได้ตีพิมพ์ไปแล้ว ดังรายละเอียดแสดง ในภาคผนวก ง

4.3 การผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์จากก้อนฟางอัดแท่ง

จากการผลทดลองการอัดฟางก้อนของเครื่องอัดฟางก้อน พบ ลักษณะที่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวมวล และจากการทดลองการผลิตแก๊สชีวมวลพบว่าเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงที่ได้ออกแบบสร้างนั้นมีความสามารถในการผลิตแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้นำฟางก้อนมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวมวลดังแสดงในรูปที่ 4.11 ผลการทดลองการผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางก้อน แสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.12

รูปที่ 4.11 ฟางแท่งและก้อนย่อยของฟางแท่งที่ใช้ในการทดลองผลิตแก๊ส

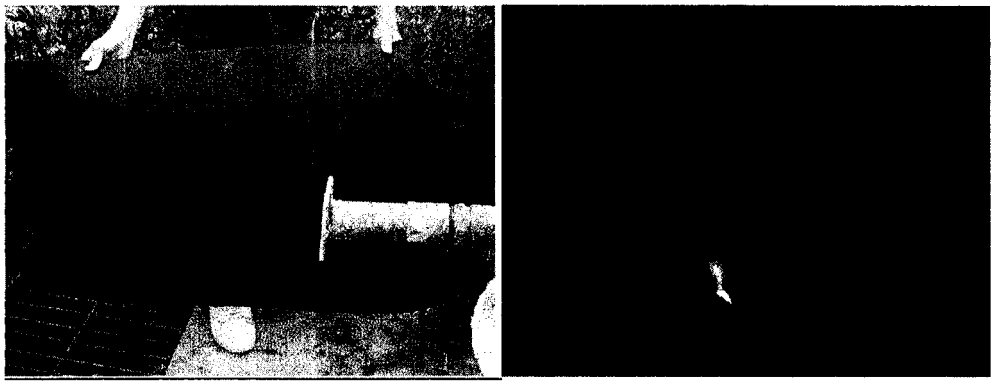


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณ CO

จากผลการทดลอง ใช้อัตราการไหล Q_{in}= 9.8 x10 m^3/s และได้ทำการวัดอุณหภูมิ 3 จุด คือ T_4 ,T_3 และ T_{out} ในช่วง 60 นาทีแรกนั้นแก๊สที่ได้นั้นสามารถจุดติดไฟได้แต่ก็ยังไม่ต่อเนื่องเพราะปริมาณแก๊สยังเบาบางอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้สูงขึ้นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีปริมาณมากขึ้นแก๊สก็สามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่องนั้นแสดงว่าอุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้และเวลาที่ในการผลิตแก๊ส หรือ เวลาที่อากาศถูกดูดเข้าไปในเตาผลิตแก๊ส (resident time) มีอิทธิพลต่อปริมาณการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ เป็นอย่างมาก รูปที่ 4.13 แสดงการจุดติดไฟได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ขณะทำการทดลอง ช่วง เวลากลางวัน และ เวลากลางคืน

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองการผลิตแก๊สชีวมวลจากฟางก้อน

Time (min)	T_4 (° C)	T_3 (° C)	T_{out} (° C)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	NO (ppm)	NO_X (ppm)	H_2 (ppm)	หมายเหตุ
10	34.2	32.2	62.9	14.34	1609	8.13	64	67	5565	
20	372.5	49.9	60.0	20.47	3082	4.86	61	70	6010	
30	257.6	68.2	50.4	12.8	5133	6.87	158	169	8871	
40	182.2	74.0	60.0	12.37	4962	7.55	207	227	5484	
50	268.2	90.3	54.9	11.7	2235	8.16	207	295	6331	
60	271.8	112.2	64.0	11.84	2547	8.02	414	415	7484	
70	306.2	154.6	57.3	11.21	3708	8.16	318	147	10027	ติดไฟ
80	374.8	221.5	67.9	11.57	4049	8.23	508	528	10886	ติดไฟ
90	351.1	332.6	111.9	11.42	3824	7.6	313	208	9276	ติดไฟ
100	498.6	440.6	92.4	11.71	4677	8.14	216	313	12031	ติดไฟ
110	344.8	489.4	89.7	11.34	3908	7.9	314	305	1054	ติดไฟ
120	381.8	494.9	67.3	11.67	4035	7.7	284	203	6347	ติดไฟ
130	420.1	507.0	59.2	13.60	4589	6.84	171	256	7568	ติดไฟ
140	349.7	513.8	64.6	12.11	3978	8.12	284	344	8894	ติดไฟ
150	334.4	516.2	72.3	11.8	4286	7.6	246	289	9946	ติดไฟ



รูปที่ 4.13 ภาพเปลวไฟของแก๊สชีวมวลที่ได้จากฟางก้อนขณะกลางวันและกลางคืน

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ฟางอัดแท่ง (ที่ย่อยให้ได้ขนาดพอเหมาะ ประมาณ 2-4 cm) ทำได้ดีกว่าการใช้ฟางปกติ (ไม่อัดแท่ง) มาก สามารถผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้ในปริมาณ ที่มากพอ ที่จะจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง และไม่มีปัญหาของการบรรจุ (feed) เชื้อเพลิง เนื่องจากฟางแท่งมีน้ำหนัก หรือ ความหนาแน่น ที่มากพอ ที่จะยุบตัวลงในเตาเผาได้เอง จากการวัดปริมาณแก๊สพบว่า มีแก๊ส ไฮโดรเจน เกิดขึ้นมากกว่าการใช้ฟางปกติมาก ส่วน CO มีปริมาณมากกว่าเล็กน้อย ค่าความร้อน ของแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีนี้ ประมาณ 4.5 MJ/m^3

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยนี้ สามารถสรุปได้เป็น 2 ประเด็น หลัก ๆ คือ

(1) การศึกษาการผลิตฟางอัดแท่ง

(2) การศึกษาการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์

5.1 การศึกษาการผลิตฟางอัดแท่ง

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องอัดฟาง RSP-ME1 ซึ่งใช้เฟืองสกรูเป็นตัวดันฟางให้ผ่านหัวอัดทรงเรียว และ ใช้ขดลวดความร้อน เป็นตัวช่วยในการให้ความร้อนและประสานฟางกับส่วนผสม ให้ยึดติดเป็นก้อน จากผลการทดลอง เครื่อง RSP-ME1 สามารถ อัดฟางเป็นแท่งได้ยาว ประมาณ 30 cm ทั้งนี้ส่วนผสมในการอัด เป็นตัวแปรสำคัญ ในการยึดติดให้ฟางเป็นแท่ง ด้วย

จากศึกษาพบว่า เครื่อง RSP-ME1 ไม่สามารถอัดฟางให้เป็นแท่งได้หากไม่มีตัวประสาน เนื่องจากกำลังในการอัดไม่สูงพอ และความร้อน ไม่มากพอ หากต้องการอัดโดยไม่มีตัวประสานและได้ฟางแท่งที่แน่น ควรจะใช้ต้นกำลังที่สูงกว่านี้ และมีการให้ความร้อนที่มากกว่านี้ ซึ่งเครื่องอัดในงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ สามารถทำได้ ที่เรียกว่า อัดแห้ง

5.2 การศึกษาการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์

ในการทดลองผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (down draft gasifier) DDG-ME2 ซึ่งถือว่าเป็นเตาผลิตแก๊สที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบคาร์บอนไม่สูงมากนัก มีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่ำ) และทำงานได้ดีกับการผลิตในกำลังการผลิตต่ำช่วงเวลาการผลิตแก๊สยาวนาน แต่ช่วงเริ่มต้นสั้น โดยทดลอง ทำการผลิตแก๊สจากฟางใน 3 ลักษณะ คือ (1) จากฟางปกติที่ไม่ได้ย่อย (2) จากฟางที่ย่อยแต่ไม่ได้อัดแท่ง (3) จากฟางอัดแท่ง ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) มีการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ น้อยมากและไม่ต่อเนื่อง เมื่อใช้ฟางปกติ เนื่องจากฟางมี bulk density ที่ต่ำมาก และไม่เกิดการกดทับลงมาในเตา ทำให้การแก๊สน้อย ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานจริง
2) เมื่อใช้ฟางที่ย่อย มีการเกิดแก๊สดีมากในช่วงเริ่มต้น แต่หลังจากนั้น การเกิดแก๊สจะหยุดไป เนื่องจาก การไม่ไหลตัวลงในเตาของฟาง ทำให้ได้แก๊สไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้ขนาดของฟางที่ย่อย

จะมีผลต่ออัตราการเกิดแก๊สด้วย การผลิตแก๊สในกรณีเช่นนี้ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานตรงเช่นกัน

3) การผลิตแก๊สโดยใช้ฟางอัดแท่ง ที่ย่อยให้ได้ขนาดประมาณ 2-4 cm ให้การเกิดแก๊สที่ต่อเนื่องและมีปริมาณแก๊สมากพอที่จะจุดติดไฟได้ตลอดเวลา เนื่องจาก ฟางอัดแท่ง มี bulk density ค่อนข้างสูง สามารถกดทับในเตาได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองทำให้เกิดแก๊สได้อย่างต่อเนื่อง การอัดแน่นและความหนาแน่นที่สูงขึ้นนี้ เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดแก๊สมาก และ เป็นที่น่าสนใจว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นหลักแล้ว ยังมีอัตราส่วนของไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นอีกด้วย ค่าความร้อนของแก๊สที่ผลิตได้ ประมาณ 4.5 MJ/m^3 ซึ่งถือว่า อยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับวัตถุดิบชนิดอื่นที่นิยมใช้ในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ เช่น แกลบ เศษถ่าน หรือ เศษไม้แห้ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ ทำให้ยืนยันได้ว่า ฟาง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มากมายในประเทศไทย แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานมากนัก และไม่นิยมนำมาผลิตแก๊สเลย สามารถผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็แล้วแต่ การที่จะผลิตให้ได้แก๊สที่มีคุณภาพ ต้องมีการเตรียมวัตถุดิบ ให้เหมาะสมเสียก่อน คือ การอัดแท่ง และหากต้องการแก๊สในปริมาณมาก เตา gasifier ที่ใช้ ควรจะมีขนาดใหญ่กว่าเตาของเชื้อเพลิง ชนิดอื่น เนื่องจาก ฟาง มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ฟางที่ใช้ควรเป็นฟางแห้ง ไม่เช่นนั้น อาจจะใช้เวลาในการอุ่นนานขึ้น และ อาจจะทำให้เตาชำรุดเนื่องจากการผุกร่อน ได้ง่าย

ในทางปฏิบัติ ควรจะมีการกักเก็บแก๊สในถังพักเสียก่อน มากกว่าที่นำไปใช้โดยตรง และหากต้องการแก๊สที่มีความสะอาดสูง ก็ควรมีการกรองแก๊สผลิตภัณฑ์ เสียก่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำไปใช้งานกับ เครื่องยนต์แก๊ส (gas engine)

เอกสารอ้างอิง

[1] สุริย์ จรูญศึกดิ์, "การศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตแกสชนิดไหลลงเพื่อใช้ในการผลิตเซรามิก", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี พ.ศ. 2543, หน้า 1-122

[2] วิรัช อรุณลักษณดำรง, 2531, เตาเผาก๊าซแบบไหลขึ้นเพื่อการเผาไหม้โดยตรง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 83 หน้า.

[3] ชัชวาล วนิชผล และสามารถ พิริยะปัญญาพร, 2534, ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแกลบด้วยระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เซชั่นและระบบผลิตก๊าซชีวมวลแบบเบดเคลื่อนที่, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 130 หน้า.

[4] สถานะการณ์พลังงานของประเทศไทย พ.ศ. 2542-2554, http.//www.teenet.chula.ac.th/plan/plan 4254-2.asp, สิงหาคม 2544.

[5] วินัย, 2541., กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง. นโยบายพลังงาน เดือนเมษายน-มิถุนายน 2541: 35-41.

[6] P. McKendry "Energy Production from Biomass (part 2): Coversion Technologies", Bioresource Technology, 2002, Vol. 83, pp.47-54

[7] M. Dogru, Midill A. and Howarth C.R. "Gasification of Sewage Sludge Using a Throated Downdraft Gasifier and Uncertainty Analysis", Fuel Processing Technology, 2002, Vol. 75, pp.55-82

[8] M. Dogru, Howarth C.R., Akay G., Keskinler B. and Malik A.A. "Gasification of Hazenut Shell in a Downdraft Gasifier", Energy, 2002, Vol. 27, pp.415-427

[9] Z.A. Zainal, Rifau A., Quadir G.A. and Seetharamu K.N. "Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier", Biomass & Bioenergy, 2002, Vol. 23, pp.283-289

[10] G. Chen, Andries J., Luo Z. and Spliethoff H. "Biomass Pyrolysis/Gasification for Product Gas Production: the Overall Investigation of Parametric Effects", Energy Conversation & Management, 2003, Vol. 44, pp.1875-1884

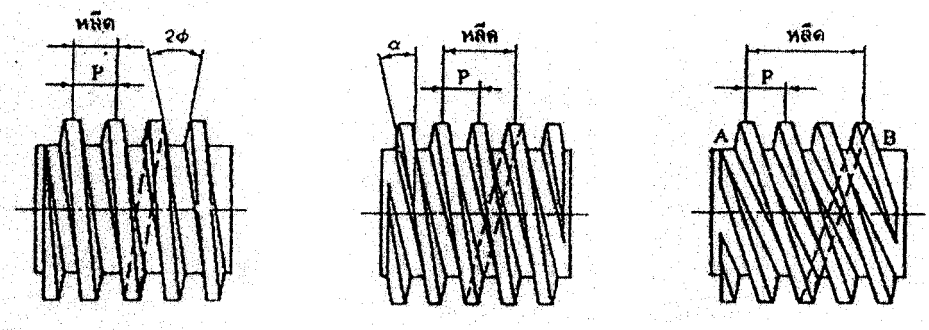
[11] C.Z. Wu, Huang H. Zheng S.P. and Yin X.L. "An Economic Analysis of Biomass Gasification and Power Generation in China", Bioresource & Technology, 2002, Vol. 83, pp.65-70

[12] A. Kaupp and Cross R.J. "Small Scale Gas Producer – Engine System", Lengerrich, 1984, pp.29-65

ภาคผนวก ก
การออกแบบเครื่องอัดฟางก้อน

หลักการออกแบบเครื่องอัดฟางแบบก้อน

ก.1 สกรูส่งกำลัง



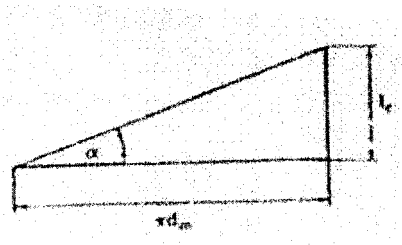
รูปที่ ก.1 เกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู

ระยะพิตช์ (P) คือระยะทางที่วัดตามแกนแนวของสกรูจากจุดหนึ่งบนเกลียวหนึ่ง ไปยังจุดเดียวกันของเกลียวที่อยู่ถัดไป

หลีด (Lead) (l_e) คือระยะทางที่สกรูเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกนของสกรู ในขณะที่สกรูหมุนไปหนึ่งรอบ ถ้าเป็นสกรูหนึ่งปาก (Single thread) ระยะของหลีดมีค่าเท่ากับระยะพิตช์ สำหรับสกรูสองปาก (Double thread) เกลียวจะมีปากคาบระหว่างเกลียวสองเกลียว ดังรูปที่ ก.1

มุมฮีลิกซ์หรือมุมหลีด (Helix or lead angle) (α) หมายถึง มุมระหว่างระนาบที่สัมผัสกับความเอียงของเกลียวและระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของสกรู ถ้าให้ d_m เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสกรูและนำส่วนที่สกรูเคลื่อนที่ไปในขณะที่หมุนหนึ่งรอบมาคลี่ออก ก็จะได้ลักษณะดังรูปที่ ก.2 และมุมหลีดคือ

$$\tan \alpha = \frac{l_e}{\pi d_m} \qquad \text{(ก.1)}$$

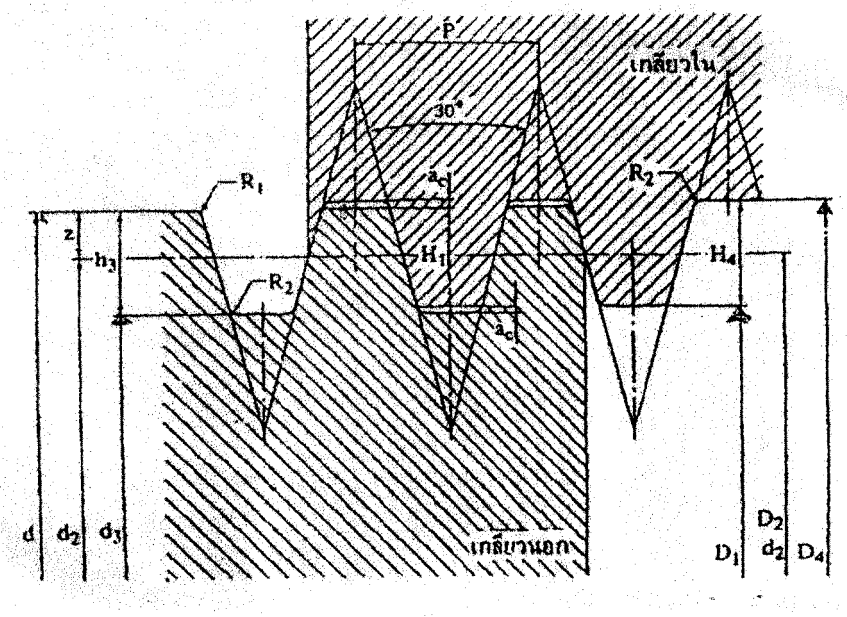


รูปที่ ก.2 มุมหลีด

เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของสกรู ซึ่งนับรวมถึงความสูงของเกลียวด้วย ขนาดระบุ (Nominal size) ของสกรูส่วนกำลังจะบอกโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เสมอ เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของสกรู

ก.2 เกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐานไอเอสโอ

ขนาดเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐานไอเอสโอ บอกมิติต่าง ๆ เป็น mm. และมีมุมของเกลียว $2\varnothing$ เท่ากับ 30^0 ขนาด ต่าง ๆ ของสกรูส่งกำลังชนิดนี้ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ขนาดต่าง ๆ ของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู

หมายเหตุ

a_c คือ ช่องว่างบนยอดฟัน

D_4 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ของเกลียวใน

D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยของเกลียวใน

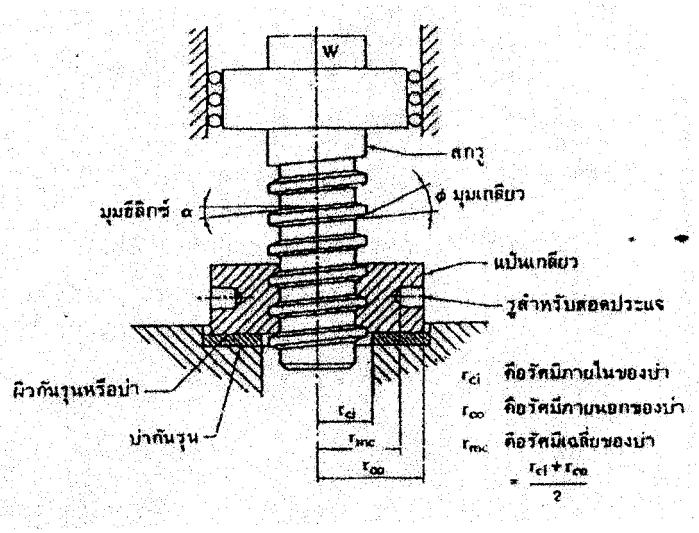
D_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของเกลียวใน

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ของเกลียวนอก (เป็นขนาดระบุด้วย)

d_3 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยของเกลียวนอก

ก.3 โมเมนต์ปิดสำหรับมุมสกรูส่งกำลัง

พิจารณาสกรูส่งกำลังดังภาพที่ 6 ซึ่งมีมุมฮีลิกซ์ α องศา และมุมเกลียวของสกรู $\varnothing$ องศา ในการยกน้ำหนัก W ขึ้นลง ทำได้โดยการหมุนเป็นเกลียว ซึ่งตั้งอยู่บนที่รองรับ เรียกว่า บ่า (Collar) สมมติให้แรง F ที่ใช้ยกน้ำหนักขึ้นกระทำอยู่บนเกลียวที่มีรัศมีเฉลี่ยของสกรู $r_m = (r_0 + r_i)/2$ ณ ตำแหน่งที่ 0 ดังรูปที่ ก.4 ในขณะที่ยกน้ำหนักขึ้นจะมีแรงเสียดทาน F_f กระทำบนผิวหน้าของเกลียวด้านการเคลื่อนที่ของสกรู



รูปที่ ก.4 ตัวอย่างการใช้สกรูส่งกำบังเป็นแม่แรง

<u>หมายเหตุ</u>

F_n คือ แรงปฏิกิริยาซึ่งมีทิศตั้งฉากกับผิวหน้าของเกลียว

OA คือ เวกเตอร์ของแรงที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนัก W แต่ทิศทางตรงข้าม

OB คือ เวกเตอร์ของแรงรวมระหว่าง F_f และ OA

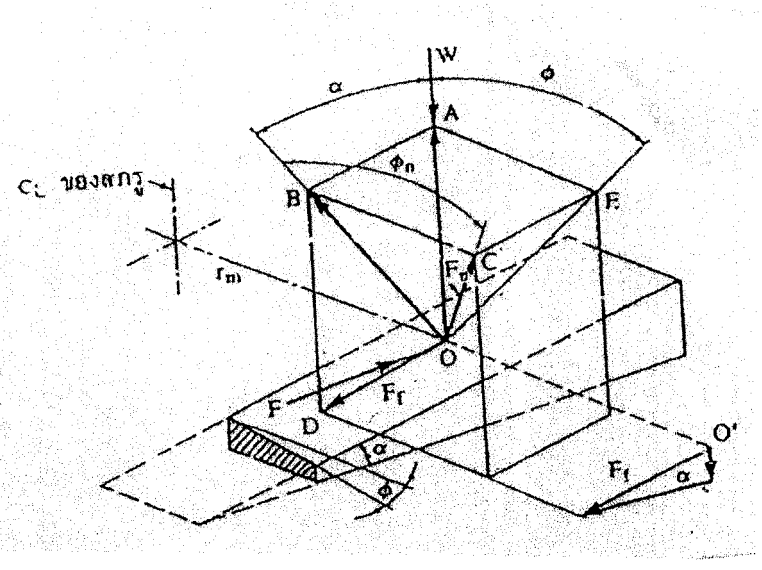
fs คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างผิวหน้าของเกลียวและแป้นเกลียว

รวมแรงในแนวดิ่งจะได้

$$F_n \cos \varnothing_n \cos \alpha = W + F_f \sin \alpha$$

แต่ $F_f = f_s F_n$ แทนค่าลงในสมการข้างบนนี้จะได้ว่า

$$F_n = \frac{W}{\cos \varnothing_n \cos \alpha - f_n \sin \alpha} \qquad \text{(ก.2)}$$



รูปที่ ก.5 แผนภาพแรงปฏิกิริยาบนเกลียวเนื่องจากการยกน้ำหนัก W

ในการหาโมเมนต์ที่เกิดจากการใช้แรง F เพื่อยกน้ำหนักขึ้น ให้รวมโมเมนต์รอบแกนกลางของสกรู

$$T_R = Fr_m = r_m \left[F_f \cos \alpha + F_n \cos \varnothing_n \sin \alpha \right]$$

$$T_R = r_m \left[f_s F_n \cos \alpha + F_n \cos \varnothing_n \sin \alpha \right]$$

แทนค่า F_n จากสมการที่ (ก.2) ลงในสมการข้างบน และให้ d_m แทนเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสกรู จะได้โมเมนต์บิดที่ใช้ในการยกน้ำหนัก

$$T_R = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{F_s \cos\alpha + \cos\varnothing_n \sin\alpha}{\cos\varnothing_n \cos\alpha - f_s \sin\alpha}\right]$$

$$= \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{F_s \cos\varnothing_n \tan\alpha}{\cos\alpha - f_s \sin\alpha}\right] \qquad \text{(ก.3)}$$

ในการใช้สมการที่ (2) จำเป็นที่จะต้องทราบมุม $\varnothing_n$ ซึ่งสามารถหาได้โดยพิจารณารูปที่ ก.6 ดังนี้

$$\tan\varnothing_n = \frac{BC}{OB}$$

แต่ BC = AE = OA tan $\varnothing$ = OB cos α tan $\varnothing$

เพราะฉะนั้น $\tan\varnothing_n = \cos\alpha \tan\varnothing$ (ก.4)

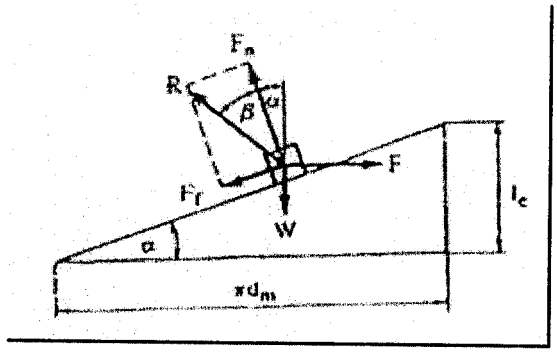
โดยปกติแล้วมุมฮีลิกซ์ α จะมีค่าน้อย (ประมาณ 2^0 ถึง 6^0) ดังนั้นค่าของ cos α จึงเกือบเท่ากับ 1 ฉะนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณทั่ว ๆ ไป จึงอนุญาตให้ใช้ $\varnothing_n = \varnothing$ ได้ ซึ่งทำให้เขียนสมการที่ (ก.3) ใหม่ได้เป็น

$$T_R = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \cos\varnothing_n \tan\alpha}{\cos\varnothing - f_s \tan\alpha}\right] \qquad \text{(ก.5)}$$

ในกรณีของสกรูส่งกำลังที่มีเกลียวสี่เหลี่ยม มุม $\varnothing = 0$ จากสมการที่ (ก.5) จะได้โมเมนต์บิดที่ใช้ยกน้ำหนัก W เท่ากับ

$$T_R = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \tan\alpha}{1 - f_s \tan\alpha}\right] \qquad \text{(ก.6)}$$

ถ้าพิจารณาจากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่า ในกรณีของเกลียวสี่เหลี่ยม แรง Fn จะเท่ากับ OB ซึ่งถ้าให้นำเกลียวจำนวนหนึ่งรอบมาคลี่ออกแล้ว จะได้ระบบของแรงที่เห็นได้ชัดเจนกว่า ดังรูปที่ ก.5 โดยที่มุม β เรียกว่า มุมความเสียดทาน ซึ่ง $\tan\beta = f_s$



รูปที่ ก.6 แรงปฏิกิริยาบนเกลียวสี่เหลี่ยม

เมื่อรวมแรงในแนวดิ่งและแนวระดับจะได้

$$W = R\cos(\alpha+\beta)$$

$$F = R\sin(\alpha+\beta)$$

หรือ $$F = W\tan(\alpha+\beta)$$

ดังนั้น $$T_R = \frac{Wd_m}{2} = \frac{Wd_m}{2}\tan(\alpha+\beta)$$

$$= \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{\tan\beta+\tan\alpha}{1-\tan\beta\tan\alpha}\right]$$

หรือ $$T_R = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s\tan\alpha}{1-f_s\tan\alpha}\right]$$

$$= \frac{Wd_m}{2}\tan(\alpha+\beta)$$

ซึ่งเหมือนกับสมการที่ (ก.6) ที่ได้หามาแล้ว

ในการหมุนสกรู เพื่อยกน้ำหนักลงแรง F และ Ff ดังรูปที่ ก.6 จะกลับทิศทาง การหาสูตรก็ทำได้ในทำนองเดียวกันกับการยกน้ำหนักขึ้น ซึ่งจะได้สมการดังนี้คือ

สำหรับสกรูที่มีมุมเกลียว ϕ องศา

$$T_L = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \cos\varnothing \tan\alpha}{\cos\varnothing - f_s \tan\alpha}\right] \quad (ก.7)$$

สำหรับเกลียวสี่เหลี่ยม

$$T_L = \frac{Wd_m}{2}\tan(\alpha+\beta)$$

$$= \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \cos\varnothing \tan\alpha}{\cos\varnothing - f_s \tan\alpha}\right] \quad (ก.8)$$

นอกจากแรงที่กระทำต่อสกรูส่งกำลังดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สกรูในรูปที่ ก.6 ยังมีแรงเสียดทานที่บ่ารองรับอีกด้วย แรงเสียดทานนี้ทำให้ต้องใช้แรงหรือโมเมนต์บิดในการยกน้ำหนัก หรือลงมากขึ้น ถ้าให้ f_c แทนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าของบ่ารองรับ และแป้นเกลียว แรงเสียดทานจะมีค่าเท่ากับ

$$F_c = f_c W$$

ถ้าสมมติให้แรงเสียดทานนี้กระทำที่รัศมีเฉลี่ยของบ่ารองรับ r_{mc} โมเมนต์บิดที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานนี้คือ

$$T_{fc} = r_{mc} f_c W$$

ดังนั้นจากสมการที่ (ก.5) ถึงสมการ (ก.8) โมเมนต์บิดที่ต้องใช้ในการยกน้ำหนักขึ้น หรือลงสำหรับสกรูส่งกำลังที่มีมุมเกลียว ϕ และ 0 องศา คือ

มุมเกลียว $\varnothing$ องศา $T_R = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \cos\varnothing \tan\alpha}{\cos\varnothing - f_s \tan\alpha}\right] + r_{mc} f_c W$ (ก.9)

มุมเกลียว 0 องศา (เกลียวสี่เหลี่ยม)

$$T_R = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \tan\alpha}{1 - f_s \tan\alpha}\right] + r_{mc} f_c W \qquad \text{(ก.10)}$$

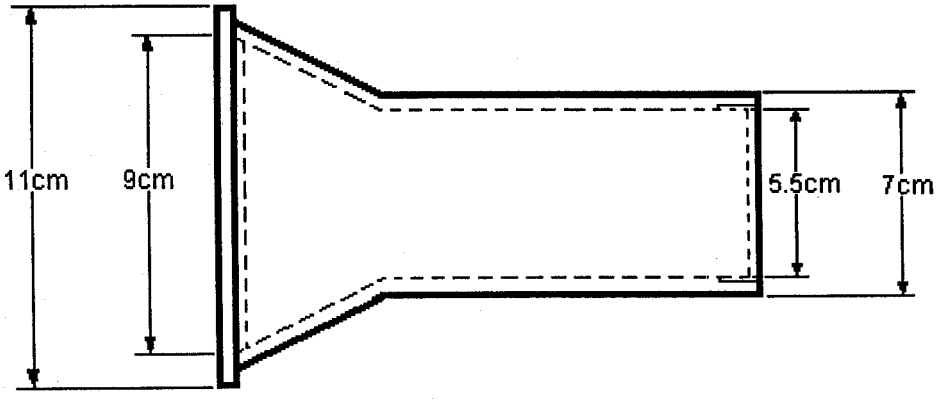
มุมเกลียว $\varnothing$ องศา

$$T_L = \frac{Wd_m}{2}\left[\frac{f_s + \cos\varnothing \tan\alpha}{\cos\varnothing - f_s \tan\alpha}\right] + r_{mc} f_c W \qquad \text{(ก.11)}$$

ก.4 การออกแบบทำหัวอัด 5.5 cm

เนื่องจากต้องการก้อนฟางที่มีขนาดเล็กลงกว่าเครื่องต้นแบบเดิม เพื่อให้ได้ก้อนฟางที่มีมีขนาดเล็กลงสามารถนำไปใช้ได้ง่ายขึ้น

อย่างไรก็ตามหากออกแบบให้ก้อนฟางมีขนาดเล็กเกินไปอาจจะเกิดปัญหาการอุดตันในหัวอัดได้ เนื่องจากแรงเสียดทานที่สูงเกินไปในการศึกษานี้ได้ทดลองออกแบบให้หัวอัดที่ทางออกมีขนาด 5.5 cm ดังภาพ โดยมีมุมกรวยอัดประมาณ 31.42 องศา

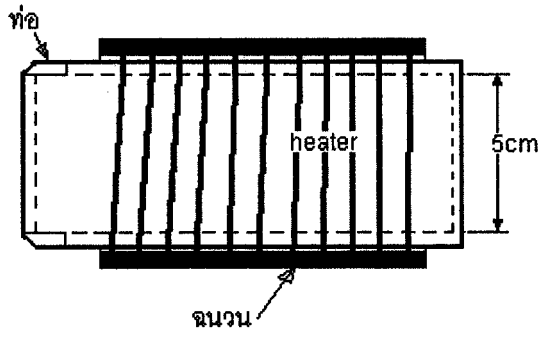


รูปที่ ก.7 หัวอัด

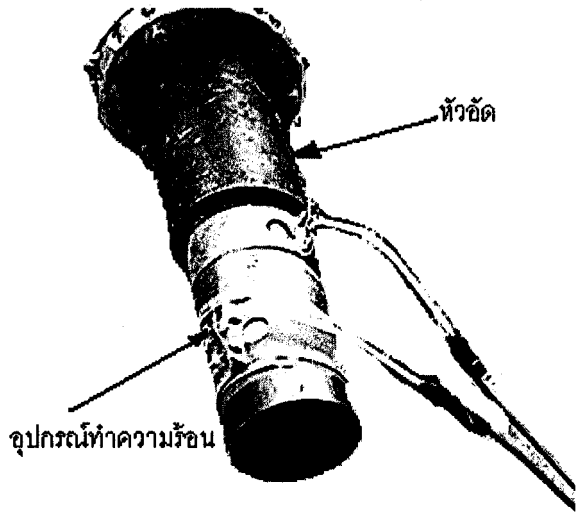
ก.5 การออกแบบอุปกรณ์ทำความร้อน

ในการออกแบบและจัดทำอุปกรณ์ทำความร้อน นำท่อที่ซึ่งมีขนาดเท่ากับหัวอัดคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm ทำการกลึงเกลียวเพื่อสวมเข้ากับหัวอัดให้รอยต่อสนิทที่สุด จัดซื้อขดลวดคอยล์ร้อนเพื่อนำมาติดตั้งที่ท่อ ติดตั้งที่ผนังทางด้านนอกของท่อ ซึ่งอุปกรณ์ทำความร้อนแบบแผ่นที่ใช้กันในเครื่องทำความร้อน และเลือกแผ่นความร้อนที่ใช้ในกาต้มน้ำร้อน เพราะสะดวกในการติดตั้ง การติดตั้งแผ่นความร้อนโดยไม่ตัดครึ่งแต่อย่างใด โดยการพันรอบท่อที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและใช้ตัวรัดหัวและท้ายเพื่อป้องกันการหลุด

แผ่นความร้อนมีกำลังทางไฟฟ้าเท่ากับ 1 kW ซึ่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 500 องศาเซลเซียส



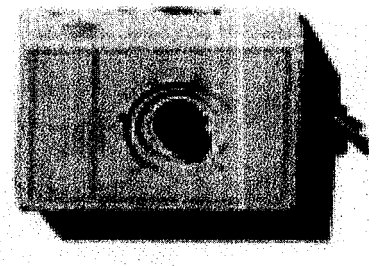
รูปที่ ก.8 แบบอุปกรณ์ทำความร้อน



รูปที่ ก.9 อุปกรณ์ทำความร้อน

ก.6 อุปกรณ์หรี่ไฟ

อุปกรณ์ควบคุมความร้อน โดยการใช้ชุดหรี่ไฟนำมาควบคุมความร้อน คือสามารถเพิ่มและลดกระแสได้ ทำการทดลองประกอบวงจรและทดลองการทำงานของวงจรหรี่ไฟ ผลที่ได้คือสามารถปรับอุณหภูมิได้หลายระดับตามที่ต้องการ อุณหภูมิที่ต่ำสุดคือ 0 องศา และอุณหภูมิสูงอยู่มากกว่า 500 องศา



รูปที่ ก.10 อุปกรณ์หรี่ไฟ

ภาคผนวก ข
การออกแบบเตาเผา

การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบเตามีไม่เพียงพอ โดยเฉพาะคุณสมบัติของฟาง ฉะนั้นในการออกแบบจึงใช้วิธีการประมาณ ซึ่งทราบว่าฟางข้าวมีค่าความร้อนในการเผาไหม้และค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่างแ กลบกับไม้ และในการออกแบบเตาปริมาตรจะมีค่าแปรผันตามค่าดังกล่าว จึงออกแบบเตาให้มีปริมาตรอยู่ระหว่างเตาเผาสำหรับเชื้อเพลิงจากไม้และแกลบ ดังแสดงต่อไปนี้

ข้อมูลการออกแบบ Gasifier จากเชื้อเพลิงไม้ [1]

กำหนด

เวลาในการเผา = 8 hr

อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ = 3×10^{-3} m^3/s

อัตราการบริโภคไม้ = 5.33 Kg/hr

ใช้ปริมาณไม้ทั้งสิ้น 5.33 X 8 = 42.64 Kg

ค่า Bulk density ของไม้ = 288 Kg/m^3 (ค.1)

ปริมาตรไม้ที่ต้องการ 42.64 / 288 $\approx$ 0.15 m^3

ข้อมูลการออกแบบ Gasifier จากเชื้อเพลิง

กำหนด

เวลาในการเผา = 8 hr

อัตราการไหลของอากาศที่ใช้จากเครื่องอัดอากาศ

อัตราการบริโภคแกลบ = 0.083 m^3/hr

ปริมาตรแกลบที่ต้องการ 0.083 X 8 = 0.67 m^3

ค่า Bulk density ของแกลบ = 136 Kg/m^3 (ค.2) (ผู้จัดทำ)

*** ค่า Bulk density ของฟาง = 165.08 Kg/m^3 (ค.3) (คณะเกษตร ฯ ม.อุบลฯ)

จาก (ค.1), (ค.2), (ค.3) และสมการ

ปริมาตรเชื้อเพลิงที่ต้องการ หรือปริมาตรเตา = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ / Bulk density ของเชื้อเพลิง

ดังนั้น 0.15 m^3 < ปริมาตรเตาเผาฟางที่ใช้ < 0.67 m^3 ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับเชื้อเพลิงที่ใช้ (ฟางอัด) เป็นข้อมูลเฉพาะซึ่งมีได้หลายค่า โดยจะเก็บได้ภายหลังจากการทดลองของโครงการนี้ และนอกจากนั้นค่าค่าง ๆ จากการเผายังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสภาวะในการเผา เช่น ค่าความเร็วหรือปริมาตรของอากาศที่จ่ายเข้าไปช่วยในการเผาไหม้ ฉะนั้น การออกแบบเตาจึงสามารถกำหนดได้อย่างหลากหลาย ในที่นี้จึงเลือกใช้ขนาดเตา 0.65 m^3

ขนาดของเตา (h =2d)

d^3 = 0.65 x 4 / 2¶ = 0.414 m^3

d ≈ *0.75 m ; h = 2d* ≈ *1.50 m*

Throth สำหรับแกลบ [1]

เตาผลิตแก๊สแบบ Double throat

Hearth Load for Downdraft Gasifier = (0.3 - 0.9) Nm^3 / hr- Cm^2

กำหนดค่า Hearth Load = 0.5 Nm^3/ hr-Cm^2 (อ.เกรียงศักดิ์ ขุนไชย และ รศ.อุทิศ หิมะคุณ)

อัตราการผลิตแก๊ส 15 – 20 m^3 / hr

กำหนดค่า อัตราการไหลแก๊ส = 20 m^3 / hr

∴ พื้นที่ Throat = 20 / 0.5

= 40 Cm^2

เส้นผ่านศูนย์กลางของ Throat ทางออก ≈ *7.15 Cm*

ผลิตภัณฑ์ที่ Throat ทางออก คิดเป็น 25.7 %

ผลิตภัณฑ์ที่ First Throat คิดเป็น 100 %

เส้นผ่านศูนย์กลางของ First Throat = (7.15 x 100) / 25.7 = 27.82 cm

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจ่ายอากาศเข้าสู่เตา

กำหนดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ = 4.46 x 10^{-3} m^3/s

ความเร็วของอากาศที่ใช้ = 2.20 m/s

จาก Q = Av

A = (4.46 x 10^{-3} m^3/s) / (2.20 m/s)

A = 0.0020 m^2

ดังนั้น จะใช้ท่อจ่ายอากาศเข้าสู่เตาเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50.8 mm

** ดูรายละเอียดของแบบเตาเผาได้ในภาคผนวก ง.

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟางข้าว

เล่มที่ 088

DEPARTMENT OF SCIENCE SERVICE
MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
RAMA VI ROAD, RATCHATHEWI DISTRICT
BANGKOK 10400
TEL. 0-2201-7000, FAX 0-2245-5001

รายได้แผ่นดิน
เลขที่ 038

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี
กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0-2201-7000, โทรสาร 0-2245-5001
เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 4101034070

ต้นฉบับใบเสร็จรับเงิน

วันที่ 31 มี.ค. 2547

ได้รับเงินจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ที่อยู่ ต.บ้านกรี ใก อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

รายการ	จำนวนเงิน
☑ ค่าวิเคราะห์ ฟางข้าว 1 ตัวอย่าง	3,000.00
☐ ค่าสอบเทียบเครื่องมือ	
☐ ค่าธรรมเนียมฝึกอบรม	
☐ ค่าแปล ฉบับ	
☐ CERTIFICATE ฉบับ	
☐ ค่าไฟฟ้า-ค่าน้ำประปา	
☐ ค่าภาษีหัก ณ ที่จ่าย 1% ตาม ม.69 ทวิ ในใบเสร็จรับเงินเล่มที่ เลขที่ ลงวันที่ จำนวนเงิน	
☐ อื่นๆ	
สามพันบาทถ้วน รวมเงินทั้งสิ้น	3,000.00

รับชำระเป็น ☑ เงินสด ☐ เช็คธนาคาร

หมายเลข ลงวันที่ จำนวนเงิน บาท

หมายเหตุ - ในกรณีชำระด้วยเช็คใบเสร็จรับเงินนี้จะสมบูรณ์ต่อเมื่อเช็คนั้นเรียกเก็บเงินได้
- โปรดนำใบเสร็จรับเงินนี้มาด้วยเมื่อรับผลการวิเคราะห์
- หักเปลี่ยนใบเสร็จรับเงินเลขที่ เล่มที่ ลงวันที่ เงิน บาท

ลงชื่อ ผู้รับเงิน
นางก้องฮา คารีน
(เจ้าพนักงานการเงินและบัญชี 3)

ที่ วท 0306/ 5903

ถึง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (ต.บ้านศรีโค)

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัตถุตัวอย่าง ตาม คำร้อง ลงวันที่ 30 มีนาคม 2547 เลขรับ 2218 วันที่ 30 มีนาคม 2547 ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 30 มีนาคม 2547

กรมวิทยาศาสตร์บริการ 30 เมษายน 2547

โครงการเคมี
โทร.0 2201 7216-7

รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง ตามที่ผู้ส่งเรียก	เครื่องหมาย ตรา ฯลฯ ที่ระบุตัวอย่าง	หมายเลข ปฏิบัติการ		As-Received Basis	Dry Basis
ฟางข้าว	-	XE.764	Ash, %	11.8	13.0
			Volatile matter, %	61.0	67.5
			Fixed carbon, %	17.7	19.5
			Carbon, %	39.2	43.3
			Hydrogen, %	5.4	4.8
			Nitrogen, %	0.63	0.70
			Oxygen, %	42.9	38.1

(นางสาวสวรรยา เชื้อพันธุ์)
นักวิทยาศาสตร์ 5

ค่าธรรมเนียมการวิเคราะห์ 2,700.00บาท (สองพันเจ็ดร้อยบาทถ้วน)

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เกี่ยวเนื่องจากงานวิจัย

(จากการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546, จังหวัดปราจีนบุรี, paper no. IC003)

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวมวลจากฟางข้าวโดยใช้เตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง

A Study of the Production of Biomass Gas from Rice Straw Using Downdraft Gasifier

อนิรุตต์ มัทธุจักร์*, กษมา เจนวิจิตรสกุล และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
85 ถ.สถลมาร์ค ต.เมืองศรีไค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
โทร (6645)288400-3 โทรสาร (6645)288378 E-mail: A.Matthujak@ubu.ac.th

Anirut Matthujak*, Kasama Janvijitsakul and Kulachate Pianthong
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University
85 Satholmark Road, Muang Sriki Sub District, Warinchamrap District, Ubonratchathani 34190

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาด้านการทดลองถึงความเป็นไปได้ ในการนำเอาฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีอยู่มากในประเทศไทยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซชีวมวลโดยเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง ซึ่งเตาชนิดนี้มีลักษณะเด่นคือ ก๊าซชีวมวลที่ได้จะมีปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวน pyrolysis และ drying ต่ำ จึงเหมาะที่จะนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ยังทำการทดลองผลิตก๊าซชีวมวล และศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตก๊าซ จากผลการทดลองพบว่า เตาที่ทำการออกแบบและสร้างสามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้จริง และ จากการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ต่างกัน 3 ค่าคือ 8.83×10^{-4} m^3/s, 9.8×10^{-4} m^3/s และ 11.78×10^{-4} m^3/s โดยใช้ระยะเวลาทดลอง 100 min/batch และใช้เชื้อเพลิง 10 kg/bacth พบว่า ที่อัตราการไหลของอากาศ 9.8×10^{-4} m^3/s สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ในปริมาณมากและสม่ำเสมอที่สุด โดยมีปริมาณ CO ที่ค่าสูงสุดถึง 3500 ppm ในส่วนของพฤติกรรมการผลิตก๊าซภายในเตาได้ถูกตรวจสอบ โดยการวัดอุณหภูมิภายในเตาตามแนวแกนซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในเตาผลิตก๊าซ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตก๊าซชีวมวลจากเตาชนิดนี้ ยังจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทำการแก้ไขและปรับปรุงก่อนการนำไปประยุกต์ใช้ในจริงต่อไป

คำสำคัญ (Keywords) : ฟางข้าว / การผลิตก๊าซชีวมวล / เตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง

Abstract

This experimental study is to investigate the possibility of gasification from rice straw which are abundantly available in Thailand. The downdraft gasifier is designed, constructed and tested. From the tests, biogas can really be produced in reasonable amount and period. The advantage of the downdraft gasifier is that the producer gas from pyrolysis and drying process are much more ready to be used because there is low deposit. The experiments of three difference inlet air flow rate were investigated; 8.83×10^{-4} m^3/s, 9.8×10^{-4} m^3/s and 11.78×10^{-4} m^3/s, with operating time of 100 min/batch and feed of 10 kg fuel/bacth. The highest quantity and continuous flow of biomass gas is achieved from 9.8×10^{-4} m^3/s inlet air flow rate. This also offers the highest CO at about 3500 ppm. Characteristics of gasification process is examined by temperature gradient along the gasifier axis using 4 thermocouples. However, from this investigate further study is still required regarding to the problem of gas blockage and feed control before applying to practices.

Keywords : Rice straw / Gasification / Downdraft gasifier.

1. บทนำ

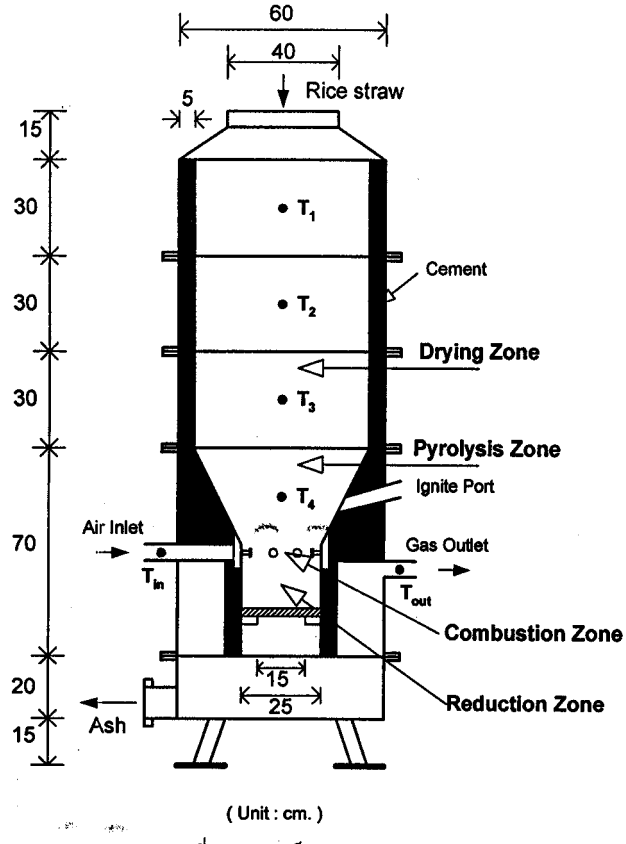
การใช้พลังงานในปัจจุบันส่วนใหญ่แล้วเป็นการนำเชื้อเพลิงฟอสซิล (fosil fuel) จากใต้พิภพ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานหลัก ยังผลให้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลง และส่งผลต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เช่น การสะสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ อันเป็นสาเหตุการเกิดสภาวะเรือนกระจก และทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าว จึงมีความพยายามในการนำพลังงานอื่นมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และ

* Corresponding author. Tel 045-288400-3 Ext 3815 Fax 045-288378
E-mail address : A.Matthujak@ubu.ac.th

เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่มากจากวัตถุดิบที่เหลือใช้ในธรรมชาติและการเกษตร ซึ่งสามารถนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หรือนำชีวมวลมาเปลี่ยนรูป (biomass energy conversoin) ก่อนนำไปใช้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะการผลิตก๊าซชีวมวล (gasification process) และการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis process) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลทางความร้อน (thermo-chemical conversion) ที่มีนักวิจัยหลายกลุ่มให้ความสนใจและทำการศึกษา อาทิเช่น McKendry [1] ได้อธิบายถึงกระบวนการและวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปชีว-มวล ซึ่งพบว่ากระบวนเปลี่ยนรูปชีวมวล (biomass conversion) มี 2 กระบวนหลักคือ การเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (bio-chemical conversion) และ การเปลี่ยนรูปโดยความร้อน (thermo-chemical conversion) ซึ่งนิยมใช้มาก ต่อมามีการผลิตก๊าซชีวมวล (gasification) จากขยะเหลือทิ้งโดยเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง (downdraft gasifier) โดย Dogru และคณะ [2] พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้และสามารถนำก๊าซชีวมวลที่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 5 kWe โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 40 % นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง มีข้อดีคือ ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้มีสิ่งปนเปื้อนน้อย ทำให้เหมาะสมในการนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (internal combustion engine) และอุปกรณ์อื่นๆ นอกจากนี้แล้ว ยังมีการผลิตก๊าซชีวมวลจากเปลือกเมล็ดถั่วจากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง โดย Dogru และคณะ [3] พบว่า ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ให้ค่าความร้อน (calorific value) สูงถึง 5 MJ/m^3 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ นอกจากเปลือกถั่วแล้วยังนำเศษไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซจากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงเช่นกัน โดย Zainal และคณะ [4] ซึ่งได้ศึกษาถึงอิทธิพลของ equivalence ratio ที่มีผลต่อส่วนประกอบของก๊าซชีวมวล ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวลและการผลิตก๊าซชีวมวลพบว่า การเพิ่มขึ้นของการผลิตก๊าซชีวมวล (gas flow rate per unit weight) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า equivalence ratio ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวลจะมีค่าสูงที่ค่า equivalence ratio ประมาณ 0.4 และส่วนประกอบของก๊าซชีวมวลจะมีค่าแตกต่างกันไปตาม equivalence ratio ซึ่ง Chen [5] ได้อธิบายเพิ่มเติมว่ายังมีตัวแปร (parameter) อื่นอีกเช่น reactor temperature เวลาของสารระเหยที่อยู่ภายใน reactor และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวมวล และยังพบว่าการผลิตก๊าซชีวมวลโดยกระบวนการ pyrolysis และ gasification ยังมีข้อเสีย คือ สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ในปริมาณน้อย และเกิดการกัดกร่อน (corrosion) บริเวณท้ายน้ำ (downstream) ของอุปกรณ์ ต่อมา Wu และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาถึงผลทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวมวล ซึ่งพบว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวมวล แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติม คือ 1.การกำจัดน้ำมันดิบ (tar) และมลภาวะที่เกิดจากการผลิต 2.การเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวมวล ซึ่งจะเป็นการลดค่าไฟฟ้าลง และ 3.จำเป็นต้องคำนึงถึงการเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลด้วย จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาทดลองการผลิตก๊าซชีวมวลจากเชื้อเพลิงชีวมวลต่างชนิดกันไป แต่การนำเอาฟางข้าวซึ่งเป็นชีว-มวลที่มีอยู่มากในประเทศไทย [7] มาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซชีว-มวลยังมีการศึกษาน้อยมาก จึงมีแนวคิดในการนำเอาฟางมาผลิตก๊าซชีวมวล โดยเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลจากฟางข้าว และหาแนวทางในการนำก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ อาทิ นำก๊าซชีวมวลที่ได้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรือนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น การทดลองในเอกสารนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นในการผลิตก๊าซชีวมวล โดยมุ่งเน้นถึงพฤติกรรมเบื้องต้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตก๊าซชีวมวล ซึ่งเป็นแนวทางในการนำไปสู่การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวมวลอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

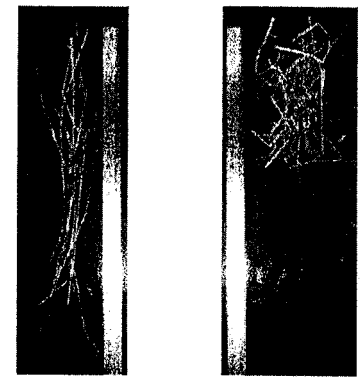
2. อุปกรณ์และวิธีทำการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวลจากฟางข้าว จะใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง (downdraft gesifier) ดังรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ถังบรรจุเชื้อเพลิง (fuel hopper) combustion and reduction zone และ ชั้นเก็บเถ้า (ash pit) ในส่วนของถังบรรจุเชื้อเพลิง (fuel hopper) ทำมาจากเหล็กหนา 2 mm ม้วนเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 cm แบ่งออกเป็น 3 ส่วนซึ่งแต่ละส่วนสูง 30 cm โดยมีความสูงรวม 105 cm ส่วนบนสุดเจาะเป็นช่องใส่เชื้อเพลิงมีฝาปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm ผนังด้านในหล่อด้วยปูนทนไฟ (cement) หนา 5 cm ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนสูญเสียที่บริเวณผนังเตา ในส่วนของ combustion และ reduction zone โครงสร้างภายนอกทำมาจากเหล็กหนา 2 mm ม้วนเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 cm เช่นเดียวกันกับถังบรรจุเชื้อเพลิง ซึ่งมีความสูง 70 cm. ภายใน combustion และ reduction zone สร้างจากเหล็กหนา 5 mm ม้วนเป็นทรงกรวยสูง 40 cm โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนของกรวย 50 cm และด้านล่างของกรวย 25 cm มีการหล่อปูนทนไฟระหว่างผนังเตาและผนังกรวย เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียของ combustion zone อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะถูกจ่ายโดยท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 cm เข้าไปในช่องจ่ายอากาศขนาดกว้าง 2.5 cm ซึ่งเป็นลักษณะวงแหวนรอบ combustion zone สำหรับการจ่ายอากาศเข้าไปยังห้องเผาไหม้ภายใน combustion zone จะจ่ายอากาศโดยหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 mm จำนวน 6 ตัว ชั้น reduction zone มีท่อม้วนหนา 5 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 cm เชื่อมต่อกับด้านล่างของกรวย ซึ่งมีความสูง 30 cm และถูกห่อหุ้มด้วยปูนทนไฟหนา 5 cm เช่นกัน บริเวณด้านล่างสุดจะเป็นตะแกรงรองรับเชื้อเพลิงทำจากเหล็กเส้นขนาด 5 mm มีระยะห่างระหว่างเหล็กเส้นประมาณ 4 cm ส่วนชั้นเก็บเถ้า (ash pit) สร้างจากเหล็กหนา 2 mm ม้วนเป็นรูปทรงกระบอกสูง 20 cm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 cm โดยมีช่องระบายเถ้าขนาด 15x15 cm และมีขาตั้งเพื่อให้เตาสูงจากพื้น 15 cm จำนวน 3 ขา โดยที่ทุกชั้นจะเชื่อมต่อกันโดยใช้หน้าแปลน (flange) และยึดติดกันด้วยน็อท ซึ่งระหว่างหน้าแปลนจะมีประเก็นเพื่อป้องกันการรั่วซึม พฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีว-มวลชนิดไหลลงจะถูกตรวจสอบ โดยการวัดอุณหภูมิภายใน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด k แบบ sheath จำนวน 4 ตำแหน่ง คือ T_1 ถึง T_4



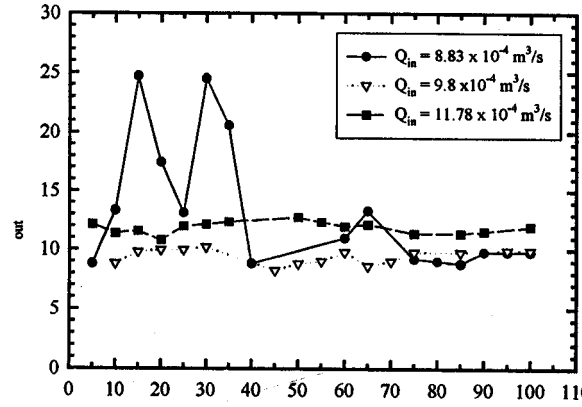
(Unit : cm.)

รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง



(a) (b)

รูปที่ 2 ลักษณะของฟางข้าวที่ใช้ผลิตก๊าซชีวมวล



รูปที่ 3 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่ออัตราการไหลของก๊าซชีวมวล Q_{out}

ส่วนพฤติกรรมการผลิตก๊าซชีวมวลจะถูกตรวจสอบ โดยการวัดปริมาณการไหลก๊าซชีวมวลซึ่งเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ (producer gas) จากการเผาไหม้ โดยใช้ air flow meter แบบ hot wire และยังวัดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (T_{in}) และอุณหภูมิของก๊าซชีวมวล (T_{out}) สัญญาณที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลจะถูกแสดงผลที่ data logger นอกจากนี้ ยังวิเคราะห์ส่วนประกอบเบื้องต้นของก๊าซชีวมวลโดยใช้ exhaust analyzer ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ (CO) ในลักษณะไอเสียแห้ง (dry basis)

การทำการทดลองการผลิตก๊าซชีวมวลจากฟางข้าว เริ่มแรกโดยการเตรียมฟางข้าวจากเดิมที่เป็นเส้นขนาดยาวประมาณ 60 cm. ทำการย่อยขนาดฟางข้าวลงให้มีขนาดประมาณ 10 cm ถึง 25 cm แล้วบรรจุลงในเตาประมาณ 10 kg และปิดฝา แล้วทำการเปิดวาล์วอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ หลังจากนั้นทำการจุดไฟที่ ignite port โดยการใช้ pilot flame เมื่อมีการผลิตก๊าซชีวมวลโดยมีก๊าซชีวมวลไหลออกมาทางท่อทางออกแล้ว ทำการทดสอบการติดไฟของก๊าซชีวมวลที่บริเวณปล่องทดสอบการติดไฟ แล้วทำการบันทึกผลการทดลองเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการผลิตก๊าซชีวมวล

3. ผลการทดลอง

3.1 การทดลองเบื้องต้น

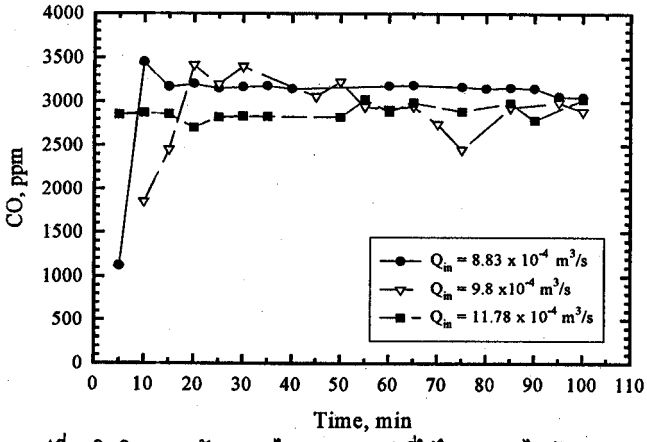
รูปที่ 2 แสดงถึงลักษณะของฟางข้าวที่ใช้การผลิตก๊าซชีวมวล โดยทำการทดลองผลิตก๊าซชีวมวลจากฟางข้าว 2 ลักษณะคือ ฟางข้าวที่ไม่มีการย่อยขนาด และฟางข้าวที่มีการย่อยขนาด จากการทดลอง เมื่อใช้ฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการย่อยขนาด (รูปที่ 2a) ซึ่งมีความยาวประมาณ 65 cm นำไปผลิตก๊าซชีวมวลพบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ในช่วงสั้นๆ คือประมาณ 5 นาทีแรก หลังจากนั้นก็ไม่มีการผลิตก๊าซชีวมวล ต้องมีการกระทุ้งฟางจากด้านบน ซึ่งสามารถผลิตก๊าซต่อได้และต้องทำเช่นนี้อย่างเป็นระยะ เนื่องจากฟางข้าวที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวมาก จึงทำให้เกิดการสานตัวกัน และเกาะกันเป็นกลุ่มลอยตัวอยู่บนชั้นบรรจุเชื้อเพลิงเพราะ bulk density ของฟางข้าวมีค่าต่ำมากประมาณ 80 kg/m^3 [8] จึงไม่มีการไหลลงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง จากปัญหาดังกล่าวจึงทำการย่อยฟางข้าวให้มีขนาดสั้นลงเหลือประมาณ 10 cm ถึง 25 cm (รูปที่ 2b) พบว่า มีการสานตัวของฟางข้าวน้อยลง ทำให้การไหลตัวลงของฟางข้าวเพื่อใช้ในการเผาไหม้และผลิตก๊าซต่อเนื่องมากขึ้น ดังนั้นในการทำการทดลองจึงจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องมีการเตรียมฟางข้าวก่อนการทดลอง

3.2 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

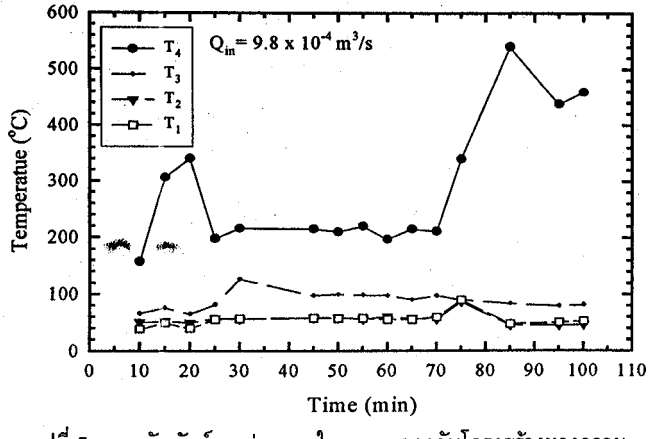
รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Q_{in}) ต่ออัตราการไหลของก๊าซชีวมวล (Q_{out}) พบว่าที่อัตราการไหล Q_{in} = 8.83 x 10^{-4} m^3/s ในช่วงเวลา 40 นาทีแรก การผลิตก๊าซชีว-

มวลเกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้น้อยจนเกินไป จึงส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้กลไกการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s และ Q_{in} = 11.78 x 10^{-4} m^3/s พบว่าก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้นั้นค่อนข้างต่อเนื่องตลอดช่วงการทดลอง และที่ Q_{in} = 11.78 x 10^{-4} m^3/s ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้มีปริมาณมากกว่าที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s ตลอดการทดลอง เนื่องจากปริมาณอากาศใช้ในการเผาไหม้ที่มากกว่านั่นเอง แต่จากรูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ Q_{in} ต่อปริมาณ CO กลับพบว่าปริมาณ CO ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซชีวมวลและเป็นส่วนประกอบที่บ่งบอกถึงคุณภาพของก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ ที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s มีปริมาณ CO เฉลี่ยเท่ากับ 2900 ppm ตลอดช่วงเวลาทำการทดลอง ซึ่งมีปริมาณมากกว่าที่ Q_{in} = 11.78 x 10^{-4} m^3/s อันเนื่องมาจากที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มากกว่า ถึงแม้ว่าปริมาณ CO ที่ผลิตได้ที่ Q_{in} = 8.83 x 10^{-4} m^3/s จะมีปริมาณมากกว่าที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s คือ เฉลี่ยประมาณ3100 ppm ก็ตามแต่ที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s มีอัตราการไหลของก๊าซชีวมวลที่สม่ำเสมอกว่าดังนั้นในการทดลองจึงใช้อัตราการไหล Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s ในการศึกษาพฤติกรรมการผลิตก๊าซชีวมวล

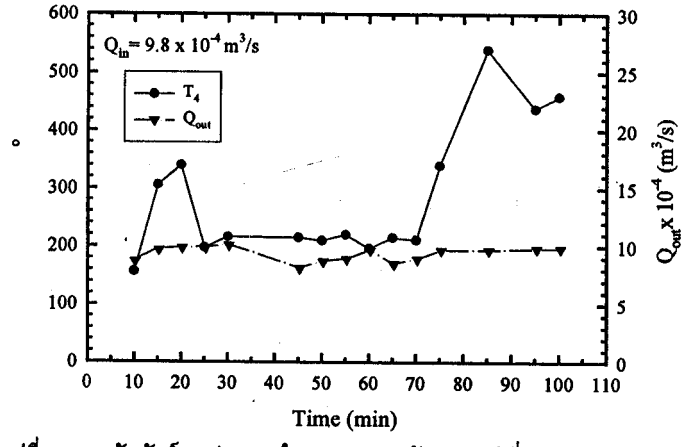
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับโครงสร้างทางความร้อน ที่ Q_{in} = 9.8 x 10^{-4} m^3/s พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_1 และ T_2 จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 50° ถึง 100 °C เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ T_3 ถึงแม้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าแต่มีค่าไม่เกิน 150 °C ตลอดการทดลอง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของพวกสารระเหย แต่ความชื้นในฟางข้าวจะถูกความร้อนทำให้ไอน้ำระเหยออกมา โดยทั่วไปไอน้ำจะเหยออกมาจากเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C ถึง 200 °C ดังนั้นเป็นไปได้ว่าน้ำภายในฟางข้าวจะระเหยที่บริเวณ T_1 ถึง T_3 โดยบริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า drying zone ส่วนที่ตำแหน่ง T_4 พบว่ามีอุณหภูมิประมาณ 150 °C ถึง 550 °C เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับบริเวณการเกิดกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นจึงได้รับความร้อนในปริมาณมากพอที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสาร organic ในฟางข้าวทำให้ได้น้ำมันดิบ (tar) ออกมา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ถึง 600 °C ดังนั้นบริเวณ T_3 จึงเป็นชั้น pyrolysis zone



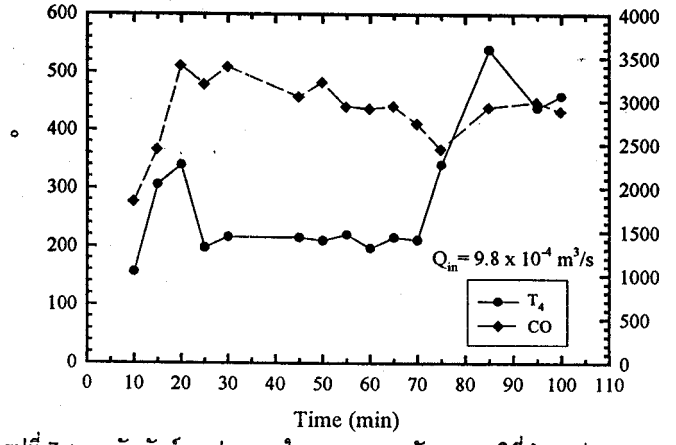
รูปที่ 4 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณ CO



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับโครงสร้างทางความร้อน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลอง กับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณก๊าซชีวมวล Q_{out}



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลอง กับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณ CO

(a) (b)

รูปที่ 8 ลักษณะเปลวไฟของการติดไฟของก๊าซชีวมวล

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลอง กับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และ ปริมาณก๊าซชีวมวล Q_{out} พบว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 (pyrolysis zone) ไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ตลอดช่วงการทดลอง อาจเนื่องมาจากตำแหน่งที่วัดอยู่ห่างจากบริเวณที่เกิดการผลิตก๊าซชีวมวลมาก จึงทำให้ผลของ T_4 ที่เปลี่ยนไปในช่วง 20 นาทีแรก และ ที่ช่วงเวลา 70 ถึง 110 นาที ซึ่งอาจเกิดจากการไหลของฟางข้าวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ และด้วยเหตุผลเดียวกันสำหรับปริมาณ CO ดังรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลอง กับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_4 และปริมาณ CO ก็ไม่ได้รับผลกระทบจาก T_4 โดยตรงเช่นกัน จากผลการทดลองดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงโครงสร้างของอุณหภูมิภายในเตาเพิ่มเติม เพื่อบ่งชี้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณก๊าซชีวมวลต่อไป

รูปที่ 8 แสดงลักษณะเปลวไฟของการติดไฟของก๊าซชีวมวลที่อัตราการไหล $Q_{in} = 9.8 \times 10^{-4}$ m^3/s พบว่า ในช่วง 30 นาทีแรก ลักษณะเปลวไฟที่ได้จะมีสีฟ้า ดังรูปที่ 8a ซึ่งจากสีของเปลวไฟของก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ในช่วงแรกอาจมี CH_4 .ในปริมาณมาก แต่เมื่อทำการผลิตก๊าซชีวมวลต่อไปพบว่าสีเปลวไฟของก๊าซชีวมวลจะเป็นสีเหลืองดังรูปที่ 8b ซึ่งเป็นลักษณะการติดไฟของก๊าซ CO

4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวมวลจากฟางข้าว ซึ่งจำเป็นต้องมีการย่อยขนาดของฟางข้าวก่อนทำการทดลอง เพื่อแก้ปัญหาการไหลลงที่ไม่ต่อเนื่องของฟางข้าว แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหา และพฤติกรรมการผลิตก๊าซชีวมวลอีกมากที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้การผลิตก๊าซชีวมวลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการใช้งานจริงได้ต่อไป ซึ่งมีข้อหัวที่ต้องศึกษาดังนี้

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมการเผาไหม้บริเวณ combustion zone และ reduction zone โดยการวัดอุณหภูมิบริเวณดังกล่าวเพื่อหาความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้

2.ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้ยังมีปริมาณน้อย และยังผลิตไม่ต่อเนื่อง จำเป็นต้องมีการแก้ไขปรับปรุง

3.ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้จากฟางข้าว จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ส่วนประกอบและหาค่าความร้อน (calorific value) เพื่อนำไปสู่การใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำงานวิจัยนี้ ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

6. เอกสารอ้างอิง

[1] P.McKendry "Energy Production from Biomass (part 2): Coversion Technologies", Bioresource Technology, 2002, Vol. 83, pp.47-54

[2] M.Dogru, Midill A. and Howarth C.R. "Gasification of Sewage Sludge Using a Throated Downdraft Gasifier and Uncertainty Analysis", Fuel Processing Technology, 2002, Vol. 75, pp.55-82

[3] M.Dogru, Howarth C.R., Akay G., Keskinler B. and Malik A.A. "Gasification of Hazenut Shell in a Downdraft Gasifier", Energy, 2002, Vol. 27, pp.415-427

[4] Z.A.Zainal, Rifau A., Quadir G.A. and Seetharamu K.N. "Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier", Biomass & Bioenergy, 2002, Vol. 23, pp.283-289

[5] G.Chen, Andries J., Luo Z. and Spliethoff H. "Biomass Pyrolysis/Gasification for Product Gas Production: the Overall Investigation of Parametric Effects", Energy Conversation & Management, 2003, Vol. 44, pp.1875-1884

[6] C.Z.Wu, Huang H. Zheng S.P. and Yin X.L. "An Economic Analysis of Biomass Gasification and Power Generation in China", Bioresource & Technology, 2002, Vol. 83, pp.65-70

[7] สุริย์ จรูญศักดิ์, "การศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตแกสชนิดไหลลงเพื่อใช้ในการผลิตเซรามิก", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี พ.ศ. 2543, หน้า 1-122

[8] A.Kaupp and Cross R.J.. "Small Scale Gas Producer – Engine System", Lengerrich, 1984, pp.29-65

ภาคผนวก จ
ประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ(ภาษาไทย) ผศ.ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง

   (ภาษาอังกฤษ) Asst.Prof.Dr. Kulachate PIANTHONG

2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 3499 00623 07 1

3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี 34190
Email: K.Pianthong@ubu.ac.th
Telephone: 045-353 381 Fax: 045-353 333

4. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษาที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญา วิชา	สาขา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2535	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล	-	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ไทย
2540	มหาบัณฑิต	M.Eng.Sc. (Mechanical Engineering)	วิศวกรรมเครื่องกล	Refrigeration and Air Conditioning design	The University of New South Wales	Australia
2545	ดุษฎีบัณฑิต	Ph.D. (Mechanical Engineering)	วิศวกรรมเครื่องกล	Combustion hypersonic jets	The University of New South Wales	Australia

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ: High-speed liquid fuel jets and shock wave characteristics, fuels & engine performance & engine emission, ejector refrigeration

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

   a. Heating-up Behaviour of Rotary Kiln in Cement Plant, TPI Polene Co. Ltd. Saraburi, THAILAND (1994)

   b. Hyper-velocity impact at Shock Wave Research Research Center, Institute of Fluid Sciences, Tohoku University, Sendai, JAPAN (1998)

   c. Combustion in Hypersonic Fuel jets at the Internal Combustion Engine Laboratory, The University of New South Wales, Sydney, AUSTRALIA. (1997-2001)

   d. Supersonic Liquid Fuel Jets at Interdisciplinary Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan (during 2001-2004, **เดินทางไปร่วมทำวิจัย 7 ครั้ง**)

   e. **งานวิจัย ขณะอยู่ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**

ลำดับที่	ชื่อโครงการวิจัย	แหล่งทุน	ช่วงเวลาทำโครงการ (ปีที่เริ่ม-สิ้นสุด)	ผู้ร่วมโครงการ
1	การออกแบบและทดสอบเตาเผาชีวมวลสำหรับเครื่องปั้นดินเผาแบบประสิทธิภาพสูง: กรณีศึกษาเตาเผาเครื่องปั้นดินเผา ตำบลปากห้วยวังนอง จังหวัดอุบลราชธานี (Design and Validation of High Efficiency Fired Clay Biomass-Kiln: Case Study at Pak Huay Wang Nong, Ubonratchathani)	งบประมาณประจำปี (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)	2546-2548 เป็นแผนงานวิจัย (โครงการชุด) อยู่ระหว่างทำรายงานฉบับสมบูรณ์	ผู้อำนวยการแผนงานวิจัยและหัวหน้าโครงการวิจัย ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง ผู้วิจัยหลัก ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ ผู้ร่วมงานวิจัย ร.ท. สมญา ภูนะยา นางสาวทรงสุภา พุ่มชุมพล นายประชาสันติ ไตรยสุทธิ์
2	การศึกษาและหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์ฉีดในระบบการทำ ความเย็นโดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลขและการทดลอง(Investigation and Optimization of Ejector Performance in Refrigeration System using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation and Experiment)	ทุนพัฒนาศักยภาพของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ปี 2546 (ระยะเวลา	2546-2548 เสร็จสมบูรณ์แล้ว (มกราคม 2549)	หัวหน้าโครงการวิจัย ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง Mentor: Prof. Masud Behnia (Sydney University)

		2 ปี)		
3	การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและการทดสอบกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก (Production of bio-diesel from used vegetable oil and engine performance tests)	ทุนสนับสนุนของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปี 2548	2548 เสร็จสมบูรณ์แล้ว (มกราคม 2549)	อ.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ (หัวหน้าโครงการ) ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง (นักวิจัยหลัก) นาย ทองคำ กิริยา นาย ไพบูลย์ เสถียรรัมย์
4	การศึกษาการผลิต และ วิเคราะห์ก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว โดยเตา Downdraft Gasifier	งบประมาณประจำปี (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)	2546-2548 อยู่ระหว่างทำรายงานฉบับสมบูรณ์	หัวหน้าโครงการ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง ผู้วิจัยหลัก นางสาวกษมา เจนวิจิตรสกุล ผู้ร่วมงานวิจัย 1 นายนิรันดร์ หันไชยุงวา ผู้ร่วมงานวิจัย 2 ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์
5	โครงการแบบจำลองสภาพน้ำท่วมพื้นที่ริมตลิ่งแม่น้ำมูล เพื่อทราบระดับน้ำและพื้นที่ท่วมนอง บริเวณเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี และเทศบาลเมืองวารินชำราบ	งบบูรณาการจังหวัดอุบลราชธานี	เสร็จสมบูรณ์แล้ว (2547)	นาย ฤกษ์ชัย ศรีวรมาศ (หัวหน้าโครงการ) นาย พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง (ผู้ร่วมงานวิจัย) นายธนรัฐ ศรีวีรกุล
6	การศึกษาอุปสงค์ อุปทาน เชื้อเพลิงชีวมวล ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กระทรวงพลังงาน	เสร็จสมบูรณ์แล้ว (2546)	ผศ. พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล (หัวหน้าโครงการ) ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง (ผู้ร่วมงานวิจัย) และ อื่นๆ อีกหลายท่าน

7. บทความทางวิชาการ **(List of Publications: Kulachate Pianthong)**

International Refereed Journals

[1] **K. Pianthong**, S. Zakrzewski, B.E. Milton, and M. Behnia, "Supersonic liquid jets; their generation and shock wave characteristics," *Shock Waves Journal*, Vol. 11, no. 6, pp. 457-466, 2002. (average impact factor = 0.442, between 2002-2004)

[2] **K. Pianthong**, S. Zakrzewski, M. Behnia, and B.E. Milton, "Characteristics of impact driven supersonic liquid jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 27 (5), pp. 589-598, 2003. (average impact factor = 0.663, between 2002-2004), invited paper.

[3] **K. Pianthong**, B.E. Milton, and M. Behnia, "Generation and shock wave characteristics of unsteady pulsed supersonic liquid jets," *Journal of Atomization and Sprays*, vol. 13, no. 5&6, pp. 475-498, 2003. (average impact factor = 0.512, between 2002-2004)

[4] S. Zakrzewski, B.E. Milton, **K. Pianthong**, and M. Behnia, "Supersonic liquid fuel jets injected into quiescent air," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp 833-840, 2004. (average impact factor = 1.018, between 2002-2004)

[5] **K. Pianthong**, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact," *Shock Waves Journal*, (in press Vol. 14, 2004). (average impact factor = 0.442, between 2002-2004)

[6] B.E. Milton and **K. Pianthong**, "Pulsed, supersonic fuel jets - A review of their characteristics and potential for fuel injection," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, issue 4 , pp. 656-671, 2005. (average impact factor = 1.018, between 2002-2004)

[7] **K. Pianthong**, A. Matthujak, K. Takayama, T. Saito, and B. Milton, "Visualization of supersonic liquid fuel jets," *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 13, pp. 1-25, 2006. (in press), invited paper.

Domestic Refereed Journal

[1] I. Worapun, **K. Pianthong**, S. Pongstabodee, and D. Soodphakdee "Performance and Emission Characteristics in Diesel Engine Using Biodiesel from Waste Cooking Oil-Ethanol Blend as a Fuel," *KKU Engineering Journal*, Vol. 33, no. 6, pp. 691-705, 2006. (in Thai)

[2] W. Seehanam, **K. Pianthong**, M. Behnia, T. Sriveerakul, S. Apornratana, "Investigation on Characteristic of Ejector Refrigeration using CFD," *KKU Engineering Journal*, Vol. 33, no. 6, pp. 629-644, 2006. (in Thai)

International Refereed Conferences

[1] **K. Pianthong**, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Micro two-stage light gas gun performance test and its penetration on a Whipple bumper shield," *Proceedings of the 22nd International Symposium on Shock Waves (ISSW22) Conference*, London, UK, paper no. 1650, pp.541-546, 18-23 July 1999.

[2] **K. Pianthong**, S. Zakrzewski, B.E. Milton, and M. Behnia, "Generation of supersonic diesel fuel jets: does auto-ignition occur?," *Proceedings of the 16th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS-Europe)*, Darmstatd, Germany, paper no. I. 11, 11-13 September 2000.

[3] **K. Pianthong**, M. Behnia, and B.E. Milton, "Visualization of supersonic diesel fuel jets using shadowgraph technique," *Proceedings of the 24th International Congress on High-Speed Photography and Photonics (ICHSPP24)*, Sendai, Japan, pp. 845-855, 24-29 September 2000.

[4] **K. Pianthong**, S. Zakrzewski, B.E. Milton, and M. Behnia, "Contribution to auto-ignition of the shock wave characteristics from supersonic diesel fuel jets," *Proceedings of the 23rd International Symposium on Shock Waves (ISSW23) Conference*, Fort Worth, Texas, USA, paper no. 2398, pp. 165-172, 22-27 July 2001.

[5] S. Zakrzewski, **K. Pianthong**, M. Behnia, and B.E. Milton, "CFD predictions of bow shock characteristics ahead of a high-speed liquid jet," *Proceedings of the 23rd International Symposium on*

Shock Waves (ISSW23) Conference, Fort Worth, Texas, USA, paper no. 3124, pp. 698-704, 22-27 July 2001.

[6] **K. Pianthong**, S. Zakrzewski, B.E. Milton, and M. Behnia, "Generation and analysis of impact driven water and diesel fuel jets in the supersonic range," *Proceedings of the 17th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS-Europe)*, Zurich, Switzerland, pp. 279-284, 2-6 September 2001.

[7] **K. Pianthong**, M. Behnia, and B.E. Milton, "Study of shock wave characteristics of supersonic diesel fuel jets using a shadowgraph technique," *Proceedings of the 14th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC14)*, Adelaide, Australia, pp. 777-780, 9-14 December 2001.

[8] S. Zakrzewski, **K. Pianthong**, M. Behnia, and B.E. Milton, "A blunt body analogy for bow shock characteristics in front of a supersonic liquid jet," *Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Fluid dynamics (ICCFD2)*, Sydney, Australia, 15-19 July 2002, pp. 229 - 234.

[9] **K. Pianthong**, B.E. Milton, and M. Behnia, "Fundamentals of supersonic diesel fuel jets for use in diesel engine," *Proceedings of the 12th International Pacific Conference on Automotive Engineering (12IPC)*, paper no. D08, 1-4 April 2003, Bangkok, Thailand.

[10] **K. Pianthong**, M. Behnia, and B.E. Milton, "Visualization of supersonic liquid diesel fuel jets: effect of nozzle geometries on jet shapes and shock waves characteristics," *Proceedings of the 7th Asian Symposium on Visualization (7ASV)*, 3-7 Nov. 2003, Singapore.

[11] B.E. Milton, **K. Pianthong**, and M. Behnia, S. Zakrzewski, K. Takayama, "Supersonic and hypersonic liquid jets: Part 1--overview, theory of impact driven injection pressure and jet velocity predictions," *Proceedings of the International Symposium on Interdisciplinary Shock Wave Research*, Sendai, Japan, 22-24 March, 2004.

[12] **K. Pianthong**, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Supersonic and hypersonic liquid jets: Part 2--Experiments, nozzle profiles, penetration and velocity attenuation" *Proceedings of the International Symposium on Interdisciplinary Shock Wave Research*, Sendai, Japan, 22-24 March, 2004.

[13] M. Behnia, S. Zakrzewski, **K. Pianthong**, B.E. Milton, and K. Takayama, "Supersonic and hypersonic liquid jets: Part 3--Simulation of shock wave structures and liquid/air mixing layers" *Proceedings of the International Symposium on Interdisciplinary Shock Wave Research*, Sendai, Japan, 22-24 March, 2004.

[14] **K. Pianthong**, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Motion of unsteady pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets" *Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena*, Bangkok, Thailand, 9-13 May, 2004.

[15] **K. Pianthong**, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Penetration and velocity attenuation of pulsed supersonic liquid jets," *Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves* (ISSW24), Beijing, 11-16 July 2004, paper no.3591.

[16] B.E. Milton, **K. Pianthong**, "Prediction of the driving conditions for hypersonic liquid fuel jets," *Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves* (ISSW24), Beijing, 11-16 July 2004, paper no. 3771.

[17] **K. Pianthong**, A. Matthujak, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Fundamental studies on effects of nozzle geometries and fuel properties on the characteristics of supersonic fuel jets," *Proceedings of the 2nd International Symposium on Interdisciplinary Shock Wave Research*, Sendai, Japan, 1-3 March, 2005.

[18] **K. Pianthong**, A. Matthujak, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Confirmation of multiple pulsed phenomena in supersonic liquid fuel jets by optical visualization and high speed video camera," *Proceedings of the 8th Asian Symposium on Visualization (8ASV)*, 23-27 May. 2005, Chiangmai, Thailand.

[19] W. Seehanam, K. Sahumin, **K. Pianthong** and M. Behnia, "Prediction of flow characteristic and performance of steam ejector in refrigeration cycle using CFD," *Proceedings of the 8th Asian Symposium on Visualization (8ASV)*, 23-27 May. 2005, Chiangmai, Thailand.

[20] A. Matthujak, **K. Pianthong**, M. Sun, K. Takayama, T. Ikohagi, "Effect of different fuels on the characteristics of supersonic liquid fuel jets," *Proceedings of the 25th International Symposium on Shock Waves* (ISSW25), Bangalore, India, 17-19 July 2005, paper no.1104.

[21] B.E. Milton, M. Watanabe, T. Saito, **K. Pianthong**, "Simulation of supersonic liquid jets using the Autodyne," *Proceedings of the 25th International Symposium on Shock Waves* (ISSW25), Bangalore, India, 17-19 July 2005, paper no.1185.

[22] **K. Pianthong**, "Visualisation of supersonic liquid fuel jets," *Proceedings of the 5th Pacific Symposium on Flow Visualisation and Image Proceeding (PSFVIP5),* 27-29th September, 2005, Australia **(Keynote Lecture).**

[23] P. Techarungpaisan, S. Theerakulpisut, S. Priprem, **K. Pianthong**, "Investigation on the performance of a hot water heater using waste heat from a small split-type air conditioner," *Proceedings of the 5th Pacific Symposium on Flow Visualisation and Image Proceeding (PSFVIP5),* 27-29th September, 2005, Australia.

[24] A. Matthujak, **K. Pianthong**, M. Sun, K. Takayama, and T. Ikohagi, *"Characteristics of High-Speed Liquid Fuel Jets,"* The 16th Japanese Symposium of Shock Wave (JSSW16), Sendai, Japan, March 17-19, 2005, pp 435-438.

[25] A. Matthujak, S.H.R. Hosseini, K. Takayama, M. Sun, **K. Pianthong**, and T. Ikohagi, *"Pressure measurement inside the nozzle during high-speed liquid jet generation,"* The 17th Japanese Symposium of Shock Wave (JSSW17), Yogohama, Japan, March 16-18, 2006, pp 289-292.

National Refereed Conferences

[1] **K. Pianthong**, "Generation, shock wave characteristics, and auto-ignition investigation of supersonic liquid diesel fuel jets," *Proceedings of the 3rd National Symposium on Graduate Research* (Thailand), 18-19 July, 2002.

[2] **K. Pianthong**, B.E. Milton, and M. Behnia, "Auto-ignition feasibilities of supersonic liquid diesel fuel jets at low ambient conditions," *Proceedings of the 16th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Phuket, 14-16 October, 2002 .

[3] E. Rusly, Lu Aye, W.W.S. Charters, A. Ooi, and **K. Pianthong**, "Ejector CFD modelling with real gas model," *Proceedings of the 16th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Phuket, 14-16 October, 2002.

[4] **K. Pianthong**, H. Yamashita, B.E. Milton, and T. Saito, "Estimation of driving pressure and jet velocity for projectile impact driven supersonic water jets," *Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Prajeenburi, 15-17 October, 2003, paper no TF038.

[5] **K. Pianthong**, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Measurements of attenuation and penetration of pulsed supersonic liquid diesel fuel jets - the possibility for use in diesel engines," *Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Prajeenburi, 15-17 October, 2003, paper no TF039.

[6] A. Matthujak, K. Janevijitsakul, and **K. Pianthong**, "A Study of the production of biomass gas from rice straw using a downdraft gasifier," *Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Prajeenburi, 15-17 October, 2003, paper no. IC003. (in Thai)

[7] A. Matthujak, **K. Pianthong** and K. Takayama, "Performance of a vertical two-stage light gas gun and its applications," *Proceedings of the Conference on 40th Year Anniversary of Engineering Faculty of Khonkaen University,*Khonkaen, Thailand, 22-24 January 2004, pp.xx-yy. (in Thai)

[8] **K. Pianthong**, V. Seehanam, K. Chunnanond, S. Aphornratana, M. Behnia, "Prediction of performance and flow behavior of steam ejector using computational fluid dynamics techniques," *Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering* (ANSCSE8), at Nakorn Ratchaseema, Thailand , 21-23 July 2004, paper no. CFDM-028.

[9] I. Vorapun, V. Meetham, S. Srisuruk, and **K. Pianthong**, "Production of biodiesel from used cooking oil and effect to engine performances," *Proceedings of the 18th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Khonkaen, 18-20 October, 2004, paper no. ETM19. (in Thai)

[10] V. Seehanam, **K. Pianthong**, M.Behnia, K. Chunnanond, and S. Aphornratana, "Simulation on performance of CPM and CRMC steam ejectors using CFD technique," *Proceedings of the 18th Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Khonkaen, 18-20 October, 2004, paper no. CST29.

[11] **K. Pianthong**, I. Vorapun, P. Triyasut, P. Sombutwong, N. Soodsane, "Production of biodiesel from used cooking oil at 150 liter/batch and its effect to engine performances," *Proceedings of the 1st*

Annual Conference of Energy Network of Thailand (E-Nett) , Pattaya City, 11-13 May, 2005, paper no. RE07. (in Thai)

[12] C. Thinvongpituk and **K. Pianthong**, "Temperature Distribution in Wood-Fired Ceramic Kilns," *Proceedings of the 1st Annual Conference of Energy Network of Thailand (E-Nett)* , Pattaya City, 11-13 May, 2005, paper no. AE007. (in Thai)

[13] I. Vorapun, **K. Pianthong**, S. Pongsathanbordee, and D. Soodphukdee "Study of performance and black smoke in diesel engine using bio-diesel ethanol blend as a fuel," *Proceedings of the 19th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Phuket, 19-21 October, 2005, paper no. ETM033. (in Thai)

[14] V. Seehanam, **K. Pianthong**, T. Sriveerakul, S. Aphornratana, and M.Behnia, "Design and test of CRMC steam ejector in refrigeration system," *Proceedings of the 19th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Phuket, 19-21 October, 2005, paper no. CST043. (in Thai)

[15] T. Limsuwan, P. Techarungpaisan, **K. Pianthong**, and A. Teeboonma, "The sun tracking system for solar energy measurements," *Proceedings of the 2nd Annual Conference of Energy Network of Thailand (E-Nett)* , Nakorn Ratchatsima, 27-29 July, 2006, paper no. Enett49-073. (in Thai)

[16] P. Triyasuti, **K. Pianthong**, T. Kiriya, P. Sathenrum, "Production of biodiesel from used vegetable oil and effect to engine performances" The 1st conference of Ubon Ratchathani University, 28-29 July 2006. (in Thai)

[17] P. Techarungpaisan, T. Limsuwan, **K. Pianthong**, and C. Thinwongpituk "Effect of Heating Coil Length on Performance Characteristic of Hot Water Heater Using Waste Heat from Small Split-type Air Conditioner" The 1st conference of Ubon Ratchathani University, 28-29 July 2006. (in Thai)

[18] K. Sateinsavapak, **K. Pianthong**, and I. Worapun "Effect to Performance and Wear of Engine in Long Term Test Using Biodiesel from Wasted Cooking Oil as a Fuel" *Proceedings of the 19th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* Nakorn Ratchatsima, 18-20 October, 2006, paper no. ETM039. (in Thai)

- ผู้วิจัยหลัก

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาวกษมา เจนวิจิตรสกุล
   (ภาษาอังกฤษ) MissKasama Janvijitsakul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ระดับ 3
   ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
3. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	จังหวัด/ประเทศ
2539	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต	วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	-	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	ไทย
2543	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต	วศ.ม.	เทคโนโลยีพลังงาน	-	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ไทย

- ผู้ร่วมงานวิจัย 1

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายนิรันดร์ หันไชยุงวา
   (ภาษาอังกฤษ) Mr. Nirun Hunchaiyungva
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ระดับ 6
   ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
3. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2523	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	วศ.บ.	เครื่องกล	-	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	ไทย

ผู้ร่วมวิจัย2

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ผศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

(English) (Asst.Prof.Dr. Chawalit THINVONGPITUK)

2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 3497 00058 141

3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 7
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
โทรศัพท์ 045 288400 ต่อ 3380, 3382 โทรสาร 045 353 333

4. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษาที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญาวิชา	สาขา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2539	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล) (เกียรตินิยมอันดับ 2)	วิศวกรรมเครื่องกล	-	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ไทย
2545	ดุษฎีบัณฑิต	Ph.D. (Mechanical Engineering)	Mechanical Engineering	-	University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST)	สหราช-อาณาจักร

5. ผลงานวิจัย บทความทางวิชาการ และสิ่งตีพิมพ์

[1] C Thinvongpituk, H. El-Sobky "The effect of end conditions on the buckling load characteristic of conical shells subjected to axial loading" The ABAQUS Users' Conference Proceedings, 2003 June 4-6, 2003, Munich, Germany.

[2] C Thinvongpituk, H. El-Sobky "Buckling of axially compressed conical shells of linearly variable thickness" The 2nd MIT Conference on Computational Fluid Dynamics and Solid Mechanics, June 17-20, 2003, MIT, USA

[3] C Thinvongpituk, H. El-Sobky "The buckling load characteristic of conical shells under various end conditions" Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network Thailand, 15-17 October, 2003.

[4] C Thinvongpituk, P. Techarungpaisarn, H. El-Sobky "Buckling of axially compressed conical shells of linearly variable thickness using structural model" Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network Thailand, 15-17 October, 2003.

[5] C. Thinvongpituk and **K. Pianthong**, "Temperature Distribution in Wood-Fired Ceramic Kilns," *Proceedings of the 1st Annual Conference of Energy Network of Thailand (E-Nett)* , Pattaya City, 11-13 May, 2005, paper no. AE007. (in Thai)