



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลักซ์เบด

โดย นายสุนทร ละอองนวล

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก)

13 พฤษภาคม 2548

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.นตร วรสุวรรณรักษ์)

การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลักซ์เบด

นายสุนทร ละอองนวล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-19-0278-6

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Name : Mr.Sunthorn Laaongnaun
Thesis Title : Study of the Fuel Biomass Combustion in a Fixed Bed
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Assistant Professor Dr.Suthum Patumsawad
Associate Professor Dr.Somrat Kerdsuwan
Academic Year : 2004

Abstract

Experiment were carried out to receive the fundamental data on parameters that characterize the combustion of Bagasse in a fixed bed reactor that composed of flame propagation velocity, combustion rate.

The experiments were performed as batch and bagasse was used as fuel. The variables investigated are air to fuel ratio, input air speed and temperature of primary air. The varying conditions were operated as follows: total air supply in the rates of 200, 300 and 400 LPM having air primary speed of 188, 282 and 377 mm/s respectively. In addition to normal temperature of combustion air that supplied to the bottom of the bed, temperature of primary air input were also heated by air heater before entry to the furnace at the temperature of 100, 150 and 200 °C. Axial temperature along the bed height and continuous monitoring of gases emission were recorded. These results were conducted to calculate the parameters concerned as mentioned earlier. The results disclose that bagasses combustion at ambient temperature (non-preheat of primary air) is governed by volatile combustion with char combustion following instantaneously. The combustion rate varies from 0.044-0.338 g/s. and flame speed from 1.59-2.87 mm/s depending on speed and volume of air. Combustion rates are 0.076, 0.188 and 0.338 g/s and flame speed are 1.86, 1.71 and 1.69 mm/s for total air of 200, 300 and 400 LPM respectively. When primary air velocities reduced, Combustion rates reduced to be 0.044, 0.085 and 0.177 g/s whereas flame speeds increased to be 2.87, 1.94 and 1.59 mm/s for the velocity of 94, 141 and 188 mm/s. When increase primary air temperature, the range of combustion rate and flame speed changed to be 0.017-0.114 g/s and 2.46-5.55 mm/s respectively by which depending on only . Depending on volume of air and primary air of velocity with total air is 200, 300 and 400 LPM and primary air

of velocity is 188, 282 and 377 mm/s results combustion rate 0.036, 0.051 and 0.077 g/s and flame speeds 4.37, 3.72 and 3.50 mm/s. When primary airdrop is 0.094, 0.141 and 0.188 m/s results combustion rate lower is 0.028, 0.56 and 0.076 g/s and flame speeds increased is 5.43, 5.55 and 5.30 mm/s. However, In the increasing total air and primary air temperature non-combustion rate increase from bagass combustion at ambient temperature.

(Total 108 pages)

Chairperson

ชื่อ : นายสุนทร ละอองนวล
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลักซ์เบด
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ
ปีการศึกษา : 2547

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่แสดงคุณลักษณะของการเผาไหม้ในเตาฟลักซ์เบดซึ่งได้แก่ อัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟ โดยทดลองแบบแบทช์ (Batch) และใช้ขาน้อยเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณอากาศ ความเร็วอากาศที่ป้อนและอุณหภูมิอากาศที่ป้อน ที่มีผลต่อการเผาไหม้ดังกล่าว

การทดลองได้กระทำในกรณีต่างๆดังนี้ คือ การเผาไหม้ขาน้อยแบบแบทช์ กรณีปริมาณอากาศ 200, 300 และ 400 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ 188, 282 และ 377 มิลลิเมตรต่อวินาที และที่อุณหภูมิทางเข้าอากาศปฐมภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส ในการทดลองแต่ละครั้งได้ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ อย่างต่อเนื่องแล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟ ผลการศึกษาพบว่า การเผาไหม้ขาน้อยที่สถานะแวดล้อมโดยมีการเผาไหม้สารระเหยและถ่านอย่าง ต่อเนื่อง ด้วยอัตราการเผาไหม้ 0.044-0.338 กรัมต่อวินาที ความเร็วของเปลวไฟ 1.59-2.87 มิลลิเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศกับความเร็วกว่าที่ป้อนให้ โดยที่ปริมาณอากาศรวม 200, 300 และ 400 ลิตรต่อวินาที และความเร็วอากาศปฐมภูมิ 188, 282 และ 377 มิลลิเมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ 0.076, 0.188 และ 0.338 กรัมต่อวินาที และความเร็วเปลวไฟ 1.86, 1.71 และ 1.69 มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อความเร็วของอากาศปฐมภูมิลดลง 94, 141 และ 188 มิลลิเมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงเป็น 0.044, 0.085 และ 0.177 กรัมต่อวินาที และความเร็วเปลวไฟเพิ่มขึ้นเป็น 2.87, 1.94 และ 1.59 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในทางตรงข้ามเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอากาศปฐมภูมิให้สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่ อัตราการเผาไหม้อยู่ในช่วง 0.017-0.114 กรัมต่อวินาที และความเร็วของเปลวไฟ 2.46-5.55 มิลลิเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศกับความเร็วกว่าที่ป้อนโดยที่ปริมาณอากาศ 200, 300 และ 400 ลิตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ 0.036, 0.051 และ

0.077 กรัมต่อวินาที และความเร็วเปลวไฟ 4.37, 3.72 และ 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อความเร็วของอากาศปฐุมภูมิลดลง 94, 141 และ 188 มิลลิเมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง 0.028, 0.56 และ 0.078 กรัมต่อวินาทีและความเร็วเปลวไฟเพิ่มขึ้นเป็น 5.43, 5.55 และ 5.30 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ อย่างไรก็ตามซึ่งพบว่าในการอุ่นอุณหภูมิอากาศปฐุมภูมิที่ทางเข้าเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยทำให้ อัตราการเผาไหม้ไปว่าการเผาไหม้ชานอ้อยที่สภาวะแวดล้อม

(วิทยานิพนธ์นี้มีจำนวนทั้งสิ้น 108 หน้า)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ ซึ่งเป็นผู้แนะนำ สนับสนุน ให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหาในระหว่างทำวิทยานิพนธ์จนทำสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ ที่ได้ให้คำแนะนำ ปรึกษาทางด้านวิชาการ ทางด้านเทคนิคการใช้อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆและวิธีการทดลอง

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ โรงงานน้ำตาลรีไฟน์ซึ้งมงคล จ.สุพรรณบุรี ที่ได้อนุเคราะห์ฐานข้อมูลพร้อมทั้งเอกสารต่างๆ เพื่อใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนวิชาความรู้มา เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำแนะนำในการทดลองและวิจัย เพื่อนๆทุกคน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบิดา มารดาและพี่ๆที่คอยเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ชาญชัย ทองประสิทธิ์ และอาจารย์วีระ ทองประสิทธิ์ ที่ได้สั่งสอนอบรมให้คำแนะนำช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นายณัฐสุทธิ แมนธนานนท์ ที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์และบัณฑิตวิทยาลัยร่วม ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งศูนย์วิจัยการเผาไหม้ของเสีย ภาควิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้อำนวยความสะดวก สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ

สุนทร ละอองนวล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ถ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 วัตถุประสงค์	5
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	5
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ทฤษฎี	
2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล	6
2.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิง	6
2.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิง	6
2.2 การเผาไหม้	8
2.2.1 การผสม	9
2.2.2 การลุกไหม้	9
2.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	10
2.4 การเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลักซ์เบด	13
2.5 เวลาการเผาไหม้หมด	15
2.6 อัตราการเผาไหม้	16
2.7 ความเร็วของเปลวไฟและอุณหภูมิติดไฟ	17
2.8 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง	
3.1 ระบบเตาเผาแบบฟลักซ์เบด	24
3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	31
3.3 ขั้นตอนเตรียมการทดลอง	31
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	32
4. ผลการทดลอง	
4.1 ผลการเผาไหม้ที่ สภาวะแวดล้อม	53
4.2 ผลการเผาไหม้ที่ อุณหภูมิ 100, 150 และ 200 ⁰ C	56
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก ก	63
ภาคผนวก ข	71
ประวัติผู้วิจัย	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	7
2-2 การเปรียบเทียบของค่าประกอบของชานอ้อย	8
3-1 แสดงช่วงการวัดก๊าซ	30
4-1 แสดงการทดลองที่สภาวะแวดล้อม 100, 150 และ 200 ⁰ C	33
4-2 รายละเอียดสภาวะการทดลอง	34
4-3 สรุปผลการทดลอง	35
ก-1 เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้	68
ก-2 อุณหภูมิจุดติดไฟ	69
ก-3 ความเร็วเปลวไฟ	69
ก-4 เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้	69
ก-5 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	70

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง	10
2-2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	11
2-3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	11
2-4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้	12
2-5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้	12
2-6 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผาแบบฟลักซ์เบด	14
2-7 ภาพจำลองเตาเผาแบบฟลักซ์เบด	18
3-1 อุปกรณ์ต่างๆพร้อมติดตั้งเครื่องมือวัด	24
3-2 เตาเผาแบบฟลักซ์เบด	25
3-3 (ก)เครื่องวัดอากาศ (ข)ชุดกรองและตัวปรับความดัน	25
3-4 เครื่องมือวัดอัตราการไหล	26
3-5 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	26
3-6 ฝาเตา	27
3-7 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล	28
3-8 เครื่องบันทึกข้อมูล	28
3-9 อุปกรณ์ดูดก๊าซ	29
3-10 อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซแบบนอลดิสเพอร์ซิฟอินฟราเรด	30
3-11 ชุดเก็บสัญญาณรุ่น DS-600 และ DS-100	31
4-1 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	36
4-2 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	36
4-3 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	37
4-4 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	38
4-6 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	38
4-7 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	39
4-8 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	39
4-9 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	40
4-10 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	40
4-11 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	41
4-12 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	41
4-13 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	42
4-14 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	42
4-15 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	43
4-16 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	43
4-17 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-18 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	44
4-19 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	45
4-20 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	45
4-21 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	46
4-22 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	46
4-23 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	47
4-24 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	47
4-25 แสดงอุณหภูมิจุดติดไฟของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	48
4-26 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 200, 100 ต่อปริมาณอากาศรวม ที่ 200 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	49
4-27 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 300, 200, 150 และ 100 ต่อปริมาณ อากาศรวมที่ 300 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	49
4-28 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 400, 300, 200 และ 100 ต่อปริมาณ อากาศรวมที่ 400 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	49
4-29 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 200, 300 และ 400 LPM ต่อปริมาณ อากาศรวม 200, 300 และ 400 LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	50
4-30 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 100, 150 และ 200 LPM ต่อปริมาณ อากาศรวม 200, 300 และ 400 LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-31 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐุมภูมิ 200, 100 ต่อปริมาณอากาศรวม ที่ 200 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	51
4-32 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐุมภูมิ 300, 200, 150 และ 100 ต่อปริมาณ อากาศรวมที่ 300 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	51
4-33 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐุมภูมิ 400, 300, 200 และ 100 ต่อปริมาณ อากาศรวมที่ 400 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 ⁰ C	51
4-34 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐุมภูมิ 200, 300 และ 400 LPM ต่อปริมาณ อากาศรวม200, 300และ400LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150และ200 ⁰ C	52
4-35 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐุมภูมิ 100, 150 และ 200 LPM ต่อปริมาณ อากาศรวม200, 300และ400LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150และ200 ⁰ C	52
ข-1 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	72
ข-2 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	72
ข-3 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	73
ข-4 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	73
ข-5 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ T=100 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	74
ข-6 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ T=100 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	74
ข-7 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	75
ข-8 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-9 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	76
ข-10 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	76
ข-11 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	77
ข-12 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	77
ข-13 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	78
ข-14 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	78
ข-15 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	79
ข-16 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	79
ข-17 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	80
ข-18 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	80
ข-19 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	81
ข-20 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	81
ข-21 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-22 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	82
ข-23 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	83
ข-24 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	83
ข-25 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	84
ข-26 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	84
ข-27 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	85
ข-28 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	85
ข-29 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	86
ข-30 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	86
ข-31 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	87
ข-32 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	87
ข-33 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	88
ข-34 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-35 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	89
ข-36 แสดงปริมาณก๊าซ CO ₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	89
ข-37 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	90
ข-38 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	90
ข-39 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	91
ข-40 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	91
ข-41 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	92
ข-42 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	92
ข-43 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	93
ข-44 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	93
ข-45 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	94
ข-46 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	94
ข-47 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150 ⁰ C Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-48 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	95
ข-49 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	96
ข-50 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	96
ข-51 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	97
ข-52 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	97
ข-53 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	98
ข-54 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	98
ข-55 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	99
ข-56 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	99
ข-57 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	100
ข-58 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	100
ข-59 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	101
ข-60 แสดงปริมาณก๊าซ CO_2 ของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-61 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	102
ข-62 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	102
ข-63 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	103
ข-64 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	103
ข-65 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	104
ข-66 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	104
ข-67 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	105
ข-68 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s	105
ข-69 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s	106
ข-70 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s	106
ข-71 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s	107
ข-72 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$ Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s	107

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
C_{ash}	ปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักที่เหลือจากการเผาไหม้
C_{in}	ปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักก่อนเผา
CO	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
CO ₂	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
C^n	ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง
$C_{p,g}$	ปริมาณความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ
$C_{p,s}$	ปริมาณความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของเชื้อเพลิง
d_e	เส้นผ่าศูนย์กลางเสมือน (Equivalent Diameter)
E	พลังงานในการกระตุ้น (Activation Energy)
h	ความกว้างของความถี่ข้อมูล
K_n	ปัจจัยของความถี่
$m_{c,T}$	มวลคาร์บอนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้
$m_{c(t)}$	มวลคาร์บอนที่เกิดขึ้นที่เวลา t
n	จำนวนความถี่ข้อมูล
Pri.	Primary
Q	อัตราการไหลของอากาศ
Q_g	ความร้อนของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้
R	Universal Constant for gas
S	Secondary
Temp.	Temperature
U	ความเร็วของเปลวไฟ
U_g	ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเชื้อเพลิง
Ø	ลักษณะรูปของเบด
λ_e	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเสมือน (Equivalent Conductivity)
η	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
α	ค่าความร้อนของการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้
Φ	ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
ρ_s	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง
ρ_g	ความหนาแน่นของก๊าซ
ω	อัตราการเผาไหม้

บทที่ 1

การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบ Fixed Bed

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชนและเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมด้วย ประเทศไทยมิได้มีแหล่งพลังงานเชิงพาณิชย์ภายในประเทศมากพอต่อความต้องการทำให้ต้องพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจว่าในอนาคต เราจะมีพลังงานใช้กันอย่างพอเพียง แนวทางในการพัฒนาพลังงานของประเทศจึงต้องคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัดและสรรหาพลังงานทางเลือกอื่นหรือเชื้อเพลิงเสริมเพื่อใช้ในการผลิตพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากที่สุด

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ข้าว น้ำตาล ยางพารา น้ำมันปาล์มและมันสำปะหลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร[1,2] เหล่านี้ จะมีวัสดุเหลือใช้ออกมาจำนวนมากซึ่งวัสดุเหลือใช้เหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตพลังงานได้ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการผลิตความร้อน เพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งเรารู้จักวัสดุที่เหลือใช้ดังกล่าวนี้เรียกว่า ชีวมวล โดยชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ ดังนี้ [3]

1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ ได้แก่ จี้เลื่อย

1.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย เปลือกถั่ว ชังข้าวโพด

1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม ได้แก่ ทะลายปาล์ม ชานอ้อย กากมัน

1.1.4 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากของเหลือใช้จากมนุษย์ ได้แก่ ขยะ

นอกจากนี้ เหตุผลหนึ่งของการสรรหาเชื้อเพลิงทดแทนเนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ถ่านหิน) ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมลพิษทางอากาศที่เกิดการปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2)ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งก่อให้เกิดฝนกรดเป็นต้น ในทางกลับกันเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นสารที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์น้อยและมีสารระเหยอยู่มากซึ่งจะช่วยให้การลดการปลดปล่อย SO_2 และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังกล่าว

อย่างไรก็ตามปัญหาของการใช้พลังงานจากชีวมวลก็มีอยู่เช่นกันโดยส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบความชื้นสูงซึ่งส่งผลทำให้ค่าความร้อนต่ำและทำให้พลังงานที่ได้ออกมาต่ำกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับ พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลในขณะเดียวกันข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับคุณลักษณะการเผาไหม้ของ ชีวมวลแต่ละชนิด ยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างลึกซึ้งมากนักและมีความยุ่งยาก ขาดข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเตาและอุปกรณ์ต่างๆอย่างเหมาะสม

เทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ใช้ก็มีอยู่หลายชนิดแตกต่างกัน[4] เช่น Fixed bed Combustion, Suspension Burning, Fluidized bed Combustion เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแต่ละประเภท เพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและเหมาะสมในการออกแบบอย่างถูกต้อง

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถพิจารณาออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) การศึกษาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ 2) การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้

สาขันธ์ ปานซัง [5] ผลการศึกษาการเผาขยะและการเผาขยะผสมลิกไนต์ พบว่าการเผาขยะอย่างเดียวมีลักษณะเป็นการเผาไหม้ของสารระเหยเป็นหลัก โดยมีการเผาถ่าน (Char) จะเกิดขึ้นเมื่อการเผาไหม้สารระเหยถึงขั้นสุดท้าย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงภายในเบด ความเร็วของเปลวไฟในรูปอัตราการติดไฟ (Ignition Rate) และอัตราการเผาไหม้ของการเผาไหม้ในที่สูงกว่าการเผาไหม้ในสัดส่วนอากาศปฏิกิริยาต่อเชื้อเพลิง มีผลอย่างมากต่อความเร็วของเปลวและอัตราการเผาไหม้การเผาขยะผสมลิกไนต์มีพฤติกรรมคล้ายการเผาไหม้ในที่สูง โดยมีความเร็วของเปลวต่ำกว่าแต่ อัตราการเผาไหม้สูงกว่าการเผาขยะเพียงอย่างเดียว อัตราการติดไฟของการเผาขยะผสมลิกไนต์สูงกว่าการเผาขยะอย่างเดียวและการเผาไหม้สมบูรณ์กว่า การเพิ่มอัตราส่วนลิกไนต์ต่อขยะทำให้ความเร็วของเปลวไฟ อัตราการติดไฟ อัตราการเผาไหม้และความสมบูรณ์การเผาไหม้เพิ่มขึ้น

นิยม ศรีศิริสิทธิกุล [6] ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(VFBC) ศึกษาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา โดยทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalent Ratio) และ อัตราส่วนของอากาศปฏิกิริยาต่ออากาศทั้งหมดโดยป้อนเชื้อเพลิง 18 kg/hr. แล้วทำการเปรียบเทียบพบว่า ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.25 (อากาศส่วนเกิน 25%) และ อัตราส่วนของอากาศปฏิกิริยาต่ออากาศทั้งหมด เท่ากับ 0.4 จะให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 850°C และจากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอด พบว่าประกอบด้วย $O_2 = 8.5\%$, $CO_2 = 6.5\%$, $CO = 305\text{ ppm.}$, $NO = 298\text{ ppm.}$, $NO_x = 298\text{ ppm.}$ และประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 98.92 %

กุลยศ สุวันทโรจน์ [7] ได้ศึกษาเวลาการเผาไหม้หมดและอัตราเร็วการเผาไหม้ของลิกไนต์, ขยะชุมชน และลิกไนต์ผสมขยะชุมชนในเตาฟลูอิดไคซ์เบดขนาดห้องปฏิบัติการ โดยเป็นการทดลองแบบแบทช์ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองคือ อุณหภูมิเบด ความเร็วของอากาศ และสัดส่วนของเชื้อเพลิง โดยผลการทดลองบ่งชี้ว่า ขยะใช้เวลาการเผาไหม้หมดประมาณ 2/3 ของการเผาไหม้ลิกไนต์ นอกจากนั้นเมื่อสัดส่วนของขยะต่อลิกไนต์เพิ่มขึ้นทำให้เวลาการเผาไหม้หมดลดลงตามสัดส่วนเมื่อเทียบกับเผาลิกไนต์อย่างเดียว สำหรับผลการศึกษาอัตราเร็วการเผาไหม้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเบดเพิ่มขึ้น มวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น โดยอัตราเร็วการเผาไหม้สูงสุดของเชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ อัตราเร็วการเผาไหม้ลิกไนต์จะเร็วกว่า การเผาขยะชุมชน

Rogaume T. [8] ได้ทำการศึกษาทดลองเผาไหม้ขยะชุมชนที่มีส่วนประกอบของไม้ และพลาสติก ในเตาเผาแบบฟลักซ์เบดชนิดตะกรับแบบเคลื่อนที่ โดยได้ทำการศึกษาดังกล่าวถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ สัดส่วนอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี และปริมาณอากาศส่วนเกิน ต่อการปลดปล่อยก๊าซมลพิษชนิด คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนตริกออกไซด์ (NO) โดยผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลอากาศต่ำกว่าความต้องการตามทฤษฎีจะก่อให้เกิดสภาพขาดออกซิเจนภายในโครงสร้างรูพรุนของเชื้อเพลิง สภาพดังกล่าวนี้จะถูกควบคุมลักษณะโดยอุณหภูมิของปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่ำ ซึ่งจะเอื้ออำนวยต่อสภาพการเกิดการกลั่นทำลาย (Pyrolysis) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และสภาพดังกล่าวนี้เป็นสภาพที่เอื้ออำนวยอย่างมากในการผลิต CO ในทางตรงกันข้าม การเผาไหม้ภายใต้อัตราการไหลอากาศที่มากกว่าความต้องการตามทฤษฎี จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเหนือ เชื้อเพลิงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและก๊าซ CO เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด สำหรับกรณีของผลของอากาศส่วนเกินต่อการปลดปล่อย CO ผลพบว่าที่อากาศส่วนเกินทั้งหมดต่ำกว่า 2.4 ศักยภาพการควบคุมปฏิกิริยาการผสมระหว่าง อากาศทุติภูมิ และผลิตภัณฑ์ การเผาไหม้ที่เกิดจากเบดเป็นไปอย่างเหมาะสม และทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับกันที่สภาพอากาศส่วนเกินสูงกว่า 2.4 จะไม่ส่งเสริมต่อการผสมระหว่างอากาศทุติภูมิและไพโรไลซิสก๊าซ และที่ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้การเพิ่มความเร็วของอากาศทุติภูมิจะก่อให้เกิดสภาพส่วนผสมบาง (Mixture Leaner) ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิลดลงด้วยอันเนื่องมาจากการพาที่มากเกินไป (Excessive Cooling) สำหรับกรณีของการเกิด NO นั้น พบว่าสภาวะที่ทำการทดลองดังกล่าวดูเหมือนว่าจะถูกควบคุมจากความเข้มข้นของออกซิเจนในโซนการเผาไหม้ (Secondary Zone) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของอากาศส่วนเกินทั้งหมดจะส่งผลต่อการเพิ่มการปลดปล่อย NO อีกด้วย

Ross A.B. และคณะ [9] ศึกษาหาปัจจัยการปลดปล่อย (Emission Factors, EF) ของมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลักซ์เบดโดยการทดสอบเผาเดี่ยว โดยเชื้อเพลิงที่ใช้คือ ถ่านหิน ไม้ และจี้เลื่อยอัดแท่ง (Briquette) และการเผาพร้อมระหว่างถ่านหินกับจี้เลื่อย โดยมลพิษที่สนใจคือ สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds, VOCs) และสารอินทรีย์ในรูปอื่น ๆ รวมทั้งก๊าซมลพิษหลักเช่น CO, SO_x, NO_x เป็นต้น ผลการทดลองพบว่า EF ของ VOCs จากการเผาไม้จะสูงกว่าถ่านหิน ในขณะที่ EF ของมลพิษตัวอื่นทั้งหมดจะน้อยกว่าที่ได้จากการเผาถ่านหิน สำหรับ EF ของสาร CO, Dust, VOC จากการเผาจี้เลื่อยพบว่าจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไม้ ในกรณีของการเผาพร้อมสังเกตได้ว่าค่าประกอบการปลดปล่อยที่ได้จากการทดลองจะต่ำกว่าค่า EF ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นถึงปฏิกิริยาการสนับสนุนซึ่งกันและกันอย่างมีประสิทธิภาพ (Synergistic Reactivity) นอกจากนั้นพบว่าการไพโรไลซิสเชื้อเพลิงจะมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดมลพิษสารอินทรีย์ ตรงนี้บ่งชี้ให้เห็นถึงคุณภาพในการผสมที่ไม่ดีพอ ข้อดีอื่นที่พบจากการเผาพร้อมถ่านหินกับชีวมวล หรือ แทนที่ถ่านหินโดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงหลัก คือการลดลงของการปลดปล่อยพวก SO_x, NO_x, Toxic Metals แต่อย่างไรก็ตามการปลดปล่อย VOCs ยังสูงอยู่ทั้งนี้ขึ้นกับการเตรียมเชื้อเพลิงในตอนแรกด้วย นอกเหนือจากที่กล่าว ขอบเขตสำหรับการลดการปลดปล่อยของสารมลพิษจะขึ้นอย่างมากกับเครื่องมือที่ใช้ในการเผาไหม้ (เทคโนโลยี) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการประยุกต์หรือดัดแปลงระบบป้อนอากาศสุทธิภูมิสำหรับการเผาไพโรไลซิสก๊าซให้เหมาะสม

จากการศึกษาสภาพความเป็นจริงเกี่ยวกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในโรงงานน้ำตาลอุตสาหกรรม ซึ่งพบในปี 2543 ได้ใช้เชื้อเพลิงจากขานอ้อยคิดเป็น 70% ของปริมาณขานอ้อยทั้งหมดที่ใช้ในการคั้นน้ำ [4] นอกจากนี้ การเผาขานอ้อยยังก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะขึ้นกับสิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และปริมาณฝุ่นเป็นจำนวนมาก

เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและตรวจสอบศักยภาพในการนำเอาขานอ้อยมาเผาเพื่อใช้ประโยชน์สูงสุดให้ โดยพิจารณาในแง่พลังงานและมลภาวะจากการเผาไหม้

อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวนี้นี้จำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเผาไหม้ขานอ้อยและอิทธิพลการเผาไหม้เป็นพื้นฐานด้วยเหตุนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปสู่ความเข้าใจในการออกแบบหรือปรับปรุงเตาเผาแบบ Fixed Bed เพื่อสามารถใช้เผาขานอ้อยให้มีประสิทธิภาพ

1.3 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือ

1.3.1 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะพารามิเตอร์ของการเผาไหม้ขานอ้อย ในรูปของอัตราการเผาไหม้ (Combustion Rate)

1.3.2 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะพารามิเตอร์ของการเผาไหม้ขานอ้อย ในรูปความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed)

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1.4.1 ทำการทดสอบการเผาไหม้เตาเผาแบบฟลักซ์เบด รูปทรงกระบอกในระดับ (Laboratory Scale)

1.4.2 เชื้อเพลิงที่ใช้ในทดสอบ ได้แก่ ขานอ้อย (Bagasse)

1.4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ปริมาณและความเร็วอากาศที่ป้อน อุณหภูมิ

1.4.4 คุณลักษณะการเผาไหม้ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาชีวมวลแบบฟลักซ์เบด รวมทั้งปัญหาข้อจำกัดและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

1.5.2 ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ (เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง)

1.5.3 ศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้และหลักการคำนวณ

1.5.4 ศึกษาการออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาแบบฟลักซ์เบด

1.5.5 ศึกษาทำการทดสอบและเก็บข้อมูล

1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุป

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 นำวัสดุที่เหลือใช้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานความร้อนให้มากที่สุด

1.6.2 มีข้อมูลที่จะใช้ประโยชน์ในการออกแบบเตาเพื่อใช้เผาขานอ้อยให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.6.3 มีข้อมูลที่จะใช้ประเมินศักยภาพของการเผาขานอ้อยเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้ผิวโลกภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเวลานานนับล้านปีหรือที่เรียกว่า “เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์” (Fossil Fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทคือ เชื้อเพลิงชีวมวล(Biomass) ซึ่งเป็นวัตถุดิบได้จากสิ่งมีชีวิตซึ่งมีองค์ประกอบพวกเซลลูโลส,เฮมิเซลลูโลสเป็นหลัก เช่น ไม้ จีเลื้อย และแกลบข้าว เป็นต้น ชีวมวลสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest Biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็น ไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) และ ไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และจีเลื้อย

2.1.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ข้าว, ฟางข้าว ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำโดยประมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์

2.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial Biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

2.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic Waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

2.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการพิจารณาคำนิยามถึงการใชเชื้อเพลิงอย่างคุ้มค่ายั่งยืนและเหมาะสมในการผลิตพลังงานรวมถึงข้อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยจุดมุ่งหมายดังกล่าวสามารถทำให้สัมฤทธิ์ผลได้ โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่มาก เช่น ชานอ้อย ขยะ แกลบ

แต่มีได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในอีกแง่มุมหนึ่งการใช้ Biomass ร่วมกับเชื้อเพลิงหลัก เช่น ถ่านหิน เพื่อช่วยลดความเสี่ยงของเชื้อเพลิงหลัก(ถ่านหิน)และลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าของถ่านหิน เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล และการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้ [2]

ตารางที่ 2-1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
ชานอ้อย	18.2
ฟางข้าว	15.7
แกลบ	16.56
ถ่านหิน	18.09

ชานอ้อย

ชานอ้อยที่ใช้ในการทดลองเป็นชานอ้อยที่ได้จากการผลิตน้ำตาลดิบโดยผ่านขบวนการคั้น น้ำออกส่วนที่เป็นน้ำนำไปผลิตเป็นน้ำตาลดิบส่วนที่เหลือคือชานอ้อยมีลักษณะเป็นขุย

ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้พอสมควรราคาถูก และมีอยู่มาก

ข้อเสีย น้ำหนักเบาและความชื้นสูง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการวิเคราะห์ทางเคมี ทำให้ทราบถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของชานอ้อยดังนี้

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของชานอ้อย

Ultimate Analysis Data	As-Received Basis	Dry Basis
C , weight %	42.45	49.6
H ,weight%	5.73	5.76
O ,weight%	39.99	39.24
N ,weight%	0.33	0.38
S,weight %	0.14	0.17
Ash ,weight %	4.13	4.83
Proximate Analysis Data	As-Received Basis	Dry Basis
Moisture , weight %	7.2	-
Volatile , weight %	78.59	84.68
Fixed carbon , weight %	10.08	10.86
Ash , weight %	4.13	4.45

2.2 การเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (Combustible Element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในนี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทางตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหามลพิษในอากาศ

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
2. อุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (Turbulence)

2.2.1 การผสม

การรวมตัวที่ีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่กรณีของเชื้อเพลิงแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็จะยุ่งยากมากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อนหรือเป็นฝอย แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดี เหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้พร้อมกับได้ความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟได้เองแล้วพร้อมกับได้ความร้อนออกมาด้วย

ฉะนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ขั้นตอน [10] คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอน
2. เกิดการรวมตัวของคาร์บอนกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาพร้อมกับความร้อน
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากผิวของเชื้อเพลิง
4. มีการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจนอีกครั้งจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

2.2.2 การลุกไหม้

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนแรกและเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous Combustion) นั้นต้องมี

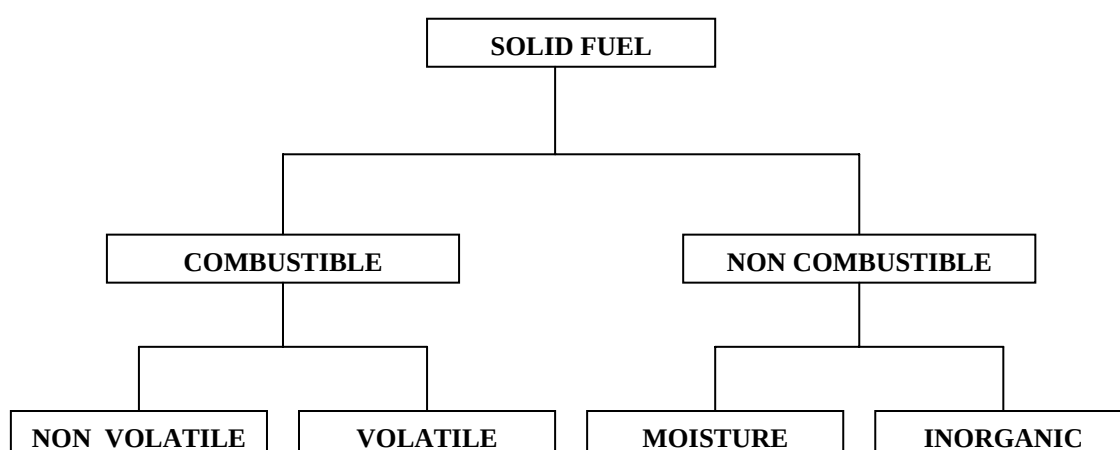
1. บริเวณที่จำกัดสำหรับการสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้นั้นไม่ได้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ

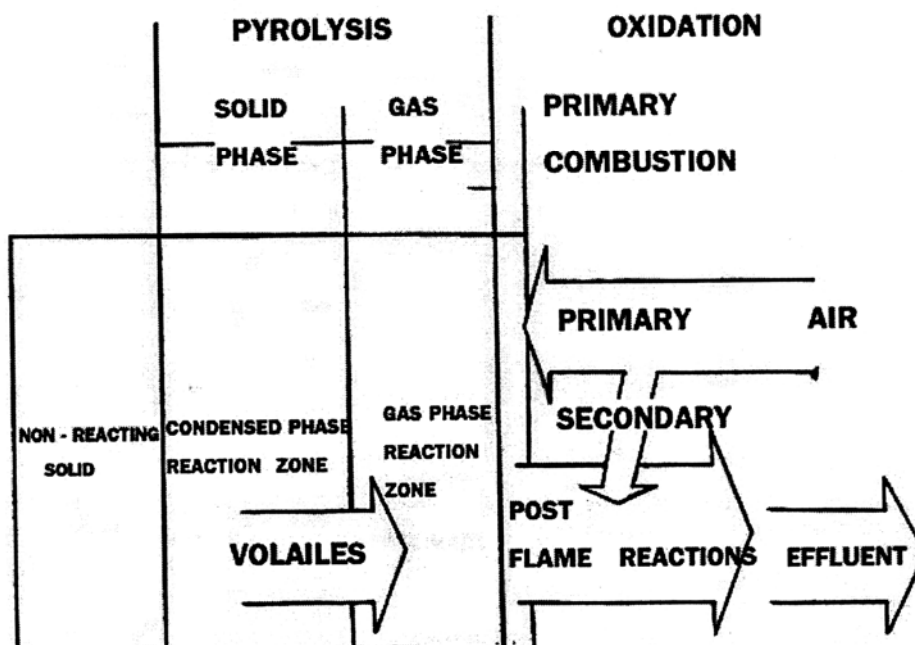
ดังนั้นการติดไฟหรือการลุกไหม้นั้นขึ้นอยู่กับหลายสิ่ง เช่น ชนิดของสารเชื้อเพลิง, สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

2.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

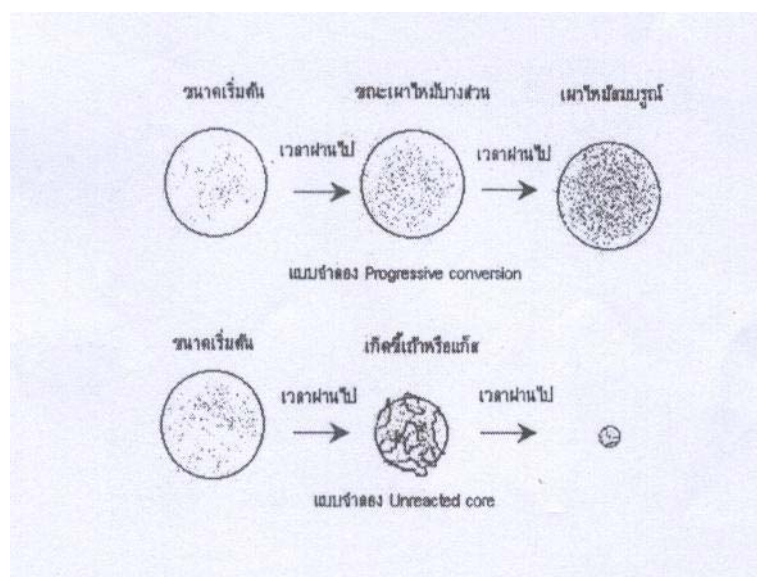
เชื้อเพลิงแข็งที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน, ฝืน, ขี้เลื่อย, แกลบ, ชังข้าวโพด, ชานอ้อย เป็นต้น ขบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และแก๊ส เพราะว่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ภายในไม่แน่นอน นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เพราะเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ [6] ดังภาพที่ 2.1



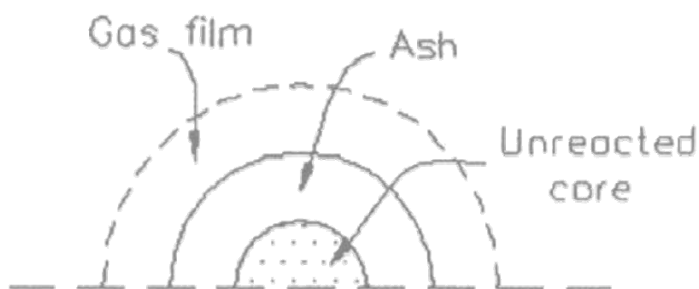
ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง



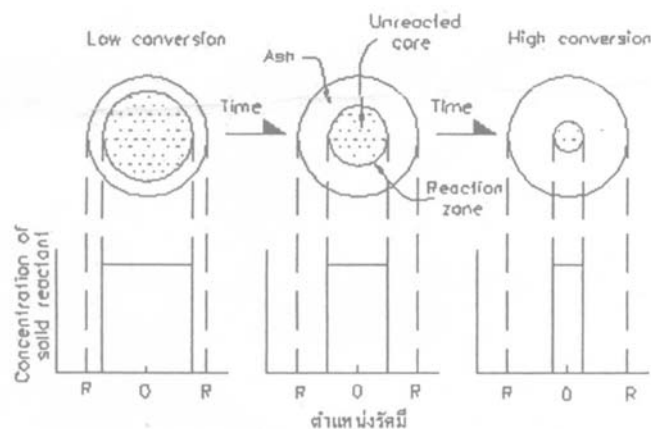
ภาพที่ 2-2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



ภาพที่ 2-3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



ภาพที่ 2-4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้



ภาพที่ 2-5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราการเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นจี้เถ้า
3. ขนาดของเชื้อเพลิง
4. ความต้านทานของชั้นจี้เถ้ากับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นจี้เถ้าจะสูงกว่าชั้นฟิล์มมากดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจจะตัดทิ้งได้
5. ความต้านทานรวมซึ่งรวมทั้งความต้านทานของก๊าซฟิล์มชั้นจี้เถ้าและปฏิกิริยาการเผาไหม้

2.4 การเผาไหม้ขานในเตาฟิชเบค

สำหรับระบบการเผาไหม้ของเตาฟิชเบค เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่เผาไหม้อยู่กับที่บนตะกรับ เตาฟิชเบคมีหลายชนิดได้แก่ ระบบ Underfeed, Stationary Grate Travelling Grate, Spreader และ Vibrating Grate[4]

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะถูกป้อนลงมาจากด้านบนโดยวางอยู่กับที่บนตะกรับ[5] การเผาไหม้จะให้ความร้อนแก่ชั้นบนสุดของเชื้อเพลิงโดยมีการป้อนอากาศได้ตะกรับไหลผ่านเชื้อเพลิง (Updraft) เรียกว่าอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ซึ่งปริมาณอากาศปฐมภูมิ มีความสำคัญต่อการควบคุมอัตราการเผาไหม้และอุณหภูมิของเชื้อเพลิง (Down Draft) เรียกว่า อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ซึ่งปริมาณของอากาศทุติยภูมิจะช่วยให้ก๊าซและอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดสามารถเผาไหม้ต่อไปได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นอากาศทุติยภูมิสามารถใช้ควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้

เมื่อเชื้อเพลิงที่อยู่ด้านบนได้รับความร้อนจากการจุดเตาซึ่งเป็นการไล่ความชื้นของเชื้อเพลิงขึ้นบน ความร้อนจะถ่ายเทลงไปสู่ชั้นต่อไปของเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงจะเริ่มปล่อยสารระเหยประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ ไฮโดรคาร์บอน, ไอน้ำ, น้ำมันดิน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ในส่วนนี้จะมีออกซิเจนเล็กน้อยเพราะเมื่อการเผาไหม้ถึงชั้นของถ่านซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันมากจะบวมพองขณะที่ทำปฏิกิริยาในขบวนการไล่ความชื้น อาจจะหลอมติดกันเป็นก้อนสามารถกีดขวางทางการไหลของก๊าซได้ทำให้อัตราการไหลของอากาศลดลง

สำหรับถ่านซึ่งอยู่ส่วนล่างสุดของเบคซึ่งการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ประกอบด้วย โซนรีดักชัน (Reducing Zone) และโซนออกซิเดชัน (Oxidizing Zone) ออกซิเจนจะแพร่ไปยังผิวของถ่าน และอยู่ในรูปของก๊าซ CO และก๊าซ CO₂ ดังสมการ



1)



2)

ขณะเดียวกันก๊าซ CO ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอยู่ในรูปของก๊าซ CO₂ ที่อยู่ในสถานะก๊าซเกิดขึ้นด้วย



3)

บริเวณที่เหนือจากตะกรับประมาณ 5 - 10 cm. ออกซิเจนจะถูกใช้หมดซึ่งอยู่ในส่วนของโซนรีดักชันดังนั้นก๊าซ CO_2 และไอน้ำจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ CO และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ผิวของถ่านดังสมการ

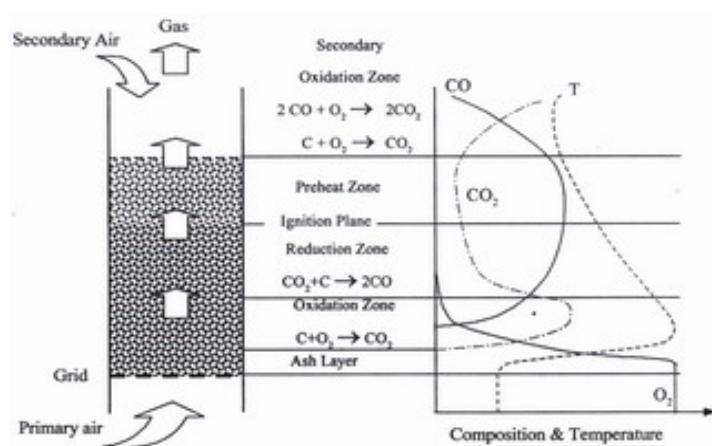


4)



5)

ปฏิกิริยา (2-4) และ (2-5) ขึ้นอยู่กับพื้นผิวของถ่าน การเพิ่มปริมาณของออกซิเจนโดยการป้อนอากาศทุติยภูมิ ซึ่งปริมาณและความเร็วของอากาศผ่านเบดสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยจะได้ก๊าซ CO_2 อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเผาไหม้ ของถ่าน และลดปริมาณของก๊าซ CO และ H_2 ได้



ภาพที่ 2-6 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาฟลักซ์เบด

ภาพที่ 2-6 แสดงขั้นตอนการเผาไหม้ในเตาฟลักซ์เบด โดยที่มีเชื้อเพลิงวางไว้เหนือตะกรับ ในห้องเผาไหม้อากาศที่ใช้ในห้องเผาไหม้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน อากาศส่วนแรก (Primary Air)

จะป้อนเข้าทางด้านล่างของเตาและไหลผ่านพื้นผิวของเชื้อเพลิงแทรกตัวลอยไปสู่ชั้นบนของเชื้อเพลิง เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้น อากาศส่วนนี้จะทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงและให้ความร้อนออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ อัน ได้แก่ ก๊าซต่างๆออกมา ส่วนที่สอง (Secondary Air) ซึ่งป้อนเข้าไปยังห้องเผาไหม้ทางด้านบนจะเป็นตัวช่วยให้ก๊าซต่างๆ ที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กันอีกครั้งหนึ่งก่อนแล้งจึงค่อยออกจากห้องเผาไหม้ ส่วนทางด้านขวาของ ภาพที่ 2-6 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและองค์ประกอบของก๊าซในห้อง เเผาไหม้ชนิดนี้

พารามิเตอร์พื้นฐานของการเผาไหม้ในเตาฟิสิกส์เบด คือ ปริมาณและความเร็วอากาศที่ป้อนอุณหภูมิ

2.5 เวลาการเผาไหม้ของอนุภาค

เวลาการเผาไหม้ (Burn-Out time) ของอนุภาคหมายถึง เวลาที่ต้องใช้เผาอนุภาคจนหมดสิ้นเวลาการเผาไหม้เป็นตัวประกอบที่สำคัญในการออกแบบและการควบคุมการทำงานของเตา โดยมีส่วนสัมพันธ์กับขนาดของเตาและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยมีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับหลายอย่าง เช่น ขนาดของอนุภาค ชนิดของเชื้อเพลิง ปริมาณคาร์บอนคงที่และ ภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศ แต่เนื่องจากไม่มีทฤษฎีที่จะคำนวณเวลาการเผาไหม้โดยตรง จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาค่าดังกล่าว โดยการทดลองแบบแบทช์กล่าวคืออาศัยการป้อนเชื้อเพลิงปริมาณน้อย เข้าไปในเบดอย่างทันทีทันใด เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ของอนุภาคจนหมด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบชั่วคราว สำหรับการหาค่าเวลาการเผาไหม้จากการทดลองดังกล่าวมีหลายวิธี ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้ [7]

วิธีที่ 1 วิธีสังเกตสีเปลวไฟทดลองโดยการใส่อนุภาคขนาดเล็กลงในเตาเผาซึ่งมีอนุภาคเบดที่ถูกควบคุมด้วยก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยมีปริมาณออกซิเจนเกินพอที่จะทำให้การเผาไหม้ของอนุภาคเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จับเวลาตั้งแต่เริ่มสังเกตเห็นเปลวไฟที่ล้อมรอบถ่านหินจนกระทั่งอนุภาคเรืองแสงสีแดงที่เกิดขึ้นดับลงเหลือแต่ขี้เถ้า เวลาที่หาได้คือเวลาการเผาไหม้ของอนุภาค

วิธีที่ 2 วิธีสังเกตปริมาณ CO_2 ป้อนเข้าแบบแบทช์เข้าสู่เตาเผาที่เบดถูกควบคุมด้วยอากาศร้อน อนุภาคจะถูกเผาไหม้เกิดก๊าซ CO_2 ขึ้น เมื่ออนุภาคถูกเผาไหม้หมดเหลือแต่ขี้เถ้า ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ในไอเสียที่ทางออกของเตาจะมีค่าเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้นเวลาการเผาไหม้ก่อนถ่าน, t_b คือ เวลาที่เริ่มเกิดก๊าซ CO_2 จนถึงเวลาที่ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ในไอเสียที่ทางออกมีค่าเท่ากับ 0

วิธีที่ 3 วิธีบันทึกค่าก๊าซ CO_2 จากการเผาไหม้ชานอ้อยในเตาเผาฟลักซ์เบดแบบต่อเนื่องแล้ว อินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟก๊าซ CO_2 ต่อเวลา โดยเวลาที่เกิด 95% ของก๊าซ CO_2 ทั้งหมดคือเวลาการเผาไหม้ของชานอ้อย

วิธีที่ 4 วิธีหาค่าอนุพันธ์อันดับสองของอุณหภูมิเบด (T_b) เทียบกับเวลา ใช้การบันทึกอุณหภูมิเบดอย่างต่อเนื่อง เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยการป้อนชานอ้อยในเบดในเตาฟลักซ์เบดทำให้อุณหภูมิเบดสูงขึ้น นำกราฟ T_b ตามเวลา เปลี่ยนเป็นกราฟอนุพันธ์อันดับสองของ T_b (d^2T_b/dt^2) ต่อเวลา โดยที่เวลาจากเริ่มต้นถึงจุดที่ (d^2T_b/dt^2) เท่ากับ 0 คือเวลาการเผาไหม้ของชานอ้อย

จากวิธีข้างต้นวิธีที่ 1 อาจทำได้ยากเพราะเตาทำจากสแตนเลส และมีช่องมองขนาดเล็กจึงไม่สามารถสังเกตสีเปลวไฟได้ วิธีที่ 2 สังเกตค่าก๊าซ CO_2 จากการสังเกตในการทดลองพบว่า ค่าก๊าซ CO_2 ทางออกมีค่าเท่ากับ 0 นั้นเป็นไปได้ยาก เพราะเครื่องมือวัดก๊าซไม่สามารถวัดค่าได้เท่ากับ 0 ได้ เพียงแต่มีค่าออกมาใกล้ค่า 0 เท่านั้น ส่วนวิธีที่ 4 การบันทึกอุณหภูมิในเบดสังเกตได้ว่าค่าอุณหภูมิในเบดเปลี่ยนแปลงน้อย จึงได้สามารถใช้วิธีนี้ได้ ดังนั้นการวิจัยจึงใช้วิธีที่ 3 เพราะหาเครื่องมือวัดสามารถบันทึกค่าการเกิดก๊าซ CO_2 ได้ทุก ๆ 2 วินาที ทำให้ค่าในการอินทิเกรตค่าพื้นที่ใต้กราฟได้แม่นยำ

2.6 อัตราการเผาไหม้

อัตราการเผาไหม้คืออัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างธาตุที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงกับก๊าซออกซิเจนแล้วให้ความร้อนกับสารผลิตภัณฑ์ออกมา อัตราการเผาไหม้จะเป็นตัวประกอบที่สำคัญอีกอย่างในการออกแบบและการควบคุมการทำงานของเตา โดยจะเป็นตัวบอกถึงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสำหรับการหาค่า อัตราในการเผาไหม้สามารถหาได้จากการคำนวณมวลคาร์บอนจากก๊าซ CO_2 และก๊าซ CO จากการเผาไหม้ได้ด้วยสมการดังนี้ [7]

$$m_{CT} - m_c(t) = 5.36 \times 10^{-6} Q \int_0^{t_b} [C_{co}(t) + C_{co2}(t)] dt \quad (2-6)$$

6)

เมื่อ m_{CT} = มวลคาร์บอนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ (mg)

$m_c(t)$ = มวลคาร์บอนที่เกิดขึ้นที่เวลา t (mg)

ซึ่งสมการข้างต้นได้จากการทำสมดุลคาร์บอน ดังนี้

จาก ปริมาณของสารเมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ 1 mol มีปริมาตรประมาณ 22.4 ลิตร STP

$$1 \text{ mol} = \text{มวลของสาร (g) / มวลโมเลกุลคาร์บอน (MW}_c\text{)}$$

$$1 \text{ mol} = \text{มวลของคาร์บอน (g) / 12}$$

สามารถคำนวณมวลคาร์บอนได้ดังนี้

$$m_{CT} - m_c(t) = MW_c \times \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{1}{100} \right) Q \int_0^{t_b} [C_{co}(t) + C_{co_2}(t)] dt$$

$$m_{CT} - m_c(t) = 5.36 \times 10^{-6} Q \int_0^{t_b} C_{co}(t) + C_{co_2}(t) dt \text{ (kg)}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของอากาศที่ STP (l/s)

$C_{co_2}(t)$ = ก๊าซ CO_2 จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่เวลา t

$C_{co}(t)$ = ก๊าซ CO จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่เวลา t

สามารถเขียนแปลงเป็นทางวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้วิธี กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบประยุกต์

(The Multiple-Application Trapezoidal Rule [11]) ได้ดังนี้

โดยที่ $C(t) = C_{co_2} + C_{co}(t)$

$$m_{CT} - m_c(t) = 5.36 \times 10^{-6} Q \frac{h}{2} (C(t_0) + C(t_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} C(t_i)) \quad (2-7)$$

เมื่อ h = ความกว้างของความถี่ข้อมูลในที่มีค่าเท่ากับ 2 (ทุกๆ 2 วินาที)

n = จำนวนความถี่ข้อมูลในที่มีค่าเท่ากับ $t_b/h + 1 = (t_b/2 + 1)$

ดังนั้นจากสมการ 2-8 สามารถหาค่าอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนได้จาก $\frac{dm_c(t)}{dt}$

สามารถเขียนแปลงเป็นทางวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ [11] ได้ดังนี้

$$\frac{dm_c(t_i)}{dt} = \frac{-m_c(t_{i+2}) + 4m_c(t_{i+1}) - 3m_c(t_i)}{2h} \quad \text{เมื่อ } i = 0, 1 \quad (2-8)$$

8)

$$\frac{dm_c(t_i)}{dt} = \frac{-m_c(t_{i+2}) + 8m_c(t_{i+1}) - 8m_c(t_{i-1}) + m_c(t_{i-2})}{2h} \quad \text{เมื่อ } i = 2 \text{ ถึง } n-2 \quad (2-9)$$

9)

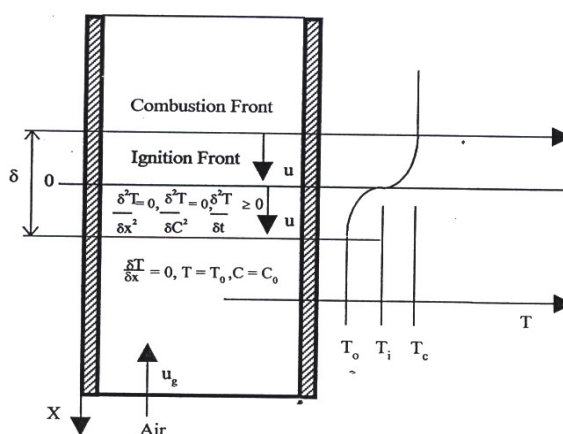
$$\frac{dm_c(t_i)}{dt} = \frac{-m_c(t_{i+2}) + 4m_c(t_{i+1}) - m_c(t_{i-2})}{2h} \quad \text{เมื่อ } i = n-1, n \quad (2-10)$$

10)

2.7 ความเร็วของเปลว และอุณหภูมิติดไฟ

Zhou และคณะ [5] ได้วิเคราะห์ทางทฤษฎี ในส่วนของโซนการเผาไหม้โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ Ignition Front ซึ่งเป็นช่วง Gasification ของเชื้อเพลิงแข็งเมื่อถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง และ Flaming Front ซึ่งเป็นช่วงที่เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้กับออกซิเจน ช่วงของเวลาระหว่าง Ignition Front และ Flaming Front มีน้อยมากเมื่อเทียบกับ Characteristic Times ต่าง ๆ ดังนั้น ความเร็วของเปลว Flaming Front Ignition Front จะถูกพิจารณาไปพร้อมกัน วิเคราะห์ความเร็วของเปลวจะดำเนินการภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การเผาไหม้เกิดขึ้นหลังจากที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ทำปฏิกิริยาให้ความร้อนเกิดขึ้นจนถึงอุณหภูมิ Characteristic ค่าหนึ่งโดยที่อุณหภูมิ Characteristic นี้ให้หมายถึงอุณหภูมิที่การปลดปล่อยก๊าซที่เผาไหม้ได้จากเชื้อเพลิงแข็งมีปริมาณเพียงพอที่จะพวยพุ่งให้เกิดเปลวการเผาไหม้ที่ยั่งยืน (Flaming Combustion)

การประเมินค่าอุณหภูมิ Characteristic นี้อาศัยหลักการทฤษฎี Thermal Explosion ของ SEMENOV เปลวของการเผาไหม้เปลวการเผาไหม้ที่ยั่งยืนซึ่งเกิดขึ้นตามหลังการติดไฟจะให้ความร้อนในกระบวนการจุดติด และอุณหภูมิ Characteristic ในการเผาไหม้ซึ่งได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จะใช้ในการบ่งบอกปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทจาก Flaming Front ไปยัง Ignition Front



ภาพที่ 2-7 ภาพจำลองเตาเผาแบบฟลักซ์เบด

การพิจารณาความเร็วของเปลวจะเริ่มต้นตั้งแต่ศูนย์จนถึงสภาวะที่เชื้อเพลิงเริ่มถ่ายเทความร้อน จากการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ แทนด้วยความเร็ว u และเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแทน

$u_g + u$ หากไม่คิดการสูญเสียความร้อนออกมาทางด้านข้างเตา การพิจารณาสัดส่วนเป็น 1 มิติ ดังนั้น สามารถแทนด้วยสมการพลังงานได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & ((1-\phi)\rho_s C_{p,s} + \phi\rho_g C_{p,g}) \frac{\partial T}{\partial t} - ((1-\phi)\rho_s C_{p,s} u + \phi\rho_g (u_g + u)) \frac{\partial T}{\partial X} = \\ & \frac{\partial}{\partial X} (\lambda_e \frac{\partial T}{\partial X}) + Q\omega \end{aligned} \quad (2-11)$$

โดยที่ ϕ คือ ลักษณะรูของเบด(Bed Porosity)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ

$C_{p,s}$ คือ ปริมาณความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของเชื้อเพลิง

$C_{p,g}$ คือ ปริมาณความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ

λ_e คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเสมือน(Equivalent Conductivity)

Q คือ ความร้อนจากการเผาไหม้ที่ปล่อยออกมา (Reaction Heat Release)

ω คือ อัตราการเผาไหม้

u_g คือ ความเร็วของอากาศที่ผ่านเชื้อเพลิง

u คือ ความเร็วของเปลว

จากสมการ 2-11 เมื่อพิจารณาเทอมแรกเป็น Thermal Inertia ของของแข็งและก๊าซ โดยที่ $\phi P_g C_{p,g} \ll (1-\phi) P_s C_{p,s}$ ดังนั้นสามารถจัด Thermal Inertia ของก๊าซได้ เทอมสอง เป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดย การพาความร้อนโดยเชื้อเพลิงและ Oxidizer ซึ่งในที่นี้ความเร็วเปลวถือว่ามีความน้อยมากเมื่อเทียบกับ Forced Flow Velocity ของอากาศจากอากาศป้อนมุมุมิ เทอมที่สาม เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของการเผาไหม้ด้านหน้ามีค่าใกล้เคียงกับการถ่ายเทของ Combustion Front ถึงแม้ อุณหภูมิค่อนข้างต่ำการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีก็มีค่าความร้อน โดยการเป็น Equivalent Conductivity (λ_e) ดังนั้นค่า Equivalent Conductivity จึงประกอบด้วย ค่า Average Conductivity (λ) ของเชื้อเพลิงกับ Oxidizer และค่า Equivalent Conductivity (λ_r) ที่ใช้คุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของ Equivalent Conductivity ได้ดังนี้

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_r$$

$$\lambda = \phi\lambda_g + (1-\phi)\lambda_s$$

$$\lambda_r = \frac{16\sigma d_e}{3}$$

โดยที่ d_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเสมือน (Equivalent Diameter) เทอมสุดท้าย เป็นการปล่อยความร้อนออกมาโดยการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบบริแอ็คชั่น

โดยที่ α คือ ความร้อนของการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ ต่อหน่วยมวลของเชื้อเพลิง

ω คือ อัตราการเผาไหม้

อัตราการเผาไหม้ เขียนอยู่ในรูป u ดังนั้นรูปแบบของสมการสมดุลของการเชื้อเพลิงสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$(1 - \phi) \frac{dC}{dt} - (1 - \phi)u \frac{dC}{dt} = -C^n k_n \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2-$$

12)

โดยที่ C^n คือ ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง

K_n คือ ปัจจัยของความถี่ (Frequency Factor)

E คือ พลังงานในการกระตุ้น (Activation Energy)

R คือ Universal Constant for Gases

โดยกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการวิเคราะห์ดังนี้

$$t = 0 \quad x = 0 \quad T = T_0 \quad C = C_0$$

$$x = \alpha \quad T = T_0 \quad C = C_0$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = 0$$

$$t < 0 \quad x = 0 \quad T = T_i \quad C = C_i$$

$$x = \alpha \quad T = T_0 \quad C = C_0$$

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0$$

การวิเคราะห์ดังกล่าวได้นำไปสู่สมการของความเร็วเปลวของเชื้อเพลิงประเภทที่มีปฏิกิริยาสารระเหยสูงดังนี้

$$U = -U_g + \sqrt{\frac{1}{\theta_i} \exp(\theta_i)} \quad (2-13)$$

โดยที่ U คือ ความเร็วเปลวไฟไร้มิติ

U_g คือ ความเร็วของอากาศไรมิตที่ผ่านเชื้อเพลิง

θ_i คือ อุณหภูมิติดไฟไรมิต

ดังจะเห็นได้ว่า ความเร็วเปลวไฟขึ้นอยู่กับอุณหภูมิติดไฟ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ U_g เท่านั้น

การศึกษาเพื่อหาอุณหภูมิติดไฟวิกฤติ จะใช้ทฤษฎีของ SEMENOV Thermal Explosion จาก Specific Volume ของสมการอนุรักษ์พลังงาน มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{d((1-\phi)\rho_s C_{p,s} \delta T)}{dt} = Q^+ - Q^- \quad (2-14)$$

โดยที่ Q^+ คือ เป็นการให้ความร้อนจากการเผาไหม้

Q^- คือ เป็นความร้อนที่สูญเสียจากปริมาตรควบคุม

$$Q^+ = Q \delta \omega = Q \delta C^n K_n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$Q^- = \phi \rho_g C_{p,g} u_g (T - T_o) + \frac{\lambda_c}{\delta} (T - T_o) - \frac{\lambda_c}{\delta} (T_F - T)$$

ถ้าพิจารณาการจุดติดเฉพาะฟังก์ชันของเวลาการจุดติดไฟจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ $Q^+ - Q^- > 0$ ซึ่งหมายความว่าความชันของอุณหภูมิตามเวลา (Temperature Gradient) จะมีค่าเป็น (+) เสมอการติดไฟจึงเกิดขึ้นเมื่อความชันของอุณหภูมิถึงจุดที่อัตราความสูญเสียความร้อนเท่ากับอัตราการกำเนิดความร้อน (Inflection) ดังนั้นจึงมีเกณฑ์การติดไฟดังนี้

$$\frac{d\theta}{d\tau} \geq 0 \quad \text{และ} \quad \frac{d^2\theta}{d\tau^2} = 0$$

จะได้อุณหภูมิจุดติดไฟวิกฤติ (Critical Ignition Temperature) คือ

$$\theta_i = \left(1 - \frac{n}{LZ}\right)\Omega + \frac{F}{B} \theta_F \quad (2-15)$$

$$\Omega = \frac{(2-n) \pm \sqrt{n^2 + 4n}}{2} \geq 0$$

โดยที่ n คือ Reaction Order

L คือ ค่าคงที่

Z คือ ความเข้มข้นของเชื้อเพลิง

F คือ ค่าคงที่

B คือ ค่าคงที่

θ_F คือ อุณหภูมิเปลวไฟ

Ω คือ ค่าคงที่

ในทำนองเดียวกันพิจารณาการติดไฟเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว เงื่อนไขการติดไฟจะเป็น

$$\frac{d\theta}{dZ} \leq 0 \quad \text{และ} \quad \frac{d^2\theta}{dZ^2} = 0$$

ซึ่งนำไปสู่การหาอุณหภูมิติดไฟวิกฤติ ได้ดังนี้

$$\theta_i = 1 + \sqrt{n} + \frac{F}{B} \theta_F \quad (2-16)$$

โดยที่ n เป็น Order ของปฏิกิริยาของการเผาไหม้ จะให้เป็นหนึ่ง

สำหรับการคำนวณความเร็วของเปลวจะแทนสมการ (2-16) ลงในสมการ (2-13) ซึ่งค่าอุณหภูมิติดไฟวิกฤติเกิดขึ้นโดยใช้ข้อกำหนดที่เป็น Supercritical ตามเวลา คือ

$$\frac{d\theta}{d\tau} \geq 0 \quad \text{และ} \quad \frac{d^2\theta}{d\tau} \geq 0$$

สำหรับค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบฟลักซ์เบดสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ได้จากการวัดอุณหภูมิในเตาด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล

นอกจากนี้การพิจารณาความเร็วของเปลวยังสามารถอธิบายอยู่ในรูปของอัตราการติดไฟ (Ignition Rate) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการติดไฟของอนุภาคเชื้อเพลิงแล้วเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างเบด ดังนั้นอัตราการติดไฟจึงหาได้จากความเร็วของเปลวคูณกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแข็ง

2.8 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

โดยทั่วไปการหาประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถหาได้ด้วยการวัดเพียงอย่างเดียว โดยการหาการสูญเสียของคาร์บอนที่ยังไม่ได้ถูกเผาไหม้ที่อยู่ในจีเถ้า วิธีทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ [6]

$$\eta = [1 - \text{ค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่เหลือในจีเถ้าและจากก๊าซไอเสีย} / \text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง}] \times 100 \% \quad (2-13)$$

การสูญเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการเผาไหม้ CO ในก๊าซไอเสียซึ่งโดยทั่วไปน้อยกว่า 1% ฉะนั้นการไม่เผาไหม้ของก๊าซ CO ในก๊าซไอเสียหรือการไม่เผาไหม้ของสารระเหยในอนุภาคขนาดเล็กในจีเถ้าสามารถมีค่าเป็นลบ อย่างไรก็ตามการสูญเสียของคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ในเบดมีค่าเป็นลบ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งหาค่าได้ใกล้เคียงด้วยการหาเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่เหลืออยู่ในจีเถ้า

วิธีประยุกต์สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{ash}}{C_{in}} \times 100 \quad (2-14)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้

C_{in} คือ ปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักก่อนเผาไหม้

C_{ash} คือ ปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักที่เหลือจากการเผาไหม้

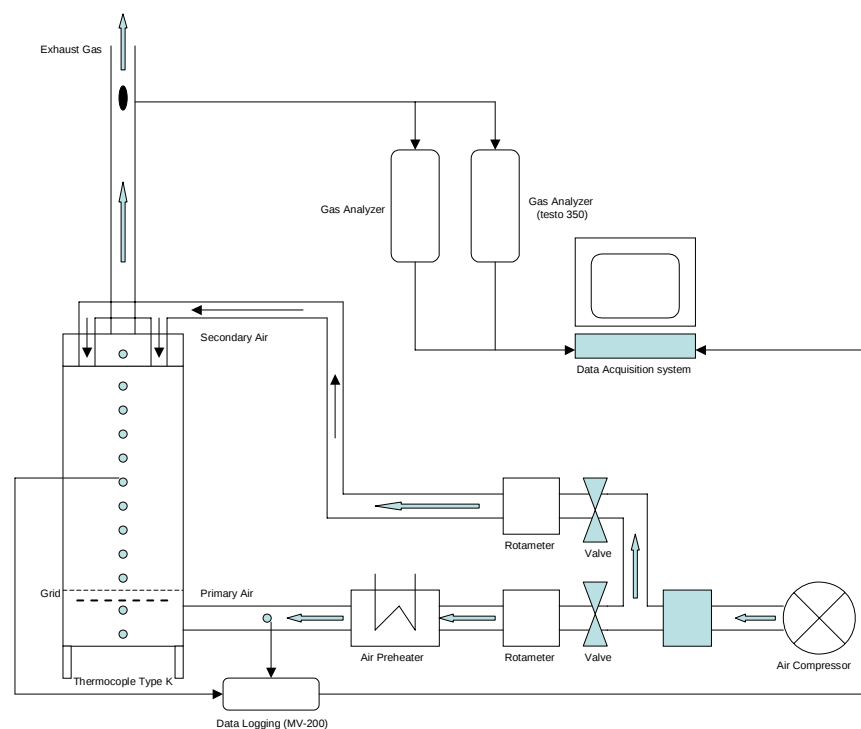
บทที่ 3

อุปกรณ์และขั้นตอนในการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์หลักในการทดลองซึ่งได้แก่ระบบเตาเผาแบบควบคุมอากาศและระบบเครื่องมือวัด การเตรียมเชื้อเพลิง ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 ระบบเตาเผาแบบฟลักซ์เบด

ระบบเตาเผาแบบฟลักซ์เบดที่ใช้เป็นเตาเผาแบบทดลอง (Lab Sales) และมีอุปกรณ์ต่างๆพร้อมติดตั้งเครื่องมือวัด ดังภาพที่ 3-1 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้



ภาพที่ 3-1 อุปกรณ์ต่างๆพร้อมติดตั้งเครื่องมือวัด

3.1.1 เตาเผาแบบฟลักซ์เบด แบบห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm. สูง 825 mm. Refractory หนา 45 mm. Rock Wood หนา 20 mm. และCasing เป็น Stainless พร้อมติดตั้งตะแกรงขนาด 10 mech รายละเอียดดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 เตาเผาแบบพิกซ์เบด

3.1.2 ระบบป้อนอากาศประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ 2 จังหวะ ขนาด 11 KW สามารถอัดความดันสูงสุดได้ 8 bar จ่ายอัตราการไหลของอากาศสูงสุดได้ $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ พร้อมชุดกรองความชื้นน้ำมันและตัวปรับความดัน ดังภาพที่ 3-3

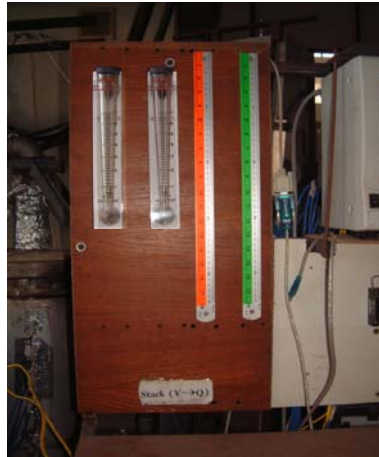


(ก)

(ข)

ภาพที่ 3-3 (ก) เครื่องอัดอากาศ (ข) ชุดกรองและตัวปรับความดัน

อากาศที่ผ่านเครื่องกรองผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลเข้าเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศโรตารีมิเตอร์ (Rotor Meter) โดยมีช่วงการวัด 100-800 LPM ยี่ห้อ Dwyer ดังภาพที่ 3-4



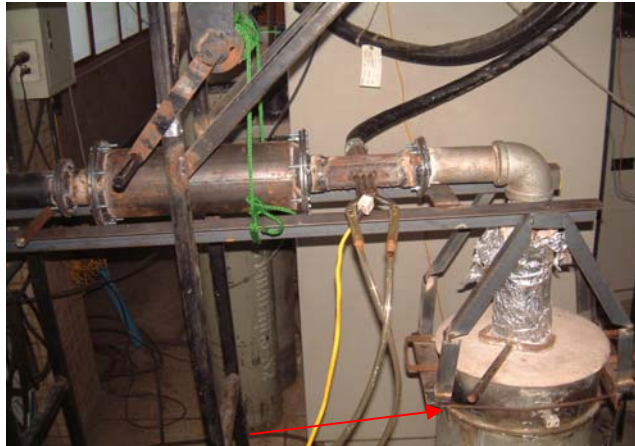
ภาพที่ 3-4 เครื่องวัดอัตราการไหล

3.1.3 ระบบอุ่นอากาศ อากาศที่ป้อนจะมีอุณหภูมิอุ่น โดยที่ระบบอุ่นเป็นชุดขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 18 KW 380 V สามารถอุ่นอากาศที่อัตราการไหลได้ $24 \text{ Nm}^3/\text{h}$ จนอุณหภูมิภายในเตา 200°C พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิป้องกันชุดขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้าขาด ขนาดของกล่องฮีตเตอร์ $450 \times 1500 \times 450 \text{ mm}$. อากาศร้อนออกจากกล่อง ฮีตเตอร์ผ่านช่องอแล้วเข้าเตาโดยผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh กระจายอยู่เต็มหน้าตัดซึ่งทำให้ อากาศกระจายโดยสม่ำเสมอเต็มทั้งหน้าตัด ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

อากาศทุกชนิดที่ผ่านเครื่องกรองผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลเข้าเครื่องวัดอากาศ (Rotor Meter) โดยมีช่วงการวัด 100-700 LPM ยี่ห้อ Dwyer เข้าทางด้านบนฝาเตา ดังภาพที่ 3-6

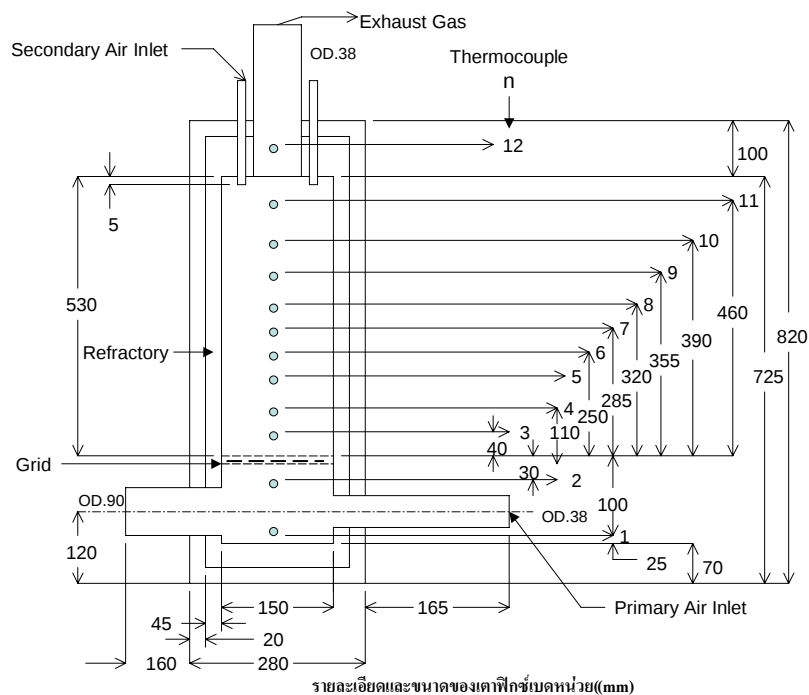


ภาพที่ 3-6 ฝาเตา

3.1.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบเบทซ์จะเป็นการป้อนเชื้อเพลิงครั้งเดียวแล้วหยุด โดยการนำเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้ใส่เข้าไปในตัวเตาวางไว้เหนือตะกรับ

3.1.5. ระบบวัดและบันทึกข้อมูลในการทดลอง

การวัดอุณหภูมิภายในเตาฟิวส์เบดใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ติดตั้ง 12 ตำแหน่งโดยมีการปิดช่องว่างระหว่างเทอร์โมคัปเปิ้ลกับเตาให้สนิท ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ที่ระดับเหนือผิวบนของตะกรับ $T_3=40\text{mm}$, $T_4=110\text{mm}$, $T_5=180\text{mm}$, $T_6=250\text{mm}$, $T_7=285\text{mm}$, $T_8=320\text{mm}$, $T_9=355\text{mm}$, $T_{10}=390\text{mm}$, $T_{11}=460\text{mm}$, และ $T_{12}=580\text{mm}$, และอยู่ที่ระดับต่ำกว่าผิวบนของตะกรับได้แก่ $T_2=30\text{mm}$, และ $T_1=100\text{mm}$. ดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล

การวัดอุณหภูมิของอากาศป้อนภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดK ติดตั้งตรงตำแหน่งที่ทางออกจากฮีตเตอร์ 1 ตำแหน่งและต่อเข้ากับชุดควบคุมฮีตเตอร์

เครื่องบันทึกข้อมูลสำหรับเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็น Data Acquisition System ยี่ห้อ YOKOGAWA ประกอบด้วย Data Acquisition Unit รุ่น MV 200 ดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 เครื่องบันทึกข้อมูล

3.1.6 การวัดก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย

3.1.6.1 อุปกรณ์ดูดก๊าซเพื่อการวิเคราะห์ (Gas Sampling) ซึ่งประกอบด้วยแท่งดูดวัดแบบไอโซเมติกส์ (Isokenetic Sampling Probe) ปั๊มเมมเบรน (Membrane Pump) และกรองแบบเซรามิก (Ceramic Filter) แสดงไว้ในภาพที่ 3-9 โดยตำแหน่งของการดูดก๊าซ (Gas Sampling) นั้นอยู่ที่มีความสูง 120 mm. เหนือแผ่นกระจายลม



ภาพที่ 3-9 อุปกรณ์ดูดก๊าซ

3.1.6.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซแบบนอนดิสเพอร์ทีฟอินฟราเรด (Non Dispersive Infrared Gas Analyzer) ของ Hartmann and Braun ABB (Advance Optima) สำหรับวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (N_2O), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.5% ของช่วงการวัด ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซแบบนอลดิสเพอร์ทีฟอินฟาเรด

3.1.6.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซแบบพาราแมกเนติกส์ (Paramagnetic Analyzer) ยี่ห้อ ANARAD รุ่น AR-180N4 สำหรับวัดก๊าซออกซิเจน (O_2) โดยช่วงการวัดของอุปกรณ์ทั้งสอง แสดงไว้ใน ตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงช่วงการวัดก๊าซ

Gas component	Range
CO (ppm)	0-3000
CO ₂ (%)	0-30
NO (ppm)	0-2500
N ₂ O (ppm)	0-1000
SO ₂ (ppm)	0-2500
O ₂ (%)	0-25

ข้อมูลทั้งหมดในการทดลองจะถูกส่งไปยังเครื่องมือวัดเก็บสัญญาณ (Data Logger) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DS600 และ DA100 ความถี่สูงสุดที่สามารถบันทึกข้อมูลได้คือ 0.5 Hz มี

ช่องสัญญาณไม่น้อยกว่า 6 ช่องสัญญาณ แสดงไว้ในภาพที่ 3-11 และใช้กับซอฟต์แวร์ (DARWIN) แสดงผล



ภาพที่ 3-11 เก็บสัญญาณรุ่น DS600 และ DA100

3.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

ขานอ้อยที่นำมาใช้ในการทดลองมาจาก โรงงานน้ำตาลรีไฟน์ซังมงคล จ.สุพรรณบุรี ขนาดของขานอ้อยตามสภาพใช้งานจริง มีการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) และแบบประมาณ (Proximate Analysis) [10] แสดงตามตารางที่ 2-2

3.3 เตรียมการทดลอง

3.3.1 เผาเชื้อเพลิงขานอ้อยในเตาฟลักซ์เบดภายใต้สภาวะที่กำหนดในข้อ 2. พร้อมบันทึกข้อมูล อุณหภูมิและก๊าซที่ปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเผาจนหมดแล้วนำจี๊ดี้เข้าเตาที่เหลือไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่เหลือ

3.3.2 ทำการทดลองโดยผลกระทบของตัวแปรต่อพารามิเตอร์ของการสันดาป ดังนี้

3.3.2.1 ปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าเตาทั้งหมด คือ อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ (200,300และ400LPM)

3.3.2.2 ความเร็วของอากาศที่ป้อนระหว่างปฐมภูมิกับทุติยภูมิ

3.3.2.3 ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่ป้อนให้ทางปฐมภูมิ (100,150และ200°C)

3.3.3 จากบันทึกตามเวลาของอุณหภูมิที่ระดับต่างๆภายในเบด วิเคราะห์ก๊าซที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของจี๊ดี้ในลักษณะการเผาไหม้ภายใต้สภาวะต่างๆ คำนวณหาอัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟและประสิทธิภาพการเผาไหม้

สำหรับการทดลองแต่ละเงื่อนไขที่กำหนดในการทดลองมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

3.4.1 เตรียมเชื้อเพลิง ได้แก่ ชานอ้อย นำไปชั่งน้ำหนักและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที และนำไปชั่งและจดบันทึกไว้

3.4.2 เตรียมอุปกรณ์การทดลอง ดังนี้

3.4.2.1 นำชานอ้อยที่เตรียมใส่ไว้ในเตาเผาและวัดความสูงของเชื้อเพลิงเพื่อหาความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

3.4.2.2 ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเปิดโปรแกรมคาร์วิน เพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมและเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ โดยสังเกตก๊าซ CO , CO_2 , NO , N_2O , SO_2 และ O_2 ที่วัดในหน้าจอ

3.4.2.3 เปิดโปรแกรม Manager เพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม โดย สังเกตจากอุณหภูมิในหน้าจอและตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล

3.4.2.4 เตรียมอากาศสำหรับการเผาไหม้

-เปิดวาล์วของอากาศรวมให้สุด

-ปรับวาล์วของอากาศป้อนหมู่ให้ได้อัตราการไหลตามอัตราส่วนกับอากาศ

ทุกยภูมิ

ตามที่กำหนดของแต่ละการทดลอง

3.4.2.5 เปิดสวิตช์และปรับ Regulator ของ Air Heater เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศตามที่กำหนด

3.4.3 การทดลอง โดยการจุดไฟบนชานอ้อยด้วยกระดาษ

3.4.4 สังเกตการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงเมื่อเริ่มจุดติดเชื้อเพลิง จึงปิดฝาเตาเผาให้แน่น

3.4.5 บันทึกอุณหภูมิในเตาเผาที่ระดับต่างๆ

3.4.6 บันทึกก๊าซ CO , CO_2 , NO , N_2O , SO_2 และ O_2 ตามเวลา

3.4.7 เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด สังเกตจากปริมาณของก๊าซ O_2 ควรอยู่ที่ ร้อยละ 21% เนื่องจากไม่มีการเผาไหม้แล้ว ปิดสวิตช์ Relagtor

3.4.8 บันทึกข้อมูลของก๊าซที่วัดได้และปิดโปรแกรมคาร์วิน

3.4.9 บันทึกข้อมูลของอุณหภูมิที่วัดได้และปิดโปรแกรม Manager

3.4.10 ปิดวาล์วของอากาศรวม

3.4.11 ทิ้งไว้ให้เตาเย็นลง (ประมาณ 2 ชั่วโมง) เก็บจี้เต้าภายในเตาทั้งหมดนำไปชั่งและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่เหลือในจี้เต้า

3.4.12 เตรียมเตาเผาฟลักซ์เบดเพื่อทำการทดลองในเงื่อนไขต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการทดลองเผาไหม้ขานอ้อยเพียงอย่างเดียวและ ผลการทดลองได้จำแนกออกเป็นสองส่วนคือ (1) อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (2) การสมมูลมวลของปริมาณก๊าซ CO และ CO₂ สำหรับคำนวณการหามวลของคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการเผาไหม้ (3) ผลของการแปรผันปริมาณอากาศที่มีต่อความเร็วเปลวไฟที่มีผลต่อการเผาไหม้

ในการทดลองกำหนดพารามิเตอร์ไว้ 2 ประการ คือพารามิเตอร์ที่คงที่และพารามิเตอร์ที่กำหนดให้ที่มีการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

1. พารามิเตอร์ที่คงที่ ได้แก่ ปริมาณของขานอ้อยที่ใช้ ความหนาแน่นและความสูงของเชื้อเพลิง (ตาราง 4-2)

2. พารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ปริมาณอากาศ ความเร็วและอุณหภูมิ

การทดลองแปรผันแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) ปริมาณอากาศรวมที่ 200, 300 และ 400 LPM 2) ความเร็วอากาศที่เบด ได้แก่ 0.188, 0.094, 0.282, 0.141, 0.377 และ 0.1883 m/s 3) อุณหภูมิของอากาศป้อนเข้า ได้แก่ ambient, 100, 150 และ 200°C รายละเอียดของสภาวะการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงการทดลองที่สภาวะแวดล้อม (100, 150 และ 200)

ปริมาณอากาศรวม (LPM)	ความเร็วอากาศที่เบด (m/s)
200	0.188, 0.094*
300	0.282, 0.141*
400	0.377, 0.188*

* คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อน้ำมันที่ 50 % และเปลี่ยนมาเป็นความเร็วอากาศ

การทดลองการเผาไหม้ขานอ้อยแบบเบดได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 ถึง 4-6 ซึ่งแสดงถึงการแปรผันของอุณหภูมิตามเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกนภายในเตา สำหรับภาพที่ 4-7 ถึง 4-12 แสดงปริมาณ CO₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้ ส่วนภาพที่ 4-13 ถึง 4-18 แสดงผลการเผาไหม้มวลคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้ผลจากการปลดปล่อยก๊าซ CO และ CO₂ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ณ เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งการเผาไหม้สิ้นสุดเวลาการเผาไหม้ โดยการคำนวณอ้างอิงจากสมการที่ 2-7 ภาพที่ 4-19 ถึง 4-24 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ขณะใดๆ (ได้มาจากการอนุพันธ์กราฟที่ได้จากการทดลองของมวลเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้) และภาพที่ 4-25 เป็นตัวอย่างในการหา

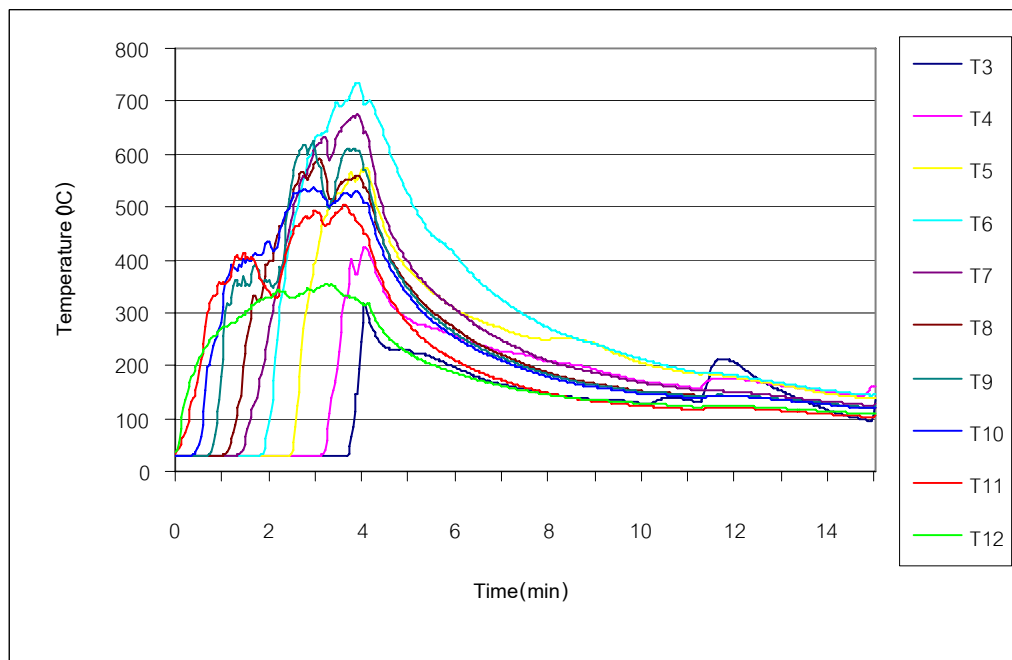
อุณหภูมิจุดติดไฟของซานอ้อยโดยใช้ทฤษฎี Thermal explosion ของ Semenov โดยมีเงื่อนไขของจุดติดไฟคือ $dT/dt \geq 0$ และ $dT^2/dt^2 = 0$ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

ตารางที่ 4-2 รายละเอียดสภาวะการทดลอง

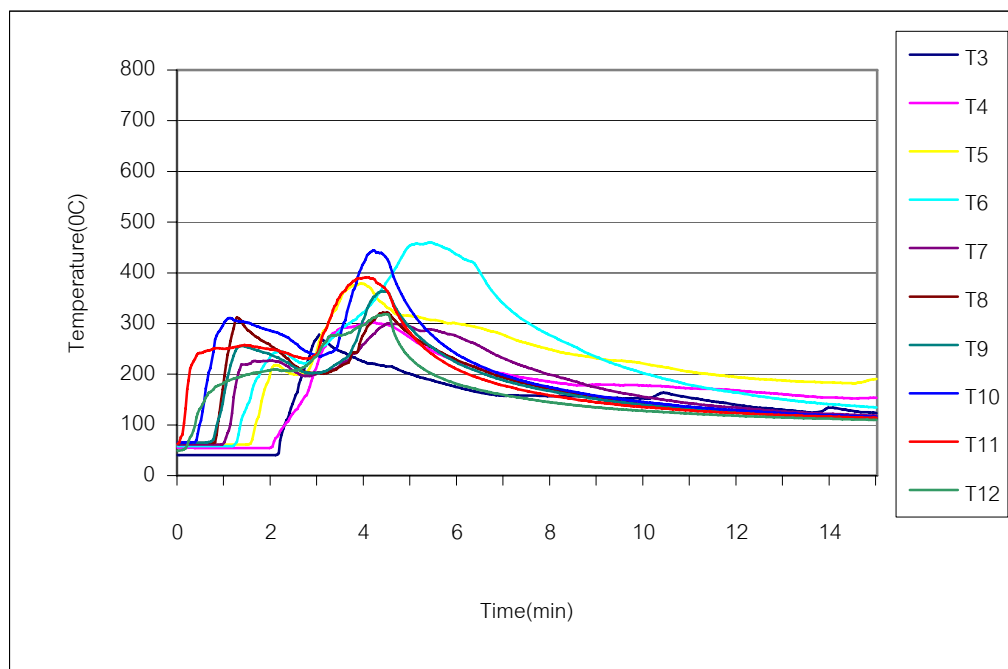
Group	No	Speed Primary Air (m/s)	Fuel Weight (kg)	Bed Height (m)	Bulk Density (kg/m ³)	Total Air Flow Rate (LPM)	Secondary Air Flow Rate (LPM)
T=ambient	1	0.188	0.4	0.44	51.444	200	0
	2	0.094	0.4	0.44	51.444	200	100
	3	0.282	0.4	0.44	51.444	300	0
	4	0.141	0.4	0.44	51.444	300	150
	5	0.377	0.4	0.44	51.444	400	0
	6	0.188	0.4	0.44	51.444	400	200
T=100°C	1	0.188	0.4	0.44	51.444	200	0
	2	0.094	0.4	0.44	51.444	200	100
	3	0.282	0.4	0.44	51.444	300	0
	4	0.141	0.4	0.44	51.444	300	150
	5	0.377	0.4	0.44	51.444	400	0
	6	0.188	0.4	0.44	51.444	400	200
T=150°C	1	0.188	0.4	0.44	51.444	200	0
	2	0.094	0.4	0.44	51.444	200	100
	3	0.282	0.4	0.44	51.444	300	0
	4	0.141	0.4	0.44	51.444	300	150
	5	0.377	0.4	0.44	51.444	400	0
	6	0.188	0.4	0.44	51.444	400	200
T=200°C	1	0.188	0.4	0.44	51.444	200	0
	2	0.094	0.4	0.44	51.444	200	100
	3	0.282	0.4	0.44	51.444	300	0
	4	0.141	0.4	0.44	51.444	300	150
	5	0.377	0.4	0.44	51.444	400	0
	6	0.188	0.4	0.44	51.444	400	200

ตารางที่ 4-3 สรุปผลการทดลอง

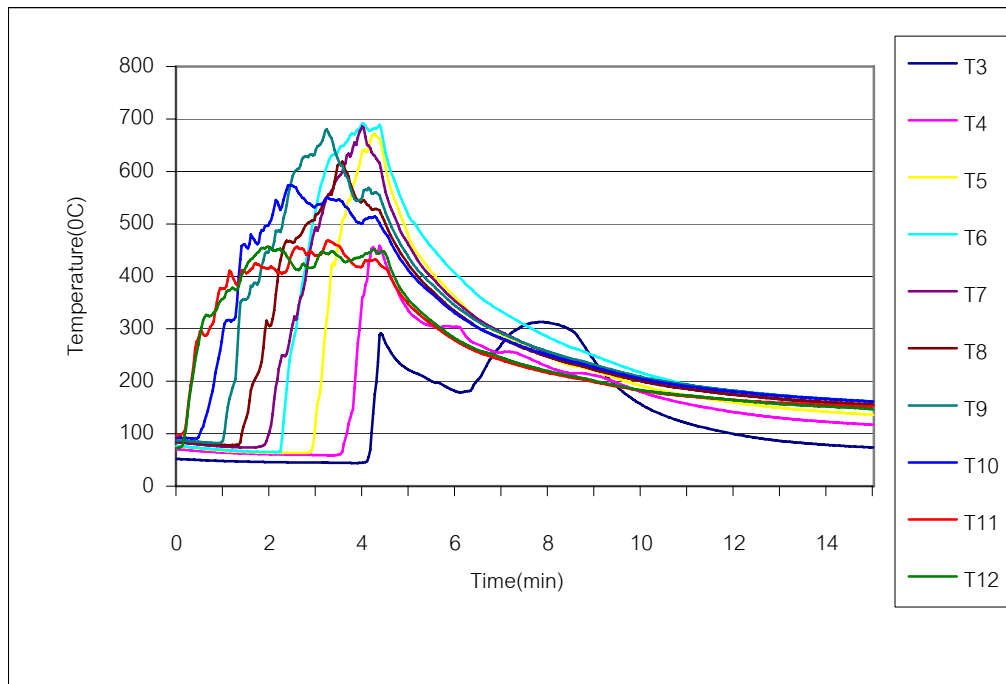
Group	No	Speed Primary Air (m/s)	Ignition Temp. (°C)	Flame Speed (mm/s)	Ignition Rate (kg/m ² s)	Combustion Rate (g/s)
T=ambient	1	0.188	248	1.86	0.095	0.076
	2	0.094	202	2.87	0.147	0.044
	3	0.282	260	1.71	0.087	0.188
	4	0.141	186	1.94	0.099	0.085
	5	0.377	248	1.69	0.086	0.338
	6	0.188	194	1.59	0.081	0.177
T=100°C	1	0.188	219	2.78	0.142	0.067
	2	0.094	216	4.61	0.236	0.030
	3	0.282	247	3.24	0.166	0.099
	4	0.141	235	3.72	0.191	0.049
	5	0.377	250	2.46	0.126	0.114
	6	0.188	244	3.18	0.163	0.060
T=150°C	1	0.188	258	3.89	0.199	0.017
	2	0.094	220	4.38	0.224	0.038
	3	0.282	247	3.68	0.189	0.097
	4	0.141	152	3.36	0.172	0.029
	5	0.377	264	3.46	0.177	0.087
	6	0.188	186	3.30	0.169	0.141
T=200°C	1	0.188	259	4.37	0.224	0.036
	2	0.094	144	5.43	0.279	0.028
	3	0.282	299	3.72	0.191	0.051
	4	0.141	255	5.55	0.285	0.056
	5	0.377	278	3.50	0.180	0.077
	6	0.188	252	5.30	0.273	0.078



ภาพที่ 4-1 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s

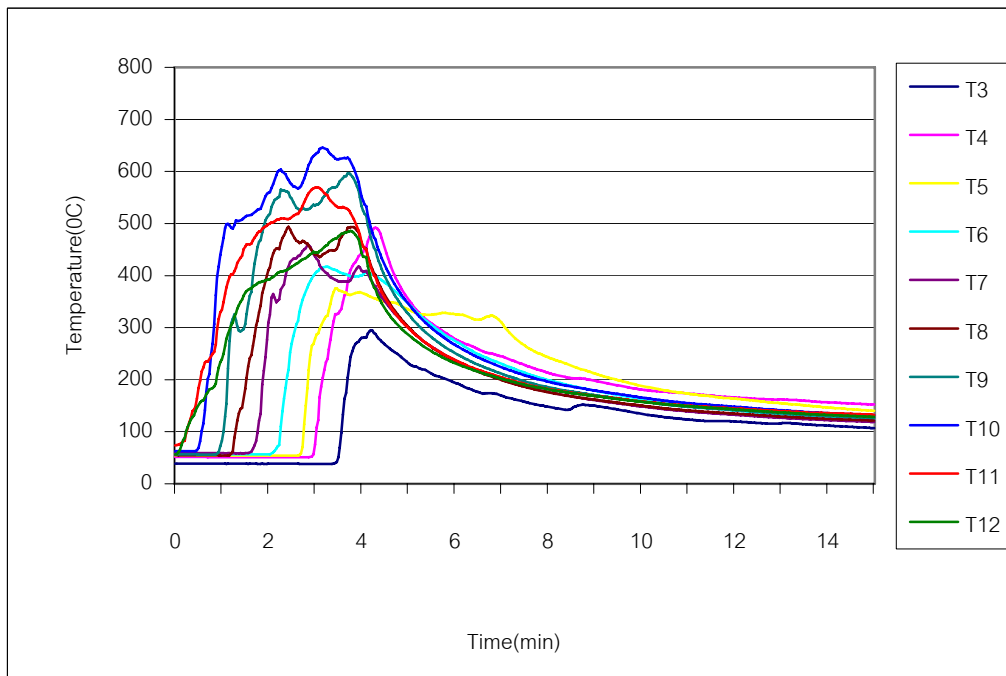


ภาพที่ 4-2 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



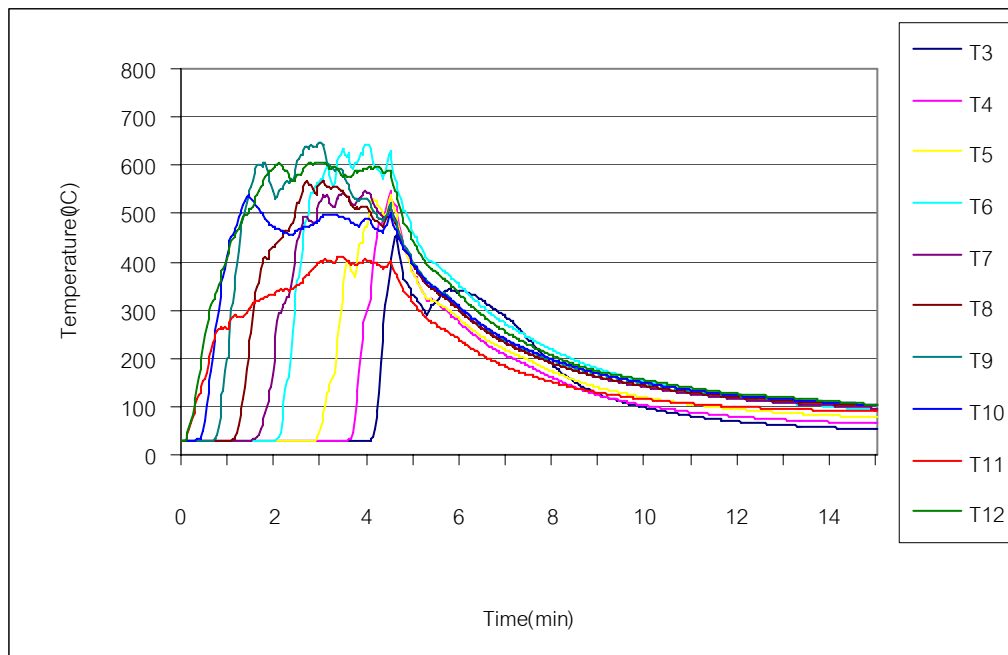
ภาพที่ 4-3 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม

Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



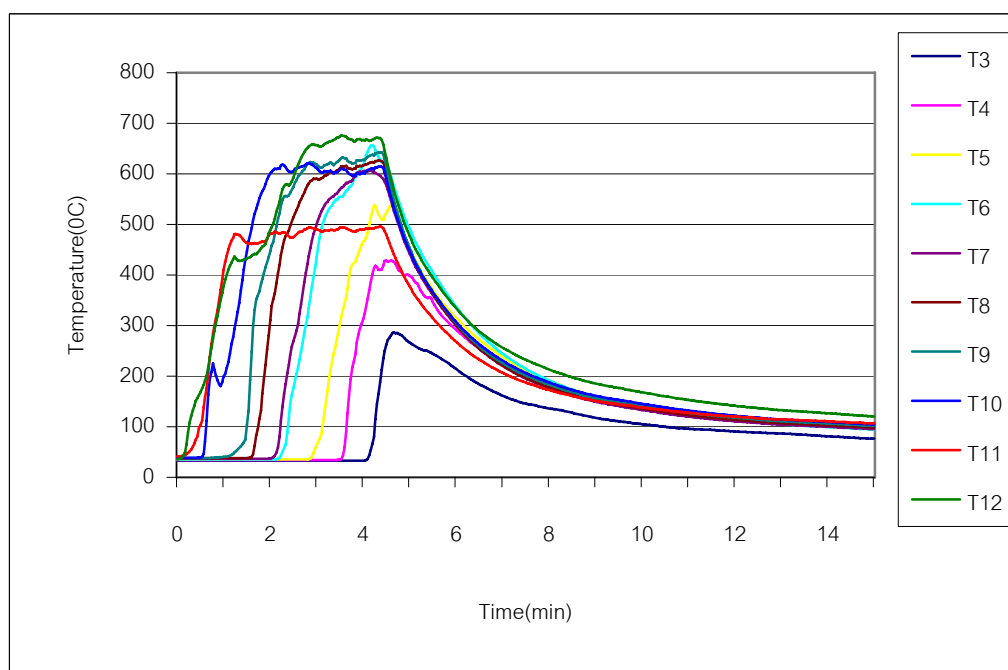
ภาพที่ 4-4 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม

Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



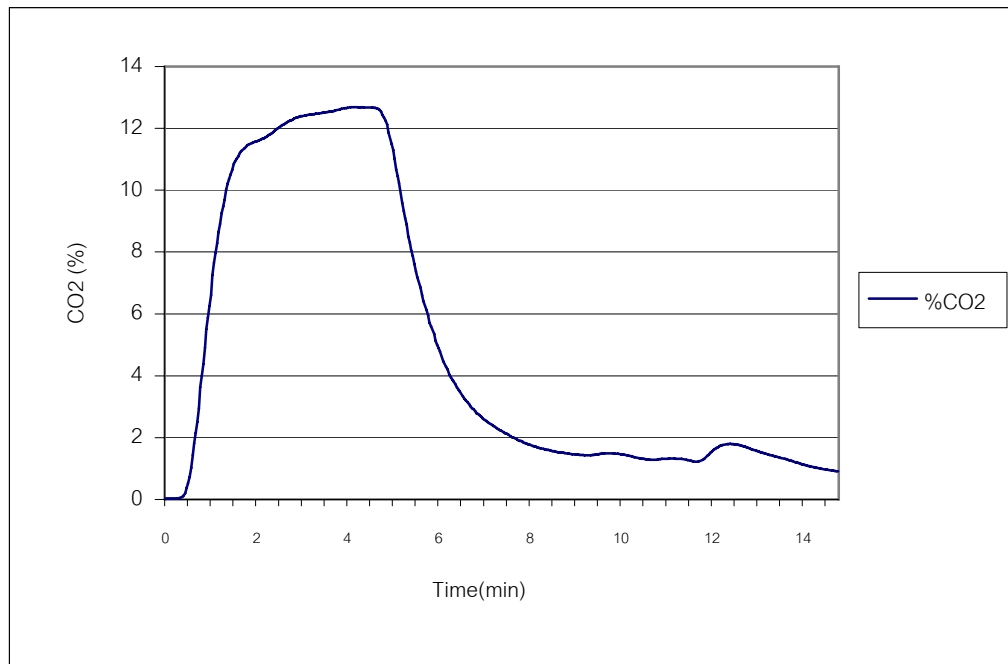
ภาพที่ 4-5 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม

Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

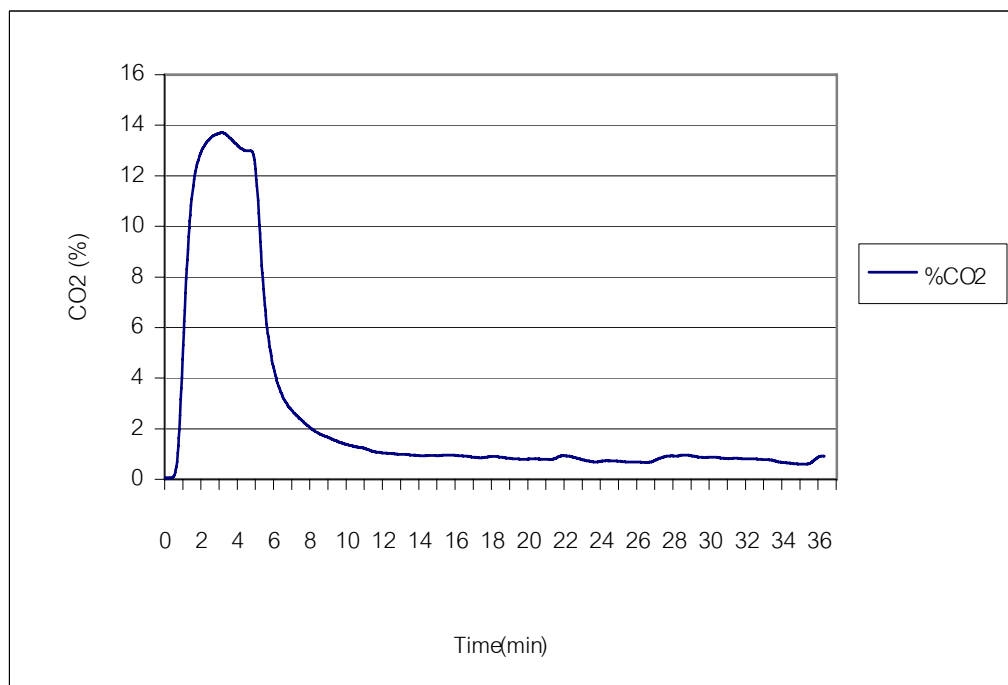


ภาพที่ 4-6 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ อากาศสถานะแวดล้อม

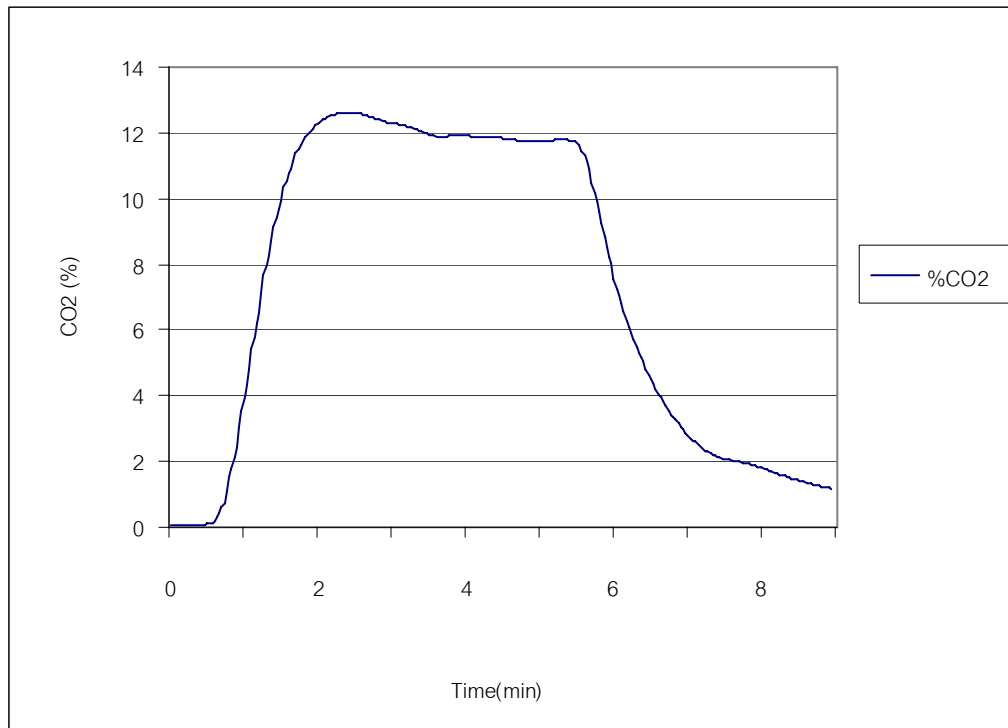
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



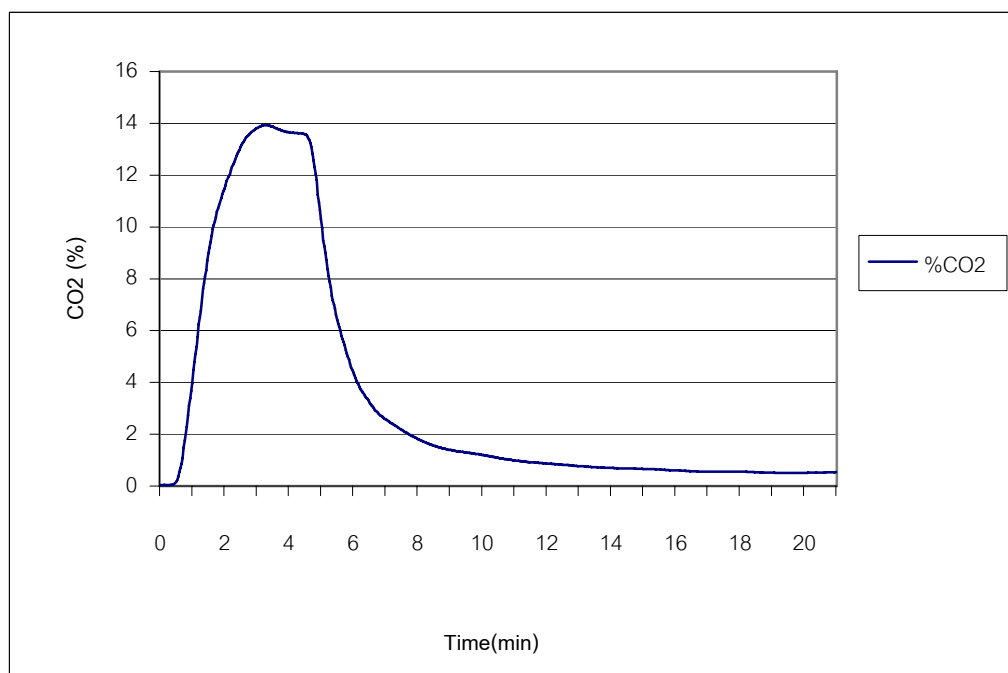
ภาพที่ 4-7 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



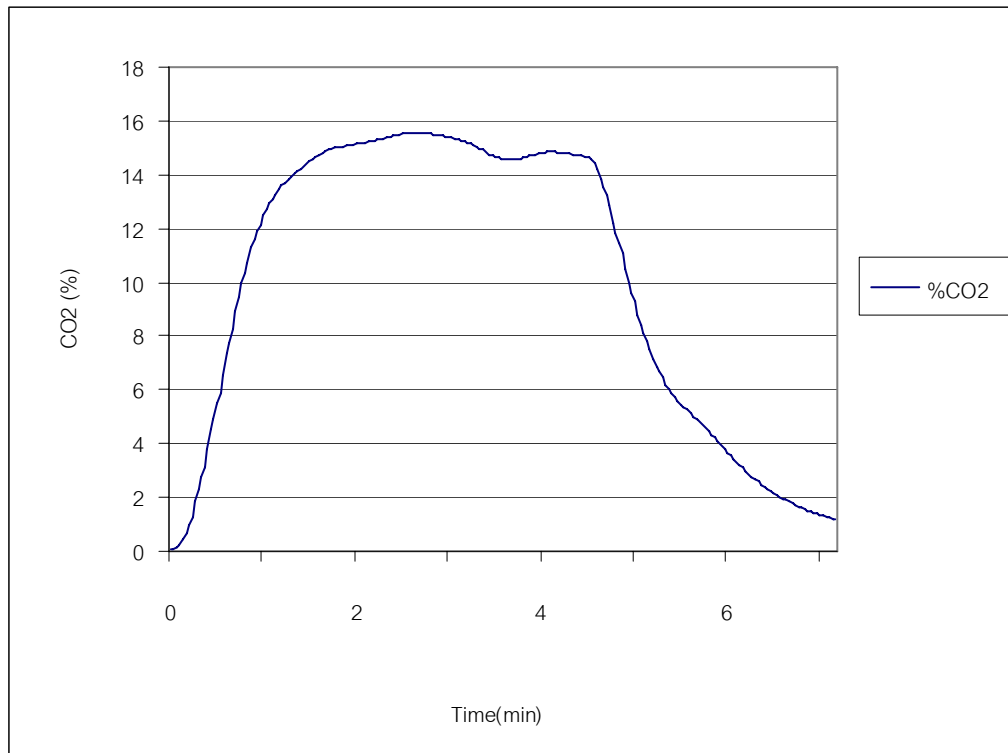
ภาพที่ 4-8 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



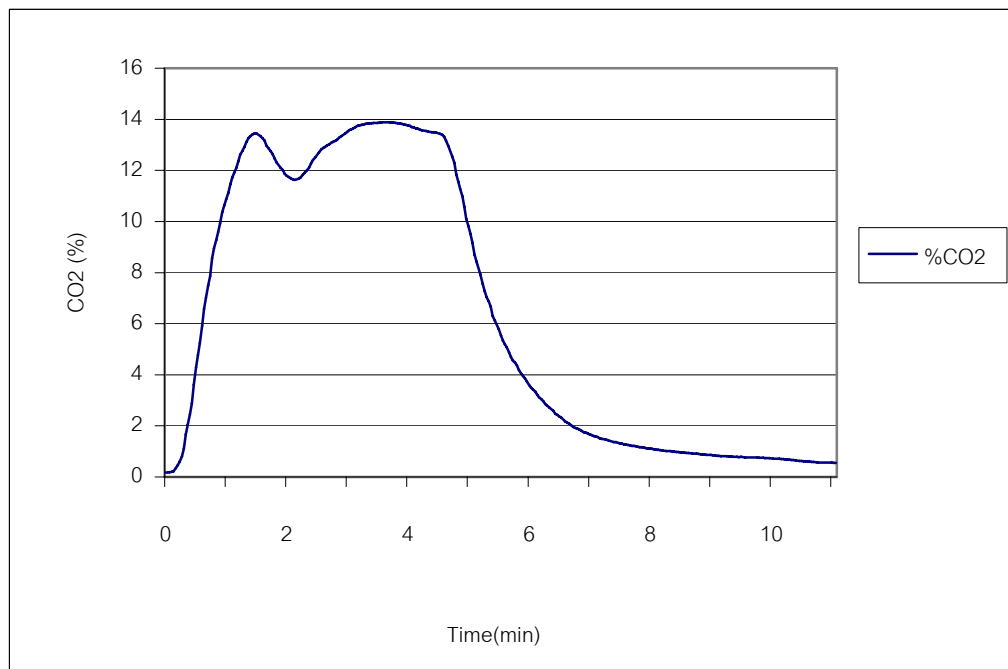
ภาพที่ 4-9 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



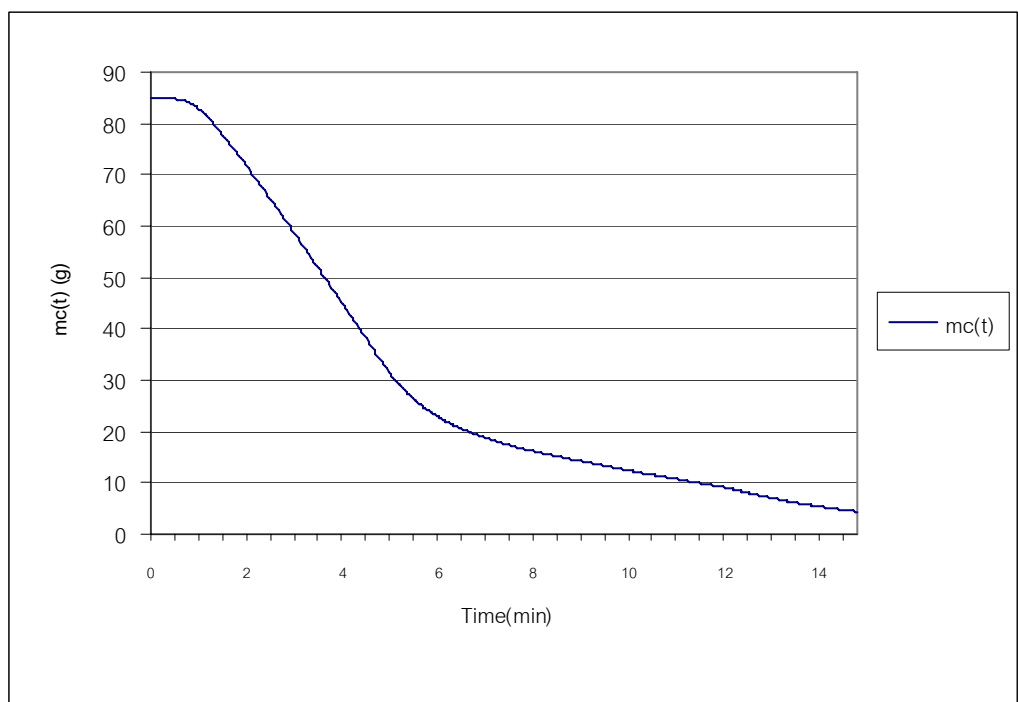
ภาพที่ 4-10 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



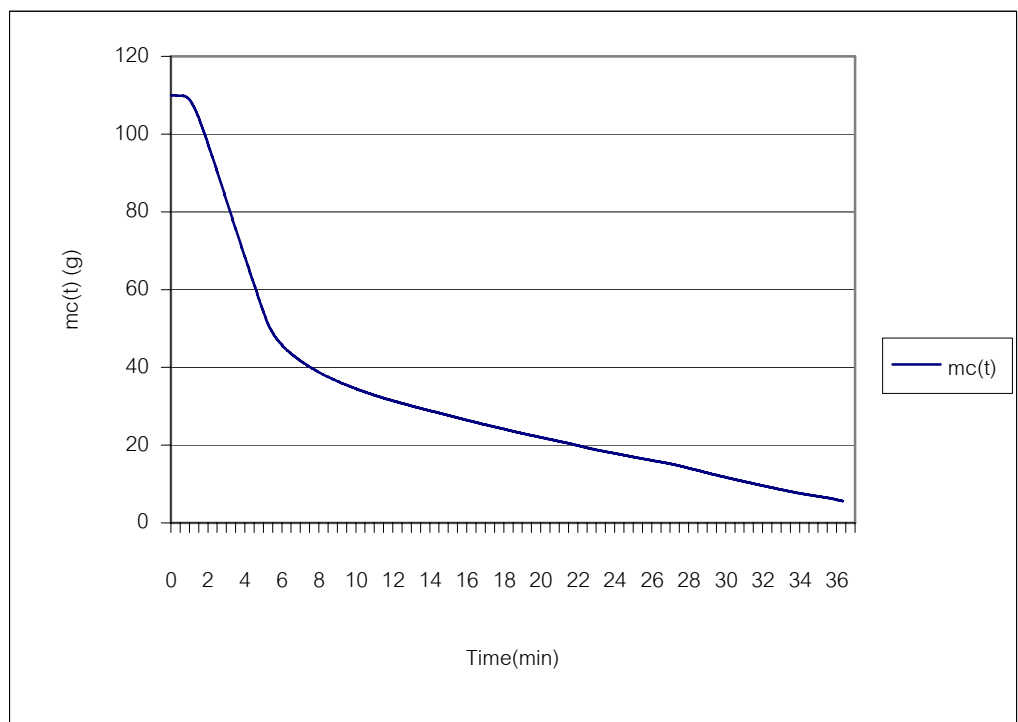
ภาพที่ 4-11 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



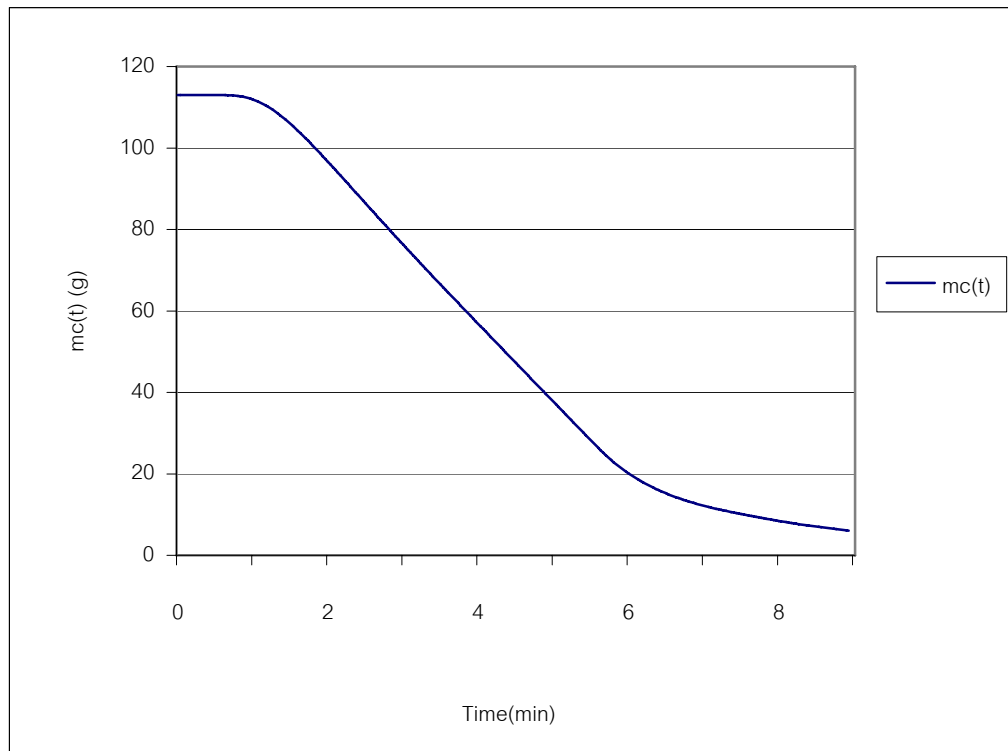
ภาพที่ 4-12 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



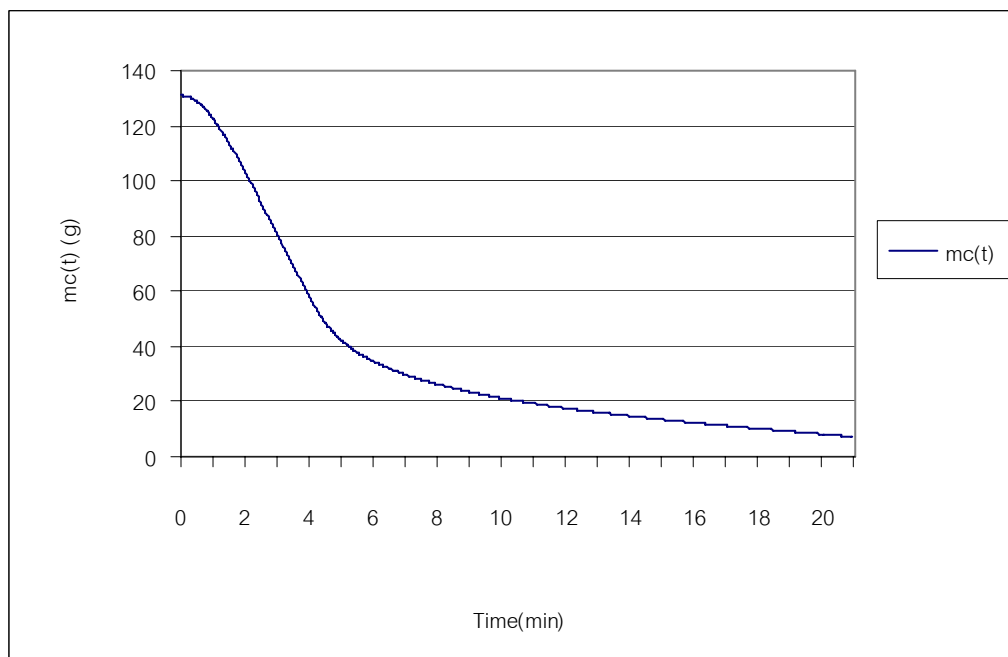
ภาพที่ 4-13 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



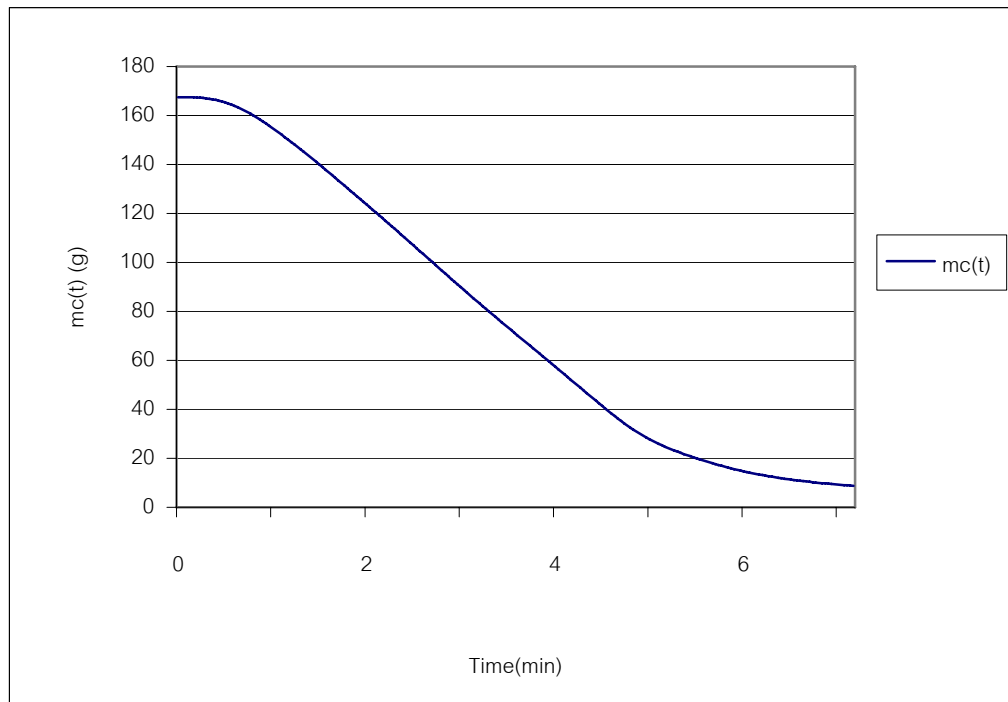
ภาพที่ 4-14 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



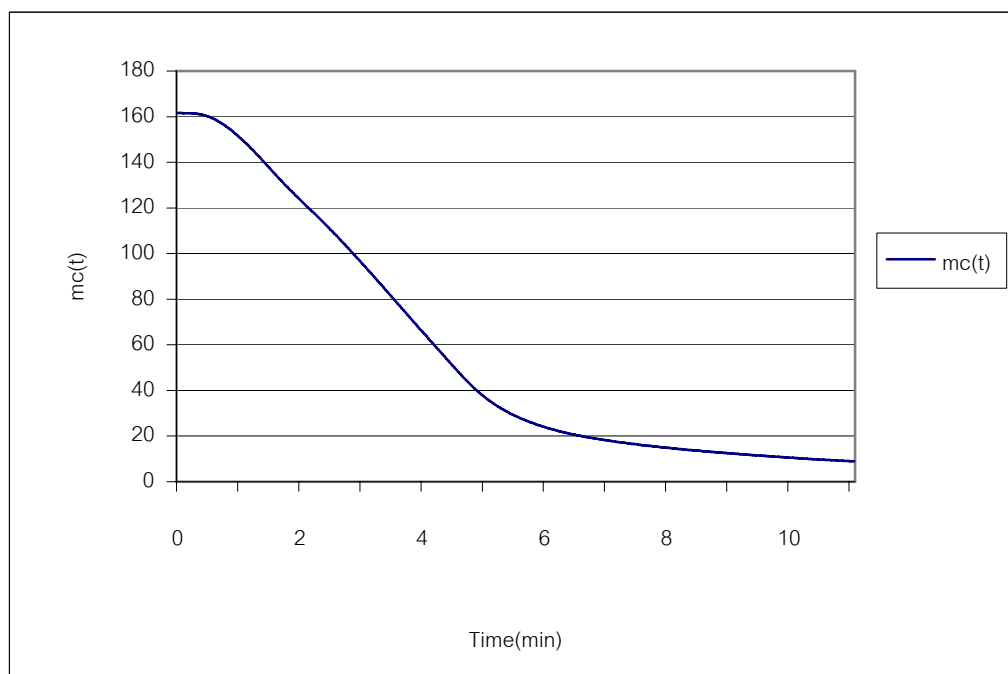
ภาพที่ 4-15 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



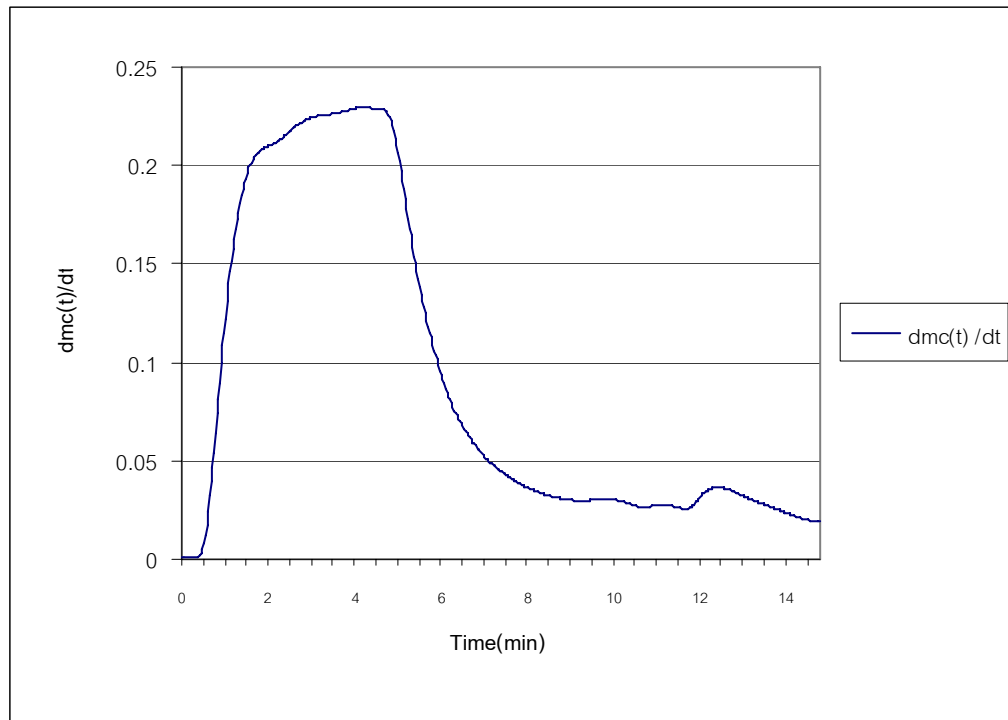
ภาพที่ 4-16 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



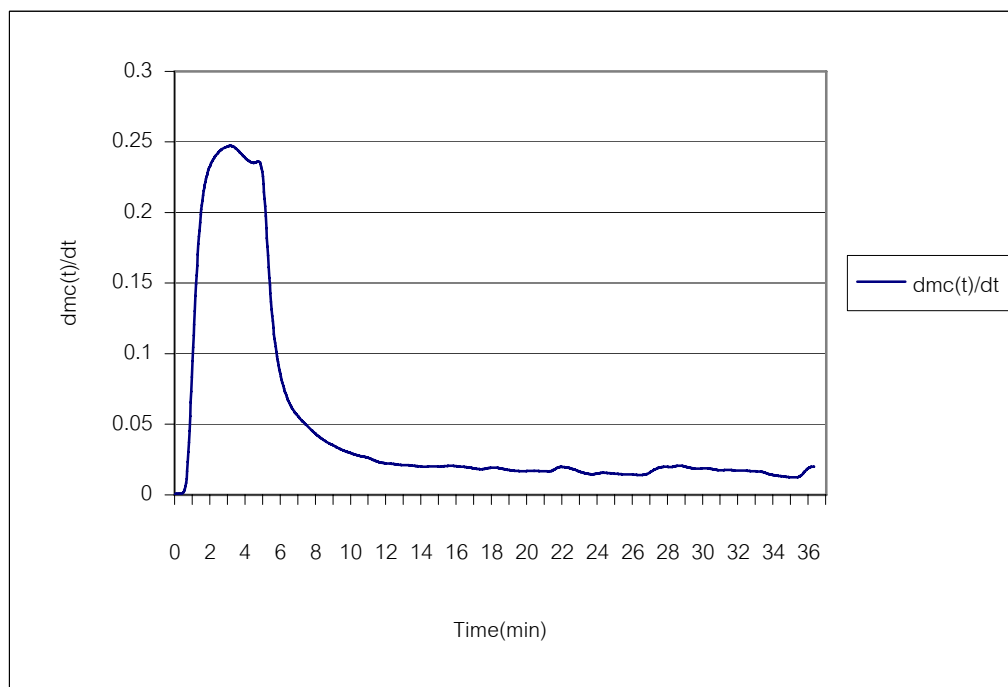
ภาพที่ 4-17 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



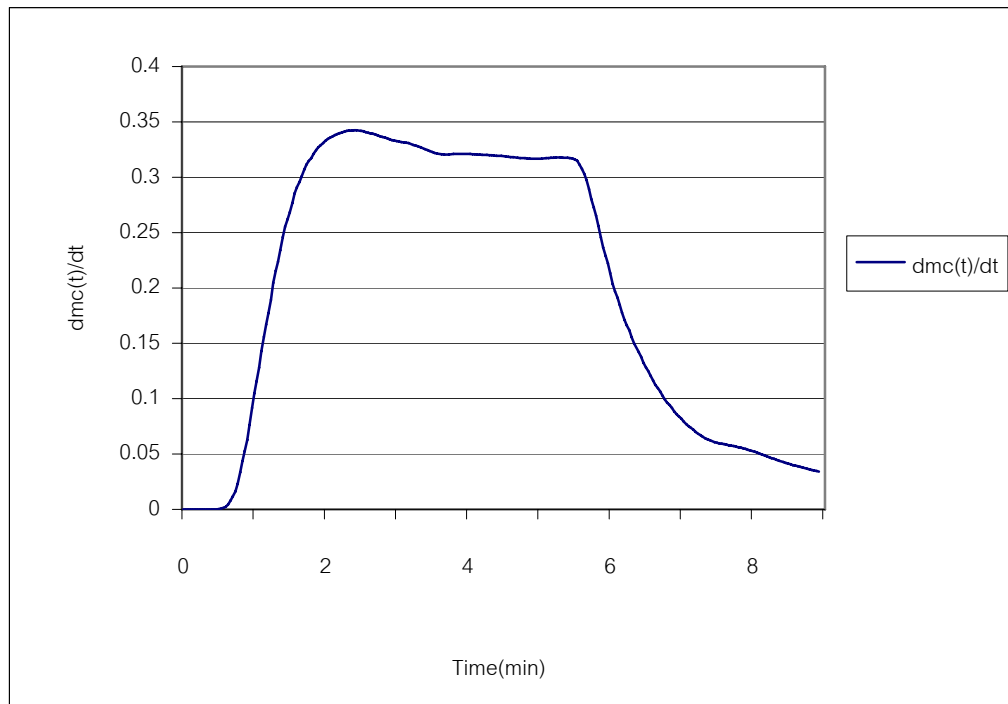
ภาพที่ 4-18 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



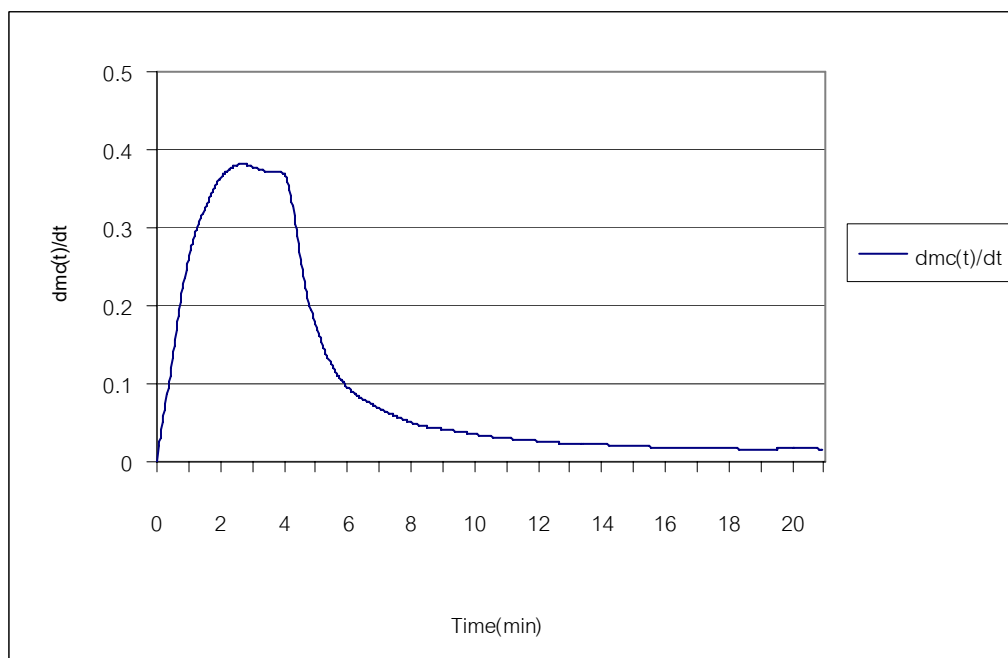
ภาพที่ 4-19 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



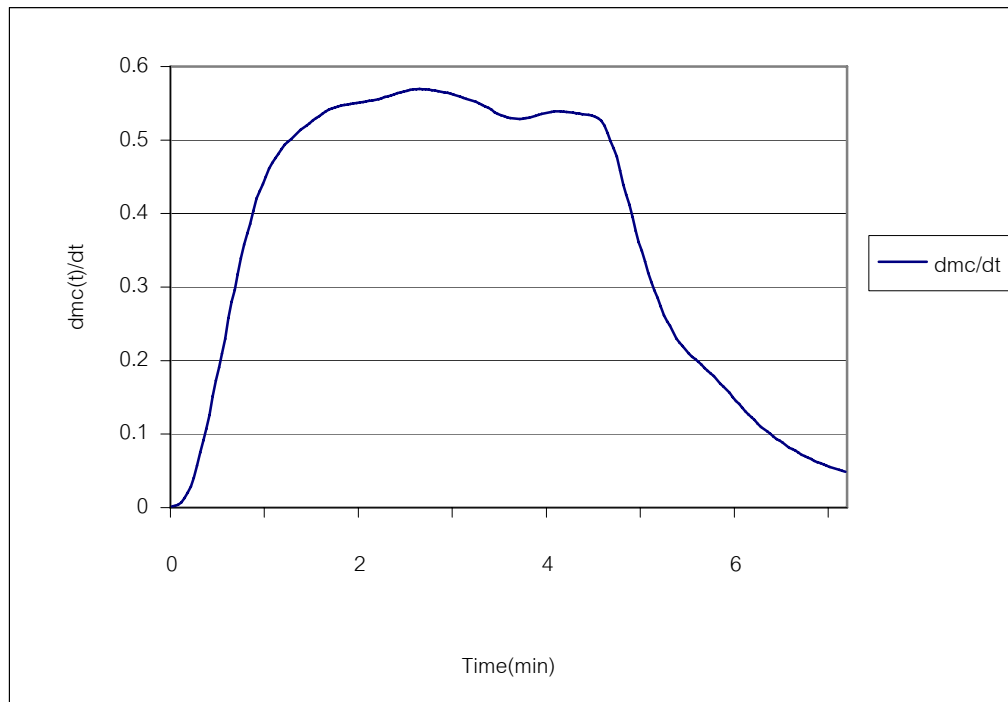
ภาพที่ 4-20 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



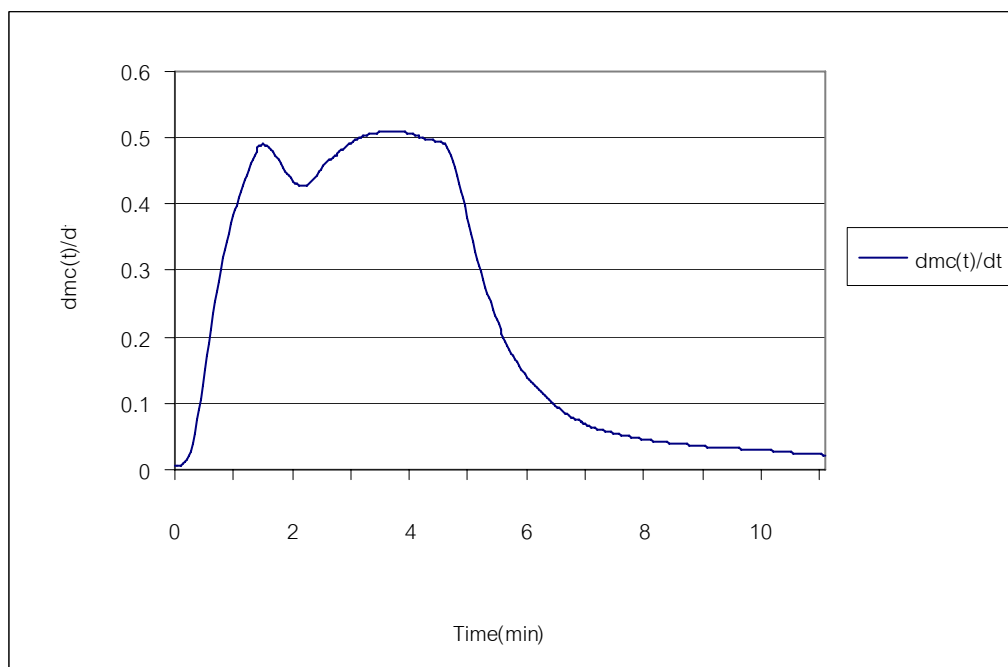
ภาพที่ 4-21 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



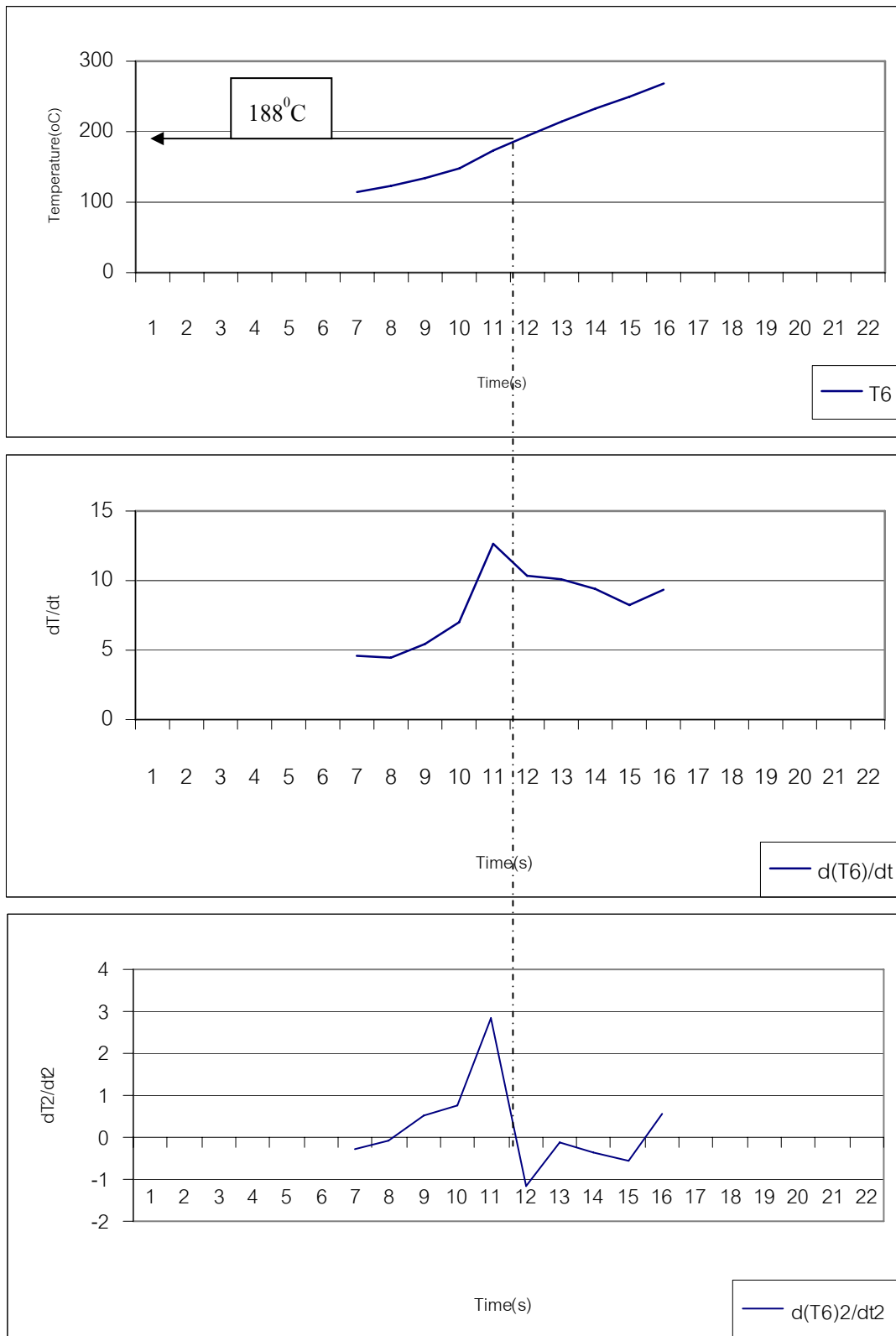
ภาพที่ 4-22 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



ภาพที่ 4-23 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

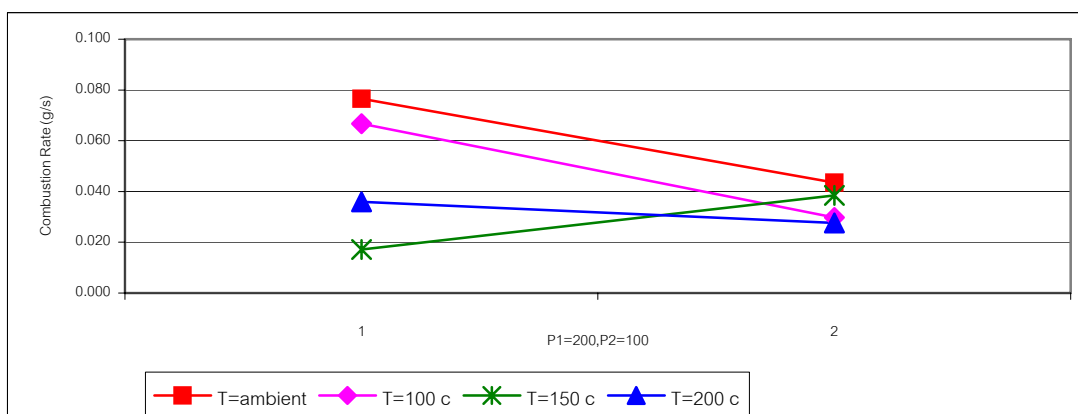


ภาพที่ 4-24 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ อากาศสถานะแวดล้อม
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s

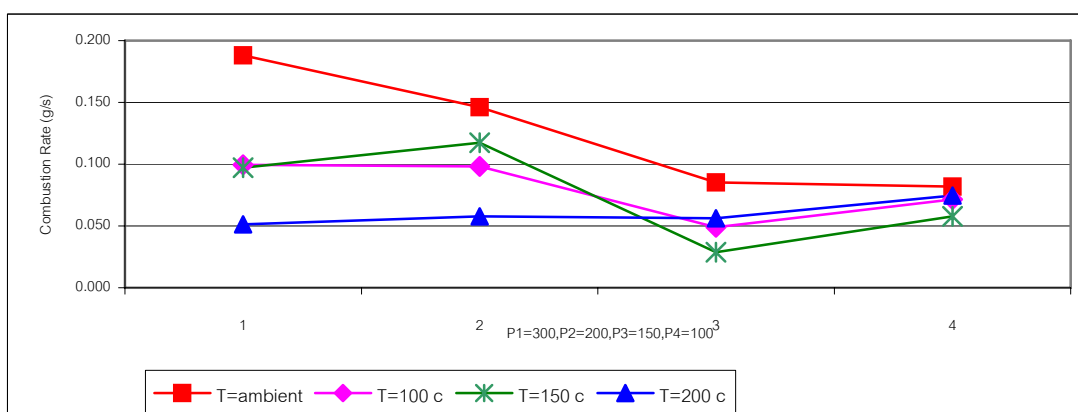


ภาพที่ 4-25 แสดงอนุกรมจุดติดไฟของการเผาไหม้ที่อากาศสถานะแวดล้อม

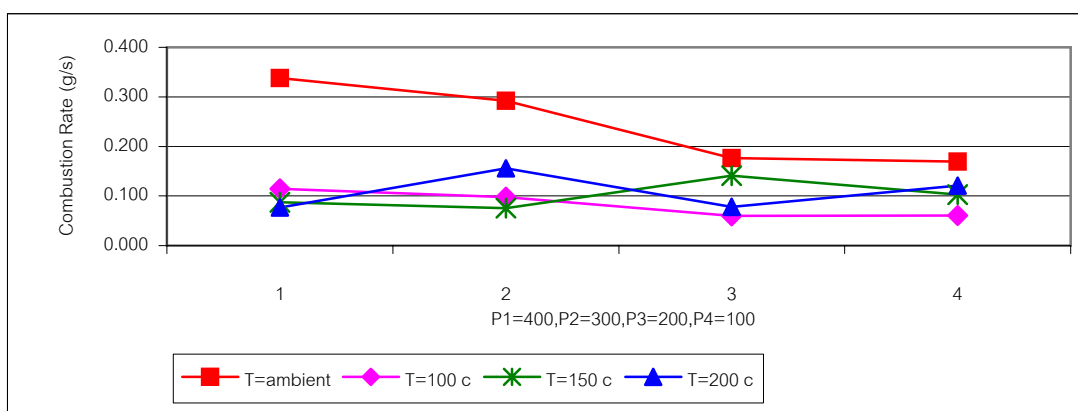
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



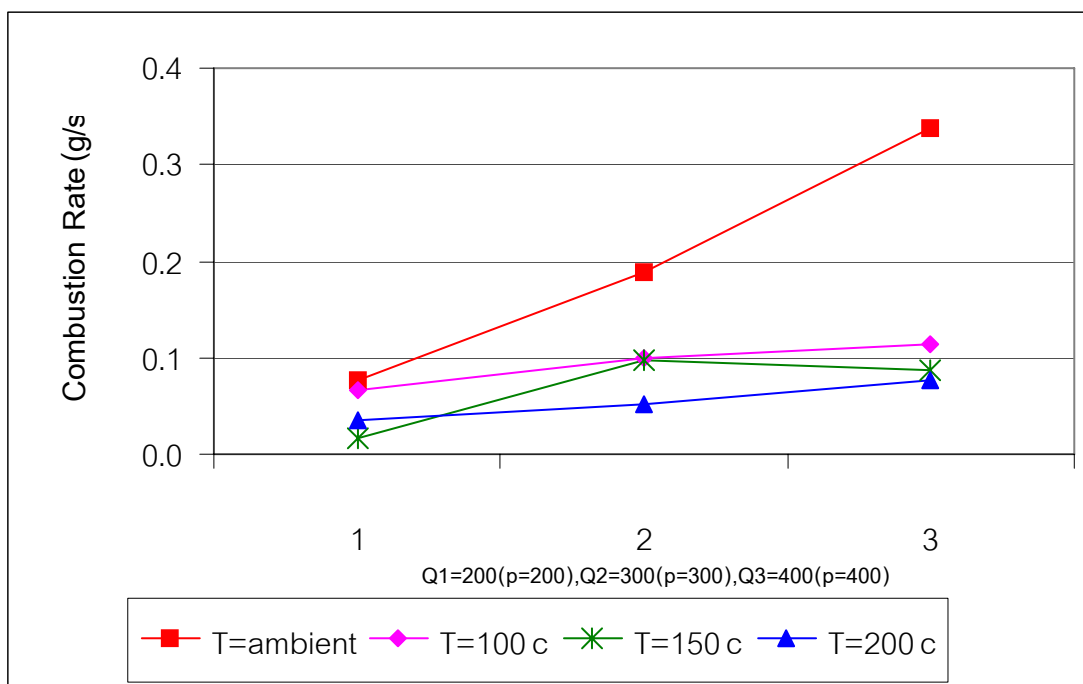
ภาพที่ 4-26 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศปฐมภูมิ 200,100 ต่อปริมาณอากาศรวมที่ 200 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200⁰C



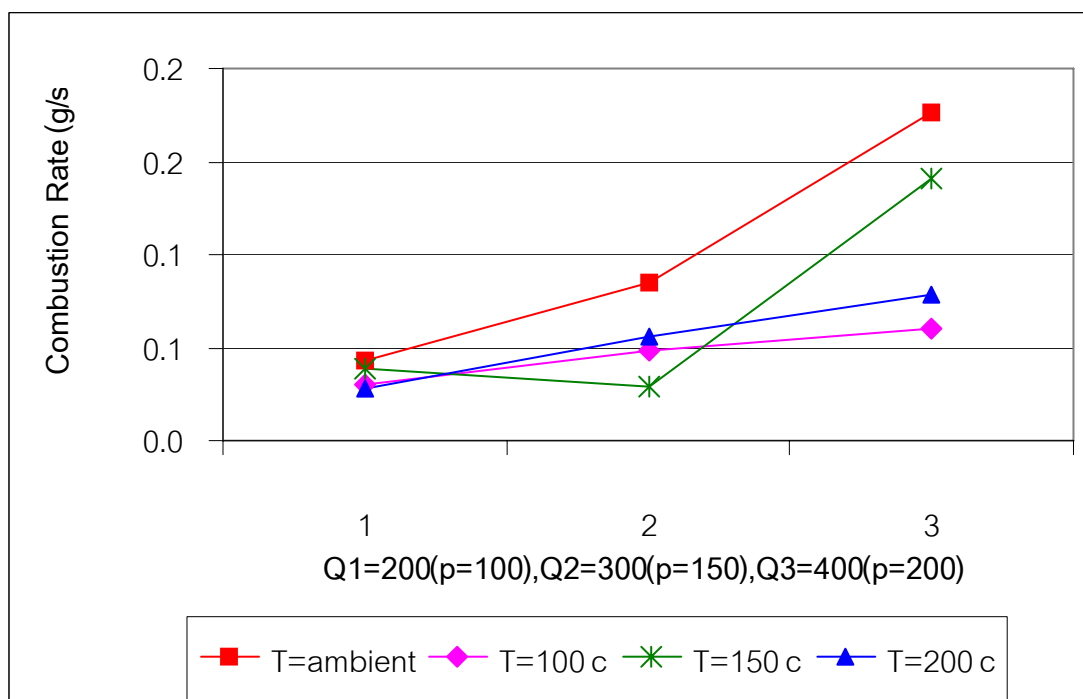
ภาพที่ 4-27 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศปฐมภูมิ 300, 200, 150 และ 100 ต่อปริมาณอากาศรวมที่ 300 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200⁰C



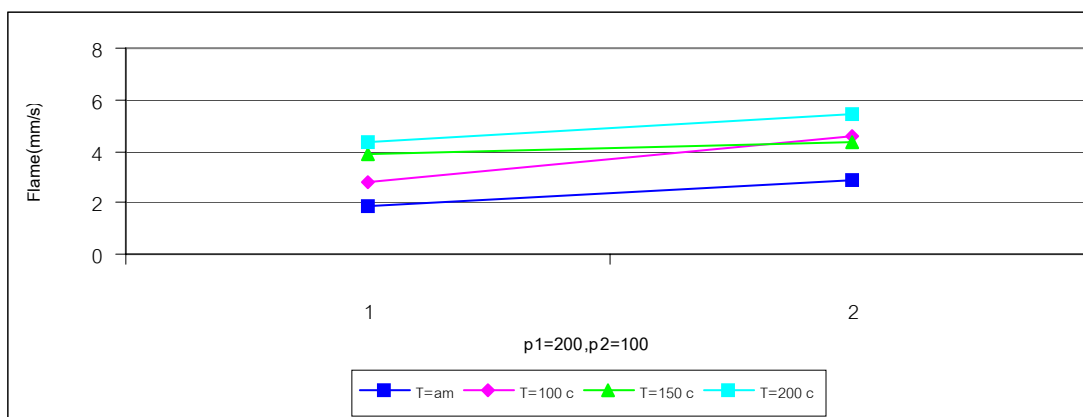
ภาพที่ 4-28 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศปฐมภูมิ 400, 300, 200 และ 100 ต่อปริมาณอากาศรวมที่ 400 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200⁰C



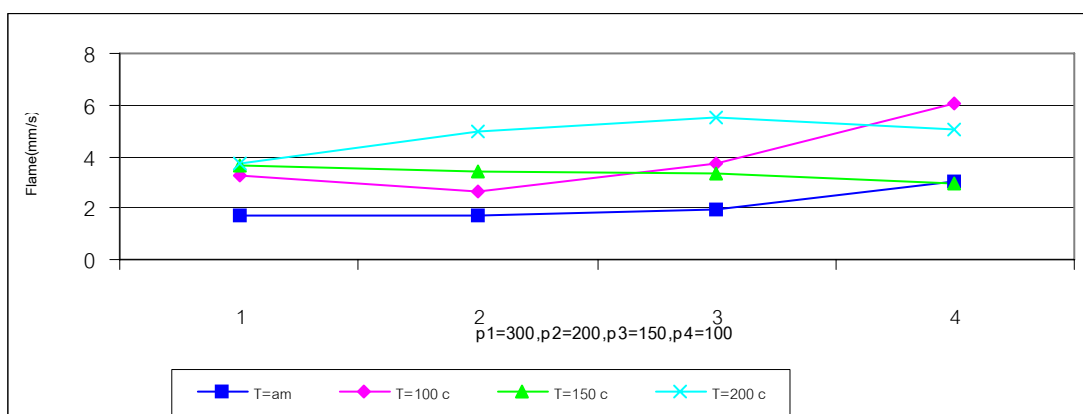
ภาพที่ 4-29 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 200, 300 และ 400 LPM ต่อปริมาณอากาศรวม 200, 300 และ 400 LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C



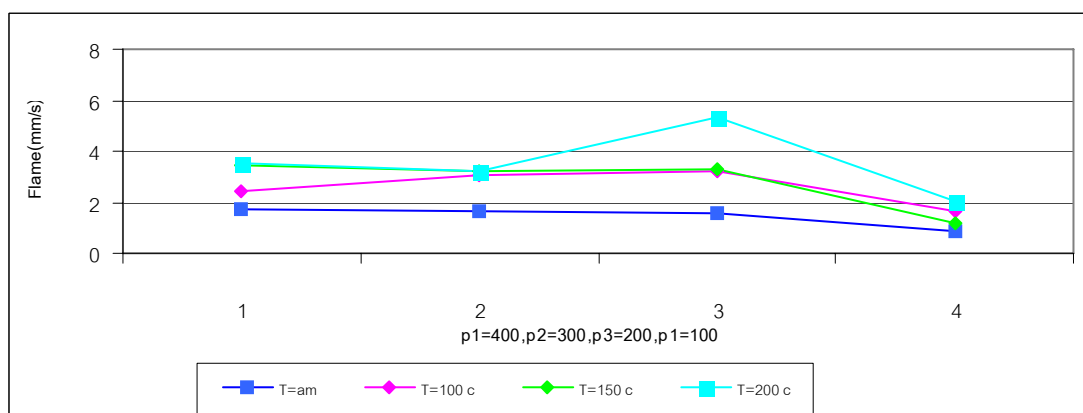
ภาพที่ 4-30 แสดงอัตราการเผาไหม้ที่ปริมาณอากาศป้อน 100, 150 และ 200 LPM ต่อปริมาณอากาศรวม 200, 300 และ 400 LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C



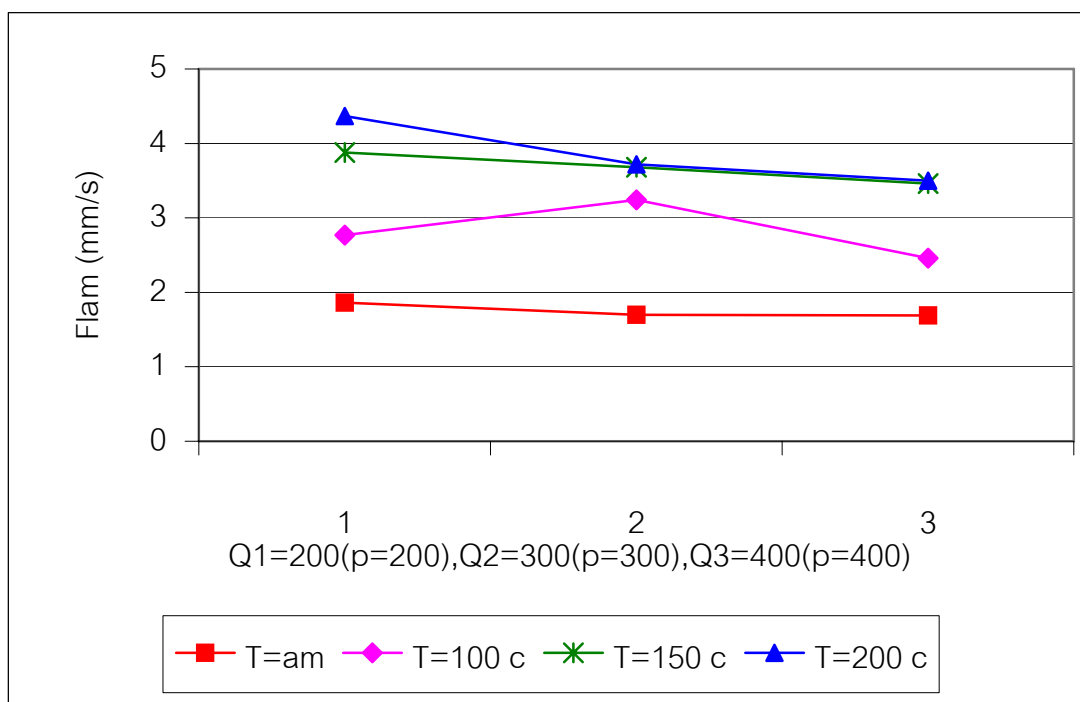
ภาพที่ 4-31 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศป้อน 200, 100 ต่อปริมาณอากาศรวมที่ 200 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C



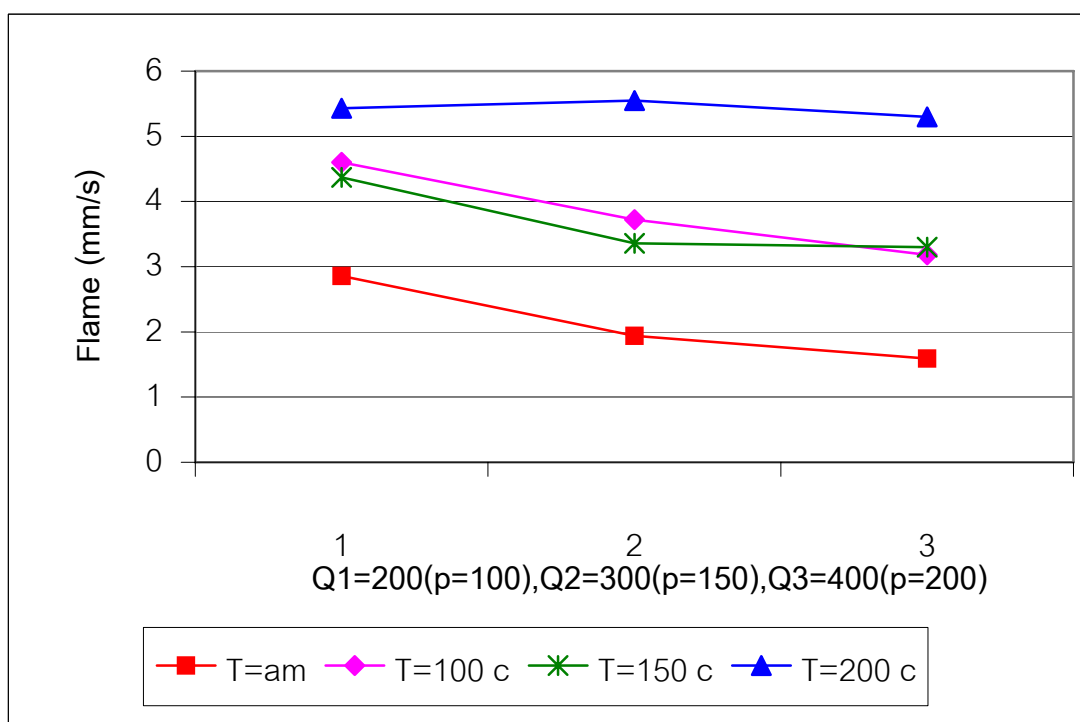
ภาพที่ 4-32 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศป้อน 300, 200, 150 และ 100 ต่อปริมาณอากาศรวมที่ 300 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C



ภาพที่ 4-33 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศป้อน 400, 300, 200 และ 100 ต่อปริมาณอากาศรวมที่ 400 LPM และ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C



ภาพที่ 4-34 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐมภูมิ 200, 300 และ 400 LPM ต่อปริมาณอากาศรวม 200, 300 และ 400 LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C



ภาพที่ 4-35 แสดงความเร็วเปลวไฟที่ปริมาณอากาศปฐมภูมิ 100, 150 และ 200 LPM ต่อปริมาณอากาศรวม 200, 300 และ 400 LPM และอุณหภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200°C

4.1 ผลการทดลองการเผาไหม้ขานอ้อย ที่ $T = \text{ambient}$

ผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-3 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

4.1.1 ลักษณะของการเผาไหม้

โดยทั่วไปลักษณะของการเผาไหม้ขานอ้อย จากภาพที่ 4-1, 4-3 และ 4-5 เป็นกรณีที่มีการเผาไหม้ขาน ที่ $\text{Sec./Total Air} = 0$ และปริมาณอากาศ 200-400 LPM จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงก่อนที่ Propagation Front จะมาถึงชั้นเชื้อเพลิงในระดับต่ำลงมายังมีอุณหภูมิที่ต่ำอยู่ และเมื่ออุณหภูมิ Propagation Front มาถึงอุณหภูมิ Characteristic (ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่ามากกว่าความร้อนที่สูญเสียออกมาทางผนังเตา) ซึ่ง ณ จุดนี้อุณหภูมิการเผาไหม้จะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เป็นกลไกการเผาไหม้ขั้นพื้นฐานที่ต้องมีการไล่ความชื้นและสารระเหยออกมาผ่าน Boundary Layer ของเชื้อเพลิง ซึ่งต่อมาออกซิเจนจะเข้าจับกับผิวของคาร์บอนและเกิด ปฏิกิริยาการเผาไหม้จนได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับความร้อนออกมา และเมื่อการเผาดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จน Propagation Front เคลื่อนที่ลงไปถึงตะแกรงพบว่าอุณหภูมิของชั้นเชื้อเพลิงที่เหนือเบดขึ้นไปจะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว (อ้างอิงจากเทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 5-10) ทั้งนี้เนื่องจากว่าก๊าซร้อน (CO_2) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ส่วนบนของเบดช่วยส่งเสริมในการ Pyrolysis เชื้อเพลิงที่อยู่ถัดลงมา ในสภาพรีดักชัน ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้อุณหภูมิของชั้นเชื้อเพลิงที่อยู่เหนือขึ้นไปเกิดการลดลงตามลำดับจากบนลงล่าง สำหรับการเผาไหม้ที่เบดนั้น พบว่าอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ $300-400^\circ \text{C}$ (อ้างอิงจากเทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 3 และ 4) ลักษณะการเผาไหม้ดังกล่าวนี้สะท้อนให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของขานอ้อย (ขนาดเล็ก, น้ำหนักเบา) จะไม่สอดคล้องรับกับอากาศที่ป้อนให้ได้ตะแกรงซึ่งมีความเร็วอากาศที่สูงและแรงพอที่จะพุงหรือดันให้ขานอ้อยที่เบดเกิดการลอยตัว โดยที่สภาพการผสมผสานระหว่างอากาศกับผิวของขานอ้อยทำได้ไม่ดีพอ กล่าวคือ เวลาในการสัมผัสระหว่าง Solid-Gas สั้นเกินกว่าที่จะเกิดการออกซิเดชันเพิ่มเติมอย่างเหมาะสม รวมทั้งความเร็วของอากาศยังเป็นปัจจัยสำคัญของการทำให้อุณหภูมิเบดต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพา (Convective Cooling) สำหรับผลของการเพิ่มปริมาณอากาศรวมขึ้นเป็น 300 LPM พบว่ารูปแบบการเผาไหม้คล้ายคลึงกันโดยไม่มีนัยสำคัญของความแตกต่าง ยกเว้นที่อากาศรวม 400 LPM ($\text{SA:TA}=0$) พบว่าอุณหภูมิที่เบดมีค่าสูงกว่าการให้อากาศรวมที่ 200 และ 300 LPM ทั้งนี้เพราะว่าโมเลกุลของอากาศเข้าจับที่ผิวของเชื้อเพลิงทั้งส่วนบนและส่วนล่างของเบดอย่างทั่วถึงอยู่แล้วก่อนที่จะเริ่มการจุดติดไฟ ดังนั้นในการเผาไหม้จะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิของเบดที่เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 100°C เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอากาศรวมใน 2 กรณีแรก ผลดังกล่าวบ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มความ

เข้มข้นของออกซิเจนในเบดจะเพิ่มความสามารถในการออกซิเดชัน ก๊าซ CO ที่ผิวของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นก๊าซ CO₂ มากขึ้นร่วมกับมีการปลดปล่อยความร้อนออกมามากขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนความเร็วของอากาศปฐมภูมิลดลง (50 %) จะสังเกตเห็นว่ามีอุณหภูมิสูงสุด 2 ช่วงด้วยกัน ดังภาพที่ 4-2, 4-4 และ 4-6 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาจะไม่สม่ำเสมอทั่วกันทั้งเตา กล่าวคือการให้อากาศแบบแบ่งส่วน (Air Staging) จะทำให้รูปแบบการเผาไหม้เปลี่ยนไปโดยที่ อากาศชุดสุดท้ายจะมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิเหนือเบด สาเหตุประการแรกเกิดจากพื้นที่ประสิทธิภาพ (Available Space) ที่จะทำให้เกิดพื้นที่และเวลาที่เพียงพอต่อการสัมผัสระหว่าง อากาศชุดสุดท้ายกับไพโรไลซิสก๊าซเกิดขึ้นอย่างเหมาะสม อีกนัยหนึ่งเกิดจากการพาของอากาศทำให้อุณหภูมิลดลง อีกทั้งยังเกิดการรบกวนกลับ (Swept Back) ของอากาศโดยปราศจากการสัมผัสกับผิวเชื้อเพลิงและจากนั้นเกิดการระบายออกสู่ปล่อง ปรากฏการณ์ที่สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของชั้นอุณหภูมิ (Temperature Profile) จะพบว่าช่วงแรกอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 300 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองจะมีอุณหภูมิเกิดขึ้นสูงกว่าช่วงแรกคือ อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการออกซิไดซ์ก๊าซ CO ให้เป็นก๊าซ CO₂ โดยเป็นที่สังเกตได้ว่า ปรากฏการณ์ ดังกล่าวข้างต้นเกิดขึ้นในช่วงจังหวะที่ชั้นเชื้อเพลิงยุบตัวลงมาพอสมควรและสอดคล้องกับเวลาในการเผาที่เพิ่มขึ้น จนการยุบตัวของชั้นเชื้อเพลิงอยู่ในระดับที่จะส่งเสริมการออกซิเดชันโดยอากาศชุดสุดท้ายได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้เองที่เป็นสาเหตุให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกรอบหนึ่ง (อ้างอิงจาก เทอร์โมคัปเปิลตัวเดียวกัน) นอกจากนี้ผลของ Air Staging แล้วยังพบด้วยว่า ความเร็วของอากาศปฐมภูมิที่ลดลง มีผลทำให้อากาศปฐมภูมิไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ อีกนัยหนึ่งในการเผาไหม้ช่วงแรกนั้นเป็นการเผาไหม้เฉพาะสารระเหยเพราะอุณหภูมิจุดติดไฟของสารระเหยต่ำกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของถ่าน เมื่อมีการเผาไหม้สารระเหยจนถึงอุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส Propagation Front ผ่านไปอุณหภูมิไม่ถึงจุดติดไฟของถ่านและออกซิเจนจากอากาศปฐมภูมิไม่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ถ่านจึงทำให้อุณหภูมิแต่ละชั้นของเบดลดลงจนกระทั่ง Propagation Front ถึงขั้นสุดท้ายของเบดซึ่งอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ซานอ้อยจะเหลือเฉพาะถ่านประกอบกับออกซิเจนเหลือเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอน ทำให้เกิดการเผาไหม้ขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิสูง อิทธิพลสัดส่วนความเร็วของอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้จะเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 4-2

4.1.2 อัตราการเผาไหม้

อัตราการเผาไหม้เริ่มต้นจากการไล่สารระเหย (Devolatilization) จำพวกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน รวมถึง ก๊าซ CO, H₂, CH₄ และอื่น ๆ ที่มีในซันอ้อยให้เกิดการปลดปล่อยออกมา รวมไปถึงการเผาคาร์บอนเสถียร (Char Combustion) โดยมวลที่ลดลงตามเวลาการเผาไหม้

ที่เพิ่มขึ้นสามารถแสดงได้โดย การอนุพันธ์กราฟของมวลของคาร์บอนที่วัดได้เทียบกับเวลา ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเผาไหม้ของการเผาไหม้อ้อยซึ่งหาโดยสมการ 2-7 ซึ่งแสดงไว้ดัง ตารางที่ 4-3 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.044-0.358 g/s จากผลการทดลองจะพบว่าอัตราการให้อากาศที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่ออัตราการเผาไหม้ ดังภาพที่ 4-26 ถึง 4-28 กล่าวคือ เมื่อสัดส่วนความเร็วของอากาศปฐุม ภูมิลดลงทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงด้วย แสดงว่า การลดสัดส่วนความเร็วของอากาศปฐุม ภูมิลดลง (ภาพที่ 4-6) เปรียบได้กับการที่ความเข้มข้นของออกซิเจนในเบคน้อยลง ซึ่งหมายความว่าเกิด สภาพเชื้อเพลิงเข้มข้น (Fuel Rich) ทำให้การเผาไหม้ถ่านไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีผลสืบเนื่องมาจาก อุณหภูมิที่เบต่ำด้วย เพราะเป็นปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีบทบาทเด่นมากกว่าการเผาไหม้ของถ่าน และเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำจนไม่สามารถพัฒนาไปถึงการเผาไหม้ถ่านได้ทำให้อัตราการเผาไหม้ ษานอ้อยลดลง โดยพิจารณาในเทอมของการลดลงของมวลของคาร์บอนและอัตราการเผาไหม้ที่ ลดลง ในทางกลับกันดังภาพที่ 4-29 การที่ให้อากาศปฐุมภูมิอย่างเฉียว (SA:TA=0, ภาพที่ 4-5) การ ออกซิเดชั่นของคาร์บอนโดยออกซิเจนเกิดขึ้นอย่างเหมาะสมมากกว่า โดยสังเกตจากอุณหภูมิเบที่ สูงขึ้นกว่า 100-150 °C ซึ่งตีความได้ว่ามีการเผาไหม้มวลของคาร์บอนได้มากกว่า สอดคล้องกับ อัตราการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นและมวลของคาร์บอนที่ลดลงตามเวลาที่สั้นกว่า

4.1.3 ความเร็วของเปลวไฟ

ความเร็วของเปลวไฟหรือความเร็วการแพร่ของการเผาไหม้ประมาณได้จากการนำเอา ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ลในเบคหารด้วยผลต่างของเวลาของ Propagation Front ที่อุณหภูมิเฉียวกัน(ใช้อุณหภูมิจุดติดไฟโดยเฉลี่ยซึ่งอยู่ในช่วง 186-260 องศาเซลเซียส เป็น อุณหภูมิอ้างอิง) ผลการคำนวณได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4-3 ความเร็วของเปลวอยู่ระหว่าง 1.59-2.87 mm/s และสำหรับความเร็วของเปลว เมื่อคำนวณร่วมกับความหนาแน่น (Bulk Density) ของ เชื้อเพลิงในเบค โดยการนำมาคูณกันจะได้เป็นอัตราการติดไฟ (Ignition Rate) มีค่าอยู่ในช่วง 0.081-0.147 kg/m² s แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-31 ถึง 4-33 จากผลการทดลองสามารถ แปลผลได้ว่า การเพิ่มสัดส่วนของอากาศปฐุมภูมิต่ออากาศรวม ส่งผลให้ความเร็วเปลวไฟเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเร่งของอากาศปฐุมภูมิต่อความเร็วในการลามของเปลวไฟจากบนลงล่างที่เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการให้อากาศรวมที่เบคอย่างเฉียว แต่ในทางกลับกันผลของความเร็วเปลว ที่สูงขึ้นกลับไม่ส่งเสริมให้อัตราการเผาไหม้สูงขึ้นตามไปด้วย เหตุผลหนึ่งเกิดจากเวลาการทำ ปฏิกิริยา (Residence Time) ระหว่างก๊าซออกซิเจนและของแข็ง (Heterogeneous Reaction of Solid-Gases) ไม่สมบูรณ์ และอีกข้อสังเกตหนึ่งที่สอดคล้องกันคือความไม่สม่ำเสมอของชั้นอุณหภูมิ และ อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ค่อนข้างต่ำเพราะปฏิกิริยาไพโรไลซิส (จุดความร้อน) ที่เด่นกว่านั่นเอง

4.2 ผลของการเผาไหม้กรณีมีการอุ่นอากาศ

จากผลการทดลองการเผาไหม้ขานอ้อย โดยการอุ่นอากาศที่ทางเข้าของอากาศปฐุมุมุมิ ที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 200 °C แสดงในตารางที่ 4-3 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ (ภาพแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข)

4.2.1 ลักษณะของการเผาไหม้

โดยทั่วไปลักษณะของการเผาไหม้ขานอ้อย จากภาพที่ ข-1 และ ข-6 เป็นกรณีที่มีการเผาไหม้ขานอ้อย ที่ Sec./Total Air 0 และปริมาณอากาศ 200-400 LPM และมีการอุ่นอากาศทางเข้าด้านล่างเท่ากับ 100 °C ลักษณะการเผาไหม้เหมือนกับการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อม แต่จะเห็นว่าได้วก่อนจะทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้มีกระบวนการไล่ความชื้นและสารระเหยออกมาจากเชื้อเพลิงล่วงหน้าไปก่อนแล้ว ก่อนที่จะทำการเผาไหม้ และ Propagation Front จะมาถึง เชื้อเพลิงที่ในระดับชั้นต่ำลง และเมื่ออุณหภูมิของ Propagation Front มาถึงอุณหภูมิจุดติดไฟก็ จะเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่องตามกลไกเช่นเดียวกับการเผาไหม้ที่สถานะแวดล้อม กล่าวคือ อุณหภูมิเชื้อเพลิงสูงขึ้นเนื่องจากความชื้นและสารระเหยถูกไล่ออกมา และทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนทำให้อุณหภูมิ ณ จุดนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนอุณหภูมิของเตาสูงสุด อยู่ระหว่าง 450-720 องศาเซลเซียส เมื่อ Propagation Front ผ่านไปอุณหภูมิจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่ง Propagation Front เคลื่อนที่ลงไปถึงตะแกรงอุณหภูมิก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาไพโรโรซิส แต่ข้อแตกต่างที่ชัดเจนอย่างหนึ่งที่สังเกตได้ในการเผาไหม้ที่มีการอุ่นอากาศก่อนเทียบกับการเผาไหม้ที่สถานะแวดล้อมจะพบว่า อุณหภูมิที่เบด (อ้างอิงที่ T/C ตัวที่ 3-4) จะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่กำหนดในการอุ่นอากาศ โดยไม่ว่าจะมีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 200 °C จะทำให้อุณหภูมิเบดเพิ่มขึ้นโดยประมาณที่ 100 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงที่เบดผ่านกระบวนการไล่ความชื้นไปก่อนหน้า ที่ Propagation Front จะมาถึง ซึ่งหมายความว่าสารระเหยนั้นเริ่มที่เคลื่อนที่จาก Porous Metrix มารอที่ผิวของเชื้อเพลิงอยู่แล้ว เมื่อเปลวไฟที่ลามมา มีอุณหภูมิสูงปานกลาง (450-720 °C) ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ชั้นในของเชื้อเพลิงและเกิด การทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่เบดได้โดยทัน

อย่างไรก็ตามในการเผาไหม้ขานอ้อย เมื่อสัดส่วนความเร็วของอากาศปฐุมุมุมิลดลง (0.5 เท่า) จะสังเกตเห็นว่ามีอุณหภูมิสูงสุด 2 ช่วงด้วยกัน ดังภาพที่ ข-4 โดยที่ช่วงแรกมีการเผาไหม้สารระเหยได้อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 400 องศาเซลเซียส และเมื่อ Propagation Front ผ่านไปในแต่ละชั้นก็จะเกิดการอบแห้งและไล่สารระเหยจนถึงตะแกรงและการเผาไหม้ช่วงที่สองจะเป็นการเผาไหม้ถ่านที่เหลือในชั้นสุดท้ายและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีอุณหภูมิเกิดขึ้นสูงกว่าช่วงแรกคือ อุณหภูมิ

ประมาณ 480 องศาเซลเซียส และเป็นการเพิ่มอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการย้อนกลับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนคือมีการเผาไหม้จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน

นอกจากนั้นในการเพิ่มปริมาณอากาศรวมในกรณีของ 200 และ 300 LPM(SA:TA = 0.5) พบว่าการลามของเปลวไฟเร็วขึ้นแต่ Profile ของอุณหภูมิจะไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่อุณหภูมิที่เบคนั้นอยู่ในช่วง 300-350 °C ซึ่งตรงนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าการอุ่นอากาศทั้งในกรณี 100, 150 และ 200 °C จะไม่มีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นในเบค หากแต่เป็นผลที่เกิดจากการควบคุมของความเข้มข้นของออกซิเจนเป็นหลักเท่านั้นซึ่งแสดงได้ดัง ภาพที่ ข-2, ข-4, ข-6

4.2.2 อัตราการเผาไหม้

จากรูปที่ ข-19 ถึง ข-24 อัตราการเผาไหม้ที่ได้จากการอนุพันธ์มวลของคาร์บอนตามเวลา ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-3 ได้ค่าอยู่ในช่วง 0.017-0.114 g/s จะเห็นว่า ดังภาพที่ 4-26 ถึง 4-28 เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอากาศทางเข้าที่อากาศป้อนสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิและอัตราการเผาไหม้ลดลงและเมื่อลดสัดส่วนความเร็วของอากาศป้อนก็ทำให้อุณหภูมิและอัตราการเผาไหม้ลดลง ตรงนี้สะท้อนให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้จะลดลงตามความเข้มข้นออกซิเจนลง โดยเฉพาะการเผาของถ่านซึ่งจะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของถ่านหรือ อีกกรณีหนึ่งคือขานอ้อยที่เบคณ บริเวณที่ได้รับอากาศร้อนเนื่องจากการอุ่นอากาศ จะส่งผลให้เกิดการระเหยของความชื้นและไอน้ำเหล่านี้เกิดการลอยขึ้นจากล่างขึ้นสู่ด้านบนและไปเกาะที่ผิวของเชื้อเพลิงในชั้นที่สูงขึ้นไป ประกอบกับเปลวไฟหน้าที่ลามลงมาถึงเพื่อที่จะทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสนั้นจะถูกควบคุมโดยกลไก Heat Transfer เมื่อเป็นดังนั้น การมีความชื้นมาเกาะที่ผิวเชื้อเพลิงทำให้ ต้องสูญเสียพลังงานสำหรับการระเหยน้ำไปทำให้พลังงานที่เหลือที่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนน้อยลง (เนื่องจากการเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนใน Porous ถ้าช้าออกไป) ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการจุดติดไฟที่ต่ำลง แต่เป็นอุณหภูมิที่ไม่ใช่ Characteristic ที่จะทำให้การเผาไหม้เกิดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอได้ สำหรับการแบ่งอากาศสำหรับเผาไหม้พบว่าจะทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงสอดคล้องกับความเร็วเปลวไฟที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการผสมระหว่างขานอ้อยกับออกซิโดเซออร์เกิดอย่างไม่เหมาะสม กล่าวคือ เวลาในการผสมน้อยเกินไปทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ สาเหตุดังกล่าวมาทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงได้ แม้ว่าอุณหภูมิที่เบคจะสูงขึ้นเนื่องจากการอุ่นอากาศประมาณ 100 °C ก็ตาม

4.2.3 ความเร็วของเปลวไฟ

ความเร็วของเปลวไฟหรือความเร็วการแพร่ของการเผาไหม้ประมาณได้จากการนำหาระยะทางระหว่างตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ลในเบคหารด้วยผลต่างของเวลาของ Propagation Front ที่อุณหภูมิเดียวกัน(ใช้อุณหภูมิจุดติดไฟเฉลี่ย 236 องศาเซลเซียส) ผลการคำนวณได้แสดงไว้

ใน ตารางที่ 4-3 ความเร็วของเปลวอยู่ระหว่าง 2.77-5.55 mm/s จากภาพที่ 4-31 ถึง 4-33 จะเห็นได้ว่าความเร็วเปลวไฟมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อคำนวณร่วมกับความหนาแน่น(Bulk Density) ของเชื้อเพลิงในเบด โดยการนำมาคูณกันจะได้เป็นอัตราการติดไฟ(Ignition Rate) มีค่าอยู่ในช่วง 0.191-0.285 kg/m² s แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 ข้อสังเกตของอัตราการติดไฟคือ เมื่อมีการอุ่นอากาศ จะทำให้อัตราการติดไฟในหน่วยพื้นที่เกิดได้ครอบคลุมกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ที่สภาวะแวดล้อม เนื่องจากกลไกการส่งผ่านความร้อนทั่วพื้นที่และมีความต่อเนื่องมากกว่า เพียงแต่การติดไฟครอบคลุมพื้นที่มากกว่านั้น มิได้เป็นตัวกำหนดว่าจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า หากแต่การป้อนอากาศที่เพียงพอ เวลาการทำปฏิกิริยาที่เพียงพอ และการผสมผสานที่ทั่วถึงของอากาศและเชื้อเพลิงต่างหาก ที่เป็นตัวกำหนดความสมบูรณ์ของการเผาไหม้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการเผาไหม้เตาเผาขยะแบบฟลักซ์เบดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150mm. สูง 820 mm. ซึ่งเป็นการจำลองสภาพการเผาไหม้ขานอ้อย บนตะกรับไม่ว่าจะเป็นตะกรับในแนวเอียงหรือในแนวระนาบ โดยเตรียมขานอ้อยที่ต้องการจะศึกษา (จากโรงงานน้ำตาลรีไฟน์ซังมงคล อ.อุททอง จ.สุพรรณบุรี) และทำการทดลองโดยภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดของการเผาไหม้ด้วยพารามิเตอร์ ต่อไปนี้ คือ

- 1) ปริมาณอากาศ ได้แก่ 200,300และ400 LPM
- 2) ความเร็วอากาศ คือ ปริมาณอากาศทุกยูนิตต่อปริมาณอากาศรวม ได้แก่ 0.188,0.094, 0.282,0.141, 0.377และ0.1883m/s

- 3) อุณหภูมิของอากาศป้อนยูนิต ได้แก่ ambient,100,150และ200°C

ซึ่งได้เก็บข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของ กลไกในการเผาไหม้ของขานอ้อย คือ การวัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ภายในเตา ขณะที่มีการเผา ณ เวลาใดๆ และวัดปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมา เพื่อนำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิจุดติดไฟ ความเร็วของเปลวไฟ อัตราการเผาไหม้ ผลการทดลองสรุปได้ ดังนี้

5.1.1 ลักษณะการเผาไหม้

5.1.1.1 เนื่องจากลักษณะองค์ประกอบของขานอ้อยที่มีสารเหຍเป็นจำนวนมากทำให้กลไกในการเผาไหม้ขานอ้อยเกิดขึ้น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการไล่ความชื้น และสารระเหຍช่วงที่สองเป็นการเผาไหม้ถ่านของขานอ้อย ถ้าปริมาณอากาศป้อนยูนิตเพียงพอต่อการเผาไหม้ จะทำให้ขั้นตอนการเกิดกระบวนการไฟโรไลซิสโดยที่ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของเชื้อเพลิงทั้งก้อนซึ่งเป็นการปลดปล่อยความชื้นและสารระเหຍออกมา สภาวะที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิติดไฟของก๊าซ (Ignition Temperature) และมีออกซิเจนแพร่กระจายอยู่ทั่วภายในก๊าซดังกล่าว จนทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงลดลงและมีผลทำให้ออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและปลดปล่อยปริมาณความร้อนมาาก ทำให้ การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์และต่อเนื่องกันในแต่ละชั้นของเบดที่มี Propagation Front ผ่าน แต่ถ้าปริมาณอากาศป้อนยูนิตไม่เพียงพอ ก็จะทำให้มีออกซิเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของเชื้อเพลิงได้ไม่ทั่วถึงซึ่งมีผลทำให้สารเหຍที่ปลดปล่อยออกมาน้อยและความชื้นในเชื้อเพลิงสูงโดยที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึงจุดติดไฟ และทำให้ออกซิเจนที่มีปริมาณต่ำก็จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ยากขึ้นอัน

เนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิงที่มีอยู่มาก จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ไม่สูงมาก ส่งผลได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลตำแหน่งที่ 3 ใช้ในการอ้างอิง

5.1.1.2 เมื่อได้มีการแบ่งสัดส่วนของอากาศออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกป้อนเข้าทางด้านล่างของเชื้อเพลิงและส่วนที่สองป้อนเข้าทางด้านบนของเชื้อเพลิง ซึ่งอากาศส่วนที่สองนี้มีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับCO และมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

5.1.1.3 ในการเผาไหม้ที่มีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนทำการเผาไหม้ไม่ทำให้ลักษณะการเผาไหม้เปลี่ยนไป แต่จะทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงอันเนื่องมาจากได้มีการไล่สารระเหยเกิดขึ้นก่อนที่จะทำการเผาไหม้

5.1.2 อัตราการเผาไหม้

5.1.2.1 เมื่อให้ปริมาณอากาศรวมเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากออกซิเจนมีปริมาณเพียงพอที่ใช้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้เร็วขึ้น จึงมีผลทำให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

5.1.2.2 การลดความเร็วของอากาศป้อนลงทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง อันเนื่องจากการทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่จะเข้าปฏิกิริยาการไล่สารระเหยและคาร์บอนลดลง มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง

5.1.2.3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศป้อนลงก่อนทำการเผาไหม้ทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มให้กับอนุภาคของเชื้อเพลิงทำให้ความชื้นได้แผ่ออกมาพร้อมกับกระบวนการไล่สารระเหยมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนลดลง และความชื้นของเชื้อเพลิงจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นๆ ทำให้มีการเผาไหม้เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ จึงมีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง

5.1.3 ความเร็วของเปลวไฟ

5.1.3.1 เมื่อให้ปริมาณอากาศรวมเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของเปลวไฟลดลง เนื่องจากออกซิเจนมีเวลาไม่เพียงพอในการจับติดผิวของเชื้อเพลิง ทำให้การไล่สารระเหยที่ออกมาปริมาณลดลง และอุณหภูมิในการเผาไหม้ลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ความเร็วของเปลวไฟลดลง

5.1.3.2 การลดความเร็วของอากาศป้อนลงทำให้ความเร็วของเปลวไฟเพิ่มขึ้น เนื่องจากออกซิเจนมีเวลาเพียงพอในการไล่สารระเหยให้ออกมามากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อนที่ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ทำให้ความเร็วของเปลวไฟเพิ่มขึ้น

5.1.3.3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศปฐมภูมิก่อนการเผาไหม้ทำให้ความเร็วของเปลวเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากได้มีการไล่ความชื้นออกจากเชื้อเพลิงก่อนที่จะมีการเผาไหม้ทำให้เชื้อเพลิงมีความชื้นต่ำ ทำให้ความเร็วของเปลวเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากในการเผาไหม้ไม่สามารถเผาไหม้ได้ครั้งละมากๆ ดังนั้นจึงควรติดตั้งระบบป้อนเชื้อเพลิงให้มีการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง

5.2.2 เมื่อเริ่มแรกในการจุดติดเชื้อเพลิง ต้องทำการเปิด-ปิดฝาเตาทำให้เกิดความยุ่งยาก ดังนั้นควรติดตั้งหัวเผา(Burner)

5.2.3 ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงควรมีการเผาไหม้ร่วม เช่น ถ่านหิน ขยะ เป็นต้น

5.2.4 ในการอุ่นอากาศปฐมภูมิไม่ควรอุ่นเชื้อเพลิงด้วย ดังนั้นจึงควรติดตั้งวาล์วปล่อยอากาศปฐมภูมิก่อนที่จะเข้าเตา

5.2.5 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณอากาศรวมทำให้มีเถ้าลอยเกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรติดตั้งระบบเก็บเถ้าลอย (Cyclone)

5.2.6 ควรศึกษาเกี่ยวกับ Particles ในก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

1. Spliethoff, H., Hein, K.R.G. "Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces." Fuel Processing Technology. c1998 : 189-205.
2. Energy for Environment Foundation. (2003), "Biomass information". Available online: <http://www.efe.or.th/indexs.htm>.
3. David A. The Combustion of Solid Fuels and Wastes. Acadmic Press : INC, c1991.
4. Borman, G. and Raglnd K. Combustion Engineering. Singapore : McGraw-Hill, c1998.
5. สายัณห์ ปานซัง. "การศึกษาขั้นมูลฐานของการเผาไหม้ขยะผสมลิกไนต์ในเตาฟลักซ์เบด." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
6. นิยม ศรีศิริสิทธิกุล. "เตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
7. กุลยศ สุวันทโรจน์. "การศึกษาเวลาการเผาไหม้และอัตราเร็วการเผาไหม้ของขยะชุมชนผสมลิกไนต์ในฟลูอิดไคซ์เบด." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
8. Rogaume T., et at., "The effects of different airflow on the formation or pollutants during waste incineration." Fuel. 81, c2002 : 2277-2288.
9. Ross A.B., et at., "Measurement and prediction of the emission pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace." Fuel. 81, c2001 : 5 7 1 - 5 8 2 .
10. Kanury, Murty A. Introduction to Combustion Phenomena. 7th ed. Newyork : Gordon and Breach, Science Publishes, c1992.
11. Steven C. Chapra and Raymond P. Canale. Numerical Methods for Engineers. 2nd ed. Singapore. : Mc Graw-Hill Press, c1990.

ภาคผนวก ก

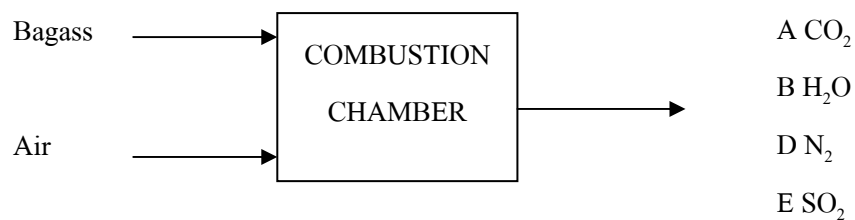
วิธีการคำนวณหาค่าต่างสำหรับการเผาไหม้

ก-1 การคำนวณหาอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

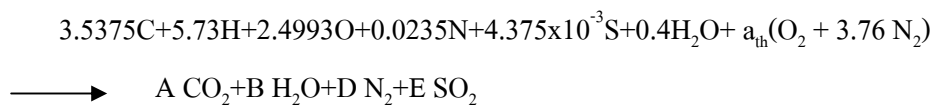
องค์ประกอบเชื้อเพลิงชานอ้อย

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมเลกุล
คาร์บอน	42.45	12	3.5375
ไฮโดรเจน	5.73	1	5.73
ออกซิเจน	39.99	16	2.4993
ไนโตรเจน	0.33	14	0.0235
ซัลเฟอร์	0.14	32	4.375×10^{-3}
ขี้เถ้า	4.13	-	-
ความชื้น	7.2	18	0.4

การสมดุลปฏิกิริยาเคมี



สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้ดังนี้

$$\text{C : } 3.5375 \longrightarrow = \text{A}$$

$$\text{A} = 3.5375$$

$$\text{H : } 5.73 + 0.4 \times 2 \longrightarrow = 2\text{B}$$

$$\text{B} = 3.265$$

$$S : 4.375 \times 10^{-3} \longrightarrow = E$$

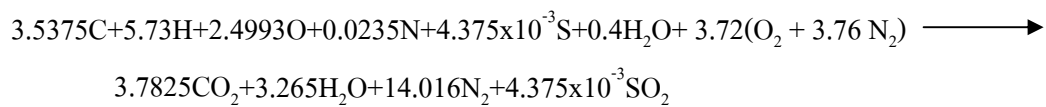
$$E = 4.375 \times 10^{-3}$$

$$O : 2.4993 + 0.4 + 2 a_{th} \longrightarrow = 2A + B + 2E$$

$$a_{th} = 3.7247$$

$$N : a_{th}(2 \times 3.76) + 0.0235 \longrightarrow = 2D$$

$$D = 14.016$$



จำนวนโมลของอากาศแห้งจะทำปฏิกิริยาเคมีเท่ากับ

$$4.76a_{th} = 4.76 \times 3.7247 = 17.729 \text{ kmol}$$

เนื่องจากการสมดุลสมการของเราใช้กับอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นเราจะต้องทำการคิดปริมาณความชื้นในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยที่เราจะต้องทำการกำหนดสภาวะของอากาศดังนี้

อากาศที่อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง (Dry-bulb Temperature) เท่ากับ $33^\circ C$

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity , RH) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สภาวะนี้ได้เท่ากับ เปิดค่าจากตาราง จะได้

$$P_{sat, H_2O} @ 33^\circ C = 5.0752 \text{ kPa}$$

$$\therefore P_{v_{air}} = \Phi_{air} P_{sat, H_2O} = 0.53 \times 5.0752 = 2.69 \text{ kPa}$$

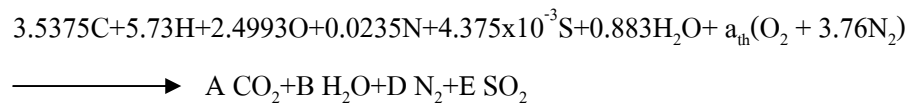
จำนวนโมลของละอองน้ำในอากาศจากสมการ

$$\left(\frac{N_{v_{air, H_2O}}}{N_{v_{Total}}} \right) = \left(\frac{P_{v_{air}}}{P_{v_{total}}} \right) \\ N_{v_{air, H_2O}} = \left(\frac{P_{v_{air}}}{P_{v_{Total}}} \right) N_{v_{Total}}$$

$$= \left(\frac{2.69 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (17.729 + N_{v_{air, H_2O}}) \text{ kmol}$$

$$= 0.483 \text{ kmol}$$

เพราะฉะนั้นทำการสมดุลสมการการเผาไหม้สำหรับอากาศชื้นใหม่จะได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้ดังนี้

$$\text{C : } 3.5375 \longrightarrow = A$$

$$A = 3.5375$$

$$\text{H : } 5.73 + (0.883 \times 2) \longrightarrow = 2B$$

$$B = 3.748$$

$$\text{S : } 4.375 \times 10^{-3} \longrightarrow = E$$

$$E = 4.375 \times 10^{-3}$$

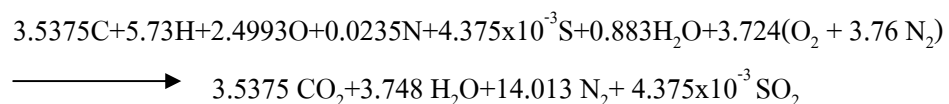
$$\text{O : } 2.4993 + 0.883 + 2 a_{th} \longrightarrow = 2A + B + 2E$$

$$a_{th} = 3.724$$

$$\text{N : } a_{th}(2 \times 3.76) + 0.0235 \longrightarrow = 2D$$

$$D = 14.013$$

นำค่าตัวแปรที่ทำการคำนวณได้แทนค่ากลับในสมการจะได้สมการการเผาไหม้ของอากาศชื้นกับเชื้อเพลิงชานอ้อยที่อัตราการเผาไหม้พอเพียง คือ



จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{ratio} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

มวลของอากาศเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{air} &= n_{air} \times MW_{air} = (n_{dry,air} \times MW_{dry,air}) + (n_{H_2O} \times MW_{H_2O}) \\ &= (3.724 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) + (0.483 \text{ kmol} \times 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}) \\ &= 522.22 \text{ kg} \end{aligned}$$

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{fuel} &= n_{fuel} \times MW_{fuel} \\ &= (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O) + (n_S \times MW_S) + (n_{H_2O} \times MW_{H_2O}) \\ &= ((3.5375 \times 12) + (5.73 \times 1) + (0.0235 \times 14) + (2.4943 \times 16) + (9.375 \times 10^{-3} \times 32) + (0.4 \times 18)) \text{ kg} \\ &= 100 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{F} \right)_{ratio} &= \frac{522.22 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \\ &= 5.22 \end{aligned}$$

ปริมาณอากาศที่ใช้กับเชื้อเพลิง 1 kg

$$\begin{aligned} v &= \frac{m}{\rho} \\ &= \frac{5.22 \text{ kg}}{1.2 \text{ kg} / \text{m}^3} \\ &= 4.351 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ก-2 การคำนวณมวลของคาร์บอนจากก๊าซ CO₂ และก๊าซ CO จากการเผาไหม้

การทำสมดุลคาร์บอน

จาก ปริมาณของสารเมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ 1 mol มีปริมาตรประมาณ 22.4 ลิตร STP

1 mol = มวลของสาร (g) / มวลโมเลกุล

1 mol = มวลของคาร์บอน (g) / 12

สามารถคำนวณมวลคาร์บอนได้จากสมการ

$$m_{CT} - m_c(t) = MW_c \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ kg}} \times \frac{1}{100} \times Q \int_0^t [C_{co}(t) + C_{co_2}(t)] dt / 22.4$$

$$m_{CT} - m_C(t) = 5.36 \times 10^{-6} Q \int_0^t [C_{CO}(t) + C_{CO_2}(t)] dt$$

Q = อัตราการไหลของอากาศ ที่ STP (ลิตร/นาที)

$C_{CO_2}(t)$ = ก๊าซ CO₂ จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่เวลา t

$C_{CO}(t)$ = ก๊าซ CO จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่เวลา t

สามารถเขียนแปลงเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบประยุกต์ (The Multiple-Application Trapezoidal Rule) ได้ดังนี้

โดยที่ $C(t) = C_{CO}(t) + C_{CO_2}(t)$

$$m_{CT} - m_C(t) = 5.36 \times 10^{-6} Q \times \frac{h}{2} (C(t_0) + C(t_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} C(t_i))$$

h = ความกว้างของความถี่ข้อมูล

n = จำนวนความถี่ข้อมูล

ดังนั้น สามารถหาอัตราเร็วการเผาไหม้มวลของคาร์บอน ได้จาก $\frac{dm_C(t)}{dt}$

สามารถเขียนเปลี่ยนแปลงเป็นทางวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ วิธี ฟิไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้ดังนี้

$$\frac{dm_C(t_i)}{dt} = \frac{-m_C(t_{i+2}) + 4m_C(t_{i+1}) - 3m_C(t_i)}{2h} \quad \text{เมื่อ } I = 0, 1$$

$$\frac{dm_C(t_i)}{dt} = \frac{-m_C(t_{i+2}) + 8m_C(t_{i+1}) - 8m_C(t_{i-1}) + m_C(t_{i-2})}{2h} \quad \text{เมื่อ } I = 2 \text{ ถึง } n-2$$

$$\frac{dm_C(t_i)}{dt} = \frac{3m_C(t_i) - 4m_C(t_{i-1}) + m_C(t_{i-2})}{2h} \quad \text{เมื่อ } I = n-1, n$$

ตารางที่ ก-1 เวลาที่ใช้ในการลุกไหม้

	Q=200 LPM		Q=300 LPM				Q=400 LPM			
	P=200	P=100	P=300	P=200	P=150	P=100	P=400	P=300	P=200	P=100
T=am*	188	122	205	201	180	116	207	210	220	389
T=100	126	76	108	134	94	52	142	114	110	210
T=150	90	80	95	102	104	117	101	110	106	301
T=200	80	58	94	70	63	69	100	108	66	169

* = อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิจุดตัดไฟ

	Q=200 LPM		Q=300 LPM				Q=400 LPM			
	P=200	P=100	P=300	P=200	P=150	P=100	P=400	P=300	P=200	P=100
T=am*	248	202	260	244	221	235	268	231	228	272
T=100	219	216	247	237	235	224	250	238	244	208
T=150	259	220	247	216	220	260	264	248	225	250
T=200	259	197	237	224	226	269	242	218	236	253

* = อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

ตารางที่ ก-3 ความเร็วเปลวไฟ

	Q=200 LPM		Q=300 LPM				Q=400 LPM			
	P=200	P=100	P=300	P=200	P=150	P=100	P=400	P=300	P=200	P=100
T=am*	1.86	2.86	1.7	1.74	1.94	3.01	1.69	1.66	1.59	0.89
T=100	2.77	4.6	3.24	2.61	3.72	6.05	2.46	3.07	3.18	1.66
T=150	3.88	4.37	3.68	3.43	3.36	2.99	3.46	3.18	3.3	1.16
T=200	4.37	5.43	3.72	5.0	5.55	5.07	3.5	3.24	5.3	2.07

* = อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

ตารางที่ ก-4 เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้

	Q=200 LPM		Q=300 LPM				Q=400 LPM			
	P=200	P=100	P=300	P=200	P=150	P=100	P=400	P=300	P=200	P=100
T=am*	1,050	2,396	568	936	1,460	1,424	470	538	888	748
T=100	1,500	3,952	1,386	1,660	1,932	1,956	1,782	2,300	2,012	2,074
T=150	1,530	2,658	1,090	1,316	2,278	1,990	1,558	1,588	998	1,154
T=200	2,076	3,472	1,402	1,494	2,209	1,646	1,442	1,680	2,010	1,304

* = อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

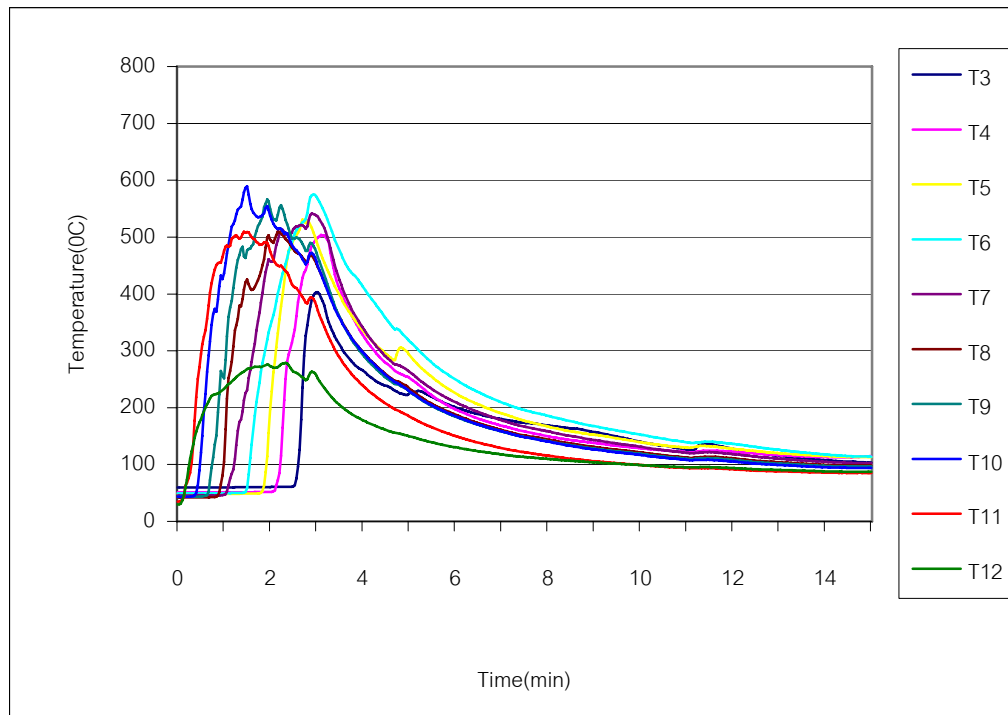
ตารางที่ ก-5 อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

	Q=200 LPM		Q=300 LPM				Q=400 LPM			
	P=200	P=100	P=300	P=200	P=150	P=100	P=400	P=300	P=200	P=100
T=am*	0.077	0.044	0.188	0.146	0.085	0.082	0.338	0.292	0.177	0.169
T=100	0.067	0.030	0.099	0.098	0.049	0.071	0.114	0.098	0.060	0.061
T=150	0.017	0.038	0.097	0.117	0.029	0.058	0.087	0.075	0.141	0.103
T=200	0.036	0.028	0.051	0.058	0.056	0.075	0.077	0.156	0.078	0.121

* = อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

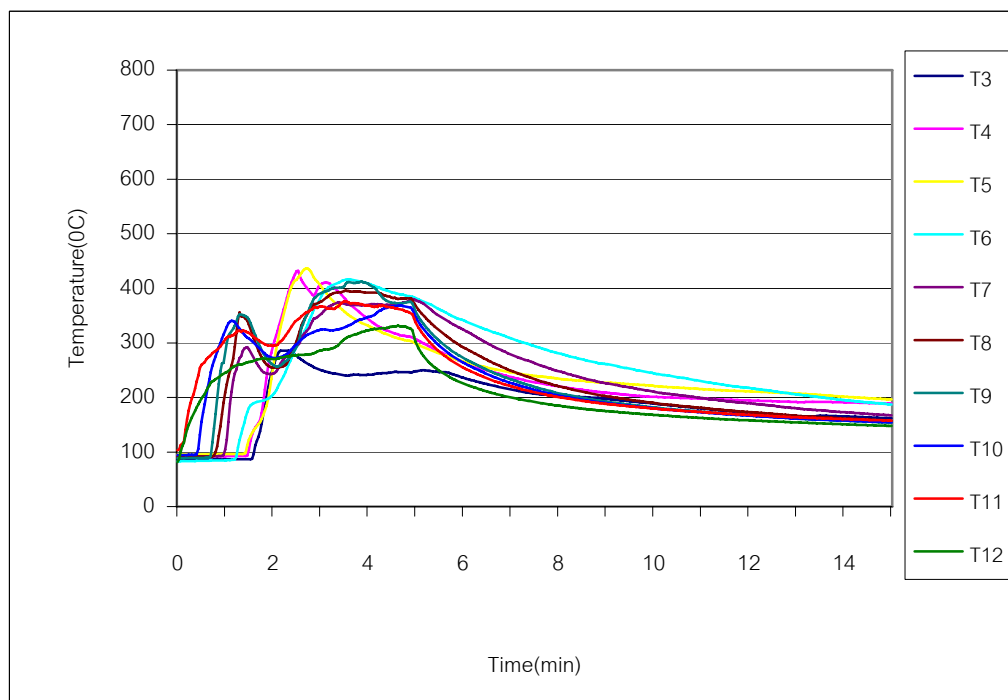
ภาคผนวก ข

ภาพแสดงผลการทดลอง ที่ $T = 100, 150$ และ 200°C



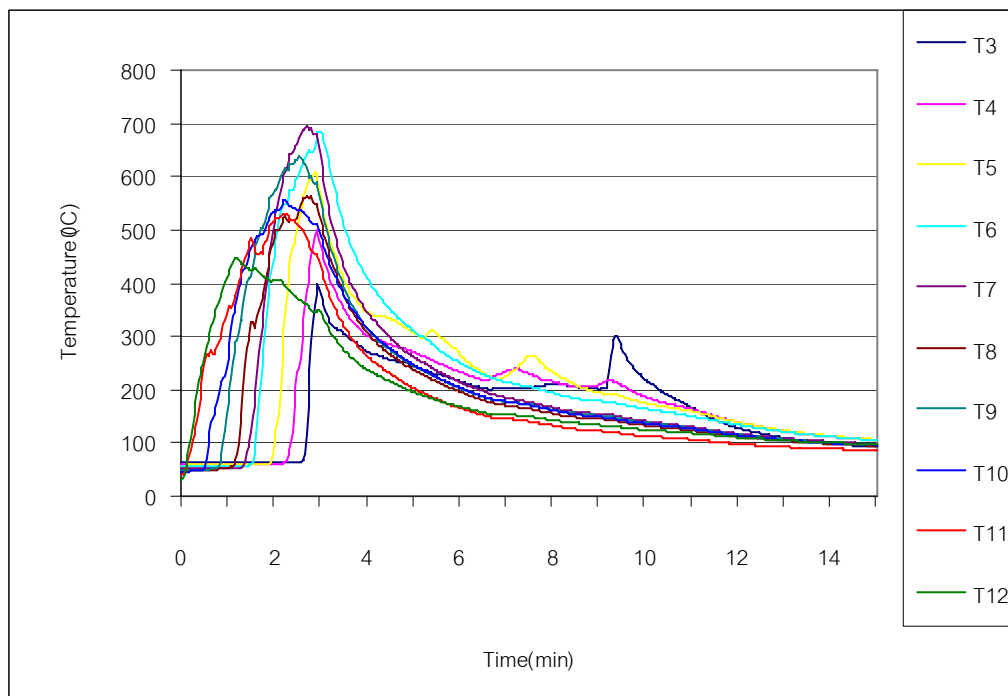
ภาพที่ ข-1 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



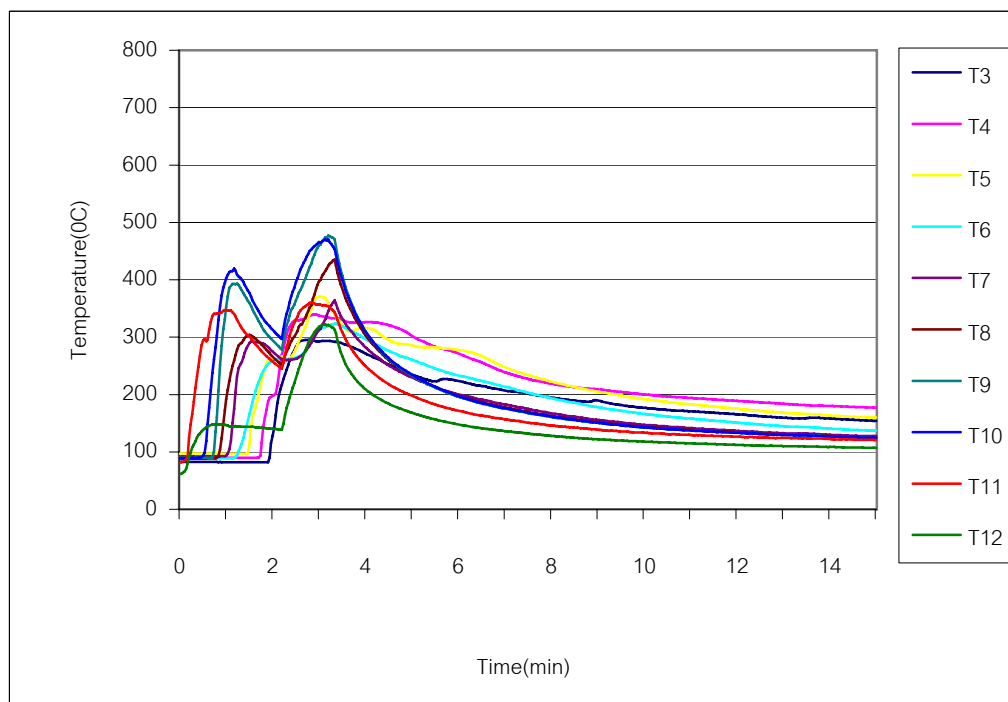
ภาพที่ ข-2 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



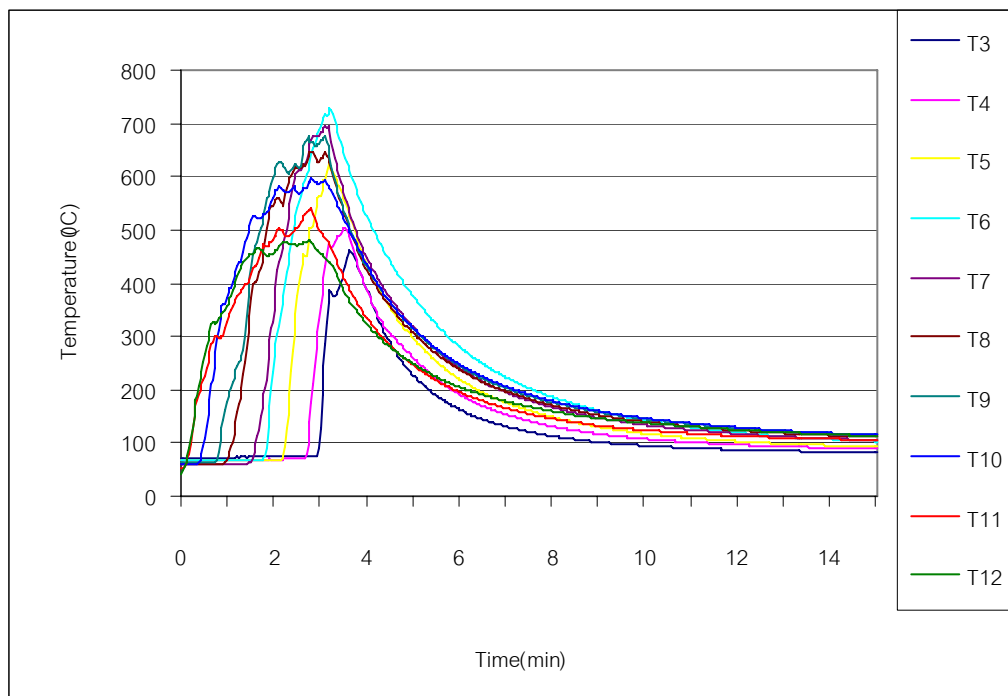
ภาพที่ ข-3 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



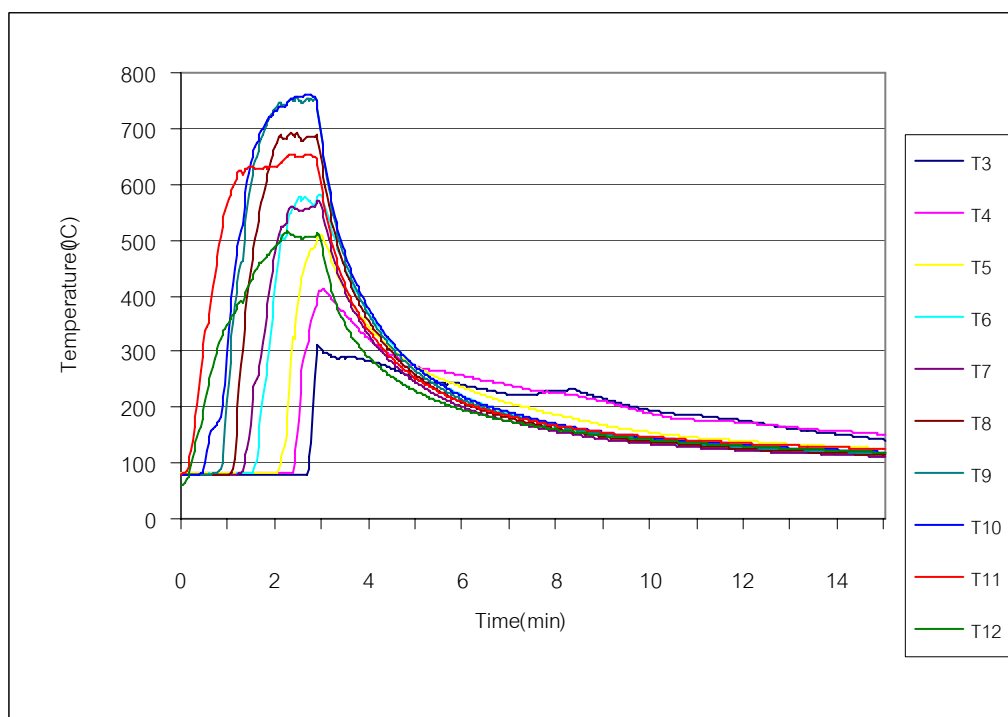
ภาพที่ ข-4 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



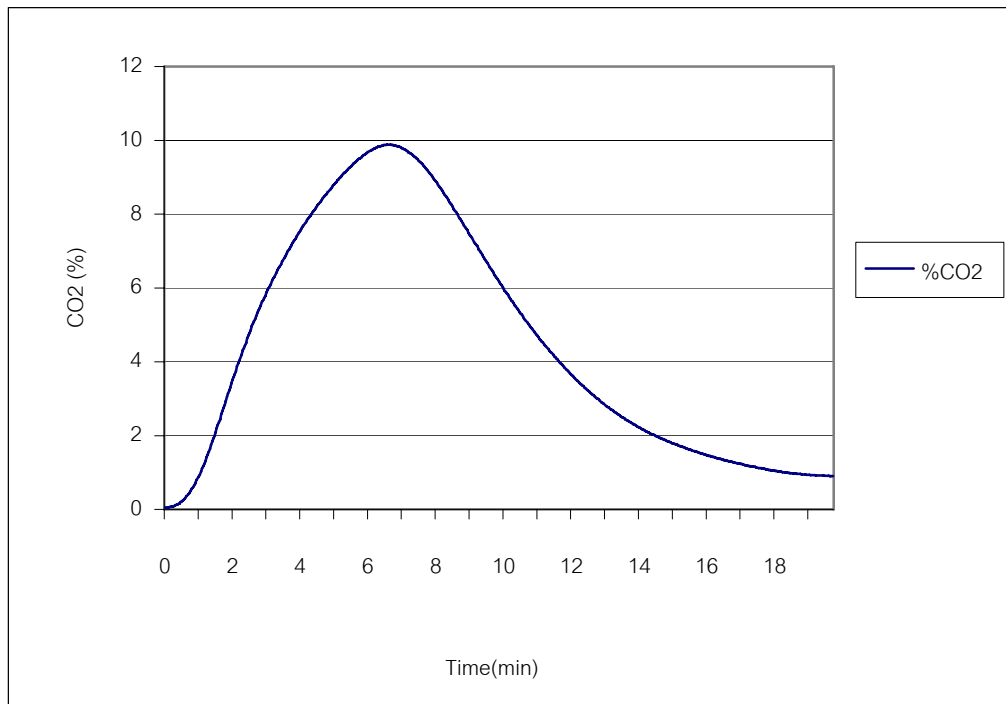
ภาพที่ ข-5 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



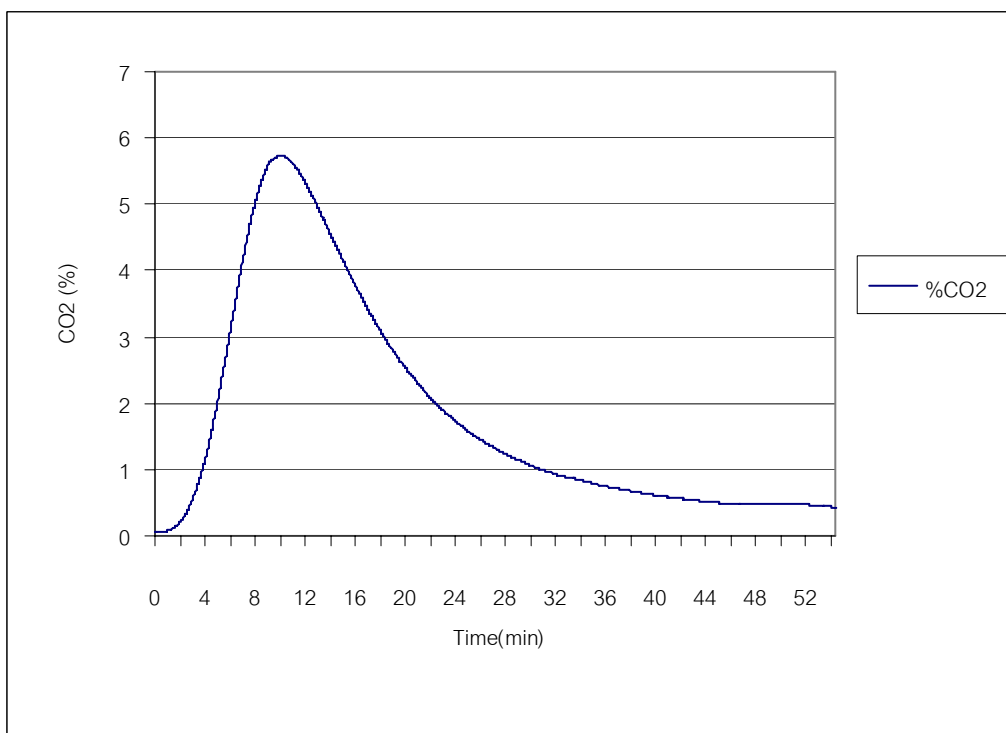
ภาพที่ ข-6 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



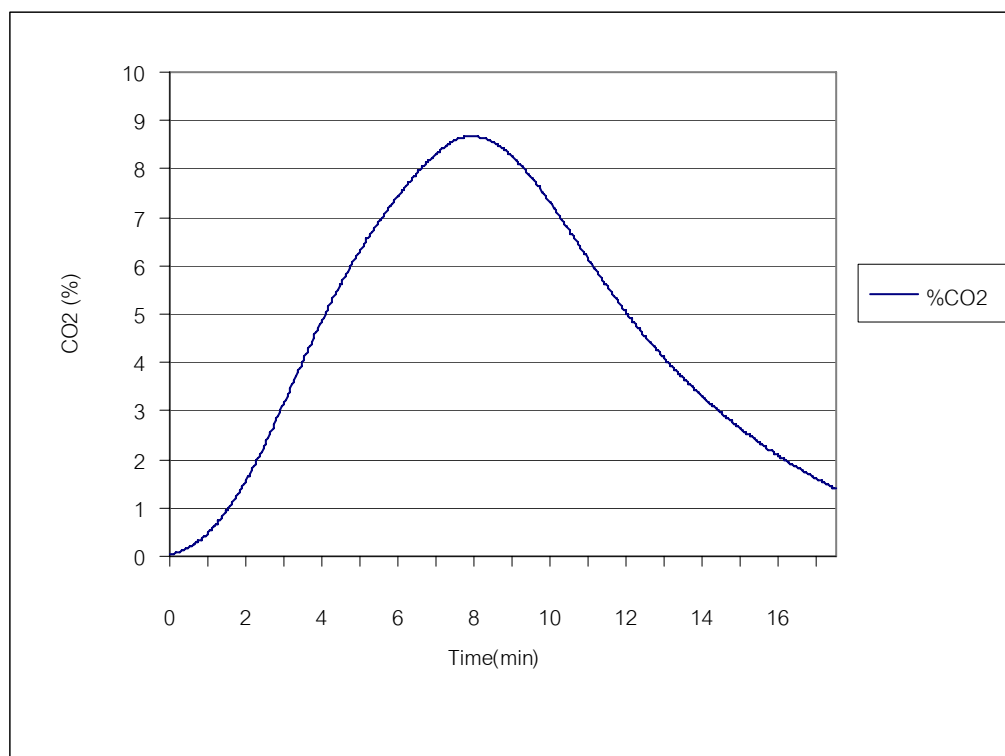
ภาพที่ ข-7 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=100⁰ C

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s

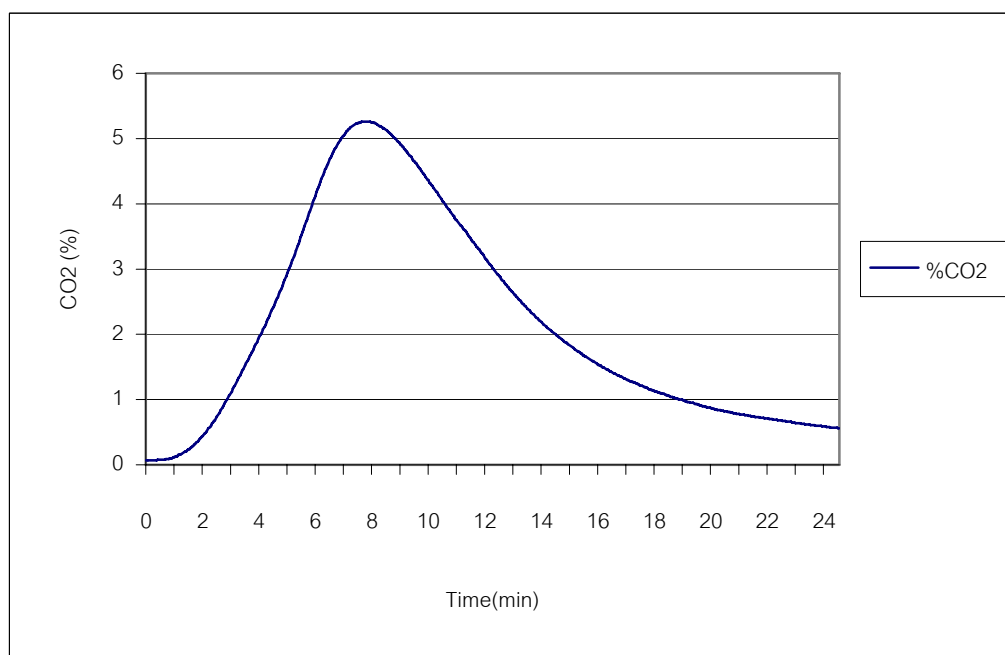


ภาพที่ ข-8 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=100⁰ C

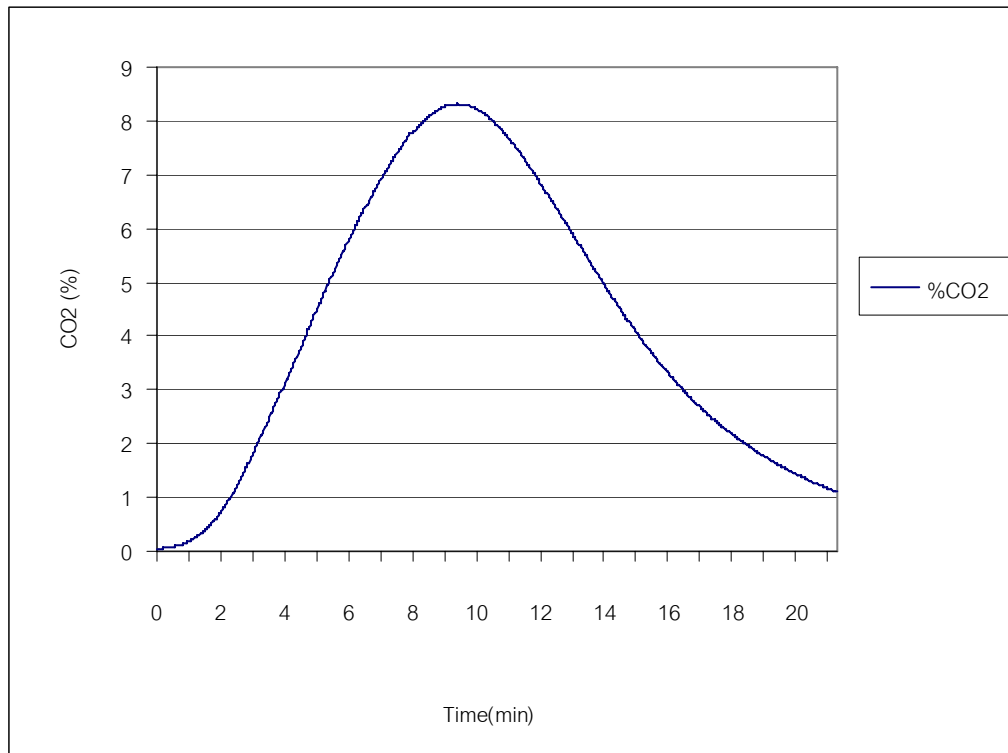
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



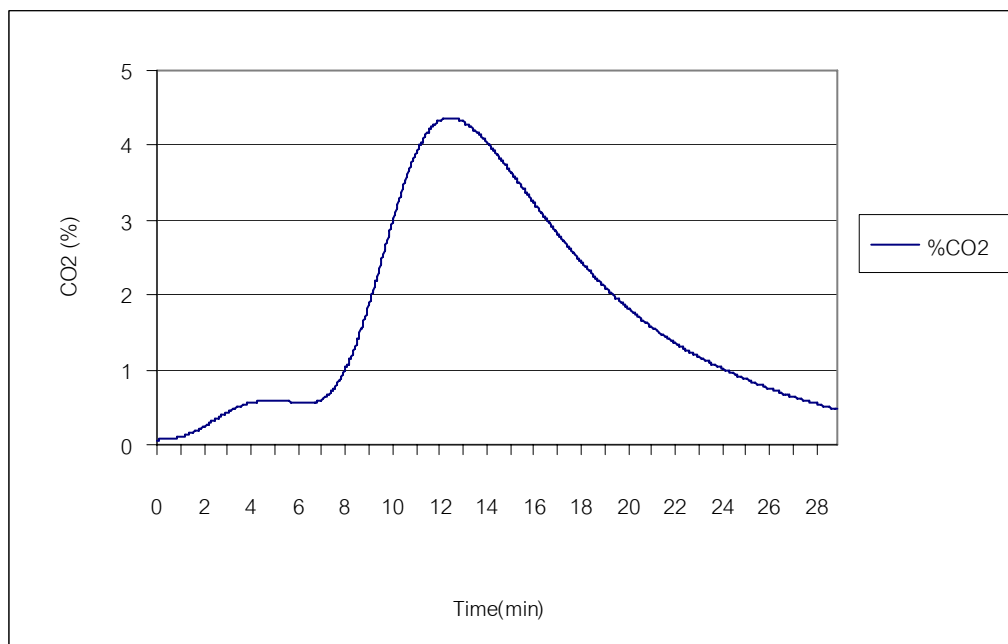
ภาพที่ ข-9 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100⁰ C
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



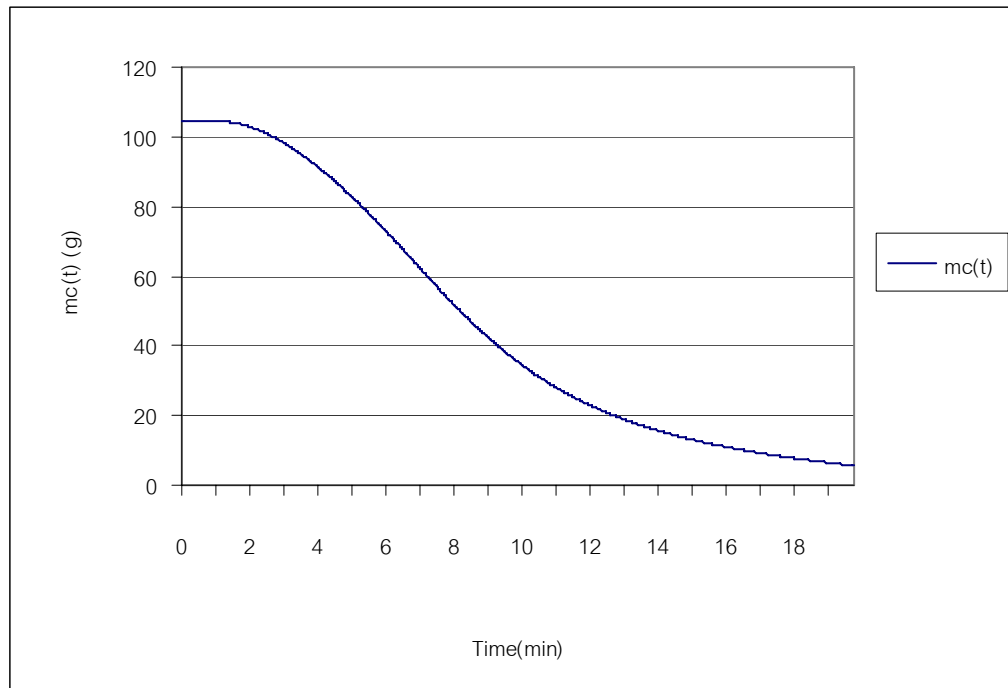
ภาพที่ ข-10 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100⁰ C
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



ภาพที่ ข-11 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100⁰ C
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

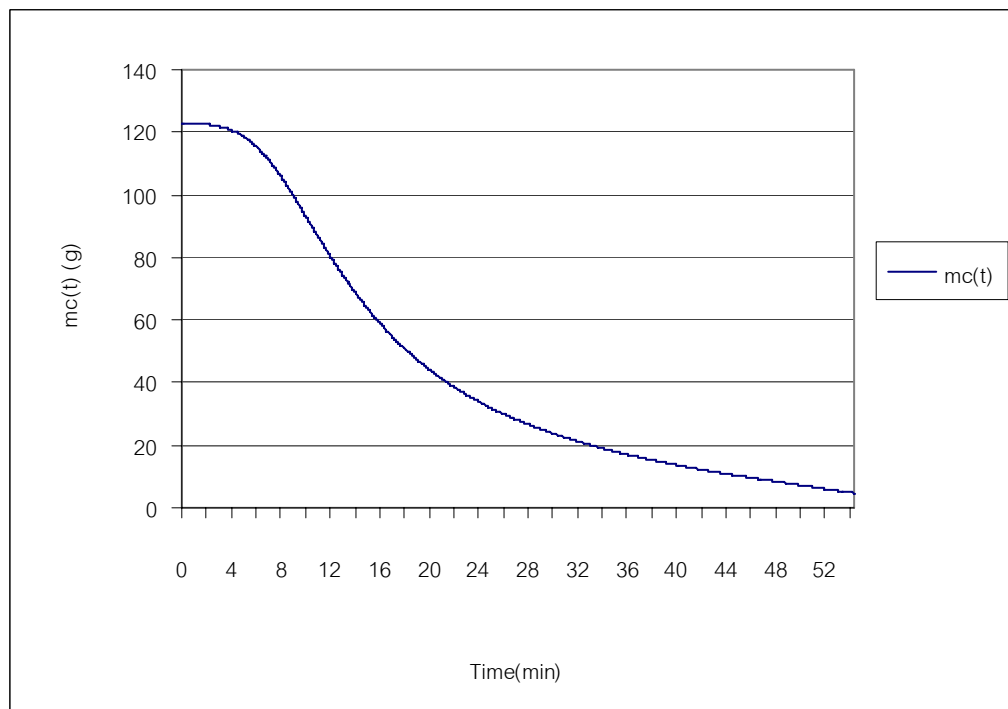


ภาพที่ ข-12 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=100⁰ C
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



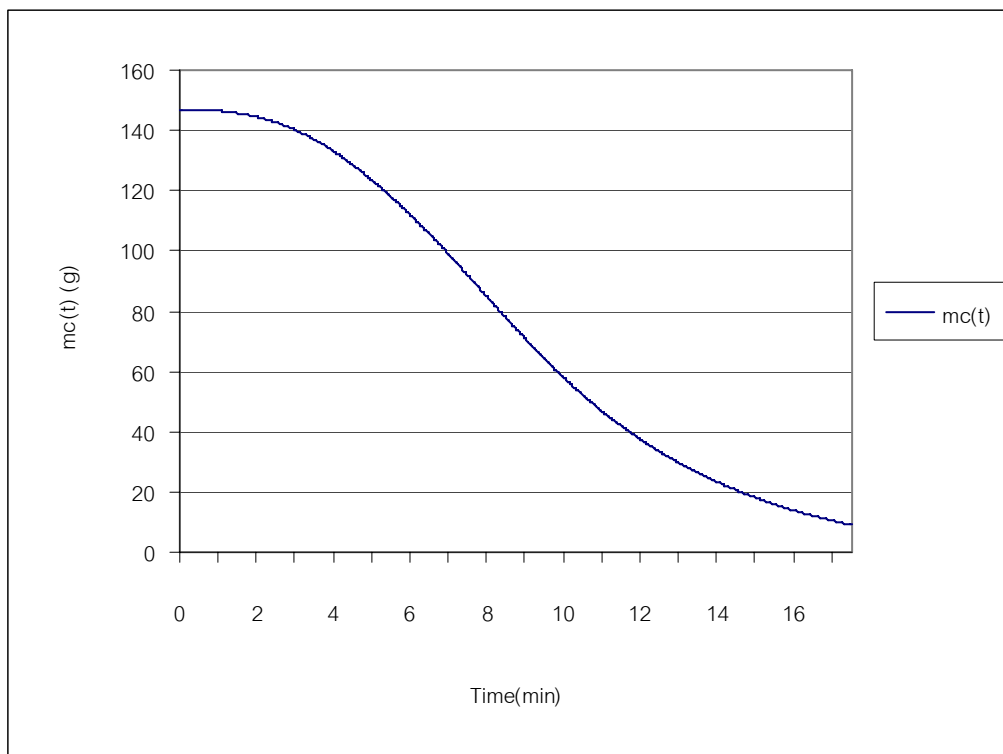
ภาพที่ ข-13 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s

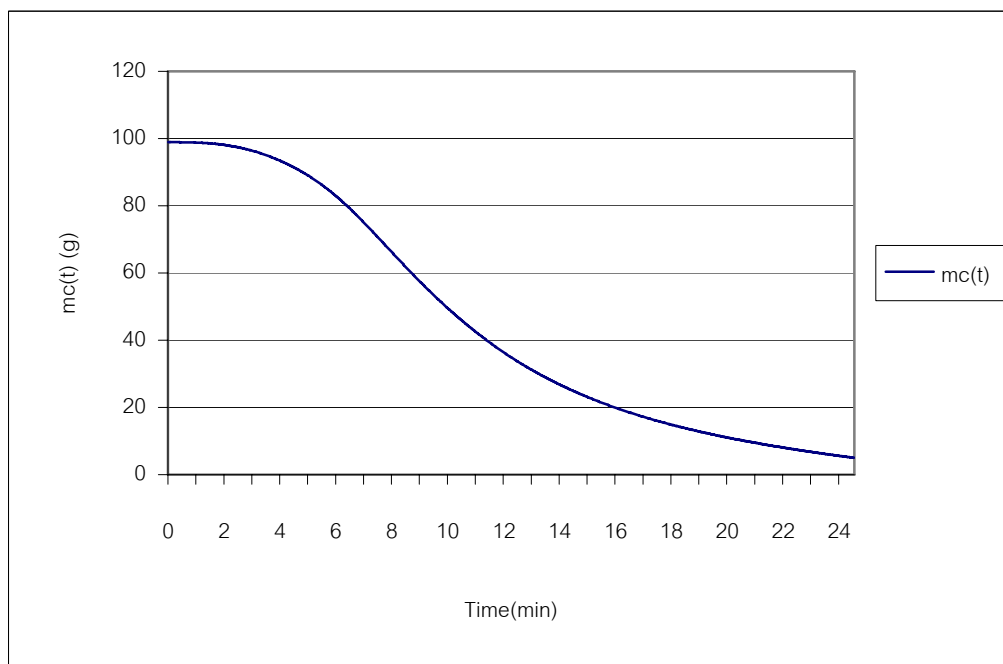


ภาพที่ ข-14 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$

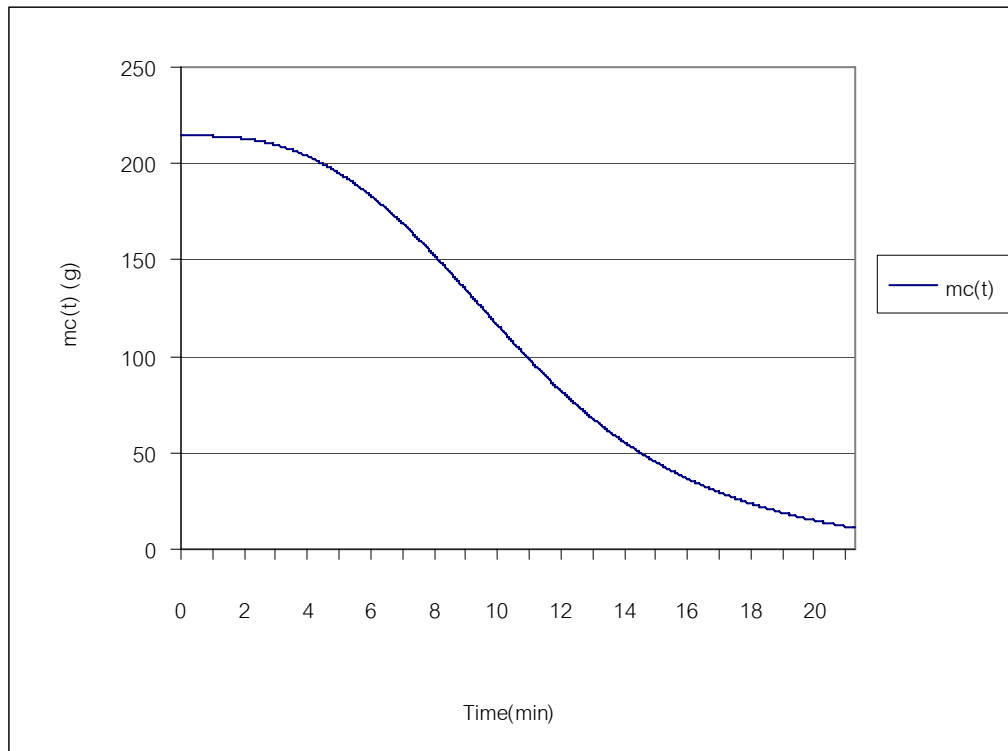
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



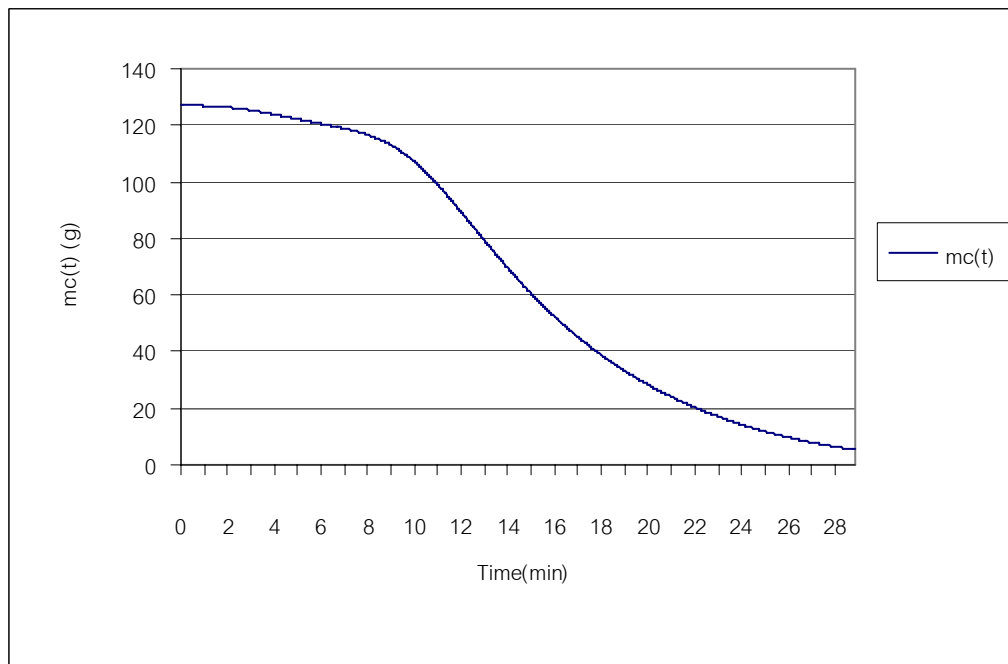
ภาพที่ ข-15 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
 Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



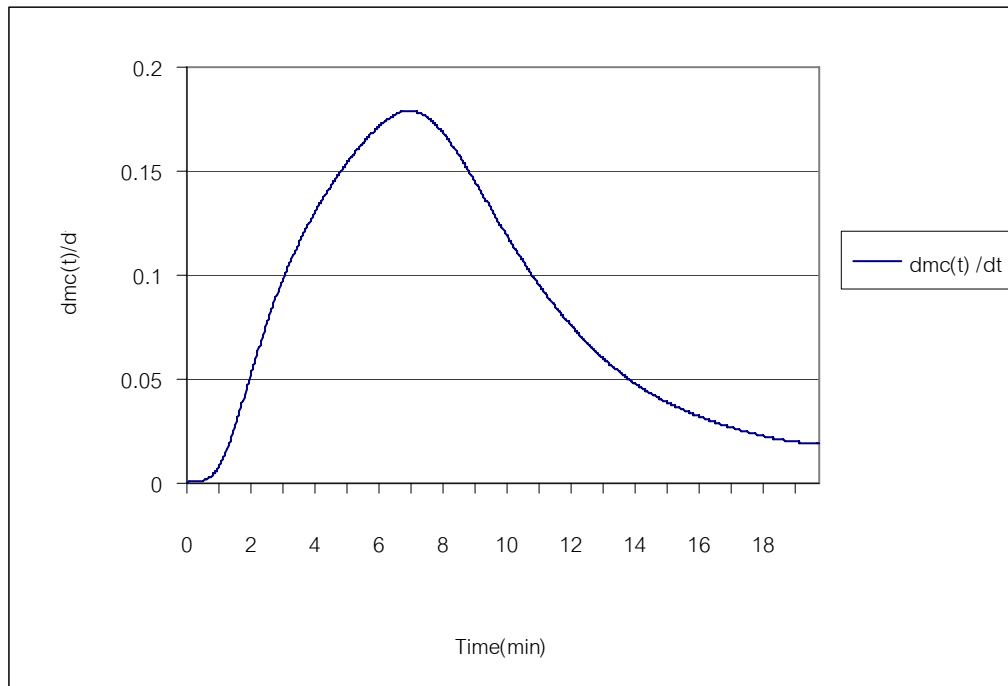
ภาพที่ ข-16 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
 Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



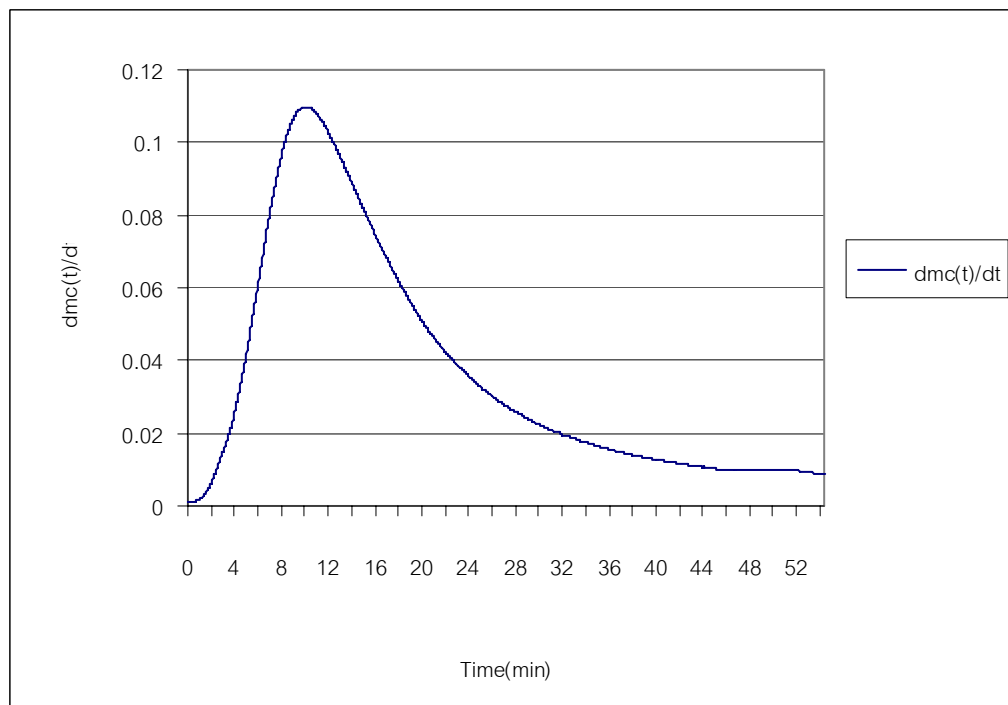
ภาพที่ ข-17 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



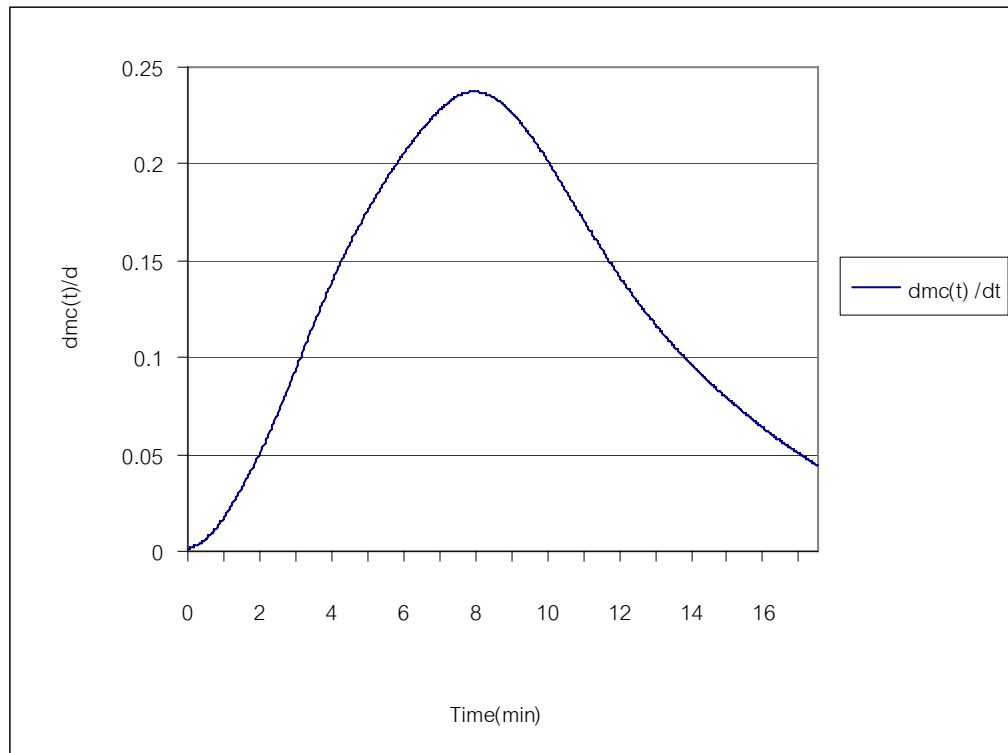
ภาพที่ ข-18 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



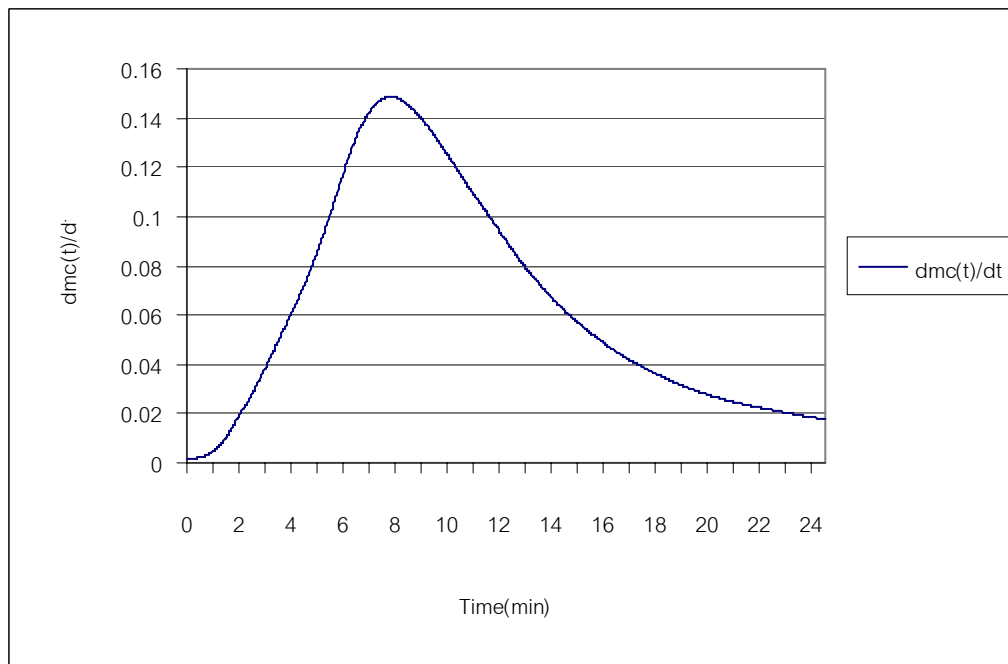
ภาพที่ ข-19 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



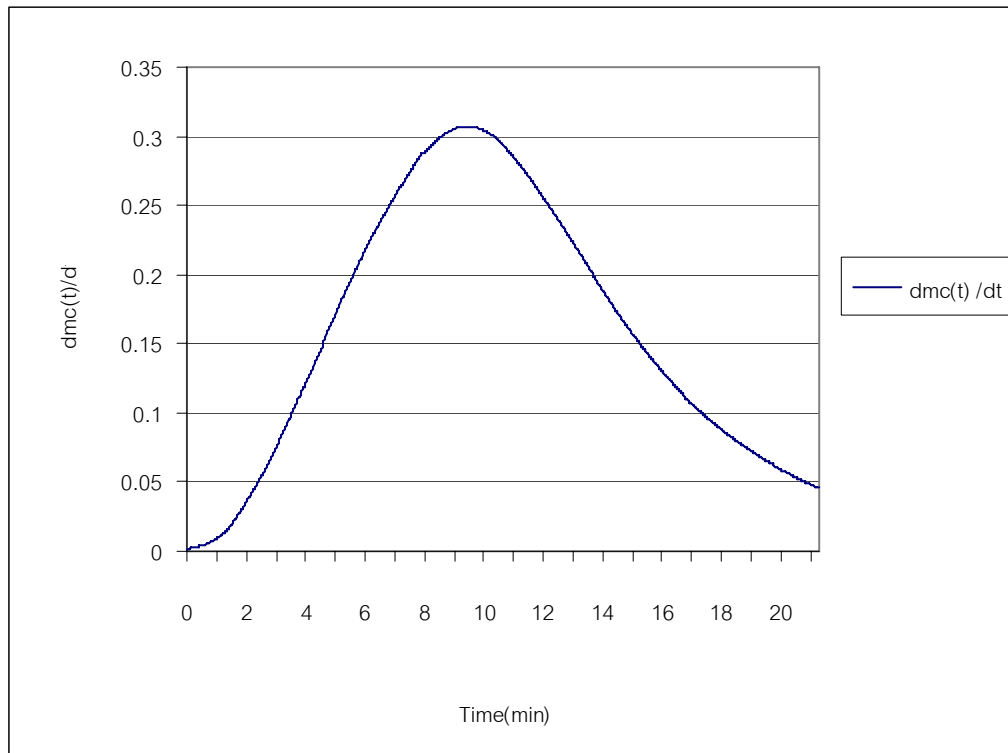
ภาพที่ ข-20 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



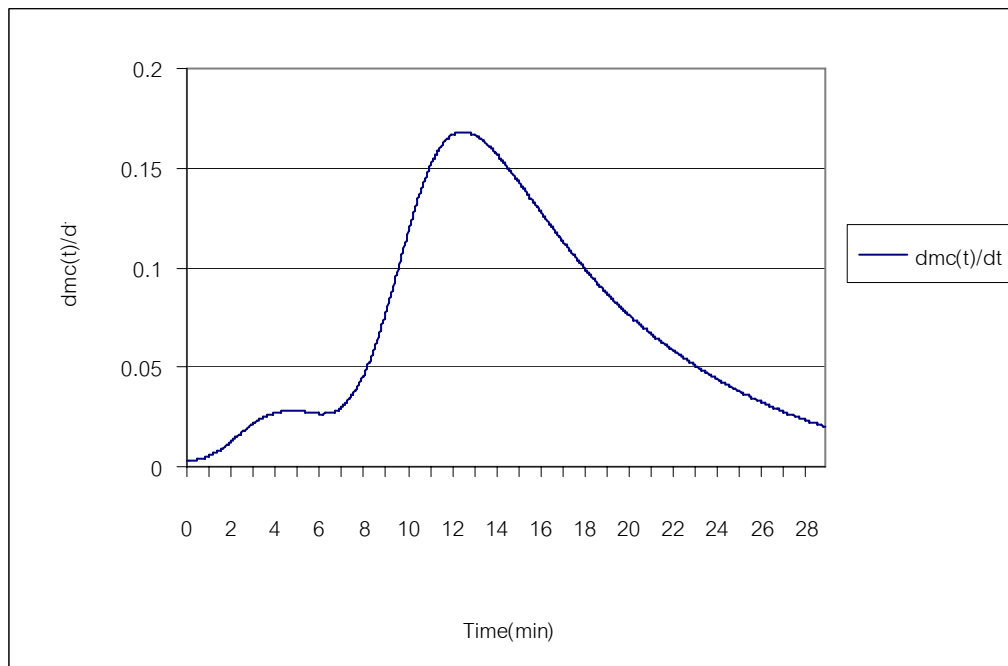
ภาพที่ ข-21 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



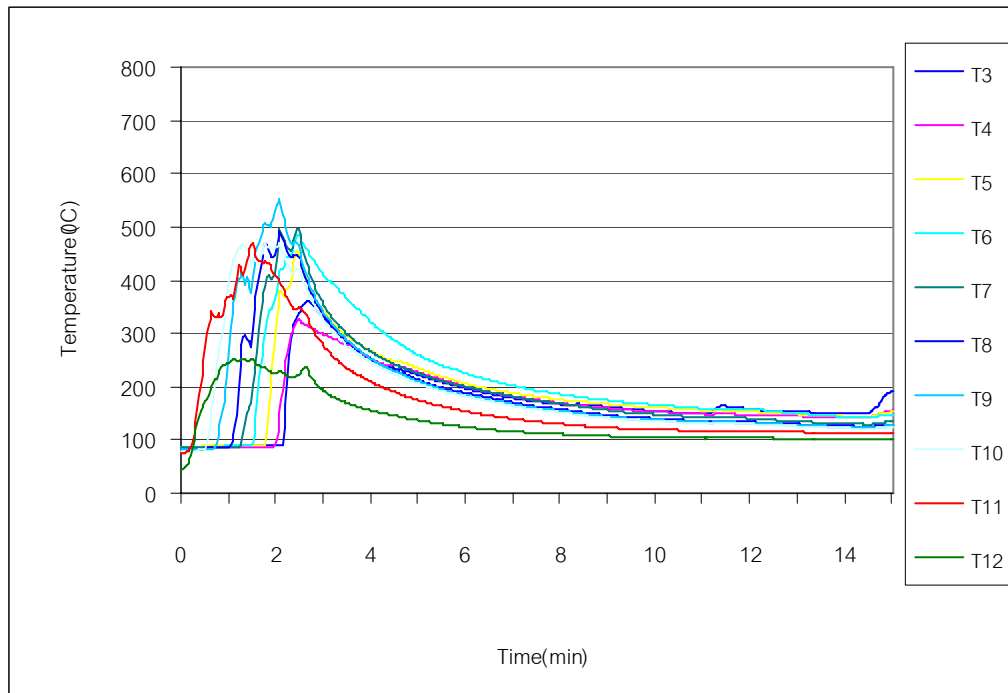
ภาพที่ ข-22 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



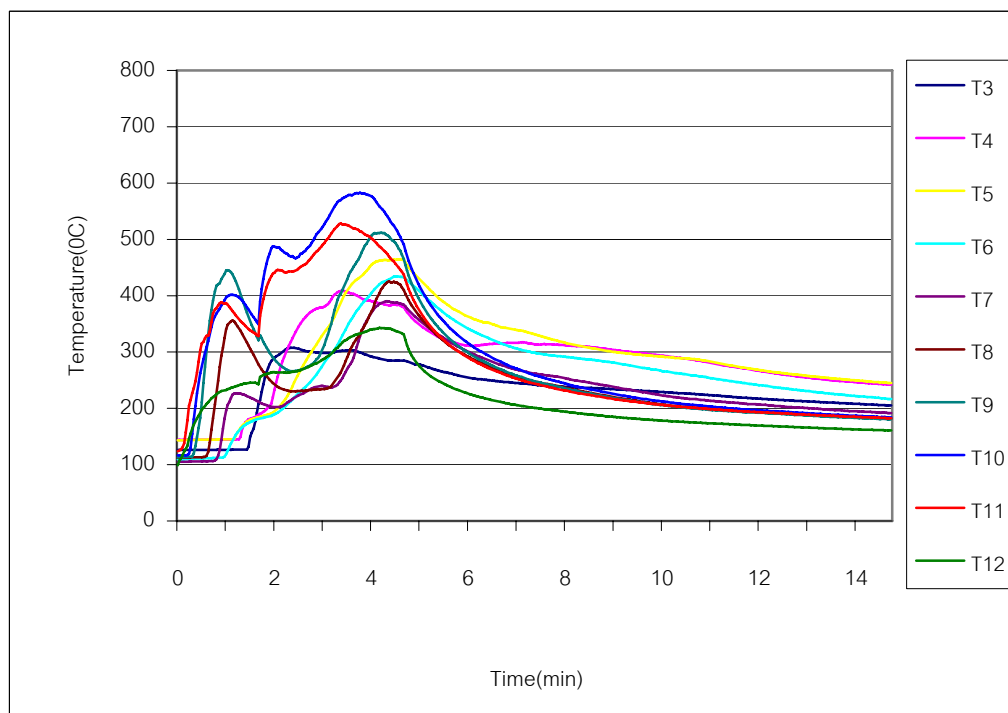
ภาพที่ ข-23 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



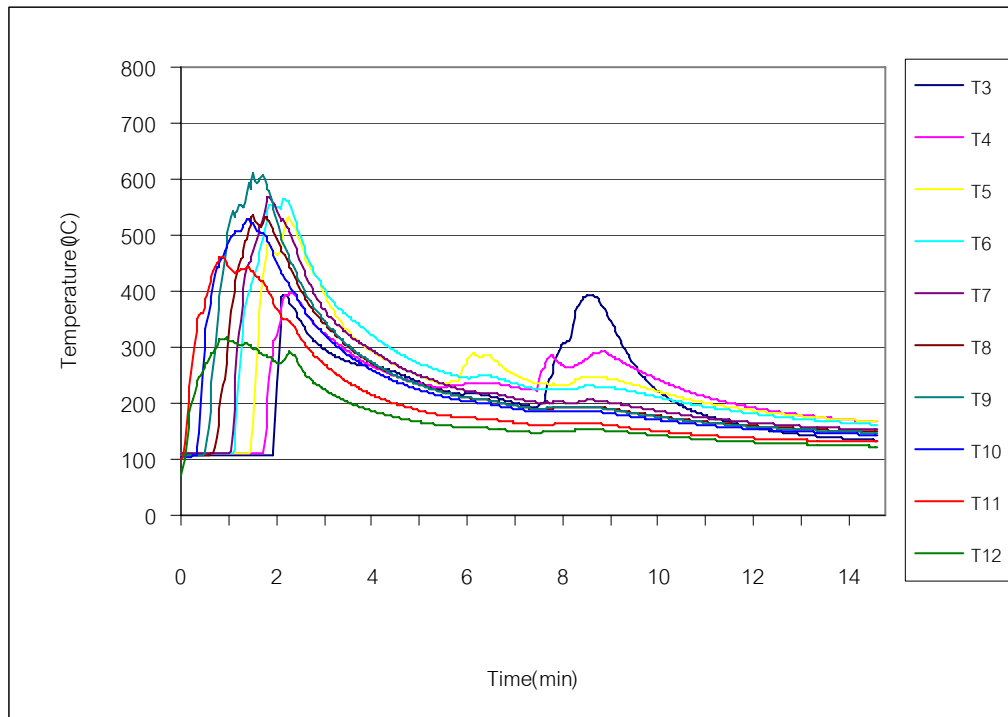
ภาพที่ ข-24 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=100^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



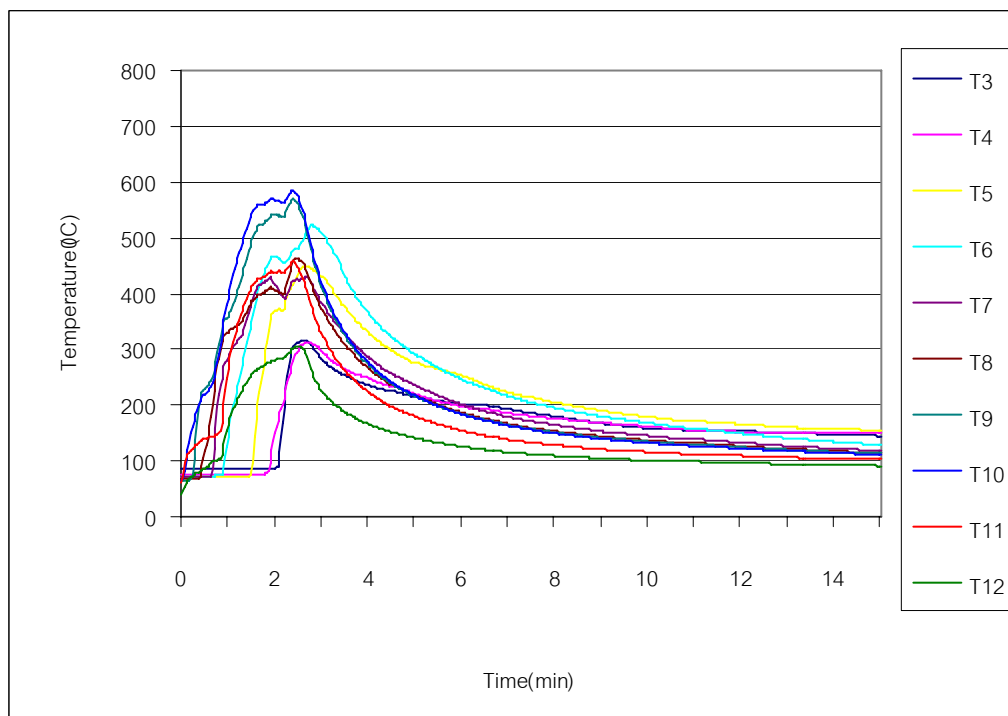
ภาพที่ ข-25 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
 Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



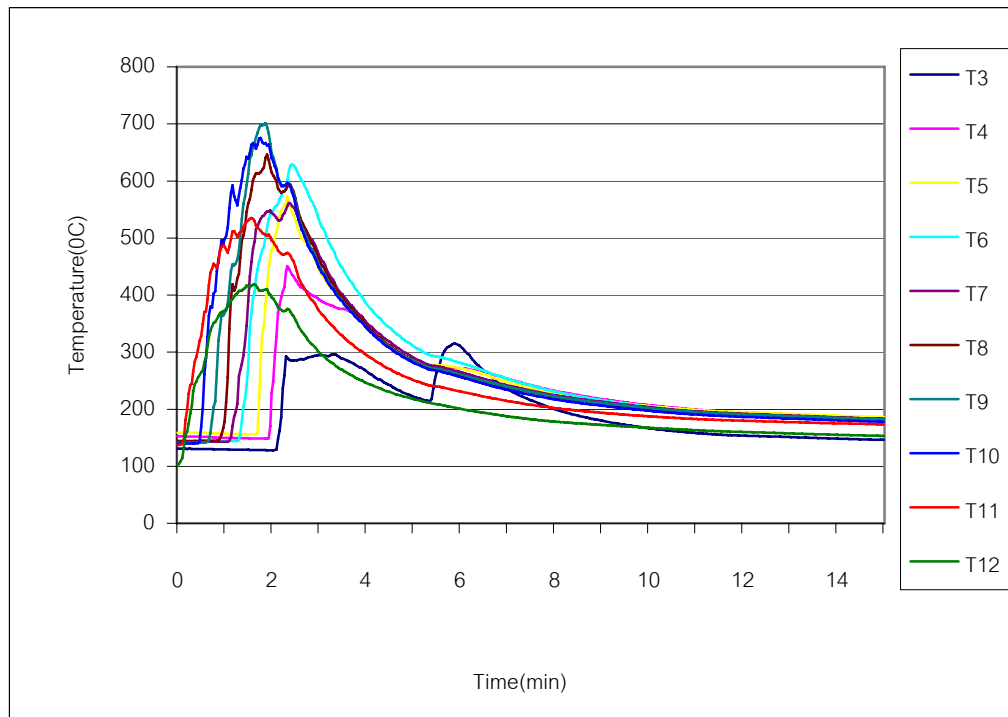
ภาพที่ ข-26 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
 Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



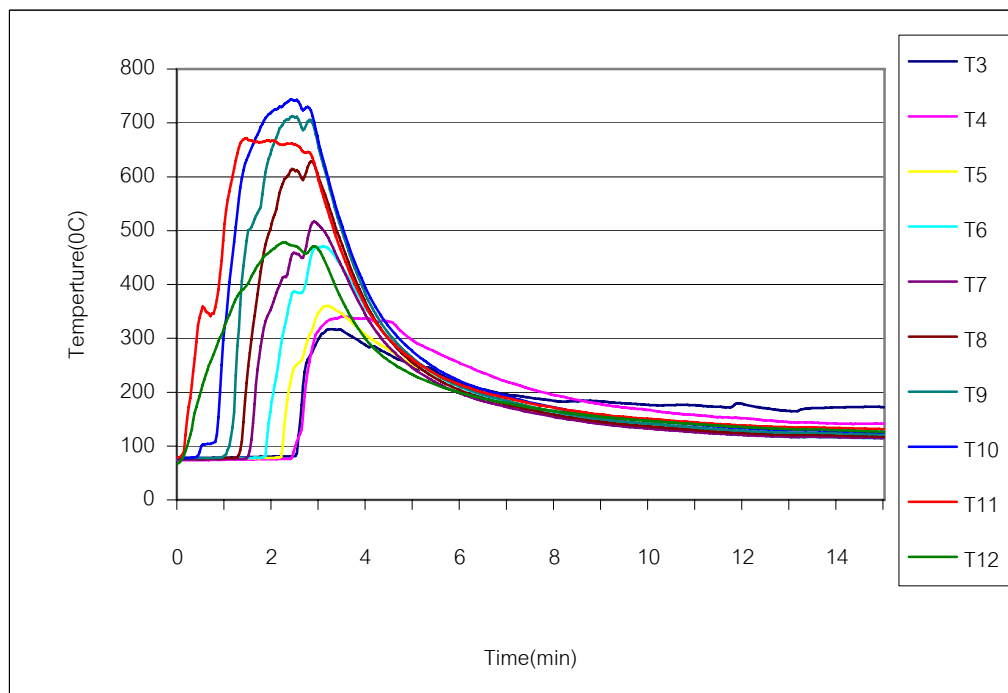
ภาพที่ ข-27 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



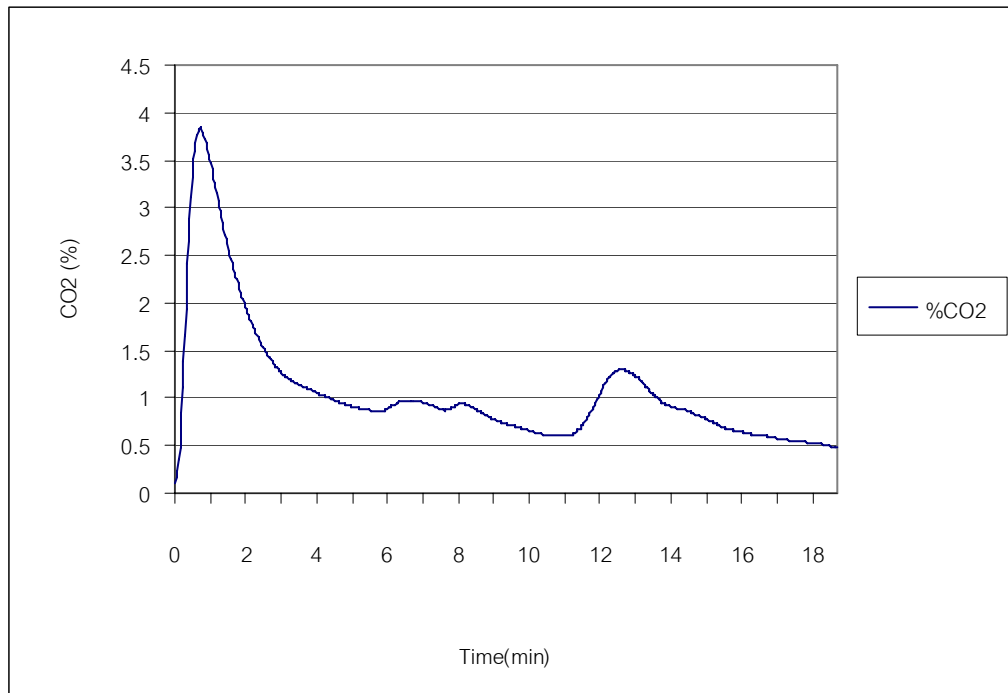
ภาพที่ ข-28 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



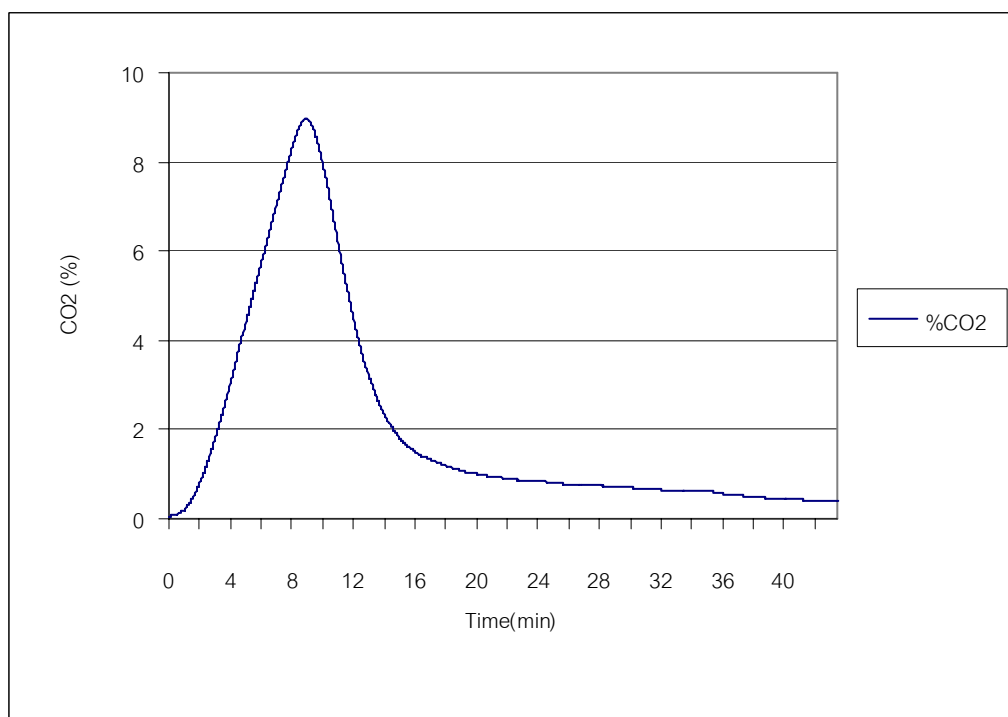
ภาพที่ ข-29 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



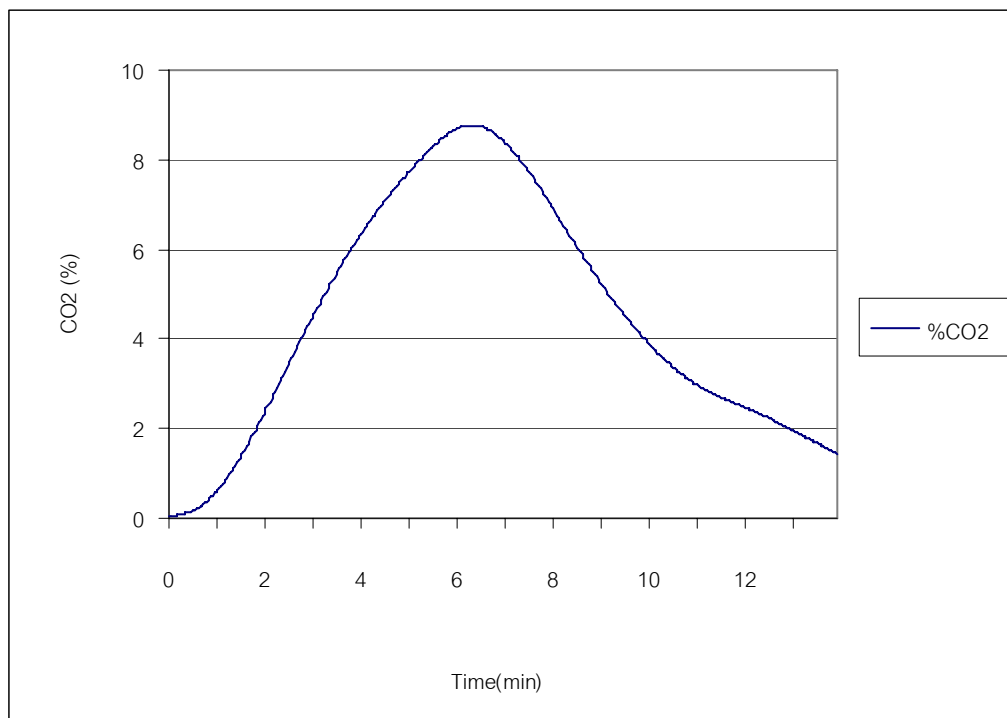
ภาพที่ ข-30 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



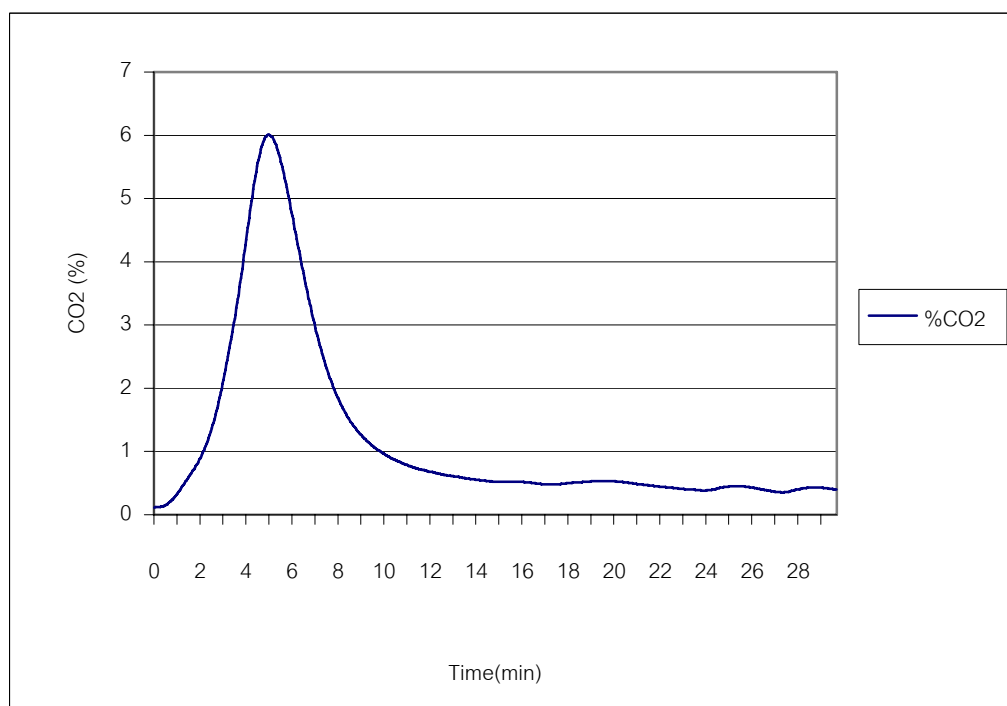
ภาพที่ ข-31 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150⁰ C
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



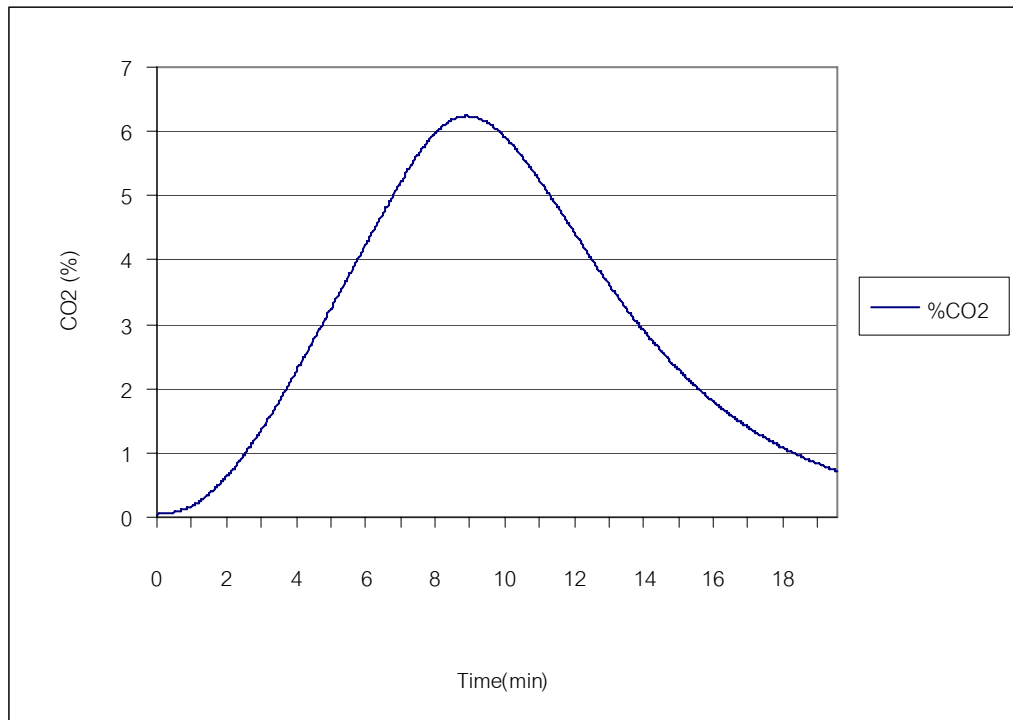
ภาพที่ ข-32 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้อ้อย ที่ T=150⁰ C
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



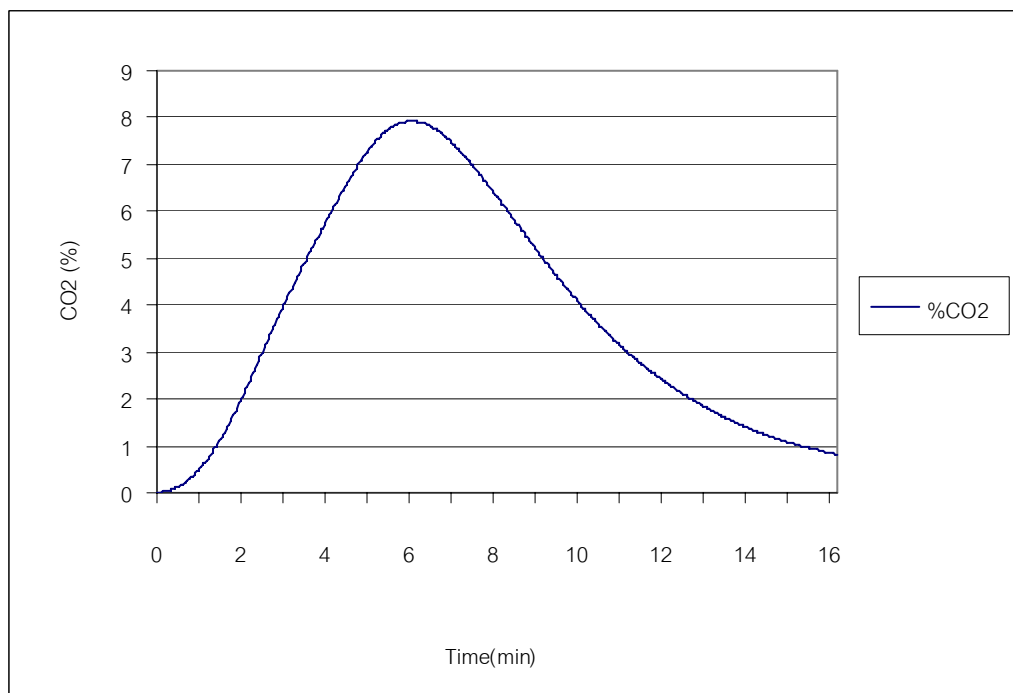
ภาพที่ ข-33 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=150⁰ C
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



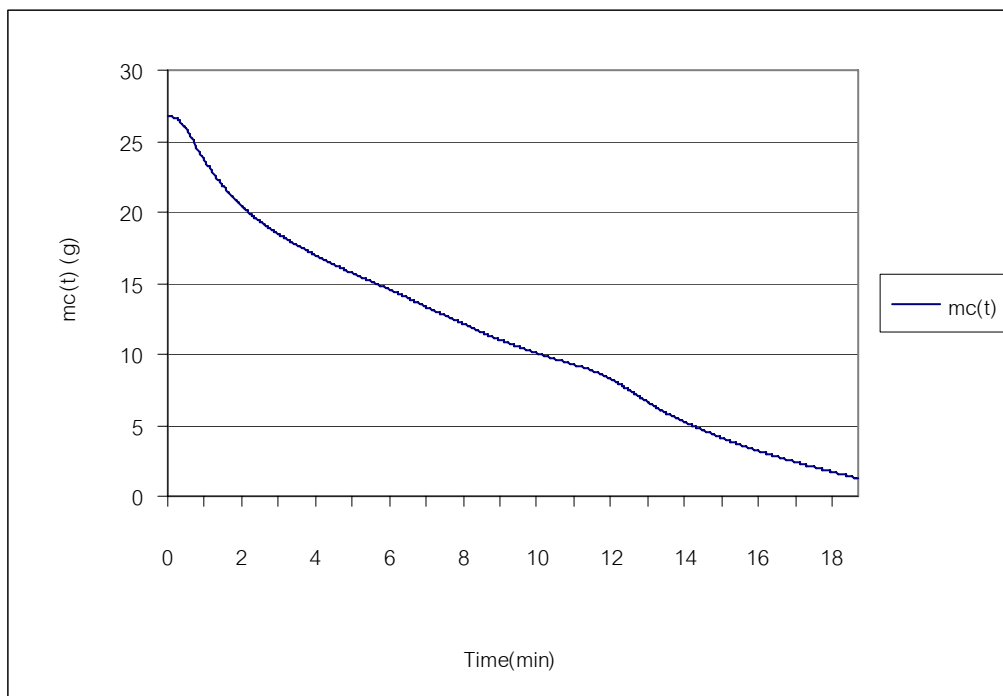
ภาพที่ ข-34 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=150⁰ C
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



ภาพที่ ข-35 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=150⁰ C
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

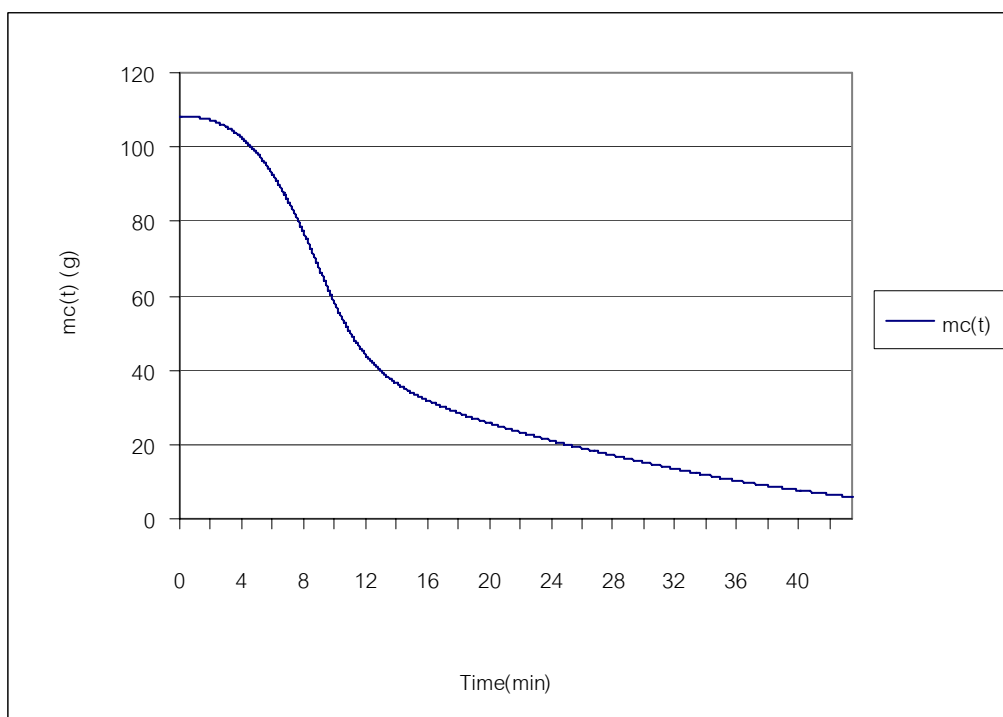


ภาพที่ ข-36 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=150⁰ C
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



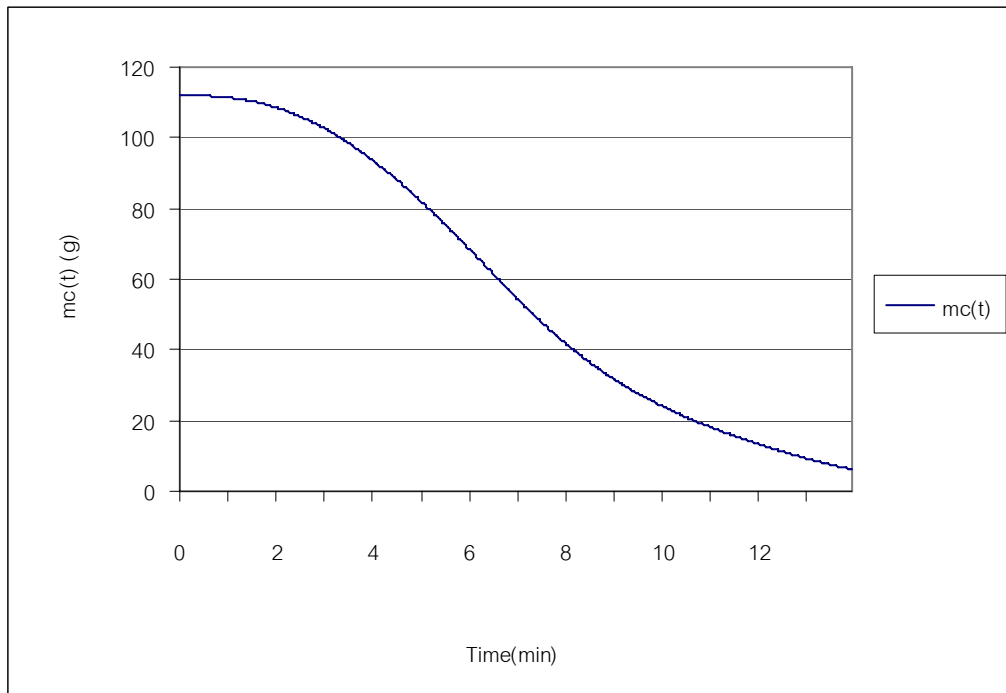
ภาพที่ ข-37 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



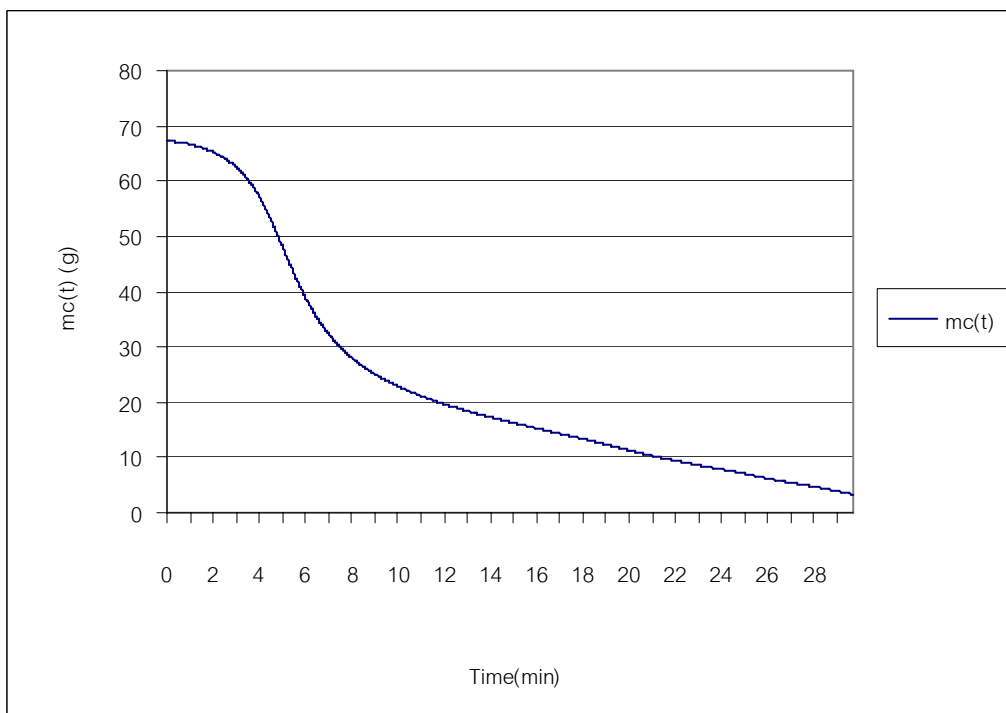
ภาพที่ ข-38 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



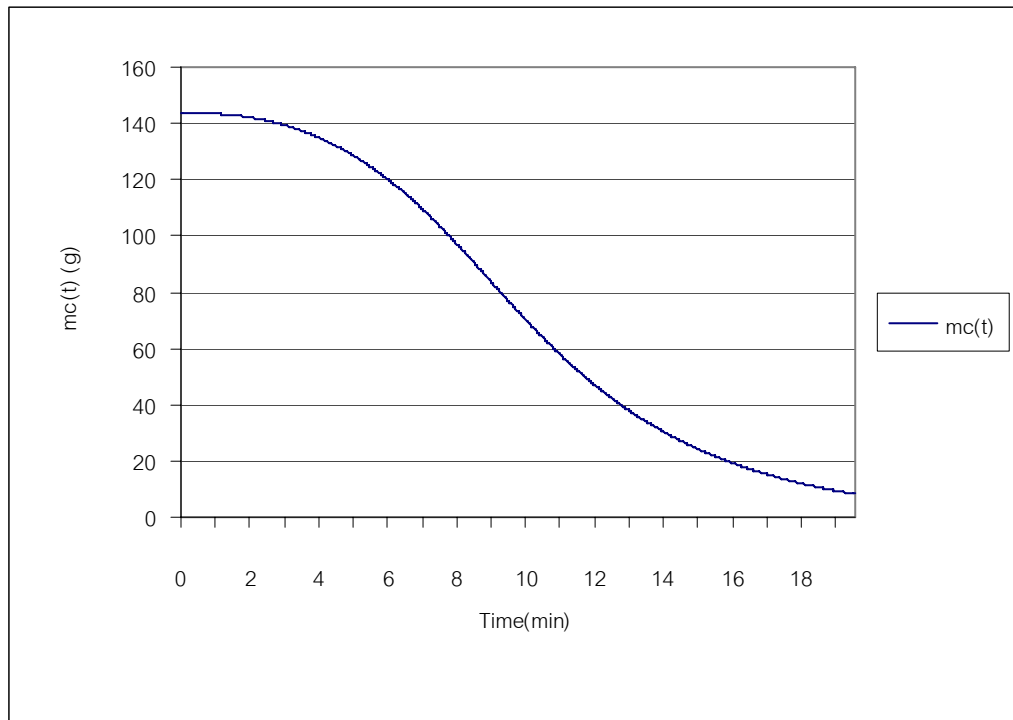
ภาพที่ ข-39 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s

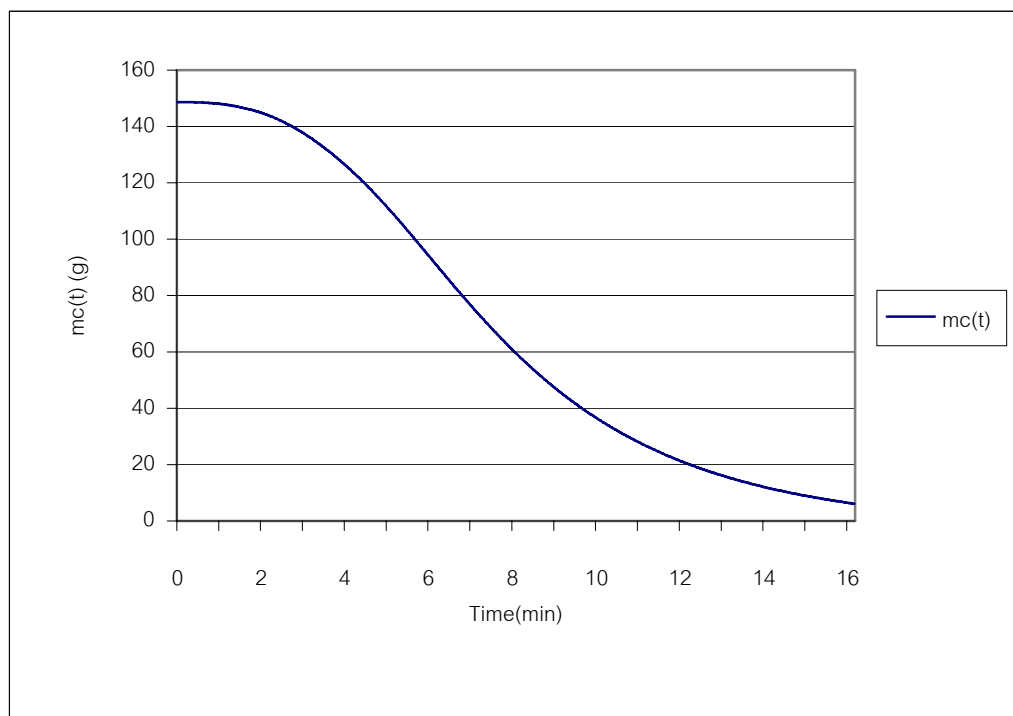


ภาพที่ ข-40 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

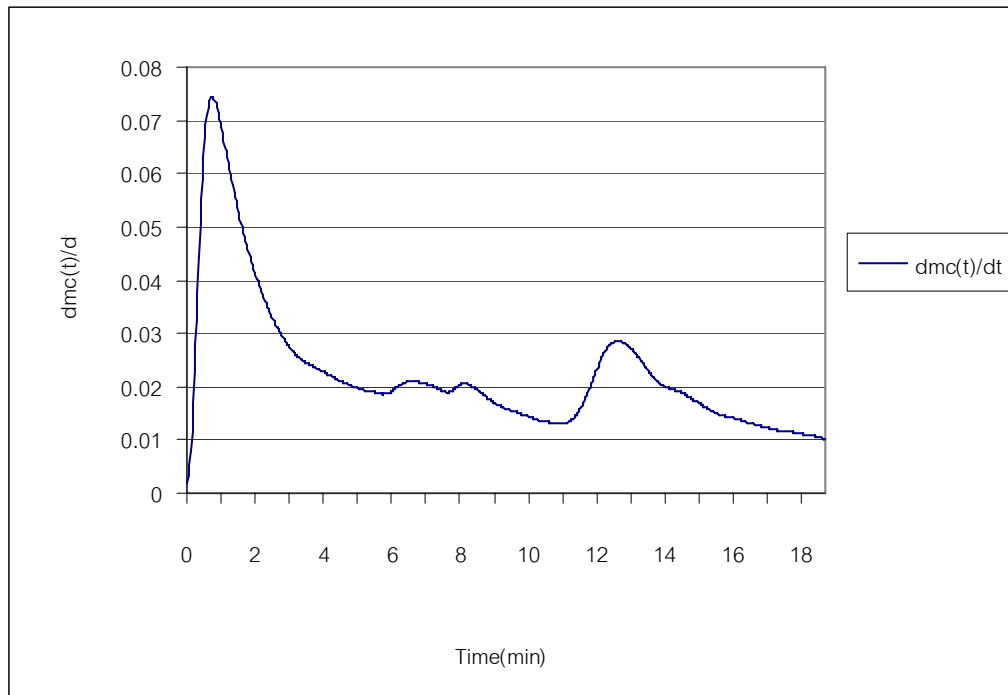
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



ภาพที่ ข-41 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

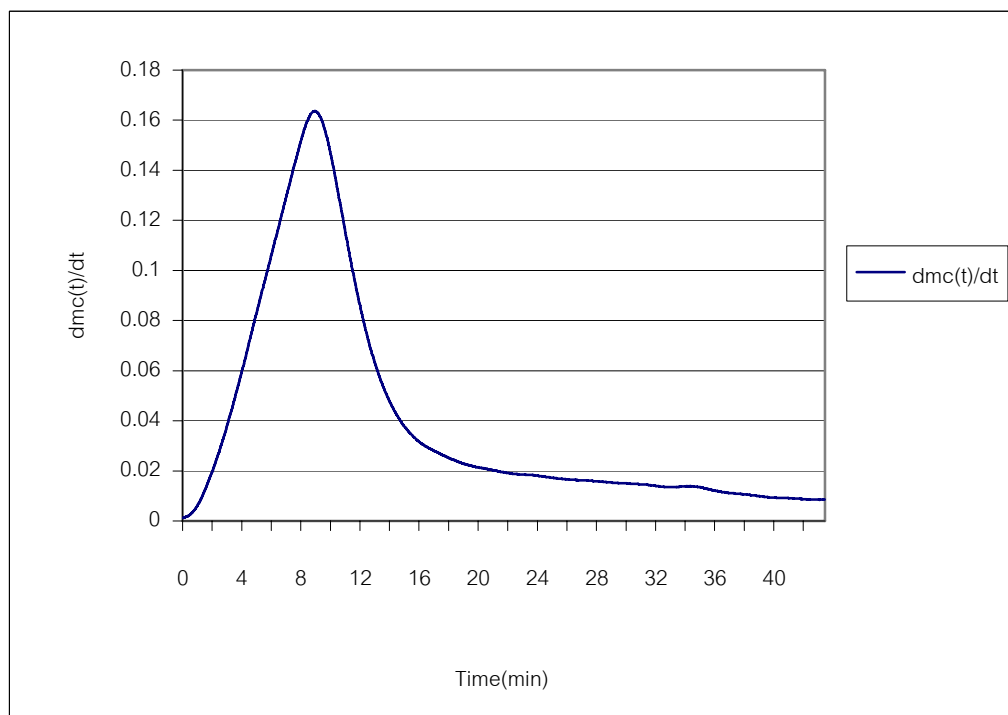


ภาพที่ ข-42 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



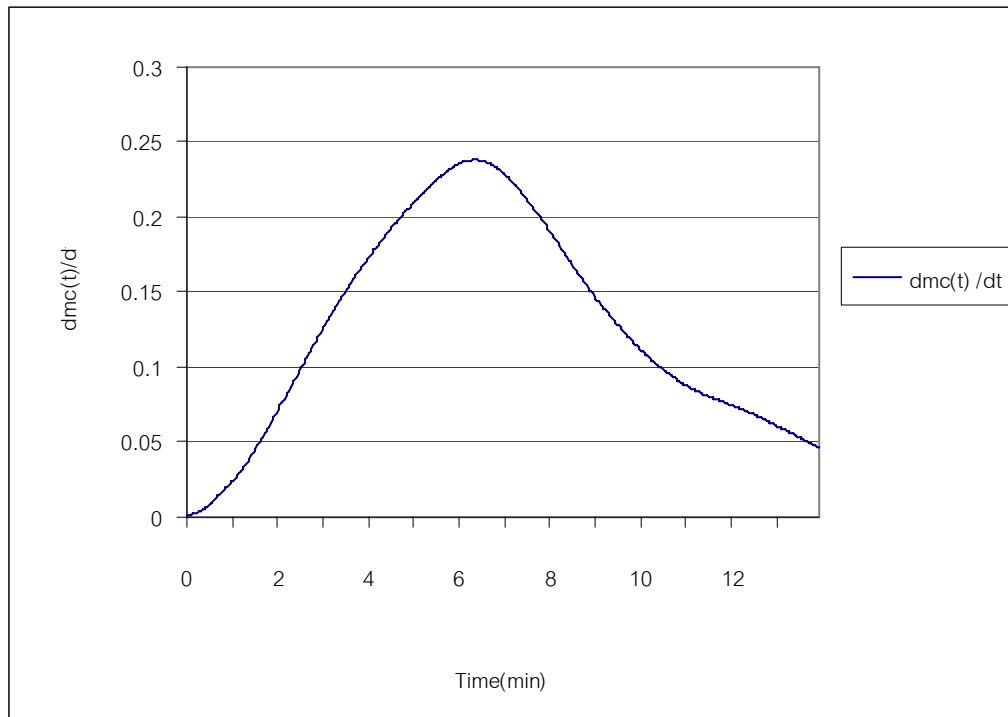
ภาพที่ ข-43 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s

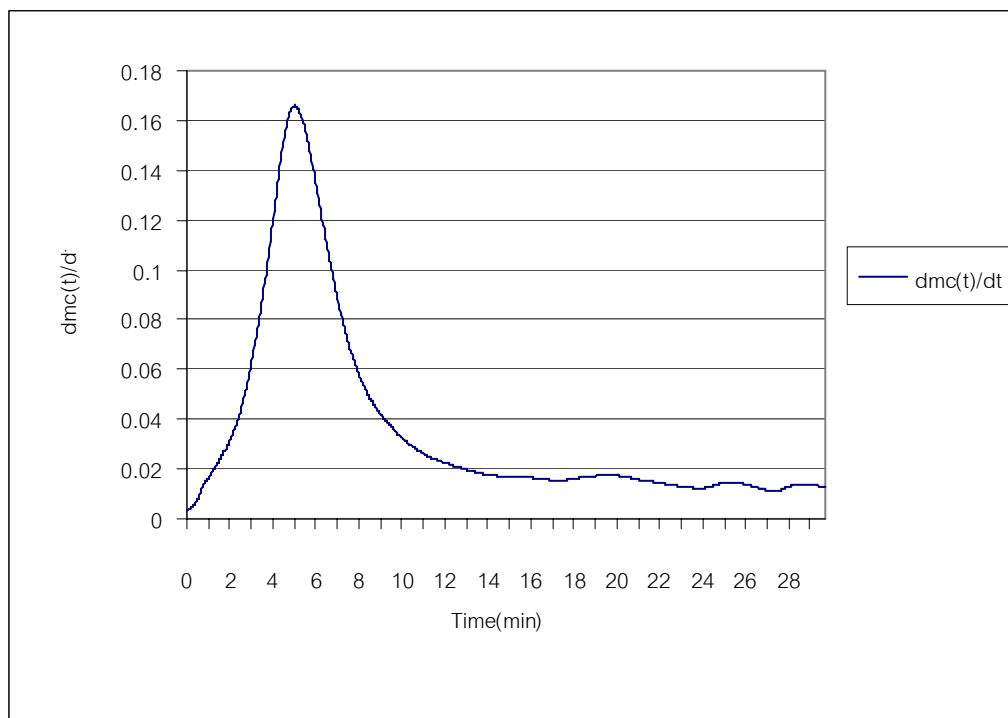


ภาพที่ ข-44 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

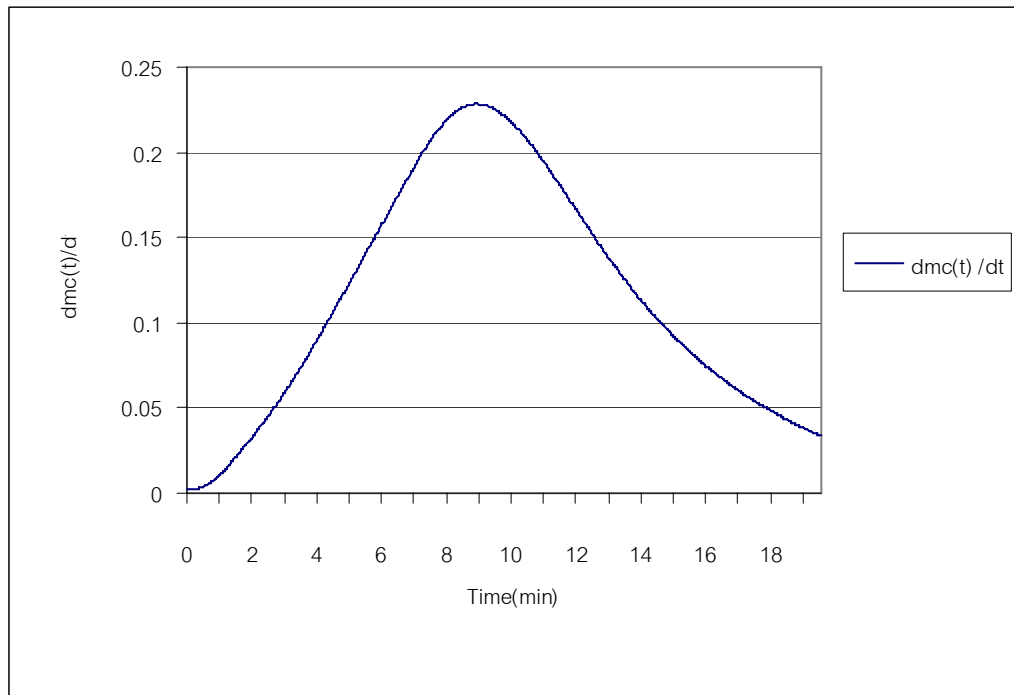
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



ภาพที่ ข-45 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s

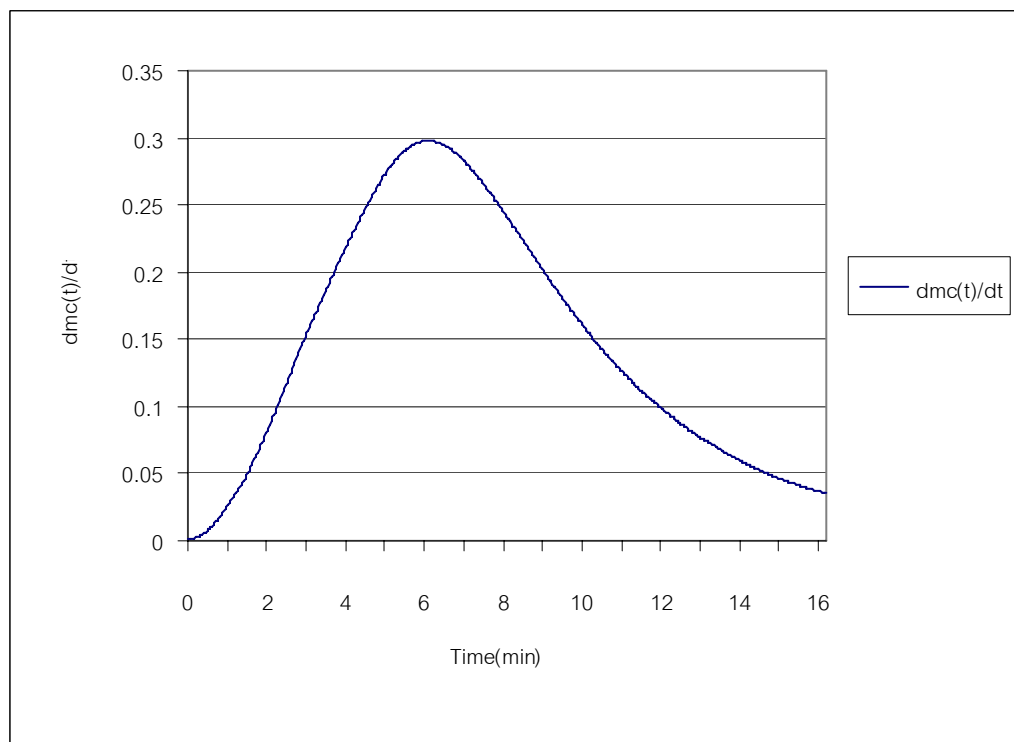


ภาพที่ ข-46 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



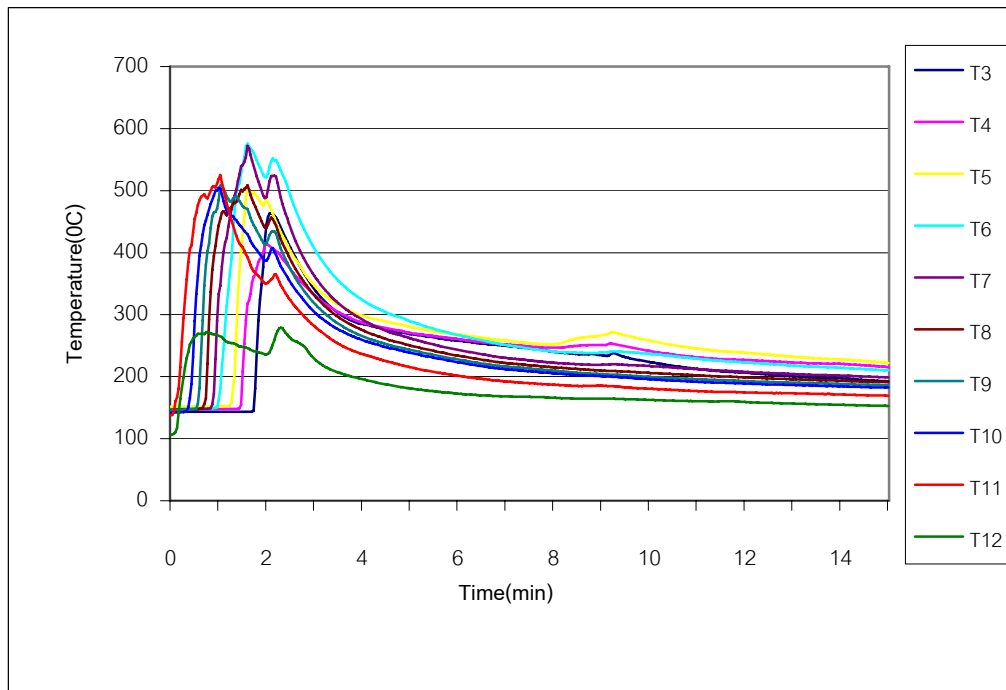
ภาพที่ ข-47 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

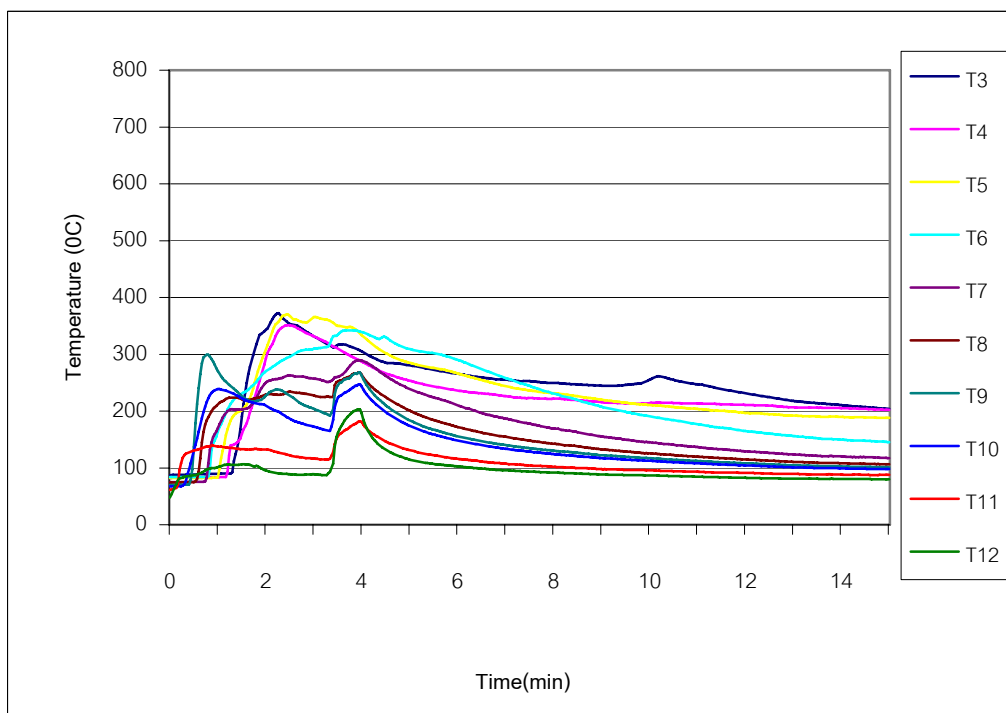


ภาพที่ ข-48 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=150^{\circ}\text{C}$

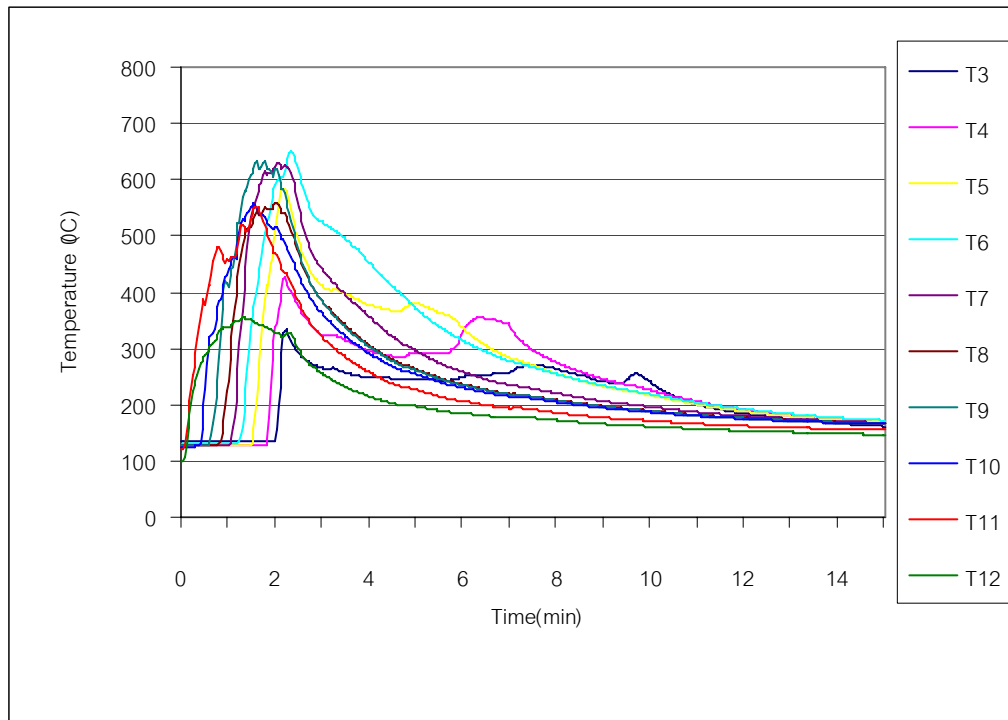
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



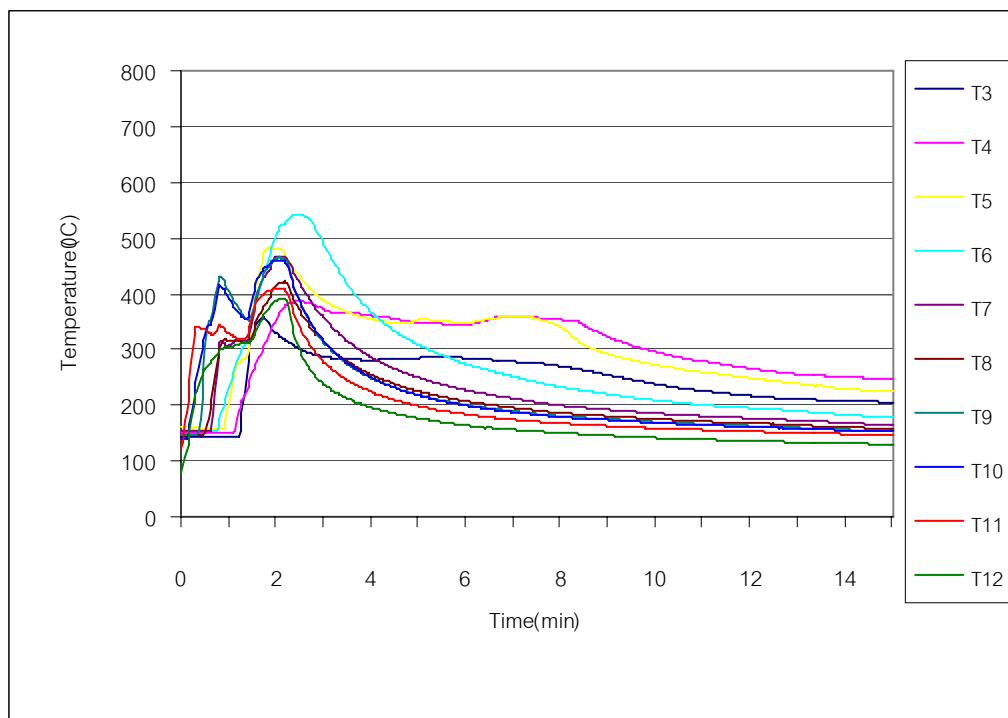
ภาพที่ ข-49 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



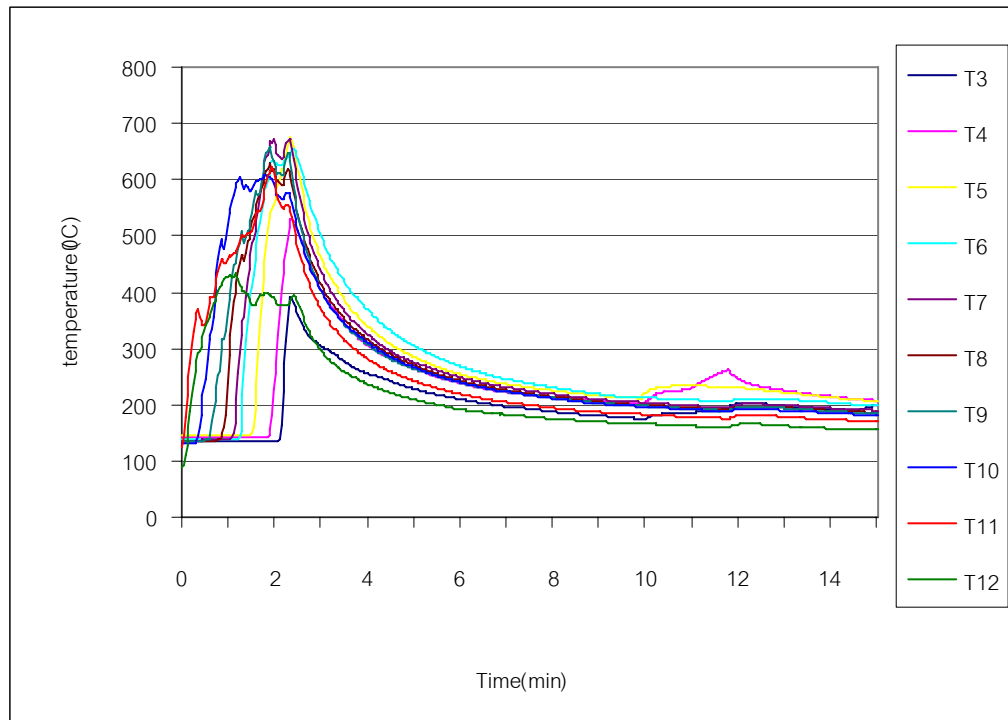
ภาพที่ ข-50 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



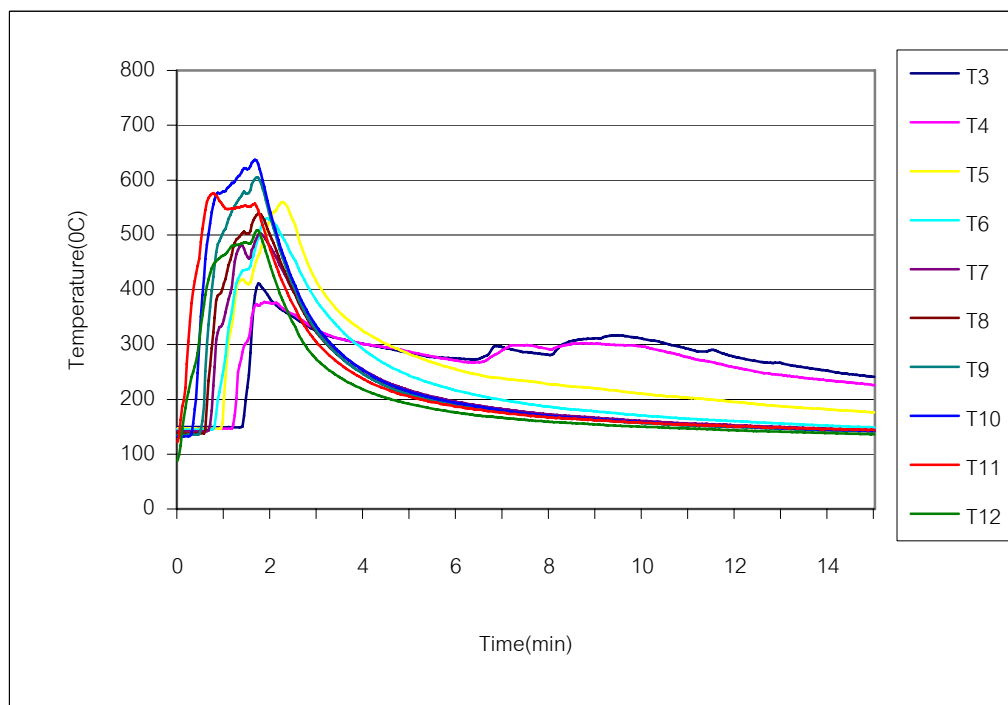
ภาพที่ ข-51 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



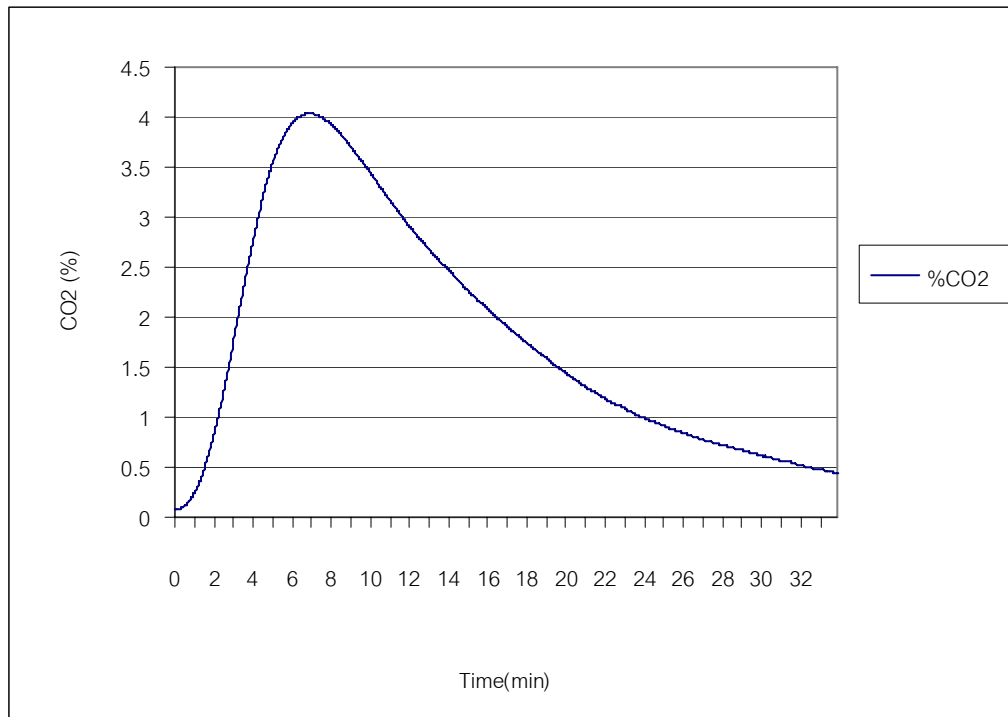
ภาพที่ ข-52 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



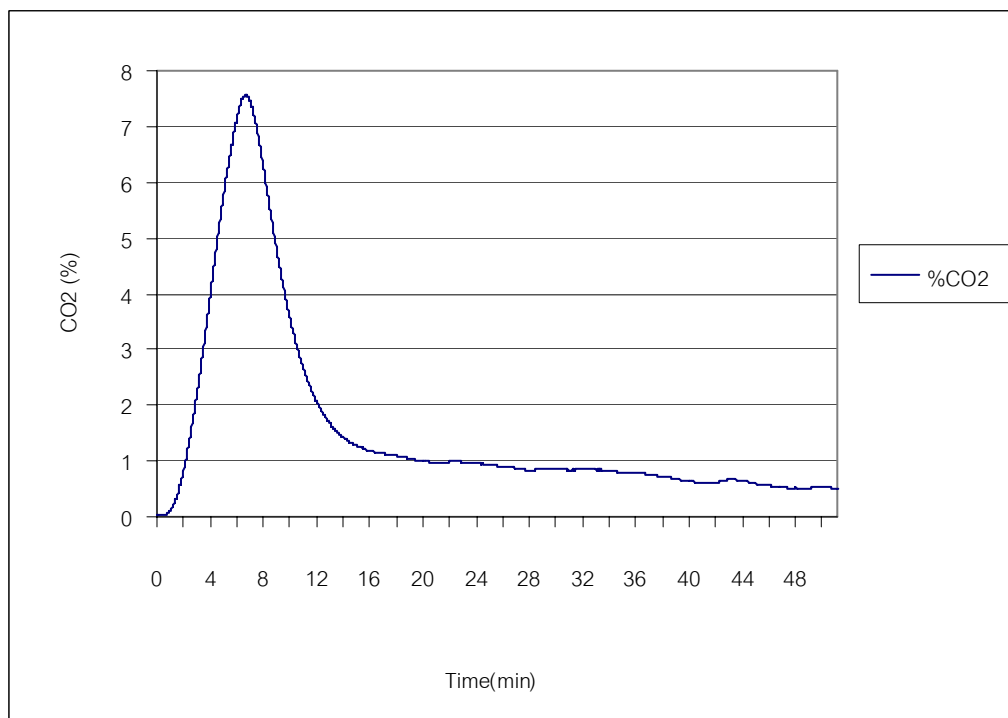
ภาพที่ ข-53 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



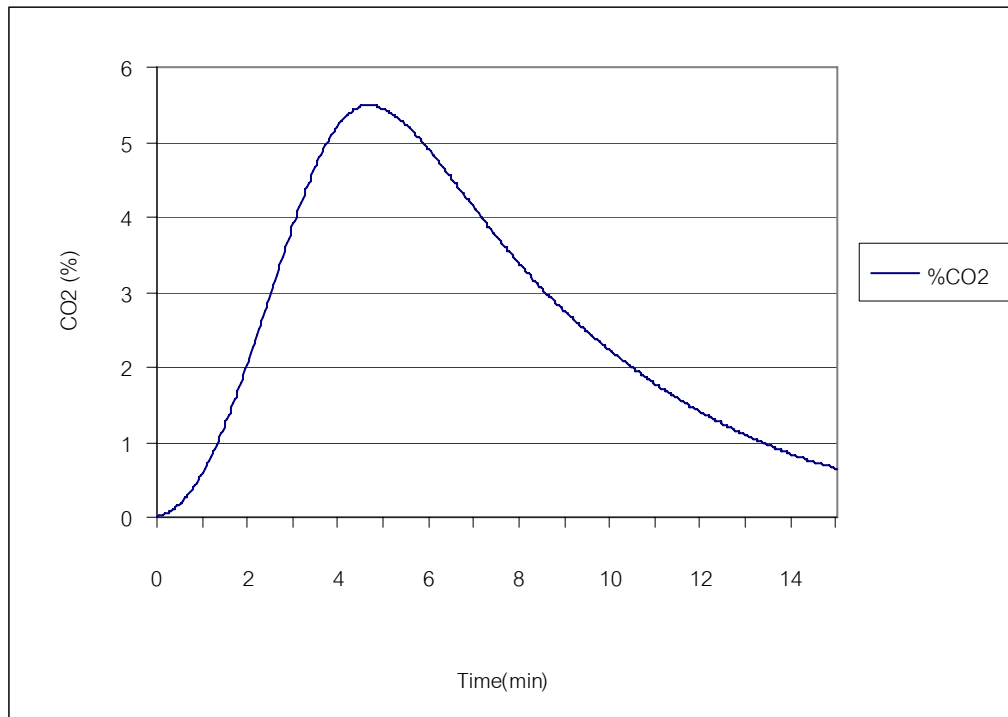
ภาพที่ ข-54 แสดงการแปรผันอุณหภูมิตามเวลา ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



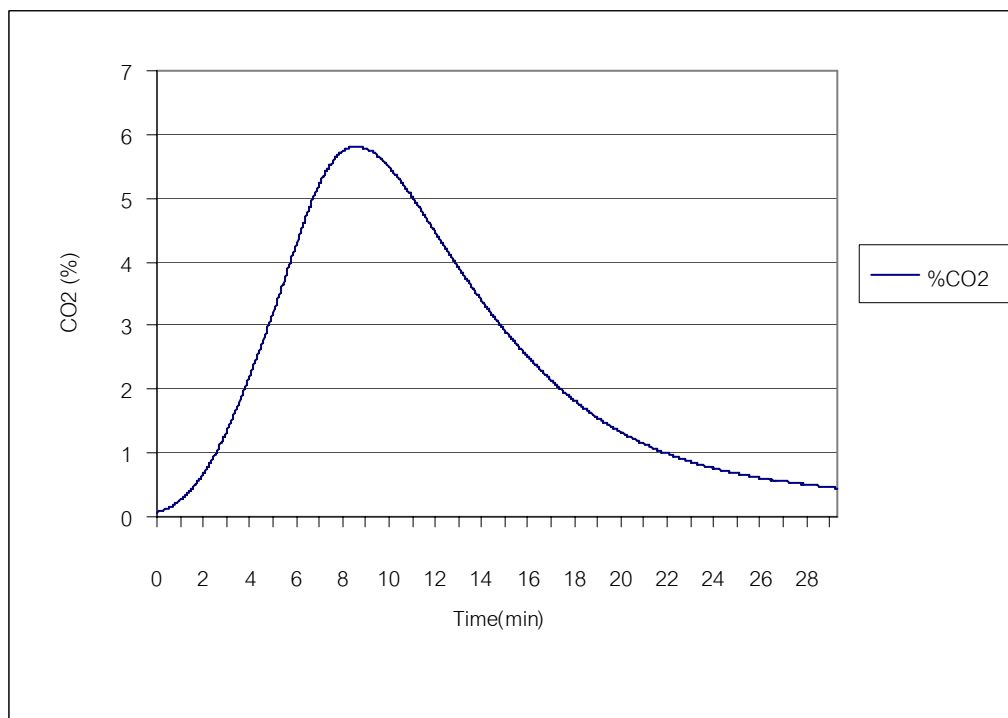
ภาพที่ ข-55 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=200⁰ C
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



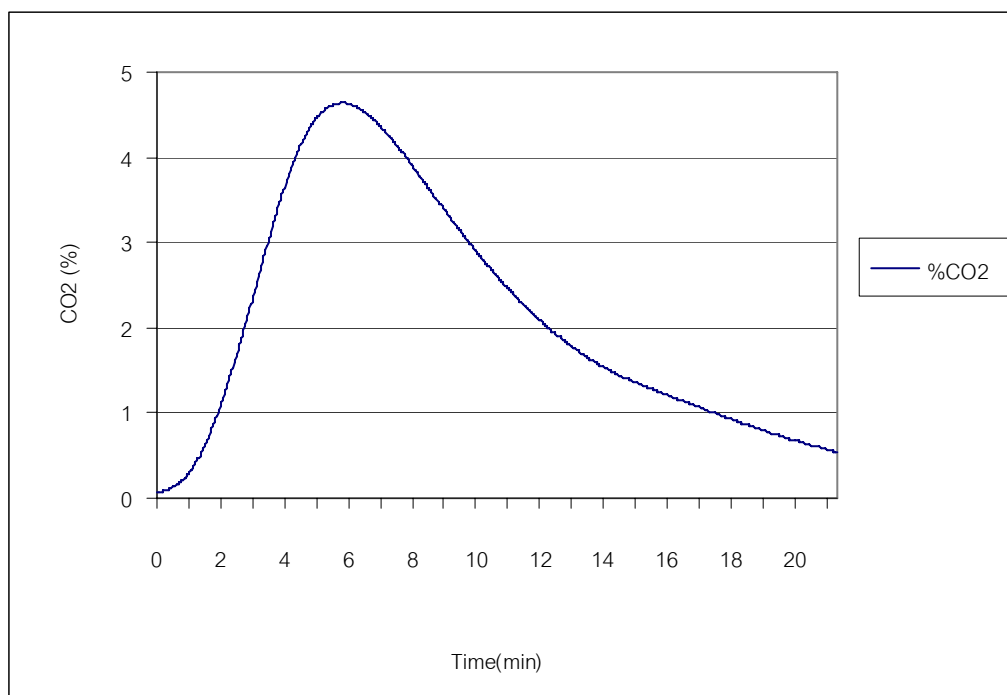
ภาพที่ ข-56 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=200⁰ C
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



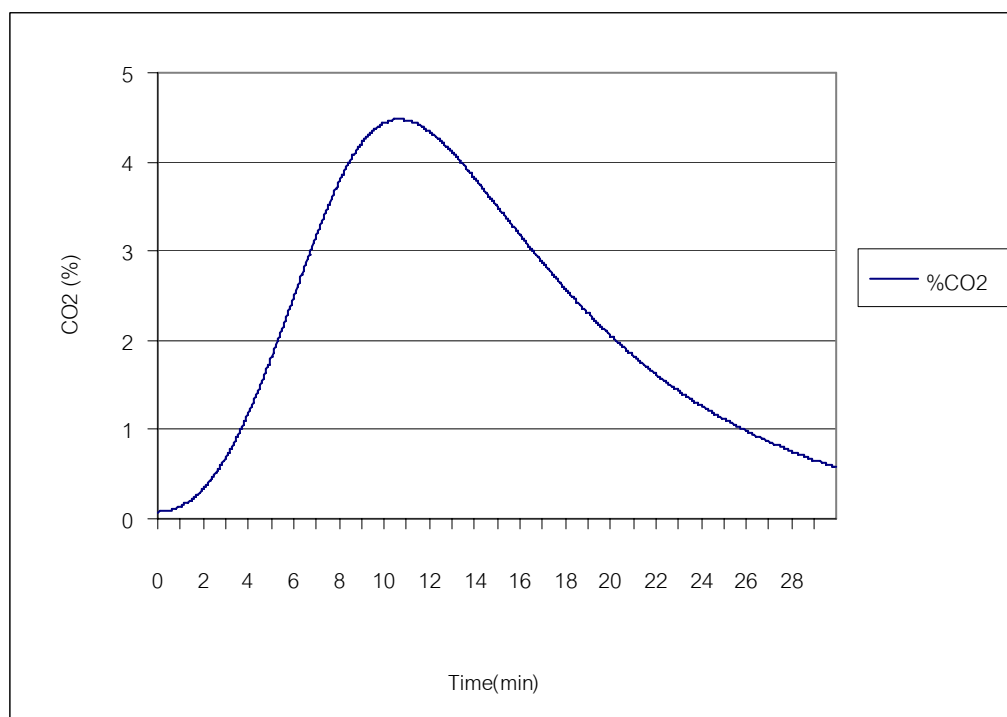
ภาพที่ ข-57 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=200⁰ C
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



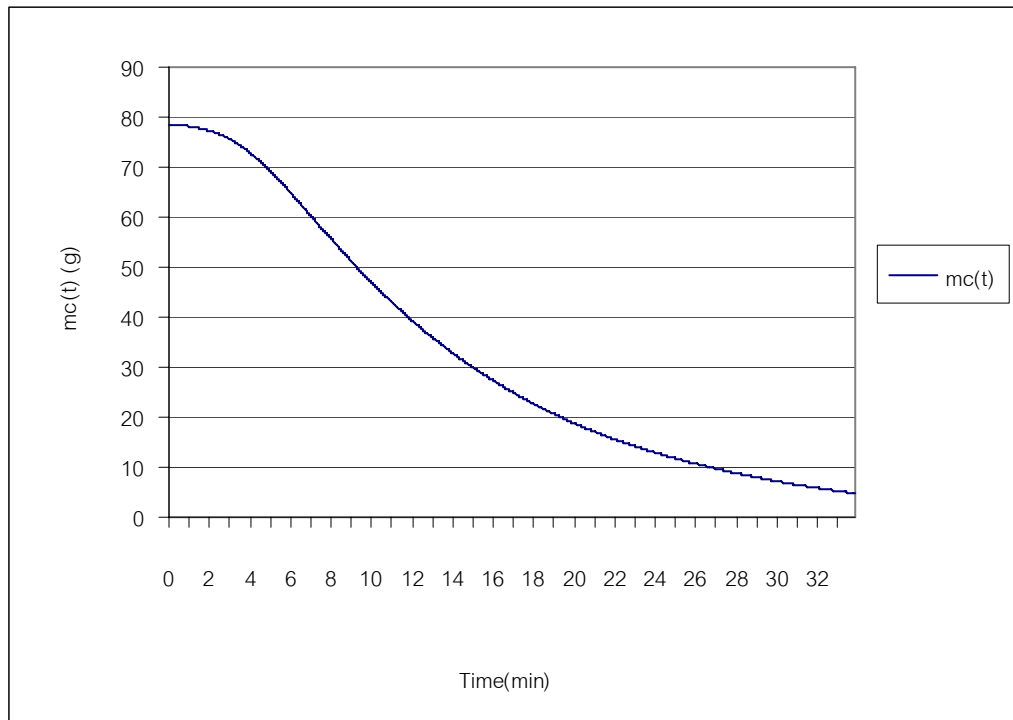
ภาพที่ ข-58 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=200⁰ C
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



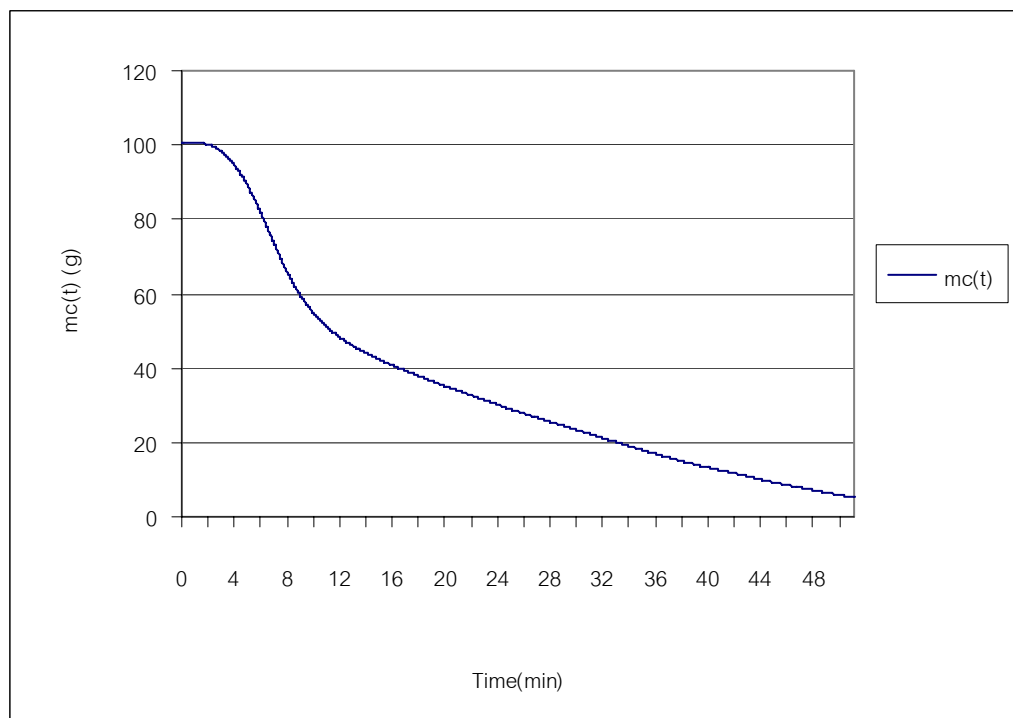
ภาพที่ ข-59 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=200⁰ C
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



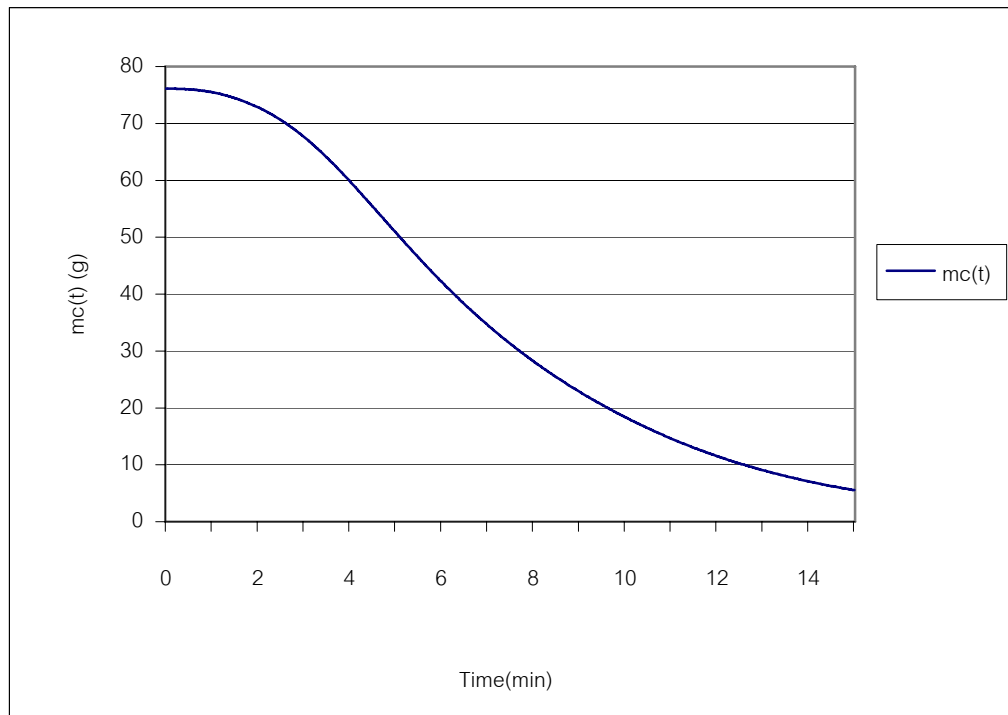
ภาพที่ ข-60 แสดงปริมาณก๊าซ CO₂ ของการเผาไหม้ที่ T=200⁰ C
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



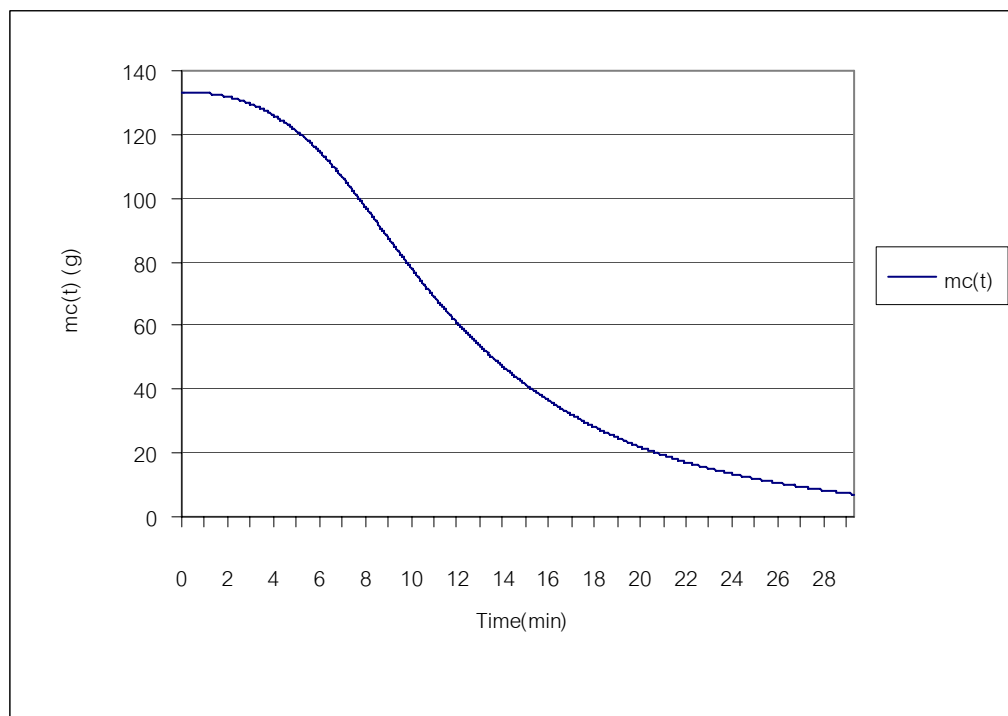
ภาพที่ ข-61 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



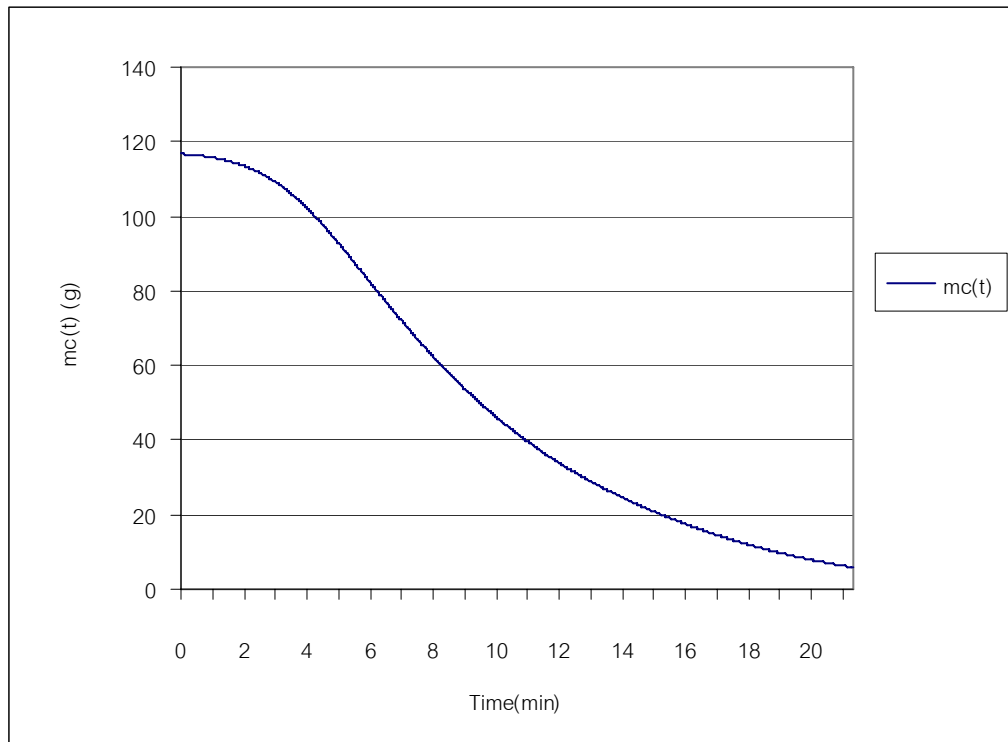
ภาพที่ ข-62 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



ภาพที่ ข-63 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s

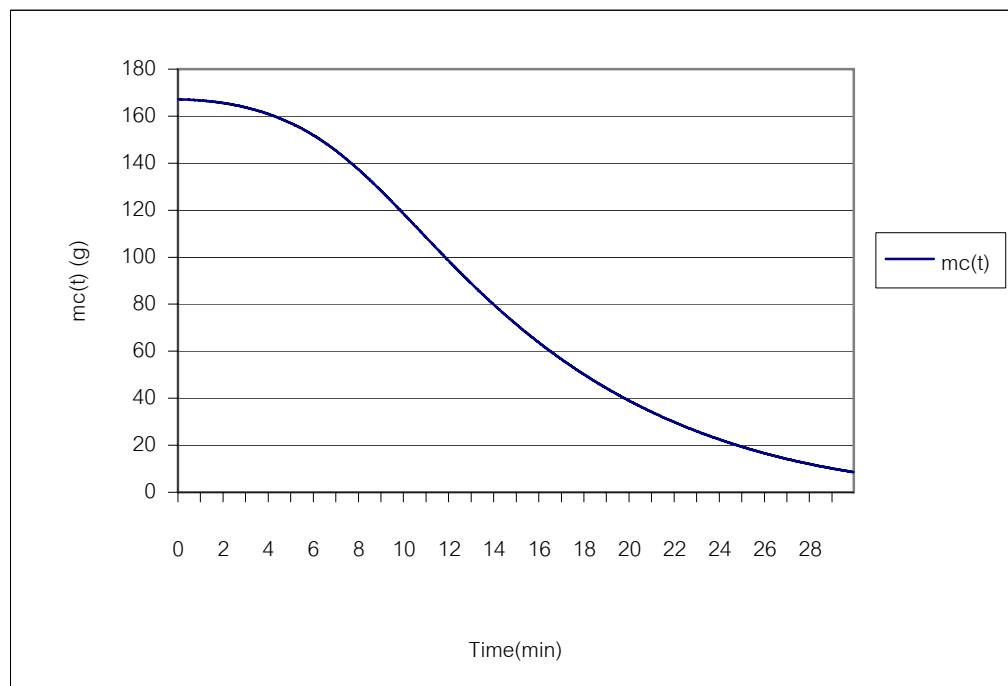


ภาพที่ ข-64 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



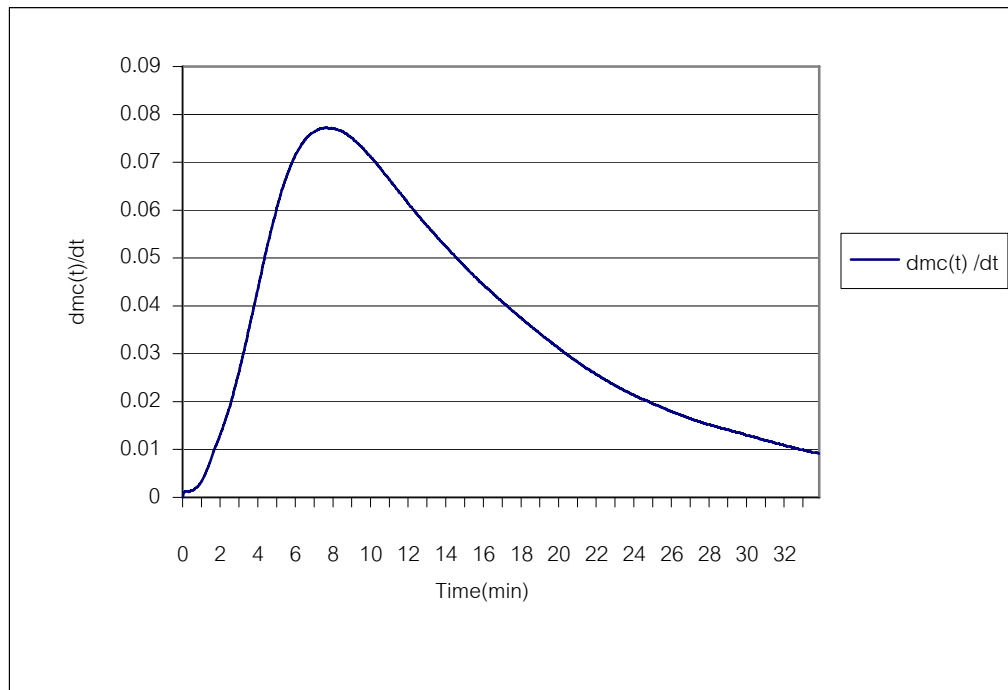
ภาพที่ ข-65 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$

Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s

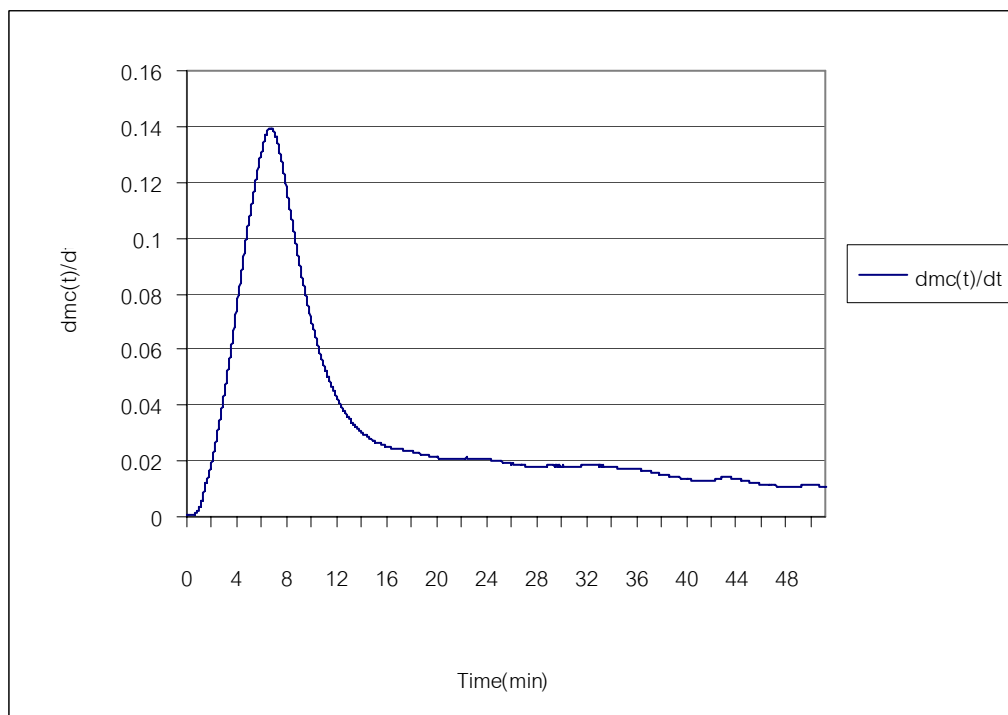


ภาพที่ ข-66 แสดงมวลคาร์บอนของการเผาไหม้ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$

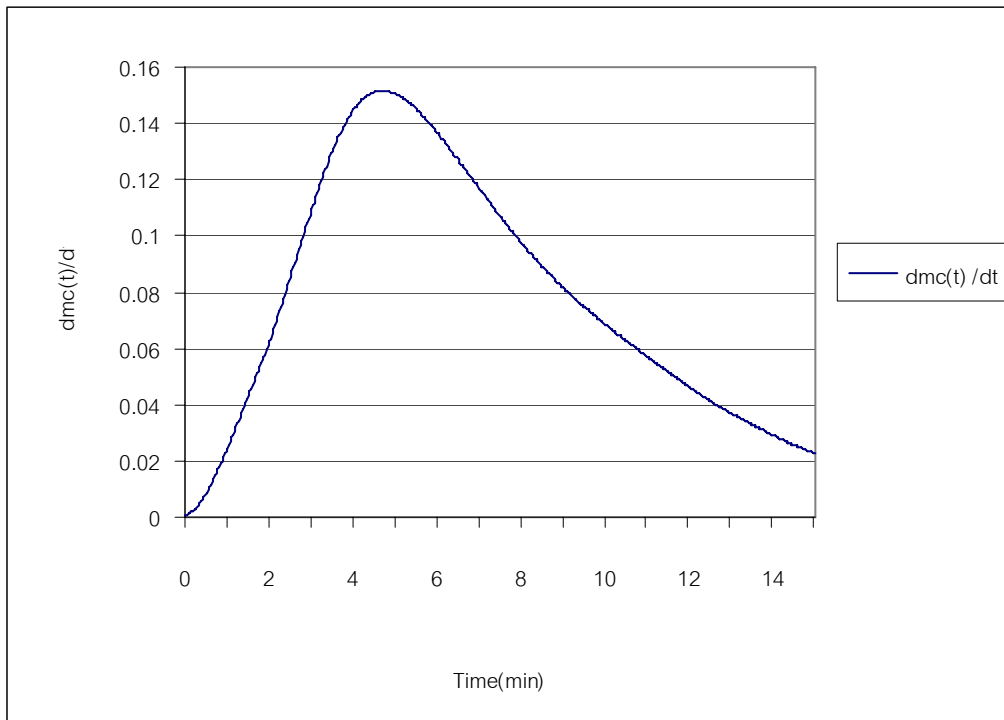
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



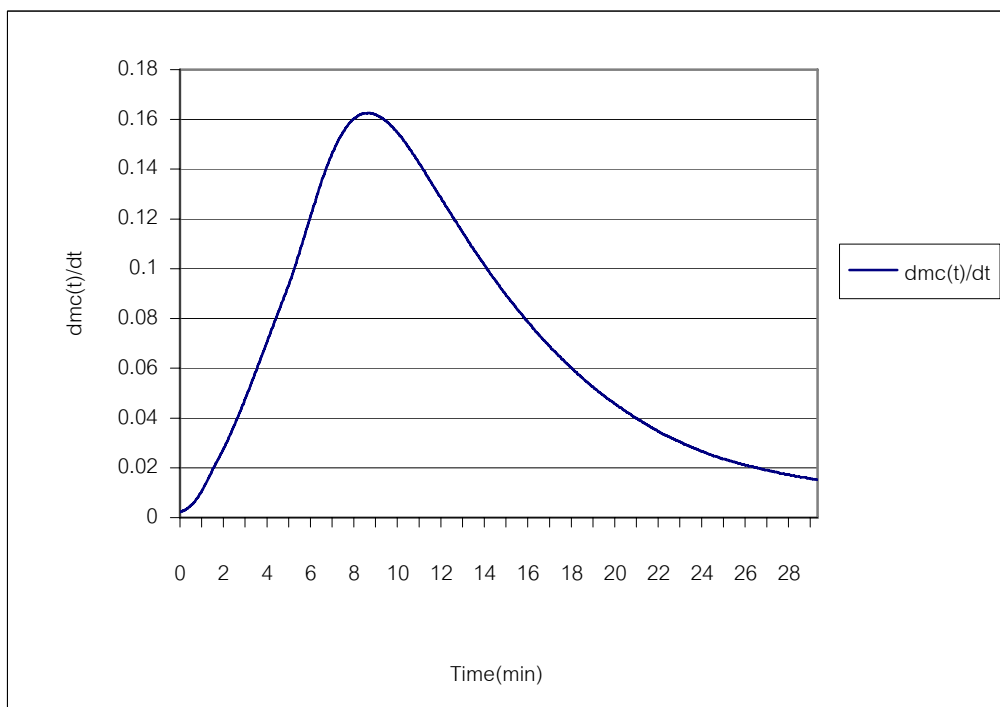
ภาพที่ ข-67 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s



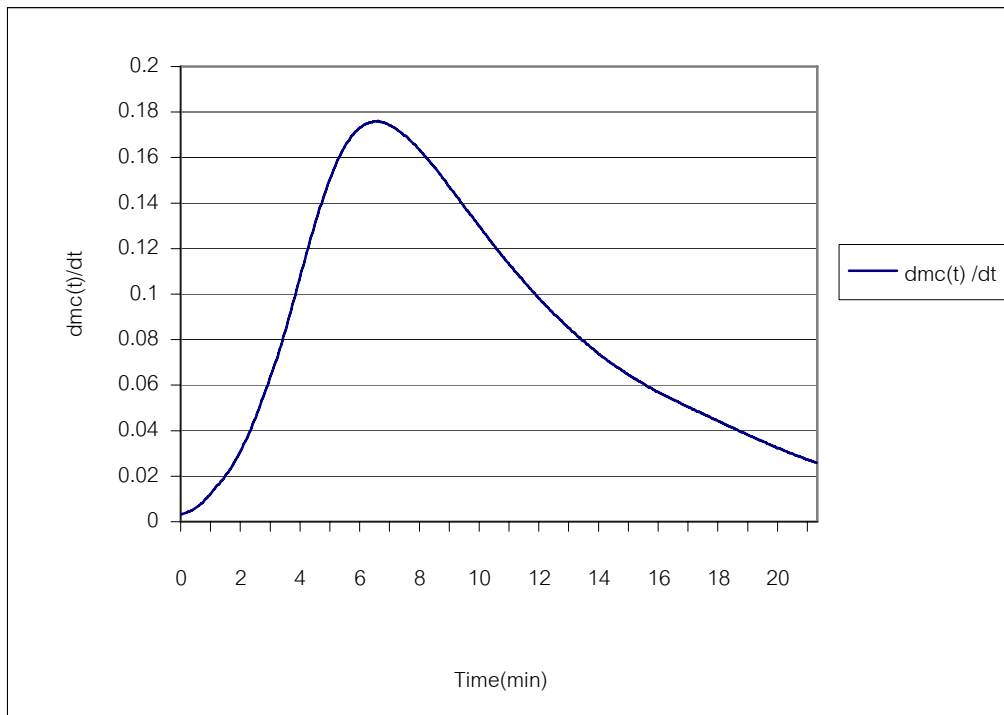
ภาพที่ ข-68 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 200 LPM ความเร็วอากาศ 0.094 m/s



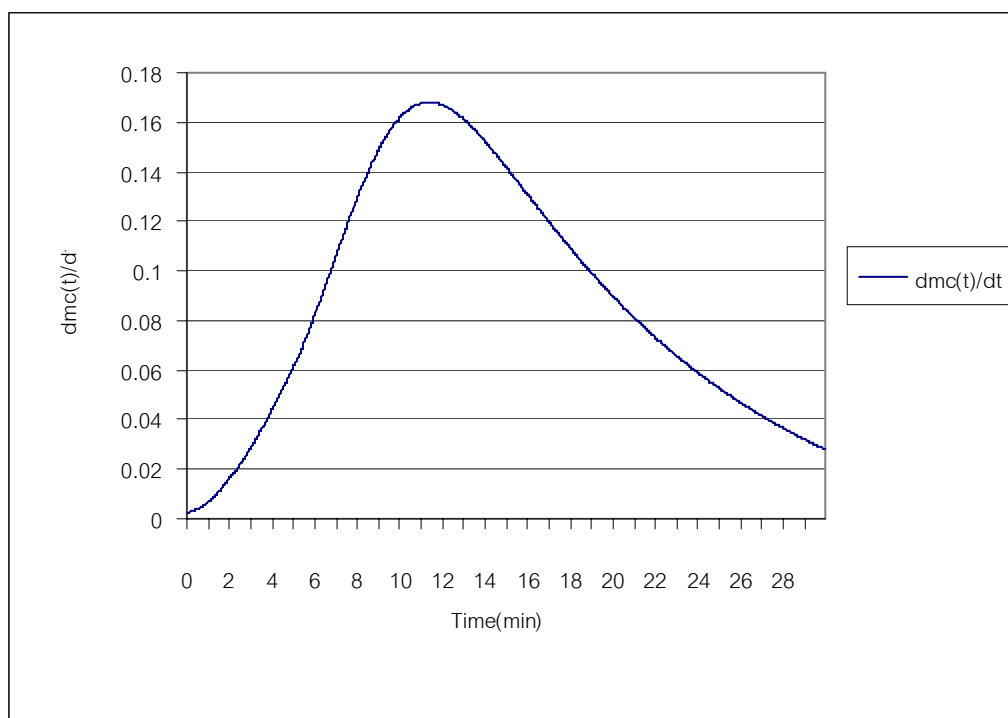
ภาพที่ ข-69 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.282 m/s



ภาพที่ ข-70 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อ้อย ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 300 LPM ความเร็วอากาศ 0.141 m/s



ภาพที่ ข-71 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.377 m/s



ภาพที่ ข-72 แสดงอัตราการเผาไหม้มวลคาร์บอนของการเผาไหม้อยู่ที่ $T=200^{\circ}\text{C}$
Total Air 400 LPM ความเร็วอากาศ 0.188 m/s

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายสุนทร ละอองนวล

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลักซ์เบด

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว

เกิดวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2514 ที่อยู่ปัจจุบัน 103 หมู่ 5 ต.ยู่งทะลาย อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี

72160

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษา ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ.2538

ประวัติการทำงาน

เป็นครูผู้สอน โรงเรียนเทคโนโลยีนครปฐม ทำหน้าที่สอนวิชา ความแข็งแรงของวัสดุ กลศาสตร์ของของไหล การปฏิบัติงานทดลองเครื่องกล งานซ่อมบำรุงรถยนต์ และอื่นในระดับ ปวช. ปวส. และได้รับหน้าที่นอกเหนือจากการสอน เช่น ผู้ช่วยงานวิชาการ ผู้ช่วยงานส่งเสริม ผู้ช่วยงานปกครอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2535 จนถึง พ.ศ.2546