

การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับวัตถุปืนเม็คในระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน  
แบบไซโคลน

นายอดิชาติ ไชยสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

HEAT TRANSFER BETWEEN HOT AIR AND KILN FEED IN CYCLONE SYSTEM

Mr.Adinat Chaisuwan

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อน  
กับวัตถุเปียกชื้นในระบบเครื่องแลกเปลี่ยน  
ความร้อนแบบไขว้โคลน

โดย

นายอดิชาติ ไชยสุวรรณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิชา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วงศ์ ปรวราจารย์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชชัย ชรินพานิชกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ)

อดิชาติ ไชยสุวรรณ: การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับวัตถุดิบปูนเม็ดในระบบ  
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไซโคลน, (HEAT TRANSFER BETWEEN HOT AIR  
AND KILN FEED IN CYCLONE SYSTEM)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา, 89 หน้า

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ ที่มีต่อ  
ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการแยกระหว่างก๊าซร้อนกับวัตถุดิบปูนเม็ด  
การวิจัยทำในห่อถั่ววัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นไซโคลนที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ โดยทำ  
การเก็บข้อมูลในการผลิตเป็นระยะเวลา 18 เดือน เพื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการถ่ายเทความ  
ร้อนและประสิทธิภาพในการดักฝุ่น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนก๊าซร้อนเพิ่ม  
มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลง และประสิทธิภาพการดักฝุ่นเพิ่มมากขึ้น  
เมื่ออัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการ  
ดักฝุ่นเพิ่มขึ้นด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

##5271510021: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PREHEATER/HEAT TRANSFEREFFICIENCY /TRAPPING DUST  
EFFICIENCY

ADINAT CHAISUWAN:HOT AIR – KILN FEED HEAT TRANSFER AND  
SEPERATION IN CYCLONE SYSTEM. ADVISOR: JERDSAK TSCHEIKUNA,  
Ph.D. , 89 pp.

This research is the study of effect of hot gas flow rate and kiln feed rate to efficiencies of heat transfer and separation of hot gas and kiln feed. Production data of preheater cyclone in a cement production facility were collected during a period of 18 months. The data were use for evaluation of efficiencies of heat transfer and dust collection

The results showed that increasing hot gas flow rate would reduce heat transfer efficiency and increase dust collection efficiency. Increasing of kiln feed rate would increase both heat transfer and dust collection efficiencies

Department:.....Chemical Engineering..... Student’s Signature:.....

Field of Study: ..Chemical Engineering..... Advisor’s Signature:.....

Academic Year : ...2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์ และน้ำใจจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านมา ณ ที่นี้

ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไซยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความทุ่มเท การสอน ได้ชี้แนะแนวทางและคำแนะนำอื่นๆตลอดจนงานวิจัยสำเร็จ

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ รศ.ดร.รัชชัชชรินพานิชกุล และอาจารย์ดร.ขจรศักดิ์ เพื่อองนวกิจ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเข้ามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ได้ข้อคิดในการทำงานวิจัยนี้อย่างมาก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถเสร็จลุล่วงได้เลยถ้าขาดพระคุณจากบิดามารดา พี่สาว และเพื่อนๆ ของผู้จัดทำเองซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุน กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างสมบูรณ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 กระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์.....	4
2.2 องค์ประกอบกระบวนการเผาไหม้.....	6
2.2.1 การคำนวณแบบสมมูล(สโตคิโอเมตริก).....	7
2.3 การถ่ายเทความร้อน(Heat Transfer).....	10
2.3.1 การแผ่รังสีความร้อน(Radiation).....	10
2.3.2 การพาความร้อน(Convective heat transfer).....	11
2.3.3 รูปแบบการถ่ายเทความร้อน.....	11

2.3.4 การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อน(Hot gas) กับอนุภาคของแข็ง (Solid particle).....	12
2.4 ไชโคลน (Cyclone).....	14
2.4.1 กลไกในการจับอนุภาค (collection Mechanisms).....	14
2.4.2 หลักการทำงาน.....	14
2.4.3 ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาค.....	16
2.4.4 ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไชโคลน.....	16
2.5 สถิติบรรยาย (Descriptive statistics).....	17
2.5.1 การแจกแจงความถี่.....	17
2.5.2 การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง (Central Tendency).....	18
2.5.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs).....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.6.1 งานวิจัยการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับอนุภาคของแข็ง.....	20
2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกอนุภาคของแข็ง.....	21
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง.....	25
3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ของหออุ่นวัตถุดิบ.....	27
3.1.1 รวบรวมข้อมูลการผลิต.....	27
3.1.2 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ.....	27
3.1.3 สมดุลมวล ( Mass balance).....	28
3.1.4 การทำสมดุลพลังงาน (Energy balance).....	34
3.1.5 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	41
3.1.6 จัดกลุ่มข้อมูล.....	41



3.1.7. อัตราป้อนก๊าซร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	41
3.1.8. อัตราป้อนฝุ่นวัตถุบส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	42
3.1.9. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ(program minitab).....	42
3.2 ขั้นตอนการทำงานทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น.....	50
3.2.1 ใช้โปรแกรมมินิแท็บ(program minitab)เพื่อออกแบบการทดลอง.....	50
3.2.2 ทำการทดลอง.....	53
3.2.3 ตรวจสอบข้อมูล.....	53
3.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง (Analysis of variance, ANOVA).....	54
3.2.5 หาสมการความสัมพันธ์.....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	56
4.1 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	57
4.1.1 ผลของอัตราป้อนก๊าซร้อน.....	57
4.1.2 ผลของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุบ.....	64
4.1.3 ระดับอิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุบ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	66
4.2 ประสิทธิภาพในการดักฝุ่น.....	70
4.2.1 ผลของอัตราป้อนก๊าซร้อน.....	72
4.2.2 ผลของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุบ.....	73
4.2.3 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุบของ ไซโคลนชุดที่ 1.....	74
4.2.4 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุบของ ไซโคลนชุดที่ 2.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80

รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	89

## ตารางที่

2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบของเชื้อเพลิง.....	7
2.2 อธิบายส่วนประกอบไซโคลน.....	15
2.3 การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของไซโคลน.....	16
3.1 ผลจากตัวอย่างทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงถ่านหิน.....	30
3.2 Cpa(อากาศ) ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	37
3.3 การเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียเปรียบเทียบกับการคำนวณไซโคลนชุดที่ 1.....	40
3.4 การเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียเปรียบเทียบกับการคำนวณไซโคลนชุดที่ 2.....	40
3.5 แสดงผลการสุ่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับ อัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1.....	43
3.6 ผลการสุ่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อน วัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2.....	46
3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของชุดไซโคลนที่ 1.....	51
3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของชุดไซโคลนที่ 2.....	52
ก.1 ผลการชั่งปูนเม็ดวันที่ 27 มกราคม 2555.....	84

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลมร้อนไซโคลนชุดที่ 1 และ ไซโคลนชุดที่ 2.....	2
2.1 กระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์.....	5
2.2 การเผาไหม้ที่สมบูรณ์การเผาไหม้ที่ดีที่สุดและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์.....	6
2.3 แสดงการเผาไหม้ถ่านหิน.....	7
2.4 ระบบการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับอนุภาคของแข็ง.....	13
2.5 ส่วนประกอบของไซโคลน.....	15
2.6 การเปรียบเทียบผลการทำนายโดยใช้สมการของ Leith and Licht เปรียบเทียบับสมการอื่นๆ และการทดลองของ Stairmand.....	23
3.1 ระบบเตาที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ด (Clinker) เป็นแบบ separate line calciner.....	26
3.2 ห่ออุณหภูมิความร้อนที่มีลักษณะเป็นไซโคลนต่ออนุกรม 2 ชุด.....	26
3.3 ขอบเขตการวิจัยของไซโคลนชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2.....	30
3.4 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2.....	38
3.5 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1.....	48
3.6 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 2.....	49
3.7 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1.....	53
3.8 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 2.....	54
3.9 ตำแหน่งการชั่งน้ำหนักฝุ่นวัดอุณหภูมิ.....	55
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดอุณหภูมิ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	58
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปยัง ฝุ่นวัดอุณหภูมิที่อัตราป้อนฝุ่นวัดอุณหภูมิ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	58

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของฝุ่นวัดอุณหภูมิขาออก	

ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	59
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาเข้า	
ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	59
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออก	
ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	60
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน	
ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	61
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปยัง	
ฝุ่นวัดถุดิบที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	61
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของฝุ่นวัดถุดิบขาออก	
ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	62
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาเข้า	
ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	62
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออก	
ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	63
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน	
ที่อัตราป้อนก๊าซร้อนที่ 120,125,130,135,140 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	64
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน	
ที่อัตราป้อนก๊าซร้อนที่ 160,170,180,190,200 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	65
4.13 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน	
ของไซโคลนชุดที่ 1.....	67
4.14 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับ	
อัตราการป้อนฝุ่นวัดถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1.....	67
4.15 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน	
ของไซโคลนชุดที่ 2.....	68
รูปที่	หน้า
4.16 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน	

กับอัตราการป้อนฝุ่นวัดถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2.....	69
4.17 ผลของประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 1.....	70
4.18 ผลของประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 2.....	71
4.19 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 145,155,165 t/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	72
4.20 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 235,245,255 t/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	72
4.21 อิทธิพลของอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 115,125,135 t/h ของไซโคลนชุดที่ 1.....	73
4.22 อิทธิพลของอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น ที่อัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ 160,180,200 t/h ของไซโคลนชุดที่ 2.....	74
4.23 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 1.....	75
4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุของไซโคลนชุดที่ 1.....	76
4.25 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดักฝุ่นกับอัตราการ ป้อนฝุ่นวัดถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1.....	76
4.26 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นไซโคลนชุดที่ 2.....	77
4.27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุของไซโคลนชุดที่ 2.....	78
4.28 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดักฝุ่นกับอัตราการ ป้อนฝุ่นวัดถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2.....	79

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

1. $F_{1k}$	อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบที่ไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
2. $F_{1h}$	อัตราป้อนลมร้อนที่ไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
3. $F_{1a}$	อัตราการมั่วเข้าไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
4. $F_{1c}$	อัตราป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
5. $F'_{1k}$	อัตราฝุ่นวัตถุดิบร้อนออกจากไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
6. $F'_{1h}$	อัตราฝุ่นลมร้อนออกจากไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
7. $F'_{1c}$	อัตราคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
8. $F'_{1d}$	อัตราฝุ่นวัตถุดิบออกจากไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
9. $F_{2k}$	อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบที่ไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
10. $F_{2h}$	อัตราป้อนลมร้อนที่ไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
11. $F_{2a}$	อัตราการเย็นเข้าไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
12. $F_{2c}$	อัตราป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
13. $F_{2rk}$	อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบที่ถูกดักจับทั้งหมดจากห่ออุ่นวัตถุดิบเข้าไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
14. $F'_{2k}$	อัตราฝุ่นวัตถุดิบร้อนออกจากไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
15. $F'_{2h}$	อัตราฝุ่นลมร้อนออกจากไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
16. $F'_{2c}$	อัตราฝุ่นวัตถุดิบออกจากไซโคลนชุดที่ 2, ton/h
17. $F'_{2d}$	อัตราฝุ่นวัตถุดิบออกจากไซโคลนชุดที่ 1, ton/h
18. $F_{fm}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้าน main burner, ton/h
19. $F_{fc}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้าน calciner, ton/h
20. $F_{AF}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงทดแทน, ton/h
21. $H_{1k}$	เอนทาลปีฝุ่นวัตถุดิบสายเข้าไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
22. $H_{1h}$	เอนทาลปีก๊าซร้อนสายเข้าไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
23. $H_{1c}$	เอนทาลปีคาร์บอนไดออกไซด์สายเข้าไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
24. $H_{1a}$	เอนทาลปีอากาศรั่วเข้าไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
25. $H'_{1k}$	เอนทาลปีฝุ่นวัตถุดิบร้อนสายออกไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
26. $H'_{1h}$	เอนทาลปีก๊าซร้อนสายออกไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h

27. $H'_{1c}$	เอนทาลปีคาร์บอน ไดออกไซด์สายออกไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
28. $H'_{1a}$	เอนทาลปีอากาศร่วออกไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
29. $H'_{1d}$	เอนทาลปีฝุ่นวัตถุคิบสายออกไซโคลนชุดที่ 1, MJ/h
30. $H_{2k}$	เอนทาลปีฝุ่นวัตถุคิบสายเข้าไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
31. $H_{2h}$	เอนทาลปีก๊าซร้อนสายเข้าไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
32. $H_{2c}$	เอนทาลปีคาร์บอน ไดออกไซด์สายเข้าไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
33. $H_{2a}$	เอนทาลปีอากาศร่วเข้าไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
34. $H_{2rk}$	เอนทาลปีฝุ่นวัตถุคิบนำกลับใช้ใหม่ 2, MJ/h
35. $H'_{2k}$	เอนทาลปีฝุ่นวัตถุคิบร้อนสายออกไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
36. $H'_{2h}$	เอนทาลปีก๊าซร้อนสายออกไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
37. $H'_{2c}$	เอนทาลปีคาร์บอน ไดออกไซด์สายออกไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
38. $H'_{2a}$	เอนทาลปีอากาศร่วออกไซโคลนชุดที่ 2, MJ/h
39. $CV_{fm}$	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงด้าน main burner, Gcal/kg fuel
40. $CV_{fc}$	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงด้าน main burner, Gcal/kg fuel
41. $CV_{AF}$	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทดแทน, Gcal/kg fuel
42. $H_{conT}$	อัตราการใช้ความร้อนในการเผาปูนทั้งหมด, Gcal/h
43. $H_{conM}$	อัตราการใช้ความร้อนในการเผาปูนด้าน main burner, Gcal/h
44. $H_{conC}$	อัตราการใช้ความร้อนในการเผาปูนด้าน calciner, Gcal/h
45. $R_{conM}$	สัดส่วนการใช้ความร้อนในการเผาปูนด้าน main burner, ร้อยละ
46. $R_{conC}$	สัดส่วนการใช้ความร้อนในการเผาปูนด้าน calciner, ร้อยละ
47. $\Pi_1$	ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของไซโคลนชุดที่ 1, ร้อยละ
48. $\Pi_2$	ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของไซโคลนชุดที่ 2, ร้อยละ
49. $V_{min1}$	ปริมาณก๊าซที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของหัวเชื้อเพลิงหลัก, ton/h
50. $V_{min2}$	ปริมาณก๊าซที่ได้หลังจากการเผาไหม้ของแคลไซเนอร์, ton/h
51. $A_{min}$	ปริมาณอากาศต่ำสุดที่ใช้สำหรับการเผาไหม้, $Nm^3/kg fuel$
52. $C$	ปริมาณคาร์บอน, kg C/kg fuel
53. $N$	ปริมาณไนโตรเจน, kg N/kg fuel
54. $O$	ปริมาณออกซิเจน, kg O/kg fuel
55. $S$	ปริมาณซัลเฟอร์, kg S/kg fuel
56. $H_2O_{fuel}$	ปริมาณน้ำในเชื้อเพลิง, kg $H_2O/kg fuel$



57. R	ค่าคงที่ของก๊าซ , $8.314\ 472 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ bar K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
58. M	น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ, 29.4 g/mol
59. m	ปริมาณก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้, ton/h
60. Excess air1	ปริมาณอากาศส่วนส่วนเกินจากการเผาไหม้ที่ main burner, ton/h
61. Excess air2	ปริมาณอากาศส่วนส่วนเกินจากการเผาไหม้ที่ Calciner, ton/h
62. O <sub>2</sub> 1	ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากไซโคลนเครื่องล่างของไซโคลนชุดที่ 1, ร้อยละ
63. O <sub>2</sub> '1	ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากไซโคลนเครื่องบนของไซโคลนชุดที่ 1, ร้อยละ
64. O <sub>2</sub> 2	ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากไซโคลนเครื่องล่างของไซโคลนชุดที่ 2, ร้อยละ
65. O <sub>2</sub> '2	ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากไซโคลนเครื่องบนของไซโคลนชุดที่ 2, ร้อยละ
66. % cal <sub>1</sub>	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยา calcinations ของ CaCO <sub>3</sub> จากไซโคลนเครื่องล่างสุดของไซโคลนชุดที่ 1, ร้อยละ
67. % cal <sub>2</sub>	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยา calcinations ของ CaCO <sub>3</sub> จากไซโคลนเครื่องล่างสุดของไซโคลนชุดที่ 2, ร้อยละ
68. LOI <sub>kr</sub>	อัตราส่วนสูญเสียจากการเผาไหม้ของฝุ่นวัดถุคิบ, ร้อยละ
69. LOI <sub>1</sub>	อัตราส่วนสูญเสียจากการเผาไหม้ของฝุ่นวัดถุคิบของไซโคลนเครื่องสุดท้ายของไซโคลนชุดที่ 1, ร้อยละ
70. LOI <sub>2</sub>	อัตราส่วนสูญเสียจากการเผาไหม้ของฝุ่นวัดถุคิบของไซโคลนเครื่องสุดท้ายของไซโคลนชุดที่ 2, ร้อยละ
71. T <sub>1k</sub>	อุณหภูมิฝุ่นวัดถุคิบขาเข้าไซโคลนชุดที่ 1, °C
72. T <sub>2k</sub>	อุณหภูมิฝุ่นวัดถุคิบขาเข้าไซโคลนชุดที่ 2, °C
73. T' <sub>1k</sub>	อุณหภูมิฝุ่นวัดถุคิบขาออกไซโคลนชุดที่ 1, °C
74. T' <sub>2k</sub>	อุณหภูมิฝุ่นวัดถุคิบขาออกไซโคลนชุดที่ 2, °C
75. T <sub>1h</sub>	อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าไซโคลนชุดที่ 1, °C
76. T <sub>2h</sub>	อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าไซโคลนชุดที่ 2, °C
77. T' <sub>1h</sub>	อุณหภูมิก๊าซร้อนขาออกไซโคลนชุดที่ 1, °C
78. T' <sub>2h</sub>	อุณหภูมิก๊าซร้อนขาออกไซโคลนชุดที่ 2, °C

79. $T_{1c}$	อุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าไซโคลนชุดที่ 1, °C
80. $T_{2c}$	อุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าไซโคลนชุดที่ 2, °C
81. $T'_{1c}$	อุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกไซโคลนชุดที่ 1, °C
82. $T'_{2c}$	อุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกไซโคลนชุดที่ 2, °C
83. $T_{2rk}$	อุณหภูมิฝุ่นวัสดุคืบ recycle ขาเข้าไซโคลนชุดที่ 2, °C
84. $C_{pk}$	ความจุความร้อนจำเพาะของฝุ่นวัสดุคืบ, kJ/kg.K
85. $C_{ph}$	ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซร้อน, kJ/kg.K
86. $C_{pF}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศรั่วเข้าระบบ, kJ/kg.K
87. $C_{pa}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg.K
88. $T_0$	อุณหภูมิอ้างอิง, °C
89. $T_a$	อุณหภูมิอากาศรั่วเข้าระบบ, °C
90. $\sigma$	ค่าคงที่ของสตีฟานและโบลท์ซมานน์มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}$ , $W/m^2K^4$
91. $A$	พื้นที่ผิวผนังไซโคลน, $m^2$
92. $T_s$	อุณหภูมิของผนังไซโคลน, °K
93. $T_a$	อุณหภูมิอากาศ, °K
94. $\epsilon$	Emissivity constant ของผนังไซโคลน, 0.9
95. $h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $kW/m^2°C$
96. $Q_{conv}$	อัตราการสูญเสียความร้อนด้วยการพาความร้อน, GW
97. $Q_{rad}$	อัตราการสูญเสียความร้อนด้วยการแผ่รังสี, GW
98. $M_h$	ปริมาณของฝุ่นวัสดุคืบที่อยู่ในห่ออุณหภูมิ ณ เวลาใดๆ (Hold up), kg
99. $\rho_s$	ความหนาแน่นของฝุ่นวัสดุคืบ, $kg/m^3$
100. $D_p$	ขนาดฝุ่นวัสดุคืบ, m
101. $A_h$	พื้นที่ใช้ถ่ายเทความร้อน, $m^2$

# บทที่ 1

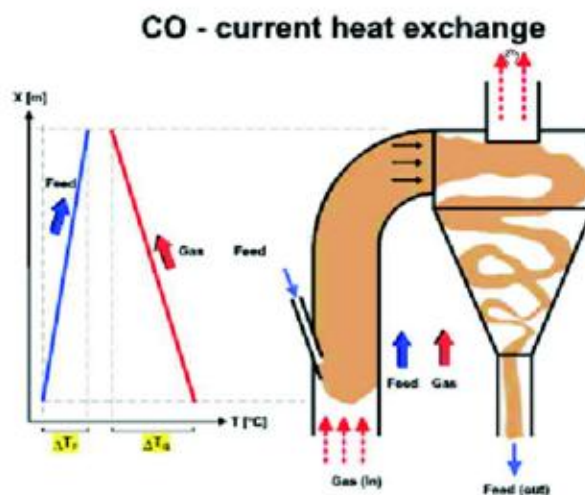
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตไม้เป็นสิ่งที่สำคัญในการก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย สะพาน รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในปีค.ศ.1824 ได้มีการคิดค้นปูนซีเมนต์ขึ้นเพื่อใช้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัย สะพานและสิ่งต่างๆ แทนไม้ เนื่องจากไม้มีความแข็งแรงน้อยกว่าปูนซีเมนต์ และในปัจจุบันมีการใช้ปูนซีเมนต์มาผลิตเป็นอิฐ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน มีการนำปูนซีเมนต์ไปทำอิฐทนไฟที่ใช้เป็นฉนวนในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งนำไปใช้สร้างเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งเราจะเห็นว่าจากอดีตจนถึงปัจจุบันปูนซีเมนต์ได้มีการพัฒนารูปแบบการนำไปใช้งานอย่างมากมาย

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงมากทั้งในด้าน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการบดวัตถุดิบ (kiln feed) และการบดซีเมนต์(Cement) และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาฝุ่นวัตถุดิบภายในเตาเผา โดยจะต้องเผาให้ได้อุณหภูมิประมาณ 1,450 °C ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงจำนวนมาก และเมื่อพิจารณาจากต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์นั้น ต้นทุนทางด้านเชื้อเพลิงสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 60% ของต้นทุนทั้งหมด และในกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์นั้นยังเป็นกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และปัญหาการปล่อยฝุ่นสู่บรรยากาศดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นห่ออุ่นวัตถุดิบ(Preheater) เพื่อมาช่วยในการอุ่นวัตถุดิบก่อนที่จะเข้าเตาเผาและช่วยในการคัดแยกฝุ่นในเบื้องต้นไม่ให้เข้าไปสู่เครื่องคัดแยกละเอียดมากเกินไป ซึ่งลักษณะของห่ออุ่นวัตถุดิบนั้นมีลักษณะเป็นไซโคลนต่อแบบอนุกรมโดยจำนวนไซโคลนและขนาดขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตลักษณะการทำงานนั้นเป็นการดึงเอาลมร้อน(Hot gas) ที่เหลือมาจากการเผาผ่านไซโคลนต่างๆ และฝุ่นวัตถุดิบป้อนเข้าทางด้านบน ซึ่งการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างฝุ่นวัตถุดิบและลมร้อน เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการสัมผัสตรงในทิศทางเดียวกัน(direct contact co-current heat transfer) ดังรูปที่ 1 และไซโคลนในแต่ละเครื่องยังสามารถคัดแยกฝุ่นวัตถุดิบไม่ให้ออกจากระบบมากเกินไปด้วย

ดังนั้นในการทำวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างฝุ่นวัสดุกับและก๊าซร้อนและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมฝุ่นของห่อฝุ่นวัสดุเพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์และยังช่วยควบคุมปริมาณฝุ่นที่ออกจากระบบให้น้อยลงด้วย



รูปที่ 1.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลมร้อน(co-current heat exchange)

(Holcim cement manufacturing vol.4,2553:53)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนของฝุ่นวัสดุกับก๊าซร้อนภายในไซโคลน
2. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการคัดแยกฝุ่นวัสดุของไซโคลน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาโดยใช้ห่อฝุ่นวัสดุของเตาเบอร์3 ของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์แห่งหนึ่ง
2. ทำการศึกษาโดยใช้ไซโคลน 4 เครื่องสำหรับไซโคลนชุดที่ 1
3. ทำการศึกษาโดยใช้ไซโคลน 4 เครื่องสำหรับไซโคลนชุดที่ 2
4. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2554 ถึงวันที่ 26 กรกฎาคม 2555

5. ใช้อัตราการป้อนของฝุ่น(Kiln feed rate) จาก110-170ตันต่อชั่วโมงของไซโคลนชุดที่ 1และอัตราการป้อนของฝุ่นจาก 140-280 ตันต่อชั่วโมงของไซโคลนชุดที่ 2ซึ่งยอมรับความผิดพลาดของอัตราการป้อนฝุ่นจากที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 3

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. รวบรวมข้อมูลในกระบวนการผลิตทั้งหมดและข้อมูลจากผลการทดสอบ
3. ทำสมมูลมวลและสมมูลพลังงาน
4. ออกแบบการทดลองสำหรับหาประสิทธิภาพในการคักฝุ่น
3. ทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการคักฝุ่น
5. วิเคราะห์ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพในการคักฝุ่น
6. สรุปผลและจัดทำรายงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการคักแยกฝุ่น
2. ทราบแนวทางในการเดินเครื่องจักรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์

การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process)

ขั้นตอนที่ 1 นำวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากแหล่งนั้นคือหินปูน(Limestone) และดินดาน(Shale) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูนมาซึ่งทำการผลิต

ขั้นตอนที่ 2 นำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาลดขนาดลงเพื่อให้เหมาะกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป โดยการนำมาผ่านเครื่องย่อย (Crusher) ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage Yard) นอกจากนี้วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ(Corrective Materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัว เพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่าน เครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน

ขั้นตอนที่ 3 ลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) ซึ่งในหม้อบดวัตถุดิบ(Raw Mill) นี้จะบดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียดรวมกันซึ่งเรียกว่า ผุ่นวัตถุดิบ (Kiln feed) โดยการควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้วัตถุดิบสำเร็จมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผาด้วย

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ววัตถุดิบสำเร็จจะถูกลำเลียงผ่านเครื่องแยกวัตถุดิบผสมแล้ว (Cyclone) ไปยังถังผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal Homogenizing Silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน

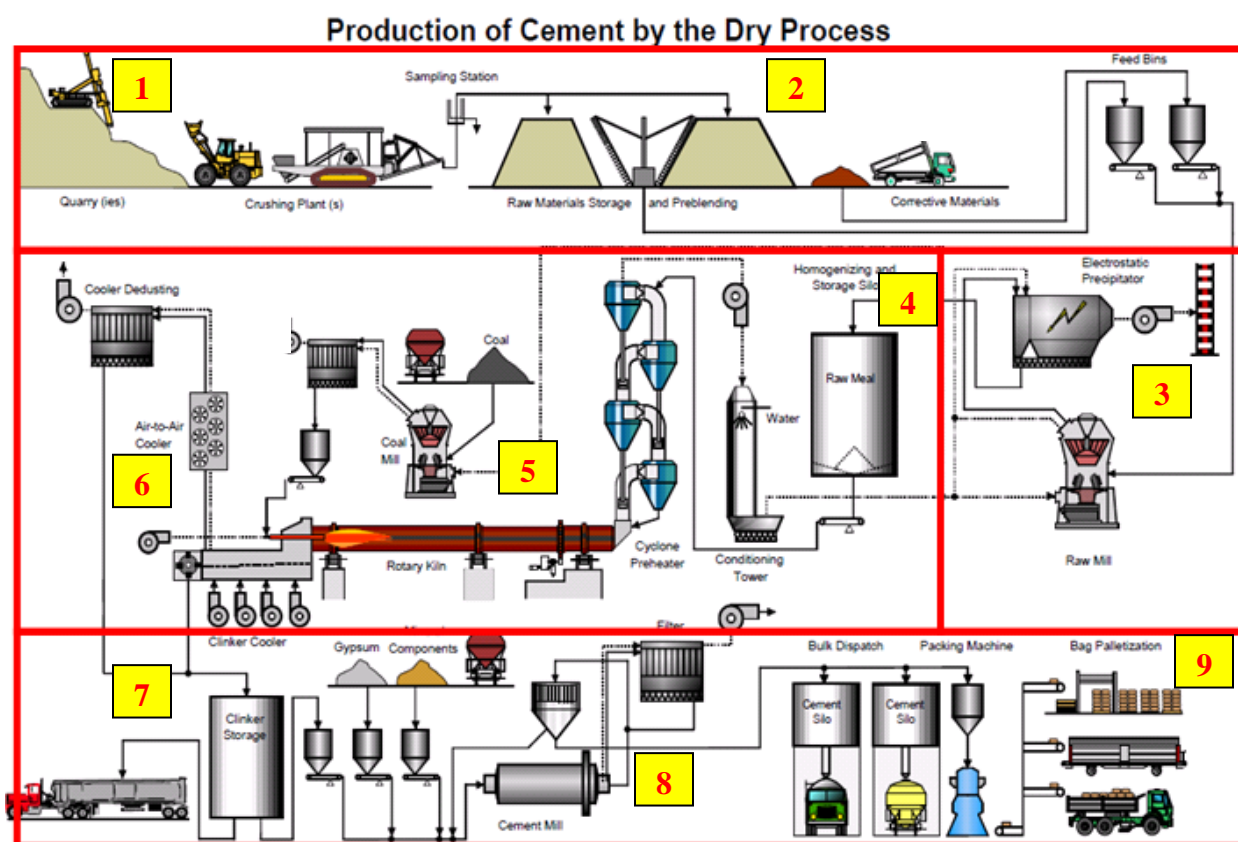
ขั้นตอนที่ 5 เป็นกระบวนการเผา โดยวัตถุดิบสำเร็จจะถูกส่งไปเผาในเตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) โดยกระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ห่ออุ่นวัตถุดิบ (Preheater) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ แล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ  $1,450^{\circ}\text{C}$  จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker)

ขั้นตอนที่ 6 เป็นการทำให้ปูนเม็ดเย็นลงโดยการนำปูนเม็ดไปผ่านห้องลดความร้อน (Clinker cooler)

ขั้นตอนที่ 7 ลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ถังเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 เป็นขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยการนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement Mill) ความละเอียดในการบด และอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 9 นำปูนซีเมนต์ผ่านเครื่องแยกปูนละเอียด แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในถังเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

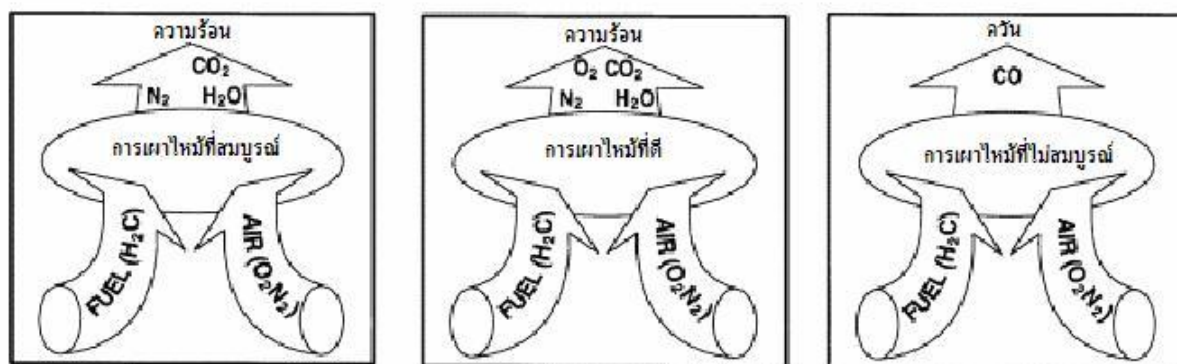


รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

(United State of environmental protection agency, 2010 : 6)

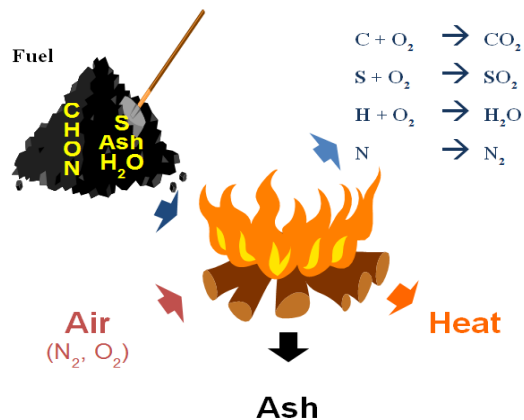
## 2.2 องค์ประกอบกระบวนการเผาไหม้

วัตถุประสงค์ของการเผาไหม้ที่ดีคือการปลดปล่อยความร้อนทั้งหมดในเชื้อเพลิงซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมปัจจัย 3 ประการของการเผาไหม้ (สาม T) ซึ่งได้แก่ (1) อุณหภูมิ (Temperature) ซึ่งจะต้องมีค่าสูงพอที่จะจุดไฟและทำให้เชื้อเพลิงติดไปตลอดเวลาได้ (2) ความแปรปรวน (Turbulence) ซึ่งจะเป็นตัวเริ่มการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนและ (3) เวลา (Time) ซึ่งจะต้องมีเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยกตัวอย่างดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอากาศเสียในระหว่างการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติถ้ามีเชื้อเพลิงหรืออากาศมากหรือน้อยเกินไปในระหว่างการเผาไหม้ก็จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของเชื้อเพลิงและเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ขึ้นจะต้องมีปริมาณออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่แน่นอนเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และต้องการอากาศส่วนเกินบางส่วนเพื่อให้แน่ใจว่าจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์อย่างไรก็ตามถ้ามีอากาศส่วนเกินมากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเผาไหม้ที่สมบูรณ์การเผาไหม้ที่ดีและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์  
(แนวทางปฏิบัติเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมของเอเชีย, 2006 : 14)





รูปที่ 2.3 การเผาไหม้ของถ่านหิน

(Holcim cement manufacturing vol. 4,2553:53)

### 2.2.1 การคำนวณแบบสมมูล (Stoichiometric)

- ความต้องการอากาศ

เราสามารถคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการเพื่อการเผาไหม้ได้โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

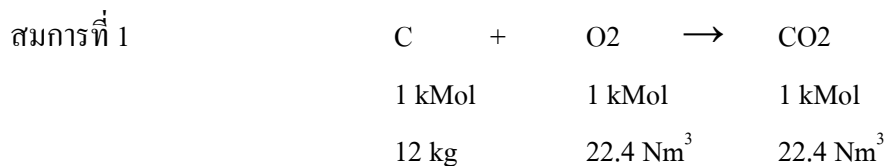
**ขั้นตอนที่ 1** การคำนวณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงยกตัวอย่างส่วนประกอบของเชื้อเพลิงตัวอย่างเช่นตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

(แนวทางปฏิบัติเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมของเอเชีย, 2006 : 20 )

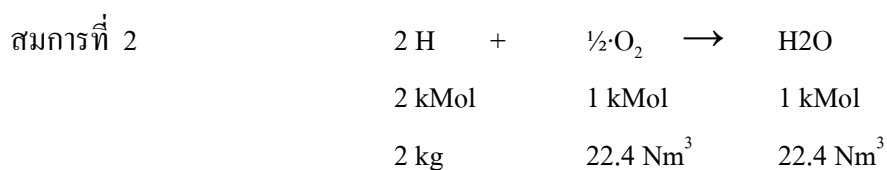
ส่วนประกอบ	น้ำมันเชื้อเพลิง	ถ่านหิน	ก๊าซธรรมชาติ
คาร์บอน	84	41.11	74
ไฮโดรเจน	12	2.76	25
กำมะถัน	3	0.41	-
ออกซิเจน	1	9.89	เล็กน้อย
ไนโตรเจน	เล็กน้อย	1.22	0.75
ซีเถ้า	เล็กน้อย	38.63	-
น้ำ	เล็กน้อย	5.98	-

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาสมการการเผาไหม้ของส่วนประกอบต่างๆดังนี้



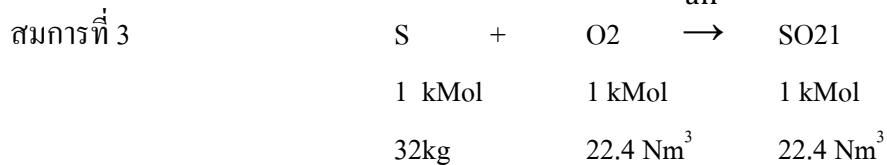
ความต้องการอากาศจะได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}_0^3}{12 \text{ kg}_C} \times \frac{1}{0.21 \frac{\text{Nm}_0^3}{\text{Nm}_0^3 \text{air}}} = 8.89 \frac{\text{Nm}_0^3 \text{air}}{\text{Kg } C}$$



ความต้องการอากาศจะได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}_0^3}{2 \text{ kg}_H} \times \frac{1}{0.21 \frac{\text{Nm}_0^3}{\text{Nm}_0^3 \text{air}}} \times \frac{1}{2} = 26.67 \frac{\text{Nm}_0^3 \text{air}}{\text{Kg } H}$$



ความต้องการอากาศจะได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}_0^3}{32 \text{ kg}_S} \times \frac{1}{0.21 \frac{\text{Nm}_0^3}{\text{Nm}_0^3 \text{air}}} = 3.33 \frac{\text{Nm}_0^3 \text{air}}{\text{Kg } S}$$

ความต้องการอากาศจากปริมาณ  $\text{O}_2$

$$\frac{-22.4 \text{ Nm}_0^3}{32 \text{ kg}_S} \times \frac{1}{0.21 \frac{\text{Nm}_0^3}{\text{Nm}_0^3 \text{air}}} = -3.33 \frac{\text{Nm}_0^3 \text{air}}{\text{Kg } O}$$

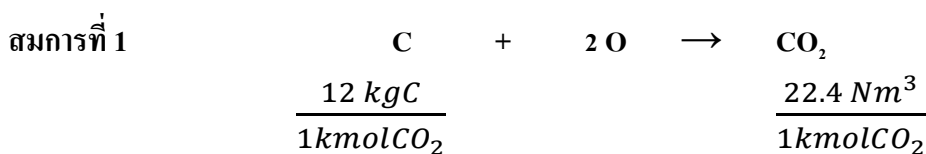
### ขั้นตอนที่ 3 รวมสมการ

ดังนั้นสมการรวมสำหรับปริมาณอากาศขั้นต่ำที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ ( $A_{\min}$ ) คือ

$$A_{\min} (\text{Nm}^3/\text{kg fuel}) = 8.89C + 26.67H + 3.33 \cdot S - 3.33O \quad (2.1)$$

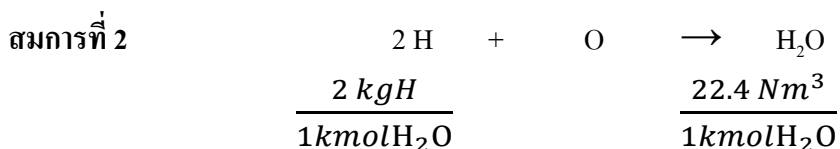
#### ● ปริมาณอากาศที่ได้จากการเผาไหม้

ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะได้ดังสมการดังต่อไปนี้



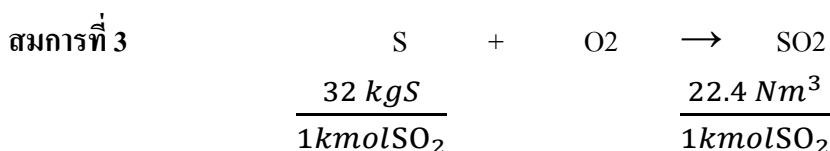
ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}^3}{12 \text{ kgC}} = \frac{1.87 \text{ Nm}^3}{\text{kgC}}$$



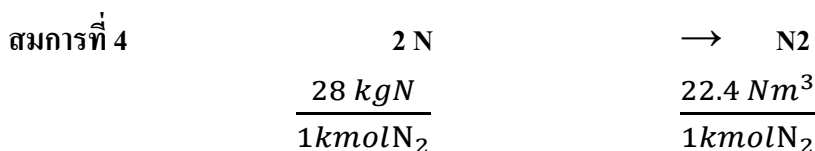
ปริมาณไอน้ำที่ได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}^3}{2 \text{ kgH}} = \frac{11.2 \text{ Nm}^3}{\text{kgH}}$$



ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}^3}{32 \text{ kgS}} = \frac{0.7 \text{ Nm}^3}{\text{kgS}}$$



ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ได้

$$\frac{22.4 \text{ Nm}^3}{28 \text{ kgN}} = \frac{0.8 \text{ Nm}^3}{\text{kgN}}$$

$$\text{สมการที่ 5} \quad \text{Humidity}_{\text{fuel}} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

$$\frac{18 \text{ kgH}_2\text{O}}{1 \text{ kmolH}_2\text{O}} = \frac{22.4 \text{ Nm}^3}{1 \text{ kmolH}_2\text{O}}$$

$$\text{ปริมาณไอน้ำที่ได้จากถ่าน} \quad \frac{22.4 \text{ Nm}^3}{28 \text{ kgH}_2\text{O}} = \frac{1.244 \text{ Nm}^3}{\text{kgH}_2\text{O}}$$

$$\text{สมการที่ 6} \quad \text{Humidity}_{\text{air}} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

ปริมาณไอน้ำที่ได้จากอากาศที่ป้อนเข้าไป % Humidity  $\cdot A_{\text{min}}$

$$\text{สมการที่ 7} \quad \text{N}_2 \text{ ที่ได้จากอากาศ } 0.79 A_{\text{min}}$$

ดังนั้นสมการรวมสำหรับก๊าซที่ได้จากการใช้ในการเผาไหม้ ( $V_{\text{min}}$ )

$$V_{\text{min}} (\text{Nm}^3/\text{kgfuel}) = 1.87C + 0.8N + 11.2H + 1.24 \text{ H}_2\text{O}_{\text{fuel}} + 0.7S + 0.79A_{\text{min}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{air}} \cdot A_{\text{min}} \quad (2.2)$$

## 2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heattransfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทของพลังงานจากแหล่งที่มีความร้อนสูงกว่า ไปยังแหล่งที่มีความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสอง โดยการถ่ายเทความร้อนที่เป็นความร้อนสูญเสียจากห่ออุณหภูมิความร้อนในอุตสาหกรรมซีเมนต์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือการพาความร้อน (Convection heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

### 2.3.1 การแผ่รังสีความร้อน

ในการแผ่รังสีความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพาความร้อน แต่ในการแผ่รังสีนี้ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศการที่จะอธิบายว่าความร้อนเคลื่อนที่ได้อย่างไรนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ในการอธิบายการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ เช่นเดียวกับตัวกลางชนิดหนึ่ง ผลที่ได้จากการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ยกกำลังสี่แต่ค่าการนำความร้อนและการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วน

โดยตรงกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งหาได้จากกฎของสเตฟาน โบลท์ซมานน์ (Stafan-boltzman's law) ขึ้นพื้นฐานดังสมการที่ (2.3)

$$Q = \sigma A T_s^4 - T_a^4 \quad (2.3)$$

โดยที่

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟานและ โบลท์ซมานน์มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8}$ ,  $W/m^2C^4$

A คือ พื้นที่ผิวที่มีการแผ่รังสี, m

$T_s$  คือ อุณหภูมิของวัตถุ, °C

$T_a$  คืออุณหภูมิของอากาศ, °C

### 2.3.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนคือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งกับของไหล โดยที่ไหลของไหลเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็ง

$$Q_{conv} = hA(T_h - T_c) \quad (2.4)$$

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $W/m^2C$

$Q_{conv}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของแข็งที่สัมผัสกับของไหล, W

$T_h$  คืออุณหภูมิของของไหลหรือพื้นที่ผิวของของแข็งที่ร้อนกว่า, °C

$T_c$  คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่าของของไหลหรือพื้นที่ผิวของของแข็ง, °C

A คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างผนังต่อการไหลของของไหล,  $m^2$

### 2.3.3 รูปแบบการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทของพลังงานจากแหล่งที่มีความร้อนสูงกว่า ไปยังแหล่งที่มีความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสอง โดยสามารถแบ่งตามรูปแบบการถ่ายเทความร้อนได้ 2 แบบดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสทางอ้อม (Indirect contact heat exchanger)

เป็นการถ่ายเทความร้อนกันระหว่าง 2 กระแสที่แยกโดยไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง โดยจะมีตัวกลางเป็นสื่อกลางในการถ่ายเทความร้อนยกตัวอย่างเช่น ผนังท่อเหล็ก

- การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสตรง (Direct contact heat exchanger)

เป็นการถ่ายเทความร้อนกันระหว่าง 2 กระแสที่ผสมกันทำให้สัมผัสกันโดยตรงโดยไม่มีตัวกลางซึ่งมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1. ไม่เกิดการกัดกร่อนของผนังสื่อกลางในการถ่ายเทความร้อน
2. ไม่เกิดตะกรันพอกผนังท่อ
3. การเพิ่มอัตราในการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการผสมกันระหว่าง 2 กระแสทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้น
4. ราคาถูก

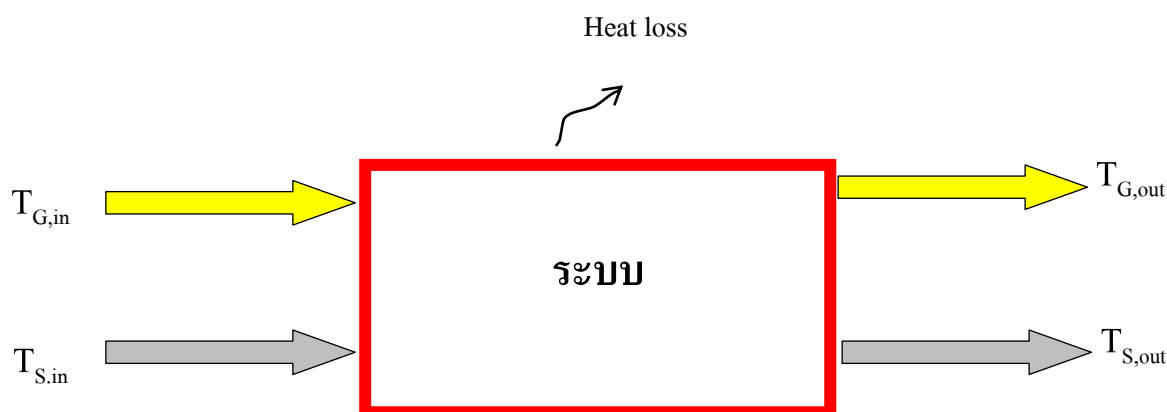
ข้อเสีย

1. วัตถุทั้ง 2 กระแสต้องไม่สามารถผสมกันได้ ซึ่งอาจเกิดสิ่งแปลกปลอมที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง 2 กระแสขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้ากันได้
2. วัตถุทั้ง 2 กระแสต้องมีความดันที่ไม่แตกต่างกันในการแลกเปลี่ยนความร้อน

#### 2.3.4 การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อน (Hot gas) กับ อนุภาคของแข็ง (Solid particle)

การถ่ายเทความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีขั้นตอนในการส่งผ่านความร้อนจากก๊าซร้อนไปยังอนุภาคของแข็งด้วยกัน 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 การถ่ายเทความร้อนจาก bulk ของก๊าซร้อนไปสู่ผิวของอนุภาคของแข็งโดยผ่านฟิล์มก๊าซรอบๆของอนุภาคของแข็งซึ่งเรียกว่าเป็นความต้านทานภายนอก (External resistance) ในขั้นตอนที่ 2 จะเกิดการถ่ายความร้อนไปสู่ภายในอนุภาคของแข็งเป็นความต้านทานภายใน (Internal resistance) โดยทั้ง 2 ขั้นตอนนั้นถูกควบคุมโดยตัวแปรไร้นหน่วยไบอ็อท (Biot number) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นสัดส่วนกันระหว่าง ความต้านทานภายในกับความต้านทานภายนอกโดยถ้าตัวแปรไร้นหน่วยไบอ็อท (มีค่ามากกว่า 2 แสดงว่า ความต้านทานภายในเป็นปัจจัยที่มีผลกับการถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคของแข็ง แต่ถ้าตัวแปรไร้นหน่วยไบอ็อทมีค่าน้อยกว่า 2 นั้นแสดงว่าความต้านทาน

ภายนอกเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคของแข็งนั้นทำให้สามารถสมมติได้ว่าของแข็งมีสถานะอุณหภูมิเท่ากันตลอด (Isothermal) การเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อนภายในไซโคลอนนั้นจะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนสัมผัสโดยตรง (Direct contact) ในแบบทิศทางเดียวกัน (CO-Current flow) ดังรูปที่ 2.4 โดยมีระบบดังนี้



รูปที่ 2.4 แสดงระบบการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับอนุภาคของแข็ง

โดยที่

$T_{G,in}$  = อุณหภูมิของก๊าซร้อนขาเข้า, °C

$T_{G,iout}$  = อุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออก, °C

$T_{S,in}$  = อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งขาเข้า, °C

$T_{S,out}$  = อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งออก, °C

## 2.4 ไซโคลน (Cyclone)

เครื่องเก็บฝุ่นเชิงกล (Mechanical collectors) เป็นเครื่องมือที่แยกฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊สหรืออากาศโดยใช้แรงถ่วงหรือแรงเฉื่อยกระทำบนอนุภาคหรือทั้ง 2 อย่างตัวอย่างเครื่องเก็บฝุ่นประเภทนี้ได้แก่ ถังตกอนุภาค (Gravity setting chambers) และไซโคลน (Cyclone collectors)

ไซโคลนเป็นเครื่องมือสำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนออกจากอากาศโดยใช้แรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศหมุนวน (Vortex) จึงสามารถแยกอนุภาคออกจากอากาศได้การเกิดกระแสวนทำได้โดยการให้อากาศไหลเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสมีข้อดีคือ ราคาต่ำ ติดตั้งและดำเนินการไม่สูง และสามารถใช้ได้กับฝุ่นที่มีอุณหภูมิสูง ส่วนข้อเสียคือความดันลดสูงและใช้ไม่ได้กับฝุ่นที่มีขนาดเล็กถึง 5 ไมครอน

### 2.4.1 กลไกในการจับอนุภาค (Collection mechanisms)

กลไกที่ใช้เก็บอนุภาคในไซโคลนมี 2 อย่างคือ

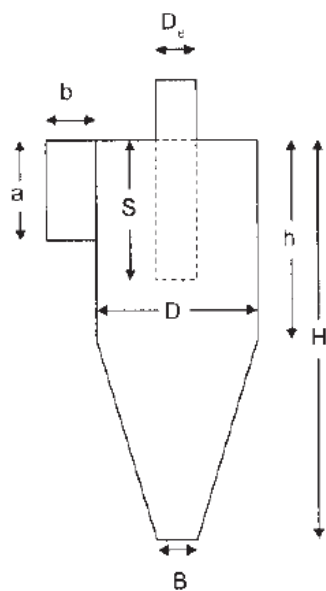
ก. แรงหนีศูนย์กลางหรือแรงเหวี่ยงซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศมีการหมุนทำให้อนุภาคถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลน

ข. แรงถ่วงเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ถึงผนังของไซโคลนแล้วอนุภาคที่หนักจะได้รับแรงถ่วงทำให้อนุภาคตกลงไปที่ถังพักข้างล่าง

### 2.4.2 หลักการทำงาน

ไซโคลนประกอบด้วยส่วนรูปทรงกระบอกและส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 โดยที่อากาศเคลื่อนเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสที่ใกล้ส่วนบนของเครื่องมือด้วยความเร็วเมื่ออากาศผ่านเข้ามาในไซโคลนจะเกิดกระแสวนขึ้น (เรียกว่า main vortex) ซึ่งทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลนกระแสวนนี้จะเคลื่อนลงจนถึงจุดหนึ่งที่อยู่เกือบปลายโคนอากาศจะหมุนกลับเป็นกระแสวนที่เล็กกว่าเดิม (เรียกว่า core vortex) และเคลื่อนที่ขึ้นไปตามตัวไซโคลนจนออกไปทางท่อออกที่อยู่ส่วนบนของเครื่องนั้นคือมีกระแสวน 2 ชั้น (double vortex) เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันสำหรับอนุภาคที่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลนจะเคลื่อนที่ลงไปยังส่วนปลายของโคนไปยังถังพัก (Hopper) เนื่องจากแรงถ่วงส่วนอากาศที่ไม่มีอนุภาคก็จะหมุนออกไปทางท่อออกที่อยู่ส่วนบนของไซโคลน





รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของไซโคลน  
(วรพจน์ กนกกันตพงษ์, 2551:83)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบไซโคลน  
(วรพจน์ กนกกันตพงษ์, 2551:83)

สัญลักษณ์	ความหมาย
D	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางไซโคลน
a	ความสูงทางเข้า
b	ความกว้างทางเข้า
S	ความสูงทางออก
$D_c$	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกก๊าซ
h	ความสูงทรงกระบอก
H	ความสูงไซโคลนทั้งหมด
B	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออกอนุภาค

### 2.4.3 ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาค

มีสมการหลากหลายที่นำมาใช้หาประสิทธิภาพของไซโคลอนในรูปของเกรด(Grade)หรือ ประสิทธิภาพในการคัดแยก (Fractional efficiency) สำหรับอนุภาคขนาดหนึ่งๆ ประสิทธิภาพในการคัดแยกหมายถึงสัดส่วนของอนุภาคที่ถูกไซโคลอนเก็บได้เมื่อเทียบกับส่วนอนุภาคขนาดนั้นที่เข้าสู่ไซโคลอน ดังจากสมการ

$$\eta_d = \frac{\text{อัตราการดักฝุ่นวัดฤดูบิ}}{\text{อัตราการป้อนฝุ่นวัดฤดูบิ}} \times 100 \quad (2.5)$$

โดยที่

$\eta_d$  คือ ประสิทธิภาพการดักฝุ่น

### 2.4.4 ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลอน

มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไซโคลอนได้แก่ลักษณะของไซโคลอนและ ลักษณะสมบัติของแก๊สและอนุภาคดังได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของไซโคลอน (วรพจน์ กนกกันตพงษ์, 2551:83)

พารามิเตอร์	ความดันลด	ประสิทธิภาพ
เพิ่มขนาดของไซโคลอน ( $D_c$ )	ลดลง	ลดลง
เพิ่มความยาวของส่วนทรงกระบอก ( $L_c$ ) และส่วนโคน ( $Z_c$ )	ลดลงเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
เพิ่มขนาดของท่ออากาศออก ( $D_o$ )	ลดลง	ลดลง
เพิ่มพื้นที่ท่ออากาศเข้า	เพิ่มขึ้น	ลดลง
เพิ่มความเร็ว	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ	ลดลง	ลดลง
ความเข้มข้นของฝุ่นมากขึ้น	ยิ่งลดลง	เพิ่มขึ้น
เพิ่มขนาดและ/หรือความหนาแน่นของอนุภาค	ไม่มีผล	เพิ่มขึ้น

## 2.5 สถิติบรรยาย ( Descriptive statistics )

สถิติบรรยาย คือ สถิติที่ใช้ในการศึกษาข้อเท็จจริงจากกลุ่มข้อมูลที่รวบรวมมาได้ เพื่อให้ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของข้อมูลกลุ่มนั้น โดยไม่ได้สรุปอ้างอิงผลการศึกษาไปยังกลุ่มข้อมูลกลุ่มอื่นหรือสรุปอ้างอิงไปยังประชากรที่ศึกษา

### 2.5.1 การแจกแจงความถี่

การแจกแจงความถี่เป็นการนำข้อมูลที่เป็นค่าของตัวแปรที่เราสนใจมาจัดเรียงตามลำดับความถี่ และแบ่งเป็นช่วงเท่าๆกัน จำนวนข้อมูลในแต่ละช่วงคะแนน เรียกว่า ความถี่ ในกรณีที่ความถี่แตกต่างกันระหว่างคะแนนสูงสุดกับคะแนนต่ำสุดไม่มาก ไม่จำเป็นต้องแบ่งช่วงคะแนนเป็นกลุ่ม ในแต่ละช่วงมี 1 คะแนนก็ได้ การแจกแจงความถี่มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ทราบภาพรวมของการแจกแจงข้อมูลทั้งหมดอย่างเป็นระบบ การจัดระบบและนำเสนอข้อมูลในเบื้องต้น สามารถนำเสนอข้อมูลในรูปแบบของตารางและแผนภูมิ ในที่นี้จะขอแยกเป็น 2 ส่วนในการนำเสนอ คือ ตารางแจกแจงความถี่ และกราฟและแผนภูมิแบบต่างๆ

#### ตารางการแจกแจงความถี่

การสร้างตารางการแจกแจงความถี่ ทำได้ 2 แบบ คือ

##### ก. การแจกแจงความถี่ของลักษณะที่สนใจที่เป็นไปได้ทั้งหมด

การแจกแจงความถี่แบบนี้ใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนลักษณะที่เป็นไปได้ทั้งหมดไม่มากนัก เช่น จำแนกตามเพศ คือ ชาย หญิง จำแนกตามระดับการศึกษา จำแนกตามอาชีพหลัก เป็นต้น

##### ข. การแจกแจงความถี่สำหรับค่าในแต่ละช่วงของลักษณะที่สนใจ

การแจกแจงความถี่แบบนี้ใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนลักษณะที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวนมาก เช่น ศึกษารายได้ของคนไทยทั้งหมด หรืออายุของคนไทยทั้งหมด เป็นต้น ดังนั้นในการแจกแจงความถี่จึงควรแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็นช่วงๆที่ต่อเนื่องกัน โดยแต่ละช่วงประกอบด้วยข้อมูลหลายๆค่า ทำให้ลดจำนวนค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดลง

#### ขั้นตอนการสร้างตารางแจกแจงความถี่

##### 1. หาค่าพิสัยของข้อมูล (R)

$$\text{พิสัย ( Range )} = \text{ค่าสูงสุด} - \text{ค่าต่ำสุด} \quad (2.6)$$

2. กำหนดจำนวนชั้น (k)

$$k = 1 + 3.3 \log N \quad (2.7)$$

3. กำหนดหาความกว้างของชั้น (Class interval)

I = ความกว้างของชั้น

R = พิสัย

K = จำนวนชั้น

### 2.5.2 การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง (Central tendency)

การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง เป็นการคำนวณค่ากลางของข้อมูลว่าอยู่ที่ใด การศึกษาในกรณีที่ต้องการค่าเพียงค่าเดียวเพื่อใช้อธิบายข้อมูลทั้งหมด จึงนิยมหาค่ากลางๆที่เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด

#### ค่าเฉลี่ย (Average หรือ Mean)

ค่าเฉลี่ยมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิก เป็นต้น แต่ค่าเฉลี่ยที่นิยมใช้กันมากที่สุดในวงการธุรกิจคือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตหรือมัธมิมเลขคณิต (arithmetic mean) โดยเรียกสั้น ๆ ว่า ค่าเฉลี่ยคือ ค่ากลาง ซึ่งคำนวณจากผลบวกของข้อมูลหารด้วยจำนวนของข้อมูลสัญลักษณ์ที่ใช้

คือ  $\bar{X}$  อ่านว่า เอ็กซ์บาร์ โดยผลบวก (sum) ของข้อมูลเขียน  $\sum_{i=1}^n X_i$  หมายถึง การบวกข้อมูล n จำนวน จาก  $X_1$  ถึง  $X_n$  เมื่อ n คือ จำนวนของข้อมูล ดังนั้นสูตรที่คำนวณคือ

$$\text{Mean: } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (2.8)$$

#### ข้อดีของค่าเฉลี่ย

1. การเปรียบเทียบข้อมูลเชิงปริมาณหลายๆชุด จำนวนข้อมูลมากๆ (มากกว่า 30 ข้อมูล) สามารถใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของข้อมูลชุดนั้นได้ ตามทฤษฎี "The Central Limit Theorem"
2. สะดวกในการคำนวณถึงแม้จะเก็บข้อมูลได้ไม่ครบ

#### ข้อเสียของค่าเฉลี่ย

1. ใช้กับข้อมูลเชิงปริมาณเท่านั้น
2. ค่าเฉลี่ยจะไม่ใช่ค่ากลางที่ดี ถ้ามีค่าผิดปกติไปมาก (ค่าที่สูงเกินไปมากๆ หรือค่าที่ต่ำเกินไปมากๆ)

### 2.5.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial designs)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งเพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วยโดยอิทธิพลร่วมคือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วมได้ชัดเจนนัก

#### การออกแบบเพื่อการคัดเลือก (Screening design)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลงโดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้คุณสามารถจะพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้หรือพิจารณาตามหลักการ ความสำคัญ จำนวนน้อยการคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด(Optimization) เพื่อบอกว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

#### การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็ม(Full factorial)

ในการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าที่ทุกๆเงื่อนไขของทุกค่าระดับปัจจัยที่มีในการทดลองโดยเงื่อนไขการทดลอง(Combination of factor levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนองโดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละอันจะเรียกว่ารัน(Run) และมีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนองและชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกรันจะเรียกว่าแบบการทดลอง(Design of experiment)

## 2.6งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อน (hot gas) กับ อนุภาคของแข็ง (solid particle) ส่วนที่ 2 เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกอนุภาคของแข็งโดยใช้ไซโคลน

### 2.6.1 งานวิจัยการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อน (hot gas)กับ อนุภาคของของแข็ง (solid particle)

ในปี 2006 Jain A.และคณะได้ทำการทดลองในเรื่อง “ studies on gas – solid heat transfer in cyclone heat exchanger ” โดยการทดลองนี้ได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง สารตั้งต้นของการผลิตซีเมนต์(Cement raw material) กับก๊าซร้อน(Hot gas) ภายในไซโคลน (Cyclone) โดยรูปแบบการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในไซโคลนเป็นสัมผัสโดยตรง (Direct contact) แบบทางเดียวกัน(CO-Current flow) ในการทดลองนี้ได้พูดถึงขั้นตอนการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกไปยังอนุภาคของแข็ง (Solid particle) ซึ่งมีอยู่ 2 ขั้นตอนคือ 1. จากภายนอกไปยังผิวของอนุภาคของแข็ง(External resistance)2. จากผิวของอนุภาคของแข็งถ่ายเทไปยังภายในของอนุภาคของแข็ง(Internal resistance) โดยมีตัวแปรไร้นิยามไปอ็อท (Biot number) มีค่าน้อยกว่า 2 ซึ่งแสดงว่าขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนที่กำหนดกระบวนการถ่ายเทความร้อนนี้ การทดลองนี้ได้ศึกษาถึงอัตราการป้อนของแข็ง (Solid feed rate) ในช่วง 0.5- 7.5 g/s, ความเร็วของอากาศภายในไซโคลนในช่วง 9-22 m/s และขนาดของของแข็ง 163 – 460  $\mu\text{m}$  ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate)อุณหภูมิขาออกและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient)ผลจากการทดลองเป็นดังนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนของแข็ง,ความเร็วของอากาศขาเข้า (Inlet air velocity) เพิ่มขึ้นและขนาดของอนุภาค (Particle size) มีขนาดเล็กลง ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนของแข็ง (Solid feed rate) เมื่อกำหนดความเร็วอากาศคงที่ (Air velocity) อีกทั้งได้ศึกษาค้นสมการสำหรับหาค่าตัวแปรไร้นิยามนัสเซล(Nu)เพื่อที่จะใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สภาวะต่างๆ

ในปี 2008 RajanK.S. และคณะ ทำการวิจัยเรื่อง “ Studies on gas – solid heat transfer during pneumatic conveying ” ได้นำยิปซัม (Gypsum) เป็นวัสดุของแข็ง (Solid material) แลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อน (Hot gas) โดยใช้การถูกพัดพาด้วยอากาศ (Pneumatic conveying) ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นสัมผัสโดยตรง (Direct contact) แบบทางเดียวกัน (CO-Currentflow) ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการอุ่น (Preheat) ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ โดยการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเร็วของอากาศที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศ (Air velocity) อยู่ในช่วง 4.3 – 5.8 m/s แต่เมื่อใช้ความเร็วอากาศที่มีค่า 6.3 m/s อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศ และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนของแข็ง (solid feed rate) ส่งผลให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

ในปี 2009 RajanK.S. และคณะ ทำการวิจัยเรื่อง “Thermal conductance of pneumatic conveying preheater for air–gypsum and air–sand heat transfer” ได้นำเอาทราย (sand) และยิปซัม (Gypsum) เป็นวัสดุของแข็ง (solid material) แลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซร้อน โดยใช้การถูกพัดพาด้วยอากาศ (Pneumatic conveying) ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นสัมผัสโดยตรง (direct contact) แบบทางเดียวกัน (co-currentflow) ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการอุ่น (preheat) ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ (cement) ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยของการเพิ่มอัตราการป้อนอนุภาคของแข็งและความเร็วของลมร้อนต่ออัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราการป้อนความร้อน (Thermal conductance) พบว่าหากเพิ่มอัตราการป้อนอนุภาคของแข็งและความเร็วลมร้อนจะทำให้ thermal conductance เพิ่มขึ้น

## 2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกอนุภาคของแข็ง (solid particle) โดยใช้ไซโคลน (cyclone)

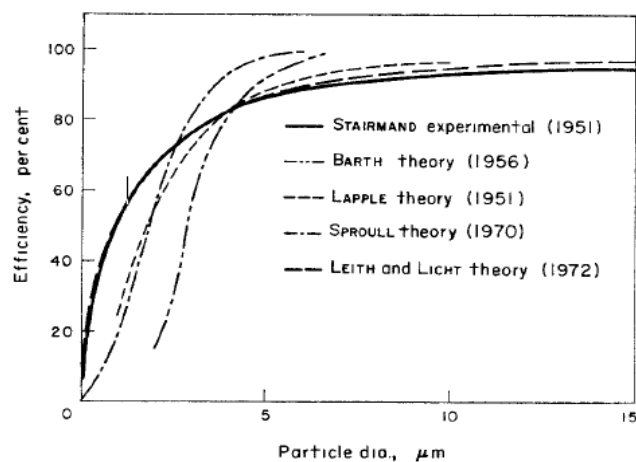
ในปี 1973 Leith D. และคณะ ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Cyclone performance and design” โดยการวิจัยนี้ได้อธิบายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกฝุ่นดังนี้ 1. เพิ่มขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค 2. เพิ่มความเร็วในการหมุนภายในไซโคลน 3. ลดเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโคลน 4. เพิ่มความยาวของไซโคลน 5. ออกแบบให้ก๊าซบางส่วนออกทางเดียวกับฝุ่น 6. ทำให้ผนังของไซโคลนเปียกอีกทั้งยังได้คิดค้นสมการ Leith and Licht ที่ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของการคัดแยกฝุ่นของไซโคลน โดยได้เปรียบเทียบความแม่นยำกับสมการอื่นรวมทั้งได้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ของ Stairmand และการทดลองของ Peterson and Whitby ผลปรากฏว่าสมการของ Leith and Licht นั้นมีความแม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดที่ขนาดของอนุภาคของแข็ง  $0 - 15 \mu\text{m}$

ในปี 2000 AriV. และคณะ ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Effect of dust concentration on a preheater cyclone in particulate transport for cement process” โดยนำฝุ่นที่เป็นสารตั้งต้นของการผลิตปูนซีเมนต์มาทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของฝุ่นที่มีผลความดันลด (Pressure drop) และประสิทธิภาพในการคัดแยกฝุ่น ผลปรากฏว่าถ้าความเข้มข้นของฝุ่นเพิ่มมากขึ้นความดันลดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพในการแยกฝุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ในปี 2003 ChenJ. ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Analysis on cyclone collection efficiencies at high temperatures” ซึ่งการวิจัยนี้ได้ใช้ฝุ่นซิลิกาซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่  $10 \mu\text{m}$  ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการคัดแยกฝุ่นที่สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง  $973 \text{ K}$  ใช้ความเร็วขาเข้าในช่วง  $12-36 \text{ m/s}$  และใช้ปริมาณฝุ่นซิลิกาคงที่อยู่ที่  $0.01 \text{ kg/m}^3 \text{ gas}$  ซึ่งการหาประสิทธิภาพของการคัดฝุ่นของไซโคลน (Cyclone) ในการทดลองนี้หาได้จากอัตราการป้อนจากนั้นซึ่งน้ำหนักที่ซึ่งได้จากถังที่รองรับฝุ่นที่ได้รับการแยกไว้ ก็จะได้สัดส่วนของการคัดแยกฝุ่น โดยการทดลองนี้ได้ทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกฝุ่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ความเร็วขาเข้า  $16 \text{ m/s}$ ,  $20 \text{ m/s}$ ,  $24 \text{ m/s}$ ,  $28 \text{ m/s}$  ผลปรากฏว่าที่ความเร็วขาเข้ายิ่งสูงความสามารถในการคัดแยกฝุ่นสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการแยกฝุ่นลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนืดของอากาศมีค่าสูงขึ้นทำให้แรงดึง (Drag force) ให้อนุภาคของซิลิกาแยกออกมามีค่าสูงขึ้น และยังทำให้ประสิทธิภาพในการหมุนวนรอบๆ ไซโคลนมีค่าลดลงและเมื่อกำหนดความเร็วขาเข้าที่  $20 \text{ m/s}$  เพื่อทดลองหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อขนาดอนุภาคสูงขึ้นที่อุณหภูมิ  $293 \text{ K}$ ,  $473 \text{ K}$ ,  $673 \text{ K}$ ,  $823 \text{ K}$ ,  $973 \text{ K}$  โดยจากการทดลองจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการคัดแยกฝุ่นจะน้อยลงเมื่อขนาดลดลงจนกระทั่งถึงขนาดวิกฤต (Critical size) จากนั้นจะสูงขึ้นแต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกฝุ่นลดลงและทำให้ทราบด้วยว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ขนาดวิกฤตสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งๆที่ไม่มีการเปลี่ยนขนาดของอนุภาคในการทดลอง





รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบผลการทำนายโดยใช้สมการของ Leith and Licht เปรียบเทียบกับสมการอื่นๆ และการทดลองของ Stairmand (ที่มา: David Leith and Dilip Metha)

ในปี 2012 FiciFi และคณะได้ทำการวิจัยเรื่อง “Optimization of the preheater cyclone separator used in the cement industry” งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยของ เส้นผ่าศูนย์กลางของทางออกก๊าซ, ความยาวทางออกก๊าซ, ความเร็วลมขาเข้า และปริมาณแป้งที่มีต่อความดันลดและประสิทธิภาพในการดักฝุ่น โดยใช้วิธีทาคูชิในการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ในโปรแกรมมินิแท็ปเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ทำให้ทราบระดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัยและสมการถดถอยเชิงพหุของประสิทธิภาพในการดักฝุ่นและความดันลดและเป็นดังนี้

ระดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น

เส้นผ่าศูนย์กลางของ vortex finder	ร้อยละ 77.35
ความยาว vortex finder	ร้อยละ 1.14
ความเร็วขาเข้า	ร้อยละ 0.03
ปริมาณแป้ง	ร้อยละ 15.73

ประสิทธิภาพในการดักฝุ่น =  $71.7621 - 0.178472 \times \text{เส้นผ่าศูนย์กลาง vortex finder} + 0.0375 \times \text{ความยาว vortex finder} + 0.519584 \times \text{ความเร็วขาเข้า} + 40.615 \times \text{ปริมาณแป้ง}$  (2.9)

ระดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อความดันลดในระบบ

เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกก๊าซ ร้อยละ 49.22

ความยาวทางออกก๊าซ ร้อยละ 19.29

ความเร็วขาเข้า ร้อยละ 21.40

ปริมาณแป้ง ร้อยละ 0.08

เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกก๊าซกับความยาวทางออกก๊าซ ร้อยละ 8.52

$$\begin{aligned} \text{ความดันลด} &= -452.977 + 0.120833 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลาง vortex finder} + 0.331944 \times \\ &\text{ความยาว vortex finder} + 50.3483 \times \text{ความเร็วขาเข้า} + 2.28259 \times \text{ปริมาณแป้ง} \end{aligned} \quad (2.10)$$

## บทที่ 3

### การออกแบบและการทดลอง

กระบวนการผลิตซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานั้นเป็นระบบการผลิตแบบแห้ง (Dry cement process) ซึ่งใช้ระบบเตาเผาในการผลิตปูนเม็ด (Clinker) เป็นแบบแคลไซน์เนอร์แยกจากเตาเผา (Separate line calciner) แสดงดังรูปที่ 3.1 มีส่วนประกอบดังนี้

1. ไชโคลนหออุ่นความร้อน (Cyclone preheater) คือ มีลักษณะเป็นไชโคลนต่ออนุกรม 5 เครื่อง 2 ชุด พิจารณาตัวอย่างได้จากรูปที่ 3.2 โดยฝุ่นวัสดุดิบจะถูกป้อนเข้าทั้ง 2 ชุด ไชโคลนเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับฝุ่นวัสดุดิบดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ไชโคลนชุดที่ 1 คือ ชุดไชโคลนที่นำลมร้อนจากเตาเผา ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

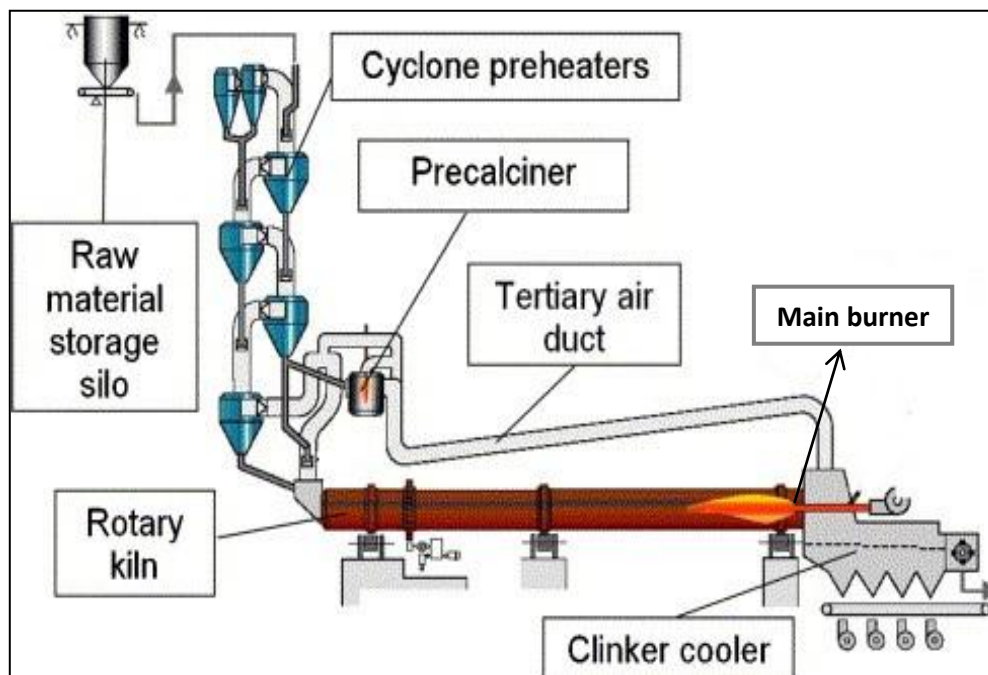
1.2 ไชโคลนชุดที่ 2 คือ ชุดไชโคลนที่นำลมร้อนจากแคลไซน์เนอร์ (Calciner) ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

2. แคลไซน์เนอร์ (Calciner) คือ เครื่องใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้มีความร้อนให้เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของฝุ่นวัสดุดิบทั้งหมดที่ถูกป้อนเข้าทางชุดไชโคลนทั้ง 2 ชุดก่อนที่จะถูกป้อนเข้าเตาเผา

3. เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) คือ เตาเผาฝุ่นวัสดุดิบให้เกิดปฏิกิริยาจนกลายเป็นปูนเม็ด

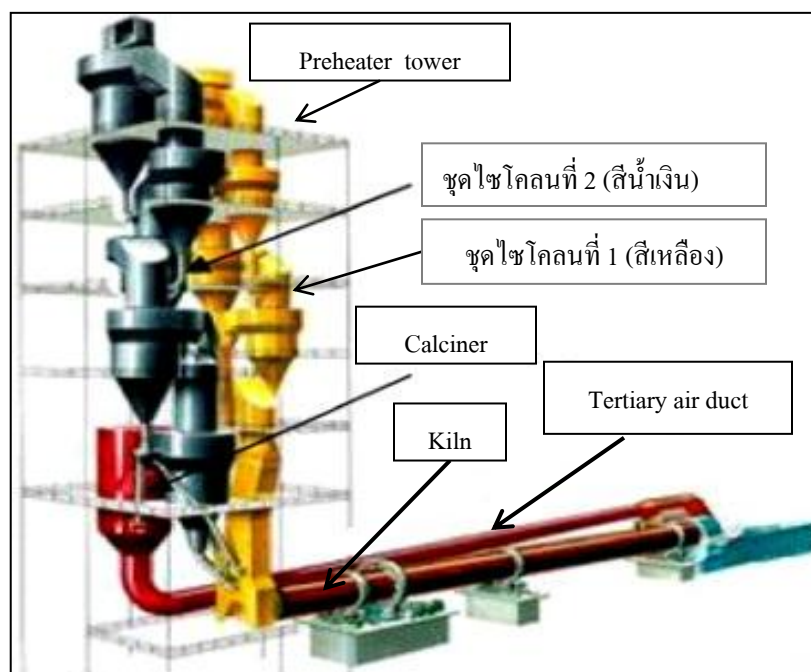
4. ท่อลมร้อนจากห้องลดความร้อน (Tertiary air duct) คือ ท่อที่นำอากาศร้อนจากห้องลดความร้อนก๊าซ (Clinker cooler) ที่มีออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 เข้าแคลไซน์เนอร์ เพื่อใช้เผาไหม้เชื้อเพลิง

5. หัวเตาเผาหลัก (Main burner) คือ อุปกรณ์ให้ความร้อนหลักสำหรับการเผาปูนในเตาเผาแบบหมุน



รูปที่ 3.1 ระบบเตาที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ด (Clinker)

(Giannopoulos D., Kolaitis D.I., Togkalidou A., Skevis G., Founti M.A., 2007 :3)



รูปที่ 3.2 หออุ่นความร้อนที่มีลักษณะเป็นไซโคลนต่ออนุกรม 2 ชุด

(Madloul N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahin N.A., 2011 :5)

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. การศึกษาข้อมูลเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของห่ออุ่นวัตถุดิบ
2. การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคักฝุ่นของห่ออุ่นวัตถุดิบ

### 3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของห่ออุ่นวัตถุดิบ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับอนุภาคของแข็งภายในไซโคลนมีหลายปัจจัย เช่น ขนาดอนุภาคฝุ่นวัตถุดิบ อัตราการป้อนก๊าซร้อน อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ เป็นต้น โดยการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาปัจจัยของอัตราการป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบเท่านั้นเพราะสามารถรวบรวมข้อมูลได้ง่าย ใช้เงินลงทุนน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ขั้นตอนการศึกษาเป็นดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 รวบรวมข้อมูลการผลิต

ข้อมูลของกระบวนการผลิตทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณถูกเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาทีในช่วงเวลาการผลิตตั้งแต่ 1 มกราคม 2554 จนถึง 31 กรกฎาคม 2555 นำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นรายวันเพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลในการคำนวณต่อไป

#### 3.1.2 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ

3.1.2.1 ข้อมูลผลการทดสอบร้อยละปริมาณส่วนที่สลายไปของฝุ่นวัตถุดิบ (Loss of ignition of kiln feed;  $LOI_{kf}$ ) ของไซโคลนเครื่องสุดท้ายของไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 เพื่อคำนวณหาระดับการเกิดปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination degree)

3.1.2.2 ข้อมูลผลการทดสอบค่าความร้อนถ่านหินด้านหัวเตาเผาหลัก (Main burner) และด้านเครื่องแคลซิเนอร์ (Calciner) วิธีการทดสอบอ้างอิงจาก ASTM D5865-10a

### 3.1.3 สมดุลมวล ( Mass balance)

ระบบห่ออุ่นวัตถุดิบประกอบด้วยไซโคลน 2 ชุดสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นในการทำสมดุลมวลจึงแยกการคำนวณออกเป็น 2 ชุด โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. สถานะการผลิตคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Steady state )
2. ยกเว้นปริมาณความชื้นในฝุ่นวัตถุดิบเนื่องจากมีปริมาณน้อย
3. ยกเว้นปฏิกิริยาเกิดขึ้นในขอบเขตงานวิจัยเนื่องจากเกิดขึ้นปริมาณน้อย
4. ยกเว้นปริมาณฝุ่นที่ออกจากระบบทั้งหมดเนื่องจากมีปริมาณน้อย

จากข้อมูลการผลิตและข้อมูลผลการทดสอบนำมาคำนวณสมดุลมวลตามขอบเขตการวิจัยดังรูปที่ 3.3 ของไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ซึ่งการคำนวณสมดุลมวลเป็นดังนี้

#### 3.1.3.1 ไซโคลนชุดที่ 1

ขอบเขตการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1 ประกอบไปด้วยไซโคลนต่ออนุกรม 4 เครื่อง ดังแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### สายเข้า (input)

1. อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ (Kiln feed rate) ป้อนเข้าในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F_{1k}$
2. อัตราป้อนก๊าซร้อน (Hot gas flow rate) ได้รับความร้อนมาจากเตาเผาปูนป้อนเข้าในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 4,  $F_{1h}$
3. อัตราอากาศเย็นไหลเข้า (False air flow) ทุกตำแหน่งในขอบเขตที่มีตำแหน่งรั่ว  $F_{1a}$
4. อัตราป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  flow rate) เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ภายไซโคลนเครื่องที่ 5 และภายในเตาเผาโดยจะรวมเข้าในไซโคลนเครื่องที่ 4,  $F_{1c}$

$$\text{ดังนั้น สายเข้า (Input) = } F_{1k} + F_{1h} + F_{1a} + F_{1c} \quad (3.1)$$

##### สายออก (Output)

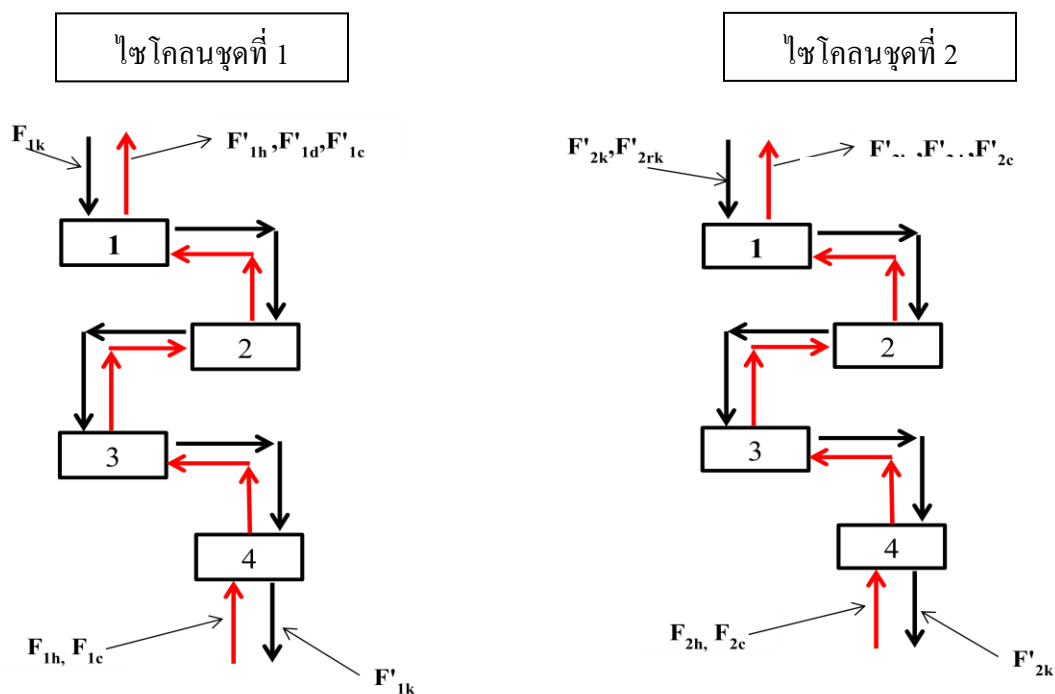
1. อัตราไหลฝุ่นร้อน (Hot kiln feed rate) ฝุ่นวัตถุดิบที่ได้รับการแลกเปลี่ยนความร้อนในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 4,  $F'_{1k}$
2. อัตราไหลก๊าซร้อน (Hot gas flow rate) ก๊าซร้อนที่ถูกแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังฝุ่น

วัตถุดิบไหลออกในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F'_{1h}$

3. อัตราไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  flow rate) ออกในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F'_{1c}$

4. อัตราไหลฝุ่นวัตถุดิบ (Hot kiln feed rate) ที่ไม่สามารถดักจับได้ไหลออกในตำแหน่งไซโคลนชุดที่ 1,  $F'_{1d}$

$$\text{ดังนั้นสายออก (Output)} = F'_{1k} + F'_{1h} + F'_{1c} + F'_{1d} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.3 ขอบเขตการวิจัยของไซโคลนชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2

### 3.1.3.2 สมการคำนวณสมดุลมวลไซโคลนชุดที่ 1

1.  $F_{1k}$  (t/h) = อัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบ (Kiln feed rate) ของไซโคลนชุดที่ 1 ตรวจวัดโดยระบบป้อนเซริง (Schcnck weight feeder) ซึ่งมีการสอบเทียบเป็นประจำทุกสัปดาห์

$$2. F_{1h} \text{ (t/h)} = V_{\min 1} + \text{excess air}_1 \quad (3.3)$$

2.1 นำตัวอย่างเชื้อเพลิงถ่านหินส่งทดสอบองค์ประกอบทางเคมีทั้งหมด โดยในที่นี้ส่งทดสอบทั้งหมด 3 ตัวอย่างและนำผลที่ได้มาเฉลี่ยดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลจากตัวอย่างทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงถ่านหิน

Lab test	Parameter	Standard/	21	4	21/	Average
		Method	/4/2555	/7/2555	11/2555	
SGS	Carbon	ASTM : D5373-02	0.613	0.524	0.562	0.566
	Hydrogen	ASTM : D5373-02	0.045	0.041	0.043	0.043
	Nitrogen	ASTM : D5373-02	0.011	0.010	0.010	0.010
	Oxygen	ASTM : D5373-02	0.132	0.150	0.144	0.142
	Ash	ASTM : D3174-04	0.091	0.151	0.132	0.125
	Sulfur	ASTM : D4239-05	0.013	0.011	0.012	0.012
	Moisture	ASTM : D3173-03	0.095	0.113	0.097	0.102
Total			1.000	1.000	1.000	1.000

## 2.2 ลมร้อนจากหัวเตาเผาหลัก ( Main burner, $V_{min1}$ (t/h))

$$V_{min1} \text{ (Ton/h)} = \frac{(1.87C + 0.8N + 11.2H + 1.24 H_2O_{fuel} + 0.7S + 0.79A_{min} + H_2O_{air} A_{min}) \times H_{conT} \times R_{conM} \times 1.013 \times 29.4}{CV_{fm} \times 0.0000831 \times 273 \times 1000000} \quad (3.4)$$

$$A_{min} \text{ (Nm}^3\text{/kg fuel)} = 8.89C + 26.67H + 3.33S - 3.33O \quad (3.5)$$

$$H_{conT} = (F_{fm} \times CV_{fm}) + (F_{fc} \times CV_{fc}) + (F_{AF} \times CV_{AF}) \quad (3.6)$$

$$R_{conM} = (F_{fm} \times CV_{fm}) / H_{conT} \quad (3.7)$$

$$R_{conC} = ((F_{fm} \times CV_{fc}) + (F_{AF} \times CV_{AF})) / H_{conT} \quad (3.8)$$

2.3 ปริมาณอากาศส่วนเกิน ( Excess air<sub>1</sub> ) = ปริมาณอากาศเพื่อสำหรับการเผาไหม้เพื่อป้องกันการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของหัวเตาเผาหลัก ( Main burner ) คำนวณได้จากสมการที่ 3.9

$$\text{Excess air}_1 = (V_{min1} + F_{1c}) \times \frac{O_2 1}{21 - O_2 1} \quad (3.9)$$

$O_2 1$  = ก๊าซปริมาณออกซิเจนที่วัดจากไซโคลนเครื่องล่างของไซโคลนชุดที่ 1

3.  $F_{1c}$  (t/h) = ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไซโคลนเครื่องที่ 5 + คาร์บอนไดออกไซด์จาก



เตาเผา

$$3.1 \text{ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไซโคลนเครื่องที่ 5} = (F_{1k} - F'_{1d}) \times (LOI_{kf} \times \% cal_1) / 100 \quad (3.10)$$

$$3.2 \text{ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเตาเผา} = ((F_{1k} - F'_{1d}) + (F_{2k} + F_{2rk} - F'_{2d})) \times (LOI_{kf}) \times (100 - \% cal_2) / 100 \quad (3.11)$$

$$\% cal_1 = [LOI_{kf} / (100 - LOI_{kf}) - LOI_1 / (100 - LOI_1)] / [LOI_{kf} / (100 - LOI_{kf})] \quad (3.12)$$

$$\% cal_2 = [LOI_{kf} / (100 - LOI_{kf}) - LOI_2 / (100 - LOI_2)] / [LOI_{kf} / (100 - LOI_{kf})] \quad (3.13)$$

$$4. F_{1a} (t/h) = (F_{1h} + F_{1c}) \times \frac{O'_{21}}{21 - O'_{21}} - (F_{1h} + F_{1c}) \times \frac{O_{21}}{21 - O_{21}} \quad (3.14)$$

$O'_{21}$  = ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่วัดจากไซโคลนเครื่องบนสุดของไซโคลนที่ 1

$$5. F'_{1k} = F_{1k} - F'_{1d} \quad (3.15)$$

$$6. F'_{1h} = F_{1h} + F_{1a}$$

$$7. F'_{1d} = F_{1k} \times \text{ร้อยละดักฝุ่น} \quad (3.16)$$

$$\text{ร้อยละดักฝุ่น} = (F_{1d} + F_{2d}) / (F_{1k} + F_{2k} + F_{2rk}) \quad (3.17)$$

### 3.1.3.3 ไซโคลนชุดที่ 2

ขอบเขตการทดลองของไซโคลนชุดที่ 2 ประกอบไปด้วยไซโคลนต่ออนุกรม 4 เครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.3 มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

#### สายเข้า (Input)

1. อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ (kiln feed rate) ป้อนเข้าในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F_{2k}$
2. อัตราป้อนก๊าซร้อน (hot gas flow rate) ป้อนเข้าในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 4,  $F_{2h}$
3. อัตราอากาศเย็นไหลเข้า (False air flow) ทุกตำแหน่งในขอบเขตที่มีตำแหน่งรั่ว,  $F_{2a}$
4. อัตราป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  flow rate) เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ทั้งฝุ่นวัตถุดิบจากไซโคลนเครื่องที่ 5 ของไซโคลนชุดที่ 1 และฝุ่นวัตถุดิบจากไซโคลนชุดที่ 2 ภายไซโคลนเครื่องแคลซิเนอร์ (Calciner),  $F_{2c}$

4. อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบนำกลับมาใช้ใหม่ (Kiln feed recycle) ฝุ่นวัตถุดิบที่ออกจากหออุ่นวัตถุดิบ ถูกดักจับได้โดยเครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) นำกลับมาป้อนเข้าไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F_{2rk}$

$$\text{ดังนั้นสมการสายเข้า (Input)} = F_{2k} + F_{2h} + F_{2a} + F_{2c} + F_{2rk} \quad (3.18)$$

#### สายออก (Output)

1. อัตราไหลฝุ่นร้อน (Hot kiln feed rate) ฝุ่นวัตถุดิบที่ได้รับการแลกเปลี่ยนความร้อนในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 4,  $F'_{2k}$

2. อัตราไหลก๊าซร้อน (Hot gas flow rate) ก๊าซร้อนที่ถูกแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังฝุ่นวัตถุดิบไหลออกในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F'_{2h}$

3. อัตราไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  flow rate) ออกในตำแหน่งไซโคลนเครื่องที่ 1,  $F'_{2c}$

4. อัตราไหลฝุ่นวัตถุดิบ (Hot kiln feed rate) ที่ไม่สามารถดักจับได้ไหลออกในตำแหน่งไซโคลนชุดที่ 1,  $F'_{2d}$

$$\text{ดังนั้นสมการสายออก (Output)} = F'_{2k} + F'_{2h} + F'_{2c} + F'_{2d} \quad (3.19)$$

#### 3.1.3.4 สมการคำนวณสมดุลมวลไซโคลนชุดที่ 2

1.  $F_{2k}$  (t/h) = อัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบ (Kiln feed rate) เข้าทางด้านไซโคลนชุดที่ 2 เป็นระบบป้อนเชิง (Schneck weight feeder) ซึ่งมีการสอบเทียบเป็นประจำทุกสัปดาห์

$$2. F_{2h} \text{ (t/h)} = V_{\min 2} + \text{Excess air}_2 \quad (3.20)$$

$$2.1 \text{ ลมร้อนจากเครื่องแคลไซเนอร์ (Calcliner) } V_{\min 2} \text{ (t/h)}$$

ใช้ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงถ่านหินจากตารางที่ 3.1 นำมาคำนวณตามสมการที่ 3.22

$$V_{\min 2} \text{ (t/h)} = \frac{(1.87C + 0.8N + 11.2H + 1.24 H_2O_{\text{fuel}} + 0.7S + 0.79A_{\min} + H_2O_{\text{air}} A_{\min}) \times H_{\text{conT}} \times R_{\text{conC}} \times 1.013 \times 29.4}{CV_{\text{fc}} \times 0.0000831 \times 273 \times 1000000}$$

$$CV_{\text{fc}} \times 0.0000831 \times 273 \times 1000000$$

$$(3.21)$$

2.2 ปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air<sub>2</sub>) = ปริมาณอากาศเพื่อสำหรับการเผาไหม้เพื่อป้องกันการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ที่เครื่องแคลไซเนอร์ (Calcliner) คำนวณได้จาก

$$\text{Excess air}_2(\text{t/h}) = (V_{\text{min}2} + F_{2c}) \times \frac{O_{22}}{21 - O_{22}} \quad (3.22)$$

$O_{22}$  = ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่วัดจากไซโคลนเครื่องล่างของไซโคลนที่ 2

3.  $F_{2c}$  = ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จากฝุ่นวัตถุคิบเครื่องที่ 5 ของไซโคลนชุดที่ 1 + ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จากฝุ่นวัตถุคิบไซโคลนชุดที่ 2

$$3.1 \text{ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ } (\text{CO}_2) \text{ จากฝุ่นวัตถุคิบเครื่องที่ 5 ของไซโคลนชุดที่ 1} \\ = (F_{1k} - F'_{1d}) \times \text{LOI}_{\text{kr}} \times (\% \text{cal}_2 - \% \text{cal}_1) / 100 \quad (3.23)$$

$$3.2 \text{ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ } (\text{CO}_2) \text{ จากฝุ่นวัตถุคิบไซโคลนชุดที่ 2} \\ = ((F_{2k} + F_{2rk}) - F'_{2d}) \times \% \text{ คักฝุ่น} \times (\text{LOI}_{\text{kr}} \times \% \text{ cal}_2) / 100 \quad (3.24)$$

4.  $F_{2a}$  (t/h) = False air ปริมาณลมรั่วที่เข้าระบบชุดไซโคลนที่ 2 คำนวณจากสมการ

$$F_{2a} = (F_{2h} + F_{2c}) \times \frac{O_{2'2}}{21 - O_{2'2}} - (F_{2h} + F_{2c}) \times \frac{O_{22}}{21 - O_{22}} \quad (3.25)$$

$O_{2'2}$  = ปริมาณออกซิเจนที่วัดจากไซโคลนเครื่องบนสุดของชุดไซโคลนที่ 2

$$5. F_{2rk} = F'_{1d} + F'_{2d} \quad (3.26)$$

$$6. F'_{2h} = F_{2h} + F_{2a} \quad (3.27)$$

$$7. F'_{2d} = (F_{2k} + F_{2rk}) \times \% \text{ คักฝุ่น} \quad (3.28)$$

8.  $F'_{2k}$  = ปริมาณฝุ่นร้อนที่ออกจากชุดไซโคลนที่ 2

$$F'_{2k} = F_{2k} + F_{2rk} - F'_{2d} \quad (3.29)$$

9. ชั่งน้ำหนักของปูนเม็ดเพื่อเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นวัตถุคิบเข้าเตากับที่ได้จากการคำนวณเพื่อทดสอบปริมาณ LOI ที่ถูกต้องพิจารณาจากภาคผนวก ก

### 3.1.3.5 หาผลนอกช่วงผิดปกติ (Outlier)

ปกติของการเก็บข้อมูลต้องมีผลผิดปกติที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องในการคำนวณจึงต้องหาข้อมูลนอกช่วงผิดปกติ ในการคำนวณหาช่วงผิดปกติใช้วิธีบล็อกพล็อต (Block plot) โดยหากพบว่าตัวแปรใดก็ตามที่มีค่าออกนอกช่วงผิดปกติ ให้ตัดข้อมูลวันดังกล่าวออกไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2

ขั้นตอนการหาผลนอกช่วง (Outlier) โดยใช้โปรแกรม excel

1. หา Q1 โดยพิมพ์คำสั่ง PERCENTILE(array,0.25)
2. หา Q3 โดยพิมพ์คำสั่ง PERCENTILE(array,0.75)
3. ตัดข้อมูลออก ; ข้อมูล  $< Q1 - 1.5x(Q3-Q1)$  (3.30)
4. ตัดข้อมูลออก ; ข้อมูล  $> Q3 + 1.5x(Q3-Q1)$  (3.31)

### 3.1.4 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

จากสมการอนุรักษ์พลังงานซึ่งแสดงในสมการที่ 3.32 และจากสมมูลมวล ใช้ในการหาสมดุลพลังงานในขอบเขตของไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$\sum_{in} m_{in} \left( h_f^0 + \Delta h + \frac{V_{in}^2}{2} + g_G Z_{in} \right) = W_{cv} + \sum_{out} m_{out} \left( h_f^0 + \Delta h + \frac{V_{out}^2}{2} + g_G Z_{out} \right) + Q_L \quad (3.32)$$

สมมติฐานดังนี้

1. พลังงานไฟฟ้า,  $W_{cv}$  ไม่มีอยู่ในขอบเขตการทดลอง
2. ขกเว้นพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ในระบบ
3. ขกเว้นปฏิกิริยาเกิดขึ้นในขอบเขตงานวิจัยเนื่องจากเกิดขึ้นน้อยมาก
4. ขกเว้นพลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำภายในฝุ่นวัตถุดิบเนื่องจากเกิดขึ้นน้อยมาก

ดังนั้นสมการสุดท้ายได้ดังนี้

$$\sum_{in} m_{in} \Delta h = \sum_{out} m_{out} \Delta h + Q_L \quad (3.33)$$

$$\Delta h_{T,p} = h_f^0 + \Delta h \quad (3.34)$$

$$\Delta h = \int_{273}^T C_p dT \quad (3.35)$$

ซึ่งตำแหน่งการวัดอุณหภูมิไซโคลนแสดงดังรูปที่ 3.4

### 3.1.4.1 ไชโคลนชุดที่ 1

#### สมการเอนทาลปีสายเข้า

$$\text{เอนทาลปีไผ่นวัตถุคิบบ (H'_{1k})} = F_{1k} \int_{273}^{T_{1k}} C_{p1k} dT \quad (3.36)$$

$$\text{เอนทาลปีกำซร้อน (H'_{1h})} = F_{1h} \int_{273}^{T_{1h}} C_{p1h} dT \quad (3.37)$$

$$\text{เอนทาลปีกำซคาร์บอนไดออกไซด์ (H'_{1c})} = F_{1c} \int_{273}^{T_{1c}} C_{p1c} dT \quad (3.38)$$

$$\text{เอนทาลปีอากาศร่ว (H'_{1a})} = F_{1a} \int_{273}^{T_{1a}} C_{p1a} dT \quad (3.39)$$

$$(\sum_{in} m_{in} \Delta h)_1 = F_{1k} \int_{273}^{T_{1k}} C_{p1k} dT + F_{1h} \int_{273}^{T_{1h}} C_{p1h} dT + F_{1c} \int_{273}^{T_{1c}} C_{p1c} dT + F_{1a} \int_{273}^{T_{1a}} C_{p1a} dT \quad (3.40)$$

#### สมการเอนทาลปีสายออก

$$\text{เอนทาลปีไผ่นวัตถุคิบบ (H'_{1k})} = F'_{1k} \int_{273}^{T'_{1k}} C_{p1k} dT \quad (3.41)$$

$$\text{เอนทาลปีกำซร้อน (H'_{1h})} = F'_{1h} \int_{273}^{T'_{1h}} C_{p1h} dT \quad (3.42)$$

$$\text{เอนทาลปีกำซคาร์บอนไดออกไซด์ (H'_{1c})} = F'_{1c} \int_{273}^{T'_{1c}} C_{p1c} dT \quad (3.43)$$

$$\text{เอนทาลปีอากาศร่ว (H'_{1a})} = F'_{1a} \int_{273}^{T'_{1a}} C_{p1a} dT \quad (3.44)$$

$$\text{เอนทาลปีไผ่นวัตถุคิบบออกนอกระบบ (H'_{1d})} = F'_{1d} \int_{273}^{T'_{1d}} C_{p1d} dT \quad (3.45)$$

$$\text{ความร้อนสูญเสีย } Q_{L1} = \text{การสูญเสียจากการแผ่รังสี} + \text{การสูญเสียจากการพาความร้อน} \quad (3.46)$$

$$(\sum_{out} m_{out} \Delta h)_1 = F'_{1k} \int_{273}^{T'_{1k}} C_{p1k} dT + F'_{1h} \int_{273}^{T'_{1h}} C_{p1h} dT + F'_{1c} \int_{273}^{T'_{1c}} C_{p1c} dT + F'_{1d} \int_{273}^{T'_{1d}} C_{p1d} dT + (F_{1h} - F'_{1a}) \int_{273}^{T_{1a}} C_{p1a} dT + Q_{L1} \quad (3.47)$$

### 3.1.4.2 ไชโคลนชุดที่ 2

#### สมการเอนทาลปีสายเข้า

$$\text{เอนทาลปีไผ่นวัตถุคิบบ (H'_{2k})} = F_{2k} \int_{273}^{T_{2k}} C_{p1k} dT \quad (3.48)$$

$$\text{เอนทาลปีกำซร้อน (H'_{2h})} = F_{2h} \int_{273}^{T_{2h}} C_{p1h} dT \quad (3.49)$$

$$\text{เอนทาลปีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์}(H_{2c}) = F_{1c} \int_{273}^{T_{2c}} C_{p1c} dT \quad (3.50)$$

$$\text{เอนทาลปีอากาศรั่ว}(H_{2a}) = F_{1a} \int_{273}^{T_{2a}} C_{p1a} dT \quad (3.51)$$

$$\text{เอนทาลปีฝุ่นวัตถุคิบนำกลับใช้ใหม่}(H_{2rk}) = F_{2rk} \int_{273}^{T_{2rk}} C_{prk} dT \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} (\sum_{in} m_{in} \Delta h)2 = & F_{2k} \int_{273}^{T_{2k}} C_{p2k} dT + F_{2h} \int_{273}^{T_{2h}} C_{p2h} dT + F_{2c} \int_{273}^{T_{2c}} C_{p2c} dT + \\ & F_{2rk} \int_{273}^{T_{2rk}} C_{prk} dT + F_{2a} \int_{273}^{T_{2a}} C_{p2a} dT \end{aligned} \quad (3.54)$$

### สมการเอนทาลปีสายออก

$$\text{เอนทาลปีฝุ่นวัตถุคิบ}(H'_{2k}) = F'_{2k} \int_{273}^{T'_{2k}} C_{p1k} dT \quad (3.55)$$

$$\text{เอนทาลปีก๊าซร้อน}(H'_{2h}) = F'_{2h} \int_{273}^{T'_{2h}} C_{p1h} dT \quad (3.56)$$

$$\text{เอนทาลปีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์}(H'_{2c}) = F'_{1c} \int_{273}^{T'_{2c}} C_{p1c} dT \quad (3.57)$$

$$\text{เอนทาลปีอากาศรั่ว}(H'_{2a}) = F'_{1a} \int_{273}^{T'_{2a}} C_{p1a} dT \quad (3.58)$$

ความร้อนสูญเสีย,  $Q_{L2}$  = การสูญเสียจากการแผ่รังสี + การสูญเสียจากพาความร้อน

$$\begin{aligned} (\sum_{out} m_{out} \Delta h)2 = & F'_{2k} \int_{273}^{T'_{2k}} C_{pk} dT + F'_{2h} \int_{273}^{T'_{2h}} C_{ph} dT + F'_{2c} \int_{273}^{T'_{2c}} C_{pco2} dT + F'_{2d} \int_{273}^{T'_{2d}} C_{pd} dT \\ & + F'_{2a} \int_{273}^{T'_{2a}} C_{p2a} dT + Q_{L2} \end{aligned} \quad (3.59)$$

### สมการค่าความจุความร้อนจำเพาะ

$$C_{pk} (\text{ความจุความร้อนจำเพาะของฝุ่นวัตถุคิบ}) = 0.88 + 0.000293 T; \text{ kJ/kg.K} \quad (3.60)$$

$$C_{ph} (\text{ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซร้อน}) = 0.96 + 0.000209 T; \text{ kJ/kg.K} \quad (3.61)$$

$$C_{pc} (\text{ความจุความร้อนจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์}) = 0.80 + 0.000461 T; \text{ kJ/kg.K} \quad (3.62)$$

$$C_{pF} (\text{อากาศรั่วเข้าระบบที่อุณหภูมิห้อง}) 32 \text{ } ^\circ\text{C} = 1.005 \text{ kJ/kg.K}$$

$$C_{pa} (\text{อากาศ}) \text{ ที่อุณหภูมิต่างๆ ข้อมูลคังตาราง 3.2}$$

อุณหภูมิอ้างอิง

$$T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_a = 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

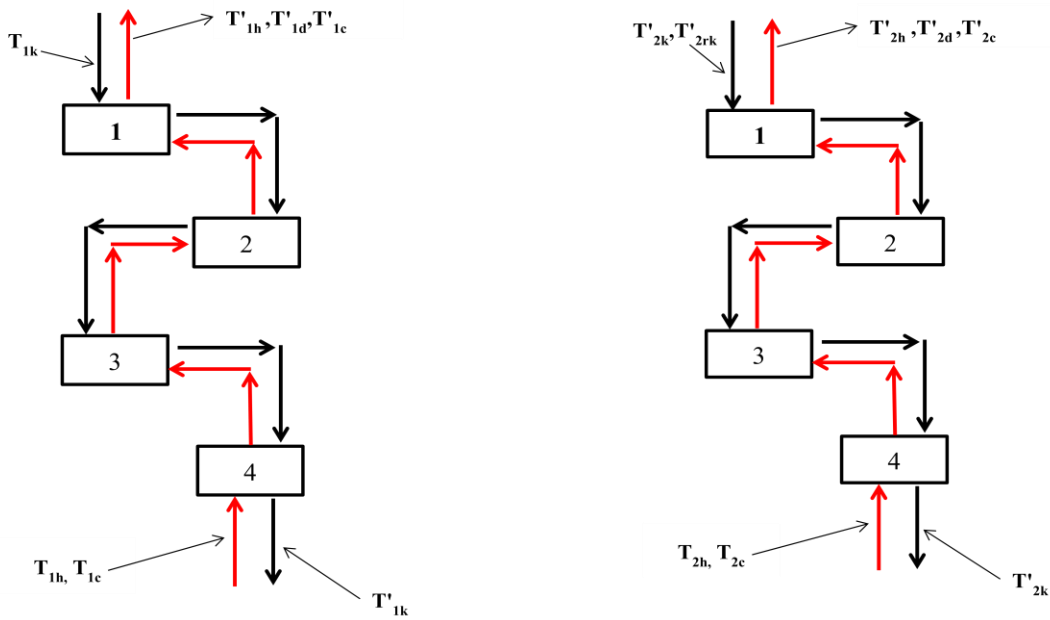
$$T_{1k} = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{2rk} = 87.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ตารางที่ 3.2 ค่า  $C_{p_a}$  (อากาศ) ที่อุณหภูมิต่างๆ

(แหล่งที่มา : <http://www.engineeringtoolbox.com> ; ค้นหามือ 18 มกราคม 2556)

Temperature	$C_p$
$^\circ\text{C}$	$\text{kJ/kg.K}$
40	1.005
60	1.009
100	1.009
120	1.013
160	1.017
200	1.026
250	1.034
300	1.047
350	1.055
400	1.068



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2

การสูญเสียจากการแผ่รังสี (Radiation loss)  $Q_{\text{rad}} = \sigma \epsilon A(T_s^4 - T_a^4)/10^9 * 3600$ ; GJ/h (3.63)

$\sigma$  = ค่าคงที่ของสเตฟานและโบลต์ซมานน์มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8}$ ,  $\text{W/m}^2\text{K}^4$

$A$  = พื้นที่ผิวผนังไซโคลน,  $\text{m}^2$

$T_s$  = อุณหภูมิของผนังไซโคลน,  $^{\circ}\text{K}$

$T_a$  = อุณหภูมิอากาศ,  $^{\circ}\text{K}$

$\epsilon$  = ค่าคงที่การแผ่รังสี (Emissivity constant) ของผนังไซโคลน, 0.9

การสูญเสียจากการพาความร้อน (convection loss)  $Q_{\text{conv}} = hA(T_h - T_c)/10^6 * 3600$ ; GJ/h (3.64)

$h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $\text{kW/m}^2\text{C}$

$T_h$  = อุณหภูมิของพื้นผิวผนังไซโคลน,  $^{\circ}\text{C}$

$T_a$  = อุณหภูมิอากาศ,  $^{\circ}\text{C}$

$A$  = พื้นที่ผิวผนังไซโคลน,  $\text{m}^2$



### 3.1.4.3 การหาผลช่วงผิดปกติ (Outlier)

ปกติของการเก็บข้อมูลต้องมีผลผิดปกติที่เกิดจากปัจจัยต่างๆตั้งนั้นเพื่อความถูกต้องในการคำนวณจึงต้องหาข้อมูลนอกช่วงผิดปกติ ในการคำนวณหาช่วงผิดปกติใช้วิธีบล็อกพล็อต(block plot) โดยหากพบว่าตัวแปรใดก็ตามที่มีค่าออกนอกช่วงผิดปกติ ให้ตัดข้อมูลวันดังกล่าวออก ไชโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2

ขั้นตอนการหา Outlier โดยใช้โปรแกรม Excel

1. หา Q1 โดยพิมพ์คำสั่ง PERCENTILE(array,0.25)
2. หา Q3 โดยพิมพ์คำสั่ง PERCENTILE(array,0.75)
3. สมการที่ (3.33) เพื่อตัดข้อมูล
4. สมการที่ (3.32) เพื่อตัดข้อมูล

### 3.1.4.4 เปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนไปยังฝุ่นวัสดุดิบ

เพื่อเป็นการยืนยันการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นไปตามสมการสมดุลพลังงานดังสมการ จึงได้มีการนำข้อมูลการตรวจวัดนำมาเปรียบเทียบผลกับที่คำนวณทั้ง ไชโคลนชุดที่ 1 และ ไชโคลนชุดที่ 2 ได้ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ ผลปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนมายังอนุภาคของแข็งนั้นเป็นจริง

พลังงานความร้อนสูญเสียประกอบไปด้วย

1. ฝุ่นวัสดุดิบร้อนที่ไม่สามารถดักจับได้ด้วย ไชโคลน
2. ลมรั่วเข้าระบบ
3. การพาความร้อน
4. การแผ่รังสีความร้อน

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียเปรียบเทียบกับการคำนวณไซโคลนชุดที่ 1

วันที่	ฝุ่นออก ด้านบน ไซโคลน (GJ/h)	ลมรั่ว เข้า ระบบ (GJ/h)	การแผ่ รังสี ความร้อน (GJ/h)	การพา ความร้อน (GJ/h)	รวม (GJ/h)	จากการ คำนวณ (GJ/h)	ผลต่าง (GJ/h)
2-มี.ค.-54	3.6	9.9	4.21	4.49	21.1	23.8	2.7
1-พ.ย.-54	3.5	8.7	2.11	2.79	17.2	19.0	1.9
21-มี.ค.-55	3.8	6.8	3.94	4.51	19.0	17.0	-2.0
6-ก.ค.-55	3.4	6.7	4.07	4.25	18.4	19.1	0.6

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียกับการคำนวณไซโคลนชุดที่ 2

วันที่	ฝุ่นออก ด้านบน ไซโคลน (GJ/h)	ลมรั่วเข้า ระบบ (GJ/h)	การแผ่ รังสี ความร้อน (GJ/h)	การพา ความร้อน (GJ/h)	รวม (GJ/h)	จากการ คำนวณ (GJ/h)	ผลต่าง (GJ/h)
2-มี.ค.-54	6.1	8.0	7.86	8.15	30.1	31.2	1.0
1-พ.ย.-54	5.8	7.0	4.93	5.86	23.5	25.3	1.7
21-มี.ค.-55	6.6	11.9	6.65	7.29	32.4	31.2	-1.3
6-ก.ค.-55	6.8	5.2	6.30	6.73	25.0	25.3	0.3

### 3.1.5 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและฝุ่นวัตถุคือ

$$\frac{\text{ปริมาณความร้อนที่ฝุ่นวัตถุได้รับ} \times 100}{\text{ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ}} \quad (3.65)$$

#### ไซโคลนชุดที่ 1

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ฝุ่นวัตถุได้รับ} = H'_{1k} - H_{1k} \quad (3.66)$$

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ} = (H_{1h} + H_{1c}) - (H'_{1h} + H'_{1c}) \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน} (\eta_1) \\ = \{ (H'_{1k} - H_{1k}) / ((H_{1h} + H_{1c}) - (H'_{1h} + H'_{1c})) \} \times 100 \end{aligned} \quad (3.68)$$

#### ไซโคลนชุดที่ 2

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ฝุ่นวัตถุได้รับ} = H'_{2k} - (H_{2k} + H_{2rk}) \quad (3.69)$$

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ} = (H_{2h} + H_{2c}) - (H'_{2h} + H'_{2c}) \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน} (\eta_2) \\ = \{ (H'_{2k} - (H_{2k} + H_{2rk})) / ((H_{2h} + H_{2c}) - (H'_{2h} + H'_{2c})) \} \times 100 \end{aligned} \quad (3.71)$$

### 3.1.6 จัดกลุ่มข้อมูล

นำข้อมูลประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน, อัตราป้อนฝุ่นวัตถุและอัตราป้อนก๊าซร้อนนำมาแจกแจงความถี่

ขั้นตอนการแจกแจงความถี่

1. เรียงข้อมูลจากน้อยไปมาก
2. หาพิสัย ; ข้อมูลค่ามากที่สุด – ข้อมูลค่าน้อยที่สุด (3.72)

3. กำหนดจำนวนชั้นโดยใช้สูตร ; จำนวนชั้น =  $1 + 3.3 \log$  (จำนวนตัวอย่าง) (3.73)

4. หาช่วงข้อมูลในแต่ละชั้น ; พิสัย / จำนวนชั้น (3.74)

### 3.1.7 อัตราป้อนก๊าซร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

3.1.7.1 ข้อมูลการแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุเลือกตัวอย่าง 5 ข้อมูลของไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ได้ดังนี้

ไซโคลนชุดที่ 1 = 150,155,160,165,170

ไซโคลนชุดที่ 2 = 195,200,205,210,215

3.1.7.2 นำมาแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนก๊าซร้อนและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วง

ข้อมูล

### 3.1.8 อัตราป้อนฝุ่นวัตถุบดส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

3.1.8.1 ข้อมูลการแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนก๊าซร้อนเลือกตัวอย่างข้อมูล 5 ของไซโคลนชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ได้ดังนี้

ไซโคลนชุดที่ 1 = 120,125,130,135,140

ไซโคลนชุดที่ 2 = 165,175,185,195,205

3.1.8.2 นำมาแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุบดและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละ

ช่วงข้อมูล

### 3.1.9 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ(Minitab program)

3.1.9.1 สุ่มข้อมูลไซโคลนชุดที่ 1

ใช้โปรแกรมเอ็กเซล (Excel program) ฟังก์ชัน  $\text{Ran}()*(N-1)+1$  เพื่อสุ่มหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน 3 ตัวอย่างดังข้อมูลต่อไปนี้

อัตราป้อนฝุ่นวัตถุบด,  $F_{1k} = 155,160,165,170,175$

อัตราป้อนก๊าซร้อน,  $F_{1h} = 120,125,130,135,140$

ตัวอย่างทั้งหมด 75 ตัวอย่าง ของไซโคลนชุดที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.5

3.1.9.2 สุ่มข้อมูลไซโคลนชุดที่ 2

ใช้โปรแกรมเอ็กเซล(Excel program) ฟังก์ชัน  $\text{Ran}()*(N-1)+1$  เพื่อสุ่มหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน 3 ตัวอย่าง ดังข้อมูลต่อไปนี้

อัตราป้อนฝุ่นวัตถุบด,  $F_{2k} = 160,170,180,190,200$

อัตราป้อนก๊าซร้อน,  $F_{2h} = 190,200,210,220$

ตัวอย่างทั้งหมด 60 ตัวอย่าง ของไซโคลนชุดที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ผลการสุ่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่น  
วัตถุประสงค์และอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1

No.	$F_{ik}$	$F_{lh}$	$\eta_l$
1	155	120	87.4
2	155	125	84.8
3	155	130	84.7
4	155	135	84.5
5	155	140	77.1
6	160	120	90.2
7	160	125	86.6
8	160	130	89.6
9	160	135	85.9
10	160	140	84.3
11	165	120	94.3
12	165	125	91.1
13	165	130	87.6
14	165	135	83.7
15	165	140	85.1
16	170	120	90.9
17	170	125	91.3
18	170	130	88.1
19	170	135	85.3
20	170	140	81.5
21	175	120	90.7
22	175	125	87.4
23	175	130	85.5
24	175	135	82.9
25	175	140	81.4
26	155	120	89.4
27	155	125	83.7
28	155	130	87.9
29	155	135	79.5
30	155	140	80.1
31	160	120	90.4
32	160	125	90.4
33	160	130	86.3

ตารางที่ 3.5 ผลการสุ่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่น  
วัตถุคืบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1 (ต่อ)

No.	$F_{lk}$	$F_{lh}$	$\eta_l$
34	160	135	82.9
35	160	140	81.9
36	165	120	90.3
37	165	125	88.3
38	165	130	89.4
39	165	135	83.5
40	165	140	81.8
41	170	120	91.3
42	170	125	86.0
43	170	130	88.8
44	170	135	83.7
45	170	140	82.7
46	175	120	91.2
47	175	125	86.6
48	175	130	85.3
49	175	135	83.1
50	175	140	82.9
51	155	120	90.4
52	155	125	87.6
53	155	130	84.2
54	155	135	83.1
55	155	140	78.6
56	160	120	87.6
57	160	125	86.2
58	160	130	85.4
59	160	135	80.7
60	160	140	79.5
61	165	120	91.2
62	165	125	85.0
63	165	130	87.6
64	165	135	82.8
65	165	140	78.2
66	170	120	88.7

ตารางที่ 3.5 ผลการสุ่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่น  
วัตถุคิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1 (ต่อ)

No.	$F_{ik}$	$F_{lh}$	$\eta_l$
67	170	125	85.4
68	170	130	83.1
69	170	135	83.0
70	170	140	78.9
71	175	120	88.2
72	175	125	86.4
73	175	130	86.1
74	175	135	84.5
75	175	140	80.1

ตารางที่ 3.6 ผลการสุ่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่น  
วัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2

No.	$F_{2k}$	$F_{2h}$	$\eta_s$
1	160	190	92.2
2	160	200	96.7
3	160	210	98.6
4	160	220	98.5
5	170	190	90.3
6	170	200	89.1
7	170	210	95.9
8	170	220	90.0
9	180	190	82.9
10	180	200	86.0
11	180	210	92.2
12	180	220	94.4
13	190	190	80.2
14	190	200	84.1
15	190	210	86.1
16	190	220	90.0
17	200	190	77.9
18	200	200	80.3
19	200	210	87.1
20	200	220	90.4
21	160	190	94.8
22	160	200	98.4
23	160	210	94.0
24	160	220	98.5
25	170	190	87.8
26	170	200	90.7
27	170	210	91.5
28	170	220	90.7
29	180	190	88.9
30	180	200	87.7
31	180	210	90.8
32	180	220	94.4

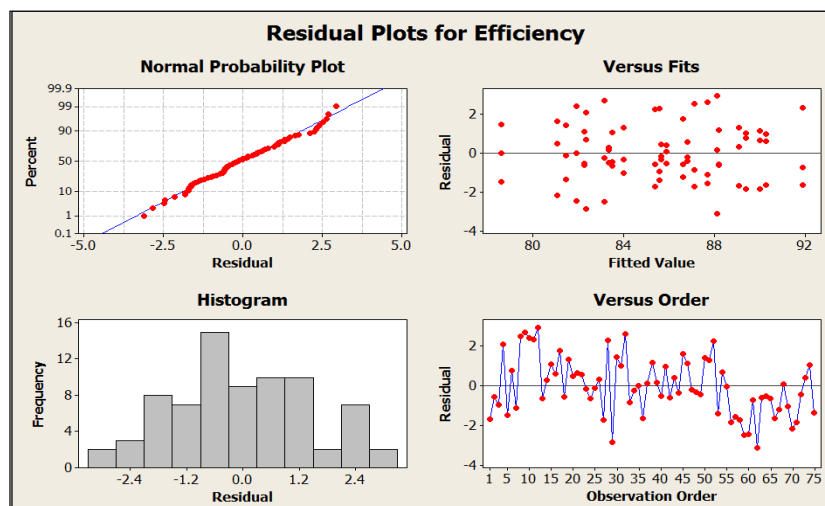


ตารางที่ 3.6 ผลการสู่มตัวอย่างผลของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่นวัดถุดิบ และอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2 (ต่อ)

No.	$F_{2k}$	$F_{2h}$	$\eta_2$
33	190	190	81.3
34	190	200	84.5
35	190	210	85.3
36	190	220	93.3
37	200	190	80.4
38	200	200	80.3
39	200	210	84.5
40	200	220	89.1
41	160	190	93.8
42	160	200	95.6
43	160	210	97.8
44	160	220	98.8
45	170	190	85.6
46	170	200	90.8
47	170	210	93.8
48	170	220	90.0
49	180	190	85.4
50	180	200	87.2
51	180	210	88.9
52	180	220	93.0
53	190	190	80.0
54	190	200	84.7
55	190	210	88.4
56	190	220	90.4
57	200	190	78.6
58	200	200	81.6
59	200	210	85.6
60	200	220	90.2

### 3.1.9.3 ตรวจสอบข้อมูลจากการสุ่มไซโคลนชุดที่ 1

นำข้อมูลที่ได้จากการสุ่มข้อมูลของไซโคลนชุดที่ 1 จากตารางที่ 3.5 ป้อนเข้าโปรแกรมมินิแท็บ (Minitab program) พบว่ามีการกระจายตัวปกติ (Normal distributed) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently distributed) และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่าซึ่งไม่มีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่งซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6 ดังนั้นจึงสรุปว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้

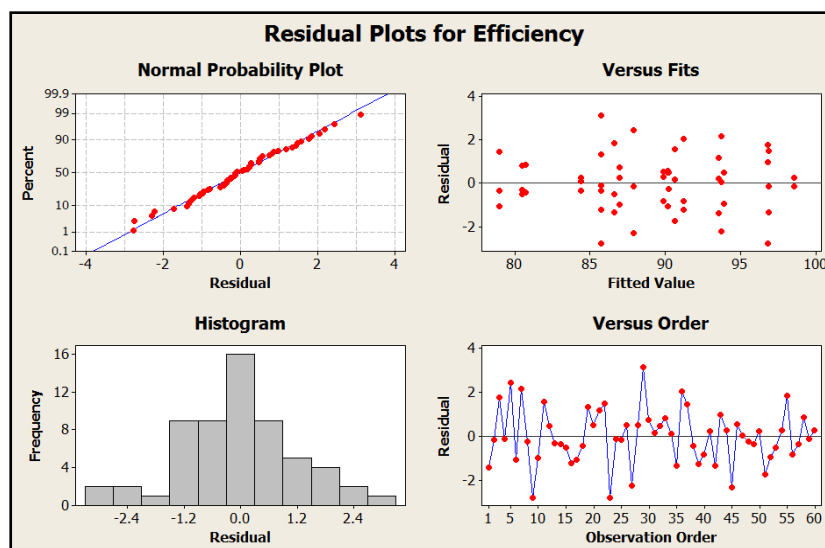


4

รูปที่ 3.5 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1

### 3.1.9.4 ตรวจสอบข้อมูลจากการสุ่มไซโคลนชุดที่ 2

นำข้อมูลที่ได้จากการสุ่มข้อมูลของไซโคลนชุดที่ 2 จากตารางที่ 3.5 ป้อนเข้าโปรแกรมมินิแท็บ (Minitab program) พบว่ามีการกระจายตัวปกติ (Normal distributed), มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently distributed) และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่าซึ่งไม่มีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ดังนั้นจึงสรุปว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้



รูปที่ 3.6 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 2

3.1.9.4 นำข้อมูลที่ได้จากการสุ่มของไซโคลนชุดที่ 1 ดังตารางที่ 3.5 และไซโคลนชุดที่ 2 ดังตารางที่ 3.6 วิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองเพื่อหาผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม (Analysis of variance, ANOVA) เพื่อวิเคราะห์ระดับของผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีผลประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

### 3.2 ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น ระหว่างก๊าซร้อนกับอนุภาคของแข็งภายในไซโคลนมีหลายปัจจัย เช่น ขนาดไซโคลน ขนาดของอนุภาค อัตราการป้อนก๊าซร้อน อัตราการป้อนอนุภาค และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาปัจจัยของอัตราการป้อนก๊าซร้อนและอัตราการป้อนของแข็งเท่านั้นเพราะสามารถรวบรวมข้อมูลได้ง่าย ใช้เงินลงทุนน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ขั้นตอนในการศึกษาเป็นดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 ใช้โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab program) เพื่อออกแบบการทดลอง

ใช้วิธีออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็ม (Full factorial experiment) 2 ปัจจัย 3 ระดับ และทดลองซ้ำ 2 ครั้งดังนี้

##### 3.2.1.1 ไซโคลนชุดที่ 1

อัตราป้อนฝุ่นวัตถุบ = 145,155,165

อัตราป้อนก๊าซร้อน = 115,125,135

ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลองซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.7

##### 3.2.1.2 ไซโคลนชุดที่ 2

อัตราป้อนฝุ่นวัตถุบ = 235,245,255

อัตราป้อนก๊าซร้อน = 160,180,200

ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลองซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1

ลำดับ	$F_{1k}$	$F_{1h}$	$F_{2k}$	$F_{2h}$
1	145	115	245	180
2	145	125		
3	145	135		
4	155	115		
5	155	125		
6	155	135		
7	165	115		
8	165	125		
9	165	135		
10	145	115		
11	145	125		
12	145	135		
13	155	115		
14	155	125		
15	155	135		
16	165	115		
17	165	125		
18	165	135		

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของชุดไซโคลนชุดที่ 2

ลำดับ	$F_{1k}$	$F_{1h}$	$F_{2k}$	$F_{2h}$
1	155	125	235	160
2			235	180
3			235	200
4			245	160
5			245	180
6			245	200
7			255	160
8			255	180
9			255	200
10			235	160
11			235	180
12			235	200
13			245	160
14			245	180
15			245	200
16			255	160
17			255	180
18			255	200

### 3.2.2 ทำการทดลอง

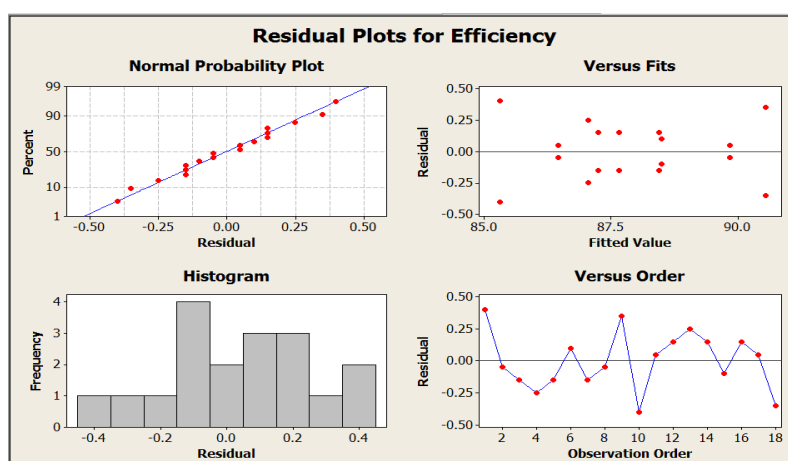
โดยการชั่งน้ำหนักของฝุ่นที่ออกจากชุดไซโคลนทั้ง 2 ตามตำแหน่งดังรูปที่ 3.11 เพื่อหาประสิทธิภาพในการดักฝุ่นดังสมการที่ (3.75) ในการทดลองทั้งหมดทำในกระบวนการแบบโดยตรง (Direct operation) คือ ไม่นำลมร้อนที่ออกจากห้องความร้อนไปใช้ที่เครื่องบดวัตถุดิบและเครื่องบด ถ่านหิน โดยจะผ่านเครื่องดักฝุ่น โดยตรงก่อนออกสู่สิ่งแวดล้อม

$$\eta_d = \frac{\text{อัตราการดักฝุ่นวัตถุดิบ}}{\text{อัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบ}} \times 100 \quad (3.75)$$

### 3.2.3 ตรวจสอบข้อมูล

#### 3.2.3.1 ไซโคลนชุดที่ 1

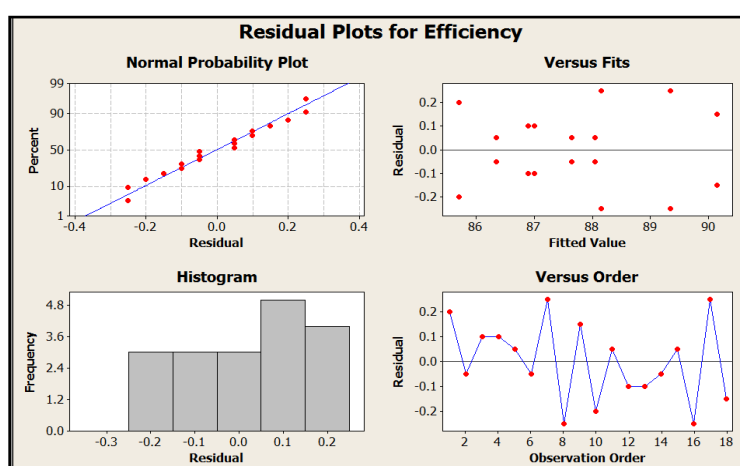
โดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab program) จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7 ของ ไซโคลนชุดที่ 1 เมื่อนำเข้าโปรแกรมมินิแท็บ (Minitab program) สามารถตรวจสอบข้อมูลมีการกระจายตัวปกติ (Normal distributed) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently distributed) และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่าได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9 ผลที่ได้แสดงว่าข้อมูลผลการทดลองมีการแจกแจงปกติและมีการกระจายตัวคงที่แต่ไม่ทราบค่าได้ สรุปว่าเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้



รูปที่ 3.7 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1

### 3.2.3.2 ไชโคลนชุดที่ 2

จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.8 ของไชโคลนชุดที่ 2 เมื่อนำเข้าโปรแกรมมินิแท็บ (Minitab program) สามารถตรวจสอบข้อมูลมีการกระจายตัวปกติ (Normal distributed) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently distributed) และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่าได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 ผลที่ได้แสดงว่าข้อมูลผลการทดลองมีการแจกแจงปกติและมีการกระจายตัวคงที่แต่ไม่ทราบค่าสรุปว่าเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้



รูปที่ 3.8 ผลการตรวจสอบตามสมมติฐานของผลการทดลองของไชโคลนชุดที่ 2

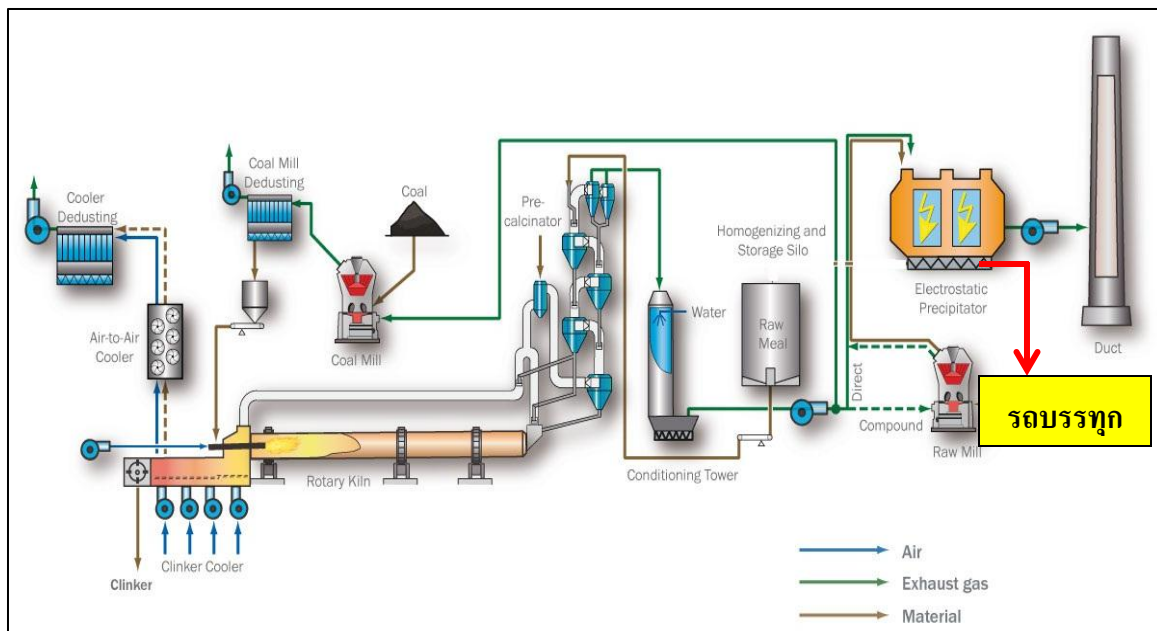
### 3.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง (Analysis of variance, ANOVA)

เพื่อวิเคราะห์ระดับของผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ(program minitab)

### 3.2.5 หาสมการความสัมพันธ์

นำผลที่ได้จากการทำการทดลอง หาสมการความสัมพันธ์





รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการขังน้ำหนักฝุ่นวัตถุดิบ  
(แหล่งที่มา : [www.sick.com](http://www.sick.com) ; ค้นหามื่อ 25 มีนาคม 2556)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพในการดักฝุ่นภายในห้องวัสดุคืบ ซึ่งห้องวัสดุคืบที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยชุดไซโคลนต่อเนื่อง 2 ชุดด้วยกัน ไซโคลนชุดที่ 1 นำลมร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ที่หัวเตาเผาหลัก (Main burner) และไซโคลนชุดที่ 2 นำลมร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จากเครื่องแคลไซน์เนอร์ (Calciner) มาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับฝุ่นวัสดุคืบ และยังเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการดักฝุ่นภายในไซโคลน

ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงขอแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

#### 4.1 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน

##### 4.1.1 ผลของอัตราป้อนก๊าซร้อน

4.1.1.1 ไซโคลนชุดที่ 1 ; ณ อัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบ (ton/h) =  
150, 155, 160, 165, 170

4.1.1.2 ไซโคลนชุดที่ 2 ; ณ อัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบ (ton/h) =  
195, 200, 205, 210, 215

##### 4.1.2 ผลของอัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบ

4.1.2.1 ไซโคลนชุดที่ 1 ; ณ อัตราป้อนก๊าซร้อน (ton/h) =  
120, 125, 130, 135, 140

4.1.2.2 ไซโคลนชุดที่ 2 ; ณ อัตราป้อนก๊าซร้อน (ton/h) =  
165, 175, 185, 195, 205

##### 4.1.3 ระดับอิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบต่อ

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

4.1.3.1 ไซโคลนชุดที่ 1

4.1.3.2 ไซโคลนชุดที่ 2

#### 4.2 ประสิทธิภาพการดักฝุ่น

##### 4.2.1 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบ ไซโคลนชุดที่ 1

4.2.1.1 สมการความสัมพันธ์ของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัสดุคืบ

#### 4.2.2 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบไซโคลนชุดที่ 2

4.2.2.1 สมการความสัมพันธ์ของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่น  
วัตถุดิบ

#### 4.1 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน

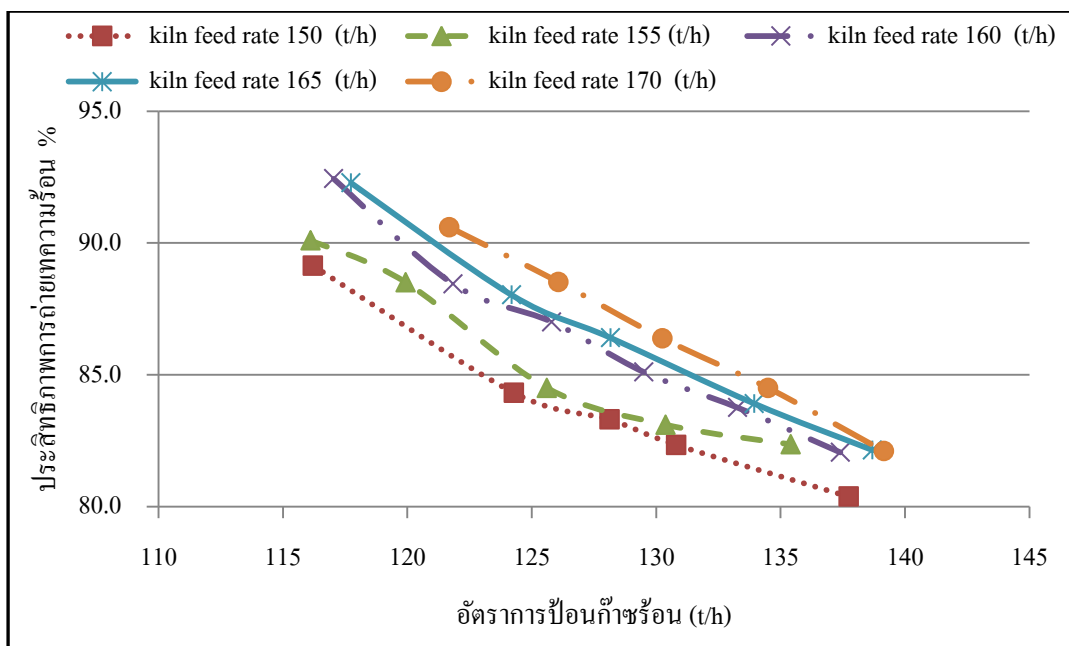
หลังจากการทำสมดุลมวล (Mass balance) และสมดุลพลังงาน (Energy balance) สามารถคำนวณประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนกับฝุ่นวัตถุดิบภายในไซโคลนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\text{ปริมาณความร้อนที่ฝุ่นวัตถุดิบได้รับ} \times 100}{\text{ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ}} \quad (4.1)$$

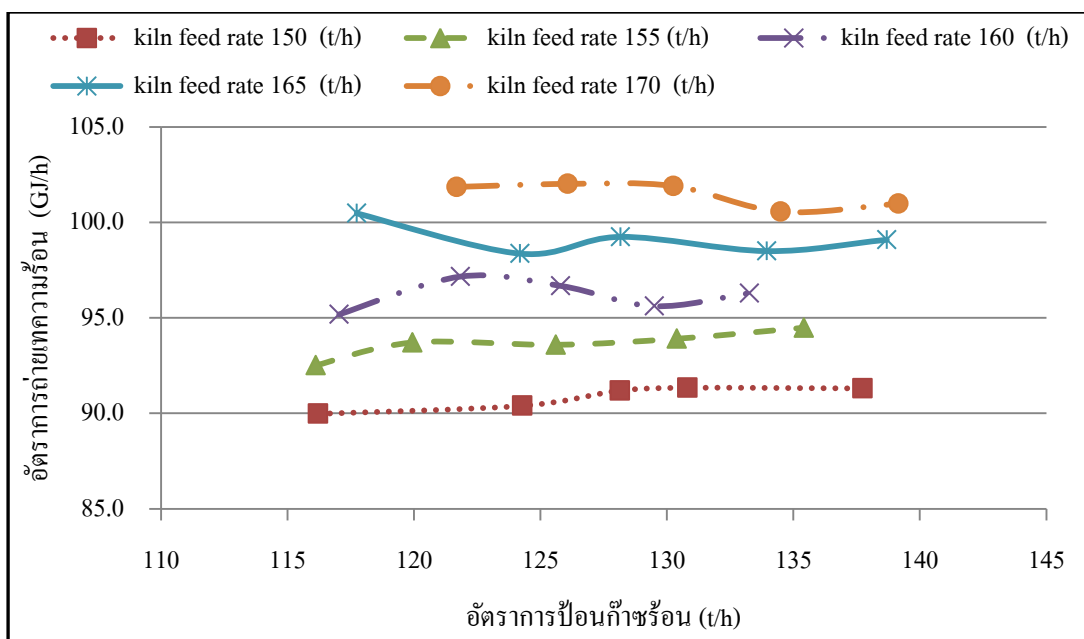
#### 4.1.1 ผลของอัตราป้อนก๊าซร้อน

##### 4.1.1.1 ไซโคลนชุดที่ 1

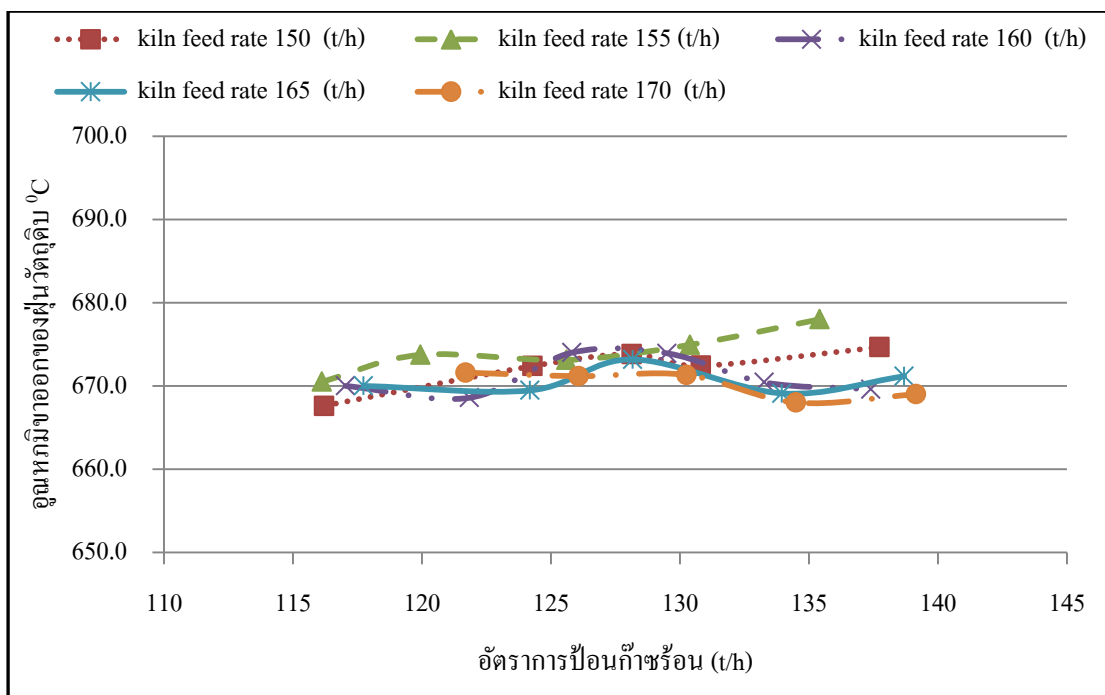
จากตัวอย่างข้อมูลอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบที่ 150,155,160,165,170 ton/h มาแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนก๊าซร้อนและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงข้อมูลนำมาแสดงผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดังต่อไปนี้



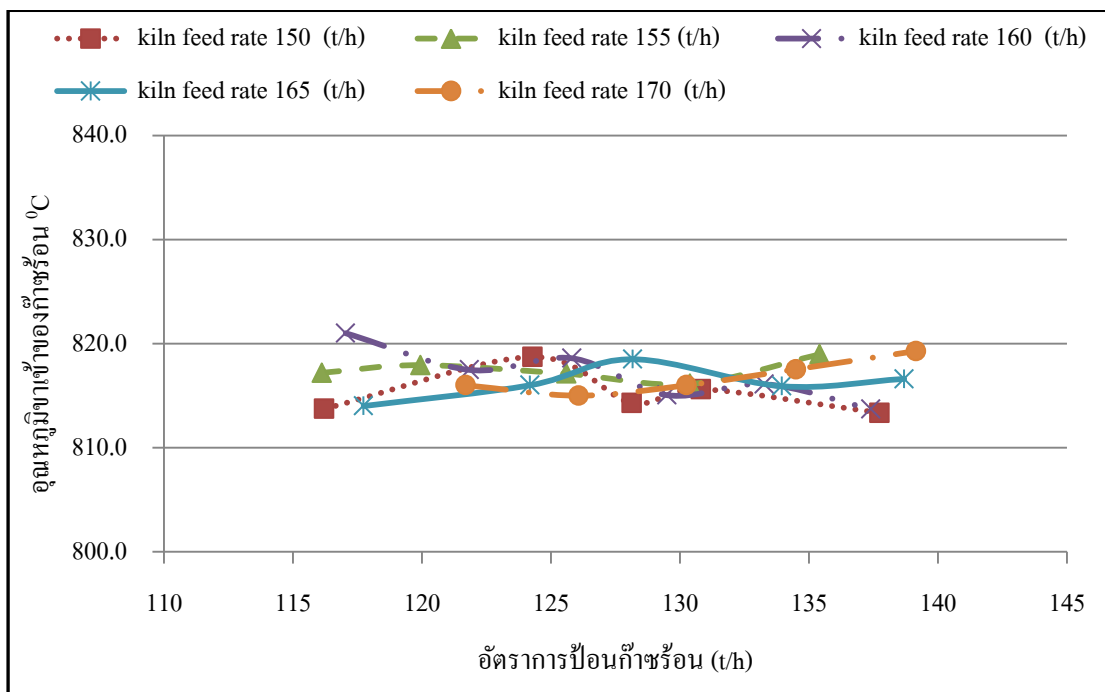
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1



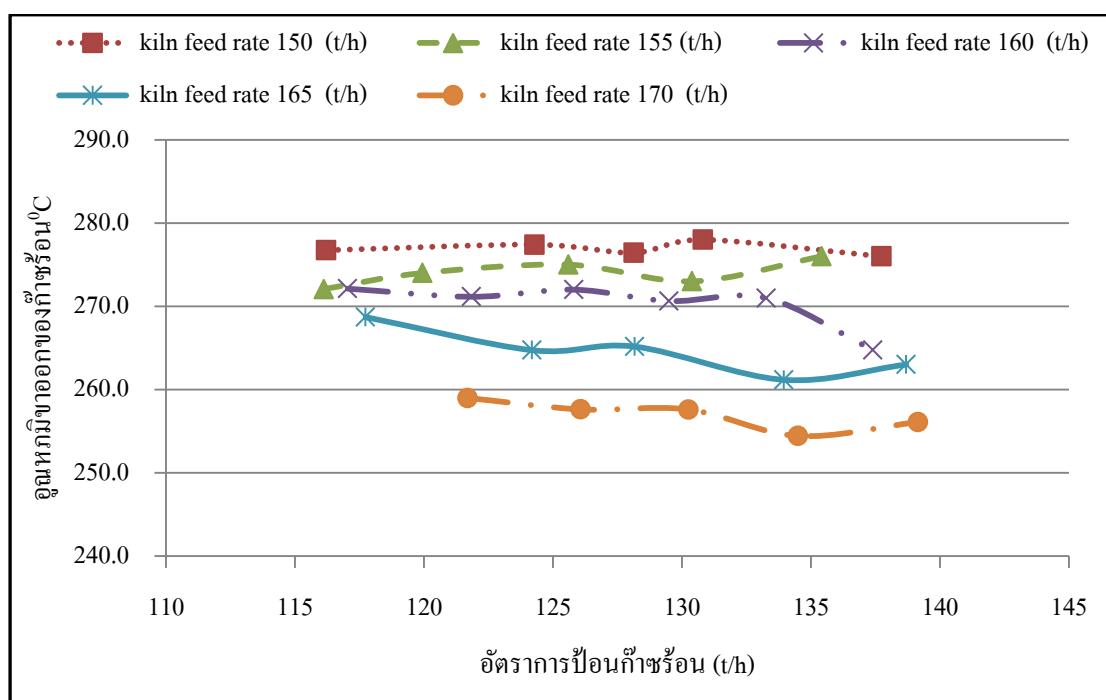
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังฝุ่นวัตถุดิบที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของฝุ่นวัสดุที่ออกที่อัตราป้อนฝุ่นวัสดุ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1



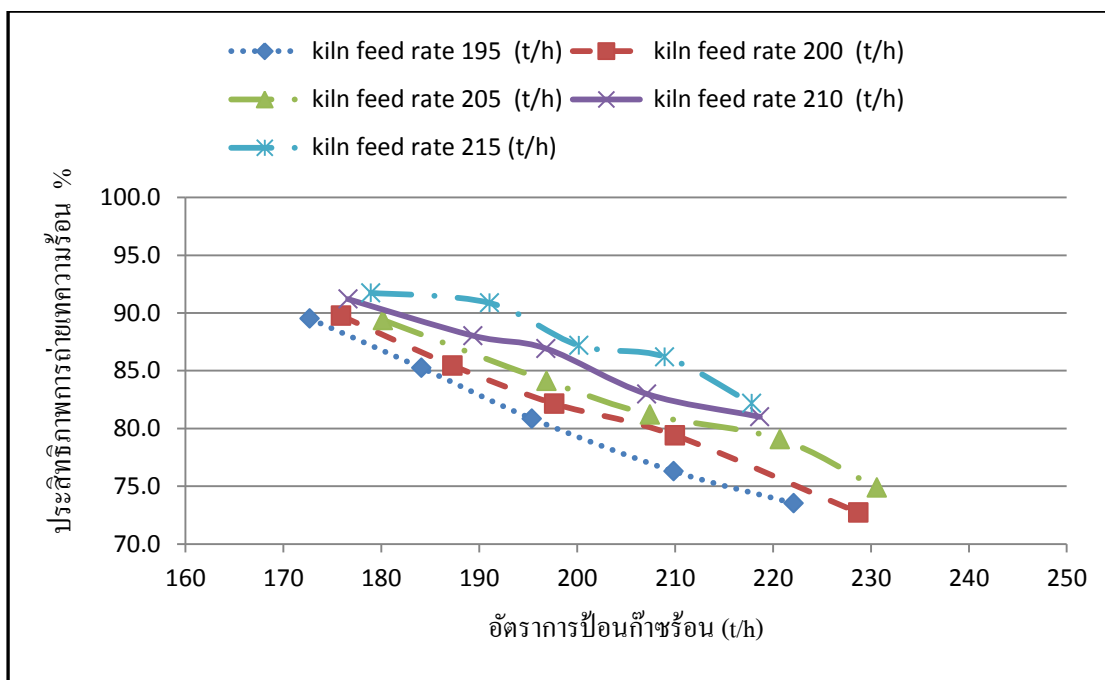
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาเข้าที่อัตราป้อนฝุ่นวัสดุ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1



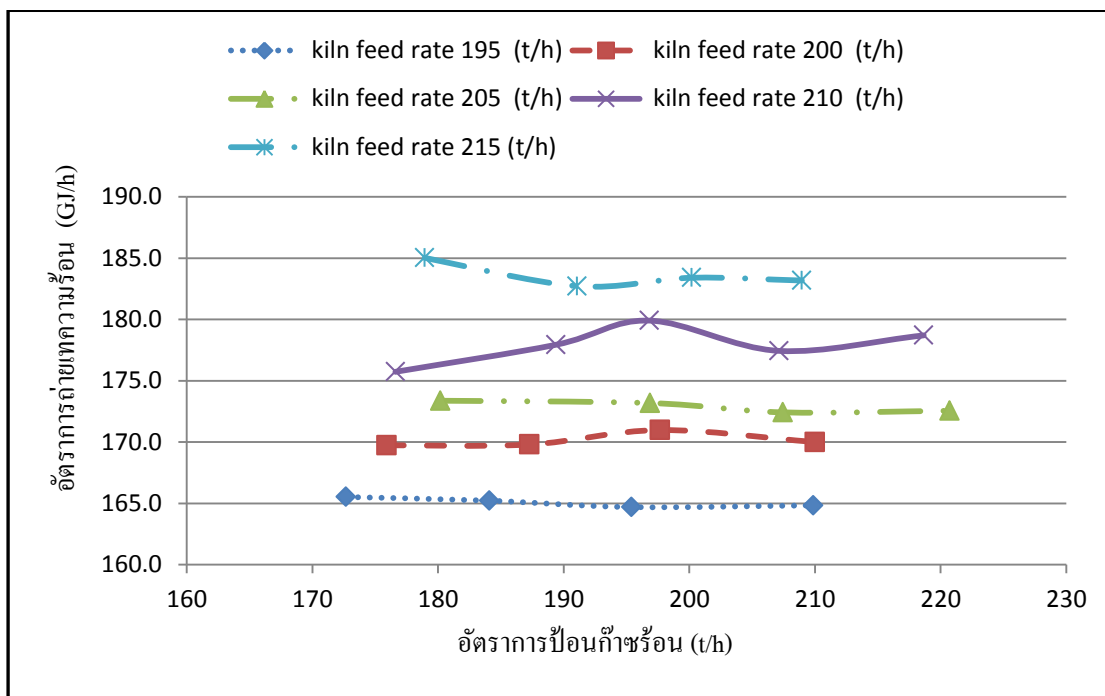
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออกที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 150,155,160,165,170 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1

#### 4.1.1.1 ไซโคลนชุดที่ 2

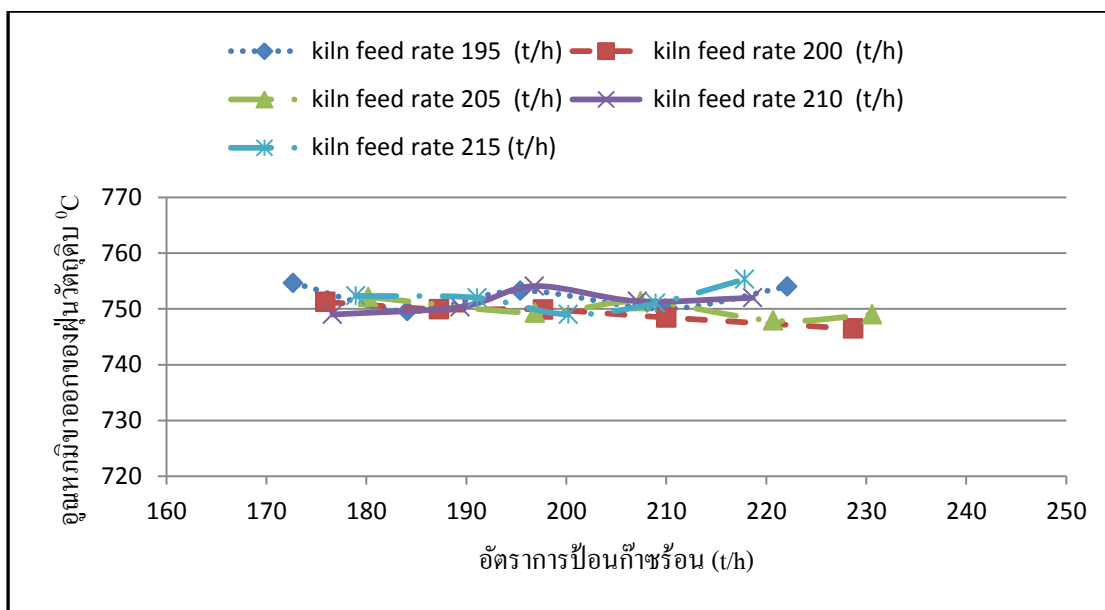
จากตัวอย่างข้อมูลอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบที่ 195,200,205,210,215 (ton/h) มาแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนก๊าซร้อนและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงข้อมูล นำมาแสดงผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดังต่อไปนี้



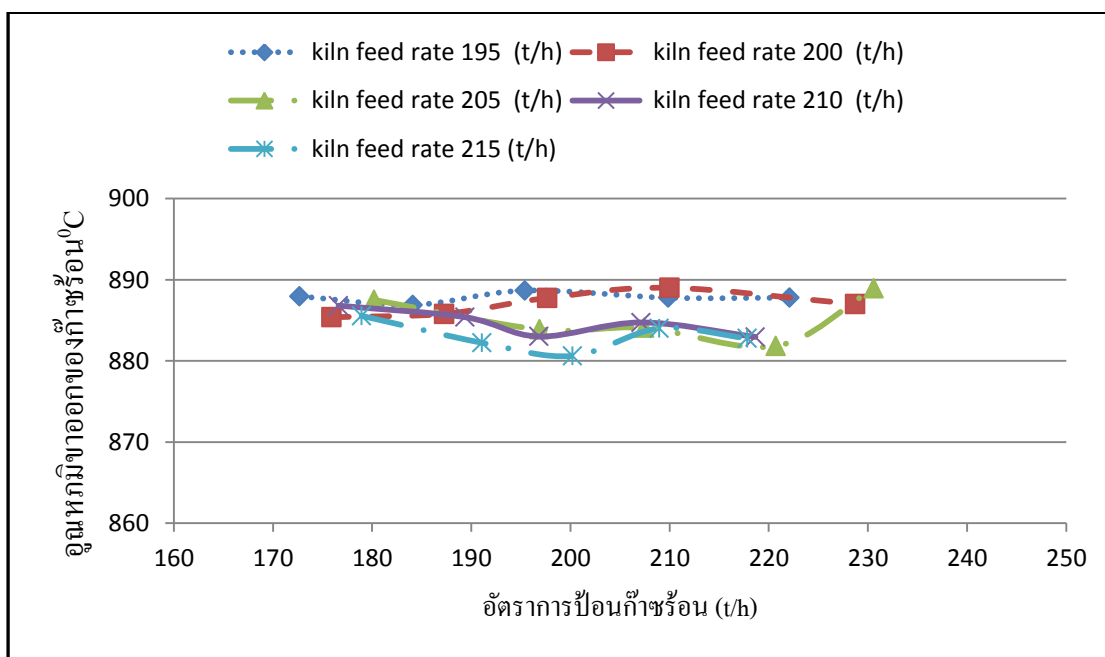
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังฝุ่นวัตถุดิบที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2

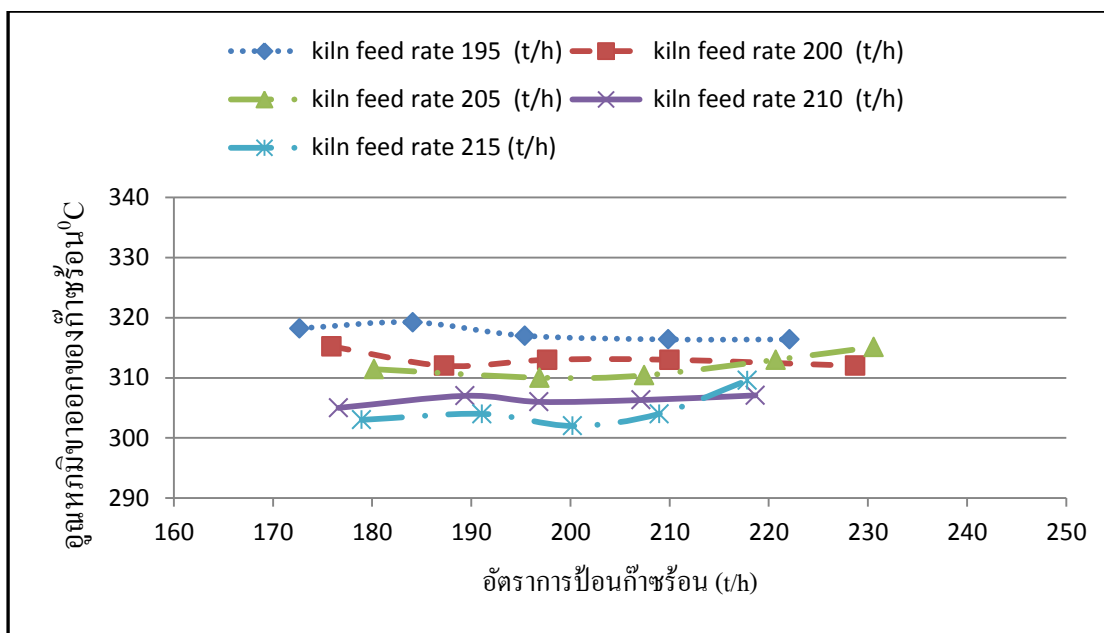


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีผลต่ออุณหภูมิของปูนซีเมนต์ที่ออกจากรุ่นที่ 2 อัตราการผลิตปูนซีเมนต์ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีผลต่ออุณหภูมิของปูนซีเมนต์ขาเข้าที่อัตราการผลิตปูนซีเมนต์ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2





รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออกที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 195,200,205,210,215 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2

รูปที่ 4.1 ของไซโคลนชุดที่ 1 และ 4.6 ของไซโคลนชุดที่ 2 เป็นการแสดงอิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ณ อัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบคงที่ ผลปรากฏว่าหากอัตราป้อนก๊าซร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อพิจารณาถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังฝุ่นวัตถุดิบ ( $Q_{output}$ ) อุณหภูมิของฝุ่นวัตถุดิบขาออก อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า พบว่าค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 4.2,4.3,4.4 และ 4.7,4.8,4.9 ของไซโคลนชุดที่ 1 และ ไซโคลนชุดที่ 2 ตามลำดับ

จึงอธิบายได้ว่าที่ ณ อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบคงที่ อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่ หากเพิ่มอัตราป้อนก๊าซร้อน พบว่าอุณหภูมิฝุ่นวัตถุดิบขาออกคงที่ นั่นแสดงว่าปริมาณความร้อนขาเข้ามีปริมาณมากเกินไปที่จะถ่ายเทความร้อนไปยังฝุ่นวัตถุดิบที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบต่างๆ และเมื่อพิจารณาสมการ  $Q_{input} = Q_{output} + Q_{loss}$  เมื่ออัตราป้อนก๊าซร้อนเพิ่มมากขึ้น  $Q_{input}$  จะเพิ่มมากขึ้น แต่จากข้อมูลข้างต้น  $Q_{output}$  ค่อนข้างคงที่ ดังนั้น  $Q_{loss}$  จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปนั้นคือ

1. เกิดจากอัตราการแผ่รังสี
2. เกิดจากอัตราการพาความร้อน
3. เกิดจากอัตราการสูญเสียที่เกิดจากฝุ่นร้อนที่ไม่สามารถดักได้
4. เกิดจากลมรั่วเข้าระบบ(false air)

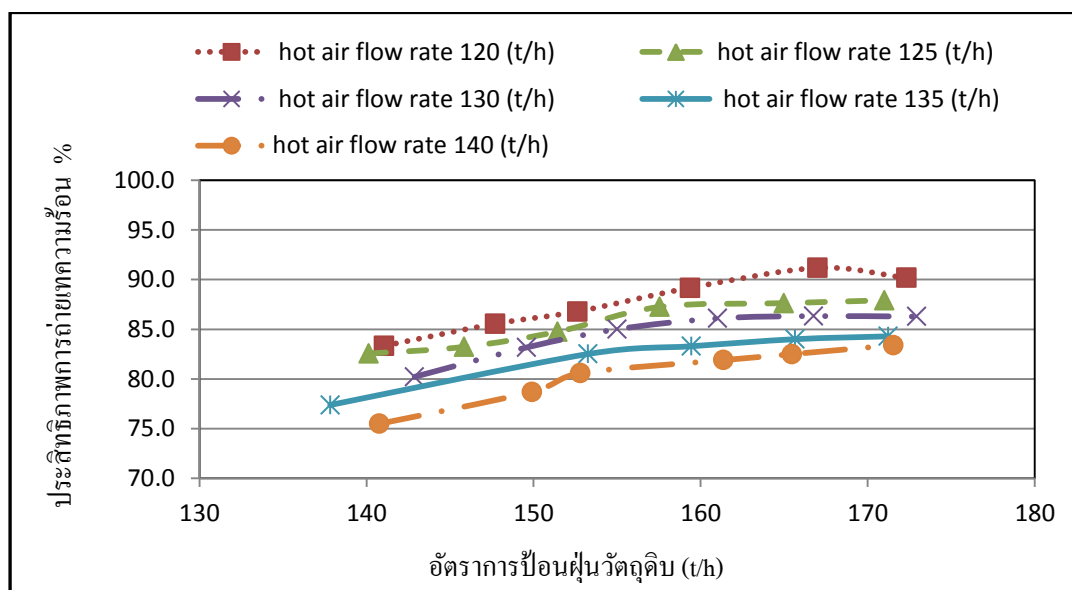
ดังนั้นหากต้องการให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

1. ต้องหมั่นตรวจสอบวัดปริมาณลมรั่ว และแก้ไขเป็น
2. ต้องลดอุณหภูมิของผนังโดยการควบคุมการติดตั้งฉนวนกันความร้อน
3. จะต้องเพิ่มอัตราป้อนฝุ่นวัตถุคิบ เพราะเมื่อพิจารณาจากกราฟของอุณหภูมิขาออกของก๊าซร้อนพบว่า หากเพิ่มอัตราป้อนฝุ่นวัตถุคิบทำให้อุณหภูมิก๊าซร้อนขาออกลดลงดังรูปที่ 4.5 และ 4.10 ของไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2 ตามลำดับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

#### 4.1.2 อัตราป้อนฝุ่นวัตถุคิบ

##### 4.1.2.1 ไซโคลนชุดที่ 1

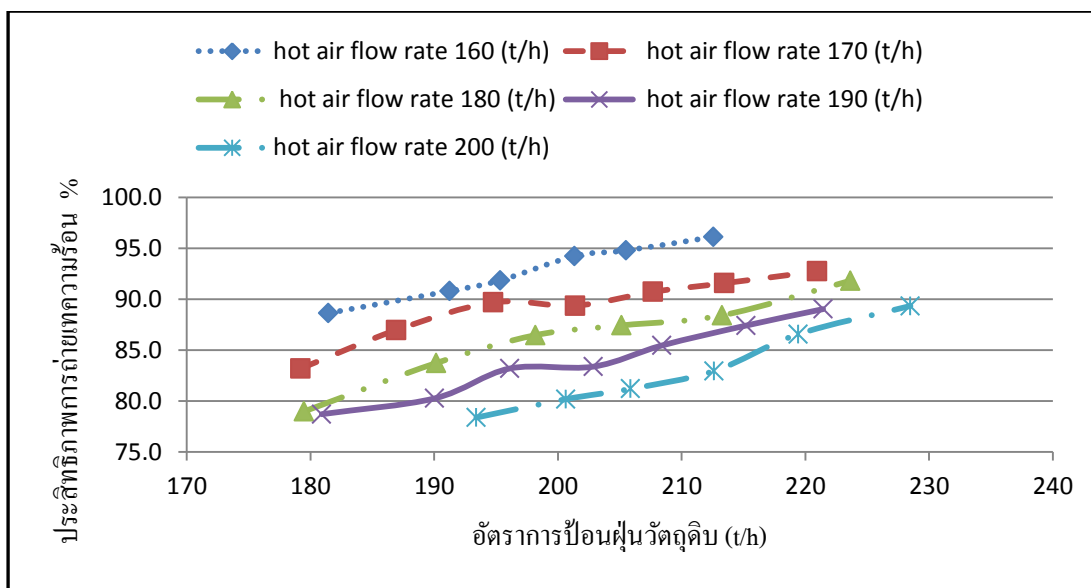
จากตัวอย่างข้อมูลอัตราป้อนก๊าซร้อนที่ 120,125,130,135,140 ton/h มาแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุคิบและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงข้อมูล นำมาแสดงผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนฝุ่นวัตถุคิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่อัตราป้อนก๊าซร้อนที่ 120,125,130,135,140 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 1

##### 4.1.2.2 ไซโคลนชุดที่ 2

จากตัวอย่างข้อมูลอัตราป้อนก๊าซร้อนที่ 165,175,185,195,205 ton/h มาแจกแจงความถี่ของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุคิบและหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงข้อมูล นำมาแสดงผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 160, 170, 180, 190, 200 ton/h ของไซโคลนชุดที่ 2

รูปที่ 4.11 ของไซโคลนชุดที่ 1 และรูปที่ 4.12 ของไซโคลนชุดที่ 2 เป็นการแสดงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบ (Kiln feed rate) ที่อัตราป้อนก๊าซร้อนต่างๆ (Hot gas flow rate) ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหากเพิ่มอัตราการป้อนมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของฝุ่นวัตถุดิบ อ้างอิงได้จากคำอธิบายของคุณ Rajan A. และคณะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนไปยังฝุ่นวัตถุดิบมีค่าเพิ่มขึ้นพิจารณาได้จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 ของไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2 และจากสมการการถ่ายเทความร้อนที่ 4.2

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{hot kiln feed}} &= UA\Delta T & (4.2) \\
 U &= \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน} \\
 A_h &= \text{พื้นที่ผิวฝุ่นวัตถุดิบ, m}^2 \\
 \Delta T &= \text{ปริมาณอุณหภูมิแตกต่าง}
 \end{aligned}$$

### 4.1.3 ระดับอิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

การแสดงระดับของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยใช้โปรแกรมมินิแท็บในการวิเคราะห์แสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1.3.1 ไซโคลนชุดที่ 1

แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองเพื่อหาผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม (Analysis of variance, ANOVA)

จากผลการรัน โปรแกรม (Program run) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถหาผลของปัจจัยหลัก ( $F_{ik}, F_{ih}$ ) และปัจจัยร่วม (Interaction,  $F_{ik} + F_{ih}$ ) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ได้ผลค่าความน่าจะเป็น (p-value) ของปัจจัยหลัก  $F_{ih}$ ,  $F_{ik}$  มีค่าเป็น 0.000 และปัจจัยร่วม  $F_{ih} + F_{ik}$  มีค่าเป็น 0.956 นั้นแสดงว่าปัจจัยหลัก ( $F_{ih}$ ,  $F_{ik}$ ) มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น แต่ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อการปัจจัยฝุ่นเพราะผลค่าความน่าจะเป็น (p-value) มากกว่า 0.05 แสดงดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงถึงความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัยต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) ของปัจจัยหลัก ( $F_{ih}$ ,  $F_{ik}$ ) แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)} = SS / SST \quad (4.3)$$

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) } F_{ik} = (50.959 / 966.410) \times 100 = 5.27 \%$$

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) } F_{ih} = (740.723 / 966.410) \times 100 = 76.6 \%$$

ดังนั้นสรุปว่า  $F_{ik}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนร้อยละ 5.27 และ  $F_{ih}$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนร้อยละ 76.6

**General Linear Model: Efficiency versus F1k, F1h**

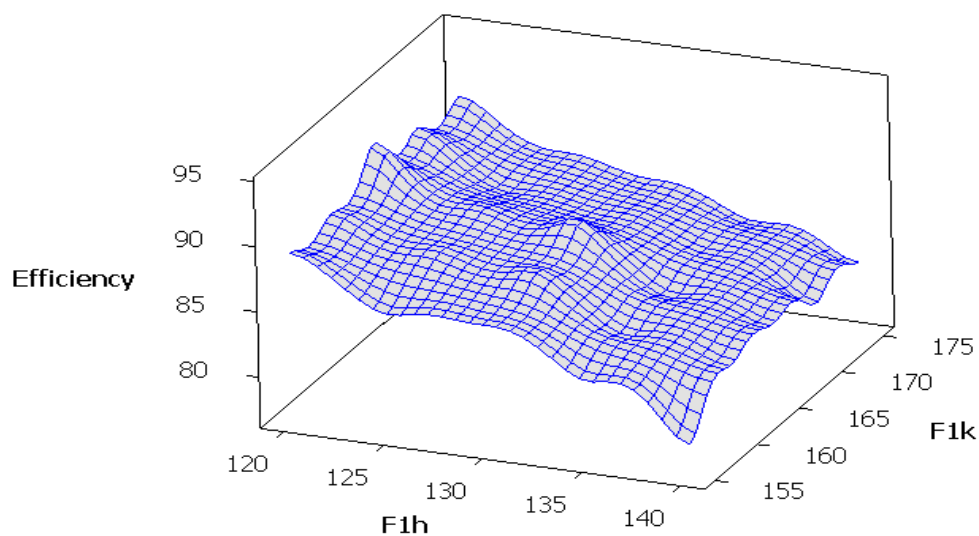
Factor	Type	Levels	Values
F1k	fixed	5	155, 160, 165, 170, 175
F1h	fixed	5	120, 125, 130, 135, 140

Analysis of Variance for Efficiency, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
F1k	4	50.959	50.959	12.740	4.18	0.005
F1h	4	740.723	740.723	185.181	60.75	0.000
F1k*F1h	16	22.312	22.312	1.394	0.46	0.956
Error	50	152.415	152.415	3.048		
Total	74	966.410				

S = 1.74594    R-Sq = 84.23%    R-Sq(adj) = 76.66%

รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของไซโคลนชุดที่ 1



รูปที่ 4.14 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1

#### 4.1.3.2 ไชโคลนชุดที่ 2

แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองเพื่อหาผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม (Analysis of variance, ANOVA) ของไชโคลนชุดที่ 2

จากผลการรัน โปรแกรม (Program run) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถหาผลของปัจจัยหลัก ( $F_{2k}, F_{2h}$ ) และปัจจัยร่วม (Interaction,  $F_{2k} + F_{2h}$ ) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ผลค่าความน่าจะเป็น (p - value) ของปัจจัยหลัก ( $F_{2k}, F_{2h}$ ) มีค่าเป็น 0.000 และปัจจัยร่วม (Interaction,  $F_{2k} + F_{2h}$ ) มีค่าเป็น 0.000 นั้นแสดงว่า  $F_{1h}, F_{1k}$  และ  $F_{1h} + F_{1k}$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัยต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) ของปัจจัย  $F_{1h}, F_{1k}$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) =  $SS / SST$

ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)  $F_{1k} = (476.387 / 1855.125) \times 100 =$  ร้อยละ 25.66

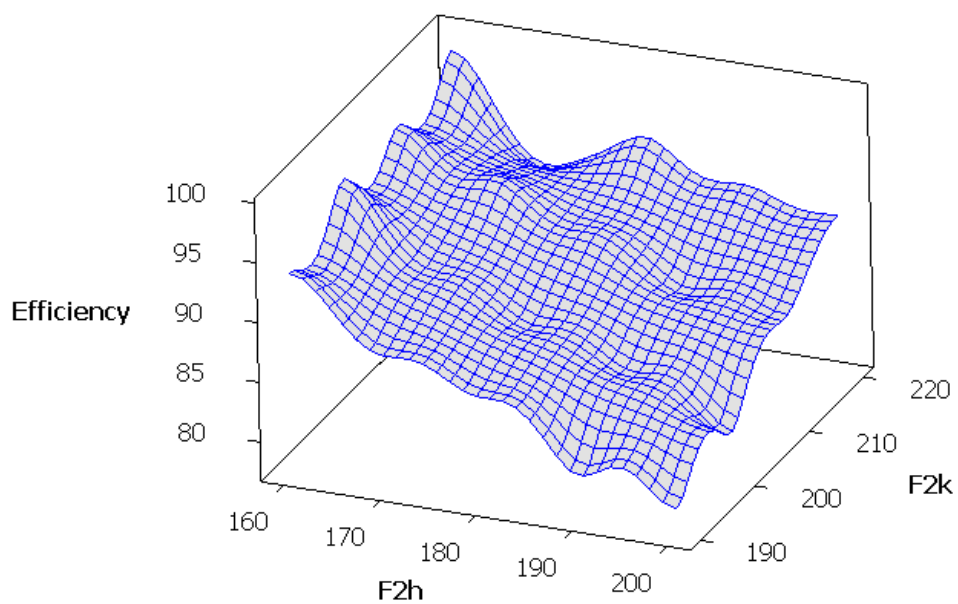
ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)  $F_{1h} = (1148.512 / 1855.125) \times 100 =$  ร้อยละ 61.91

ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)  $F_{1h} + F_{1k} = (140.009 / 1855.125) \times 100 =$  ร้อยละ 7.54

ดังนั้นสรุปว่าปัจจัยหลัก ( $F_{2k}, F_{2h}$ ) และ ปัจจัยร่วม (Interaction,  $F_{2k} + F_{2h}$ ) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน 61.91 % , 25.27 % และ 7.54 % ตามลำดับ

General Linear Model: Efficiency versus F1h, F1k						
Factor	Type	Levels	Values			
F1h	fixed	5	160, 170, 180, 190, 200			
F1k	fixed	4	190, 200, 210, 220			
Analysis of Variance for Efficiency, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
F1h	4	1148.512	1148.512	287.128	127.31	0.000
F1k	3	476.387	476.387	158.796	70.41	0.000
F1h*F1k	12	140.009	140.009	11.667	5.17	0.000
Error	40	90.216	90.216	2.255		
Total	59	1855.125				
S = 1.50180    R-Sq = 95.14%    R-Sq(adj) = 92.83%						

รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของไชโคลนชุดที่ 2



รูปที่ 4.16 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนกับอัตราการป้อนฝุ่น  
วัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2

#### 4.2 ประสิทธิภาพในการดักฝุ่น

จากการชั่งน้ำหนักปริมาณฝุ่นวัสดุบดที่ถูกดักจับได้นั้น นำมาคำนวณประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2 เป็นดังนี้

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	F1k	F1h	Efficiency	
1	1	1	1	1	145	115	85.7	
2	2	2	1	1	145	125	86.4	
3	3	3	1	1	145	135	87.1	
4	4	4	1	1	155	115	86.8	
5	5	5	1	1	155	125	87.5	
6	6	6	1	1	155	135	88.6	
7	7	7	1	1	165	115	88.3	
8	8	8	1	1	165	125	89.8	
9	9	9	1	1	165	135	90.9	
10	10	10	1	1	145	115	84.9	
11	11	11	1	1	145	125	86.5	
12	12	12	1	1	145	135	87.4	
13	13	13	1	1	155	115	87.3	
14	14	14	1	1	155	125	87.8	
15	15	15	1	1	155	135	88.4	
16	16	16	1	1	165	115	88.6	
17	17	17	1	1	165	125	89.9	
18	18	18	1	1	165	135	90.2	
19								

รูปที่ 4.17 ผลของประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 1



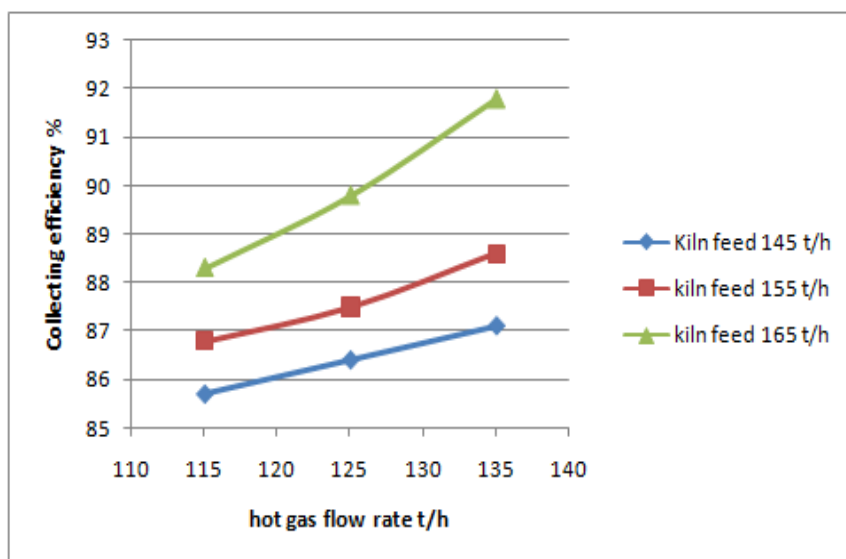
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	F2k	F2h	Efficiency	
1	1	1	1	1	235	160	85.9	
2	2	2	1	1	235	180	86.3	
3	3	3	1	1	235	200	87.0	
4	4	4	1	1	245	160	87.1	
5	5	5	1	1	245	180	87.7	
6	6	6	1	1	245	200	88.0	
7	7	7	1	1	255	160	88.4	
8	8	8	1	1	255	180	89.1	
9	9	9	1	1	255	200	90.3	
10	10	10	1	1	235	160	85.5	
11	11	11	1	1	235	180	86.4	
12	12	12	1	1	235	200	86.8	
13	13	13	1	1	245	160	86.9	
14	14	14	1	1	245	180	87.6	
15	15	15	1	1	245	200	88.1	
16	16	16	1	1	255	160	87.9	
17	17	17	1	1	255	180	89.6	
18	18	18	1	1	255	200	90.0	
19								

รูปที่ 4.18 ผลของประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 2

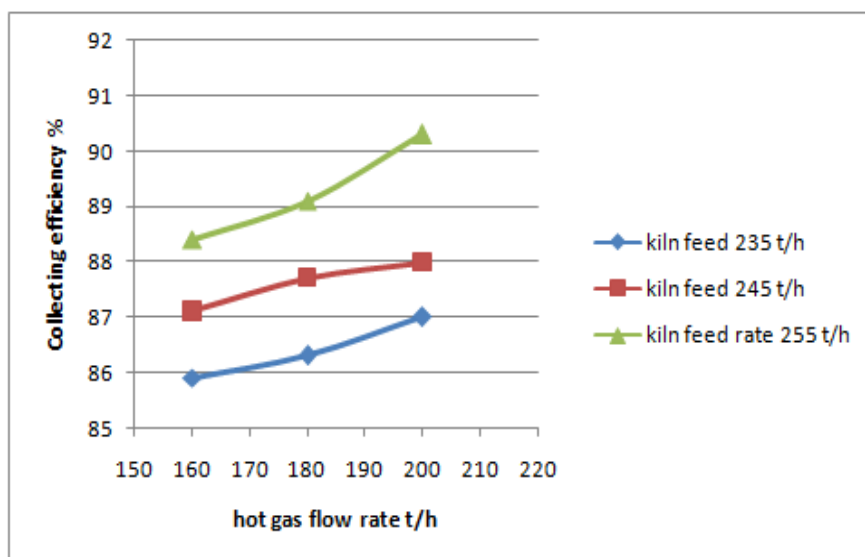
#### 4.2.1 ผลของอัตราป้อนก๊าซร้อน

ได้ดังนี้

จากผลการทดลองและได้คำนวณประสิทธิภาพการดักฝุ่นที่อัตราป้อนก๊าซร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่นที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 145,155,165 t/h ของไซโคลนชุดที่ 1



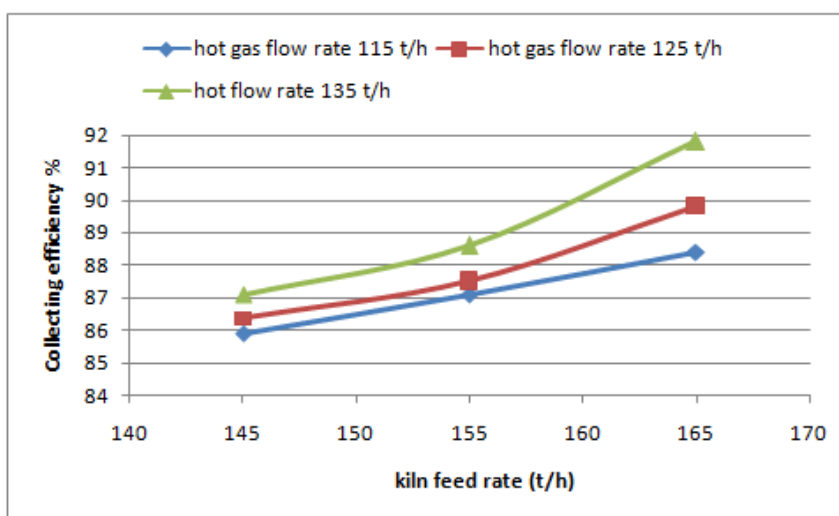
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่นที่อัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ 235,245,255 t/h ของไซโคลนชุดที่ 2

ผลของการทดลองประสิทธิภาพการดักฝุ่นดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ของไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2 ตามลำดับ ผลที่ได้จะเห็นว่าหากเพิ่มอัตราป้อนก๊าซร้อน จะทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2 ซึ่งผลที่ได้สามารถอธิบายจากกลไกการดักฝุ่นได้ดังนี้

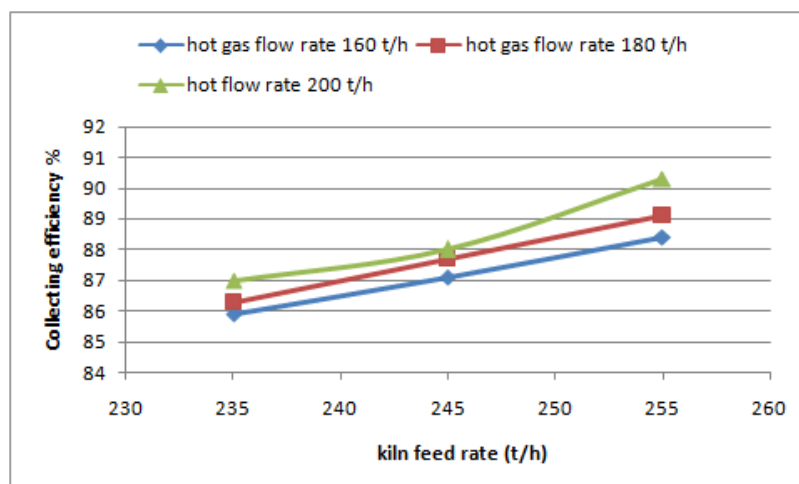
พิจารณากลไกการดักฝุ่นเมื่อก๊าซร้อนเข้ามาภายในไซโคลนจะเกิดแรงหนีศูนย์กลางหรือแรงเหวี่ยง ซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศมีการหมุน ทำให้อนุภาคถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลนและจะทำให้เกิด แรงถ่วง – เมื่ออนุภาคเคลื่อนถึงผนังของไซโคลนแล้ว อนุภาคที่หนักจะได้รับแรงถ่วงทำให้อนุภาคตกลงไปที่ถังพักข้างล่าง ดังนั้นหากเพิ่มอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบจะทำให้อนุภาคบริเวณผนังไซโคลนมีโอกาสอัดแน่นกันมากขึ้นส่งผลให้อนุภาคถูกดักมากขึ้น อ้างอิงจากการทดลองของคุณ Bahrami A, และคณะ

#### 4.2.2 ผลของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ

จากผลการทดลอง ที่อัตราป้อนก๊าซร้อนต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น ที่อัตราป้อนก๊าซร้อน 115, 125, 135 t/h ของไซโคลนชุดที่ 1



รูปที่ 4.22 อิทธิพลของอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น ที่อัตราป้อนก๊าซร้อน 160, 180, 200 t/h ของไซโคลนชุดที่ 2

ผลที่ได้จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 ของไซโคลนชุดที่ 1 และ ไซโคลนชุดที่ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าหากเพิ่มอัตราป้อนก๊าซร้อน จะทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นเพิ่มมากขึ้นซึ่งผลที่ได้สามารถอธิบายจากกลไกการดักฝุ่นที่อธิบายไว้ข้างต้นว่าหากเพิ่มอัตราป้อนก๊าซร้อนทำให้ความเร็วขาเข้าไซโคลนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงหนีศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นทำให้ฝุ่นวัตถุดิบไปยังผนังไซโคลนเพิ่มมากขึ้นทำให้ฝุ่นวัตถุดิบเคลื่อนตัวออกจากไซโคลนมากขึ้น

#### 4.2.3 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบของไซโคลนชุดที่ 1

นำข้อมูลผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.17 ป้อนเข้าโปรแกรมมินิแท็บ (program minitab) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นว่ามีผลหรือไม่ ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งผลที่ได้สามารถพิจารณาได้ว่าค่า p - value ของตัวแปรหลัก  $F_{1h}$ ,  $F_{1k}$  มีค่าเป็น 0.000 และปัจจัยร่วม  $F_{1h} * F_{1k}$  มีค่าเป็น 0.449 นั้นแสดงว่า  $F_{1h}$ ,  $F_{1k}$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น แต่ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อการปัจจัยฝุ่นเพราะ p - value มากกว่า 0.05

การคำนวณระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) ของปัจจัย  $F_{1h}$ ,  $F_{1k}$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)} = SS / SST$$

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)} F_{1k} = (32.57 / 43.97) \times 100 = 74.07 \%$$

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)} F_{1h} = (10.15 / 43.97) \times 100 = 23.08 \%$$

ดังนั้นสรุปว่า  $F_{1k}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการดักฝุ่น 74.07 % และ  $F_{1h}$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น 23.08 %

Residual Plots for Efficiency						
General Linear Model: Efficiency versus F1k, F1h						
Factor	Type	Levels	Values			
F1k	fixed	3	145, 155, 165			
F1h	fixed	3	115, 125, 135			
Analysis of Variance for Efficiency, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
F1k	2	32.5744	32.5744	16.2872	171.44	0.000
F1h	2	10.1544	10.1544	5.0772	53.44	0.000
F1k*F1h	4	0.3856	0.3856	0.0964	1.01	0.449
Error	9	0.8550	0.8550	0.0950		
Total	17	43.9694				
S = 0.308221    R-Sq = 98.06%    R-Sq(adj) = 96.33%						

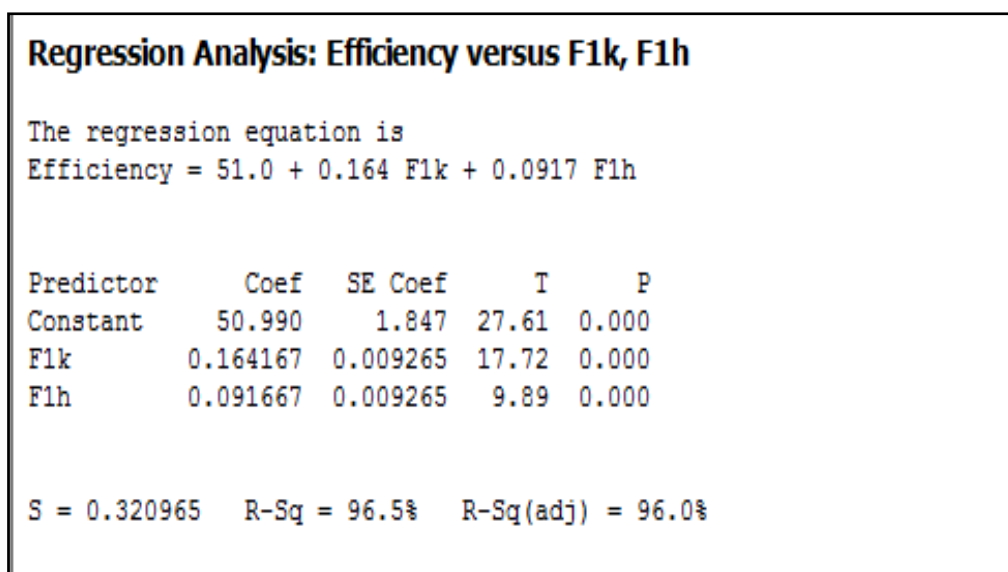
รูปที่ 4.23 แสดงผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนชุดที่ 1

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regressions) ของไซโคลนชุดที่ 1

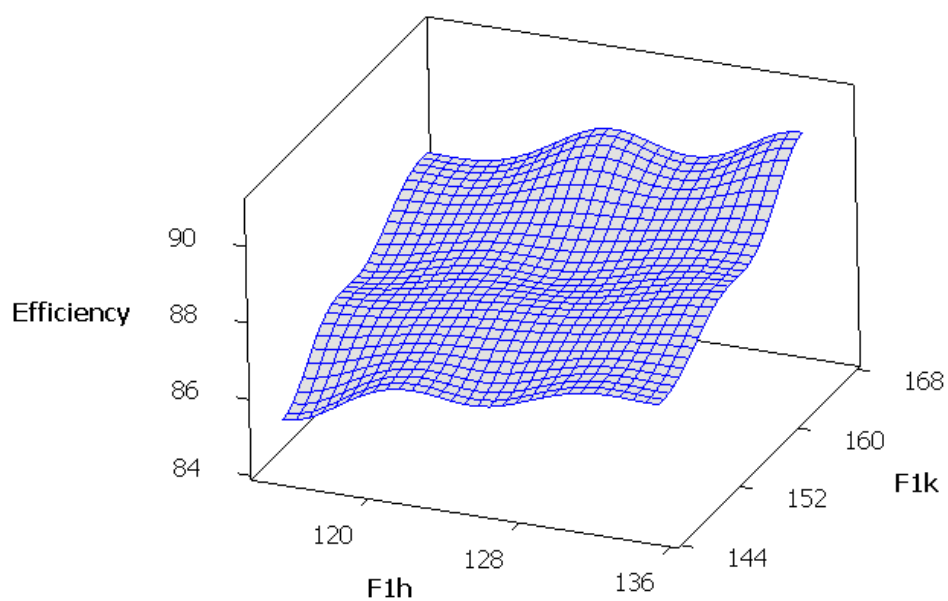
จากผลการทดลองสามารถนำมาหาสมการการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งจากผลการทดลองจะได้สมการที่ (4.4) และสามารถพิจารณาผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนฝุ่น วัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนดังรูปที่ 4.25 ซึ่งจะเห็นว่าหากเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซร้อนและหากเพิ่มอัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบ ทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามผลระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)

$$\text{ประสิทธิภาพในการดักฝุ่น (Collection efficiency)} = 51.0 + F_{1k} \times 0.164 + F_{1h} \times 0.0917 \quad (4.4)$$

โดยที่  $R^2 = 96.0\%$



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุของไซโคลนชุดที่ 1



รูปที่ 4.25 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดักฝุ่นกับอัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 1

#### 4.2.4 อิทธิพลของอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบของไซโคลนชุดที่ 2

ผลจากนำข้อมูลผลการทดลองของไซโคลนชุดที่ 2 ดังรูปที่ 4.18 ป้อนเข้าโปรแกรมมินิแท็บ (Program minitab) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นว่ามีผลหรือไม่ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งผลที่ได้สามารถพิจารณาได้ว่าค่า p - value ของตัวแปรหลัก  $F_{1h}$ ,  $F_{1k}$  มีค่าเป็น 0.000 และปัจจัยร่วม  $F_{1h} * F_{1k}$  มีค่าเป็น 0.091 นั้นแสดงว่า  $F_{1h}$ ,  $F_{1k}$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น แต่ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อการปัจจัยฝุ่นเพราะ p - value มากกว่า 0.05

ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) ของปัจจัย  $F_{1h}$ ,  $F_{1k}$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

จาก ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) =  $SS_{F_{1k}} / SST$

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) } F_{2k} = (25.39 / 32.44) \times 100 = 78.26 \%$$

$$\text{ระดับอิทธิพล (Percentage of distribution) } F_{2h} = (6.08 / 32.44) \times 100 = 18.74 \%$$

ดังนั้นสรุปว่า  $F_{2k}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการดักฝุ่น 78.26 % และ  $F_{2h}$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่น 18.74 %

General Linear Model: Efficiency versus F2k, F2h						
Factor	Type	Levels	Values			
F2k	fixed	3	235, 245, 255			
F2h	fixed	3	160, 180, 200			
Analysis of Variance for Efficiency, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
F2k	2	25.3900	25.3900	12.6950	265.71	0.000
F2h	2	6.0833	6.0833	3.0417	63.66	0.000
F2k*F2h	4	0.5367	0.5367	0.1342	2.81	0.091
Error	9	0.4300	0.4300	0.0478		
Total	17	32.4400				
S = 0.218581    R-Sq = 98.67%    R-Sq(adj) = 97.50%						

รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักฝุ่นไซโคลนชุดที่ 2

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regressions) ของไซโคลนชุดที่ 2

จากผลการทดลองสามารถนำมาหาสมการการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งจากผลการทดลองจะได้สมการ (4.5) และสามารถพิจารณาผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนฝุ่นวัตถุดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนดังรูปที่ 4.28 ซึ่งจะเห็นว่าหากเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซร้อนและหากเพิ่มอัตราการป้อนฝุ่นวัตถุดิบทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามผลระดับอิทธิพล (Percentage of distribution)

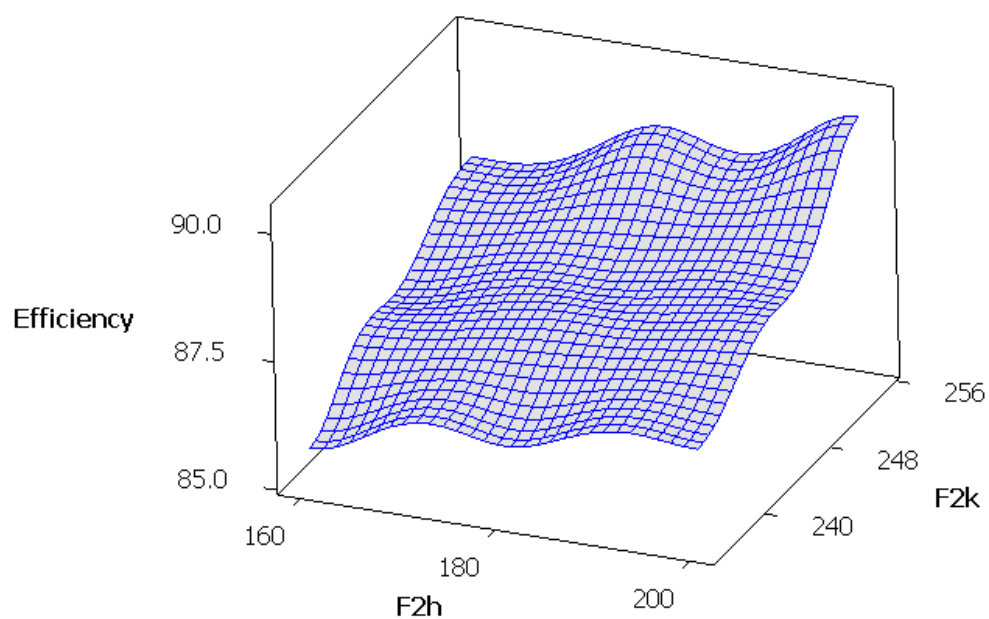
$$\text{ประสิทธิภาพในการดักฝุ่น (Collection efficiency)} = 45.8 + F_{2k} \times 0.145 + F_{2h} \times 0.0354 \quad (4.5)$$

โดยที่  $R^2 = 95.8\%$  ดังรูปที่ 4.32

Regression Analysis: Efficiency versus F2k, F2h				
The regression equation is				
Efficiency = 45.8 + 0.145 F2k + 0.0354 F2h				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	45.800	2.123	21.58	0.000
F2k	0.145000	0.008128	17.84	0.000
F2h	0.035417	0.004064	8.71	0.000
S = 0.281563    R-Sq = 96.3%    R-Sq(adj) = 95.8%				

รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุของไซโคลนชุดที่ 2





รูปที่ 4.28 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดักฝุ่นกับอัตราการป้อนฝุ่นวัดดูดิบและอัตราการป้อนก๊าซร้อนของไซโคลนชุดที่ 2

การศึกษาถึงระดับอิทธิพลของอัตราป้อนฝุ่นวัดดูดิบ และอัตราป้อนก๊าซร้อน มีผลต่อประสิทธิภาพต่อการดักฝุ่น ซึ่งผลดังกล่าวพบว่าหากเพิ่มอัตราป้อนฝุ่นวัดดูดิบ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่นมากกว่าการเพิ่มอัตราป้อนก๊าซร้อน โดยผลที่ได้มีลักษณะคล้ายกับผลของคุณ Ferit Ficici และคณะ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการศึกษาอัตราป้อนก๊าซร้อนและอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการดักฝุ่น เป็นดังนี้

##### 5.1.1.1 ผลของอัตราการป้อนก๊าซร้อน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนก๊าซร้อนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลงและประสิทธิภาพการดักฝุ่นเพิ่มมากขึ้น ทั้งในไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2

##### 5.1.1.1 ผลของอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราป้อนฝุ่นวัดถุดิบเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการดักฝุ่นเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งในไซโคลนชุดที่ 1 และไซโคลนชุดที่ 2

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่จะได้ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่น้อยที่สุดให้ได้ผลิตถ่านมากที่สุด

## รายการอ้างอิง

1. เครื่องมือที่ใช้พลังงานความร้อน:เชื้อเพลิงและการเผาไหม้,โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ2006.
2. Anuj Jain, Paul A.R. , Aggarwal S.K. , Mohanty B. , Mani B.P. A New Correlation for Holdup in Gas-Solids Cyclone. Applied and Computational Mathematics : 117-126
3. Ari V., Gur M., Engin T., and Calli I., Effect of dust concentration on a preheater cyclone in particulate transport for cement process, The third Israeli conference for conveying and handling of particle solids 10th International Freight Pipeline Society Symposium (may 2000):16.12-16.15.
4. FeritFicici ,andVedat Ari , Optimization of the Preheater CycloneSeparators Used in the Cement Industry,International Journal of Green Energy10(2013) : 12-27.
5. Jain A., Mohanty B., Pitchumani B., and Rajan .K.S..Studies on Gas-Solid Heat Transfer in Cyclone Heat Exchanger,Journal of heat transfer volume 128 (August 2006) : 761-768.
6. KabirG., AbubakarA.I., and El-Nafaty U.A. ,Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant,Energy 35 (2010):1237–1243.
7. Otto Labahn,and B. Kohlhaas, Firing technology in Cement Engineers’s Handbook, Bauverlag GmbH 1983, pp. 433-440.
8. Parker R., Jain R., and Calvert S., Particle Collection in Cyclones at High Temperature and High Pressure, American Chemical Society Volume 15 Number 4 (April 1981):451-458
9. Percent Calcination.Innovations in Portland Cement Manufacturing, May 2011

10. Policies and Programs Division Office of Air Quality Planning and Standards U.S. Environmental Protection Agency, Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Portland Cement Industry, Office of Air and Radiation October 2011 : 6
11. Rajan K.S. ,Dhasandhan K., Srivastava S.N., and Pitchumani .B ,Studies on gas–solid heat transfer during pneumatic conveying,International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008):2801–2813.
12. Rajan K.S., Srivastava S.N. , Pitchumani B. , and Surendiran V., Thermal conductance of pneumatic conveying preheater for air–gypsum and air–sand heat transfer,International Journal of Thermal Sciences 49 (2010): 182–186.
13. Tahsin Engin ,and Vedat Ari, Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems A case study, Energy Conversion and Management 46 (2005): 551–562.
14. Unal Camdali ,Ali Erisen ,and Fusun Celen, Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production, Energy Conversion and Management 45 (2004): 3017–3031.
15. Won Namkung and Minyoung Cho. Pneumatic Drying of Iron Ore Particles in a Vertical Tube,Drying Technology An International Journal volume 22 number 4 : 877-891

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลการชั่งปุ๋ยมะพร้าววันที่ 27 มกราคม 2555

รถคันที่	น้ำหนักรวม ปุ๋ยมะพร้าว(kg)	น้ำหนัก (kg)	น้ำหนักปุ๋ยมะพร้าว (ton)
1	52610	20240	32.4
2	57580	22530	35.1
3	52460	20070	32.4
4	52730	19160	33.6
5	52750	20190	32.6
6	57550	21050	36.5
7	52570	20870	31.7
8	46620	19890	26.7
9	50380	19700	30.7
10	52760	20670	32.1
11	55700	20230	35.5
12	55670	20040	35.6
13	52540	21130	31.4
14	50390	19710	30.7
15	52700	21240	31.5
16	57780	19500	38.3
17	52610	20560	32.1
18	52610	20740	31.9
19	52600	20100	32.5
20	46650	19970	26.7
21	52700	21450	31.3

ตารางที่ ก.1 ผลการชั่งปุ๋ยมะพร้าววันที่ 27 มกราคม 2555(ต่อ)

รถคันที่	น้ำหนักกรรรวม ปุ๋ยมะพร้าว(kg)	น้ำหนักกรร (kg)	น้ำหนักปุ๋ยมะพร้าว (ton)
22	57610	21020	36.6
23	52640.0	20840.0	31.8
24	52620.0	19770.0	32.9
25	52570.0	19410.0	33.2
26	52730.0	20140.0	32.6
27	57710.0	21990.0	35.7
28	52580.0	20720.0	31.9
29	57640.0	21530.0	36.1
30	52520.0	20610.0	31.9
31	46700.0	19720.0	27.0
32	52500.0	20070.0	32.4
33	52850.0	20410.0	32.4
34	50080.0	19890.0	30.2
35	52600.0	20590.0	32.0
36	52660.0	20330.0	32.3
37	52700.0	20240.0	32.5
38	52660.0	21960.0	30.7
39	52690.0	20150.0	32.5
40	52850.0	20420.0	32.4
41	52790.0	22050.0	30.7
42	57520.0	21100.0	36.4
43	46570.0	19940.0	26.6

ตารางที่ ก.1 ผลการชั่งปุ๋ยเม็ดวันที่ 27 มกราคม 2555(ต่อ)

รถคันที่	น้ำหนักกรรรวมปุ๋ย เม็ด(kg)	น้ำหนักกรร (kg)	น้ำหนักปุ๋ยเม็ด (ton)
44	52740	21200	31.5
45	52220	21050	31.2
46	51730	20200	31.5
47	57590	19140	38.5
48	52600	19650	33.0
49	57570	22160	35.4
50	57720	21470	36.3
51	52690	22250	30.4
52	46540	19830	26.7
53	52760	18630	34.1
54	52850	20350	32.5
55	55670	20810	34.9
56	52750	20170	32.6
57	52590	20080	32.5
58	52800	18890	33.9
59	57610	21120	36.5
60	57650	21120	36.5
61	57630	22160	35.5
62	57740	21940	35.8
63	52680	20670	32.0
64	52580	20370	32.2
65	52610	20380	32.2
66	52580	19710	32.9



ตารางที่ ก.1 การชั่งปุ๋ยมะพร้าววันที่ 27 มกราคม 2555(ต่อ)

รถคันที่	น้ำหนักกรรรวม ปุ๋ยมะพร้าว(kg)	น้ำหนักกรร (kg)	น้ำหนักปุ๋ยมะพร้าว (ton)
67	52720	20620	32.1
68	57670	21100	36.6
69	52590	20200	32.4
70	52730	20120	32.6
71	46710	19790	26.9
72	52510	19140	33.4
73	52990	20010	33.0
74	54660	19440	35.2
75	57550	21310	36.2
76	55670	20060	35.6
77	57680	22530	35.2
78	58060	20940	37.1
79	52680	20990	31.7
80	55590	20900	34.7
81	24380	20330	4.1
น้ำหนักปุ๋ยมะพร้าวรวม			2637.1

ใช้เวลาทั้งหมด 11 ชั่วโมง 10 นาที

น้ำหนักฝุ่นวัดตุลิจบที่ใช้

ไซโคลนชุดที่ 1	=	1712 ton
ไซโคลนชุดที่ 2	=	2311 ton
น้ำหนักรวมทั้งหมด	=	4023 ton
ดังนั้นอัตราส่วนที่หายไป	=	$(4023 - 2311) / 4023$
	=	0.345
ข้อมูล LOI ของฝุ่นวัดตุลิจบ	=	0.354
% Error	=	- 2.6 %

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล นายอดิชาติ ไชยสุวรรณ  
 วันเดือนปีเกิด 24 กันยายน พ.ศ.2528  
 สถานที่เกิด จังหวัดอ่างทอง  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 99/829 หมู่ที่ 7 แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150  
 โทรศัพท์ 089-928-8133

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2543 มัธยมศึกษาโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ สำเร็จการศึกษาปีการศึกษา 2546  
 พ.ศ.2546 ปริญญาตรี ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาปิโตรเคมี และวัสดุโพลีเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร  
 สำเร็จการศึกษาปีการศึกษา 2550  
 พ.ศ.2552 ปริญญาโท ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 สำเร็จการศึกษาปีการศึกษา 2555