

อิทธิพลของมานอากาศต่อการถ่ายเทความร้อนในเตาเผา



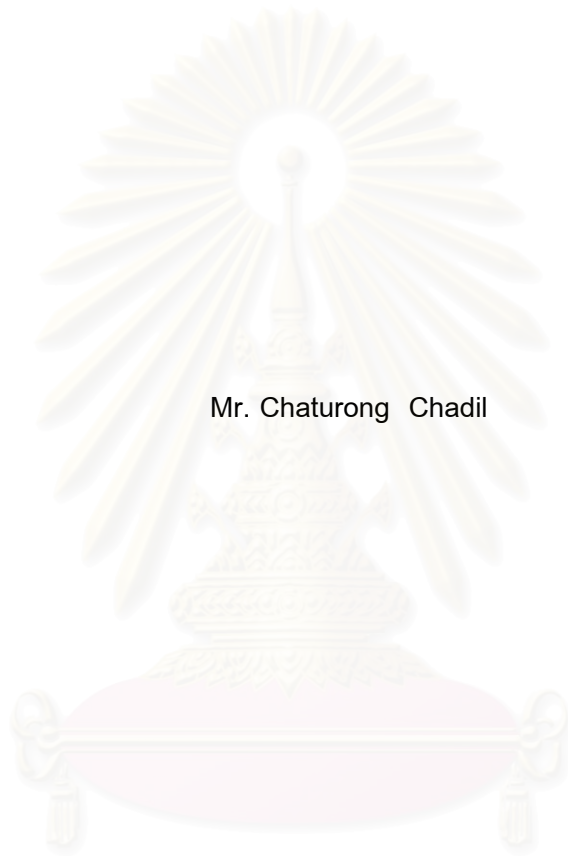
นายจัตรงค์ ชะภูิล

สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# INFLUENCE OF AIR CURTAIN ON THE HEAT TRANSFER IN FURNACE



Mr. Chaturong Chadil

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

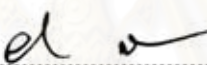
หัวข้อวิทยานิพนธ์      อิทธิพลของม่านอากาศต่อการถ่ายเทความร้อนในเตาเผา  
โดย                              นายจตุรงค์ ชะภูิล  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

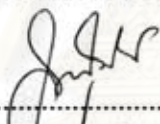
---

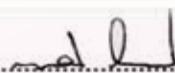
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
.....      คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....      ประธานกรรมการสอบ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล)

  
.....      อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์)

  
.....      อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

  
.....      กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์)

  
.....      กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วงศ์ ปوراจารย์)

จัดรงค์ ชะภูิล : อิทธิพลของม่านอากาศต่อการถ่ายเทความร้อนในเตาเผา. (INFLUENCE OF AIR CURTAIN ON THE HEAT TRANSFER IN FURNACE)

อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.วิทย์ สุนทรนันท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์,  
43 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของม่านอากาศต่อรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาแบบเปิด ซึ่งป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเข้าที่ผนังด้านข้าง ขณะที่ทำการดูดก๊าซเผาไหม้ผ่านทางด้านหลังเตา ตัวแปรควบคุมในการศึกษานี้คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการไหลของม่านอากาศ ความกว้างของลำม่านอากาศ และทำการปรับเปลี่ยนมุมของม่านอากาศ และร้อยละของการเปิด damper โดยทำการวัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าและออกจากเตาเผาที่หน้าเตาเผา ช่องป้อนเชื้อเพลิง และช่องทางออก (stack) อุณหภูมิภายในเตาเผา ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผา จากการศึกษาพบว่า รูปแบบการไหลของก๊าซเผาไหม้ในเตาเผาเกิดการไหลวนระหว่างช่องเปิดด้านหน้า และช่องป้อนเชื้อเพลิง โดยการใช้ม่านอากาศมีผลต่อการไหลวนของก๊าซเผาไหม้ และเกิดการผสมของอากาศจากม่านอากาศและก๊าซเผาไหม้มีผลให้การกระจายตัวของก๊าซเผาไหม้ ระดับความสมบูรณ์ของการสันดาปและการพาความร้อนภายในเตาเผาเปลี่ยนแปลงไป

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... จัดรงค์ .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ปีการศึกษา ..... 2549 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4670254221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

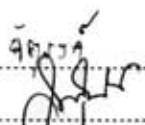
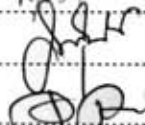
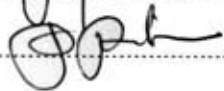
KEY WORDS: AIR / CURTAIN / FURNACE.

CHATURONG CHADIL: INFLUENCE OF AIR CURTAIN ON THE HEAT  
TRANSFER IN FURNACE. THESIS ADVISOR: WIT SOONTARANUN, Ph.D.,  
THESIS COADVISOR: ASSOCIATE PROFESSOR PORNPOTE PIUMSOMBOON,  
Ph.D., 43 pp.

This research aims to investigate the influences of air curtain on the flow profile and heat transfer in an opened gas-fired furnace. Fuel and air were supplied to one side of the furnace while the combustion gas was vented through the back. The controlled parameters included fuel feed rate, flow rate and width of the air curtain. The angle of air curtain and present opening of damper was allowed to vary. The measurements were done on the flow rate of gas in and out of the furnace at the front opening, fuel feed port, and stack, temperature, carbon monoxide and oxygen concentrations at various positions in the furnace. It was found that a recirculation of combustion gas in the furnace section between front opening and fuel feed port were affected by air curtain in a way that the distribution of gas, the level of combustion and the heat transfer in the furnace were changed.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ..... Chemical Engineering ..... Student's signature .....   
Field of study ..... Chemical Engineering ..... Advisor's signature .....   
Academic year ..... 2006 ..... Co-advisor's signature ..... 

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาสันต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเฉพาะหน่วยทางวิศวกรรมเคมี ที่เอื้อเพื่อห้องทดลองในการทดลองวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดสร้างอุปกรณ์การทดลอง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการสำหรับจัดสร้างอุปกรณ์การทดลอง

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณทุกคนในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....		ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....		จ
กิตติกรรมประกาศ.....		ฉ
สารบัญ.....		ช
สารบัญตาราง.....		ฅ
สารบัญภาพ.....		ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....		ฎ
บทที่ 1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์.....	1
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
	2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 3	อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	10
	3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	10
	3.1.1 เต้าเผา.....	10
	3.1.2 อุปกรณ์การวัด.....	10
	3.1.2.1 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ.....	10
	3.1.2.2 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของก๊าซ.....	11
	3.2 วิธีทดลอง.....	12
	3.2.1 การวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	12
	3.2.2 การวัดอุณหภูมิ อัตราส่วนออกซิเจน และอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	13
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	14
	4.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเต้าเผาก่อนทำการสันดาปและไม่เปิดผ่านอากาศ.....	14
	4.2 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเต้าเผาเมื่อทำการสันดาปและไม่เปิดผ่านอากาศ.....	21

4.3 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเมื่อทำการสันดาป และ เปิดผ่านอากาศ.....	25
4.3.1 กรณีการเปิด Damper 0%.....	25
4.3.2 กรณีการเปิด Damper 50%.....	29
4.3.3 กรณีการเปิด Damper 100%.....	33
บทที่ 5   สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
รายการอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	40
ก. ตัวอย่างการคำนวณ.....	41
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	43

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิด Damper 0%, 50% และ 100% ทดลองเมื่อไม่เปิดม่านอากาศ และไม่ทำการสันดาป.....	16
4.2	อุณหภูมิภายในเตาเผา ความเข้มข้นออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบเมื่อทำการเปิด Damper 0%, 50% และ 100% โดยปิดม่านอากาศ.....	21
4.3	อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิดม่านอากาศที่มุมต่างๆ (+15 หมายถึงเปิดม่านอากาศออกจากเตาเผา 15 องศา, 0 หมายถึงเปิดม่านอากาศ 0 องศา และ -15 หมายถึงเปิดม่านอากาศเข้าสู่เตาเผา 15 องศา) กรณีไม่มีการสันดาป และเปิด Damper 0%.....	25
4.4	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเผา เปอร์เซนต์ออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการเปิดม่านอากาศที่มุม +15°, 0° และ -15° กับกรณีปิดม่านอากาศ โดยเปิด Damper 0% .....	26
4.5	อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิด Damper 50% (+15 หมายถึงเปิดม่านอากาศออกจากเตาเผา 15 องศา, 0 หมายถึง เปิดม่านอากาศ 0 องศา และ -15 หมายถึงเปิดม่านอากาศเข้าสู่เตาเผา 15 องศา) กรณีไม่มีการสันดาป.....	29
4.6	แสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาเปอร์เซนต์ออกซิเจนส่วนเกิน และอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อทำการเปิด Damper 50%.....	30
4.7	อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิด Damper 100% (+15 หมายถึงเปิดม่านอากาศออกจากเตาเผา 15 องศา, 0 หมายถึงเปิดม่านอากาศ 0 องศา และ -15 หมายถึงเปิดม่านอากาศเข้าสู่เตาเผา 15 องศา) กรณีไม่มีการสันดาป.....	33
4.8	อุณหภูมิภายในเตาเผาเปอร์เซนต์ออกซิเจนส่วนเกิน และอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อทำการเปิด Damper 100%.....	34

## สารบัญญภาพ

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งบริเวณต่างๆ ของมันอากาศ.....	3
2.2 ความเร็วลม โดยค่า $u'$ เป็นความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปจากความเร็วลมเฉลี่ย (ค่า $\bar{u}$ ) Turbulence intensity จะสูง.....	4
2.3 ลักษณะระบบ และอุปกรณ์ในงานวิจัยของ Guyonnuad และคณะ (2000).....	5
2.4 ขนาด และลักษณะของห้องที่ได้ออกแบบในการทดลองของ Costa และคณะ (2006).....	7
2.5 รูปแบบของเส้นกระแสความเร็ว (Streamline) ในสภาวะฤดูร้อน ที่ $H_d/b = 44.4$ และมุมมันอากาศ 0 องศา โดย (a) การพาโดยธรรมชาติ; (b.1) และ (b.2) การพาจากทั้งโดยธรรมชาติ และการพาจากแรงกระทำจากภายนอก และ (c) การพาโดยแรงกระทำจากภายนอก.....	8
3.1 ตำแหน่งสำหรับวัดอุณหภูมิ ออกซิเจนส่วนเกิน และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์.....	10
3.2 ตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง Blower วาล์ว และมันอากาศ.....	11
3.3 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของ Blower ที่ทำการดูดลมเข้าสู่เตาเผาสำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศ .....	12
3.4 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของช่องทางออก Stack.....	13
4.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย มันอากาศ Blower ตัวที่ 1, 2 และ 3 และตำแหน่งการติดตั้งวาล์วแต่ละตัว (มุมมองจากด้านบน) 15	
4.2 หน้าตัดที่ทำการวัดรูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผา.....	17
4.3 ความเร็ว และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่หน้าตัดต่างๆ เมื่อเปิด Damper ของ Stack 0% (หน่วย ม./วินาที).....	18
4.4 รูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผาซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลความเร็ว และทิศทางในรูป 4.3 เมื่อเปิด Damper ของ Stack 0%.....	18
4.5 ความเร็ว และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่หน้าตัดต่างๆ เมื่อเปิด Damper ของ Stack 50% (หน่วย ม./วินาที).....	19
4.6 รูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผาซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลความเร็ว และทิศทางในรูป 4.5 เมื่อเปิด Damper ของ Stack 50%.....	19
4.7 ความเร็ว และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่หน้าตัดต่างๆ เมื่อเปิด Damper ของ Stack 100% (หน่วย ม./วินาที).....	20
4.8 รูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผาซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลความเร็ว และทิศทางในรูป 4.7 เมื่อเปิด Damper ของ Stack 100%.....	20

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	=	พื้นที่ของผนัง, พื้นที่ผิวแผ่รังสีความร้อน, พื้นที่การวัดความเร็วลม
$Area$	=	พื้นที่ในการวัดความเร็วลม
$b$	=	ความกว้างของลำอากาศ (เมตร)
$C_p$	=	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่
$e$	=	ความกว้างของช่องเปิดผ่านอากาศ
$E_Q$	=	ผลการลดการถ่ายเทความร้อน
$F_\varepsilon$	=	ฟังก์ชันของรังสีการปล่อยออก
$F_G$	=	ฟังก์ชันรูปร่าง (View factor)
$g$	=	แรงดึงดูด, ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (เมตร วินาที <sup>-2</sup> )
$H$	=	ความสูงของผ่านอากาศ, ค่า Heat of combustion
$h$	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน, enthalpy ของอากาศชื้น (กิโลจูลล์/กิโลกรัม)
$k$	=	Thermal conductivity ของวัสดุที่ใช้ทำผนัง, Thermal conductivity ของของไหล
$L$	=	ความยาวด้านที่ทำการพาความร้อนของแผ่นเรียบ
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลเชิงมวล, อัตราการไหลเชิงมวลโมเลกุล
$q$	=	พลังงานความร้อนที่ปล่อยออก
$Q$	=	อัตราการไหล
$\dot{Q}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน
$T$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์, อุณหภูมิของก๊าซภายในเตาเผา
$T_1$	=	อุณหภูมิจากผนังเตาเผา, อุณหภูมิเริ่มต้นของก๊าซเผาไหม้
$T_2$	=	อุณหภูมิล้าง, อุณหภูมิสุดท้ายของก๊าซ
$T_{ref}$	=	อุณหภูมิของก๊าซที่ reference state
$T_{feed}$	=	อุณหภูมิที่ทำการป้อนเชื้อเพลิง และอากาศ
$V_j$	=	ความเร็วลำอากาศ (เมตร/วินาที)
$W$	=	อัตราส่วน humidity ของอากาศแห้ง
$0$	=	กรณีไม่ใช้ผ่านอากาศ
$\eta_Q$	=	อัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทมวลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราการถ่ายเทมวลเมื่อไม่ใช้ผ่านอากาศ
$\rho_i$	=	ความหนาแน่นของของไหลภายในห้อง (กิโลกรัม เมตร <sup>-3</sup> )
$\nu$	=	kinematic viscosity ของอากาศ, ความเร็วลม
$x$	=	characteristic length

$\alpha$	=	thermal diffusivity
$\beta$	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ
$\varepsilon$	=	Emissivity
$\sigma$	=	ค่าคงที่ Stefan Boltzmann
$\mu$	=	Dynamic viscosity



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

กระบวนการผลิตที่ต้องทำการดำเนินการในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงมักจะประสบปัญหาการสูญเสียความร้อน โดยเฉพาะการผลิตที่ทำการป้อนชิ้นงานเข้า และออกบ่อยครั้ง หรือตลอดเวลา โดยช่องเปิดจะเป็นแหล่งความร้อนสูญเสียหลัก

ยิ่งไปกว่านั้น ในกรณีที่ให้พลังงานความร้อนด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง การสูญเสียความร้อนอาจเกิดมากขึ้นจากการถ่ายเทของอากาศที่เข้า และออกจากระบบ อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันระหว่างระบบ และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของระบบดังกล่าว ได้แก่ เตาอบชิ้นงานโลหะ เครื่องปั้นดินเผา ที่ดำเนินการแบบต่อเนื่อง

วิธีหนึ่งในการลดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากระบบเหล่านี้ได้แก่ การใช้ม่านอากาศ (air curtain) ซึ่งมีลักษณะเป็นลำหรือกระแสอากาศไหลขนานไปกับพื้นที่เปิดของเตา ซึ่งเป็นการไหลตัดขวางกระแสการถ่ายเทอากาศเข้า-ออกจากเตา ทำหน้าที่กั้นอากาศร้อนที่ออกมาจากเตาเผาสู่ออกนอก และกั้นอากาศเย็นจากภายนอกให้เข้าเตาเผาให้น้อยที่สุด โดยไม่เป็นอุปสรรคต่อการทำงานในการนำวัสดุ เข้า/ออกจากเตา

อย่างไรก็ดี การที่จะใช้ม่านอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น มีปัจจัยหลายประการที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบด้วย อาทิเช่น อุณหภูมิ และความดันภายในเตาเผา อัตราการเผาไหม้ ความเร็วของกระแสลม และรูปร่างของช่องปล่อยลม การทำมุมของม่านอากาศกับพื้น ฯลฯ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ขึ้นต้นต่อสมรรถนะในการลดการสูญเสียความร้อนด้วยม่านอากาศ

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของม่านอากาศที่ติดตั้งอยู่ปากเตาด้านหน้าต่อการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนในเตาเผาแบบเปิด ในสภาวะการดูดก๊าซเผาไหม้ออกทางด้านหลังที่อัตราการไหลต่างๆ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการเผาไหม้ และการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาแบบเปิด ซึ่งป้อนอากาศและเชื้อเพลิงเข้าที่ผนังด้านข้าง โดยติดตั้งม่านอากาศบริเวณปากเตาด้านหน้าให้สามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่

- มุมของม่านอากาศ (-15, 0 และ +15 องศา)
- อัตราการดูดก๊าซเผาไหม้ออกทางด้านหลัง (3 ระดับโดยควบคุมจากระยะการเปิด-ปิด Damper เท่ากับ 0%, 50% และ 100%)

และทำการควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ประกอบด้วย

- ความเร็วของม่านอากาศ ณ ปากปล่อง 6 เมตร/วินาที
- ความกว้างของม่านอากาศ ณ ปากปล่อง 6 เซนติเมตร
- อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 0.48 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทราบถึงปัจจัยต่างๆ ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียความร้อน มากน้อยเท่าใด

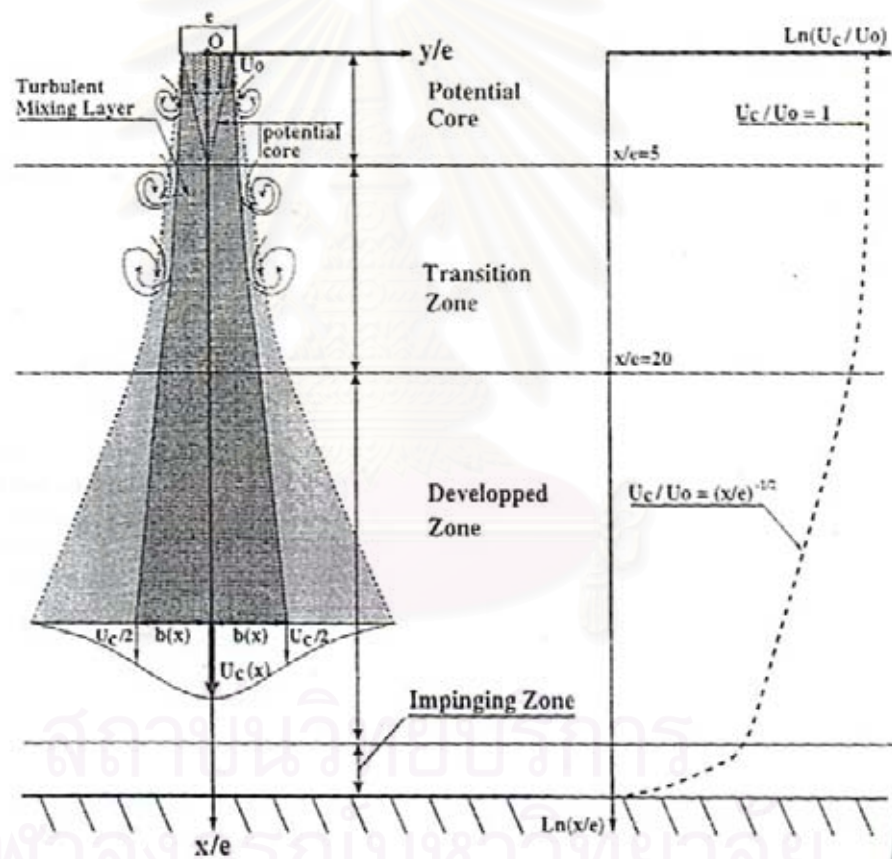
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Guyonnuad และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของม่านอากาศจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล และศึกษาจากการลดขนาด (scale down) ของม่านอากาศเพื่อนำไปพัฒนาในการติดตั้งแบบ full scale ซึ่งอาจทำการแบ่งบริเวณต่างๆ ของม่านอากาศไว้ 3 ถึง 4 ส่วนขึ้นอยู่กับความสูงของม่านอากาศ



รูปที่ 2.1 การแบ่งบริเวณต่างๆ ของม่านอากาศ

จากรูปที่ 2.5 ทำการแบ่งบริเวณต่างๆ ของลำอากาศดังนี้

- Potential Core zone ความเร็วที่กลางลำอากาศคงที่ และเท่ากับความเร็วลำอากาศขาออก ซึ่งมีความสูงประมาณ 5-8 เท่าของความกว้างช่องเปิด
- Transition zone เริ่มมีการกระจายของความเร็วลำอากาศในระดับของค่า Turbulence intensity ที่ต่ำ มีความสูงประมาณ 20 เท่าของความกว้างช่องเปิด

- Affinity หรือ Developed zone ความเร็วของลำอากาศที่ระยะต่างๆ มีการกระจายตัวดังสมการ

$$\frac{U(x,y)}{U_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{7.67}{x} \left[ 1 - \tanh^2 \left( 7.67 \frac{y}{x} \right) \right]}$$

โดย  $U(x,y)$  คือ ความเร็วที่ตำแหน่งใดๆ

$U_0$  คือ ความเร็วขาออกของลำอากาศ

และสมการความเร็วกึ่งกลางลำอากาศคือ

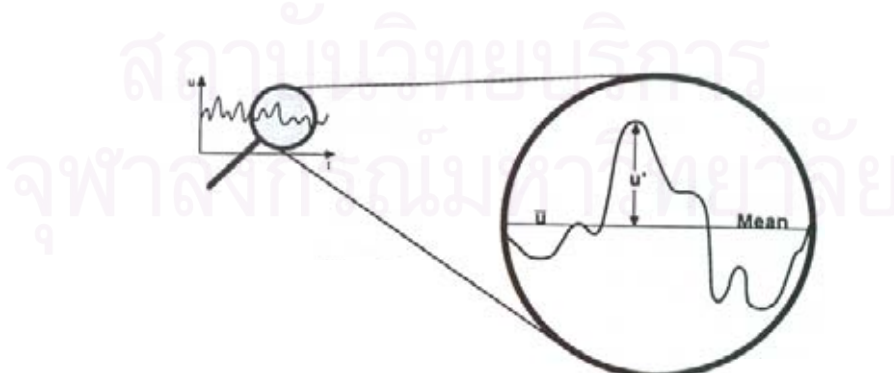
$$\frac{Uc(x)}{U_0} = C_1 \left( \frac{x}{e} - C_2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

โดย  $Uc(x)$  คือ ความเร็วกึ่งกลางลำอากาศ

ค่าคงที่  $1.9 < C_1 < 3.0$  และ  $-8 < C_2 < 10$

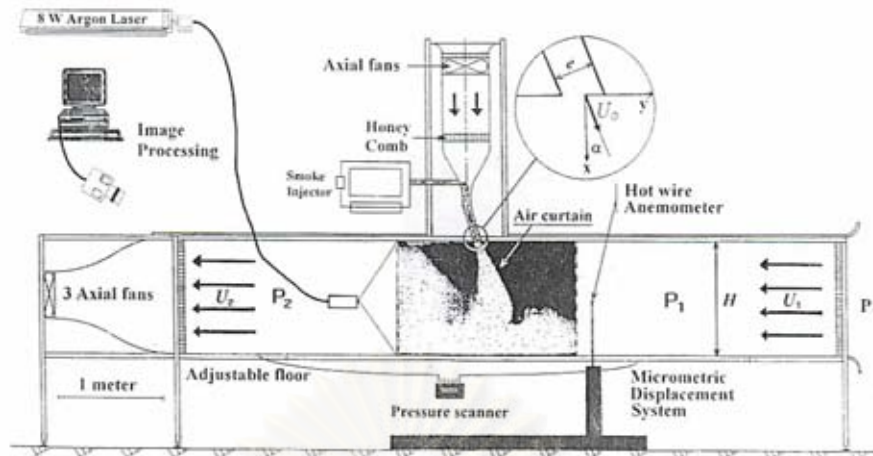
- Impinging หรือ recompression zone การเกิดบริเวณนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของลำอากาศ ซึ่งเป็นบริเวณที่ลำอากาศกระทบกับพื้น ซึ่งมีการประมาณความสูงของบริเวณนี้ไว้ที่ 15% ของความสูงลำอากาศทั้งหมด

การทดลองของงานวิจัยนี้ ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันของ Euler number ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อแรงเฉื่อย โดยฟังก์ชันต่างๆ ได้จากทฤษฎี  $\pi$ - Buckingham ได้แก่ อัตราส่วนทางเรขาคณิต;  $H/e$  (ค่า  $H$  = ความสูงของลำอากาศ และค่า  $e$  = ความกว้างของลำอากาศ) ค่า Reynolds number ( $\frac{U_0 e}{\nu}$ ) ค่า Turbulence intensity และมุมการเป่าของลมจากมา่านอากาศ อุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย อุโมงค์ลมขนาดกว้าง 1.4 ม. ยาว 8 ม. ปรับความสูงของพื้นในระดับ 0.2 ถึง 0.4 ม. มุมของมา่านอากาศในการทดลอง 30 องศาในแนวตั้งฉากกับพื้น ความกว้างช่องปล่อยลมปรับในระยะ 20, 40, 60, 80 มม. ปรับค่า Turbulence intensity ของลำอากาศ (เป็นความแปรปรวนเฉลี่ยของความเร็วของลำอากาศ ถ้าค่า turbulence intensity สูง ความเร็วของลำอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงมาก แสดงในรูปที่ 2.2) ได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 20%



รูปที่ 2.2 ความเร็วลม โดยค่า  $u'$  เป็นความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปจากความเร็วลมเฉลี่ย (ค่า  $\bar{u}$ ) Turbulence intensity จะสูง





รูปที่ 2.3 ลักษณะระบบ และอุปกรณ์ในงานวิจัยของ Guyonnuad และคณะ (2000)

จำแนกปัจจัยในการพิจารณาเป็น

- การทดลองโดยใช้ Free air ซึ่งมีสมการสำหรับความเร็วของลมที่แกนกลางผ่านอากาศต่อความเร็วต้นของผ่านอากาศดังนี้

$$\frac{U_c(x)}{U_0} = C_1 \left( \frac{x}{e} - C_2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

จากการทดลองด้วย Free air jet พบว่าเป็นไปตามสมการนี้ โดยค่า  $C_1 = 2.51$  และค่า  $C_2 = 0$

- รูปร่างและความโค้งของผ่านอากาศ ผลการทดลองพบว่าจากสมการความโค้งของลำอากาศสามารถประมาณได้จากความโค้งของวงกลมรัศมี  $R$  โดย  $R = \frac{\rho U_0^2 e}{\Delta P}$  นั้น ในทางปฏิบัติสำหรับลำอากาศที่เกิดการชนในระยะทางสั้นๆ สมการนี้จะไม่เป็นจริง

- อิทธิพลจาก Turbulence intensity พบว่าค่า Turbulence intensity ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของผ่านอากาศ

- อิทธิพลจากขนาดของแบบจำลอง ในการทดลองปรับขนาดของแบบจำลองในการทดลองตั้งแต่  $1/4$  ถึง  $1/1$  ทดลองที่อัตราส่วนเรขาคณิต  $\left(\frac{H}{e}\right)$  เป็น 12 พบว่าค่า Euler number มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมาตราส่วนเปลี่ยน และเมื่อทดลองที่ค่า Euler number เดียวกันจะต้องให้ความเร็วลมของผ่านอากาศแรงกว่าที่จำเป็น ซึ่งอาจก่อให้เกิดการไหลของลมในทิศทางตรงข้าม

- อิทธิพลจากอัตราส่วนทางเรขาคณิต  $\frac{H}{e}$  และความกว้างลำอากาศ พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน  $\frac{H}{e}$  และความหนาลำอากาศ ( $e$ ) จาก 20 ถึง 80 มม. และ 12 ถึง 48 มม. ตามลำดับ ค่า Euler number จะไม่คงที่ตามสภาวะทางเรขาคณิตเปลี่ยนไป

ซึ่งสามารถสรุปผลหลักๆ จากการวิจัยได้ดังนี้

- เมื่อความดันแตกต่างกันเพิ่มขึ้น เราสามารถตั้งค่าความเร็วลมของมาโนอากาศได้จากเกณฑ์ของ Euler ในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเรขาคณิต
  - ในช่วงค่า Turbulence intensity ตั้งแต่ 0 - 20% ค่า Turbulence intensity ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของมาโนอากาศ มีเพียงค่า mean flow rate เท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของมาโนอากาศ
  - การทำการ Extrapolation ของค่าขนาดทางเรขาคณิตในการลดขนาดของแบบจำลองไม่สามารถทำได้ จากผลการ extrapolation จาก Euler ซึ่งจะทำให้เกิดการ over-efficient
- การวิจัยของ Tso, C.P. และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและมวลในรถแข่งเป็นขนาดตัวถัง 2.84 ม. (กว้าง) × 1.64 ม. (ยาว) × 1.54 ม (สูง) และตัวถังสูงจากพื้น 0.9 ม. ขนาดประตู 1.25 ม. (สูง) × 0.7 ม. (กว้าง) ใช้มาโนอากาศขนาดกว้าง 0.9 ม. ติดตั้งเหนือประตู ความเร็วลม 9.5 ม./วินาที อัตราการไหลเชิงปริมาตร 18.2 ลบ.ม./วินาที ทำการทดลองในกรณีไม่มีมาโนอากาศ มีมาโนอากาศ และมีมาโนพลาสติกกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในรถแข่งเย็นกับภายนอก ในกรณีที่เปิดประตูห้องเย็นทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 นาที ทำการคำนวณความร้อนที่เข้าสู่ห้องเย็นได้จากสมการ

$$h = 1.006t + W(1.805t)$$

โดย  $h$  = enthalpy ของอากาศชื้น (กิโลจูล/กิโลกรัม)

$t$  = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

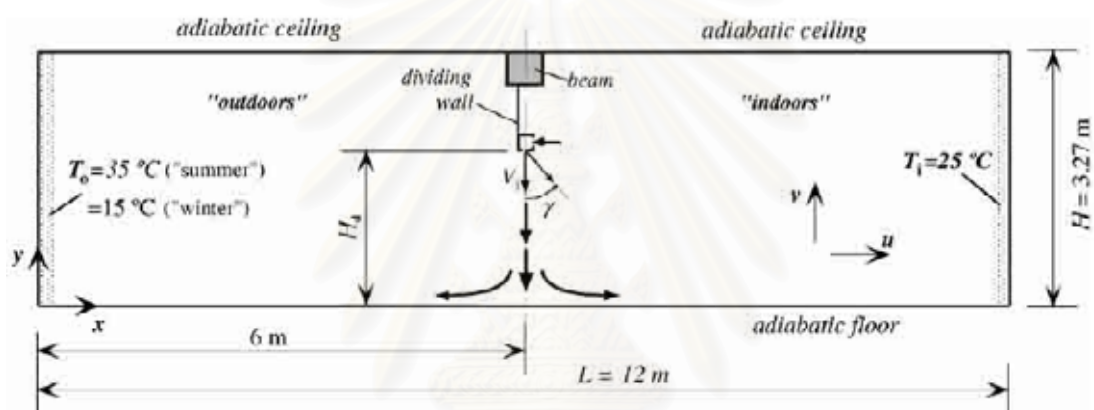
$W$  = humidity ratio ของอากาศแห้ง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Enthalpy ที่เปลี่ยนแปลงจากผลอุณหภูมิ และค่าความชื้นอากาศที่วัดได้ในแต่ละกรณี พบว่าการใช้มาโนอากาศสามารถลดความร้อนที่ผ่านเข้าไปได้มากกว่าการใช้มาโนพลาสติกกัน 11% (25 กิโลจูล) และลดความร้อนผ่านเข้าสู่ห้องเย็นได้ถึง 40% เมื่อเปรียบเทียบกับการปฏิบัติงานโดยไม่มีอุปกรณ์ใดๆ ขวางกัน

Bhattacharjee และ Loth (2004) ได้ทำการศึกษาสภาวะการไหลของมาโนอากาศสำหรับในห้องเย็น สังเกตผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ และความหนาของลำอากาศ สำหรับการไหลในช่วงสภาวะ laminar และ transition คำนวณโดยใช้แบบจำลอง direct numerical simulation (DNS) ร่วมกับสมการ Navier-Stokes ทำการสังเกตผลการกระจายตัวของความเร็วลมจากแบบจำลองพบว่า ที่  $Re = 100-700$  ซึ่งเป็นกรไหลแบบ laminar มีการไหลที่คงที่ โดยความหนาของลำอากาศจะลดลงเมื่อ  $Re$  สูงขึ้น ที่ค่า  $Re$  ระหว่าง 700-2000 เป็นช่วง Transition โดยพบว่าที่  $Re = 700$  เริ่มพบการไหลวน (eddy) และที่  $Re = 2000$  พบการไหลวนอย่างเด่นชัด โดยความหนาของลำอากาศเพิ่มขึ้นตาม  $Re$  ที่เพิ่มขึ้น (ทั้งในกรณีของโมเมนตัม และการกระจายตัวของอุณหภูมิ) ที่การทดสอบด้วยความเร็วลำอากาศต่างๆ กันจะพบว่า profile การไหลมีความลาดชันจะเกิดการกระจายตัวน้อยที่สุด และที่  $Re = 10000$  ไม่พบการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ และในกรณี  $Re$

=10000 นี้ค่า mean flow development มีค่าเท่ากับกรณี  $Re = 100$  โดยในสภาวะที่ค่า  $Re$  สูงมากจะมีการกระจายของโมเมนต์ที่กว้าง

ในงานวิจัยของ Costa และคณะ (2006) ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ผ่านลมในการกัน โดยทำการแบ่งห้องเป็น 2 ส่วนคือ ห้องภายนอก และห้องภายในขนาดห้องละ 6 ม.  $\times$  6 ม.  $\times$  3.27 ม. โดยผนังทุกด้านพิจารณาเป็น Adiabatic พิจารณาของไหลเป็นชนิดไม่สามารถอัดตัวได้ และพิจารณาระบบ Steady state โดยกำหนดให้ห้องภายในมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และห้องภายนอกกำหนดเป็น 2 กรณีคือในกรณีฤดูหนาว กำหนดผนังห้องภายนอกอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และกรณีฤดูร้อน กำหนดผนังห้องอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



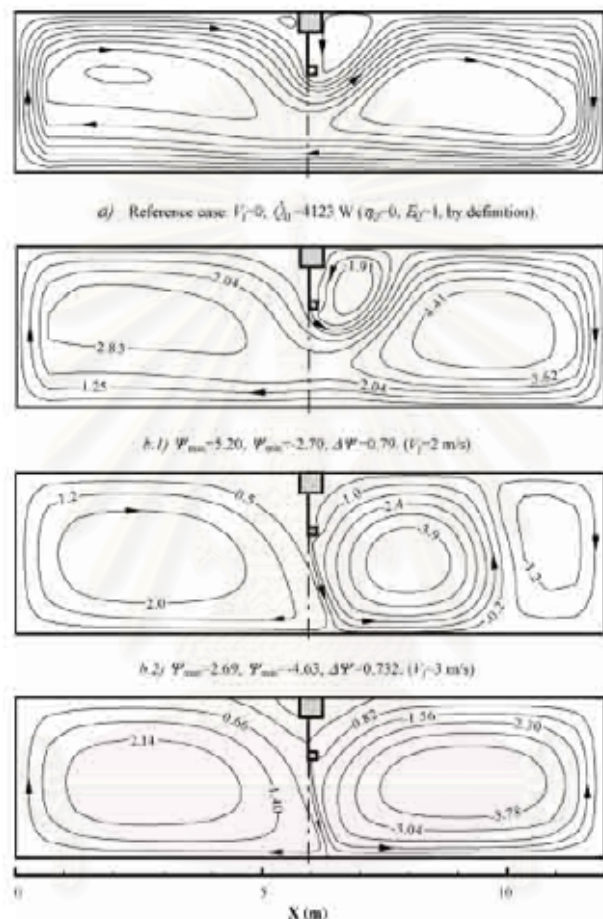
รูปที่ 2.4 ขนาด และลักษณะของห้องที่ได้ออกแบบในการทดลองของ Costa และคณะ (2006)

ใช้ Boussinesq approximation ในการพิจารณาคคุณสมบัติด้านกายภาพของของไหล แบบจำลองทำการคำนวณจากสมการอนุรักษ์มวล โมเมนต์ และพลังงานความร้อน ใช้แบบจำลอง k-e turbulent

โดยทำการทดลองที่ความเร็วลมจากมานอากาศ 0-9 เมตร/วินาที ความสูงมานอากาศ 2 และ 2.5 เมตร หรือคำนวณเป็นค่า  $H_d/b$  (อัตราส่วนความสูงมานอากาศต่อความหนาอากาศ) ได้ 44.4 และ 55.6 สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศ ทั้งในสภาวะฤดูหนาว และฤดูร้อนเป็นเช่นเดียวกับดังนี้

- (i) ในระบบการพาแบบธรรมชาติ (ความเร็วลมจากมานอากาศต่ำ หรือเป็นศูนย์) การไหลจะเกิดจากแรงลอยตัวเป็นหลักและจะมีการไหลวนเป็นวงแยกกัน ซึ่งเกิดจากการชนกับล้าอากาศแล้วไหลวนย้อนกลับ โดยพบว่าที่กรณีไม่เปิดใช้มานอากาศ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้มีค่าสูงที่สุด

- (ii) ที่ความเร็วลมจากม่านอากาศสูงขึ้น แรงเฉื่อยจะมีอิทธิพลต่อการไหลของอากาศอย่างเด่นชัด รูปร่างของลำอากาศจะคงที่และต่อเนื่องจนถึงพื้น รูปแบบการไหลไม่ขึ้นกับตัวเลข Reynolds
- (iii) ในช่วงความเร็วลมปานกลาง การไหลของอากาศในระบบจะขึ้นกับการพาทั้ง 2 ชนิด คือทั้งจากแรงลอยตัว และจากแรงเฉื่อย



รูปที่ 2.5 รูปแบบของเส้นกระแสความเร็ว (Streamline) ในสภาวะฤดูร้อน ที่  $H_d/b = 44.4$  และ มุมม่านอากาศ 0 องศา โดย (a) การพาโดยธรรมชาติ; (b.1) and (b.2) การพาจากทั้ง โดยธรรมชาติ และการพาจากแรงกระทำจากภายนอก และ (c) การพาโดยแรงกระทำ จากภายนอก

โดยความสม่ำเสมอของม่านอากาศพิจารณาจากความสมดุลระหว่างโมเมนต์พลิกซ์ของ ลำอากาศ และแรงต้านการลอยตัว โดยพิจารณาเป็นตัวเลขไร้มิติเรียกว่า Deflection modulus,  $D_m$  มีสมการดังนี้

$$D_m = \frac{\rho_i b V_j^2}{g H_d^2 |(\rho_o - \rho_i)|}$$

โดย  $\rho_i$  = ความหนาแน่นของของไหลภายในห้อง (กิโลกรัม เมตร<sup>-3</sup>)

$b$  = ความกว้างของลำอากาศ (เมตร)

$V_j$  = ความเร็วลำอากาศ (เมตร/วินาที)

$g$  = ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (เมตร วินาที<sup>-2</sup>)

$H_d$  = ความสูงของประตู่ (เมตร)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านมานอากาศทำการคำนวณจากการถ่ายเทความร้อน 2 ส่วน ร่วมกันประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนจากกลไกการแพร่ของโมเลกุลในการไหลแบบปั่นป่วน (Diffusive heat transfer rate) และการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกิดจากการพาของอากาศที่ไหลผ่าน ประตู่ (Advective heat transfer rate) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากสมการ

$$E_Q = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}}$$

โดย  $E_Q$  = ผลการลดการถ่ายเทความร้อน

$\dot{Q}_0$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อไม่ใช้มานอากาศ

$\dot{Q}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้มานอากาศ

ซึ่ง  $E_Q = 1$  หมายถึงมานอากาศไม่มีผลต่อการลดการถ่ายเทความร้อน และที่  $E_Q = \infty$  หมายถึง มานอากาศสามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างสมบูรณ์ และพิจารณาการประหยัดพลังงาน จากค่า  $\eta_Q$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทมวลที่เปลี่ยนแปลงต่ออัตราการถ่ายเทมวลเมื่อ ไม่ใช้มานอากาศ มีสมการดังนี้

$$\eta_Q = 1 - \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_0}$$

โดย  $\eta_Q = 0$  หมายถึง ไม่เกิดการลดการถ่ายเทความร้อน และ  $\eta_Q = 1$  หมายถึง สามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างสมบูรณ์

ซึ่งผลจากการคำนวณในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงการไหลของอากาศ และอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลต่อปรากฏการณ์ในการพามวลสาร และความร้อน โดยจากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนความเร็ว และความสูงของมานอากาศ เพื่อให้ได้ค่า Deflection modulus สูงกว่า 0.6 จะเป็นค่าที่ มานอากาศสามารถปฏิบัติงานได้ใกล้เคียงภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถประหยัดพลังงาน ( $\eta_Q$ ) ได้ 75-80% นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับมุมการเป่าของมานอากาศออกสู่ภายนอก 15-20 องศา จะช่วยเพิ่มผลของมานอากาศในการลดการถ่ายเทมวล ( $E_Q$ ) ประมาณ 70% อย่างไรก็ตาม พบว่าการติดตั้งมานอากาศด้วยมุมนี้ส่งผลให้ความสม่ำเสมอที่ชั้นล่างของมานอากาศในสภาวะฤดูหนาวลดลง

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

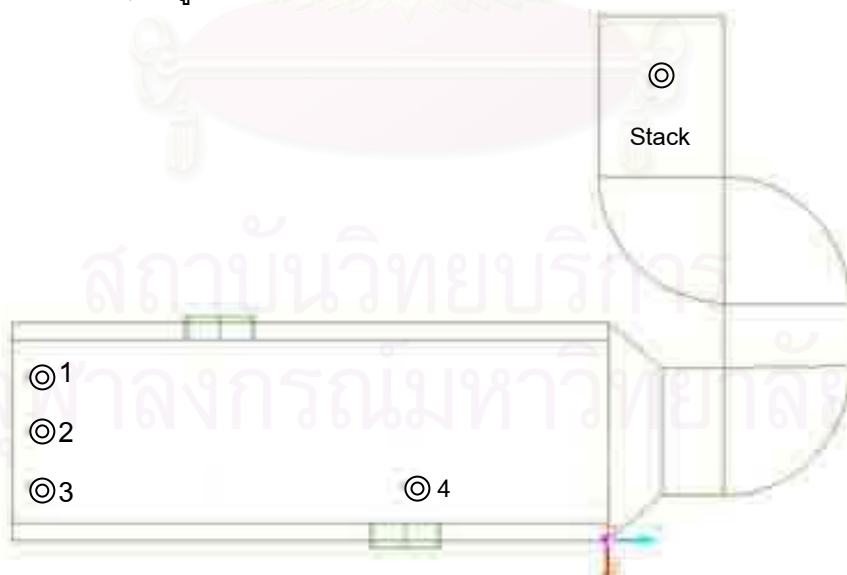
#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 เตาเผา

- ขนาดภายนอกเตาเผา 54x120x54 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง)
- ขนาดภายในเตาเผา 30x120x30 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง)
- ขอบเตาเผาหนา 10 ซม. ใช้แผ่นเซรามิกไฟเบอร์เป็นวัสดุสำหรับทำฉนวนภายในเตาเผา
- Blower ป้อนอากาศเพื่อทำการสันดาปกับก๊าซ LPG กำลัง 1/2 แรงม้า จำนวน 2 ตัว
- Blower สำหรับดูดก๊าซภายในเตาเผาออกทาง Stack กำลัง 1 แรงม้า จำนวน 1 ตัว
- ช่องเปิดบานลมมีขนาด 8x120 ซม. (กว้างxยาว) กำลังของพัดลม 1/4 แรงม้า

##### 3.1.2 อุปกรณ์การวัด

3.1.2.1 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ ใช้อุปกรณ์ Flue gas analyzer สำหรับวัดอุณหภูมิในเตาเผาที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 1

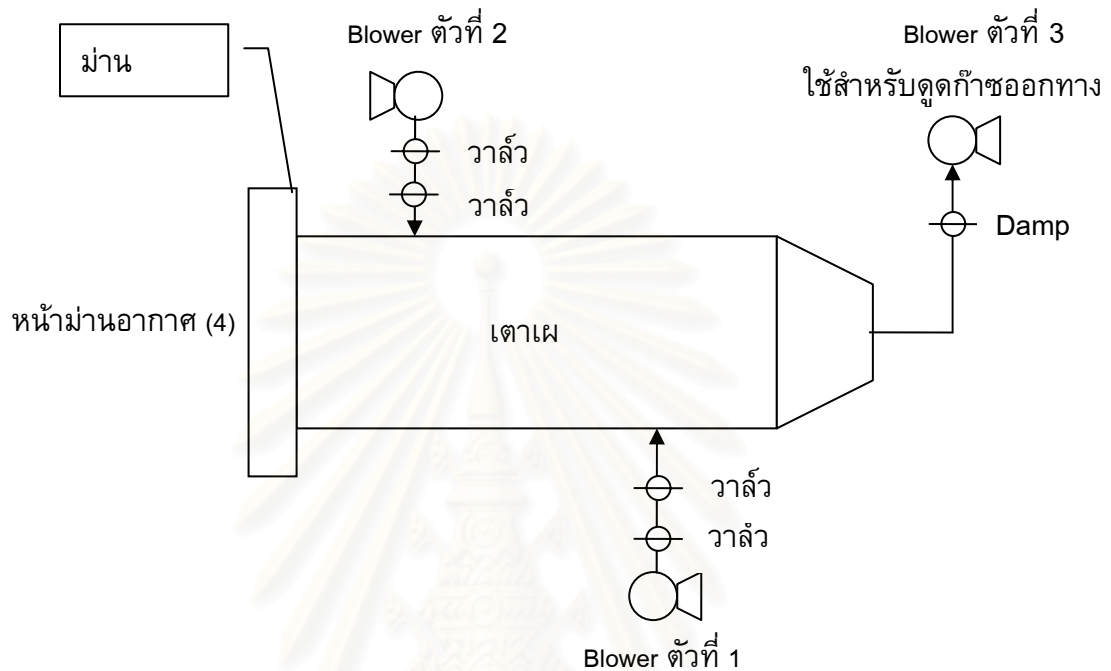


รูปที่ 3.1 ตำแหน่งสำหรับวัดอุณหภูมิ ออกซิเจนส่วนเกิน และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

##### 3.1.2.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

- Gas flow meter สำหรับวัดปริมาตรก๊าซ LPG ที่ทำการป้อนเข้าสันดาปกับอากาศ

- Anemometer สำหรับวัดความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าทาง Blower ป้อนอากาศทั้ง 2 ตัว วัดความเร็วอากาศที่ถูก Blower ดูดก๊าซที่ Stack ดูดออก และวัดความเร็วลมหน้าม่านลม สำหรับตำแหน่งการติดตั้ง Blower แต่ละตัวสำหรับป้อนอากาศ และดูดอากาศออกจาก Stack แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง Blower วาล์ว และม่านอากาศ

ในการทดลองได้ทำการตั้งสภาวะของ Blower ดังนี้

- Blower ตัวที่ 1 เพื่อทำการป้อนอากาศเข้าสันดาปกับเชื้อเพลิง ประกอบด้วยวาล์ว A และ B สำหรับใช้ในการปรับอัตราการป้อนอากาศ
- Blower ตัวที่ 2 จะทำการปิดวาล์ว C และ D แต่เนื่องจากไม่สามารถปิดได้สนิท จึงมีอากาศไหลเข้าสู่เตาเผาเป็นปริมาณเล็กน้อย
- Blower ตัวที่ 3 จะทำการดูดก๊าซในเตาเผาให้ไหลออกทางท่อ Stack ใช้ Damper ในการปรับอัตราการไหลของก๊าซ

### 3.2 วิธีทดลอง

เนื่องจากมีปัญหาในการใช้อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ ซึ่งไม่สามารถทำการวัดในช่วงอุณหภูมิที่สูงมากได้ ทำให้ไม่สามารถวัดอัตราการไหลของก๊าซเผาไหม้ที่ไหลออกทาง Stack หลังทำการสันดาปได้ จึงทำให้ต้องปรับรูปแบบการทดลอง โดยจะทำการวัดอัตราการไหลของอากาศ

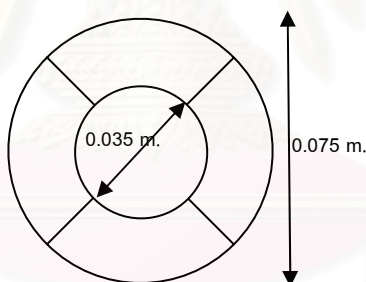
ภายในเตาเผา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนที่ตำแหน่งต่างๆ ของเตาเผา เพื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผา

ในการศึกษานี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- (1) ศึกษาอิทธิพลของม่านอากาศที่มีต่อการไหลเวียนของอากาศในเตาเผา และ
- (2) อิทธิพลของม่านอากาศที่มีต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทพลังงานในเตาเผา

### 3.2.1 การวัดอัตราการไหลของอากาศ

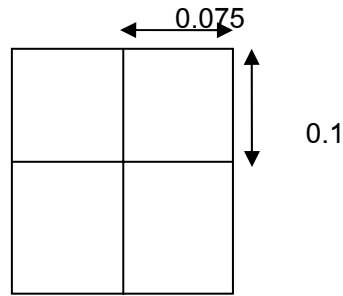
ในการทดลองจะทำการศึกษาอัตราการไหลของอากาศสำหรับทำนายพฤติกรรมของการไหลภายใน เพื่อเป็นส่วนช่วยในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาเผา ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ เนื่องจากไม่สามารถระบุ Profile การไหลของอากาศที่เข้าทางท่อดูดจาก Blower ได้อย่างแน่นอนจึงทำการแบ่งพื้นที่ทำการวัดความเร็วลม สำหรับ Blower ดูดอากาศเข้าสู่เตาเผาจะทำการแบ่งพื้นที่วัดความเร็วลมออกเป็น 5 ส่วน และมีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยให้พื้นที่จุดกึ่งกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 m. เพื่อให้ได้พื้นที่ใกล้เคียงกัน และแบ่งพื้นที่ที่เหลืออีก 4 ส่วนเท่าๆ กัน เป็นบน ล่าง ซ้าย ขวา จากนั้นนำค่าความเร็วลมที่วัดได้จากแต่ละพื้นที่มาคำนวณหาอัตราการไหล (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.3 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของ Blower ที่ทำการดูดลมเข้าสู่เตาเผาสำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

และสำหรับความเร็วลมที่ไหลออกจาก Stack ซึ่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม จึงทำการแบ่งพท. หน้าตัดที่ออกออกเป็น 4 ส่วน ทำการคำนวณโดยนำพื้นที่หน้าตัดคูณกับความเร็วลมแต่ละจุด จะได้เป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของจุดนั้นๆ ดังรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก





รูปที่ 3.4 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของช่องทางออก Stack

ในการทดลองจะทำการปรับวาล์ว Blower ตัวที่ 2 ซึ่งใช้สำหรับป้อนอากาศเข้าทำการสันดาปกับเชื้อเพลิง โดยท่อป้อนอากาศไปทำการสันดาปประกอบด้วยวาล์ว 2 ตัวคือ วาล์วตัวใน (วาล์ว A) และวาล์วตัวนอก (วาล์ว B) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยทำการปรับวาล์วเป็น 2 กรณีคือ

- ปรับวาล์ว A ที่ 50% และวาล์ว B ที่ 40%
- ปรับวาล์ว A ที่ 50% และวาล์ว B ที่ 50%

### 3.2.2 การวัดอุณหภูมิ อัตราส่วนออกซิเจน และอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

เนื่องจากอุปกรณ์วัดค่าอัตราการไหลของก๊าซไม่สามารถวัดได้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ไม่สามารถวัดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ Stack ขณะทดลองโดยใช้เชื้อเพลิง และไม่สามารถคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนหน้าผานอากาศได้ ดังนั้นจะนำค่าที่ได้จากการวัดโดยอุปกรณ์ Flue gas analyzer ที่ตำแหน่งต่างๆ ในเตาเผา มาเปรียบเทียบความสามารถในการลดการสูญเสียความร้อนจากการใช้งานमानलमที่สภาวะต่างๆ โดยตำแหน่งที่ทำการวัดแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

- ตำแหน่งหน้าปากเตาเผาใกล้मानलमจำนวน 3 จุด คือตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3
- ตำแหน่งใกล้หัวเผา 1 จุด คือตำแหน่งที่ 4
- ท่อดูดก๊าซทาง Stack หน้า damper 1 จุด

โดยค่าที่วัดได้ประกอบด้วย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิก๊าซผลิตภัณฑ์ ปริมาณออกซิเจน และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

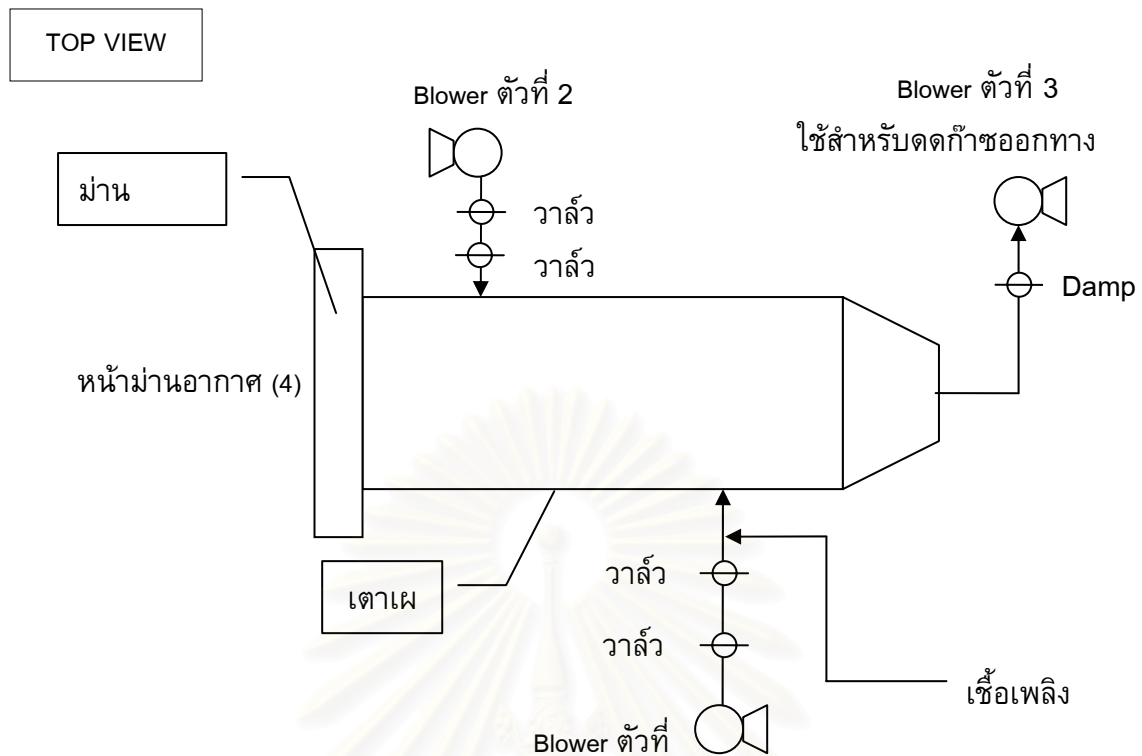
เนื่องจากเตาเผาที่ใช้ในการวิจัยมีลักษณะเป็นเตาแนวราบ ทำการป้อนชิ้นงานเข้าทางหน้าปากเตา มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ป้อนเข้ามาในเตาให้สม่ำเสมอ ดังนั้นการดึงความร้อนมาสู่บริเวณหน้าปากเตาเพื่อให้อุณหภูมิทั่วทั้งเตามีค่าใกล้เคียงกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น จะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงตั้งแต่บริเวณหน้าเตาจนถึงบริเวณท้ายเตามีการกระจายความร้อนตลอดทั้งเตาส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามหนึ่งในปัจจัยที่จะก่อให้เกิดผลที่กล่าวข้างต้นได้คือ อากาศพลศาสตร์ภายในเตา ในการศึกษาครั้งนี้จึงแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน เพื่อศึกษาผลของม่านลมที่มีต่ออากาศพลศาสตร์ภายในเตา โดยการศึกษาแบ่งการทดลองออกได้ดังนี้

1. รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาก่อนทำการสันดาป และไม่เปิดม่านอากาศ
2. รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเมื่อทำการสันดาป และไม่เปิดม่านอากาศ
3. รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาก่อนทำการสันดาป และเปิดม่านอากาศ
4. รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเมื่อทำการสันดาป และเปิดม่านอากาศ

#### 4.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาก่อนทำการสันดาป และไม่เปิดม่านอากาศ

ทำการทดลองโดยการเปิด Blower ดูดอากาศออกจาก Stack และเปิดวาล์ว Blower ตัวที่ 1 โดยเปิดวาล์ว A เป็น 50% และ B เป็น 40% และปิดวาล์ว C และ D ของ Blower ตัวที่ 2 ทำการทดลองและเก็บข้อมูลสำหรับ 3 กรณีของการปรับเปลี่ยนร้อยละการเปิด damper ที่ 3 ค่า คือ 0% 50% และ 100% และทำการวัดอัตราการไหลของอากาศ 3 ตำแหน่งประกอบด้วย

- ตำแหน่งที่ 1 คือตำแหน่งช่องป้อนอากาศของ Blower ตัวที่ 1
- ตำแหน่งที่ 2 คือตำแหน่งช่องป้อนอากาศของ Blower ตัวที่ 2
- ตำแหน่งที่ 3 คือตำแหน่งปากทางออกของ Stack



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย หม้ออากาศ Blower ตัวที่ 1, 2 และ 3 และตำแหน่งการติดตั้งวาล์วแต่ละตัว (มุมมองจากด้านบน)

เนื่องจากทำการทดลองในสภาวะปกติคือที่อุณหภูมิห้อง จึงตั้งสมมติฐานให้ความหนาแน่นอากาศมีค่าคงที่ แล้วทำการคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับทำดุลมวลเพื่อหาอัตราการไหลที่หน้าหม้ออากาศได้จากสมการ

$$Q_4 = Q_1 + Q_2 - Q_3 \quad (1)$$

โดย  $Q_1$  = อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ Blower ตัวที่ 1  
 $Q_2$  = อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ Blower ตัวที่ 2  
 $Q_3$  = อัตราการไหลของอากาศที่ไหลออกทาง Stack (ถูกดูดโดย Blower ตัวที่ 3)  
 $Q_4$  = อัตราการไหลของอากาศออกทางหน้าหม้ออากาศ (เป็น + เมื่ออากาศไหลออกหน้าหม้ออากาศ, เป็น - เมื่อมีการดูดอากาศจากหน้าหม้ออากาศเข้าสู่เตาเผา)

สำหรับผลจากการวัดอัตราการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ และอัตราการไหลหน้าปากเตาเผาที่คำนวณได้จากสมการ (1) แสดงในตารางที่ 4.1

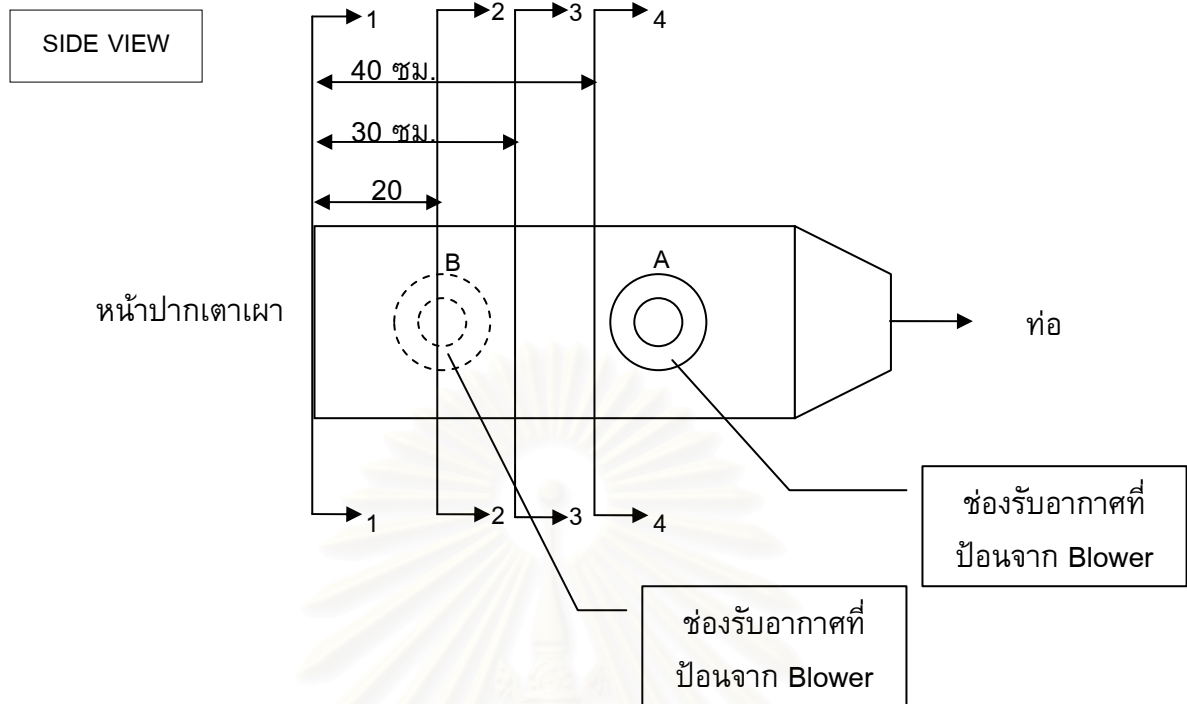
ตารางที่ 4.1 อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิด Damper 0%, 50% และ 100% ทดลองเมื่อไม่เปิดม่านอากาศ และไม่ทำการสันดาป

ตำแหน่งที่ทำการวัด อัตราการไหลอากาศ	เปอร์เซ็นต์ความกว้างของ Damper		
	0%	50%	100%
Blower ตัวที่ 1	108.48	106.23	110.36
Blower ตัวที่ 2	10.20	9.00	9.12
ช่องเปิดทางออกของ Stack	101.64	219.38	261.45
ปากเตาเผา (จากการคำนวณ)	17.04	-104.15	-141.97

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการเปิด Damper 0% ส่งผลให้มีอากาศภายในเตาไหลออกสู่ภายนอกบริเวณปากเตา ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการเปิด Damper ที่ 50% และที่ 100% อากาศจะไหลจากปากเตาเผาเข้าสู่ภายในเตาเผามากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความดันภายในเตามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปิดและเปิด damper ในกรณีที่ปิด damper จะมีการสะสมอากาศที่ป้อนเข้ามาในเตา ส่งผลให้ความดันภายในเตาสูงกว่าบรรยากาศรอบข้าง เมื่อเปิด damper จะเกิด natural draft ส่งผลให้ความดันภายในเตาลดลง อากาศจึงเข้ามาจากปากเตาได้มากขึ้น และเมื่อเปิด damper กว้างมากขึ้น อากาศจะเข้าจากปากเตาได้มากยิ่งขึ้น

เพื่อพิจารณาทิศทางการไหลและความเร็วอากาศที่หน้าตัดตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเผา ดังรูปที่ 4.1 จึงแบ่งพื้นที่ในตำแหน่งข้างต้นออกเป็น 25 ส่วน (ส่วนละ 5 x 5 ซม.) ทำการวัดความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศบริเวณหน้าเตา นำข้อมูลที่วัดได้มาทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในเตาเผาสำหรับกรณีการเปิด Damper ที่ความกว้างต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 หน้าตัดที่ทำการวัดรูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผา

สำหรับการอธิบายทิศทางการไหลของอากาศของพื้นที่ย่อยแสดงดังนี้

- ● อากาศไหลในทิศตรงสู่สายตา
- ↓ อากาศไหลในทิศลง
- ↑ อากาศไหลในทิศขึ้น
- → อากาศไหลในทิศออกด้านขวา
- ← อากาศไหลในทิศออกด้านซ้าย

สำหรับความเร็วอากาศแสดงในหน่วย ม./วินาที โดยเป็นบวกเมื่อมีทิศทางออกจากเตาเผา และเป็นลบเมื่อมีทิศทางเข้าสู่เตาเผา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

↖	↘	↘	0	0
1.3	0.6	0.6	0	0
↘	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
↗	↗	↗	0	0
1.5	1.2	0.5	0	0

หน้าตัด 4-4

↓	↘	→	0	0
1.1	0.8	0.4	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
•	→	→	→	→
0.9	0.7	0.6	0.4	0.1

หน้าตัด 3-3

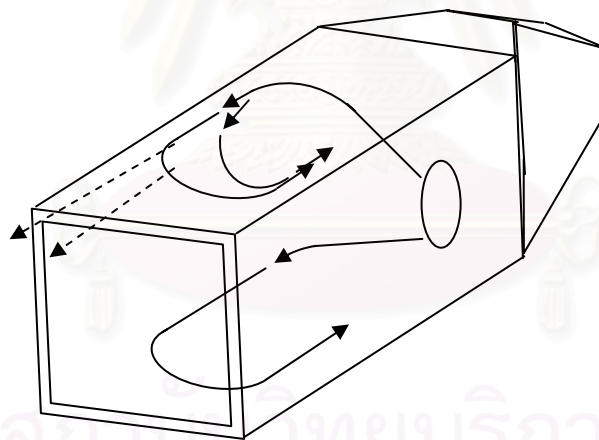
•	↘	0	0	0
0.7	0.8	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
•	↗	0	0	0
0.7	0.5	0	0	0

หน้าตัด 2-2

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 1-1

รูปที่ 4.3 ความเร็ว และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่หน้าตัดต่างๆ เมื่อเปิด Damper ของ Stack 0% (หน่วย ม./วินาที)



รูปที่ 4.4 รูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผาซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลความเร็ว และทิศทาง ในรูป 4.3 เมื่อเปิด Damper ของ Stack 0%

จากผลการวัดความเร็วบริเวณหน้าตัดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 นำซึ่งคำอธิบายรูปแบบการไหลภายในเตาได้ดังรูปที่ 4.4 อากาศจาก Blower ตัวที่ 1 ซึ่งถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาทางผนังด้านขวาในทิศทางตั้งฉากกับผนังเตา อากาศที่เข้าเกิดการกระทบผนังเตาเผาด้านซ้ายซึ่งอยู่ตรงกันข้าม จากนั้นจึงกระจายตัววิ่งออกไปตามขอบเตาทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยส่วนใหญ่จะวิ่งออกไปทาง Stack ในขณะที่อากาศส่วนหนึ่งไหลออกมาทางปากเตาเผา โดยจะเกิดการไหลวนของอากาศขึ้นภายในเตาตามรูปที่ 4.4

↙	0	↘	0	0
0.5	0	0.4	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
↙	→	0	0	0
-0.1	-0.3	0	0	0
↖	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0

หน้าตัด 4-4

↙	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 3-3

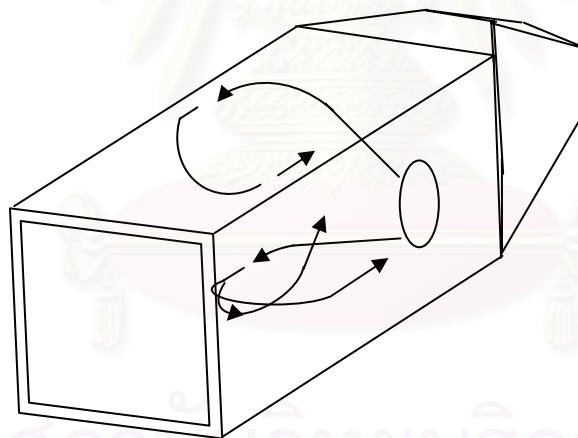
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 2-2

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 1-1

รูปที่ 4.5 ความเร็ว และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่หน้าตัดต่างๆ เมื่อเปิด Damper ของ Stack 50% (หน่วย ม./วินาที)



รูปที่ 4.6 รูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผาซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลความเร็ว และทิศทาง ในรูป 4.5 เมื่อเปิด Damper ของ Stack 50%

จากผลของรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเปิด Damper 50% สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.6 ว่าอากาศที่เข้าทาง Blower ตัวที่ 1 จากด้านขวาไหลมากระทบผนังเตาเผาด้านซ้าย และเกิดการกระจายตัววิ่งไปตามขอบเตาเช่นเดียวกับกรณีเปิด Damper 0% หากแต่ปริมาณอากาศที่ไหลมาทางด้านหน้าเตาจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยอากาศส่วนที่ไหลบริเวณมุมบนด้านซ้ายยังมีการไหลออกไปจนถึงบริเวณระหว่างหน้าตัด 3-3 และ 2-2 แล้วเกิดการไหลย้อนกลับ ส่วนอากาศที่มุมล่างด้านซ้ายของเตาเผามีการไหลย้อนกลับตั้งแต่บริเวณหน้าตัด 4-4

↖	↖	↗	0	0
0.6	0.3	0.4	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	↗	0	↖
0	0	-0.2	0	-0.2
0	0	0	0	0

หน้าตัด 4-4

↖	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0
0	0	0	0	↖
0	0	0	0	-0.2
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 3-3

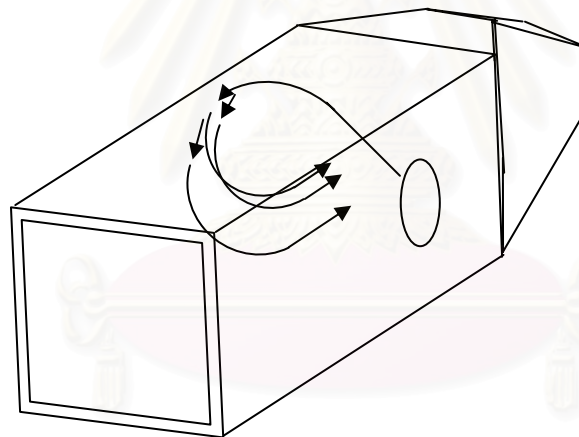
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 2-2

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

หน้าตัด 1-1

รูปที่ 4.7 ความเร็ว และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่หน้าตัดต่างๆ เมื่อเปิด Damper ของ Stack 100% (หน่วย ม./วินาที)



รูปที่ 4.8 รูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาเผาซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลความเร็ว และทิศทาง ในรูป 4.7 เมื่อเปิด Damper ของ Stack 100%

จากผลของรูปที่ 4.7 เมื่อเปิด Damper 100% สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.8 ในลักษณะเดียวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อเปิด Damper 50% อากาศไหลเข้ามากกระทบผนังทางฝั่งตรงข้าม จากนั้นแยกออกจากกันส่งผลให้เกิดการไหลวนของอากาศภายในเตา แต่ระยะการไหลวนของอากาศภายในเตาอาจสั้นลงกว่าเมื่อเปิด Damper 100% เนื่องจากมีอากาศเข้ามาจากทางด้านหน้าเตามากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากผลการวัดความเร็วลมและทิศทางการไหลภายในเตาเผาจากการเปิด Damper ทั้ง 3 กรณีนี้อาจกล่าวได้โดยสรุปว่า การป้อนอากาศเข้าทางผนังด้านข้างของเตาเผาจะก่อให้เกิดการ



ไหลวนภายในเตาระหว่างปากเตาและจุดป้อนอากาศ โดยสัดส่วนของอากาศที่ไหลไปทางหน้าปากเตามากน้อยนั้นขึ้นกับอัตราการดูดอากาศออกจาก Stack หากมีการดูดอากาศออกมากทำให้อากาศไหลไปสู่หน้าปากเตาน้อยลง และเกิดการไหลวนในวงที่จำกัดแคบลง

#### 4.2 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเมื่อทำการสันดาป และไม่เปิดผ่านอากาศ

ผลของการเปิด Damper ในระดับต่างๆ (0%, 50% และ 100%) ที่มีต่ออุณหภูมิ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตา เมื่อทำการป้อนอากาศ และเชื้อเพลิงเข้าทาง Stack ตัวที่ 1 เพื่อทำการสันดาป แสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิภายในเตาเผา ความเข้มข้นออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบเมื่อทำการเปิด Damper 0%, 50% และ 100% โดยปิดผ่านอากาศ

		Damper 0 %	Damper 50 %	Damper 100 %
อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	47.0	44.3	42.0
	ตำแหน่ง 2	47.8	44.8	42.7
	ตำแหน่ง 3	48.4	44.9	42.1
	ตำแหน่ง 4	47.7	44.7	42.2
	Stack	47.4	45.0	42.1
อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่วัด (องศา เซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	337.2	196.3	138.9
	ตำแหน่ง 2	354.8	182.2	145.6
	ตำแหน่ง 3	357.8	174.2	140.2
	ตำแหน่ง 4	648.1	461.3	357.8
	Stack	700.0	554.5	482.1
เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน	ตำแหน่ง 1	19.0	21.1	21.3
	ตำแหน่ง 2	18.8	21.2	21.3
	ตำแหน่ง 3	18.8	21.2	21.3
	ตำแหน่ง 4	16.5	19.4	20.2
	Stack	11.4	16.4	17.5
ความเข้มข้น คาร์บอนมอนนอกไซด์ (ppm)	ตำแหน่ง 1	51.5	6.7	4.0
	ตำแหน่ง 2	71.5	11.3	17.0
	ตำแหน่ง 3	84.5	5.0	7.0
	ตำแหน่ง 4	965.5	582.7	431.3
	Stack	2.5	262.7	253.7

		Damper 0 %	Damper 50 %	Damper 100 %
อัตราการไหล (ลบ.ม.ต่อวินาที)	Blower ตัวนอก	97.31	97.21	97.73
	Blower ตัวใน	8.44	8.79	8.60
อัตราไหลของแก๊ส (ลบ.ม.ต่อชม.)		0.48	0.48	0.48

จากข้อมูลในตารางข้างต้น รูปแบบการไหลภายในเตาเผาที่เกิดขึ้นกรณีไม่ใช้มานอากาศสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

#### เมื่อเปิด Damper 0%

##### ที่ตำแหน่ง 4 (บริเวณหัวเผา)

- บริเวณหัวเผา อากาศและเชื้อเพลิงจะผสมกันและเริ่มปฏิกิริยาการสันดาป เมื่อทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ณ บริเวณดังกล่าวพบว่ามีค่าในปริมาณที่สูง แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งหมายถึงในบริเวณดังกล่าวมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศที่เข้ามาทำปฏิกิริยาด้วยมาก

##### ที่ตำแหน่ง Stack

- จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 ก่อนหน้านี้ก๊าซเผาไหม้ภายในเตาส่วนใหญ่จะถูกดูดออกจาก Stack โดยก๊าซมีระยะเวลาเพียงพอที่เกิดการสันดาปจนเกือบสมบูรณ์ ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.2 จะพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพียง 2.5 ppm อุณหภูมิที่วัดได้ที่ Stack จึงมีค่าสูงใกล้เคียงบริเวณหัวเผา

##### ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 (หน้าปากเตาเผา)

- ก๊าซเผาไหม้อีกส่วนหนึ่งจะไหลมาออกทางหน้าเตาเผา ทำให้อุณหภูมิบริเวณหน้าเตาสูงกว่าภายนอก แต่จะต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาบริเวณหัวเผา เนื่องจากก๊าซเผาไหม้ถูกทำให้ต่ำลงโดยอากาศที่ป้อนเข้ามาจาก Blower ตัวที่ 2 และอากาศส่วนนี้ยังอาจส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้เคลื่อนตัวออกจากเตาเร็วขึ้นจนการสันดาปยังเกิดขึ้นได้ไม่มาก พิจารณาได้จากการที่มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างสูงในบริเวณหน้าเตา นี้ นอกจากนั้นยังมีก๊าซที่ไหลมาทางด้านหน้าเตาส่วนหนึ่งจะเกิดการไหลวนกลับ ตามรูปแบบการไหลภายในเตาเผาดังที่อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1 (รูปที่ 4.2) ส่งผลให้ความร้อนไม่ถูกพามาถึงบริเวณหน้าเตา ในขณะที่มีอากาศใหม่เข้ามาโดย blower ตัวที่ 2 ซึ่ง อาจเป็นอีกสาเหตุที่ส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนด้านหน้าเตาต่ำลง

สำหรับกรณีการเปิด Damper 0% สามารถวิเคราะห์ในภาพรวมได้ว่า รูปแบบการไหลเป็นไปตามที่พบในการทดลองตอนที่ 4.1 คือก๊าซเผาไหม้ที่ไหลวนจากบริเวณหัวเผามายังปากเตาส่วนหนึ่งเกิดการไหลออก อีกส่วนหนึ่งเกิดการไหลวนกลับสู่บริเวณหัวเผา โดยก๊าซเผาไหม้ใน

ส่วนดังกล่าวนี้ยังคงไม่เกิดการสันดาปโดยสมบูรณ์ พิจารณาจากร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ สำหรับก๊าซเผาไหม้ส่วนใหญ่ไปทาง Stack นั้นสามารถเกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์เนื่องจากอัตราการไหลออกที่ต่ำทำให้มีเวลาในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้นาน

### เมื่อเปิด Damper 50%

#### ที่ตำแหน่ง 4 (บริเวณหัวเผา)

– การเปิด Damper กว้างขึ้น มีผลให้เกิดการดึงอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผาผ่านทางปากเตา (จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 และตารางที่ 4.1) เกิดการผสมของอากาศที่ไหลเข้าทางปากเตากับเชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้าทางหัวเผา ทำให้สัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่บริเวณหัวเผามีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิต่ำลง ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนสูงขึ้น และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำลงเมื่อเทียบกับกรณีเปิด Damper 0%

#### ที่ตำแหน่ง Stack

– จากข้อมูลการวัดบริเวณ Stack พบว่าความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำลง และอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ 4 (บริเวณหัวเผา) แสดงให้เห็นว่าเกิดการสันดาปอย่างต่อเนื่องของก๊าซเผาไหม้จากหัวเผาไหลไปทาง Stack ทำให้อุณหภูมिवัดบริเวณ Stack สูงกว่าที่หัวเผา และจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ (ตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปิด Damper 50% ก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผาจะถูกดูดด้วยอัตราการไหลที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเปิด Damper 0% อากาศและเชื้อเพลิงมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเผาไหม้สั้นลง จึงพบการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซบริเวณ Stack

#### ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 (หน้าปากเตาเผา)

– การที่อากาศภายนอกถูกดูดเข้าสู่เตาเผามากขึ้น และระยะการไหลวนของก๊าซเผาไหม้ในเตาเผาสั้นลง ทำให้เกิดการเจือจางของก๊าซเผาไหม้บริเวณหน้าปากเตา ซึ่งพิจารณาได้จากความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณปากเตาที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเปิด Damper 0% และมีค่าใกล้เคียงกับอากาศ (ร้อยละ 21) ทำให้การพาความร้อนจากการสันดาปโดยก๊าซเผาไหม้ไปสู่หน้าเตาเผาลดลง อุณหภูมिवัดบริเวณหน้าเตาจึงต่ำกว่ากรณีเปิด Damper 0% นอกจากนี้ การเจือจางของอากาศที่ไหลเข้าจากหน้าปากเตายังอาจส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการสันดาปภายในเตาเผา ซึ่งในการทดลองนี้ ยังไม่สามารถทำการระบุได้แน่ชัดว่าผลของการเจือจางโดยอากาศจากหน้าเตาต่อปฏิกิริยาการสันดาปเป็นเช่นไร

สำหรับกรณีการเปิด Damper 50% สามารถวิเคราะห์ได้ในภาพรวมว่าอากาศจากภายนอกที่ไหลเข้าทางปากเตาส่งผลต่อทั้งรูปแบบการไหลวนของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาให้อยู่ในวงที่จำกัดแคบลง และการเจือจางของก๊าซเผาไหม้ ทำให้ความร้อนจากการสันดาปถูกพามา

บริเวณปากเตาได้น้อยลง ในขณะที่ความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ของก๊าซซึ่งไหลไปทาง Stack จะลดลง เป็นผลจากอัตราการไหลออกทาง Stack ที่สูงขึ้น

#### เมื่อเปิด Damper 100%

##### *ที่ตำแหน่ง 4 (บริเวณหัวเผา)*

- เมื่อเปิด Damper กว้างที่สุด อัตราการไหลของอากาศภายนอกจากปากเตาเข้าสู่เตาเผามากขึ้น การเจือจางของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาจึงสูงสุด ส่งผลให้อุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์บริเวณหัวเผาต่ำที่สุด ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เปิด Damper 0% และ 50%

##### *ที่ตำแหน่ง Stack*

- จากข้อมูลปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ Stack ที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ 4 (บริเวณหัวเผา) แสดงให้เห็นว่าเกิดการสันดาปอย่างต่อเนื่องของก๊าซเผาไหม้จากหัวเผาไหลไปทาง Stack ทำให้อุณหภูมิบริเวณ Stack สูงกว่า และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าที่หัวเผา แต่จากการที่ก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผาถูกดูดออกทาง Stack มากขึ้น อากาศและเชื้อเพลิงมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเผาไหม้สั้นลง การเผาไหม้บริเวณ Stack จึงไม่สมบูรณ์เท่าเมื่อเปิด Damper 0% แต่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้ที่ Stack ค่อนข้างใกล้เคียงกับกรณีการเปิด Damper 50% แสดงให้เห็นถึงผลของการเจือจางโดยอากาศจากภายนอกที่ถูกดูดเข้าทางปากเตา

##### *ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 (หน้าปากเตาเผา)*

- อิทธิพลของการไหลของอากาศจากภายนอกเข้าสู่ทางปากเตา เนื่องจากการดูดก๊าซเผาไหม้ออกทาง Stack สูงขึ้น ทำให้การไหลเวียนของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาอยู่ในวงจำกัดแคบลง การพาความร้อนไปสู่ปากเตาจึงต่ำกว่า 2 กรณีแรก ทำให้อุณหภูมิบริเวณปากเตาต่ำกว่ากรณีเปิด Damper 0% และ 50% ความเข้มข้นของออกซิเจนหน้าเตาเผามีค่าใกล้เคียงกับอากาศ แต่จากการที่ยังวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ณ บริเวณปากเตาได้ในปริมาณเล็กน้อยแสดงให้เห็นถึงความปั่นป่วนสูงภายในเตาเผา ทำให้เกิดการผสมระหว่างอากาศที่ถูกดูดเข้า และก๊าซเผาไหม้ที่ไหลวนอยู่ภายในเตาเผา

สำหรับการเปิด Damper 100% สามารถวิเคราะห์ในภาพรวมได้ว่าอัตราการดูดออกของก๊าซเผาไหม้และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลจากการเจือจางของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาโดยอากาศที่ไหลเข้าทางหน้าปากเตาและการจำกัดการพาความร้อนโดยก๊าซเผาไหม้

ผลการทดลองของกรณีศึกษาทั้งสามกรณีในตอนๆ 4.2 นี้ (เมื่อเปิด Damper 0%, 50% และ 100%) ซึ่งให้เห็นถึงผลของอัตราการไหลของก๊าซเผาไหม้ออกจากเตาเผาทาง Stack ซึ่งควบคุมโดยร้อยละของการเปิด-ปิด Damper ที่มีต่อการไหลเวียนของก๊าซภายในเตาเผา และระดับการผสมของอากาศจากภายนอก ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาวะความร้อนของการสันดาปไปยังส่วนต่างๆ ของเตาเผา และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาการสันดาปของก๊าซเชื้อเพลิง จึงเป็นข้อสังเกตที่ได้จากการวิจัยนี้ว่า สำหรับเตาเผาที่ถูกออกแบบให้ป้อนเชื้อเพลิงเข้าทางผนังด้านข้าง มีช่องเปิดบริเวณด้านหน้า และมีการดูดก๊าซเผาไหม้จากทางด้านหลัง (Stack) เช่นเดียวกับเตาเผาที่ใช้ทดลอง การติดตั้งและปรับ Damper ที่ Stack มีศักยภาพในการควบคุมรูปแบบการไหล รวมไปถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาได้ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการในลักษณะดังกล่าว มีปัจจัยอีกหลายประการที่ไม่อยู่ภายใต้การควบคุม อาทิเช่น ความสมบูรณ์ของการสันดาปภายในเตาเผา ไม่ว่าจะเป็นที่บริเวณหัวเผาเอง หรือบริเวณอื่นๆ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง ทำให้การปฏิบัติงานอาจไม่อยู่ในสภาวะที่มีการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น การใช้งานอากาศอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการควบคุมระบบของเตาเผาลักษณะนี้ โดยผลการศึกษาอิทธิพลของมาอากาศจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป

### 4.3 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเมื่อทำการสันดาป และเปิดมาอากาศ

#### 4.3.1 กรณีการเปิด Damper 0%

ผลการทดลองวัดอัตราการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ และคำนวณอัตราการไหลหน้าปากเตาเผา เปรียบเทียบระหว่างกรณีเปิดมาอากาศและปิดมาอากาศ แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการไหลอากาศเข้าและออกจากเตาเผาที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.)

เมื่อเปิดมาอากาศที่มุมต่างๆ (+15 หมายถึงเปิดมาอากาศออกจากเตาเผา 15 องศา, 0 หมายถึง เปิดมาอากาศ 0 องศา และ -15 หมายถึงเปิดมาอากาศเข้าสู่เตาเผา 15 องศา) กรณีไม่มีการสันดาป และเปิด Damper 0%

ตำแหน่งที่ทำการวัด อัตราการไหลอากาศ	ปิดมา อากาศ	มุมการเปิดมาอากาศ		
		+15	0	-15
Blower ตัวที่ 1	108.48	107.03	103.64	106.17
Blower ตัวที่ 2	10.20	9.84	8.16	9.66
ช่องเปิดทางออกของ Stack	101.64	95.18	95.63	99.90
ปากเตาเผา (จากการคำนวณ)	17.04	21.70	16.17	15.93

และข้อมูลการวัดอุณหภูมิ ความเข้มข้นออกซิเจน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเผา แสดงในตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเผา เเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการเปิดม่านอากาศที่มุม  $+15^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  และ  $-15^{\circ}$  กับกรณีปิดม่านอากาศ โดยเปิด Damper 0%

		เปิด 15 องศา ออกจาก เตาเผา	ปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง $+15^{\circ}$ กับ ปิด	เปิด 0 องศา	ปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง 0 กับ ปิด	เปิด 15 องศาเข้าสู่ เตาเผา	กรณีปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง $-15^{\circ}$ กับ ปิด
อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	43.4	47.0	-3.6	45.5	47.0	-1.5	45.6	47.0	-1.4
	ตำแหน่ง 2	43.7	47.8	-4.1	45.6	47.8	-2.2	46.4	47.8	-1.4
	ตำแหน่ง 3	41.6	48.4	-6.8	44.6	48.4	-3.8	48.5	48.4	0.1
	ตำแหน่ง 4	44.9	47.7	-2.8	42.3	47.7	-5.4	45.3	47.7	-2.4
	Stack	44.8	47.4	-2.6	41.7	47.4	-5.7	46.7	47.4	-0.7
อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง ที่วัด (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	326.2	337.2	-11.0	362.1	337.2	24.9	373.6	337.2	36.4
	ตำแหน่ง 2	313.6	354.8	-41.2	347.8	354.8	-6.9	392.4	354.8	37.7
	ตำแหน่ง 3	308.6	357.8	-49.2	341.3	357.8	-16.5	400.1	357.8	42.4
	ตำแหน่ง 4	632.4	648.1	-15.7	610.7	648.1	-37.4	620.0	648.1	-28.1
	Stack	681.8	700.0	-18.2	644.4	700.0	-55.6	637.8	700.0	-62.2
เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	ตำแหน่ง 1	19.8	19.0	0.8	18.6	19.0	-0.4	21.5	19.0	2.5
	ตำแหน่ง 2	19.9	18.8	1.1	17.8	18.8	-1.0	16.8	18.8	-2.0
	ตำแหน่ง 3	19.9	18.8	1.2	17.7	18.8	-1.1	16.9	18.8	-1.9
	ตำแหน่ง 4	14.9	16.5	-1.6	15.0	16.5	-1.5	15.1	16.5	-1.4
	Stack	10.2	11.4	-1.2	9.8	11.4	-1.6	9.3	11.4	-2.1
ความเข้มข้น คาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	ตำแหน่ง 1	0.0	51.5	-51.5	76.0	51.5	24.5	0.0	51.5	-51.5
	ตำแหน่ง 2	0.0	71.5	-71.5	43.0	71.5	-28.5	158.0	71.5	86.5
	ตำแหน่ง 3	0.0	84.5	-84.5	86.0	84.5	1.5	129.0	84.5	44.5
	ตำแหน่ง 4	858.0	965.5	-107.5	848.0	965.5	-117.5	959.0	965.5	-6.5
	Stack	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	5.0	2.5	2.5
อัตราการไหล (ลบ.ม.ต่อวินาที)	Blower ตัวที่ 1	95.74	97.31	-1.6	97.60	97.31	0.3	96.67	97.31	-0.6
	Blower ตัวที่ 2	9.54	8.44	1.1	8.92	8.44	0.5	8.26	8.44	-0.2
อัตราไหลของแก๊ส (ลบ.ม.ต่อชม.)		0.48	0.48		0.48	0.48		0.48	0.48	

และเมื่อนำผลจากตารางที่ 4.3 ทำการประเมินร่วมกับตารางที่ 4.4 เพื่อพิจารณารูปแบบการไหลบริเวณต่างๆ ภายในเตาเผา เมื่อเปิด Damper 0% อาจวิเคราะห์การไหลในแต่ละกรณีการเปิดมาอากาศได้ดังนี้

เปรียบเทียบกรณีเปิดมาอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผากับกรณีปิดมาอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ปากเตาเผา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับช่องสำหรับวัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 เป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้มาอากาศที่สุดจึงได้รับอิทธิพลจากมาอากาศมาก โดยเมื่อทำการสันดาป การเปิดมาอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา มีผลให้ความดันบริเวณช่องป้อนอากาศจาก Blower ตัวที่ 2 น้อยกว่าการปิดมาอากาศ Blower ตัวที่ 2 สามารถป้อนอากาศเข้าสู่เตาเผาด้วยอัตราที่มากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนบริเวณนี้มากขึ้น จากข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ บริเวณตำแหน่ง 1, 2 และ 3 มีค่าน้อยมาก อาจเกิดจากการที่มาอากาศได้ดึงก๊าซเผาไหม้ออกจากเตาเผาที่บริเวณมุมของปากเตา (ตามรูปแบบการไหลที่ได้วิเคราะห์ในตอน 4.2) มากขึ้น ทำให้ก๊าซเผาไหม้ที่แต่เดิมเคยไหลผ่านบริเวณหน้าปากเตาบริเวณตอนกลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งตรวจวัดที่ 1, 2 และ 3 แล้วย้อนกลับเข้าสู่ภายในเตาเผาส่วนหนึ่งหายไป เมื่อทำการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้แทบไม่พบค่าความเข้มข้นเลย สอดคล้องกับอุณหภูมิหน้าเตาซึ่งต่ำกว่ากรณีปิดมาอากาศเกิดจากการเปิดมาอากาศ แสดงให้เห็นว่าอากาศจากมาอากาศเกิดการไหลเข้ามาผสมกับอากาศภายในเตาเผา ณ บริเวณดังกล่าวนี้
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 เป็นบริเวณหัวเผา เมื่อทำการสันดาป อากาศจากมาอากาศส่วนหนึ่งได้ไหลเข้าหมุนเวียนแทนที่ก๊าซเผาไหม้ที่ไหลออกหน้าปากเตาเข้าเจือจางก๊าซเผาไหม้บริเวณหัวเผา ทำให้ค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และอุณหภูมิบริเวณหัวเผาต่ำกว่ากรณีไม่ใช้มาอากาศ
- บริเวณ Stack จากข้อมูลตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการเปิดมาอากาศมีผลให้อัตราการไหลออกของอากาศทาง Stack ลดลงจากการที่มีก๊าซเผาไหม้ไหลออกทางปากเตามากขึ้น พิจารณาผลเมื่อทำการสันดาป ตารางที่ 4.4 พบว่าบริเวณ Stack มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กว่ากรณีปิดมาอากาศ เนื่องจากมีเวลาเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง จึงไม่พบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และพบว่าปริมาณก๊าซออกซิเจนลดลง

อาจสรุปรูปแบบการไหลในระบบสำหรับกรณีเปิดมาอากาศ 15 องศา เมื่อเปิด Damper 0% ได้ว่า การเปิดมาอากาศ มีผลให้เกิดการดึงก๊าซเผาไหม้ออกทางหน้าปากเตามากขึ้น โดยมีอากาศจากมาอากาศส่วนหนึ่งไหลเข้าแทนที่ก๊าซเผาไหม้ในเตา ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้ไหลออกทาง Stack น้อยลง

### เปรียบเทียบกรณีเปิดม่านอากาศ 0 องศา กับกรณีปิดม่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 จากการพิจารณาอัตราการไหลเข้าสู่เตาเผาของอากาศจาก Blower ตัวที่ 2 พบว่า ผลจากการเปิดม่านอากาศ 0 องศา ทำให้ความดันบริเวณ Blower ตัวที่ 2 ต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศเล็กน้อย อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตาเผาผ่าน Blower ตัวที่ 2 นี้จึงสูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศ อย่างไรก็ตาม ม่านอากาศไม่ได้ส่งผลที่ชัดเจนต่อรูปแบบการไหลของก๊าซเผาไหม้ในเตา โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และอุณหภูมิหน้าปากเตาที่วัดได้ที่มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างกรณีเปิด และปิดม่านอากาศ
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 ผลจากการเปิดม่านอากาศ 0 องศาทำให้อัตราการไหลเข้าของอากาศจาก Blower ตัวที่ 1 ใกล้เคียงกับกรณีปิดม่านอากาศ และพบว่าอากาศจากม่านอากาศส่วนหนึ่งยังคงไหลเวียนแทนที่ก๊าซเผาไหม้ที่ไหลออกหน้าปากเตา เป็นการเจือจางกับก๊าซเผาไหม้ที่บริเวณหัวเผา ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และอุณหภูมิจึงต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ
- บริเวณ Stack จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปิดม่านอากาศ 0 องศา มีผลให้อัตราการไหลของอากาศออกทาง Stack ต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ เนื่องจากอากาศที่เข้าทาง Blower ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ลดลง เมื่อทำการสันดาป มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์บริเวณ Stack เนื่องจากไม่พบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการแยกวิเคราะห์การไหลในแต่ละส่วนของเตาเผาพบว่า รูปแบบการไหลภายในเตาของกรณีการเปิดม่านอากาศ 0 องศาไม่แตกต่างไปจากกรณีไม่เปิดม่านอากาศ โดยมีการผสมของอากาศจากม่านอากาศกับก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผาเล็กน้อย

### เปรียบเทียบกรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา กับกรณีปิดม่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 การเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา ทำให้การสันดาปบริเวณหน้าเตาเผามีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์น้อยลง โดยสังเกตตำแหน่งที่ 1 ไม่พบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่กลับพบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอากาศจากม่านอากาศได้รับกวนการไหลเวียนของก๊าซเผาไหม้โดยเฉพาะบริเวณปากเตา นอกจากนั้นก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผาซึ่งไหลมาทางหน้าปากเตาเกิดการไหลวนด้วยความเร็วสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของก๊าซภายในเตาเผาทั่วถึงขึ้น อุณหภูมิหน้าปากเตาจึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีปิดม่านอากาศ
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 เป็นบริเวณหัวเผา ผลจากตารางที่ 4.4 พิจารณาได้ว่าความสมบูรณ์ในการเผาไหม้ใกล้เคียงกรณีปิดม่านอากาศ ทำให้วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า แม้ม่านอากาศจะส่งผลกระทบต่อ



ต่อการไหลเวียนของก๊าซเผาไหม้ แต่ไม่ได้มีอิทธิพลที่เด่นชัดต่อการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงแต่อย่างใด

- ม่านอากาศที่เป่าเข้าสู่เตาเผาด้วยมุม 15 องศาไม่มีผลต่อก๊าซเผาไหม้ที่ไหลออกจาก Stack อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากอุณหภูมิที่ลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนออกทางหน้าปากเตาที่มากขึ้น

อาจสรุปผลจากการวิเคราะห์รูปแบบการไหลในกรณีการเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาได้ว่า การเปิดม่านอากาศมีผลให้การกระจายตัวของก๊าซเผาไหม้บริเวณส่วนหน้าของเตาดีขึ้น แต่อิทธิพลจากม่านอากาศมีผลต่อการไหลออกจาก Stack ของก๊าซเผาไหม้น้อยมาก

จากการพิจารณารูปแบบการไหลของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงภายในเตาเผาเมื่อเปิด Damper 0% ซึ่งทิศทางการไหลของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผามีการไหลออกจากหน้าปากเตา การเปิดม่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา และ 0 องศา ได้ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้ออกทางปากเตามากขึ้น อุณหภูมิบริเวณหน้าปากเตาของทั้ง 2 กรณีนี้จึงต่ำกว่าการปิดม่านอากาศ ส่วนการเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา แม้อากาศจากม่านอากาศจะเข้าสู่เตาเผามากขึ้น แต่ความปั่นป่วนที่เกิดจากการเปิดม่านอากาศ ได้ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้เกิดการกระจายตัวมากขึ้นบริเวณปากเตา และทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้สูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศ

#### 4.3.2 กรณีการเปิด Damper 50%

จากการทดลองวัดอัตราการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ และคำนวณอัตราการไหลหน้าปากเตาเผา เปรียบเทียบในกรณีเปิดม่านอากาศ และปิดม่านอากาศ แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิด Damper

50% (+15 หมายถึงเปิดม่านอากาศออกจากเตาเผา 15 องศา, 0 หมายถึง เปิดม่านอากาศ 0 องศา และ -15 หมายถึงเปิดม่านอากาศเข้าสู่เตาเผา 15 องศา) กรณีไม่มีการสันดาป

ตำแหน่งที่ทำการวัด อัตราการไหลอากาศ	ปิดม่าน อากาศ	มุมการเปิดม่านอากาศ		
		+15	0	-15
Blower ตัวที่ 1	106.23	107.46	103.16	109.01
Blower ตัวที่ 2	9.00	9.97	8.16	9.35
ช่องเปิดทางออกของ Stack	219.38	214.20	206.55	220.95
ปากเตาเผา (จากการคำนวณ)	-104.15	-96.77	-95.23	-102.59

และทำการพิจารณารูปแบบการไหลภายในเตาเผาพร้อมกับข้อมูลการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผา ความเข้มข้นออกซิเจน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเปิด Damper 50% แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนส่วนเกิน และอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อทำการเปิด Damper 50%

		เปิด 15 องศา ออกจาก เตาเผา	ปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง +15 กับ ปิด	เปิด 0 องศา	ปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง 0 กับ ปิด	เปิด 15 องศาเข้าสู่ เตาเผา	กรณีปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง -15 กับ ปิด
อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	42.7	44.3	-1.6	45.8	44.3	1.5	45.5	44.3	1.2
	ตำแหน่ง 2	41.2	44.8	-3.6	46.4	44.8	1.6	44.3	44.8	-0.5
	ตำแหน่ง 3	43.2	44.9	-1.7	46.4	44.9	1.5	48.0	44.9	3.1
	ตำแหน่ง 4	41.8	44.7	-2.9	46.0	44.7	1.3	47.1	44.7	2.4
	Stack	41.5	45.0	-3.5	45.9	45.0	0.9	46.2	45.0	1.2
อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง ที่วัด (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	298.2	196.3	101.9	327.4	196.3	131.1	296.6	196.3	100.3
	ตำแหน่ง 2	286.5	182.2	104.3	321.9	182.2	139.7	290.4	182.2	108.2
	ตำแหน่ง 3	279.8	174.2	105.6	319.6	174.2	145.4	286.2	174.2	112.0
	ตำแหน่ง 4	488.5	461.3	27.2	500.4	461.3	39.1	411.1	461.3	-50.2
	Stack	604.7	554.5	50.2	633.3	554.5	78.8	582.1	554.5	27.6
เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	ตำแหน่ง 1	19.1	21.1	-2.0	21.4	21.1	0.3	21.6	21.1	0.5
	ตำแหน่ง 2	19.2	21.2	-2.0	21.4	21.2	0.2	21.2	21.2	0.0
	ตำแหน่ง 3	19.4	21.2	-1.8	21.3	21.2	0.1	19.8	21.2	-1.4
	ตำแหน่ง 4	17.7	19.4	-1.7	19.3	19.4	-0.1	19.4	19.4	0.0
	Stack	15.9	16.4	-0.5	16.4	16.4	0.0	16.4	16.4	0.0
ความเข้มข้น คาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	ตำแหน่ง 1	0.0	6.7	-6.7	0.0	6.7	-6.7	0.0	6.7	-6.7
	ตำแหน่ง 2	0.0	11.3	-11.3	0.0	11.3	-11.3	22.0	11.3	10.7
	ตำแหน่ง 3	0.0	5.0	-5.0	0.0	5.0	-5.0	116.0	5.0	111.0
	ตำแหน่ง 4	524.0	582.7	-58.7	486.0	582.7	-96.7	554.0	582.7	-28.7
	Stack	259.0	262.7	-3.7	251.0	262.7	-11.7	303.0	262.7	40.3
อัตราการไหล (ลบ.ม.ต่อวินาที)	Blower ตัวที่ 1	96.32	97.21	-0.9	96.05	97.21	-1.16	98.61	97.21	1.40
	Blower ตัวที่ 2	9.54	8.79	0.8	8.92	8.79	0.13	8.26	8.79	-0.53
อัตราไหลของแก๊ส (ลบ.ม.ต่อชม.)		0.48	0.48		0.48	0.48		0.48	0.48	

จากการพิจารณาผลจากตารางที่ 4.5 และ 4.6 ร่วมกันจะทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหล บริเวณต่าง ๆ ภายในเตาเผา เมื่อเปิด Damper 50% สำหรับในแต่ละกรณีการเปิดม่านอากาศได้ ดังนี้

เปรียบเทียบกรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา กับกรณีปิดม่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 จากตารางที่ 4.5 พบว่ากรณีการเปิดม่านอากาศ 15 องศา ออกจากเตาเผา อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตาเผาทาง Blower ตัวที่ 2 สูงขึ้น เนื่องจากการเปิด Damper 50% ระบบจะทำการดูดอากาศจากภายนอกเข้าทางปากเตาเผา การเปิดม่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผาจะทำให้เกิดความปั่นป่วนสูง บริเวณด้านหน้าเตา และเกิดความดันลดสูงขึ้นเป็นผลให้อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตาเผาทางหน้าปากเตาเผาตกลง อากาศจึงไหลเข้าทาง Blower ตัวที่ 2 มากขึ้น เมื่อทำการสันดาป ตาราง 4.6 วิเคราะห์ได้ว่าการเปิดม่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา มีผลให้เกิดการไหลเวียนของก๊าซเผาไหม้มายังด้านหน้าเตาได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีปิดม่านอากาศ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่บริเวณปากเตาสูงขึ้นทุกตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด ในขณะที่ค่าความเข้มข้นของออกซิเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 ความปั่นป่วนจากการเปิดม่านอากาศ ก่อให้เกิดความดันลด ภายในเตาเผาบริเวณตำแหน่งป้อนอากาศเข้าสู่เตาเผาทาง Blower ตัวที่ 1 เช่นกัน เมื่อทำการสันดาป การไหลเวียนของก๊าซเผาไหม้ที่เกิดจากการเปิดม่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา ทำให้อุณหภูมิบริเวณหัวเผาสูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศ ค่าความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ เนื่องจากอากาศจากภายนอก เข้าสู่เตาเผาทางปากเตาได้น้อยลง
- บริเวณ Stack ผลจากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่ากรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศา ออกจากเตาเผา อากาศจะไหลออกทาง Stack น้อยกว่ากรณีการปิดม่านอากาศ เมื่อทำการสันดาป ความสมบูรณ์ในการเผาไหม้ใกล้เคียงกับกรณีปิดม่านอากาศ ทำให้วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งสองกรณีได้ใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากอากาศที่ไหลเข้าทางหน้าปากเตาเผาน้อยกว่ากรณีปิดม่านอากาศ ทำให้อากาศจากภายนอกเตาเผาเข้าลดอุณหภูมิบริเวณ Stack ได้ไม่มากนัก นอกจากนั้นยังมีผลให้ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลในกรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา โดยรวมสรุปได้ว่า การเปิดม่านอากาศมีผลให้ก๊าซเผาไหม้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นในบริเวณส่วนหน้าของเตา และไหลออกทางปากเตาและ Stack น้อยลง

เปรียบเทียบกรณีเปิดม่านอากาศ 0 องศา กับกรณีปิดม่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 จากตารางที่ 4.5 พบว่าอิทธิพลจากม่านอากาศทำให้ความดันบริเวณช่องป้อนอากาศจาก Blower ตัวที่ 2 เข้าสู่เตาเผาสูงขึ้น ทำให้อัตราการไหลอากาศจาก Blower ตัวที่ 2 ต่ำลง เมื่อทำการสันดาป การเปิดม่านอากาศทำให้อากาศจากม่านอากาศส่วนหนึ่งไหลเข้าสู่เตาเผา เกิดการเจือจางก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงไม่พบค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งอากาศจากม่านอากาศซึ่งเข้าสู่เตาเผาทำให้ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนเท่ากับกรณีปิดม่านอากาศ และจากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการเปิดม่านอากาศ 0 องศาทำให้ก๊าซเผาไหม้ไหลออกทางหน้าปากเตาลดลง ทำให้การสูญเสียความร้อนไปสู่ภายนอกน้อยลง อุณหภูมิบริเวณหน้าปากเตาเผาจึงสูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศ
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 การเปิดม่านอากาศ ทำให้ความดันภายในเตาเผาสูงขึ้น อัตราการไหลของอากาศจาก Blower ตัวที่ 1 เข้าสู่เตาเผาต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ เมื่อทำการสันดาป การเปิดม่านอากาศทำให้ก๊าซเผาไหม้มีการไหลวนภายในเตาเผาเพิ่มขึ้น การพาความร้อนกลับมาสู่บริเวณหัวเผามากขึ้น ทำให้อุณหภูมิบริเวณหัวเผาสูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศ
- ที่บริเวณ Stack อัตราการไหลออกของอากาศทาง Stack ต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ อย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลเข้าของอากาศบริเวณหน้าปากเตาที่ต่ำลง แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของม่านอากาศต่อการถ่ายเทมวลสารเข้าและออกจากเตาเผา เป็นผลให้อากาศถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาทาง Blower ทั้งตัวที่ 1 และ 2 ลดลงตามไปด้วย ในขณะที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงยังคงเดิม ดังนั้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ส่วนหนึ่งที่เพิ่มจากสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่มากขึ้น จึงถูกหักล้างโดยระยะเวลาในการสันดาปที่นานขึ้น ทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และออกซิเจนไม่แตกต่างจากรณีปิดม่านอากาศ

ผลจากการวิเคราะห์ในแต่ละส่วนของเตาเผาแสดงให้เห็นว่า ในกรณีการเปิดม่านอากาศ 0 องศา มีผลให้ก๊าซเผาไหม้เกิดการกระจายตัวสูงมากจากการไหลวนอย่างรวดเร็วในบริเวณระหว่างหน้าปากเตาถึงหัวเผา ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตลอดทั้งเตา

#### เปรียบเทียบกรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา กับกรณีปิดม่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 การเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา ก่อให้เกิดการรบกวนการไหลเวียนของก๊าซเผาไหม้บริเวณหน้าปากเตาเผาอย่างสูง (เช่นเดียวกับกรณีการเปิดม่านอากาศ 15 องศา และเปิด Damper 0%) เนื่องจากไม่พบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บริเวณตำแหน่ง 2 แต่พบในตำแหน่งที่ 1 และ 3 และผลจากการไหลวนของก๊าซเผาไหม้บริเวณหน้าปากเตาที่มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิบริเวณหน้าปากเตาในกรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาสูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศ และความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำลง

- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 การเปิดม่านอากาศ ทำให้อากาศจากม่านอากาศส่วนหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกายในเตาเผาไหลเข้าสู่บริเวณหัวเผา ทำให้อุณหภูมิบริเวณหัวเผาลดลง
- บริเวณ Stack จากตารางที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของอากาศออกจาก Stack กรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาใกล้เคียงกับกรณีปิดม่านอากาศ ซึ่งเมื่อทำการสันดาป พบว่าความสมบูรณ์ในการสันดาปใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้ผลความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน และอุณหภูมิบริเวณ Stack มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 กรณี

จากผลการวิเคราะห์ในแต่ละส่วนของเตาเผา พบว่าการเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณหน้าเตาเผา ก๊าซเผาไหม้จากบริเวณหัวเผาถูกดึงออกมาสู่บริเวณหน้าปากเตามากขึ้น โดยอากาศจากม่านอากาศส่วนหนึ่งเข้าไปแทนที่ก๊าซเผาไหม้ และทำการลดอุณหภูมิในบริเวณหัวเผา

เมื่อพิจารณากรณีการเปิด Damper 50% ซึ่งระบบมีทิศทางการไหลของอากาศจากภายนอกเข้าทางหน้าปากเตา พบว่าการเปิดม่านอากาศโดยรวม ได้ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้มีการถ่ายเทมาสู่บริเวณหน้าปากเตามากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิบริเวณหน้าปากเตากรณีการเปิดม่านอากาศในทุกกรณีสูงกว่ากรณีการปิดม่านอากาศ โดยการเปิดม่านอากาศ 0 องศาสามารถทำให้ก๊าซเผาไหม้เกิดการกระจายตัวได้ทั่วทั้งเตา ส่งผลให้อุณหภูมิในทุกตำแหน่งที่วัดสูงกว่ากรณีการเปิดม่านอากาศกรณีอื่นๆ

#### 4.3.2 กรณีการเปิด Damper 100%

จากการทดลองวัดอัตราการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ และคำนวณอัตราการไหลหน้าปากเตาเผา เปรียบเทียบในกรณีเปิดม่านอากาศ และปิดม่านอากาศ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อัตราการไหลอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (หน่วย ลบ.ม./ชม.) เมื่อเปิด Damper

100% (+15 หมายถึงเปิดม่านอากาศออกจากเตาเผา 15 องศา, 0 หมายถึง เปิดม่านอากาศ 0 องศา และ -15 หมายถึงเปิดม่านอากาศเข้าสู่เตาเผา 15 องศา) กรณีไม่มีการสันดาป

ตำแหน่งที่ทำการวัด อัตราการไหลอากาศ	ปิดม่าน อากาศ	มุมการเปิดม่านอากาศ		
		+15	0	-15
Blower ตัวที่ 1	110.36	109.68	105.85	106.79
Blower ตัวที่ 2	9.12	9.68	8.37	10.20
ช่องเปิดทางออกของ Stack	261.45	259.88	260.55	257.17
ปากเตาเผา (จากการคำนวณ)	-141.97	-140.51	-146.34	-140.18

และทำการพิจารณารูปแบบการไหลภายในเตาเผาพร้อมกับข้อมูลการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผา ความเข้มข้นออกซิเจน และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเปิด Damper 100% แสดงในตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** อุณหภูมิภายในเตาเผาเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนส่วนเกิน และอัตราส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อทำการเปิด Damper 100%

		เปิด 15 องศา ออกจาก เตาเผา	ปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง +15 กับ ปิด	เปิด 0 องศา	ปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง 0 กับ ปิด	เปิด 15 องศาเข้าสู่ เตาเผา	กรณีปิดม่าน อากาศ	ผลต่าง ระหว่าง -15 กับ ปิด
อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	42.0	42.0	0.0	41.4	42.0	-0.6	44.9	42.0	2.9
	ตำแหน่ง 2	42.4	42.7	-0.3	40.7	42.7	-2.0	44.5	42.7	1.8
	ตำแหน่ง 3	42.4	42.1	0.3	40.7	42.1	-1.4	43.2	42.1	1.1
	ตำแหน่ง 4	42.4	42.2	0.2	41.5	42.2	-0.7	45.1	42.2	2.9
	Stack	41.8	42.1	-0.3	41.3	42.1	-0.8	45.8	42.1	3.7
อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง ที่วัด (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง 1	229.8	138.9	90.9	232.2	138.9	93.3	275.7	138.9	136.8
	ตำแหน่ง 2	208.4	145.6	62.8	220.2	145.6	74.6	272.3	145.6	126.7
	ตำแหน่ง 3	217.0	140.2	76.8	208.9	140.2	68.7	257.4	140.2	117.2
	ตำแหน่ง 4	354.2	357.8	-3.6	334.1	357.8	-23.7	396.5	357.8	38.7
	Stack	469.8	482.1	-12.3	450.1	482.1	-32.0	511.4	482.1	29.3
เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน	ตำแหน่ง 1	21.4	21.3	0.1	21.5	21.3	0.2	21.8	21.3	0.5
	ตำแหน่ง 2	21.4	21.3	0.1	21.5	21.3	0.2	20.7	21.3	-0.6
	ตำแหน่ง 3	21.4	21.3	0.1	21.5	21.3	0.2	20.6	21.3	-0.7
	ตำแหน่ง 4	19.4	20.2	-0.8	19.6	20.2	-0.6	19.5	20.2	-0.7
	Stack	17.5	17.5	0.0	17.5	17.5	0.0	17.4	17.5	-0.1
ความเข้มข้น คาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)	ตำแหน่ง 1	0.0	4.0	-4.0	0.0	4.0	-4.0	0.0	4.0	-4.0
	ตำแหน่ง 2	0.0	17.0	-17.0	0.0	17.0	-17.0	52.0	17.0	35.0
	ตำแหน่ง 3	0.0	7.0	-7.0	0.0	7.0	-7.0	117.0	7.0	110.0
	ตำแหน่ง 4	620.0	431.3	188.7	490.0	431.3	58.7	582.0	431.3	150.7
	Stack	254.0	253.7	0.3	241.0	253.7	-12.7	195.0	253.7	-58.7
อัตราการไหล (ลบ.ม.ต่อวินาที)	Blower ตัวที่ 1	97.29	97.70	-0.41	100.78	97.70	3.08	97.36	97.70	-0.34
	Blower ตัวที่ 2	9.54	8.60	0.94	8.57	8.60	-0.03	10.79	8.60	2.19
อัตราไหลของแก๊ส (ลบ.ม.ต่อชม.)		0.48	0.48		0.48	0.48		0.48	0.48	

จากการพิจารณาผลจากตารางที่ 4.7 และ 4.8 ร่วมกันจะทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหล บริเวณต่างๆ ภายในเตาเผา เมื่อเปิด Damper 100% สำหรับในแต่ละกรณีการเปิดผ่านอากาศได้ ดังนี้

#### เปรียบเทียบกรณีเปิดผ่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา กับกรณีปิดผ่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 การเปิดผ่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา ก่อให้เกิดความดันลดภายในระบบ เกิดการดึงก๊าซเผาไหม้จากหัวเผาเข้าสู่บริเวณหน้าปากเตา ส่วนหนึ่ง ทำให้มีเวลาเกิดการสันดาป ประกอบกับมีอากาศเพียงพอให้เกิดการเผาไหม้ จึงเกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ และระยะการไหลวนของก๊าซเผาไหม้สั้นลง ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณนี้มีค่าสูง และไม่พบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 หรือบริเวณหัวเผา กรณีที่มีการสันดาป การเปิดผ่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา มีผลให้ระยะการไหลวนของก๊าซเผาไหม้สั้นลง ความดันในส่วนนี้เพิ่มขึ้น พิจารณาจากอัตราการป้อนอากาศที่ลดลง จึงพบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น และความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำลง ซึ่งอัตราการดูดก๊าซออกทาง Stack อาจมีผลให้เกิดการดึงเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเผาไหม้จำนวนหนึ่งออกไปทาง Stack ด้วยเช่นกัน ทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้ไม่สูงขึ้น
- บริเวณ Stack พบว่าการเปิดผ่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะในบริเวณดังกล่าวน้อยมาก โดยพิจารณาผลจากอุณหภูมิ ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกรณีปิดผ่านอากาศ

จากผลการวิเคราะห์แต่ละส่วนของเตาเผา พิจารณาได้ว่าการเปิดผ่านอากาศ 15 องศาออกจากเตาเผา มีผลให้เกิดความดันลดที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าปากเตา เกิดการดึงก๊าซเผาไหม้จากบริเวณหัวเผาส่วนหนึ่งมาสู่หน้าปากเตา และก๊าซเผาไหม้ส่วนที่ไหลวนบริเวณหัวเผามีระยะการไหลวนที่สั้นลง

#### เปรียบเทียบกรณีเปิดผ่านอากาศ 0 องศา กับกรณีปิดผ่านอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 จากตารางที่ 4.7 กรณีการเปิดผ่านอากาศ 0 องศา อิทธิพลจากผ่านอากาศมีผลให้ความดันภายในเตาเผาสูงขึ้น อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตาเผาทาง Blower ตัวที่ 2 ต่ำกว่ากรณีปิดผ่านอากาศ เมื่อทำการสันดาป การเปิดผ่านอากาศมีผลให้เกิดการดึงก๊าซเผาไหม้ส่วนหนึ่งมาทางหน้าปากเตา ทำให้อุณหภูมิในบริเวณนี้สูงขึ้น ก๊าซเผาไหม้ส่วนที่ไหลสู่หน้าปากเตาเกิดปฏิกิริยาการเผา

ใหม่ที่อยู่สูง เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อากาศจากมานอากาศส่วนหนึ่งมีการไหลเข้าบริเวณหน้าปากเตา จึงพบความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนที่สูงขึ้น

- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 หรือบริเวณหัวเผา เมื่อเปิดมานอากาศ 0 องศา เชื้อเพลิงมีการกระจายตัวมาสู่หน้าปากเตามากขึ้น เชื้อเพลิงบริเวณหัวเผาตกลง อากาศลดลง เกิดการเผาไหม้น้อยลง เนื่องจากเชื้อเพลิงวิ่งไปสู่บริเวณหน้าเตา และเกิดการเผาไหม้บริเวณนั้นมากขึ้น
- ในกรณีของ Stack การเปิดมานอากาศ 0 องศาทำการดึงก๊าซเผาไหม้ ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้เคลื่อนตัวบริเวณหน้าปากเตามากขึ้น ก๊าซเผาไหม้ที่ไหลสู่บริเวณ Stack ลดลง การพาความร้อนลดลง อุณหภูมิบริเวณ Stack ต่ำลง และเนื่องจากอัตราการไหลออกทาง Stack ของก๊าซเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกันใน 2 กรณี จึงพบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์กรณีการเปิดมานอากาศ 0 องศาได้ว่า การเปิดมานอากาศส่งผลให้เกิดการดึงก๊าซเผาไหม้ อากาศ และเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้ทำการสันดาปบางส่วนมาสู่บริเวณหน้าปากเตามากขึ้น การพาความร้อนทำให้อุณหภูมิบริเวณหน้าเตาสูงขึ้น สำหรับก๊าซเผาไหม้ส่วนที่มีการไหลวนกลับมาสู่บริเวณหัวเผามีระยะการไหลวนสั้นลง ทำให้พบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้น

#### เปรียบเทียบกรณีเปิดมานอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผากับกรณีปิดมานอากาศ

- บริเวณ Blower ตัวที่ 2 จากตาราง 4.7 พบว่าการเปิดมานอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา ทำให้อัตราการไหลเข้าของอากาศทาง Blower ตัวที่ 2 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อทำการสันดาป พบว่าการเปิดมานอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา มีผลให้เกิดการรบกวนการไหลวนของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผา ผลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์บริเวณหน้าปากเตาจึงค่อนข้างแตกต่างกัน โดยตำแหน่ง 1 ไม่พบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ อาจเกิดจากอากาศที่ได้รับการป้อนจาก Blower ตัวที่ 2 ทำการเจือจางก๊าซเผาไหม้ ดังนั้นจึงไม่พบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในตำแหน่งที่ 1 พบความเข้มข้นที่ต่ำในตำแหน่งที่ 2 และพบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงขึ้นมากในตำแหน่งที่ 3 นอกจากนี้ก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผาซึ่งไหลมาทางหน้าปากเตาเกิดการไหลวนเร็วขึ้น การกระจายตัวของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผามากขึ้น อุณหภูมิหน้าปากเตาสูงขึ้น
- บริเวณ Blower ตัวที่ 1 จากตาราง 4.7 การเปิดมานอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผา มีผลให้ความดันบริเวณหัวเผาสูงขึ้น อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนจาก Blower ตัวที่ 1 เข้าสู่เตาเผาต่ำกว่ากรณีปิดมานอากาศ เมื่อทำการสันดาป เชื้อเพลิงและอากาศมีเวลาในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในระยะเวลาที่มากขึ้นที่มากขึ้น เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จึงให้พลังงานความร้อนที่สูงขึ้น อุณหภูมิบริเวณนี้สูงขึ้น และอากาศที่



ป้อนเข้าสู่บริเวณหัวเผาต่ำลง ส่งผลให้วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่ากรณีปิดม่านอากาศ

- บริเวณ Stack จากตารางที่ 4.7 พบว่าอัตราการไหลก๊าซออกทาง Stack กรณีเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาต่ำกว่ากรณีปิดม่านอากาศ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้นานขึ้น การเผาไหม้เกิดได้สมบูรณ์ขึ้น จึงพบความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำลง

อาจทำการวิเคราะห์กรณีการเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาโดยรวมได้ว่า การเปิดม่านอากาศในกรณีนี้ทำให้การไหลบริเวณหน้าปากเตาเกิดความปั่นป่วนขึ้น ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้ส่วนหนึ่งไหลออกบริเวณมุมหนึ่งของหน้าปากเตา และก๊าซเผาไหม้ส่วนที่มีการไหลวนเกิดการไหลวนด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ก่อให้เกิดการกระจายตัวของก๊าซเผาไหม้ภายในเตาเผามากขึ้น โดยคาดว่าเกิดการสันดาประหว่างเชื้อเพลิง และอากาศในปริมาณที่มากขึ้น พลังงานความร้อนภายในเตาเผาจึงสูงกว่ากรณีปิดม่านอากาศในทุกตำแหน่งที่ทำการวัด

เมื่อพิจารณากรณีการเปิด Damper 100% ระบบมีทิศทางการไหลของอากาศจากภายนอกเข้าทางหน้าปากเตา โดยก๊าซเผาไหม้ไหลออกทาง Stack ด้วยอัตราการไหลที่สูง การเปิดม่านอากาศโดยรวม ได้ส่งผลให้ก๊าซเผาไหม้มีการถ่ายเทเข้าสู่บริเวณหน้าปากเตามากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิบริเวณหน้าปากเตากรณีการเปิดม่านอากาศในทุกกรณีสูงกว่ากรณีการปิดม่านอากาศ โดยการเปิดม่านอากาศ 15 องศาเข้าสู่เตาเผาสามารถทำให้ก๊าซเผาไหม้เกิดการกระจายตัวได้ทั่วทั้งเตา ส่งผลให้อุณหภูมิในทุกตำแหน่งที่วัดสูงกว่ากรณีการเปิดม่านอากาศกรณีอื่นๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับเตาเผาแบบเปิดด้านหน้า ซึ่งป้อนอากาศและเชื้อเพลิงเข้าที่ผนังด้านข้าง และดูดก๊าซเผาไหม้ออกทางด้านหลัง รูปแบบการไหลของก๊าซเผาไหม้จะมีลักษณะหมุนวนภายในเตาระหว่างช่องเปิดด้านหน้า และช่องป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ โดยอาจมีก๊าซเผาไหม้ไหลเข้าหรือออกทางด้านหน้าของเตา ขึ้นอยู่กับแรงดูดออกทางด้านหลัง ซึ่งปรับโดย Damper

นอกเหนือจากการถ่ายเทของก๊าซเผาไหม้ และอากาศเข้าและออกบริเวณด้านหน้าเตาแล้ว อัตราการดูดก๊าซเผาไหม้ออกทางด้านหลังยังส่งอิทธิพลต่อการหมุนเวียนก๊าซเผาไหม้ ความสมบูรณ์ของก๊าซเผาไหม้ การกระจายตัวของก๊าซเผาไหม้ และอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเผา

การประยุกต์ใช้ม่านอากาศเพื่อกั้นหน้าปากเตานอกจากจะมีผลในการลดการถ่ายเทมวลสาร และการถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังทำให้ระบบการไหลของก๊าซเผาไหม้และอากาศภายในเตาเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยม่านอากาศทำการดึงก๊าซเผาไหม้มาสู่บริเวณหน้าปากเตามากขึ้น การกระจายความร้อนภายในเตาเผาเกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นในบางกรณีอากาศจากม่านอากาศมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาเช่นกัน โดยทำการลดอุณหภูมิภายในเตา และความปั่นป่วนบริเวณหน้าเตาเผาที่เกิดจากอากาศจากม่านอากาศไหลปะทะกับก๊าซเผาไหม้ที่ไหลมาสู่หน้าปากเตา ซึ่งมุมการใช้งานม่านอากาศที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการกระจายการไหลของก๊าซเผาไหม้ภายในระบบ ช่วยให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ทั่วทั้งเตา

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ทำการศึกษาอิทธิพลจากความกว้างของม่านอากาศ และความเร็วของลำอากาศที่ป้อนจากม่านอากาศ ต่อผลการลดการสูญเสียความร้อนจากเตาเผา นอกจากนั้นควรมีการศึกษาแบบจำลองจากการคำนวณ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการงานวิจัยนี้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กัญจนนา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. 1<sup>st</sup> ed. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.

### ภาษาอังกฤษ

Bhattacharjee, P. and Loth, E. Simulations of laminar and transitional cold wall jets. International Journal of Heat and Fluid Flow 25 (2004): 32-43.

Borman, G.L. and Ragland, K. Combustion Engineering 4<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 1998.

Costa, J., Oliveira, L.A., and Silva, M.C. Energy savings by aerodynamic sealing with a downward-blowing plane air curtain—A numerical approach. Energy and Buildings Journal 38 (2006) 1182-1193.

Goodfellow, H. and Esko, T. Industrial Ventilation design guidebook. 1<sup>st</sup> ed. United State of America: Academic Press, 2001.

Guyonnaud, L., Sollicec C., De Virel, M.D., and Rey, C. Design of air curtains used for area confinement in tunnels. Experiments in Fluids journal 28 (2000) 377-384.

Holman, J.P., Heat Transfer. 9<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 2002.

Kreth, F. and Bohn, M.S. Principles of heat transfer. 6<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 2001.

Neto L.P.C. Private communication. Portugal: Coimbra, 2002.

Tso, C.P., Yu, S.C.M., Poh, H.J., and Jolly, P.G. Experimental study on the heat and mass transfer characteristics in a refrigerated truck. International Journal of Refrigeration 25 (2002) 340-350.

Smith, J.M., Van Ness, H.C., and Abbott, M.M. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 5<sup>th</sup> ed., Singapore: McGraw-Hill, 1996.

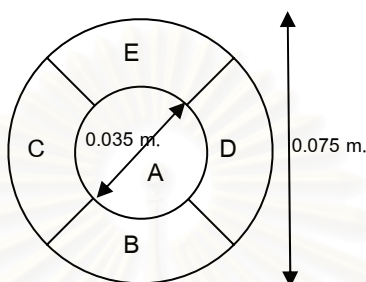


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่เข้า Blower ตัวที่ 1 และ 2  
การแบ่งพื้นที่หน้าตัดเพื่อวัดความเร็วอากาศเข้าสู่ Blower



รูปที่ 1 แสดงความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่แบ่งพื้นที่วัดความเร็วอากาศ โดยพื้นที่ A มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 ม. คำนวณโดยสมการ

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่} &= \frac{\pi d^2}{4} \\ &= \frac{\pi(0.035)^2}{4} \end{aligned}$$

จะได้พื้นที่หน้าตัด A เป็น 0.0009621 ตร.ม.

และคำนวณพื้นที่หน้าตัด B, C, D และ E ได้เป็น 0.004418 ตร.ม.

ในการวัดความเร็วอากาศที่เข้าทาง Blower ตัวที่ 1 วาล์ว A 100% วาล์ว B 50% กรณีการปิด มานลม ครั้งที่ 1 ได้ผลดังนี้

ตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลม	A	B	C	D	E
Blower ตัวที่ 1	9	8.2	8.9	9	10.9

จะสามารถคำนวณอัตราการไหลแต่ละจุดได้โดยสมการ

$$Q = Area \times v \quad (1)$$

โดย  $Q$  = อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)

$Area$  = พื้นที่วัดความเร็วลม (ตร.ม.)

$v$  = ความเร็วลมที่วัดได้ (ม./วินาที)

ที่จุด A จะได้อัตราการไหลเป็น

$$Q_A = (0.0009621 \times 9)$$

$$= 0.0086589 \quad \text{ลบ.ม./วินาที}$$

ที่จุด B จะได้อัตราการไหลเป็น

$$Q_B = (0.004418 \times 8.2)$$

$$= 0.0362276 \quad \text{ลบ.ม./วินาที}$$

ด้วยวิธีเดียวกันได้ค่า  $Q_C = 0.0393202$  ลบ.ม./วินาที

$Q_D = 0.0397620$  ลบ.ม./วินาที

$Q_E = 0.0481562$  ลบ.ม./วินาที

จะได้อัตราการไหลรวมที่เข้าทาง Blower ตัวที่ 1 ดังนี้

$$Q_{\text{total}} = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E$$

$$= 0.0086589 + 0.0362276 + 0.0393202 + 0.0397620 + 0.0481562$$

$$= 0.0406 \quad \text{ลบ.ม./วินาที}$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจตุรงค์ ชะภูิล เกิดเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม 2521 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2544 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม ศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี การศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย