

เตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

VORTEXING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK

นิยม ศรีศรีสัตติกุล

NIYOM SRISIRISITTIKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-939-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

VORTEXING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK



นิยม ศรีศิริสิทธิกุล

NIYOM SRISIRISITTIKUL

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 49323  
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-939-7

**VORTEXING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FOR BURNING RICE HUSK**

**NIYOM SRISIRISITTIKUL**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2003**

**ISBN 974-324-939-7**

**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**



หัวข้อวิทยานิพนธ์	เตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน
นักศึกษา	นายนิยม ศรีศิริสิทธิกุล
รหัสประจำตัว	44062030
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(VFBC) ซึ่งเตาเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 mm. โดยความสูงเท่ากับ 2,720 mm. และมีการฉีดอากาศทุติยภูมิไว้ในแนวเส้นสัมผัสรอบผนังของเตาเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศภายในห้องเผาไหม้และเพื่อศึกษาอิทธิพลของคอคอด(throat) โดยได้ทำการติดตั้งคอคอดบริเวณของส่วนบนห้องเผาไหม้ จะส่งผลทำให้เกิดการหมุนวนกลับไปมา (recirculation) ซึ่งจะทำให้เกิดความปั่นป่วนของอนุภาคและเป็นผลทำให้อนุภาคแกลบอยู่ภายในเตาได้นานขึ้น โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ ) เท่ากับ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 ในการศึกษาอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิจึงทำการทดลองโดยกำหนดสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.0, 0.25 และ 0.4 ตามลำดับ ที่ภาระความร้อนของแกลบ (Heat load) 1 ค่า คือ 18 kg/hr. แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา (กรณีไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ) ,เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีไม่มีคอคอด (without throat) และเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอด (throat) และผลของการเปรียบเทียบการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอดจะมีลักษณะการเผาไหม้ดีกว่าเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีไม่มีคอคอดและเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา โดยจะพบว่ามลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้น้อยกว่า และจากการทดลองจะพบว่าที่ค่า  $\Phi$  เท่ากับ 0.25 และ  $\lambda = 0.4$  กรณีมีคอคอด ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr จะให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอ พบว่าอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 850 °C โดยควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อยและจากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอด พบว่าประกอบด้วย O<sub>2</sub> = 8.5 %, CO<sub>2</sub> = 6.5 %, CO = 305 ppm., NO = 298 ppm., NO<sub>x</sub> = 298 ppm. และประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 98.92 %

<b>Thesis Title</b>	Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk
<b>Student</b>	Mr. Niyom Srisirisittikul
<b>Student ID.</b>	44062030
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

### ABSTRACT

The thesis presents the combustion characteristic investigations of rice husk in a vortexing fluidized bed combustor. (VFBC) The combustor is a cylindrical shape with 300 mm inside diameter and 2,720 mm height. To induce vortex flow, secondary air is injected tangentially into the combustion chamber. Besides, a vortexing ring or throat is installed on the top chamber to create a circulation zone downstream of throat that helps good mixing between fuel and air and increases residence time of fuel particles. The study is made by considering the uniform and high temperature distributions inside the chamber for each of the equivalence ratio, ( $\Phi$ ), adjusted to be 0.2, 0.25, 0.3 and 0.35. In each run of  $\Phi$ , the fraction of secondary air to total air flow rate, ( $\lambda$ ) is set to 0.0, 0.25 and 0.4 to study the effect of secondary air. Moreover, heat load or fuel feeding rate is at 18 kg/hr. The experiments can be classified into 3 case; fluidized bed, vortexing fluidized bed and vortexing fluidized bed with vortex ring. The performance is considered in terms of uniform and high temperature distribution and low emission for three cases compared. At  $\Phi=0.25$  and  $\lambda=0.4$  and the VFBC with vortex ring yields the best performance by considering uniform temperature distributions with maximum temperature around 850 °C, and less smoke. From exhaust gas emission measurement, it is found that  $O_2= 8.5\%$ ,  $CO_2= 6.5\%$ ,  $CO=305$  ppm.,  $NO=298$  ppm.,  $No_x=298$  ppm. and Combustion efficiency is 98.92 %.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำสั่งสอน , ให้คำแนะนำ , ให้คำปรึกษาและความกรุณาของ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และที่ปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณ ผศ.ดร.จารุวัฒน์ เจริญสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ผศ.จำลอง ปราบแก้ว, ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์, ผศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ที่กรุณาให้คำชี้แนะในครั้งนี้

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ลูกศิษย์คนนี้ ขอขอบพระคุณยิ่ง

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ ผศ.ดร.รุ่งเรือง พิทยศิริ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้อนุเคราะห์ rotameter ปรับเทียบเครื่องมือวัดและให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณบิดา มารดาและญาติ ๆ ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ เลี้ยงดูและคอยอบรมสั่งสอนให้ ผู้วิจัยก้าวมาถึงวันนี้

ขอขอบคุณนายสมชาย ศรีพัฒนพิพัฒน์, นายสมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด, นายสมศักดิ์ โพธิ์ถวิล เกียรติ, นายวิศิษฐ์ ติลาผาดิกุล, นายเมืองแก้ว ยุตัน, นายยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ, นายการุณ เลาะมาน, นายบุญชัย ศิลปกิจวงษ์กุล และอาจารย์ มลฑา เทียมเมือง ที่คอยคำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ได้อนุเคราะห์ให้ทดสอบผลการหาเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของซีเมนต์แกลบ

ขอขอบคุณนางสาวกัญทิมา พาดกลาง เพื่อนที่คอยให้กำลังใจแก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณรุ่นน้องปริญญาตรี(กลุ่มเตาเผา) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ลงแรงช่วยเหลือในการทดลอง

ขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงสีไฟศรีกรุงลาดกระบัง ที่ได้อนุเคราะห์เชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยนี้จากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

ขอแสดงความขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

นิยม ศรีศิริสิทธิกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ.....	5
2.2.1.1 งานวิจัยของ วิศิษฐ์ สีสานพาคกุล.....	5
2.2.1.2 งานวิจัยของ เสรีย์ ตู้ประกาย.....	6
2.2.1.3 งานวิจัยของ ศศิวิมล สูงสว่าง.....	7
2.2.1.4 งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ.....	8
2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ.....	9
2.2.2.1 งานวิจัยของ W.Permchart และคณะ.....	9
2.2.2.2 งานวิจัยของ Teng และคณะ.....	10
2.2.2.3 งานวิจัยของ LIN และคณะ.....	12
2.2.2.4 งานวิจัยของ S.Nieh และคณะ.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.5 งานวิจัยของ CHYANG และคณะ .....	15
2.2.2.6 งานวิจัยของ WAN และ CHYANG .....	16
บทที่ 3 ทฤษฎี .....	20
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล .....	20
3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	20
3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	21
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ .....	21
3.2.1 การผสม .....	22
3.2.2 การติดไฟและการลุกไหม้ .....	23
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง .....	23
3.4 อัตราส่วนสมมูล .....	26
3.5 ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชัน .....	26
3.5.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชัน .....	26
3.5.2 ลักษณะฟลูอิดไดซ์เบด .....	27
3.5.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดตามสมบัติของอนุภาค .....	29
3.5.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดซ์เซชัน .....	29
3.5.5 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน .....	31
3.5.6 แผ่นกระจายของไหล .....	34
3.6 กระบวนการเผาไหม้อนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด .....	36
3.7 การลุกติดไฟของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด .....	37
3.8 การหมุนวนของอากาศทุติยภูมิ .....	38
3.9 การกระจายตัวของความเร็ว .....	39
3.10 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ .....	41
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ .....	42
4.1 บทนำ .....	42
4.2 การออกแบบเตาเผา .....	42
4.2.1 ขนาดของเตาเผาที่เหมาะสม .....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ระบบการป้อนอากาศทุติยภูมิ.....	43
4.2.3 ระบบการป้อนเชื้อเพลิง.....	44
4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	46
<b>บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....</b>	<b>50</b>
5.1 บทนำ.....	50
5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองและการเก็บข้อมูล.....	50
5.2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	50
5.2.1.1 ชุดประกอบเตาเผา.....	50
5.2.1.2 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	53
5.2.1.3 ชุดป้อนเชื้อเพลิงแก๊ส.....	54
5.2.1.4 ชุดอุ่นเตา.....	55
5.2.1.5 ชุดอุปกรณ์วัดและอ่านค่าอุณหภูมิ.....	56
5.2.1.6 ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	57
5.2.1.7 ชุดวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย.....	58
5.2.1.8 ชุดกำจัดเถ้าลอย.....	59
5.2.2 อุปกรณ์ชุดควบคุม.....	59
5.2.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHN Determinator.....	60
5.3 ขั้นตอนการเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศผ่าน Orifice meter.....	
เทียบกับ Flow meter.....	61
5.4 ขั้นตอนการเปรียบเทียบอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	61
5.5 ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน.....	62
5.6 ขั้นตอนการทดลอง.....	63
5.6.1 ขั้นตอนการอุ่นเตา.....	63
5.6.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	64
5.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน.....	65
<b>บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์.....</b>	<b>66</b>
6.1 บทนำ.....	66

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2	เตาเผาฟลูอิดไคซ์แบบอากาศหมุนวนกรณีไม่มีคอคอด .....	66
6.2.1	อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล, $\Phi$ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr ...	66
6.2.1.1	กรณีไม่มีการฉีดอากาศหมุนวน $\lambda = 0.0$ .....	66
6.2.1.2	กรณีมีการฉีดอากาศหมุนวน ก) ฉีดอากาศหมุนวน 25% ของอากาศทั้งหมด .....	
	$\lambda = 0.25$ .....	68
6.2.1.3	กรณีมีการฉีดอากาศหมุนวน ข) ฉีดอากาศหมุนวน 40% ของอากาศทั้งหมด .....	
	$\lambda = 0.4$ .....	70
6.2.2	อิทธิพลของ $\lambda$ .....	70
6.2.2.1	กรณี $\Phi = 0.2$ .....	70
6.2.2.2	กรณี $\Phi = 0.25$ .....	72
6.2.2.3	กรณี $\Phi = 0.3$ .....	74
6.2.3	ก๊าซไอเสียในกรณีไม่มีการติดตั้งคอคอด .....	74
6.3	เตาเผาเมื่อมีคอคอด(Throat) .....	77
6.3.1	อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล, $\Phi$ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr ....	77
6.3.1.1	กรณีไม่มีการฉีดอากาศหมุนวน ก) $\lambda = 0.0$ .....	77
6.3.1.2	กรณีมีการฉีดอากาศหมุนวน ข) ฉีดอากาศหมุนวน 25% ของอากาศทั้งหมด .....	
	$\lambda = 0.25$ .....	78
6.3.1.3	กรณีมีการฉีดอากาศหมุนวน ค) ฉีดอากาศหมุนวน 40% ของอากาศทั้งหมด .....	
	$\lambda = 0.4$ .....	79
6.3.2	อิทธิพลของ $\lambda$ .....	82
6.3.2.1	กรณี $\Phi = 0.2$ .....	82
6.3.2.2	กรณี $\Phi = 0.25$ .....	82
6.3.2.3	กรณี $\Phi = 0.3$ .....	84
6.3.3	ก๊าซไอเสียเมื่อเตามีคอคอด .....	85
6.4	การเปรียบเทียบก๊าซไอเสียจากเตาเผา ระหว่างกรณีมีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอด ....	88
6.4.1	กรณี $\lambda = 0.25$ .....	88
6.4.2	กรณี $\lambda = 0.4$ .....	88
6.5	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา VFBC .....	89

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	91
7.1 สรุปผล.....	91
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	92
บรรณานุกรม .....	93
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงแกลบและการคำนวณหาขนาดของเตาเผา.....	95
ภาคผนวก ข. การปรับเทียบอุปกรณ์ในการทดลอง .....	102
ภาคผนวก ค. Measurement Certificate Variable Area Flowmeter ABB รุ่นAM54.....	109
ภาคผนวก ง. Calibration Certificate Flue gas analyser Testo 300M-I.....	111
ภาคผนวก จ. รายละเอียดของเครื่องวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์คาร์บอน, ไฮโดรเจนและไนโตรเจน	113
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	142

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เงื่อนไขในการทดสอบสำหรับการวัดอนุภาค .....	15
2.2 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบแบบ Cold Model .....	16
2.3 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบความสูงของการหลุดลอยส่งผ่านและอัตราของการหลุดลอยของ อนุภาคในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด .....	17
3.1 ค่า $K_1$ และ $K_2$ จากคณะวิจัยต่าง ๆ .....	32
4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ .....	46
4.2 แสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองกรณีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 18 kg/hr .....	49
5.1 แสดงส่วนประกอบของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน .....	52
5.2 แสดงช่วงของปริมาณก๊าซไอเสียที่สามารถวิเคราะห์ได้ .....	58

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไคอะแกรมการทดลองของเตาออร์ทเทคหลายชั้น (MVC) .....	6
2.2 แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นตัวเตา .....	7
2.3 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	8
2.4 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด .....	9
2.5 ไคอะแกรมการทดลองของเตาเผา Conical FBC.....	10
2.6 ลักษณะของเตาดันแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) .....	11
2.7 ไคอะแกรมของระบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (VFBC).....	13
2.8 ไคอะแกรมอุปกรณ์ในการทดลอง Cold model และรายละเอียดของห้องเผาไหม้.....	14
2.9 อุปกรณ์ในการทดสอบของลักษณะในการหลุดลอยของอนุภาค.....	17
3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง.....	24
3.2 ปฏิกริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง .....	24
3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง .....	25
3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้.....	25
3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้ .....	25
3.6 แสดงระดับของเบดในห้องทดลอง.....	27
3.7 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด .....	28
3.8.เป็นแผนภูมิ Geldart ใช้กับฟลูอิดไคซ์เบดที่มีอากาศเป็นตัวกลางที่สภาวะปกติและความเร็ว .....	
อากาศต่ำกว่า 10 Umf มีประโยชน์บ่งถึงลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อทราบขนาดและความ.....	
หนาแน่นของอนุภาค .....	29
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด .....	30
3.10 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู .....	34
3.11 คุณภาพของฟลูอิดไคซ์เซชันเกินจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน .....	35
3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_{p, or}$ กับ เรย์โนลด์สเบอร์ (Re <sub>p</sub> ).....	36
3.13 รูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค : a, b, เป็น preignition และ c, d, e เป็น postignition .....	37
3.14 ปรัชญาการณ Recirculation.....	40
3.15 อธิบายปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิกของเตา VFBC.....	40
4.1 แสดงความสูงของขนาดเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอด (ก) .....	
และกรณีไม่มีคอคอด (ข) .....	43
4.2 แสดงตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ(Secondary Air)และคอคอด(Throat).....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงเหลว.....	44
5.1 แสดงลักษณะของเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) กรณีมีคอคอด.....	51
5.2 ลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงกับอากาศ .....	53
5.3 แสดงBlower และ Motor .....	53
5.4 แสดงमानอมิเตอร์.....	54
5.5 แสดงชุดแยกอากาศทุติยภูมิ .....	54
5.6 แสดงชุดป้อนเชื้อเพลิงเหลว .....	55
5.7 แสดงมอเตอร์และชุดสายพาน .....	55
5.8 แสดงถังแก๊ส .....	56
5.9 แสดงหัวเผาที่ใช้สำหรับอุ่นเตา .....	56
5.10 แสดงเทอร์โมคัพเปิ้ลและดิจิตอลอินดิเคเตอร์ .....	56
5.11 แสดง Thermocouple type K.....	57
5.12 แสดง Armored Variable Area Flowmeter .....	57
5.13 Gas Analyzer Testo 300 MI .....	58
5.14 แสดงไซโคลน .....	59
5.15 Inverter .....	59
5.16 DC. Power Supply .....	60
5.17 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHN Determinator รุ่น CHN 900 .....	60
5.18 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับเทียบแผ่น Orifice meter .....	61
5.19 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน.....	62
6.1 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดที่อัตราการป้อน เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\lambda$ เท่ากับ 0.0 .....	67
6.2 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดที่อัตราการป้อน เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\lambda$ เท่ากับ 0.25 .....	69
6.3 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดที่อัตราการป้อน เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\lambda$ เท่ากับ 0.4 .....	71
6.4 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดที่อัตราการป้อน เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\Phi$ เท่ากับ 0.2 .....	72
6.5 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\Phi$ เท่ากับ 0.25 .....	73
6.6 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\Phi$ เท่ากับ 0.3 .....	75
6.7 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง $O_2$ , $CO_2$ , $CO$ , $NO$ และ $NO_x$ กับ .....	
ค่าเท่ากับ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 เมื่อ $\lambda$ เท่ากับ 0.0, 0.25 และ 0.4 ภายในเตา VFBC .....	
กรณีไม่มีคอคอด .....	76
6.8 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\lambda$ เท่ากับ 0.0 .....	78
6.9 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\lambda$ เท่ากับ 0.25 .....	80
6.10 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\lambda$ เท่ากับ 0.4 .....	81
6.11 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\Phi$ เท่ากับ 0.2 .....	83
6.12 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\Phi$ เท่ากับ 0.25 .....	85
6.13 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอดที่อัตราการป้อน .....	
เชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่ $\Phi$ เท่ากับ 0.3 .....	86
6.14 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง $O_2$ , $CO_2$ , $CO$ , $NO$ และ $NO_x$ กับ .....	
ค่า $\Phi$ เท่ากับ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 เมื่อ $\lambda$ เท่ากับ 0.0, 0.25 และ 0.4 ภายในเตา VFBC .....	
กรณีมีคอคอด .....	89
6.15 การเปรียบเทียบผลของปริมาณก๊าซไอเสียระหว่างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศ .....	
หมุ่ขนาดกรณีที่มีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอด .....	90
6.16 การเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศ .....	
หมุ่ขนาดกรณีที่มีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอด .....	90

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

AF	อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง
$AF_{ac}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ
$AF_{th}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส, (m <sup>2</sup> )
$A_r$	พื้นที่หน้าตัดเบด, (m <sup>2</sup> )
$Ar$	เลขอาคิมีดิส (Archimedes number)
$C_d$	Drag Coefficient, (ไร้มิติ)
CO	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, (ppm.)
CO <sub>2</sub>	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, (% Vol.)
$C_p$	specific heat, ( J/kg.K)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผา, (m.)
$D_e$	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทิ้งไถ่ลอย
$d_p$	ขนาดของอนุภาค
$d_{or}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิซ
FEZ	Free Entrainment Zone
g	สัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วงของโลก, (m/s <sup>2</sup> )
h	ความสูงของเตาเผา, (m.)
H	ก๊าซไฮโดรเจน
$L_f$	height of a bubbling fluidized bed, (m.)
MW	มวลโมเลกุล, (kmol)
$m_a$	มวลของอากาศแห้ง, (kg)
$\dot{m}_{air}$	อัตราการไหลของอากาศ, (kg/s)
$\dot{m}_{fuel}$	อัตราการป้อนแก๊ส, (kg/min)
$m_g$	ปริมาณไอน้ำในอากาศสูงสุดที่อุณหภูมิใด ๆ, (kg)
$m_v$	มวลของไอน้ำ, (kg)
m.	เมตร
mm.	มิลลิเมตร
n	จำนวน โมล

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

NO	ไนโตริกออกไซด์, (ppm.)
NO <sub>2</sub>	ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์, (ppm.)
NO <sub>x</sub>	ออกไซด์ของไนโตรเจน, (ppm.)
N <sub>or</sub>	จำนวนรูของออริฟิซต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นกระจายลม
OD	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเตาเผา, (m.)
O <sub>2</sub>	ก๊าซออกซิเจน, (% Vol.)
P	ความดันของอากาศชั้น, (Pa)
P <sub>a</sub>	ความดันย่อยของอากาศแห้ง, (Pa)
P <sub>g</sub>	ความดันของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิใด ๆ, (Pa)
ppm.	ส่วนในล้านส่วน(part per million) หรือร้อยละ โดยปริมาตร
P <sub>v</sub>	ความดันไอน้ำ, (Pa)
Q <sub>ac</sub>	อัตราการไหลจริงเชิงปริมาตร, (m <sup>3</sup> /s)
R	รัศมีภายในของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน, (m.)
R <sub>a</sub>	ค่าคงที่ของอากาศ, (kJ/kg·K)
Re <sub>p</sub>	$\frac{d_p U_o \rho_g}{\mu}$ ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ของอนุภาค
R <sub>v</sub>	ค่าคงที่ของไอน้ำ, (kJ/kg·K)
RTD	residenc time distribution
r	พิกัดในแนวรัศมีภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน, (m.)
T	อุณหภูมิ, (°C)
S	ก๊าซซัลเฟอร์
SO <sub>2</sub>	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, (ppm.)
T <sub>db</sub>	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, (°C)
TDH	ค่าความสูงของการหลุดลอย (transprot disengaging height), (m.)
T <sub>wb</sub>	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, (°C)
SEZ	Swirling Effect Zone
μ	ความหนืดของก๊าซ
U	ความเร็ว, (m/s)
U <sub>mf</sub>	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์
U <sub>t</sub>	terminal Velocity of a falling particle, ( m/s)

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$U_o$	superficial fluid velocity, ( m/s)
$U_{or}$	ความเร็วของก๊าซที่ผ่านแผ่นออริฟิซ, ( m/s)
V	ปริมาตร, (m <sup>3</sup> )
VFBC	เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(Vortexing Fluidized-Bed Combustor)
X	ระยะตำแหน่งความสูงของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนในแนวตั้ง, (m.)
$\Phi$	อัตราส่วนสมมูล(Equivalent ratio)
$\phi$	ความชื้นสัมพัทธ์
$\omega$	อัตราส่วนความชื้น, (kg/kg-dry air)
$\rho_a$	ความหนาแน่นของอากาศ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	ความหนาแน่นของอากาศอัดที่อุณหภูมิใด ๆ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_v$	ความหนาแน่นของไอน้ำ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	ความหนาแน่นของน้ำ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ, (N/m <sup>3</sup> )
$\beta$	มุมของการฉีดในแนวนอน
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	ความหนาแน่นของก๊าซ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta h$	ความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์, (mm.)
$\Delta P_d$	ความดันตกคร่อมผ่านแผ่นกระจายลม, (Pa)
$\lambda$	อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด
$\phi_s$	ค่าความกลม (sphericity) ของอนุภาค
$\varepsilon$	Vaid Fraction, (ไม่มีหน่วย)
$\varepsilon_f$	สัดส่วนช่องว่างของเบดขณะเกิดการฟลูอิดไดซ์
$\varepsilon_{mf}$	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์
$\eta_c$	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency)

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการทางด้านพลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นเพราะมีการใช้พลังงานในปริมาณที่มากตามความเจริญของประเทศ ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่ได้มาจากปิโตรเลียม อีกทั้งยังเกิดวิกฤตการณ์ของราคาน้ำมันเชื้อเพลิงสูงขึ้น ดังนั้นภาครัฐและเอกชนจึงมีนโยบายที่จะหาพลังงานอื่น ๆ มาช่วยทดแทนพลังงานที่มาจากฟอสซิล เช่นพลังงานจากแสงอาทิตย์, พลังงานลม แต่พลังงานในรูปแบบดังกล่าวนี้จะต้องนำมาผ่านกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากและต้องใช้เครื่องมือที่ทันสมัย อีกทั้งยังมีราคาแพงมาก จึงทำให้ยากที่จะนำพลังงานเหล่านี้มาใช้ เพราะมีต้นทุนในการผลิตสูง ความพยายามที่จะนำน้ำมันเชื้อเพลิงมาผสมรวมกับสารสกัดจากพืชเพื่อนำมาผสมกันและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงใหม่เช่นการนำน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันปาล์ม เรียกว่า "ไบโอดีเซล"

เมื่อลองพิจารณาจะพบว่าประชากรส่วนใหญ่ของประเทศไทยประกอบอาชีพเกษตรกรรม ดังนั้นทำให้มีวัสดุเหลือใช้เป็นจำนวนมาก อาทิ เช่น ฟางข้าว, เปลือกถั่ว, ชังข้าวโพด และ แกลบ ฯลฯ ซึ่งวัสดุดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีซึ่งพลังงานที่ได้เหล่านี้เราเรียกว่า "พลังงานจากชีวมวล" (Biomass Energy) ถ้าหากปล่อยวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวทิ้งไว้จะทำให้เกิดปัญหามลพิษทางด้านสภาวะแวดล้อม จากการศึกษาจะพบว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทั่วทุกภาคของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมมีการทำนากันมาก เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตเรียบร้อยแล้วจะต้องนำข้าวเปลือกไปสี เพื่อให้ได้เมล็ดข้าวออกมาสำหรับบริโภค และสิ่งที่เหลือจากกระบวนการสีข้าว นั่นก็คือ แกลบ

แกลบคือวัสดุที่เหลือจากการสีข้าวซึ่งถ้าสีข้าว 1 ตันจะได้แกลบออกมาประมาณ 220 kg. ค่าความร้อนของแกลบมีค่าประมาณ 2,900-4,560 kcal/kg. จึงน่าจะนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานความร้อนต่อไป เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาและค้นคว้าเบื้องต้นของการเผาไหม้ของแกลบในเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด โดยทำการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อการเผาไหม้และอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิ โดยเทคนิคการฉีดอากาศเข้าไปยังด้านข้างของห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัส ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาฟลูอิด ไคซ์เบด (Fluidized bed Combustor) เรียกว่า "Vortexing fluidized-bed Combustor", (VFBC) ซึ่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ผ่านช่องฉีดเข้าไปในเตาในแนวสัมผัส เทคนิคดังกล่าวนี้ได้ช่วยเพิ่ม Residence Time Distribution, RTD ของอนุภาค

เชื้อเพลิงในเตาและลดการสูญเสียของอนุภาคละเอียดที่หลุดลอย (Particle elutriation) ออกไปจากเตา

เพราะฉะนั้นจึงควรที่จะทำการศึกษาดังปริมาณของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดที่ฉีดเข้าไปยังห้องเผาไหม้ และตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิ, จำนวนของหัวฉีดอากาศทุติยภูมิ และยังสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแกลบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพื่อศึกษาอัตราการป้อนแกลบที่เหมาะสมกับเตาเผาที่ได้ทำการออกแบบไว้

ตัวแปรที่สำคัญที่มีการเปลี่ยนแปลงอีกคือ อัตราส่วนสมมูล เพื่อที่จะหาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยสังเกตจากค่าอุณหภูมิภายในเตา, ปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้ รวมถึงซีเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ โดยนำไปวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการออกแบบสร้าง และทดสอบเตาเผาแกลบฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน
2. ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิของเตาเผาแกลบฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนต่อ พฤติกรรมการเผาไหม้ของแกลบภายในเตาเผา โดยพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา
3. หาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา, ซีเถ้า และองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติให้ระบบที่ทำการศึกษานี้เป็นระบบแบบอะเดียบาติกและเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบขนาดปกติ ( 2 mm. X 8 mm.)

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ซึ่งเป็นการนำเอาส่วนดีของเตาเผาแบบไซโคลน, เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด, เตาเผาเวอร์เทค มาใช้เป็นแนวคิดในการออกแบบ ซึ่งอาศัยเทคนิคการหมุนวนของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เพื่อก่อให้เกิดความปั่นป่วน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นและเพื่อช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ ทำให้เปลวไฟภายในเตามีความเสถียรยิ่งขึ้น

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการทดสอบการเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน กรณีไม่มีอากาศทุติยภูมิและมีการฉีดอากาศทุติยภูมิ 4 หัวฉีด
2. อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr.
3. อัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณอากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.0, 0.25 และ 0.4 ตามลำดับ
4. ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio,  $\Phi$ ) ทั้งสิ้น 4 ค่า คือ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 ตามลำดับ
5. ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิภายใน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนที่กำหนดไว้ของเตาเผา 13 ตำแหน่ง ในกรณีที่มีคอคอด ( $T_1-T_{13}$ ) และ 14 ตำแหน่งในกรณีที่ไม่มีคอคอด ( $T_1-T_{14}$ ) ในแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ทั้งสิ้น 5-6 ตำแหน่ง
6. วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผา
7. ทำการหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาชีวมวลแบบวอร์เทค, ฟลูอิดไดซ์เบดและไซโคลน รวมทั้งปัญหา, ข้อจำกัดและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
2. ศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้, ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชัน และหลักการคำนวณ
3. ออกแบบสร้างและทดสอบเตาเผาแกลบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนทำการเก็บข้อมูลที่ศึกษาถึงผลกระทบต่อกรเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งสามารถแบ่งส่วนประกอบของการทดลองออกเป็น 6 กรณีหลัก ๆ คือ
  - 3.1 ทำการทดลองการเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน กรณีมีคอคอด (Throat)
  - 3.2 ทำการทดลองการเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน กรณีไม่มีอากาศทุติยภูมิ, กรณีการฉีดอากาศทุติยภูมิ 4 หัวฉีด
  - 3.3 เปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio,  $\Phi$ ) เป็น 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 ตามลำดับ
  - 3.4 เปลี่ยนค่าอัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศทุติยภูมิต่อปริมาณอากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 ตามลำดับ
  - 3.5 เปลี่ยนค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg./hr. ในกรณีมีคอคอด

3.6 ทำการทดลองการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์แบบอบอากาศหมุนวนกรณีไม่มีคอคอด (Without throat) ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. กรณีไม่มีอากาศทุติยภูมิ. กรณีการฉีดอากาศทุติยภูมิ 4 หัวฉีด และทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.3 และข้อ 3.4

4. บันทึกผลการทดลอง

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา และการปรับปรุง

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

2. สามารถนำเกลบที่เหลือใช้จากระบวนการสีข้าวมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้นกว่าที่เป็นอยู่

3. สามารถประยุกต์พลังงานความร้อนที่ได้มาใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร หรือนำไปผลิตไอน้ำเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังพัฒนาไปสู่การเป็นประเทศทางด้านอุตสาหกรรม การดำเนินการต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานมาใช้จำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำพลังงานมาใช้ในหลายรูปแบบเช่นพลังงานฟอสซิล ได้แก่ก๊าซธรรมชาติ, น้ำมันดิบ, ถ่านหิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้พลังงานจากธรรมชาติเช่นชีวมวล, พลังงานน้ำ ตลอดจนพลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่ปริมาณการใช้ยังมีไม่มากเท่าใดนัก การนำพลังงานฟอสซิลมาใช้อย่างฟุ่มเฟือยก่อให้เกิดปัญหาการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ การนำเข้าเพลิงชีวมวลมาเผาเพื่อเป็นพลังงานจะช่วยลดความต้องการการนำเข้าพลังงานลงได้ในระดับหนึ่ง และยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมอีกด้วย

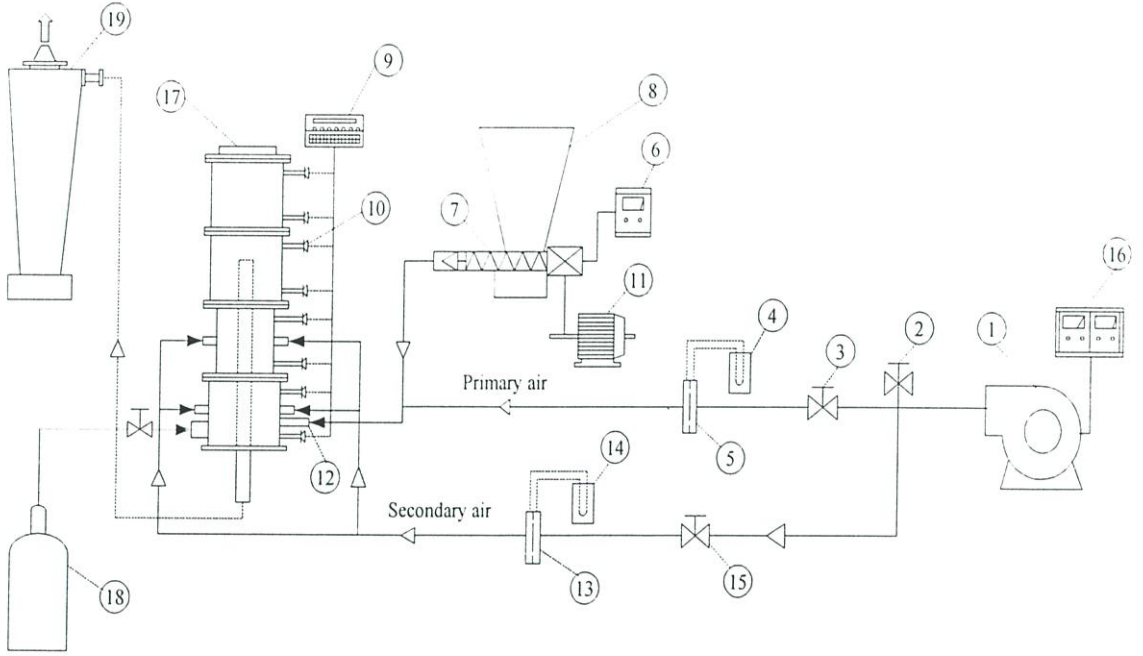
### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะของเตาเผาเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน สำหรับประเทศไทยมีการค้นคว้าวิจัยเตาเผาหลายประเภทด้วยกันเช่นเตาเผาออร์เทค, เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบค หรือ เตาเผาไซโคลน เป็นต้น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศมากมาย

#### 2.2.1 งานวิจัยภายในประเทศ

2.2.1.1 งานวิจัยของ วิศิษฐ์ สีสมาติกุล [1] ศึกษาชั้นวอร์เทคของเตาเผาเคลบ ที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ภายในเตาซึ่งเตาเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 mm. (D) โดยมีแกนกลางภายในเป็นท่อทังไอเสี่ย และมีการติดตั้งตำแหน่งท่อฉีดอากาศไว้ในแนวสัมผัสรอบ ๆ ผนังเตาเผาไหม้ เพื่อทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศภายใน ขนาดของเตาเผาไหม้ส่วนบนและส่วนล่าง ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดจาก 1.0D เป็น 0.75D และ 0.5D ตามที่ได้ออกแบบไว้ การเปลี่ยนขนาดเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างนี้ ก่อให้เกิดการหมุนวนหลายชั้นภายในเตาเผาไหม้ รายละเอียดของอุปกรณ์ในการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.1 โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ ) เท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 โดยแต่ละการทดลอง จะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออัตราการไหลของอากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.0, 0.15, และ 0.25 ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเคลบคกที่เท่ากับ 0.3 kg/min. จากการทดลองเตาเผาส่วนบนและส่วนล่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5D และ 1.0D ตามลำดับ ที่ค่า  $\Phi$  เท่ากับ 0.8 และที่ค่า  $\lambda$  เท่ากับ 0.0 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาเท่ากับ 1,192 °C ที่บริเวณวงแหวนของห้องเผา

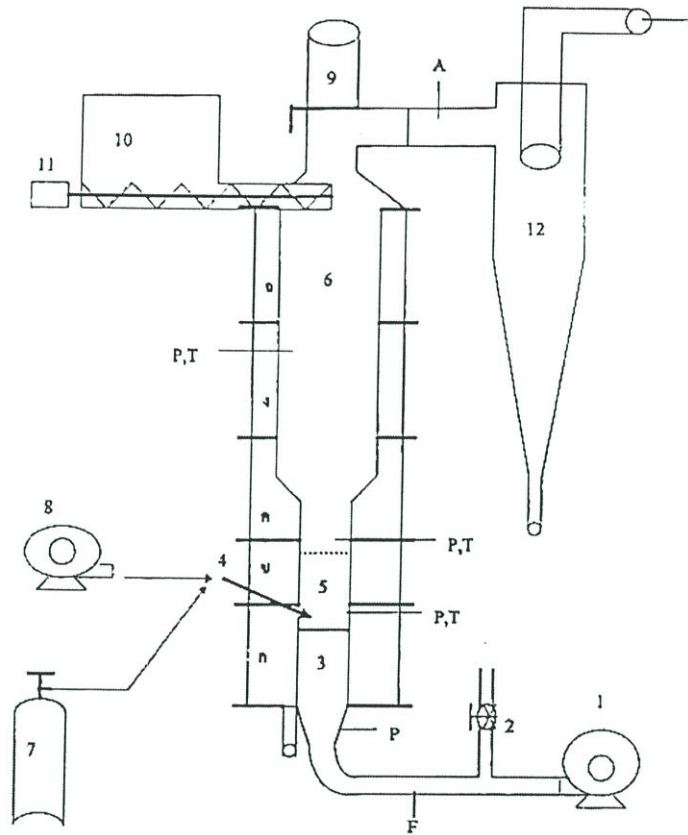
ไหม้ โดยควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย และ จากการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของเตาเผาออร์เทค พบว่าก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 1.5%, ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์เท่ากับ 18.3% และ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เท่ากับ 205 ppm.



- |               |                  |                    |                           |                   |
|---------------|------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|
| (1) Blower    | (2) Ball valve   | (3) Globe valve    | (4) U-tube manometer      | (5) Orifice meter |
| (6) Inverter  | (7) Screw feeder | (8) Hopper         | (9) Temperature indicator | (10) Thermocouple |
| (11) Motor    | (12) Primary air | (13) Orifice meter | (14) U-tube manometer     | (15) Globe valve  |
| (16) Inverter | (17) Combustor   | (18) LPG           | (19) Cyclone              |                   |

## รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมการทดลองของเตาเผาออร์เทคหลายชั้น(MVC)

**2.2.1.2 งานวิจัยของ เสรีย์ ตู๊ประกาย [2]** ศึกษาและออกแบบเตาเผาภาคตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวางเป็นข้อมูลพื้นฐาน ส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.2 โดยลักษณะเตาเผาเป็นรูปทรงกระบอกหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟ บริเวณเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 m. ส่วนขยายด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.4 m. ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงป้อนหัวเผา พบว่าสภาพที่เหมาะสมในการดำเนินการอยู่ที่ อัตราการป้อนก๊าซ LPG 4.35 kg/hr. ปริมาณอากาศสำหรับฟลูอิดไดซ์ 32 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อากาศผสม LPG ที่หัวเผา 7.5 ลูกบาศก์เมตร ต่อชั่วโมง ศึกษาอัตราการป้อนการตะกอนที่ 10, 15, 20, 25, 30 kg/hr. พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 95.62 % ที่อัตราการป้อน 15 kg/hr. และประสิทธิภาพการทำลายกากตะกอนสูงสุดเท่ากับ 95.89 % ที่อัตราการป้อนกากตะกอน 10 kg/hr.



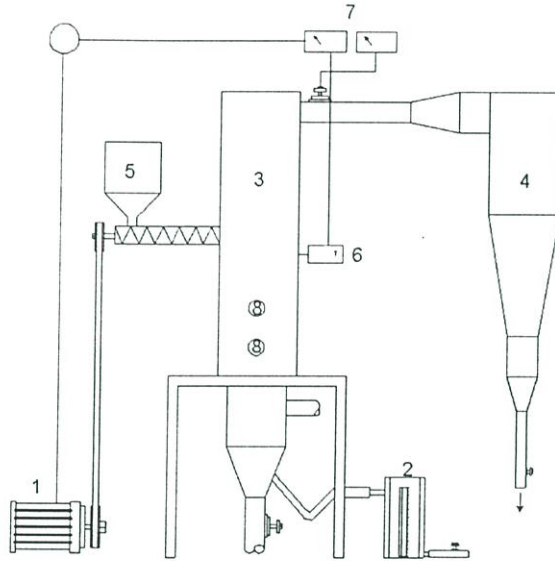
- |                         |                   |                    |                          |
|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|
| 1. Fluidized-air blower | 5. Sand bed       | 9. Butterfly valve | P-จุดวัดความดัน          |
| 2. By part              | 6. Freebord       | 10. Screw feeder   | T-จุดวัดอุณหภูมิ         |
| 3. Distributor          | 7. LPG tank       | 11. Motor          | A-จุดวัดก๊าซเผาไหม้      |
| 4. Preheat burner       | 8. Air compressor | 12. Cyclone        | F-จุดวัดอัตราการไหลอากาศ |

รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนที่นำมาประกอบเป็นเตาเผา

2.2.1.3 งานวิจัยของ ศศิวิมล สูงสว่าง [3] ได้ทำการวิจัยการเผาไหม้ของแกลบโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดเพื่อทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบที่ทำให้ได้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มทุน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีในการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่แกลบที่เหลือใช้ให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

โดยในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด และศึกษาการทำงานรวมถึงกลไกการทำงานของเครื่องมือวิจัยของเตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากการศึกษาทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังนี้ คือ อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของการเผาไหม้ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมของการเผาไหม้แกลบในฟลูอิด ไคซ์เบด ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศจาก 20.62 - 45.67 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้จาก 500 - 800 °C

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด คือความเร็วของอากาศเท่ากับ 32.77 m/s และอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าประมาณ 700 °C ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.91 โดยที่กำหนดอัตราการป้อนแกลบไว้ที่ 3.05 kg/hr. และขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีใช้อยู่ พบว่าประสิทธิภาพของการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 47 – 53

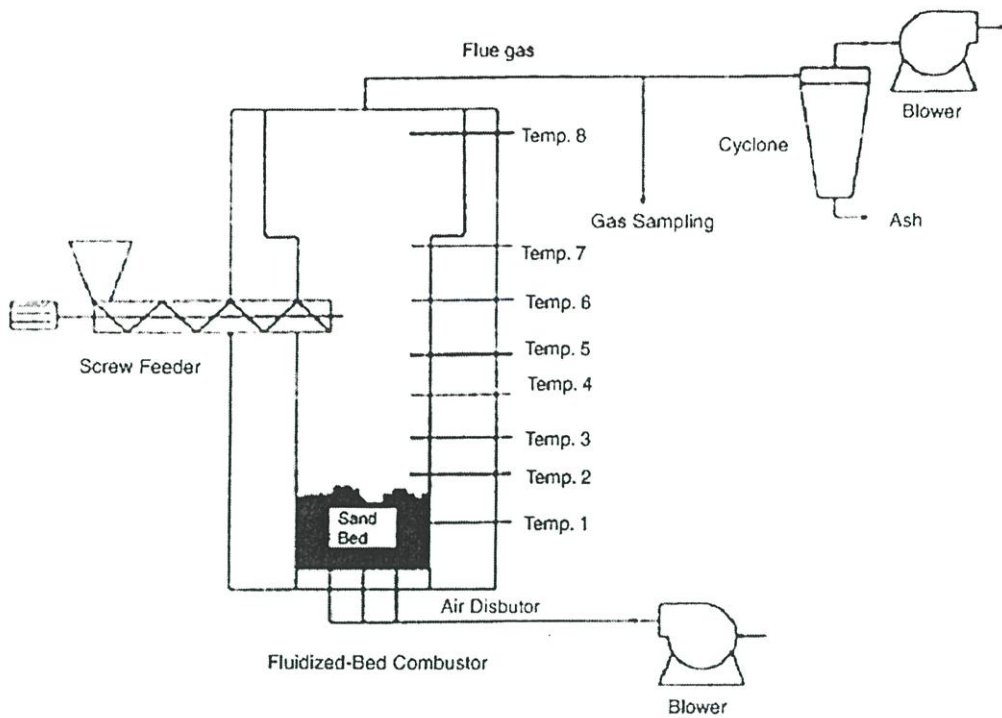


1. มอเตอร์
2. เครื่องวัดความเร็วของอากาศ
3. ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์
4. ไซโคลน
5. เครื่องป้อนวัตถุดิบ
6. เครื่องวัดอุณหภูมิ
7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
8. ช่องสำหรับดูการเผาไหม้ภายในคอลัมน์

รูปที่ 2.3 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

2.2.1.4 งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งได้ทำเตาฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ กากมันสำปะหลัง, เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว เพื่อการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยทำการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่เท่ากับ 15 kg/hr. ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดของกากมันสำปะหลัง, เปลือกถั่วลิสง และฟางข้าว มีค่าเท่ากับ 7.25, 6.0 และ 7.15 จะได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99.71%, 99.07% และ 97.92% ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่าอุณหภูมิในเบด เป็นเพราะชีวมวลที่ใช้มีปริมาณสารระเหยสูงส่วนปริมาณก๊าซพิษ



รูปที่ 2.4 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

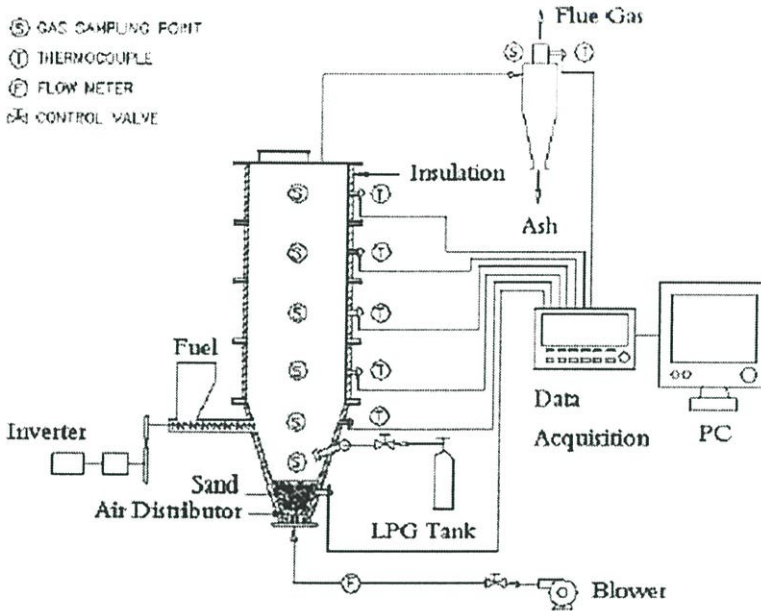
ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 290 – 340 ppm. ส่วนสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) จะมีน้อยมากประมาณ 120 – 200 ppm.

## 2.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ

2.2.2.1 งานวิจัยของ W.Permchart และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดทรงกรวย (conical FBC) โดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.3-0.5 mm. ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิและก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตาเผา และเชื้อเพลิงแกลบที่ใช้จะมีความชื้นประมาณ 10.3% อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบ 2 ค่า คือ 37.3 และ 82.4 kg/hr. ในแต่ละอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะทำการปรับเปลี่ยนอากาศส่วนเกิน (Excess Air) 6 ค่าคือ 20%, 40%, 60%, 80%, 100% และ 120% ตามลำดับ

โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo-350 M โดยทำการวัดส่วนประกอบของก๊าซ ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  และ  $\text{NO}$ ) โดยตัวอย่างในการทดสอบจะทำการวัดจากช่องวัดพิเศษภายในเตาเผาและที่ทางออกของไซโคลนที่นำขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ รวมทั้งขี้เถ้าที่ยังไม่เผาไหม้ไปวิเคราะห์ พื้นฐานของการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนมีอยู่ด้วยกัน 2 ตัวแปรคือ คาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ภายในขี้เถ้าและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบของอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาเผา Conical FBC และ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีผลกระทบที่ชัดเจนต่ออากาศส่วนเกินและความสูงของเบดเป็นอิทธิพลรองของการกระจายอุณหภูมิและปริมาณของ

ก๊าซ CO และ NO ตามแนวแกนมีค่าสูงสุดอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกิน อย่างไรก็ตาม CO และ NO ตามแนวแกนมีผลมาจากความสูงของเบด ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา Conical FBC สำหรับการเผาถ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 81% ถึง 86% ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่ต่างกัน



รูปที่ 2.5 โค้ดแกรมการทดลองของเตาเผา Conical FBC

2.2.2.2 งานวิจัยของ Teng และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของขยะยางในเตาเผาต้นแบบฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน เตาเผานี้จะถูกออกแบบให้มีการเผาไหม้ขยะยางในปริมาณ 120 kg/hr. ส่วนประกอบของเตาเผาสร้างจากวัสดุทนไฟ การศึกษานี้กำหนดให้มีความร้อนสูญเสียที่ออกไปสู่สิ่งแวดล้อมคิดได้ว่ามีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 5%) ลักษณะของตัวเตาเผาสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ Windbox, Distributor (ตัวกระจายลม), Combustion chamber

Windbox ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนแยกออกจากกัน ปริมาตรของส่วนหนึ่งเป็น 2 เท่าของอีกส่วนหนึ่ง อากาศปฐมภูมิ (Primary Air) จะถูกควบคุมแยกกัน ในแต่ละส่วน ตัวกระจายลมจะถูกออกแบบให้มีลักษณะที่ลาดเอียง และจุดประสงค์ของการออกแบบ Windbox และตัวกระจายลมก็เพื่อการไหลหมุนวนของวัสดุเบดภายในเตาเผา ห้องเผาไหม้มีขนาดฐาน 0.7 X 1.4 m. และมีความสูง 2 m. ภายในห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็นส่วนที่มีความเร็วสูงกับส่วนนี้มีความเร็วต่ำ เหนือส่วนของ Windbox ตัวเล็กจะเป็นส่วนที่มีความเร็วสูง

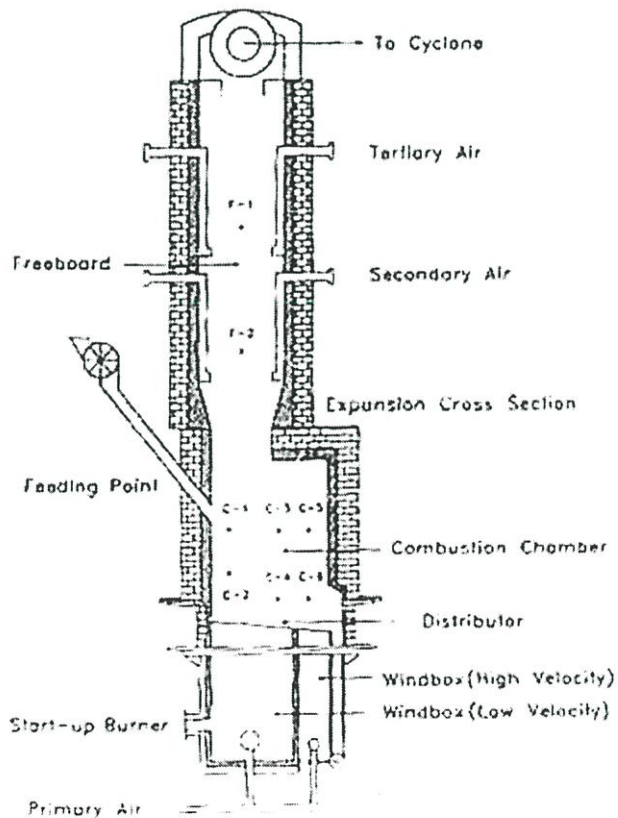
ส่วนของ Freeboard มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1 m. และมีความสูง 4 m. หัวฉีดของอากาศทุติยภูมิจะถูกวางเป็น 2 ระดับบน Freeboard แต่ละระดับประกอบไปด้วยหัวฉีด

จำนวน 4 หัว วางไว้ให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน และมีการแบ่งระดับของหัวฉีดทั้ง 2 ระดับนี้เราเรียก ส่วนล่างว่าอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) และเรียกส่วนบนว่าอากาศส่วนที่ 3 (Tertiary Air) ดัง แสดงในภาพที่ 2.4 อากาศทั้ง 2 ส่วนนี้จะถูกอุ่นก่อนที่จะส่งเข้าไปใน Freeboard

ระบบป้อนเชื้อเพลิงนี้มีการป้อนเชื้อเพลิงเหนือเบด และมีการป้อนทั้งเศษยางกับหินปูน โดยทั้งเศษยางและหินปูนจะถูกส่งไปตามท่อส่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ จุดที่มีการป้อนจะอยู่ที่ด้านข้างของส่วนที่มีความเร็วต่ำ

เศษยาง ได้ถูกนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา การศึกษานี้ได้ใช้เศษยาง 2 ขนาด คือ 10-20 mm. และ 50-100 mm. ส่วนประกอบและองค์ประกอบของธาตุของเศษยางและได้ใช้ทรายซิลิกา เป็นวัสดุเบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $520 \mu\text{m}$ . ปริมาณกำมะถันที่สูงของเศษยางจะให้ ปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์ที่สูงในการเผาไหม้ การทดลองนี้ได้ใช้หินปูนเป็นตัวลดการปล่อยซัลเฟอร์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหินปูนเฉลี่ยคือ  $710 \mu\text{m}$ . อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์กำหนดให้อยู่ที่ 3 kg ทุกการทดลอง

การเผาไหม้เศษยางที่มีขนาดแตกต่างกันในเตาเผาต้นแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนนั้น การใช้เศษยางที่มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้ปริมาณสารระเหยในปริมาณน้อย ถูกเผาไหม้ใน Freeboard ผลการทดลองทำให้เห็นแล้วว่า การใช้ยางที่มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้อุณหภูมิเบดที่คงตัว



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเตาเผาต้นแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(VFBC)

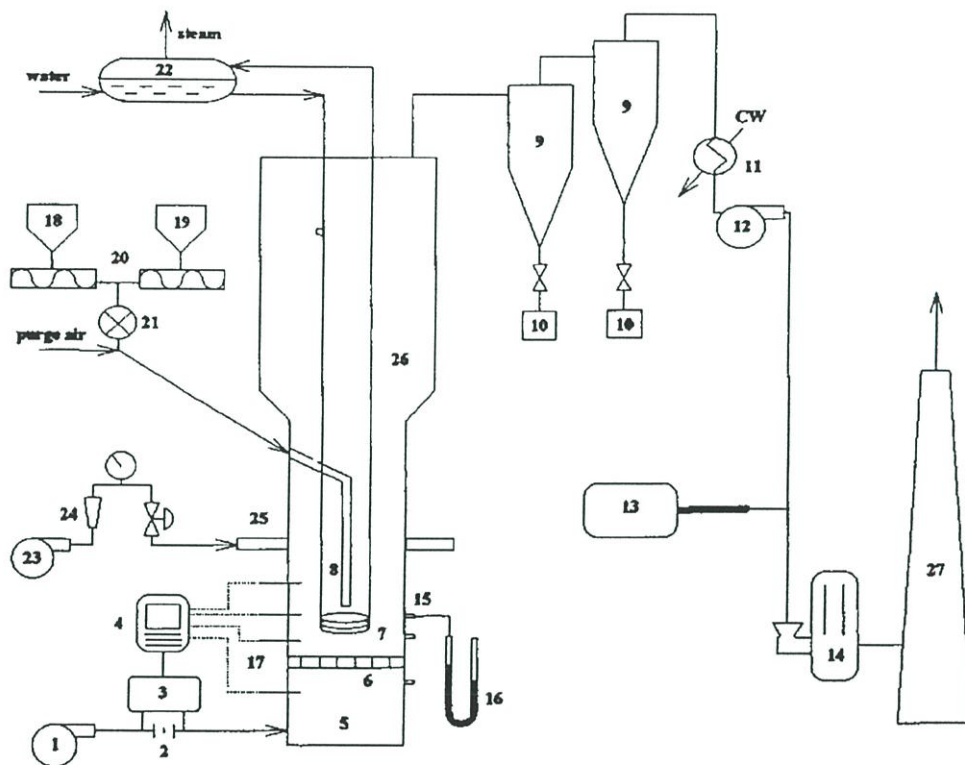
คุณลักษณะของการเผาไหม้มีความสำคัญ และมีอิทธิพลจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) และอากาศส่วนที่ 3 (Tertiary Air) การเพิ่มขึ้นของการฉีดอากาศทุติยภูมิ และอากาศส่วนที่ 3 พร้อมกันจะทำให้เพิ่มความเข้มของการหมุนวนและความเร็วของก๊าซตามแกนใน Freeboard, รวมทั้งประสิทธิภาพการเผาไหม้, การปล่อยมลพิษมีผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ

2.2.2.3 งานวิจัยของ LIN และคณะ [7] ได้ทำการทดสอบการเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.45 m. โดยใช้ถ่านหินบิทูมินัสที่พบภายในประเทศ 3 ขนาด (+3.5 -9.7 mm., +1.4 -3.5 mm., -1.4 mm.) ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยอัตราการป้อนถ่านหินคงที่เท่ากับ 36 kg/hr. ส่วนอากาศปฐมภูมิถูกจัดที่ 95 % ของอากาศทางทฤษฎีขณะที่ความเร็วเป็น 1.2 m/s (ประมาณ 3.5 เท่าของ  $U_{mf}$ ) ไโคะแกรมของระบบการเผาไหม้สามารถดูได้จากรูป 2.7 เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ทำการศึกษาหาขนาดของทรายในฟลูอิดไดซ์เบดและความเร็วของแก๊สที่ทำให้เกิดความเร็วยุติทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.345 m/s. อากาศฟลูอิดไดซ์ซึ่งและอากาศปฐมภูมิของการเผาไหม้ ซึ่งมาจาก 2 Blower แบบ Roots ขนาด 15 แรงม้า อากาศทุติยภูมิมาจากเทอร์โบโบลเวอร์ขนาด 3 แรงม้า และคอมเพรสเซอร์ขนาด 20 แรงม้าใช้สำหรับส่งอากาศผ่านท่อไปยังห้องเผาไหม้ซึ่งสร้างจากสแตนเลส (SUS 316) และหุ้มเซรามิกไฟเบอร์หนา 0.1 m. ความสูงของเตาเผาทั้งหมดเป็น 4.68 m. ความลึกของเบดเป็น 0.6 m. และความสูงของ Freeboard เป็น 2.5 m. คอลล์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับได้อยู่ภายในเตาเผาเป็นตัวช่วยควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับพื้นที่ผิวของคอลล์ในเบด

การจัดวางหัวฉีด (สำหรับการฉีดอากาศทุติยภูมิ) ใน Free board จะถูกจัดวางในแนวระดับและมุมของหัวฉีดเป็น 60 องศา มีการกำหนดความสูงของหัวฉีดของอากาศทุติยภูมิ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามระดับความสูงของการฉีดอากาศทุติยภูมิทั้งสาม (ที่ 0.9, 1.3 และ 1.85 m. ) เหนือแผ่นกระจายลม โดยได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลและแท่งความดันตามแนวความสูงของเตาเผาเพื่อใช้สำหรับวัดอุณหภูมิและความดัน ท่อไอเสียมีการหล่อเย็นที่ 200 °C ก่อนที่จะปล่อยออกไปยังบรรยากาศ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียจะถูกเก็บไว้ในชุดไซโคลนทั้ง 2 และสกรับเบอะแบบเปียก

ผลลัพธ์จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิของถ่านหินเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง กรณีไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิอัตราส่วนของอากาศส่วนเกินสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง, ตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิควรจะอยู่ในตำแหน่งล่างในบริเวณ เหนือช่วงการขยายตัว (Expansion section) แต่ที่ตำแหน่งสูงกว่าสำหรับช่วงต่ำกว่าช่วงขยายตัว อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงเท่ากับ 96 % ย่างต่อการควบคุมภายใต้การศึกษาใน VFBC

การศึกษานี้เป็นการสนับสนุนให้เห็นว่าปริมาณการไม่เผาไหม้ของ CO ในก๊าซไอเสียหรือการไม่เผาไหม้สารระเหยในอนุภาคของถ่านหินของชี้ถ้ำสามารถเป็นลบในเงื่อนไขของการทำงานที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการสูญเสียของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเบคเป็นลบ ส่วนประสิทธิภาพของการเผาไหม้สามารถคำนวณได้ด้วยเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในชี้ถ้ำ การปล่อย  $\text{NO}_x$  ต่ำกว่า 100 ppm.



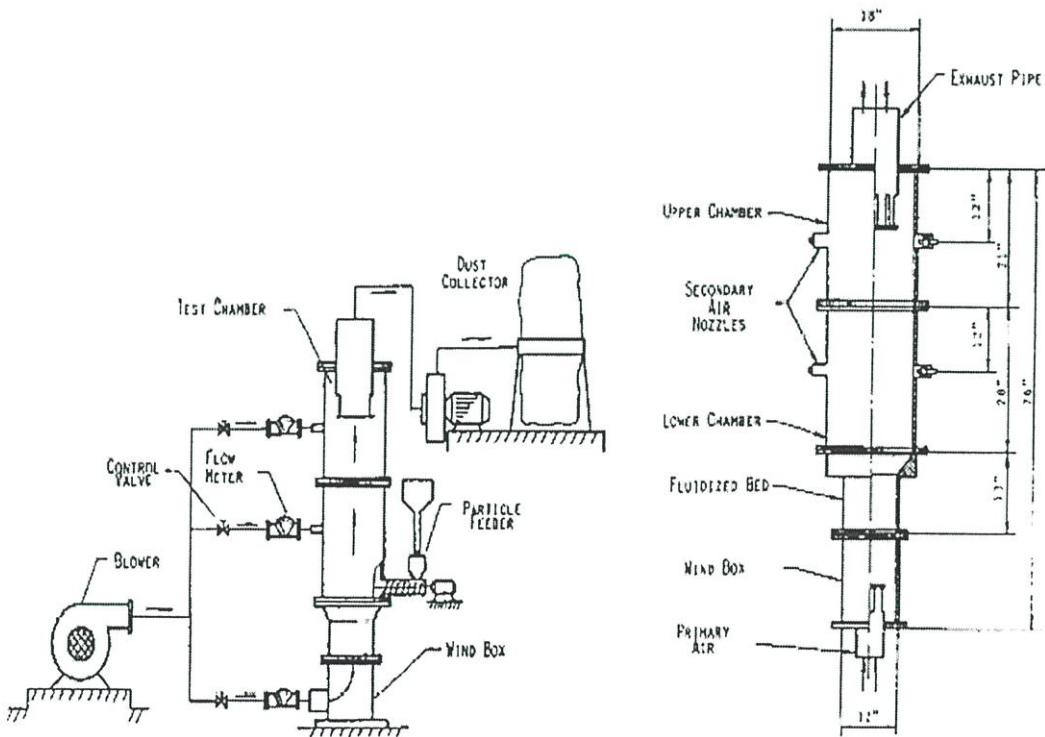
- |                        |                             |                               |                     |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 1. โบเวอร์             | 2. ออร์ฟิโกมิเตอร์          | 3. Pressure transducer        | 4. ตัวบันทึก        |
| 5. กล่อลม              | 6. แผ่นกระจาย               | 7. คอลย์ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน | 8. ท่อส่ง           |
| 9. ไซโคลน              | 10. ตัวเก็บค้อนภาค          | 11. ท่อระบายความร้อน          | 12. พัดลม           |
| 13. เครื่องมือวัดมลพิษ | 14. Scrubber                | 15. ตัววัดความดัน             | 16. มานอมิเตอร์     |
| 17. เทอร์โมคัปเปิ้ล    | 18. Hopper สำหรับ Timestone | 19. Hopper สำหรับ ถ่านหิน     |                     |
| 20. Screw feeder       | 21. Air lock                | 22. Drum                      | 23. เทอร์โบโบลเวอร์ |
| 24. โรตารีมิเตอร์      | 25. อากาศทุติยภูมิ          | 26. Free board                | 27. Stack           |

## รูปที่ 2.7 ไลอะแกรมของระบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบค (VFBC)

2.2.2.4 งานวิจัยของ S. Nieh และคณะ [9] ได้ทำการทดสอบการวัดของอนุภาคก๊าซและการหลุดลอยของอนุภาคภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์แบบอากาศหมุนวน ภายใต้ความแตกต่าง

ของค่า Swirl number และสัดส่วนของอากาศหุติภูมิโดยใช้อุณหภูมิคือถูกแก้วต่างชนิดกัน โดยการทดลองเป็นแบบ cold model รายละเอียดสามารถดูได้จากรูปที่ 2.8 ในการทดลองจะใช้อากาศจากพัดลมขนาด 1,200 ft<sup>3</sup>/min โดยอากาศที่ใช้จะเป็น 3 ส่วน โดยอากาศทั้ง 2 ส่วนจะถูกส่งไปยังอากาศหุติภูมิและอีกส่วนหนึ่งไปยังกล่องลมของชุดป้อนอากาศปฐมภูมิอัตราการไหลของอากาศจะถูกควบคุมและทำการวัดโดยชุดวัดอัตราการไหลและดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์มาเนมิเตอร์ ในการทดสอบอนุภาคเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ส่งไปยังห้องทดสอบด้วยสกรูพีดเดอร์รุ่น 30 r โดยอัตราการป้อนเท่ากับ 0.26-4.16 ft<sup>3</sup>/min. และอนุภาคที่ออกจาก VFBC จะถูกเก็บด้วยถุงกรองและถอดออกมาตรวจสอบด้วยกล้องไมโครสโคป (Microscopic examination)

การทดสอบของห้องทดลอง (Chamber) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว และความสูง 80 นิ้ว ห้องทดสอบ VFBC ถูกพิจารณาเป็น 4 ส่วนหลัก คือส่วนบนของห้องทดสอบส่วนล่างของห้องทดสอบ, ฟลูอิดไดซ์เบด และกล่องลม ซึ่งทั้งหมดทำจากพลาสติกใส ความสูงส่วนบนของห้องทดสอบมีขนาด 22 นิ้ว, ท่อไอเสีย 10 นิ้ว อยู่ที่ส่วนบนและหัวฉีดอากาศหุติภูมิ 4 หัวฉีด (ทำมุม 90 องศา กับเส้นรอบวง) ระยะระหว่างหัวฉีดเป็น 64 นิ้วและห้องเผาไหม้ส่วนล่างมีความสูง 28 นิ้ว ที่ส่วนนี้ก็มีหัวฉีดอีก 4 หัวฉีดและ Freeboard จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน หนึ่งในตัวแปรหลักในการพิจารณาแบบ VFBC เป็นการควบคุมความแรงของวอร์เทค ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปจะกำหนดด้วยค่า Swirl number ส่วนรายละเอียดของการทดลองสามารถศึกษาได้จากตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมอุปกรณ์ในการทดลอง Cold model และรายละเอียดของห้องเผาไหม้

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขในการทดสอบสำหรับการวัดอนุภาค

ตัวแปร	หน่วย	ค่า
<b>ลูกแก้ว (glass beads)</b>		
- ขนาดของอนุภาค	$\mu\text{ m.}$	0-3,000
- เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	$\mu\text{ m.}$	344
- ค่าความถ่วงจำเพาะ		2.42
<b>อากาศปฐมภูมิ</b>		
- อัตราการไหล	$\text{ft}^3/\text{min}^{-1}$	66-477
- ความเร็ว	$\text{ft s}^{-1}$	1.9-13.7
<b>อากาศทุติยภูมิ</b>		
- อัตราการไหล	$\text{ft}^3 \text{min}^{-1}$	0-221
- สัดส่วนของอัตราการไหล	%	0-0.47
- ความเร็ว	$\text{ft s}^{-1}$	0-146

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า มุมที่ทำการฉีดอากาศทุติยภูมิ  $\beta = 45^\circ$  จะมีผลดีต่อการเกิดการหมุนวนไปมา (Recirculating Flow) และการเปลี่ยนแปลงค่า Swirl number ของหัวฉีดอากาศทุติยภูมิช่วยลดอัตราการหลุดลอยของอนุภาค

2.2.2.5 งานวิจัยของ CHYANG และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาลักษณะของการหลุดลอยของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในการทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบ Cold Model ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดและเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.19 m. และความสูงของเตาเท่ากับ 4 m. โดยใช้ลูกแก้วเป็นวัสดุเบด ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 545  $\mu\text{ m.}$  เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วงตั้งแต่ 49 ถึง 194  $\mu\text{ m.}$  ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่า the specific elutriation rate constant (K) เป็นฟังก์ชันของ initial concentration ของการหลุดลอยของอนุภาค

ไคอะแกรมของอุปกรณ์ในการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.9 คอลัมน์ฟลูอิดไดซ์เซชันซึ่งทำจากอะคริลิกใสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.19 m. และมีความสูงเท่ากับ 4.0 m. ในการศึกษาแผ่นกระจายลมที่เป็นแผ่นอะคริลิก (Acrylic plate) ถูกเจาะลักษณะเป็นสามเหลี่ยมซึ่งมีระยะพิทเท่ากับ 15 mm. และอัตราส่วนต่อพื้นที่เปิด(open area ratio)เป็น 2.28% และไซโคลนจะใช้สำหรับเก็บอนุภาคที่หลุดลอย ลูกแก้วถูกนำมาใช้เป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์, เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 49 ถึง 194 mm. ขนาดของ coarse ลูกแก้ว (อนุภาคที่ไม่หลุดลอย) เป็น 545  $\mu\text{ m}$  อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิถูกส่งจ่ายด้วยโบลเวอร์แบบ Root

ขนาด 15 แรงม้า อัตราการไหลของอากาศทั้ง 2 นี้ จะถูกวัดด้วยแผ่นออริฟิก อากาศทุติยภูมิจะฉีดตรงเข้าทางแนวสัมผัสทางแนวนอนไปยัง Freeboard เงื่อนไขการทำงานอยู่ในตารางที่ 2.2 ตาชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (OMAS TP4K) ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของอนุภาคที่หลุดลอยมาจากคอลัมน์และถูกเก็บที่ไซโคลน อนุภาคจะถูกส่งไปยังเบรกเกอร์ ซึ่งอยู่บนตาชั่งอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำการชั่งน้ำหนักของอนุภาคอย่างต่อเนื่อง และข้อมูลทำการวัดจะส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์โดยการ์ดแปลงสัญญาณ RS232 ช่วงของเวลาของการส่งผ่านข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์จะถูกเก็บข้อมูลทุก ๆ 2 วินาที

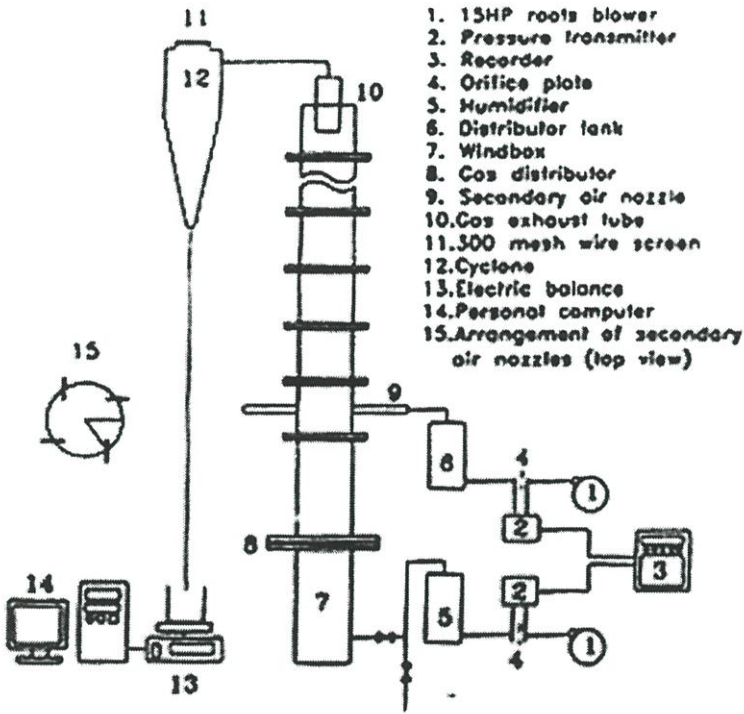
ตารางที่ 2.2 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบแบบ Cold Model

ตัวแปร	หน่วย	ค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์	m.	0.19
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดอากาศทุติยภูมิ	mm.	19
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทิ้งไอเสีย	mm.	95
- อากาศปฐมภูมิ	Nm <sup>3</sup> /min	1.5-3.5
อัตราการไหล	m /s	0.9-2.1
ความเร็ว		
- อากาศทุติยภูมิ (เข้าทางแนวสัมผัส)	Nm <sup>3</sup> /min	1.5
อัตราการไหล		
ความเร็ว	m /s	22
ความสูงของระดับหัวฉีด	m.	0.57
- อนุภาค		
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	μ m.	49-194
น้ำหนักทั้งหมด	kg	4.5
ความสูงของ Static bed	m.	0.12

2.2.2.6 งานวิจัยของ WAN และ CHYANG [11] ได้ทำการศึกษาความสูงของการหลุดลอยส่งผ่านและอัตราของการหลุดลอยของอนุภาคในเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบด อุปกรณ์ในการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 2.9 และเงื่อนไขการทดสอบดูได้จากตารางที่ 2.3

จากการวิเคราะห์ผลของการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า TDH จะไม่ขึ้นกับตัวบ่งชี้ที่ผลของการไหลหมุนวน (Swirling Flow) แต่อัตราของการหลุดลอยของอนุภาคจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมา

จากความเร็วในการฉีดของอากาศทุติยภูมิและความสูงของเบด โดยเปรียบเทียบกับผลของความเร็วของอากาศปฐมภูมิและได้ทำการหาตำแหน่งความสูงของการฉีดอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อ TDH อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิก, Free board ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ The Free Entrainment Zone (FEZ) และบริเวณผลของการหมุนวน (The Swirling Effect Zone, SEZ) ซึ่งความยาวของบริเวณการหมุนวนเป็นตัวแปรหลักสำหรับการหลุดลอยของอนุภาคในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ในการทดสอบของลักษณะการหลุดลอยของอนุภาค

การทดสอบรูปแบบของเตาเผา VFBC แบบ Cold Model ขนาด 18 นิ้วใช้ลักษณะของการไหลของก๊าซใน VFBC จะมีลักษณะเป็นการไหลหมุนวน, Developing และการไหลหมุนวนไปมา (Recirculation flow) ตำแหน่งของการไหลหมุนวนไปมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มของค่า Swirl number มุมการฉีดของอากาศทุติยภูมิที่  $\beta = 45^\circ$  จะมีสมรรถนะของก๊าซหมุนวนไปมา (Recirculation) ดี การออกแบบเตาเผา VFBC สามารถลดอัตราของการหลุดลอยของอนุภาคการเป็นค่าของค่า Swirl number ของอากาศทุติยภูมิสามารถควบคุมอัตราของการหลุดลอยเมื่อค่า Swirl number เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 4.34

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตจะพบว่าได้มีการศึกษาเฉพาะผลที่เกิดขึ้นจากรูปแบบของเตาเผา VFBC แบบ Cold Model โดยศึกษาถึงรูปของการหลุดลอยของอนุภาคและผลของค่า Swirl

number ซึ่งได้แก่ งานวิจัยของ Nieh, งานวิจัยของ Wan และ Chyang งานวิจัยของวิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล ศึกษาถึงขั้นวอร์เทคของเตาเผาแกลบและศึกษาถึงผลอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) ที่มีผลต่อการเผาไหม้ในเตาเผาแบบวอร์เทค

ตารางที่ 2.3 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบความสูงของการหลุดลอยส่งผ่านและอัตราของการหลุดลอยของอนุภาคในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด

ตัวแปร	หน่วย	ค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์, $D_0$ - อากาศปฐมภูมิ	m.	0.19
อัตราการไหล, $Q_1$	$\text{Nm}^3/\text{min}^{-1}$	1.75-3.0
ความเร็ว, $U_1$ - อากาศทุติยภูมิ (เข้าทางแนวสัมผัส)	$\text{m sec}^{-1}$	1.03-1.76
อัตราการไหล, $Q_2$	$\text{Nm}^3/\text{min}^{-1}$	0.5-1.5
ความเร็ว, $U_2$	$\text{m. sec}^{-1}$	7.35-22.05
ความสูงของตำแหน่งการฉีด $H_c$	m.	3.0-5.0 Do
ลูกแก้วหยาบ ( $545 \mu\text{m}$ ), $W_0$	g.	3,500-5,000
ลูกแก้วละเอียด ( $115 \mu\text{m}$ ), $W_i$	g.	500

งานวิจัยของเสรี ตู๊ประกาย ได้ทำการศึกษาและออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับกากตะกอน ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่าง ๆ ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการทำลายกากตะกอนและอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้เช่นเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดในงานวิจัยของสุวิทย์ เตีย เป็นส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบและงานวิจัยของศศิวิมล สูงสว่าง การวิจัยในส่วนของอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดโดยพิจารณาถึงอัตราการไหลของอากาศได้แก่ งานวิจัยของ W. Permchart และคณะ ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิและก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นตามความสูงของเตาเผาและประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ส่วนในเรื่องการศึกษาคุณภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงชีวมวลคือ การศึกษาการเผาไหม้ของวัสดุเหลือใช้และเชื้อเพลิงแข็งจำพวกถ่านหิน ได้แก่ งานวิจัยของ Teng และคณะ ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ของขยะยางและงานวิจัยของ Lin และคณะ ได้ศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้ถ่าน

หิน โดยพิจารณาขนาดของทรายและความเร็วของก๊าซที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เบด ทำการศึกษาถึงตำแหน่งของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้

จากงานวิจัยทั้งหมดนี้ยังไม่ม้งานวิจัยใด ๆ ที่ทำการศึกษาถึงผลกระทบของคอคอดที่ทำให้เกิด Recirculation และการหาประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลของคอคอด (Throat) และอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ที่มีผลต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของการเผาไหม้รวมถึงมลพิษที่ออกมาจากเตาเผา ซึ่งแต่ล้วนแล้วเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาหาผลที่เกิดขึ้นกับการเผาไหม้ของแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

## บทที่ 3

# ทฤษฎี

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าเชื้อเพลิงก๊าซและของเหลวมาก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะต้องอาศัยพื้นผิวใหม่ของเชื้อเพลิงในการเกิดออกซิเจนไปจับตัวกับคาร์บอนส่วนที่เหลือในเชื้อเพลิงเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรจะทำการศึกษาถึงทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง และองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

### 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการทับถมตัวของซากพืชซากสัตว์ ภายใต้อิทธิพลของโลกหรือที่เรียกว่า “เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์” (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งคือ เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้ ขี้เลื่อย และแกลบข้าว เป็นต้น เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนี้ส่วนใหญ่จะได้จากสิ่งที่เหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม

#### 3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล [1]

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท คือ

3.1.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็น ไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และ ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกนิน (Lignin) อยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ใน ไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และขี้เลื่อย

3.1.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบข้าว, ฟางข้าว ซึ่งสารพวกนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำโดยประมาณ 0 – 20 เปอร์เซ็นต์

3.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับปะรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับปะรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก

3.1.1.4 เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

### 3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวลและการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วยดังนี้ [1]

ชานอ้อย	มีค่าความร้อน	1,900	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ขบะ	มีค่าความร้อน	2,000	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
แกลบ	มีค่าความร้อน	3,300	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
ขี้เลื่อย	มีค่าความร้อน	4,000	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

#### แกลบ

แกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด คาริโอพซิส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale) ประกอบกัน แบบตะขอพัน (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาว ภายในเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้านผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบทั่วไป

ข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีพอสมควรและราคาถูกมาก

ข้อเสีย เมื่อถูกเผาไหม้จะมีปริมาณขี้เถ้าสูงพอประมาณ 15.7 – 21.3 เปอร์เซ็นต์ มีความชื้นสูง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของแกลบดังนี้

ธาตุคาร์บอน	ประมาณ	40 – 42	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	ประมาณ	36 – 37	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	ประมาณ	5	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน	ประมาณ	1	เปอร์เซ็นต์
ขี้เถ้า	ประมาณ	14 – 17	เปอร์เซ็นต์

### 3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ [12]

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ สารเผาไหม้ได้ในที่นี้มีธาตุหลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และกำมะถัน สำหรับกำมะถันขณะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะให้ความร้อนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ในทาง

ตรงกันข้ามกลับเพิ่มปัญหาในด้านการกักกร่อนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ รวมทั้งทำให้เกิดปัญหามลพิษในอากาศ

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. เวลาในการเผาไหม้ต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด
2. อุณหภูมิระหว่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง
3. การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องอยู่ในลักษณะการไหลผสมแบบปั่นป่วน (turbulence)

### 3.2.1 การผสม

การรวมตัวที่ีระหว่เชื้อเพลิงกับออกซิเจน ก็คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซ การผสมกันนั้นจะเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว การผสมกันนั้นก็จะยุ่งยากมากขึ้น

ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ก็จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ก่อนหรือเป็นฝอย แล้วจึงจะทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวได้ง่ายกับอากาศและเกิดการลุกไหม้ได้ดีเหมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้น แต่ละโมเลกุลของออกซิเจนจะสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้พร้อมกับได้ความร้อนออกมาส่วนหนึ่ง จากนั้นออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟได้เองแล้วพร้อมกับได้ความร้อนออกมาด้วย

ฉะนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบด้วยพฤติกรรม 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอน
2. เกิดการรวมตัวของคาร์บอนกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาพร้อมกับความร้อน
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากผิวของเชื้อเพลิง
4. มีการรวมตัวกันของคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนอีกครั้งจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า อัตราการเผาไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุที่กล่าวมาแล้ว และสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดได้โดยการบดเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งให้เป็นผงซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น

### 3.2.2 การติดไฟหรือการลุกไหม้

การลุกไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นขึ้นอยู่กับโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนแรกและเกิดต่อไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้มากขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous combustion) นั้นต้องมี

1. บริเวณที่จำกัดสำหรับการสะสมความร้อน
2. สารเชื้อเพลิง
3. อากาศ

การลุกไหม้นั้นไม่ได้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการเผาไหม้แบบต่อเนื่องก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถลุกไหม้แบบต่อเนื่องได้ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเผาไหม้สูง การลุกไหม้ก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ

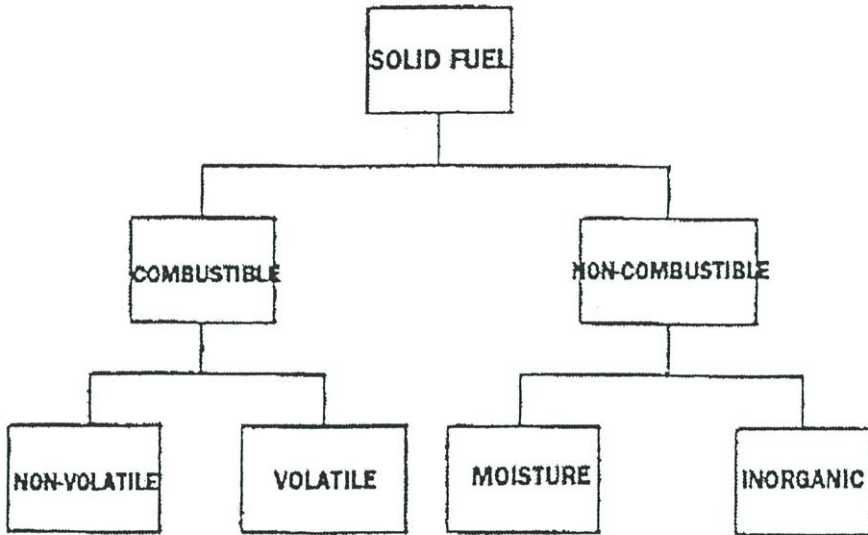
ดังนั้นการติดไฟหรือการลุกไหม้นั้นขึ้นอยู่กับหลายสิ่ง เช่น ชนิดของสารเชื้อเพลิง, สถานะของเชื้อเพลิง และอัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ

### 3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

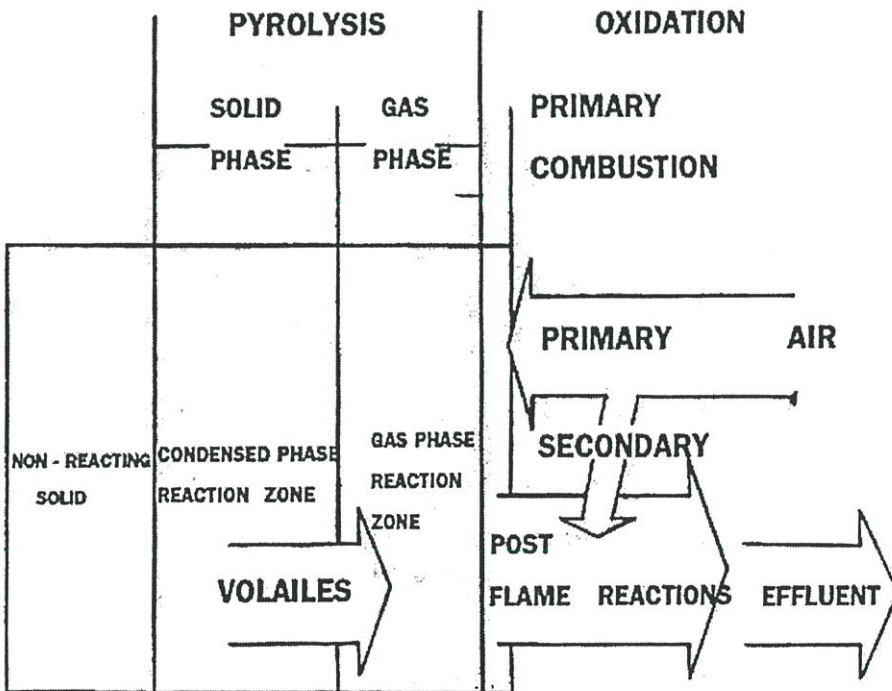
เชื้อเพลิงแข็งที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน, ฝืน, ชี้อ้อย, แกลบ, ฟางข้าว โปด เป็นต้น ขบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีความแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลว และแก๊ส เพราะว่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของสารต่างๆ ภายในไม่แน่นอน นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เพราะเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีทั้งเผาไหม้ได้ และไม่สามารถเผาไหม้ได้ดังรูปที่ 3.1

สารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เรียกว่า สารเฉื่อย (Inert) สารเฉื่อยนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งจะไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ในบางครั้งสารเฉื่อยเหล่านี้ก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ในบางขบวนการของการเผาไหม้ โดยเฉพาะในขบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงๆ สารเฉื่อยที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ความชื้น และสารประกอบเคมีที่ประกอบขึ้นเป็นชี้ถ้าสารอนินทรีย์เหล่านี้โดยมากจะเป็นพวกซิลิเกต (Siligates), ซัลไฟด์ (Sulfides) และเกลือฮาโลเจน (Halogen salt) เป็นต้น เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สารเหล่านี้จะกลายเป็นชี้ถ้า บางส่วนจะตกในห้องที่เผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะปลิวไปกับไอเสียที่เรียกว่า ฝ้ายลอย (Fly ash) เชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแยกได้เป็นส่วนที่ระเหยได้ (Volatile) และส่วนที่ไม่ระเหย (Non-

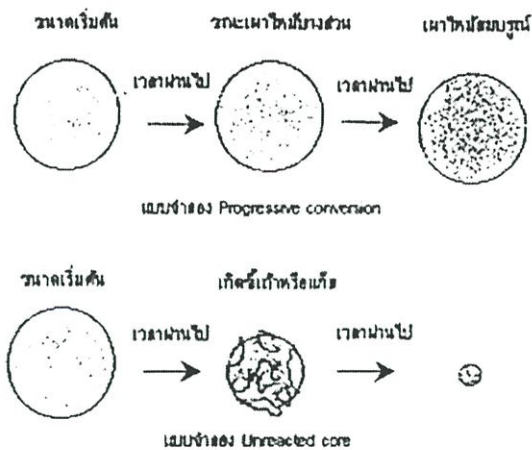
volatile) ในส่วนที่ไม่ระเหยนี้ ประกอบด้วยคาร์บอน สารประกอบคาร์บอน  $C_xH_y$  โดยที่ค่า  $x$  มีค่ามากกว่า  $y$  มากๆ หรือเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั่นเอง ส่วนสารที่ระเหยได้ในที่นี้ หมายถึง สารประกอบที่ระเหยใช้ในช่วงของการเผาไหม้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ หลักในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.2



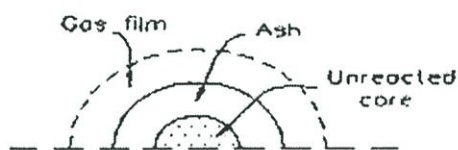
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง



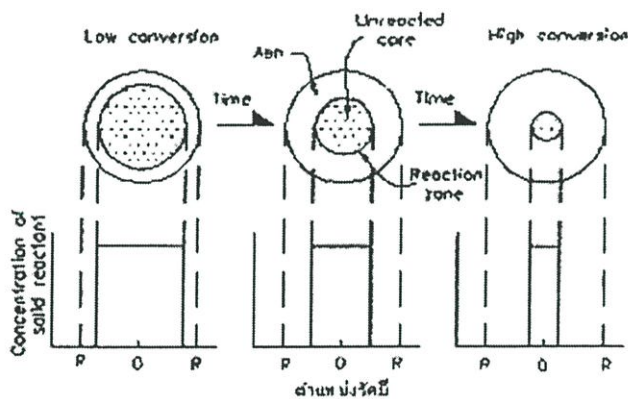
รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.4 บริเวณการเกิดการเผาไหม้



รูปที่ 3.5 ลักษณะชั้นเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้

สิ่งที่มีผลต่ออัตราการความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อุณหภูมิ โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
2. เวลาของการแพร่กระจายของอากาศผ่านชั้นฟิล์ม หรือชั้นจี้ไถ้
3. ขนาดของเชื้อเพลิง

4. ความต้านทานของชั้นซีเถ้ากับชั้นฟิล์ม โดยปกติความต้านทานของชั้นซีเถ้าจะสูงกว่าชั้นฟิล์มมาก ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นฟิล์มจึงอาจจะตัดทิ้งได้

5. ความต้านทานรวม ซึ่งรวมทั้งความต้านทานของแก๊สฟิล์มชั้นซีเถ้า และปฏิกิริยาการเผาไหม้

### 3.4 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) [12]

ในการเผาไหม้จริงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีจะเรียกว่า “อัตราส่วนผสมบาง” (Lean Mixture) ตรงกันข้ามหากปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่า “อัตราส่วนผสมหนา” (Rich Mixture) เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง  $(A/F)_{\text{stoic}} = (m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}})_{\text{stoic}}$  และอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio,  $\Phi$ ) จะหมายถึง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{Stoic}}}{(A/F)_{\text{Actual}}} = \frac{(F/A)_{\text{Actual}}}{(F/A)_{\text{Stoic}}} \quad (3.1)$$

Fuel – rich mixtures ,  $\Phi > 1$  มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย

Stoichiometric mixtures ,  $\Phi = 1$  ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

Fuel – lean mixtures ,  $\Phi < 1$  มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก

### 3.5 ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชัน [13]

ฟลูอิดไดซ์เซชันเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กถูกทำให้อยู่ในสภาวะคล้ายของไหลด้วยการพุงโดยก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านเบดของแข็งขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่งโดยมีการถ่ายเทมวลสาร, ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง

#### 3.5.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชัน

กระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

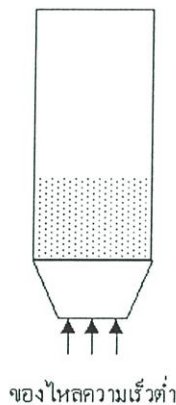
3.5.1.1 ฟลูอิดไดซ์เซชันสองสถานะ (Two - phases fluidization) หมายความว่าในหอทดลอง หรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสองสถานะคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดซ์เซชันจึงแบ่งออกอีก 2 ประเภท คือ

1. ก๊าซฟลูอิดไดซ์เซชัน (Gas fluidization)
2. ฟลูอิดไดซ์เซชันของของเหลว (Liquid fluidization)

3.5.1.2 ฟลูอิดิเซชันสามสถานะ (Three - phases fluidization) หมายความว่าภายในหอทดลองจะประกอบด้วยของสามสถานะในเวลาเดียวกันคือ ของแข็ง, ของเหลวและก๊าซ สำหรับฟลูอิดิเซชันสามสถานะเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดิเซชันสองสถานะ

### 3.5.2 ลักษณะฟลูอิดไดเบด [13]

เบด ( Bed ) หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในห้องทดลอง จะระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง

ปรากฏการณ์ฟลูอิดิเซชันเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล, ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด, ลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันลดในเบดเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูปที่ 3.7 ลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

3.5.2.1 เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า “เบดนิ่ง” (Fixed bed)

3.5.2.2 เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “เบดขยาย” (Expanded bed)

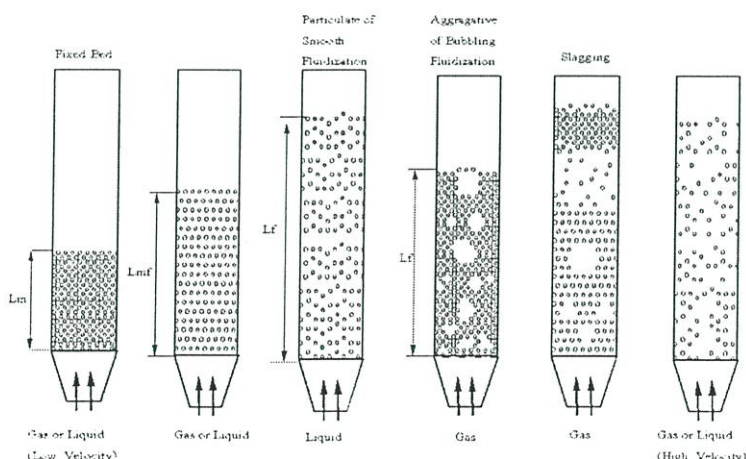
3.5.2.3 เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุดๆ หนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันลดในเบดระหนัดใดๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้นๆ เบดในสภาพเช่นนี้เป็นเบดที่เริ่มฟลูอิดิเซชัน เรียก

เบดในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบด (Incipiently fluidized bed) หรือเบดที่มีสภาพฟลูอิดไดซ์เซชันต่ำสุด (Minimum fluidization)

3.5.2.4 เมื่อของไหลมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่กล่าวในหัวข้อ 3.5.2.3 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนตัวห่างออกจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหลจะเริ่มเกิดฟองก๊าซ(Bubbles) เกิดขึ้นอนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งจะรุนแรงยิ่งขึ้น เบดในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “ บับบลิ้งฟลูอิดไดซ์เบด ” (Bubbling fluidized bed) ส่วนของเบดที่ไม่รวมฟองเรียกว่า “ อิมัลชันเฟส ” (Emulsion phase)

3.5.2.5 ฟลูอิดไดซ์เบดที่สามารถบ่งบอกระดับเบดได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense phase fluidized bed) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย (Terminal velocity) อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะเรียกว่า “ ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง “ (Lean phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล (Pneumatic or Hydraulic transport)

3.5.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของอนุภาคของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดแบบนี้ว่า “ เบดสม่ำเสมอ “ (Smoothly fluidized bed) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซลักษณะของเบดจะแตกต่างจากของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันแล้วก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วเกิดเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซจะแทรกตัวเองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบด และแตกตัวในที่สุด การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเบดจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.7 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

### 3.5.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดแบ่งตามสมบัติของอนุภาค [13]

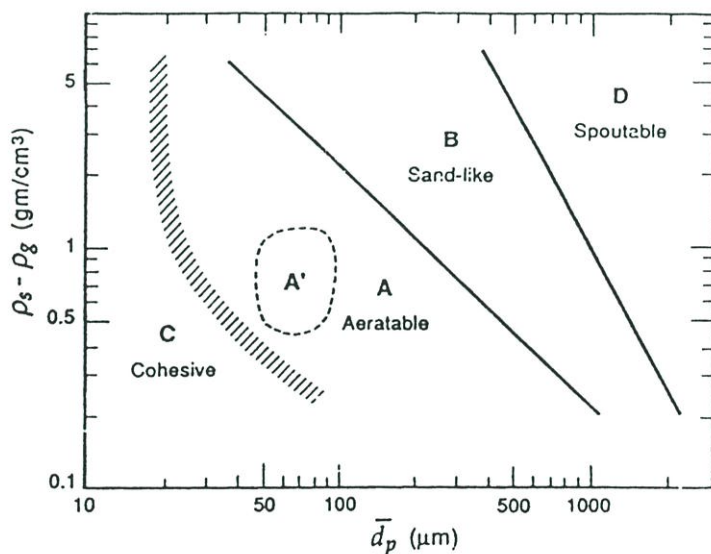
Geldart แบ่งลักษณะฟลูอิดไดซ์เบดตามสมบัติของอนุภาคออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

ก) Group C (Cohesive) อนุภาคมีขนาดละเอียดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ยาก ตัวอย่างเช่น แป้งจากเมล็ดธัญพืช

ข) Group A (Aeratable) อนุภาคมีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำ (น้อยกว่า  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ) จะเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ง่าย โดยเกิด Homogeneous Fluidization ที่มีความเร็วก๊าซต่ำและ Bubbling bed ที่ความเร็วสูง

ค) Group B (Sand like) อนุภาคอยู่ในช่วง  $d_p = 0.0016-0.0197$  นิ้ว และมีความหนาแน่น  $p_s = 1.4-4 \text{ g/cm}^3$  อนุภาคในกลุ่มนี้ฟลูอิดไดซ์ได้ดี โดยมีการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซอย่างรุนแรงและฟองก๊าซ จะขยายขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูงของเบด

ง) Group D (Spoutable) อนุภาคมีขนาดใหญ่และความหนาแน่นสูง ทำให้ไม่เกิดสถานะฟลูอิดไดซ์เซชัน หรือเกิดได้ยาก การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซและของแข็งทำได้โดยผ่านอากาศให้เข้าตรงกลางหอ ในลักษณะเป็นลำอากาศ ลักษณะสัมผัสแบบนี้เรียก "Spouted bed"



รูปที่ 3.8 เป็นแผนภูมิ Geldart ใช้ได้กับฟลูอิดไดซ์เบดที่มีอากาศเป็นตัวกลางที่สถานะปกติ และความเร็วอากาศต่ำกว่า  $10 U_{mf}$  มีประโยชน์บอกถึงลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด เมื่อทราบขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค

### 3.5.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดซ์เซชัน [13]

ขณะที่ของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านใกล้ผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอทดลองที่บรรจุอนุภาคของของแข็งมีอิทธิ

ผลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลใน หอทดลองจะลดน้อยลง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

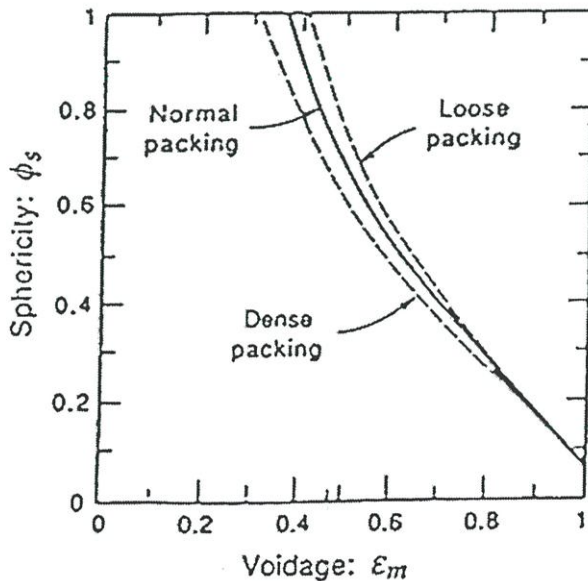
ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันคือ

1. ความเร็วของของไหล
2. ตัวกระจายของไหล
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง
4. อนุภาคของแข็ง
5. ความหนาแน่นของของไหล
6. ความหนืด
7. ความสูงของเบด

ค่าความกลมของอนุภาค ( $\phi_s$ ) ใบบ่งบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด นิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \quad \text{เมื่อปริมาตรเท่ากัน} \quad (3.2)$$

จากรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นได้ว่า เมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด [13]

### 3.5.5 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (Minimum Fluidizing Velocity)

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันคือ ความเร็วที่ทำให้แรงต้านการไหลของอนุภาค(Drag Force) มีค่าเท่ากับน้ำหนักของตัวมัน  
(แรงต้าน)=(น้ำหนัก)

หรือ

(ความดันตกคร่อม)(พื้นที่หน้าตัดท่อ)=(ปริมาตรของเบด)(เศษส่วนปริมาตรของของแข็งในเบด)(น้ำหนักจำเพาะของเบด)

(3.3)

ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์

$$(\Delta P_b)A_t = W = A_t L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) \left[ (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \quad (3.4)$$

$A_t$  = พื้นที่หน้าตัดของเบด

$\Delta P_b$  = ความดันตกของเบด

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของอนุภาค

$\rho_g$  = ความหนาแน่นของของไหล

$g$  = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

$g_c$  = ค่าคงที่ขึ้นกับระบบหน่วยที่ใช้เช่น  $g_c = 32.2$  ในระบบหน่วย lb, lbm, ft, sec

จัดเทอมในสมการ(3.4)จะได้

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.5)$$

ค่า  $\varepsilon_{mf}$  โดยปกติจะมีค่าสูงกว่าความพรุนของเบดหนึ่ง ( $\varepsilon_m$ ) เล็กน้อยความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ( $U_{mf}$ ) หาได้จากสมการ

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.6)$$

หรืออยู่ในรูปกลุ่มไร้มิติ

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{p,mf} = \text{Ar} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$\text{Re}_{p,mf} = \text{ตัวเลขเรย์โนลด์} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu}$$

$$\text{Ar} = \text{ตัวเลขอาคิมิติส} = \frac{d_p \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

ก) ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก ( $\text{Re}_{p,mf} < 20$ )

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{150} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \text{Re}_{p,mf} < 20 \quad (3.8)$$

ข) ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ ( $\text{Re}_{p,mf} > 1000$ )

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{1.75 \rho_g} \varepsilon_{mf}^3 \phi_s, \text{Re}_{p,mf} < 1000 \quad (3.9)$$

ในกรณีที่ไมทราบค่า  $\varepsilon_{mf}$  และ  $\phi_s$  เราสามารถประมาณค่า  $U_{mf}$  ได้โดยพิจารณาสมการ 3.8 เขียนใหม่ได้เป็น

$$K_1 \text{Re}_{p,mf}^2 + K_2 \text{Re}_{p,mf} = Ar$$

$$\text{เมื่อ } K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{ และ } K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

จากการศึกษาพบว่า  $K_1$  และ  $K_2$  มีค่าค่อนข้างค่าที่สำหรับอนุภาคชนิดต่างๆ ในช่วง  $\text{Re}_p$  ตั้งแต่ 0.001-4000 และตารางที่ 3.1 สรุปค่า  $K_1$  และ  $K_2$  จากคณะวิจัยต่างๆ

ก) สำหรับอนุภาคมีขนาดใหญ่

$$\text{Re}_{p,mf} = [28.7^2 + 0.0494 Ar]^{1/2} - 28.7 \quad (3.10)$$

ข) สำหรับอนุภาคมีขนาดเล็ก

$$\text{Re}_{p,mf} = [33.7^2 + 0.0408 Ar]^{1/2} - 33.7 \quad (3.11)$$

ตารางที่ 3.1 ค่า  $K_1$  และ  $K_2$  จากคณะวิจัยต่างๆ [13]

Investigators	First, $K_2/2K_1$	Second, $1/K_1$
Wan and Yu(1966)		
284 data points form the literature	33.7	0.0408
Richardson(1971)	25.7	0.0365
Sexena and Vogel(1977)		
Dolomite at high temperature and pressure	25.3	0.0571
Babu et al.(1978)		
Correlation of report data until 1977	25.3	0.0651
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al.(1984)		
Coal,char,Ballotini; up to 64 bar	28.7	0.0494

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของอนุภาคของแข็งเป็นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านฟลูอิดไดซ์เบดถูกจำกัดด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วเริ่มหลุดลอยแสดงได้ดังสมการ

$$U_T = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

โดยที่  $C_d$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหาได้จากการทดลอง และจากการทดลองพบว่าค่า  $C_d$  ขึ้นอยู่กับค่า  $Re_p$  ดังสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.13)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.14)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.15)$$

แทนค่าจากสมการ 3.13, 3.14 และ 3.15 แล้วหาค่า  $U_t$  จะได้

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 0.4 \quad (3.16)$$

$$U_t = d_p \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g \mu} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{เมื่อ} \quad 0.4 < Re_p < 500 \quad (3.17)$$

$$U_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ} \quad 500 < Re_p < 200000 \quad \text{หรือ} \quad 1000 < Re_p \quad (3.18)$$

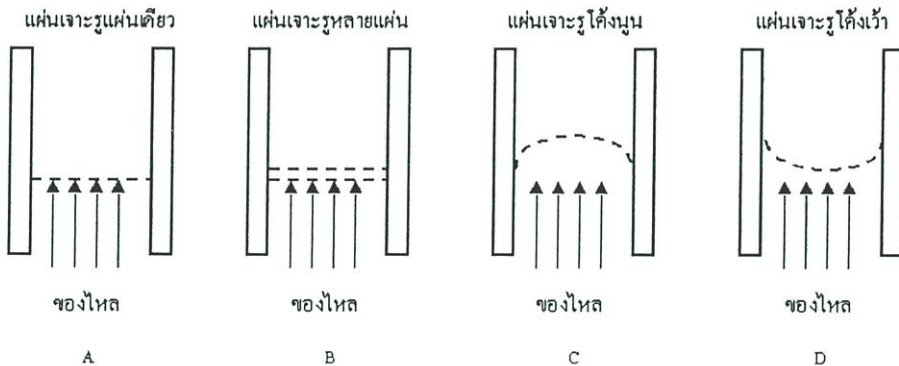
เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว  $U_{mf}$  และความเร็ว  $U_t$  ในการคำนวณหาความเร็ว  $U_{mf}$  เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด ดังนั้นขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้

จะเป็นขนาดโดยเฉลี่ยส่วนการคำนวณความเร็ว  $U$ , จะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กที่สุดปะปนอยู่ในเบด

### 3.5.6 แผ่นกระจายของไหล

หน้าที่ของแผ่นกระจายของไหลคือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคอยู่ในสถานะเสมือนของไหลได้ดีหรือไม่ก็คือ ความดันตกคร่อม โดยของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้าหากความดันตกคร่อมน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันตกคร่อมโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10 % ของความดันตกคร่อมที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆมีดังต่อไปนี้

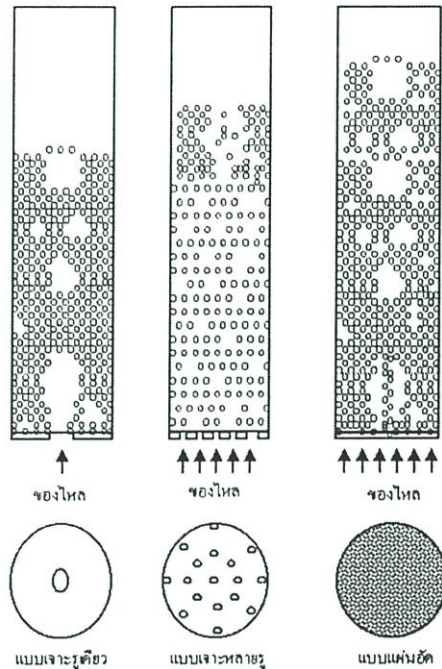
3.5.6.1 แบบแผ่นเจาะรู (Perforate plate) แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้น ทำได้โดยการนำแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อย ลักษณะของอนุภาคเหนือแผ่นกระจายในขณะลอยตัว หรืออยู่ในสถานะเสมือนของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองอากาศใหญ่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นจำนวนรูและการเจาะจึงมีส่วนสำคัญ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการและเครื่องทดลองขนาดกลางเพราะทำง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติดีพอสมควร แสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู

ในขณะที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยความเร็วของของไหลต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด จากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจายของไหลที่รองรับเบดว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่น ตัวกระจายทำด้วยแผ่นโลหะเจาะรูฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาด

ใหญ่กว่าตัวกระจายของไหลที่เป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันอัดสูงๆจนติดกับแผ่นกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลแบบหลังนี้ของไหลผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซจึงเกิดขึ้นได้เป็นจำนวนมาก ตัวกระจายที่เป็นแผ่นเจาะรูของไหลจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ท (Jet) จำนวนการเกิดของฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะบนตัวกระจายดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 คุณภาพของฟลูอิดไคเซชั่นเกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน

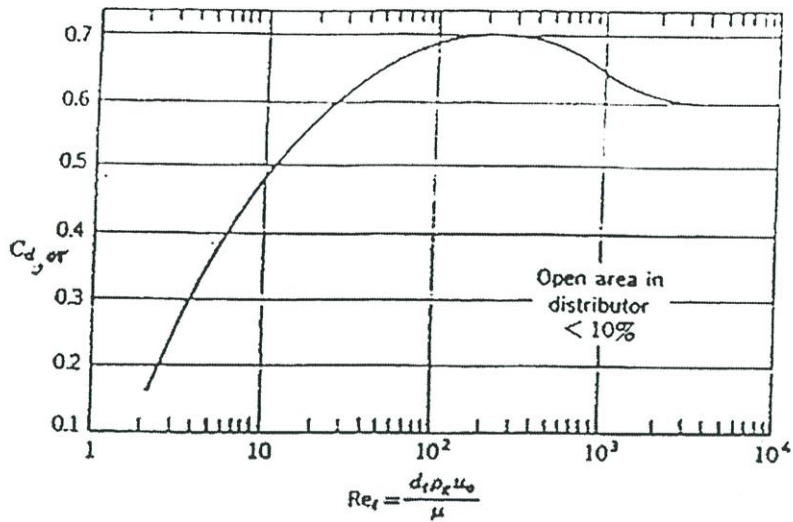
การออกแบบแผ่นกระจายของไหลนั้นมีสิ่งที่สำคัญคือ ความดันลดของก๊าซที่เกิดจากแผ่นกระจายอากาศ สำหรับกฎของการคำนวณความดันลดบนแผ่นกระจายอากาศนั้น สมการที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ดี [13] คือ

$$\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b \quad (3.19)$$

โดยที่ค่า Reynolds Number ( $Re_d$ ) และเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของออริฟิส (Orifice coefficient,  $C_{d,or}$ ) ที่เหมาะสมจากรูปที่ 3.12

คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรูออริฟิสจากสมการ 3.20

$$U_{or} = C_{d,or} \left[ 2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_d$  กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re_p$ )

กำหนดจำนวนรูเจาะของตะแกรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตะแกรงหรือตัวกระจายได้จากสมการ

$$U_0 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.21)$$

### 3.6 กระบวนการเผาไหม้อนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด [4]

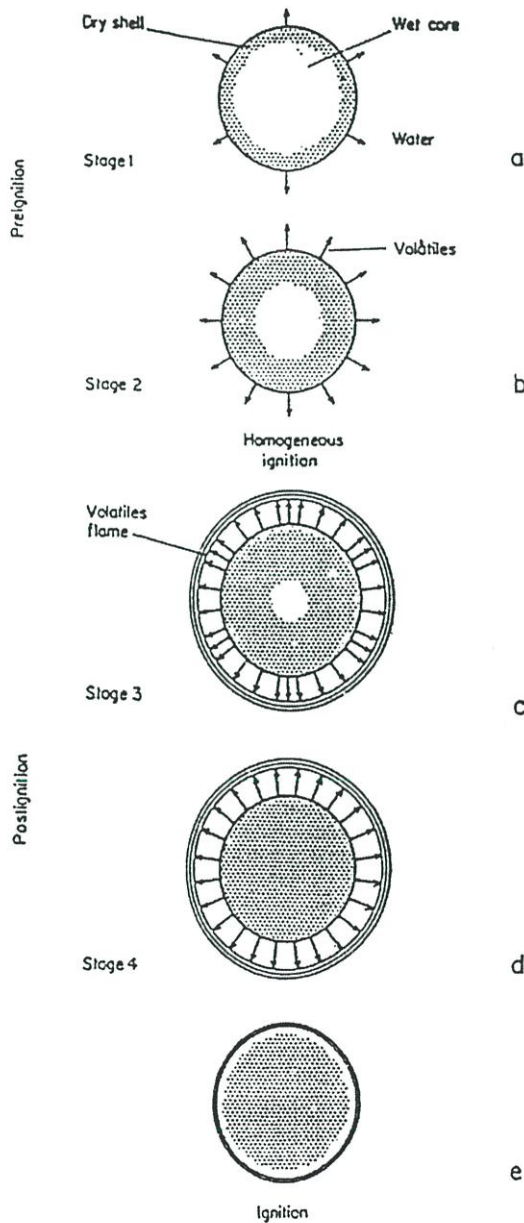
เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.1 mm ถูกป้อนเข้าสู่เตาเผา จะเกิดปรากฏการณ์เป็นขั้นตอนดังนี้

- ก. drying เป็นการกำจัดความชื้นในอนุภาค ขณะเริ่มต้นรับความร้อนในเตาเผา
- ข. devolatilization เป็นขั้นตอนการสลายตัวของอนุภาคเกิดเป็นสารระเหย
- ค. ignition of volatile เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดจากจุดประกายของสารระเหย ที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาค
- ง. combustion of volatile เป็นขบวนการเผาไหม้สารระเหย ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นล้อมรอบอนุภาค
- จ. ignition of char particle เป็นขบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของอนุภาคที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็ก ๆ ที่ผิวด้านนอก แล้วค่อย ๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค
- ฉ. combustion of residual char particle เป็นขบวนการเผาไหม้อนุภาคที่เหลือ หลังจากที่สารระเหย ระเหยออกจากอนุภาคบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือขี้เถ้า

### 3.7 การลุกติดไฟของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด (Ignition of coal particle in fluidized bed)

อุณหภูมิเบดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการลุกติดไฟของอนุภาค เพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาช่วงอุ่นเตาเผา การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิติดไฟจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอุ่นเบด เพราะไม่จำเป็นต้องอุ่นเบดด้วยเชื้อเพลิงอื่น (ก๊าซ/น้ำมัน) จนอุณหภูมิสูงเกินไป

Wildlgger และ Agarwal ได้อธิบายถึงรูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาคว่าสามารถแบ่งเป็น 2 เฟส (ดังรูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 รูปแบบการลุกติดไฟของอนุภาค : a, b, เป็น preignition และ c, d, e เป็น postignition

- pre-ignition phase เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับ drying และ devolatilization ภายใต้สภาวะไพโรไลซิส แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

- ขั้นตอนที่ 1 เมื่อนำอนุภาคใส่ลงในเบคร้อนจะเกิดการระเหยของความชื้นทันทีที่ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างส่วนที่แห้งซึ่งอยู่นอก และส่วนที่ชื้นอยู่ภายในอนุภาค เมื่ออนุภาคได้รับความร้อนนานขึ้น ส่วนที่ชื้นจะมีขนาดเล็กลง ทำให้เกิดส่วนที่แห้งเพิ่มขึ้น

- ขั้นตอนที่ 2 อุณหภูมิในส่วนที่แห้งเริ่มเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการระเหยออกมาของสารระเหย เนื่องจากการแตกของพันธะภายในโครงสร้างของอนุภาค

- post-ignition phase เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับ drying และ devolatilization ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน ทำให้เกิดเปลวไฟล้อมรอบอนุภาค ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

- ขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของอนุภาคมีปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิสูงเพียงพอทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยออกมา เกิดเป็นเปลวไฟชั้นล้อมรอบอนุภาค ความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิด drying และ devolatilization เพิ่มขึ้น ในขั้นตอนนี้ drying จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

- ขั้นตอนที่ 2 อนุภาคเกิด devolatilization ต่อสารระเหยที่ระเหยออกมาจะถูกเผาไหม้เป็นเปลวไฟล้อมรอบอนุภาคและจะดับเหลือแต่อนุภาค เมื่อสารระเหยหมดหรือระเหยออกมาน้อยจนไม่สามารถติดไฟ

### 3.8 การหมุนวนของอากาศทุดิยุมิ [1]

อากาศปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอนุภาคของเชื้อเพลิงเข้ายังห้องเผาไหม้ในแนวตั้งฉาก แล้วจะพยุอนุภาคของเชื้อเพลิงขึ้นสู่ด้านบนห้องเผาไหม้ ขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันและส่งตัวขึ้นสู่ด้านบนนั้นจะมีอากาศทุดิยุมิเข้ามาในแนวสัมผัสกับผนังของเตา ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงหมุนตามไปด้วย ช่วยเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากการไหลวนของอากาศและการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิง

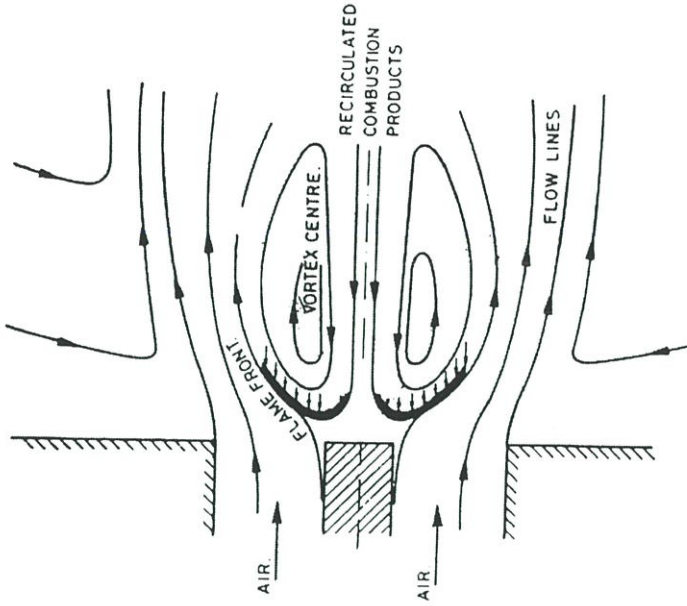
การเคลื่อนที่ของอากาศในลักษณะวอร์เทคเป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (conservation of angular momentum) ทำให้เกิดความเร็วและการหมุนในแนวรัศมีของอนุภาคต่าง ๆ (สามารถพิจารณาโมเลกุลของอากาศ และปริมาตรของอากาศ) จะมีค่าคงที่ เป็นที่น่าสังเกตว่า gradient ความเร็วยังคงอยู่ในของไหลกับความเร็วในแนวเส้นสัมผัสต่ำที่ชั้นนอก (ใกล้บริเวณผนังท่อ) ซึ่งเรียกว่าระบบการไหลแบบ irrotational เมื่อมีผลการไหลที่มีความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้องจะเทียบเท่ากับการกระจายความเร็วของอนุภาคผ่านข้ามไปในแนวรัศมีของท่อ ตามการขยายของทอวอร์เทคในท่อ ทำให้ชั้นความเร็วสูงไปเร่งชั้นความเร็วต่ำที่ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น เรียกการไหลแบบ

rotation และจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ออกจากแนวแกนของท่อ สาเหตุที่มีการถ่ายเทพลังงาน (energy transfer) เพราะมีการทำความร้อนของเลเซอร์ชั้นนอก และการทำความเย็นของเลเซอร์ชั้นใน เมื่ออากาศไหลวนภายในท่อ อากาศที่ค้างอยู่จะไหลย้อนกลับไปยังศูนย์กลางของท่อตามแนวแกนแบบสวนทางกัน (counter flow) ที่เป็นเช่นนี้เพราะบังคับให้มีการหมุนวนในตอนแรกไปยังเส้นรอบวงของท่อ โดยแรงหนีศูนย์กลางที่มาจากการหมุนวนครั้งที่สอง มีการหมุนในทิศทางเชิงมุม (angular direction) อย่างเดียวกับตอนแรกโดยที่ viscous drag และความหนาแน่นแบบปั่นป่วนที่ชั้นขอบเขตระหว่างการหมุนทั้งสองจะอยู่ระหว่างช่วงการหมุนชั้นนอก และการหมุนชั้นใน ในการเคลื่อนที่แบบ synchronous และมีผลต่างทางกายภาพอย่างเดี๋ยวนั้น คือ กระแสทั้งสองเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรงข้ามกัน และการหมุนชั้นในจะมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีชั้นนอก (แตกต่างกับ ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนคือ เป็นอุปกรณ์การเผาไหม้ที่ประยุกต์มาจากไซโคลนดักฝุ่น กล่าวคือ ของไหลซึ่งอาจปนกับอนุภาคของแข็งจะไหลแบบบังคับเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสกับผิวด้านในแล้วจะไหลลักษณะวนเป็นเกลียวหรือขดสปริง (Helix Motion) 2 วง คือ วงแรกเรียกว่า การไหลวนรอบนอก (Outer Vortex) มีทิศทางไหลลงสู่กันไซโคลน วงที่สอง เรียกว่า การไหลวนภายใน (Inner Vortex) ภายใต้อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) มีทิศทางไหลวนกลับมาในแนวแกนออกสู่ปากไซโคลน ซึ่งการไหลวนของอากาศภายในเตาเผาไซโคลนนั้นจะใช้ปริมาณและความเร็วของอากาศมากกว่าการเกิดการหมุนวนในเตาออร์ทเทค) แสดงในรูปที่ 3.14

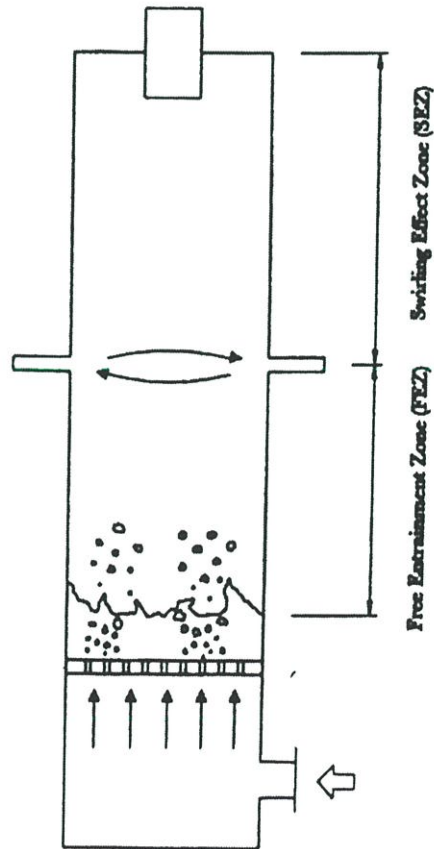
### 3.9 การกระจายตัวของความเร็ว [14]

ลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว (Velocity Profile) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถบ่งบอกได้ถึงเสถียรภาพของเปลวไฟ (Flame Stabilisation) กล่าวคือตำแหน่งที่เสถียรตัวของเปลวไฟเป็นบริเวณที่มีความเร็วเท่ากับศูนย์ (Stagnation) จากการกระจายตัวของความเร็วการฟอร์มตัวของการไหลเป็นบริเวณการไหลหมุนวนกลับมาอีก (Recirculation Zone) ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการเสถียรตัวด้วยเทคนิคการหมุนวน (Swirl) นอกจากนี้ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วยังเป็นบ่งชี้ให้เห็นถึงโมเมนต์สัมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นจากการหมุนวนของอากาศที่จ่ายเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ เนื่องจากว่าความรุนแรงจะก่อให้เกิดโซนการไหลย้อนกลับ (Recirculation Zone) ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติที่ดีของการเผาไหม้ทำให้เสถียรภาพของเปลวไฟลดลง เมื่อนำไปประกอบกับลักษณะทางเรขาคณิตของหัวฉีดอากาศทุติยภูมิจะทำให้ทราบถึงคุณภาพของส่วนผสมในเบื้องต้น

อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิก [11], Free board ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ The Free Entrainment Zone (FEZ) และบริเวณผลของการหมุนวน (The Swirling Effect Zone, SEZ) ซึ่งความยาวของบริเวณการหมุนวนเป็นตัวแปรหลักสำหรับการหลุดลอยของอนุภาคในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนซึ่งอธิบายในรูป



รูปที่ 3.14 ปรางภูการณ์ Recirculation



รูปที่ 3.15 อธิบายปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิกของเตา VFBC

### 3.10 การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ [7]

โดยทั่วไปการหาประสิทธิภาพการเผาไหม้สามารถหาได้ด้วยการวัดเพียงอย่างเดียว โดยการหาการสูญเสียของคาร์บอนที่ยังไม่ได้ถูกเผาไหม้ที่อยู่ภายในจี้เต้า วิธีที่ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้หาได้ดังนี้

$$\eta_c = [ 1 - \text{ค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่เหลือในจี้เต้าและจากแก๊สไอเสีย} / \text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง} ] \times 100 \% \quad (3.22)$$

การสูญเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการเผาไหม้ CO ในก๊าซไอเสียซึ่งโดยทั่วไปน้อยกว่า 1 % ฉะนั้นการไม่เผาไหม้ของก๊าซ CO ในก๊าซไอเสียหรือการไม่เผาไหม้ของสารระเหยในอนุภาคถ่านหินในจี้เต้าสามารถมีค่าเป็นลบ อย่างไรก็ตามการสูญเสียของคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ในเบดมีค่าเป็นลบ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งหาได้ใกล้เคียงด้วยการหาเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่เหลืออยู่ในจี้เต้า

วิธีประยุกต์สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้

$$\eta_c = [ 1 - \text{ค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่เหลือในจี้เต้า} / \text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง} ] \times 100 \% \quad (3.23)$$

พื้นฐานของการหาอัตราการสิ้นเปลือง  $O_2$  (ซึ่งหาได้โดยการสมดุลมวลของคาร์บอน) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\eta_c = \frac{C \times x + S + H}{C + S + H} \times 100 \% \quad (3.24)$$

เมื่อ  $C$  = สัดส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอน

$S$  = สัดส่วนโดยน้ำหนักของซัลเฟอร์

$H$  = สัดส่วนโดยน้ำหนักของไฮโดรเจน

$x$  = สัดส่วนของการออกซิเดชันของคาร์บอน

## บทที่ 4

### การออกแบบและการคำนวณ

#### 4.1 บทนำ

หัวข้อที่สำคัญในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ การออกแบบและการคำนวณ ซึ่งการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน โดยเป็นการนำส่วนดีของเตาเผาไซโคลน, เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด และเตาเผาเวอร์เทค ซึ่งการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนที่ยึดหลักการเหนี่ยวนำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยการหมุนวนของอากาศที่เข้าทางด้านข้างตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Air) ซึ่งการหมุนวนจะช่วยเพิ่ม residence time ของอนุภาคเชื้อเพลิงในเตาและลดการสูญเสียของอนุภาคละเอียดที่หลุดลอยออกไปจากเตา (Elutriation)

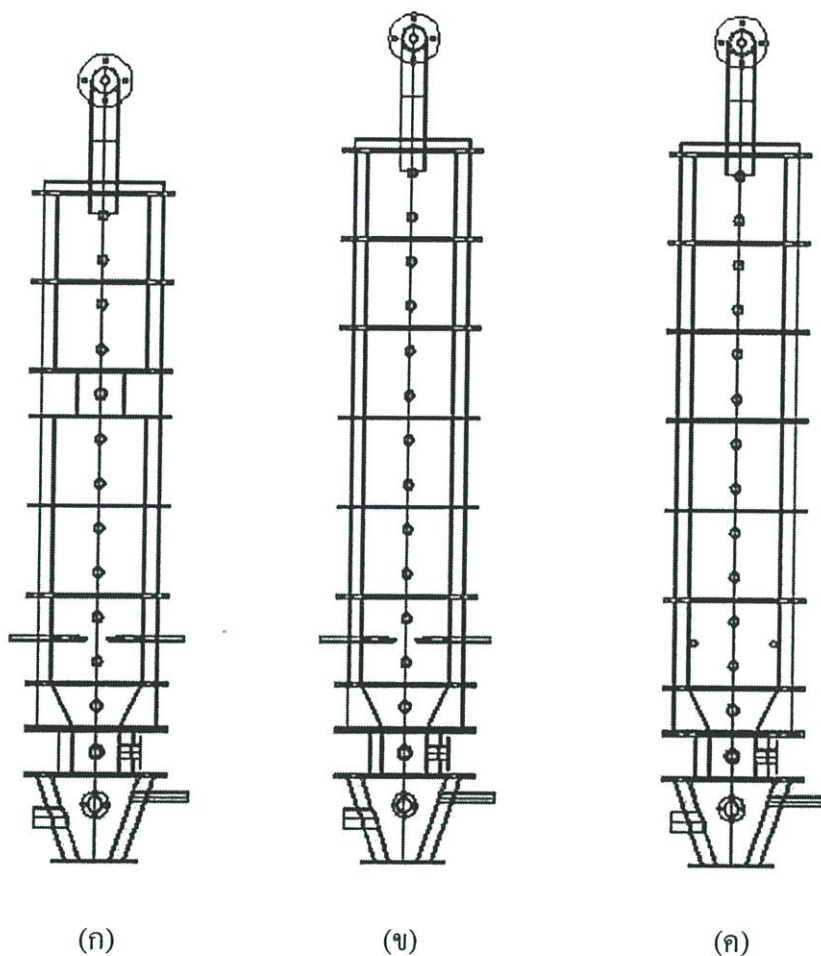
ลักษณะ โครงสร้างของการไหลแบบหมุนวนที่สร้างโดยเทคนิค VFBC แสดงโดยความเร็วของ gas-solid slip ที่สูง, strong turbulence intensity และการหมุนวนของวัสดุภายในเตา ซึ่งในลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น, ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่สูง, ประสิทธิภาพของ Desulfurization ที่สูงและการปล่อยมลพิษที่ลดต่ำลง โดยการศึกษาถึงอิทธิพลของคอคอดที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Recirculation และอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในที่เกิดขึ้น ส่วนในหัวข้อการคำนวณยึดหลักทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสารโดยคำนึงถึงองค์ประกอบของสารตั้งต้น (เชื้อเพลิง) เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจนได้ผลิตภัณฑ์ออกมา เพื่อคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการใช้ในการคำนวณส่วนการหาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงกลบสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมจากภาคผนวก ก.

#### 4.2 การออกแบบเตาเผา

จากการศึกษาเตาเผาไซโคลน, เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด และเตาเผาเวอร์เทค ทำให้ทราบปัญหาในการคำนวณของเตาเผาเพื่อนำมาปรับปรุงออกแบบสร้างและทดสอบดังนี้

##### 4.2.1 ขนาดของเตาเผาที่เหมาะสม

ขนาดความสูงทั้งหมดของเตาเผาที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือในกรณีที่มีคอคอด (Throat) จะมีความสูงเท่ากับ 2,720 mm. และกรณีที่ไม่มีการคอคอด (Without throat) จะมีความสูงเท่ากับ 2,870 mm. เนื่องจากการติดตั้งชุดคอคอดจะเป็นการเพิ่มขั้นการเผาไหม้มากขึ้นเพื่อทำให้เกิดการหมุนวนไปมาอย่างรุนแรง Recirculation โดยขนาด (Throat) มีขนาดเท่ากับ 0.5 D ซึ่งขนาดของเตาเผาที่เหมาะสมจะช่วยให้อากาศกับเชื้อเพลิงมีการคลุกเคล้าในขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดีและยังเป็นการเพิ่มเวลาในการเผาไหม้ให้นานขึ้นจนสามารถเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้

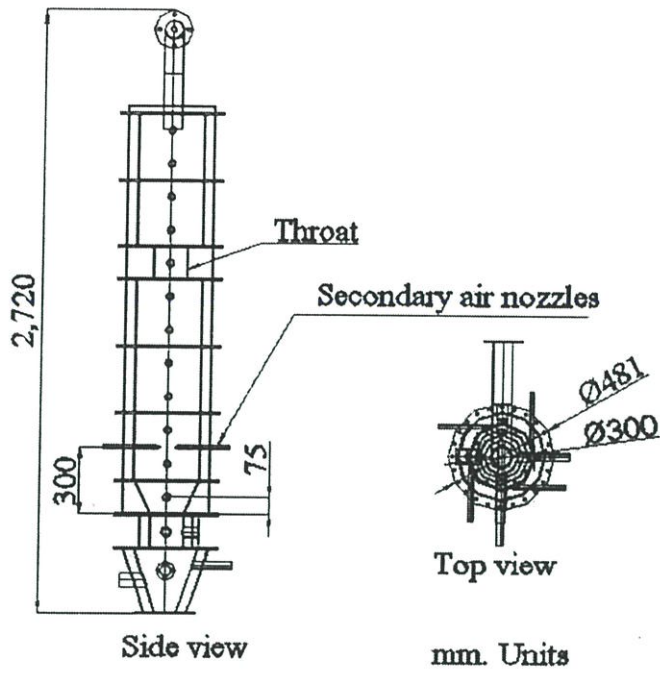


รูปที่ 4.1 ก. แสดงเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีที่มีคอคอด

ข. กรณีไม่มีคอคอด,มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ และ ค.กรณีไม่มีคอคอดและ ไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ

#### 4.2.2 ระบบการป้อนอากาศทุติยภูมิ

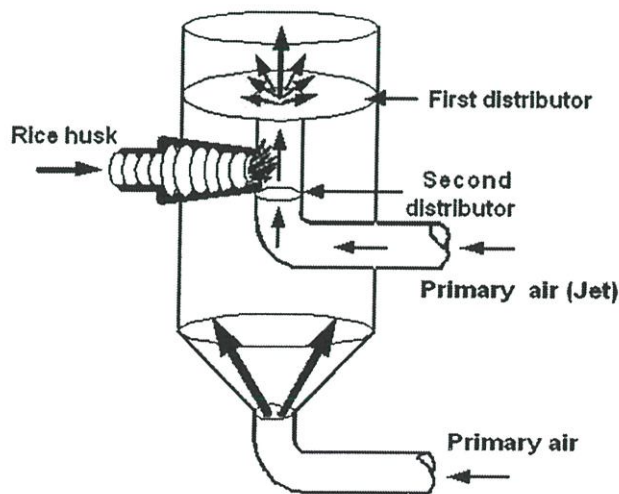
อากาศทุติยภูมิได้จากท่อลมหลักที่ By pass จาก Blower และทำการแยกอากาศในท่อของอากาศทุติยภูมิเป็นท่อเล็ก ๆ (nozzles) ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศทุติยภูมิมีขนาดเท่ากับ 19 mm. และตำแหน่งของการติดตั้งหัวฉีดอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 300 mm. เหนือแผ่นกระจายลมเพื่อฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าไปในเตาเผาที่บริเวณผนังเตาซึ่งทำการออกแบบท่อที่ฉีดอากาศที่เข้าไปในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวง ในแนวเส้นสัมผัสซึ่งจำนวนของหัวฉีดมีอยู่ด้วยกัน 4 หัวฉีดที่สมมาตรทางเรขาคณิต เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศเป็นไปอย่างสมมาตรไม่กีดขวางทิศทางของแนวอากาศปฐมภูมิที่เข้าทางด้านล่างและยังเป็นการเพิ่มการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) และคอคอด(throat)

#### 4.2.3 ระบบการป้อนเชื้อเพลิง

การใช้ระบบการป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบเกลียว (Screw Feeder) โดยป้อนตรงเข้าสู่ท่อขนาด 45 mm. ซึ่งเป็นจุดตั้งลักษณะเข้าแบบตั้งฉาก ( $90^{\circ}$ ) กับท่อลม Nozzle Jet เป็นลมที่ช่วยพาอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงโดยใช้อากาศพาเชื้อเพลิงกลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทางด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะการป้อนของเชื้อเพลิงกลับ

ในการออกแบบดังกล่าวนี้ เพื่อป้องกันเปลวไฟย้อนกลับไปยังชุดป้อนเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ไบโอแก๊สเสียหาย (ในกรณีที่ปรับอากาศน้อย) และยังช่วยลดการติดขัดของเชื้อเพลิงแกลบในท่อนก่อนเข้าเตาเผา

การออกแบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน ตัวเตาเผามีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) ที่ใช้ในการทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 ขนาด คือ กรณีที่มีคอคอด (Throat) จะประกอบด้วยชิ้นส่วน 9 ชิ้น รายละเอียดของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นสามารถดูได้จากหัวข้อ 5.1 ซึ่งความสูงของเตาเผาจะมีความสูงเท่ากับ 2,720 mm. และกรณีไม่มีคอคอด (Without Throat) ความสูงของเตาเท่ากับ 2,870 mm. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอคอดมีขนาดเท่ากับ 150 mm. และมีความสูงเท่ากับ 150 mm. ส่วนกรณีที่ไม่มีคอคอดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 300 mm. และมีความสูงเท่ากับ 300 mm.

ฝาบนเป็นเหล็กแผ่นที่หล่อด้วยคอนกรีตหนา 40 mm. และหน้าแปลนของเตาเผามีทั้งส่วนบนและส่วนล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 481 mm. มีความหนา 5 mm. ซึ่งฝาบนนี้จะเป็นจุดต่อของท่อไอเสีย

อากาศที่ใช้ในการทดลองจะใช้อากาศด้วยกัน 3 ส่วน คือ อากาศปฐมภูมิ (Primary Air), อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) และอากาศจาก Nozzle Jet โดยอากาศปฐมภูมิเป็นอากาศที่ช่วยทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันได้จาก Blower ที่มีขนาด 10 hp. เป็นแหล่งจ่ายอากาศเข้าสู่ท่อจ่ายอากาศฉีดมีขนาด 45 mm. ในการทดลองกำหนดให้ใช้อากาศปฐมภูมิเข้าทางด้านล่างของเตาเผา ส่วนอากาศทุติยภูมิเป็นอากาศที่จ่ายเข้าสู่เตาเผาไหลเข้าบริเวณด้านข้างผนังเตาในแนวเส้นสัมผัสเพื่อช่วยให้เกิดการหมุนวนและคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้แหล่งจ่ายลมที่ By pass มาจาก Blower โดยจากท่อลมหลักจะต่อท่อลม Secondary Air ขนาด 50 mm. ซึ่งอากาศทุติยภูมิมีอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 2,500 L/min. โดยอากาศทุติยภูมิจะถูกแยกออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน เข้าสู่ท่อฉีด (Nozzle) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm. ที่ยึดติดอยู่กับผนังเตาเผาในแนวเส้นสัมผัส

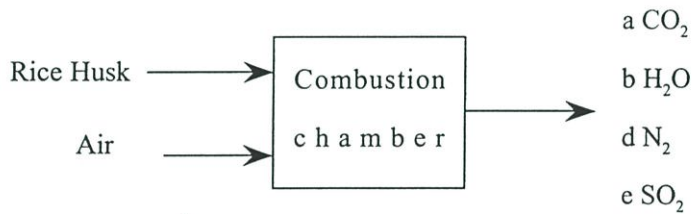
การฉีดอากาศทุติยภูมิจะฉีดอากาศเข้าเตาเผา 1 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะ 300 mm. เหนือแผ่นกระจายลมจะมีจุดฉีดอากาศทุติยภูมิ 4 จุด แต่ละจุดตั้งฉากกับรัศมีของเตาเผาในแนวเส้นสัมผัส (Tangent) และทุกจุดทำมุมระหว่างกันทุก ๆ 90 องศา และยังตั้งฉากกับแนวแกนของตัวเตาเผาและอากาศปฐมภูมิ, อากาศทุติยภูมิ Nozzle Jet จะถูกควบคุมด้วยวาล์วควบคุม (Gate Valve) และวัดอัตราการไหลผ่านชุด Orifice plate และ Manometer โดยชุด Orifice plate ถูกทำการปรับเทียบอัตราการไหลด้วย Flow meter รายละเอียดสามารถดูได้จากหัวข้อ 5.3

### 4.3 การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

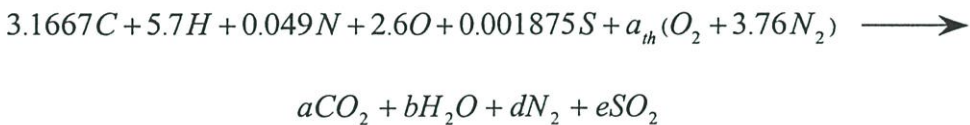
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมล
คาร์บอน	38.0	12	3.1667
ไฮโดรเจน	5.7	1	5.7
ไนโตรเจน	0.69	14	0.049
ออกซิเจน	41.6	16	2.6
ซัลเฟอร์	0.06	32	0.001875
น้ำ	19.8	-	-

การสมดุลปฏิกิริยาเคมี



สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้

$$C : \quad 3.1667 \quad \longrightarrow \quad = \quad a$$

$$a = 3.1667$$

$$H : \quad 5.7 \quad \longrightarrow \quad = \quad 2b$$

$$b = 2.85$$

$$S : \quad 0.001875 \quad \longrightarrow \quad = \quad e$$

$$e = 0.001875$$

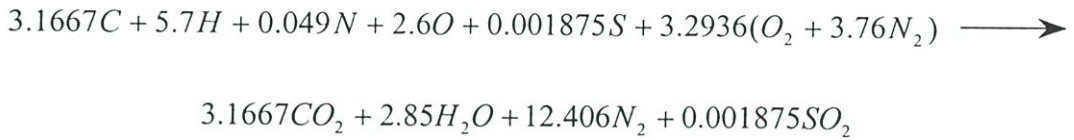
$$O : \quad 2.6 + 2a_{th} \quad \longrightarrow \quad = \quad 2a + b + 2e$$

$$a_{th} = 3.2936$$

$$N : \quad 0.049 + a_{th}(2 \times 3.76) \quad \longrightarrow \quad = \quad 2d$$

$$d = 12.406$$

ทำการแทนค่าลงในสมการจะได้



จำนวน โมลของอากาศแห้งจะปฏิกิริยาเคมีนี้มีค่าเท่ากับ

$$4.76a_{th} = 4.76 \times 3.2936 = 15.678 \text{ kmol}$$

เนื่องจากการสมดุลสมการของเราใช้กับอากาศแห้ง แต่ในการทดลองไม่สามารถทำให้เป็นอากาศแห้งได้ เพราะฉะนั้นเราจะต้องทำการคิดปริมาณความชื้นในอากาศเข้าไปในสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย โดยที่เราจะทำการกำหนดสถานะของอากาศดังนี้

อากาศมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ( Dry-bulb temperature ) เท่ากับ  $33^\circ\text{C}$

ความชื้นสัมพัทธ์ ( Relative Humidity , RH ) เท่ากับ 53%

เพราะฉะนั้นทำการหาค่าความดันย่อยในอากาศที่สถานะนี้ได้เท่ากับ  
เปิดค่าจากตาราง จะได้

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

$$\therefore P_{v,air} = \Phi_{air} P_{sat,H_2O} = 0.53 \times 5.0752 = 2.690 \text{ kPa}$$

จำนวน โมลของละอองน้ำในอากาศจากสมการ

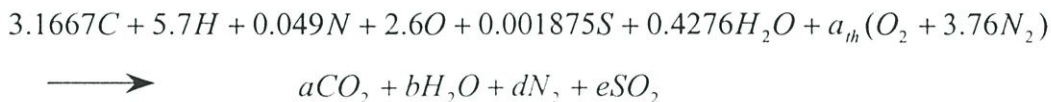
$$\left( \frac{N_{v,H_2O,air}}{N_{v,total}} \right) = \left( \frac{P_{v,air}}{P_{v,total}} \right)$$

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

$$= \left( \frac{2.690 \text{ kPa}}{101.325 \text{ kPa}} \right) \times (15.678 + N_{v,H_2O,air}) \text{ kmol}$$

$$\therefore N_{v,H_2O,air} = 0.4276 \text{ kmol}$$

เพราะฉะนั้นทำการสมดุลสมการการเผาไหม้สำหรับอากาศชื้นใหม่จะได้ดังนี้



ทำการสมดุลสมการจะได้

$$C : 3.1667 \longrightarrow = a$$

$$a = 3.1667$$

$$H : 5.7 + (0.4276 \times 2) \longrightarrow = 2b$$

$$b = 3.2776$$

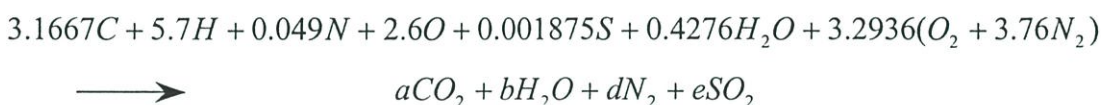
$$S : 0.001875 \longrightarrow = e$$

$$e = 0.001875$$

$$O : 2.6 + 0.4276 + (a_{th} \times 2) = 2a + b + 2e \longrightarrow a_{th} = 3.2936$$

$$N : 0.049 + (a_{th} \times 3.76 \times 2) = 2d \longrightarrow d = 12.408$$

นำค่าตัวแปรที่ทำการคำนวณได้แทนค่ากลับในสมการจะได้สมการเผาไหม้ของอากาศชั้นกับเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการเผาไหม้พอ คือ



จากนั้นทำการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

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

มวลของอากาศเท่ากับ

$$m_{air} = n_{air} \times MW_{air} = (n_{dry\ air} \times MW_{dry\ air}) + (n_{H_2O} \times MW_{H_2O})$$

$$= (3.2936 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right) + (0.4276 \text{ kmol} \times 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})$$

$$= 461.875 \text{ kg}$$

มวลของเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$m_{fuel} = n_{fuel} \times MW_{fuel} = (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_N \times MW_N) + (n_O \times MW_O)$$

$$+ (n_S \times MW_S)$$

$$= (3.1667 \times 12) + (5.7 \times 1) + (0.049 \times 14) + (2.6 \times 16) + (0.001875 \times 32) \text{ kg}$$

$$= 86.046 \text{ kg}$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{ratio} = \frac{461.875 \text{ kg}}{86.046 \text{ kg}}$$

$$= 5.368$$

จากสมการอัตราส่วนสมมูล

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stioc}}{(A/F)_{act}} = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stioc}}$$

- Fuel rich mixture       $\Phi > 1$     ปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
- Stoichiometric         $\Phi = 1$     ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี
- Fuel lean mixture       $\Phi < 1$     ปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

ตารางที่ 4.2 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 18 kg/hr

$\Phi$	Primary Air (l/min)			Nozzle Jet (l/min)	Secondary Air (l/min)	
	100%	75%	60%		25%	40%
0.2	5560	4170	3336	1150	1399.03	2238.45
0.25	4218	3163.5	2530.6	1150	1342	2147.2
0.3	3323.33	2204.99	1533.998	1150	1118.25	1789.332
0.35	2684.28	1725.714	1150.571	1150	958.57	1533.712

## บทที่ 5

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 5.1 บทนำ

ขั้นตอนในการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก คือ ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองและการเก็บข้อมูล, ขั้นตอนที่สอง คือ ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดลองเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดและการปรับเทียบอุปกรณ์ในการทดลอง และขั้นตอนที่ 3 คือ ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

### 5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองและการเก็บข้อมูล

ในการทดลองการเผาไหม้ของเตาฟลูอิด ไคซ์เบดเกี่ยวกับการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาประกอบด้วยชิ้นส่วนตัวเตาเผาและอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมายที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ อุปกรณ์ในการทดลองและส่วนที่สอง คือ อุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล ฉะนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

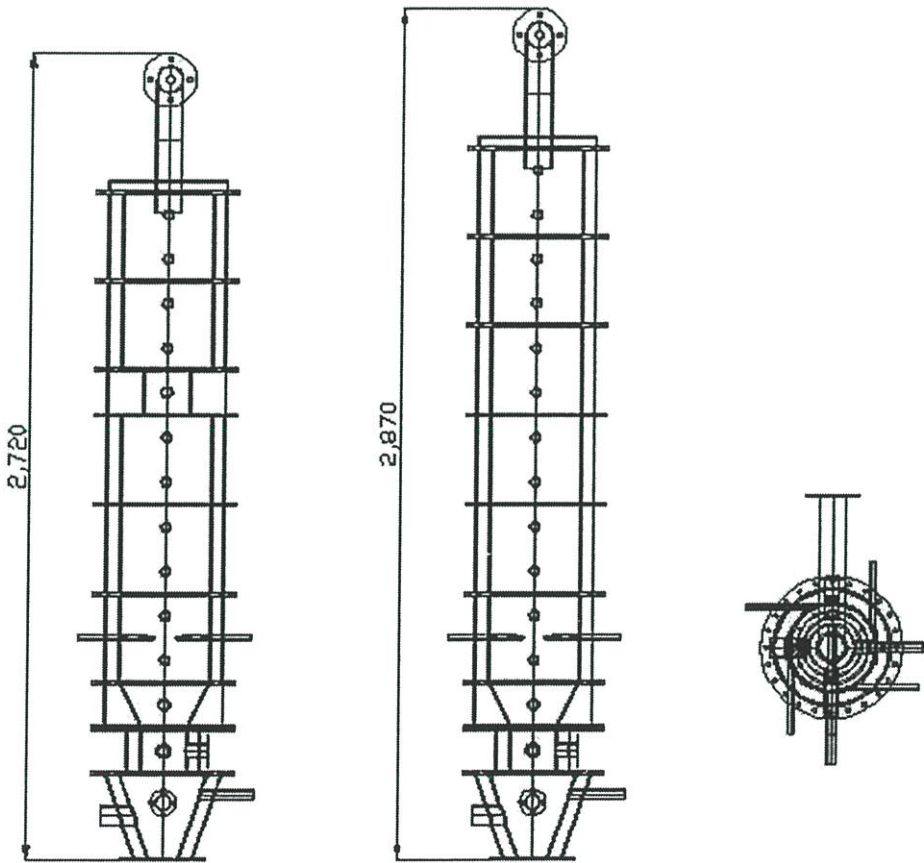
#### 5.2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

แบ่งอุปกรณ์ในการทดลองได้เป็น 4 ประเภท คือ

##### 5.2.1.1 ชุดประกอบเตาเผา

เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (Vortexing Fluidized-bed Combustor, VFBC ) ประกอบเตาเผาที่มีลักษณะเป็นท่อรูปทรงกระบอกซึ่งเตาเผามีความสูงโดยรวมทั้งสิ้น 2,720 mm. (ในกรณีมีคอคอด) และ 2,870 mm. (ในกรณีที่ไม่มีคอคอด) ซึ่งจะประกอบด้วยชิ้นส่วนทั้งหมด 10 ชิ้น รายละเอียดสามารถดูได้จากรูปที่ 5.1 มีลักษณะดังต่อไปนี้ ชิ้นส่วนที่ 1 ฐานของห้องผสม เป็นจุดต่อระหว่างท่อป้อนอากาศปฐมภูมิมีลักษณะเป็นทรงกรวย ยอดตัวมีขนาดความสูง 300 mm. ระหว่างชั้นของวงแหวนจะมีคอนกรีตทนไฟที่มีความหนา 40 mm. ชิ้นส่วนที่ 2 ห้องผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงประกอบไปด้วยโครงสร้างเหล็กทำเป็นวงแหวนซ้อนกันอยู่ โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในวงแหวนของวงในสุดมีขนาดเท่ากับ 150 mm. เหล็กมีความหนา 6 mm. วงแหวนภายนอกเป็นเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 mm. และมีความสูงเท่ากับ 150 mm. ซึ่งห้องผสมนี้เป็นจุดรวมของท่อที่เป็นจุดรวมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงกลบ ซึ่งท่อรวมนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm. รายละเอียดสามารถดูได้จากรูปที่ 5.2 ชิ้นส่วนที่ 3 ห้องอุ่นเบด ภายนอกจะมีลักษณะเป็นท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเท่ากับ 481 mm. ส่วนภายในประกอบด้วยกรวยยอดตัดที่มีความสูงเท่ากับ 150 mm. โดยเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนเท่ากับ 300 mm. และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่างเท่ากับ 150 mm. ซึ่งจุดนี้จะเป็นส่วนที่อยู่เหนือแผ่นกระจายลมและทำหน้าที่สำหรับอุ่นเตาโดยด้านข้างของเตา

จะเจาะรูขนาด 45 mm. ไว้สำหรับใส่หัวเผา ชั้นส่วนที่ 4 ห้องเผาใหม่ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ ประกอบด้วยโครงสร้างเหล็กที่ทำเป็นลักษณะวงแหวนซ้อนกันอยู่ โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนภายในสุดเท่ากับ 300 mm. เหล็กมีความหนา 6 mm. ระหว่างวงแหวนจะมีคอนกรีตทนไฟที่มีความหนาเท่ากับ 40 mm. วงแหวนวงนอกจะเป็นเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 386 mm. โดยใช้เหล็กหนา 6 mm. ซึ่งมีความสูงเท่ากับ 300 mm. โดยด้านข้างของเตาจะมีท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 19 mm. เจาะเข้าด้านข้างในแนวสัมผัส โดยแต่ละท่อจะวางห่างกันเป็นมุม 90 องศา เพื่อให้อากาศเข้าไปในแนวสัมผัสก่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศ ด้านข้างของเตาจะมีท่อขนาด 30 mm. สำหรับใส่ท่อเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ โดยมีอยู่ด้วยกัน 2 ท่อด้วยกัน ชั้นส่วนที่ 5, 6, 8 และ 9 เป็นห้องเผาใหม่มีลักษณะเหมือนกับห้องเผาใหม่ที่มีระบบป้อนอากาศทุติยภูมิ แต่จะไม่มีท่อสำหรับป้อนอากาศทุติยภูมิ ชั้นส่วนที่ 7 เป็นห้องเผาใหม่ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับห้องเผาใหม่ที่มีระบบการป้อนอากาศทุติยภูมิแต่จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 150 mm. ความสูงมีขนาดเท่ากับ 150 mm. ชั้นส่วนดังกล่าวนี้เรียกว่า คอคอค เพื่อก่อให้เกิดการหมุนวนไปมา เราเรียกว่า Recirculation



(ก) กรณีมีคอคอค(Throat)      (ข) กรณีไม่มีคอคอค(Without Throat)

รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC)

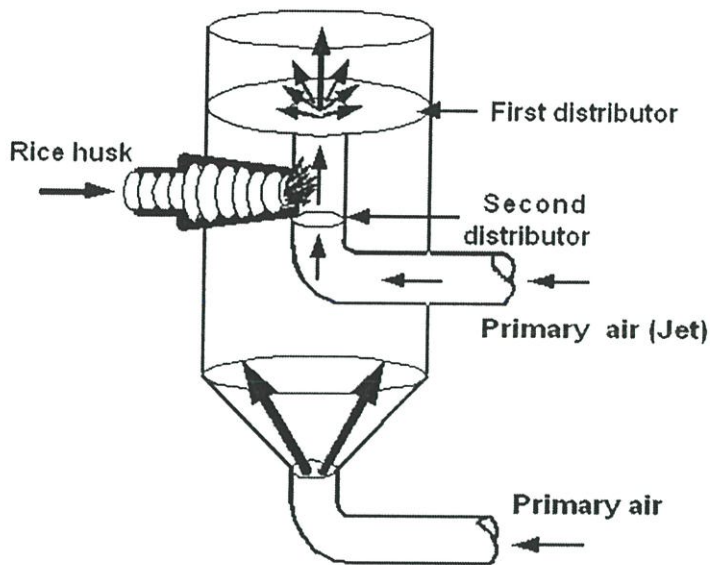
ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วนจะมีแผ่นเหล็กลักษณะวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 mm. และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 300 mm. เชื่อมปิดเพื่อรองรับคอนกรีตทนไฟที่วงแหวนจะเจาะรูขนาด 10 mm. ตามแนวรัศมีจำนวน 12 รู ระยะจากขอบเท่ากัน 20 mm. มีไว้สำหรับยึดน๊อตเพื่อประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ความหนาของขนาดแผ่นเหล็กวงแหวนมีค่าเท่ากับ 6 mm. ที่ขอบล่างของแต่ละชิ้นส่วนก็เป็นเช่นเดียวกัน มีขนาดแผ่นเหล็กลักษณะวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 480 mm. และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 400 mm. มีความหนา 6 mm. เชื่อมติดอยู่เพื่อใช้ยึดติดกับชิ้นส่วนอื่น ๆ

ตารางที่ 5.1 แสดงส่วนประกอบของเตาเผาแก๊สฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

ส่วนประกอบ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ห้องเผาไหม้ (mm.)	ความสูง (mm.)
ชิ้นส่วนที่ 1	300, 150	300
ชิ้นส่วนที่ 2	150	150
ชิ้นส่วนที่ 3	300, 150	150
ชิ้นส่วนที่ 4	300	300
ชิ้นส่วนที่ 5	300	300
ชิ้นส่วนที่ 6	300	300
ชิ้นส่วนที่ 7	150	150
ชิ้นส่วนที่ *7	300	300
ชิ้นส่วนที่ 8	300	300
ชิ้นส่วนที่ 9	300	300

หมายเหตุ \*กรณีปรับเปลี่ยนห้องเผาไหม้ในกรณีที่ไม่มีท่อลดขนาด (คอกอด)

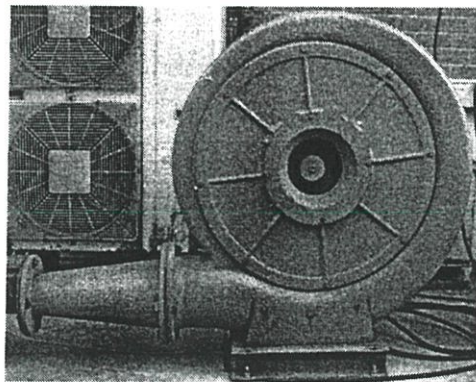
แผ่นกระจายลมแผ่นที่ 1 เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลอยลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลทำการไหลผ่านได้ ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลของมีค่าเท่ากันทุกจุด ลักษณะของแผ่นกระจายลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 481 mm. มีความหนาเท่ากับ 6 mm. ตรงกลางของแผ่นกระจายจะเจาะรูซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 45 mm. ขนาดของรูเจาะจะมีขนาดเท่ากับ 2.5 mm.



รูปที่ 5.2 ลักษณะของการป้อนเชื้อเพลิงกับอากาศ

### 5.2.1.2 ชุดป้อนอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ

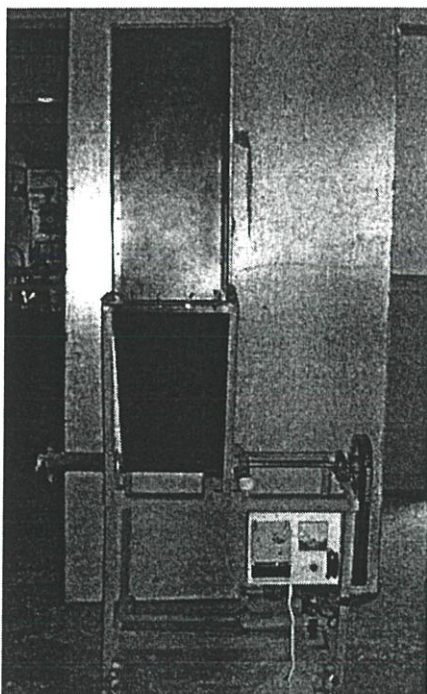
ประกอบด้วย Blower ชนิดใบพัดแบบ Backward inclined Capacity  $100 \text{ m}^3/\text{min}$   
 Pressure  $200 \text{ mm.Aq}$  Speed  $4050 \text{ min}^{-1}$  สร้างความดันของพัดลมที่มากที่สุดเท่ากับ  $72.6$   
 เซนติเมตรของน้ำ มอเตอร์ที่ใช้ขับใบพัดลมเป็นชนิด 3 เฟส ขนาด 10 แรงม้า



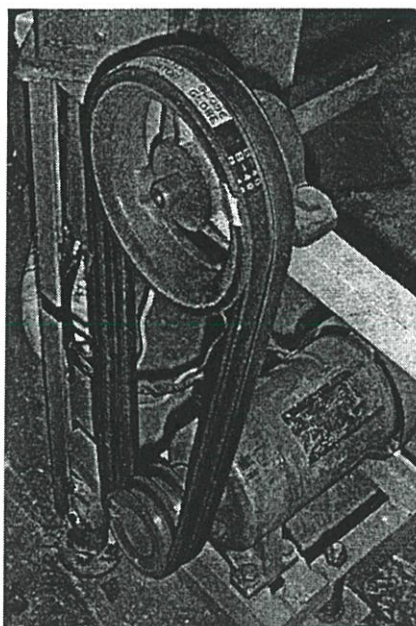
รูปที่ 5.3 แสดง Blower และ Motor

**Motor** ใช้เป็นตัวขับ Blower ขนาด  $7.5 \text{ kw}$   $1400 \text{ rpm}$   $15 \text{ A}$   $380 \text{ V}$   $4 \text{ Pole}$   
 วาล์ว ที่ใช้ในการปรับปริมาณอากาศปฐมภูมิ ใช้ Gate valve ขนาด 3 นิ้ว, อากาศทุติย  
 ภูมิใช้ gate valve ขนาด 2 นิ้ว และอากาศที่ส่งผ่านเข้าผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Nozzles  
 jet) ใช้วาล์ว 2 นิ้ว





รูปที่ 5.6 แสดงชุดป้อนเชื้อเพลิงกลบ



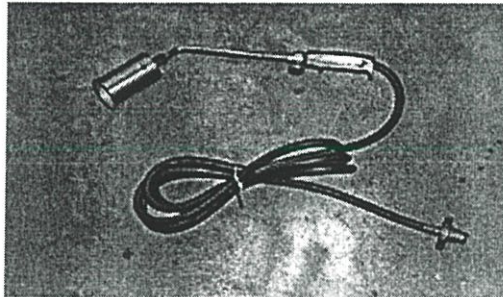
รูปที่ 5.7 แสดงมอเตอร์และชุดสายพาน

#### 5.2.1.4 ชุดอุ่นเตา

ประกอบด้วย ถังแก๊ส LPG ขนาด 15 kg และหัวเผา ขนาด 2 นิ้ว



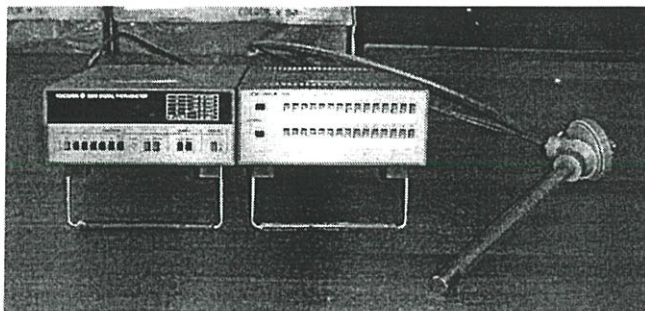
รูปที่ 5.8 แสดงถังแก๊ส



รูปที่ 5.9 แสดงหัวเผาที่ใช้สำหรับอุ่นเตา

#### 5.2.1.5 ชุดอุปกรณ์วัดและอ่านค่าอุณหภูมิ

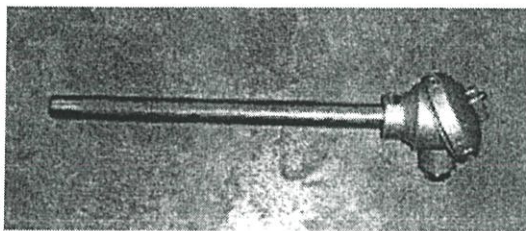
Digital Thermometer and Multichannel Switch เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แสดงผลในการวัดอุณหภูมิ การกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาใหม่แสดงเป็นจำนวนตัวเลขมี 4 หลักและมีหลักทศนิยม 1 ตำแหน่ง สามารถวัดอุณหภูมิของ Thermocouple Type K ได้ถึง  $1,370^{\circ}\text{C}$  และสามารถวัดอุณหภูมิได้ 30 Channel ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 แสดงเทอร์โมคัปเปิลและ ดิจิตอล อินดิเคเตอร์

เทอร์โมคัพเปิลที่ใช้ในการทดลองนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือ

1. Thermocouple Type K [5] เป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องมือวัด ซึ่งใช้ในการวัดอุณหภูมิทำจากโลหะผสม ที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 10% + โครเมียม 90% และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% + 5% ของส่วนผสมระหว่าง อลูมิเนียม, แมงกานีส และซิลิกอน สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงสุด  $1,260^{\circ}\text{C}$  และที่อุณหภูมิต่ำสุดถึง  $-250^{\circ}\text{C}$  โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแกนวัดอุณหภูมิจะแปรผันตามอุณหภูมิที่สามารถวัดได้ ขนาดของ Thermocouple Type K ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 22 mm. มีความยาว 300 mm. ดังแสดงรูปที่ 5.11

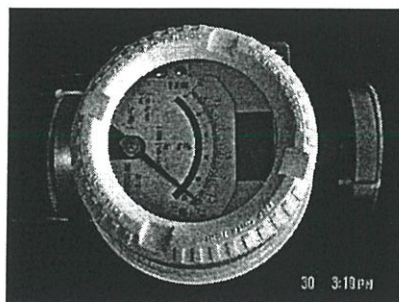


รูปที่ 5.11 แสดง Thermocouple Type K

2. Thermocouple Type J [5] เป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องมือวัด ซึ่งใช้ในการวัดอุณหภูมิทำจากโลหะผสมระหว่าง 60% ของทองแดง + 40% ของนิกเกิล สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงสุด  $760^{\circ}\text{C}$  และที่อุณหภูมิต่ำสุดถึง  $-210^{\circ}\text{C}$  ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จำนวน 1 จุด

#### 5.2.1.6 ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

Armored Variable Area Flowmeter (ABB รุ่น AM 54-32) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศช่วงของการวัด ได้ตั้งแต่ 300-2,950 l/min และแสดงผลแบบดิจิตอลโดยใช้กระแสไฟตั้งแต่ 10-40 volt (DC) ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งผ่านการเปรียบเทียบจากมาตรฐานสามารถดูได้จากภาคผนวก ค.



รูปที่ 5.12 แสดง Armored Variable Area Flowmeter

### 5.2.1.7 ชุดวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซไอเสีย (Gas Analyzer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 300 MI ดังแสดงในรูปที่ 5.13 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาโดยช่วงของการตรวจวัดปริมาณของก๊าซต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ห้ว่าคอุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียทำจาก Nicr-Ni ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $-30$  ถึง  $500^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีอุปกรณ์มาตรฐานอีกทั้งยังผ่านการปรับเทียบ โดยดูได้จากภาพผนวก ก.



รูปที่ 5.13 Flue Gas Analyzer Testo 300 MI

เครื่องวัดและบันทึกประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำและเตาเผา ยี่ห้อ TESTO รุ่น 300 MI ซึ่งสามารถวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา โดยมีช่วงของการใช้งานดังนี้

ตารางที่ 5.2 แสดงช่วงของปริมาณก๊าซไอเสียที่สามารถวิเคราะห์ได้

Gas	Range
O <sub>2</sub>	0 – 25 %
CO <sub>2</sub>	0 – CO <sub>2</sub> max Vol.%
CO	0 – 10,000 ppm
NO	0 – 3,000 ppm
SO <sub>2</sub>	0 – 5,000 ppm (Option)

### 5.2.1.8 ชุดกำจัดเถาลอย

ชุดไซโคลน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการดักเถาลอยที่ออกจากเตาเผา เพื่อไม่ให้ฟุ้งกระจายในอากาศ โดยที่ไซโคลนนี้สามารถดักอนุภาคเถาลอยที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งด้านล่างมีลักษณะเป็นกรวย ก๊าซไอเสียและเถาลอยที่ออกจากเตาเผา จะเข้าไซโคลนทางด้านบนในแนวสัมผัสเพื่อทำให้เกิดการหมุนวนภายในเป็นผลให้ซี่เถาตกลงสู่ก้นไซโคลนและก๊าซไอเสียจะออกปล่องด้านบนของไซโคลน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

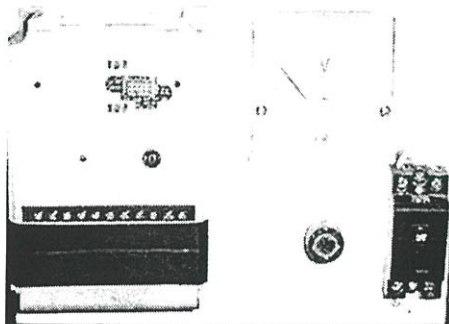


รูปที่ 5.14 แสดงไซโคลน

### 5.2.2 อุปกรณ์ชุดควบคุม

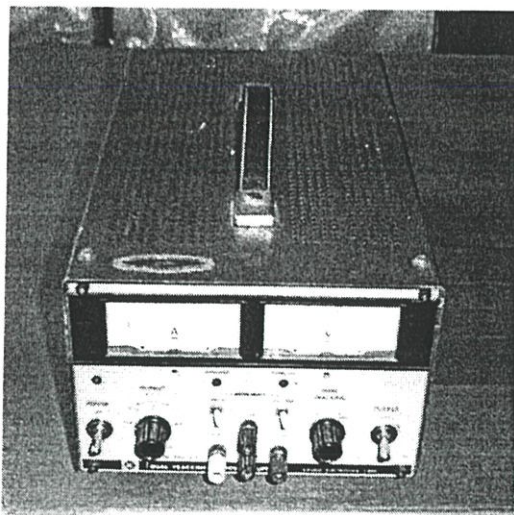
อุปกรณ์ชุดควบคุมในการทดลองใช้ในการควบคุมเครื่องมือทางไฟฟ้าและทางเครื่องกล เพื่อแปรผันค่าต่าง ๆ ผ่านชุดควบคุม (การปรับค่าต่าง ๆ จะเป็นแบบ Analog) ซึ่งมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คืออุปกรณ์ที่นำมาใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง มีกำลังขับ 0.22 KW 1.5A Model FR-A024-0.2 KP โดยอินเวอร์เตอร์สามารถปรับความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1650 RPM ดังแสดงในรูปที่ 5.16



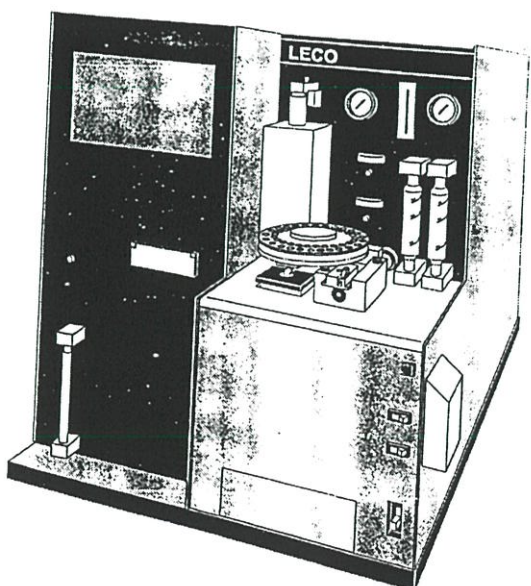
รูปที่ 5.15 Inverter

DC. Power Supply เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงกระแสไฟ AC เป็น DC เพื่อใช้จ่ายกระแสไฟให้กับหน้าจอของ Armored Variable Area Flow meter สามารถปรับแรงดันสูงสุด 40 volt ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 DC. Power Supply

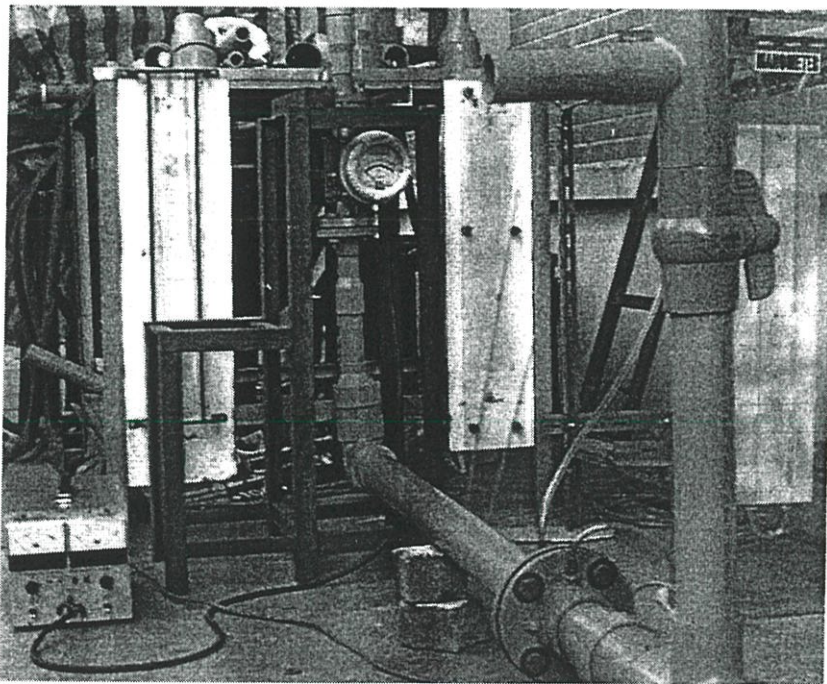
5.2.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N Determinator เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ที่อยู่ภายในตัวอย่างซีเมนต์ ซึ่งนำไปเผาภายในออกซิเจนบริสุทธิ์โดยอุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ที่  $925^{\circ}\text{C}$  โดยรายละเอียดของเครื่องสามารถดูได้ใน ภาคผนวก จ



รูปที่ 5.17 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHN Determinator รุ่น CHN 900

### 5.3 ขั้นตอนการปรับเทียบอัตราการไหลของอากาศผ่าน Orifice meter เทียบกับ Flow meter

1. ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองดังรูปที่ 5.18
2. เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้วให้ทำการเปิดสวิตช์ควบคุม โบเวอร์ จากนั้นทำการเปิดวาล์ว by pass ขณะนี้ควรทำการปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหล (เพื่อป้องกัน Flow meter ชำรุด)
3. จากนั้นทำการปรับวาล์ว โดยในการปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลให้อ่านค่าจาก Flow meter เช่น ปรับที่อัตราการไหล 300 l/min ที่ flow meter แล้วอ่านค่าของแตกต่างของความดันที่มานอมิเตอร์ได้เท่ากับ 1 mm H<sub>2</sub>O
4. ทำการปรับอัตราการไหลที่ 100 l/min แล้วอ่านค่า  $\Delta h$  ของมานอมิเตอร์จนกระทั่งสุดสเกลของ Flow meter ดังแสดงในตารางในภาคผนวก ข.
5. ทำการเปลี่ยนท่อที่เป็น Orifice ของชุดอากาศทุติยภูมิและ Orifice ของชุด nozzle โดยทำซ้ำในข้อ 4 ผลการทดลองแสดงในตารางภาคผนวก ข.
6. นำผลที่ได้นำมา Fit curve เพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 5.18 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับเทียบแผ่น Orifice meter

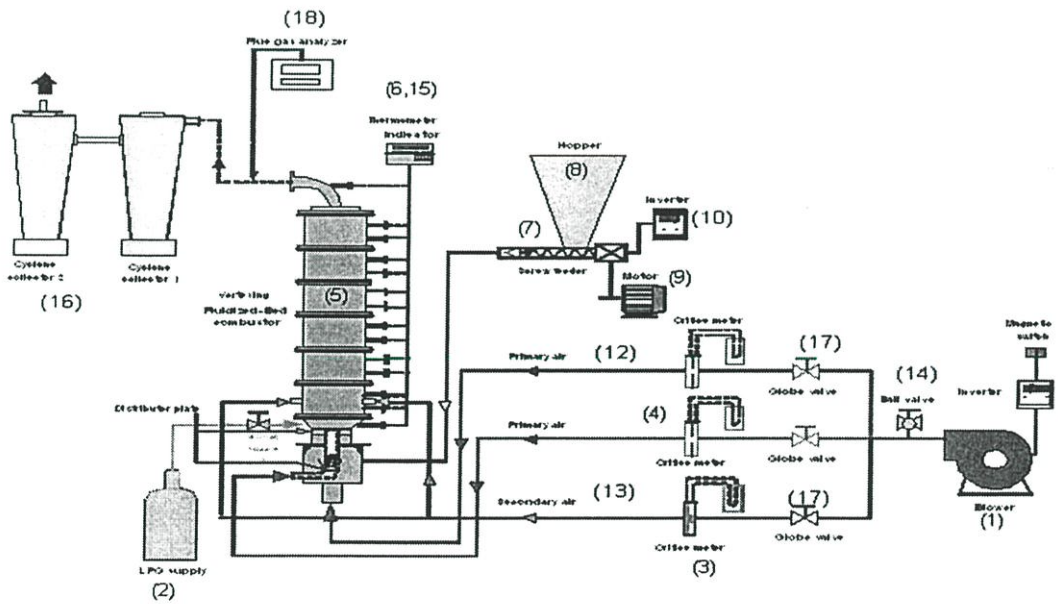
### 5.4 ขั้นตอนการปรับเทียบอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.19 แล้วเติมแก๊สใน Hopper จากนั้นก็ทำการมาร์คจุดที่เพลลาของมอเตอร์

2. ทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการปรับกระแสไฟที่ชุด Inverter และใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบปรับค่าความเร็วรอบที่เท่ากับ 20 rpm. ขณะเดียวกันก็ทำการจับเวลาที่ 1 นาที, 2 นาที, 3 นาที นำเชื้อเพลิงกลับมาชั่งแล้วบันทึกผลการทดลอง
3. ทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เป็น 30 rpm. จนกระทั่ง 170 rpm. แล้วทำซ้ำตามข้อ 2
4. เมื่อทดลองเสร็จก็นำผลที่ได้มา fit cure ดังแสดงในภาคผนวก ข.

## 5.5 ขั้นตอนในการติดตั้งชุดทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลองเริ่มต้นจากการประกอบตัวเตาเผาแต่ละส่วนเข้าด้วยกันเมื่อทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วใช้ทำการติดตั้ง Thermocouple Type K จำนวน 13 ตัวเข้ากับชุด Digital Thermometer and Multichannel Switch (6) โดยอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ประกอบด้วยอากาศ 3 ส่วนคือ อากาศปฐมภูมิ (Primary Air), อากาศที่ส่งไปยังหัวฉีด (Nozzle Jet) และอากาศทุติยภูมิ ซึ่งได้มาจากแหล่งต้นกำลังแหล่งเดียวกัน คือ Blower (1) มีชุด Magnetic Switch ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟไปยังมอเตอร์ของ Blower ในส่วนของอากาศในท่อ Primary Air จะผ่านชุด Gate valve (17) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลและวัดอัตราการไหลผ่านชุด Orifice



- |                             |   |                        |                   |
|-----------------------------|---|------------------------|-------------------|
| (1) Blower                  | (2) LPG supply                                  | (3) Manometer          | (4) Orifice plate |
| (5) Fluidized-bed combustor | (6) Digital Thermometer and Multichannel Switch | (7) Screw feeder       |                   |
| (8) Hopper                  | (9) Motor                                       | (10) Inverter          | (11) Burner       |
| (12) Primary air            | (13) Secondary air                              | (14) Bypass air        | (15) Thermocouple |
| (16) Cyclone                | (17) Gate valve                                 | (18) Flue gas analyzer |                   |

รูปที่ 5.19 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

plate (4) และ Manometer (3) ซึ่งอากาศปฐมภูมิ จะเป็นอากาศที่ทำให้ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชัน และเป็นตัวช่วยพยุงเกลบในสภาวะของของแข็งเกิดสภาวะเหมือนของเหลว อากาศส่วนที่ 2 Nozzle Jet เป็นจุดที่อากาศและเชื้อเพลิงเกลบเข้าผสมกัน โดยอากาศจะผ่านแผ่นกระจายลมตัวที่ 2 ขึ้นมาและรวมกับเชื้อเพลิงเกลบและโดยการฉีดพ่นส่งผ่านไปยังห้องเผาไหม้ ในส่วนของอากาศ ในท่อ Nozzle Jet จะผ่านชุด Gate Valve (17) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศและปรับอัตราการไหลผ่านชุด Orifice meter และ Manometer (3) สามารถดูได้จากรูปที่ 5.2 โดยเชื้อเพลิงเกลบจะถูกบรรจุภายใน Hopper (8) จะถูกลำเลียงเข้าสู่ท่อ Nozzle Jet โดยใช้ Screw feeder (7) ซึ่งมีต้นกำลังจาก Motor (9) เป็นชุดขับเคลื่อนและมี Inverter (10) เป็นชุดปรับความเร็วรอบของ Motor ส่วนอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) จะผ่านเข้าสู่ท่อลม โดยมีชุด Gate Valve ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศและปรับอัตราการไหลของอากาศผ่านชุด Orifice plate (4) และ Manometer (3) สามารถแบ่งอากาศส่วนนี้ออกเป็น 4 ส่วนเท่ากัน โดยจะจ่ายลมเข้าทางผนังบริเวณกึ่งกลางเตาเผาซึ่งท่อลมจะติดตั้งส้อมผสมผนังด้านในของห้องเผาไหม้และตั้งฉากกับรัศมีของเตาทุก ๆ 90 องศา อากาศจะไหลเข้าตามท่อหัวฉีดอากาศทุติยภูมิ บริเวณส่วนล่าง 4 ส่วนเท่า ๆ กันเพื่อจ่ายลมให้กับเตาเผา โดย Orifice Manometer ทั้ง 3 ชุด จะถูกปรับเทียบกับ Armored Variable Area Flowmeter รายละเอียดสามารถดูได้จากขั้นตอนการปรับเทียบในหัวข้อ 5.3 และเมื่อติดตั้งชุดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการอุ่นเตาเผา แสดงดังรูปที่ 5.18

## 5.6 ขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นตอนนี้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการอุ่นเตาเผาและขั้นตอนการทดลองเผาไหม้ โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 5.6.1 ขั้นตอนการอุ่นเตา

หลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองเรียบร้อยแล้วในการเผาไหม้นั้นจำเป็นต้องมีการอุ่นเตาเผาก่อนเสมอ โดยจะทำการอุ่นเตาเผาด้วย LPG Supply (2) โดยใช้หัวเผา (Burner) ทำการปรับเปลวไฟให้เป็นสีน้ำเงินจากนั้นนำเข้าไปที่ท่ออุ่นเตาของเตาเผา (5) ให้มีอุณหภูมิสูงที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้เสียก่อน ซึ่งในขั้นต้นเริ่มอุ่นเตาให้มียุณหภูมิภายในเตาประมาณ 450 °C จนอุณหภูมิภายในเตาเริ่มคงที่ให้ทำการปรับอากาศ Nozzle Jet ที่อัตราการไหลของอากาศคงที่เท่ากับ 1,150 l/min พร้อมทั้งทำการปรับ Gate Value (17) ให้อากาศปฐมภูมิเพื่อช่วยพยุงเชื้อเพลิงเกลบขึ้น จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงเกลบด้วย Screw feeder (7) เพื่อให้เชื้อเพลิงเกลบเข้าไปรวมกับอากาศจากท่อ Nozzle Jet เพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ หลังจากเชื้อเพลิงเกลบถูกเผาไหม้แล้วจะคายความร้อนของเชื้อเพลิงเกลบออกมามีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงถึงประมาณ 600 - 700 °C ซึ่งขณะนี้เกลบสามารถติดไฟได้ด้วยตัวเองแล้ว จึงทำการหยุดให้ LPG Supply (2)

แล้วเริ่มทำการทดลองต่อไป

### 5.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

เมื่อทำการอุ่นเตาเผาเรียบร้อยแล้วสามารถเริ่มทำการทดลองได้ ซึ่งในการทดลองการเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนจะทำการปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบคงที่เท่ากับ 18 kg/hr (ในกรณีที่มีคอคอด) และทำการทดลองเปรียบเทียบการเผาไหม้ในเตาเผาในกรณีที่ไม่มีการป้อนเชื้อเพลิงแกลบที่เท่ากัน ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ทำการติดตั้งเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนในกรณีที่มีคอคอด
2. เมื่อ  $\lambda = 0.0$  คือไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ
3. ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio,  $\Phi$ ) เท่ากับ 0.2
4. รอจนกว่าอุณหภูมิภายในเตาอยู่ในสถานะคงที่ เริ่มทำการบันทึกผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $x = 0.075$  m., 0.225 m., 0.375 m., 0.525 m., 0.675 m., 0.825 m., 0.975 m., 1.125 m., 1.275 m., 1.425 m., 1.575 m. และ 1.725 m. (เหนือแผ่นกระจายลมแผ่นที่ 1) ที่ระยะ  $r/R = 0.0$
5. บันทึกอุณหภูมิที่เวลา นาทีที่ 6 และนาทีที่ 9 บันทึกผลการทดลองสังเกตควันและเก็บชิ้นเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้, ทำการตรวจเช็คองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้
6. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 4 ที่ระยะ  $r/R = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  และ 1.0 ตามลำดับ แต่ที่ตำแหน่ง  $x = 0.075$  m. จะทำการปรับระยะ  $r/R = 0.25$  และที่ตำแหน่ง  $x = 1.125$  m. ทำการปรับระยะ  $r/R = 0.2$  และ 0.5 ตามลำดับ
7. ทำการทดลองตามข้อที่ 3-6 ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศให้ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.25, 0.3 และ 0.35 ตามลำดับ
8. ทำการทดลองตามข้อที่ 2-7 เมื่อ  $\lambda = 0.25$  และเมื่อ  $\lambda = 0.4$  ตามลำดับ
9. ทำการทดลองตามข้อที่ 1 เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง  $x = 1.125$  m ให้เป็นห้องเผาไหม้ที่ไม่มีการลดขนาด (ไม่มีคอคอด) ซึ่งมีขนาดความสูงห้องเผาไหม้เพื่อขึ้นอีก 0.150 m ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 4-8 โดยเพิ่มตำแหน่งการวัดเพิ่มขึ้นอีก 1 ตำแหน่งคือ  $x = 1.875$  m
10. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 ที่ตำแหน่ง 0.225 m., 0.375 m., 0.525 m., 0.675 m., 0.825 m., 0.975 m., 1.125 m., 1.425 m., 1.575 m., 1.725 m. และ 1.875 m. ที่ระยะ  $r/R$  เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับส่วนที่ตำแหน่ง  $x = 0.075$  m. จะทำการปรับระยะ  $r/R$  เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.75 ตามลำดับแล้วบันทึกผลการทดลอง

เมื่อ  $x$  คือ ความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

r/R คือ อัตราส่วนระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีต่อรัศมีภายในเตาเผา ฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

### 5.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน [15]

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N Determinator รุ่น CHN – 900 ของบริษัท LECO Corporation การทดลองจะนำตัวอย่างของซีเมนต์ที่ได้จากการเผาไหม้มาบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1- 2 mg. ในภาชนะนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925 °C ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปใน Reagion CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> โดยควบคุมความดัน, อุณหภูมิ, ปริมาตร ให้อยู่ที่ และวัดปริมาณก๊าซโดย Thermal Conductivity

## บทที่ 6

# ผลการทดลองและวิจารณ์

### 6.1 บทนำ

การทดลองในบทนี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล, อัตราส่วนของปริมาณการไหลของอากาศตูดยภูมิต่อปริมาณอากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) และผลของคอคอดที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Recirculation รวมถึงผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบที่มีผลต่อการเผาไหม้ โดยพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อกระบวนการเผาไหม้จากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาตามแนวรัศมีของเตาเผา, ผลของการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตา, ชี้อัลลอย (Fly ash) ที่ได้จากการเผาไหม้, มลพิษที่ออกจากเตาเผา รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงแกลบ เท่ากับ 18 kg/hr

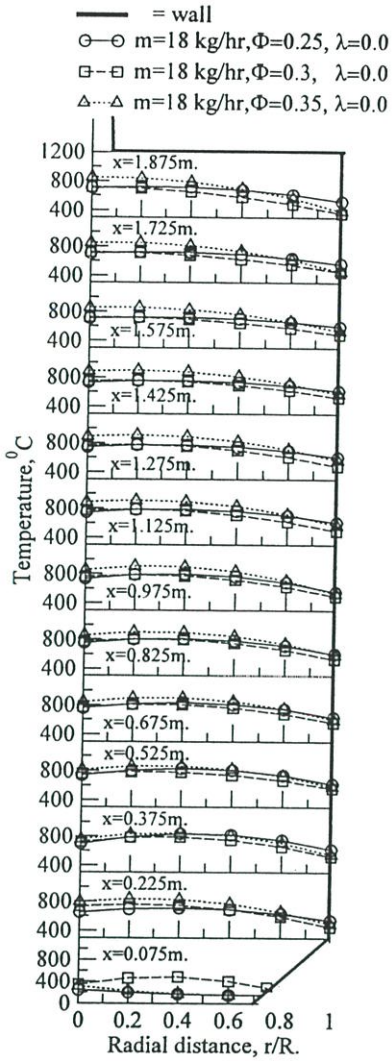
ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเผาไหม้อย่างหนึ่งคือ การหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง (การคลุกเคล้าผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง) ซึ่งถ้าเกิดการหมุนวนที่มีความเร็วสูง ความรุนแรงมากในขณะที่เกิดการเผาไหม้ย่อมทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคภายในได้เป็นอย่างดี ยิ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้มีค่าอุณหภูมิสูง โดยเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ 2 ขนาด คือในกรณีที่มีคอคอด (Throat) ซึ่งจะติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้โดยเตาเผามีความสูงเท่ากับ 2,720 mm. และในกรณีที่ไม่มีคอคอด (Without throat) จะมีความสูงของเตาเผาเท่ากับ 2,870 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 300 mm. ซึ่งในการทดลองจะศึกษาถึงอิทธิพลของอากาศตูดยภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้และศึกษาผลของคอคอดที่ทำให้เกิดการหมุนวนไปมา Recirculation ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เมื่อ  $\Phi = 0.2, 0.25, 0.3$  และ  $0.35$  แล้วทำการปรับค่า  $\lambda = 0.0, 0.25$  และ  $0.4$  ตามลำดับ

### 6.2 เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีไม่มีคอคอด (Without Throat)

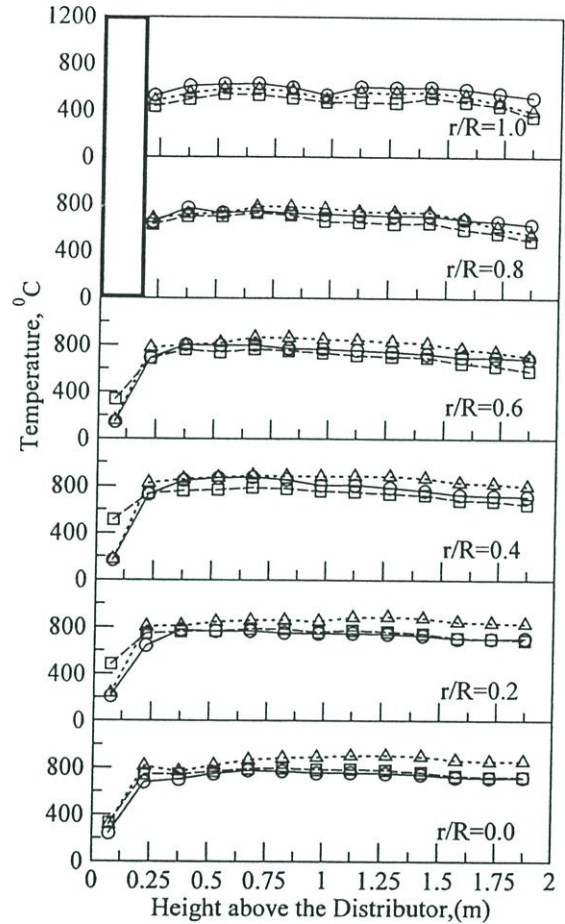
#### 6.2.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ ) ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 18 kg/hr

##### 6.2.1.1 กรณีไม่มีการฉีดอากาศหมุนวน ( $\lambda = 0.00$ )

จากรูปที่ 6.1 ก) พิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่  $\lambda = 0.0$  กรณีไม่มีการฉีดอากาศตูดยภูมิจะพบว่าที่ตำแหน่ง  $x = 0.075$  m. เป็นช่วงเบดซึ่งบริเวณนี้จะเป็นช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ใกล้แผ่นกระจาย ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้เป็นจุดที่รวมตัวกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้มีค่าไม่สูงมากนักแต่ก็เริ่มติดไฟได้ และเมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิ จะพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.35 จะให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผาและมีค่าสูงกว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.25 และ 0.3 เนื่องจากที่อัตราส่วน



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.1 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ  $18 \text{ kg/hr}$  ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.0

สมมูลเท่ากับ 0.35 จะใช้ปริมาณอากาศน้อยกว่าทำให้การเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าทั้งสองกรณี ส่วนที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 ที่  $\lambda=0.0$  ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากในกรณีนี้ปริมาณอากาศเข้าไปภายในเตามีปริมาณมากเกินไปทำให้อุณหภูมิภายในเตาดำและจะค่อยๆ ลดลง พิจารณาจากรูปที่ 6.1 ข เป็นกราฟที่แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาที่อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio),  $\Phi$  เท่ากับ 0.25, 0.3, 0.35 ที่  $\lambda=0.0$  จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio),  $\Phi$  เท่ากับ 0.25 ตำแหน่งความสูงเท่ากับ 0.75 m. ที่ระยะ  $r/R=0.4$  จะให้อุณหภูมิสูงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $800^{\circ}\text{C}$  และมีค่าสูงกว่าที่ระยะ  $r/R$  เท่ากับ 0.0 และ 0.2 เนื่องจากที่บริเวณนี้เป็นช่วงเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันที่ของแข็งประพติดัวเหมือนของไหล ซึ่งบริเวณนี้จะ

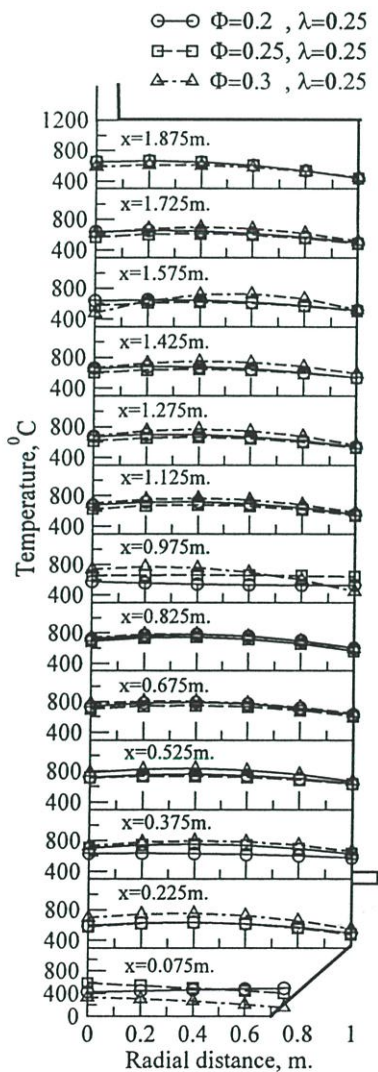
เป็นบริเวณของการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศซึ่งมีลักษณะคล้ายกับน้ำพุทำให้การเผาไหม้บริเวณนี้เผาไหม้ได้ดีและมีอุณหภูมิสูงกว่าระยะ  $r/R$  ทั้ง 2 ระยะคือ 0.0 และ 0.2 และสาเหตุอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากที่บริเวณกึ่งกลางเตาเผาเป็นจุดรวมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงอยู่กันหนาแน่น จึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูง ส่วนที่ตำแหน่งความสูงเท่ากับ 1.5 m. การกระจายอุณหภูมิของทั้ง 3 ระยะเริ่มจะไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องบริเวณนี้ใกล้กับทางออกของท่อไอเสีย ซึ่งความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะถูกถ่ายเทความร้อนออกสู่นอกเตาเผาและที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.3 จะสังเกตได้ว่าที่ระยะ  $r/R=0$  ที่ตำแหน่งความสูงเท่ากับ 0.075 m. ก็จะเป็นช่วงของการเริ่มต้นของการเผาไหม้และอุณหภูมิจะค่อยเริ่มสูงขึ้นและมีค่าเกือบจะคงที่ตลอดทั้งความสูงของเตาเผา โดยอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งเตาประมาณ  $790^{\circ}\text{C}$  ส่วนที่ระยะ  $r/R=0.2$  และ  $r/R=0.4$  จะให้อุณหภูมิต่ำลงมาเล็กน้อยแต่จะลดต่ำลงมาอย่างเห็นได้ชัดบริเวณส่วนบนของเตาเผาและพิจารณาการกระจายอุณหภูมิที่  $\Phi=0.35$  ในกรณีนี้ที่  $\lambda=0.0$  จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้มีค่าต่ำเนื่องจากในกรณีนี้จะใช้อากาศปฐมภูมิที่มีปริมาณออกาศน้อยทำให้อากาศกับเชื้อเพลิงผสมกันได้ดีพอดีทำให้การเผาไหม้มีค่าสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผาโดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ  $850^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $r/R=0.4$  ส่วนที่บริเวณผนังของเตาเผาที่ระยะ  $r/R=1.0$  จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจการเผาไหม้ของทั้ง 3 กรณีมีค่าไม่สูงมากนัก โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณดังกล่าวนี้มีอุณหภูมิประมาณ  $600-700^{\circ}\text{C}$

### 6.2.1.2 กรณีมีการฉีดอากาศหมุนวน

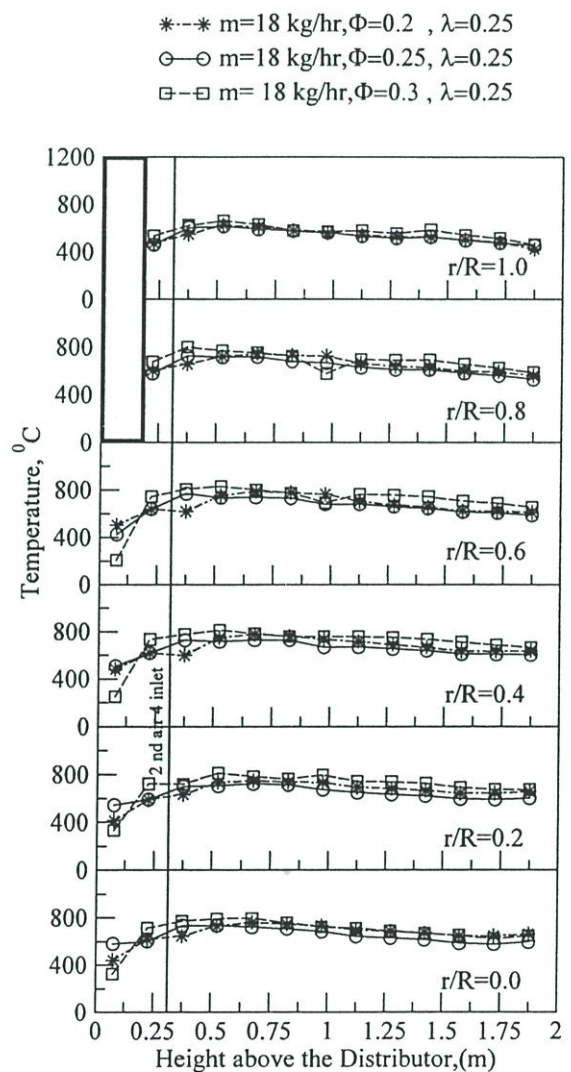
#### ก) ฉีดอากาศหมุนวน 25% ของอากาศทั้งหมด ( $\lambda=0.25$ )

ในการทดลองในกรณีนี้จะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็น 3 ส่วนก็คือส่วนแรกเป็นอากาศปฐมภูมิที่ส่งผ่านทางด้านล่างของเตาเผาและอากาศส่วนที่สองหรืออากาศจาก Nozzle Jet ใช้ร่วมกับอากาศปฐมภูมิคือเป็นอากาศที่ช่วยส่งผ่านเชื้อเพลิงกลับเข้าไปยังห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงกลับเข้ามาทางด้านล่างใต้แผ่นกระจาย ซึ่งสามารถดูรายละเอียดจากรูปที่ 5.2 และอากาศส่วนที่ 3 จะเป็นอากาศทุติยภูมิที่ฉีดเข้ามาข้างด้านข้างของผนังเตาตามแนวเส้นสัมผัสจากการทดลองในกรณีนี้ห้องเผาไหม้จะไม่มีกรลดขนาดห้องเผาไหม้ภายในเตาเผา ซึ่งมีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 300 mm. ตลอดทั้งความสูงของเตาเผา (ไม่มีการติดตั้งคอคอด) จากการทดลองจะพบว่าเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่  $\Phi=0.3$  จะให้การกระจายอุณหภูมิสูงสุดและมีค่ากระจายของอุณหภูมิต่ำสม่ำเสมอตามแนวรัศมีและตามแนวความสูงของเตาเผาดังแสดงในรูป 6.2 (ก) และ (ข) เนื่องจากผลของอากาศปฐมภูมิจากทางด้านล่างของเตาเผาพร้อมกับอากาศจาก Nozzle Jet ที่ทำให้การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งการฉีดพ่นระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจะมาจากทางด้านล่างใต้แผ่นกระจายลม โดยช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้บริเวณส่วนบนเหนือแผ่นกระจายลมจะให้การกระจายอุณหภูมิต่ำไม่สูงมากนักประกอบกับ ณ ตำแหน่ง  $x=0.3$  m. ได้ติดตั้งชุดอากาศทุติยภูมิซึ่งฉีดอากาศมาข้างด้านข้างของเตาเผาตามแนวเส้นสัมผัสทำให้เกิดการหมุน

วน มีผลทำให้อนุภาคกลับกับอากาศเกิดการไหลผสมกันอย่างปั่นป่วน การฉีดอากาศ ณ ตำแหน่งนี้จะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ยังไม่สูงมากนักเนื่องจากอากาศที่เย็นไหลเข้ามาผสมจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีค่าคงที่แต่พอพ้นช่วงของตำแหน่งการฉีดอากาศทุกภูมิภาคอุณหภูมิของการเผาไหม้เริ่มมีค่าสูงขึ้นช่วงของการเผาไหม้จะอยู่ในช่วง  $x = 0.525$  m. จนถึง  $x = 1.125$  m. โดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาในกรณีอยู่ที่ประมาณ  $750 - 800$  °C บริเวณจุดกึ่งกลางวงแหวนตามแนวรัศมีจน  $r/R = 0.6$  ตามแนวรัศมี และจะค่อย ๆ ลดลงที่ผนังเตาส่วนกรณีที่  $\Phi = 0.25$  ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมีลักษณะคล้ายกับกรณี  $\Phi = 0.3$  แต่การกระจายอุณหภูมิจะต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่มากกว่า  $\Phi = 0.3$  จึงทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ถูก



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.2 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFCB กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.25

ระบายความร้อนด้วยอากาศเย็น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $700 - 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และที่อัตราการไหลของอากาศที่  $\Phi = 0.2$  ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้ปริมาณของอากาศส่วนเกินที่มากจึงทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าไม่สูงมากนัก และลักษณะกระจายอุณหภูมิที่คล้ายกับกรณี  $\Phi = 0.25$  และ  $\Phi = 0.3$  แต่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาจะมีค่าประมาณ  $680 - 720 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วนที่  $\Phi = 0.35$  ไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากปริมาณลมที่ช่วยให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันไม่พอที่จะช่วยพยุงเชื้อเพลิงแกลบ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการอุดตันส่งผลต่อระบบการป้อนของเชื้อเพลิง

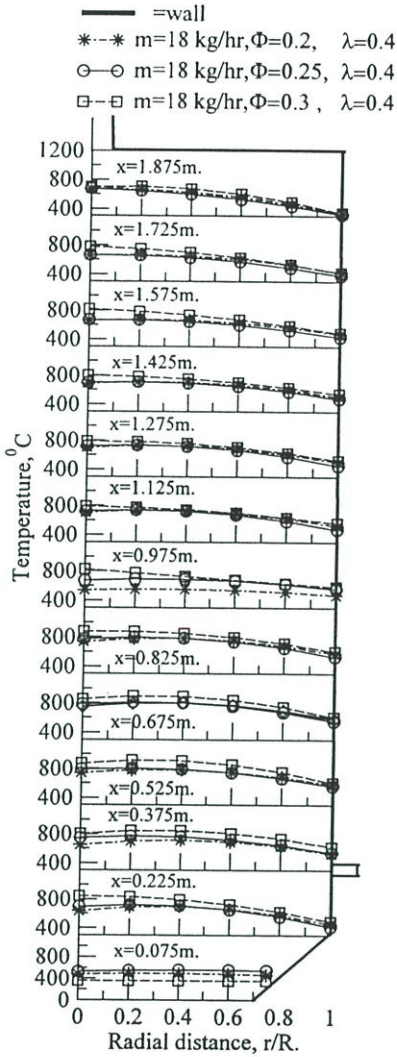
### ข) ฉีดอากาศหมวน 40% ของอากาศทั้งหมด ( $\lambda = 0.4$ )

จากการทดลองในกรณีนี้จะแบ่งอากาศทุติยภูมิเป็น 40% ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้และจากการทดลองเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่  $\Phi = 0.3$  จะสังเกตเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณี  $\lambda = 0.25$  แต่จะเห็นได้ว่าลักษณะอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าโดยจะเห็นได้ชัดว่าที่  $\Phi = 0.3$ ,  $\lambda = 0.40$  จะให้การกระจายอุณหภูมิสูงกว่ากรณี  $\Phi = 0.25$  และ  $\Phi = 0.2$  ณ บริเวณจุดกึ่งกลางของเตาเผาที่  $r/R = 0.0$  ตลอดทั้งความสูงของเตาเผาโดยดูได้จากรูปที่ 6.3 (ข) โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของการเผาไหม้ในกรณีนี้จะมีค่าประมาณ  $850 - 880 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่  $\Phi = 0.25$  การกระจายอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่ากรณี  $\Phi = 0.2$  ที่บริเวณ  $r/R = 0$  จนถึง  $r/R = 0.4$  ที่ตำแหน่ง  $x = 0.225 \text{ m}$ . ถึง  $x = 0.375 \text{ m}$ . เนื่องจากผลของปริมาณอากาศทุติยภูมิในกรณี  $\Phi = 0.2$   $\lambda = 0.4$  จะมีปริมาณมากกว่าทำให้ตำแหน่งดังกล่าวถูกอากาศเย็นจากภายนอกมาผสมในปริมาณมากกว่าจึงทำให้อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.3 (ก) และ  $\Phi = 0.2$  จะให้การกระจายอุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนัก ณ ตำแหน่ง  $x = 0.525 \text{ m}$ . จนถึง  $x = 0.825 \text{ m}$ . โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้ง 2 กรณีนี้มีค่าประมาณ  $750 - 790 \text{ }^{\circ}\text{C}$

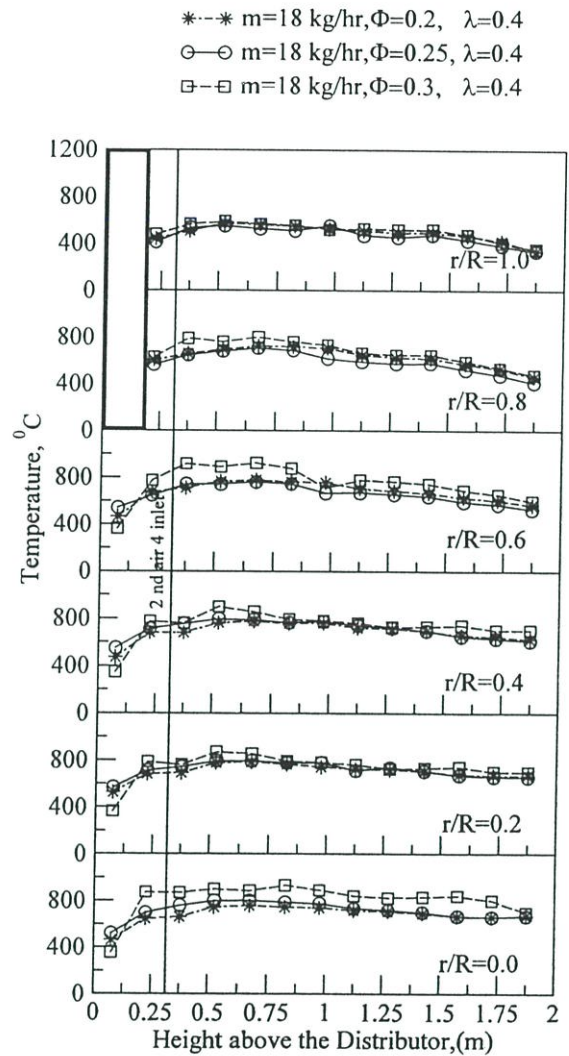
## 6.2.2 อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ )

### 6.2.2.1 กรณี $\Phi = 0.2$

จากรูปที่ 6.4 (ก) พิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในเตาเผากรณี  $\Phi = 0.2$  ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ปริมาณของอากาศในห้องเผาไหม้ค่อนข้างมากจึงทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าไม่สูงมากนัก โดยจะเห็นว่าเมื่อ  $\lambda = 0.4$  ก็คือ การฉีดอากาศทุติยภูมิประมาณ 40% ของอากาศทั้งหมดจะให้การกระจายอุณหภูมิสูงช่วยแรกของการเผาไหม้ที่ตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิที่บริเวณด้านข้างของเตาเผาตามแนวเส้นสัมผัสจะก่อให้เกิดลักษณะของการหมวนวนทำให้อนุภาคแกลบผสมกับอากาศเกิดการคลุกเคล้าได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การเผาไหม้ได้ดีประกอบกับปริมาณของอากาศปฐมภูมิรวมกับอากาศจากท่อ Nozzle Jet ที่ช่วยทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันจึงทำให้การเผาไหม้เหมาะสมที่กรณี  $\Phi =$



(ก) ตามแนวรัศมี

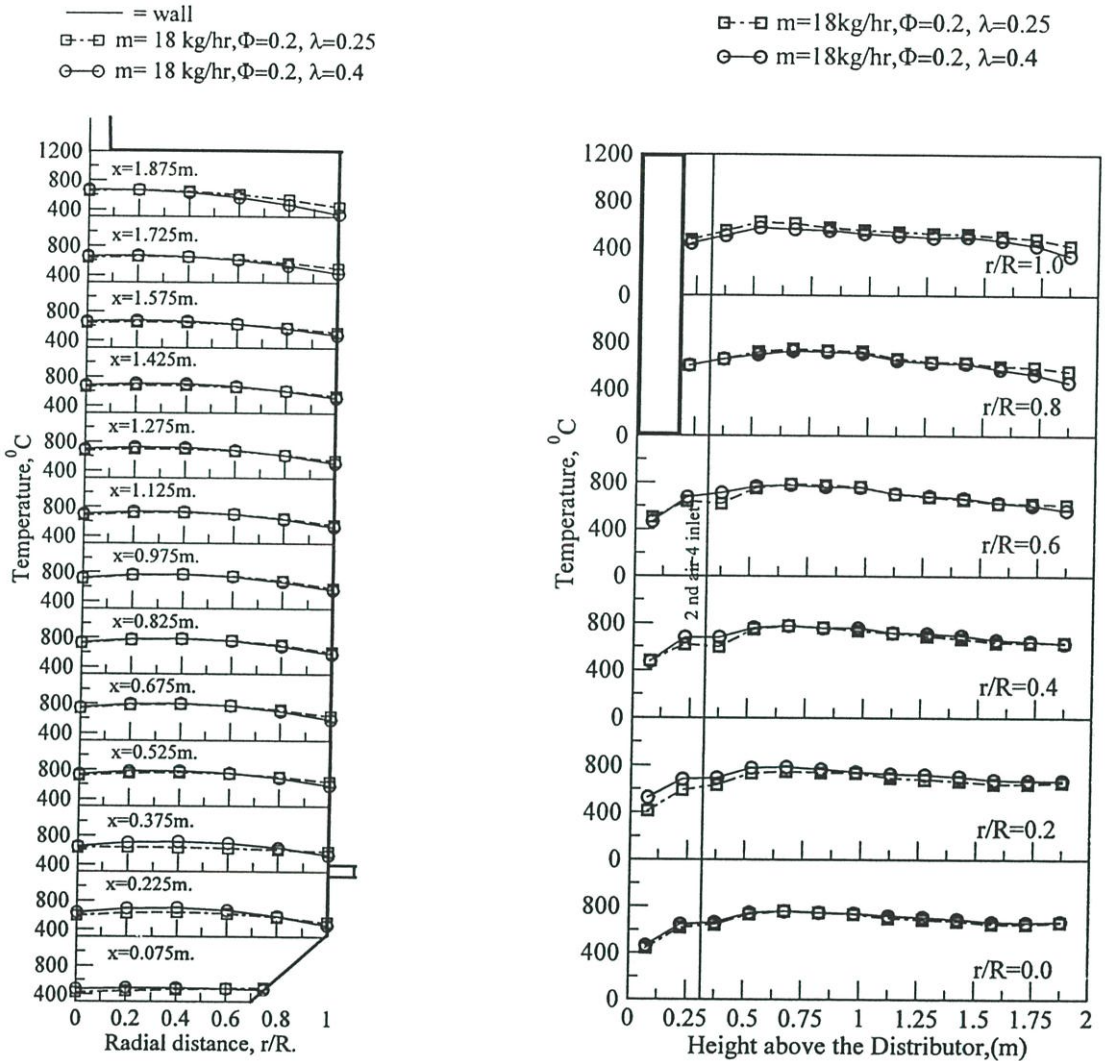


(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.3 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 18 kg/hr. ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.4

0.2 จะใช้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้มากจึงทำให้ปริมาณของอากาศส่วนเกินมากทำให้การเผาไหม้อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $780^{\circ}\text{C}$  บริเวณกึ่งกลางเตาตามแนวรัศมีถึง  $r/R = 0.6$  ที่ตำแหน่งความสูงตั้งแต่  $x = 0.525$  m. ถึง  $x = 1.125$  m. โดยอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่า  $\lambda = 0.25$  ไม่มากนัก ประมาณ  $30 - 40^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถดูได้จากรูป 6.4 (ข) ส่วนในกรณี  $\lambda = 0.0$  ก็คือใช้ปริมาณอากาศป้อนรวมกับอากาศจาก Nozzle Jet รวมกันเท่ากับ 100% ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากปริมาณ

อากาศค่อนข้างมากทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาตกลงอย่างรวดเร็วจนอุณหภูมิไม่อยู่ในขอบเขตของการตีคไฟ



(ก) ตามแนวรัศมี

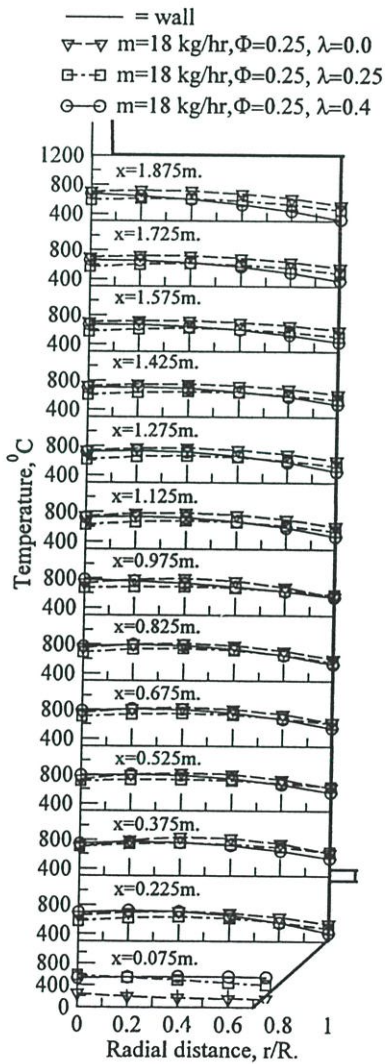
(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.4 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ  $18 \text{ kg/hr}$  ที่อัตราส่วนสมมูล  $\Phi$  เท่ากับ 0.2

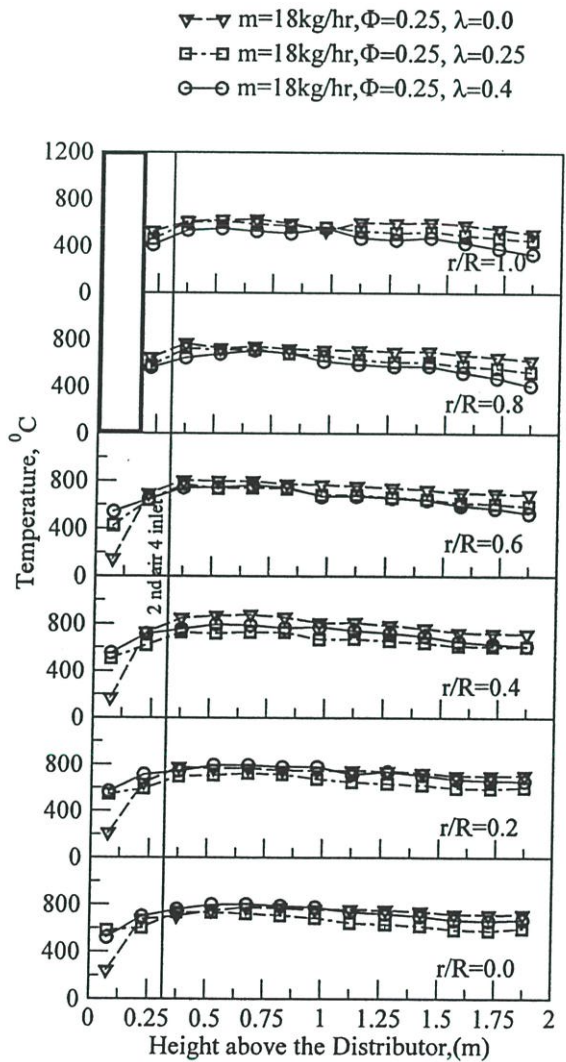
### 6.2.2.2 กรณี $\Phi = 0.25$

จากการทดลองในรูปที่ 6.5 (ก) แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการปรับปริมาณของอากาศตุนภูมิต่ออากาศทั้งหมดที่  $\lambda = 0.4$  จะเห็นได้ว่าการใช้ปริมาณอากาศตุนภูมิจำนวน 40% ของอากาศทั้งหมดซึ่งจะมีผลทำให้อากาศปฐมภูมิและอากาศที่ส่งผ่านมายัง Nozzle Jet ลดลงเหลือเพียง 60% ของอากาศทั้งหมดซึ่งช่วงแรกของการเผาไหม้จะเห็นได้ว่า  $\lambda = 0.4$  จะให้การกระจายอุณหภูมิสูงสุดบริเวณกึ่งกลางเตาเผา  $r/R = 0.0$  และจะค่อย ๆ ลดลง ตั้งแต่

บริเวณ  $x = 0.075$  m. จนถึง  $x = 1.0$  m. จนถึงระยะ  $r/R = 0.2$  ความแรงของการหมุนวนเริ่มลดต่ำลง จึงทำให้การผสมกันระหว่างอนุภาคในแนวรัศมีเจือจางลงจึงทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่  $\lambda = 0.0$  จะให้การกระจายอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณของอากาศป้อนรวมกับอากาศที่ส่งผ่านมายัง Nozzle Jet มีปริมาณมากกว่าการพาความร้อนของการเผาไหม้ตามแนวแกนมีปริมาณมากกว่าจึงทำให้การเผาไหม้อุณหภูมิสูงกว่าโดยอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้น ณ ตำแหน่งความสูงที่  $x = 0.375$  m. ตามแนวความสูงของเตาที่ระยะ  $r/R = 0.4$  จนถึงผนังของเตาเผาตลอดตามแนวความสูงของเตาเผาซึ่งแสดงในรูปที่ 6.5 (ข)



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.5 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFCF กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. ที่อัตราส่วนสมมูล  $\Phi$  เท่ากับ 0.25

### 6.2.2.3 กรณี $\Phi = 0.3$

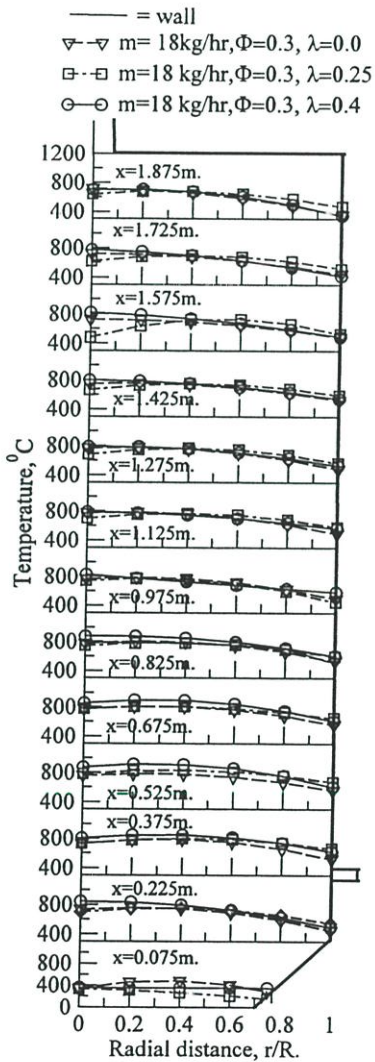
พิจารณาจากรูปที่ 6.6 (ก) ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอดจะพบว่าเมื่อทำการปรับ  $\lambda = 0.4$  ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.3 จะเป็นการใช้ปริมาณอากาศหุติภูมิประมาณ 40% ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้จะเห็นได้ว่าความเร็วของอากาศหุติภูมิในกรณีนี้มีค่าสูงทำให้อัตราของการหมุนวนตามแนวรัศมีมีค่าสูงตามไปด้วยและยังลดปริมาณของความเร็วของอากาศปฐมภูมิลง จะเห็นได้ว่าที่  $\lambda = 0.4$  จะให้การกระจายของอุณหภูมิสูงสุดบริเวณจุดกึ่งกลางตามแนวรัศมีของวงแหวนตลอดทั้งความสูงของเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 6.6 (ข) โดยช่วยของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบในกรณีอยู่ ณ บริเวณ  $x = 0.225$  m. จนถึง  $x = 1.275$  m. โดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผามีค่าประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$  และจะเห็นได้ว่าค่า  $\lambda$  ทั้ง 2 ค่าคือ  $\lambda = 0.25$  และ  $0.4$  จะไม่มีผลต่อการเผาไหม้มากนัก ณ บริเวณ  $x = 0.975$  m. จนถึงส่วนบนของห้องเผาไหม้อาจเนื่องมาจากความแรงของการหมุนวนที่ก่อให้เกิดความปั่นป่วนมีค่าลดลง (คือการหมุนวนในแนวรัศมีเริ่มอ่อนตัวลงมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณของอากาศที่ไหลขึ้นตามแนวแกน) จึงทำให้การกระจายอุณหภูมิมิค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

### 6.2.3 ก๊าซไอเสียในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งคอคอด

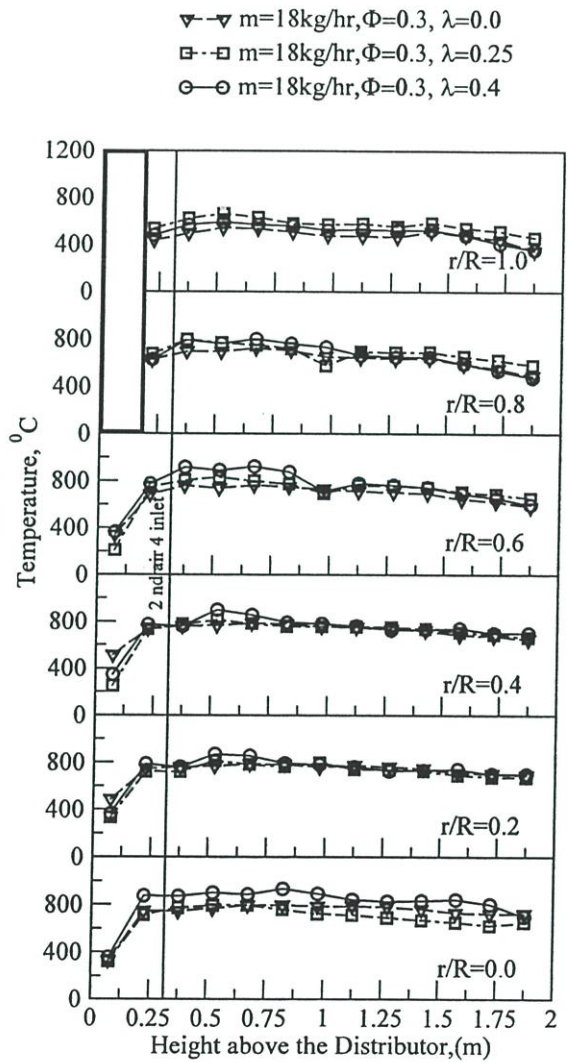
จากผลการทดลองของการวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของเตาเผา VFBC ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งคอคอด ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ  $18 \text{ kg/hr}$ . เมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศให้  $\lambda = 0.0, 0.25$  และ  $0.4$  ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ  $\lambda$  มีผลกระทบต่อปริมาณของก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ดังต่อไปนี้

เมื่อ  $\Phi = 0.2$  จะเห็นได้ว่าในการทดลองในกรณีนี้จะใช้ปริมาณของอากาศในการเผาไหม้ปริมาณมากทำให้การเผาไหม้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก จึงทำให้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ค่อนข้างมากโดยมีปริมาณของออกซิเจนสูงถึง 12.5% และในทางกลับกันเมื่อปริมาณออกซิเจนเหลือมากปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ก็จะมีค่าลดลงโดยมีค่าประมาณ 5% สำหรับในกรณี  $\lambda = 0.4$  และเนื่องจากการเผาไหม้อุณหภูมิไม่สูงจึงทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยมีค่ามากที่สุดที่เท่ากับ 1,400 ppm. ขณะเดียวกันเมื่อการเผาไหม้อุณหภูมิไม่สูงจึงทำให้ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีค่าต่ำโดยมีค่าประมาณ 210 ppm. และ 205 ppm. ตามลำดับควันที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้มีสีขาวบาง ๆ ขึ้นได้มีลักษณะสีเทาปนดำ เมื่อ  $\Phi = 0.25$  จะเห็นได้ว่าในการทดลองนี้จะใช้ปริมาณของอากาศส่วนเกินน้อยกว่าที่  $\Phi = 0.2$  จึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่าและจะพบว่าปริมาณของอากาศหุติภูมิต่ออากาศทั้งหมด  $\lambda = 0.4$  ซึ่งมีความแรงของการหมุนวนค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดความปั่นป่วนดังนั้นอนุภาคเชื้อเพลิงแกลบอยู่

ภายในเตาเผาได้นาน จึงทำให้การเผาไหม้นานขึ้นส่งผลทำให้อุณหภูมิสูง โดย ปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 10% ซึ่งต่ำกว่ากรณี  $\lambda = 0.0$  และ 0.25 โดยจะเป็นสัดส่วนที่แปรผันกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6% และผลของการหมุนวนจึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำลงเท่ากับ 380 ppm. เนื่องจากการเผาไหม้ในกรณีนี้มีอุณหภูมิสูงจึงทำให้ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 305 และ 310 ppm. ตามลำดับวันที่ได้จากการเผาไหม้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและลักษณะของขี้เถ้ามีลักษณะละเอียดกว่าในกรณี  $\Phi = 0.2$  โดยมีสีดำปนเทา



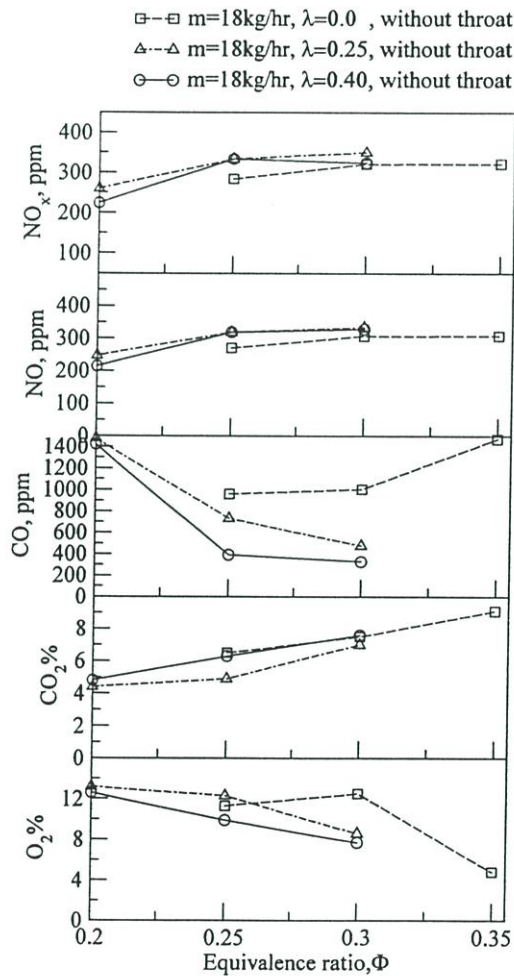
(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.6 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาVFC กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. ที่อัตราส่วนผสม  $\Phi$  เท่ากับ 0.3

เมื่อ  $\Phi = 0.3$  จะเห็นได้ว่าปริมาณของอากาศส่วนเกินในกรณีจะมีค่าน้อยกว่า  $\Phi = 0.2$  และ  $\Phi = 0.25$  ทำให้ปริมาณของอากาศในการเผาไหม้น้อยกว่าส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาที่  $\lambda = 0.4$  ก็ยังพบว่าอิทธิพลของการหมุนวนก่อให้เกิดความปั่นป่วนทำให้การเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงแกลบอยู่ภายในเตาเผาสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงโดยอุณหภูมิกรณีนี้เท่ากับ  $900^\circ\text{C}$  จึงทำให้ปริมาณของก๊าซ  $\text{O}_2$  ที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 8% และส่วนผลทำให้ก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8% การเผาไหม้ในกรณีมีอุณหภูมิสูงจึงทำให้ก๊าซ  $\text{CO}$  ลดต่ำสุดเท่ากับ 370 ppm. ส่วนค่า  $\text{NO}$  และ  $\text{NO}_x$  เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 300 ppm. และ 295 ppm. ตามลำดับ



รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  และ  $\text{NO}_x$  กับค่า  $\Phi = 0.2, 0.25, 0.3$  และ  $0.35$  เมื่อ  $\lambda = 0.0, 0.25$  และ  $0.4$  ภายในเตาเผา VFBC กรณีไม่มีคอคอด

ส่วน  $\Phi = 0.35$  เป็นการเผาไหม้โดยใช้อากาศปฐมภูมิและอากาศที่ส่งผ่านมายัง Nozzle Jet โดยใช้อากาศปฐมภูมิ 100% จะให้ได้ว่าปริมาณของก๊าซ  $\text{O}_2$  ที่เหลือจากการเผาไหม้เพียง 4.5% และ

ทำให้ก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้นเป็น 9% ซึ่งมีผลทำให้ก๊าซ CO เพิ่มขึ้นสูงถึง 1,400 ppm. และก๊าซ NO และ  $\text{NO}_x$  มีค่าเท่ากับ 300 ppm. ควันที่ได้จากการเผาไหม้มีสีดำปนเทาและขี้เถ้าจากการเผาไหม้มีลักษณะสีดำปนเทาและมีลักษณะค่อนข้างละเอียด

### 6.3 เตาเผาเมื่อมีคอคอด (Throat)

เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอด (Throat) ถูกติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ ที่อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr.

#### 6.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล ( $\Phi$ )

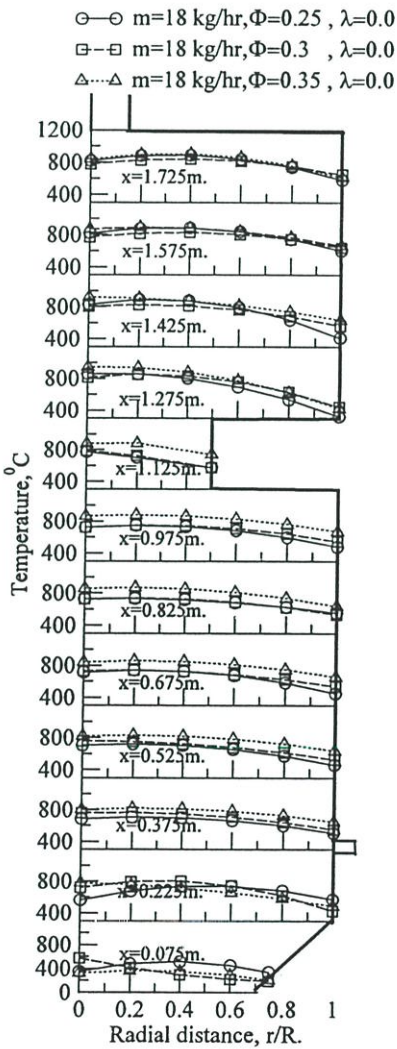
##### 6.3.1.1 ก) กรณีไม่มีการฉีดอากาศหมุนวน ( $\lambda = 0.00$ )

กรณีนี้เป็นกรณีของการทดลองที่ใช้อากาศปฐมภูมิร่วมกับอากาศของ Nozzle Jet เพียงอย่างเดียวโดยเชื้อเพลิงแกลบจากทางด้านข้างเข้ามาผสมกับอากาศภายในท่อ Nozzle Jet บริเวณกึ่งกลางเตาได้แผ่นกระจายลมและผสมกัน จากนั้นอากาศส่วนนี้ก็ส่งเชื้อเพลิงแกลบไปยังกึ่งกลางเตาเผาโดยอัตราการไหลของอากาศคงที่ และอากาศปฐมภูมิจากทางด้านล่างของเตาจะช่วยให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์เซชัน จากผลการทดลองเมื่อกำหนดให้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min หรือ 18 kg/hr. ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟในรูปที่ 6.8 (ก) โดยเป็นการพิจารณาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาตามแนวรัศมี จะพบว่ากรณีที่  $\Phi = 0.35$  การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ย เมื่อเปรียบเทียบกับในระดับความสูงเดียวกันของเตาเผาอยู่ที่ตำแหน่ง  $r/R = 0.4$  หรือบริเวณกึ่งกลางของวงแหวนตามแนวรัศมีของเตาเผาและจะค่อย ๆ ลดต่ำลงจนอุณหภูมิจะต่ำที่สุดอยู่ที่บริเวณผนังเตาเผาและเมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในแนวความสูงของเตาเผาได้จากรูป 6.8 (ข) จะพบว่าอุณหภูมิจะมีค่าต่ำที่บริเวณด้านล่างของเตาเผาและจะค่อย ๆ สูงขึ้น โดยจะมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ระยะ  $x = 0.525$  m. ถึงส่วนบนของเตาเผา ที่ระยะ  $r/R = 0.0$  ถึง  $r/R = 0.4$  โดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาประมาณ  $800 - 840$  °C และเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า  $\Phi = 0.3$  และ  $0.25$  การกระจายอุณหภูมิจะมีค่าแตกต่างกันในช่วงแรกของการเผาไหม้คือบริเวณส่วนล่างของเตาเผาจนถึงตำแหน่งความสูง  $x = 0.525$  m. และเหนือตำแหน่งบริเวณดังกล่าวมีค่าการกระจายอุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนัก บริเวณที่ระยะ  $r/R = 0.2$  จนถึง  $r/R = 0.6$  ที่ความสูง  $x = 0.675$  m. จนถึง  $x = 1.275$  m. โดยอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณดังกล่าวนี้จะมีค่าเท่ากับ  $750 - 780$  °C และจะค่อย ๆ ลดต่ำลงและจะเห็นว่าความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิอยู่ในบริเวณใกล้กับผนังเตาเผาที่  $r/R = 0.8$  จนถึง  $r/R = 1.0$  (ผนังเตา) เนื่องจากปริมาณอากาศปฐมภูมิที่มีปริมาณมากจึงทำให้เกิดลักษณะของการพาและการแผ่รังสีความร้อนให้กับผนังเตามากตามไปด้วย สำหรับกรณีการปรับเปลี่ยนค่า  $\Phi = 0.2$  อุณหภูมิการเผาไหม้เริ่มมีค่าไม่คงที่โดยช่วงแรกของการเผาไหม้อุณหภูมิสูงและจะค่อย ๆ ลด

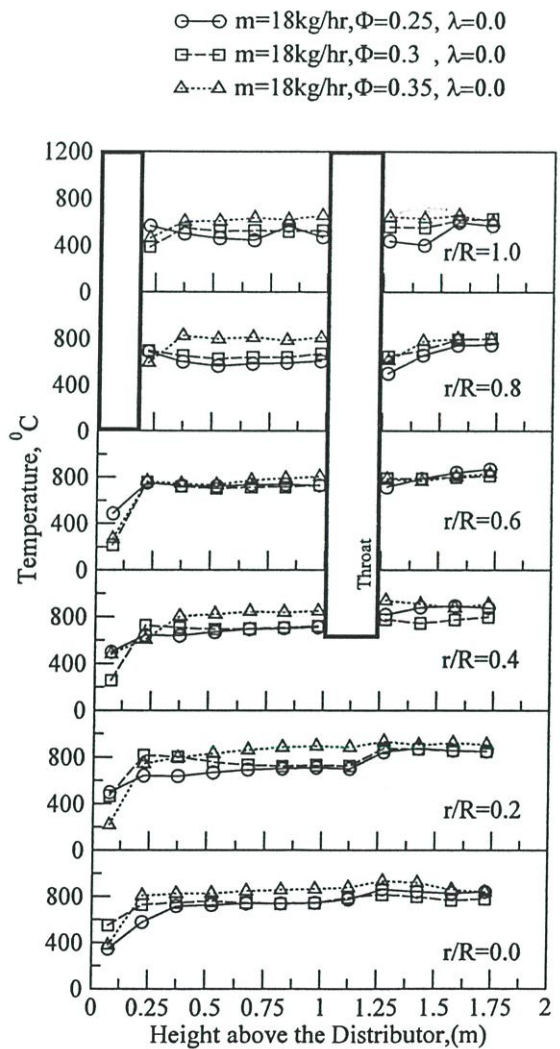
ต่ำลงจนไม่สามารถเก็บผลการกระจายอุณหภูมิได้ เนื่องจากปริมาณของอากาศส่วนเกินที่มากจึงทำให้ไม่เกิดการเผาไหม้ได้โดยอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดต่ำลงจนอุณหภูมิต่ำกว่าขอบเขตของการติดไฟของเชื้อเพลิงเหลวได้

6.3.1.2 ข) กรณีฉีดอากาศหมุนวน 25%ของอากาศทั้งหมด ( $\lambda = 0.25$ )

กรณีนี้เป็นกรณีของการศึกษาโดยทำการแบ่งปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ อากาศปฐมภูมิ, อากาศจาก Nozzle Jet และอากาศทุติยภูมิ โดยที่ทำการกำหนดให้อากาศจาก Nozzle Jet มีค่าคงที่ตลอดการทดลองและอากาศปฐมภูมิร่วมกับอากาศจาก Nozzle Jet



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

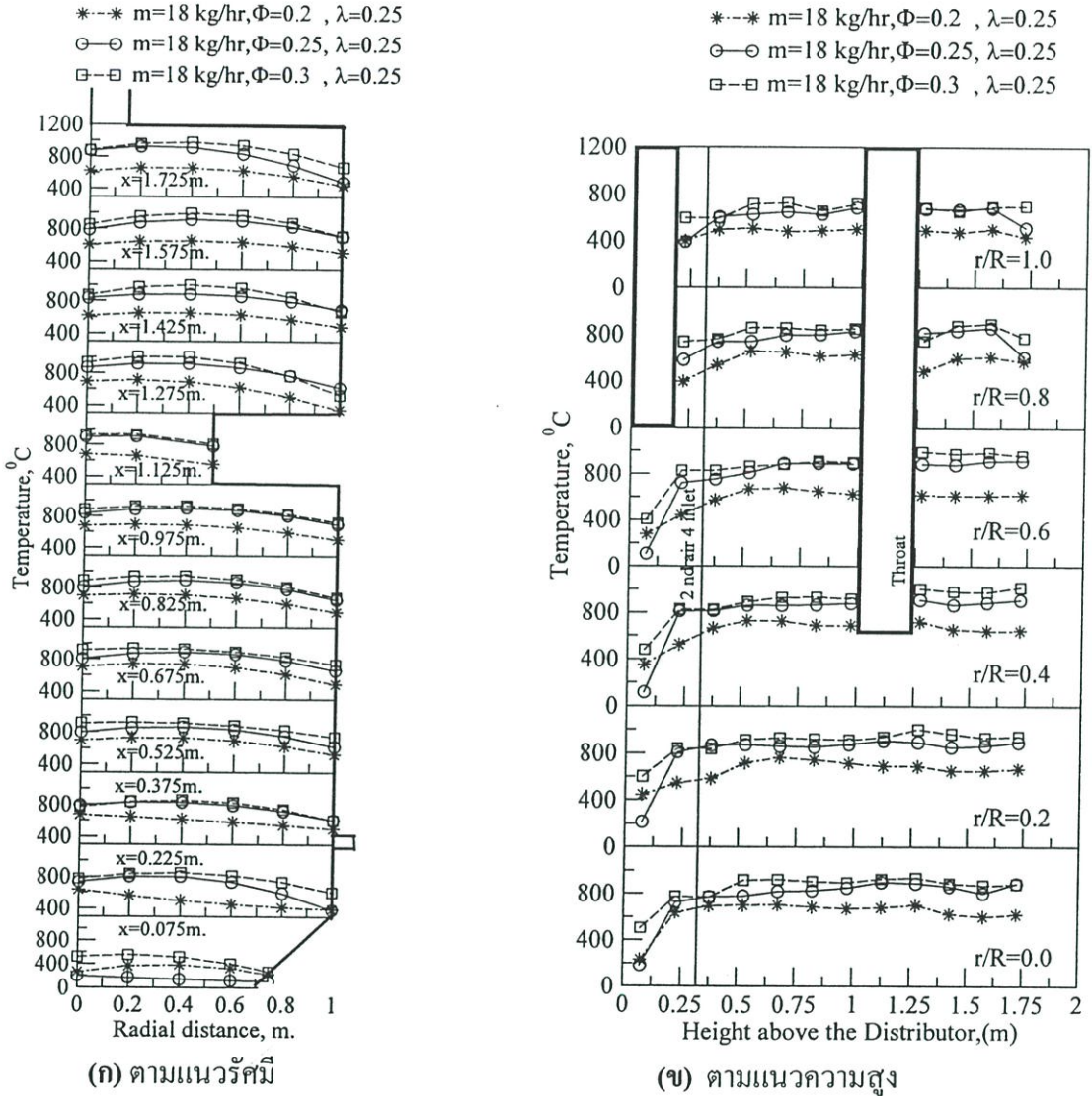
รูปที่ 6.8 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาVFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 18 kg/hr. ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.0

เป็น 75% ของอากาศทั้งหมดและอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 25% ของอากาศทั้งหมด จากผลการทดลองกรณีของ  $\Phi = 0.3$  พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้ (เหนือแผ่นกระจายลม) บริเวณ  $x = 0.075$  m. จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนี้มีค่าการกระจายอุณหภูมิสูงกว่ากรณี  $\Phi = 0.2$  และ  $\Phi = 0.25$  เนื่องจากปริมาณอากาศปฐมภูมิมีค่าน้อยกว่าทำให้ไม่มีการสูญเสียให้กับปริมาณอากาศเกินพอจึงทำให้เชื้อเพลิงกับออกซิเจนผสมกันได้เหมาะสมกว่า จึงทำให้อุณหภูมิกรณีดังกล่าวนี้มีค่าสูงกว่าโดยอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ  $450 - 500$  °C ซึ่งสูงกว่ากรณี  $\Phi = 0.2$  และ  $0.25$  และเหนือตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิซึ่งจะติดตั้งไว้ที่ตำแหน่ง  $x = 0.3$  m. (เหนือแผ่นกระจายลม) เมื่อปรับ  $\lambda = 0.25$  ของทุกกรณีก็จะหมายความว่า จะต้องใช้อากาศส่วนที่ 2 ถึง 25% ของอากาศทั้งหมดของทุกกรณีเข้ามาช่วยในการเผาไหม้จะเห็นว่าช่วงตำแหน่งการฉีดดังกล่าวอากาศเย็นภายนอกปริมาณ 25% ของทุกกรณีจะมีลักษณะของการไหลหมุนวนทำให้อุณหภูมิมังไม่สูงมากนักเนื่องจากอากาศเย็นเข้ามาผสมและมีลักษณะคล้ายผ่านอากาศ เพื่อทำให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงเกิดการหมุนวนส่งผลให้อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าคงที่ เมื่อการไหลของอากาศผ่านตำแหน่งของการฉีดจึงทำให้อากาศกับเชื้อเพลิงผสมกันในลักษณะของการไหลผสมแบบปั่นป่วนจึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาอยู่ในเตาเผาได้นานขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น ประกอบกับการติดตั้งชุดคอคอดทำให้การไหลของปริมาณอากาศจำนวนมากถูกลดพื้นที่การเผาไหม้อย่างทันทีทันใด ทำให้มีอุณหภูมิสูงบริเวณกึ่งกลางเตาโดยอุณหภูมิสูงสุดในเตาอยู่ที่ประมาณ  $850 - 870$  °C ตั้งแต่  $r/R = 0.0$  จนถึง  $r/R = 0.6$  ของกึ่งกลางวงแหวนและอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดต่ำลงบริเวณผนังเตาซึ่งคล้ายกับกรณี  $\lambda = 0.0$  แต่อุณหภูมิที่ผนังเตายังมีอุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณผนังเตาประมาณ  $600 - 650$  °C ดูได้จากรูป 6.9 (ข) ส่วนเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศให้  $\Phi = 0.2$  จะพบว่าลักษณะของการกระจายอุณหภูมิมิมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดโดยการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $600 - 650$  °C ที่บริเวณกึ่งกลางเตาจนถึง  $r/R = 0.6$  ซึ่งคล้ายกับกรณี  $\Phi = 0.3$  ข้อสังเกตจากการทดลองอีกประการหนึ่งก็คือการติดตั้งคอคอดบริเวณ  $x = 1.125$  m. ทำให้เกิดลักษณะของการลดขนาดอย่างทันทีทันใดเป็นผลทำให้เกิดลักษณะของการไหลหมุนวนไปมา จึงทำให้อุณหภูมิเกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องจึงทำให้อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นจาก  $850$  เป็น  $890$  °C ณ ตำแหน่ง  $x = 1.275$  m. ถึง  $x = 1.575$  m. ซึ่งการไหลหมุนวนไปมาจะมีลักษณะคล้ายกับน้ำพุโดยเปลวไฟจะค่อยเล็กและขยายขึ้น ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงบริเวณ  $r/R = 0.2$  จนถึง  $r/R = 0.6$

### 6.3.1.3 ค) กรณีฉีดอากาศหมุนวน 40% ของอากาศทั้งหมด ( $\lambda = 0.4$ )

เป็นกรณีที่ทำการศึกษาคล้ายกับกรณีก่อนหน้านี้แต่ปริมาณของอากาศทุติยภูมิจะมีค่าเพิ่มเป็น 40% ของค่าทั้งหมด จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6.10 (ก) พิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีจะพบว่าเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่  $\Phi = 0.3$  จะพบว่าให้การกระจายอุณหภูมิสูงที่สุดบริเวณจุดกึ่งกลางของเตาเผาโดยอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $900 - 920$  °C

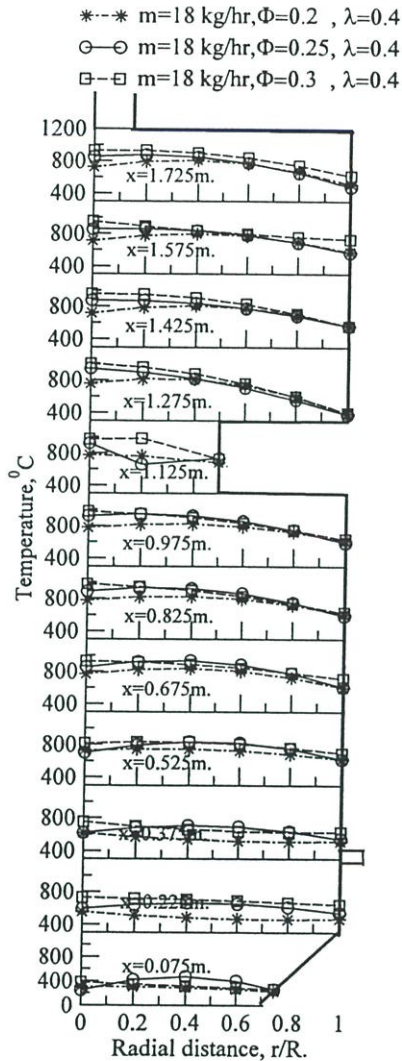
เนื่องจากในกรณีนี้ได้ทำปรับอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิเป็น 40% จึงทำให้สัดส่วนของอากาศปฐมภูมิรวมกับอากาศที่ Nozzle Jet ลดลงเป็น 60% ก็คือลักษณะของการไหลของอากาศทางด้านล่างของเตาเผาลดลงแต่เพิ่มอัตราของการหมุนวนให้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าบริเวณด้านล่างของ



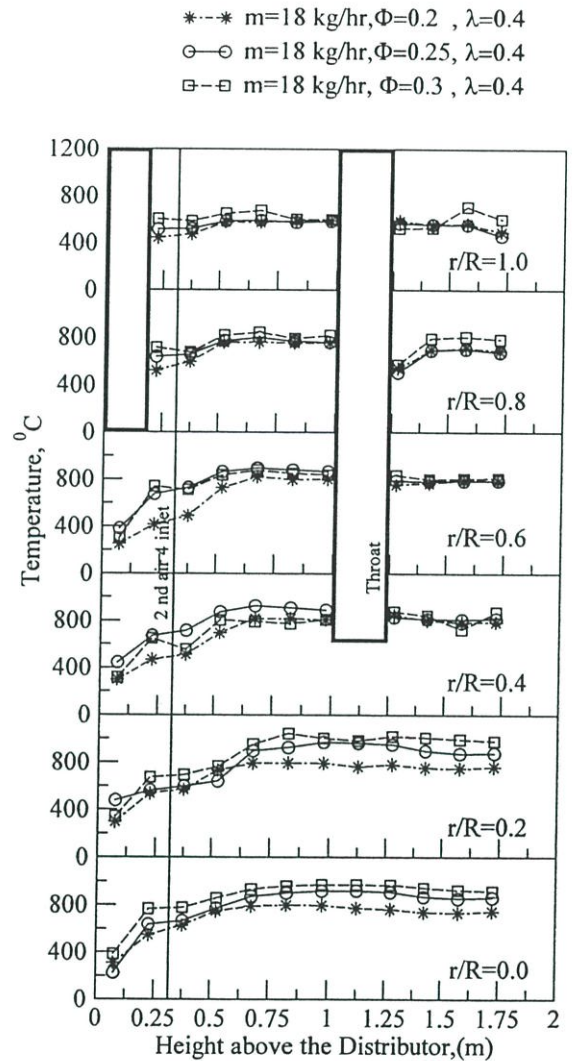
รูปที่ 6.9 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.25

เตาเผามีอุณหภูมิสูงประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$  และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น  $900^{\circ}\text{C}$  ณ ตำแหน่ง  $X = 0.675 \text{ m}$ . บริเวณกึ่งกลางเตา  $r/R = 0$  จนถึง  $r/R = 0.4$  และอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงโดยอุณหภูมิที่ผนังเตาเผามีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ  $600 - 650^{\circ}\text{C}$  และเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศเป็น  $\Phi = 0.25$  จะเห็นว่า การกระจายอุณหภูมิจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยโดยอุณหภูมิลดลงอยู่ที่ประมาณ  $870 - 900^{\circ}\text{C}$  และจะมีค่าสูงกว่าในกรณี  $\Phi = 0.3$  ในบริเวณ  $r/R = 0.4$  จนถึง  $r/R = 0.6$  ที่ตำแหน่ง  $x = 0.525 \text{ m}$ . ถึง

$x = 0.975$  m. ตามรูปที่ 6.10 (ข) อาจเนื่องมาจากอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิในแนวแกนรวมกับปริมาณอากาศทุติยภูมิที่ไหลเข้าในแนวสัมผัสมีปริมาณมากทำให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณนี้สูง



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.10 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 18 kg/hr. ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.4

มากและอาจเป็นผลมาจากการพาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ส่งผลทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นข้อสังเกตอีกประการหนึ่งก็คือการติดตั้งคอคอดมีผลทำให้การเผาไหม้เพิ่มขึ้นโดยสังเกตเห็นว่าความร้อนของการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงบริเวณกึ่งกลางของวงแหวนและลดต่ำลงที่บริเวณผนังเตา โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้นคืออุณหภูมิสูงบริเวณกึ่งกลางและลดต่ำลงบริเวณผนังและเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่  $\Phi = 0.2$  จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้การกระจายอุณหภูมิจะมี

ค่าต่ำลงเนื่องจากปริมาณอากาศส่วนเกินมากทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนของการเผาไหม้ ซึ่งคล้ายกับในกรณี  $\lambda = 0.25$  แต่อุณหภูมิในกรณี  $\lambda = 0.4$  จะให้อุณหภูมิสูงโดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาอยู่ที่ประมาณ  $700 - 720$  °C และอุณหภูมิภายในเตาบริเวณดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกับกรณี  $\Phi = 0.25$  และที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ  $0.35$   $\lambda = 0.4$  ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากปริมาณของอากาศที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันไม่พอที่จะยกเชื้อเพลิงกลับขึ้นได้

### 6.3.2 อิทธิพลของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ )

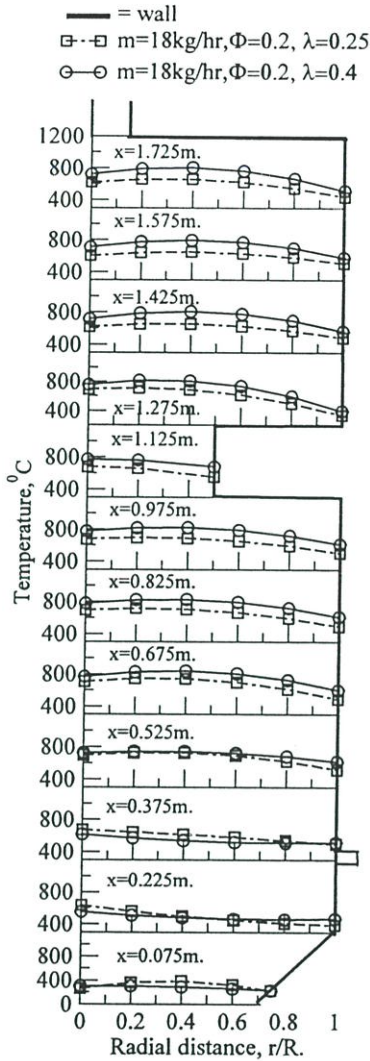
#### 6.3.2.1 ก) $\Phi = 0.2$

จากรูปที่ 6.11 ก) เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงกลับเป็น 18 kg/hr. ที่อัตราส่วนสมมูล,  $\Phi$  เท่ากับ 0.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตามีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาประมาณ 800 °C ที่บริเวณกึ่งกลางเตาดั้งแต่  $x = 0.675$  m. ถึง  $x = 0.825$  m. จะเห็นได้ว่าการฉีดอากาศทุกชนิด  $\lambda = 0.4$  จะให้การกระจายอุณหภูมิสูงกว่า  $\lambda = 0.25$  โดยอุณหภูมิแตกต่างประมาณ 100 °C ตั้งแต่  $x = 0.825$  m. จนถึงด้านบนสุดของเตา ส่วนในกรณีที่ไม่มี การฉีดอากาศทุกชนิด  $\lambda = 0.0$  จะให้อุณหภูมิการเผาไหม้ไม่คงที่เนื่องจากที่อัตราส่วนสมมูล,  $\Phi$  เท่ากับ 0.2 จะใช้อากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียวในการเผาไหม้ไม่มีการแบ่งอากาศให้กับการฉีดอากาศทุกชนิด จึงทำให้ปริมาณอากาศปฐมภูมิที่เข้าทางด้านล่างของเตามีปริมาณมากซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาค่อย ๆ ลดต่ำลงจนกระทั่งอุณหภูมิไม่อยู่ในช่วงขอบเขตของการติดไฟจึงส่งผลกระทบต่อทำให้เตาเผาดับลง

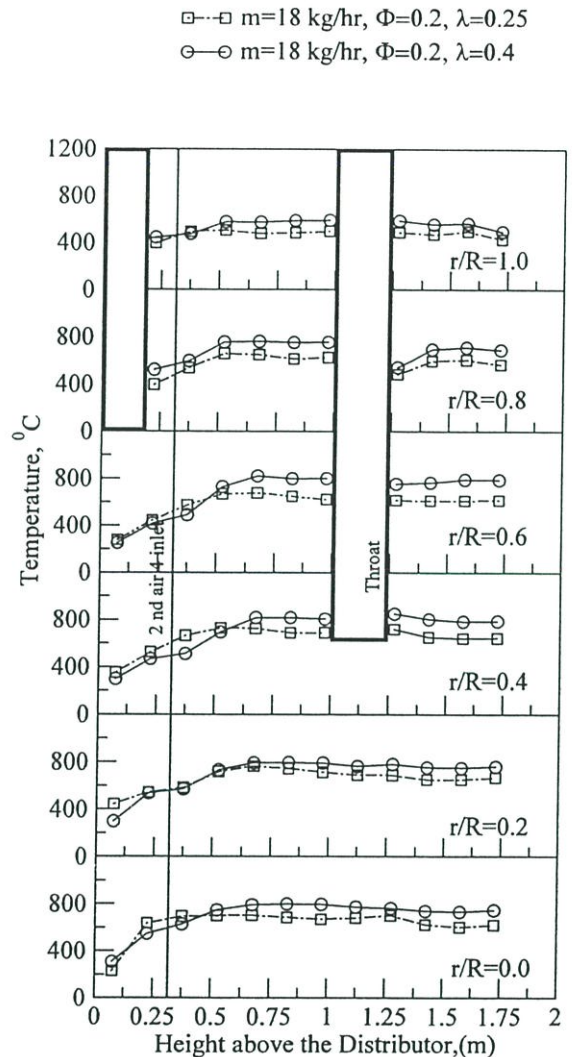
#### 6.3.2.2 ข) $\Phi = 0.25$

จากรูปที่ 6.12 (ก) พิจารณาลักษณะของการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตาเผาที่  $\Phi = 0.25$  จะพบว่าในกรณีนี้ได้ทำการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงกลับเป็น 18 kg/hr. จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่บริเวณตำแหน่งการฉีดอากาศทุกชนิดคือ  $x = 0.225$  m. ถึง  $x = 0.375$  m. การกระจายอุณหภูมิจะมีค่าไม่สูงมากนักและอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าคงที่เนื่องจากผลของการฉีดอากาศทุกชนิดจะเห็นได้ว่า  $\lambda = 0.4$  เกิดการกระจายอุณหภูมิน้อยกว่ากรณี  $\lambda = 0.25$  เพราะว่ามีปริมาณอากาศทุกชนิดมีปริมาณมากกว่า จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำกว่าและจะพบว่าผลของการหมุนวนของอากาศกับเชื้อเพลิงในกรณี  $\lambda = 0.4$  ให้การกระจายอุณหภูมิสูงกว่า  $\lambda = 0.25$  ที่บริเวณ  $x = 0.675$  m. ถึง  $x = 0.975$  m. เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วง SEZ (ช่วงบริเวณของการหมุนวน) จึงทำให้การกระจายอุณหภูมิสูง ณ บริเวณดังกล่าวจะสังเกตเห็นว่าผลของกรณีการฉีดอากาศทุกชนิด  $\lambda$  จะให้ค่าการกระจายอุณหภูมิสูงกว่ากรณี ไม่มีการฉีดอากาศทุกชนิด ( $\lambda = 0.0$ ) และจะพบว่าบริเวณคอคอด (Throat) การหมุนวนไปมาทำให้เกิด Recirculation นั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิที่อยู่ภายในเตาเกิดความปั่นป่วน จะพบว่าตั้งแต่ตำแหน่ง  $x = 1.125$  m. ถึงด้านบนของเตาเผาการหมุนวนของอากาศทุกชนิดที่  $\lambda = 0.4$  จะให้การกระจายอุณหภูมิต่ำกว่าค่า  $\lambda = 0.25$  เนื่องจากปริมาณอากาศทุกชนิด  $\lambda =$

0.4 มีปริมาณมากกว่าปริมาณของเชื้อเพลิงจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวลดต่ำกว่า  $\lambda = 0.25$  แต่ก็ยังพบว่า การกระจายอุณหภูมิในกรณีที่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ จะให้อุณหภูมิสูงกว่ากรณีไม่มีการ



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.11 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่ อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. ที่อัตราส่วนสมมูล  $\Phi$  เท่ากับ 0.2

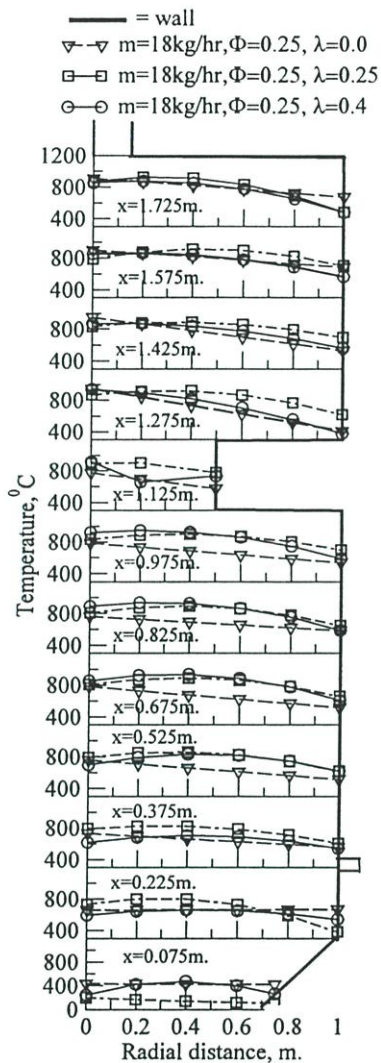
ฉีดอากาศทุติยภูมิ  $\lambda = 0.0$  โดยอุณหภูมิเฉลี่ยเหนือบริเวณคอคอดประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$  และจะลดลงที่บริเวณใกล้กับผนังของเตาเผาซึ่งเป็นผลมาจากการฉีดอากาศทุติยภูมิและเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผนังไปกับสิ่งแวดล้อม และ จากรูปที่ 6.12(ข) พิจารณาลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.25 จะพบว่าที่ตำแหน่ง  $x = 0.075$  m. ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้จะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่งนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ และมีอุณหภูมิลักษณะนี้ค่าไม่สูงมากนักและจะเริ่มการเผาไหม้บริเวณที่  $r/R = 0.2$  ถึง  $r/R = 0.6$  เพราะที่บริเวณนี้

กลางเตาเผาเป็นจุดที่ทำการป้อนเชื้อเพลิงกับอากาศที่มาจากทางด้านล่างของเตาเผาอีกทั้งยังมีอากาศป้อนรวมกันมาช่วยพยุงแกลบทำให้อุณหภูมิมีค่าไม่สูงมากนัก โดยจะเริ่มเผาไหม้บริเวณ  $x = 0.225$  m. ถึง  $x = 1.500$  m. จะพบว่ากรณีการฉีดอากาศทุติยภูมินี้ทำให้การเผาไหม้ได้ดีกว่ากรณีไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการกระจายอุณหภูมิที่  $\lambda = 0.4$  จะมีค่าสูงสุดที่ระยะ  $r/R = 0.0$  จนถึง  $r/R = 0.6$  และอุณหภูมิบริเวณ  $r/R = 0.8$  ถึง  $r/R = 1.0$  เพราะอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่ฉีดอากาศมาด้านข้างตามแนวสัมผัสของผนังเตาจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวต่ำกว่า  $\lambda = 0.25$  แต่การกระจายอุณหภูมิกรณีมีการฉีดอากาศทุติยภูมิก็ยังให้การกระจายอุณหภูมิสูงกว่ากรณีไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda = 0.0$ )

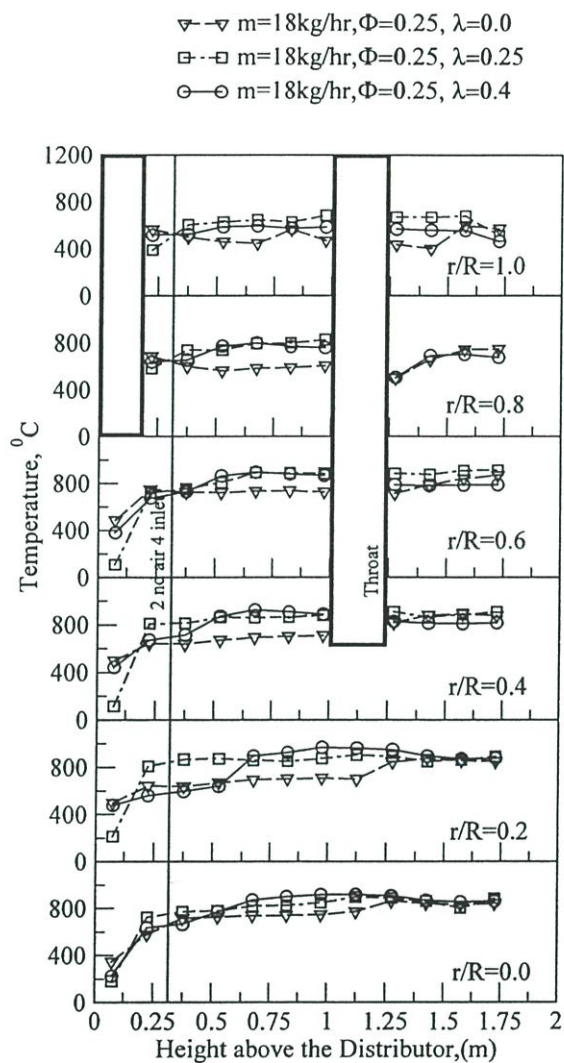
### 6.3.2.3 ค) $\Phi = 0.3$

จากรูปที่ 6.13(ก) พบว่าการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมีที่  $\Phi = 0.3$  ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr หรือปริมาณ 0.3 kg/min ก็ยังพบว่าที่บริเวณตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิยังฉีดอากาศทุติยภูมิในปริมาณมาก ในช่วงบริเวณ  $x = 0.225$  m. ถึง  $x = 0.375$  m. จะทำให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดต่ำสุด ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $600-700^{\circ}\text{C}$  และเมื่อถึงระยะการหมุนวนพื้นบริเวณดังกล่าวอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่  $\Phi = 0.3$  จะให้ปริมาณอากาศน้อยกว่ากรณี  $\Phi = 0.2$  และ  $0.25$  จะทำให้การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงโดยอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ  $900^{\circ}\text{C}$  และสังเกตเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิของกรณี  $\lambda = 0.4$  จะให้อุณหภูมิสูงกว่า  $\lambda = 0.25$  บริเวณจุดกึ่งกลางของเตาเผา  $r/R = 0$  ที่บริเวณ  $x = 0.825$  m. จนถึง  $x = 1.725$  m. และอุณหภูมิจะค่อยลดต่ำลงอยู่อย่างเห็นได้ชัดบริเวณผนังเตาเผาโดยอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ  $400-500^{\circ}\text{C}$  แต่ก็ยังพบว่า การฉีดอากาศทุติยภูมิจะช่วยให้การเผาไหม้ดีกว่ากรณีไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ  $\lambda = 0.0$  และที่บริเวณคอคอดจะเป็นส่วนที่ช่วยหมุนวนแกลบให้เกิดการหมุนวนอยู่ในเตานานขึ้นส่งผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งก็คือสัดส่วนของปริมาณอากาศป้อนรวมกันและทุติยภูมิก็มีผลต่อคุณลักษณะของการเผาไหม้ถ้าใช้อากาศป้อนรวมเพียงอย่างเดียวก็อาจทำให้การเผาไหม้ไม่ดีพอหรือถ้าใช้อากาศทุติยภูมิในปริมาณมากไปก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิบริเวณการฉีดลดต่ำลงโดยจะสังเกตว่าที่ตำแหน่งคอคอดคือตั้งแต่  $x = 1.125$  m. จนถึง  $x = 1.725$  m. จะพบว่าที่  $\lambda = 0.25$  จะให้การกระจายอุณหภูมิสูงกว่า  $\lambda = 0.4$  อาจเนื่องมาจากปริมาณสัดส่วนระหว่าง อากาศป้อนรวมกันและอากาศทุติยภูมิอยู่ในช่วงการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงพอเหมาะจึงทำให้การเผาไหม้ที่ได้อุณหภูมิสูง หากพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามแนวความสูงของเตาเผา โดยดูได้จากรูปที่ 6.13(ข) จะเห็นได้ว่าบริเวณการฉีดอากาศทุติยภูมิคือตั้งแต่  $x = 0.225$  m. ถึง  $x = 0.325$  m. จะเห็นว่าเมื่อมีการฉีดอากาศทุติยภูมิจะส่งผลให้บริเวณดังกล่าวอุณหภูมิไม่สูงเนื่องจากอากาศเย็นภายนอกเข้ามาผสมกับอุณหภูมิการเผาไหม้จึงทำให้อุณหภูมิในช่วงบริเวณดังกล่าวมีค่าคงที่ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่

ประมาณ 700 °C พิจารณาบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของเตาเผา (r/R = 0.0) จะพบว่าผลของการฉีดอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda = 0.0$ ) ตลอดทั้งเตาที่ความสูงระยะต่าง ๆ และจะพบว่าการฉีดอากาศทุติยภูมิกรณี



(ก) ตามแนวรัศมี



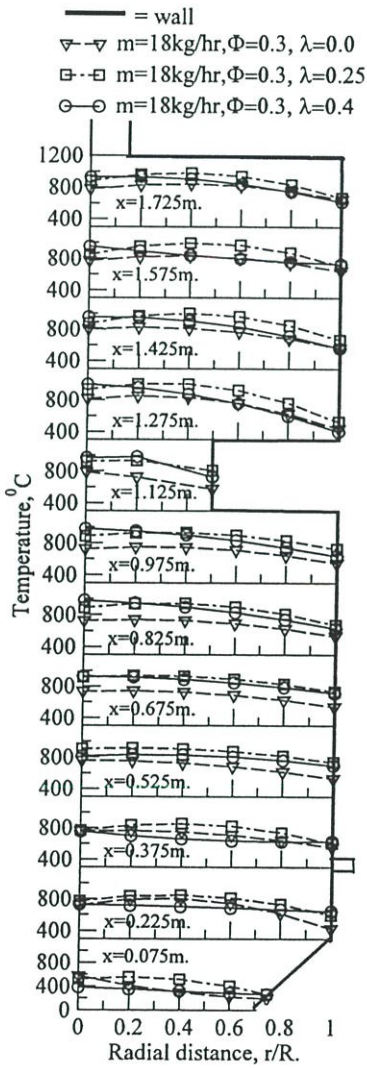
(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.12 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 kg/hr. ที่อัตราส่วนสมมูล  $\Phi$  เท่ากับ 0.25

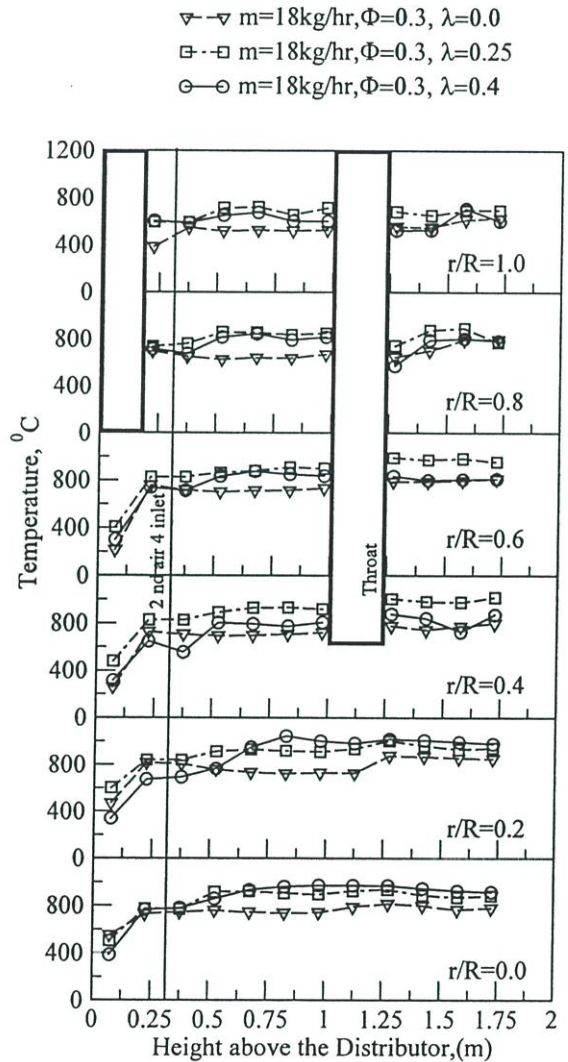
$\lambda = 0.4$  อุณหภูมิจะต่ำกว่าค่า  $\lambda = 0.25$  ที่ตำแหน่งตั้งแต่ r/R = 0.4 จนถึงผนังของเตาเผา (r/R = 1.0) ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนของปริมาณของอากาศปฐมภูมิที่ขึ้นจากทางด้านล่าง จึงทำให้เชื้อเพลิงที่มาจากด้านล่างผสมกับอากาศทางแนวสัมผัสน้อยกว่ากรณี  $\lambda = 0.25$

### 6.3.3 ก๊าซไอเสียเมื่อเตามีคอคอด

จากการทดลองผลต่อก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ภายในเตาเผา VFBC ในกรณีที่มีการลดขนาดของห้องเผาไหม้บริเวณกึ่งกลางห้องเผาไหม้หรือคอคอดที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงกลบเท่ากับ 18 kg/hr. เมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศให้  $\lambda = 0.0$  (ไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ), 0.25 และ 0.4 ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลง  $\lambda$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซออกซิเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ดังต่อไปนี้



(ก) ตามแนวรัศมี



(ข) ตามแนวความสูง

รูปที่ 6.13 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงกลบเท่ากับ 18 kg/hr. ที่อัตราส่วนสมมูล  $\Phi$  เท่ากับ 0.3

เมื่อ  $\Phi = 0.2$  ลักษณะแนวโน้มของปริมาณก๊าซไอเสียมีลักษณะคล้ายกับกรณีการเผาไหม้ภายในเตาแบบไม่มีคอคอด จะพบว่าการติดตั้งคอคอดมีผลให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงตกลงอยู่ภายในเตาได้นานขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นจึงเป็นผลทำให้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 12.5% ซึ่งในทางกลับกันถ้าปริมาณของก๊าซ  $O_2$  เพิ่มขึ้นปริมาณของก๊าซ  $CO_2$  จะมีค่าลดลงเท่ากับ 5% สำหรับกรณี  $\lambda = 0.4$  จะเห็นได้ว่าปริมาณของการหมุนวนสูงขึ้นซึ่งในกรณี  $\Phi = 0.2$  นี้จะใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินค่อนข้างมากทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ไม่สูงมากนักจึงทำให้ก๊าซ CO มีค่าเท่ากับ 400 ppm. ซึ่งการเผาไหม้อุณหภูมิไม่สูงนี้จะส่งผลก็คือทำให้ปริมาณของก๊าซ NO และ  $NO_x$  ต่ำลงเท่ากับ 200 ppm. ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ส่วนลักษณะควันที่ขึ้นจากการเผาไหม้มีลักษณะเป็นสีขาวปนเทา และสีเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้มีสีดำปนเทา

เมื่อ  $\Phi = 0.25$  จะเห็นได้ว่าการเผาไหม้ในกรณีนี้จะใช้ปริมาณของอากาศส่วนเกินที่น้อยกว่ากรณี 0.2 จะส่งผลทำให้การเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะพบว่าการทำอากาศทุกชนิดในแนวเส้นสัมผัสที่ด้านข้างของเตาเผาจะส่งผลทำให้การเผาไหม้ดีกว่ากรณีไม่มีการฉีดอากาศทุกชนิด เนื่องจากการหมุนวนก่อให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรุนแรงทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศ (ออกซิเจน) จับตัวกันได้มากขึ้นทำให้เหลือปริมาณของก๊าซ  $O_2$  เท่ากับ 8.5% เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้  $O_2$  กับ  $CO_2$  จึงทำให้สัดส่วนของ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.5% และเห็นได้ว่าการเผาไหม้ในกรณี  $\lambda = 0.4$  มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $800^\circ C - 850^\circ C$  จึงทำให้ปริมาณของก๊าซ CO ลดต่ำลงเท่ากับ 305 ppm. แต่ในทางกลับกันถ้าการเผาไหม้อุณหภูมิสูงก็จะทำให้ก๊าซ NO และ  $NO_x$  มีค่าเท่ากับ 298 ppm. ดังแสดงในรูปที่ 6.14

เมื่อ  $\Phi = 0.3$  จากการทดลองในกรณีนี้เราจะใช้ปริมาณของอากาศส่วนเกินที่ต่ำกว่าในกรณี  $\Phi = 0.25$  จึงทำให้ปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สำหรับในกรณีนี้ย่อมจึงส่งผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาเผาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ  $900^\circ C$  จากรูปที่ 6.14 ก็ยังพบว่าที่กรณี  $\lambda = 0.4$  ก็คือ การฉีดอากาศทุกชนิดต่อปริมาณอากาศทั้งหมดถึง 40 % จะส่งผลทำให้เกิดการหมุนวนในปริมาณมากทำให้เชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนได้ดีมากยิ่งขึ้นทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น จึงส่งผลทำให้ปริมาณของก๊าซ  $O_2$  เท่ากับ 6.5 % เมื่อเทียบกับกรณี  $\lambda = 0.0$  และ  $\lambda = 0.25$  จะพบว่า  $\lambda = 0.4$  จะมีค่าต่ำกว่า โดยที่  $\lambda = 0.0$  และ  $\lambda = 0.25$  จะมีปริมาณออกซิเจน เท่ากับ 8% ส่วนในทางกลับกันเมื่อ  $\lambda = 0.40$  ทำให้ปริมาณก๊าซ  $O_2$  น้อยลงจะส่งผลทำให้ปริมาณของก๊าซ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ 8.5% ซึ่งการเผาไหม้ในกรณี  $\lambda = 0.4$  จะส่งผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซ CO ลดลงเท่ากับ 308 ppm. และจะเห็นได้ว่าปริมาณของก๊าซ NO และ  $NO_x$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 300 ppm. และ 298 ppm. ตามลำดับ โดยดูได้จากรูปที่ 6.14 และควันที่ได้จากการเผาไหม้มีลักษณะสีเทาปนดำ, สีเถ้ามีลักษณะละเอียดสีเทาปนดำทดสอบได้เนื่องจากปริมาณของอากาศที่ใช้ในการพองแกลบเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิด ไคซ์เซชันไม่พอจึงไม่สามารถทดลองได้ โดยจะทดสอบได้ในกรณีที่  $\lambda = 0$  ได้เพียงอย่างเดียว จะเห็นได้ว่าการใช้ปริมาณของอากาศปฐมภูมิร่วมกับ

อากาศจาก Nozzle Jet มีค่าเท่ากับ 100% ของอากาศทั้งหมดจะทำให้การเผาไหม้อุณหภูมิสูงเนื่องมาจากการใช้ปริมาณของอากาศที่น้อยลงส่งผลทำให้การเผาไหม้มีอุณหภูมิสูง โดยปริมาณของ  $O_2$  ที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 7% ส่วนก๊าซ  $CO_2$  มีแนวโน้มสูงขึ้นเท่ากับ 9% จะเห็นได้ว่าการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงจึงส่งผลทำให้ก๊าซ CO มีค่าลดลงเท่ากับ 300 ppm. และก๊าซ NO และ  $NO_x$  มีค่าเท่ากับ 300 ppm. ดังแสดงในรูปที่ 6.12 โดยลักษณะควันจากการเผาไหม้สีเทาปนดำ และเชื้อเพลิงที่ได้มีลักษณะละเอียดสีเทาปนดำ

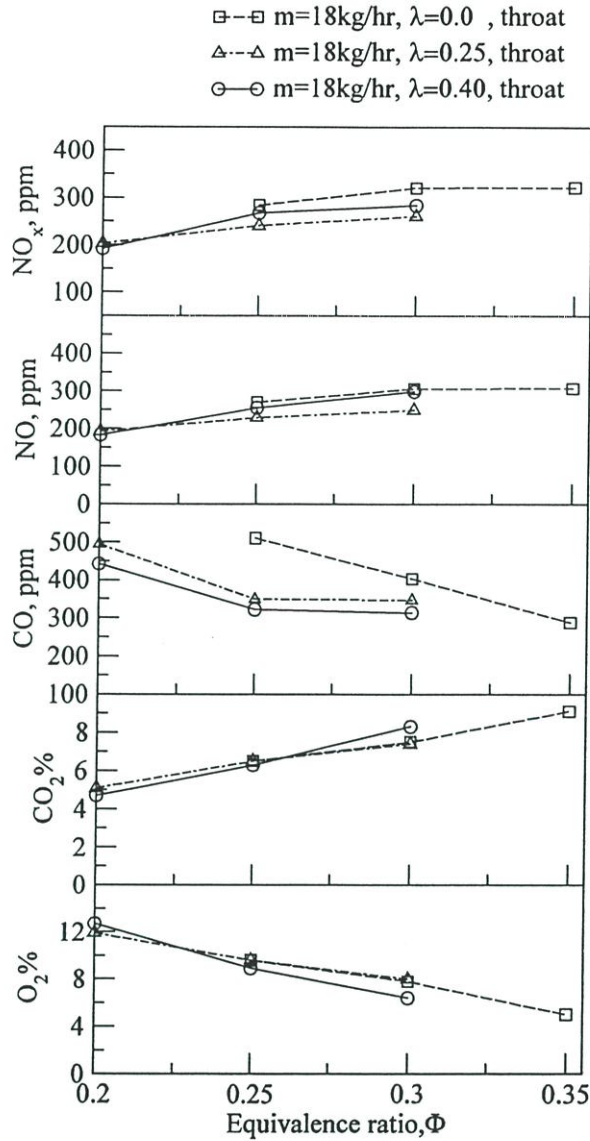
#### 6.4 การเปรียบเทียบก๊าซไอเสียจากเตาเผาระหว่างกรณีมีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอด

##### 6.4.1 กรณี $\lambda = 0.25$

จากรูปที่ 6.15 (ก) กราฟแสดงเปรียบเทียบผลของปริมาณก๊าซไอเสียกรณีมีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอดที่  $\lambda = 0.25$  จะพบว่าแนวโน้มการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้มีแนวโน้มและลักษณะที่คล้ายคลึงกันแต่จะพบว่าการปลดปล่อยมลพิษของกรณีมีคอคอด (Throat) จะให้มลพิษต่ำกว่ากรณีไม่มีคอคอดเนื่องจากการติดตั้งชุดคอคอดนี้จะก่อให้เกิดการเผาไหม้เป็นลำดับขั้น Staging Combustion ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการหมุนวนกลับ ไปมา (Recirculation) ทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จะเห็นได้ชัดว่าปริมาณของก๊าซ  $O_2$  ที่เหลือจากการเผาไหม้มีค่าน้อยกว่าและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่ามากกว่าในกรณีไม่มีคอคอดซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากลักษณะของการหมุนวนร่วมกับลักษณะของการไหลกลับ ไปมาจึงทำให้อุณหภูมิโดยรวมกับอากาศได้มากจึงให้การเผาไหม้ดีเป็นการปรับปรุงห้องเผาไหม้ก็จะส่งผลต่อการลดมลพิษ  $NO_x$  ได้โดยตรง (ซึ่งสามารถดูได้จากรูป 6.15 ก) โดยมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้  $\Phi$  ทุกกรณีคือ  $\Phi = 0.2, 0.25$  และ  $0.3$  มีค่าต่ำกว่ากรณีไม่มีคอคอดทุกกรณีเช่นที่  $\Phi = 0.25$  และ  $0.3$  จะให้ปริมาณของก๊าซ CO ต่ำกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 380 ppm. ส่วนในกรณีไม่มีคอคอดที่กรณีเดียวกันปริมาณของก๊าซ CO สำหรับกรณีไม่มีคอคอดจะให้ปริมาณที่มากกว่าโดยมีค่าสูงสุดที่  $\Phi = 0.2$  จะมีค่าเท่ากับ 1,400 ppm.

##### 6.4.2 กรณี $\lambda = 0.4$

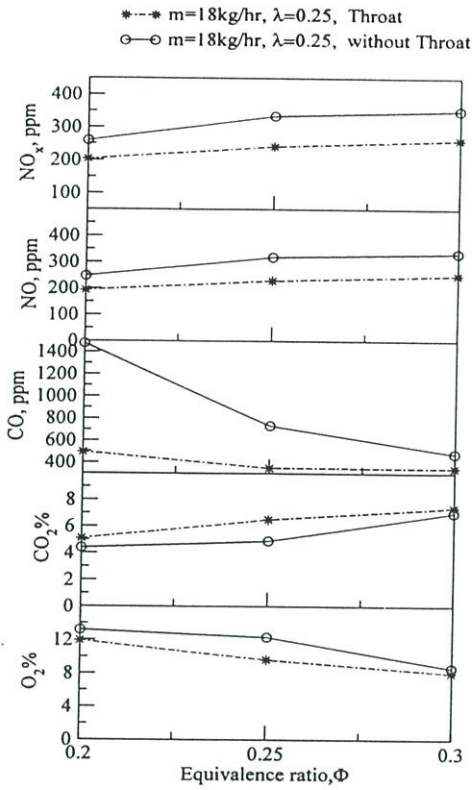
จากรูปที่ 6.15 (ข) เป็นกราฟแสดงเปรียบเทียบผลของปริมาณก๊าซไอเสียที่  $\lambda = 0.4$  จากกราฟจะพบว่าแนวโน้มการปลดปล่อยมลพิษคล้ายกับในกรณี  $\lambda = 0.25$  โดยจะพบว่าที่  $\Phi = 0.2$  กรณีมีคอคอดปริมาณของก๊าซ CO จะมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่มีคอคอดถึงประมาณ 1,000 ppm. ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการปรับปรุงลักษณะของห้องเผาไหม้โดยการลดพื้นที่ของห้องเผาไหม้อย่างทันทีทันใดช่วยให้การเผาไหม้ภายในเตาเกิดการเผาไหม้เป็นลำดับขั้น ซึ่งก่อให้เกิดการหมุนวนกลับ ไปมาจึงทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จึงทำให้ก๊าซ CO มีค่าลดต่ำลงและส่งผลทำให้ปริมาณ NO และ  $NO_x$  ต่ำกว่าโดยปริมาณต่ำสุดอยู่ที่  $\Phi = 0.2$  โดยมีค่าเท่ากับ 198 ppm. และ 200 ppm. ตามลำดับ



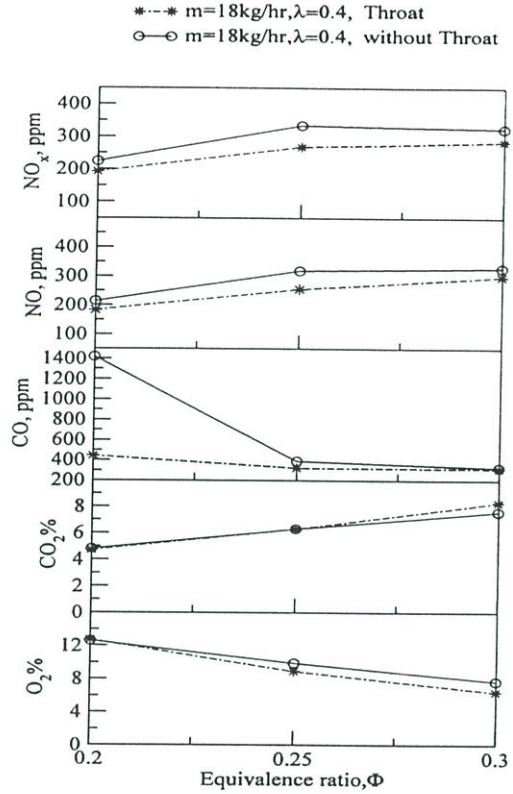
รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่าง  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , CO, NO และ  $\text{NO}_x$  กับค่า  $\Phi = 0.2, 0.25, 0.3$  และ  $0.35$  เมื่อ  $\lambda = 0.00, 0.25$  และ  $0.4$  ภายในเตาเผา VFBC กรณีมีคอคอด

### 6.5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผา VFBC

จากหาประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยหาจากเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ในนี้ ถ้าจะพบว่า การเผาไหม้ภายในเตา VFBC กรณีมีคอคอด (throat) ที่อัตราการไหลของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด  $\lambda = 0.4$  จะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 98.92 % ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้จะพบว่า การเผาไหม้ภายในเตา VFBC กรณีไม่มีคอคอด (without throat) ที่อัตราการไหลของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมด  $\lambda = 0.0$  จะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 97% ดังแสดงในรูปที่ 6.16

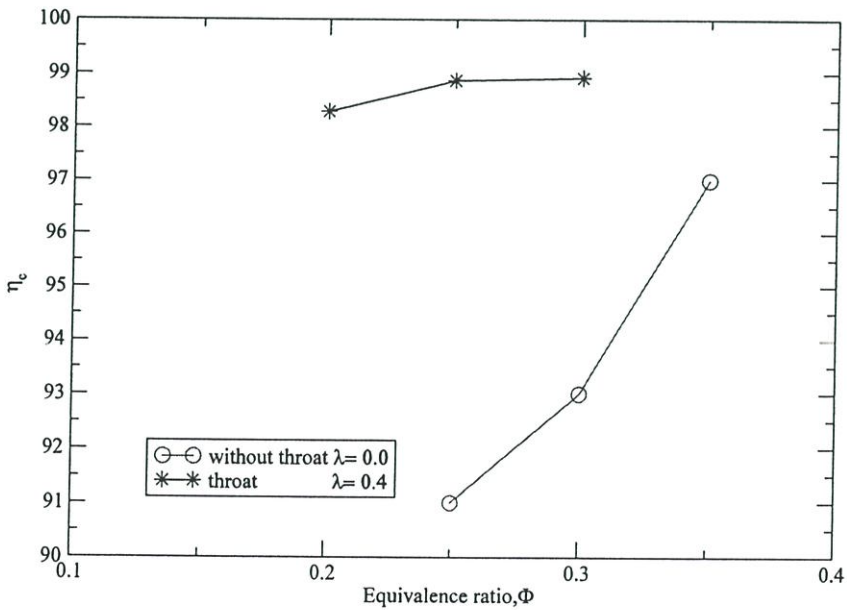


ก)  $\lambda = 0.25$



ข)  $\lambda = 0.4$

รูปที่ 6.15 การเปรียบเทียบผลของปริมาณก๊าซไอเสียระหว่างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(VFBC) กรณีที่มีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอด



รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน(VFBC) กรณีที่มีคอคอดและกรณีไม่มีคอคอด

## บทที่ 7

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิและอิทธิพลของคอคอด (Throat) ที่มีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) โดยทำการกำหนดอัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 ตามลำดับ โดยทำการปรับอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0.0, 0.25 และ 0.40 อีกทั้งยังทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเท่ากับ 18 kg/hr และทำการเปรียบเทียบลักษณะการเผาไหม้ระหว่างเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนในกรณีมีคอคอด (Throat) และกรณีไม่มีคอคอด (Without Throat) ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบ ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) ในกรณีมีคอคอด (Throat) จะมีค่าเท่ากับ 0.3 ที่อัตราป้อนแกลบเท่ากับ 18 kg/hr

2. การเผาไหม้ภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนกรณีมีคอคอด จะทำให้การเผาไหม้ดีกว่ากรณีไม่มีคอคอด เนื่องจากคอคอด (Throat) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการหมุนวนไปมา (Recirculation) ทำให้การเผาไหม้เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์และมลพิษที่ออกจากเตาเผาน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีคอคอด (Without Throat)

3. การฉีดอากาศทุติยภูมิเข้าทางด้านในแนวสัมผัสของเตาเผา จะช่วยทำให้เกิดการหมุนวนซึ่งอากาศกับเชื้อเพลิงจะคลุกเคล้ากัน ได้ดีและส่งผลทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดธรรมดา (ไม่มีการฉีดอากาศทุติยภูมิ  $\lambda = 0.0$ )

4. เมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มากขึ้น ถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 1,000 °C จะทำให้เกิด  $\text{NO}_x$  สูง อีกทั้งยังทำให้การรวมตัวของ Char และ สารระเหยเกาะกันเป็นก้อนของเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดการอุดตัน

5. ตำแหน่งของการฉีดอากาศทุติยภูมิ ก็มีผลต่อการเผาไหม้ควรจะอยู่ในระยะด้านล่างของเตาเผา เพื่อจะทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศหมุนวนอยู่ได้นาน

ดังนั้นเมื่อ  $\lambda$  มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มลักษณะการเผาไหม้แบบหมุนวนมากยิ่งขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดการผสมและการสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงแกลบกับอากาศอย่างทั่วถึงมากขึ้น และเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ภายในพร้อมทั้งลดการหลุดลอยของอนุภาคภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน และให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นมลพิษที่ออกจากเตาเผาก็น้อยลงประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นอีกด้วย

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFBC) เป็นงานวิจัยที่พัฒนาจากเตาเผาออร์เทค คือนำส่วนดีของเตาเผาออร์เทครวมกับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งการทดลองได้มุ่งเน้นในการศึกษาการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน สังเกตลักษณะของขี้เถ้า (Fly ash) ที่ออกจากเตาเผา, ควัน, มลพิษที่ออกจากและหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งเป็นการควบคุมในระดับหนึ่ง ฉะนั้นควรมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น

1. ศึกษาถึงตำแหน่งของคอคอด (Throat) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผ่าว่ามีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา
2. ศึกษาถึงขนาดของหัวฉีดอากาศทุติยภูมิ และศึกษาถึงมุมในการฉีดอากาศทุติยภูมิเช่น มุม 30 – 45 องศา กับผนังเตาเผา
3. ศึกษาถึงผลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด  $\lambda$  ที่สูงขึ้นว่ามีผลอย่างไรต่อการเผาไหม้ เช่น  $\lambda = 60, 70, 80\%$  ของปริมาณอากาศทั้งหมด
4. ทำการวัดปริมาณมลพิษที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผา
5. ศึกษาถึงลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบต่าง ๆ ว่ามีผลอย่างไรต่อการเผาไหม้
6. ศึกษาถึงการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ เช่น ชังข้าวโพด, ขี้เถ้า, ชานอ้อย, เปลือกถั่วลิสง กับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน
7. ติดตั้งชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนไปใช้งาน
8. นำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์มากกว่านี้ เช่นนำไปอบแห้งเมล็ดพืชหรือผลิตผลทางการเกษตร

## บรรณานุกรม

- [1] วิศิษฐ์ สีสภาติกุล “เตาเผาแกลบบอร์เทคหลายชั้น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [2] เสรีย์ ผู้ประกาย “การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [3] ศศิวิมล สูงสว่าง “การเผาไหม้แกลบบในฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- [4] สุวิทย์ เตีย และคณะ (2542) “ การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม, หน้า 47 - 63.
- [5] สมศักดิ์ กীরติวุฒิสเรษฐ “หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม” พิมพ์ครั้งที่ 3, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2539.
- [6] Teng H., Chyang C.S , and Chang S.H, “Character of Waste Tire Incineration in a Prototype Vortexing Fluidizedbed Combustor. Air & Waste Management Association”, 1997, Vol.49, pp. 49 – 57.
- [7] Lin. C.H., Teng J.T. and Chyang C.S., “ Evaluation of the Combustion Efficiency and Emission of Pollutants by Coal Particles in a Vortexing Fluidized Bed, Combustion and Flame”, 1997, Vol.110, pp. 163 – 172.
- [8] Nieh S. and Yang G., “Particle Flow Pattern in the Free board of a Vortexing Fluidized Bed, Powder Technology, 1987, Vol. 50, pp. 121 – 131.
- [9] Nieh, S. Yang G., Zhu A.Q and Zhao C.S. “Measurements of gas – particle flows and elutriation of an 18 inch i.d. cold Vortexing fluidized – bed combustion mode Powder Technology, 1992, Vol. 69, pp. 139 – 146.
- [10] Parmchart W., Kouprianov V.I. and Tantimuratha L. “Experimental study on a conical fluidized bed Combustor firing rice husk” The Second Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Enviroment, 12 – 14 February 2003, Phuket, Thailand.
- [11] Wan H., and Chyang. C.S., “Transport Disengaging Height and Elutriation Rate of a Vortexing Fluidized Bed Journal of Chemical Engineering of Japan”, 1998, Vol. 31, No. 6 pp. 977 – 986.

- [12] Stephen R., Turns, An Introduction to Combustion (Concepts And Applications). McGraw – Hill International Editions, 1996, pp. 19.
- [13] Daizo K., Octave L., Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann. Second Editions, 1991.
- [14] รุ่งเรือง พิทยศิริ “การลดการสิ้นสละเทือนในห้องเผาไหม้ด้วยการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ใหม่”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, 28-30 พฤศจิกายน 2544, หน้า CE66-78.
- [15] CHN-900/CHNS-932 Instruction Manual, Version 2.2 ,Leco Corporation,1998

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงแกลบและการคำนวณหา  
ขนาดของเตาเผา

### คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของเบดที่เป็นเกลบ

1. การหาสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction,  $\varepsilon_m$ ) และความกลม (Sphericity,  $\phi_s$ ) ของเกลบ, kunii [13] และศศิวิมล [5]

$$\varepsilon_m = \frac{\text{void volume}}{\text{Volume of (particles + voids)}}$$

จากการทดลองปริมาตรของ n-hexane ก่อนผสม	= 55 มิลลิลิตร
ปริมาตรของเกลบและช่องว่าง	= 20.5 มิลลิลิตร
ปริมาตรหลังผสม	= 58 มิลลิลิตร
สัดส่วนของช่องว่างของเบด	= $\frac{55 + 20.5 - 58}{20.5}$
	= 0.85

จากกราฟของKuniiและLevenspiel [13] ในรูปที่ 3.9 เส้น normal Packing จะได้

$$\varepsilon_m = 0.85$$

$$\phi_s = 0.24 \text{ g/cm}^2$$

2. เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมเทียบเท่ากับเกลบ (diameter of sphere having the volume,  $d_p$ )

ปริมาตรของเกลบและช่องว่าง	= 20.5 มิลลิลิตร
จำนวนของอนุภาค	= 600 อนุภาค
ปริมาตรของเกลบ	= จำนวนของอนุภาค $\times \frac{\pi d_p^3}{6}$
	= ปริมาตรของเกลบและช่องว่าง $\times (1 - \varepsilon_m)$

$$600 \times \frac{\pi d_p^3}{6} = 20.5 \times (1 - 0.85)$$

$$d_p^3 = \frac{6 \times 20.5 \times 0.15 \times 7}{22 \times 600}$$

$$= 9.784 \times 10^{-3}$$

$$d_p = 0.214 \text{ cm.}$$

$$= 2.14 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

3. ความหนาแน่นของเกลบ

น้ำหนักของเกลบ	= 10.5881 กรัม
ปริมาตรของเกลบ	= 83.3 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของแกลบ} &= \frac{10.5881}{83.3(1-0.85)} \\ &= 0.8473 \text{ g/ml. (กรัมต่อมิลลิลิตร)} \end{aligned}$$

#### 4. การหาปริมาณความชื้น

$$\text{น้ำหนักของแกลบก่อนอบ} = 3.0625 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของแกลบหลังอบ} = 2.7545 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของน้ำในแกลบ} = 0.308 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณร้อยละของความชื้นของแกลบ} \\ &= \frac{0.308 \times 100}{3.0625} = 10.06 \% \end{aligned}$$

#### 5. การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลซ์เบด ( $U_{mf}$ )

แกลบ (rice husk),  $\phi_s = 0.24$

$$\rho_{\text{rice husk}} = 0.8473 \text{ g/cm}^3$$

$$d_p = 0.214 \text{ cm} = 2.14 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 35^\circ\text{C} \text{ อากาศ (Air), } \rho_g &= 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \\ \mu &= 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 3.1 wan และ yu (1965) kunii [13]

$$\frac{1}{K_1} = 0.0408, K_1 = 24.5098$$

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}, \dots \dots \dots (1)$$

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$\varepsilon_{mf}^3 = \frac{1.75}{(24.5098)(0.24)} = 0.2975$$

$$\varepsilon_{mf} = \sqrt[3]{0.2975} = 0.6675$$

$$K_1 = \frac{1.75}{(0.2975)(0.24)} = 24.5098$$

และ 
$$K_2 = \frac{150(1 - 0.6675)}{(0.6675^3)(0.24^2)} = 2911.4317$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu^2} \dots\dots\dots(3)$$

แทนค่าในสมการ(3)

$$Ar = \frac{0.214^3 \times 0.0012 \times (0.8473 - 0.0012) 981}{0.00018^2} = 301278.58$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_S} \frac{(d_p U_{mf} \rho_g)^2}{\mu^2} + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_S^2} \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu^2} \dots\dots\dots(4)$$

จากสมการ (1) และ (2) แทนค่าใน(4) จะได้

$$K_1 \frac{[(0.214)U_{mf}(0.0012)]^2}{(0.00018)^2} + K_2 \frac{[(0.214)U_{mf}(0.0012)]}{(0.00018)} = 301278.58$$

$$49.8867U_{mf}^2 + 4157.6425U_{mf} = 301278.58$$

$$\therefore U_{mf} = 46.509 \text{ cm/s (ที่อุณหภูมิ } 35^\circ\text{C)}$$

ที่อุณหภูมิ  $950^\circ\text{C}$

$$\rho_g = 0.28920 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 4.74560 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu^2}$$

$$Ar = \frac{[(0.214^3)U_{mf}(0.2892 \times 10^{-3})(0.8473 - 0.2892 \times 10^{-3})(981)]}{(4.7456 \times 10^{-4})^2} = 10,457.19$$

แทนค่าในสมการ(4) จะได้

$$K_1 \frac{[(0.214)U_{mf}(0.2892 \times 10^{-3})]^2}{(4.7456 \times 10^{-4})^2} + K_2 \frac{[(0.214)U_{mf}(0.2892 \times 10^{-3})]}{(4.7456 \times 10^{-4})} = 10457.19$$

$$0.41685U_{mf}^2 + 379.6885U_{mf} = 10457.19$$

$$\therefore U_{mf} = 26.75 \text{ cm/s (ที่อุณหภูมิ } 950^\circ\text{C)}$$

## 6. ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์(Terminal Velocity of Particles, $U_t$ )

Rice husk,  $\phi_s = 0.24$

$$\rho_R = 0.8473 \text{ g/cm}^3$$

$$d_p = 0.214 \text{ cm.}$$

$$\text{Air, } \rho_g = 1.2 \times 10^{-3}$$

$$\mu = 1.8 \times 10^{-4}$$

$$d_p^* = d_p \frac{[\rho_g (\rho_R - \rho_g) g]^{1/3}}{[\mu]^{1/3}} \dots\dots\dots(5)$$

แทนค่าจะได้

$$d_p^* = 0.214 * \frac{[(0.0012)(0.8473 - 0.0012)980]^{1/3}}{(0.00018^2)^{1/3}}$$

$$d_p^* = 67.038$$

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{d_p^*} + 2.335 - \frac{(1.744\phi_s)}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \dots\dots\dots(6)$$

แทนค่าในสมการ(6)

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(67.038)^2} + \frac{(1.744)(0.24)}{(67.038)^{0.5}} \right]^{-1}$$

$$\therefore U_t^* = 4.20045$$

$$U_t = U_t^* \left[ \frac{\mu(\rho_R - \rho_g)g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots(7)$$

แทนค่าในสมการ(7) จะได้

$$U_t = 4.20085 \left[ \frac{(0.0018)(0.8473 - 0.0012)980}{0.0012^2} \right]^{1/3}$$

$$\therefore U_t = 425.2758 \text{ cm/s}$$

## 7. กำหนดความเร็วอากาศขาเข้าและขาออกที่เหมาะสม ( $Q_a$ , $Q_f$ )

**Air flow rate,  $Q_a$**

อัตราการป้อนแกลบ = 21 kg/hr

ปริมาณของอากาศ/เชื้อเพลิง = 5.368 kg/kgเชื้อเพลิง

อัตราป้อนแกลบ 21 kg/hr ต้องการอากาศ = 112.728 kg/hr

$$Q_a = \frac{F_a}{\rho_a} = \frac{112.728}{1.2} = 93.94 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

Fluegas rate,  $Q_f$

อัตราการไหลของก๊าซร้อนขาออก( $F_2$ )

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$v_2 = \frac{950 + 273}{35 + 273} (93.94) = 373.015 \text{ m}^3 / \text{hr} \text{ ที่ } 950^\circ\text{C}$$

8. กำหนดพื้นที่หน้าตัดเตาเผา

$$\text{จาก } Q = U_f A$$

$$A = \frac{Q}{U_f}$$

$$U_f = 3U_{mf}$$

ที่  $950^\circ\text{C}$

$$U_f = 3 \times 26.75 / 100 = 0.8025 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{373.015}{0.8025 \times 3600} = 0.129$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.405 \text{ m}$$

ที่อุณหภูมิ  $35^\circ\text{C}$

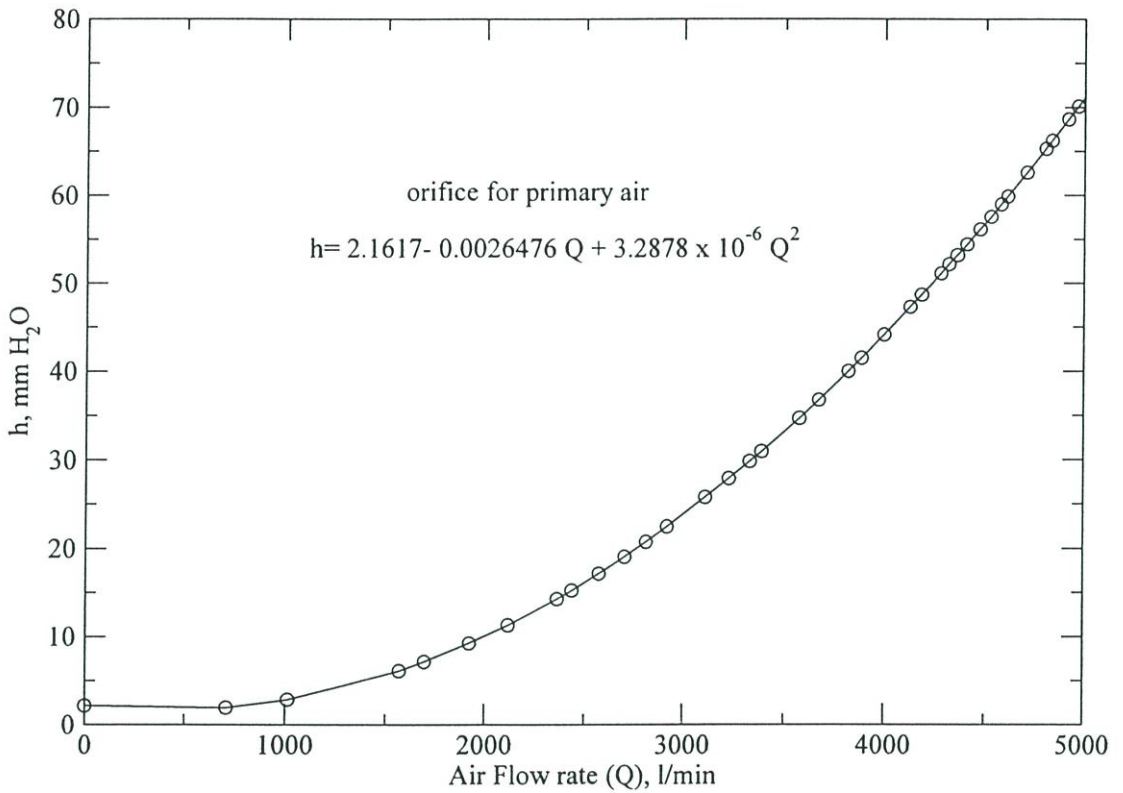
$$U_f = 3 \times 46.509 / 100 = 1.395 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{93.94}{1.395 \times 3600} = 0.0187 \text{ m}^2$$

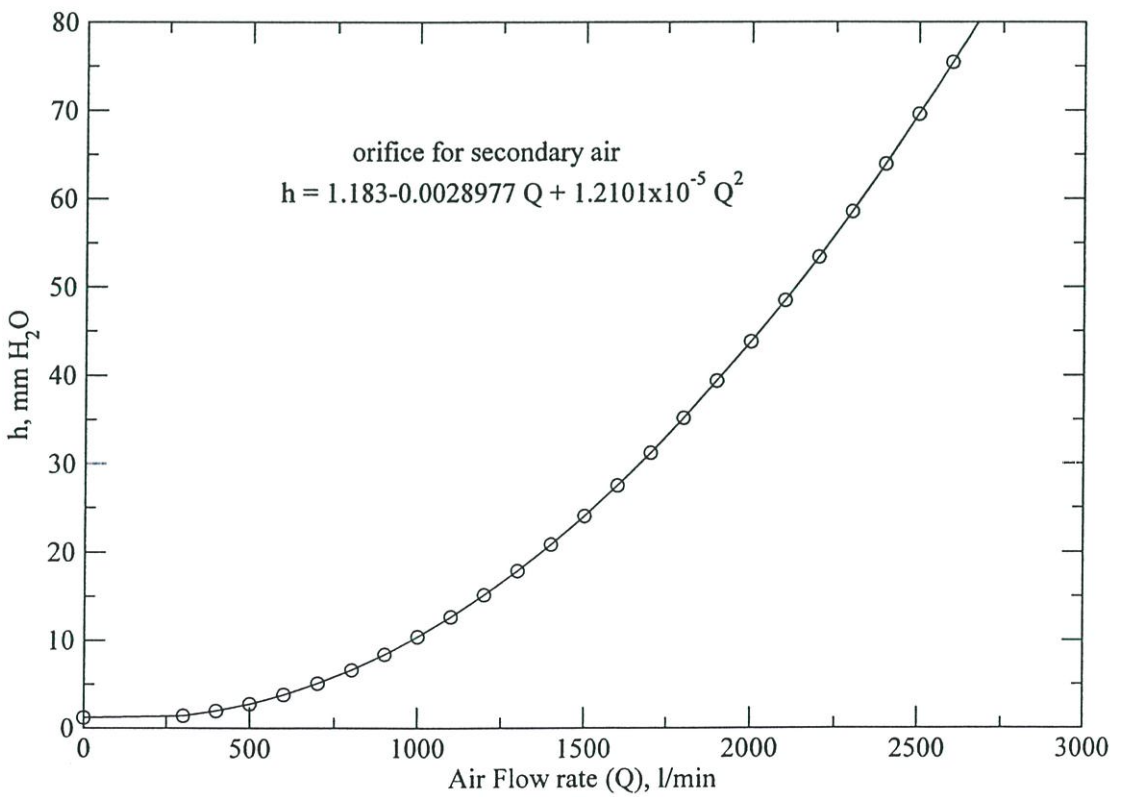
$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.154 \text{ m}$$

เฉลี่ย  $(0.405 + 0.154) / 2 = 0.279 \text{ m} \approx 0.3 \text{ m}$ .

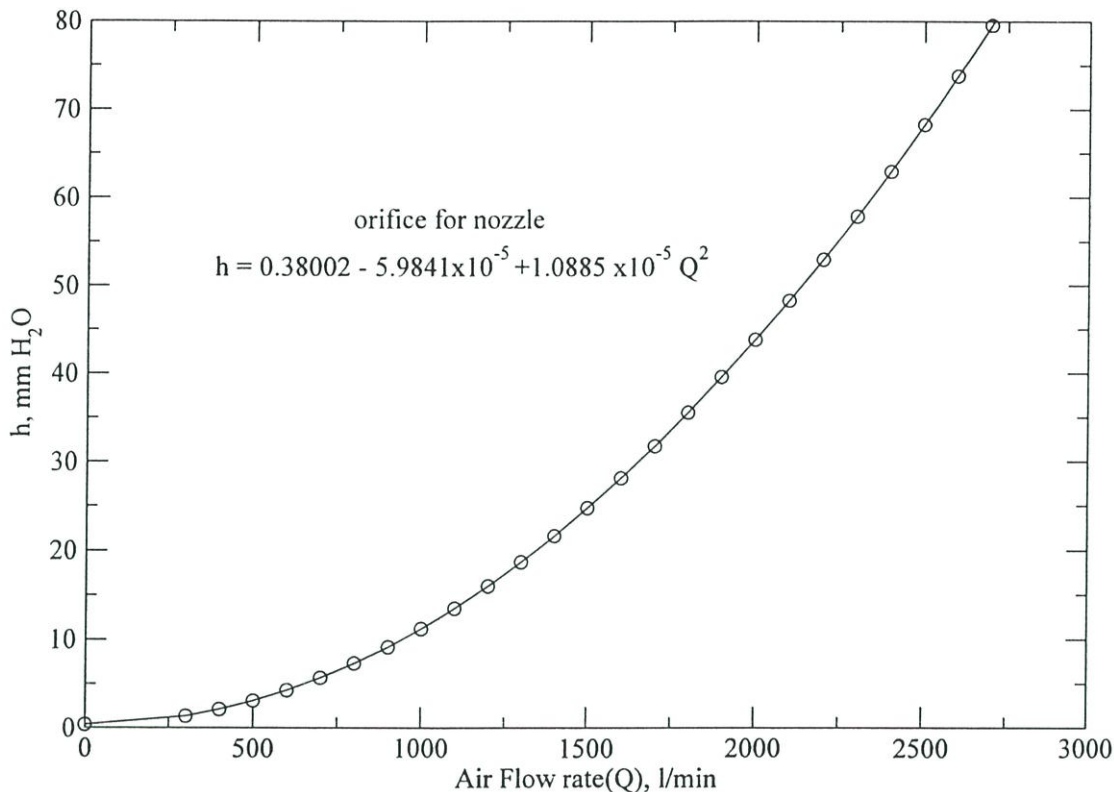
ภาคผนวก ข.  
การเปรียบเทียบอุปกรณ์ในการทดลอง



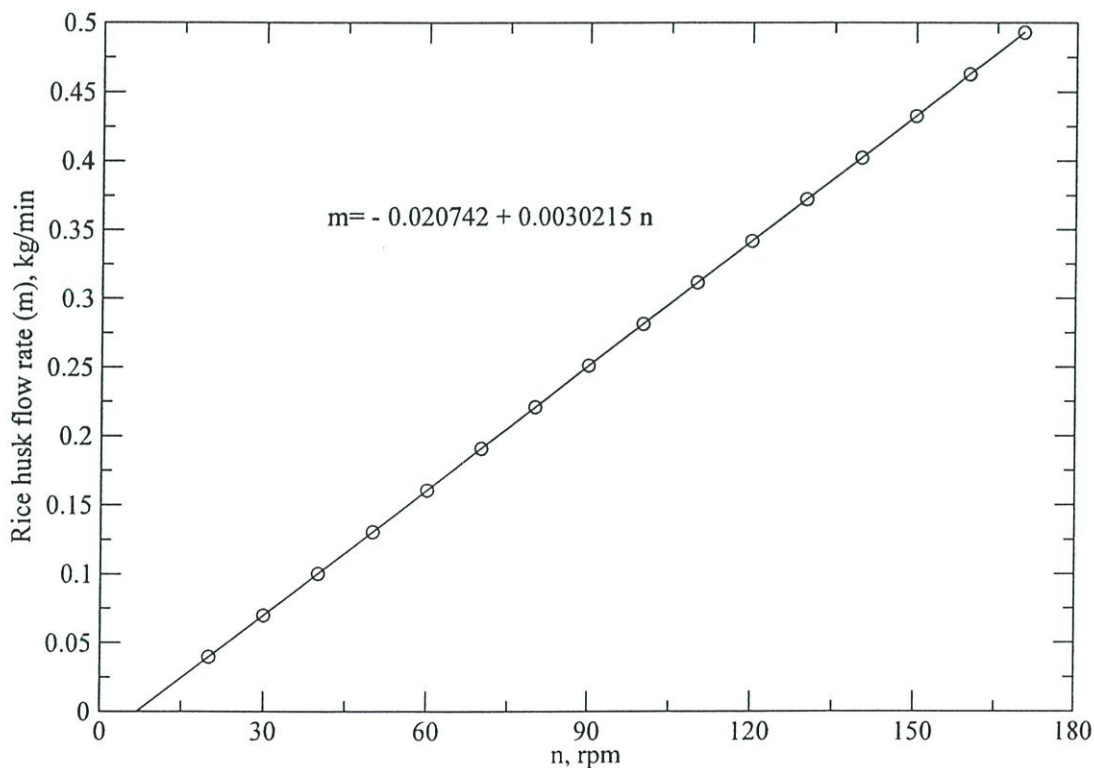
รูปที่ ข.1 กราฟแสดง Calibration curve Orifice plate ของอากาศปฐมภูมิกับ Flow meter



รูปที่ ข.2 กราฟแสดง Calibration curve Orifice plate ของอากาศทุติยภูมิ กับ Flow meter



รูปที่ ข.3 กราฟแสดง Calibration curve Orifice plate ของอากาศ Nozzle Jet กับ Flow meter



รูปที่ ข.4 กราฟแสดง Calibration curve อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลของการปรับเทียบแผ่น Orifice plate ของอากาศปฐมภูมิเทียบกับ flow meter

flow rate (l/min)	$\Delta h$ mm H <sub>2</sub> O	flow rate (l/min)	$\Delta h$ mm H <sub>2</sub> O
0	0	4128.76	44
710.9	2	4185.24	46
1013.56	4	4281.6	48
1569.96	6	4322.38	50
1698.43	8	4361.95	52
1924.48	10	4409.47	54
2117.58	12	4473.85	56
2363.25	14	4527.12	58
2436.68	16	4578.62	60
2574.73	18	4611.76	62
2704.6	20	4708.33	64
2813.43	22	4803.28	66
2919.49	24	4835.17	68
3112.31	26	4918.17	70
3229.31	28	4967.14	72
3331.03	30	5056.46	74
3388.74	32	5130.09	76
3573.57	34	5186.21	78
3670.69	36	5284.98	80
3818.87	38	5363.91	82
3884.46	40	5402.85	84
3998.33	42	5512.67	86

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลของการปรับเทียบแผ่น Orifice plate ของอากาศทุกุติยภูมิเทียบกับ flow meter

flow rate (l/min)	$\Delta h$ mm H <sub>2</sub> O
0	0
300	1
400	2
500	3
600	4
700	6
800	7
900	9
1000	10
1100	14
1200	16
1300	18
1400	21
1500	24
1600	27
1700	30
1800	35
1900	39
2000	43
2100	48
2200	52
2300	58
2400	64
2500	70
2600	77
2700	82
2800	88

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลของการปรับเทียบแผ่น Orifice plate ของอากาศ nozzles jet เทียบกับ flow meter

flow rate (l/min)	$\Delta h$ mm H <sub>2</sub> O
0	0
300	1
400	2
500	3
600	4
700	6
800	8
900	10
1000	12
1100	14
1200	16
1300	18
1400	21
1500	24
1600	28
1700	32
1800	36
1900	40
2000	44
2100	47
2200	52
2300	57
2400	63
2500	69
2600	75
2700	80
2800	85

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลของการปรับเทียบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

จำนวนรอบ (n) rpm	flow rate rice husk kg/min	กระแสไฟที่ควบคุม inverter volts
0	0	0
20	0.04	68
30	0.07	83
40	0.1	113
50	0.12	125
60	0.15	138
70	0.2	148
80	0.22	158
90	0.24	168
100	0.28	173
110	0.3	180
120	0.33	188
130	0.37	198
140	0.4	208
150	0.45	218
160	0.47	224
170	0.5	230

ภาคผนวก ค.

**Measurement Certificate Variable Area Flowmeter**

**ABB รุ่นAM54**

## Measurement Certificate

### Variable Area Flowmeter AM54

Order-No.: 000175356 / X001 TAG-No.: -  
 Model-No.: AM54 TAG-Name:

#### Technical Data

meter tube / Float	250-1.263-S	Power supply	10 - 46 V dc
Float weight	237.00 g	Current output	-
Float density	8020,00 g/cm <sup>3</sup>	Meter size	DN 25 (1")

#### Fluid data

Fluid	Air	Fluid density	7.1510 kg/m <sup>3</sup>
range (q <sub>smax</sub> )	(250.000 - 2900,000) l/min (q <sub>n</sub> )	pressure	5.000 bar
Viscosity		Temperature	20.0 °C

#### Measurement results

Measurement procedure	standard (medium water)
Measurement flow (q <sub>kmax</sub> )	2523.1 l/h
Equivalent water (q <sub>wmax</sub> )	2490,0 l/h
accuracy (k)	class 1.6 acc. to VDE/VDI 3513

#### Measurement point

	1	2	3	4	5
master:					
flow q <sub>vm</sub> (% v. q <sub>wmax</sub> )	9.7000	18.1300	26.7500	35.9700	45.0300
D.U.T.:					
scale q <sub>s</sub> : [l/min (q <sub>n</sub> )]	10.0000	20.0000	30.0000	40.0000	50.0000
	6	7	8	9	10
master:					
flow q <sub>vm</sub> (% v. q <sub>wmax</sub> )	54.5000	64.8100	76.3900	88.4900	100.0000
D.U.T.:					
scale q <sub>s</sub> : [l/min (q <sub>n</sub> )]	60.0000	70.0000	80.0000	90.0000	100.0000

The above indicated instrument meets the accuracy published in our specification. The calibration was accomplished in the testrig indicated below. The Reference-Meters used are calibrated at fixed intervals against standards, traceable to national standards.

ภาคผนวก ง.

**Calibration Certificate Flue gas analyser Testo 300M-I**

# Calibration Certificate



Customer : Entech Associate Co.,Ltd.  
Instrument Description : Flue gas analyser  
Instrument Model : Testo 300M-I  
Instrument Serial No. : 00336428/004

Calibration No. : FN0662  
Probe Description : -  
Probe Model : -  
Probe Serial : -

The Measuring installations used for calibration are regularly calibrated and are tracebled to nation standard.

## Measuring Installations

Description	Reference Number
Nitric Oxide 152.8 ppm	ALM 065925
Carbon Monoxide 950 ppm	0072/02
Carbon Monoxide 298 ppm	0071/02
.	.
.	.
.	.

## Ambient Conditions

Temperature ( Deg.C ) 25.7  
Humidity ( %RH ) 57.7

## Measuring Procedure

Injection of standard calibration gas at 1 L/min flow rate

## Measuring Results

Uncertainty of reference: +/-1%, +/-19 ppm, +/-6 ppm

Parameter	Nominal Value	Actual Value	Deviation
Nitric Oxide (NO)	153 ppm	153 ppm	0 ppm
Carbon Monoxide (CO)	950 ppm	950 ppm	0 ppm
Carbon Monoxide (CO)	298 ppm	300 ppm	2 ppm
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Date of Calibration

23 April 2002

Person responsible

(Pornchit Kamjanakanti)

Supervisor

(Som-ek Ploysodsai)

ภาคผนวก จ.

รายละเอียดของเครื่องวิเคราะห์ห่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอน, ไฮโดรเจน  
และไนโตรเจน

## เครื่องวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์คาร์บอน, ไฮโดรเจนและไนโตรเจน [15]

รุ่น CHN – 900 ของบริษัท LECO รายละเอียดของเครื่องมือวัดมีดังต่อไปนี้

### เวลาในการวิเคราะห์

คาร์บอน	100	วินาที
ไฮโดรเจน	180	วินาที
ไนโตรเจน	100	วินาที
ซัลเฟอร์	120	วินาที

### Detection Method

คาร์บอน	Infrared Absortion
ไฮโดรเจน	Infrared Absortion
ซัลเฟอร์	Infrared Absortion
ออกซิเจน	Infrared Absortion
ไนโตรเจน	Infrared Absortion

ขนาดของตัวอย่างปกติ 2 mg.

2.5 mg. คาร์บอนมากที่สุดไม่ควรเกิน

1.0 mg. ไฮโดรเจน

1.0 mg. ไนโตรเจน

1.3 mg. ซัลเฟอร์

### ความละเอียด (Precision)

คาร์บอน	1 Sigma 0.001
ไฮโดรเจน	1 Sigma 0.001
ไนโตรเจน	1 Sigma 0.001
ซัลเฟอร์	1 Sigma 0.002
ออกซิเจน	1 Sigma 0.002

### ระยะ Range (บนพื้นฐานของตัวอย่าง 2 mg.)

คาร์บอน	0.001 ถึง 100%
ไฮโดรเจน	0.001 ถึง 100%
ไนโตรเจน	0.001 ถึง 100%

ซัลเฟอร์ 0.001 ถึง 100%

ออกซิเจน 0.001 ถึง 100%

**อุณหภูมิ (Temperature)**

Oxidation Furnace 1,000 °C ปกติ, 1,100 °C สูงสุด

Reduction Furnace 650 °C ปกติ, 950 °C สูงสุด

Pyrolysis Furnace 1,300 °C ปกติ, 1,350 °C สูงสุด

Incoming Reduction Furnace 600 °C

ภาคผนวก ฉ.  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



การประชุม

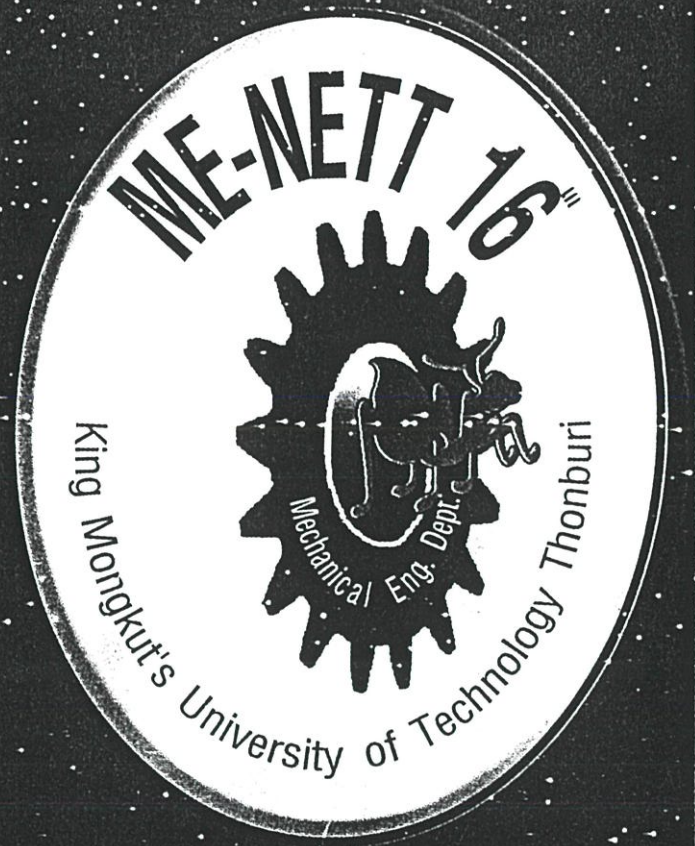
วิชาการเครือข่าย

วิศวกรรมเครื่องกล

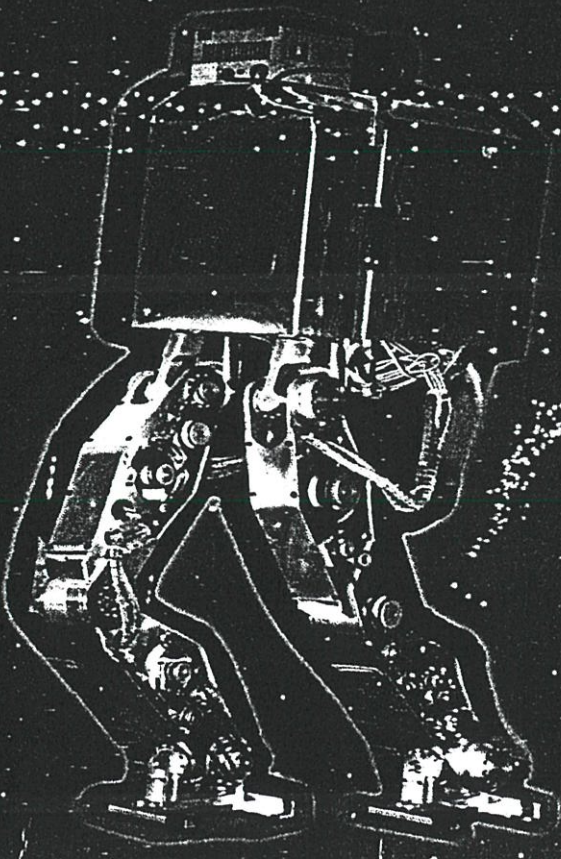
แห่งประเทศไทย

ครั้งที่

16



Mechanical Engineering  
Network of Thailand  
The 16<sup>th</sup> Conference



14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต  
October 14-16, 2002. Phuket.

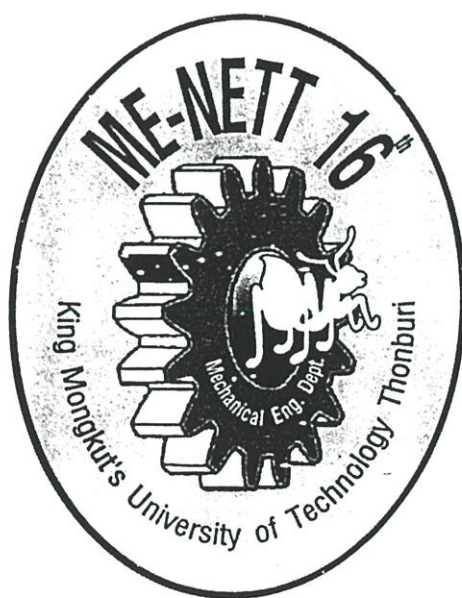


**TRANE**  
AIR CONDITIONING

การประชุมวิชาการ  
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 16

14 – 16 ตุลาคม 2545  
ณ โรงแรมกะตะบีชรีสอร์ท จังหวัดภูเก็ต

Mechanical Engineering Network of Thailand the 16<sup>th</sup> Conference  
October 14 – 16, 2002



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

EM112	การศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่เหมาะสมสำหรับอาคารราชการขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	608
	<i>ทรงสุภา พุ่มขุมพล สมหมาย ปรีเปรม สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ และ ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร</i>	
EM113	การศึกษาการประหยัดพลังงานในระบบการปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดแก๊สทำความเย็นให้เหมาะสม	614
	<i>สุนทร วงศ์เสน สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ สมหมาย ปรีเปรม และ ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร</i>	
EM114	การสร้างแบบจำลองของแคปิลลารีทิวปีและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อของเหลวและท่อคูลของระบบปรับอากาศ	620
	<i>อลัมพล เจริญกิจ สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ สมหมาย ปรีเปรม และ ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร</i>	
EM117	อิทธิพลของสนามไฟฟ้าสำหรับการเดือดของสารทำความเย็น R-11 และ R-141b	626
	<i>ทวิวัฒน์ สุภารส บุญส่ง เหมวัฒน์ และ สุจินต์ จิระชีวะนันท์</i>	
EM121	การประเมินภาวะสบายเชิงความร้อนสำหรับบ้าน	631
	<i>อัศรา กิจการเจริญสิน และ ศุภย์ มณีวัฒนา</i>	
EM123	การวิเคราะห์สมรรถนะระบบกักเก็บความเย็นในรูปแบบน้ำแข็งขนาดท่อ	637
	<i>ทวิวัฒน์ สุภารส จิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์</i>	
EM124	ระบบนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยใช้คอนเดนเซอร์สำหรับระบบปรับอากาศในรถยนต์เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	643
	<i>เจนจิรา เปี่ยมดี ณัฐ วยศ วงศ วงศ์อภัย ณอคคุณ สิทธิพงษ์ และ ภานุพงศ์ คุโนปกรณ์พันธ์</i>	
EM125	คุณลักษณะการเผาไหม้ของแก๊สชั้นในเตาเผาแบบวอร์เทค	649
	<i>ยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ ศุภชัย เลื่อนลอย ทวี เทศเจริญ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์</i>	
EM126	เตาเผาแก๊สวอร์เทคหลายชั้น	655
	<i>ยุทธพงษ์ มีสาคร วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล เมธี ลิมกุล และ พงษ์เจต พรหมวงศ์</i>	
EM127	เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนสำหรับเผาแก๊ส	660
	<i>นิยม ศรีศิริสิทธิกุล เอกพจน์ ดันตราภิววัฒน์ ชินรักษ์ เขียวพงษ์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์</i>	
EM128	การศึกษาเชิงทดลองของการเผาไหม้แก๊สต่างขนาดในเตาเผาแก๊สแบบวอร์เทค	666
	<i>วิษณุชัย ดวงใจ สมศักดิ์ ไพร์ถวิลเกียรติ์ นิยม ศรีศิริสิทธิกุล ชินรักษ์ เขียวพงษ์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์</i>	
EM130	การประมาณค่าและควบคุมอุณหภูมิเพื่อการประหยัดพลังงานของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	672
	<i>รัชทิน จันทรเจริญ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และ ประพันธ์ พิกุลทอง</i>	
EM131	การพัฒนาต้นแบบเครื่องคัดผลส้มพองโดยใช้ความหนาแน่นของน้ำ	678
	<i>พัฒนะ อรรถนสุพัตติ ชงชัย ยันตรศรี Zaman Alikhani และ จินดา ศรศรีวิชัย</i>	
EM236	การกลั่นเอทานอลด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน	683
	<i>พรประสิทธิ์ คงบุญ ณัฐ วยศ ชีระพงษ์ ว่องรัตนไพศาล และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์</i>	
EM237	จลนศาสตร์ของการอบแห้งและความชื้นสมดุลของลำไยทั้งลูก	689
	<i>อารีย์ วัจนวิริยะ จิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์</i>	

การประชุมวิชาการเครื่องช่วยวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16  
14 – 16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต

## เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนสำหรับเผาแกลบ Vortexing Fluidized-bed Combustor for Burning Rice Husk

นิยม ศรีศิริสิทธิกุล เอกภรณ์ ดันตราภิวณิช ชินวัจน์ เขียรพงษ์ พงษ์เจต พรหมวงศ์  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 662-326-4197 ต่อ 104 , โทรสาร 662-326-9053 , e-mail : kppongje@kmitl.ac.th

Niyom SRISIRISITTIKUL Eakapot TONTRAPHIWAT Chinaruk THIANPONG Pongjet PROMVONGE  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520  
Tel. 662-326-4197 ext 104 , Fax 662-326-9053 , e-mail : kppongje@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเท่ากับ 300 มิลลิเมตรมีความสูง 1200 มิลลิเมตร โดยอากาศที่ใช้ประกอบด้วยอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิ ซึ่งจะไหลเข้าไปภายในเตาตามแนวเส้นสัมผัสและตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิที่ใช้ในการทดลองทั้งสิ้นมี 3 ระยะคือ 0.45, 0.75, 1.05 เมตร ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของแกลบคงที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัม / นาที และทำการปรับอัตราส่วนสมมูล  $\Phi$  เท่ากับ 0.8 , 1.0 และ 1.2 ในการเผาแต่ละครั้งจะกำหนดอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดเท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่ระยะ 0.45 เมตร และอัตราส่วนสมมูล 0.8 โดยมีอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ 0.25 ให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาสูงที่สุดประมาณ 927 องศาเซลเซียส และที่ระยะ 60 มิลลิเมตรจากกึ่งกลางเตาตามแนวรัศมีจะเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด

### Abstract

This paper presents the design and test of a vortexing fluidized-bed combustor (VFC) using rice husk as fuel. The combustor has a cylindrical shape with 300 mm in diameter and 1200 mm height. There are two supply air sources for the combustor : primary air and secondary air, entering tangentially into the combustor. The fuel mass flow rate is 0.2 kg/min and kept constant throughout. The equivalence ratio is set to be 0.8, 1.0 and 1.2 for each test run. For each run, the volumetric air flow rate ratio of secondary air to total air is adjusted to be 0, 0.15 and 0.25. From experiment at a tangential injection of secondary air at 0.45 m and at equivalence ratio = 0.8 The

experiment show that maximum temperature inside the combustor is found to be 927 °C for the secondary air flow rate ratio ,  $\lambda = 0.25$  and at about 60 mm from the core in the middle region is the area of the peak temperature.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการนำทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือใช้และมีอยู่ทั่วไปมาผ่านกระบวนการวิธีต่างๆที่ได้จากทรัพยากรธรรมชาติเหล่านี้เช่น น้ำมัน, ถ่านหิน, ไม้, ยาง และก๊าซธรรมชาติ สำหรับการวิจัยนี้เราสนใจไปที่จะนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะว่าจากการสำรวจพบว่าเรามีปริมาณแกลบอยู่เป็นจำนวนมากและทั่วประเทศเพราะมีการทำนาเกือบทั่วประเทศ ไทยมีปริมาณแกลบประมาณ 4.4 – 4.6 ล้านตันต่อปี และเมื่อทำการเปรียบเทียบศักยภาพทางความร้อนเท่ากับน้ำมันดิบ 1.46 – 1.53 ล้านตัน เพราะฉะนั้นเราเห็นว่าแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจในการนำมาใช้งานในการผลิตพลังงานความร้อนออกมาใช้งานต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาที่มีอยู่ในปัจจุบันได้แก่ งานวิจัยของพงษ์เจต พรหมวงศ์ และนิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ [1] ทำการศึกษาเบื้องต้นถึงการเผาไหม้ของแกลบในเตาเผาแบบวอร์เทค โดยพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิในเตาเผา, ซีดีและควัน โดยทำการปรับอัตราการไหลเชิงมวลของแกลบและเอียงเท่ากับ 0.3 ถึง 0.5 kg/min ส่วนค่า equivalence ratio,  $\Phi$  เท่ากับ 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1.0 และ 1.05 จากการศึกษาจะพบว่าที่เมื่อทำการป้อนแกลบ เท่ากับ 0.3 kg/min และ  $\Phi$  เท่ากับ 0.95 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบวอร์เทคที่ตำแหน่งที่เลือกไว้สูงเท่ากับ 1,030 °C งานวิจัยของศุภชัย เลื่อนลอย และสมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ [2,3] ได้ทำการวิจัยถึงอิทธิพลของความชื้นและขนาดของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบวอร์เทค ที่ระดับความชื้น 3 ค่าคือ 9.2%, 12%, 15% โดยน้ำหนัก และมีขนาดของเชื้อเพลิงแกลบ 2 ขนาดคือ อยู่ในช่วง 0.84 - 1.00 และ

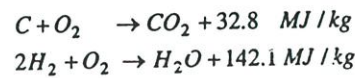
1.19 - 1.41 มม. และมีอัตราการป้อนแกลบเท่ากับ 0.3 kg/min และทำการปรับค่า  $\Phi$  เท่ากับ 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 จากการทดลองจะพบว่าที่  $\Phi$  ในช่วง 0.9-1.0 ให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาในแนวนอน และที่ความชื้น 9.2 % จะให้อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1,000 °C งานวิจัยของ สุพจน์ นานาโชค [4] ได้ทำการวิจัยกับเตาเผาแบบไซโคลน โดยใช้ชีเลื้อยเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยของรัชชัย ท้วมวิล และ สันติ อากาศไพบูลย์ [5] ได้ทำการวิจัยกับเตาเผาแบบอากาศหมุนวน โดยใช้เศษวัสดุทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยของ อติศักดิ์ ชูจินดา [6] มีการสร้างเตาเผาแกลบสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไคซ์เบคขนาด 10 ตันต่อชั่วโมงโดยได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาทั้งระบบประมาณ 59-60 % งานวิจัยของ สุวิทย์ เตีย และคณะ [7] ได้วิจัยเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบค โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยทำการเปลี่ยนการป้อนของอากาศ ที่อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงคงที่เท่ากับ 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการทดลองจะพบว่าค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดของกากมันสำปะหลัง, เปลือกถั่วและฟางข้าวมีค่าเท่ากับ 7.25, 6.0 และ 7.15 ตามลำดับ จะได้ค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99.71%, 99.07% และ 97.92 % งานวิจัยของ Sen Nieh และ Tim T.Fu [9] ทำการทดสอบการไหลในเตาแบบจำลอง cold model และ hot model ของเตาเผาแบบวอร์เทค โดยใช้ถ่านหินผงเป็นเชื้อเพลิง และได้ทำการพัฒนาต่อโดยใช้ Dry Ultrafine Coal (DUC) และ Coal Water Fuel (CWF) เป็นเชื้อเพลิง จากการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 99 % และประสิทธิภาพทางความร้อนเป็น 84% งานวิจัยของ Sen Nieh และ G.Yang [10] ได้ศึกษาการไหลของอนุภาคแก๊สภายในเตา VFC แบบ cold model ซึ่งมีขนาดห้องเผาไหม้เท่ากับ 18 นิ้ว

เมื่อได้ทำการศึกษาค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบ (ดูในเอกสารอ้างอิง [2]) เราจะพบว่าแกลบจะให้ค่าความร้อนเท่ากับ 3,580 kcal/kg เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตาซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 9,900 kcal/kg จะพบว่าแกลบมีค่าความร้อนเกือบครึ่งหนึ่งของน้ำมันเตา แต่ราคาของแกลบถูกกว่ามาก ซึ่งน่าจะส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งของการป้อนอากาศทุกจุดภายในแนวสัมผัสกับตัวเตาไปยัง free board เทคนิคดังกล่าวนี้ได้ช่วยเพิ่ม residence time ของอนุภาคเชื้อเพลิงแกลบใน free board และลดการสูญเสียอนุภาคละเอียดที่หลุดลอยออกไปจากเตา VFC และยังช่วยให้การคลุกเคล้าของอากาศและเชื้อเพลิงซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างเตาเผาแบบวอร์เทคและเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบค โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิภายในเตา เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของการป้อนอากาศทุกจุดที่ตำแหน่งต่าง ๆ และมีการปรับค่า Equivalence ratio ที่ค่าต่าง ๆ กันเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

## 2. ทฤษฎีการเผาไหม้ [2]

การเผาไหม้หมายถึงปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ ในที่นี้สารเผาไหม้ได้หลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน,

ไฮโดรเจนและกำมะถัน สำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของคาร์บอนและไฮโดรเจนกับออกซิเจนนั้นเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



พบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังกล่าวนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยปลดปล่อยความร้อนออกมาประมาณ 32.8 MJ/kg ของคาร์บอน และ 142.1 MJ/kg ของไฮโดรเจน

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

- 1) เวลาต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้หมดโดยไม่ถูกอากาศส่วนเกินนำออกทางปล่องควันท่อนอกเผาไหม้
- 2) อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง
- 3) การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องอยู่ในลักษณะของการผสมแบบปั่นป่วน

ค่าอัตราส่วนสมมูล เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้จริงต่อทางทฤษฎี เราจะหาค่าอัตราส่วนสมมูลได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{(m_a/m_f)_{\text{moic}}}{(m_a/m_f)_{\text{act}}} \quad (1)$$

เมื่อ  $m_a$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/min)

$m_f$  คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min)

โดยที่  $\Phi < 1.0$  คือ อัตราส่วนผสมบาง (Lean)

$\Phi = 1.0$  คือ อัตราส่วนผสมพอดี (Stoichiometric)

$\Phi > 1.0$  คือ อัตราส่วนผสมหนา (Rich)

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกจุดต่ออากาศทั้งหมดเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงของวอร์เทคของการไหล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (2)$$

เมื่อ  $Q_s$  คือ อัตราการไหลของอากาศทุกจุด (kg/min)

$Q_T$  คือ อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (kg/min)

ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีผลทำให้เกิดการปั่นป่วนก็คือค่า Swirl number ได้จากการคำนวณสัดส่วนของโมเมนตัมในแนวสัมผัสกับแนวแกนและหารด้วยรัศมีของการหมุนวนที่บริเวณห้องเผาไหม้

$$\text{Swirl number, } S = \frac{\pi \lambda^2 D_i D_c}{4 A_i} \quad (3)$$

เมื่อ  $D_c$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อไอเสีย

$D_o$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของห้องเผาไหม้

$D_i$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมทางจินตภาพของห้องเผาไหม้

$A_i$  = ผลรวมของพื้นที่ของหัวฉีดอากาศทุกจุด

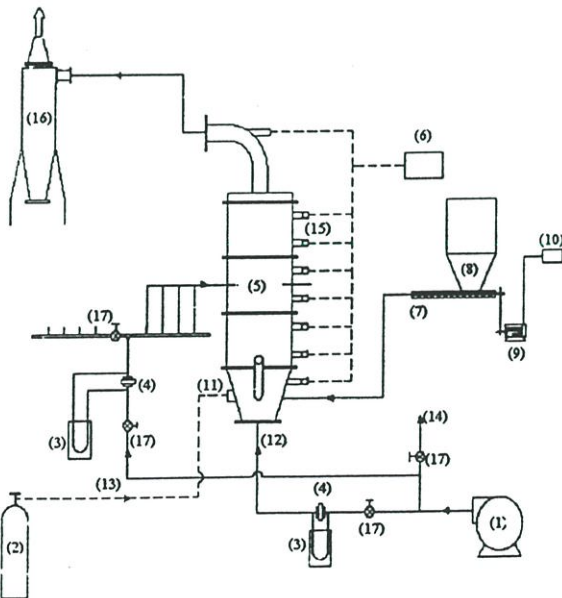
$\lambda$  = สัดส่วนการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกจุด

สำหรับรูปแบบของการไหล (flow pattern) ภายในเตา VFC ที่ได้มาจากการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [8]

3. อุปกรณ์และเครื่องมือทดลอง

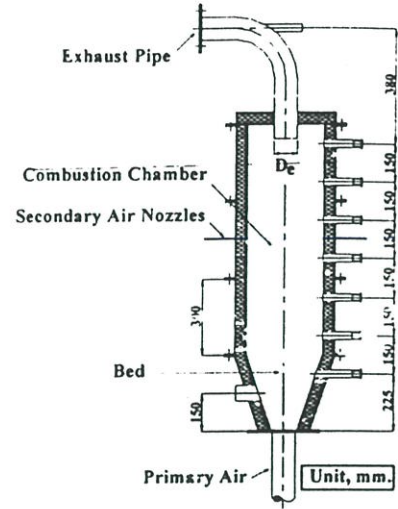
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 1 ซึ่งห้องเผาไหม้จะได้รับอากาศมาจาก 2 ส่วนจาก Blower (1) คือ อากาศปฐมภูมิซึ่งจะถูกควบคุมอัตราการไหลโดย Gate valve (17) และเราจะใช้ Orifice meter (4) ใช้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศซึ่งจะไหลผ่านมาทางด้านล่างของเบด และอากาศส่วนที่ 2 คืออากาศทุติยภูมิที่ได้มาจาก Blower ซึ่งจะส่งไปยัง Gate valve (17) เพื่อทำการปรับอัตราการไหล และทำการวัดโดย Orifice meter (4) อากาศจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในแนวสัมผัส ซึ่งอยู่สูงจากฐานของเบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบนั้นจะถูกบรรจุอยู่ใน Hopper (8) และจะถูกลำเลียงโดย Screw feeder (7) ซึ่งจะได้รับต้นกำลังจาก Motor (9) และได้ทำการควบคุมอัตราการป้อนของแกลบด้วย Inverter (10) โดยแกลบจะเข้าสู่ท่อลำเลียงและเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยอากาศปฐมภูมิจะไหลขึ้นมาจากด้านล่างของเบดทำให้เกิดการผสมคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ การวัดการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาจะใช้ Thermocouple type K (15) ซึ่งจะทำกรวัดทั้งสิ้น 9 จุด และอ่านค่าอุณหภูมิได้จาก Indicator (6)

ส่วนรูปที่ 2 แสดงห้องเผาไหม้ VFC ซึ่งด้านในของห้องเผาไหม้ทำจากอิฐทนไฟซึ่งมีความหนาเท่ากับ 0.04 เมตร และด้านข้างของห้องเผาไหม้จะเจาะรูไว้สำหรับป้อนอากาศทุติยภูมิ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3

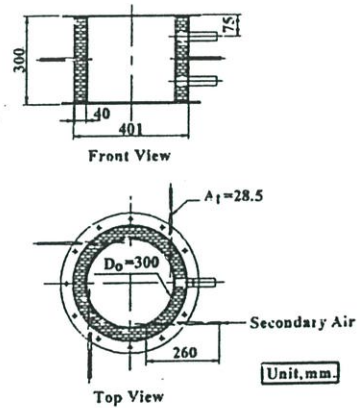


- |                    |                             |                   |
|--------------------|-----------------------------|-------------------|
| (1) Blower         | (2) LPG supply              | (3) Manometer     |
| (4) Orifice plate  | (5) Fluidized-bed combustor | (6) Indicator     |
| (7) Screw feeder   | (8) Hopper                  | (9) Motor         |
| (10) Inverter      | (11) Burner                 | (12) Primary air  |
| (13) Secondary air | (14) Bypass air             | (15) Thermocouple |
| (16) Cyclone       | (17) Gate valve             |                   |

รูปที่ 1 ระบบอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 รูปร่างและขนาดของห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน (VFC)



รูปที่ 3 ลักษณะการป้อนอากาศทุติยภูมิ

4. วิธีการทดลอง

- ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 400 °C จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบพร้อมกับอากาศปฐมภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ 700 °C แล้วนำหัวเผาออกจากเตา
- ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้อัตราส่วนสมดุลตามที่กำหนดไว้คือ 1.0 (เงื่อนไขการทดลองดูได้จากตารางที่ 1)
- ทำการปรับอัตราการไหลของปฐมภูมิ 75 เปอร์เซ็นต์ อากาศทุติยภูมิ 25 เปอร์เซ็นต์
- ทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล 9 จุด โดยทำการวัดที่ระยะ 150 มิลลิเมตรตามแนวรัศมีของเตา แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง
- ปรับระยะของเทอร์โมคัปเปิ้ล 7 จุด ที่ระยะ 120, 90, 60, 30 และ 0 มิลลิเมตร (จากกึ่งกลางของเตา) ตามลำดับตามแนวรัศมี โดยแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดอุณหภูมิและบันทึกผลการทดลอง เทอร์โมคัปเปิ้ลด้านบนสุดไว้สำหรับวัดอุณหภูมิ

ด้านนอกจากเตา ส่วนเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 9 ไว้สำหรับวัดอุณหภูมิบรรยากาศ โดยไม่ต้องทำการปรับตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล

6. ทำการปรับอัตราส่วนของอากาศปฐมภูมิ 85 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศทุติยภูมิ 15 และ 0 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 4 และข้อ 5
7. ทำการปรับอัตราส่วนผสมเป็น 1.2 และ 0.8 ตามลำดับแล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง ข้อ 6
8. หลังจากทดลองเสร็จทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่ระยะ 0.75 เมตรและทำการทดลองที่ระยะ 1.050 เมตร ตามลำดับ พร้อมทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 7

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	ค่าที่ใช้
อัตราการป้อนการป้อนแลกเปลี่ยน	0.2 kg/min
อัตราการไหลของอากาศ	1.074 kg/min
ตำแหน่งของการป้อนอากาศทุติยภูมิ(โดยวัดจากฐานของเบด)	3ระยะ คือ 0.45, 0.75 และ 1.05 m.
ตำแหน่งของการฉีดของอากาศทุติยภูมิ X จำนวนของหัวฉีด	1 ชั้น X 4 ตำแหน่ง

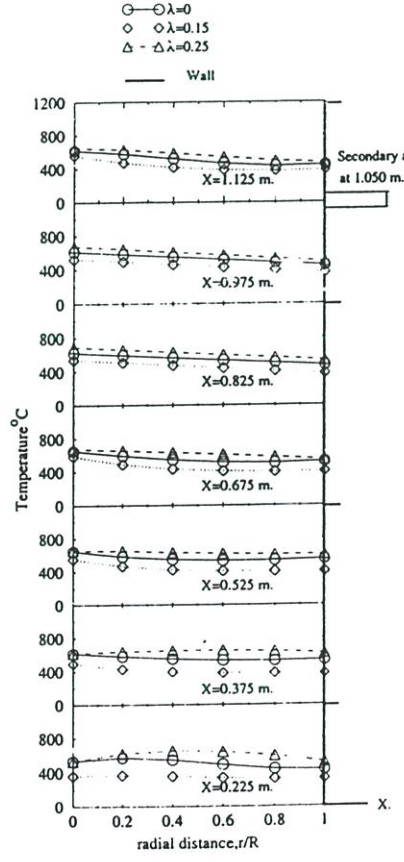
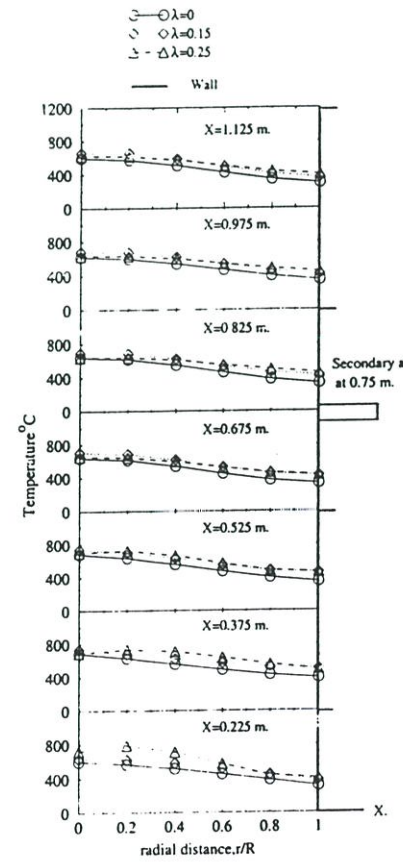
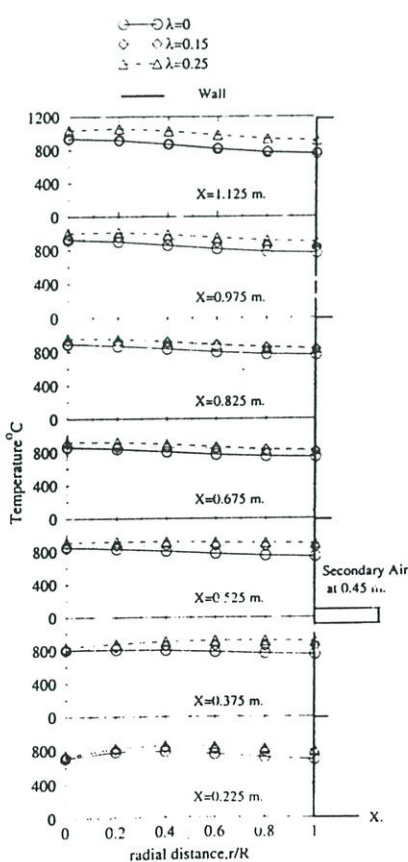
5. ผลการทดลองและการอภิปราย

จากผลการทดลองการเผาไหม้ของ (VFC) โดยใช้เตาเผาที่มีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิทั้งสิ้น 3 ตำแหน่ง คือ 0.45, 0.75 และ 1.05 เมตรตามลำดับ โดยวัดจากฐานเบดการปรับเปลี่ยนกรณีดังกล่าวข้างต้นเพื่อศึกษาลักษณะอากาศหมุนวนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศภายในห้องเผาไหม้เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในเตาเผาที่เหมาะสมที่สุด โดยอัตราการป้อนแลกเปลี่ยนเท่ากับ 0.2 kg/min ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ผลได้ดังต่อไปนี้

5.1 อิทธิพลของตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้

รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิแตกต่างกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนผสมเท่ากับ 0.8 พร้อมทั้งได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด,  $\lambda$ , ให้เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25 ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

รูป 4 (a) ที่  $\lambda$  เท่ากับ 0 ก็คือไม่มีการป้อนอากาศทุติยภูมิจะมีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า  $\lambda$  เท่ากับ 0.25 และ 0.15 ส่วนที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่  $X = 0.45$  m และ อัตราส่วนผสม,  $\Phi$ , เท่ากับ 0.8 จะพบว่าผลการกระจายอุณหภูมิค่อนข้างสม่ำเสมอโดยจะมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่บริเวณส่วนกลางของห้องเผาไหม้และอุณหภูมิจะลด



(a) ระยะการฉีดของอากาศ ที่ 0.45 m

(b) ระยะการฉีดของอากาศ ที่ 0.75 m

(c) ระยะการฉีดของอากาศ ที่ 1.05 m

รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 0.45, 0.75 และ 1.05 เมตร ที่  $\Phi=0.8$

ต่ำลงเล็กน้อยที่ผนังของห้องเผาไหม้ จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของอากาศทุกจุดต่ออากาศทั้งหมด  $\lambda$  เท่ากับ 0.25 เกิดการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้อย่างสม่ำเสมอในทุก ๆ ตำแหน่งของห้องเผาไหม้ และจะให้อุณหภูมิสูงกว่า  $\lambda$  เท่ากับ 0 และ 0.15

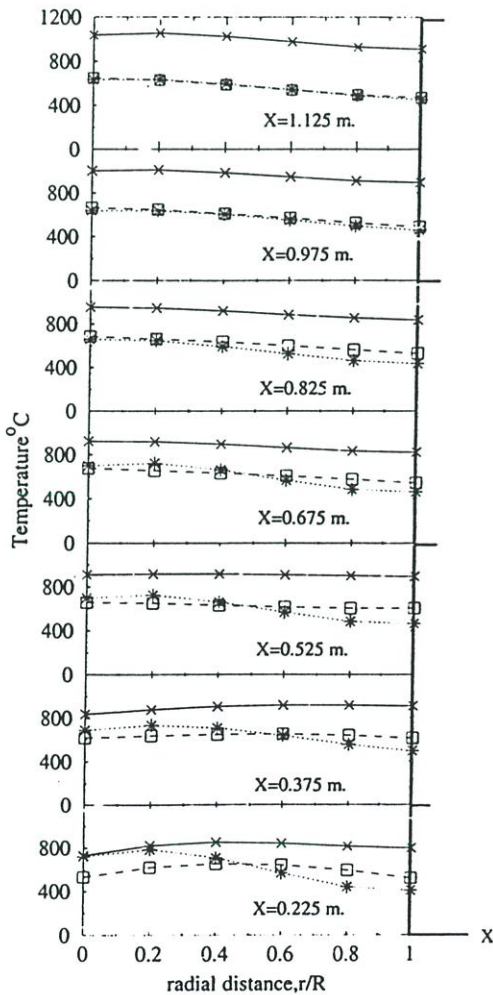
รูป 4(b) การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งของการป้อนอากาศทุกจุดโดยมีค่า 0.75 m และ อัตราส่วนสมมูล,  $\Phi$ , เท่ากับ 0.8 จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอแต่การกระจายอุณหภูมิไม่ดีเท่ากับ  $\lambda$  เท่ากับ 0.15 เนื่องจากเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ซึ่งปริมาณออกซิเจนมากกว่าปริมาณเชื้อเพลิงจึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน ทำให้การฉีดของอากาศทุกจุด  $\lambda$  เท่ากับ 0.25 มากเกินไปจึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนทำให้อุณหภูมิที่  $\lambda$  เท่ากับ 0.25 ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด รูป 4(c) ตำแหน่งของการป้อนของอากาศทุกจุดโดยมีค่า 1.05 m และ อัตราส่วนสมมูล,  $\Phi$ , เท่ากับ 0.8 จะเห็นได้ว่าการกระจายของอุณหภูมิของ  $\lambda$  ทั้งสาม มีการกระจายอุณหภูมิ

ลดต่ำลงเนื่องการหมุนวนที่ระยะนี้ใกล้เคียงกับทางออกของไอเสียทำให้เกิดการดูดความร้อนออกไปที่สู่ภายนอกจึงทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง

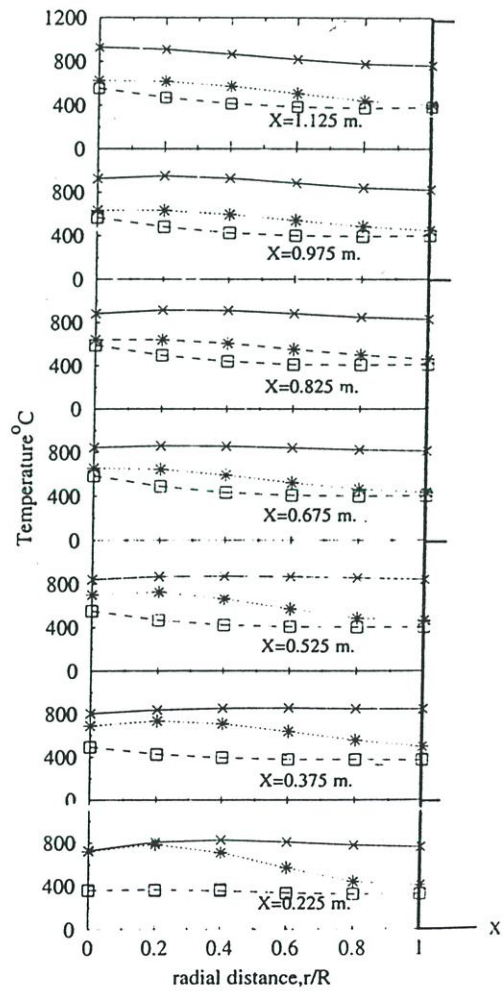
จากกราฟรูปที่ 4 เราสามารถสรุปโดยรวมได้ว่าได้อิทธิพลของตำแหน่งของการป้อนของอากาศทุกจุดที่ 0.45 m จะทำให้เกิดการหมุนวนและมีการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงให้อยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้นทำให้การเผาไหม้นานขึ้นจึงเป็นผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งอุณหภูมิที่ตำแหน่งดังกล่าวนี้จะมีสูงกว่าประมาณ 35% ของตำแหน่งการทดลองทั้งหมด ส่วนที่ตำแหน่งของการป้อนอากาศทุกจุดที่ 0.75 และ 1.05 m จะทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศหมุนวนไปอยู่ที่บริเวณปากทางออกของท่อไอเสียทำให้เชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้เผาไหม้หรือเผาไหม้ไม่หมดถูกการหมุนวนออกมาทางท่อไอเสียจึงเป็นผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดและจากการเผาไหม้จะพบว่าเชื้อเพลิงแกลบเผาไหม้ไม่หมด

× — × Level 1, X=0.45 m.  
\* ··· \* Level 2, X=0.75 m.  
□ - □ Level 3, X=1.05 m.

× — × Level 1, X=0.45 m.  
\* ··· \* Level 2, X=0.75 m.  
□ - □ Level 3, X=1.05 m.



a)  $\lambda = 0.25$



b)  $\lambda = 0.15$

รูปที่ 5 อิทธิพลของอากาศทุกจุดต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผา สำหรับ  $\Phi = 0.8$

## 5.2 อิทธิพลของอากาศหุติยภูมิ

ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังกราฟเราสรุปได้ว่ารูปที่ 5(a) การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ปริมาณอากาศหุติยภูมิเท่ากับ 0.25 จะทำให้เกิดการหมุนวนและความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นจึงช่วยให้เกิดการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น และจะพบว่าที่ระยะ  $X = 0.525$  m การกระจายอุณหภูมิมีสค่าสม่ำเสมอ และตั้งแต่กึ่งกลางเตาถึงด้านบนของห้องเผาไหม้การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งของการป้อนอากาศหุติยภูมิเท่ากับ 0.75 และ 1.050 m มีค่าเกือบไม่แตกต่างกันมากนัก

รูปที่ 5(b) ที่ปริมาณอากาศหุติยภูมิเท่ากับ 0.15 เราสามารถสรุปว่าการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งของการป้อนอากาศหุติยภูมิเท่ากับ 0.45 m มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งของการป้อนอากาศหุติยภูมิทั้ง 3 ระยะ

จากรูปที่ 5 เราสามารถสรุปโดยรวมได้ว่าปริมาณอากาศหุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมดเท่ากับ 0.25, 0.15 ที่เท่ากับ 0.45 m จะมีผลต่อการเผาไหม้คือเป็นการช่วยให้อากาศกับเชื้อเพลิงเกิดการผสมคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดีเป็นผลมาจากอากาศหุติยภูมิซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศกับเชื้อเพลิงให้เผาไหม้ได้นานขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนที่ตำแหน่งของการป้อนอากาศหุติยภูมิที่ 0.75 และ 1.05 m ไม่ได้ช่วยในการเผาไหม้แต่จะทำให้เป็นการดึงความร้อนที่เริ่มเผาไหม้ไปทิ้งภายนอกทำให้อุณหภูมิมีสค่าต่ำลง

## 6. สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นของการศึกษาค่าตำแหน่งของการป้อนอากาศหุติยภูมิที่ตำแหน่งต่างๆใน (VFC) โดยใช้เชื้อเพลิงแกลบเป็นเชื้อเพลิงโดยที่ได้มุ่งผลไปที่ทำการศึกษาระยะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาเพียงเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองเราสามารถสรุปผลได้ว่าการกระจายอุณหภูมิภายใน VFC ที่ตำแหน่งของทางป้อนอากาศหุติยภูมิที่ 0.45 m และ ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 ให้การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและมีค่าสูง จะให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดประมาณ  $927^{\circ}\text{C}$  และตำแหน่งของการป้อนอากาศหุติยภูมิ 1.05 m จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่องเพราะจะเกิดการดับซึ่งเป็นผลของการหมุนวนบริเวณท่อไอเสียทำให้เกิดการดูดความร้อนไปทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ต่ำกว่าจุดติดไฟได้เองของเชื้อเพลิงแกลบ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

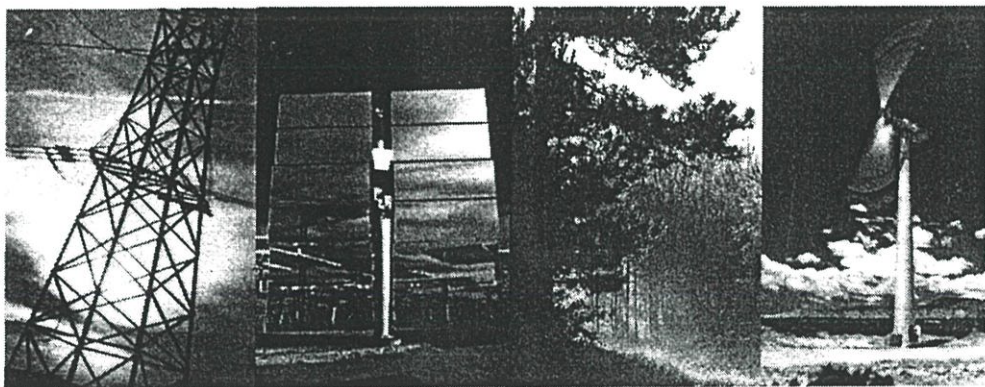
งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงไม่ได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลชั้นปีที่ 3 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในการทดลอง

## 8.งานที่ทำได้ไปในอนาคต

- ทำการปรับปรุงลักษณะของห้องเผาไหม้และทำการทดสอบที่อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการป้อนต่างๆกันที่มีผลต่อการเผาไหม้
- ทำการวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกมาจากการเผาไหม้
- หาประสิทธิภาพของการเผาไหม้

## 9.เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์เจต พรหมวงศ์ และคณะ (2543) "การศึกษาเชิงทดลองของการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาแกลบแบบวอร์เทค" วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 (ธันวาคม) , หน้า 19 - 24
- [2] ศุภชัย เลื่อนลอย (2545) "อิทธิพลของความชื้นของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] สมศักดิ์ โพธิ์ถวิลเกียรติ (2545) "อิทธิพลของขนาดของแกลบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] สุพจน์ นานาโชค (3536) "การเผาไหม้ซีลื้อในห้องเผาไหม้แบบไซโคลนชนิดอากาศเข้าหลายช่องทาง" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5] ธัชชัย ท้วถวิล และ สันติ อาภาไพบูลย์ (2534) "เตาเผาวัสดุทางการเกษตรแบบใช้อากาศหมุนวน" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [6] อติศักดิ์ ชูจินดา (2540) "เตาเผาแกลบสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไธซ์เบด" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานและวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [7] สุวิทย์ เตีย และคณะ (2542) "การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบด" วารสารวิจัยพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม - สิงหาคม 2542), หน้า 47 - 63
- [8] สมชาย ศรีพัฒนพิพัฒน์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์, "การทำนายเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนในเตาฟลูอิดไธซ์เบดแบบวอร์เทค " นานาสถอต่อสัมมนาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 , 2545
- [9] Sen Nieh and Tim T.Fu "Development of a Non-Slagging Vortex Combustor (VC) for Space/Water Heating Application" , Proc. 5<sup>th</sup> International Coal Conf., pp.761 - 768 , 1988
- [10] Sen Nieh and G.Yang " Measurements of gas-particle flows and elutriation of an 16 inch i.d cold vortexing fluidized-bed combustion model " , Powder technology , pp 139-146 ,1992



# **Second Regional Conference on Energy Technology towards a Clean Environment**

## **PROCEEDINGS**

12-14 February 2003  
Phuket, Thailand

Volume 1

## Experimental Study on Secondary Air Injection Locations of a Vortexing Fluidized-Bed Combustor

N. Srisirisittikul<sup>1</sup>, P. Promvonge<sup>1</sup> and S. Eiamsa-ard<sup>2</sup>

- 1 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand, E-mail: kppongje@kmitl.ac.th  
2 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Nongchok, Bangkok 10530, Thailand.

### Abstract

This investigation is undertaken to obtain information on the effect of inlet nozzle position of secondary air and volumetric flow rate ratios of secondary air to total air on temperature distributions in a vortexing fluidized-bed combustor (VFBC). The combustor has a cylindrical shape with 300 mm in diameter and 1200 mm in height. There are two supply air sources for the combustor: primary air entering directly and secondary air entering tangentially into the combustor. The fuel mass flow rate is set to 0.2 kg/min and kept constant throughout. The equivalence ratio is adjusted to be 0.8, 1.0 and 1.2 for each test run. For each run, the volumetric airflow rate ratio of secondary air to total air ( $\lambda$ ) is adjusted to be 0, 0.15 and 0.25. Three nozzle locations of secondary air are introduced at 0.45m, 0.75m and 1.05m to investigate their effect on temperature distribution inside the chamber. From experiment for the nozzle location of secondary air injection at 0.45 m and equivalence ratio ( $\Phi$ ) = 0.8, the maximum temperature inside the combustor is found to be 927°C for  $\lambda = 0.25$ . The area of the peak temperature is at the core in the top region. Use of secondary air to create a vortex flow leads to higher performance of combustion than that without secondary air.

### Keywords

vortexing fluidized-bed combustor (VFBC) and rice husk.

### Nomenclature

$\lambda$	= ratio of volumetric flow rates of the secondary airflow to total air		
$\Phi$	= equivalent ratio	$S$	= swirling number
$m_f$	= mass flow rate of fuel	$m_a$	= mass flow rate of air
$D_e$	= diameter of exhaust tube	$Q_T$	= total air flow rate
$D_i$	= diameter of imaginary	$Q_S$	= secondary air flow rate
	circle of air injection		
$A_i$	= total tip area of secondary	$D_o$	= diameter of chamber
	air nozzles		
$\beta$	= nozzle injection angle on a horizontal plane		

### Introduction

Fluidized bed technology has been widely applied to coal combustion and waste incineration. This kind of combustion system offers the advantages of low pollutant emissions and high combustion efficiency and to reduce the elutriation of fine particles. The vortexing fluidized-bed combustor (VFBC), an integration of a bubbling fluidized bed and cyclone, was developed and demonstrated early in

the 1970s. The vortex-generating system was developed by tangentially injecting of the secondary air into the freeboard. Based on the concept of the VFBC Nieh and Yang [1] developed a rectangular bubbling bed integrated with a circular freeboard. The performance of the combustion of waste tire was reported in a previous study [2]. Recently, a two-stage, swirl-flow fluidized bed combustor was also developed by Lee et al. [3]. However, there has been no report on optimum secondary air injection nozzle sizes and their locations to combustion behaviours.

The purpose of this study is to investigate effects of different locations of secondary air injection nozzles on combustion characteristics of a vortexing fluidized-bed combustor (VFBC). The effects of the equivalence ratio, and ratio of volumetric flow rates of the secondary airflow to total airflow are also extensively discussed.

### Combustion Foundation

The amount of air used in combustion processes is expressed in terms of the equivalence ratio,  $\Phi$ , which is the ratio of the actual fuel-air ratio to the stoichiometric fuel-air ratio and it can be written as

$$\Phi = \frac{(m_a / m_f)_{act}}{(m_a / m_f)_{stoic}} \quad (1)$$

which

- $\Phi < 1$  Rich mixture
- $\Phi = 1$  Stoichiometric or theoretical combustion
- $\Phi > 1$  Lean mixture

The ratio of volumetric flow rates of the secondary airflow to total air is a value indicates the vortex intensity in the combustor, which can be expressed as

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_r} \quad (2)$$

One of the major design considerations of the vortexing fluidized-bed combustor (VFBC) is the control of vortex intensity, which commonly characterized by the swirling number [4-5]. For the VFBC model, the swirling number can be expressed as

$$S = \frac{\text{inlet angular momentum}}{\text{outlet axial momentum} \times D_e / 2} \\ = \frac{\pi \lambda^2 D_i D_e}{4 A_i} \quad (3)$$

in which  $D_i = D_o \cos \beta$

## Method and Materials

The experimental setup is showed in Fig. 1 and 2. The fluidized bed assembly includes a bed column, a distributor and a plenum chamber. The bed is 1.2 m in height and 0.3 m in diameter with multiple injection nozzles each of 10 mm diameter for the secondary air as depicted in Fig. 1. Rice husk fuel was used as the fluidized particles. The rice husk particles were milled and grinded, sieved up to about 2.0x8.0 mm and stored in the laboratory under dry condition (9.2% of moisture content). Its minimum fluidized-gas velocity  $u_{mf}$  was 0.24 m/s, and the fluidizing fluid was air. The distributor has a number of holes each with 2 mm in diameter and frictional open area was 50%. Seven types K thermocouples were used to measure local temperatures. The temperature probes were installed on the wall of the bed column at seven stations, namely,  $X = 0.225$  m, 0.375 m, 0.525 m, 0.675 m, 0.825 m, 0.975 m, and 1.125 m above the distributor.

The combustor was operated over a temperature range from 400–1000°C. A 15 hp blower was used for providing both primary and secondary combustion airs. Rice husk fuel was fed through a screw feeder and injected directly to the bottom chamber. Heating up the VFBC commenced start up process with LPG torch inserted at the lower nozzle slot. The preheating took about 30 minutes for the chamber to raise its temperature to be about 400°C. Then feeding commenced through the hopper, slowly with the rice husk until 0.2 kg/min and kept constant and in the meantime, feeding primary airflow is gradually adjusted to create fluidization. When the temperature in the chamber reached 700°C, stop of preheating with LPG was made. A thick, black smoke was seen at the beginning and slowly thinned out by adjusting the air/fuel (A/F) ratio. Excess air at various levels for equivalence ratio of 0.8, 1.0 and 1.2 was tried for each of  $\Phi$ . Temperature measurements at seven strategic locations in the test system were monitored at various selected locations with chromel-alumel (type K) thermocouples while volumetric flow rates of primary and secondary airs were measured by using orifice meters. All data collection was taken at steady state condition.

**Table 1** Details of a vortexing fluidized-bed combustor (VFBC).

Parameter	Magnitude
Fluidized bed chamber geometry	
Chamber diameter ( $D_0$ ), mm	300
Chamber height (H), mm	1200
Exhaust tube diameter ( $D_e$ ), mm	75
Distributor plate diameter, mm	300
Number of bubble cap	50
Bubble cap diameter, mm	2
Material	stainless steel
Multiple air injections	
Number of inlet nozzle	4
Nozzle diameter, mm	10
Nozzle location distance, mm	450, 750 and 1050

temperature distribution in the combustion chamber than at the equivalent ratios,  $\Phi = 1.0$  and  $1.2$  with the average highest temperature in the vicinity of the central chamber of the furnace at the radial profiles ( $r/R=0.2$ ). And it is gradually reduced to lower and the lowest temperature at the furnace walls. The highest temperature in the combustion chamber at the high position is  $X = 0.525$  m and  $X = 0.975$  m while the equivalence ratio is  $1.0$  causing the constant and lowest temperature distribution in the combustion chamber. In the case of the equivalence ratio of  $1.2$  it leads to the inconsiderable temperature distribution in the combustion chamber since the quantity of  $O_2$  value is relatively lower than the quantity required in the combustion. And this causes the small amount of energy loss.

For the secondary air entrance station at  $X = 0.75$  m and equivalence ratio,  $\Phi = 1.0$ , it is obvious that the temperature distribution inside the furnace is constant and highest for this case. Thanks to the recirculation and the air turbulence in terms of high fuel residence time of the furnace, these can lengthen the interval of the combustion as shown in Fig. 3(b).

From Fig. 3(c) at the station of secondary air injection nozzle of  $X = 1.05$  m, it can be visible that the temperature distributions inside the furnace of this case are lower than those of both cases above for all equivalence ratios of  $0.8, 1.0$  and  $1.2$ . This can be attributed to small amount of  $O_2$  (insufficient air) used in combustion with fuels at the lower chamber region. This results from the position of secondary air nozzle close to the exit of the exhaust pipe and then leads to high combustion air escape from the furnace causing to reduce the internal temperature.

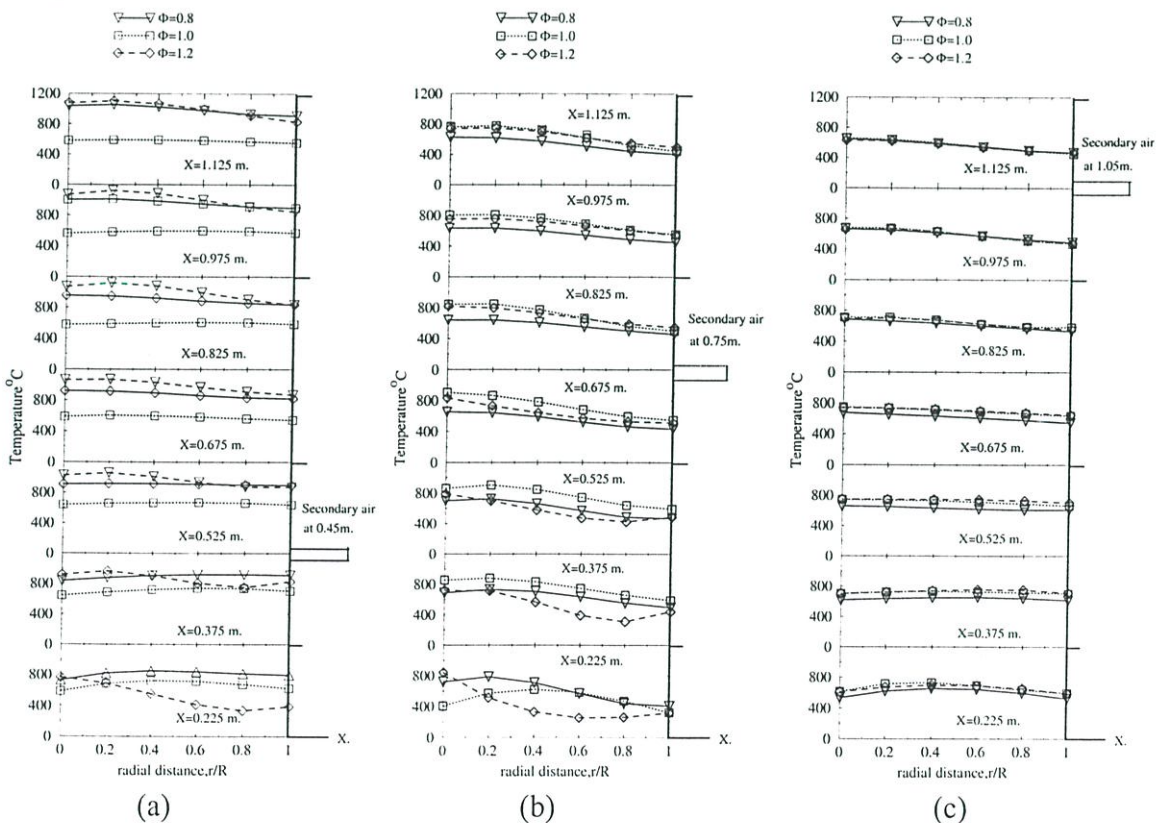


Figure 3. Temperature distributions inside a vortexing fluidized-bed combustor with adjusting the inlet position of secondary airflow at  $X = 0.45$  m,  $0.75$  m and  $1.05$  m with  $\lambda = 0.25$ .

### Effect of secondary air-flow

Figures 4(a), 4(b) and 4(c) show the temperature distributions in the combustion chamber at  $\Phi = 0.8$  and various  $\lambda$  for the nozzle positions of secondary air at  $X = 0.45$  m, 0.75 m and 1.05 m, respectively. In Fig. 4(a) for the position at  $X = 0.45$  m (at the bottom chamber), use of the secondary air ratio,  $\lambda = 0.25$  gives higher and more uniform temperature distributions inside the furnace than those of  $\lambda = 0.0$  and 0.15. The highest temperature in the combustion chamber is seen to be  $927^{\circ}\text{C}$ . This indicates the significant effect of swirling intensity from secondary air injection on combustion behaviors.

For the nozzle location of secondary air at  $X=0.75$  m (at the middle chamber), it is found that the secondary air ratio of 0.15 yields higher temperature distributions in the combustion chamber than those of 0.0 and 0.25. This can be explained that because of the swirling intensity enhancing and the state of great turbulence of the air including the internal fuel of the furnace, these factors lead to lengthen the duration of the combustion. But for the secondary air ratio of 0.25, the quantity of air (primary air around 75% of total air) used in combustion at the bottom chamber is not sufficient. This reason makes use of secondary air ratio of 0.25 poorer performance than that of  $\lambda = 0.15$  as can be seen in Fig. 4(b).

In Fig. 4(c) for the nozzle location of secondary air at  $X=1.05$  m (at the top chamber), it is interesting to note that that temperature distributions inside the furnace of this case are lower than those of both cases above for all  $\lambda$  used. This can be attributed to insufficient combustion air (primary air) used in combustion with fuels at the lower chamber region as mentioned for the case in Fig. 3(c).

From the experimental results in Fig. 4, the influence of the lower nozzle position of the secondary air at  $X=0.45$  m enhances the fuel residence time and helps prolong the mixing between fuel and air in the combustion chamber. This leads to perfect combustion, which gives higher temperature of the combustion system. The internal temperature in the combustion chamber is higher than the temperature at the position of secondary air at  $X=0.75$  m and 1.05 m around 35%.

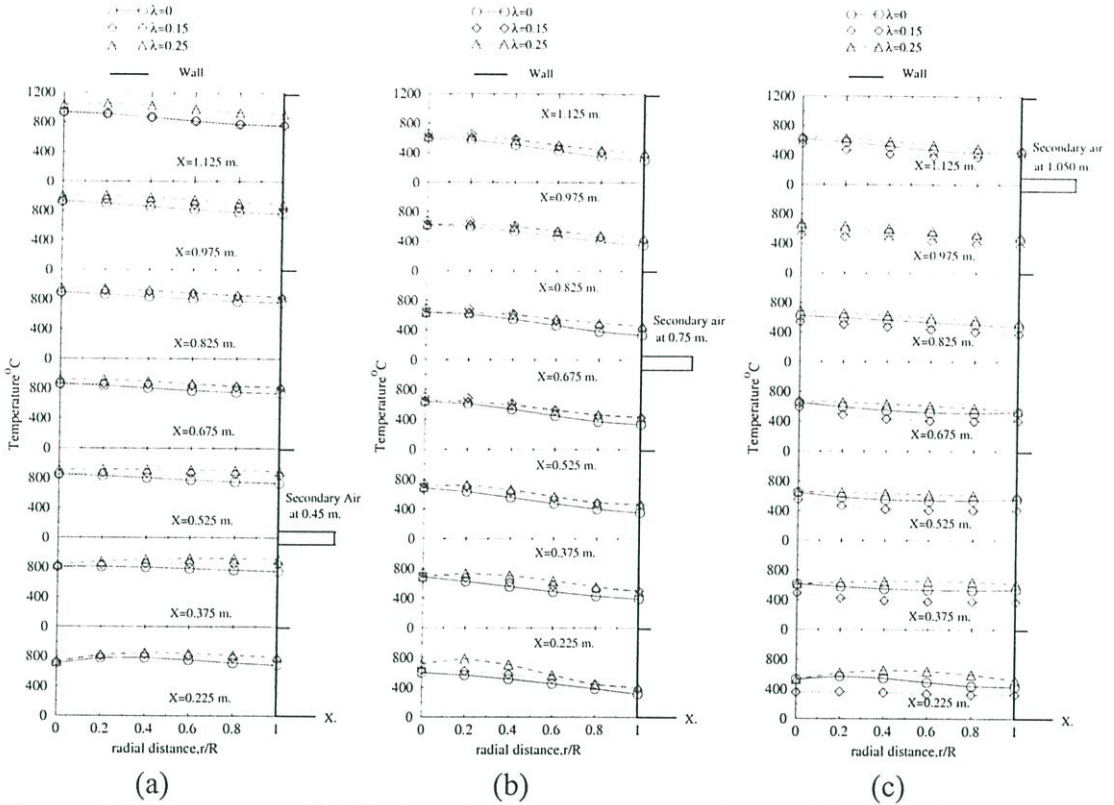


Figure 4. Temperature distributions inside a vortexing fluidized-bed combustor with adjusting the inlet position of secondary airflow at  $X = 0.45$  m,  $0.75$  m and  $1.05$  m with  $\Phi = 0.8$ .

### Conclusions

Thanks to these experimental conditions characterized as the fundamental studies on positions of secondary air nozzles in the VFBC by using the rice husk fuel. They are only emphasized the results in studies on the temperature distributions inside the vortex combustor. From the results, it is concluded that maximum temperature distribution can be achieved inside the VFBC for the nozzle position of the secondary air at  $0.45$  m and equivalent ratio of  $0.8$ . This case shows the high and nearly uniform temperature distribution in the combustion chamber and yields the highest temperature around  $927^{\circ}\text{C}$  while the nozzle position of secondary air at  $X = 1.05$  m leads to poorest combustion due to insufficient combustion air at the lower chamber. This results in lower temperature occurring in the combustion chamber. However, use of secondary air to create a vortex flow leads to higher performance of combustion than that without secondary air.

### Acknowledgements

The authors would like to acknowledge with appreciation, the Thailand Research Fund (TRF) and National Energy Policy Office (NEPO) for the financial support of this research.

## References

- [1] S. Nieh, G. Yang, A. Q. Zhu and C. S. Zhao, "Measurements of gas-particle flows and elutriation of an 18 inch i.d cold vortexing fluidized-bed combustion model", *Powder technology*, Vol. 69, pp.139-146, 1992.
- [2] H. Teng, C. S. Chyang, S. H. Shang and J. A. Ho, "Characterization of waste tire incineration in a prototype vortexing fluidized bed combustor", *Journal Air & Waste Manage. Assoc*, Vol.47, pp. 49-57, 1997.
- [3] J. K. Lee and H. S. Chun, "Anthracite coal combustion in a bench scale two-stage swirl-flow fluidized bed combustor", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 30, No 6, pp. 1125-1129, 1997.
- [4] N. Syred and J. M. Beer, "Combustion and Flames, Vol. 23, pp. 143, 1974.
- [5] A. K. Gupta, D. G. Lilley and N. Syred, "Swirling Flow", Chapter 5-6 , Abacus Press, Tunbridge Wells, 1984.



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

# ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2546

1. วิจารณ์ความต้านทานแบบลอยตัวที่ควบคุมด้วยกระแสไหลมอสทรานซิสเตอร์ 1  
สมนึก ห้าวหาญ กอบชัย เดชหาญ ไชโย ธรรมรัตน์
2. วงจรถักกำลังโซลาร์เซลล์สำหรับกระแสควบคุมด้วยกระแส 7  
วิจิตร เพ็ชรกิจ สิทธิพร เพ็ชรกิจ วิวัฒน์ กิรานนท์
3. วงจรนำเลเซอร์ลิซ่าแบบลอยตัวโดยโซลาร์ทรานส์มิเตอร์แบบมอสเฟตและการประยุกต์ 13  
ภัทรา เพ็ชรชอบ อมร จิรเสรีอมรกุล วิมลภ สุระกำพล
4. การศึกษาเปรียบเทียบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (CCM) และแบบไม่ต่อเนื่อง (DCM) 19  
ศุภชัย หอวิมานพร ชรินทร์ บุญลักษณ์อนุสรณ์
5. เอนทิเอ็มสวิตช์ที่มีบัฟเฟอร์ทางด้านขาเข้าซึ่งมีนโยบายการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลภายใต้กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง 25  
ปิติพงษ์ ประภามณฑล สุวิมล สิทธิชีวภาค เกียรติกร วงศ์โรจน์ภรณ์
6. การจัดการเส้นทางของโครงข่ายโทรศัพทให้ดีที่สุดโดยวิธีฮอปฟิลด์เน็ต 31  
ฉัตรชัย วิวัฒน์พันธุ์ มบุญ สุขเกษม อวิฬ พึ่งมา
7. การปรับปรุงคุณภาพของแต่ละคลาสที่ได้จากตัวจำแนกความเหมือนสูงสุด 37  
สมบัติ อิศราวัฒน์ย์ พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์
8. การแปลงภาพระดับสีเทาเป็นภาพสองระดับโดยใช้วิธีของเอนโทรปีด้วยบอร์ดสตาร์ทเตอร์ TMS 320C31 43  
เพชร ใจหาญ พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์
9. การแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับแบ่งประเภทฟอลต์ในสายส่ง 49  
อรุณพล เก้าพิทักษ์กุล ศุภี บรรจงจิตร สมชาติ จิรวិภากร สุธีวัฒน์ นงนุช
10. การระบุตำแหน่งฟอลต์ในสายส่งโดยใช้การแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียม 55  
อรุณพล เก้าพิทักษ์กุล ศุภี บรรจงจิตร สมชาติ จิรวิภากร อัศวชัย บรรจงศิลป์
11. การหาฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 61  
พูนิจจร บุญมี มารุต คณิตเดชามงคล สมชาติ จิรวิภากร นิตศัมภ์ กฤษณจินดา
12. การวิเคราะห์ฟอลต์ที่ลดความถี่ของไฟฟ้า 3 เฟสโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP 67  
จิตรี อินทร์พุ่ม มณฑล สิลลาจินดาไกรฤกษ์ บุญเลิศ สือเฉย ปัญญา มาลีวัตร ฉวีวิช ทัดสวน
13. การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ 73  
บุญเลิศ สือเฉย ปัญญา มาลีวัตร สมศักดิ์ ลีโรปรานานนท์ ศุภี บรรจงจิตร
14. การออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้เทคนิคอัลกอริธึม 79  
ชวรัตน์ นงนุช อรุณกิจ คอพงษ์ ภูมิภาค ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย
15. การออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์การใช้ไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม 85  
มารุต คณิตเดชามงคล สมชาติ จิรวิภากร
16. การป้องกันไหลล้นเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการปรับตารางการป้อนแหล่งจ่ายและไลน์สวิตชิง 91  
สิทธิเดช วรรณศรีศิริกุล มณฑล สิลลาจินดาไกรฤกษ์
17. การวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน 97  
ปิติพงษ์ สมไชยวงศ์ ประภาส อุดคณิกพันธ์
18. Semantic Query for Content-Based Image Retrieval Using Genetic Algorithm 103  
Cattleya Duanggate Orachat Chitsobhuk Suphamit Chitayasothorn
19. Robust Inverse Response Compensator 109  
Pratchai Tontrithiphol Mongkol Janchookiat Kiattisak Kumwachara
20. อิทธิพลของตัวแบ่งการนำอากาศหตุยภูมิต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาเผาฟอลต์โคชเบคแบบอากาศหมุนวน 115  
นิยม ศรีศรีสิริกิติ์ พงษ์เจต พรหมวงศ์ ภูรินทร์ อัครฤทธ

# อิทธิพลของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

## Effect of Secondary Air Injection Locations on Combustion Temperature in a Vortexing Fluidized-bed Combustor

นิยม ศรีศิริสิทธิกุล

พงษ์เจต พรหมวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภูรินทร์ อัครกุลธร

คณะเกษตรศาสตร์บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล บางพระ ศรีราชา ชลบุรี

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองของอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน โดยพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิภายในเตา, ชี้ออกและควันที่เกิดจากการเผาไหม้ การทดลองใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงป้อนสู่เตาเผาด้วยอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.2 kg/min ส่วนค่า Equivalence ratio ถูกปรับให้มีค่าเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 พร้อมทั้งทำการปรับค่าอัตราการไหลอากาศทุติยภูมิต่ออากาศทั้งหมด ( $\lambda$ ) เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25 จากการทดลองพบว่าที่ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 0.8 และที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 0.45 m จากฐานล่าง จะให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้เท่ากับ 927 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของการทดลอง และชี้ออกที่ออกมา มีลักษณะละเอียด

### Abstract

This paper presents an experimental study of the effect of secondary air on combustion temperature in a vortexing fluidized combustor. (VFBC). The temperature distributions in the combustor including ashes and smoke from flue gases are measured and observed. Measurements are made by setting the feeding rate of rice husk to be 0.2 kg/min throughout and the equivalence ratios are to be 0.8, 1.0 and 1.2 with varying the ratio of volumetric flow rate of secondary air to total air ( $\lambda$ ) of 0, 0.15 and 0.25 for each test run. The experiment shows that the equivalence ratio = 0.8 and the feeding location of secondary air of 0.45 m from the bottom base gives maximum temperature at about 927 °C in the chamber.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่าความเจริญก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานในระบบการผลิตไม่ว่าจะเป็น พลังงานไฟฟ้า, พลังงานความร้อนและพลังงานกลจะเห็นได้ว่าความต้องการใช้พลังงานของประเทศไทยมีไม่เพียงพอแก่ความต้องการของอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นจะต้องตั้งชื่อจากต่างประเทศทำให้เกิดการเทียบเคียงการค้า เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีภายในประเทศมาทดแทนเมื่อทำการศึกษาค้นคว้าว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศมีอยู่มากมายในประเทศยังไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ สำหรับงานวิจัยนี้ได้สนใจเชื้อเพลิงแกลบซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่มากภายในประเทศ

งานวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ งานวิจัยของสุวิทย์ เตีย และคณะ [1] ได้วิจัยเตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล Sen Nieh และ G.Yang [3] ได้ศึกษาการไหลของอนุภาคแก๊สภายในเตา VFBC แบบ cold model ซึ่งมีขนาดห้องเผาไหม้เท่ากับ 18 นิ้ว

เตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนซึ่งได้ทำการประยุกต์มาจากเตาเผาแบบไซโคลนเตาเผาแบบฟลูอิด ไคซ์เบดและเตาเผาแบบวอร์เทคโดยภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวนจะมีการหมุนวนเป็นเกลียวและมีความปั่นป่วนทำให้มีการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศได้ดีขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นและให้ปริมาณความร้อนออกมาเพิ่มขึ้นจากการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแกลบพบว่าค่าความร้อนอยู่ในช่วง 2,900 – 4,560 kcal/kg ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเพื่อจะสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติต่อไป

## 2. ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้หมายถึงปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารเผาไหม้ได้ (combustible element) ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต้องอาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

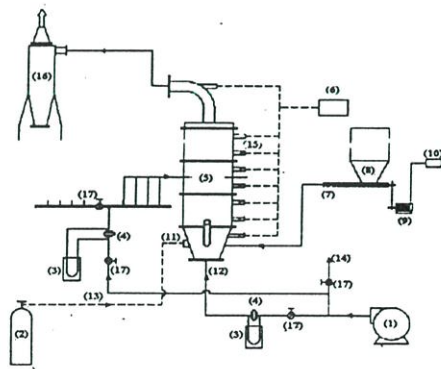
- 1) เวลาต้องนานเพียงพอ เพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้หมดโดยไม่ถูกอากาศส่วนเกินนำออกทางปล่องควันก่อนถูกเผาไหม้
- 2) อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง
- 3) การผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องอยู่ในลักษณะของการผสมแบบปั่นป่วน

ค่า Equivalence ratio เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้จริงต่อทางทฤษฎี เราจะหาค่า Equivalence ratio ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{(m_a / m_f)_{stoc}}{(m_a / m_f)_{act}} \quad (2)$$

เมื่อ  $m_a$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/min)

$m_f$  คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min)



- |                   |                             |                 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|
| (1) Blower        | (2) LPG supply              | (3) Manometer   |
| (4) Orifice plate | (5) Fluidized-bed combustor |                 |
| (6) Indicator     | (7) Screw feeder            | (8) Hopper      |
| (9) Motor         | (10) Inverter               | (11) Burner     |
| (12) Primary air  | (13) Secondary air          | (14) Bypass air |
| (15) Thermocouple | (16) Cyclone                | (17) Gate valve |

รูปที่ 1 ไออะแกรมอุปกรณ์การทดลอง

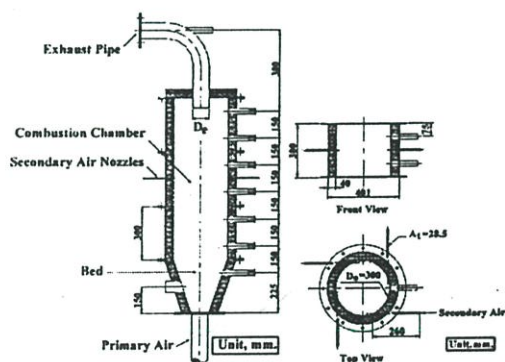
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทุกชนิดต่ออากาศทั้งหมดเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการเพิ่มความแรงของวอร์เทคของการไหล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (3)$$

เมื่อ  $Q_s$  คือ อัตราการไหลของอากาศทุกชนิด  
 $Q_T$  คือ อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด

### 3. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 1 สามารถศึกษารายละเอียดได้จาก [2] ห้องเผาไหม้ VFBC ซึ่งด้านในของห้องเผาไหม้ทำจากอิฐทนไฟซึ่งมีความหนาเท่ากับ 0.04 เมตร และด้านข้างของห้องเผาไหม้จะเจาะรูไว้สำหรับป้อนอากาศทุกชนิด ซึ่งแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของห้องเผาไหม้และการป้อนอากาศทุกชนิดของเตา VFBC

### 4. วิธีการทดลอง

1. ทำการอุ่นเตาโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 400 °C จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบพร้อมกับอากาศปฐมภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาประมาณ 700 °C แล้วนำหัวเผาออกจากเตา
2. ทำการปรับอัตราการไหลของอากาศและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้อัตราส่วนสมมูลตามที่กำหนดไว้คือ 1.0

3. ทำการปรับอัตราการไหลของปฐมภูมิ 75 เปอร์เซ็นต์ อากาศทุกชนิด 25 เปอร์เซ็นต์
4. ทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล 9 จุด โดยทำการวัดที่ระยะ 150 มิลลิเมตรตามแนวรัศมีของเตาแล้วทำการบันทึกผลการทดลอง
5. ปรับระยะของเทอร์โมคัปเปิ้ล 7 จุด ที่ระยะ 120, 90, 60, 30 และ 0 มิลลิเมตร ( จากกึ่งกลางของเตา) ตามลำดับตามแนวรัศมี โดยแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดอุณหภูมิและบันทึกผลการทดลองเทอร์โมคัปเปิ้ลด้านบนสุดไว้สำหรับวัดอุณหภูมิด้านออกจากเตา ส่วนเทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 9 ไว้สำหรับวัดอุณหภูมิจนบรรยากาศ โดยไม่ต้องทำการปรับตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล
6. ทำการปรับอัตราส่วนของอากาศปฐมภูมิ 85 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อากาศทุกชนิด 15 และ 0 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 4 และข้อ 5
7. ทำการปรับอัตราส่วนสมมูลเป็น 1.2 และ 0.8 ตามลำดับแล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง ข้อ 6
8. หลังจากทดลองเสร็จทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนของอากาศทุกชนิดที่ระยะ 0.75 เมตร และทำการทดลองที่ระยะ 1.05 เมตร ตามลำดับ พร้อมทั้งทำการทดลองซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 7

### 5. การวิเคราะห์การทดลอง

การทดลองนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลผลของอากาศทุกชนิดที่มีผลกระทบต่อเผาไหม้เตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน โดยที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนของอากาศทุกชนิด 3 ตำแหน่งคือ 0.45, 0.75 และ 1.05 ม. และได้ทำการหาค่า Equivalence ratio ที่เหมาะสมกับเตาเผาฟลูอิด ไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน โดยที่ทำการทดลองกับค่า Equivalence ratio ที่ 0.8, 1.0, 1.2 และยังคงได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่า  $\lambda$  เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25

### 5.1 อิทธิพลของตำแหน่งการป้อนอากาศหุคิยภูมิ

รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศหุคิยภูมิแตกต่างกันที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 พร้อมทั้งได้ทำการเปลี่ยนแปลงองศาการไหลของอากาศหุคิยภูมิต่ออากาศทั้งหมด  $\lambda$  ให้เท่ากับ 0, 0.15 และ 0.25 ซึ่งจากการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

รูปที่ 3 (a) พิจารณาที่  $\lambda = 0$  นั่นคือไม่มีการป้อนอากาศหุคิยภูมิจะพบว่า การกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า  $\lambda$  เท่ากับ 0.15 และ 0.25 ตามลำดับและที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศหุคิยภูมิที่  $X = 0.45$  และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 การกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ก่อนข้างสม่ำเสมอตั้งแต่กึ่งกลางเตาจนถึงผนังเตา การป้อนอากาศที่ตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดการหมุนวนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงแกลบให้การเผาไหม้ได้มากขึ้น

และทำให้อุณหภูมิภายในเตาส่งขึ้นและสม่ำเสมอทุกตำแหน่งของเตาเผาหลังจากการเผาไหม้จะพบว่ามีลักษณะของชี้ในตำแหน่งนี้มีลักษณะค่อนข้างละเอียด และลักษณะคว้นค่อนข้างดำ รูปที่ 3(b) ที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศหุคิยภูมิเท่ากับ 0.75 m. และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 จะพบว่าลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาเผาจะสูงปริมาณกึ่งกลางเตาและจะลดลงบริเวณผนังเตาจะเห็นได้ว่าที่  $\lambda = 0.25$  และ 0.15 บริเวณกึ่งกลางเตาตามความสูงการกระจายอุณหภูมิแทบจะไม่แตกต่างกันมากนัก และจะพบว่าที่บริเวณด้านล่างคือส่วนที่เป็นเบดที่ตำแหน่ง  $X = 0.225$  m. และ  $\lambda = 0.25$  จะพบว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นเนื่องจากอากาศหุคิยภูมิด้านบนเป็นส่วนที่ดูดให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วยและเมื่อมาถึงที่ตำแหน่งการป้อนดังกล่าวอากาศหุคิยภูมิก็เป็นตัวลดอุณหภูมิทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนบริเวณดังกล่าวจึงทำให้อุณหภูมิลดลง รูปที่ 3 (c) ณ ตำแหน่งการป้อนของอากาศหุคิยภูมิเท่ากับ 1.05 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับบริเวณท่อไอเสียจะสังเกตได้ว่าการกระจายอุณหภูมิมียค่าสูงบริเวณกึ่งกลาง

เตาและลดต่ำลงบริเวณผนังเตา แต่อุณหภูมิจะมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับตำแหน่งการป้อนของอากาศหุคิยภูมิ  $X = 0.45$  และ  $X = 0.75$  m. เนื่องจากบริเวณการป้อนของอากาศ ณ ตำแหน่งนี้อยู่ใกล้กับท่อไอเสียจึงเป็นการดูดความร้อนของการเผาไหม้ไปทั้งด้านบนจึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาลดลงอย่างเห็นได้ชัดและลักษณะของชี้ด้านล่างส่วนจะเผาไหม้ไม่หมด

จากกราฟรูปที่ 3 เราสามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลของตำแหน่งการป้อนของอากาศหุคิยภูมิที่  $X = 0.45$  m. จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากที่ตำแหน่งนี้จะเป็นการทำให้เกิดการหมุนวนให้อากาศกับเชื้อเพลิงคลุกเคล้าทำให้เกิดการป้อนป่วนทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวนี้จะให้อุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ประมาณ 35 % ส่วนที่ตำแหน่งการป้อนที่  $X = 0.75$  และ 1.05 m. จะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและเชื้อเพลิงอยู่ใกล้กับบริเวณท่อไอเสียทำให้เป็นการดึงความร้อนจากการเผาไหม้ไปทั้งและทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนจึงเป็นผลทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง

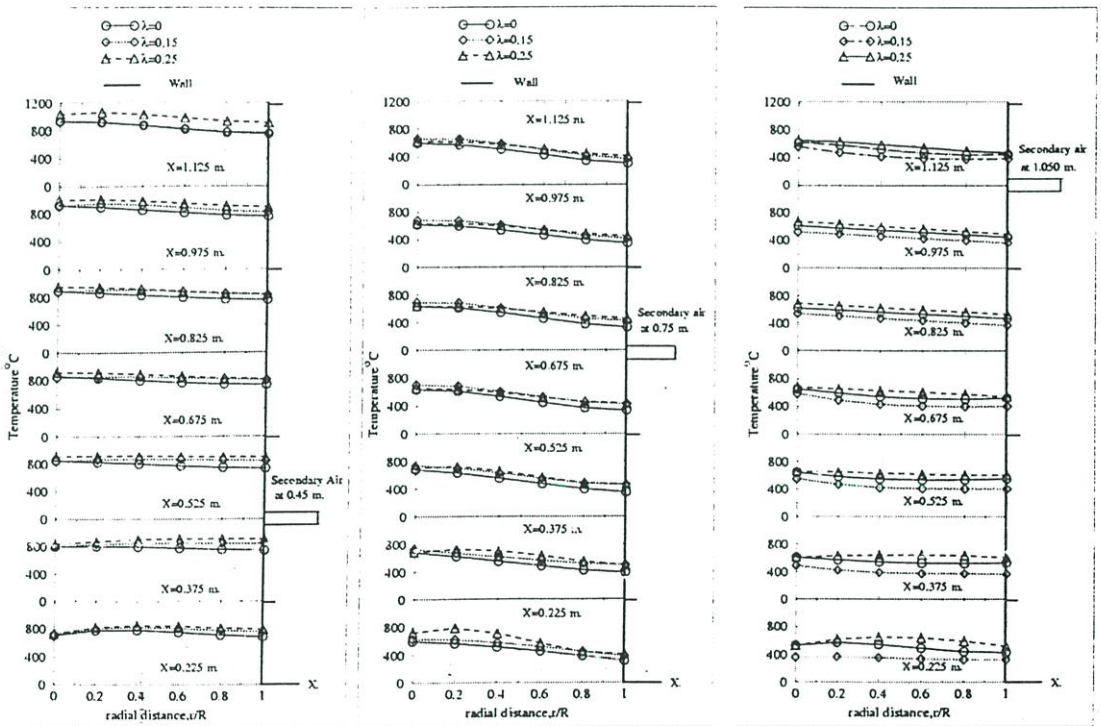
### 5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล

รูป 4 (a) ที่ตำแหน่งการป้อนอากาศหุคิยภูมิ  $X = 0.45$  m. โดย  $\lambda = 0.25$  เราจะพบว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 0.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิจะให้ค่าที่สม่ำเสมอโดยจะมีอุณหภูมิสูงสุดโดยจะมีอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยที่ตำแหน่ง  $r/R$  เท่ากับ 0.2 หรือบริเวณกึ่งกลางวงแหวนของเตาเผาในแนวรัศมีและค่อย ๆ ลดต่ำลงสู่ผนังเตาจนกระทั่งต่ำที่สุดที่ผนังเตาและมีอุณหภูมิสูงสุดที่  $X=0.525$  ถึง  $X = 0.975$  m. ส่วนในกรณี  $\Phi$  เท่ากับ 1.0 จะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอแต่จะมีการกระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดและในกรณีของ  $\Phi$  เท่ากับ 1.2 นั้นมีปริมาณของออกซิเจนน้อยกว่าออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์จึงทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้น้อยตามไปด้วย

รูปที่4(b) จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 ที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่  $X=0.75$  m. จะให้ค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางวงแหวนของเตาเผาและจะค่อยลดต่ำลงเนื่องจากปริมาณอากาศทุติยภูมิและอากาศปฐมภูมิมีค่าพอเหมาะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์

รูปที่4(c) จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่  $X=1.05$  m. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับบริเวณทางออกของไอเสีย จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาที่อัตราส่วนสมมูลทั้ง 3 ค่าจะให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนักและการกระจายอุณหภูมิเนื่องจากการสูญเสียความร้อน

จากรูปที่ 4. สรุปได้ว่าที่ระยะการป้อนของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 0.45 m. ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 จะให้ค่าการกระจายอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของวงแหวนและลดต่ำลงเล็กน้อยที่ผนังเตา และที่ระยะการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่ 0.75 m. ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.0 จะให้ค่าการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีการหมุนวนเกิดการปั่นป่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ ทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้นานขึ้นทำให้



(a) ตำแหน่งการป้อนที่ 0.45 m

(b) ตำแหน่งการป้อน ที่ 0.75 m

(c) ตำแหน่งการป้อน ที่ 1.05 m

รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาสำหรับ  $\Phi = 0.8$  และที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิต่างๆ

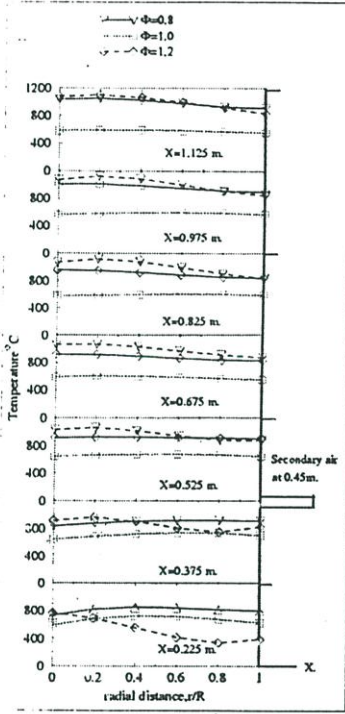
อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนที่ระยะการป้อนของอากาศทุติยภูมิเท่ากับ 1.05 m. จะเห็นว่าที่อัตราส่วนสมมูลทั้งสามค่าให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการการหมุนวนในตำแหน่งนี้ใกล้กับทางออกของท่อไอเสียจึงเป็นการดึงความร้อนไปทิ้งสู่ภายนอกเตาเผาทำให้อุณหภูมิลดลงตามไปด้วย

6.สรุปผลการทดลอง

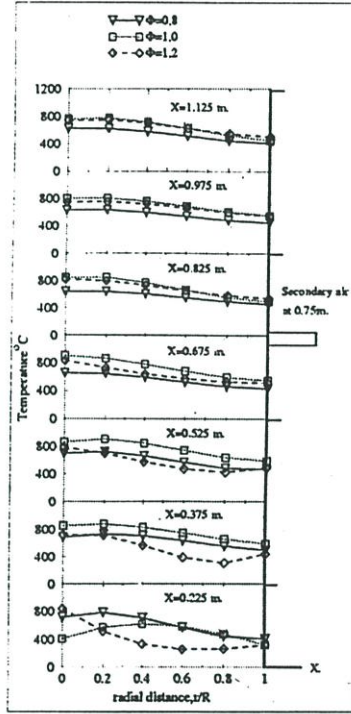
เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC ที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุติยภูมิที่ระยะต่าง ๆ กัน ซึ่งจากการทดลองเราพอจะสรุปได้ว่า ที่ตำแหน่งการป้อนอากาศทุติยภูมิ  $X = 0.45$  m. และอัตรา

ส่วนสมมูลเท่ากับ 0.8 จะให้ค่าการกระจายตัวสูงสุดบริเวณ  $r/R$  เท่ากับ 0.2 (จากกึ่งกลางของเตา) โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ  $927^{\circ}\text{C}$  และลักษณะของชั้นเถ้าค่อนข้างละเอียด , คำนที่ออกมาจากท่อไอเสียน้อยและ ที่ตำแหน่งการป้อนของ

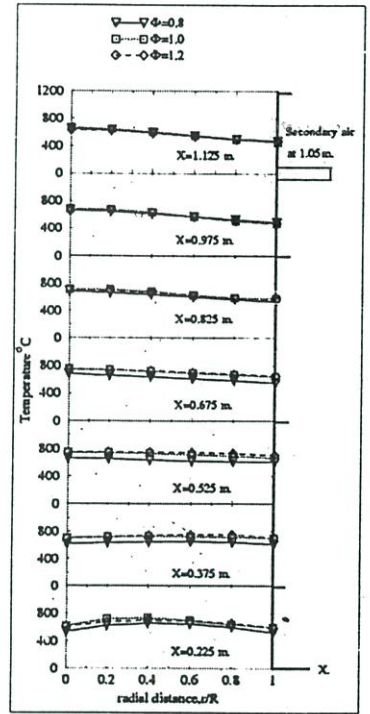
อากาศ ที่  $X = 1.05 \text{ m}$ . จะเกิดการสูญเสียความร้อนบริเวณ ที่อัตราส่วนสมมูลทั้ง 3 คำนั้นอัตราเนื่องจากที่ตำแหน่งนี้ใกล้ บริเวณท่อไอเสียจึงทำให้การหมุนวน บริเวณนี้ เป็นการดูด



(a) ตำแหน่งการป้อน ที่ 0.45 m



(b) ตำแหน่งการป้อน ที่ 0.75 m



(c) ตำแหน่งการป้อน ที่ 1.05 m

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งการป้อนของอากาศทุกชนิดที่ต่างกัน

ความร้อนและเชื้อเพลิงเคลือบบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ออกจากห้องเผาไหม้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

7.เอกสารอ้างอิง

[1] สุวิทย์ เตีย และคณะ (2542) “การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด” วารสารวิจัยพัฒนา มจร. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม หน้า 47 – 63, 2542.

[2] นิยม ศรีศิริพิทักษ์กุล, เอกภรณ์ ตันตราภิวัดน์, ชินรัชย์ เขียรพงษ์ และพงษ์เจต พรหมวงศ์ “แผนภาพกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่ 16 หน้า 660-665, 2545

[3] S. N. and G. Yang “ Measurements of gas-particle flows and elutriation of an 18 inch i.d cold vortexing fluidized-bed combustion model”, Powder technology , pp.139-146; 1992.

## ประวัติผู้เขียน

นายนิยม ศรีศิริสิทธิกุล เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน 2518 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษา  
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัย  
ศรีปทุม ปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรม  
เครื่องกล ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544

### ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2543 ทำงานที่ INNOVALUES PRECISION(THAILAND) CO.,LTD ตำแหน่ง QA Engineer

พ.ศ.2544 ทำงานที่ ALL ARM CO.,LTD ตำแหน่ง Production Engineer