

การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Enhancement of Air Cooled Heat Exchanger Performance in Petrochemical Industry



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

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ
	ระบายความร้อนด้วยอากาศในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
โดย	นายนิธิพงศ์ ช่างหล่อ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูตีมา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ ลีละวัฒน์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกคี่ก)	

นิธีพงค์ ช่างหล่อ : การเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. (Enhancement of Air Cooled Heat Exchanger Performance in Petrochemical Industry) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร. จิตรา รุ่งกิจการพานิช

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีมีหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลในกระบวนการผลิตให้ได้ตามที่กำหนด ในกรณีศึกษาที่พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิวที่ประสบปัญหาไม่สามารถลดอุณหภูมิได้ตามที่กำหนด จึงได้มีการนำระบบหมอกน้ำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยมีสมมติฐานว่าระบบหมอกน้ำสามารถช่วยลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ส่งผลให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของการประยุกต์ใช้ระบบหมอกน้ำ มีปัจจัยที่สนใจได้แก่ 1) ความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ 2) ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ และ 3) จำนวนหัวพ่นหมอกน้ำ ผลการทดลองพบสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ 0.6 MPa ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ 0.2 MPa และจำนวนหัวพ่น 16 หัว ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศให้ต่ำลงได้ 2.31 °C ถึง 2.41 °C ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้มีความสามารถในการรับภาระการระบายความร้อนได้เพิ่มขึ้น 129.91 kW คิดเป็นเพิ่มขึ้น 3.89% เมื่อนำค่าสภาวะนี้ไปใช้ในแบบจำลองของกระบวนการผลิตพบว่าผลผลิตจากกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 84 ตัน/ชั่วโมง เป็น 87 ตัน/ชั่วโมง คิดเป็นเพิ่มขึ้น 3.57 %

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970934921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: air-cooled heat exchanger, water mist system, petrochemical industry, condensate residue

Nitipong Changlor : Enhancement of Air Cooled Heat Exchanger Performance in Petrochemical Industry. Advisor: Assoc. Prof. Jittra Rukijkanpanich, Ph.D.

The performance of air-cooled heat exchangers in the condensate residue production of petrochemical plants had been reduced, resulting in not being able to reduce the temperature of the condensate residue as specified. Therefore, water mist systems had been applied to heat exchangers to help increase heat exchange performance. The hypothesis of the research was then the water mist system could reduce the inlet air temperature of the heat exchanger and make it able to handle more cooling loads. The experiment to find the optimum conditions of the water mist system was conducted. There were factors of interest; 1) the water pressure of the water mist system 2) the air pressure of the water mist system, and 3) the amount of water mist nozzles. The results showed that the optimum condition was as follows: water pressure of the water mist system of 0.6 MPa, air pressure of the water system of 0.2 MPa and 16 spray nozzles. Then the inlet temperature of the air-cooled heat exchanger could be reduced in the range of 2.31 to 2.41 °C with a 95% confidence level and consequently, the thermal duty increased to 129.91 kW or 3.89%. When applying this condition in the production process model, the yield of the production process increased from 84 to 87 tons/hour, therefore, increased 3.57%.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยกราบขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความรู้ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางการดำเนินงาน รวมถึงแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ที่ร่วมเป็นประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ ธีระวัฒน์ (กรรมการ) และรองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกคิก (กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ) ที่ได้ให้คำชี้แนะต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยออกมาอย่างถูกต้องสมบูรณ์ จึงขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนและพี่ ทุกคนในโรงงานกรณีศึกษาที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือด้านข้อมูลที่มีประโยชน์ในการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ กรรมการ ผู้จัดการของโรงงานกรณีศึกษาที่อนุญาตให้ทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้สนับสนุนและให้กำลังใจต่ออุปสรรคต่างๆ ที่เจอในการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบพระคุณทุกท่าน ที่ได้กล่าวนามถึง ที่ให้ความร่วมมือและให้กำลังใจจนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์

นิธิพงศ์ ช่างหล่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

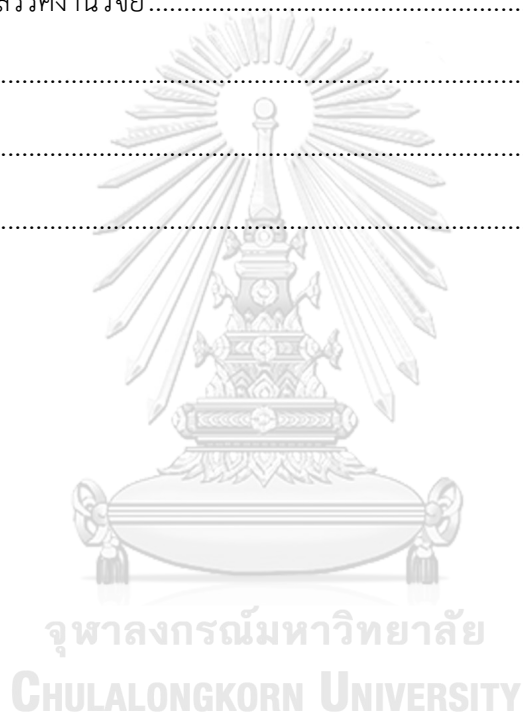
สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาแห่งปัญหา.....	1
1.2 ข้อมูลโรงงานกรณีศึกษา	1
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.4 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1.1 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง	8
2.1.2 หลักการทางสถิติวิศวกรรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล	14
2.1.3 การทดสอบสมมติฐาน	16

2.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	17
2.1.5 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	19
2.1.6 หลักการทำงานของระบบหมอกน้ำ.....	21
2.1.7 ทฤษฎีทางความร้อน.....	23
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง.....	28
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดอุณหภูมิของอากาศด้วยระบบหมอกน้ำ.....	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	32
3.1 ศึกษาความเป็นไปได้.....	32
3.1.1 ความเป็นไปได้ด้านเทคนิค (Technical Feasibility)	32
3.1.2 ความเป็นไปได้ด้านการปฏิบัติงาน (Operational Feasibility).....	34
3.1.3 ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility).....	35
3.1.4 การประเมินความเสี่ยง	37
3.1.5 ทางเลือกอื่น ๆ ในการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อน ด้วยอากาศ.....	39
3.2 การออกแบบระบบหมอกน้ำ.....	41
3.2.1 ข้อมูลและลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ ใช้ในงานวิจัย	41
3.2.2 ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดระยอง.....	42
3.2.3 การเลือกหัวพ่น	45
3.2.4 แหล่งจ่ายน้ำและอากาศ	47
3.2.5 อุปกรณ์จับยึดหัวพ่น.....	48
3.2.6 การออกแบบสายส่งน้ำและอากาศ	51
3.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย	53

3.4 การออกแบบการทดลอง.....	54
3.4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	54
3.4.1.1 ปัจจัยด้านปริมาณน้ำในระบบหมอกน้ำ	55
3.4.1.2 ปัจจัยด้านอากาศในระบบหมอกน้ำ.....	56
3.4.1.3 ปัจจัยด้านรูปแบบการจัดวางหัวพ่น.....	57
3.4.1.4 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ.....	57
3.4.1.5 ปัจจัยด้านสภาพเครื่องจักรและกระบวนการผลิต	59
3.4.2 ขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	60
3.4.3 กำหนดปัจจัยในการออกแบบการทดลอง	61
3.4.4 กำหนดสภาวะแวดล้อมในการออกแบบการทดลอง.....	61
3.4.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	63
3.4.6 การเลือกตัวแปรตอบสนอง.....	64
3.4.7 การแผนการทดลอง.....	64
3.4.8 การดำเนินการทดลองและวัดผล.....	66
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	67
4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	67
4.2 อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ลดลง	70
4.2.1 อิทธิพลของความดันน้ำและความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ	70
4.2.2 อิทธิพลของจำนวนหัวพ่นและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ.....	70
4.3 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสม.....	71
4.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	72
4.5 โอกาสในการเพิ่มกำลังการผลิต.....	73

4.6 ผลการทดลองแบบไม่ใช่ค่าเฉลี่ย (Worst-case scenario).....	74
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.1.1 สรุปผลการคัดเลือกปัจจัย.....	77
5.1.2 สรุปผลการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	77
5.1.3 สรุปการยืนยันผลการทดลองโดยใช้งานในกระบวนการผลิตจริง.....	78
5.2 ปัญหาและอุปสรรคงานวิจัย.....	79
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	83



สารบัญญภาพ

รูปที่ 1.1 แผนภูมิการไหลกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา	2
รูปที่ 1.2 แผนภูมิแสดงกระบวนการลดอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิวก่อนบรรจุถังเก็บผลิตภัณฑ์ ..	3
รูปที่ 2.1 ปัจจัยต่างๆของกระบวนการ	9
รูปที่ 2.2 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล และไม่มีผล (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551).....	11
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีพื้นผิวดตอบสนอง.....	13
รูปที่ 2.4 การตรวจสอบการแจกแจงปกติของส่วนตกค้าง (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551).....	15
รูปที่ 2.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551).....	15
รูปที่ 2.6 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551)	16
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบบ	20
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบบ	20
รูปที่ 2.9 ทิศทางการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	21
รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบรูปแบบวิธีการระบายความร้อน	22
รูปที่ 2.11 ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (C_V) และความจุความร้อนเฉพาะที่ความดันคงที่ (C_p)	23
รูปที่ 2.12 การกระจายอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทิศเดียวกัน (Quora, 2017)	25
รูปที่ 2.13 การกระจายอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทิศสวนทางกัน	26
รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากกัน (Quora, 2017)...	26
รูปที่ 3.1 วัฏจักรของการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561).....	32
รูปที่ 3.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนของหยดน้ำและอากาศ (biOx, 2020)	33

รูปที่ 3.3 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ.....	35
รูปที่ 3.4 การทำความสะอาดท่อระบายความร้อน (TUBETECH, 2020).....	40
รูปที่ 3.5 ภาพก่อนและหลังการทำความสะอาดครีบบระบายความร้อน.....	40
รูปที่ 3.6 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน	41
รูปที่ 3.7 Mist King Dry fogging humidifier.....	46
รูปที่ 3.8 Mini Mist Nozzle Internal mixing type (Everloy Spray Nozzles, 2005)	47
รูปที่ 3.9 พื้นที่ติดตั้งหัวพ่นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด	48
รูปที่ 3.10 พื้นที่ติดตั้งหัวพ่นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด force draft.....	48
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างชิ้นงานอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น.....	49
รูปที่ 3.12 ภาพจำลองสามมิติของการประกอบอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น.....	49
รูปที่ 3.13 ภาพจำลองการหาค่าแรงที่วัสดุรับได้.....	50
รูปที่ 3.14 พื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น	50
รูปที่ 3.15 ผังแสดงขนาดท่อน้ำและอากาศที่ใช้งานในระบบหมอกน้ำ	51
รูปที่ 3.16 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer) (Grainger, 2018).....	53
รูปที่ 3.17 เกจวัดความดัน (pressure gauge) (Monotaro, 2018)	53
รูปที่ 3.18 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared Thermometer) (Fluke, 2020)	53
รูปที่ 3.19 เครื่องวัดความเร็วลม (anemometer) (Tru Tech Tools, 2019).....	54
รูปที่ 3.20 ค่าการใช้งานของหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 (Everloy Spray Nozzles, 2005)	56
รูปที่ 3.21 ทิศทางของลมจากทะเลที่ไหลผ่านบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	58
รูปที่ 3.22 จุดวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังการใช้งานระบบหมอกน้ำ	66
รูปที่ 4.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง	68
รูปที่ 4.2 Contour plot และ surface plot แสดงอิทธิพลของความดันน้ำและความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ	70

รูปที่ 4.3 Contour plot และ surface plot แสดงอิทธิพลของจำนวนหัวฟันและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ 71

รูปที่ 4.4 การทำแบบจำลองเพื่อประเมินสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ .. 74

รูปที่ 4.5 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง 75

รูปที่ 4.6 ทิศทางของลมทะเลที่ส่งผลต่อจุดวัดอุณหภูมิ 76



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แนวทางการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ.....	4
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างแผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 4 ปัจจัย	12
ตารางที่ 2.2 ความผิดพลาดในการตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน	17
ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ Two Factor Fixed Effect Model	19
ตารางที่ 3.1 รายการอุปกรณ์	36
ตารางที่ 3.2 Risk Assessment Matrix ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงในโรงงานกรณีศึกษา... 37	
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ในการทดลอง	42
ตารางที่ 3.4 ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน 30 ปี (1981 - 2010) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2563)	44
ตารางที่ 3.5 ค่าใช้งานของ Mist King Dry fogging humidifier	46
ตารางที่ 3.6 ค่าใช้งานของ Mini Mist Nozzle Internal mixing	46
ตารางที่ 3.7 Air Flow Pressure Drop in Pipe (Inter Spray, 2018).....	52
ตารางที่ 3.8 Water flow and proper pipe size (Kirinoikeuchi, 2018).....	52
ตารางที่ 3.9 ค่าใช้งานของ Mini Mist Nozzle Internal mixing type (KSMMS 027115)	56
ตารางที่ 3.10 สรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ต้องการทำการทดลอง.....	64
ตารางที่ 3.11 การสุ่มตัวอย่างในการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	65
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง	67
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน	69
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดลองใช้งานระบบหมอกน้ำตามค่าสถานะที่เหมาะสม	71
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ระหว่างก่อนใช้ระบบหมอกน้ำและเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ	72
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแบบค่าผลต่างอุณหภูมิน้อยที่สุด.....	74

ตารางที่ 5.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบหมอน้ำ.....	78
--	----



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาแห่งปัญหา

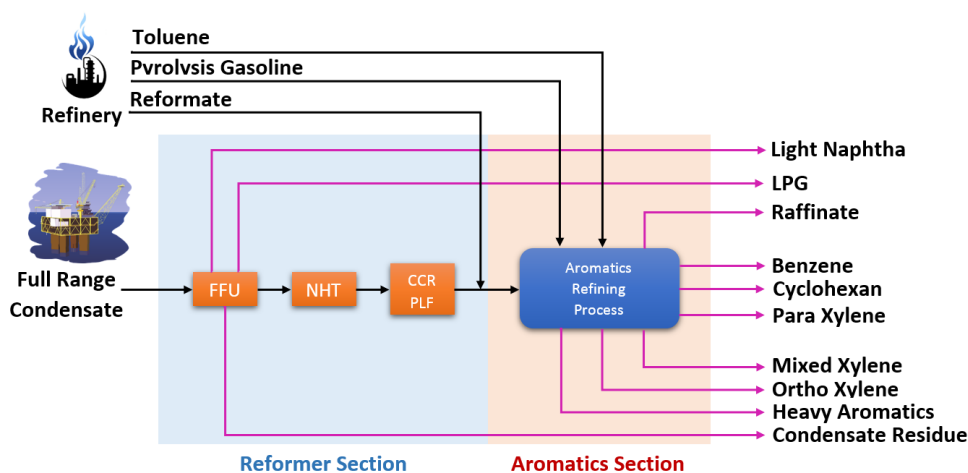
โรงงานปิโตรเคมีเป็นโรงงานที่มีปริมาณความร้อนสะสมของของไหลในกระบวนการผลิตสูงมาก จึงต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดอุณหภูมิของของไหลในกระบวนการผลิตนั้น เครื่องจักรที่ใช้ในการระบายความร้อนขนาดใหญ่ที่นิยมใช้คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-cooled heat exchanger) เพราะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ใช้อากาศเป็นสื่อกลางในการระบายความร้อน ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และมีค่าบำรุงรักษาไม่สูงเมื่อเทียบกับการระบายความร้อนด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้น้ำหรือของเหลวเป็นสื่อกลางในการระบายความร้อน (Hudson Products Corporation, 2007)

โรงงานปิโตรเคมีที่เป็นกรณีศึกษานี้มีการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศจำนวนถึง 270 เครื่องเพื่อใช้ระบายความร้อนออกจากกระบวนการผลิตและเปลี่ยนสถานะของผลิตภัณฑ์ จากรูปที่ 1.1 แสดงขอบเขตของกระบวนการผลิตในกรณีศึกษานี้ โดยเริ่มต้นจากหอกลิ้น (Naphtha Splitter) ทำการกลั่นแยกเนฟทาชนิดหนัก (heavy naphtha) เพื่อส่งไปยังขั้นตอนต่อไป ในขณะที่เดียวกันมีการแยกผลิตภัณฑ์พลอยได้ประเภทคอนเดนเสทเรซิดิว (condensate residue) ออกมาทางด้านล่างของหอกลิ้น จากนั้นเครื่องสูบลอย (pump) จะทำหน้าที่ดูดคอนเดนเสทเรซิดิวส่งผ่านไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell & tube heat exchanger) เพื่อทำการลดอุณหภูมิขั้นต้น และทำการลดอุณหภูมิในขั้นตอนต่อมาที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ จากนั้นคอนเดนเสทเรซิดิวจะถูกส่งไปยังถังเก็บผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการลดอุณหภูมิจะต้องควบคุมอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิวให้มีอุณหภูมิสูงไม่เกิน 60°C ก่อนลงถังเก็บ

1.2 ข้อมูลโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาประกอบธุรกิจผลิตผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี มีกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้นประมาณ 1 ล้านตันต่อปี ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตคือกลุ่มสารอะโรเมติกส์ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถนำไปต่อยอดเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมพลาสติก เช่น อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม และอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถกลั่นแยกผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซ

ปิโตรเลียมเหลว แนฟทาซินดิเบา และคอนเดนเสทเรซิดิว ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงงานโอเลฟินส์ และโรงกลั่นน้ำมันเพื่อกลั่นแยกเป็นน้ำมันอากาศยาน น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา



รูปที่ 1.1 แผนภูมิการไหลกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

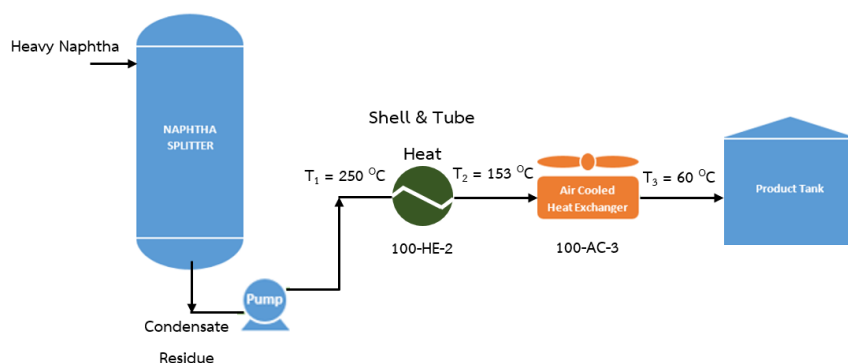
จากรูปที่ 1.1 โรงงานกรณีศึกษามีกระบวนการผลิตทั้งหมด 16 กระบวนการ ตั้งแต่การรับ Full Range Condensate (FRC) จากอ่าวไทยจนถึงการกลั่นเป็นผลิตภัณฑ์อะโรเมติกส์ โดยงานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศในหน่วยการผลิต Feed Fractionation Unit จำนวน 2 เครื่อง ที่ถูกใช้งานเพื่อลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Condensate Residue) ก่อนที่จะถูกนำส่งไปยังถังเก็บผลิตภัณฑ์

1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.3.1 สภาพปัญหาที่พบ

ขอบเขตของกระบวนการผลิตในกรณีศึกษานี้เริ่มต้นจากหอกกลั่น (Naphtha Splitter) ทำการกลั่นแยกแนฟทาซินดิหนัก (heavy naphtha) ออก เพื่อส่งไปยังขั้นตอนต่อไป และมีการแยกผลิตภัณฑ์พลอยได้ประเภทคอนเดนเสทเรซิดิว (condensate residue) ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงกลั่นน้ำมันออกมาสู่ด้านล่างของหอกกลั่น จากนั้นเครื่องสูบ (pump) จะทำหน้าที่ดูดคอนเดนเสทเรซิดิวส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell & tube heat exchanger) เพื่อทำการลดอุณหภูมิลำดับแรกก่อน และทำการลดอุณหภูมิในขั้นตอนต่อมาที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ จากนั้นคอนเดนเสทเรซิดิวจะถูกส่งไปยังถังเก็บผลิตภัณฑ์

ซึ่งในกระบวนการลดอุณหภูมิจะต้องควบคุมอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิวให้มีอุณหภูมิสูงไม่เกิน 60 °C ก่อนลงถังเก็บ



รูปที่ 1.2 แผนภูมิแสดงกระบวนการลดอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิวก่อนบรรจุถังเก็บผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของการระบายความร้อนของคอนเดนเสทเรซิดิวที่ลดต่ำลง ขึ้นอยู่กับสองสาเหตุ สาเหตุแรกเกิดจากตะกอนสะสมบริเวณท่อระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (หมายเลข 100-HE-2) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อระบายความร้อนลดลง และสาเหตุที่สองเกิดจากอุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องระบายความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (หมายเลข 100-AC-3) มีค่าสูง ซึ่งการสะสมของตะกอนในสาเหตุแรกนั้นได้รับการแก้ไขโดยการหยุดซ่อมครั้งใหญ่ (turn around) ทุกสี่ปีแล้ว ยังคงเหลือสาเหตุที่เกิดจากอุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศส่งผลให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่สามารถทำการระบายความร้อนได้ตามที่กำหนด

เมื่อเกิดปัญหาด้านสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ จึงทำให้หน่วยการกลั่นแยกผลิตภัณฑ์ต้องลดกำลังการผลิตลงทำให้อัตราการไหลของการกลั่นช้าลง เพื่อให้สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนเก็บลงถังได้ไม่เกิน 60 °C งานวิจัยนี้จึงได้หาวิธีการลดอุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

1.3.2 แนวทางการแก้ไขปัญหา

การจากศึกษาแนวทางการเพิ่มสมรรถนะให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศของวิศวกรที่มีหน้าที่ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต พบว่าการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายด้วยอากาศมีทั้งหมด 5 วิธี ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งเป็นแนวคิดที่ได้มา

จากการระดมสมองเพื่อหาแนวทางการแก้ปัญหาของทีมที่ประกอบไปด้วย process engineer, reliability engineer, maintenance engineer, safety engineer และ operator โดยอ้างอิงหลักการจาก PERFORMANCE IMPROVEMENT TO EXISTING AIR-COOLED HEAT EXCHANGERS (Giammaruti, 2004)

ตารางที่ 1.1 แนวทางการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ลำดับ	แนวทางการแก้ไขปัญหา	เงินลงทุน	ช่วงที่สามารถดำเนินการ	การขยายผล
1	การซื้อเครื่องจักรใหม่	7 ล้านบาท	ช่วงการหยุดซ่อมบำรุงใหญ่	-
2	การทำความสะอาดภายในท่อระบายความร้อน	6 แสนบาท	ช่วงการหยุดซ่อมบำรุงใหญ่	-
3	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อนสมรรถนะสูง	1 ล้านบาท	ช่วงการหยุดซ่อมบำรุงใหญ่	-
4	การทำความสะอาดครีบนระบายความร้อน	3 แสนบาท	ดำเนินงานทุกปี	-
5	การติดตั้งระบบหมอกน้ำแบบใช้น้ำผสมอากาศ	2 แสนบาท	สามารถดำเนินงานได้ทันที	สามารถประยุกต์ใช้กับหน่วยการผลิตอื่น ๆ ได้

จากตารางที่ 1.1 การจากศึกษาแนวทางการเพิ่มสมรรถนะให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ พบว่าการใช้ระบบหมอกน้ำ (water mist system) เป็นวิธีการที่มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติและมีค่าใช้จ่ายไม่สูงเมื่อเทียบกับการลงทุนเครื่องจักรใหม่ (Ellmer, 2010) และ (Liehui, G., Lijun, & Xiaoze, 2018) ได้อธิบายว่าภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม (ambient temperature) ที่สูงขึ้น การระบายความร้อนด้วยระบบหมอกน้ำเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องจักรที่ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ เมื่ออากาศ

โดยรอบเครื่องจักรมีอุณหภูมิต่ำลง ก็จะช่วยให้อุณหภูมิที่ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

ในกรณีศึกษานี้จึงได้ทำการออกแบบระบบหมอกน้ำต้นแบบที่สามารถติดตั้งและรื้อถอนได้ ทั้งนี้เพื่อใช้สำหรับทดลองกับกระบวนการผลิต หากพบว่าได้ผลดีจะทำการติดตั้งแบบถาวรต่อไป

1.4 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อหาปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานระบบหมอกน้ำให้สามารถช่วยลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Condensate Residue) ให้ได้มากที่สุด

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาเฉพาะกระบวนการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Condensate Residue) ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศของส่วน down stream ของหอกลั่น Naphtha Splitter ในหน่วยการผลิต Feed Fractionation เท่านั้น
- 2) ศึกษาเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศส่วน down stream ของหอกลั่น Naphtha Splitter ในหน่วยการผลิต Feed Fractionation เท่านั้น
- 3) ศึกษาเฉพาะปัญหาการควบคุมอุณหภูมิไม่ได้ตามต้องการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศเท่านั้น
- 4) ศึกษาเฉพาะวิธีการช่วยลดอุณหภูมิโดยการใช้งานระบบหมอกน้ำ
- 5) ไม่พิจารณากรณีที่เครื่องจักรเสียหาย หรือเหตุฉุกเฉินอื่น ๆ
- 6) พิจารณาเฉพาะเวลาที่กระบวนการผลิตอยู่ในสภาวะปกติเท่านั้น

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
 - ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง
 - ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
 - ศึกษาหลักการการออกแบบระบบหมอกน้ำสำหรับใช้งานกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
 - ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบหมอกน้ำและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 2) ศึกษาเงื่อนไขและสภาพปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา
 - กำหนดปัญหาที่ต้องการจะแก้ไข
 - วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ต้องการจะแก้ไข
 - สสำรวจกระบวนการผลิตและเงื่อนไขของเครื่องจักรที่ต้องการแก้ไขปัญหา
 - 3) ศึกษาและเลือกแนวทางการแก้ไขปัญหา
 - ระดมสมองเพื่อเลือกแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสม
 - ประเมินความเสี่ยงของวิธีการแก้ไขปัญหาที่เลือก
 - 4) ออกแบบระบบหมอกน้ำ
 - ศึกษาระบบหมอกน้ำที่มีใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
 - ศึกษาความเป็นไปได้และนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้
 - ออกแบบและสังเคราะห์ชุดทดลองต้นแบบระบบหมอกน้ำสำหรับการทดลอง
 - 5) วางแผนและออกแบบการทดลอง
 - ค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง
 - คัดเลือกปัจจัยและกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
 - 6) ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลอง
 - จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การวัด
 - ติดตั้งระบบหมอกน้ำ
 - ดำเนินการทดลองตามแผนงานที่กำหนดไว้
 - 7) วิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักสถิติวิศวกรรมเพื่อหาค่าการใช้งานที่ดีที่สุด
 - ศึกษาหมอกน้ำที่มีใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
 - วิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองเบื้องต้น
 - กำหนดแผนการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม
 - วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม
 - ทดสอบผลิตรจริงเพื่อยืนยันผลการทดลอง

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อทราบถึงปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของระบบหมอกน้ำที่สามารถช่วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศให้สามารถลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้ตามต้องการ
- 2) เพื่อให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในส่วน down stream ของหอกลั่น Naphtha Splitter ซึ่งอยู่ในหน่วยการผลิต Feed Fractionation ได้ตามต้องการ
- 3) เพื่อแก้ไขปัญหาลดกำลังการผลิต (slow down feed) ในช่วงของวันที่มีอากาศร้อนมากกว่าปกติ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

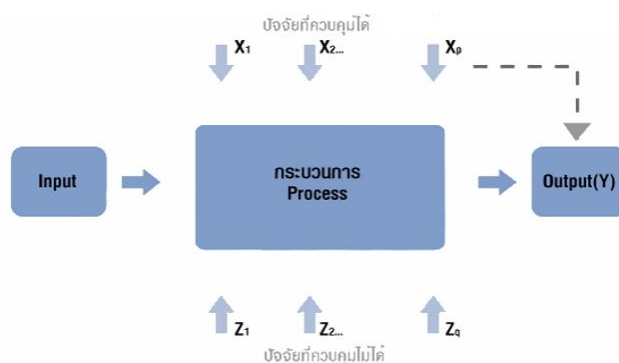
2.1.1 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการดำเนินการทดลองแบบมีการวางแผนและมีการควบคุมอย่างเป็นระบบ จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติเพื่อหาข้อสรุปว่า ปัจจัยที่นำเข้าไป (input variable) หรืออิทธิพลระหว่างตัวแปร (interaction) มีผลต่อตัวแปรที่สนใจในการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ (output response) ซึ่งข้อดีของการออกแบบการทดลองคือช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาแต่ยังคงได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือสูงอยู่ จึงสามารถนำไปใช้ประยุกต์เพื่อช่วยหาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบหรือกระบวนการที่สนใจ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้

2.1.1.1 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

- 1) ทรีทเมนต์ (Treatment) คือ วิธีปฏิบัติที่เลือกใช้ในการทดลองเพื่อที่จะวัดผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์การทดลอง
- 2) หน่วยการทดลอง (Experiment Unit) คือ หน่วยที่ใช้กำหนดทรีทเมนต์
- 3) ปัจจัย (Factor) คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งเป็นได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและปริมาณ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกคือ
 - a. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถควบคุมค่าของปัจจัยนั้น ๆ ได้ในการทดลอง
 - b. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) คือ ปัจจัยใด ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้ โดยปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) ส่วนใหญ่มักจะเป็นเรื่องของเวลา หรือเครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ และ Nuisance Variable คือตัวแปรที่จะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่จะไม่ทราบก่อน ซึ่งตัวแปรนี้สามารถกำจัดได้โดยใช้วิธีการสุ่มลำดับการทดลอง

- 4) ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ต้องการวัดค่าในการทดลอง หรือกระบวนการ สามารถเรียกได้อีกอย่างว่าตัวแปรตาม ซึ่งตัวแปรนี้จะเป็นผลลัพธ์ที่สะท้อนให้เห็นของอิทธิพลของตัวแปรอิสระ(ตัวแปรต้น) ที่ส่งผลต่อการทดลองหรือกระบวนการนั่นเอง



รูปที่ 2.1 ปัจจัยต่างๆของกระบวนการ

2.1.1.2 หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

- 1) การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การสุ่มลำดับการทดลองเพื่อให้แต่ละหน่วยการทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์ที่เท่า ๆ กัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดความเอนเอียงหรืออคติจากผู้ทำการทดลองลงและการทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้
 1. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
 2. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
 3. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)
- 2) การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่ทรีทเมนต์หนึ่งกระทำต่อหน่วยการทดลองมากกว่า 1 หน่วยการทดลอง โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความเที่ยง (Precision) ของการทดลองโดยการลดขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย
- 3) การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มการเก็บข้อมูล เพื่อลดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

2.1.1.3 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

- 1) การนิยามปัญหา (Recognition and Statement of Problem)

เป็นการศึกษาปัญหาที่แท้จริงที่ต้องการจะแก้ไข แล้วระบุปัญหาให้ชัดเจน ตรงประเด็น เพื่อที่จะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง ตรงตามวัตถุประสงค์

- 2) การเลือกปัจจัย ระดับของปัจจัยและขอบเขต (Choice of Factors and Levels)

เป็นการระบุปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองและกำหนดระดับของปัจจัยนั้น ๆ รวมถึงการกำหนดขอบเขต โดยสามารถแบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

 1. แบบกำหนดตายตัว (Fixed Levels) สามารถกำหนดระดับของปัจจัยได้
 2. แบบสุ่ม (Random Level) ไม่สามารถกำหนดค่าระดับของปัจจัยได้
 3. แบบผสม (Mixed Levels) เป็นการผสมผสานระหว่างแบบกำหนดตายตัวและแบบสุ่ม
- 3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Choice of Response Variable)

สำหรับการคัดเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการเลือกตัวแปรที่สะท้อนค่าที่ต้องการจะศึกษาและจะต้องเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการสรุปผลการทดลอง
- 4) การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Response Variable)

หลังจากที่ได้กำหนดทรีทเมนต์และตัวแปรตอบสนองแล้ว ผู้ทำการทดลองจะต้องกำหนดขนาดของการทดลอง ซึ่งก็คือจำนวนการทำซ้ำของการทดลอง ลำดับของการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่มและการบล็อกที่เหมาะสม
- 5) การดำเนินการทดลอง (Performing Experiment)

ในระหว่างที่ทำการทดลอง ผู้ทำการทดลองจำเป็นต้องทำตามแบบแผนที่วางเอาไว้อย่างเคร่งครัด ต้องตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมือวัดเพื่อที่จะได้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองน้อยที่สุด
- 6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้ทำการทดลองจะต้องนำความรู้ทางด้านสถิติวิศวกรรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลและทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ก่อนที่จะทำการสรุปผลการทดลอง
- 7) การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendation)

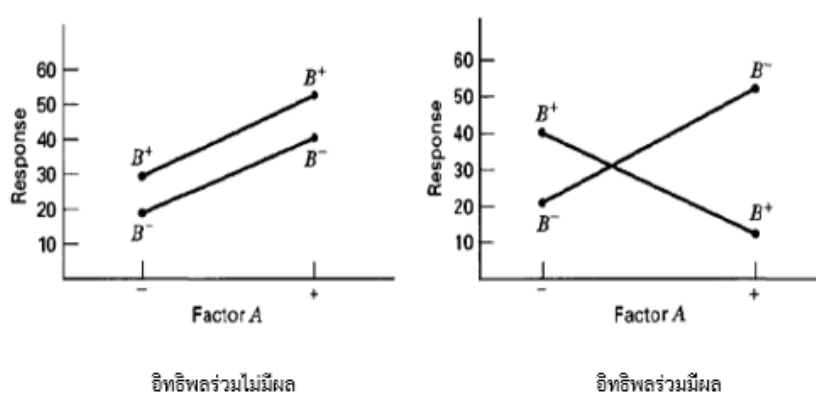
การสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล อาจแสดงในรูปแบบของตาราง กราฟ หรือแผนภูมิและเสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลได้แล้วก็ควรจะมีการทดสอบใช้งานจริงเพื่อยืนยันผลการทดลองในขั้นตอนสุดท้าย

2.1.1.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการทำการทดลองที่ศึกษาหลายปัจจัยพร้อม ๆ กัน โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect)

การทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ใช้สำหรับการตรวจสอบอิทธิพลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- 1) อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน



รูปที่ 2.2 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล และไม่มีผล (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีหลายแบบคือ

- 1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ง่ายที่สุด มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะมีการทดลองร่วมของปัจจัยเท่ากับ $a \times b$ การทดลองและจำนวนเรพลีเคต n ครั้ง
- 2) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่จะใช้ต่อเมื่อมีปัจจัยจำนวน k ปัจจัยและแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งจะถูกแทนด้วยระดับสูงต่ำของปัจจัยในแต่ละการทำซ้ำ โดยปกติการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”
- 3) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทำการทดลองสามารถละเลยอันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวได้ เนื่องจากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แบบเต็มนั้น หากมีจำนวนปัจจัยที่มากก็จะมีจำนวนการทดลองที่มากตามไปด้วย ซึ่งบางครั้งไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากไม่มีทรัพยากรหรือเวลาเพียงพอที่จะทำการทดลอง การ

ออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจึงถูกนำมาใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

- 4) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ แต่ละระดับจะถูกแทนด้วยตัวเลข -1, 0 และ 1 ซึ่งหมายถึงระดับ ต่ำ กลาง สูง ตามลำดับ

2.1.1.5 การออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

Box-Behnken ได้นำเสนอการออกแบบการทดลองแบบ 3 ระดับเพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณ การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์เมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ วิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน จะใช้หลักการของ 2^2 แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบกับจุดกึ่งกลางรวมเข้าไป ตัวอย่างของแผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคนของการศึกษาระดับ 4 ปัจจัย ดังตารางที่ 2.1 โดยแผนการทดลองจะจัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบด้วย 9 การทดลอง ซึ่งจะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 27 การทดลองโดยหลักการออกแบบแผนการทดลองจะกำหนดให้พารามิเตอร์ 2 ตัวอยู่ในรูปรหัสออร์โทกอนัลคือ +1 หรือ -1 ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือจะกำหนดให้เป็น 0 ข้อดีคือสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้นผลกระทบกำลังสอง (quadratic effect) และผลกระทบอันตรกิริยา 2 ปัจจัยได้ และเป็นแบบการทดสอบที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม และงานวิจัยต่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างแผนการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 4 ปัจจัย

ปัจจัย			
A	B	C	D
±1	±1	0	0
0	0	±1	±1
0	0	0	0
±1	0	0	±1
0	±1	±1	0
0	0	0	0
±1	0	±1	0
0	±1	0	±1
0	0	0	0

2.1.1.6 ทฤษฎีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

วิธีการหาค่าพื้นผิวตอบสนอง เป็นวิธีการคำนวณภาพแบบหนึ่งใช้เทคนิคทางสถิติและคณิตศาสตร์ มาใช้ในการปรับปรุง พัฒนาและการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับการนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขที่คาดว่าจะค่าที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์ วิธีการนี้จะคำนวณหาค่าพื้นที่ (Region) ที่ดีที่สุดโดยตรง โดยการใช้การเลือกจำนวนการทดลองแล้วทำการเลือกจุดที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้จากกลุ่มของจุดอื่นที่อยู่รอบ ๆ (Candidate Point) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจุดอื่นที่อยู่รอบ ๆ จะเป็นลักษณะคล้ายกับตะแกรงของจุดมากมาย (A Grid of Point Spaced) ที่อยู่เหนือพื้นที่การออกแบบที่เป็นไปได้ดังรูปที่ 2.3 ในการคำนวณโดยวิธี Response Surface จะอยู่ในภาพของฟังก์ชันซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

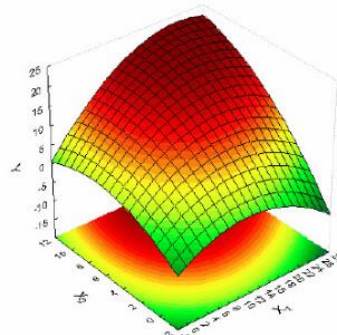
$$y = f(X_1, X_2) \quad (2.1)$$

เมื่อ X_1 และ X_2 คือ ตัวแปรที่ต้องการทดสอบ และ y คือ จุดใด ๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง ดังนั้นวิธีการพื้นผิวตอบสนอง จะค้นหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันระหว่าง y และตัวแปรที่ต้องการทดสอบ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในภาพแบบของ First-order หรือ Main effect ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_x X_x + \beta \quad (2.2)$$

หรือรูปแบบของ Second order ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

2.1.2 หลักการทางสถิติวิศวกรรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อความแน่ใจและแม่นยำในผลของการทดลอง จำเป็นที่จะต้องใช้หลักการทางสถิติเข้ามาเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์และสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยใช้วิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์ทางการตัดสินใจและการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ มีรายละเอียดดังนี้

1) การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูว่าการออกแบบการทดลองที่ได้ออกแบบขึ้นมาั้นมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ หรือจะต้องมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอและการออกแบบการทดลองที่ดีนั้นจะต้องมีความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้อยู่ให้น้อยที่สุด

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \times 100\% \quad (2.4)$$

หากคำนวณได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถทำการแก้ไขได้โดย

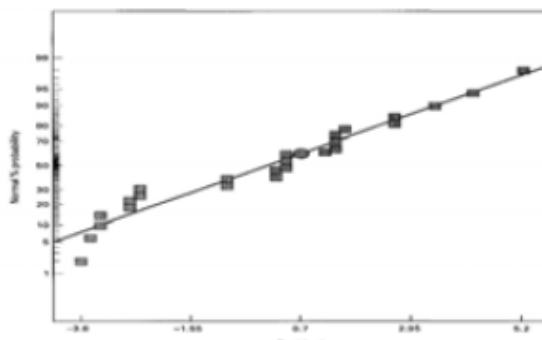
- เพิ่มจำนวนการทำซ้ำของการทดลอง
- ตรวจสอบหาปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องแล้วออกแบบการทดลองใหม่
- หากเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ เข้าไปแล้วพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังคงต่ำอยู่ หมายความว่าได้รับผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) ให้ทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

2) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

เป็นวิธีการที่ใช้ตรวจสอบให้ทราบว่าข้อมูลจากการทดสอบนั้นมีความถูกต้องและเพียงพอสำหรับการทดลองหรือไม่ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และสรุปผล ซึ่งการตรวจสอบ \mathbf{E}_{ij} มี 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การตรวจสอบการกระจายแบบการแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

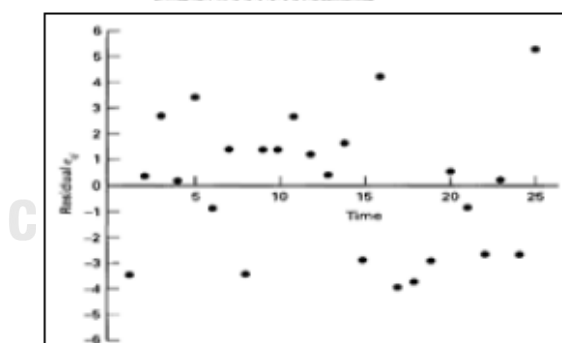
ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะมีการตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์จากตัวแปรตอบสนองว่ามีมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ ใช้วิเคราะห์ส่วนตกค้าง เพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน (\mathbf{E}) ว่ามีการกระจายแบบปกติหรือไม่ คือมีการแจกแจง $\mathbf{E}_{ij} \sim N(0, \sigma_2)$ และการสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง หากแจกแจงของความผิดพลาดนั้นเป็นแบบปกติ ลักษณะกราฟจะเป็นเส้นตรง โดยในงานวิจัยจะพิจารณาจากค่า P-Value เป็นหลัก ถ้าหาก P-Value มากกว่าค่านัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ที่กำหนดไว้ แสดงว่า \mathbf{E}_{ij} มีการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติ จำนวนข้อมูลทดลองเพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์และสรุปผล แต่ถ้า P-Value น้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนดไว้ นั่นแสดงว่า \mathbf{E}_{ij} มีการกระจายไม่เป็นแบบแจกแจงปกติ ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอที่จะสรุปผล ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การตรวจสอบการแจกแจงปกติของส่วนตกค้าง (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551)

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent)

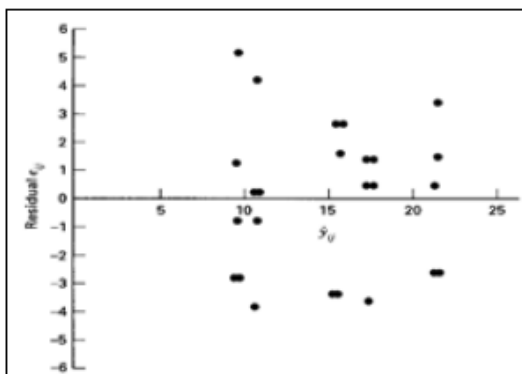
ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลทำได้โดยการพล็อตส่วนตกค้างเทียบกับลำดับเวลาในการทดลอง โดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) โดยเขียนจุดของค่าความคลาดเคลื่อนเรียงลำดับของการเก็บข้อมูลการทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) ข้อมูลจะมีลักษณะการกระจายเป็นอิสระแล้วพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดบนแผนภูมิเป็นรูปแบบอิสระกระจายตัวอยู่รอบ ๆ ค่าศูนย์หรือไม่ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551)

3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

สามารถตรวจสอบได้โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าฟิต (Fit) หรือค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ไม่เป็นรูปแบบเฉพาะ แสดงว่าข้อมูลนั้นมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน (องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551)

2.1.3 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานเชิงสถิติ คำกล่าวที่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นของตัวแปรแบบสุ่มที่มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ที่มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งค่าพารามิเตอร์ โดยสมมติฐานสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

- 1) สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) เป็นข้อสมมติหรือข้อสงสัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะต่าง ๆ ของประชากรที่ต้องการพิสูจน์ว่าจริงหรือไม่ โดยมีสัญลักษณ์คือ H_0
- 2) สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ตั้งให้แตกต่างกับสมมติฐานหลัก ซึ่งเป็นข้อความที่เสนอทางเลือกให้กับคำกล่าวของสมมติฐานหลักว่าไม่เป็นจริง โดยใช้สัญลักษณ์ H_1

โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่สมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธ (Reject H_0) นั้นจะถูกกำหนดโดยระดับของนัยสำคัญ ซึ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นที่น้อยมากที่ค่าพารามิเตอร์จะอยู่ในช่วงของการปฏิเสธสมมติฐานเมื่อสมมติฐานนั้นเป็นจริง โดยทั่วไปแล้วมักจะมีการทำการเปลี่ยนแปลงช่วงของการปฏิเสธสมมติฐานหรือระดับความมีนัยสำคัญเป็นค่าวิกฤต เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดไว้ และการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด อาจเกิดความผิดพลาดได้ 2 กรณีคือ

- 1) ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) ซึ่งความผิดพลาดนี้ เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้องหรือว่าเป็นความจริง
- 2) ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานที่ไม่เป็นจริงหรือไม่ถูกต้องว่าเป็นจริง

ตารางที่ 2.2 ความผิดพลาดในการตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานที่กำหนด	สมมติฐานที่ถูกต้อง	สมมติฐานที่ไม่ถูกต้อง
ยอมรับ	การตัดสินใจถูกต้อง	ความผิดพลาดแบบที่ 2
ปฏิเสธ	ความผิดพลาดแบบที่ 1	การตัดสินใจถูกต้อง

2.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้มาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ โดยอาศัยหลักการของ ANOVA หรือการถดถอย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการคำนวณทางเลขคณิต โดยการแยกผลรวมผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Square; SST) ออกเป็นส่วนต่าง ๆ ตามแหล่งกำเนิดหรือสาเหตุ โดยจะวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อการทดลองโดยพิจารณาที่ความแตกต่าง ซึ่งจะวัดออกมาในรูปของความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อยทำการเปรียบเทียบความต่างย่อยเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่าแสดงว่าปัจจัยนั้นทำให้เกิดความแตกต่างโดยมีผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square; MS) ซึ่งเป็นตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวนที่ดีที่สุดซึ่งกำหนดให้

$$MS = \frac{SS}{df} \quad (2.5)$$

เมื่อ SS คือ ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square)

df คือ ชั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)

สามารถอธิบายการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละแบบการทดลองได้ดังนี้

1) การทดลองแบบแฟกทอเรียล

ทำการแยกความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นสองส่วน คือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้ที่รีทเมนต์ต่างกันและความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fix Effect Model) มีดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.6)$$

โดย

$i = 1, 2, \dots, a$

$j = 1, 2, \dots, b$

$k = 1, 2, \dots, r$

เมื่อ

Y_{ijk} คือ ค่าของข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิธีปฏิบัติ i กลุ่มที่ j ครั้งที่ k

μ คือ เฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i คือ อิทธิพลที่เกิดปัจจัย A จากทรีทเมนต์ i

β_j คือ อิทธิพลของปัจจัย B จากทรีทเมนต์ j

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัย A จากทรีทเมนต์ i และปัจจัย B จากทรีทเมนต์ j

ε_{ijk} คือ ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองวิธีปฏิบัติ i กลุ่มที่ j ครั้งที่ k

ในการวิเคราะห์จะทำได้โดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตออกเป็น ส่วน ๆ โดยจะกำหนดความผันแปรทั้งหมดของค่าสังเกตในรูปของผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Squares: SST) โดยที่

$$SST = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 \right) - \left(\frac{y_{...}^2}{abn} \right) \quad (2.7)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \left(\frac{y_{...}^2}{abn} \right) \quad (2.8)$$

$$SS_B = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \left(\frac{y_{...}^2}{abn} \right) \quad (2.9)$$

ผลรวมกำลังสองของอิทธิพลร่วมกันของปัจจัย 2 ตัว (The two factor interaction sum of squares)

$$SS_{Subtotal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \left(\frac{y_{...}^2}{abn} \right) \quad (2.10)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotal} - SS_A - SS_B \quad (2.11)$$

ดังนั้นเมื่อเอาผลรวมกำลังสองของผลกระทบหลัก (Main Effect) แต่ละตัวและของอิทธิพลร่วม (Interaction) ไปหักออกจากผลรวมกำลังสองของทั้งหมด ก็จะได้ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error) ดังสมการที่ (2.12)

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal} \quad (2.12)$$

ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 โดยที่ถ้าหากค่า $F_0 \leq (F_{(\alpha, v_1, v_2)})$ แล้วถือว่าปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อตัวแปรตาม นั่นคือสามารถยอมรับ Null Hypothesis ได้

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ Two Factor Fixed Effect Model

Source of Variation (SOV)	Sun of Square (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean Squares (MS)	F_0
A	SS_A	a-1	$MS_A = SS_A / a-1$	MS_A / MS_E
B	SS_B	b-1	$MS_B = SS_B / b-1$	MS_B / MS_E
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = SS_{AB} / ab-1$	MS_{AB} / MS_E
Error	SS_E	ab(n-1)	$MS_{Error} = SS_E / ab(n-1)$	
Total	SS_T	abn-1		

2.1.5 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนออกจากของไหลที่มาจากกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการดึงความร้อนออกจากของไหลไปสู่บรรยากาศ ข้อดีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้คือไม่จำเป็นต้องใช้น้ำหรือตัวกลางที่เป็นของเหลวเพื่อใช้ในการดึงความร้อนออกจากกระบวนการซึ่งจะเหมาะสมสำหรับโรงงานขนาดใหญ่ที่ต้องการระบายความร้อนออกจากกระบวนการปริมาณมากและไม่จำเป็นต้องติดตั้งใกล้แหล่งน้ำหรือสร้างหอน้ำหล่อเย็นขนาดใหญ่เพื่อใช้สำหรับถ่ายเทความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศมีขนาดที่หลากหลายตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ แบบหม้อน้ำรถยนต์จนถึงขนาดใหญ่พิเศษมีความยาวหลายสิบเมตรที่ใช้สำหรับระบายความร้อนของโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่

2.1.5.1 ส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

จากรูปที่ 2.7 – 2.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบ Force Draft และแบบ Induce Draft ซึ่งมี 3 ส่วนประกอบหลักได้แก่

1) ส่วนกำเนิดลม

ประกอบด้วย ใบพัด (1)

2) ส่วนขับเคลื่อน

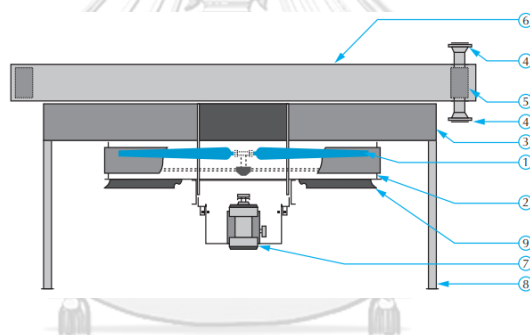
ประกอบด้วย ชุดมอเตอร์และสายพาน (7)

3) ส่วนระบายความร้อน

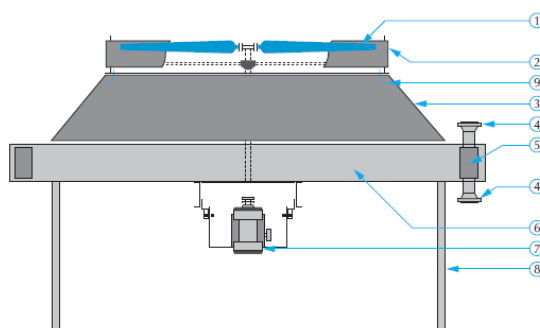
ประกอบด้วย ท่อและครีระบายความร้อน (6) เสดเตอร์ (5) ท่อขาเข้าและขาออก (4)

4) ส่วนโครงสร้าง

ประกอบด้วย เสาค้ำ (8) ห้องกาศ (3) ปากกระฆัง (9) และกรอบใบพัด (2)



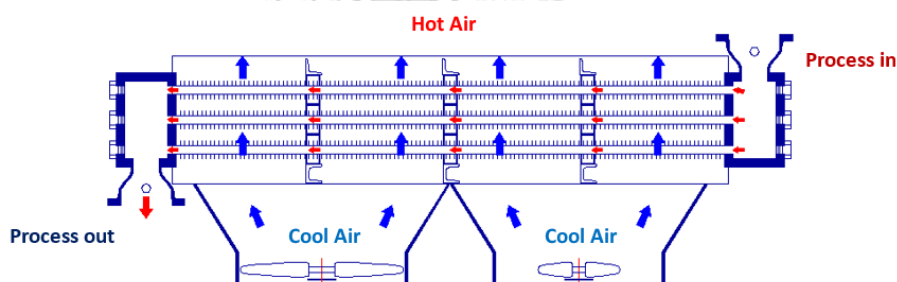
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบบ Force Draft (Hudson Products Corporation, 2007)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบบ Induce Draft (Hudson Products Corporation, 2007)

2.1.5.2 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.9 เริ่มจากของไหลที่มีความร้อนจากกระบวนการผลิตถูกส่งเข้ามาในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (process in) ในขณะที่เดียวกันอากาศโดยรอบจะถูกพัดลมดูดและเป่าให้อากาศ (cool air) ไหลผ่านครีระบายความร้อนที่ติดตั้งอยู่บนท่อที่มีของไหลร้อนไหลผ่าน ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณท่อและครีระบายความร้อน ความร้อนจะถูกระบายไปยังอากาศที่ไหลผ่านกลายเป็นอากาศร้อน (hot air) ที่ถูกระบายออกไปยังบรรยากาศ จากนั้นจะได้ของไหลขาออก (process out) ที่อุณหภูมิลดลงหรือควมแน่นเปลี่ยนสถานะจากก๊าซไปเป็นของเหลว จากหลักการทำงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศขาเข้า (cool air) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ หากอากาศที่ถูกดูดเข้าไประบายความร้อนยังมีอุณหภูมิต่ำมากเท่าไร ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็จะดียิ่งขึ้นเท่านั้น



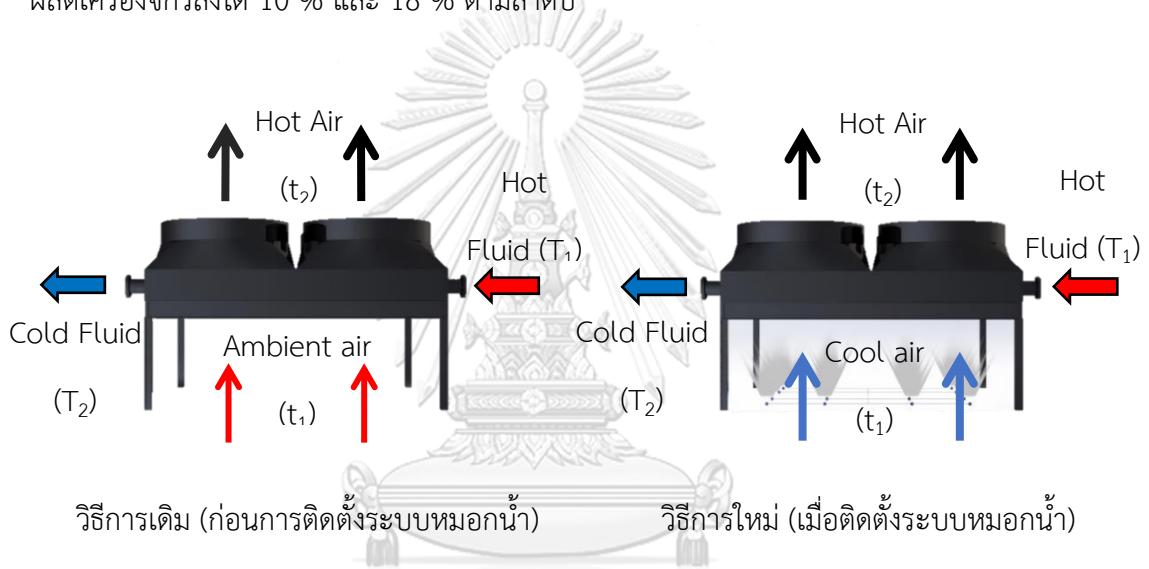
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.9 ทิศทางการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

2.1.6 หลักการทำงานของระบบหมอกน้ำ

จากรูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบวิธีการระบายความร้อน เมื่อยังไม่มีติดตั้งระบบหมอกน้ำ (รูปซ้าย) อุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศจะเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม แต่เมื่อทำการติดตั้งระบบหมอกน้ำเข้าไปบริเวณใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (รูปขวา) โดยทำการติดตั้งหัวพ่นที่สามารถพ่นหมอกน้ำขนาดประมาณ 25–50 ไมโครเมตร จะส่งผลให้อากาศบริเวณนั้นเย็นขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (สามารถเพิ่มได้สูงสุดถึง 10 °C ในขณะที่เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้มากถึง 5 กรัมต่ออากาศแห้งหนึ่ง กิโลกรัม) เมื่อหมอกน้ำถูกพัดลมระบายความร้อนดูดเข้าไปใกล้ครีระบายความร้อน หมอกน้ำจะตั้ง

ความร้อนความแฝงของอากาศโดยรอบมาระเหยตัวเองให้กลายเป็นไอน้ำ ด้วยหลักการการดึงความร้อนแฝงนี้จะทำให้อากาศใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศมีอุณหภูมิต่ำลง ส่งผลให้สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศมีค่าสูงขึ้นได้ Ellmer, 2010 ได้ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศให้มีขนาดเล็กลง 20 % ด้วยการนำระบบหมอกน้ำเข้ามาช่วยในการลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลงไป 5°C ที่ 60 %RH และหากออกแบบให้ระบบหมอกน้ำให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศบริเวณเครื่องจักรลงไปได้ 10.5°C ที่ 90 %RH จะทำให้สามารถลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศลงได้ถึง 40 % ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตเครื่องจักรลงได้ 10 % และ 18 % ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบรูปแบบวิธีการระบายความร้อน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในการสร้างระบบหมอกน้ำจะต้องได้รับการปรับตั้งความดันน้ำและอากาศอย่างเหมาะสม เนื่องจากที่ความดันอากาศและน้ำที่แตกต่างกันก็จะให้ปริมาณหมอกน้ำที่ได้แตกต่างกันออกไป งานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการสร้างหมอกน้ำด้วยการนำน้ำผสมกับอากาศผ่านและพ่นออกผ่านหัวพ่น ซึ่งจะสามารถสร้างหมอกน้ำที่มีความละเอียดประมาณ 10–20 ไมโครเมตร โดยใช้ระบบสาธารณสุขปกติของโรงงานกรณีศึกษาที่มีอยู่มาใช้ในการสร้างระบบหมอกน้ำซึ่งสามารถจ่ายน้ำและจ่ายอากาศที่ความดันสูงสุด 0.6 และ 0.5 MPa ตามลำดับ

2.1.7 ทฤษฎีทางความร้อน

2.1.7.1 ความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะของสารหมายถึง ปริมาณความร้อนที่สารนั้นสามารถรับไว้ (หรือคายออก) ต่อหนึ่งมวลของสาร แล้วทำให้สารนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) หนึ่งองศา ซึ่งมีหน่วยเป็น $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ หรือ $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.13)$$

เมื่อ

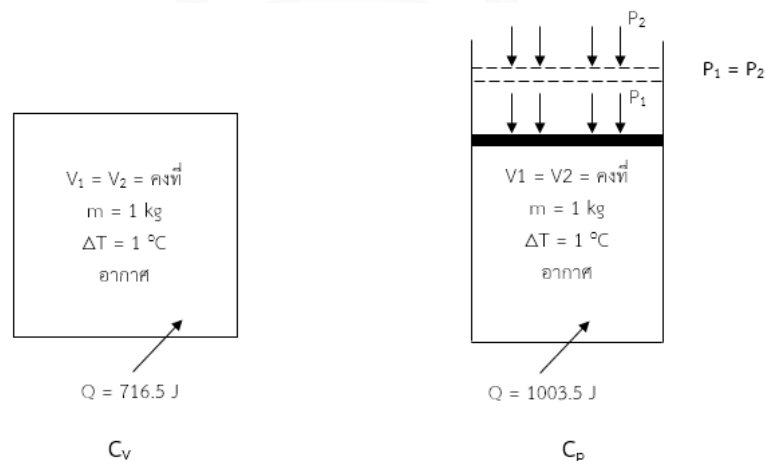
C = ความจุความร้อนจำเพาะของสาร ($\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

Q = ปริมาณความร้อนที่สารนั้นรับไว้หรือคายออกทั้งหมด (kJ)

m = มวลทั้งหมดของสารนั้น (kg)

ΔT = อุณหภูมิแตกต่างของสารหลังรับหรือคายความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

ความจุความร้อนจำเพาะของสารแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ความจุความร้อนจำเพาะปริมาตรคงที่ (C_V) และความจุความร้อนจำเพาะความดันคงที่ (C_P)



รูปที่ 2.11 ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (C_V) และความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (C_P)

ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (C_V) หมายถึงปริมาณความร้อนที่สารนั้นสามารถรับไว้ (หรือคายออก) ต่อหนึ่งหน่วยมวล แล้วทำให้สารดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น (หรือลดลง) หนึ่งองศา ภายใต้ปริมาตรคงที่ ดังรูปที่ 2.10

ความจุความร้อนเพาะที่ความดันคงที่ (C_P) หมายถึงปริมาณความร้อนที่สารนั้นสามารถรับไว้ (หรือคายออก) ต่อหนึ่งหน่วยมวล แล้วทำให้สารดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น (หรือลดลง) หนึ่งองศา ภายใต้ความดันคงที่ ดังรูปที่ 2.10

สำหรับสารที่เป็นของแข็งหรือของเหลวภายใต้อุณหภูมิกึ่งที่หนึ่ง ๆ พบว่า $C = C_P = C_V$ ดังนั้นจึงมีค่าความจุความร้อนเพียงค่าเดียว และสำหรับก๊าซอุดมคติค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

2.1.7.2 ความร้อน

สำหรับระบบหนึ่ง ๆ ความร้อนจะเกิดการถ่ายเทเมื่อมีอุณหภูมิแตกต่าง 2 บริเวณ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ รูปแบบของความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1) ความร้อนสัมผัส

คือปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งที่ทำให้สารหนึ่ง ๆ มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยไม่ทำให้สถานะของสารนั้นเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น วัตถุหนึ่งมีมวลเท่ากับ m kg ความร้อนจำเพาะเท่ากับ C kJ/kg. $^{\circ}$ C ได้รับความร้อนไปในปริมาณหนึ่งทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T_1 ($^{\circ}$ C) ไปเป็น T_2 ($^{\circ}$ C) ปริมาณความร้อนสัมผัสคือ

$$Q_s = mC\Delta T = mC(T_2 - T_1) \quad (2.14)$$

ในกรณีที่ความจุความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิจะหาปริมาณความร้อนจาก

$$Q_s = m \int_{T_1}^{T_2} C dT \quad (2.15)$$

ถ้าพิจารณาภายใต้ปริมาตรคงที่ จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) ให้แทนค่า $C = C_V$

ถ้าพิจารณาภายใต้ความดันคงที่ จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) ให้แทนค่า $C = C_P$

2) ความร้อนแฝง

คือปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งที่ทำให้แก่สารหนึ่ง ๆ (หรือดึงออกจากสาร) แล้วทำให้สถานะภายใต้อุณหภูมิกึ่งที่ พิจารณาวัตถุหนึ่งมวล m kg มีความร้อนแฝงจำนวนเท่ากับ L kJ/kg เมื่อได้รับความร้อนจำนวนหนึ่งทำให้มวลนั้นหลอมเหลว ปริมาณความร้อนแฝงนี้คือ

$$Q_l = mL \quad (2.16)$$

โดยที่ L คือค่าความร้อนแฝงจำเพาะ (kJ/kg) ที่มีกพบเสมอคือ ความร้อนแฝงของการระเหยตัวหรือควบแน่นของไอน้ำมีค่าประมาณ 2257 kJ/kg และความร้อนแฝงของการหลอมเหลวหรือแข็งตัวของน้ำแข็งมีค่าประมาณ 335 kJ/kg

3) ความร้อนจากปฏิกิริยาทางเคมี

คือพลังงานความร้อนของสารเชื้อเพลิงขณะสารเชื้อเพลิงเผาไหม้ จะปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.17)

$$Q = m_F(HV) \quad (2.17)$$

เมื่อ

m_F = มวลของสารเชื้อเพลิง (kg)

H_V = ค่าความร้อนของสารเชื้อเพลิง (kJ/kg)

เครื่องหมายความร้อน

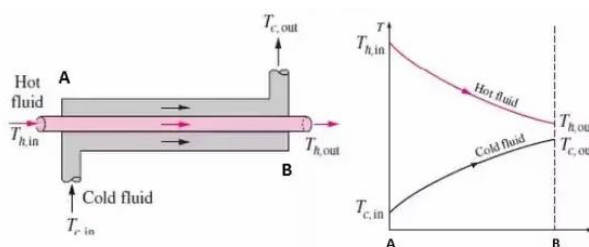
- ความร้อนมีเครื่องหมายลบ (-) เมื่อสูญเสียความร้อนหรือมีความร้อนถ่ายเทออกจากระบบ
- ความร้อนมีเครื่องหมายบวก (+) เมื่อได้รับความร้อนหรือมีความร้อนถ่ายเทเข้าระบบ

2.1.7.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้โอนถ่ายความร้อนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลทั้งสองไม่คงที่และทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในที่นี้จะขอกล่าวรูปแบบของการไหล 3 รูปแบบคือ

- 1) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทิศทางเดียว (parallel – Flow Heat Exchanger)

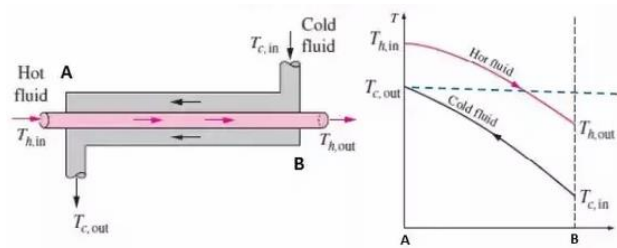
จากรูปที่ 2.12 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลทั้งสองระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อนกันจะมีการไหลไปในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของอุปกรณ์



รูปที่ 2.12 การกระจายอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทิศเดียวกัน (Quora, 2017)

2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง (Counter – Flow Heat Exchanger)

ดังรูปที่ 2.13 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลทั้งสองขณะที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกันจะมีการไหลในทิศทางสวนกันตลอดความยาวของอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

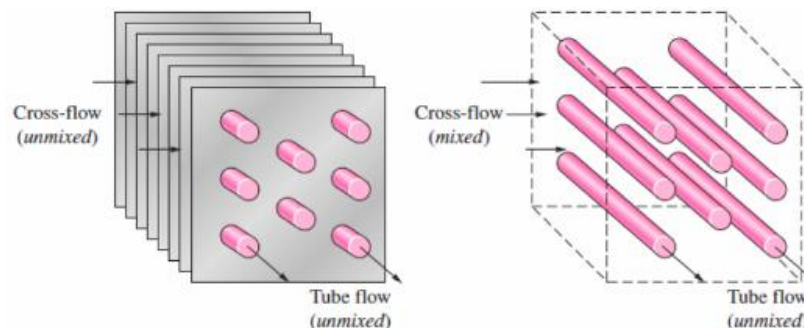


รูปที่ 2.13 การกระจายอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทิศสวนทางกัน

(Quora, 2017)

3) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางตั้งฉากกัน (Cross – Flow Heat Exchanger)

จากรูปที่ 2.14 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลทั้งสองขณะที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกันจะมีการไหลในทิศทางขวางตั้งฉากกัน สำหรับการกระจายของอุณหภูมิจะพิจารณาเช่นเดียวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน และใช้ตัวประกอบแก้ค่า (Correction Factor) ในช่วง 0.5 – 1 คู่กับค่าอุณหภูมิแตกต่างที่คำนวณจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง



รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากกัน (Quora, 2017)

การคำนวณในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

- สำหรับของไหลร้อน อัตราความร้อนถ่ายเทออก คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{m}_{hot} C_p (T_1 - T_2) \quad (2.18)$$

- สำหรับของไหลเย็น อัตราความร้อนถ่ายเทเข้า คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{cold} = \dot{m}_{cold} C_p (T_2 - T_1) \quad (2.19)$$

- หากไม่คิดความร้อนสูญเสีย จะพบว่า

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{Q}_{cold} \quad (2.20)$$

- ถ้าพิจารณาสมการอัตราความร้อนถ่ายเทจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{Q}_{cold} = \dot{Q} = UA(\Delta T_{LM}) \quad (2.21)$$

โดยที่

ΔT_{LM} คือผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference)

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \quad (2.22)$$

ถ้าพิจารณาในเทอมของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean Temperature Difference)

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{Q}_{cold} = \dot{Q} = UA(\Delta T_{AM}) \quad (2.23)$$

โดยที่

ΔT_{AM} คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเลขคณิต

$$\Delta T_{AM} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \quad (2.24)$$

2.1.7.4 สมดุลทางความร้อนของการระเหยของหมอกน้ำ

ผลของการระบายความร้อนจากระบบหมอกน้ำนั้นมาจากความร้อนแฝงของการระเหย โดยหมอกน้ำที่ระเหยนั้นจะเก็บความร้อนจากบรรยากาศรอบ ๆ ตัว ความร้อนแฝงนั้นจะถูกแลกเปลี่ยนกับความร้อนสัมผัส ปริมาณของความร้อนแฝงที่ถูกส่งผ่านมีค่า (Q_L) ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลของหมอกน้ำที่ระเหย ดังปรากฏในสมการ (2.25) อย่างไรก็ตามความร้อนสัมผัส (Q_s) ที่แลกเปลี่ยนกับอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มต้นของหมอกน้ำ (T_0) และอุณหภูมิของอากาศ (T_A) ดังปรากฏในสมการ (2.26) ในขณะเดียวกันอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ผลิตหมอกน้ำก็จะส่งผ่านความร้อนสัมผัสบางส่วน ไปยังอากาศบริเวณโดยรอบด้วยเช่นกัน

$$Q_l = Lm_{ev} \quad (2.25)$$

$$Q_s = C_p m_m (T_0 - T_A) \quad (2.26)$$

ในทางปฏิบัติจะทำการสร้างหมอกน้ำด้วยปั๊มแรงดันสูง (high pressure pump) และหัวพ่นหมอกขนาดเล็กพิเศษโดยอาศัยการจ่ายน้ำผสมกับอากาศผ่านรูขนาดเล็กมาก ๆ เพื่อให้หยดน้ำที่พ่นออกมามีการแตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ เมื่อจ่ายน้ำที่มีแรงดันสูงผ่านจะทำให้เกิดหมอกน้ำขนาด 5 - 10 ไมครอน ซึ่งเล็กมาก ทำให้สามารถระเหยได้โดยฉับพลัน (Flash Evaporation) ในกระบวนการระเหยนี้ หมอกน้ำจะดูดซับเอาความร้อนจากอากาศรอบตัว ทำให้อุณหภูมิของอากาศลดลง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

(พิทักษ์ชน วิเศษ, 2558) ทำการศึกษาการลดของเสียในการผลิตชิ้นไม้สับโดยการออกแบบการทดลอง ปัญหาเริ่มจากการพบของเสียในกระบวนการผลิตในลักษณะไม้สับไม่ได้มาตรฐาน จึงได้ทำการหาสาเหตุโดยทำการศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดของเสียขึ้น และสันนิษฐานว่ามี 4 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดชิ้นไม้เสีย จากนั้นจึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design พหุปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องต่อขนาดชิ้นไม้สับออกไป จึงเหลือเพียง 3 ที่ส่งผลต่อขนาดชิ้นไม้สับอย่างมีนัยสำคัญ คือ 1. ความเร็วรอบชุดคัดแยกเปลือกไม้ 2. องศาของใบมีดชุดสับไม้ 3. ระยะเชิงกับหมอนชุดสับไม้ จากนั้นใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Factorial Design เพื่อหาค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ได้ผลคือ ความเร็วรอบชุดคัดแยกเปลือกไม้ควรตั้งที่ 7.5 รอบต่อนาที องศาของใบมีดชุดสับไม้ควรตั้งไว้ที่ 34 องศา และระยะเชิงกับหมอนชุดสับไม้ควรตั้งที่ 3 มิลลิเมตร เพื่อนำระดับของปัจจัยไปทำการทดลองจริงพบว่า สามารถลดของเสียจาก 5.74% เหลือเพียง 2.79%

(องค์การ ศิริสวัสดิ์, 2551) ศึกษาการผลิตเทพลอนที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการผลิตเทพลอน โดยเริ่มจาก 5 ปัจจัยตั้งต้นที่คิดว่าจะมีผลต่อการผลิตเทพลอนคือ อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 1. อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 2. อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 3. อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 4. และความเร็วของผลิตภัณฑ์ จากนั้นใช้ 2^k Factorial Design เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตเทพลอนอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าเหลือเพียง 4 ปัจจัยคือ อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 1. อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 2. อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 3. และอุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 4. จากการทดลองหาค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมพบว่า อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 1 คือ

350 °C อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 2 คือ 370 °C อุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 3 คือ 400 °C และอุณหภูมิฮีทเตอร์โซน 4 คือ 280 °C จากการนำค่าระดับของปัจจัยไปใช้จริงพบว่าสามารถลดของเสียได้ถึง 33.9%

(สุสเซน คานสกุล, 2558) ศึกษากระบวนการหมักของจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีปัจจัยหลักที่ศึกษา 4 ปัจจัยคือ อัตราการให้อากาศ อัตราการกวน ความเข้มข้นของเชื้อ และเวลาการเลี้ยงเชื้อก่อนการหมัก การออกแบบการทดลองแบบ Placket-Burman (PB) ถูกใช้เพื่อออกแบบการทดลองสำหรับคัดเลือกตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการหมักแบบกะ นอกจากนั้นผลการทดลองจะถูกวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของกรดแล็กติก ผลผลิตของกรดแล็กติก อัตราการผลิตของกรดแล็กติก และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ถูกใช้เพื่อออกแบบการทดลองและวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จะถูกใช้เพื่อเครื่องมือวิเคราะห์และทำนายผล จากผลการวิเคราะห์แบบพื้นผิวตอบสนอง พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสม มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน คือ 1.9882 และ สัดส่วนของแหล่งไนโตรเจน คือ 1.2819 จากสัดส่วนอาหารเลี้ยงเชื้อจากโมเดลของ RSM ทำนายความเข้มข้นของกรดแล็กติกที่ 105.39 กรัมต่อลิตร อาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมมีองค์ประกอบคือ กลูโคส 10 กรัมต่อลิตร ยีสต์สกัด 10.37 กรัมต่อลิตร และ แอมโมเนียมคลอไรด์ 3.37 กรัมต่อลิตร โดยสูตรอาหารนี้สามารถลดปริมาณยีสต์สกัดได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนสุดท้าย การทำนายของโมเดลจะถูกเปรียบเทียบกับ การทดลองจริงเพื่อดูความสมเหตุสมผลของโมเดล จากการทดลองกรดแล็กติกที่ได้เข้มข้นสูงสุดที่ 106.14 กรัมต่อลิตร ซึ่งพิสูจน์ว่าโมเดลนี้สมเหตุสมผล

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดอุณหภูมิของอากาศด้วยระบบหมอกน้ำ

(Ellmer, 2010) ทำการศึกษาการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศด้วยระบบหมอกน้ำเข้ามาทดแทนด้วยวิธีการทำซิมูลेशन เริ่มต้นจากปัญหาว่าในบางวันของช่วงฤดูร้อนในต่างประเทศ จะเกิดปัญหาประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศลดลง ทำให้โรงงานต้องซื้อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาขนาดใหญ่กว่าความต้องการมาเพื่อไว้รองรับวันที่มีอากาศร้อนจัด ซึ่งจะมีอยู่ไม่กี่วันในหนึ่งปี การที่จะต้องซื้อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ ทำให้ต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมาก Marc Ellmer จึงทำการศึกษาค้นคว้าตัวอย่างในขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยน

ความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่หอกลับ propylene splitter ของโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งทางตอนเหนือของยุโรป โดยทำการชิมุเลชันเทียบกัน 3 กรณี คือ 1. ออกแบบตามปกติ ไม่มีระบบหมอกน้ำ กำหนดอุณหภูมิอากาศไหลเข้าอุโมงลมเป็น 35°C ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 50% 2. ออกแบบจำลองสภาวะการมีระบบสเปรย์ละอองน้ำ ช่วยลดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบลง 5°C ทำให้อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าอุโมงลมเป็น 30°C ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 60% 3. ออกแบบจำลองสภาวะการมีระบบหมอกน้ำ ช่วยลดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบลง 10.5°C ทำให้อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าอุโมงลมเป็น 24.5°C ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 90% โดยกำหนดอุณหภูมิขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศเท่ากับทุกกรณี ผลการทำชิมุเลชันพบว่า การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศในกรณีติดตั้งระบบสเปรย์ละอองน้ำ ช่วยลดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบลง 5°C ทำให้อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าอุโมงลมเป็น 30°C ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 60% จะทำให้ช่วยลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศลง 20% และออกแบบจำลองสภาวะการมีระบบหมอกน้ำ ช่วยลดอุณหภูมิของอากาศโดยรอบลง 10.5°C ทำให้อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าอุโมงลมเป็น 24.5°C ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 90% จะทำให้ช่วยลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศลง 40% คิดเป็นการลดเงินลงทุนลงได้ 10% และ 18% ตามลำดับ

(Jia, K.T., Xiangsheng, Xiaofeng, & Hongyu, 2012) ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (air-cooled chillers) จุดประสงค์การวิจัยคือระบบหมอกน้ำมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศอย่างไร โดยทำการทดลองในโรงงานกรณีศึกษาที่ตั้งอยู่ในบริเวณเขตร้อนแห่งหนึ่ง ซึ่งมีการติดตั้งระบบหมอกน้ำในระบบทำความเย็นแต่ไม่มีการศึกษาข้อดีข้อเสียของระบบนี้ ผลการทดลองพบว่าระบบหมอกน้ำสามารถลดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้า condenser ได้ถึง 9°C ส่งผลให้อุณหภูมิการควบแน่น (condensing temperature) ใน condenser ลดลงไป 7.2°C และ chiller coefficient of performance เพิ่มขึ้นอีก 18.6%

(Craig, N., Masatoshi, and Minako, & Takeo, 2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการระเหยของสเปรย์หมอกน้ำของพัลลมไอเย็น เพื่อช่วยลดอุณหภูมิบรรยากาศสำหรับทางเดินในประเทศญี่ปุ่น โดยทำการออกแบบชุดสเปรย์หมอกน้ำและติดตั้งเครื่องมือสำหรับการตั้งค่าปัจจัยและอุปกรณ์การวัดค่าต่าง ๆ เช่น ชุดปรับอุณหภูมิของสเปรย์หมอกน้ำ หลังจากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำที่จ่ายเข้าหัวพ่นส่งผลดีต่อระบบการสเปรย์หมอกน้ำคือ 1. อัตราการไหลของมวลหมอกน้ำที่ตีกว่าเพราะขนาดของ droplet ที่เล็กกว่า 2. เส้นผ่านศูนย์กลางของหมอกน้ำที่เล็กกว่า 3. ส่งผลให้ระเหยระเหยทำได้ดีกว่า 4. สูญเสียความเย็นสุทธิเพียงเล็กน้อย ดังนั้น

ยิ่งอุณหภูมิของน้ำที่จ่ายเข้าหัวพ่นยิ่งเข้าใกล้จุดเดือดของน้ำมากเท่าไร จะทำให้หมอกน้ำระเหยได้ง่ายมากขึ้น ส่งผลให้หมอกน้ำสามารถดึงความร้อนแฝงจากอากาศโดยรอบได้ง่ายขึ้น

(Yu, Ho, Chan, & Sit, 2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบหมอกน้ำในการใช้งาน precooling condenser air ของ air cooled chiller ขนาด 282 kW ที่มีโหมดการเดินเครื่อง 2 รูปแบบคือ normal mode และ variable speed control mode การทดลองโดยการติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อวัดค่าดังต่อไปนี้ 1. Electric Power 2. Chilled Water Flow Rate 3. Fan Power Frequency 4. Refrigerant Pressure 5. %RH 6. Temperature จากนั้นทำการทดลองใช้ระบบหมอกน้ำและเก็บค่า พบว่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับสภาพอากาศมากกว่าการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ของ air cooled chiller เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจริงกับการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า มีค่าเบี่ยงเบนไปอย่างมากจากทฤษฎีเพราะหมอกน้ำที่ถูกสเปรย์ออกมาปะทะกับครีระบายความร้อนของ air condenser จะระเหยตัวได้ดีกว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนของหมอกน้ำกับอากาศโดยตรง เนื่องจากมีความร้อนของครีระบายความร้อนเข้ามาช่วยในการระเหยตัวของหมอกน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบหมอกน้ำเพื่อช่วยในการ precooling condenser air ของ air cooled chiller ช่วยเพิ่ม coefficient of performance ของ air cooled chiller 0.36–8.86% ในโหมด normal และ 0.34–10.19% ในโหมด และ variable speed control

(Fahmy & Nabih, 2016) ยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศ และการเปลี่ยนแปลงภาระความร้อนที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศและพบว่า การลดลงของอุณหภูมิอากาศบริเวณรอบเครื่องจักรจะช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศได้ ซึ่งการติดตั้งระบบหมอกน้ำ เพื่อช่วยลดอุณหภูมิอากาศบริเวณเครื่องจักรนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้อากาศในการระบายความร้อนต่าง ๆ

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

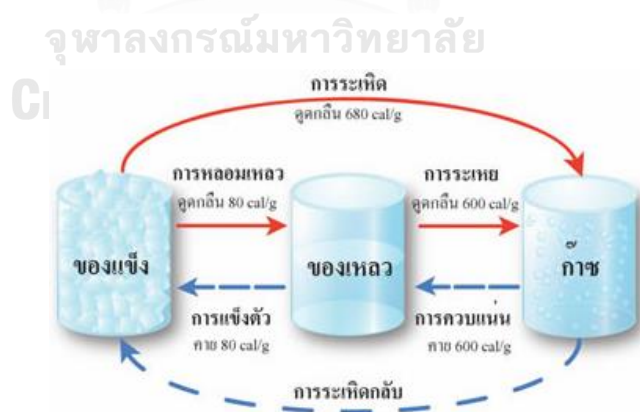
3.1 ศึกษาความเป็นไปได้

การศึกษความเป็นไปได้ของการใช้งานระบบหมอกน้ำกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาถึงความเหมาะสมและการประเมินผลประโยชน์ โดยใช้หลักพิจารณา 4 ข้อดังนี้

3.1.1 ความเป็นไปได้ด้านเทคนิค (Technical Feasibility)

1) พิจารณาเชิงทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน

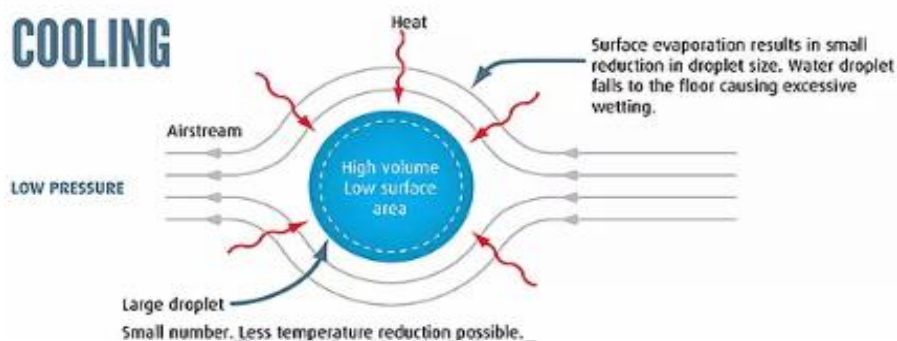
ระบบหมอกน้ำนั้นมีการใช้งานในการระบายความร้อนอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนยกตัวอย่างเช่น การใช้ระบบหมอกน้ำเพื่อลดอุณหภูมิบรรยากาศสำหรับโรงเรือนหรือร้านอาหารต่าง ๆ การใช้ระบบหมอกน้ำสำหรับการควบคุมอุณหภูมิในโรงเห็ด และใช้ในการประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Jia et al., 2012) จึงได้มีแนวคิดในการนำระบบหมอกน้ำลักษณะเดียวกันมาประยุกต์ใช้ในการลดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนแฝง ซึ่งเป็นหนึ่งในวัฏจักรของการเปลี่ยนสถานะของน้ำ



รูปที่ 3.1 วัฏจักรของการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561)

จากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายถึงหลักการระเหยกลายเป็นไอของน้ำได้ว่า เมื่อน้ำที่อยู่ในสถานะของเหลวได้รับพลังงานจากภายนอกจะทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณา

ระบบหมอกน้ำแล้วนั้น พบว่าหากทำการพ่นหมอกน้ำที่พร้อมระเหยกลายเป็นไอไปยังอากาศบริเวณที่ต้องการจะลดอุณหภูมินั้น หมอกน้ำจะทำการดึงพลังงานความร้อนจากอากาศบริเวณโดยรอบมาทำการระเหยตัวเองให้กลายเป็นไอน้ำ ดังนั้นเมื่ออากาศถูกดึงพลังงานความร้อนออกจึงทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิที่ลดลง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนของหยดน้ำและอากาศ (biOx, 2020)

2) พิจารณาในเชิงทรัพยากร

- อุปกรณ์และแหล่งทรัพยากร

ในการใช้งานระบบหมอกน้ำจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบจ่ายน้ำและอากาศที่มีความดัน เพื่อนำไปผลิตเป็นหมอกน้ำ ซึ่งโรงงานกรณีศึกษามีการติดตั้งระบบจ่ายน้ำและอากาศอยู่ในระบบ plant utility ไว้ตามกระบวนการผลิตต่าง ๆ สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องทำการสร้างระบบใหม่ ทำให้สามารถออกแบบระบบหมอกน้ำที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายที่มีอยู่ได้

- บุคลากร

ในการใช้งานระบบหมอกน้ำนั้นไม่มีความซับซ้อน สามารถให้พนักงานปฏิบัติการที่มีอยู่ทำงานกับระบบหมอกน้ำได้ เนื่องจากพนักงานปฏิบัติการทุกคนได้รับการอบรมและมีความเชี่ยวชาญกับกระบวนการผลิต พนักงานปฏิบัติการส่วนใหญ่มีประสบการณ์การทำงานในกระบวนการผลิตมากกว่า 10 ปี

3) พิจารณาเชิงผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและเครื่องจักร

ระบบหมอกน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายใต้อุโมงค์ลมเท่านั้น ดังนั้นจะไม่มี การเข้าไม่ยุ่งเกี่ยวกับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตใด ๆ ทำให้การทดลองใช้งานระบบนี้จะไม่ส่งผลเสียใด ๆ ต่อกระบวนการผลิต แต่เนื่องจากการใช้งานระบบหมอกน้ำนั้นจะทำให้เกิด

ความชื้นขึ้นในบริเวณรอบ ๆ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าหากมีความชื้นมากเกินไป จะทำให้สายพานที่ทำหน้าที่เป็นระบบขับเคลื่อนของพัดลมจะขึ้นและมีอายุการใช้งานที่สั้นลงกว่าปกติได้ ดังนั้นในการออกแบบจุดติดตั้งระบบหมอกน้ำ จะต้องพิจารณาถึงระยะการระเหยของหมอกน้ำ โดยหมอกน้ำจะต้องระเหยและไม่สะสมเป็นหยดน้ำเกาะที่สายพาน

4) พิจารณาเชิงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากระบบหมอกน้ำนั้นมีการใช้งานเพียงน้ำและอากาศจึงไม่มีของเสียหรือสารเคมีที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายในโรงงานกรณีศึกษา

3.1.2 ความเป็นไปได้ด้านการปฏิบัติงาน (Operational Feasibility)

1) วิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน

การที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศเข้ามีค่าสูงนั้น ทำให้กระบวนการผลิตต้องลดกำลังการผลิตลง ส่งผลให้สูญเสียโอกาสในการผลิต ดังนั้นหากมีระบบหมอกน้ำเข้ามาช่วยลดอุณหภูมิอากาศเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นได้ ก็ทำให้ไม่ต้องลดกำลังการผลิตและไม่สูญเสียโอกาสในการผลิตในช่วงเวลาดังกล่าว

2) ผลกระทบต่อการปฏิบัติงาน

การติดตั้งระบบหมอกน้ำไปที่บริเวณใต้อุโมงค์ลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศซึ่งเป็นพื้นที่ที่พนักงานปฏิบัติการใช้ในการยืนหรือเข้าไปเดินตรวจสอบอุปกรณ์ จะส่งผลต่อความยากในการเข้าถึงพื้นที่ปฏิบัติงาน เพราะจะมีหมอกน้ำสเปรย์อยู่ตลอดเวลาหากมีการเปิดใช้งาน ดังนั้นผู้พัฒนาระบบจำเป็นต้องคิดวิธีการควบคุมพื้นที่ และแจ้งให้ทางพนักงานปฏิบัติการได้ทราบถึงวิธีการปฏิบัติหากต้องการที่จะเข้าตรวจสอบพื้นที่ในขณะที่ระบบหมอกน้ำทำงานอยู่

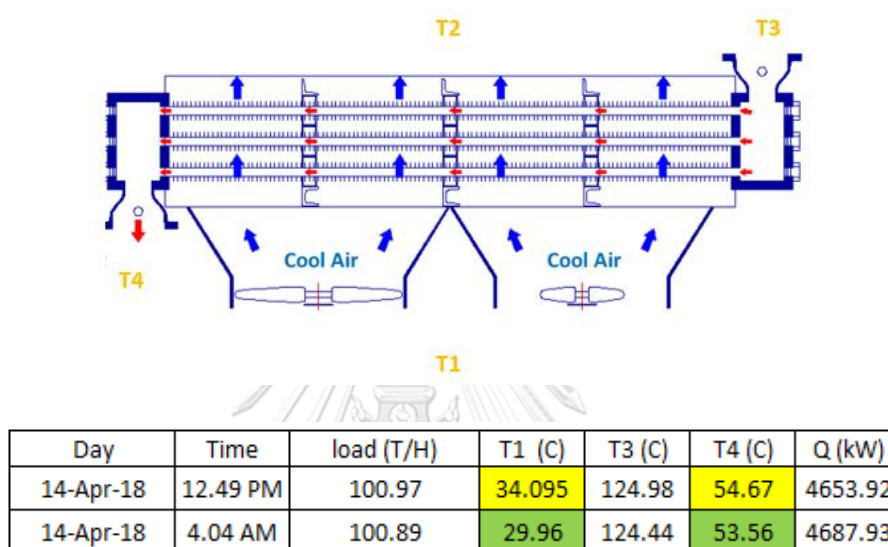
3) ความสามารถของบุคลากรที่ทำการพัฒนาระบบหมอกน้ำ

ในขั้นตอนทบทวนการออกแบบและการประเมินความเสี่ยงจะต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้จัดการฝ่ายผลิตและทีมงานบริหารการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบไปด้วยวิศวกรจากหน่วยงานวิศวกรรม หน่วยงานเทคนิคกระบวนการ หน่วยงานปฏิบัติการ และหน่วยงานซ่อมบำรุง เพื่อร่วมพิจารณาจุดเสี่ยงและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการเดินเครื่องจักร

3.1.3 ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility)

1) พิจารณาด้านผลประโยชน์จากกระบวนการ

อ้างอิงจากผลต่างอุณหภูมิของอากาศที่ต่างกันในช่วงเวลาที่ร้อนที่สุดและเย็นที่สุดของวัน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการเก็บค่าจริงในเดือนเมษายน 2561 และคำนวณความสามารถในการเพิ่มกำลังการผลิตในช่วงที่เย็นที่สุดของวันเปรียบเทียบกับช่วงที่ร้อนที่สุดของวันได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.3 เมื่อคำนวณตามทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า ตอนเที่ยงวัน ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า (T_1) = 34 °C อากาศขณะนั้นมีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากระบบได้ 4653.92 kW และเทียบกับตอนตีสี่ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า (T_1) = 29 °C อากาศขณะนั้นมีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากระบบได้ 4687.93 kW ซึ่งมากกว่าตอนเที่ยงวัน จากนั้นทำการคำนวณตามหลักทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการคิดย้อนกลับจากสูตร $q = mc_p\Delta T$ โดยคำนวณว่าหากเพิ่มกำลังการผลิต (T/H) ไปจนอุณหภูมิกระบวนการผลิตขาออก (T_4) เพิ่มขึ้นจาก 53.56 °C ไปจนถึง 54.67 °C จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้เท่าใด ดังสมการที่ (3.1) – (3.3)

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3.1)$$

$$4687.93 = \dot{m}(2.36)(124.44 - 54.67) \quad (3.2)$$

$$\dot{m} = 101.709 \text{ T/H} \quad (3.3)$$

จากการคำนวณสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้อีก 0.73 ตันต่อชั่วโมง หากนำมาคูณราคาผลิตภัณฑ์ที่ 3,000 บาทต่อตัน คิดเป็นเงิน 2,200 บาทต่อชั่วโมง หรือ 53,00 บาทต่อวัน

การคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณจากผลต่างของอุณหภูมิของอากาศบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ 5 °C ซึ่งคาดว่าระบบหมอกน้ำจะให้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิอากาศที่ลดลงใกล้เคียงกัน

2) พิจารณาเงินลงทุนระบบหมอกน้ำ

ระบบหมอกน้ำประกอบด้วยอุปกรณ์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการอุปกรณ์

อุปกรณ์	ราคา
หัวพ่น จำนวน 16 หัว	128,000 บาท
อุปกรณ์จับยึดหัวพ่น	10,000 บาท
ข้อต่อและสาย PU	20,000 บาท

ระบบหมอกน้ำจะใช้เงินลงทุนเพียง 158,000 บาท เนื่องจากไม่ต้องติดตั้งเครื่องอัดอากาศและเครื่องสูบน้ำแรงดันสูง เพราะสามารถใช้งานทรัพยากรเหล่านี้จากระบบ plant utility จึงสามารถประหยัดค่าอุปกรณ์และการสร้างแหล่งทรัพยากรนี้ได้

3) พิจารณาระยะคืนทุน

เนื่องจากระบบหมอกน้ำจะถูกใช้งานเฉพาะเวลากลางวันในช่วง peak load ไม่ได้ถูกใช้งานตลอดเวลา จึงกำหนดระยะเวลาในการคืนทุนในรูปแบบการใช้งานเป็นชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณระยะคืนทุนได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ชั่วโมง)} = \text{เงินลงทุน} / \text{ราคาผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มต่อชั่วโมง} \quad (3.4)$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ชั่วโมง)} = 158,000 / 2,200 \quad (3.5)$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ชั่วโมง)} = 71.82 \text{ ชั่วโมง} \quad (3.6)$$

ดังนั้นระบบหมอกน้ำจะคุ้มทุนที่การใช้งาน 71.82 ชั่วโมง

3.1.4 การประเมินความเสี่ยง

ในการที่จะตัดแปลงอุปกรณ์เดิมหรือติดตั้งอุปกรณ์ชนิดใหม่เข้าไปในกระบวนการผลิตนั้น จำเป็นที่จะต้องได้รับอนุมัติในหลักการผ่านกระบวนการบริหารการเปลี่ยนแปลง (Management of Change) รวมการประเมินความเสี่ยงจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องก่อนที่จะกระทำการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในกระบวนการผลิต การประเมินความเสี่ยงจะมองไปถึงหลักการของเปลี่ยนแปลงและผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากทำการเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ โดยจะคำนวณคะแนนของความเสี่ยงจากการพิจารณา 2 ตัวแปรคือ 1. ความรุนแรงของผลกระทบ (Consequence Rating) 2. ความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุดังกล่าว (Likelihood Rating) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Risk Assessment Matrix ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงในโรงงานกรณีศึกษา

	General Term (No.)	How often?	Hazard Severity Rating				
	Likelihood	Frequent (5)	Has happened more than once per year in the same location	Low	Medium	High	Extreme
Likely (4)		Has happened at the location more than once per year	Low	Medium	High	High	Extreme
Possible (3)		possible to happen in the company group	Low	Low	Medium	High	High
Unlikely (2)		possible to happen in the industry	Very Low	Low	Low	Medium	Medium
Impossible (1)		unlikely to occur	Very Low	Very Low	Low	Low	Low
Consequence	Severity No.		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	People		No injury or first aid case	Medical treatment or restricted to work	Loss time injury	single fatality or permanent total disabilities	More than one fatality
	Environment		No effect	Minor Effect	Moderate Effect	Major Effect	Massive Effect
	Economic		< 0.3 MTHB	0.3 - < 3 MTHB	3 - < 30 MTHB	30 - < 300 MTHB	> 300 MTHB
	Social		No impact to community	Minor impact with short term recovery	Moderate impact with long term recovery	Major impact	Massive impact

ข้อมูลสำหรับการประเมินความเสี่ยงของการติดตั้งระบบหมอกน้ำมีดังต่อไปนี้

- 1) คำอธิบายการเปลี่ยนแปลง (Plant Change Description)
 - ติดตั้งระบบหมอกน้ำบริเวณใต้อุโมงค์ลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศหมายเลข 100-AC-3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
- 2) ข้อมูลที่ต้องพิจารณาในการเปลี่ยนแปลง (Identify Information for Assessment)
 - ข้อมูลเครื่องจักร (Equipment Data Sheet)
 - ข้อมูลระบบท่อน้ำและอากาศ (Instrument Air) ในโรงงานกรณีศึกษา

- Engineering Flow Diagram
 - ข้อมูลการออกแบบและติดตั้งระบบหมอกน้ำ
 - ข้อมูลการเพิ่มและลดกำลังการผลิต
 - ประวัติความเสียหายรูปแบบต่าง ๆ ในอดีตของเครื่องจักร
- 3) ข้อเสนอแนะสำหรับการเปลี่ยนแปลง (Identify recommendations related to the change)
- ทบทวนการออกแบบระบบหมอกน้ำว่าเป็นไปอย่างถูกต้องและเหมาะสมหรือไม่
 - ทบทวนปริมาณการใช้ น้ำและอากาศ (Instrument Air) ว่าจะไม่กระทบต่อการเดินเครื่องจักรอื่น
 - ให้วิศวกรวัสดุทบทวนเรื่อง การเกิดปฏิกิริยาของหมอกน้ำที่จะเกิดขึ้นกับครีบอลูมิเนียม (fin tube)
 - ทบทวนเส้นทางการเข้าออกของผู้ปฏิบัติงานว่าการติดตั้งระบบสเปร์หมอกน้ำจะไม่ขวางทางการทำงานบริเวณโดยรอบ
 - ทบทวนประโยชน์ที่ได้รับหลังจากการติดตั้ง
- 4) ผลกระทบที่เป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลง (Potential Consequences)
- สายพานขับเคลื่อนอาจจะได้รับผลกระทบจากหมอกน้ำที่เข้าปะทะสายพานโดยตรง ส่งผลให้สายพานมีอายุการใช้งานสั้นลง ทำให้ต้องเสียค่าเปลี่ยนสายพานครั้งละ 20,000 บาท
- 5) ความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น (likelihood)
- เคยเกิดขึ้นในโรงงานกรณีศึกษา แต่เกิดขึ้นจากการนำน้ำไปฉีดโดยตรงบริเวณสายพานเป็นเวลาหลายสัปดาห์เพื่อลดอุณหภูมิในท่อของกระบวนการผลิตในขณะที่ทำการซ่อมบำรุงอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 6) สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสี่ยง (Cause)
- หมอกน้ำที่เข้ากระทบกับสายพานโดยตรง
- 7) มาตรการป้องกัน (Preventive and Corrective Measures)
- ใช้หัวสเปร์น้ำ (Nozzle) ที่มีความละเอียดของหมอกน้ำสูง ทำให้ขนาดของหยดน้ำเล็กลงและระเหยก่อนที่จะไปปะทะกับสายพาน
 - ตั้งค่าความดันน้ำและความดันอากาศให้เหมาะสม ไม่ทำให้เกิดหมอกน้ำที่มีความชื้นมากจนเกินไป
- 8) ประเมินความเสี่ยงจากตารางความเสี่ยง (Hazard Severity Rating)
- พิจารณาในแง่ของผลกระทบ (Potential Consequences)

การติดตั้งระบบหมอกน้ำอาจจะทำให้อายุการทำงานของสายพานที่ชุดขับเคลื่อนของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศสั้นลง ซึ่งจะต้องเสียค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร เป็นเงินประมาณ 20,000 บาทต่อครั้ง เมื่อพิจารณาในตารางด้านผลกระทบ (Consequence) จะอยู่ในหัวข้อ ตัวเลขความรุนแรงด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic severity number) (1) ส่วนในด้านของผลกระทบต่อผู้คน (people) สิ่งแวดล้อม (environment) และ สังคม (social) นั้น ไม่มีผลกระทบใดๆ จึงไม่ถูกพิจารณา

- พิจารณาในแง่ของความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น (Likelihood)

การเสียหายจากความชื้นของสายพานชุดขับเคลื่อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศนั้น เคยเกิดขึ้นมาแล้วในอดีต แต่เป็นจากกรณีที่ทำกรน้ำเข้าไปบริเวณสายพานโดยตรงเป็นระยะเวลาหลายสัปดาห์ ทำให้สายพานทำงานอยู่บนเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมนานจนเกินไป จึงทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสิ่งที่จะทำการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาในตารางด้าน likelihood จะตกที่ likely to often (4) คือมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นซ้ำได้

เมื่อนำคะแนนของทั้งผลกระทบ (Potential Consequences) และความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น (Likelihood) มาพิจารณากับ Risk Assessment Matrix แล้ว พบว่าความเสี่ยงของความเปลี่ยนแปลงครั้งนี้อยู่ที่ ระดับต่ำ (Low) ซึ่งตามนโยบายของโรงงานกรณีสึกษานั้นยินยอมให้ทำการเปลี่ยนแปลงครั้งนี้ได้ภายใต้ข้อแนะนำของกระบวนการบริหารการเปลี่ยนแปลง (Management of Change)

3.1.5 ทางเลือกอื่น ๆ ในการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

1) การขยายขนาดเครื่องจักร

หากในอนาคตมีแผนในการเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นไปอีกในปริมาณมากและคุ้มค่ากับการลงทุนมูลค่าหลายล้านบาท ก็สมควรที่จะทำการขยายขนาดเครื่องจักรเพื่อให้รองรับกับกำลังการผลิตจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเครื่องจักรที่ใหม่จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี และเทคโนโลยีที่ใหม่กว่า ซึ่งจะมีผลเรื่องความคุ้มค่าในการใช้พลังงานในการเดินเครื่องจักร

2) การทำความสะอาดภายในของท่อระบายความร้อน



รูปที่ 3.4 การทำความสะอาดท่อระบายความร้อน (TUBETECH, 2020)

การทำความสะอาดภายในของท่อระบายความร้อนสามารถทำได้ในช่วงซ่อมบำรุงใหญ่ ซึ่งจะดำเนินการพร้อมกับการวัดค่าความหนาของท่อเพื่อประเมินอายุการใช้งานของท่อ วิธีการนี้จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มาก เนื่องจากหากภายในท่อเกิดตะกอนสะสมจะทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับอากาศน้อยลง แต่การทำความสะอาดภายในท่อนี้มีข้อจำกัดคือต้องหยุดกระบวนการผลิตทั้งหมด ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะดำเนินการในช่วงการเดินเครื่องปกติ ดังนั้นการทำความสะอาดนี้จึงกำหนดให้อยู่ในรูปแบบแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางทำการล้างทุก ๆ ครั้งที่มีการซ่อมบำรุงใหญ่ (4 ปี)

3) การทำความสะอาดครีบบระบายความร้อน



รูปที่ 3.5 ภาพก่อนและหลังการทำความสะอาดครีบบระบายความร้อน

จากรูปที่ 3.5 การทำความสะอาดครีบบระบายความร้อนเป็นวิธีการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่สามารถทำได้โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิตทั้งหมด เพียงแค่หยุดการเดินเครื่องจักรตัวที่ต้องการจะทำความสะอาดและใช้ผงเคมีฟ้นไปยัง

ครีบบระบายความร้อนเพื่อทำความสะอาด แต่ในบางกรณีที่ครีบบระบายความร้อนมีความสกปรกมาก เช่น มีหินปูนเกาะหนาก็ไม่สามารถทำความสะอาดได้ จำเป็นที่จะต้องทำการเปลี่ยนครีบบระบายความร้อนใหม่ ซึ่งสามารถทำได้ในช่วงซ่อมบำรุงใหญ่เท่านั้น

4) การเพิ่มประสิทธิภาพพัดลมระบายความร้อน



รูปที่ 3.6 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน

การเพิ่มประสิทธิภาพพัดลมระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ พัดลมระบายอากาศเป็นอุปกรณ์หลักที่จะช่วยให้อากาศสามารถไหลผ่านครีบบระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง หากพัดลมเก่าและเสียหายก็จะทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงตามไปด้วย การเปลี่ยนพัดลมแบบแอร์โตนามิกส์รุ่นใหม่ก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เครื่องจักรได้โดยใช้เงินลงทุนประมาณ 1 ล้านบาท วิธีนี้เป็นวิธีที่ดีและง่ายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงสุดถึง 30% (Giammaruti, 2004) แต่มีข้อจำกัดคือสามารถดำเนินการติดตั้งพัดลมแบบแอร์โตนามิกส์ชนิดใหม่ได้เฉพาะช่วงงานซ่อมบำรุงใหญ่เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถดำเนินการแก้ไขได้ทันที

3.2 การออกแบบระบบหมอกน้ำ

3.2.1 ข้อมูลและลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบบ induce draft จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งใช้สำหรับการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์พลอยได้ (condensate residue) ที่กลั่นได้จาก ในหน่วยการผลิต Feed Fractionation Unit โดยมีข้อมูลการออกแบบดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ACHE type	Induce draft	
No. of Bays	2	bays
Surface per unit – finned tube	13,880.8	m ²
Bare tubes	589.59	m ²
Heat exchanged	7,990	kW
Finned tube transfer rate	15.21	W/m ² °C
Bare tube transfer rate	358.16	W/m ² °C
Clean	457.3	W/m ² °C

3.2.2 ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดระยอง

เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดระยอง งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเกี่ยวกับสภาพอากาศของพื้นที่ที่ทำการทดลอง โดยลักษณะสภาพอากาศมีดังต่อไปนี้ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2563)

- **ที่ตั้งและอาณาเขต**

จังหวัดระยองเป็นจังหวัดในภาคตะวันออกของประเทศไทยตั้งอยู่ประมาณละติจูดที่ 12° 37' เหนือลองจิจูด 101° 20' ตะวันออก ห่างจากกรุงเทพมหานครตามเส้นทางรถยนต์ประมาณ 179 กิโลเมตร มีชายฝั่งทะเลยาวประมาณ 100 กิโลเมตร มีเนื้อที่ 3,552 ตารางกิโลเมตร และมีอาณาเขตติดต่อกับบริเวณใกล้เคียงดังนี้ ทิศเหนือ ติดต่อกับ จังหวัดชลบุรี ทิศใต้ ติดต่อกับ ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย ทิศตะวันออก ติดต่อกับ จังหวัดจันทบุรี และทิศตะวันตก ติดต่อกับ จังหวัดชลบุรี

- **ภูมิประเทศทั่วไป**

สภาพพื้นที่โดยทั่วไปเป็นที่ราบสลับที่ดอนเป็นลูกคลื่น พื้นที่ทางดานเหนือและดานตะวันออกเป็นที่ราบสลับภูเขาลาดต่ำลงสู่อ่าวไทยทางทิศใต้ มีพื้นที่ที่ภูเขา 2 แนว คือ ทิวเขาชะเมาทางทิศตะวันออกและทิวเขาที่อยู่ประมาณกึ่งกลางของตัวจังหวัดเป็นแนวยาวจากอำเภอเมืองระยองขึ้นไป

ทางเหนือ จังหวัดระยองมีแม่น้ำสายสั้นๆ ซึ่งเกิดจากเทือกเขาจันทบุรีและเทือกเขาบรรทัดไหลลงสู่อ่าวไทย แม่น้ำที่สำคัญได้แก่แม่น้ำระยอง ความยาวประมาณ 50 กิโลเมตร ไหลผ่านทองที่อำเภอปลวกแดงอำเภอบานคาย อำเภอเมือง โดยไหลลงสู่ทะเลที่ตำบลปากน้ำ อำเภอเมืองระยอง และแม่น้ำประแสร์ ความยาวประมาณ 26 กิโลเมตร โดยมีต้นกำเนิดจากทิวเขาในจังหวัดจันทบุรี ไหลผ่านทองที่ต่าง ๆ ในอำเภอแกลง กิ่ง อ.เขาชะเมา และลงสู่ทะเลที่ตำบลปากน้ำประแสร์ นอกจากนี้จังหวัดระยองยังมีชายฝั่งทะเล มีหาดทรายสวยงามและมีเกาะใหญ่น้อยเรียงรายเลียบตามแนวชายฝั่ง นับเป็นทรัพยากรการท่องเที่ยวที่สำคัญของประเทศ

● ลักษณะอากาศทั่วไป

จังหวัดระยอง อยู่ภายใต้อิทธิพลของมรสุมที่พัดปกคลุมประเทศไทย 2 ชนิด คือ มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดปกคลุมตั้งแต่ประมาณกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ กับมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งพัดปกคลุมในช่วงฤดูฝนประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม ซึ่งพัดจากทิศตกเฉียงใต้เป็นส่วนใหญ่และเป็นลมที่พัดผ่านทะเลนำความชื้นและไอน้ำเข้าสู่จังหวัด ทำให้อากาศชุ่มชื้นและมีฝนตกโดยทั่วไป

● ฤดูกาล

พิจารณาตามลักษณะลมฟ้าอากาศของประเทศไทย สามารถแบ่งฤดูกาลของจังหวัดระยองได้เป็น 3 ฤดู ดังนี้

1. ฤดูหนาว

เริ่มตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและบริเวณความกดอากาศสูงจากประเทศจีนที่มีคุณสมบัติเย็นและแห้งจะแผลงมาปกคลุมประเทศไทยในช่วงนี้ ฤดูนี้อุณหภูมิของจังหวัดระยอง ไม่ลดต่ำมากเหมือนภาคอื่น ๆ เพราะเขตนี้อยู่ปลายมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ความหนาวเย็นจึงไม่ลดลงมาก นอกจากนี้ก็ยังมีชายฝั่งทะเลจึงทำให้จังหวัดระยอง ไม่หนาวเย็นมากนัก

2. ฤดูร้อน

เริ่มเมื่อมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือสิ้นสุดลงคือประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์และสิ้นสุดประมาณกลางเดือนพฤษภาคม ระยะนี้มีลมตะวันออกเฉียงใต้และลมเฉื่อยจากทะเลในตอนบ่ายพัดมารวมกับลมตะวันออกเฉียงใต้ จึงทำให้ลมมีกำลังแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นฝั่งทะเลระยองในระยะเดือนกุมภาพันธ์

ถึงเดือนเมษายนจึงมีคลื่นลมคอนข้างแรงในตอนบ่ายและเย็น ทำให้อุณหภูมิไม่สูง อากาศจึงไม่ร้อนมากนัก

3. ฤดูฝน

เริ่มประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม เป็นช่วงที่มรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมประเทศไทย ซึ่งจะนำความชื้นจากทะเลอันดามันพัดผ่านอ่าวไทยเข้าสู่ภาคตะวันออก ทำให้อากาศจะชุ่มชื้นและมีฝนตกชุกทั่วไป

● อุณหภูมิ

เนื่องจากจังหวัดระยองเป็นจังหวัดหนึ่งในภาคตะวันออกที่ได้รับอิทธิพลจากลมทะเลอยู่เสมอ จึงทำให้อากาศไม่ร้อนอบอวลมากนักในฤดูร้อน และฤดูหนาวอากาศก็ไม่หนาวจัด โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปี 28.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 32.6 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 25.0 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิต่ำที่สุดที่เคยตรวจวัดได้ 12.5 องศาเซลเซียส ที่สถานีอากาศเกษตรห้วยโป่ง เมื่อวันที่ 30 ธันวาคม 2518 ส่วนอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ 40.0 องศาเซลเซียส สถานีอุตุนิยมวิทยา ระยอง เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2544

ตารางที่ 3.4 ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน 30 ปี (1981 - 2010) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2563)

เดือน	อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	ปริมาณฝน (มม)	จำนวนวันฝนตก (วัน)
มกราคม	21.5	31.9	20.7	-
กุมภาพันธ์	24.5	32.5	36.5	-
มีนาคม	26.2	33.2	70.3	-
เมษายน	27.1	34.3	81.6	-
พฤษภาคม	26.9	33.6	198.6	-
มิถุนายน	26.8	32.7	165.1	-
กรกฎาคม	26.5	32.3	171.8	-
สิงหาคม	26.4	32.0	132.3	-
กันยายน	25.4	31.9	255.2	-
ตุลาคม	24.5	32.3	194.4	-

เดือน	อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	ปริมาณฝน (มม)	จำนวนวันฝนตก (วัน)
พฤศจิกายน	23.3	32.6	50.8	-
ธันวาคม	21.3	32.0	5.9	-

3.2.3 การเลือกหัวพ่น

สำหรับการออกแบบระบบหมอกน้ำที่มีความละเอียดสูงทั่วไปนั้น จะต้องใช้น้ำสะอาดผ่านการอัดให้เกิดความดันด้วยเครื่องสูบลมแรงดันสูงที่ความดันประมาณ 1 – 10 MPa เพื่อทำให้เกิดหมอกน้ำขนาดประมาณ 10 – 20 ไมโครเมตร หากใช้ความดันที่ต่ำกว่าค่าความดันดังกล่าวอาจไม่สามารถทำให้เกิดหมอกน้ำขนาดประมาณ 10 – 20 ไมโครเมตรได้ ซึ่งอาจจะไม่อยู่ในสถานะที่พร้อมจะระเหยกลายเป็นไอและเกิดความชื้นควบแน่นเป็นหยดน้ำเกาะตามเครื่องจักรได้

การติดตั้งเครื่องสูบลมแรงดันสูง 1 – 10 MPa ที่สามารถใช้งานในโรงงานปิโตรเคมีนั้น (explosion proof pump) จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนที่สูงมาก งานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการสร้างหมอกน้ำความละเอียดสูงอีกวิธีหนึ่ง คือ การเลือกใช้งานหัวพ่นที่ออกแบบมาให้สามารถใช้ระบบน้ำที่มีแรงดันปานกลางพ่นผสมอากาศที่มีแรงดันปานกลาง ก็สามารถสร้างหมอกน้ำที่มีความละเอียดประมาณ 10 – 20 ไมโครเมตรได้เช่นเดียวกัน เพราะการใช้อากาศที่มีแรงดันปานกลางเข้าไปผสมจะช่วยให้เกิดการแตกตัวของหมอกน้ำ ซึ่งจะสร้างความละเอียดของหมอกน้ำได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้การระเหยของหมอกน้ำทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากกระแสของอากาศที่ไหลผ่านหมอกน้ำจะช่วยให้สามารถดึงความร้อนไปใช้ได้เร็วขึ้น ทั้งนี้สามารถทำได้โดยไม่ต้องติดตั้งเครื่องสูบลมแรงดันสูง ทำให้ลดต้นทุนและความยุ่งยากในการติดตั้งเครื่องสูบลมแรงดันสูงในกระบวนการผลิตได้ จำนวนของหัวพ่นจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาณน้ำที่ต้องการจะใส่เข้าไปในระบบ ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการดึงความร้อนออกจากอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ประกอบกับโรงงานกรณีศึกษามีระบบน้ำ demineralized water และ utility air ที่มีความดันสูงสุดที่ 0.6 และ 0.5 MPa ตามลำดับ ดังนั้นหัวพ่น 2 รูปแบบที่สามารถหาซื้อได้ในตลาดจึงถูกนำมาพิจารณาดังนี้

1) Mist King Dry fogging humidifier

ตารางที่ 3.5 ค่าใช้งานของ Mist King Dry fogging humidifier

ขนาด droplet เฉลี่ย	7.5	$\mu\text{m.}$
ปริมาณน้ำที่ใช้ / ชั่วโมง	2.4	L/H
ความดันอากาศที่ใช้งาน	0.3 - 0.35	Mpa
ความดันน้ำที่ใช้งาน	atm	MPa

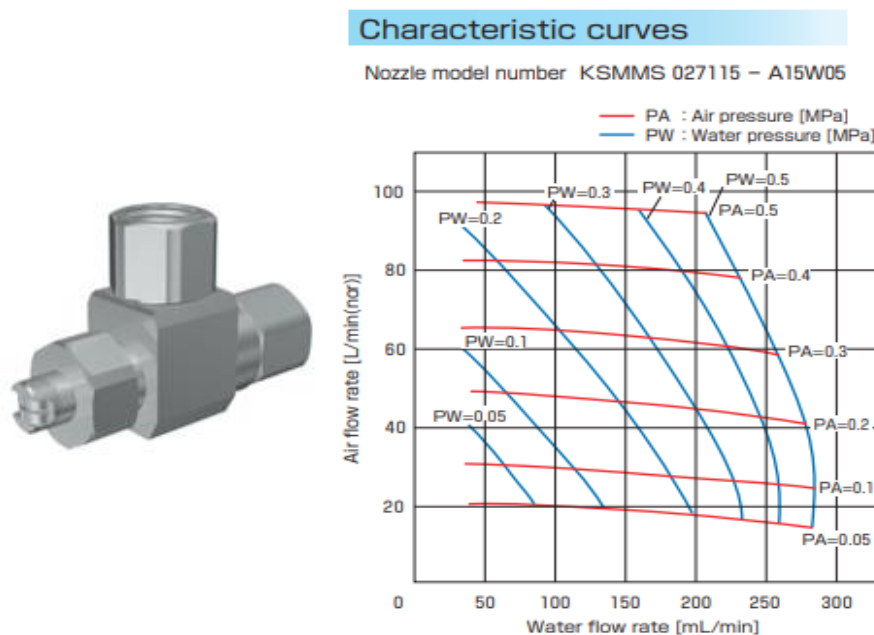


รูปที่ 3.7 Mist King Dry fogging humidifier

2) Mini Mist Nozzle Internal mixing type (model KSMMS 027115)

ตารางที่ 3.6 ค่าใช้งานของ Mini Mist Nozzle Internal mixing

ขนาด droplet เฉลี่ย	10	$\mu\text{m.}$
ปริมาณน้ำที่ใช้ / ชั่วโมง	7.2 - 15.54	L/H
ความดันอากาศที่ใช้งาน	0.05 - 0.5	Mpa
ความดันน้ำที่ใช้งาน	0.05 - 0.5	MPa



รูปที่ 3.8 Mini Mist Nozzle Internal mixing type (Everloy Spray Nozzles, 2005)

จากการเปรียบเทียบข้างต้น จะเห็นว่าขนาดความละเอียด (droplet) เฉลี่ยของหัวพ่นทั้ง 2 รูปแบบมีความใกล้เคียงกัน แต่ Mini Mist Nozzle Internal mixing type สามารถจ่ายน้ำได้ในปริมาณมากกว่าและมีอายุการใช้งานที่กว้างกว่า ทำให้สามารถปรับตั้งค่าการจ่ายความดันน้ำและความดันอากาศได้หลายรูปแบบมากกว่า นอกจากนี้ ข้อจำกัดของ Mist King Dry fogging humidifier คือใช้แหล่งน้ำแบบถังบรรจุ ซึ่งไม่สามารถจ่ายน้ำได้ในระยะเวลานาน ดังนั้น Mini Mist Nozzle Internal mixing type จึงถูกเลือกมาใช้งานในงานวิจัยนี้

3.2.4 แหล่งจ่ายน้ำและอากาศ

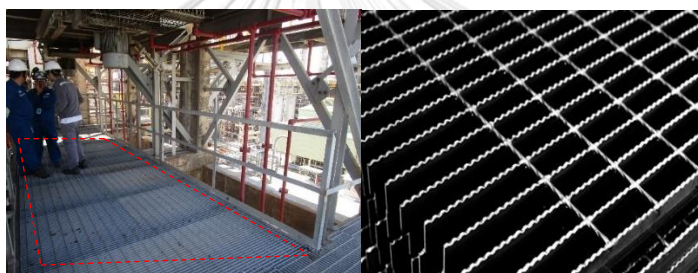
การเลือกใช้หัวพ่นชนิดที่ใช้น้ำและอากาศในการสร้างหมอกน้ำ จำเป็นที่จะต้องหาแหล่งจ่ายอากาศและน้ำให้กับระบบ ซึ่งจะใช้จากแหล่งจ่ายที่มีอยู่แล้วจากระบบ plant utility ของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งมีจุดเชื่อมต่อพร้อมสำหรับใช้งานและสามารถจ่ายความดันของน้ำสูงสุดที่ 0.6 MPa และความดันของอากาศสูงสุด 0.5 MPa เพียงแค่ออกแบบระบบท่อสำหรับการใช้งานจากจุดเชื่อมต่อไปยังจุดที่ใช้งานก็สามารถใช้งานได้

3.2.5 อุปกรณ์จับยึดหัวพ่น

จากการเลือกใช้หัวพ่น Mini Mist Nozzle Internal mixing type (model KSMMS 027115) ในหัวข้อที่ 3.2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากจะนำหัวพ่นดังกล่าวมาติดตั้งบริเวณพื้นที่ใต้โคมคลุมนั้นจะต้องมีอุปกรณ์จับยึดที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้สามารถติดตั้งใช้งานได้ เนื่องจากตัวหัวพ่นเองไม่มีชิ้นส่วนสำหรับจับยึดติดตั้งมาให้ด้วย โดยการออกแบบอุปกรณ์จับยึดหัวพ่นมีขั้นตอนในการพิจารณาดังนี้

1) ลักษณะพื้นผิวที่ต้องการติดตั้ง

ลักษณะของพื้นผิวที่จะติดตั้งจะมองถึงการออกแบบสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด force draft ในอนาคต ซึ่งอุปกรณ์จับยึดนี้จะต้องสามารถติดตั้งหรือเคลื่อนย้ายไปยังจุดต่าง ๆ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องอื่น ๆ ได้



รูปที่ 3.9 พื้นที่ตั้งติดตั้งหัวพ่นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด induce draft

จากรูปที่ 3.9 จุดติดตั้งหัวพ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด induce draft จะอยู่บริเวณใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งที่เป็นพื้นสำหรับให้ปฏิบัติงานเข้าไปปฏิบัติงาน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตรเชื่อมกันเป็นตาราง



รูปที่ 3.10 พื้นที่ตั้งติดตั้งหัวพ่นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด force draft

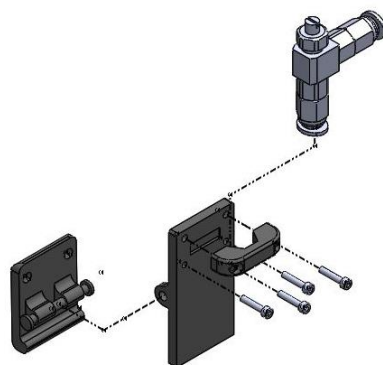
จากรูปที่ 3.10 จุดติดตั้งหัวพ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศชนิด force draft จะอยู่บริเวณของโครงสร้างภายใต้พัดลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โครงสร้างนี้มีลักษณะเป็นเหล็ก H beam ที่มีครีบหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร จะเห็นว่าพื้นที่สำหรับติดตั้งทั้งสองประเภทมีความคล้ายคลึงกันคือเป็นลักษณะแผ่นเหล็กที่มีความหนาประมาณ 3 – 5 มิลลิเมตร ดังนั้นลักษณะการจับยึดที่สามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายได้ง่ายที่สุดคือการออกแบบอุปกรณ์จับยึดในลักษณะก้านหนีบ (clamp) ที่สามารถปรับขนาดตามความหนาได้ โดยใช้แรงจากการขันล๊อคโดยนัทและโบลท์ ตามภาพที่ 3.11



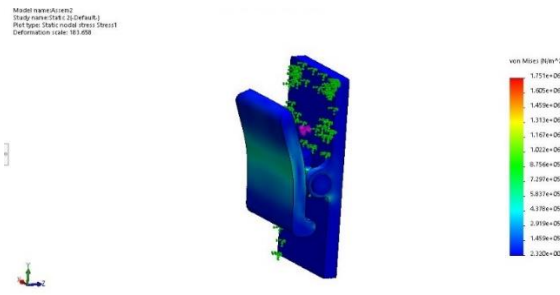
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างชิ้นงานอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น

2) ความแข็งแรงของอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น

อุปกรณ์จับยึดหัวพ่นใช้วัสดุ ABS ทำการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค 3D Printing กำหนดให้ขาหนีบที่ใช้สำหรับหนีบยึดเหล็ก 3 มิลลิเมตรทั้งสองข้าง มีความหนาข้างละ 5 มิลลิเมตร โดยทำการ simulation จากโปรแกรม Solidworks Simulation พบว่าสามารถรับแรงการหนีบได้ 20 นิวตัน โดยไม่แตกหักซึ่งเพียงพอต่อการจับยึดหัวพ่น



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองสามมิติของการประกอบอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น



รูปที่ 3.13 ภาพจำลองการหาค่าแรงที่วัสดุรับได้

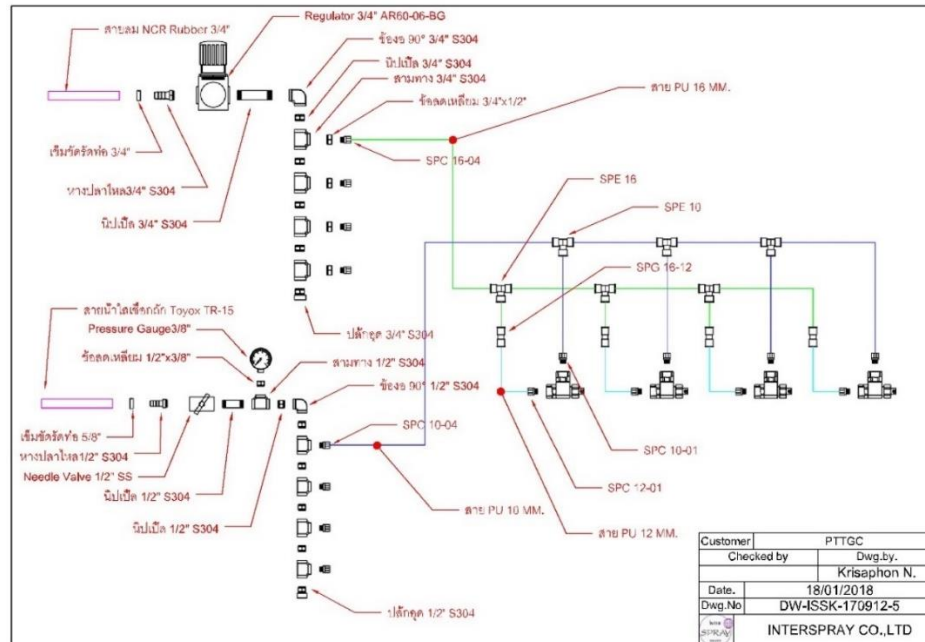
3) ตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น

จากรูปที่ 3.14 พื้นที่การติดตั้งหัวพ่นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด induce draft ที่ใช้ในงานวิจัยจะอยู่บริเวณใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งที่เป็นพื้นสำหรับให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าไปปฏิบัติงาน มีระยะห่างจากสายพานชุดขับเคลื่อนประมาณ 2.4 เมตร และห่างจากครีบบระบายความร้อนประมาณ 3 เมตร พื้นที่ใช้สำหรับติดตั้งมีขนาดกว้าง 2.25 เมตร ยาว 8.5 เมตร ต่อข้าง และรัศมีความกว้างของสเปรย์หมอกน้ำต่อหนึ่งหัวคือ 1.3 เมตร ดังนั้นสามารถออกแบบวิธีการจัดวางหัวพ่นให้ครอบคลุมพื้นที่บริเวณใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 พื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์จับยึดหัวพ่น

3.2.6 การออกแบบสายส่งน้ำและอากาศ



รูปที่ 3.15 ผังแสดงขนาดท่อส่งน้ำและอากาศที่ใช้งานในระบบหมอกน้ำ

จากการเลือกใช้หัวพ่นรุ่น KSMMS 027115

กำหนดให้แรงดันลมสูงสุด 0.5 MPa จะมีปริมาณการใช้ลม 95 ลิตร / นาที / หัวพ่น

กำหนดแรงดันน้ำสูงสุด 0.6 MPa จะมีปริมาณการใช้น้ำ 0.27 ลิตร / นาที / หัวพ่น

ทำการออกแบบทั้งระบบด้วยหัวพ่นทั้งหมด 16 หัว

- ที่แรงดันลม 0.5 MPa จะมีปริมาณการใช้ลม รวม 1,520 ลิตร / นาที โดยกำหนดให้ pressure drop ไม่เกิน 0.03 MPa ความยาวของท่อลมหลัก 20 เมตร เมื่อเทียบขนาดท่อลมหลักจากตาราง air flow pressure drop in pipe (Inter Spray, 2018) จะได้ขนาดท่อลมหลัก และ Regulator ขนาด 20.96 มิลลิเมตร ในขั้นต่อมา มีการแยกหัวพ่นเป็น 4 หัว / ท่อลมย่อย มีปริมาณการใช้ลมในท่อลมย่อยรวม 380 ลิตร / นาที จะได้ท่อลมขนาด 16 มิลลิเมตรสำหรับท่อลมย่อย และ 12 มิลลิเมตรสำหรับท่อลมจากท่อลมย่อยไปยังหัวพ่น

- ที่แรงดันน้ำ 0.6 MPa จะมีปริมาณการใช้น้ำรวม 4.32 ลิตร / นาที โดยพิจารณาอัตราการไหลที่เหมาะสมตามตาราง Water flow and proper pipe size (Kirinoikeuchi, 2018) จะได้ท่อน้ำหลัก และ needle valve ขนาด 21.7 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ท่อน้ำย่อยขนาด 10 มิลลิเมตร แยกเป็น 4 หัวพ่น /

ท่อลมย่อย มีปริมาณการใช้น้ำรวม 1.08 ลิตร / นาที จะได้ท่อที่แยกจากท่อจ่ายไปยังหัวพ่น
ขนาด 10 มิลลิเมตรเช่นกัน ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 Air Flow Pressure Drop in Pipe (Inter Spray, 2018)

Flow			Pressure Drop 20m sch40								
Nm ³ /h	L/min	L/sec	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1.1/4"	1.1/2"	2"
3.00	50	0.83	0.0858	0.0193							
6.00	100	1.67	0.3093	0.0695	0.0153						
12.00	200	3.33	1.1151	0.2506	0.0551						
21.01	350	5.83	3.1401	0.7056	0.1553	0.048					
30.01	500	8.33		1.3650	0.3004	0.094	0.022				
45.02	750	12.50		2.8900	0.6360	0.198	0.048				
60.02	1,000	16.67			1.0830	0.337	0.081	0.024			
75.03	1,250	20.83			1.6365	0.510	0.122	0.037			
90.04	1,500	25.00			2.2929	0.714	0.172	0.052			
105.04	1,750	29.17			3.0496	0.950	0.228	0.069			
120.05	2,000	33.33				1.216	0.292	0.088	0.022		
150.06	2,500	41.67				1.837	0.441	0.133	0.034		
180.07	3,000	50.00				2.574	0.619	0.187	0.047	0.022	
210.08	3,500	58.33					0.823	0.248	0.063	0.029	
240.10	4,000	66.67					1.053	0.318	0.080	0.037	
270.11	4,500	75.00					1.310	0.395	0.100	0.046	
300.12	5,000	83.33					1.592	0.480	0.121	0.056	
330.13	5,500	91.67					1.898	0.572	0.145	0.067	
360.14	6,000	100.00					2.230	0.672	0.170	0.078	0.023
390.16	6,500	108.33					2.586	0.780	0.197	0.091	0.026
420.17	7,000	116.67					2.966	0.894	0.226	0.104	0.030
480.19	8,000	133.33						1.145	0.289	0.134	0.039
540.22	9,000	150.00						1.424	0.360	0.166	0.048
600.24	10,000	166.67						1.730	0.437	0.202	0.058
660.26	11,000	183.33						2.063	0.521	0.241	0.070
720.29	12,000	200.00						2.424	0.612	0.283	0.082
780.31	13,000	216.67						2.811	0.710	0.328	0.095
840.34	14,000	233.33							0.814	0.376	0.109
900.36	15,000	250.00							0.925	0.427	0.123
960.38	16,000	266.67							1.042	0.481	0.139
1,020.41	17,000	283.33							1.166	0.539	0.156
1,080.43	18,000	300.00							1.296	0.599	0.173
1,140.46	19,000	316.67							1.432	0.662	0.191
1,200.48	20,000	333.33							1.575	0.728	0.210
1,260.53	22,000	366.67							1.879	0.868	0.251
1,500.60	25,000	416.67							2.380	1.099	0.318
1,680.67	28,000	466.67							2.935	1.356	0.392
1,800.72	30,000	500.00								1.540	0.445
2,100.84	35,000	583.33								2.049	0.592
2,400.96	40,000	666.67								2.623	0.758
3,001.20	50,000	833.33									1.145
3,601.44	60,000	1,000.00									1.604
4,201.68	70,000	1,166.67									2.134
4,801.92	80,000	1,333.33									2.732
5,402.16	90,000	1,500.00									
6,002.40	100,000	1,666.67									

ตารางที่ 3.8 Water flow and proper pipe size (Kirinoikeuchi, 2018)

Pipe size	Steel pipe		Spray flow (l/min) when pressure loss is 0.01-0.03 MPa per pipe length of 10 m
	A	B	
6A	1/8"	6.5	1.3-2.2
8A	1/8"	9.2	3-5.2
10A	3/8"	12.7	7-12
15A	1/2"	16.1	12-21
20A	3/4"	21.6	22-38
25A	1"	27.6	38-65
32A	1 1/8"	35.7	70-120
40A	1 1/2"	41.6	120-210
50A	2"	52.9	215-370
65A	2 1/2"	67.9	410-700
80A	3"	80.7	680-1,200
100A	4"	105.3	1,200-2,100
125A	5"	130.8	2,100-3,600
150A	6"	155.2	3,300-5,700

3.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณของไอน้ำที่อยู่ในอากาศในการทดลอง สามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0 ถึง 100 %RH (ความคลาดเคลื่อน ± 1.5 %)



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer) (Grainger, 2018)

2) เกจวัดความดัน (pressure gauge)

ใช้สำหรับการวัดความดันของน้ำและอากาศในระบบหมอกน้ำ เพื่อควบคุมความดันเป็นไปตามค่าที่ต้องการ (ความคลาดเคลื่อน ± 1 %)



รูปที่ 3.17 เกจวัดความดัน (pressure gauge) (Monotaro, 2018)

3) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared Thermometer)

ใช้ในการวัดอุณหภูมิของอากาศในการทดลอง (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.5 %)



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared Thermometer) (Fluke, 2020)

4) เครื่องวัดความเร็วลม (anemometer)

ใช้สำหรับการวัดความเร็วของลมในการทดลองเช่น ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอุโมงลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศและความเร็วของลมทะเลที่ไหลตัดอุโมงลม (crosswind) (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.2 %)



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดความเร็วลม (anemometer) (Tru Tech Tools, 2019)

3.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เป็นการวิเคราะห์หาผลกระทบจากปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ซึ่งก็คือออกกำหนดชุดการทดลองและปรับค่าของปัจจัยไปในแต่ละครั้งของการทดลองอย่างเป็นระบบตามแบบแผนที่วางเอาไว้ จากนั้นทำการบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทำการทดลอง เพื่อค้นหาปัจจัยและระดับของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าผลลัพธ์ที่สนใจ เพื่อนำไปกำหนดการตั้งค่าปัจจัยที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ปัจจัยในการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrollable Factors) หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ และปัจจัยที่ควบคุมได้ (controllable Factors) หมายถึงปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้น ๆ ในการทดลองได้

3.4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะวิธีการลดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการใช้ระบบหมอกน้ำ ซึ่งใช้น้ำและอากาศในการสร้างสเปรย์เท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ในเบื้องต้นจะทำการระดมสมอง จากวิศวกรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา โดยอ้างอิงตามหลักวิศวกรรม และข้อมูลจากงานวิจัยเกี่ยวกับระบบหมอกน้ำ รวมถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่าง ๆ มาพิจารณาร่วมกัน เพื่อทำการระบุปัจจัยที่เป็นไปได้ที่มีผลกระทบต่อการลดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการใช้ระบบหมอกน้ำ

3.4.1.1 ปัจจัยด้านปริมาณน้ำในระบบหมอกน้ำ

จากการค้นหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องจะใช้วิเคราะห์อ้างอิงจากหลักการการแลกเปลี่ยนความร้อน และหลักการระเหยการเป็นไอซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\dot{Q}_{mist} = \dot{m}_{mist} l_v \quad (3.7)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{mist} คือ ปริมาณความร้อน (kW)

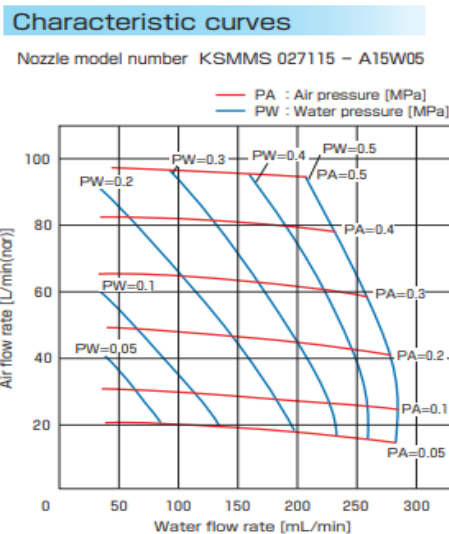
\dot{m}_{mist} คือ มวลของไอน้ำ (kg/s)

l_v คือ ความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

จากสมการที่ (3.7) จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอจะขึ้นตรงกับปริมาณของมวลไอน้ำที่ใส่เข้าไปในระบบ ซึ่งเมื่อมวลไอน้ำมากขึ้นก็จะทำให้ปริมาณความร้อนในการระเหยเพิ่มขึ้น และหมอกน้ำจะดึงพลังงานความร้อนออกจากอากาศบริเวณโดยรอบได้มากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าหากใส่ปริมาณน้ำมากเกินไปแล้วเกิดสถานะไอน้ำในอากาศอิ่มตัว (ความชื้นสัมพัทธ์ 100%) ก็จะไม่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น และจะส่งผลให้เกิดหยดน้ำควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำไปเกาะตามโครงสร้างของเครื่องจักรและทำให้อายุการทำงานของสายพานลดลง อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียน้ำโดยไม่เกิดประโยชน์ ดังนั้นปัจจัยแรกที่จะต้องควบคุมและหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งานระบบหมอกน้ำ ปริมาณน้ำที่จะใช้ในระบบหมอกน้ำ ซึ่งการควบคุมปริมาณน้ำในระบบหมอกน้ำในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

- 1) การควบคุมความดันของน้ำที่จะพ่นออกทางหัวพ่น

เมื่อทำการพิจารณาค่าการใช้งานของหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 ที่เลือกใช้ในงานวิจัย ตามตารางที่ 3.9 พบว่าหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 รองรับการปรับตั้งความดันของน้ำอยู่ที่ช่วง 0.05 – 0.5 MPa ซึ่งการใช้งานที่ค่าความดันน้ำที่ต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณหมอกน้ำที่ถูกพ่นออกมาที่มีปริมาณที่ต่างกัันออกไป



รูปที่ 3.20 ค่าการใช้งานของหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 (Everloy Spray Nozzles, 2005)

2) การควบคุมจำนวนหัวพ่น

จำนวนการใช้งานหัวพ่นจะส่งผลโดยตรงถึงปริมาณและความหนาแน่นของหมอกน้ำที่ถูกพ่นออกไปยังอากาศ การเพิ่มจำนวนหัวพ่นสามารถช่วยเพิ่มปริมาณน้ำได้มากกว่าการเพิ่มความดันน้ำของระบบหมอกน้ำอย่างเดียวยหลายเท่า

ตารางที่ 3.9 ค่าใช้งานของ Mini Mist Nozzle Internal mixing type (KSMMS 027115)

ขนาด droplet เฉลี่ย	10	µm.
ปริมาณน้ำที่ใช้ / หัว	7.2 - 15.54	L/H
ความดันอากาศที่ใช้งาน	0.05 - 0.5	MPa
ความดันน้ำที่ใช้งาน	0.05 - 0.5	MPa

3.4.1.2 ปัจจัยด้านอากาศในระบบหมอกน้ำ

เมื่อพิจารณาจากปัจจัยการระเหยของหมอกน้ำ พบว่าโมเลกุลของของเหลวนั้นจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งแต่ละโมเลกุลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอาจมีการชนกันและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกันได้ทำให้โมเลกุลหนึ่ง ๆ อาจได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและบางโมเลกุลสูญเสียพลังงานลงไป ถ้าโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูง ๆ อยู่ที่บริเวณผิวของ

ของเหลวก็สามารถชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลได้ก็จะหลุดออกไป โมเลกุลที่หลุดออกจากผิวหน้าของของเหลวจะเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะก๊าซ ซึ่งปัจจัยของการระเหยของหยดน้ำมีดังต่อไปนี้

1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิของหมอกน้ำที่สูงจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายกว่าหมอกน้ำอุณหภูมิต่ำกว่า (Craig et al., 2015)

2) พื้นที่ผิวของของหมอกน้ำ

หมอกน้ำที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายกว่าหมอกน้ำที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า (Craig et al., 2015)

3) ความดันบรรยากาศ

ที่ความดันบรรยากาศสูง หมอกน้ำจะระเหยได้ยากจึงทำให้ระเหยได้น้อยกว่าหมอกน้ำที่อยู่ในสภาพความดันบรรยากาศต่ำกว่า

4) ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านหมอกน้ำ

จากรูปที่ 3.2 อากาศที่ไหลผ่านพื้นผิวของหมอกน้ำจะเก็บความชื้นจากการระเหยไว้ เมื่ออากาศที่แห้งกว่าไหลเข้ามาแทนที่ก็จะเก็บความชื้นจากการระเหยต่อไปเรื่อย ๆ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านจึงส่งผลต่อการระเหยของหมอกน้ำ

3.4.1.3 ปัจจัยด้านรูปแบบการจัดวางหัวพ่น

การจัดวางหัวพ่นมีผลเรื่องการกระจายตัวและความหนาแน่นของหมอกน้ำในบริเวณที่ต้องการลดอุณหภูมิ ถ้าไม่มีการวิเคราะห์ตำแหน่งการจัดวางหัวพ่นที่ดีพออาจจะส่งผลต่อความสามารถของการลดอุณหภูมิอากาศของหมอกน้ำ ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องออกแบบตำแหน่งการจัดวางให้เหมาะสมทั้งเรื่องพื้นที่การพ่นหมอกน้ำและการกระจายตัวของมวลไอน้ำที่จะใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ

3.4.1.4 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

1) อุณหภูมิของอากาศบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

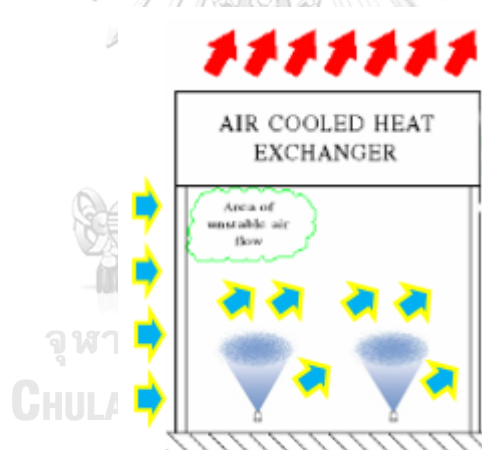
อุณหภูมิอากาศจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เนื่องจากยิ่งอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศยิ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก็จะทำให้ผลต่างของ

อุณหภูมิอากาศกับของเหลวที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าน้อยลง เมื่อผลต่างของอุณหภูมิน้อยลงก็ทำการดึงความร้อนออกจากของเหลวที่ต้องการลดอุณหภูมิลงตามไปด้วย ดังนั้นยิ่งอุณหภูมิของอากาศยิ่งร้อนก็จะยิ่งเห็นผลของการใช้ระบบหมอกน้ำมากขึ้น

2) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ความชื้นสัมพัทธ์คือ อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศขณะนั้นเทียบกับปริมาณไอน้ำที่อากาศจะรองรับได้ หากระดับไอน้ำในขณะนั้นมากเกินกว่า 100 %RH ซึ่งเกินกว่าความสามารถของอากาศที่จะรองรับได้ ไอน้ำจะเกิดการควบแน่น (Condensation) และกลายเป็นหยดน้ำในที่สุด ดังนั้นหากความชื้นสัมพัทธ์บริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศยังมีค่าน้อย อากาศบริเวณนั้นก็จะสามารถรองรับการระเหยของหมอกน้ำจากระบบหมอกน้ำได้มากขึ้นตามไปด้วย

3) ความเร็วของลมจากทะเลที่พัดผ่านบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ



รูปที่ 3.21 ทิศทางของลมจากทะเลที่ไหลผ่านบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โรงงานกรณีศึกษาตั้งอยู่ริมชายฝั่งทะเลของภาคตะวันออกซึ่งมักจะมีลมทะเลที่มีความเร็วลมที่สูง ไหลขึ้นชายฝั่งและไหลผ่านบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่เลือกใช้ในการทำงานวิจัยนี้ เมื่อมีความเร็วลมที่สูงไหลผ่าน ลมจะพัดให้หมอกน้ำที่ถูกสร้างขึ้นไหลออกไปนอกบริเวณที่ต้องการลดอุณหภูมิอากาศ ซึ่งจะทำให้การลดอุณหภูมิด้วยระบบหมอกน้ำเห็นผลน้อยลง

4) อุณหภูมิของน้ำที่ใส่เข้าไปยังระบบหมอกน้ำ

ตามทฤษฎีอุณหภูมิของน้ำที่ใช้จะมีผลต่อการระเหยของหมอกน้ำ คือยิ่งน้ำที่ใส่เข้าไปมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นเท่าไร หมอกน้ำที่ถูกพ่นออกมาก็จะยิ่งระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ง่ายขึ้นเท่านั้น แต่ในระบบน้ำที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ ซึ่งจะมีอุณหภูมิคงที่

5) อุณหภูมิของอากาศที่ใส่เข้าไปยังระบบหมอกน้ำ

อุณหภูมิของอากาศมีผลโดยตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ ยิ่งอากาศยิ่งร้อนความชื้นสัมพัทธ์ยิ่งต่ำ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอากาศก็จะสามารถรับความชื้นจากหมอกน้ำเพิ่มขึ้นได้ ทำให้หมอกน้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ง่ายขึ้น

6) อุณหภูมิหยดน้ำค้างของอากาศ

อุณหภูมิหยดน้ำค้างคือ อุณหภูมิที่ความชื้นในอากาศเริ่มกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเมื่ออากาศถูกลดอุณหภูมิที่แรงดันคงที่หรืออีกนัยยะหนึ่งก็คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันของไอน้ำอิ่มตัวหรือสภาวะที่อุณหภูมิที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากอากาศที่ใส่เข้าไปมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่สูง ก็มีโอกาที่จะทำให้เกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำของหมอกน้ำที่ถูกสเปร์ย์ออกไปเพื่อลดอุณหภูมิได้

3.4.1.5 ปัจจัยด้านสภาพเครื่องจักรและกระบวนการผลิต

1) ความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร

หากเครื่องจักรไม่สามารถเดินเครื่องได้ตามการหลักการทำงานที่ออกแบบไว้ (break down) ไม่ว่าจะเป็นการขาดการซ่อมบำรุงตามรอบหรือการซ่อมบำรุงที่ไม่ถูกวิธี ทำให้ต้องหยุดการเดินเครื่องเพื่อแก้ไขปัญหาก็เกิดการสูญเสียเวลาและมีต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น

2) เงื่อนไขของกระบวนการผลิต

หากกระบวนการผลิตมีการปรับเปลี่ยนหรือกระบวนการผลิตก่อนหน้ามีการหยุดการเดินเครื่อง จะส่งผลให้กระบวนการผลิตที่ทำการศึกษามีต้องเปลี่ยนเงื่อนไขหรืออาจจะต้องหยุดการเดินเครื่องจักรลง

3) อัตราการไหลของกระบวนการผลิต

อัตราการไหลของกระบวนการผลิตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ตลอดเวลา แต่ในขณะที่ทำการทดลองจะกำหนดให้อัตราการไหลอยู่ที่ 84 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลที่กำหนดไว้ในกระบวนการผลิต

4) อุณหภูมิของของไหลเข้าสู่กระบวนการผลิต (Hot fluid)

เป็นอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิว ซึ่งในขณะที่เป็นของไหลขาเข้าสู่กระบวนการผลิตจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ $120 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.4.2 ขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดอุณหภูมิอากาศโดยใช้ระบบหมอกน้ำ พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 12 ปัจจัย และเนื่องจากปัจจัยที่มีจำนวนมาก ดังนั้นในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการพิจารณาตัดบางปัจจัยออกจากการทดลอง เพื่อให้เหมาะสมกับทรัพยากรและเวลาที่มีอยู่อย่างจำกัด พิจารณปัจจัยที่ควบคุมได้จากความสามารถในการจำกัดขอบเขตค่าของปัจจัยเป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- 1) ปัจจัยที่ทราบค่าอยู่แล้ว และสามารถจำกัดให้อยู่ในขอบเขตของการศึกษา เช่น การตั้งค่าระดับปัจจัยต่าง ๆ ของระบบหมอกน้ำ
- 2) ปัจจัยที่ไม่ทราบค่ามาก่อน แต่สามารถจำกัดให้อยู่ในขอบเขตได้ เช่น ค่าความเร็วของลมทะเลในแต่ละฤดูกาล

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาว่าปัจจัยนั้นสามารถควบคุมได้หรือไม่

- หากเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ (controllable factors) ทำการพิจารณาต่อในขั้นตอนที่ 2
- หากเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable factors) ไปพิจารณาในขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาความสามารถในการปรับเปลี่ยนค่า

- สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายในแต่ละการทดลอง พิจารณาต่อในขั้นตอนที่ 3
- ทำการปรับเปลี่ยนได้ยาก ให้ทำการกำหนดปัจจัยนั้นให้มีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่งในการทดลอง (held constant factor)

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการลดอุณหภูมิด้วยระบบหมอกน้ำหรือไม่

- หากส่งผล ให้นำปัจจัยเหล่านั้นไปออกแบบการทดลอง
- หากไม่ส่งผล สามารถไม่พิจารณาปัจจัยนั้น ๆ ไปทำการทดลอง

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

- ส่งผลต่อการลดอุณหภูมิด้วยระบบหมอกน้ำมาก ให้ทำการพิจารณาว่าสามารถควบคุมปัจจัยนั้น ๆ ในการทดลองได้หรือไม่ หากควบคุมได้ให้ทำการบล็อกปัจจัยดังกล่าว หรือถ้าหากควบคุมไม่ได้ ให้ทำการออกแบบการวิเคราะห์ตัวแปรร่วม

- ปัจจัยนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อ การลดอุณหภูมิด้วยระบบหมอกน้ำ สามารถพิจารณาปัจจัยดังกล่าวให้เป็นปัจจัยรบกวน (noise factor)

3.4.3 กำหนดปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

เหตุผลจากการวิเคราะห์ในการเลือกปัจจัยเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ความดันน้ำที่ใส่เข้าไปในระบบหมอกน้ำ

พิจารณาจากปัจจัยดังกล่าว จัดเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ โดยมีช่วงการปรับค่าที่ 0.05 – 0.5 MPa ซึ่งระดับของปัจจัยจะส่งผลต่อปริมาณหมอกน้ำที่ถูกพ่นออกไปยังอากาศที่ต้องการลดอุณหภูมิ การใช้ความดันน้ำน้อยเกินไปจะทำให้ปริมาณหมอกน้ำถูกพ่นออกไปน้อยและจะดึงความร้อนออกจากอากาศได้น้อย แต่หากใช้ความดันน้ำเยอะเกินไปอาจจะทำให้ปริมาณหมอกน้ำในอากาศเยอะเกินไปและเกิดการอึดตัวของไอน้ำในอากาศ (ความชื้นสัมพัทธ์ 100%) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดอากาศบริเวณนั้นไม่สามารถดึงความร้อนออกจากอากาศได้เพิ่ม

2) ความดันอากาศที่ใส่เข้าไปในระบบหมอกน้ำ

พิจารณาจากปัจจัยดังกล่าว จัดเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ โดยมีช่วงการปรับค่าที่ 0.05 – 0.5 MPa การปรับระดับของปัจจัยนี้จะทำให้ปริมาณอากาศไหลผ่านหมอกน้ำแตกต่างกัน ซึ่งการไหลของอากาศผ่านหมอกน้ำนั้น ยิ่งอากาศมีความเร็วสูงก็จะช่วยให้หมอกน้ำระเหยได้เร็วขึ้นและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำได้มากขึ้น

3) จำนวนหัวพ่น

พิจารณาจากปัจจัยดังกล่าว จัดเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ โดยสามารถเลือกเพิ่มจำนวนหัวพ่นได้ตามจำนวนที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ต้องการใส่เข้าไปในระบบ การเพิ่มลดของปริมาณน้ำจะเป็นหลักการเดียวกับควบคุมปัจจัยความดันของน้ำที่ใส่เข้าไปในระบบ แต่จำนวนของหัวพ่นมีช่วงของการปรับเพิ่มลดปริมาณน้ำได้กว้างกว่ามาก และในการทดลองนี้ได้ออกแบบจำนวนหัวพ่นไว้สูงสุดที่ 16 หัว ซึ่งสามารถพ่นหมอกน้ำได้ครอบคลุมพื้นที่ใต้อุโมงค์ลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

3.4.4 กำหนดสภาวะแวดล้อมในการออกแบบการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่เก็บข้อมูลมีดังนี้

1) รูปแบบการจัดวางหัวพ่น

จัดเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ แต่ในการเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าแต่ละครั้งในระหว่างที่ทำการทดลองนั้นทำได้ยาก ใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้มีจำนวนการทดลองเพิ่มขึ้นมาก เนื่องด้วยเวลาการทดลองที่จำกัด ประกอบกับมีหลายปัจจัยที่ต้องควบคุมให้คงที่ทุก ๆ ครั้งในการทดลอง จึงจะทำการทดลองได้ ดังนั้นปัจจัยเรื่องรูปแบบการจัดวางจึงถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่จะติดตั้ง และกำหนดให้คงที่เป็นรูปแบบเดียวกันในทุก ๆ การทดลอง

2) อุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ได้กำหนดอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับการทดลองไว้ที่ $30 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เหตุผลที่กำหนดเช่นนี้เพราะ (1) อุณหภูมิแวดล้อมพบบ่อยที่สุดในรอบปี (2) การทดลองนี้เป็นการทดลองในสภาวะที่ทำการผลิตจริง และทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่าสภาวะดังกล่าวมีความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบต่อกระบวนการผลิตอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ทั้งนี้อุณหภูมิแวดล้อมนั้นเป็นค่าเดียวกันกับอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องระบายความร้อน

3) ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) อากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะแปรผกผันกับอุณหภูมิอากาศ หากอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นในอากาศจะลดลง ซึ่งสำหรับการทดลองนี้ ความชื้นสัมพัทธ์ถูกกำหนดไว้ที่ $70 \pm 5 \%$ ซึ่งเป็นค่าความชื้นเฉลี่ยที่พบบ่อยที่สุดในรอบปี และเนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้นั้นมีการแกว่งขึ้นลงอยู่ตลอดเวลา จึงได้กำหนดช่วงไว้ที่ $\pm 5 \%$

4) ความเร็วลมจากทะเล (cross wind) ที่พัดผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องระบายความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศจะมีประสิทธิภาพต่ำลงภายใต้สภาพลมแรง และการทำงานกับอากาศที่มีอุณหภูมิสูง การทดลองนี้อ้างอิงหลักการเดียวกับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ (API Standard 661, 2012) ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ทดลองได้ในขณะที่มีความเร็วลมไม่เกิน 4.5 เมตรต่อวินาที

5) อุณหภูมิของน้ำที่ใส่เข้าไปยังระบบหมอกน้ำ

เนื่องจากน้ำที่นำมาใช้งานในระบบหมอกน้ำมาจากหน่วยการผลิตน้ำกลั่นของโรงงานการศึกษา อุณหภูมิมีค่าคงที่คือ $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$

6) อุณหภูมิอากาศที่ใส่เข้าไปยังระบบหมอกน้ำ

อากาศที่จะถูกใส่เข้าไปในระบบหมอกน้ำ ได้มาจากระบบผลิตอากาศแห้ง (air dryer system) ของโรงงานการศึกษา มีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70%

7) อัตราการไหลของกระบวนการผลิต

อัตราการไหลของกระบวนการผลิตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ตลอดเวลา แต่ในขณะที่ทำการทดลองจะกำหนดให้อัตราการไหลอยู่ที่ 84 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลที่กำหนดไว้ในกระบวนการผลิต

8) อุณหภูมิของของไหลเข้าสู่กระบวนการผลิต (Hot fluid)

เป็นอุณหภูมิของคอนเดนเสทเรซิดิว ซึ่งในขณะที่เป็นของไหลเข้าสู่กระบวนการผลิตจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ $120 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.4.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการคัดเลือกและตัดปัจจัยโดยการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.4.3 และ 3.4.4 สามารถนำปัจจัยที่ถูกเลือกทั้ง 3 มากำหนดระดับของแต่ละปัจจัย ซึ่งได้ผลดังนี้

1) ความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ

เมื่อทำการพิจารณาค่าการใช้งานของหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 ที่เลือกใช้ในงานวิจัย จากรูปที่ 3.22 พบว่าหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 รองรับการปรับตั้งความดันของน้ำอยู่ที่ช่วง 0.05 MPa จนถึง 0.5 MPa แต่จากการทดลองใช้งานจริงพบว่า สามารถใช้งานได้ตามความดันสูงสุดที่ระบบจ่ายน้ำของโรงงานกรณีศึกษาสามารถใช้งานได้คือ 0.6 MPa ซึ่งการใช้งานที่ค่าความดันของน้ำที่ต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ถูกสเปรย์มีค่าตั้งแต่ 30 ml/min จนถึงประมาณ 300 ml/min ซึ่งที่การตั้งค่าความดันที่ 0.05 MPa และ 0.1 MPa จะไม่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเนื่องจากที่ความดันดังกล่าวให้ปริมาณน้ำในการพ่นน้อยเกินไป ดังนั้น จึงสามารถกำหนดปัจจัยได้เป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับ 1 ความดันน้ำ 0.2 MPa

ระดับ 2 ความดันน้ำ 0.4 MPa

ระดับ 3 ความดันน้ำ 0.6 MPa

2) ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ

เมื่อพิจารณาจากค่าการใช้งานของหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 ที่เลือกใช้ในงานวิจัยจากรูปที่ 3.22 พบว่าหัวพ่นรุ่น KSMMS 027115 รองรับการปรับตั้งความดันของอากาศอยู่ที่ช่วง 0.05 MPa จนถึง 0.5 MPa การใช้งานที่ค่าความดันของอากาศที่ต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณอากาศที่ถูกสเปรย์ออกมาผสมกับน้ำมีค่าที่ต่างกันออกไป ซึ่งที่ระดับความดันที่ต่ำกว่า 0.2 MPa จะไม่ถูกนำมาใช้งานเนื่องจากเมื่อทำการทดลองใช้งานในเบื้องต้นพบว่า การตั้งค่าระดับความดันของอากาศในระดับที่ต่ำกว่า 0.2 MPa จะไม่สามารถสร้างหมอกน้ำให้เกิดขึ้นได้ จึงสามารถกำหนดปัจจัยได้เป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับ 1 ความดันอากาศ 0.2 MPa

ระดับ 2 ความดันอากาศ 0.35 MPa

ระดับ 3 ความดันอากาศ 0.5 MPa

3) จำนวนหัวพ่นของระบบหมอกน้ำ

จำนวนหัวพ่นสามารถเพิ่มจำนวนได้ตามปริมาณการใช้น้ำที่ต้องการ และในการทดลองนี้ได้กำหนดไว้สูงสุดที่ 16 หัว เนื่องจากพื้นที่ในการสเปรย์ของ 16 หัว นั้นครอบคลุมพื้นที่บริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ในการทดลอง โดยจะแบ่งระดับงานใช้งานหัวพ่นเป็น 3 ระดับ ดังนี้

ระดับ 1 ใช้หัวพ่นจำนวน 8 หัว

ระดับ 2 ใช้หัวพ่นจำนวน 12 หัว

ระดับ 3 ใช้หัวพ่นจำนวน 16 หัว

จากการพิจารณาข้างต้น สรุปได้ว่าปัจจัยมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยระดับต่ำ แทนด้วยสัญลักษณ์ (-) ระดับกลาง แทนด้วยสัญลักษณ์ (0) และระดับสูง แทนด้วยสัญลักษณ์ (+) จากนั้นทำการแทนแต่ละปัจจัยด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษ ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 สรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ต้องการทำการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			
	ต่ำ (-)	กลาง (-)	สูง (+)	หน่วย
ความดันน้ำ (A)	0.2	0.4	0.6	Mpa
ความดันอากาศ (W)	0.2	0.35	0.5	MPa
จำนวนหัวสเปรย์ (N)	8	12	16	หัว

3.4.6 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

จากการคัดเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลสำหรับปัญหาที่สนใจนั้น เพื่อให้สามารถกำหนดค่าปัจจัยที่อากาศบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยตัวแปรตอบสนองคือ อุณหภูมิอากาศ มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งตัวแปรตอบสนองจัดเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data)

3.4.7 การแผนการทดลอง

การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) การทดลอง 15 การทดลอง จำนวน 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ

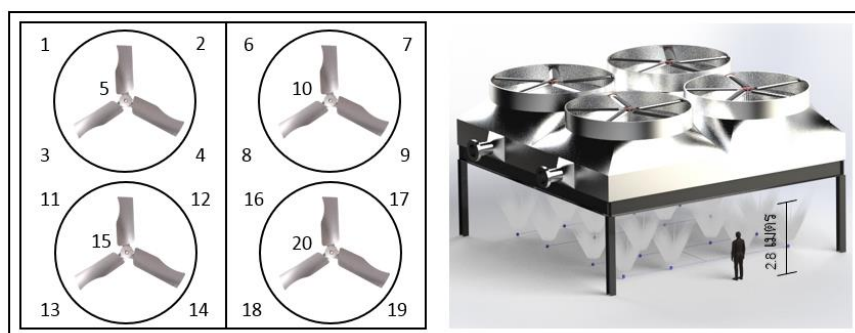
ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง และทำการสุ่มลำดับการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 การสุ่มตัวอย่างในการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ลำดับ	ความดันอากาศ (MPa)	ความดันน้ำ (MPa)	หัวพ่น (หัว)
1	0.35	0.2	8
2	0.35	0.2	8
3	0.35	0.6	16
4	0.2	0.4	8
5	0.35	0.4	12
6	0.35	0.6	8
7	0.35	0.2	16
8	0.2	0.2	12
9	0.35	0.4	12
10	0.2	0.2	12
11	0.2	0.6	12
12	0.5	0.2	12
13	0.2	0.4	16
14	0.35	0.6	16
15	0.35	0.4	12
16	0.2	0.4	16
17	0.35	0.4	12
18	0.2	0.6	12
19	0.2	0.4	8
20	0.35	0.6	8
21	0.5	0.6	12
22	0.5	0.4	16
23	0.35	0.2	16
24	0.35	0.4	12
25	0.5	0.2	12
26	0.35	0.4	12
27	0.5	0.4	8
28	0.5	0.4	8
29	0.5	0.4	16
30	0.5	0.6	12

3.4.8 การดำเนินการทดลองและวัดผล

ขั้นตอนแรกจะทำการวัดอุณหภูมิอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมก่อนการเปิดใช้งานระบบหมอกน้ำ มีจุดวัดทั้งหมด 20 จุด ที่กระจายอย่างสมมาตรบริเวณใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (ดังรูปที่ 3.22) โดยจุดวัดอยู่ที่ระดับความสูงจากหัวฟัน 2.8 เมตร



รูปที่ 3.22 จุดวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังการใช้งานระบบหมอกน้ำ

ขั้นตอนต่อไปทำการเปิดระบบหมอกน้ำตามสภาวะที่กำหนดตามแผนการทดลอง โดยแต่ละการทดลองจะเปิดระบบหมอกน้ำ ใช้งานเป็นเวลา 20 นาที และทำการวัดอุณหภูมิเข้าและความชื้นสัมพัทธ์ตามจุดที่กำหนดไว้ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้แต่ละจุด จะต้องไม่เกิน 90 % เนื่องจากได้ทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เกิน 90 % จะเริ่มมีหยดน้ำเกาะบริเวณสายพานชุดขับเคลื่อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งการเกิดหยดน้ำที่นี้จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของสายพานในระยะยาว (Gates Corporation, 2018) จากนั้นทำการทดลองจนครบตามแผนการทดลองจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนที่จะกล่าวถึงในบทนี้ เป็นการนำปัจจัยที่ได้ทำการวางแผนเอาไว้ในบทที่ 3 มาทำการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติ

4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการทดลองการใช้งานระบบหมอกน้ำที่สภาวะต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 อุณหภูมิที่ลดลงเป็นผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำกับเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ และเมื่อตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Model adequacy checking) โดยทำการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance stability test) แสดงได้ดังรูปที่ 4.4

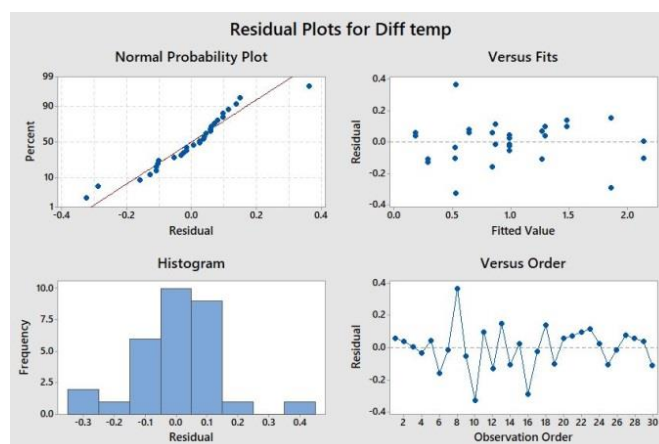
จากรูปที่ 4.1 พบว่ากราฟ Normal Probability Plot นั้น ข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง ไม่มีค่าผิดปกติขึ้นในกราฟ ส่วนกราฟ Residual Versus Fitted พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ และมีการกระจายตัวรอบ ๆ ค่าศูนย์ที่เท่า ๆ กัน และกราฟ Residual Versus Order พบว่าส่วนตกค้างไม่มีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ สรุปได้ว่าสามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ต่อไปได้ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

การทดลองที่	ความดันอากาศ (MPa)	ความดันน้ำ (MPa)	หัวพ่น (หัว)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ (°C)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ (°C)	อุณหภูมิที่ลดลง (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ (%)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ (%)
1	0.35	0.2	8	30.41	30.17	0.24	68.11	68.86
2	0.35	0.2	8	30.38	30.16	0.22	69.16	70.52
3	0.35	0.6	16	30.37	28.23	2.15	71.61	82.48
4	0.2	0.4	8	30.21	29.72	0.49	72.24	76.82
5	0.35	0.4	12	30.43	29.40	1.03	68.73	73.62
6	0.35	0.6	8	30.32	29.64	0.68	70.19	74.1
7	0.35	0.2	16	30.10	29.24	0.85	72.48	75.1
8	0.2	0.2	12	30.47	29.62	0.89	71.57	77.17
9	0.35	0.4	12	30.36	29.43	0.93	69.54	74.85

การทดลองที่	ความดันอากาศ (MPa)	ความดันน้ำ (MPa)	หัวพัน (หัว)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่ลดลง ($^{\circ}\text{C}$)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ (%)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ (%)
10	0.2	0.2	12	30.39	30.19	0.2	72.67	76.12
11	0.2	0.6	12	30.25	28.71	1.58	70.40	77.12
12	0.5	0.2	12	30.55	30.39	0.16	70.01	71.05
13	0.2	0.4	16	30.23	28.22	2.01	72.50	81.91
14	0.35	0.6	16	30.41	28.37	2.04	70.33	76.08
15	0.35	0.4	12	30.51	29.50	1.01	71.67	75.32
16	0.2	0.4	16	30.25	28.68	1.57	71.34	78.4
17	0.35	0.4	12	30.11	29.15	0.96	72.23	76.94
18	0.2	0.6	12	30.39	28.77	1.62	72.14	77.17
19	0.2	0.4	8	30.27	29.85	0.42	71.17	75.08
20	0.35	0.6	8	30.18	29.28	0.9	72.52	76.88
21	0.5	0.6	12	30.42	29.08	1.34	68.7	77.53
22	0.5	0.4	16	30.36	28.97	1.39	70.37	73.53
23	0.35	0.2	16	30.26	29.28	0.98	71.52	77
24	0.35	0.4	12	30.29	29.28	1.01	71.56	77.58
25	0.5	0.2	12	30.47	30.29	0.18	69.60	71.1
26	0.35	0.4	12	30.32	29.35	0.97	70.15	75.1
27	0.5	0.4	8	30.26	29.54	0.72	72.33	75.21
28	0.5	0.4	8	30.31	29.61	0.7	71.98	75.13
29	0.5	0.4	16	30.36	29.03	1.33	71.51	75.87
30	0.5	0.6	12	30.39	29.23	1.16	68.78	76.01

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	8.47728	0.94192	36.42	0.000
Linear	3	7.90656	2.63552	101.92	0.000
Air Pressure	1	0.20250	0.20250	7.83	0.011
Water Pressure	1	3.75391	3.75391	145.17	0.000
Nozzle	1	3.95016	3.95016	152.76	0.000
Square	3	0.14360	0.04787	1.85	0.170
Air Pressure * Air Pressure	1	0.00093	0.00093	0.04	0.851
Water Pressure * Water Pressure	1	0.05026	0.05026	1.94	0.179
Nozzle * Nozzle	1	0.08142	0.08142	3.15	0.091
2 – Way Interaction	3	0.42712	0.14238	5.51	0.006
Air Pressure * Water Pressure	1	0.00031	0.00031	0.01	0.914
Air Pressure * Nozzle	1	0.23461	0.23461	9.07	0.007
Water Pressure * Nozzle	1	0.19220	0.19220	7.43	0.013
Error	20	0.51719	0.02586		
Lack of Fit	3	0.11464	0.03821	1.61	0.223
Pure Error	17	0.40255	0.02368		
Total	29	8.99447			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq(pred)	
	0.160809	94.25%	91.66%	85.37%	

จากตารางที่ 4.2 จะได้ว่าเมื่อเปิดระบบหมอกน้ำแล้ว ค่าความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ และจำนวนหัวพ่น มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิอากาศขาเข้า อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ลดลง (Diff Temp) ที่แสดงความสัมพันธ์กับความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ (W) ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ (A) และจำนวนหัวพ่น (N) เป็นดังนี้

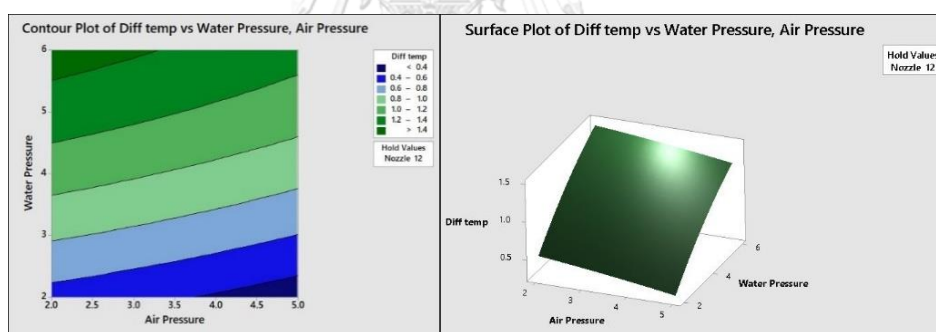
$$\text{Diff Temp} = 0.294A + 0.167W - 0.0109N - 0.0050A^2 - 0.0206W^2 + 0.00656N^2 + 0.0021A*W - 0.02854A*N + 0.01937W*N - 0.898 \quad (4.1)$$

4.2 อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ลดลง

จากสมการที่ (4.1) สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Surface response analysis) ดังต่อไปนี้

4.2.1 อิทธิพลของความดันน้ำและความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำและความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ โดยกำหนดให้จำนวนหัวพ่นมีค่ากลางเท่ากับ 12 หัว แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าลดลงได้มากขึ้นเมื่อความดันน้ำเพิ่มขึ้นและความดันอากาศลดลง และแสดงแนวโน้มที่จะสามารถลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าได้มากยิ่งขึ้นหากเพิ่มความดันน้ำให้สูงกว่า 0.6 MPa ส่วนค่าความดันอากาศนั้นจากการทดลองพบว่าหากปรับความดันอากาศให้ต่ำกว่า 0.2 MPa แล้วน้ำที่ออกมาจากหัวพ่นจะไม่เป็นหมอกน้ำ

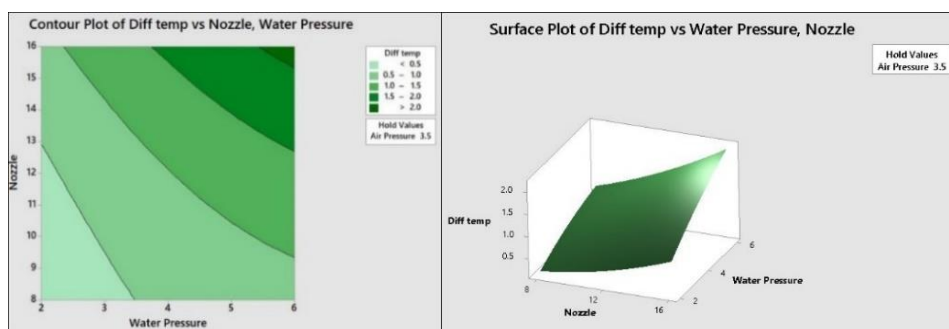


รูปที่ 4.2 Contour plot และ surface plot แสดงอิทธิพลของความดันน้ำและความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ

4.2.2 อิทธิพลของจำนวนหัวพ่นและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหัวพ่นและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ โดยกำหนดให้ค่าความดันอากาศมีค่าเท่ากับค่ากลางคือ 0.35 MPa แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะลดลงมากขึ้น เมื่อจำนวนหัวพ่นและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้จำนวนหัวพ่น 16 หัว และความดันน้ำระบบหมอกน้ำอยู่ในช่วง 0.55 – 0.6 MPa จะทำให้อุณหภูมิ

อากาศขาเข้าลดลงไปได้มากกว่า 2°C สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มจำนวนหัวพ่นและการเพิ่มความดันน้ำของระบบหมอกน้ำส่งผลให้สามารถดึงพลังงานความร้อนจากอากาศได้มากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 Contour plot และ surface plot แสดงอิทธิพลของจำนวนหัวพ่นและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ

4.3 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสม

เมื่อนำสมการที่ (4.1) มาหาค่าสภาวะที่เหมาะสม (ทั้งนี้สภาวะที่เหมาะสมหมายถึงว่าเป็นค่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ต่ำที่สุด) จะได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานระบบหมอกน้ำ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความดันน้ำ (W)} &= 0.6 \text{ MPa} & \text{จำนวนหัวพ่น (N)} &= 16 \text{ หัว} \\ \text{ความดันอากาศ (A)} &= 0.2 \text{ MPa} & \text{อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ลดได้} &= 2.41^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

ในยืนยันค่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบหมอกน้ำด้วยวิธีทางสถิตินั้นได้ทำการทดลองใช้งานระบบหมอกน้ำตามค่าสภาวะที่เหมาะสม ทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 ซ้ำ สมมติฐานหลัก (H_0) คือ ค่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าลดลงเท่ากับ 2.41°C ผลการทดสอบทางสถิติ ดังตารางที่ 4.3 ได้ค่า $T = -2.10$ แสดงให้เห็นว่าสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าลดลงเท่ากับ 2.41°C โดยพบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นี้มีช่วงค่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าลดลงอยู่ระหว่าง 2.3684 ถึง 2.4115 $^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดลองใช้งานระบบหมอกน้ำตามค่าสภาวะที่เหมาะสม

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Diff Temp	10	2.39	0.03018	0.00955	(2.3684, 2.4115)	-2.1	0.066

4.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศระหว่างเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำกับเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ สมรรถนะที่ใช้ในการเปรียบเทียบในที่นี้วัดจากปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถถ่ายเทออกไปได้

กำหนดให้สถานการณ์ของการทดลองเปรียบเทียบครั้งนี้อยู่ที่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 33.17 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%RH₁) ที่ 55.61 % อุณหภูมิของไหลขาเข้ากระบวนการผลิต (T₁) ประมาณ 120 °C อุณหภูมิของไหลขาออกจากกระบวนการผลิต (T₂) ไม่เกิน 60 °C อัตราการไหลของของไหลในกระบวนการผลิต 84 ตัน/ชั่วโมง สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้จัดบันทึกแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ระหว่างก่อนใช้ระบบหมอกน้ำและเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ

พารามิเตอร์	เมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ	เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ
อุณหภูมิของไหลขาเข้ากระบวนการผลิต (T ₁)	120.5 °C	120.3 °C
อุณหภูมิของไหลขาออกจากกระบวนการผลิต (T ₂)	59.06 °C	56.5 °C
อุณหภูมิอากาศขาเข้าเฉลี่ย (t ₁)	33.17 °C	30.63 °C
อุณหภูมิอากาศขาออกเฉลี่ย (t ₂)	69.11 °C	68.20 °C
อัตราการไหลในกระบวนการผลิต (ṁ)	84 ตัน / ชั่วโมง	84 ตัน / ชั่วโมง
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้าเฉลี่ย (%RH ₁)	55.61 %	78.71 %
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาออกเฉลี่ย (%RH ₂)	11.1 %	11.8 %

จากตารางที่ 4.4 เมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ อุณหภูมิของไหลขาออกจากกระบวนการผลิต (T₂) มีค่าใกล้ 60 °C ซึ่งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการจัดเก็บผลิตภัณฑ์แต่เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำทำให้ลดความเสี่ยงที่อุณหภูมิของไหลขาออกไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

เมื่อทำการคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่ถ่ายเทออกไปจากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4.2)$$

โดยที่ \dot{Q} คือ อัตราความร้อนถ่ายเท

\dot{m} คือ อัตราการไหลในกระบวนการผลิต (kg/s)

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิของกระบวนการผลิตขาเข้าและขาออก ($^\circ\text{C}$)

คำนวณอัตราความร้อนถ่ายเทก่อนเปิดระบบหมอกน้ำ

$$\dot{Q} = (23.33 \text{ kg/s}) \times (2.36 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \times (120.5 \text{ }^\circ\text{C} - 59.06 \text{ }^\circ\text{C}) = 3,383.29 \text{ kW} \quad (4.3)$$

คำนวณอัตราความร้อนถ่ายเทหลังเปิดระบบหมอกน้ำ

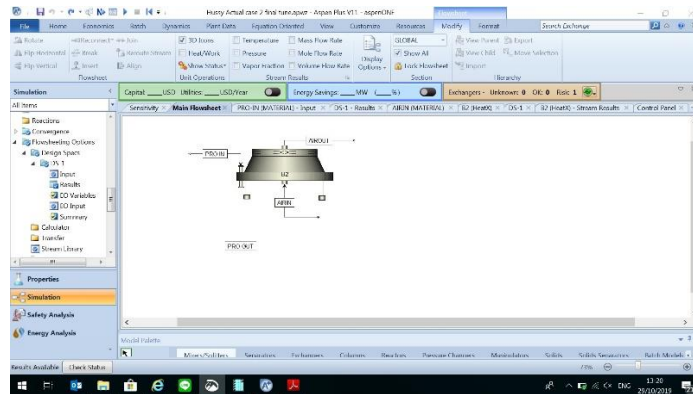
$$\dot{Q} = (23.33 \text{ kg/s}) \times (2.36 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \times (120.3 \text{ }^\circ\text{C} - 56.5 \text{ }^\circ\text{C}) = 3,513.20 \text{ kW} \quad (4.4)$$

เมื่อ C_p เป็นค่าคงที่ ในขณะที่ $\dot{m} = 84$ ตัน / ชั่วโมง หรือ 23.33 กิโลกรัม / วินาที เมื่อ ΔT ยิ่งมีค่ามาก ยิ่งทำให้ Q มากขึ้น

ดังนั้นจะได้ว่าเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ จะคำนวณหาอัตราความร้อนถ่ายเทได้เพียง 3,383.29 kW ในขณะที่เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำจะคำนวณหาอัตราความร้อนที่ถ่ายเทเป็น 3,513.20 kW ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การใช้ระบบหมอกน้ำสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน 129.91 kW ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 3.89%

4.5 โอกาสในการเพิ่มกำลังการผลิต

อดีตที่ผ่านมาเมื่อมีข้อจำกัดในการถ่ายเทความร้อน จึงได้แก้ไขปัญหโดยลดอัตราการไหลของคอนเดนเสทเรซีติวลงซึ่งมีผลให้ผลผลิต (yield) ลดต่ำลง แต่เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำเพื่อช่วยลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องระบายความร้อนและทำให้สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นหมายความว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มอัตราการไหลของคอนเดนเสทเรซีติว และให้ผลผลิตสูงขึ้นเพื่อความแม่นยำจึงได้ทดลองนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความดันน้ำ 0.6 MPa ความดันอากาศ 2 MPa จำนวนหัวพ่น 16 หัว ซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมที่สามารถลดอุณหภูมิอากาศได้มากที่สุด มาเข้าโปรแกรมแบบจำลองการผลิตของโรงงานปิโตรเคมีที่เป็นกรณีศึกษา (โปรแกรม ASPEN SIMULATION) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยทำการสร้างแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศเครื่องทำให้ในการทดลอง จากนั้นใส่ข้อมูลกระบวนการผลิตและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและให้โปรแกรมทำการคำนวณ พบว่าอุณหภูมิอากาศลดลงได้ $2 \text{ }^\circ\text{C}$ สามารถเพิ่มผลผลิตของกระบวนการผลิตขึ้นจาก 84 ตัน/ชั่วโมง เป็น 87 ตัน/ชั่วโมงเพิ่มขึ้น 3.57 %



รูปที่ 4.4 การทำแบบจำลองเพื่อประเมินสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

4.6 ผลการทดลองแบบไม่ใช้ค่าเฉลี่ย (Worst-case scenario)

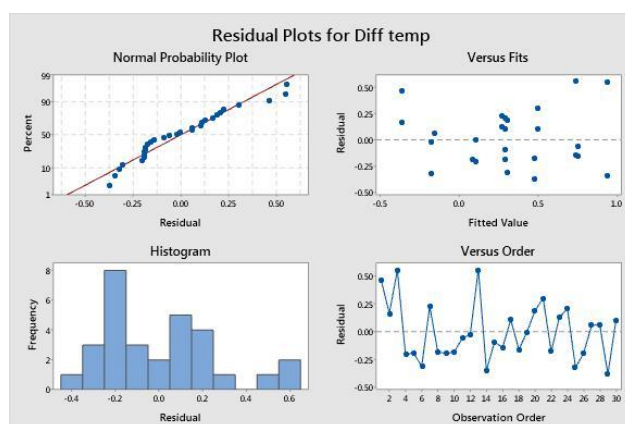
จากหัวข้อที่ 4.1 – 4.5 เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยแบบใช้ของผลต่างอุณหภูมิที่วัดได้ทั้งหมด 20 จุดที่แสดงในรูป 3.23 นำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าอุณหภูมิ 1 ค่า ซึ่งในหัวข้อที่ 4.6 นี้จะเป็นการนำค่าที่ต่ำที่สุด (worst case) ของจุดวัด 20 จุดจากทุกๆการทดลองมาทำการวิเคราะห์ว่าสามารถนำค่าเหล่านั้นมาใช้เพื่อหาค่าความเหมาะสมได้หรือไม่ โดยค่าผลต่างอุณหภูมิต่ำที่สุดของแต่ละการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแบบค่าผลต่างอุณหภูมิต่ำที่สุด

การทดลองที่	ความดันอากาศ (MPa)	ความดันน้ำ (MPa)	หัวพัน (หัว)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ (°C)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ (°C)	อุณหภูมิต่ำสุด (°C) (ค่าต่ำที่สุด)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ (%)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ (%)
1	0.35	0.2	8	30.41	30.17	0.1	68.11	68.86
2	0.35	0.2	8	30.38	30.16	-0.2	69.16	70.52
3	0.35	0.6	16	30.37	28.23	1.5	71.61	82.48
4	0.2	0.4	8	30.21	29.72	-0.1	72.24	76.82
5	0.35	0.4	12	30.43	29.40	0.1	68.73	73.62
6	0.35	0.6	8	30.32	29.64	0	70.19	74.1
7	0.35	0.2	16	30.10	29.24	0.5	72.48	75.1
8	0.2	0.2	12	30.47	29.62	-0.1	71.57	77.17
9	0.35	0.4	12	30.36	29.43	0.1	69.54	74.85

การทดลองที่	ความดันอากาศ (MPa)	ความดันน้ำ (MPa)	หัวพัน (หัว)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่ลดลง ($^{\circ}\text{C}$) (ค่าต่ำที่สุด)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำ (%)	ความชื้นสัมพัทธ์เมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ (%)
10	0.2	0.2	12	30.39	30.19	-0.1	72.67	76.12
11	0.2	0.6	12	30.25	28.71	0.7	70.40	77.12
12	0.5	0.2	12	30.55	30.39	-0.2	70.01	71.05
13	0.2	0.4	16	30.23	28.22	1.3	72.50	81.91
14	0.35	0.6	16	30.41	28.37	0.6	70.33	76.08
15	0.35	0.4	12	30.51	29.50	0.2	71.67	75.32
16	0.2	0.4	16	30.25	28.68	0.6	71.34	78.4
17	0.35	0.4	12	30.11	29.15	0.4	72.23	76.94
18	0.2	0.6	12	30.39	28.77	0.6	72.14	77.17
19	0.2	0.4	8	30.27	29.85	0.1	71.17	75.08
20	0.35	0.6	8	30.18	29.28	0.5	72.52	76.88
21	0.5	0.6	12	30.42	29.08	0.8	68.7	77.53
22	0.5	0.4	16	30.36	28.97	0.3	70.37	73.53
23	0.35	0.2	16	30.26	29.28	0.4	71.52	77
24	0.35	0.4	12	30.29	29.28	0.5	71.56	77.58
25	0.5	0.2	12	30.47	30.29	-0.5	69.60	71.1
26	0.35	0.4	12	30.32	29.35	0.1	70.15	75.1
27	0.5	0.4	8	30.26	29.54	-0.1	72.33	75.21
28	0.5	0.4	8	30.31	29.61	-0.1	71.98	75.13
29	0.5	0.4	16	30.36	29.03	0.1	71.51	75.87
30	0.5	0.6	12	30.39	29.23	0.6	68.78	76.01

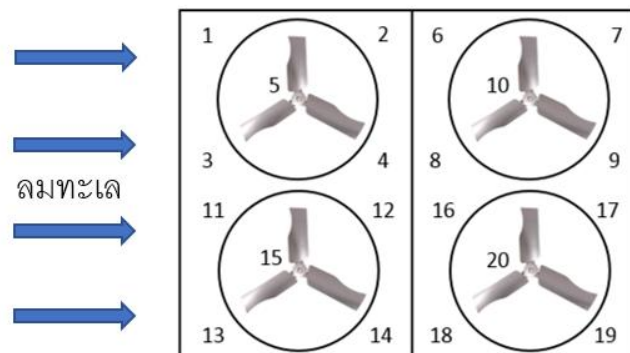
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.5 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 พบว่ากราฟ Normal Probability Plot นั้น ข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง ไม่มีค่าผิดปกติขึ้นในกราฟ ส่วนกราฟ Residual Versus Fitted พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ และมีการกระจายตัวรอบ ๆ ค่าศูนย์ที่เท่า ๆ กัน และกราฟ Residual Versus Order พบว่าส่วนตกค้างไม่มีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ สรุปได้ว่าสามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ต่อไปได้ ถึงแม้ว่าข้อมูลจะมีการกระจายตัวอย่างปกติ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถนำค่าดังกล่าวไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนต่อไปได้เนื่องจากค่าผลต่างอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เก็บมานั้นไม่ได้สะท้อนถึงภาพรวมการลดลงอุณหภูมิทั้งหมดบริเวณใต้อุโมงค์ลม เนื่องจากจุดที่วัดค่าได้ต่ำสุดนั้นจะเป็นจุดที่อยู่ติดกับชายฝั่งทะเล และมักจะได้รับผลกระทบจากการพัดของลมทะเลสูง ซึ่งทำให้อากาศบริเวณนั้นไม่ได้รับอิทธิพลของการแลกเปลี่ยนความร้อนของหมอกน้ำที่ถูกพ่นออกมาจากหัวสเปร์ย์ เช่นจุดที่ 1 3 11 และ 13 ดังรูปที่ 4.6

ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้การเฉลี่ยค่าอุณหภูมิทั้งหมด 20 จุดเพื่อเป็นตัวชี้วัดการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิบริเวณใต้อุโมงค์ลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบหมอกน้ำ



รูปที่ 4.6 ทิศทางของลมทะเลที่ส่งผลต่อจุดวัดอุณหภูมิ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลการคัดเลือกปัจจัย

จากการพิจารณาหาปัจจัยของระบบหมอกน้ำที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 12 ปัจจัย จากนั้นทำการจำแนกชนิดของปัจจัยที่จะสามารถตัดบางปัจจัยออกจากการทดลองได้ โดยจะเลือกเฉพาะปัจจัยที่สามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนค่าได้ นำไปทำการออกแบบการทดลอง ได้แก่

1) ความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ จะส่งผลต่อปริมาณของหมอกน้ำที่จะถูกพ่นออกไป ในการทดลองระดับของปัจจัยนี้ถูกกำหนดไว้ต่ำสุดที่ 0.2 MPa เนื่องจากได้ทำการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่าหากใช้น้ำที่ความดันต่ำกว่า 0.2 MPa หัวพ่นจะไม่ได้สามารถสร้างหมอกน้ำได้ และเนื่องจากระบบจ่ายน้ำของโรงงานกรณีศึกษาสามารถใช้งานได้สูงสุดที่ 0.6 MPa

2) ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ ซึ่งจะส่งผลกับอัตราการไหลของอากาศที่จะไปผสมกับน้ำเพื่อสร้างหมอกน้ำ ระดับของปัจจัยนี้ถูกกำหนดไว้ต่ำสุดที่ 0.2 MPa เนื่องจากหากใช้ค่าความดันที่ต่ำกว่า 0.2 MPa จะไม่สามารถเอาชนะความดันน้ำเพื่อสร้างหมอกน้ำได้ และเนื่องจากระบบจ่ายอากาศของโรงงานกรณีศึกษาสามารถจ่ายความดันอากาศได้สูงสุด 0.5 MPa ระดับของปัจจัยนี้จึงถูกกำหนดไว้สูงสุดที่ 0.5 MPa

3) จำนวนหัวพ่น โดยทั่วไปแล้วจำนวนหัวพ่นมากย่อมทำให้ได้ปริมาณหมอกน้ำมากขึ้น การทดลองนี้ทำการคำนวณความกว้างของระยะพ่น ซึ่งพบว่าหัวพ่นจำนวน 16 หัว สามารถผลิตหมอกน้ำครอบคลุมพื้นที่บริเวณใต้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

5.1.2 สรุปผลการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ทำการทดลอง 15 การทดลอง จำนวน 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ จำนวนการ

ทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ทำการออกแบบเมตริกซ์การออกแบบการทดลองและทำการสุ่มลำดับการทดลอง พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการลดอุณหภูมิอากาศเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังนี้

- 1) ความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ
- 2) ความดันอากาศของระบบหมอกน้ำ
- 3) จำนวนหัวพ่น

สามารถสรุปปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงเพื่อการปรับตั้งค่าระบบหมอกน้ำได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบหมอกน้ำ

ปัจจัย	ค่าปรับตั้ง	หน่วย
ความดันน้ำ	0.6	MPa
ความดันอากาศ	0.2	MPa
จำนวนหัวพ่น	16	หัว

5.1.3 สรุปการยืนยันผลการทดลองโดยใช้งานในกระบวนการผลิตจริง

การยืนยันสถานะที่เหมาะสมในการใช้งานระบบหมอกน้ำ ที่ต้องการจะลดอุณหภูมิอากาศบริเวณใต้อุโมงค์ลมให้ได้มากที่สุด จึงได้ทำการทดลองใช้งานระบบหมอกน้ำตามสถานะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 10 การทดลอง ในสถานะแวดล้อมเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้า ผลการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิอากาศเข้าที่ลดลงคือ $2.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศระหว่างเมื่อไม่ใช้ระบบหมอกน้ำกับเมื่อใช้ระบบหมอกน้ำ พบว่าการใช้ระบบหมอกน้ำสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน 129.91 kW ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 3.89% และเมื่อนำค่าสถานะนี้ไปใช้ในแบบจำลองของกระบวนการผลิตพบว่าผลผลิตจากกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 84 ตัน/ชั่วโมง เป็น 87 ตัน/ชั่วโมง คิดเป็นเพิ่มขึ้น 3.57 %

5.2 ปัญหาและอุปสรรคงานวิจัย

ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานวิจัยมีดังนี้

- 1) ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมในแต่ละวันและการทดลองต้องใช้กับกระบวนการผลิตจริงจึงต้องมีความรอบคอบและระมัดระวังไม่ให้เกิดความเสียหายต่อการผลิต
- 2) เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบหมอกน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อม ซึ่งทำให้ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้ ในแต่ละการทดลองจึงต้องรอให้สภาพแวดล้อมมีค่าใกล้เคียงกันที่สุดในแต่ละการทดลองจึงจะสามารถเริ่มทำการทดลองได้ ด้วยเหตุนี้การทดลองแต่ละครั้งจึงใช้เวลาค่อนข้างนาน
- 3) การทดลองเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อตรวจสอบว่าหลังจากใช้งานระบบหมอกน้ำจะสามารถเพิ่มผลผลิตขึ้นได้เท่าใดนั้น ไม่สามารถทำการทดลองได้กับกระบวนการผลิตจริง เนื่องจากหากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของการกลั่นจะทำให้กระบวนการผลิตถัดไปแปรปรวนได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมในแต่ละวันมีผลต่อการกำหนดระดับของปัจจัยอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองเฉพาะช่วง 30 ± 0.5 °C เป็นที่น่าสนใจหากการวิจัยในอนาคตจะมีการขยายผลให้ครอบคลุมถึงอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้นหรือต่ำกว่าช่วงดังกล่าว ซึ่งอาจจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอัตราการระเหยของหมอกน้ำที่เปลี่ยนไป รวมถึงมีผลกระทบจากฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการวางแผนการทดลองอย่างละเอียดรอบคอบ
- 2) จากการทดลองพบว่ายังระบบหมอกน้ำยังสามารถลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศได้อีกด้วยวิธีการเพิ่มจำนวนหัวพ่นและความดันน้ำของระบบหมอกน้ำ ซึ่งจะมีโอกาสที่จะเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศได้อีก

บรรณานุกรม

- API Standard 661. (2012). Petroleum, petrochemical, and natural gas industries-air cooled heat exchangers. In.
- biOx. (2020). Cooling industrial cooling | Spraystream sooling. Retrieved from <https://bioxinternational.com/cooling/>
- Craig, F., N., M., Masatoshi, N., and Minako, N., & Takeo, M. (2015). Effect of water temperature on evaporation of mist sprayed from a nozzle. *Journal of Heat Island Institute International*, 10.
- Ellmer, M. (2010). Reducing air cooler size in design stage by using a chilling system. *Hydrocarbon Asia*, Oct - Dec 2010.
- Everloy Spray Nozzles. (2005). Mini mist nozzle internal mixing type. Retrieved from https://www.everloy-spray-nozzles.com/en/product/mist_in/
- Fahmy, M. F. M., & Nabih, H. I. (2016). Impact of ambient air temperature and heat load variation on the performance of air-cooled heat exchangers in propane cycles in LNG plants – Analytical approach. *Energy Conversion and Management*, 121, 22-35.
- Fluke. (2020). 561 HVAC Infrared & Contact Thermometer. Retrieved from <https://www.fluke.com/en-us/product/temperature-measurement/ir-thermometers/fluke-561>
- Gates Corporation. (2018). *Belt maintenance guide & installation method (for customer internal use only)*.
- Giammaruti, R. (2004). *Performance improvement to existing air-cooled heat exchangers*. Paper presented at the 2004 Cooling Technology Institute Annual Conference, Houston, Texas.
- Grainger. (2018). Hygrometer. Retrieved from www.grainger.com
- Hudson Products Corporation. (2007). *The basics of air-cooled heat exchangers*.
- Inter Spray. (2018). *Air Flow Pressure Drop in Pipe (for internal use only)*.
- Jia, Y., K.T., C., Xiangsheng, W., Xiaofeng, Y., & Hongyu, Z. (2012). Performance enhancement of air-cooled chillers with water mist: experimental and analytical

- investigation. *Applied Thermal Engineering*, 40, 114-112.
- Kirinoikeuchi. (2018). *Pneumatic spray nozzles (for internal use)*.
- Liehui, X., G., Z., Lijun, Y., & Xiaoze, D. (2018). Numerical study on performance improvement of air-cooled condenser. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 1028–1042.
- Monotaro. (2018). Pressure Gauge. Retrieved from www.monotaro.co.th/g/00074379/
- Quora. (2017). Why is a counter flow heat exchanger better than a parallel flow heat exchanger? Retrieved from <https://www.quora.com/Why-is-a-counter-flow-heat-exchanger-better-than-a-parallel-flow-heat-exchanger>
- Tru Tech Tools. (2019). Testo Vane Anemometer. Retrieved from <https://www.trutechtools.com/error.asp?error=89&catalogid=6097&prdas=1>
- TUBETECH. (2020). Air cooled fin fan condenser (ACC) cleaned in germany in one day. Retrieved from <https://www.tubetech.com/services/air-cooled-condenser-cleaning/case-studies/cleaned-in-one-day>
- Yu, F. W., Ho, W. T., Chan, K. T., & Sit, R. K. Y. (2018). Theoretical and experimental analyses of mist precooling for an air-cooled chiller. *Applied Thermal Engineering*, 130, 112-119.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2563). สภาพอากาศชายฝั่งทะเล จังหวัดระยอง. Retrieved from <https://www.tmd.go.th/province.php?id=55>
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2561). ความชื้นและเสถียรภาพของอากาศ. Retrieved from http://portal.edu.chula.ac.th/lesa_cd/assets/document/lesa212/6/atm_moisture/air_moisture/air_moisture.html
- พิทักษ์ชน วิเศษ. (2558). การลดของเสียในการผลิตชิ้นไม้สับโดยการออกแบบการทดลอง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- องค์การ ศิริสวัสดิ์. (2551). การศึกษาวิธีการผลิตเทปลอนที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- อุสเซน คานสกุล. (2558). การออกแบบการทดลองเพื่อพัฒนากระบวนการหมักกรดแลคติก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นิธิพงศ์ ช่างหล่อ
วัน เดือน ปี เกิด	12 กุมภาพันธ์ 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดจันทบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ใน ปี 2557
ที่อยู่ปัจจุบัน	161/20 ต.เนินพระ อ.เมือง จ.ระยอง 21000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY