# การลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย
# ในการผลิตผงซักฟอก

นายชาคริต ควรพานิช
นายวัฒนชัย ชวลิตชัยชาญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

# การลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย
# ในการผลิตผงซักฟอก


นายชาคริต ควรพานิช

นายวัฒนชัย ชวลิตชัยชาญ


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MINIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTIIOM OF A SPRAY DRYER IN POWDER DETERGENT PRODUCTION


CHAKRIT KHUANPANICH

WATTANACHAI CHAWALITCHAICHAN


THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013


เอกสารนี้เป็นเอกสาร ... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **ปริญญานิพนธ์เรื่อง** | การลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผงซักฟอก |
| **โดย** | นายชาคริต ควรพานิช |
| | นายวัฒนชัย ชวลิตชัยชาญ |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ |
| **ที่ปรึกษาร่วม** | คุณไพบูลย์ ชูโชติรส |
| | บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด |
| **ปริญญานิพนธ์** | สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |

---

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.............................................................ประธานกรรมการ
(รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

.............................................................กรรมการ
(ดร.นริศรา ทองบุญชู)

.............................................................กรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวีริยวาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **ปริญญานิพนธ์เรื่อง** | การลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผงซักฟอก |
| **โดย** | นายชาคริต ควรพานิช |
| | นายวัฒนชัย ชวลิตชัยชาญ |
| **ปริญญา** | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมเคมี |
| **ปีการศึกษา** | 2556 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ |
| **ที่ปรึกษาร่วม** | คุณไพบูลย์ ชูโชติรส |
| | บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด |

## บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีหน้าที่ผลิตผงพื้นฐาน (base powder) สำหรับผงซักฟอก โดยใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักในการไล่ความชื้นออกจากสเลอรี่ จากนโยบาย World Class Manufacturing เพื่อเป็นผู้นำในการผลิตผงซักฟอก บริษัทได้เลือกใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและมุ่งพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องภายใต้ต้นทุนต่ำ โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ลดการใช้แก๊สธรรมชาติที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยไม่กระทบต่อคุณภาพของผงพื้นฐาน การปฏิบัติการปกติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อากาศจากบรรยากาศจะถูกผสมกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เตาเผาอากาศร้อน และจึงใช้แก๊สธรรมชาติเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้ถึงค่าปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โครงการนี้ทดสอบการใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากเครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง ผสมกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันแทนอากาศจากบรรยากาศ ผลการดำเนินงานพบว่าการใช้แก๊สธรรมชาติลดลง ปริมาณที่ใช้เท่ากับ 36.74 กิโลกรัม/ตันของผงพื้นฐาน คิดเป็นมูลค่า 37.6 ล้านบาท/ ปี ที่อัตราการฉีดสเลอรี่ปกติ คือ 25 ตัน/ชั่วโมง และอัตราการไหลรวมของอากาศร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ขณะที่ปริมาณแก๊สธรรมชาติในกรณีที่ใช้อากาศจากบรรยากาศเท่ากับ 39.78 กิโลกรัม/ตันของผงพื้นฐาน หรือคิดเป็นมูลค่า 40.7 ล้านบาท/ปี ดังนั้นสามารถลดต้นทุนค่าพลังงานที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจากการใช้แก๊สธรรมชาติได้ 3.1 ล้านบาท/ปี นอกจากนี้ยังได้ผลพลอยได้จากการลดพลังงานไฟฟ้าที่พัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้อีก 350,000 บาท/ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Report Title** | Minimization of Energy Consumption of a Spray Dryer in Powder Detergent Production |
| **By** | Mr. Chakrit Khuanpanich |
| | Mr. Wattanachai Chawalitchaichan |
| **Degree** | Bachelor of Engineering |
| **Program** | Chemical Engineering |
| **Year** | 2013 |
| **Advisor** | Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum |
| **Co-advisor** | Mr. Paiboon Choochotiros |
| | The Unilever Thai Holdings Limited |

## ABSTRACT

Spray dryer is an operation to produce base powder for powder detergent by using natural gas as a main fuel to evaporate moisture from detergent slurry. To become the leader in detergent production as the World Class Manufacturing, the case study company uses remarkable and high efficiency technology, sustains high product quality at low production cost. For this reason, this project aims to minimize natural gas consumption at the spray dryer while the base powder still stays within standard specifications. In general practice, for high energy efficiency of the spray dryer, the ambient air was preheated by waste heat from the sulfonation plant at the heating furnace. The hot air temperature was then increased to the operating temperature of the dryer by natural gas. In this study, hot air of 90 °C from 2 air compressors was used instead of the ambient air with waste heat from the sulfonation plant. It was clearly that the natural gas consumption was decreased. The amount of natural gas was found to be 36.74 kg/ton of base powder, which was equivalent to 37.6 million Baht/year at normal slurry flow rate of 25 ton/h and the total hot air flow rate to the spray dryer of 70,000 kg/h. The amount of natural gas of 39.78 kg/ton of base powder or 40.7 million Baht/year was observed when the ambient air was used. In conclusion, a saving of 3.1 million Baht/year was achieved from the natural gas minimization at the spray dryer excluding the electricity saving at the combustion air fan of approximately 350,000 Baht/year.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คณะผู้บริหารของบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด ที่ให้โอกาสทำโครงการกับบริษัท รวมถึงสนับสนุนวัตถุดิบและเครื่องมือตลอดการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ คุณประชา โภคฐิติยุกต์ ผู้อำนวยการฝ่ายผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือนและเครื่องใช้ส่วนบุคคล คุณไพบูลย์ ชูโชติรส ผู้จัดการแผนกผลิตผงซักฟอก พนักงานห้องปฏิบัติการควบคุมการผลิต และพนักงานตรวจสอบคุณภาพที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อแนะนำและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการทำงาน และตรวจแก้ไขให้ปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ดร.นริศรา ทองบุญชู และอาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

ท้ายสุดนี้กราบขอบพระคุณ บิดามารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามที่อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจตลอดมา

หากปริญญานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใด คณะทำงานขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ชาคริต ควรพานิช
วัฒนชัย ชวลิตชัยชาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... II
กิตติกรรมประกาศ ..... III
สารบัญ ..... IV
สารบัญตาราง ..... VII
สารบัญรูป ..... VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... IX
บทที่ 1 บทนำ ..... 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน ..... 2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน ..... 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ ..... 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 4
2.1 ผงซักฟอก ..... 4
2.2 กระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน ..... 7
2.3 การอบแห้ง ..... 9
2.4 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ..... 12
2.5 แก๊สธรรมชาติ ..... 15
2.6 หลักพื้นฐานในการอนุรักษ์พลังงาน ..... 16
2.7 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ..... 18
2.8 การไหลของของไหลในท่อ ..... 20
2.9 เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ..... 21
2.10World Class Manufacturing ..... 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน ..... 25

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน ..... 25

3.2 เขียนแผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน (process mapping) ..... 25

3.3 วิเคราะห์ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ก่อนการดำเนินงาน ..... 25

3.4 วิเคราะห์ปัจจัยหรือตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อ การลดการใช้แก๊สธรรมชาติ ..... 25

3.5 การสร้างสมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจาก เครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA ..... 26

3.6 แก้ไขความถูกต้องในการแสดงอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ ในระบบ SCADA ..... 27

3.7 วิเคราะห์การใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน ..... 27

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล ..... 28

4.1 แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน ..... 28

4.2 ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงาน ..... 31

4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ..... 32

4.4 สมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ ในระบบ SCADA ..... 34

4.5 ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน ..... 38

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ ..... 41

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน ..... 41

5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 42

บรรณานุกรม ..... 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ........ 45
ภาคผนวก ก วิธีใช้ท่อพิทอตและมาโนมิเตอร์ ........ 46
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ ........ 48
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ ........ 57
ภาคผนวก ง สมบัติของอากาศที่ 1 บรรยากาศ ........ 62
ประวัติผู้เขียน ........ 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผงซักฟอก | 6 |
| 4.1 | แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน | 28 |
| 4.2 | ความหมายของสัญลักษณ์จากแผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน | 30 |
| 4.3 | เปรียบเทียบการใช้อากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศแทนอากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน | 35 |
| 4.4 | อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคงที่ 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง โดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน | 38 |
| ข.1 | อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ต่อแก๊สธรรมชาติก่อนการดำเนินงาน | 48 |
| ข.2 | อุณหภูมิของอากาศจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันก่อนเข้าเตาเผาต่อแก๊สธรรมชาติที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ก่อนการดำเนินงาน | 49 |
| ข.3 | อุณหภูมิของอากาศจากบรรยากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันก่อนเข้าเตาเผาต่อแก๊สธรรมชาติที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ก่อนการดำเนินงาน | 50 |
| ข.4 | ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย | 51 |
| ข.5 | ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง หลังการดำเนินงาน | 55 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน 8

2.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง 9

3.1 แผนผังการนำอากาศร้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 26

3.2 ระยะที่ใช้วัดความเร็วของอากาศร้อนในท่อ 27

4.1 การใช้แก๊สธรรมชาติก่อนการดำเนินงาน ที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง 31

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 33

4.3 อุณหภูมิของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผาต่อการใช้แก๊สธรรมชาติ 34

4.4 อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อการใช้แก๊สธรรมชาติ 34

4.5 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์รุ่น GF 90 เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศ 36

4.6 การวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรมมินิแทป 36

4.7 ปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้หลังการดำเนินงานที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง 39

4.8 ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงาน ที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง 39

4.9 ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน ที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง 40

ก.1 การต่อท่อพิทอตกับมาโนมิเตอร์ 44

ก.2 มาโนมิเตอร์ รุ่น MP 100-101-105-112 45

ก.3 ท่อพิทอต รุ่น PT2C-60 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำอธิบายสัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| $A$ | พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางเมตร) |
| D | เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (เมตร) |
| $\dot{m}$ | อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัม/ชั่วโมง) |
| $N_R$ | เลขเรย์โนลด์ |
| $Q$ | อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง) |
| $T_{avg}$ | อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผา (°C) |
| $v_{avg}$ | ความเร็วเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (เมตร/วินาที) |
| $\mu$ | ความหนืดสัมบูรณ์ (ปาสคาล/วินาที) |
| $\nu$ | ค่าความหนืดจลนศาสตร์ของของไหล (ตารางเมตร/วินาที) |
| $\rho$ | ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด ผลิตและจัดจำหน่ายสินค้าอุปโภคบริโภคในกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล เช่น สบู่ แชมพู สารซักฟอกชนิดผงและชนิดเหลว ซึ่งมีทั้งสำหรับซักด้วยมือและด้วยเครื่องซักผ้า กลุ่มผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในครัวเรือน และกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม ปัจจุบันแม้ว่าความนิยมของผู้บริโภคต่อการใช้สารซักฟอกชนิดเหลวจะเพิ่มขึ้นมาก เพราะสารซักฟอกชนิดเหลวมีประสิทธิภาพการซักล้างสูงและไม่ทิ้งคราบเกาะติดผ้า แต่สารซักฟอกชนิดผงซักฟอกสูตรมาตรฐานและสูตรเข้มข้นที่บริษัทผลิตก็ยังคงได้รับความนิยมสูง การผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐานเริ่มจากการผสมสเลอรี่ (slurry) จากวัตถุดิบต่างๆ ทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็ง แล้วอบแห้งสเลอรี่ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ผงพื้นฐาน (base powder) ส่วนการผลิตผงซักฟอกสูตรเข้มข้นนั้น วัตถุดิบที่เป็นของแข็งจะถูกนำมาผสมกันได้ผงพื้นฐานโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการผสมเป็นสเลอรี่และการอบแห้งแบบพ่นฝอย ผงพื้นฐานจะถูกผสมด้วยสารเติมแต่งต่างๆ เช่น สารช่วยการละลาย สารกันการจับตัวเป็นก้อน สารช่วยให้ผ้านุ่ม น้ำหอม ฯลฯ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับผงซักฟอก แล้วจึงส่งผงซักฟอกเข้ากระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์

นโยบาย World Class Manufacturing ของบริษัทเพื่อมุ่งสู่การเป็นบริษัทผู้ผลิตชั้นนำ มีกลยุทธ์ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การลดการเดินเครื่องจักรตัวเปล่า การลดหรือเปลี่ยนชนิดของปัจจัยนำเข้า เช่น วัตถุดิบ เชื้อเพลิง การลดต้นทุนการผลิตต่างๆ เช่น ต้นทุนพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต โครงการนี้เป็นงานในกลุ่มการลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐานที่ศึกษาต่อเนื่องเพื่อลดการใช้แก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยที่ผงพื้นฐานที่ออกจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะต้องมีข้อกำหนดด้านคุณภาพตามที่บริษัทกำหนด ได้แก่ ความชื้น (2.0-4.0 % โดยน้ำหนัก) ความหนาแน่นรวมของผงพื้นฐาน (0.36-0.44 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) เพราะความชื้นและความหนาแน่นรวมของผงพื้นฐานมีผลต่อคุณภาพ น้ำหนัก ขนาด และความสามารถในการซักล้างของผงซักฟอก รวมทั้งความสามารถในการบรรจุผงซักฟอกลงบรรจุภัณฑ์

โดยปกติการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการอบแห้งสเลอรี่เพื่อผลิตผงพื้นฐาน บริษัทใช้อากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เตาเผาอากาศร้อน หลังจากนั้นจึงใช้แก๊สธรรมชาติเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนนี้ให้สูงขึ้นจนถึงค่าปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (กระบวนการซัลโฟเนชันเป็นกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นของ... ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตกรดซัลโฟนิก หรือลิเนียร์อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (linear alkylbenzenesulfonate: LAS) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงและสามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ ใช้สำหรับการผลิตสารซักฟอก) งานวิจัยที่ผ่านมาของกมลา ธรรมรัตนากร และจันทกานต์ พรสายชล (2555) รายงานว่าปัจจัยที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติในกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และจำนวนและตำแหน่งการเปิดหัวฉีดสเลอรี่ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สมมาตรกัน การปรับอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมกับอัตราการฉีดสเลอรี่ คือ 63,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง และการกำหนดตำแหน่งและจำนวนการเปิดหัวฉีดสเลอรี่ คือ เปิดหัวฉีดสเลอรี่ที่วงแหวนบน7 หัวฉีด จาก 16 หัวฉีด และที่วงแหวนล่าง 4 หัวฉีด จาก 12 หัวฉีด จะทำให้ละอองสเลอรี่กระจายตัว และสัมผัสกับอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้การสูญเสียความร้อนออกไปกับอากาศลดลง และการใช้แก๊สธรรมชาติในกระบวนการผลิตผงซักฟอกมีประสิทธิภาพสูงสุด

สำหรับแนวทางลดการใช้แก๊สธรรมชาติที่ศึกษาในโครงการนี้คือทดสอบการนำอากาศร้อนทิ้งที่ยังมีศักยภาพซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส จากเครื่องอัดอากาศ (air compressor) 2 เครื่อง มาใช้ผสมกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เตาเผาอากาศร้อน เพราะคาดว่าจะสามารถลดปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิอากาศที่เตาเผาให้กับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อลดการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

## 1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

1.3.2 วิเคราะห์การใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงาน

1.3.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

1.3.4 หาแนวทางลดการใช้แก๊สธรรมชาติโดยการนำความร้อนทิ้งที่มีศักยภาพกลับมาใช้ใหม่และวิเคราะห์การใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน

1.3.5 สรุปผลการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทราบปัจจัยและสามารถลดการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

1.4.2 ได้สมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต

1.4.3 ผู้ทำโครงการได้เรียนรู้กระบวนการผลิตและการทำงานในบริษัท สามารถวิเคราะห์ปัจจัยและสาเหตุของปัญหาในกระบวนการผลิต และได้พัฒนาทักษะในการแก้ไขปัญหาเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ผงซักฟอก [มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 78-2549]

ผงซักฟอก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดสังเคราะห์ และ/หรือชนิดธรรมชาติเป็นส่วนประกอบหลัก ใช้สำหรับซักผ้า

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมถึงผงซักฟอกที่มีลักษณะเป็นผง เม็ดเล็กๆ หรือเกล็ด อัดขึ้นรูปกึ่งแข็งกึ่งเหลว แท่ง หรือลักษณะอื่น แต่ไม่ครอบคลุมถึงผลิตภัณฑ์ซักผ้าเหลว ผงซักฟอกแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดซักฟอกด้วยมือ ชนิดซักฟอกด้วยเครื่องซักผ้า และชนิดซักฟอกด้วยมือหรือเครื่องซักผ้า

2.1.1 ส่วนประกอบของผงซักฟอกแบ่งเป็นส่วนประกอบหลักและส่วนประกอบอาจมีได้โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ส่วนประกอบหลัก เช่น

(ก) สารลดแรงตึงผิว (surface-active agent or surfactant) หมายถึง สารเมื่อละลายในน้ำแล้วช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ สารลดแรงตึงผิวอาจเป็นสารชนิดสังเคราะห์ และ/หรือชนิดธรรมชาติก็ได้ เช่น แอนไอออนิก (anionic) แคตไอออนิก (cationic) หรือนอนไอออนิก (nonionic) ประเภทใดประเภทหนึ่งหรือผสมกัน ในกรณีที่เป็นสารเคมีประเภทแอนไอออนิก ต้องไม่เป็นอัลคิลเบนซีนซัลโฟเนตที่มีโครงสร้างแบบกิ่ง (branch alkylbenzene sulphonate)

(ข) สารลดความกระด้างของน้ำ (sequestering builder) หมายถึง สารที่ช่วยให้สารลดแรงตึงผิวสามารถทำหน้าที่ได้ดี เช่น โซเดียมไทรพอลิฟอสเฟต (sodium tripolyphosphate: STPP) เกลือของกรดไนทริโลไทรแอซีติก (nitrilotriacetic acid: NTA) ซีโอไลต์ (zeolite) สารใดสารหนึ่งหรือผสมกัน

(ค) สารรักษาระดับความเป็นด่าง หมายถึง สารที่รักษาระดับความเป็นด่างให้คงที่ตลอดช่วงการใช้งานของผงซักฟอก เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) โซเดียมเซสควิคาร์บอเนต (sodium sesquicarbonate) สารใดสารหนึ่งหรือผสมกัน

(ง) สารกันคราบคืน (anti-soil redeposition agent) หมายถึง สารที่ช่วยไม่ให้คราบหรือสิ่งสกปรกที่หลุดออกไปแล้วกลับมาติดผ้าอีกขณะซัก เช่น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (sodium carboxymethylcellulose: SCMC)

(จ) สารเพิ่มความสดใส (optical brightening agent or optical brightener) หมายถึง สารที่สามารถดูดแสงอัลตราไวโอเลต แล้วให้แสงที่ทำให้ผ้าดูสดใสยิ่งขึ้น เช่น ไทโนพัล ดีเอ็มเอส (timopal DMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนประกอบที่อาจมีได้

(ก) โซเดียมซัลเฟต (sodium sulphate)

(ข) สารเพิ่มฟอง (suds booster) หรือสารลดฟอง (suds depressor) หมายถึง สารซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวจะทำให้เกิดฟองมากขึ้นหรือทำให้ฟองลดลง

(ค) สารฟอก

(ง) สารฟอกต้นตอ (bleach precursor) หมายถึง สารซึ่งเมื่อละลายในน้ำจะเกิดสารฟอกขึ้น

(จ) สารคงสภาพสำหรับสารฟอกต้นตอ (stabilizer for bleach precursor) หมายถึง สารที่ผสมกับสารฟอกต้นตอแล้วทำให้สารฟอกต้นตอสลายตัวช้าลง

(ฉ) สารช่วยการละลาย (hydrotrope) หมายถึง สารที่ทำให้ผงซักฟอกละลายในน้ำได้ดีขึ้น

(ช) สารกันหมอง (anti-tarnishing agent) หมายถึง สารที่ช่วยให้ส่วนที่เป็นโลหะที่เป็นส่วนประกอบของสิ่งซักล้างไม่หมองคล้ำ

(ซ) แอนติออกซิแดนต์ (anti-oxidant) หมายถึง สารที่ทำให้ส่วนประกอบบางอย่างของผงซักฟอกมีปฏิกิริยากับออกซิเจนช้าลง

(ฌ) เอนไซม์ (enzyme) หมายถึง สารอินทรีย์ที่มีสมบัติช่วยย่อยโมเลกุลของโปรตีนหรือแป้งหรือไขมันให้เป็นหน่วยย่อยๆ ได้

(ญ) น้ำหอม

(ฎ) สี

(ฏ) สารกันการจับตัวเป็นก้อน

(ฐ) สารช่วยขับสิ่งสกปรก (soil releasing agent) หมายถึง สารที่ช่วยให้สิ่งสกปรกที่ติดผ้าหลุดออกง่ายขึ้น

(ฑ) สารต้านจุลินทรีย์ (anti-microbial compound) หมายถึง สารที่ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

(ฒ) สารละมุน (mildness additive) หมายถึง สารที่ช่วยให้ผงซักฟอกไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง

(ณ) สารคงสภาพการเก็บรักษา (storage stabilizer) หมายถึง สารที่ช่วยให้ผงซักฟอกเก็บไว้ได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ

(ด) สารช่วยให้ผ้านุ่ม (fabric softening agent) หมายถึง สารช่วยทำให้ผ้านุ่มหลังจากซักแล้ว

(ต) สารกันไฟฟ้าสถิต (anti-static agent) หมายถึง สารช่วยลดประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ถ) สารกันการกัดกร่อน (anti-corrosion agent) หมายถึง สารที่ช่วยลดการกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะของผ้า

2.1.2 คุณลักษณะของผงซักฟอกที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 78-2549 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ คือ

- ต้องปราศจากสิ่งแปลกปลอม ส่วนประกอบต้องกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ กรณีที่เป็นกึ่งแข็งกึ่งเหลวจะต้องไม่มีการแยกตัว

- ไม่มีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นน้ำมันก๊าด กลิ่นหืน กลิ่นคาว หรือกลิ่นกรด

- คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผงซักฟอกเป็นตามตารางที่ 2.1 การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก.578

- คุณลักษณะทางชีวภาพต้องสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก.578

**ตารางที่ 2.1** คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผงซักฟอก [มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 78-2549]

| รายการที่ | คุณลักษณะ | เกณฑ์ที่กำหนด | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ชนิดซักฟอกด้วยมือ | ชนิดซักฟอกด้วยมือหรือเครื่องซักผ้า | ชนิดซักฟอกด้วยเครื่องซักผ้า |
| 1. | ความเป็นกรด-ด่าง เมื่อทำให้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ไม่เกิน | 10.5 | | 11.0 |
| 2. | สารที่ละลายได้ในเอทานอล* ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า | 18.0 | | 5.0 |
| 3. | สารลดความกระด้างของน้ำ (คำนวณเป็นแคลเซียมที่ทำปฏิกิริยา) มิลลิกรัมต่อกรัม | 27 ถึง 136 | | 27 ถึง 198 |
| 4. | ฟอสเฟตทั้งหมด (คำนวณเป็น $P_2O_5$) ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่เกิน | 20.0 | | 28.0 |
| 5. | ด่างทั้งหมด (คำนวณเป็น $Na_2O$) ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า | 1.1 | | 1.1 |
| 6. | โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า | 0.2 | | 0.2 |
| 7. | สารเพิ่มความสดใส | ต้องมี | | ต้องมี |
| 8. | ความสามารถในการซักฟอกเทียบกับผงซักฟอกอ้างอิง | 80 | | 80 |
| 9. | ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า ความสามารถในการรักษาความขาวเทียบกับผงซักฟอกอ้างอิง ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า | 80 | | 80 |

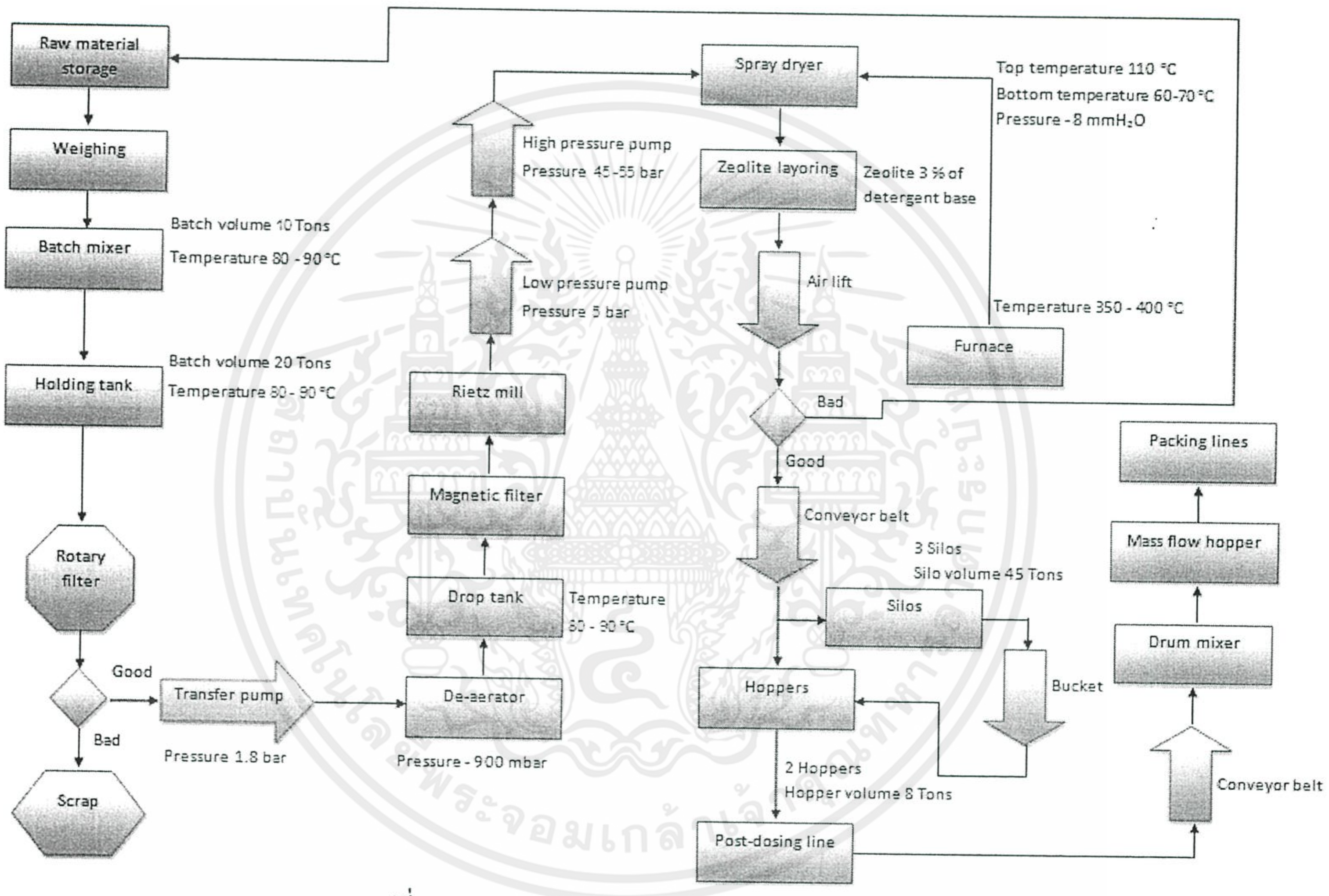
หมายเหตุ * หมายถึง สารที่ละลายได้ในเอทานอลประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน [เอกสารบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด]

การผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐานเริ่มจากชั่งน้ำหนักวัตถุดิบต่างๆ ตามสูตร เช่น สารลดแรงตึงผิว สารลดความกระด้างของน้ำ สารรักษาระดับความเป็นด่าง เพื่อผสมเป็นสเลอรี่ จากนั้นบดสเลอรี่ให้มีขนาดเล็กลง แล้วจึงกรองสิ่งปนเปื้อนและไล่อากาศออกจากสเลอรี่ เพื่อส่งเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยให้ได้ผงพื้นฐานที่มีความชื้นเหมาะต่อการใช้งานและสามารถเก็บรักษาได้นาน ผงพื้นฐานที่ได้จะถูกผสมกับสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความสามารถการซักล้าง เช่น เอนไซม์ ได้ผงซักฟอกสูตรมาตรฐานเก็บเข้าไซโลเพื่อรอการบรรจุ ผงซักฟอกแต่ละสูตรขึ้นกับสัดส่วนของวัตถุดิบและสารเติมแต่ง ดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

## 2.3 การอบแห้ง [G. Nonhebel and A.A.H. Moss (1971); วัชระ มั่งวิทิตกุล (2548); เอกสารบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด; วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ Hajime Tamon (2548); Arun S. Mujumdar (2011)]

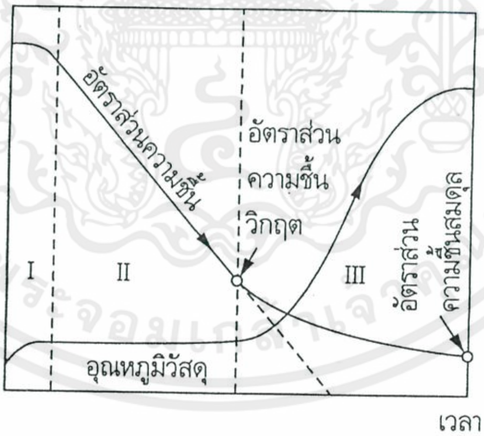
### 2.3.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีความชื้นเพื่อระเหยน้ำออกและได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง การอบแห้งจึงเป็นปรากฏการณ์ถ่ายเทมวลและถ่ายเทความร้อนในเวลาเดียวกัน การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการอบแห้งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง วัสดุที่ต้องการอบแห้งอาจอยู่ในสภาพของเหลว สเลอรี่ วัสดุคล้ายแป้งเปียก เส้นใย เม็ดผง สะเก็ด (flake) และก้อนของแข็ง เป็นต้น

โดยปกติปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุอบแห้ง จะถูกนิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลของวัสดุที่ต้องการอบแห้งทั้งหมด คือ ใช้มวลของวัสดุชื้นเป็นมาตรฐานของการคำนวณความชื้น แต่ในกระบวนการอบแห้งเนื่องจากมวลของวัสดุชื้นจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจึงใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณความชื้น ดังสมการที่ (2.1)

$$\text{\% ความชื้นของวัสดุอบแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \qquad (2.1)$$

### 2.3.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (drying characteristic curve)




**รูปที่ 2.2** เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง [วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ Hajime Tamon (2548)]

การอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ คือ

- ช่วงที่ 1 การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ เป็นช่วงการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงที่ 2 การอบแห้งที่อัตราการอบแห้งคงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ตราบที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงนี้

- ช่วงที่ 3 การอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากภายในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น

2.3.3 อัตราการอบแห้ง (drying rate)

อัตรากรอบแห้ง คือ อัตราที่น้ำถูกดึงออกจากละอองเล็กๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และเวลา การระเหยของน้ำจะถูกทำให้เป็นละออง โดยเครื่องอบแห้ง การถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง

2.3.4 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบ่งประเภทได้ตามลักษณะการให้ความร้อนกับวัสดุชื้น เช่น

- เครื่องอบแห้งแบบการพาความร้อน วัสดุชื้นสัมผัสกับแก๊สร้อน เช่น อากาศร้อนโดยตรง ตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) เครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized bed dryer)

- เครื่องอบแห้งแบบการนำความร้อน เครื่องอบแห้งแบบนี้ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากตัวกลางภายนอก เช่น ไอน้ำควบแน่นโดยผ่านทางผิวของโลหะที่วัสดุชื้นสัมผัสอยู่ ตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบดรัม (drum dryer)

- เครื่องอบแห้งแบบการแผ่รังสี

- เครื่องอบแห้งแบบ dielectric เช่นแบบไมโครเวฟ

การทำงานของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจเป็นทั้งแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบทช์ เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องมักใช้เมื่ออัตราการอบแห้งสูง เป็นจำนวนหลายตันต่อชั่วโมง ส่วนเครื่องอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่องเหมาะสำหรับการอบแห้งที่น้อยกว่า 100 กิโลกรัมต่อวัน

ตัวอย่างของเครื่องอบแห้ง

- ห้องอบแห้ง (chamber dryer หรือ drying room) จัดวางวัสดุที่ต้องการอบแห้งภายในห้องอบแห้งแล้วใช้ลมร้อนไหลเวียนเข้าห้องอบแห้ง ประสิทธิภาพการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น ถ้าให้ความร้อนสัมผัสกับผิววัสดุมากที่สุด และหมุนเวียนลมร้อนส่วนหนึ่งกลับมาใช้ใหม่โดยผสมกับอากาศที่ป้อนเข้าห้องอบแห้ง โดยทั่วไปห้องอบแห้งจะใช้อบแห้งวัสดุชิ้นใหญ่ เช่น ยางแผ่น อิฐ กระเบื้องปูผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ของเหลวถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งแล้วทำให้เกิดละออง ขนาดเล็กด้วยหัวฉีดแบบพ่นฝอย เมื่อละอองของของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อนจะได้ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง

- เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (belt-type dryer) วัสดุที่ต้องการอบแห้งจะอยู่บนสายพานที่เคลื่อนที่ อากาศร้อนจะหมุนเวียนผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ใช้สำหรับอบแห้งน้ำตาล

- เครื่องอบแห้งแบบแผ่น (plate dryer) ประกอบด้วยแผ่นความร้อน 2 แผ่น วางวัสดุที่ต้องการอบแห้งไว้บนแผ่นหนึ่ง แล้วนำแผ่นความร้อนอีกหนึ่งแผ่นมาประกบ ใช้อบแห้งไม้อัด และผ้า

2.3.5 ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกเครื่องอบแห้ง

ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกเครื่องอบแห้งมีหลาบปัจจัยๆ ที่สำคัญ เช่น

- สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ต้องการอบแห้งตลอดระยะเวลาก่อนและหลังการอบแห้ง

- สภาวะและรูปร่างของวัสดุชื้นก่อนและหลังการอบแห้ง เช่น ขนาด รูปร่าง ลักษณะเม็ด ลักษณะสเลอรี่ ความหนืด อัตราส่วนความชื้นในวัสดุ

- คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิของวัสดุขณะอบแห้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาการอบแห้งน้อย คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจะดีกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำและเวลาการอบแห้งนาน

- ปริมาณที่ต้องการอบแห้ง

- ลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง และเงื่อนไขในการอบแห้ง

- แหล่งความร้อนและกำลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้

- ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง

2.3.6 การอนุรักษ์พลังงานในการอบแห้ง

การอนุรักษ์พลังงานในการอบแห้ง เช่น

- การไล่น้ำออกก่อนอบแห้ง

(ก) ลดปริมาณความชื้นให้เหลือน้อยที่สุดในระหว่างกระบวนการผลิต

(ข) การไล่น้ำโดยวิธีทางกล

- การป้องกันการสูญเสียความร้อน เช่น การติดตั้งฉนวนความร้อน การป้องกันการรั่วของอากาศร้อน (การป้องกันการแทรกซึมของอากาศเย็น) การป้องกันการรั่วบริเวณข้อต่อ การปรับสมดุลของความดันในและนอกเครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [ไทรท์ ศรีโยธา และคณะ (2546); เอกสารบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด; วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ Hajime Tamon (2548)]

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อระเหยน้ำออกจากสเลอรี่อย่างรวดเร็วโดยอากาศร้อน การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเริ่มจากดูดอากาศผ่านตัวกรอง และผ่านเตาเผาโดยใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง สเลอรี่ที่ถูกปั๊มผ่านหัวฉีดแบบพ่นฝอยเป็นละอองเข้าห้องอบแห้งนั้นควรเป็นของเหลวและไม่ข้นมาก ละอองสเลอรี่มีขนาด 100-250 ไมครอน ทำให้มีพื้นที่ผิวการถ่ายเทมวลและความร้อนมากขึ้น น้ำที่อยู่ในสเลอรี่จะระเหย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้ง มีขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตร เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นเริ่มแรกมีค่าสูง เพราะฉะนั้นต้นทุนของพลังงานความร้อนต่อมวลหนึ่งหน่วยของผลิตภัณฑ์จะสูง แต่เนื่องจากเวลาการอบแห้งสั้นมาก เพราะฉะนั้นแม้แต่วัสดุที่เสื่อมสภาพโดยความร้อนได้ง่ายก็จะไม่สูญเสียคุณภาพ เครื่องอบแห้งชนิดนี้ถูกใช้มากในการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและผงซักฟอก กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

2.4.1 ขั้นตอนการทำละอองสเลอรี่ (atomization)

การทำละอองสเลอรี่เป็นหัวใจหลักของการอบแห้งแบบพ่นฝอย สเลอรี่ที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลและความร้อนเพิ่มขึ้น จึงสามารถระเหยน้ำออกจากสเลอรี่ได้อย่างรวดเร็ว หัวฉีดแบบพ่นฝอยมี 3 ชนิด ได้แก่

- หัวฉีดแบบหมุน (rotary atomizer) สเลอรี่จะไหลลงใกล้จุดศูนย์กลางบนจานหมุนที่มีความเร็วรอบ 5,000-10,000 รอบต่อนาที สเลอรี่ที่ไหลลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองขนาด 30-120 ไมครอน ขนาดละอองสเลอรี่จะแปรผันกับอัตราการไหลของสเลอรี่และความหนืด แต่จะแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน
- หัวฉีดแบบแรงดัน (pressure nozzle atomizer) สเลอรี่จะไหลผ่านช่องของหัวฉีดภายใต้ความดันสูง และกระจายเป็นละอองโดยไม่ต้องใช้อากาศ ละอองสเลอรี่ที่ได้มีขนาด 100-250 ไมครอน ขนาดของละอองสเลอรี่แปรผันกับอัตราการฉีดและความหนืดของสเลอรี่ แต่จะแปรผกผันกับความดันของหัวฉีด
- หัวฉีดแบบของไหลสองชนิด (two-fluid nozzle atomizer หรือ pneumatic nozzle atomizer) นิยมใช้กับสเลอรี่ที่มีความหนืดสูง สเลอรี่และอากาศจะไหลผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูงทำให้สเลอรี่กระจายเป็นละออง การปรับอัตราการไหลของอากาศที่หัวฉีดจะช่วยในการกระจายเป็นละอองของสเลอรี่ การใช้หัวฉีดชนิดนี้มีค่าดำเนินการสูง ได้ผลผลิตต่ำ

2.4.2 ขั้นตอนการสัมผัสระหว่างละอองสเลอรี่กับอากาศร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนนี้น้ำจะระเหยออกจากละอองสเลอรี่เมื่อสเลอรี่สัมผัสกับอากาศร้อน ทิศทางการไหลของอากาศร้อนกับทิศทางการฉีดละอองสเลอรี่สำคัญต่อการถ่ายเทความร้อน และขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการอบแห้ง ลักษณะของสเลอรี่ และลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

ลักษณะของการสัมผัสระหว่างละอองสเลอรี่กับอากาศร้อน แบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่

- สเลอรี่กับอากาศร้อนไหลในทิศทางเดียวกัน (co-current flow)

ถ้าสเลอรี่กับอากาศร้อนไหลในทิศทางเดียวกันในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อากาศร้อนที่ไหลเข้าจะผสมกับละอองสเลอรี่ ผลิตภัณฑ์และอากาศส่วนใหญ่จะออกทางออกด้านล่างของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและเคลื่อนที่ไปยังระบบแยก การอบแห้งลักษณะนี้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อการสูญเสียคุณภาพเมื่อสัมผัสกับความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งลักษณะนี้จะสัมผัสกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำลง

- สเลอรี่กับอากาศร้อนไหลในทิศสวนทางกัน (counter-current flow)

สเลอรี่จะถูกฉีดเข้าทางด้านบนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและตกลงมา ในขณะที่อากาศร้อนจะไหลสวนทางเข้าจากด้านล่าง และเคลื่อนที่สู่ด้านบนสัมผัสกับสเลอรี่ ผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะออกทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อากาศร้อนที่ด้านล่างของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงจะสัมผัส โดยตรงกับผลิตภัณฑ์ที่แห้งหรือเกือบแห้ง ดังนั้นข้อเสียของการอบแห้งลักษณะนี้ คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจจะลดลงหรือผลิตภัณฑ์อาจเสื่อมสภาพเนื่องจากสัมผัสกับอากาศร้อนอุณหภูมิสูง และต้องใช้อัตราไหลของอากาศร้อนค่อนข้างต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียผลิตภัณฑ์ติดไปกับอากาศ

- การไหลแบบผสมกัน (mixed flow)

การไหลแบบนี้อากาศร้อนจะไหลแบบไซโคลน ในขั้นต้นสเลอรี่จะถูกฉีดเข้าที่ตอนกลางของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ส่วนอากาศร้อนที่ไหลเข้าจากด้านบนจะเคลื่อนที่ลงมาด้านล่างในทิศทางเดียวกันกับสเลอรี่ และอากาศร้อนจะถูกบังคับให้ไหลย้อนกลับขึ้นจากด้านล่างของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีลักษณะเป็นกรวยสวนทางกับสเลอรี่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไหลออกทางด้านล่าง ข้อเสียของการอบแห้งลักษณะนี้คือถ้าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเข้าเครื่องอบแห้งสูง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะลดลง

- การระเหยของละอองฝอย

เมื่อละอองสเลอรี่สัมผัสกับอากาศร้อน น้ำอิ่มตัวที่อยู่บริเวณผิวของละอองสเลอรี่จะระเหยอย่างรวดเร็ว ที่ผิวของละอองสเลอรี่จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอุณหภูมิอากาศแห้ง น้ำจากด้านในสเลอรี่จะแพร่มาที่ผิวและถูกระเหยเข้าสู่อากาศร้อน ช่วงนี้อัตราการระเหยจะคงที่จนกระทั่งความชื้นในสเลอรี่อยู่ในระดับต่ำและไม่มีการแพร่มาที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์แห้งออกจากอากาศร้อน

- นิยมใช้ไซโคลน (cyclone) ในการแยกผลิตภัณฑ์แห้งที่ติดไปกับอากาศร้อนให้ตกลงทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยรวมกับผลิตภัณฑ์ ส่วนอากาศที่ออกด้านบนของไซโคลนจะผ่านไปยังเครื่องดักฝุ่น ขั้นสุดท้ายอาจใช้ระบบบำบัดอากาศแบบเปียก (wet scrubber) หรือเครื่องเก็บฝุ่นแบบถุงกรอง (bag filter) ในการแยกฝุ่น ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของฝุ่น

2.4.5 ปัจจัยสำคัญในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ที่อัตราการไหลของอากาศร้อนคงที่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและขาออกมีผลต่อการอบแห้ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า การระเหยของน้ำออกจากสเลอรี่จะเพิ่มขึ้น

- ความเข้มข้น

ที่สภาวะการทำงานของหัวฉีดคงที่ ถ้าความเข้มข้นของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์ ทำให้อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำหนักแห้งของสเลอรี่ลดลง หรือมีความชื้นของสเลอรี่ลดลง เนื่องจากอัตราการระเหยน้ำในการอบแห้งคงเดิม ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความชื้นลดลง

- อัตราการป้อนสเลอรี่

การเพิ่มอัตราการป้อนสเลอรี่ โดยที่สภาวะการทำงานของหัวฉีดคงที่ มีผลทำให้ละอองฝอยของสเลอรี่ที่ถูกฉีดมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นต่ำลง หรือการเพิ่มอัตราการป้อนสเลอรี่ โดยที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าและปริมาณความร้อนที่ให้กับเครื่องอบแห้งคงที่ จะมีผลทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

- อัตราการไหลของอากาศร้อน

อัตราการไหลของอากาศร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยพัดลมดูดอากาศซึ่งสามารถปรับระดับให้อัตราการไหลของอากาศร้อนที่เข้าหรือออกเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งมีผลต่อความดันภายในของเครื่องอบแห้ง ถ้าความดันลดลง ปริมาณการระเหยของน้ำจะสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศร้อนจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ถ้าอุณหภูมิของอากาศร้อนคงที่และอัตราการไหลของอากาศร้อนต่ำ ปริมาณอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งสเลอรี่จะลดลง มีผลให้การระเหยของน้ำออกจากสเลอรี่ลดลง

- อัตราการฉีดสเลอรี่

อัตราการฉีดสเลอรี่คือสเลอรี่ที่ถูกอัดโดยอากาศหรือแก๊สให้เกิดการกระจายตัวเป็นละออง ถ้าอัตราการฉีดสเลอรี่สูง ขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเล็กลง

- ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความชื้นของอากาศร้อนสูงจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ถ้าต้องการให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ต้องเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า แต่อุณหภูมิที่ใช้จะต้องอยู่ในช่วงที่ปฏิบัติงานได้ เพราะผงที่ได้จากการอบแห้งอาจแปรสภาพและคุณสมบัติ

- การหมุนเวียนของอากาศร้อน

การหมุนเวียนอากาศร้อนที่ดีช่วยประหยัดต้นทุนในการอบแห้ง และทำให้การระเหยของน้ำสูง

## 2.5 แก๊สธรรมชาติ [บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) (2556); กัญจนา บุณยเกียรติ และชวลิต งามจรัสศรีวิชัย (2551)]

แก๊สธรรมชาติเป็นแก๊สผสมของไฮโดรคาร์บอนเบาเป็นส่วนใหญ่ แก๊สธรรมชาติประกอบด้วย

- ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) หรือพาราฟินิกไฮโดรคาร์บอน (paraffinic hydrocarbons) แหล่งแก๊สธรรมชาติในอ่าวไทยมีแก๊สมีเทน 60- 70 % อีเทน ($C_2H_6$) 10 % โพรเพน ($C_3H_8$) 5 % บิวเทน ($C_4H_{10}$) และสารที่หนักกว่าประมาณ 3 %
- แก๊สเจือปน (impurities) ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
- แก๊สเฉื่อย (inert and permanent gases) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน เป็นต้น และโลหะเจือปน
- ไอน้ำ

2.5.1 สมบัติทั่วไปของแก๊สธรรมชาติ

- เบากว่าอากาศ (ความถ่วงจำเพาะ 0.5-0.8 เท่าของอากาศ)
- ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ปราศจากพิษ
- มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ
- ช่วงของการติดไฟที่ร้อยละ 5-15 ของปริมาตรในอากาศ อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้เอง (autoignition temperature) คือ 650 $^{\circ}$C

2.5.2 ประโยชน์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแก๊สธรรมชาติ

- แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและเมื่ออัดด้วยความดันสูงจะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ คือ แก๊สธรรมชาติอัด (compressed natural gas: CNG หรือ natural gas for vehicles: NGV)
- แก๊สอีเทนและแก๊สโพรเพน ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น สำหรับการผลิตเม็ดพลาสติก
- แก๊สปิโตรเลียมเหลวหรือแก๊สหุงต้ม (liquefied petroleum gas: LPG) เป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สโพรเพนและแก๊สบิวเทน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและในโรงงานอุตสาหกรรม ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น และใช้ในการขนส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไฮโดรคาร์บอนเหลวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (heavier hydrocarbons) อยู่ในสถานะของเหลว เรียกว่า คอนเดนเสท (condensate) ลำเลียงขนส่งโดยเรือหรือท่อเพื่อนำไปกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูป

## 2.6 หลักพื้นฐานในการอนุรักษ์พลังงาน [กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2545)]

การอนุรักษ์พลังงานมีหลักพื้นฐาน 3 ประการ คือ

2.6.1 การลดการใช้พลังงานที่สิ้นเปลือง (reduce)

การลดการใช้พลังงานที่สิ้นเปลือง เช่น ลดการเปิดเครื่องจักรเดินตัวเปล่าโดยไม่ทำให้เกิดงานขึ้น การปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศที่ไม่เหมาะสม ทำให้คอมเพรสเซอร์ทำงานมากและสิ้นเปลืองพลังงาน

2.6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (increase efficiency)

การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานหรือลดการสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งอาจมาจากตัวอุปกรณ์หรือเครื่องจักร เช่น การใช้เครื่องจักรที่เสื่อมสภาพ หรือมาจากระบบการจัดการที่ไม่ดี

2.6.3 การนำพลังงานที่เหลือทิ้งกลับมาใช้งานใหม่ (reuse)

การนำพลังงานที่เหลือทิ้งกลับมาใช้งานใหม่ ทำได้โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากแหล่งจ่ายและแหล่งรับความร้อนทิ้ง หรือลดการใช้เชื้อเพลิงที่จุดใช้งาน เช่น

- การนำน้ำร้อนที่เหลือจากการใช้ในกระบวนการผลิตกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งในการอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (pre-heating combustion air) ซึ่งเป็นวิธีการใช้ความร้อนทิ้งที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง เพราะมีประสิทธิภาพและให้ผลตอบแทนในการลงทุนสูง

- การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในการให้ความร้อน

- การนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่สามารถที่กำหนดขอบเขตการส่งจ่ายความร้อนไปยังบริเวณต่างๆ ของโรงงานได้โดยตรงด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ตัวอย่างเช่น การนำอากาศร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ด้วยระบบท่อส่งจ่าย เครื่องอัดอากาศที่มีโครงสร้างอยู่ในฝาครอบหรือในกล่องสี่เหลี่ยมสำหรับช่วยป้องกันเสียง จะสามารถนำความร้อนทิ้งมาใช้ใหม่ได้ดี อากาศที่จะนำไปอัดจะถูกดูดจากปลายข้างหนึ่งของฝาครอบเครื่องอัดอากาศโดยการขับเคลื่อนของเพลา หรือตัวขับเคลื่อนระบายความร้อนพัดลม และส่งผ่านไปยังทางออกของอากาศร้อนทิ้งที่อยู่ตรงข้ามกับฝาครอบซึ่งติดตั้งท่อส่งจ่ายอากาศร้อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการใช้งานได้

- การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในการทำน้ำร้อน

โดยทั่วไปความร้อนทิ้งของเครื่องอัดอากาศจากการระบายความร้อนด้วยน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่ สามารถทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงถึง 95 °C โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือเครื่องสูบน้ำในการช่วยทำน้ำร้อน การนำน้ำร้อนจากเครื่องอัดอากาศประเภทระบายความร้อนด้วย

น้ำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มักใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (plate heat exchanger) และระบบที่เป็นวงจรปิดเพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนและการเกาะตัวของสิ่งสกปรก

- การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในกระบวนการผลิต

ปริมาณความร้อนทิ้งจากเครื่องอัดอากาศ สามารถนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง (drying process) โดยใช้อากาศร้อนทิ้งจากเครื่องอัดอากาศประเภทระบายความร้อนด้วยอากาศ ส่วนเครื่องอัดอากาศประเภทระบายความร้อนด้วยน้ำจะนำน้ำร้อนไปใช้ในกระบวนการซักล้างและทำความสะอาด

- การประหยัดพลังงานในระบบลมอัด ตัวอย่างเช่น

(ก) การควบคุมปริมาณการอัดอากาศโดยการหรี่วาล์วทางเข้า

การควบคุมปริมาณการอัดอากาศวิธีนี้ ใช้การหรี่วาล์วทางเข้าของอากาศด้านดูดของเครื่องอัดอากาศ ทำให้ความดันทางเข้าและความหนาแน่นของอากาศลดลง อัตราการไหลของอากาศที่ถูกอัดจึงลดลงด้วย แต่วิธีนี้จะทำให้อัตราส่วนความดันสูงขึ้นซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาอุณหภูมิที่ทางออกสูงเกินไป

(ข) การควบคุมอัตราการอัดอากาศด้วยวาล์วบายพาสที่ทางออก

วิธีนี้เมื่อความดันในระบบจ่ายลมอัดถึงค่าที่กำหนด วาล์วบายพาสที่ทางออกของเครื่องอัดอากาศจะเปิดเพื่อปล่อยอากาศที่ถูกอัดออกจากคอมเพรสเซอร์ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนกลับคืนไปที่ทางด้านดูดของคอมเพรสเซอร์

การปรับอัตราการอัดอากาศ มีข้อจำกัด เพราะแม้ว่าปริมาณการไหลของอากาศจะลดลง แต่กำลังของคอมเพรสเซอร์กลับลดลงไม่มากนัก เนื่องจากเป็นการปล่อยลมทิ้งหลังจากที่ถูกอัดจนมีความดันสูงแล้ว ดังนั้นก็ยังไม่สามารถลดการใช้พลังงานลงได้มาก

(ค) การลดการรั่วไหลของอากาศอัด

การรั่วของอากาศอัดเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ เพราะการรั่วไหลไม่ได้ก่อให้เกิดงานขึ้น แต่เป็นการสูญเสียพลังงาน โดยปกติจะยอมให้อากาศอัดรั่วไหลได้เพียง 5 เปอร์เซ็นต์ หากเกินค่านี้ต้องรีบแก้ไขโดยด่วน ตำแหน่งที่มีการรั่วไหลของอากาศอัดบ่อย เช่น วาล์ว หน้าแปลน ข้อต่อท่อต่างๆ จุดต่อเข้าเครื่องจักร ลักษณะการรั่วมี 2 ลักษณะ คือ การรั่วโดยตรง และการรั่วซึม ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นการรั่วซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน [กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2545)]

2.7.1 เครื่องอัดอากาศ (air compressor)

เครื่องอัดอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 10 % ของปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในโรงงาน พลังงานมากกว่า 90 % ของ 10 % ที่ใช้ จะสูญเสียไปกับระบบน้ำมันหล่อเย็น และน้ำหล่อเย็น หรือสูญเสียในรูปของความร้อนจากมอเตอร์ โดยทั่วไปถือว่าความร้อนที่สูญเสียจากมอเตอร์นี้มีระดับอุณหภูมิที่ต่ำ แต่ก็ยังสามารถนำกลับมาใช้อุ่นน้ำหรืออากาศได้ สามารถแบ่งเครื่องอัดอากาศตามการระบายความร้อนได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ และชนิดที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ

เครื่องอัดอากาศชนิดที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ความร้อนส่วนหนึ่งนั้นได้มาจากน้ำที่ใช้หล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นอาจมีอุณหภูมิสูงถึง 60 °C จึงอาจใช้อุ่นน้ำสำหรับป้อนหม้อไอน้ำเพื่อทำน้ำร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิต ความร้อนเหล่านี้สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับเครื่องอัดอากาศชนิดที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยทั่วไปอากาศร้อนที่ได้จะมีอุณหภูมิระหว่าง 50 - 60 °C อากาศร้อนนี้สามารถนำกลับมาใช้ได้โดยส่งไปตามท่อยังแหล่งที่ต้องการใช้ความร้อน

การแบ่งชนิดของเครื่องอัดอากาศตามการใช้งาน ได้แก่ เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (reciprocating compressor) และเครื่องอัดอากาศแบบแรงเหวี่ยงหรือเทอร์โบ (centrifugal compressor)

1. เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ

(ก) ประเภทระบายความร้อนด้วยอากาศ แบ่งเป็น

1) เครื่องขนาดเล็ก

ปกติแล้วอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่จะได้รับผ่านแผงบานเกล็ดที่ติดตั้งไว้ที่ผนังของเครื่องอัดอากาศสำหรับระบายความร้อน

2) เครื่องขนาดใหญ่ที่มีระบบระบายความร้อนแยกกัน

การเก็บรวบรวมความร้อนทิ้งทั้งหมดจากเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบขนาดใหญ่ค่อนข้างยาก อย่างไรก็ตามการต่อท่อส่งจ่ายอากาศเพื่อนำอากาศร้อนจากการระบายความร้อนของชุดอินเตอร์คูลเลอร์ (Intercooler) กับ Aftercooler สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ได้ถึง 50 %

3) เครื่องขนาดใหญ่ที่มีระบบระบายความร้อนรวมในตัว

สามารถเชื่อมเข้าที่ระบบท่อส่งจ่ายอากาศและนำอากาศร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ให้กับแหล่งที่ต้องการใช้ความร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ประเภทระบายความร้อนด้วยน้ำ

โดยปกติจะมีการระบายความร้อนชุดอินเตอร์คูลเลอร์ Aftercooler และกระบอกสูบด้วยน้ำหล่อเย็นหมุนเวียนจากภายนอก หลังจากระบายความร้อนแล้วน้ำหล่อเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งใช้เป็นน้ำร้อนป้อนให้กับหม้อไอน้ำได้

2. เครื่องอัดอากาศแบบแรงเหวี่ยงหรือเทอร์โบ เครื่องอัดอากาศชนิดนี้เกือบทั้งหมดจะระบายความร้อนด้วยน้ำ และอัดอากาศ 2, 3 หรือ 4 ขั้นตอน ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างน้ำหล่อเย็นที่ผ่านการระบายความร้อนแล้วกับน้ำปกติ ซึ่งจะทำให้น้ำปกติมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำเป็นน้ำร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิต และสามารถทำเป็นน้ำป้อนให้หม้อไอน้ำได้ การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่จากน้ำระบายความร้อน ต้องไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเบี่ยงเบนจากค่าการออกแบบ เพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและการควบคุมของเครื่องอัดอากาศ ดังนั้นจึงควรปรึกษากับผู้ผลิตก่อนใช้ระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

ความดันอากาศอัดที่ต้องการ เครื่องมือและอุปกรณ์ของอากาศอัดส่วนใหญ่สามารถทำงานที่ระดับความดัน 6.3 บาร์หรือ 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การออกแบบการส่งจ่ายอากาศอัดที่ดีจะมีความดันลดลงประมาณ 0.7 บาร์ หรือ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ณ จุดที่ไกลที่สุดของการส่งจ่าย ซึ่งหมายความว่า ความดันที่ผลิตต่ำสุดของเครื่องอัดอากาศควรจะอยู่ที่ 7 บาร์ หรือ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

การทำงานของระบบที่ไม่จำเป็นต่อการผลิตอากาศที่มีความดันสูงจะเป็นสาเหตุทำให้ต้องใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น อุปกรณ์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการทำงานในสภาวะที่การส่งจ่ายอากาศอัดมีความดันสูงเกินความต้องการ สามารถประหยัดพลังงานได้ด้วยการติดตั้งเครื่องควบคุมความดันเพื่อรักษาระดับการส่งจ่ายให้มีความดันต่ำที่สุดเท่าที่จำเป็นได้ และยังสามารถลดการสูญเสียเนื่องจากการรั่วไหลภายในระบบได้อีกด้วย

ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการส่งจ่ายอากาศอัดที่มีความดันสูงปริมาณมากๆ ไปยังอุปกรณ์ที่ใช้อากาศอัดที่มีขนาดเล็ก แต่ควรพิจารณาการติดตั้งเครื่องอัดอากาศขนาดเล็กเพิ่มเติมแทนให้กับอุปกรณ์นั้นๆ

2.7.2 หม้อน้ำ (boiler)

หม้อน้ำเป็นแหล่งที่ปล่อยแก๊สไอเสียที่มีอุณหภูมิสูง หม้อน้ำขนาดใหญ่จะประกอบด้วยเครื่องอุ่นอากาศ (air preheater) ซึ่งนำความร้อนจากแก๊สไอเสียที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยการอุ่นอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้ หรือใช้เครื่องอุ่นน้ำป้อน (economizer) ซึ่งนำความร้อนจากแก๊สไอเสียที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ให้มาโดยการอุ่นน้ำป้อน และการใช้เครื่องอุ่นน้ำแบบกลั่นตัว (condensing economizer) มากขึ้นเพื่อดึงเอาความร้อนแฝงของแก๊สไอเสียมาใช้ แก๊สที่ปล่อยออกก็จะมีอุณหภูมิต่ำลง

เอกสารนี้ ... การค้า
ไม่ว่ากรณี ... ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การไหลของของไหลในท่อ [วิศิษฏ์ จาตุรมาน และขวัญชัย สินทิพย์สมบูรณ์ (2544)]

การไหลของของไหลในท่อแบ่งเป็น 3 แบบ ได้แก่

การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) มีเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number: $N_R$) $\leq 2{,}000$

การไหลแบบราบเรียบกึ่งปั่นป่วน (transition flow) มีค่า $N_R$ ระหว่าง 2,000 ถึง 4,000

การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) มีค่า $N_R \geq 4{,}000$

การไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนนี้เป็นผลมาจากแรงเฉื่อย (inertial forces) และแรงที่เกิดจากความหนืด (viscous forces) โดยได้แสดงความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อยและแรงที่เกิดจากความหนืดไว้ เรียกว่า เลขเรย์โนลด์

สามารถเขียนสมการการไหลในท่อกลมกับเลขเรย์โนลด์ ดังสมการที่ (2.2)

$$N_R = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \qquad (2.2)$$

เมื่อ $N_R$ คือ เลขเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นตัวเลขไร้หน่วย

$\rho$ คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

V คือ ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (เมตร)

$\nu$ คือ ค่าความหนืดไคเนมาติกของของไหล (ตารางเมตร/วินาที)

$\mu$ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (ปาสคาล-วินาที)

การวัดอัตราการไหลชิงมวลของกระแสในกระบวนการซึ่งไม่ได้ติดตั้งมาตรวัดนั้น โดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการวัดความเร็วของของไหลในท่อน้ำหรือท่อลม ตามหลักวิชาขั้นพื้นฐานจะเป็นการบันทึกค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลและคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลจากพื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำหรือท่อลมและจากความหนาแน่นของของไหลนั้น

วิธีการวัดการไหลของแก๊สที่ถูกต้องแม่นยำมากที่สุดที่เป็นไปได้ คือการสร้างรูปโครงร่างของความเร็ว (velocity profile) ของท่อลม (หรือท่อน้ำ) โดยการใช้ท่อพิทอต (pitot tube) และมาโนมิเตอร์ (manometer) ซึ่งใช้หลักการตามมาตรฐาน BS 1042 ทางเลือกอื่นคือการใช้เครื่องวัดอัตราความเร็วของลมแบบใบกังหันและแบบเส้นลวดร้อน (vane and hot-wire anemometers) ซึ่งใช้งานได้สะดวกมาก สามารถอ่านค่าความเร็วได้ทันที แต่มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ห้ามใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C เพราะความคลาดเคลื่อนในการวัดการไหลของแก๊สมักเกิดขึ้นจาก

- การบันทึกหรือการเปลี่ยนแปลงความหมายผิดพลาดจากรูปโครงร่างของความเร็ว

- การแปลงค่าจากแรงดันความเร็ว (velocity pressure) ไปเป็นความเร็วไม่ถูกต้อง เนื่องจากการแก้ไขค่าความหนาแน่นไม่ถูกต้อง

- แปลงค่าจากการไหลเชิงปริมาตรเป็นการไหลเชิงมวลไม่ถูกต้องเนื่องจากใช้ค่าความหนาแน่นไม่ถูกต้อง

ผลกระทบของค่าความหนาแน่นมักพบเป็นประจำโดยเฉพาะในแก๊สไอเสียที่มีความชื้นที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการผลิต เช่น เครื่องอบ เตาอบ สามารถทำให้เกิดความแตกต่างกันอย่างมากในการคำนวณค่าการไหลเชิงมวล ความหนาแน่นของแก๊สไอเสียในกรณีเหล่านี้มักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งหรือหนึ่งในสามของอากาศภายนอกที่เข้าสู่ระบบ

อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สไอเสีย คำนวณได้ดังสมการที่ (2.3)

อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สไอเสีย = อัตราการไหลของเชื้อเพลิง + อัตราส่วนอากาศตามทฤษฎี + ปริมาณอากาศส่วนเกิน (2.3)

**หมายเหตุ** ปริมาณอากาศส่วนเกินอาจไม่ใช่อากาศทั้งหมดที่ไหลผ่านหัวเผา อาจมีการรั่วไหลเข้าสู่ระบบ

## 2.9 เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน [เอกสารบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด]

2.9.1 แผนผังแสดงสาเหตุและผล (cause and effect diagram) หรือผังก้างปลา (fishbone diagram)

แผนผังแสดงสาเหตุและผล เป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ (possible causes) ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น

- วิธีการสร้างแผนผังแสดงสาเหตุและผลหรือผังก้างปลา

สิ่งสำคัญในการสร้างแผนผัง คือ ทำเป็นทีม เป็นกลุ่ม โดยใช้ขั้นตอน 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

(ก) กำหนดประโยคปัญหาที่หัวปลา

(ข) กำหนดกลุ่มปัจจัยที่จะทำให้เกิดปัญหานั้นๆ

(ค) ระดมสมองเพื่อหาสาเหตุในแต่ละปัจจัย

(ง) หาสาเหตุหลักของปัญหา

(จ) จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ

(ฉ) ใช้แนวทางการปรับปรุงที่จำเป็น

- การกำหนดปัจจัยบนแผนผังแสดงสาเหตุและผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การกำหนดกลุ่มปัจจัย สามารถกำหนดปัจจัยอะไรก็ได้ แต่ต้องมั่นใจว่ากลุ่มที่เรากำหนดไว้เป็นปัจจัยนั้น สามารถที่จะช่วยให้แยกแยะและกำหนดสาเหตุต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเป็นเหตุเป็นผลส่วนมากมักจะใช้หลักการ 4M 1E เป็นกลุ่มปัจจัย เพื่อจะนำไปสู่การแยกแยะสาเหตุต่างๆ ซึ่ง 4M 1E นี้มาจาก

(ก) M - Man คนงาน หรือพนักงาน หรือบุคลากร

(ข) M - Machine เครื่องจักรหรืออุปกรณ์

(ค) M - Material วัตถุดิบหรืออะไหล่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ

(ง) M - Method กระบวนการทำงาน

(จ) E - Environment อากาศ สถานที่ ความสว่าง และบรรยากาศการทำงาน

ปัญหาและผลลัพธ์จะแสดงอยู่ที่หัวปลา ส่วนสาเหตุและปัจจัยที่กระทบต่อหัวปลาจะเขียนไว้ในก้างปลาแต่ละก้างและมีก้างรองเป็นสาเหตุของก้างหลัก

- ข้อดีและข้อเสียของแผนผังแสดงสาเหตุและผล

(ก) ข้อดี คือไม่ต้องเสียเวลาแยกความคิดต่าง ๆ ที่กระจัดกระจายของแต่ละสมาชิก แผนผังแสดงสาเหตุและผลจะช่วยรวบรวมความคิดของสมาชิกในกลุ่ม และทราบสาเหตุหลักๆ และสาเหตุย่อยๆ ของปัญหา ทำให้ทราบสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา และสามารถหาวิธีการแก้ปัญหาได้ถูกวิธี

(ข) ข้อเสีย คือ ความคิดไม่อิสระเนื่องจากมีแผนภูมิเป็นตัวกำหนด ซึ่งความคิดของสมาชิกในกลุ่มจะมารวมอยู่ที่แผนผังแสดงสาเหตุและผล และต้องอาศัยผู้ที่มีความสามารถและประสบการณ์สูง จึงจะสามารถใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผลในการระดมความคิดได้เป็นอย่างดี

2.9.2 โปรแกรมมินิแทป

สำหรับการปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบจะมีการทำงานอย่างเป็นระบบในการสืบค้นตัวแปรในกระบวนการ (process variables) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (product variables) หลังจากที่ทำการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แล้ว จึงจะสามารถทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และ ประสิทธิภาพ เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพ

โปรแกรมมินิแทปเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะคำนวณและแสดงค่าสถิติต่างๆ ของแต่ละคอลัมน์หรือแต่ละตัวแปร สามารถวิเคราะห์และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ได้จากหน้าจอหลัก ประกอบด้วย 3 หน้าต่าง คือ

- หน้าต่าง Worksheet สำหรับนำเข้า บันทึกและแสดงข้อมูลที่จะวิเคราะห์
- หน้าต่าง Session สำหรับแสดงผลลัพธ์ (output) ตารางสถิติจากการวิเคราะห์ข้อมูล
- หน้าต่าง Project Manager สำหรับเก็บข้อมูลและจัดการข้อมูลต่าง ๆ ในระหว่างการ

วิเคราะห์ ข้อมูล ซึ่งกระบวนการจัดเก็บคำสั่งโปรแกรม Minitab ในระหว่างการประมวลผลจะเป็นฟังก์ชันส่วนหนึ่งใน Project Manager

## 2.10 World Class Manufacturing (WCM) [จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์ (2553)]

World Class Manufacturing คือ หลักปฏิบัติที่จะทำให้บริษัทมุ่งไปสู่การเป็นผู้ผลิตระดับโลก โดยนำหลักการของ Total Productivity Maintenance (TPM) คือ กิจกรรมที่ทุกคนทั้งองค์กรจะต้องร่วมกันทำเพื่อลดการสูญเสีย กำจัดความสูญเปล่า เพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมขององค์กร และการลดความสูญเสีย โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการผลิตไปสู่ขีดกำจัดสูงสุด

การทำ TPM มี 8 ขั้นตอน หรือเรียกว่า 8 เสาหลักของ TPM ประกอบด้วย

- การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (focus improvement)

การปรับปรุงเฉพาะเรื่องมีจุดมุ่งหมายที่จะเลือกเรื่องที่เป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดความสูญเสียและอุปสรรคในการดูแลรักษาเครื่องจักรมาทำการแก้ไข โดยสมาชิกกลุ่มย่อยและจัดตั้งทีมงานเพื่อช่วยแก้ไขให้สำเร็จเป็นเรื่องๆ

- การบำรุงรักษาด้วยตนเอง (autonomous maintenance)

การบำรุงรักษาด้วยตัวเองมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาพนักงานดูแลเครื่องจักรให้มีทักษะที่สามารถดูแลรักษาเครื่องจักรได้ด้วยตนเอง

- การวางแผนการบำรุงรักษา (planned maintenance)

การวางแผนการบำรุงรักษา มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาระบบซ่อมบำรุงให้มีประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงทักษะการซ่อมบำรุง วิเคราะห์ข้อมูลเครื่องจักร และนำเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาเครื่องจักร เพื่อยืดอายุการใช้งาน ลดต้นทุนในการดูแลรักษาเครื่องจักร และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไร้ตำหนิ อันเป็นผลจากการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ปราศจากปัญหา

- การศึกษาและฝึกอบรม (training and education)

การศึกษาและฝึกอบรมมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาทักษะในการเดินเครื่องจักรของพนักงานให้มีความชำนาญและดูแลรักษาอย่างถูกวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การบำรุงรักษาเชิงคุณภาพ (quality maintenance)

การบำรุงรักษาเชิงคุณภาพมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะไม่ให้สินค้ามีจุดบกพร่องออกจากกระบวนการผลิต หรือต้องการให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงสุดด้วยระบบการผลิตที่ควบคุมการทำงานได้ถูกต้องตามมาตรฐาน

- การควบคุมตั้งแต่เริ่มต้น (initial control)

การควบคุมตั้งแต่เริ่มต้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เครื่องจักรที่ติดตั้งใหม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลต่างๆ จากการใช้และดูแลเครื่องจักรที่มีปัญหาก่อนหน้านั้นมาใช้ปรับปรุงหรือพัฒนาเพื่อลดปัญหา และการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

- ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (safety and environment)

ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดอุบัติเหตุให้เป็นศูนย์โดยเน้นการสร้างสถานที่ทำงานที่มีความปลอดภัย รวมทั้งสภาพแวดล้อมโดยรอบไม่ให้ถูกกระทบจากกระบวนการทำงานเครื่องจักร

- การเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงาน (efficient administration)

การเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของฝ่ายสนับสนุนที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการผลิตโดยตรง เพื่อส่งเสริมให้ฝ่ายผลิตมีความคล่องตัวมากขึ้น โดยนำ 5 ส. ได้แก่ สะสาง สะดวก สะอาด สุขลักษณะ สร้างนิสัย มาใช้เป็นพื้นฐานสำคัญในการทำความสะอาดเครื่องจักรและจัดสถานที่ทำงานให้เป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# วิธีดำเนินงาน

## 3.1 ศึกษากระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

3.1.1 ศึกษาขั้นตอนในกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน ได้แก่ การผสมสเลอรี่ การผลิตผงพื้นฐาน และการบรรจุผงซักฟอกสูตรมาตรฐานเพื่อทำแผนภาพกระบวนการผลิต (process mapping)

3.1.2 ศึกษาหน้าที่และการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และเครื่องอัดอากาศ

## 3.2 เขียนแผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

พิจารณาอินพุตและเอาท์พุตของแต่ละขั้นตอนย่อย

## 3.3 วิเคราะห์ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงาน

เก็บข้อมูลการใช้แก๊สธรรมชาติที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนผสมระหว่างอากาศจากบรรยากาศกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงานที่บันทึกไว้ในระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) โดยกำหนดให้ภาวะปฏิบัติงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อไปนี้คงที่ อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง (อัตราการฉีดสเลอรี่ปกติ 25-27 ตัน/ชั่วโมง) ค่าแรงดันหัวฉีดที่ 50 บาร์ และอัตราการไหลรวมของอากาศร้อน 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นของผงพื้นฐานจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ตามข้อกำหนดเฉพาะด้านคุณภาพ (ถ้าใช้แรงดันของหัวฉีดต่ำ ผงพื้นฐานที่ได้จะมีขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง และประสิทธิภาพการซักล้างของผงซักฟอกลดลง นอกจากนี้เมื่อผงพื้นฐานมีขนาดใหญ่ ความหนาแน่นรวมของผงซักฟอกจะต่ำ ดังนั้นอาจไม่สามารถบรรจุผงซักฟอกลงบรรจุภัณฑ์ได้)

## 3.4 วิเคราะห์ปัจจัยหรือตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อการลดการใช้แก๊สธรรมชาติ

3.4.1 หาปัจจัยหรือตัวแปรปฏิบัติการที่คาดว่ามีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

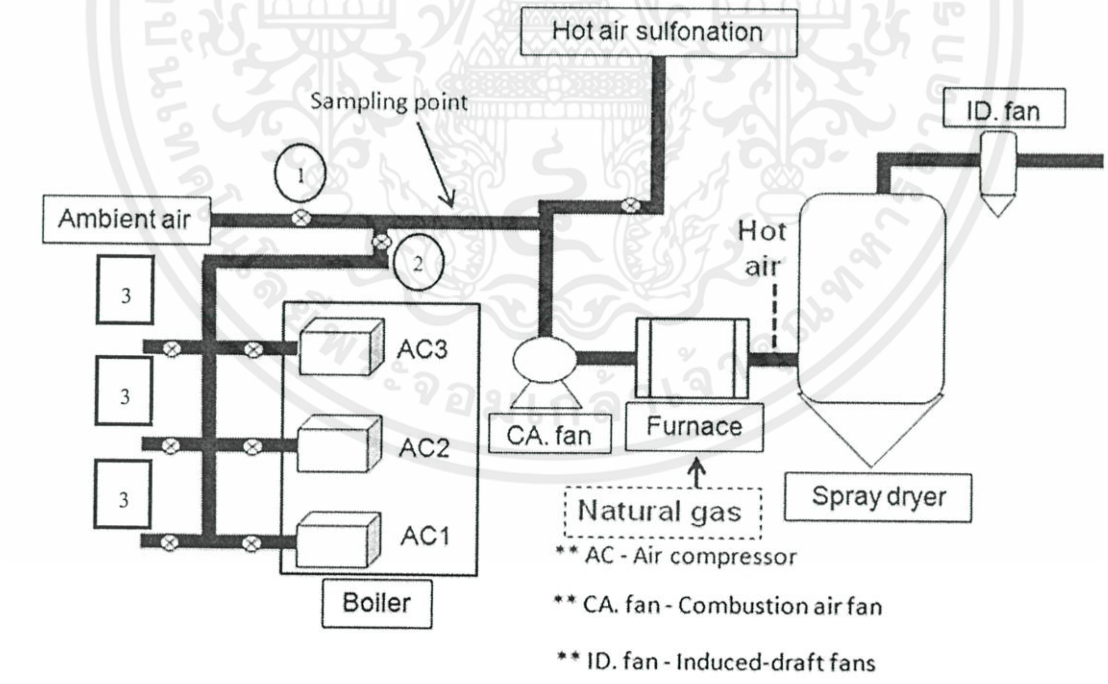
3.4.2 วิเคราะห์ผลของปัจจัยหรือตัวแปรปฏิบัติการต่อการใช้แก๊สธรรมชาติโดยใช้โปรแกรมมินิแทป R. 15 เพื่อหาแนวทางการลดการใช้แก๊สธรรมชาติที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

3.4.3 ทดสอบแนวทางการลดการใช้แก๊สธรรมชาติที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เตาเผาอากาศร้อนแทนอากาศจากบรรยากาศ

## 3.5 การสร้างสมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA

เนื่องจากระบบ SCADA ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต ไม่มีสมการประมวลอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง (โครงการนี้ใช้เครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง เนื่องจากเป็นสภาวะปกติของการเดินเครื่องอัดอากาศของโรงงาน) ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงวิธีปฏิบัติงานที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนทิ้งจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เตาเผาอากาศร้อนแทนอากาศจากบรรยากาศเพื่อลดการใช้แก๊สธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องสร้างสมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA ดังนี้

3.5.1 ปิดวาล์วรับอากาศจากบรรยากาศ (หมายเลข 1) และเปิดวาล์วรับอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง (หมายเลข 2) แทน โดยใช้พัดลมดูดอากาศขาเข้าดูดอากาศร้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และใช้แก๊สธรรมชาติเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนให้ถึงค่าปฏิบัติการที่เตาเผา ดังรูปที่ 3.1



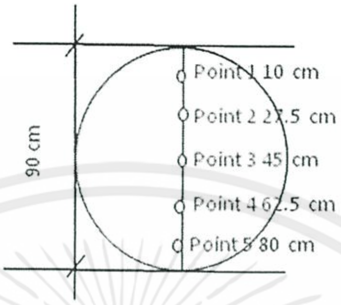

**รูปที่ 3.1** แผนผังการนำอากาศร้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ [illegible] ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หมายเหตุ** CA.fan คือ พัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

ID. fan คือ พัดลมดูดอากาศขาออกเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

3.5.2 ทดลองปรับภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (% combustion air fan: % CA. fan) ในระบบ SCADA ดูดอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศและอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน จากนั้นวัดความเร็วของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศตามตำแหน่ง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.2 เพื่อนำมาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ เนื่องจากอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศมีการไหลแบบปั่นป่วน ($N_R > 4000$)




**รูปที่ 3.2** ระยะที่ใช้วัดความเร็วของอากาศร้อนในท่อ

3.5.3 สร้างสมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA โดยใช้โปรแกรมมินิแทป ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่อ่านได้จากระบบ SCADA และอุณหภูมิของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันก่อนเข้าเตาเผาที่อ่านได้จากระบบ SCADA

3.5.4 ทดสอบความถูกต้องของสมการปรับแก้ค่าอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่ได้

## 3.6 แก้ไขความถูกต้องในการแสดงอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA

เพิ่มสมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศเข้าในระบบ SCADA เพื่อความถูกต้องในการประมวลอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่อ่านค่าได้จากระบบ SCADA

## 3.7 วิเคราะห์การใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน

คำนวณปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติหลังการดำเนินงาน (กรณีที่ใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง ผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน) เปรียบเทียบกับก่อนการดำเนินงานกรณีที่ใช้อากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน และตรวจสอบความชื้นของผงพื้นฐานที่อ่านค่าได้จากระบบ SCADA ให้อยู่ในข้อกำหนดคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

## 4.1 แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

**ตารางที่ 4.1** แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

| ขั้นตอนการผลิต | อินพุต | เอาท์พุต | การควบคุม |
|---|---|---|---|
| 1. ถังเก็บวัตถุดิบ | น้ำ NaOH, LAS วัตถุดิบชนิดที่ 4, 5, 6, 7, 8, 9 | | อุณหภูมิ 60-70 °C |
| 2. การผสมสเลอรี่<br>2.1 ชั่งน้ำหนัก | วัตถุดิบจากถังเก็บ | น้ำหนักวัตถุดิบตามสูตร | |
| 2.2 ชั่งน้ำแล้วเติมลงถังผสม | น้ำ | | อุณหภูมิ50-65 °C |
| 2.3 ชั่ง NaOH แล้วเติมลงถังผสม | NaOH | | หลังเติม NaOH อุณหภูมิ 62-67 °C |
| 2.4 ชั่ง LAS แล้วเติมลงถังผสม | LAS | | รอ 120 s เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสะเทิน |
| 2.5 ชั่งวัตถุดิบชนิดที่ 4, 5 แล้วเติมลงถังผสม | วัตถุดิบชนิดที่ 4, 5 | | ความเร็วรอบของใบกวน 65 rpm |
| 2.6 ชั่งวัตถุดิบชนิดที่ 6, 7 แล้วเติมลงถังผสม | วัตถุดิบชนิดที่ 6, 7 | | |
| 2.7 ชั่งวัตถุดิบชนิดที่ 8 แล้วเติมลงถังผสม | วัตถุดิบชนิดที่ 8 | | รอ 60 s เพื่อให้สเลอรี่ผสมเข้ากัน |
| 2.8 ชั่งวัตถุดิบชนิดที่ 9 แล้วเติมลงถังผสม | วัตถุดิบชนิดที่ 9 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน (ต่อ)

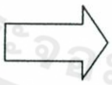
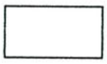
| ขั้นตอนการผลิต | อินพุต | เอาท์พุต | การควบคุม |
|---|---|---|---|
| 2.9 การผสมสเลอรี่ | | สเลอรี่ที่ผ่านการผสมแล้ว | รอการผสมสเลอรี่ 120 s ความเร็วรอบของใบกวน 50 rpm |
| 2.10 ปล่อยสเลอรี่ลงถังพักสเลอรี่ | สเลอรี่ | | อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 70 °C |
| 3. เครื่องกรองสเลอรี่ | สเลอรี่จากถังพัก | | เส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร |
| 4. เครื่องกำจัดอากาศ | สเลอรี่ | สเลอรี่ที่มีความหนาแน่นรวมต่ำลง | ความดันสุญญากาศ -900 mbar |
| 5. ถังพัก | สเลอรี่ | สเลอรี่ | อุณหภูมิ 60-70 °C |
| 6. เครื่องกรองแม่เหล็ก | สเลอรี่ | สเลอรี่ที่ผ่านการกรองแล้ว | |
| 7. Reitz mill | สเลอรี่ | สเลอรี่ | |
| 8. ปั๊มความดันต่ำ | สเลอรี่ | สเลอรี่ที่มีความดันต่ำ | ความดัน 4-5 bar |
| 9. ปั๊มความดันสูง | สเลอรี่ที่มีความดันต่ำ | สเลอรี่ที่มีความดันสูง | ความดัน 45-55 bar |
| 10. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย | สเลอรี่ที่มีความชื้นสูง | ผงพื้นฐาน | อุณหภูมิ 350-400 °C อัตราการไหลของอากาศร้อน 6,500-7,000 kg/h ความดัน -8 mm$H_2O$ |
| 11. การเติมซีโอไลต์ | ซีโอไลต์ | ผงพื้นฐานที่มีซีโอไลต์ | เติมซีโอไลต์ 3.5 wt% ของผงพื้นฐาน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** แผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน (ต่อ)

| ขั้นตอนการผลิต | อินพุต | เอาท์พุต | การควบคุม |
|---|---|---|---|
| 12. การลำเลียงผงพื้นฐานด้วยอากาศ | ผงพื้นฐาน | ผงพื้นฐานที่มีอุณหภูมิลดลง | อัตราการไหลของอากาศ 50,000-55,000 $m^3/h$ |
| 13. ไซโล | ผงพื้นฐาน | ผงพื้นฐาน | ปริมาณ 45 ton |
| 14. ฮอปเปอร์ (hopper) | ผงพื้นฐาน | ผงพื้นฐาน | ปริมาณ 8 ton |
| 15. การเติมสารเติมแต่งแล้วปล่อยลงสู่สายพาน | สารเติมแต่งต่างๆ | ผงซักฟอก | |
| 16. เครื่องผสม | ผงซักฟอก | ผงซักฟอก | |
| 17. Mass flow hopper | ผงซักฟอก | ผงซักฟอก | ปริมาณ 1.5 ton |
| 18. การบรรจุ | ผงซักฟอก | ผงซักฟอกแต่ละสูตร | |

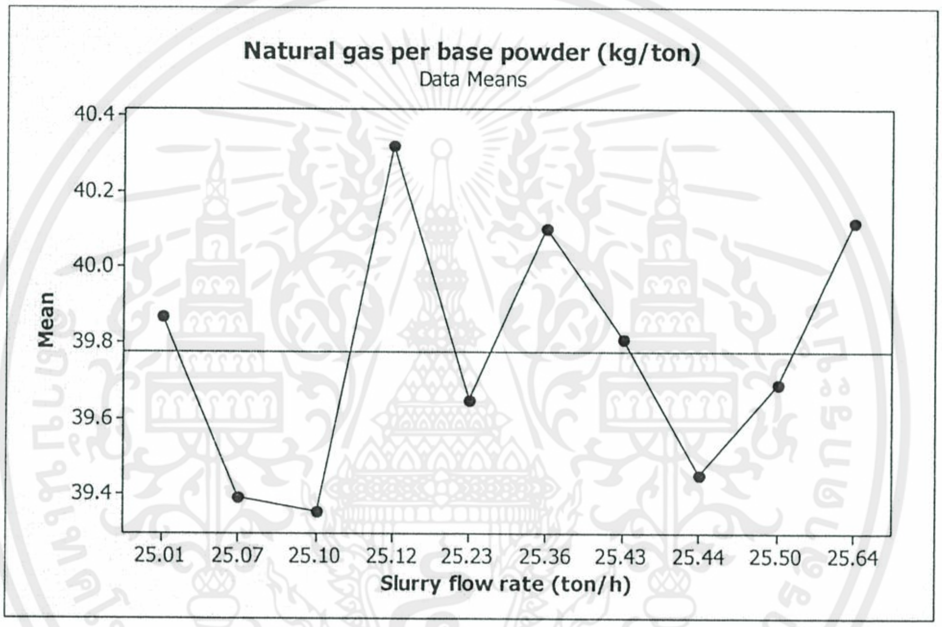
**ตารางที่ 4.2** ความหมายของสัญลักษณ์จากแผนภาพกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน

| สัญลักษณ์ | ความหมาย |
|---|---|
| Storage | กระบวนการที่อยู่กับที่ หรือการเก็บรักษา |
| Transportation  | การเคลื่อนย้ายไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยไม่เปลี่ยนสภาพ |
| Delay | กระบวนการที่หยุดรอคอยกระบวนการอื่น จึงเป็นกระบวนการที่ไม่ทำให้เกิดมูลค่า |
| Operation  | กระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีมูลค่า |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนดำเนินงาน

รูปที่ 4.1 แสดงข้อมูลการผลิตผงพื้นฐานก่อนการดำเนินงานจากระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) (กรณีที่ใช้อากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน) ที่อัตราการฉีดสเลอรี่ปกติที่ 25 ตัน/ชั่วโมง ใช้ค่าแรงดันหัวฉีดที่ 50 บาร์ อัตราการไหลรวมของอากาศร้อน 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง และควบคุมความชื้นของผงพื้นฐาน 2-4 % โดยน้ำหนัก เมื่อพล็อตด้วยโปรแกรมมินิแทป พบว่าปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ยก่อนการดำเนินงาน 39.78 กิโลกรัม/ตันของผงพื้นฐาน หรือเป็นมูลค่า 40.7 ล้านบาท/ปี การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.3




**รูปที่ 4.1** การใช้แก๊สธรรมชาติก่อนการดำเนินงานที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง

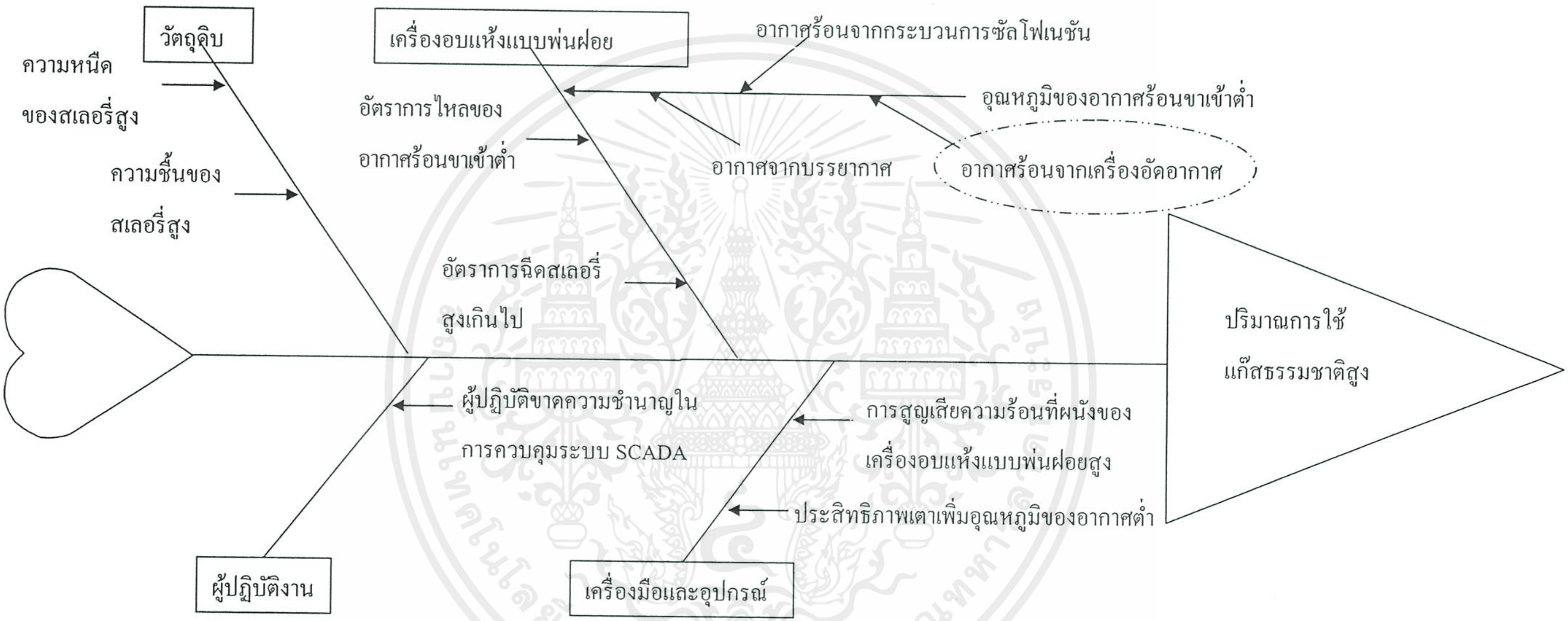
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

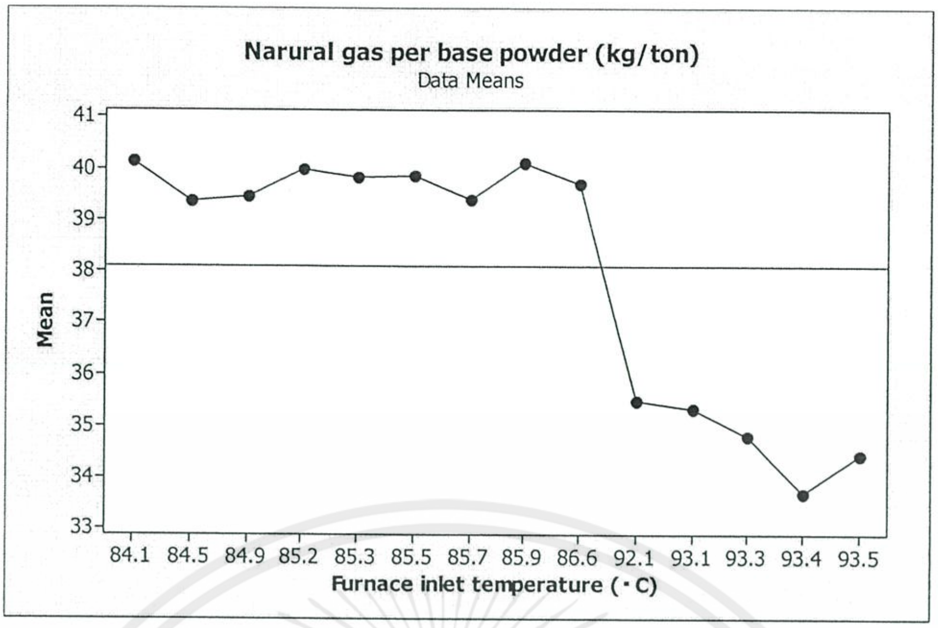
จากทฤษฎีแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ดังนั้นจากรูปที่ 4.2 ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อการลดปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติที่เลือกพิจารณา คือ การใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ (ประเภทระบายความร้อนด้วยอากาศ) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 100-120 องศาเซลเซียส แทนการใช้ความร้อนทิ้งแบบเดิมคือใช้อากาศจากบรรยากาศร่วมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

วิเคราะห์ตัวแปรปฏิบัติการที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติในการผลิตผงพื้นฐานและสามารถปรับค่าได้ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่เข้าเตาเผาอากาศร้อนที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (รูปที่ 4.3) และอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (รูปที่ 4.4) จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนที่เข้าเตาเผาอากาศร้อนเพิ่มขึ้น แก๊สธรรมชาติที่ใช้จะลดลง ในงานวิจัยนี้จึงใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศแทนอากาศจากบรรยากาศ เพราะทำให้อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสูงกว่า จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติแปรผันกับอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการฉีดสเลอรี่ปกติ ดังนั้นเพื่อให้ความชื้นของผงพื้นฐานได้ตามข้อกำหนดเฉพาะด้านคุณภาพ (ตรวจสอบค่าได้จากระบบ SCADA) จึงต้องใช้อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคงที่ที่ 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง

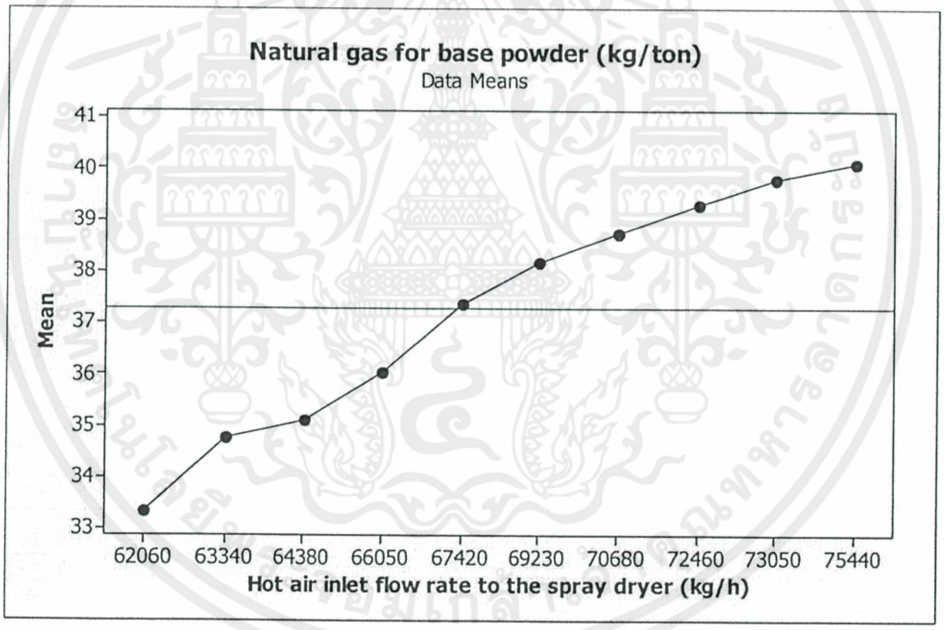
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.2** ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย




**รูปที่ 4.3** อุณหภูมิของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผาต่อการใช้แก๊สธรรมชาติ




**รูปที่ 4.4** อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อการใช้แก๊สธรรมชาติ

## 4.4 สมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA

โดยปกติในการอบแห้งสเลอรี่อากาศจากบรรยากาศจะถูกผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันก่อนส่งเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย หลังจากนั้นจึงใช้แก๊สธรรมชาติเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนนี้ให้สูงขึ้นถึงค่าปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้

พลังงาน โครงการนี้ได้เปลี่ยนใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศแทนอากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน และทดลองฉีดสเลอรี่ที่อัตราการฉีดปกติ 25 ตัน/ชั่วโมง ปรับอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคงที่ที่ 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง พบว่าค่าภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออก (% Induced-draft fans: % ID. fans) จากการใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศแทนอากาศจากบรรยากาศที่อ่านได้จากระบบ SCADA มีค่า 90 % ซึ่งมากกว่าค่าภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกแบบเดิมที่ใช้อากาศจากบรรยากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 74.39 % รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.3 ข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 และ ข.3

**ตารางที่ 4.3** เปรียบเทียบการใช้อากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ (I) แทนอากาศจากบรรยากาศ (II) ผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน (III)

| **อากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย** | **อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้าที่อ่านได้จากระบบ SCADA (kg/h)** | **ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเฉลี่ย (%)** | **ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกเฉลี่ย (%)** |
|---|---|---|---|
| I + III | 70,308 | 79.31 | 90.00 |
| II + III | 70,174 | 79.64 | 74.39 |

จากหลักการสมดุลมวลสารที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี

มวลสารเข้าระบบ = มวลสารออกจากระบบ + มวลสารที่สะสมในระบบ

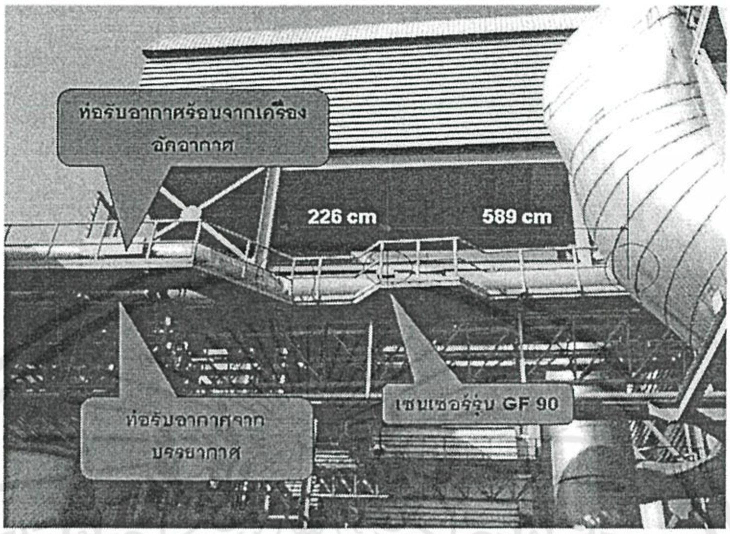
เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยไม่มีการสะสมมวลสารในระบบ ดังนั้น

มวลสารเข้าระบบ = มวลสารออกจากระบบ (4.1)

จากตารางที่ 4.3 และสมการที่ (4.1) แสดงว่าอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันต้องมีค่ามากกว่าการใช้อากาศร้อนจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน จากการศึกษาเป็นผลมาจากตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์รุ่น GF 90 ปกติเซนเซอร์นี้ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศร้อนจากบรรยากาศ เนื่องจากมีพื้นที่ในการปฏิบัติงานจำกัดที่จะติดตั้งเซนเซอร์เพิ่มดังรูปที่ 4.5 บริษัทจึงจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์ตัวเดียวกันนี้ในการวัดอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง และจากคู่มือการติดตั้งเซนเซอร์รุ่น GF 90 เพื่อให้ผลของการวัดอัตราการไหลถูกต้อง จึงติดตั้งเซนเซอร์ตามระยะที่กำหนดคือระยะของท่อตรงต้องมีระยะทางของ Upstream และ Downstream 20 และ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตามลำดับ แต่เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น ตลอดทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะ Upstream และ Downstream ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศนั้นไม่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว อัตราการไหลที่อ่านได้จากระบบ SCADA จึงผิดพลาด ซึ่งจะต้องสร้างสมการปรับแก้สำหรับคำนวณอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศในระบบ SCADA




**รูปที่ 4.5** ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์รุ่น GF 90 เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศ

จากนั้นเก็บข้อมูลค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย แล้วนำข้อมูลค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ดังตารางที่ ข.4 มาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้กับอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่อ่านค่าจากระบบ SCADA และอุณหภูมิของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผาโดยใช้โปรแกรมมินิแทป (ถ้าอุณหภูมิของอากาศร้อนสูงความหนาแน่นของอากาศร้อนจะต่ำ ทำให้อัตราการไหลของอากาศร้อนต่ำ) ผลวิเคราะห์การถดถอยจากโปรแกรมมินิแทปแสดงดังรูปที่ 4.6 และได้สมการปรับแก้ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.2)

**Regression Analysis: Y versus X1, X2**

```
The regression equation is
Y = - 3098 + 2.38 X1 + 24.1 X2


Predictor    Coef  SE Coef      T      P
Constant    -3098     3500  -0.89  0.383
X1         2.3766   0.1010  23.53  0.000
X2          24.11    24.72   0.98  0.337


S = 1064.80   R-Sq = 97.9%   R-Sq(adj) = 97.7%
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.6** การวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรมมินิแทป

$$Y = 2.38X_1 + 24.1X_2 - 3098 \quad (4.2)$$

เมื่อ $Y$ = อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่คำนวณได้

$X_1$ = อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่อ่านจากระบบ SCADA

$X_2$ = อุณหภูมิของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผา

จากตารางที่ 4.3 ข้างต้นทราบแล้วว่าอัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันต้องมีค่ามากกว่า 70,308 กิโลกรัม/ชั่วโมง ที่ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกที่อ่านได้จากระบบ SCADA 90 % ลำดับต่อไปคือหาความแม่นยำของสมการที่ (4.2) โดยทดลองฉีดสเลอรี่ที่อัตราการฉีดปกติ 25 ตัน/ชั่วโมง ใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันแทนการใช้อากาศจากบรรยากาศ จากนั้นปรับลดภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าลงเพื่อให้ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกลดลงโดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่ค่าใกล้เคียงกับค่าภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกเมื่อใช้อากาศจากบรรยากาศซึ่งมีค่า 74.39 % เพราะเป็นค่าภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกที่ทำให้อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อ่านได้จากระบบ SCADA มีค่าประมาณ 70,174 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่อ่านค่าจากระบบ SCADA เท่ากับ 60,200 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.5)

ใช้สมการที่ (4.2) ซึ่งมีค่า $R^2$ เท่ากับ 97.9 % ปรับแก้อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ เพื่อคำนวณอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ค่าที่คำนวณได้คือ 71,279 กิโลกรัม/ชั่วโมง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่กำหนดไว้ที่ 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง แสดงว่าสามารถยอมรับสมการที่ (4.2) ได้โดยมีความคลาดเคลื่อน 1.83 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคงที่ 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง โดยใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

| อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศร้อนขาเข้า (kg/h) | | ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเฉลี่ย (%) | ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกเฉลี่ย (%) |
|---|---|---|---|
| **อ่านค่าจากระบบ SCADA** | **คำนวณจากสมการปรับแก้** | | |
| 60,200 | 71,279 | 64.97 | 74.40 |

**หมายเหตุ** - % CA. fan คือ ค่าภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศก่อนเข้าเตาเผา (100 % CA.fan เท่ากับ 88,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง)

- % ID. fan คือ ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาออกที่ส่วนบนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (100 % ID. fan เท่ากับ 95,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง)

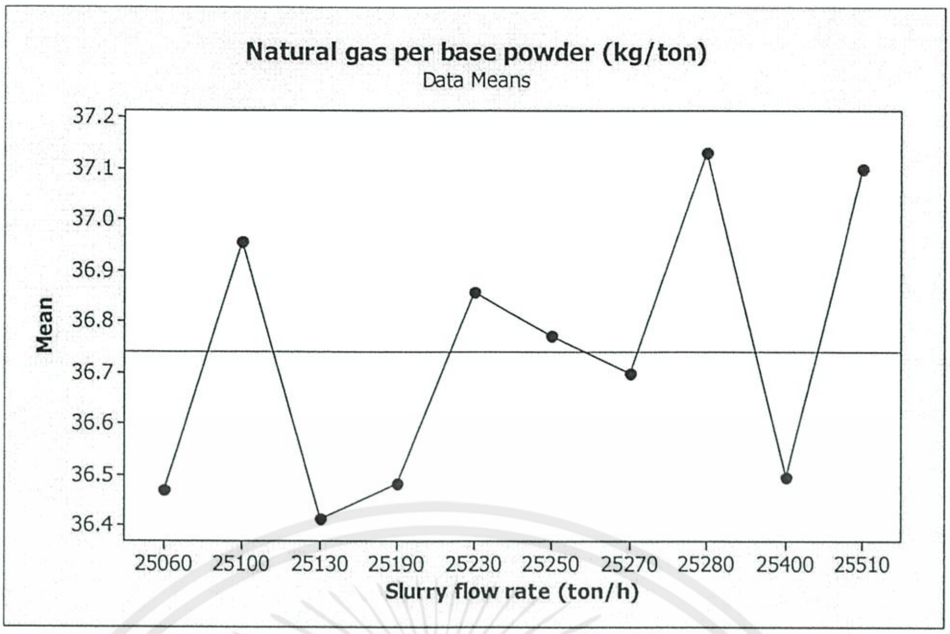
## 4.5 ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน

ปัจจุบันยังไม่ได้เขียนโปรแกรมสำหรับเพิ่มสมการที่ (4.2) ซึ่งจะใช้ปรับแก้อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศลงในระบบ SCADA เพราะต้องทดสอบการใช้ในกระบวนการก่อน ดังนั้นใช้การปรับแก้แบบ Manual

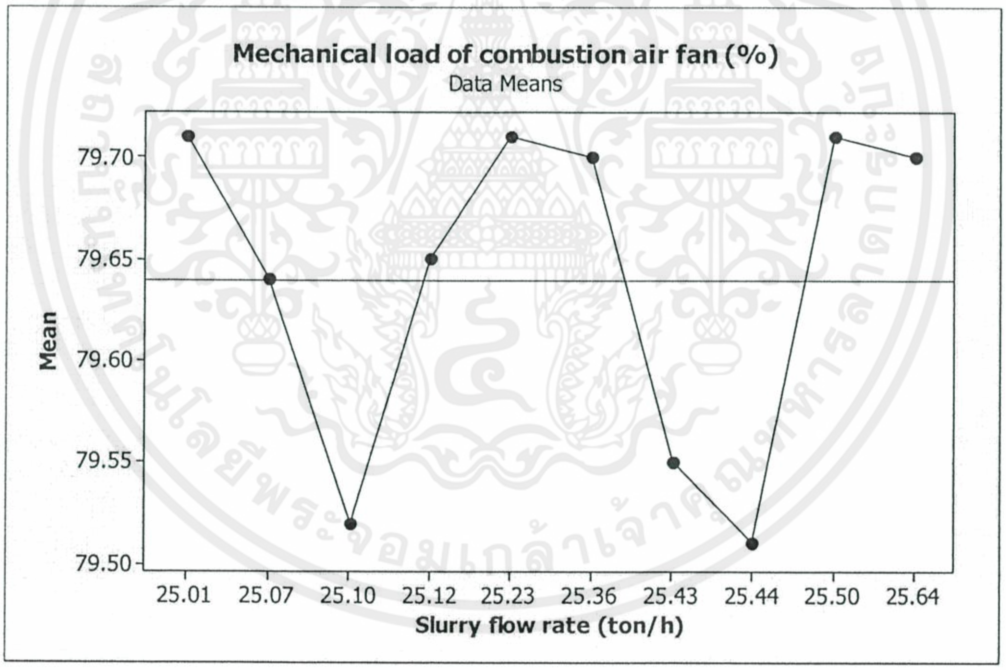
เมื่อใช้อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศแทนอากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง ใช้ค่าแรงดันหัวฉีดที่ 50 บาร์ อัตราการไหลรวมของอากาศร้อน 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง และควบคุมความชื้นของผงพื้นฐาน 2-4 % โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ยหลังการดำเนินงานจากข้อมูลการผลิตผงพื้นฐานที่พล็อตด้วยโปรแกรมมินิแทป เท่ากับ 36.74 กิโลกรัม/ตันของผงพื้นฐาน (รูปที่ 4.7) หรือเป็นมูลค่า 37.6 ล้านบาท/ปี การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.3

นอกจากสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจากการใช้แก๊สธรรมชาติได้แล้ว ยังสามารถลดพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากภาระทางกลของกำลังพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้อีกด้วย รูปที่ 4.8 แสดงภาระทางกลของกำลังพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงาน ค่าเฉลี่ย 79.64 % มูลค่าเทียบเท่า 1.92 ล้านบาท/ปี สำหรับค่าเฉลี่ยภาระทางกลของกำลังพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงานดังรูปที่ 4.9 เท่ากับ 64.97 % มูลค่าเทียบเท่า 1.57 ล้านบาท/ปี มูลค่าภาระทางกลของกำลังพัดลมดูดอากาศที่ลดลงได้ 350,000 บาท/ปี แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค.3

เอกสารนี้...ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

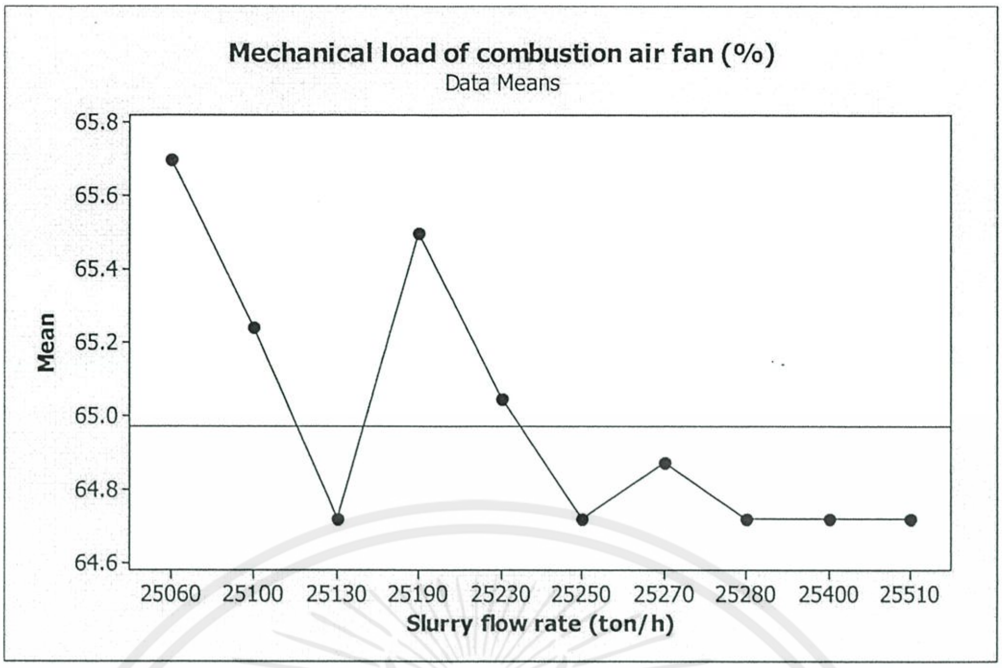



**รูปที่ 4.7** ปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้หลังการดำเนินงานที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง




**รูปที่ 4.8** ภาระของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงานที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.9** ภาระของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงานที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติในกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐานที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย นอกจากอัตราการฉีดสเลอรี่ อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย การใช้อากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันร่วมกับอากาศจากบรรยากาศ จำนวนและตำแหน่งการเปิดหัวฉีดสเลอรี่ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สมมาตรกันแล้ว อัตราการไหลรวมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศร่วมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการใช้แก๊สธรรมชาติที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยอีกด้วย

การใช้อากาศร้อนทิ้งที่ยังมีศักยภาพจากเครื่องอัดอากาศ 2 เครื่อง แทนอากาศจากบรรยากาศผสมร่วมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย สามารถลดต้นทุนค่าพลังงานจากการใช้แก๊สธรรมชาติได้ จากผลการดำเนินงานที่อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ตัน/ชั่วโมง ค่าแรงดันหัวฉีดสูงที่ 50 บาร์ อัตราการไหลรวมของอากาศร้อน 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง และควบคุมความชื้นของผงพื้นฐาน 2-4 % โดยน้ำหนัก ปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เท่ากับ 36.74 กิโลกรัม/ตันของผงพื้นฐาน คิดเป็นมูลค่า 37.6 ล้านบาท/ปี ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติ 39.78 กิโลกรัม/ตันของผงพื้นฐาน มูลค่า 40.7 ล้านบาท/ปี ที่ใช้ก่อนการดำเนินงานในกรณีใช้อากาศจากบรรยากาศผสมกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันสามารถลดต้นทุนค่าพลังงานที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจากปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ลดลงได้ 3.1 ล้านบาท/ปี นอกจากนี้ยังได้ผลพลอยได้จากการลดพลังงานไฟฟ้าที่พัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยอีก 350,000 บาท/ปี

โครงการนี้ใช้อัตราการฉีดสเลอรี่คงที่ที่อัตราการฉีดสเลอรี่ปกติคือ 25 ตัน/ชั่วโมง อัตราการฉีดสเลอรี่ที่เหมาะสม จะทำให้ละอองสเลอรี่จะกระจายตัวดี พื้นที่การสัมผัสระหว่างละอองสเลอรี่กับอากาศร้อนเพิ่มขึ้น และปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติต่อตันของผงพื้นฐานลดลง แต่ถ้าอัตราการฉีดสเลอรี่สูงเกินไป ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติต่อตันของผงพื้นฐานจะสูงขึ้นได้ เพราะต้องใช้แก๊สธรรมชาติในการควบคุมให้ความชื้นของผงพื้นฐานได้ตามข้อกำหนดเฉพาะด้านคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรตรวจสอบท่อพิทอตก่อนการใช้งาน เพื่อความแม่นยำในการวัด

5.2.2 ไม่ควรใช้ท่อพิทอตวัดความเร็วลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เพราะอาจทำให้วัสดุหรือเซนเซอร์ของท่อพิทอตเสียหาย

5.2.3 เพื่อลดความสูญเสียความร้อนของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศจากการผสมของอากาศจากบรรยากาศกับอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ ควรปิดแดมเปอร์ (หมายเลข 3 ดังรูปที่ 3.1) บริเวณช่องระบายความร้อนของเครื่องอัดอากาศ

งานที่ควรศึกษาต่อ เช่น 1) การป้องกันการสูญเสียความร้อนจากเครื่องอัดอากาศโดยหุ้มฉนวนที่ท่อนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ ป้องกันการรั่วของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศและอากาศร้อนจากระบวนการซัลโฟเนชัน 2) การนำอากาศร้อนทิ้งที่ส่วนบนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ยังมีศักยภาพซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส กลับมาใช้เพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และ 3) การปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวของอากาศร้อน โดยทดลองปรับขนาดช่องของแดมเปอร์ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อให้อากาศร้อนที่ใช้อบแห้งสเลอรี่กระจายตัวอย่างทั่วถึง และช่วยลดเวลาและพลังงานในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่ใช้ลมร้อนและมีการทำงานแบบต่อเนื่องนั้น ลักษณะการกระจายตัวของลมร้อนในเครื่องอบแห้งมีบทบาทสำคัญต่อพลังงานที่ใช้และความชื้นในผลิตภัณฑ์ (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ. 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม


กัญจนา บุณยเกียรติ และชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. 2551. **เทคโนโลยีแก๊สธรรมชาติ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 8

กมลา ธรรมรัตนากร และจันทกานต์ พรสายชล. 2555. "**ภาวะปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งสเลอรี่แบบพ่นฝอยในกระบวนการผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐานที่ใช้แก๊สธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพ**." ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. **เทคนิคการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่**. บริษัท ไทยวัฒนาพาณิชย์. 2545. หน้า 20-25

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2545. **การนำความร้อนทิ้งในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่**. บริษัท ไทยวัฒนาพาณิชย์. หน้า 11-14

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2546. **การนำความร้อนทิ้งจากเครื่องอัดอากาศกลับมาใช้ใหม่**. บริษัท ลายเส้น ครีเอชั่น จำกัด. หน้า 9-14

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2546. **การเลือกวิธีการประหยัดพลังงานโดยการควบคุมและการบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ**. บริษัท ลายเส้น ครีเอชั่น จำกัด. หน้า 54-56

จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์ เจริญศักดิ สินธุธาน และ สุรวุฒิ แก้ววิมล. ปัจจัยแห่งความสำเร็จหลักของการจัดการผลผลิตทั่วทั้งองค์กร (TPM). **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 18. 2(2553). หน้า 83-86.

ต้องการ แก้วทาสี. 2551. "**การประหยัดพลังงานในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย**." วิทยาพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไทรท์ ศรีโยธา คมสันต์ อัฑฒพงศ์ พิเชฎฐ์ พิศาล ฝ่ายชาวนา และสมรรถ ขันทะมูล. 2546. **การศึกษาระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอย.** สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553. **สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเลียมและพลังงาน**. กรุงเทพฯ : บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). หน้า 98, 111

บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). **แก๊สธรรมชาติ** [Online]. Available: http://pttweb2.pttplc.com/webngv/kw_if.aspx [29 กันยายน 2556]

บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด. **แผนภูมิสาเหตุและผล.**

บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด. **กระบวนการผลิตผงซักฟอก.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด. **การอบแห้ง.**

ระนอง พยัคฆพันธ์. 2553. การประหยัดพลังงานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและอาคาร ชุดที่ 2. บริษัท เอ็มแอนด์ อี. หน้า 58-70

วัชระ มั่งวิทิตกุล. 2548. **กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงาน สำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม.** บริษัท รำไทย เพรส จำกัด. หน้า 165-166

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล (บรรณาธิการ). 2536. **คู่มืออุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). หน้า 200

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ Hajime Tamon. 2548. **เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). หน้า 13, 25-35, 144-146

วิศิษฎ์ จาตุรมาน และขวัญชัย สินทิพย์สมบูรณ์. 2544. **กลศาสตร์ของไหล.** บริษัท ซีเอ็ดยูเคชัน จำกัด (มหาชน)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผงซักฟอก.** [Online]. Available: http://library.tisi.or.th/multim/TIS/TIS-78-2549m.pdf [02/08/2556]

Arun S. Mujumdar. 2011. **Industrial Drying Principles and Practice.** Metals and Materials Technology Centre. p. 28

G. Nonhbel and A.A.H. Moss 1971. **Drying of Solids in the Chemical Industry.** London: Butterworth & Co. Ltd. pp. 44-45

GEA Process Engineering Inc. **Spray Drying Technology.** [Online]. Available: http://www.niroinc.com/technologies/spray_drying_tech.asp [12 ธันวาคม 2556]

Yoshiko Takamura. 2543. **เทคนิคการประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม.** แปลโดย จิรศักดิ์ บุญรอด. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). หน้า 345-350

Yunus A. Cengel. 2006. **Introduction to Thermodynamic and Heat Transfer 2nd ed.** The McGraw-Hill Companies Inc. p. 798

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

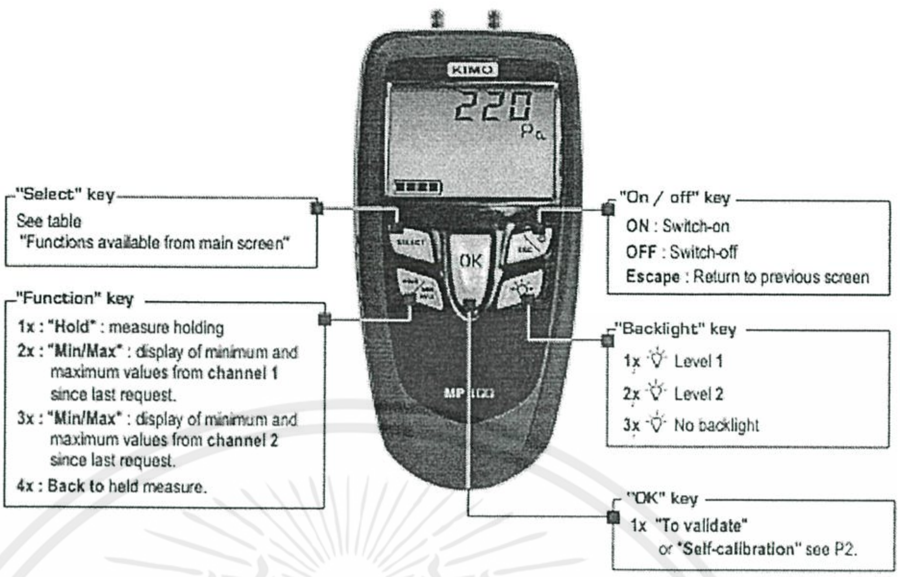
# วิธีใช้ท่อพิทอตและมาโนมิเตอร์

## ก.1 วิธีใช้ท่อพิทอตและมาโนมิเตอร์

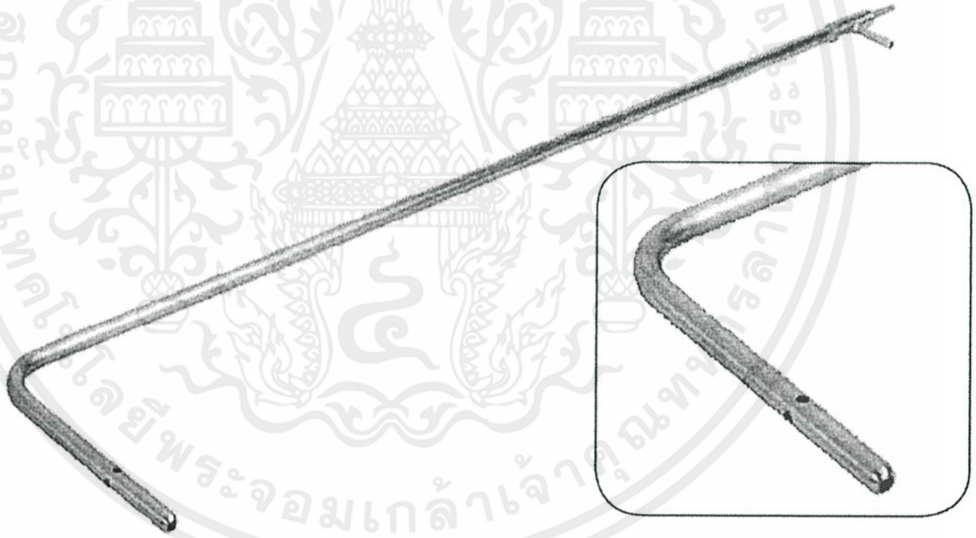
1. นำอุปกรณ์ออกมาจากซองบรรจุ ตรวจเช็คสภาพของอุปกรณ์ก่อนใช้งาน
2. เลือกหน่วยความเร็ว ที่ต้องการแสดงผลบนหน้าจอมาโนมิเตอร์
3. กำหนดระยะที่ต้องการวัดในท่อ โดยทำการขีดเส้นแบ่งระยะที่ท่อพิทอต
4. นำท่อพิทอตต่อสายยางเข้ากับเครื่องมาโนมิเตอร์ ดังรูปที่ ค.1 เพื่อเตรียมพร้อมทำการทดลอง
5. วัดความเร็วลมในท่อโดยหันปากท่อพิทอตในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของลม
6. อ่านค่าความเร็วที่ได้จากมาโนมิเตอร์ จดบันทึกค่า และทำการวัดระยะถัดไป
7. เมื่อทดลองเสร็จ ปิดมาโนมิเตอร์เช็ดทำความสะอาดท่อพิทอต และเก็บเข้าซองบรรจุ

**รูปที่ ก.1** การต่อท่อพิทอตกับมาโนมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ ก.2** มาโนมิเตอร์ รุ่น MP 100-101-105-112



**รูปที่ ก.3** ท่อพิทอต รุ่น PT2C-60

**หมายเหตุ** การวัดความเร็วลมตามมาตรฐานของ Fluid Component International LLC. ควรมีระยะทางตรงจาก Upstream และ Downstream เป็น 20 และ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข

# ข้อมูลดิบ

**ตารางที่ ข.1** อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ต่อแก๊สธรรมชาติก่อนการดำเนินงาน

| **อัตราการฉีดสเลอรี่ (kg/h)** | **อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า (kg/h)** | **ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%)** | **อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C)** | **ความชื้นของผงพื้นฐาน (wt%)** | **แก๊สธรรมชาติต่อผงพื้นฐาน (kg/ton)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 25,230 | 62,060 | 68.64 | 86.5 | 3.35 | 33.34 |
| 25,230 | 63,340 | 70.60 | 85.3 | 3.95 | 34.76 |
| 25,270 | 64,380 | 72.56 | 82.1 | 3.34 | 35.11 |
| 25,400 | 66,050 | 74.52 | 84.6 | 3.10 | 36.04 |
| 25,270 | 67,420 | 76.48 | 86.7 | 3.03 | 37.37 |
| 25,230 | 69,230 | 78.44 | 85.1 | 3.57 | 38.19 |
| 25,060 | 70,680 | 80.40 | 85.2 | 3.61 | 38.75 |
| 25,270 | 72,460 | 82.36 | 86.3 | 3.55 | 39.29 |
| 25,060 | 73,050 | 84.32 | 85.7 | 3.93 | 39.81 |
| 25,440 | 75,440 | 86.28 | 86.1 | 3.82 | 40.12 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศหรืออากาศจากบรรยากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.2** อุณหภูมิของอากาศจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันก่อนเข้าเตาเผาต่อแก๊สธรรมชาติที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ก่อนการดำเนินงาน

| **อัตราการฉีดสเลอรี่ (kg/h)** | **อัตราการไหลของอากาศร้อน** | | | **ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%)** | | **อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C)** | **ความชื้นของผงพื้นฐาน (wt%)** | **แก๊สธรรมชาติต่อผงพื้นฐาน (kg/ton)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **(I) จากเครื่องอัดอากาศที่อ่านจาก SCADA (kg/h)** | **(III) จากกระบวนการซัลโฟเนชัน (kg/h)** | **(I+III) อากาศร้อนขาเข้า (kg/h)** | **ขาเข้า** | **ขาออก** | | | |
| 25,230 | 9,120 | 61,350 | 70,470 | 79.10 | 90.00 | 92.1 | 2.72 | 35.47 |
| 25,100 | 8,940 | 61,410 | 70,350 | 79.31 | 90.00 | 93.1 | 2.31 | 35.31 |
| 25,170 | 8,590 | 61,650 | 70,240 | 79.50 | 90.00 | 93.5 | 2.45 | 34.41 |
| 25,410 | 8,640 | 61,470 | 70,110 | 79.52 | 90.00 | 93.4 | 2.01 | 33.68 |
| 25,430 | 8,990 | 61,380 | 70,370 | 79.13 | 90.00 | 93.3 | 2.35 | 34.81 |
| **เฉลี่ย** | 8,856 | 61,452 | 70,308 | 79.31 | 90.00 | 93.08 | 2.37 | 34.74 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

**ตารางที่ ข.3** อุณหภูมิของอากาศจากบรรยากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชันก่อนเข้าเตาเผาต่อแก๊สธรรมชาติที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง ก่อนการดำเนินงาน

| อัตราการฉีดสเลอรี่ (kg/h) | อัตราการไหลของอากาศร้อน | | | ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%) | | อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C) | ความชื้นของผงพื้นฐาน (wt%) | แก๊สธรรมชาติต่อผงพื้นฐาน (kg/ton) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (II) จากบรรยากาศ (kg/h) | (III) จากกระบวนการซัลโฟเนชัน (kg/h) | (II+III) อากาศร้อนขาเข้า (kg/h) | ขาเข้า | ขาออก | | | |
| 25,440 | 1,370 | 68,900 | 70,270 | 79.51 | 75.10 | 84.9 | 3.51 | 39.45 |
| 25,070 | 1,530 | 68,370 | 69,900 | 79.64 | 74.30 | 85.7 | 3.78 | 39.39 |
| 25,100 | 1,410 | 68,820 | 70,230 | 79.52 | 74.20 | 84.5 | 3.35 | 39.35 |
| 25,500 | 1,450 | 68,670 | 70,120 | 79.71 | 74.60 | 86.6 | 3.12 | 39.69 |
| 25,430 | 1,480 | 68,530 | 70,010 | 79.55 | 74.70 | 85.3 | 3.43 | 39.81 |
| 25,640 | 1,550 | 68,580 | 70,130 | 79.70 | 74.40 | 84.1 | 3.45 | 40.12 |
| 25,230 | 1,490 | 68,820 | 70,310 | 79.71 | 74.20 | 85.2 | 3.15 | 39.65 |
| 25,120 | 1,410 | 68,850 | 70,260 | 79.65 | 73.80 | 85.2 | 3.14 | 40.32 |
| 25,010 | 1,370 | 68,790 | 70,160 | 79.71 | 74.10 | 85.5 | 3.75 | 39.87 |
| 25,360 | 1,380 | 68,970 | 70,350 | 79.70 | 74.50 | 85.9 | 3.35 | 40.10 |
| **เฉลี่ย** | 1,444 | 68,730 | 70,174 | 79.64 | 74.39 | 85.3 | 3.40 | 39.78 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศจากบรรยากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

**ตารางที่ ข.4** ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

| ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%) | ครั้งที่ | ความเร็วของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้ (m/s) | | | | | | อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ | | เลขเรย์โนลด์เฉลี่ย | อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | จุดที่ 1 | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | เฉลี่ย | ค่าที่อ่านจาก SCADA (kg/h) | ค่าที่วัดได้ (kg/h) | | |
| 20 % | 1 | 2.7 | 3.1 | 3.0 | 3.2 | 3.2 | 3.04 | 2,920 | 6,275 | 108,755 | 119.4 |
| | 2 | 2.6 | 3.3 | 3.3 | 3.1 | 2.8 | 3.02 | 2,930 | 6,233 | | 119.0 |
| | 3 | 3.0 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.0 | 3.10 | 2,870 | 6,398 | | 120.5 |
| | 4 | 2.8 | 3.0 | 3.1 | 2.8 | 3.1 | 2.96 | 2,900 | 6,109 | | 116.5 |
| | 5 | 2.9 | 3.0 | 3.3 | 3.0 | 2.9 | 3.02 | 2,940 | 6,068 | | 117.1 |
| 30 % | 1 | 4.4 | 4.7 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 4.84 | 3,990 | 9,757 | 165,096 | 129.0 |
| | 2 | 4.6 | 4.6 | 5.2 | 5.1 | 4.5 | 4.80 | 4,220 | 9,677 | | 129.0 |
| | 3 | 4.4 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 4.3 | 4.70 | 4,140 | 9,475 | | 125.3 |
| | 4 | 4.6 | 4.9 | 5.3 | 5.3 | 4.2 | 4.86 | 3,890 | 9,798 | | 130.2 |
| | 5 | 4.8 | 4.6 | 5.2 | 4.9 | 4.2 | 4.74 | 4,210 | 9,596 | | 126.5 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

**ตารางที่ ข.4** ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (ต่อ)

| ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%) | ครั้งที่ | ความเร็วของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้ (m/s) | | | | | | อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ | | เลขเรย์โนลด์เฉลี่ย | อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | จุดที่ 1 | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | เฉลี่ย | ค่าที่อ่านจาก SCADA (kg/h) | ค่าที่วัดได้ (kg/h) | | |
| 40 % | 1 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.0 | 6.14 | 5,380 | 12,165 | 203,473 | 137.3 |
| | 2 | 5.6 | 6.2 | 6.5 | 6.5 | 5.8 | 6.12 | 5,350 | 12,125 | | 133.2 |
| | 3 | 5.5 | 5.9 | 6.4 | 6.4 | 5.6 | 5.96 | 5,070 | 11,808 | | 132.1 |
| | 4 | 5.5 | 5.9 | 6.8 | 6.2 | 6.0 | 6.08 | 5,280 | 12,046 | | 136.9 |
| | 5 | 5.5 | 6.0 | 6.4 | 6.4 | 6.2 | 6.10 | 5,270 | 12,085 | | 135.5 |
| 50 % | 1 | 7.6 | 8.0 | 8.0 | 8.2 | 8.0 | 7.96 | 6,640 | 16,246 | 278,586 | 120.0 |
| | 2 | 7.5 | 7.7 | 8.3 | 8.3 | 7.9 | 7.94 | 6,890 | 16,205 | | 121.6 |
| | 3 | 7.5 | 7.9 | 8.1 | 8.2 | 7.7 | 7.88 | 6,770 | 16,083 | | 127.0 |
| | 4 | 7.3 | 8.1 | 8.4 | 8.1 | 7.6 | 7.90 | 6,650 | 16,369 | | 122.4 |
| | 5 | 7.2 | 7.8 | 8.2 | 8.2 | 8.0 | 7.88 | 6,700 | 16,185 | | 124.0 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

**ตารางที่ ข.4** ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (ต่อ)

| ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%) | ครั้งที่ | ความเร็วของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้ (m/s) | | | | | | อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ | | เลขเรย์โนลด์เฉลี่ย | อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | จุดที่ 1 | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | เฉลี่ย | ค่าที่อ่านจาก SCADA (kg/h) | ค่าที่วัดได้ (kg/h) | | |
| 60 % | 1 | 9.1 | 10.0 | 10.5 | 9.5 | 9.1 | 9.64 | 8,350 | 20,110 | 355,600 | 115.3 |
| | 2 | 9.2 | 9.5 | 10.3 | 10.1 | 9.4 | 9.70 | 8,250 | 20,235 | | 114.1 |
| | 3 | 9.4 | 9.6 | 10.5 | 10.4 | 9.3 | 9.84 | 8,420 | 20,527 | | 112.8 |
| | 4 | 9.2 | 9.7 | 10.4 | 10.3 | 9.6 | 9.84 | 8,270 | 20,068 | | 112.5 |
| | 5 | 9.0 | 9.3 | 10.2 | 10.4 | 9.2 | 9.62 | 8,210 | 20,360 | | 117.8 |
| 70 % | 1 | 10.6 | 11.2 | 11.9 | 11.6 | 11.5 | 11.36 | 9,730 | 24,294 | 427,102 | 101.2 |
| | 2 | 10.9 | 10.9 | 11.4 | 11.7 | 11.3 | 11.24 | 9,890 | 24,037 | | 106.4 |
| | 3 | 10.8 | 11.3 | 11.8 | 11.2 | 11.2 | 11.26 | 9,810 | 24,080 | | 104.4 |
| | 4 | 10.1 | 11.4 | 11.8 | 11.3 | 11.3 | 11.18 | 9,650 | 23,909 | | 106.6 |
| | 5 | 10.4 | 10.9 | 11.6 | 11.2 | 11.0 | 11.02 | 9,870 | 23,567 | | 107.4 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

**ตารางที่ ข.4** ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (ต่อ)

| ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%) | ครั้งที่ | ความเร็วของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้ (m/s) | | | | | | อัตราการไหลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ | | เลขเรย์โนลด์เฉลี่ย | อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | จุดที่ 1 | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | เฉลี่ย | ค่าที่อ่านจาก SCADA (kg/h) | ค่าที่วัดได้ (kg/h) | | |
| 80 % | 1 | 11.6 | 12.2 | 12.3 | 12.1 | 11.9 | 12.02 | 11,150 | 26,251 | 478,412 | 97.6 |
| | 2 | 11.3 | 12.2 | 12.6 | 12.4 | 11.8 | 12.06 | 11,400 | 26,338 | | 99.5 |
| | 3 | 11.7 | 12.4 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.20 | 12,540 | 26,644 | | 95.1 |
| | 4 | 11.5 | 12.1 | 12.6 | 12.2 | 12.1 | 12.10 | 12,210 | 26,425 | | 95.7 |
| | 5 | 11.3 | 12.3 | 12.6 | 12.3 | 11.9 | 12.08 | 12,700 | 26,382 | | 97.1 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

**ตารางที่ ข.5** ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง หลังการดำเนินงาน

| อัตราการฉีดสเลอรี่ (kg/h) | อัตราการไหลของอากาศร้อน | | | อัตราการไหลรวมของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย | | ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%) | | อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C) | ความชื้นของผงพื้นฐาน (wt%) | แก๊สธรรมชาติต่อผงพื้นฐาน (kg/ton) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | จากเครื่องอัดอากาศ | | (III) จากกระบวนการซัลโฟเนชัน (kg/h) | ค่าที่อ่านจาก SCADA (I + III) (kg/h) | ค่าที่คำนวณได้ (II + III) (kg/h) | ขาเข้า | ขาออก | | | |
| | (I) ค่าที่อ่านจาก SCADA (kg/h) | (II) ค่าที่คำนวณจากสมการที่ (4.2) (kg/h) | | | | | | | | |
| 25,060 | 8,740 | 19,881 | 52,010 | 60,750 | 71,891 | 65.70 | 74.13 | 90.4 | 3.03 | 36.47 |
| 25,230 | 8,810 | 20,140 | 52,280 | 61,090 | 72,420 | 65.70 | 74.32 | 94.2 | 3.92 | 37.62 |
| 25,100 | 8,460 | 19,381 | 51,740 | 60,200 | 71,121 | 65.50 | 74.75 | 97.3 | 3.51 | 36.54 |
| 25,270 | 8,480 | 19,320 | 52,010 | 60,490 | 71,330 | 65.50 | 75.01 | 92.8 | 3.43 | 37.52 |
| 25,100 | 8,700 | 19,772 | 51,500 | 60,200 | 71,272 | 65.50 | 74.34 | 89.8 | 3.82 | 37.69 |
| 25,190 | 8,600 | 19,495 | 51,560 | 60,160 | 71,055 | 65.50 | 73.98 | 88.2 | 3.57 | 36.48 |
| 25,230 | 8,850 | 20,235 | 51,360 | 60,210 | 71,595 | 64.72 | 73.65 | 94.2 | 3.60 | 36.81 |
| 25,270 | 8,300 | 18,991 | 51,580 | 60,890 | 70,571 | 64.72 | 73.75 | 96.9 | 3.44 | 36.40 |
| 25,400 | 8,630 | 19,827 | 51,450 | 60,080 | 71,277 | 64.72 | 74.80 | 99.0 | 3.00 | 36.00 |
| 25,270 | 8,410 | 19,255 | 50,740 | 59,150 | 69,995 | 64.72 | 73.45 | 97.0 | 3.73 | 36.41 |
| 25,270 | 8,710 | 19,971 | 50,740 | 59,450 | 70,711 | 64.72 | 74.81 | 97.1 | 3.73 | 36.41 |

**ตารางที่ ข.5** ค่าตัวแปรปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้า 70,000 กิโลกรัม/ชั่วโมง หลังการดำเนินงาน (ต่อ)

| **อัตราการฉีดสเลอรี่ (kg/h)** | **อัตราการไหลของอากาศร้อน** | | | **อัตราการไหลรวมของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย** | | **ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้า (%)** | | **อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา (°C)** | **ความชื้นของผงพื้นฐาน (wt%)** | **แก๊สธรรมชาติต่อผงพื้นฐาน (kg /ton )** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **จากเครื่องอัดอากาศ** | | **(III) จากกระบวนการซัลโฟเนชัน (kg/h)** | **ค่าที่อ่านจาก SCADA (I + III) (kg/h)** | **ค่าที่คำนวณได้ (II + III) (kg/h)** | **ขาเข้า** | **ขาออก** | | | |
| | **(I) ค่าที่อ่านจาก SCADA (kg/h)** | **(II) ค่าที่คำนวณจากสมการที่ (4.2) (kg/h)** | | | | | | | | |
| 25,230 | 8,800 | 20,121 | 51,130 | 59,930 | 71,251 | 64.72 | 74.51 | 94.4 | 3.42 | 36.14 |
| 25,100 | 8,880 | 20,246 | 51,250 | 60,130 | 71,496 | 64.72 | 74.71 | 91.7 | 3.50 | 36.64 |
| 25,400 | 8,620 | 19,851 | 51,500 | 61,120 | 71,351 | 64.72 | 74.65 | 101.00 | 3.84 | 37.03 |
| 25,250 | 8,740 | 20,281 | 51,090 | 59,830 | 71,371 | 64.72 | 74.81 | 107 | 3.91 | 36.77 |
| 25,130 | 8,810 | 20,164 | 51,780 | 60,590 | 71,944 | 64.72 | 74.21 | 95.2 | 3.71 | 36.41 |
| 25,510 | 8,460 | 19,401 | 51,790 | 60,250 | 71,191 | 64.72 | 74.16 | 98.1 | 3.40 | 37.10 |
| 25,270 | 8,480 | 19,383 | 51,480 | 59,960 | 70,863 | 64.72 | 74.81 | 95.4 | 3.52 | 36.75 |
| 25,400 | 8,700 | 19,945 | 52,010 | 60,710 | 71,955 | 64.72 | 74.30 | 97.0 | 3.75 | 36.45 |
| 25,280 | 8,600 | 19,719 | 51,200 | 58,800 | 70,919 | 64.72 | 74.80 | 97.5 | 3.71 | 37.13 |
| **เฉลี่ย** | 8,639 | 19,769 | 51,510 | 60,200 | 71,279 | 64.97 | 74.40 | 95.71 | 3.58 | 36.70 |

**หมายเหตุ** อุณหภูมิก่อนเข้าเตาเผา คือ อุณหภูมิผสมของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศกับอากาศร้อนจากกระบวนการซัลโฟเนชัน

# ภาคผนวก ค

# ตัวอย่างการคำนวณ

## ค.1 การคำนวณเลขเรย์โนลด์ของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ

เลขเรย์โนลด์ของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่ 20 % ของกำลังพัดลมดูดอากาศคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$N_R = \frac{v_{avg} D}{\nu} \tag{2.2}$$

ความหนืดจลนศาสตร์ (kinematic viscosity: $\nu$) ของอากาศร้อนที่มาจากเครื่องอัดอากาศคำนวณได้จากการประมาณค่าในช่วง (interpolation) ดังสมการที่ (ค.1.1)

$$\frac{y - y_a}{y_b - y_a} = \frac{x - x_a}{x_b - x_a} \qquad (ค.1.1)$$

เมื่อ $x$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผา ดังตารางที่ ข.4

$$= T_{avg} = \frac{119.4 + 119.0 + 120.5 + 116.5 + 117.1}{5} = 118.5\ ^{o}C$$

$x_a$ = อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ 100 °C

$x_b$ = อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ 120 °C

$y_a$ = ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 100 °C เท่ากับ $2.522\text{x}10^{-5}$ $m^2/s$

$y_b$ = ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 120 °C เท่ากับ $2.306\text{x}10^{-5}$ $m^2/s$

$y$ = ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 118.5 °C

ดังนั้น ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 118.5 °C จากสมการที่ (ค.1.1)

$$\frac{y - 2.306\times10^{-5}}{2.522\times10^{-5} - 2.306\times10^{-5}} = \frac{118.5-100}{120-100}$$

$\nu = x = 2.5058\times10^{-5}$ $m^2/s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 0.9 m

$v_{avg}$ = ความเร็วเฉลี่ยของอากาศร้อนเฉลี่ยที่วัดได้ 5 ครั้ง ดังตารางที่ ข.4

$$v_{avg} = \frac{3.04 + 3.02 + 3.10 + 2.96 + 3.02}{5} = 3.028 \text{ m/s}$$

ดังนั้น คำนวณเลขเรย์โนลด์ของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้

$$N_R = \frac{(3.028)(\pi(0.9/2)^2)}{2.5058 \times 10^{-5}}$$
$$= 108,755.68$$

อากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศมีการไหลแบบปั่นป่วน

## ค.2 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้

อัตราการไหลเชิงปริมาตรคำนวณได้จากอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่ 20 % ของกำลังพัดลมดูดอากาศ คำนวณได้จากสมการที่ (ค.2.1)

$$Q = v_{avg} A \qquad \text{(ค.2.1)}$$

เมื่อ $Q$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m$^3$/h)

$v_{avg}$ = ความเร็วเฉลี่ยของอากาศร้อนเฉลี่ยที่วัดได้ 5 ครั้ง ดังตารางที่ ข.4

$$v_{avg} = \frac{3.04 + 3.02 + 3.10 + 2.96 + 3.02}{5} = 3.028 \text{ m/s}$$

$A$ = พื้นที่หน้าตัดของท่อ

ดังนั้น คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้

$$Q = (3.04)(\pi(0.9/2)^2)$$
$$= 6,948 \text{ m}^3\text{/h}$$

อัตราการไหลเชิงมวลคำนวณได้จากสมการที่ (ค.2.2)

$$\dot{m} = \rho Q \qquad \text{(ค 2.2)}$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)

$\rho$ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m$^3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Q$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m$^3$/h)

ความหนาแน่นของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศ คำนวณได้จากสมการที่ (ค.1.1)

เมื่อ $x$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศร้อนก่อนเข้าเตาเผา ดังตารางที่ ข.4

$$= T_{avg} = \frac{119.4 + 119.0 + 120.5 + 116.5 + 117.1}{5} = 118.5\,^{o}C$$

$x_a$ = อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ 100 °C

$x_b$ = อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ 120 °C

$y_a$ = ความหนาแน่นที่ 100 °C เท่ากับ 0.9458 kg/m$^3$

$y_b$ = ความหนาแน่นที่ 120 °C เท่ากับ 0.8977 kg/m$^3$

$y$ = ความหนาแน่นที่ 118.5 °C

$$\frac{x - 0.9458}{0.8977 - 0.9458} = \frac{118.5 - 100}{120 - 100}$$

$\rho = x = 0.9013$ kg/m$^3$

ดังนั้น คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนจากเครื่องอัดอากาศที่วัดได้

$$\dot{m} = (0.9013)(6,948)$$

$$= 6,275.10 \text{ kg/h}$$

## ค.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจากการคำนวณด้วยสมการปรับแก้ และจากระบบ SCADA คำนวณได้ดังนี้

$$\%\ \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{M - S}{S}$$

$$= \frac{71,279 - 70,000}{70,000} \times 100\%$$

$$= 1.83\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $M$ = อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปรับแก้เท่ากับ $71,279$ kg/h

$S$ = อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ตั้งค่าที่ระบบ SCADA เท่ากับ $70,000$ kg/h

## ค.4 การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ราคาแก๊สธรรมชาติที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคำนวณดังนี้

กำลังการผลิตผงพื้นฐานเพื่อใช้ผลิตผงซักฟอกสูตรมาตรฐาน 70,000 ton/year

ราคาแก๊สธรรมชาติ 14.65 Baht/kg

**ราคาแก๊สธรรมชาติก่อนการดำเนินงาน**

อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ton/h และอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 70,000 kg/h

ปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย 39.78 kg/ton $_{\text{base powder}}$ (จากข้อมูลที่บันทึกในระบบ SCADA)

แก๊สธรรมชาติที่ใช้ $39.78 \times 70,000 = 2.78 \times 10^6$ kg/year

ราคาแก๊สธรรมชาติ $14.65 \times 2.78 \times 10^6 = 4.07 \times 10^7$ Baht/year

**ราคาแก๊สธรรมชาติหลังการดำเนินงาน**

อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ton/h และอัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 70,000 kg/h

ปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย 36.74 kg/ton $_{\text{base powder}}$ (จากโครงการนี้)

แก๊สธรรมชาติที่ใช้ $36.74 \times 70,000 = 2.57 \times 10^6$ kg/year

ราคาแก๊สธรรมชาติ $14.65 \times 2.57 \times 10^6 = 3.76 \times 10^7$ Baht/year

**ราคาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการดูดอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคำนวณดังนี้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าที่ 100 % ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 150 kW/h

อัตราการฉีดสเลอรี่ 25 ton/h ที่มีความชื้น 30.5 %

อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 70,000 kg/h

ระยะเวลาผลิตผงพื้นฐาน $\frac{70,000}{\left(25\ x\ (1-0.305)\right)} = 4,028$ h/year

**ราคาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการดูดอากาศร้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนการดำเนินงาน**

ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเท่ากับ 79.64 %

ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 119.46 kW/h (จากข้อมูลที่บันทึกในระบบ SCADA)

ราคาพลังงานไฟฟ้า 4 Baht/kW

ราคาพลังงานไฟฟ้า $119.46 \times 4,028 \times 4 = 1,924,740$ Baht/year

**ราคาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการดูดอากาศร้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยหลังการดำเนินงาน**

ภาระทางกลของพัดลมดูดอากาศขาเข้าเท่ากับ 64.97 %

ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 97.46 kW/h (จากโครงการนี้)

ราคาพลังงานไฟฟ้า 4 Baht/kW

ราคาพลังงานไฟฟ้า $97.46 \times 4,028 \times 4 = 1,570,276$ Baht/year

ดังนั้นราคาพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงที่พัดลมดูดอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

$1,924,740 - 1,570,276 = 354,464$ Baht/year

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ง

# สมบัติของสาร

**ตาราง ง.1** สมบัติของอากาศที่ 1 บรรยากาศ [Yunus A. Cengel (2006)]

Properties of air at 1 atm pressure

| Temp. $T$, °C | Density $\rho$, kg/m$^3$ | Specific Heat $c_p$, J/kg · K | Thermal Conductivity $k$, W/m · K | Thermal Diffusivity $\alpha$, m$^2$/s | Dynamic Viscosity $\mu$, kg/m · s | Kinematic Viscosity $\nu$, m$^2$/s | Prandtl Number Pr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| −150 | 2.866 | 983 | 0.01171 | $4.158 \times 10^{-6}$ | $8.636 \times 10^{-6}$ | $3.013 \times 10^{-6}$ | 0.7246 |
| −100 | 2.038 | 966 | 0.01582 | $8.036 \times 10^{-6}$ | $1.189 \times 10^{-6}$ | $5.837 \times 10^{-6}$ | 0.7263 |
| −50 | 1.582 | 999 | 0.01979 | $1.252 \times 10^{-5}$ | $1.474 \times 10^{-5}$ | $9.319 \times 10^{-6}$ | 0.7440 |
| −40 | 1.514 | 1002 | 0.02057 | $1.356 \times 10^{-5}$ | $1.527 \times 10^{-5}$ | $1.008 \times 10^{-5}$ | 0.7436 |
| −30 | 1.451 | 1004 | 0.02134 | $1.465 \times 10^{-5}$ | $1.579 \times 10^{-5}$ | $1.087 \times 10^{-5}$ | 0.7425 |
| −20 | 1.394 | 1005 | 0.02211 | $1.578 \times 10^{-5}$ | $1.630 \times 10^{-5}$ | $1.169 \times 10^{-5}$ | 0.7408 |
| −10 | 1.341 | 1006 | 0.02288 | $1.696 \times 10^{-5}$ | $1.680 \times 10^{-5}$ | $1.252 \times 10^{-5}$ | 0.7387 |
| 0 | 1.292 | 1006 | 0.02364 | $1.818 \times 10^{-5}$ | $1.729 \times 10^{-5}$ | $1.338 \times 10^{-5}$ | 0.7362 |
| 5 | 1.269 | 1006 | 0.02401 | $1.880 \times 10^{-5}$ | $1.754 \times 10^{-5}$ | $1.382 \times 10^{-5}$ | 0.7350 |
| 10 | 1.246 | 1006 | 0.02439 | $1.944 \times 10^{-5}$ | $1.778 \times 10^{-5}$ | $1.426 \times 10^{-5}$ | 0.7336 |
| 15 | 1.225 | 1007 | 0.02476 | $2.009 \times 10^{-5}$ | $1.802 \times 10^{-5}$ | $1.470 \times 10^{-5}$ | 0.7323 |
| 20 | 1.204 | 1007 | 0.02514 | $2.074 \times 10^{-5}$ | $1.825 \times 10^{-5}$ | $1.516 \times 10^{-5}$ | 0.7309 |
| 25 | 1.184 | 1007 | 0.02551 | $2.141 \times 10^{-5}$ | $1.849 \times 10^{-5}$ | $1.562 \times 10^{-5}$ | 0.7296 |
| 30 | 1.164 | 1007 | 0.02588 | $2.208 \times 10^{-5}$ | $1.872 \times 10^{-5}$ | $1.608 \times 10^{-5}$ | 0.7282 |
| 35 | 1.145 | 1007 | 0.02625 | $2.277 \times 10^{-5}$ | $1.895 \times 10^{-5}$ | $1.655 \times 10^{-5}$ | 0.7268 |
| 40 | 1.127 | 1007 | 0.02662 | $2.346 \times 10^{-5}$ | $1.918 \times 10^{-5}$ | $1.702 \times 10^{-5}$ | 0.7255 |
| 45 | 1.109 | 1007 | 0.02699 | $2.416 \times 10^{-5}$ | $1.941 \times 10^{-5}$ | $1.750 \times 10^{-5}$ | 0.7241 |
| 50 | 1.092 | 1007 | 0.02735 | $2.487 \times 10^{-5}$ | $1.963 \times 10^{-5}$ | $1.798 \times 10^{-5}$ | 0.7228 |
| 60 | 1.059 | 1007 | 0.02808 | $2.632 \times 10^{-5}$ | $2.008 \times 10^{-5}$ | $1.896 \times 10^{-5}$ | 0.7202 |
| 70 | 1.028 | 1007 | 0.02881 | $2.780 \times 10^{-5}$ | $2.052 \times 10^{-5}$ | $1.995 \times 10^{-5}$ | 0.7177 |
| 80 | 0.9994 | 1008 | 0.02953 | $2.931 \times 10^{-5}$ | $2.096 \times 10^{-5}$ | $2.097 \times 10^{-5}$ | 0.7154 |
| 90 | 0.9718 | 1008 | 0.03024 | $3.086 \times 10^{-5}$ | $2.139 \times 10^{-5}$ | $2.201 \times 10^{-5}$ | 0.7132 |
| 100 | 0.9458 | 1009 | 0.03095 | $3.243 \times 10^{-5}$ | $2.181 \times 10^{-5}$ | $2.306 \times 10^{-5}$ | 0.7111 |
| 120 | 0.8977 | 1011 | 0.03235 | $3.565 \times 10^{-5}$ | $2.264 \times 10^{-5}$ | $2.522 \times 10^{-5}$ | 0.7073 |
| 140 | 0.8542 | 1013 | 0.03374 | $3.898 \times 10^{-5}$ | $2.345 \times 10^{-5}$ | $2.745 \times 10^{-5}$ | 0.7041 |
| 160 | 0.8148 | 1016 | 0.03511 | $4.241 \times 10^{-5}$ | $2.420 \times 10^{-5}$ | $2.975 \times 10^{-5}$ | 0.7014 |
| 180 | 0.7788 | 1019 | 0.03646 | $4.593 \times 10^{-5}$ | $2.504 \times 10^{-5}$ | $3.212 \times 10^{-5}$ | 0.6992 |
| 200 | 0.7459 | 1023 | 0.03779 | $4.954 \times 10^{-5}$ | $2.577 \times 10^{-5}$ | $3.455 \times 10^{-5}$ | 0.6974 |
| 250 | 0.6746 | 1033 | 0.04104 | $5.890 \times 10^{-5}$ | $2.760 \times 10^{-5}$ | $4.091 \times 10^{-5}$ | 0.6946 |
| 300 | 0.6158 | 1044 | 0.04418 | $6.871 \times 10^{-5}$ | $2.934 \times 10^{-5}$ | $4.765 \times 10^{-5}$ | 0.6935 |
| 350 | 0.5664 | 1056 | 0.04721 | $7.892 \times 10^{-5}$ | $3.101 \times 10^{-5}$ | $5.475 \times 10^{-5}$ | 0.6937 |
| 400 | 0.5243 | 1069 | 0.05015 | $8.951 \times 10^{-5}$ | $3.261 \times 10^{-5}$ | $6.219 \times 10^{-5}$ | 0.6948 |
| 450 | 0.4880 | 1081 | 0.05298 | $1.004 \times 10^{-4}$ | $3.415 \times 10^{-5}$ | $6.997 \times 10^{-5}$ | 0.6965 |
| 500 | 0.4565 | 1093 | 0.05572 | $1.117 \times 10^{-4}$ | $3.563 \times 10^{-5}$ | $7.806 \times 10^{-5}$ | 0.6986 |
| 600 | 0.4042 | 1115 | 0.06093 | $1.352 \times 10^{-4}$ | $3.846 \times 10^{-5}$ | $9.515 \times 10^{-5}$ | 0.7037 |
| 700 | 0.3627 | 1135 | 0.06581 | $1.598 \times 10^{-4}$ | $4.111 \times 10^{-5}$ | $1.133 \times 10^{-4}$ | 0.7092 |
| 800 | 0.3289 | 1153 | 0.07037 | $1.855 \times 10^{-4}$ | $4.362 \times 10^{-5}$ | $1.326 \times 10^{-4}$ | 0.7149 |
| 900 | 0.3008 | 1169 | 0.07465 | $2.122 \times 10^{-4}$ | $4.600 \times 10^{-5}$ | $1.529 \times 10^{-4}$ | 0.7206 |
| 1000 | 0.2772 | 1184 | 0.07868 | $2.398 \times 10^{-4}$ | $4.826 \times 10^{-5}$ | $1.741 \times 10^{-4}$ | 0.7260 |
| 1500 | 0.1990 | 1234 | 0.09599 | $3.908 \times 10^{-4}$ | $5.817 \times 10^{-5}$ | $2.922 \times 10^{-4}$ | 0.7478 |
| 2000 | 0.1553 | 1264 | 0.11113 | $5.664 \times 10^{-4}$ | $6.630 \times 10^{-5}$ | $4.270 \times 10^{-4}$ | 0.7539 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน


**ชื่อ-นามสกุล** นายชาคริต ควรพานิช

**วัน เดือน ปีเกิด** 27 กรกฎาคม 2534

**ที่อยู่** 77/1 ถ.พระราม 5 แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

**Email** chakrit-4k@hotmail.com โทรศัพท์ 089-781-1577


**ประวัติการศึกษา**

- พ.ศ. 2550-2552 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนราชวินิตมัธยม จังหวัดกรุงเทพฯ
- พ.ศ. 2553-2556 ปริญญาตรี วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ประสบการณ์การฝึกงานและผลงานวิจัย**

- นักศึกษาฝึกงานที่บริษัท คอลเกต-ปาล์มโอลีฟ (ประเทศไทย) จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี ส่วนโรงงาน้ำยาบ้วนปาก (Mouthwash plant) ระหว่างวันที่ 18 มีนาคม – 16 พฤษภาคม 2556
- ขณะนี้กำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรตรีก้าวหน้า ทำวิทยานิพนธ์ร่วมกับบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด


**ชื่อ-นามสกุล** นายวัฒนชัย ชวลิตชัยชาญ

**วัน เดือน ปีเกิด** 30 เมษายน 2535

**ที่อยู่** 87 หมู่ 5 ตำบลหนองเสม็ด อำเภอเมือง จังหวัดตราด 23000

**Email** wattanachai_mt@hotmail.com โทรศัพท์ 091-414-0629


**ประวัติการศึกษา**

- พ.ศ. 2550-2552 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนตราษตระการคุณ จังหวัดตราด
- พ.ศ. 2553-2556 ปริญญาตรี วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ประสบการณ์การฝึกงานและผลงานวิจัย**

- นักศึกษาฝึกงานที่บริษัท ดาว เคมิคอล ประเทศไทย จำกัด นิคมอุตสาหกรรมเอเชีย จังหวัดระยอง ส่วนสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานระหว่างวันที่ 1 เมษายน – 6 มิถุนายน 2556
- ขณะนี้กำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรตรีก้าวหน้า ทำวิทยานิพนธ์ร่วมกับบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้