



การปรับปรุงแบบจำลองในการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงแบบจำลองในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

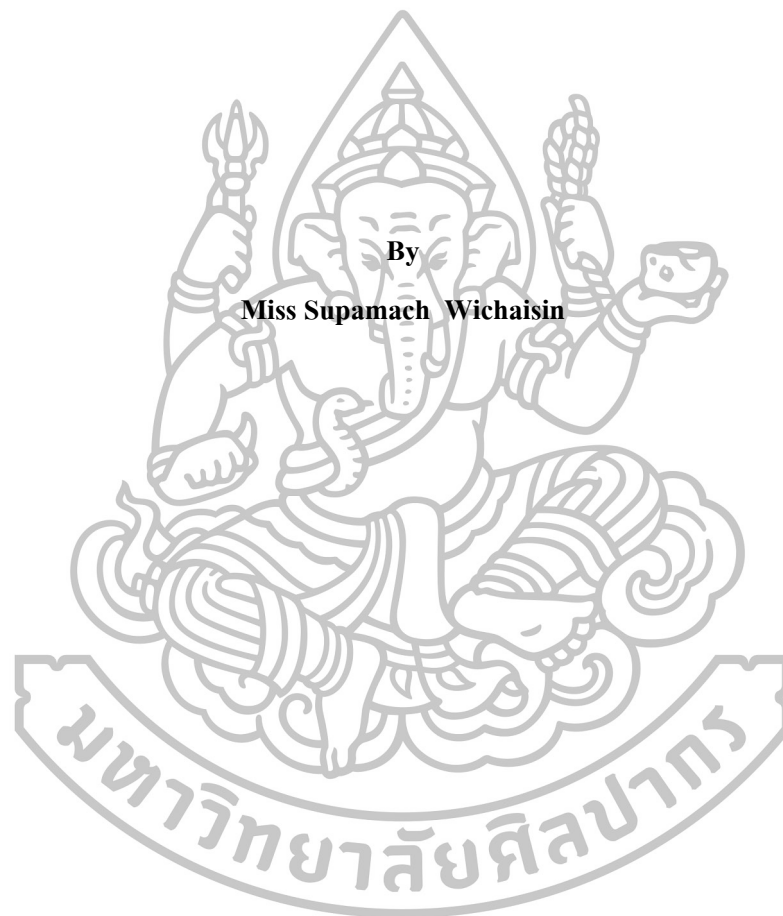
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**IMPROVEMENT OF MODEL TO PREDICT DEHUMIDIFICATION PROCESS  
EFFECTIVENESS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**Master of Engineering Program in Energy Engineering**

**Department of Mechanical Engineering**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2015**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การปรับปรุง  
แบบจำลองในการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ ” เสนอโดย นางสาว  
ศุภมาส วิชัยสินธุ์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทสพล เขตเจนการ

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ชัยวิวัฒน์วรกุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทสพล เขตเจนการ)

...../...../.....



54406208 : สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คำสำคัญ : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์/ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น/อัตราการดูดความชื้น/การวิเคราะห์ความไว

ศุภมาศ วิชัยสินธุ์ : การปรับปรุงแบบจำลองในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ทสพล เขตเจนการ. 147 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลวเพื่อทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านของ Chung (1994) และ Martin and Goswami (2000) เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานโดยมีช่วงอัตราการไหลของอากาศที่ 35 - 335 CFM และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1 - 9 LPH ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 40% เป็นสารดูดความชื้น ทำการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแบบจำลอง (MBD) แบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ กรณีกำหนดให้เป็นค่าคงที่ และกรณีหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่

ผลลัพธ์กรณีแรกพบว่า RMSE ของ Chung และ Martin and Goswami เท่ากับ 0.5573, 43.26 และ MBD เท่ากับ 0.1101, -8.424 ตามลำดับ กรณีที่สองพบว่า RMSE และ MBD เท่ากับ 0.6076, 0.0931 และกรณีสุดท้าย RMSE ของ Chung และ Martin and Goswami เท่ากับ 0.3103, 1.1753 และ MBD เท่ากับ 0.0613, 0.2335 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองลดลงอย่างชัดเจน เมื่อใช้แบบจำลองที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้ว ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลองของ Chung ที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วมาทดลองใช้งานจริง คือ การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น สามารถเรียงลำดับความไวได้ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น, อุณหภูมิของอากาศ, อัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้น, อุณหภูมิของสารดูดความชื้น และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แต่ตัวแปรด้านอากาศจะเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากเป็นสภาพอากาศจริง ดังนั้น ในการออกแบบและใช้งานเครื่องดูดความชื้นจึงควรให้ความสำคัญกับตัวแปรด้านสารดูดความชื้นก่อน

---

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ลายมือชื่อนักศึกษา..... ปีการศึกษา 2558  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

54406208 : MAJOR : ENERGY ENGINEERING

KEY WORD : MOISTURE EFFECTIVENESS MODEL, MOISTURE REMOVAL EFFECTIVENESS, MOISTURE REMOVAL RATE, SENSITIVITY ANALYSIS

SUPAMACH WICHAISIN : IMPROVEMENT OF MODEL TO PREDICT DEHUMIDIFICATION PROCESS EFFECTIVENESS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.THOSAPON KATEJANEKARN. D.Eng. 147 pp.

The purposes of this research was to study and improve the model of the performance of liquid desiccant dehumidification system. The study used a mathematical model from Chung (1994) and Martin and Goswami (2000). A set of actual experiments was conducted air flow rate 35-335 CFM, desiccant flow rate 1-9 LPH and 40% concentration calcium chloride solution as the liquid desiccant

The comparison of root mean square error (RMSE) and mean bias difference (MBD) was considered in 3 cases: case 1 was that the models were applied without adjusting the coefficients in the models, case 2 was that the effectiveness was assumed constant, and case 3 was that models were applied after the coefficients in the models were adjusted corresponding to the type of the desiccant and the operating condition. For case 1, it was found RMSE and MBD from Chung's model was 0.5573, 0.1101 whereas the RMSE and MBD from Martin and Goswami's model was 43.24, -8.424, respectively. For case 2, it was found RMSE and MBD of the results was 0.6076, 0.0931, respectively. For the last case, it found RMSE and MBD from Chung's model was 0.3103, 0.0613 whereas the RMSE and MBD from Martin and Goswami's model was 1.1753, 0.2335, respectively. It can be seen that the error in case 3 Chung's model reduced more than Martin and Goswami's model. Thus we used Chung's model were applied after the coefficients in the model to a sensitivity study of input parameters on the moisture removal rate. The results showed that desiccant concentration was the most sensitivity parameter, followed by air temperature, air flow rate, desiccant flow rate, desiccant temperature and air relative humidity, respectively. In real practice, input parameters on the air side cannot be controlled since they belong to the actual ambient air. Therefore, when designing and operating a liquid desiccant dehumidifier, one should focus on the parameters on the desiccant side which are concentration, flow rate, and temperature, respectively.



Department of Mechanical Engineering  
Student's signature .....  
Thesis Advisor's signature .....

Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล เขตเจนการ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำตลอดจนถ่ายทอด ประสบการณ์ความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัยและงานวิจัยในครั้งนี้ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความ ถูกต้องครบถ้วนและสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวที่คอยสนับสนุน ส่งเสริมและให้กำลังใจซึ่งช่วย เป็นพลังและแรงบันดาลใจให้ผู้วิจัยสามารถศึกษาและทำงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ร่วมเรียนร่วมศึกษามาด้วยกัน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจซึ่ง กันและกันจนสามารถทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าหรือประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาแก่พระคุณบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและอบรมสั่งสอน แนะนำ ให้การสนับสนุนและกำลังใจอย่างดียิ่งเสมอ มา



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ณ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	7
ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
ขั้นตอนของการวิจัย.....	7
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
แหล่งความร้อนและความชื้น .....	9
คุณสมบัติของอากาศ (Air properties) .....	11
สารดูดความชื้น (Desiccant).....	13
วัฏจักรของสารดูดความชื้น (Desiccant cycle) .....	13
ชนิดของสารดูดความชื้น (Desiccant type).....	14
คุณสมบัติของสารดูดความชื้นชนิดของเหลว (Liquid desiccant properties).....	16
ลักษณะของเครื่องดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว .....	25
สมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น.....	28
ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะกระบวนการดูดความชื้น.....	30
การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิด ของเหลว.....	39
การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน.....	43
3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	45
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	45
กำหนดตัวแปรของการทดลอง .....	47
ระบบดูดความชื้นที่ใช้และขั้นตอนการทดลอง.....	47



บทที่	หน้า
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
จุดตรวจวัดระบบดูดความชื้น.....	54
ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของระบบดูดความชื้น.....	55
ขั้นตอนการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	56
การวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปรงานวิจัย.....	56
สถานที่ทำวิจัย.....	57
ระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย.....	57
4 ผลการวิจัย.....	58
ผลของสมรรถนะระบบดูดความชื้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลง.....	58
การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่.....	61
การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่.....	86
การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่.....	95
ตัวอย่างการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น.....	126
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	132
การทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น.....	132
การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของการดูดความชื้นมาใช้งานจริง.....	134
ข้อเสนอแนะ.....	135
รายการอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก.....	151
ภาคผนวก ก การใช้งานโปรแกรมเพื่อปรับปรุงชุดค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น.....	152
ประวัติผู้วิจัย.....	156

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การใช้ไฟฟ้ารายสาขาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2559 (2 เดือนแรกของปี) .....	2
1.2 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารประเภทต่างๆ ของประเทศไทย .....	2
1.3 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (ร้อยละ) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ .....	3
1.4 สถิติอุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ .....	3
2.1 ตัวอย่างอัตราการปล่อยความร้อนของอุปกรณ์ต่างๆ .....	10
2.2 คุณสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ .....	16
2.3 ตัวแปรสำหรับการคำนวณความดันไอของสารละลายทั้ง 2 ชนิด .....	17
2.4 ตัวแปรสำหรับหาค่าความหนาแน่นของสารละลายทั้ง 2 ชนิด .....	18
2.5 ตัวแปรในการคำนวณความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	18
2.6 ตัวแปรสำหรับคำนวณแรงดึงผิวของสารละลายทั้งสอง .....	19
2.7 ตัวแปรสำหรับคำนวณความหนืดของสารละลายทั้งสอง .....	20
2.8 ค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณค่าความหนืดของน้ำอิมิตัว .....	21
2.9 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณความร้อนจำเพาะของสารละลาย .....	22
2.10 ตัวแปรสำหรับหาค่าแตกต่างของการใช้พลังงานในการระเหย .....	24
2.11 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น .....	40
3.1 สิ่งตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดในจุดต่าง ๆ .....	54
4.1 ค่าความเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ....	72
4.2 ค่าความเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการทำนายอัตราการ ดูดความชื้นจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของ กระบวนการดูดความชื้น ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ .....	85
4.3 ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของ Chung .....	97
4.4 ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami .....	98
4.5 ค่าความเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ ...	111
4.6 ค่าความเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการทำนายอัตราการดูด ....	124
4.7 ค่าความเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการทำนายอัตราการดูด ความชื้น เมื่อกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ .....	94
4.8 สภาวะฐานของตัวแปรต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	126
5.1 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น .....	134

ตารางที่

หน้า

5.2 สรุปผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีต่ออัตราการดูดความชื้น ..... 135



## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การผลิตไฟฟ้ารายเดือนของไทย .....	1
1.2 ภาวะสบายของ ASHRAE .....	4
1.3 ความแตกต่างของพลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศด้วยวิธี Overcool and Reheat.....	5
2.1 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น .....	14
2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ต่อความดันไอ .....	17
2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อความความหนาแน่น.....	19
2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อแรงตึงผิว .....	20
2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อความหนืด .....	21
2.6 ผลกระทบต่อสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ต่อความร้อนจำเพาะ .....	22
2.7 ผลกระทบของต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl <sub>2</sub> ) ต่อความร้อนจำเพาะ.....	23
2.8 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อความหนืด .....	24
2.9 แพ็คทาวเวอร์แบบไหลสวนทางกัน .....	26
2.10 แพ็คทาวเวอร์แบบไหลทางเดียวกัน.....	26
2.11 แพ็คทาวเวอร์ แบบไหลตัดกัน .....	27
2.12 เพลทคอลัมน์ .....	27
2.13 หอสเปรย์ .....	28
2.14 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของ กระบวนการดูดความชื้น .....	30
2.15 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของ กระบวนการดูดความชื้น .....	31
2.16 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น .....	31
2.17 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและ ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	32
2.18 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและ ประสิทธิภาพ ของกระบวนการดูดความชื้น .....	32
2.19 ผลกระทบของสัดส่วนความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น.....	33
2.20 ผลกระทบของสัดส่วนความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น และประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	33
2.21 ผลกระทบของสัดส่วนความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น และประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	34
2.22 ผลกระทบของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น .....	34
2.23 ผลกระทบของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผล ของ กระบวนการดูดความชื้น .....	35

รูปที่	หน้า
2.24 ผลกระทบของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	35
2.25 ผลกระทบของอุณหภูมิสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น .....	36
2.26 ผลกระทบของอุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	36
2.27 ผลกระทบของอุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	37
2.28 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น .....	37
2.29 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	38
2.30 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น .....	38
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.2 แผนผังระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3 เครื่องดูดความชื้นในอากาศ .....	50
3.4 หอฝึ่งเย็น .....	50
3.5 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ .....	51
3.6 เครื่องวัดความหนาแน่นของสารละลาย.....	51
3.7 เครื่องวัดความเร็วลม.....	52
3.8 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	52
3.9 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ.....	53
3.10 เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ .....	53
3.11 จุดตรวจวัดระบบดูดความชื้นที่ใช้ในการทดลอง.....	54
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้น .....	59
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น .....	59
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศ .....	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น .....	61
4.5 ผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 1 ลิตรต่อชั่วโมง .....	62
4.6 ผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 3 ลิตรต่อชั่วโมง.....	63
4.7 ผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	64







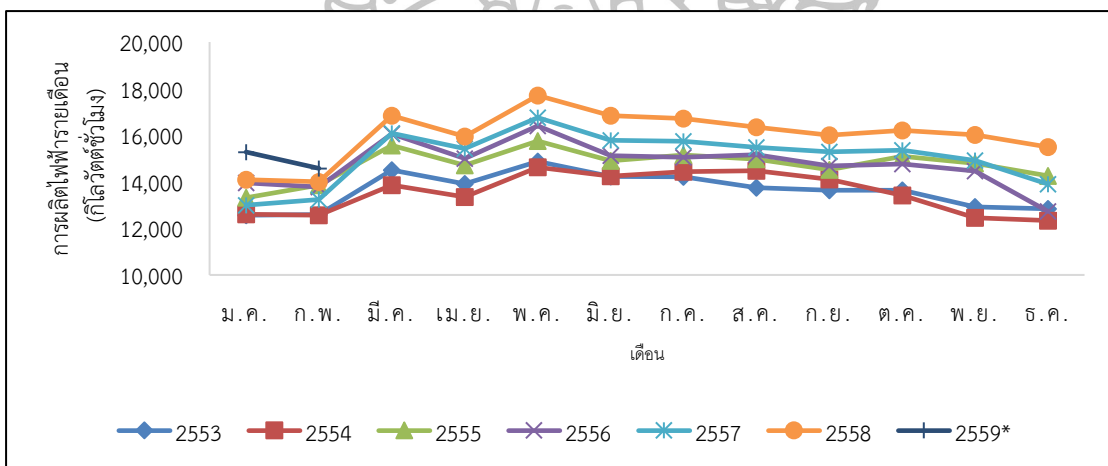


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการของภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจ และภาคอุตสาหกรรม ในกิจวัตรประจำวันของคนต้องพึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก เพื่อทำให้เกิดความสะดวก ความสบาย และตอบสนองความต้องการของคน จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าจำเป็นต้องผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน (กลางเดือนกุมภาพันธ์ ถึง กลางเดือนพฤษภาคม) มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากที่สุด



รูปที่ 1.1 การผลิตไฟฟ้ารายเดือนของไทย [1]

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละภาคส่วนดังตารางที่ 1.1 โดยในปี 2559 เป็นการสำรวจในช่วง 2 เดือนแรกของปี (เดือนมกราคมและเดือนกุมภาพันธ์) มีการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 27,471 กิกะวัตต์ชั่วโมง ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 8.01 โดยเป็นการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด ยกเว้นภาคการเกษตรกรรมที่มีการใช้ไฟฟ้าลดลง โดยภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด คือ ร้อยละ 44 ของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด รองลงมา คือ ภาคครัวเรือนและธุรกิจ มีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ร้อยละ 22 และ 19 ตามลำดับ ซึ่งถ้ามองในภาคอาคารซึ่งเป็นการรวมภาคครัวเรือนและภาคธุรกิจเข้าด้วยกัน พบว่ามีความต้องการไฟฟ้าใกล้เคียงกับภาคอุตสาหกรรม คือ ร้อยละ 41

ตารางที่ 1.1 การใช้ไฟฟ้ารายสาขาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2559 (2 เดือนแรกของปี) [1]

สาขา	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559
ครัวเรือน	33,216	32,799	36,447	37,657	38,993	41,285	6,139
กิจการขนาดเล็ก	15,586	15,446	17,013	18,374	18,807	19,767	3,052
ธุรกิจ	22,996	23,660	27,088	30,423	31,362	33,218	5,235
อุตสาหกรรม	68,039	67,942	72,336	72,536	73,782	74,772	12,098
ส่วนราชการและ องค์กรที่ไม่แสวงหา กำไร	5,049	4,888	3,799	149	152	179	28
เกษตรกรรม	335	297	377	354	414	386	49
การใช้ไฟฟ้าที่ไม่คิด มูลค่า	2,034	2,168	2,191	2,379	2,517	2,743	479
อื่นๆ	2,046	1,655	2,527	2,470	2,592	2,479	392
รวม	149,301	148,855	161,778	164,342	168,619	174,829	27,472

เมื่อพิจารณาเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคารประเภทต่างๆ ดังตารางที่ 1.2 พบว่า ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในระบบปรับอากาศ ซึ่งมีสัดส่วนที่สูงถึงประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด ดังนั้น ถ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศของอาคารได้ ก็จะสามารถช่วยให้การใช้พลังงานของประเทศและโลกลดลงได้

ตารางที่ 1.2 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารประเภทต่างๆ ของประเทศไทย [2]

ประเภทอาคาร	ระบบปรับอากาศ	ระบบแสงสว่าง	น้ำร้อนและอื่นๆ
สำนักงาน	61.0	19.0	20.0
โรงพยาบาล	58.3	22.5	19.2
โรงแรม	55.6	23.9	23.5

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่กลางคาบสมุทรอินโดจีนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อยู่ระหว่างละติจูดที่ 5 ถึง 21 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 97 ถึง 106 องศาตะวันออก ซึ่งเป็นแถบบริเวณเส้นศูนย์สูตร จึงทำให้มีภูมิอากาศเป็นแบบเขตร้อน หรือแบบสะวันนา จึงมีอากาศที่ร้อนชื้น ปกคลุมเกือบตลอดทั้งปี เว้นแต่บริเวณที่อยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดิน ตั้งแต่ภาคกลางขึ้นไป ความชื้นสัมพัทธ์ จะลดลงชัดเจน ในช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อน และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดทั้งปีเท่ากับร้อยละ 72 ถึง 80 และมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 32 ถึง 34 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 1.3 และ 1.4

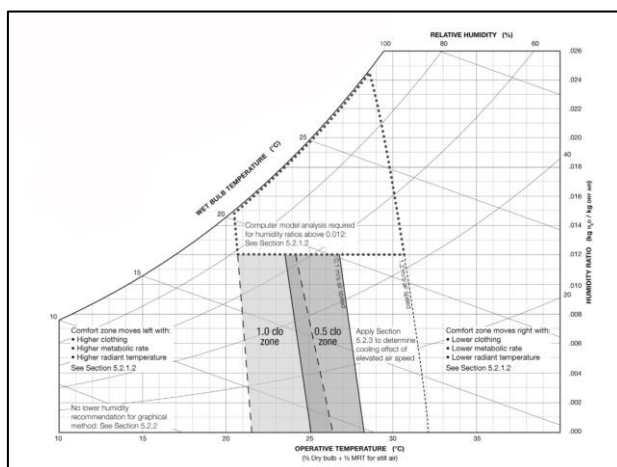
ตารางที่ 1.3 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (ร้อยละ) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ [3]

ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	เฉลี่ยตลอดปี
เหนือ	73	62	81	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	69	65	80	72
กลาง	71	69	79	73
ตะวันออก	71	74	81	76
ใต้ฝั่งตะวันออก	81	77	78	79
ใต้ฝั่งตะวันตก	77	76	84	80

ตารางที่ 1.4 สถิติอุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ [3]

ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	เฉลี่ยตลอดปี
เหนือ	31.1	36.1	32.4	33.2
ตะวันออกเฉียงเหนือ	30.6	35.2	32.6	32.8
กลาง	32.3	36.2	33.4	34.0
ตะวันออก	32	34.1	32.3	32.8
ใต้ฝั่งตะวันออก	30.4	33	32.7	32.0
ใต้ฝั่งตะวันตก	32	34.1	31.6	32.6

จากข้อมูลสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยข้างต้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่ได้อยู่ในเขตภาวะสบาย (Thermal comfort) ที่ทางสมาคมวิศวกรทำความร้อนทำความเย็น และปรับอากาศแห่งอเมริกา (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ASHRAE) ได้ประเมินภาวะสบายของมนุษย์ โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วงฤดูกาล คือ ฤดูหนาวและฤดูร้อน โดยกล่าวว่า ภาวะสบายของมนุษย์อยู่ช่วงระหว่างอุณหภูมิเอฟเฟคทีฟ (Effective temperature) 20 ถึง 27 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative temperature) ร้อยละ 30 ถึง 60 มีความชื้นสัมบูรณ์ (Humidity ratio) อยู่ในช่วง 4 ถึง 14 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง ดังรูปที่ 1.2

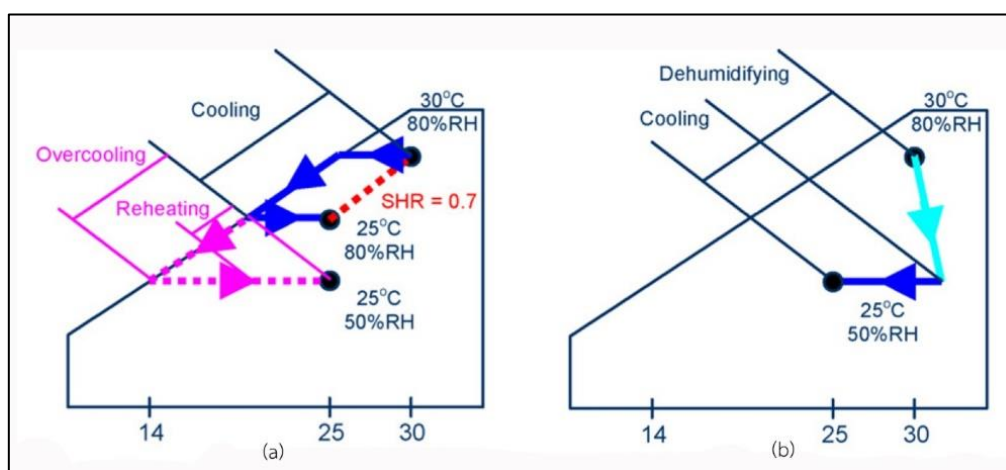


รูปที่ 1.2 ภาวะสบายของ ASHRAE [4]

ดังนั้นเพื่อตอบสนองต่อภาวะสบายของมนุษย์ ระบบปรับอากาศเป็นระบบหนึ่งที่สามารถตอบสนองต่อภาวะสบายได้ โดยวัตถุประสงค์หลักของระบบปรับอากาศ คือ การทำความเย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นมักเป็นแบบระบบอัดไอ (Vapor compression) โดยคอยล์เย็น (Cooling coil) จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและกำจัดความชื้นที่เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อภาวะสบายของมนุษย์ โดยจะทำการดูดความร้อนออกจากอากาศ ทำให้อุณหภูมิก๊าซอากาศลดลงถึงจุดน้ำค้าง (Dewpoint temperature) เมื่อทำความเย็นต่อไป ไอน้ำในอากาศบริเวณรอบ ๆ คอยล์เย็นจะเกิดการควบแน่น ทำให้ความชื้นถูกกำจัดออก แต่อุณหภูมิก็ยังลดต่ำลง ระบบทำความเย็นแบบอัดไอจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้ที่เทอร์โมสแตท (Thermostat) โดยไม่สนใจว่าความชื้นในอากาศจะมีหรือน้อย ในฤดูที่มีอากาศชื้นเช่น ฤดูร้อน หรือฤดูฝน ความชื้นส่วนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่สบายตัว นอกจากนี้ความชื้นจะทำให้วัสดุในพื้นที่ปรับอากาศเสื่อมคุณภาพเช่น เกิดเชื้อรา หรือปัญหาอื่น ๆ ตามมา [5]

ภาระของระบบปรับอากาศมีอยู่ 2 ชนิด คือ ภาระความร้อนสัมผัส (Sensible load) และภาระความร้อนแฝง หรือภาระทางความชื้น (Latent load) ซึ่งภาระความร้อนแฝงส่วนใหญ่จะเกิดมาจากอากาศระเหย ในงานที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นไปพร้อม ๆ กัน โดยหากใช้ระบบอัดไอจะใช้กระบวนการทำความเย็นให้เกินความต้องการและให้ความร้อนกลับแก่อากาศเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Overcool and reheat ซึ่งการทำให้อากาศเย็นเกินความต้องการสามารถทำได้โดยการนำอากาศมาผ่านคอยล์เย็น ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิก๊าซอากาศลดต่ำลงถึงจุดน้ำค้าง และไอน้ำในอากาศบริเวณรอบ ๆ จะเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำจนอากาศมีอัตราส่วนความชื้นในระดับที่ต้องการ แต่อากาศจะมีอุณหภูมิต่ำมาก จึงต้องนำอากาศไปผ่านคอยล์ร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศ ระบบประเภทนี้จำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานมาก เพราะต้องสูญเสียพลังงานในการทำให้อากาศเย็นจัดเสียก่อน ซึ่งจะทำให้ระบบทำความเย็นจะมีขนาดใหญ่ แล้วจึงต้องสูญเสียพลังงานในการทำความร้อนให้อากาศอุ่นขึ้นมาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (a) ดังนั้นการแยกการควบคุมระหว่างอุณหภูมิและความชื้นออกจากกัน โดยใช้

ระบบระบบดูดความชื้น (Dehumidifying system) อากาศก่อนเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศทำหน้าที่ลดความชื้นในอากาศ และให้การลดอุณหภูมิเป็นหน้าที่ของระบบปรับอากาศ จะทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าลดน้อยลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (b) เนื่องจากระบบดูดความชื้นใช้เพียงปั๊มและพัดลมซึ่งใช้พลังงานน้อยกว่าคอมเพรสเซอร์ในระบบอัดไอ โดยอาจลดลงได้ถึงร้อยละ 35 ถึง 51 [6–10]



รูปที่ 1.3 ความแตกต่างของพลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศด้วยวิธี Overcool and reheat และการแยกควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ [11]

เครื่องดูดความชื้นในอากาศจำเป็นต้องใช้สารดูดความชื้น (Desiccant) ซึ่งสารดูดความชื้น หมายถึง สารที่มีความสามารถในการเก็บกักน้ำ สารดูดความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง ได้แก่ ซิลิกาเจล ซีโอไลท์ และโมเลกุลาร์ซีฟ เป็นต้น และสารดูดความชื้นชนิดของเหลว ได้แก่ สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) สารละลายลิเทียมโบรไมด์ (LiBr) สารละลายไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นต้น โดยสารดูดความชื้นบางประเภทอาจจะเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารจะดูดซับความชื้นที่ติดมากับวัสดุหรืออากาศโดยที่ไม่ทำให้ตัวสารดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งโดยมากมักจะเป็นสารดูดความชื้นชนิดของแข็ง ส่วนสารดูดความชื้นชนิดของเหลวมักจะเป็นสารดูดความชื้นชนิดดูดซึม (Absorbent) เนื่องจากสารดูดความชื้นชนิดของเหลวสามารถมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีและกายภาพหลังจากการดูดความชื้น [12]

การถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับสารดูดความชื้นเกิดจากความแตกต่างของความดันไอของอากาศและสารดูดความชื้น โดยหากให้อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นที่มีความดันไอต่ำกว่า ความดันไอของอากาศ จะทำให้อากาศถ่ายเทไปสู่สารดูดความชื้น กระบวนการดังกล่าวมีลักษณะเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลชื้นพร้อมกัน (Simultaneous heat and mass transfer) จนกระทั่งความดันไอของสารดูดความชื้นและอากาศเข้าสู่สภาวะสมดุล กระบวนการดูดความชื้นก็จะหยุดลง ในระหว่างกระบวนการดูดความชื้นจะเกิดความร้อนของการควบแน่นจะส่งผลให้อากาศบริเวณรอบ ๆ และตัวสารดูดความชื้นเองมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนสารดูดความชื้นก็จะมีปริมาณความชื้นในตัวสูงขึ้นเนื่องจากน้ำจากอากาศที่ดูดซึมมา ดังนั้น การที่จะนำสารดูดความชื้น

กลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ระบบจะต้องทำให้สารดูดความชื้นมีปริมาณความชื้นในตัวลดต่ำลงดังเดิม โดยการผ่านความร้อนเพื่อให้ความชื้นที่อยู่ภายในสารดูดความชื้นถูกระเหยออก ซึ่งการให้ความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง การใช้น้ำร้อนหรือไอน้ำจากหม้อไอน้ำ หรือการใช้พลังงานจากความร้อนทิ้งหรือแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น ความร้อนจากคอยล์ร้อนของระบบปรับอากาศ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น

หากเปรียบเทียบการทำงานของสารดูดความชื้นชนิดของเหลวและชนิดของแข็ง จะพบว่า สารดูดความชื้นชนิดของเหลวนั้นสามารถดูดความชื้นได้มากกว่าสารดูดความชื้นชนิดของแข็ง [13] นอกจากนี้ขนาดของระบบและอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากสารดูดความชื้นชนิดของเหลวนั้นจะมีขนาดเล็กและต่ำกว่าสารดูดความชื้นชนิดของแข็งอีกด้วย อย่างไรก็ตาม สารดูดความชื้นชนิดของแข็งมีข้อได้เปรียบกว่าชนิดของเหลวในเรื่องของการติดตั้งใช้งานได้ง่ายกว่า ระบบไม่เป็ยกชั้น ไม่มีผ้อยละอองพัดติดไปกับอากาศ กัดกร่อนโครงสร้างและระบบที่น้อยกว่า รวมทั้งไม่มีเสียงดังจากการไหลเวียนของของเหลวภายในท่อและถังเก็บ

เนื่องจากแหล่งความชื้นในพื้นที่ปรับอากาศส่วนใหญ่มาจากอากาศระบาย [14] จึงนิยมให้ระบบดูดความชื้นกำจัดความชื้นในอากาศก่อนส่งเข้าพื้นที่ปรับอากาศ โดยทั่วไประบบดูดความชื้นจะต้องประกอบไปด้วยการทำงานของ 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการดูดความชื้นของสารดูดความชื้น (Water sorption) กระบวนการระเหยน้ำออกจากสารดูดความชื้น (Desiccant regeneration) และกระบวนการลดอุณหภูมิสารดูดความชื้น (Desiccant cooling) [15–23] สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะในส่วนของกระบวนการดูดความชื้น

สมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นสามารถพิจารณาได้จาก ประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวล ประสิทธิภาพเอนทาลปี ประสิทธิภาพความชื้น ประสิทธิภาพอุณหภูมิ ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น และอัตราการดูดความชื้น โดยสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นที่งานวิจัยนี้พิจารณา คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น และอัตราการดูดความชื้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดความชื้นมีด้วยกัน 2 ด้าน คือ ด้านกายภาพ (Physical parameters) ซึ่งได้แก่ ลักษณะของเครื่องดูดความชื้น พื้นที่ผิวจำเพาะของแพ็คกิ้ง ความสูงเบด เป็นต้น และด้านการทำงาน (Operating parameters) โดยในส่วนนี้สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ด้าน คือ ด้านอากาศและด้านสารดูดความชื้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายสมรรถนะของระบบดูดความชื้น [24–27] ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้จะทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยจะครอบคลุมเฉพาะภาวะการทำงานสำหรับงานวิจัยนั้นเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในช่วงที่กว้างขึ้น (ช่วงอัตราการไหลของอากาศที่ 35 ถึง 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1 ถึง 9 ลิตรต่อชั่วโมง) ซึ่งจะอ้างอิงรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยของ Chung และ Martin and Goswami เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม จึงนำไปทดลองใช้งานจริง ซึ่งจากการศึกษาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในเรื่องของผลกระทบของตัวแปรต้นที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น

เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ [15, 22, 26–42] แต่ยังไม่มีการวิเคราะห์อิทธิพลหรือความไว (Sensitivity) ของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น ดังนั้นจึงทดลองนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วมาวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น เพื่อที่จะสามารถออกแบบและควบคุมการทำงานของเครื่องดูดความชื้นได้อย่างเหมาะสม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดความชื้น โดยอ้างอิงรูปแบบจาก Chung และ Martin and Goswami

1.2.2 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้วมาทดลองใช้งานจริงในการวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นด้านการดำเนินงานที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สารดูดความชื้นที่ใช้ในระบบดูดความชื้นเป็นสารดูดความชื้นชนิดของเหลว คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

1.3.2 ชนิดของเครื่องดูดความชื้น คือ แบบแพ็คเบด (Packed bed) และชนิดของแพ็คเกจ (Packing) คือ พอลริง (Pall ring) ขนาด 25 มิลลิเมตร

1.3.3 การทำงานของระบบดูดความชื้นอยู่ภายใต้สภาวะอะเดียบาติก (Adiabatic condition)

1.3.4 ไม่พิจารณาความร้อนที่เกิดจากปั๊ม (Pump) และพัดลม (Blower)

1.3.5 ระบบดูดความชื้นทำงานภายใต้สภาวะอากาศของจังหวัดนครปฐม

1.3.6 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อระบบดูดความชื้น 6 ตัว ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และ อัตราการไหล อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น

1.3.7 ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของระบบดูดความชื้นที่ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมีมวลเป็นสารดูดความชื้น

1.3.8 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้วมาทดลองใช้งานจริงในการวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น

## 1.4 ขั้นตอนของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung [25] และ Martin and Goswami [26]

1.4.2 ศึกษาตัวแปรต้นที่มีผลต่อระบบดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว

1.4.3 กำหนดตัวแปรต้นที่จะทำการศึกษา



1.4.4 ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการ  
ดูดความชื้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา คือ Chung และ Martin and Goswami

1.4.5 ทดลองนำแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้วมาใช้งานจริง คือ การวิเคราะห์ความไวของ  
ตัวแปรต้นต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น

1.4.6 สรุปผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย





## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น เพื่อทำนายอัตราการดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลวซึ่งเป็นสมรรถนะหลักของกระบวนการ และทดลองนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้วมาใช้งาน โดยใช้ในการวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้น โดยในบทนี้จะกล่าวถึง แหล่งความร้อนและความชื้นที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ปรับอากาศ คุณสมบัติของอากาศ ชนิดของสารดูดความชื้น วัฏจักรของสารดูดความชื้น คุณสมบัติของสารดูดความชื้นชนิดของเหลว ลักษณะของเครื่องดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว สมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น และการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน

### 2.1 แหล่งความร้อนและความชื้น

ความร้อนและความชื้นจะเป็นภาระของระบบปรับอากาศ โดยความร้อนซึ่งในที่นี้จะหมายถึงภาระความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยระดับอุณหภูมิ และความชื้นจะเป็นภาระความร้อนแฝง (Latent heat) ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยระดับของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) หรืออัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) โดยแหล่งกำเนิดของความร้อนและความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แหล่ง ดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 มนุษย์ (Occupant)

มนุษย์เป็นแหล่งกำเนิดทั้งความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัส ซึ่งแต่ละบุคคลก็จะปล่อยความร้อนออกมาที่อัตราไม่เท่ากัน ตามแต่กิจกรรมของแต่ละบุคคลและเพศ

#### 2.1.2 ระบบแสงสว่าง (Lighting system)

ระบบแสงสว่างจะให้เฉพาะความร้อนสัมผัส โดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้ของหลอดไฟจะกลายเป็นความร้อนถึงร้อยละ 78 ถึง 90 ของกำลังไฟฟ้า ดังนั้น จึงมักคิดกำลังทั้งหมดของหลอดไฟเป็นภาระความร้อนเพื่อความสะดวก

### 2.1.3 กรอบอาคาร (Building envelope)

กรอบอาคารจะส่งผ่านเฉพาะความร้อนสัมผัสโดยขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ในการประกอบผนัง หลังคา และพื้นอาคาร เป็นต้น

### 2.1.4 อุปกรณ์ (Equipment)

อุปกรณ์จะให้ทั้งภาระความร้อนแฝงและภาระความร้อนสัมผัส ขึ้นอยู่กับชนิดอุปกรณ์ที่ใช้ในอาคารสำนักงานต่าง ๆ โดยอุปกรณ์แต่ละอย่างจะปล่อยความร้อนซึ่งเป็นภาระปรับอากาศออกมาไม่เท่ากัน และโดยมากมักไม่สูงเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ระบุไว้บนฉลาก ตัวอย่างอัตราการปล่อยความร้อนของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างอัตราการปล่อยความร้อนของอุปกรณ์ต่าง ๆ [43]

อุปกรณ์	ระดับกำลัง (วัตต์)	อัตราการความร้อน (วัตต์)	
		ความร้อนแฝง	ความร้อนสัมผัส
- โทรทัศน์	-	-	50-100
- คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ	110	-	20
- เครื่องพิมพ์เลเซอร์	320-550	-	70-275
- เครื่องถ่ายเอกสาร	400-1,100	-	20-400
- ตู้เย็น (0.17-0.71 ลูกบาศก์เมตร)	780	-	310
- เครื่องทำน้ำเย็น (30 ลิตรต่อชั่วโมง)	700	-	350
- เต้าไมโครเวฟ (20-30 ลิตร)	600-1,400	-	400-930
- เครื่องต้มกาแฟ (10 แก้ว)	1,500	450	1,050

### 2.1.5 อากาศระบายและอากาศรั่วไหล (Ventilation and infiltration)

ในระบบปรับอากาศทั่วไป จะมีการนำเอาอากาศจากภายนอกเข้ามาพลัดเปลี่ยนกับอากาศภายใน เพื่อนำอากาศที่ผ่านการใช้งานออกไปทิ้งหรือที่เรียกกันว่าอากาศระบาย ซึ่งอากาศระบายจะผ่านตัวกรองฝุ่นละอองของระบบปรับอากาศ แต่ความร้อนและความชื้นของอากาศยังสามารถเข้ามายังพื้นที่ปรับอากาศได้ โดยความชื้นของอากาศ คือ ภาระความร้อนแฝงส่วนใหญ่ของระบบปรับอากาศ และอาจส่งผลให้เกิดภาวะไม่สบายในของคนพื้นที่ปรับอากาศ และสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุที่เก็บอยู่ในพื้นที่ปรับอากาศนั้นได้ ภาระปรับอากาศอันเนื่องมาจากความชื้นที่มาจากอากาศระบายคิดเป็นร้อยละ 80 ของภาระปรับอากาศทั้งหมด [11] ส่วนปริมาณความชื้นที่มาจากคน ระบบแสงสว่าง กรอบอาคาร และอุปกรณ์สำนักงานเมื่อรวมกันแล้วเทียบกับความชื้นที่มาจากอากาศระบายจะคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องกำจัดความชื้นออกจากอากาศระบายเป็นอันดับแรก

## 2.2 คุณสมบัติของอากาศ (Air properties)

อากาศในบรรยากาศประกอบด้วย อากาศแห้ง (Dry air) ซึ่งเป็นอากาศที่ไม่มีไอน้ำเป็นส่วนประกอบ แต่จะประกอบด้วยก๊าซต่าง ๆ และไอน้ำ (Water vapor) โดยไอน้ำที่ปะปนอยู่ในอากาศเรียกว่า ความชื้น (Moisture air) ซึ่งอากาศสามารถอมความชื้นได้ปริมาณที่มากเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง และสามารถอมความชื้นได้น้อยเมื่ออากาศมีอุณหภูมิต่ำ

### 2.2.1 คุณสมบัติของอากาศ

#### 2.2.1.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง คือ อุณหภูมิของอากาศที่สามารถวัดได้โดยตรงจากเทอร์โมมิเตอร์ ถ้าพิจารณาที่แผนภูมิไซโครเมตริกจะแสดงค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งในแกนแนวนอน

#### 2.2.1.2 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิที่สามารถวัดได้โดยทั่วไป โดยที่ปลายเทอร์โมมิเตอร์จะถูกหุ้มด้วยสำลีที่เปียกน้ำ และเมื่อมีอากาศผ่านสำลีที่เปียกน้ำ อุณหภูมิที่อ่านได้จะเป็นตัวบอกว่าอากาศที่พิจารณาอยู่นั้นสามารถรับน้ำได้อีกปริมาณเท่าไร อากาศนั้นจึงจะถึงจุดอิ่มตัว โดยที่อากาศที่ไหลผ่านสำลีเปียกน้ำ เป็นอากาศไม่อิ่มตัวจะทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในสำลีเกิดการระเหย ทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงเนื่องจากเกิดการดึงความร้อนออกไป แต่ถ้าอากาศที่ไหลผ่านเป็นอากาศที่อิ่มตัวอากาศจะไม่ต้องการความชื้นอีก ทำให้อุณหภูมิมียค่าคงที่

#### 2.2.1.3 สัดส่วนความชื้น (Humidity ratio)

สัดส่วนความชื้น คือ สัดส่วนระหว่างไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง โดยมีหน่วยเป็นกิโลกรัมไอน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง (กิโลกรัมไอน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2-1)$$

โดยที่

$m_v$  = มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ (กิโลกรัม)

$m_a$  = มวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัม)

เนื่องจากอากาศเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ ดังนั้น การพิจารณาความดันของอากาศสามารถที่จะให้ความดันอากาศในบรรยากาศมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างความดันย่อยของอากาศแห้งและความดันย่อยของไอน้ำ ดังสมการที่ 2-2

$$P_t = P_a + P_v \quad (2-2)$$

โดยที่

$P_t$  = ความดันไอย่อยของอากาศแห้ง (กิโลปาสกาล)

$P_v$  = ความดันไอย่อยของไอน้ำ (กิโลปาสกาล)

$$PV = mRT \quad (2-3)$$

จากสมการก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) ดังสมการที่ 2-3 และสมการที่ 2-1, 2-2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ 2-4

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V_v / R_v T_v}{P_a V_a / R_a T_a} = \frac{P_v / R_v}{(P_t - P_v) / R_a} \quad (2-4)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าเชิงตัวเลขของ  $R_a$  และ  $R_v$  โดยมีค่าเท่ากับ 0 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน และ 0.4615 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน ตามลำดับ ลงในสมการที่ 2-4 จะสามารถคำนวณสัดส่วนความชื้นของอากาศได้ดังสมการที่ 2-5

$$\omega = \frac{287P_v}{4615P_a} = \frac{0.622P_v}{P_t - P_v} \quad (2-5)$$

$$p_v = \frac{101.325\omega}{0.62198 + \omega} \quad (2-6)$$

#### 2.2.1.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ คือ สัดส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศและปริมาณความชื้นที่สามารถรับได้มากที่สุดในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 0 (สำหรับอากาศแห้ง) ถึงร้อยละ 100 (สำหรับอากาศอิ่มตัว) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-7

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2-7)$$

#### 2.2.1.5 ความดันไออิ่มตัว (Saturated vapor pressure)

ความดันไออิ่มตัว คือ ความดันไอน้ำสูงสุดซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ จากกฎของแก๊สอุดมคติพบว่าความดันไออิ่มตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-8 โดยอุณหภูมิจะต้องอยู่ในช่วง 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส

$$p_{vs}(T_{abs}) = \exp[C_1/T_{abs} + C_2 + C_3 T_{abs} + C_4 T_{abs}^2 + C_5 T_{abs}^3 + C_6 \ln(T_{abs})] \quad (2-8)$$

โดยที่

$T_{abs}$  = อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

$C_1$  =  $-5.8002206 \times 10^3$

$C_4$  =  $4.1764768 \times 10^{-5}$

$C_2$  =  $-5.5162560$

$C_5$  =  $-1.4452093 \times 10^{-8}$

$C_3$  =  $-4.8640239 \times 10^{-3}$

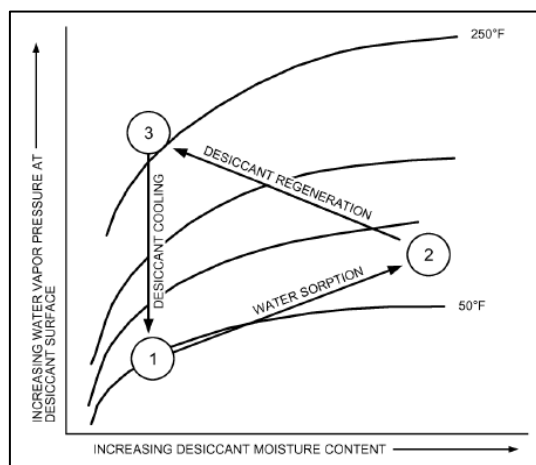
$C_6$  =  $6.5459673$

## 2.3 สารดูดความชื้น (Desiccant)

สารดูดความชื้นเป็นส่วนหนึ่งของสารดูดซับ (Sorbent) โดยสารดูดซับสามารถสกัดและอุ้มก๊าซหรือของเหลวต่าง ๆ ได้ แต่สำหรับสารดูดความชื้นมีคุณสมบัติในการสกัดความชื้นและอุ้มน้ำเท่านั้น ซึ่งวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่โดยรอบตัวเรา เช่น กระดาษ ไม้ หนังสือ หรือวัสดุสังเคราะห์ มีคุณสมบัติเหล่านี้เช่นกัน แตกต่างกันว่าสารดูดความชื้นในเชิงการค้าและมีความสามารถในการสกัดความชื้นและอุ้มน้ำได้มากกว่าซึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 1,000 ของน้ำหนักแห้งของตัวสารดูดความชื้น แม้ในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำๆ [12] การทำงานของสารดูดความชื้นทุกชนิดจะมีลักษณะเหมือนกัน คือ จะเกิดถ่ายเทมวลจากความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นกับอากาศโดยรอบ เมื่อความดันไอบริเวณผิวหน้าของสารดูดความชื้นต่ำกว่าอากาศโดยรอบ สารดูดความชื้นจะสกัดความชื้นออกจากอากาศ และเมื่อความดันไอบริเวณผิวหน้าของสารดูดความชื้นสูงกว่าอากาศ สารดูดความชื้นจะปล่อยความชื้นออกสู่อากาศ

## 2.4 วัฏจักรของสารดูดความชื้น (Desiccant cycle)

จากรูปที่ 2.1 พบว่าความชื้นจากอากาศสัมผัสกับสารดูดความชื้น ทำให้ปริมาณความชื้นในตัวและความดันไอน้ำที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น กระบวนการดูดซับความชื้นดำเนินไปจนกระทั่งสารดูดความชื้นเข้าสู่สถานะสมดุลกับอากาศที่จุด 2 ซึ่งเป็นจุดที่สารดูดความชื้นจะไม่สกัดความชื้นอีกต่อไป (ความชื้นในสารดูดความชื้นเท่ากับความชื้นในอากาศโดยรอบ) ระหว่างจุด 1 และจุด 2 เป็นกระบวนการดูดซับความชื้นซึ่งอุณหภูมิของสารดูดความชื้นและอากาศโดยรอบจะสูงขึ้น เนื่องจากการดูดซับความชื้นจะทำให้เกิดความร้อนสัมผัสขึ้น เท่ากับความร้อนแฝงของไอน้ำที่ถูกดูดออกจากสารดูดความชื้นรวมกับการเพิ่มขึ้นของความร้อนจากการดูดซับซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 25 ของความร้อนแฝงของไอน้ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถ่ายเทให้สารดูดความชื้นและสิ่งแวดล้อม [12] การจะทำให้สารดูดความชื้นสามารถสกัดความชื้นได้อีกครั้งต้องทำให้ความชื้นในสารดูดความชื้นลดลง โดยการระเหยความชื้นออกมา กระบวนการให้ความร้อนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดความชื้นออกจนกระทั่งสารดูดความชื้นแห้งและสมดุลกับความชื้นของอากาศโดยรอบ ที่จุด 3 นี้ สารดูดความชื้นจะมีอุณหภูมิสูงและความดันไอน้ำที่ผิวสูงแต่ความชื้นในสารดูดความชื้นต่ำ การนำสารดูดความชื้นกลับมาใช้ต้องทำความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นที่จุด 3 ต่ำลงโดยการให้ความเย็นจากภายนอก ทำให้อุณหภูมิของสารดูดความชื้นลดลงจนกระทั่งอยู่ในสถานะที่จุดที่ 1 (เริ่มต้น) สารดูดความชื้นจะพร้อมใช้งานในการดูดความชื้นอีกครั้ง



รูปที่ 2.1 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น [12]

## 2.5 ชนิดของสารดูดความชื้น (Desiccant type)

### 2.5.1 สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง (Solid desiccant)

สารดูดซับ คือ วัสดุแข็งที่มีพื้นที่ผิวภายในมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยมวล เพียง 1 กรัม จะมีพื้นที่ผิวมากถึง 50,000 ตารางฟุต โครงสร้างของสารดูดซับคล้ายกับฟองน้ำแข็ง พื้นที่ผิวของสารดูดซับประกอบด้วยท่อฝอยมากมาย ภายในท่อฝอยมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับซึ่งสามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำภายในความจุของช่องว่างนั้น น้ำที่ถูกดูดซับจะควบแน่นอยู่ในท่อฝอยของสารดูดซับ สารดูดซับสามารถดูดซับความชื้นได้เพราะสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิว ดังนั้นแต่ละพื้นที่ผิวบนสารดูดความชื้นจะดึงดูดโมเลกุลของน้ำที่ประจุไฟฟ้าตรงข้ามกัน ความจุของสารดูดความชื้นชนิดแข็งจะน้อยกว่าสารดูดความชื้นชนิดเหลว เช่น สารดูดความชื้นแบบโมเลกุลซีฟ (Molecular sieves) สามารถดูดซับความชื้นได้ร้อยละ 17 ของน้ำหนักแห้งที่อากาศอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 20 แตกต่างจากลิเทียมคลอไรด์ซึ่งสามารถดูดซับน้ำได้ร้อยละ 130 ของน้ำหนักแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน [12] ชนิดของสารดูดความชื้นชนิดของแข็งที่ใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel), ซีโอไลต์ (Zeolites), แอคติเวทเตด อลูมินา (Activated alumina), โมเลกุลซีฟ (Molecular sieve)

### 2.5.2 สารดูดความชื้นเหลว (Liquid desiccant)

สารดูดความชื้นชนิดเหลวจะมีความจุในการอุ้มน้ำได้สูง เช่น แต่ละโมเลกุลของลิเทียมคลอไรด์สามารถอุ้มน้ำได้ 2 โมเลกุลเมื่ออยู่ในสภาวะแห้ง เมื่อ 1 โมเลกุลของลิเทียมคลอไรด์อุ้มน้ำไว้ 2 โมเลกุล ลิเทียมคลอไรด์จะกลายเป็นสารละลายเหลวและสามารถอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น ถ้าสารละลายของสารดูดความชื้นลิเทียมคลอไรด์อยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 จะสามารถสกัดโมเลกุลของน้ำได้ประมาณ 26 โมเลกุลต่อลิเทียมคลอไรด์ 1 โมเลกุล ซึ่งเมื่อคิดเป็น

น้ำหนักที่สามารถดูดซึมน้ำได้ต่อน้ำหนักแห้งของลิเทียมคลอไรด์จะมีค่าประมาณร้อยละ 1,000 ของน้ำหนักแห้ง [12]

คุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดความชื้นชนิดเหลวที่สำคัญสำหรับการใช้งาน คือ ความดันไอของสารดูดความชื้น ความหนาแน่น ความหนืด ความจุความร้อนจำเพาะ และความแตกต่างของเอนทัลปี โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของสารดูดความชื้นจะได้อาจมาจากผู้ผลิต ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนาสมการความสัมพันธ์ของคุณสมบัติต่างๆ ของสารดูดความชื้น 2 ชนิด คือ สารละลายลิเทียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ โดยได้ศึกษางานที่ผ่านมา 1,850 ตัวอย่าง ได้แสดงรูปสมการคุณสมบัติต่างๆในของตัวแปรไร้มิติ [13, 44]

สารดูดความชื้นชนิดเหลวโดยส่วนใหญ่จะเป็นเกลือ หรือเกลือทางเคมีที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ (Lithium chloride, LiCl) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl<sub>2</sub>) และไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) เป็นต้น [9, 14, 22, 42, 45]

ลิเทียมคลอไรด์เป็นสารดูดความชื้นชนิดเหลวที่เสถียร ซึ่งเป็นลักษณะของสารดูดความชื้นที่ดีและสามารถลดความชื้นอากาศได้ต่ำกว่าร้อยละ 15 โมเลกุลของลิเทียมคลอไรด์สามารถมีน้ำเป็นองค์ประกอบได้มากกว่า 2 โมเลกุล สารดูดความชื้นจะเป็นของเหลวและกลับมาดูดซับน้ำ ถ้าสารละลายเข้าสู่สภาวะสมดุลกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 ลิเทียมคลอไรด์จะประกอบด้วยน้ำ 26 โมเลกุล ดูดซับน้ำได้มากกว่าร้อยละ 1,000 ของน้ำหนักแห้ง ลิเทียมคลอไรด์ไม่กลายเป็นไอในสภาวะอากาศปกติ จึงทำให้สามารถใช้ดูดความชื้นในอาคารได้ แต่ลิเทียมคลอไรด์มีฤทธิ์การกัดกร่อนเป็นอันตรายต่อระบบท่อถ้ามีการเชื่อมต่อกับระบบจ่ายอากาศและราคาค่อนข้างสูง โดยลิเทียมคลอไรด์มีราคาประมาณ 2,500 บาทต่อกิโลกรัม

แคลเซียมคลอไรด์มีราคาถูกกว่าลิเทียมคลอไรด์มาก และสามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาประมาณ 25 บาทต่อกิโลกรัม โดยในสภาวะปกติ สารแคลเซียมคลอไรด์จะมีสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งจะสามารถดูดซึมน้ำความชื้นจากอากาศจนกระทั่งแคลเซียมคลอไรด์เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นสารละลาย โดยอัตราการดูดซึมน้ำความชื้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของสารละลายที่สัมผัสกับอากาศ รวมทั้งอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านสารละลาย และความแตกต่างของความดันไอระหว่างอากาศและสารละลาย ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) เป็นสารดูดความชื้นชนิดเหลวที่ปลอดภัยซึ่งใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม นอกจากนี้มีความสามารถในการจับก๊าซเสียได้ดีกว่าลิเทียมคลอไรด์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความดันไอที่ต่ำ ไกลคอลบางส่วนสามารถระเหยไปในอากาศ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในระบบปรับอากาศในอาคาร

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ [13]

ความเข้มข้น ของสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ (ร้อยละโดยมวล)	คุณสมบัติของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์			
	มวล โมเลกุล	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อวินาที)
50.66	219.09	29.90	-	17.1
60.63	183.05	45.30	-	18.3
75.49	147.02	176.00	174	18.5
86.03	129.00	187.00	183	22.4
100.00	110.99	773.00	1,935	21.6

## 2.6 คุณสมบัติของสารดูดความชื้นชนิดของเหลว (Liquid desiccant properties)

Conde [44] ได้ทำการศึกษาสารดูดความชื้นชนิดเหลวสองชนิด คือ สารละลายลิเทียมคลอไรด์ และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ รวมทั้งได้พัฒนาสมการในรูปแบบของเอมพิริคัล เพื่อใช้ในการทำนายหาค่าคุณสมบัติจำเพาะของสารดูดความชื้นชนิดเหลว ซึ่งสมการดังกล่าวประกอบด้วยฟังก์ชันของความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารดูดความชื้นชนิดเหลว ดังนี้

### 2.6.1 ความดันไอ (Vapor pressure)

ความดันไอของสารดูดความชื้น เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้น อุณหภูมิของสารดูดความชื้น และความสัมพันธ์ของความดันไออยู่ในรูปของ  $\pi$

$$\pi \equiv \frac{p_{\text{sol}}(\xi, T)}{p_{\text{H}_2\text{O}}(T)} = \pi_{25} f(\xi, \theta) \quad (2-9)$$

โดยที่

$p_{\text{sol}}(\xi, T)$  = ความดันไอของสารดูดความชื้นที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ (กิโล-  
ปาสคาล)

$p_{\text{H}_2\text{O}}(T)$  = ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ (กิโลปาสคาล)

$\xi$  = ความเข้มข้นของสารละลาย (ร้อยละโดยมวล)

$$\pi_{25} = 1 - \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{-\frac{(\xi-0.1)^2}{0.005}} \quad (2-10)$$

$$f(\xi, \theta) = A + B\theta \quad (2-11)$$



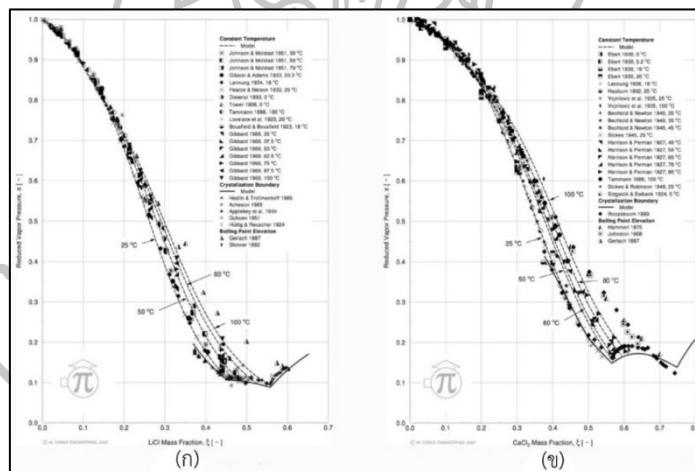
โดยที่

$$A = 2 - \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2}, B = \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1$$

จากสมการข้างต้นสามารถสรุปตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความดันไอของสารละลายได้โดยความดันไอของสารละลายทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของของสารละลายลดลง ดังรูปที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรสำหรับการคำนวณความดันไอของสารละลายทั้ง 2 ชนิด [44]

ตัวแปร	LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	ตัวแปร	LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O
$\pi_0$	0.28	0.31	$\pi_5$	0.49	0.49
$\pi_1$	4.30	3.698	$\pi_6$	0.362	0.478
$\pi_2$	0.60	0.60	$\pi_7$	-4.75	-5.20
$\pi_3$	0.21	0.231	$\pi_8$	-0.40	-0.40
$\pi_4$	5.10	4.584	$\pi_9$	0.03	0.018



รูปที่ 2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ต่อความดันไอ (ก) สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (ข) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ [13, 44]

### 2.6.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของสารละลายเมื่อเทียบที่สถานะอิ่มตัวและอุณหภูมิเดียวกัน โดยพบว่าความหนาแน่นของสารละลายทั้งสองเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย ดังสมการที่ 2-12

$$\rho_{sol}(\xi, T) \rho_{H_2O}(T) \sum_{i=0}^3 \rho_i \left( \frac{\xi}{1-\xi} \right)^i \tag{2-12}$$

โดยที่

$\frac{\xi}{1-\xi}$  = เศษส่วนมวลของสารละลาย (Mass fraction)

$\rho_{H_2O}(T)$  = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังสมการที่ 2-13

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรสำหรับหาค่าความหนาแน่นของสารละลายทั้ง 2 ชนิด [44]

	LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O
$\rho_0$	1.0	1.0
$\rho_1$	0.540966	0.836014
$\rho_2$	-0.303792	-0.436300
$\rho_3$	0.100791	0.105642

$$\rho_{H_2O}(\tau) = \rho_{c,H_2O}(1 + B_0\tau^{1/3} + B_1\tau^{2/3} + B_2\tau^{5/3} + B_3\tau^{16/3} + B_4\tau^{43/3} + B_5\tau^{110/3}) \quad (2-13)$$

โดยที่

$\tau \equiv 1 - \theta$

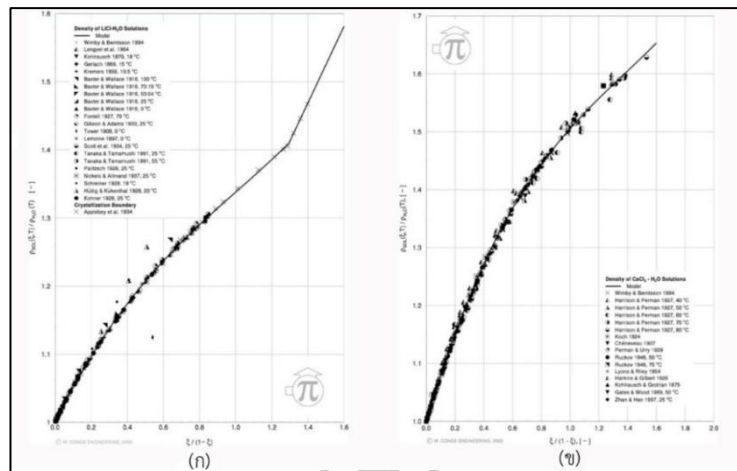
$\theta$  = อุณหภูมิลดที่อุณหภูมิน้ำวิกฤติ (องศาเซลเซียส)

$\rho_{c,H_2O}$  = ความหนาแน่นของน้ำที่จุดวิกฤติ (322 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรในการคำนวณความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ [44]

i	B
0	1.9937718430
1	1.0985211604
2	-0.5094492996
3	-1.7619124270
4	-44.9005480267
5	-723692.2618632

จากรูปที่ 2.3 พบว่าความหนาแน่นของสารละลายทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่อความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายลดลง ความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับสมการนี้ คือ  $0 \leq \xi \leq 0.56$  สำหรับสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ  $0 \leq \xi \leq 0.60$  สำหรับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อความหนาแน่น (ก) สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) (ข) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) [13], [44]

2.6.2 แรงตึงผิว (Surface tension)

แรงตึงผิวของสารละลายเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ลดลงและความเข้มข้นของสารละลาย ดังสมการที่ 2-14

$$\sigma_{sol}(\xi, \theta) = \sigma_{H_2O}(\theta)(1 + \sigma_1\xi + \sigma_2\xi\theta + \sigma_3\xi\theta^2 + \sigma_4\xi^2 + \sigma_5\xi^3) \tag{2-14}$$

โดยที่

$\theta$  = อุณหภูมิที่ลดลงของน้ำ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-15  
 $\sigma_{H_2O}(\theta)$  = แรงตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิที่ลดลงต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-16

$$\theta = \frac{T}{T_{c,H_2O}} \tag{2-15}$$

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรสำหรับคำนวณแรงตึงผิวของสารละลายทั้งสอง [44]

	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$
LiCl-H <sub>2</sub> O	2.757115	-12.011299	14.751818	2.443204	-3.147739
CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	2.33067	-10.78779	13.56611	1.95017	-1.77990

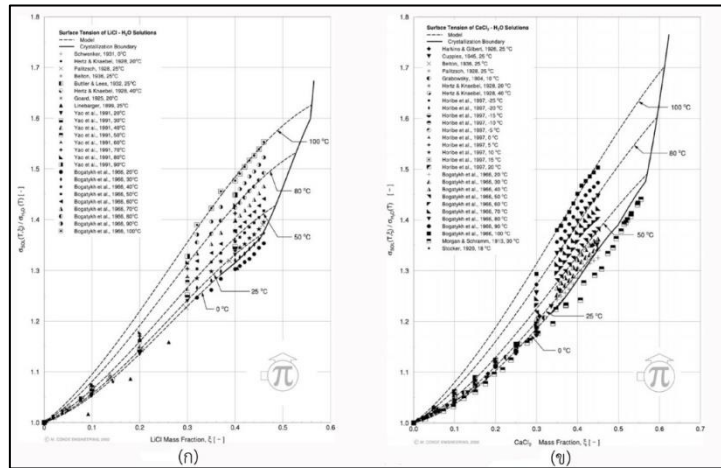
$$\sigma_{H_2O}(\theta) = \sigma_0[1 - b(1 - \theta)](1 - \theta)^\mu \tag{2-16}$$

โดยที่

$\sigma_0$  = 235.8 มิลลิเมตร-นิวตันต่อเมตร  
 $B$  = -0.625

$\mu = 1.256$

เมื่อความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงตึงผิวของสารละลายเพิ่มขึ้น สัดส่วนแรงตึงผิวระหว่างสารละลายและน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายเพิ่ม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อแรงตึงผิว (ก) สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) (ข) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>)

2.6.3 ความหนืด (Dynamic viscosity)

ความหนืดของสารละลายลิเทียมคลอไรด์และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-17

$$\eta_{sol}(\zeta, \theta) = \eta_{H_2O}(\theta) e^{\eta_1 \zeta^{3.6} + \eta_2 \zeta + \eta_3 \zeta^2 + \eta_4 \zeta^2} \tag{2-17}$$

โดยที่

$\zeta$  = สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-18

$\eta$  = ค่าความหนืดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.7

$$\zeta \equiv \frac{\xi}{(1-\xi)^{1/0.6}} \tag{2-18}$$

ตารางที่ 2.7 ตัวแปรสำหรับคำนวณความหนืดของสารละลายทั้งสอง [44]

	LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O		LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O
$\eta_1$	0.090481	-0.169310	$\eta_3$	0.675875	0.574230
$\eta_2$	1.390262	0.817350	$\eta_4$	-0.583517	0.398750

โดยที่ค่าความหนืดของน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-19 และตารางที่ 2.8 แสดงค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณค่าความหนืดของน้ำ

$$\eta_{H_2O} = \eta_{H_2O,0} \times (A + B\theta^{0.02} + C\theta^{0.04} + D\theta^{0.08} + E\theta^{2.85} + F\theta^8) \quad (2-19)$$

โดยที่

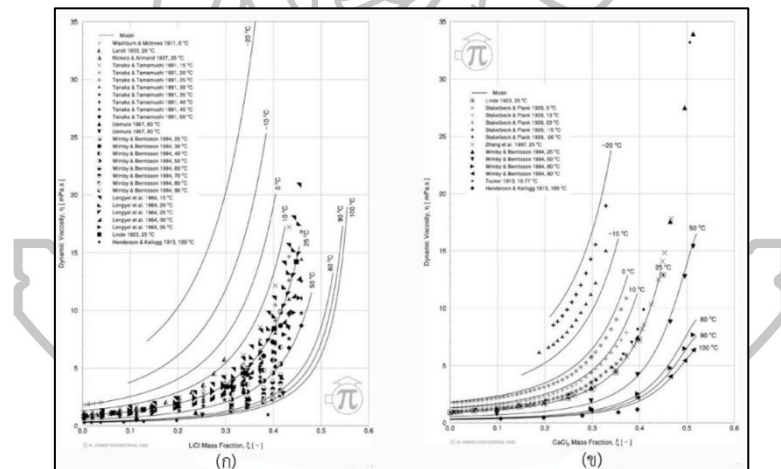
$\theta$  = อุณหภูมิลดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-20

$$\theta \equiv \frac{T}{228} - 1 \quad (2-20)$$

ตารางที่ 2.8 ค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณค่าความหนืดของน้ำอิมิตัว

A	B	C	D	E	F
1.0261862	12481.702	-19510.923	7065.286	-395.561	143922.996

ความหนืดของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของสารละลายลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อความหนืด (ก) สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) (ข) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>)

### 2.6.4 ความจุร้อนจำเพาะ (Specific thermal capacity)

สำหรับการคำนวณหาค่าความจุร้อนจำเพาะของสารละลายลิเทียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์แสดงในสมการที่ 2-21

$$C_{p\text{sol}}(T,\xi) = C_{p\text{H}_2\text{O}}(T) \times (1 - f_1(\xi) \times f_2(T)) \quad (2-21)$$

โดยที่

$C_{pH_2O}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน) สามารถคำนวณได้  
ดังสมการที่ 2-22

$$C_{pH_2O}(\theta) = A + B\theta^{0.02} + C\theta^{0.04} + D\theta^{0.06} + E\theta^{1.8} + F\theta^8 \quad (2-22)$$

สำหรับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายลิเทียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน  
ร้อยละ 31 โดยมวล

$$f_1(\xi) = A\xi + B\xi^2 + C\xi^3 \quad (2-23)$$

ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 31 สามารถหาค่า  $f_1(\xi)$  ได้ดังสมการที่ 2-24  
ค่า  $f_2(\theta)$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-25 และตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.9

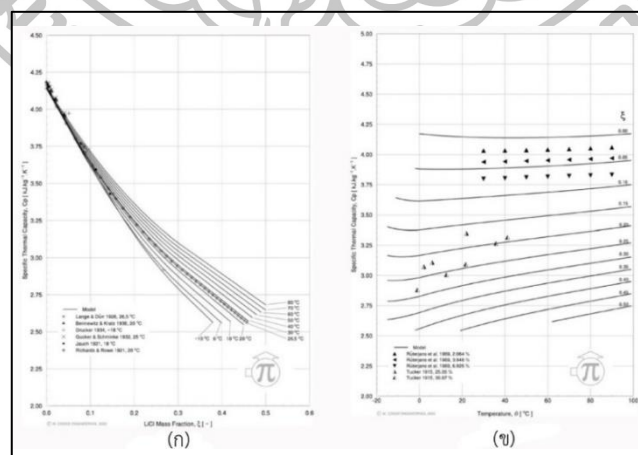
$$f_1(\xi) = D + E\xi \quad (2-24)$$

$$f_2(\theta) = F\theta^{0.02} + G\theta^{0.04} + H\theta^{0.06} \quad (2-25)$$

ตารางที่ 2.9 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของสารละลาย

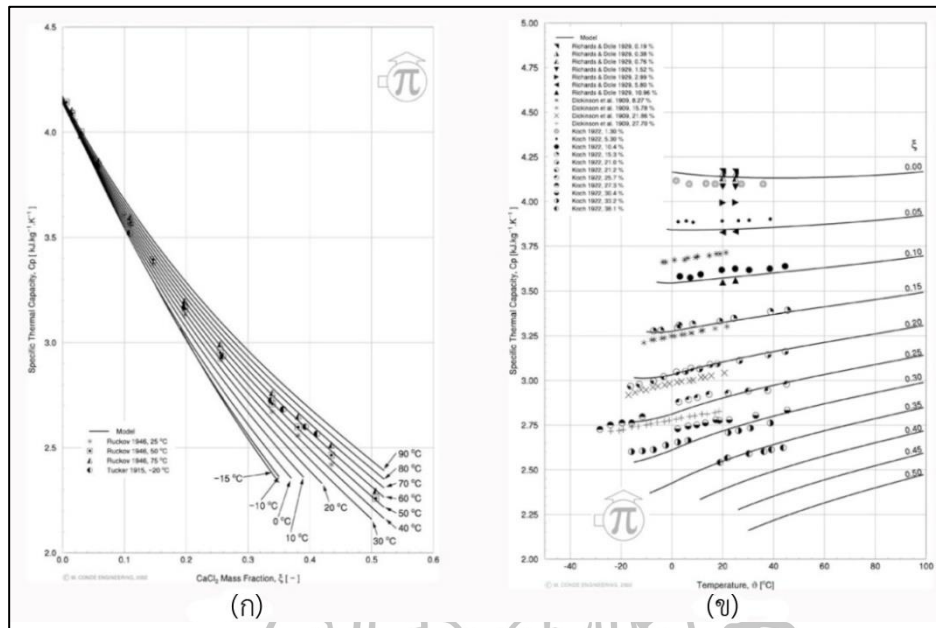
	A	B	C	D	E	F	G	H
LiCl-H <sub>2</sub> O	1.43980	-1.24317	-0.12070	0.12825	0.62934	58.5225	-105.6343	47.7948
CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	1.63799	-1.69002	1.05124	0.0	0.0	58.5225	-105.6343	47.7948

ความจุความร้อนจำเพาะของสารละลายลดลงก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของสารละลายลดลง และ  
อุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ต่อความจุความร้อนจำเพาะ  
(ก) ความเข้มข้นของสารละลาย (ข) อุณหภูมิของสารละลาย





รูปที่ 2.7 ผลกระทบของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) ต่อความจุร้อนจำเพาะ (ก) ความเข้มข้นของสารละลาย (ข) อุณหภูมิของสารละลาย

2.6.5 ความแตกต่างของการใช้พลังงานในการระเหยน้ำ (Differential enthalpy of dilution)

การระเหยน้ำออกจากสารละลายโดยใช้เครื่องระเหยน้ำ สำหรับการระเหยน้ำจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานความร้อน เรียกว่า ความแตกต่างของการใช้พลังงานในการระเหย (Differential enthalpy of dilution) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-26

$$\Delta h_d = \Delta h_{d,0} \left[ 1 + \left( \frac{z}{H_1} \right) H_2 \right]^{H_3} \tag{2-26}$$

โดยที่

- $z$  = สามารถคำนวณได้จากร้อยละความเข้มข้นของสารละลายโดยมวลดังสมการที่ 2-27
- $\Delta h_{d,0}$  = ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-28

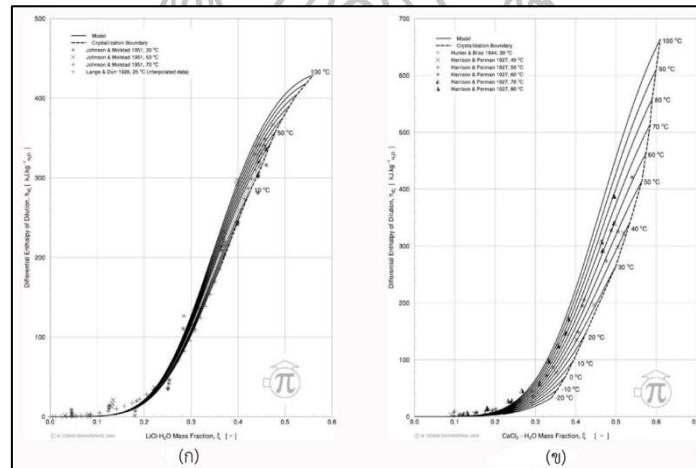
$$z = \frac{\xi}{H_4 - \xi} \tag{2-27}$$

$$\Delta h_{d,0} = H_5 + H_6 \theta \tag{2-28}$$

ตารางที่ 2.10 ตัวแปรสำหรับหาค่าแตกต่างของการใช้พลังงานในการระเหย

	LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O		LiCl-H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O
H <sub>1</sub>	0.845	0.855	H <sub>4</sub>	0.6	0.8
H <sub>2</sub>	-1.965	-1.965	H <sub>5</sub>	169.105	-955.690
H <sub>3</sub>	-2.265	-2.265	H <sub>6</sub>	457.850	3011.974

พลังงานที่ใช้ในการระเหยเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8 โดยทั่วไปส่วนใหญ่แล้วความร้อนสำหรับการระเหยและการควบแน่นของสารละลายสูงกว่าน้ำบริสุทธิ์



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดต่อความหนืด  
(ก) สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) (ข) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>)

### 2.6.6 อายุการใช้งานของสารดูดความชื้น [12]

1. อายุในการใช้งานของสารดูดความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งปนเปื้อนในกระแสกาศ สารดูดความชื้นมีอายุการใช้งานมากที่สุด 10,000 ถึง 100,000 ชั่วโมงหรือมากกว่านี้
2. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดจากสารปนเปื้อน
3. การสูญเสียพื้นที่ผิวหน้าในการดูดซับซึ่งเกิดจากการหลุดตันหรือการเสื่อมสภาพจากความชื้นและความร้อน (Hydrothermal degradation)
4. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดจากสารปนเปื้อน



5. การสูญเสียพื้นที่ผิวหน้าในการดูดซับซึ่งเกิดจากการอุดตันหรือการเสื่อมสภาพจากความชื้นและความร้อน (Hydrothermal degradation)
7. สารดูดความชื้นชนิดเหลวจะไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าสารดูดความชื้นชนิดแข็งเมื่อในกระแสดูดอากาศมีสิ่งปนเปื้อนชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไอน้ำ
8. สารดูดความชื้นชนิดแข็งจะเกิดการอุดตันซึ่งขึ้นอยู่กับการทำงานของสารดูดความชื้นแต่ละชนิดและปริมาณของสารดูดความชื้นในการไหลของอากาศ

## 2.7 ลักษณะของเครื่องดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว

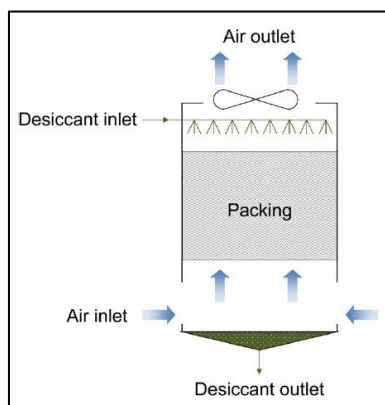
กระบวนการดูดความชื้นนั้นเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนไปพร้อมกันระหว่างอากาศที่ถูกดูดความชื้นกับสารดูดความชื้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นในอุปกรณ์ดูดความชื้น โดยอุปกรณ์ที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ แพ็คทาวเวอร์ เพลทคอลลัมน์ และสเปรย์คอยล์ ซึ่งรูปแบบการไหลของสารละลายกับอากาศก็จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป คือ แบบไหลสวนทาง แบบไหลทางเดียว และแบบไหลตัดกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองโดยใช้แพ็คทาวเวอร์ หรือแพ็คเบด และชนิดของการไหลของสารดูดความชื้นและอากาศเป็นแบบไหลสวนทางกัน

### 2.7.1 แพ็คทาวเวอร์ (Packed tower)

แพ็คทาวเวอร์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 3 แบบ ได้แก่ แบบไหลตัดกัน แบบไหลทางเดียวกัน และแบบไหลสวนทางกัน ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

#### 2.7.1.1 แบบไหลสวนทางกัน (Counter flow)

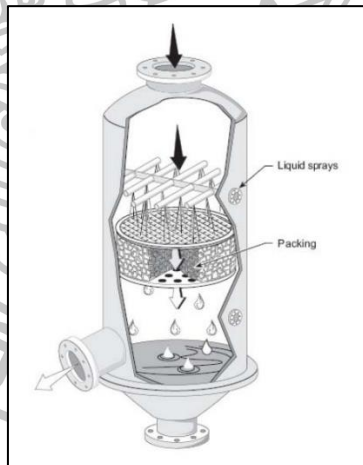
แบบนี้เป็นการให้อากาศไหลสวนทางกับของเหลว ดังรูปที่ 2.9 โดยอากาศจะไหลเข้าทางด้านล่างและออกทางด้านบนของอุปกรณ์ ในขณะที่ของเหลวจะไหลเข้าและถูกสเปรย์ให้เป็นละอองเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไอของอากาศกับของเหลวจากทางด้านบนของอุปกรณ์ ของเหลวที่ไหลสวนทางกับอากาศจะเกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารกับไอน้ำของอากาศ จนกระทั่งของเหลวตกลงสู่ด้านล่างและไหลออกจากอุปกรณ์



รูปที่ 2.9 แพ็คทาวเวอร์แบบไหลสวนทางกัน [46]

#### 2.7.1.2 แบบไหลทางเดียวกัน (Parallel flow)

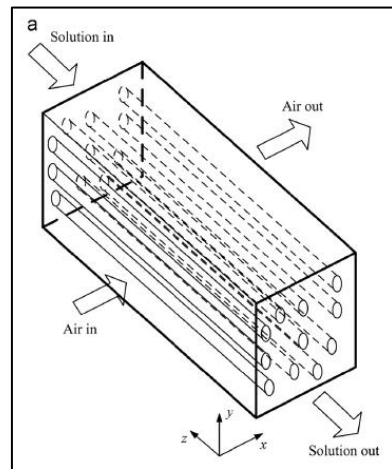
แบบนี้เป็นการให้อากาศไหลทางเดียวกับของเหลว ดังรูปที่ 2.10 โดยอากาศจะเข้าและไหลออกทางด้านเดียวกันกับของเหลวภายในตัวของอุปกรณ์ กล่าวคือ ถ้าของเหลวไหลเข้าและถูกสเปรย์ออกมาจากทางด้านบนและไหลออกทางด้านล่างของอุปกรณ์ อากาศก็จะไหลเข้าจากทางด้านบนและไหลออกทางด้านล่างของอุปกรณ์ที่ใช้



รูปที่ 2.10 แพ็คทาวเวอร์แบบไหลทางเดียวกัน [47]

#### 2.7.1.3 แบบไหลตัดกัน (Cross flow)

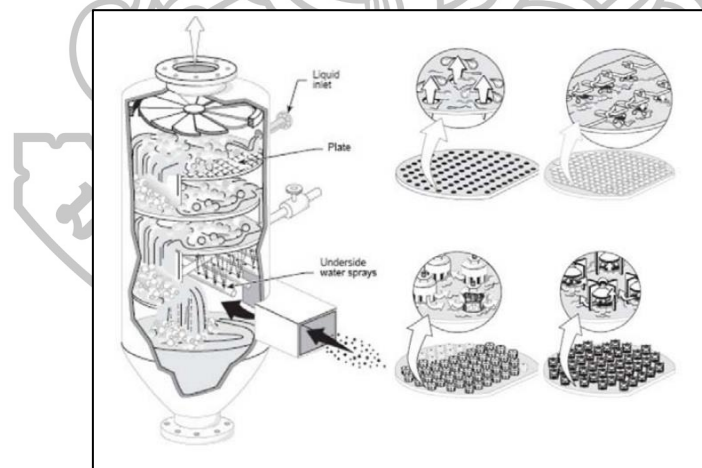
แบบนี้เป็นการให้อากาศไหลผ่านของเหลวในลักษณะขวางกัน โดยตัวอุปกรณ์จะถูกออกแบบให้อยู่ในลักษณะแนวนอน และให้ของเหลวไหลเข้าและถูกสเปรย์ออกมาทางด้านบนของตัวอุปกรณ์ ในขณะที่ให้อากาศไหลผ่านของเหลวที่ถูกสเปรย์ลงมาในแนวนอนดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แพ็คทาวเวอร์ แบบไหลตัดกัน [41],[48 - 49]

#### 2.7.1.4 เฟลทคอลัมน์ (Plate column)

เฟลทคอลัมน์ หรือเฟลทแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการบังคับให้อากาศไหลย้อนขึ้นด้านบนผ่านช่องเล็กๆ ของแผ่นรองรับ (Plate) ไปสัมผัสกับของเหลวที่ไหลอยู่บนแผ่นรองรับนั้น โดยการไหลจะเป็นการไหลแบบสวนทาง คือ ให้อากาศไหลขึ้น และให้ของเหลวไหลลง โดยทั่วไปจะใช้แผ่นรองรับที่ต่อกันเป็นอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซึ่มดังรูปที่ 2.12

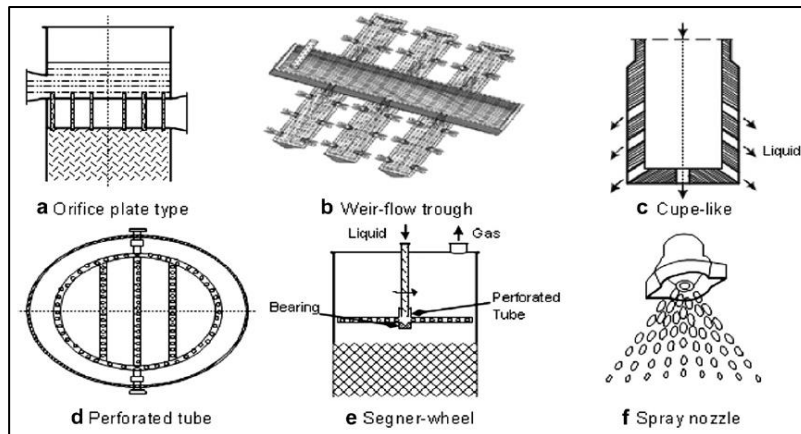


รูปที่ 2.12 เฟลทคอลัมน์ [50]

#### 2.7.1.5 หอสเปรย์ (Spray tower)

หลักการของอุปกรณ์ดูดซึ่มนิดหอสเปรย์หรือสเปรย์คอยล์ คือ การพ่นฝอยของเหลวลงสู่อากาศ โดยให้อากาศไหลเข้าทางด้านล่างของหอสเปรย์ ส่วนของเหลวจะถูกฉีดให้เป็นฝอยทาง

ด้านบนหอ ที่ทางออกของอากาศจะติดตั้งดักละออง เพื่อป้องกันละอองของของเหลวหลุดลอยตามอากาศ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หอสเปรย์ [14]

## 2.8 สมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น

กระบวนการดูดความชื้นเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลไปพร้อม ๆ กัน เพื่อให้ความชื้นออกจากอากาศระบาย ทำให้อากาศระบายมีระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับรักษาคุณภาพอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งจะทำให้ภาระความร้อนแฝงหรือภาระทางความชื้นของพื้นที่ปรับอากาศลดลงด้วย การนำสารดูดความชื้นและอากาศมาสัมผัสกันโดยตรง จะเกิดกระบวนการดูดความชื้นออกจากอากาศซึ่งเกิดจากความดันไอที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะให้กระบวนการดูดความชื้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาตัวแปรต้นด้านสภาวะการทำงาน และสมรรถนะหลักของกระบวนการดูดความชื้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากอัตราการดูดความชื้น และประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น

### 2.8.1 อัตราการดูดความชื้น

อัตราการดูดความชื้นเป็นค่าที่บอกสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นโดยตรง คือ อัตราหรือปริมาณไอน้ำในอากาศที่ถูกกำจัดออกโดยสารดูดความชื้น อัตราการดูดความชื้นสามารถคำนวณได้จากตัวแปรด้านอากาศ คือ ความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศระหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องดูดความชื้น และอัตราการไหลของอากาศ ดังสมการที่ 2-29

$$m_{w,ab} = G_a(\omega_{a,in} - \omega_{a,out}) \quad (2-29)$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณได้จากตัวแปรด้านสารดูดความชื้น คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นระหว่างทางเข้ากับทางออกของเครื่องดูดความชื้น และอัตราการไหลของสารดูดความชื้น ดังสมการที่ 2-30

$$m_{w,ab} = \frac{G_s(\xi_{s,out} - \xi_{s,in})}{\xi_{s,out}} \quad (2-31)$$

โดยที่

$m_{w,ab}$	=	อัตราการดูดความชื้น (กิโลกรัมต่อวินาที)
$G_a$	=	อัตราการไหลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
$G_s$	=	อัตราการไหลของดูดความชื้น (กิโลกรัมต่อวินาที)
$\omega_{a,in}$	=	สัดส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)
$\omega_{a,out}$	=	สัดส่วนความชื้นของอากาศขาออกเครื่องดูดความชื้น (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)
$\xi_{s,in}$	=	ความเข้มข้นของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (ร้อยละโดยมวล)
$\xi_{s,out}$	=	ความเข้มข้นของสารดูดความชื้นขาออกเครื่องดูดความชื้น (ร้อยละโดยมวล)

### 2.8.2 ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น

ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น สามารถหาได้จากอัตราส่วนของความสามารถในการดูดความชื้นจริงเทียบกับความสามารถในการดูดความชื้นสูงสุดทางทฤษฎี หรือความสามารถในการดูดความชื้นที่สามารถทำได้สูงสุด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความชื้นของอากาศทางออกสมดุลกับอัตราส่วนความชื้นเทียบเท่าของอากาศที่อยู่ทีสภาวะสมดุลกับสารดูดความชื้นที่ทางเข้า ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ 2-32

$$\alpha = \frac{\omega_{a,in} - \omega_{a,out}}{\omega_{a,in} - \omega_{s,in}} \quad (2-32)$$

เนื่องจากในระบบดูดความชื้นอากาศมีกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน แต่สมการที่ 2-23 เป็นสมการที่บอกถึงการถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียว ทำให้ได้ข้อมูลไม่เพียงพอในการวิเคราะห์ซึ่งยังจำเป็นต้องทราบประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน หรือประสิทธิภาพเอนทาลปีอีกตัวหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2-33 และ 2-34 ตามลำดับ เพื่อให้ครอบคลุมการสื่อถึงการถ่ายเทความร้อนด้วย

$$\beta_{ab} = \frac{T_{a,in} - T_{a,out}}{T_{a,in} - T_{s,in}} \quad (2-33)$$

$$\varepsilon_{h,ab} = \frac{h_{a,in} - h_{a,out}}{h_{a,in} - h_{s,in}} \quad (2-34)$$

โดยที่

$T_{a,in}$	=	อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)
$T_{a,out}$	=	อุณหภูมิของอากาศขาออกเครื่องดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)
$T_{s,in}$	=	อุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)

$$\begin{aligned}
 h_{a,in} &= \text{เอนทาลปีของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (กิโลจูลต่อโมล)} \\
 h_{a,out} &= \text{เอนทาลปีของอากาศขาออกเครื่องดูดความชื้น (กิโลจูลต่อโมล)} \\
 h_{s,in} &= \text{เอนทาลปีของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (กิโลจูลต่อโมล)}
 \end{aligned}$$

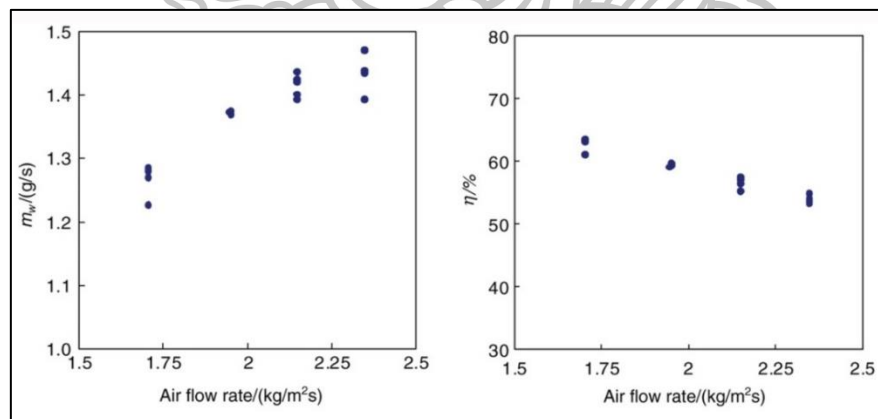
## 2.9 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะกระบวนการดูดความชื้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเครื่องดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มตัวแปรฝั่งอากาศ และกลุ่มตัวแปรฝั่งสารดูดความชื้น

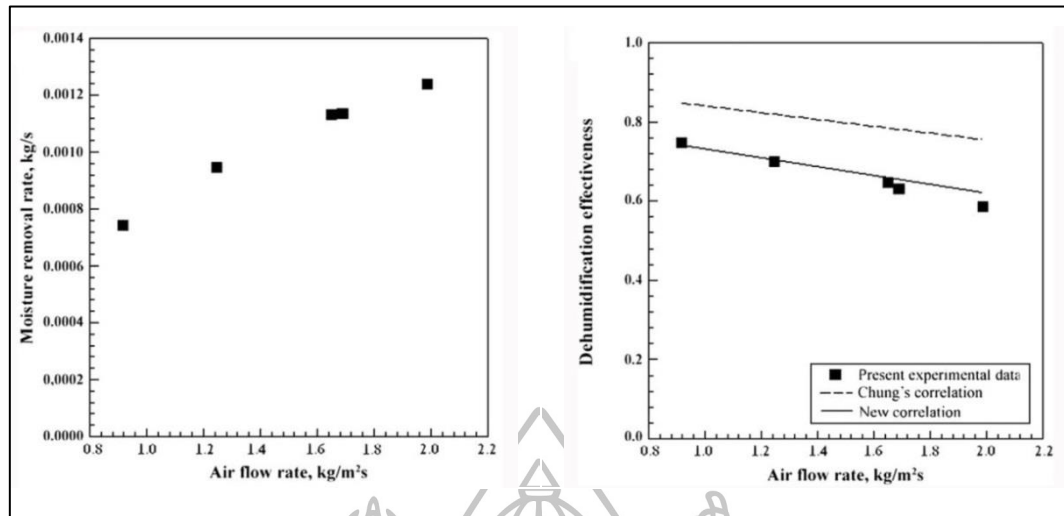
### 2.9.1 ผลกระทบจากตัวแปรฝั่งอากาศ

#### 2.9.1.1 อัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate)

เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลระหว่างสารดูดความชื้นและไอน้ำในอากาศเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างสารดูดความชื้นและไอน้ำในอากาศลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นลดลง ดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



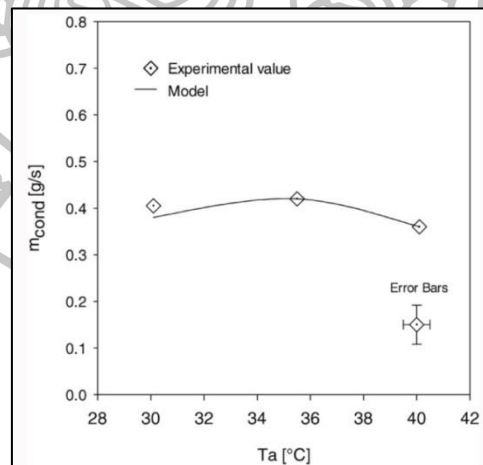
รูปที่ 2.14 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น [49]



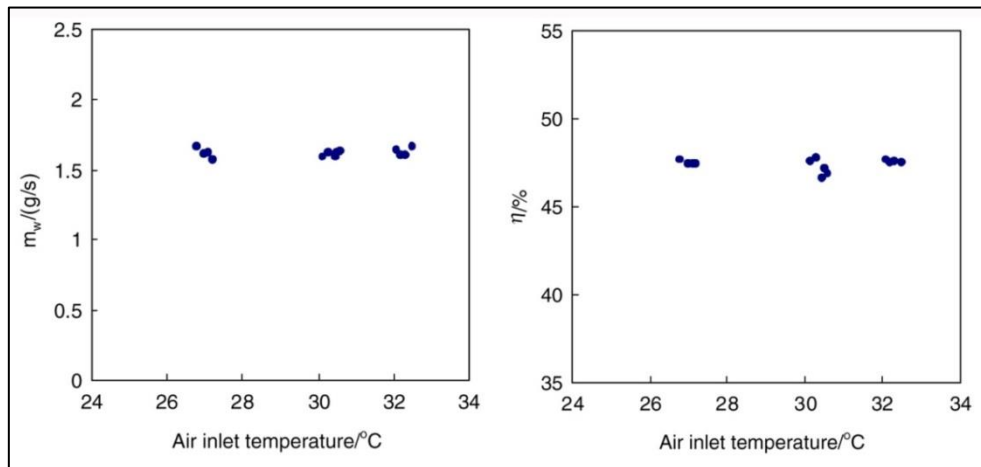
รูปที่ 2.15 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [41]

#### 2.9.1.2 อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (Air inlet temperature)

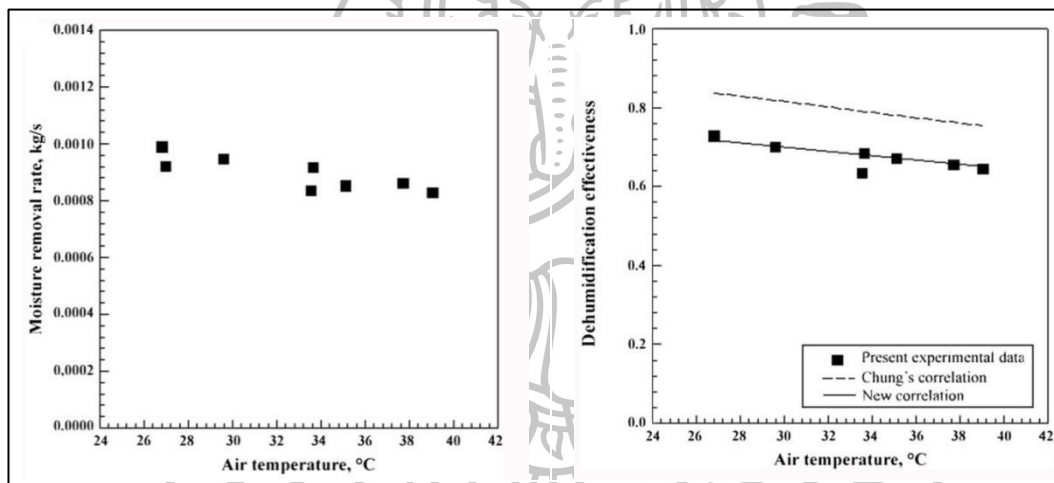
เมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น อัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น ไม่สามารถเห็นแนวโน้มของผลกระทบได้อย่างชัดเจน เนื่องจากความร้อนของอากาศจะถูกถ่ายเทไปยังสารดูดความชื้น จึงทำให้สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.16 ถึง 2.18



รูปที่ 2.16 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น [32]



รูปที่ 2.17 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [49]

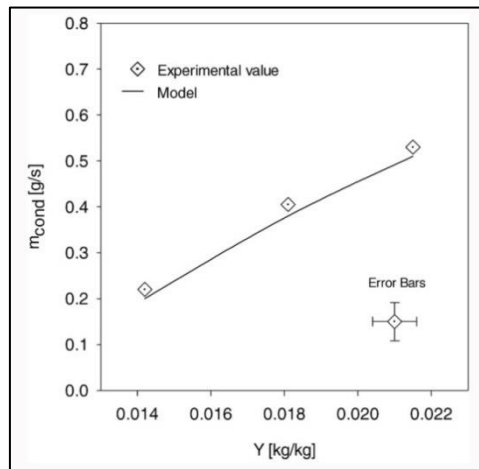


รูปที่ 2.18 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [41]

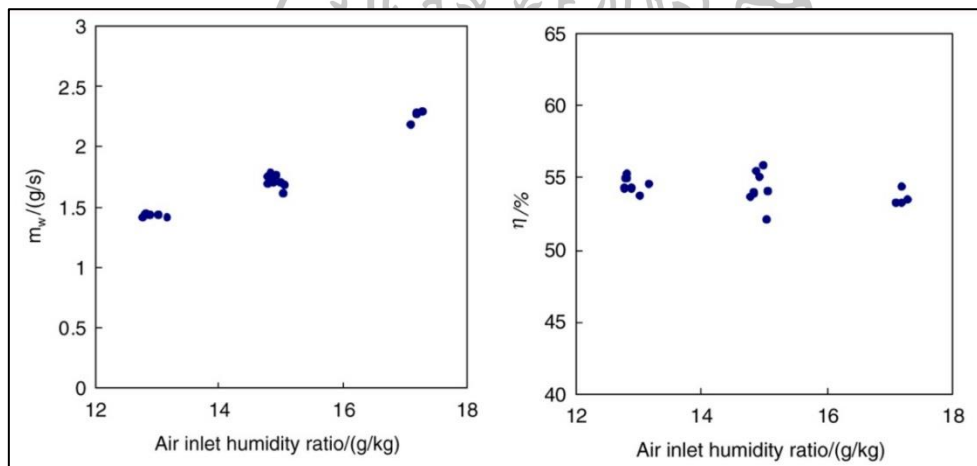
### 2.9.1.3 สัดส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (Air inlet humidity ratio)

เมื่อสัดส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนความชื้นอากาศที่เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถเห็นผลกระทบที่ชัดเจนต่อประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น ดังรูปที่ 2.19 ถึง 2.21

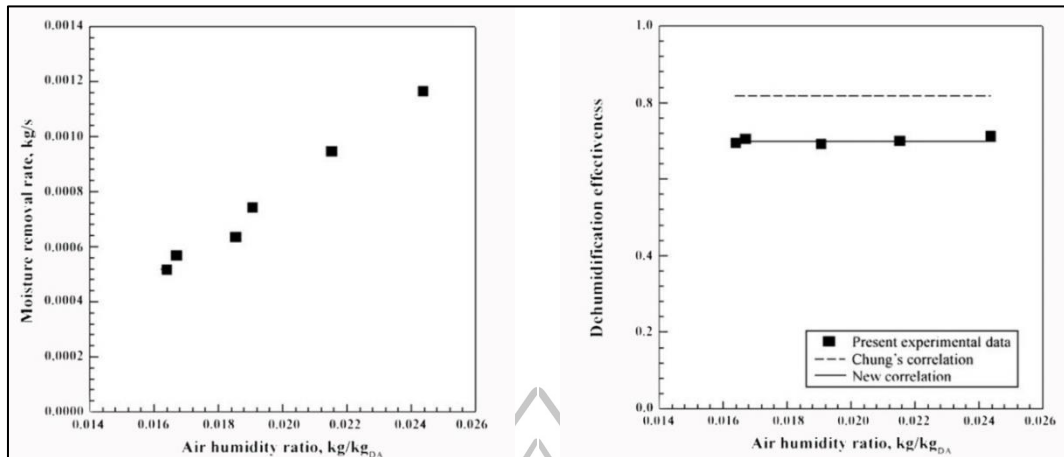




รูปที่ 2.19 ผลกระทบของสัดส่วนความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น [32]



รูปที่ 2.20 ผลกระทบของสัดส่วนความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น และประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น [51]

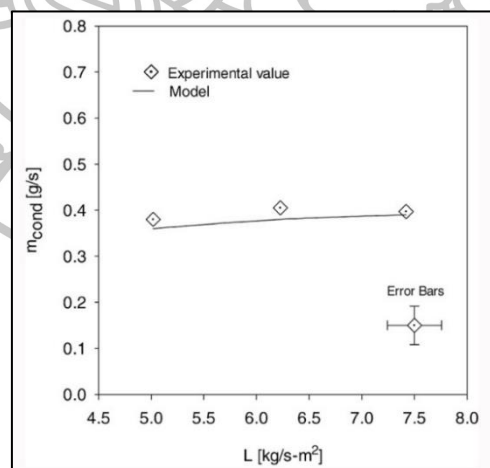


รูปที่ 2.21 ผลกระทบของสัดส่วนความชื้นอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น และประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [41]

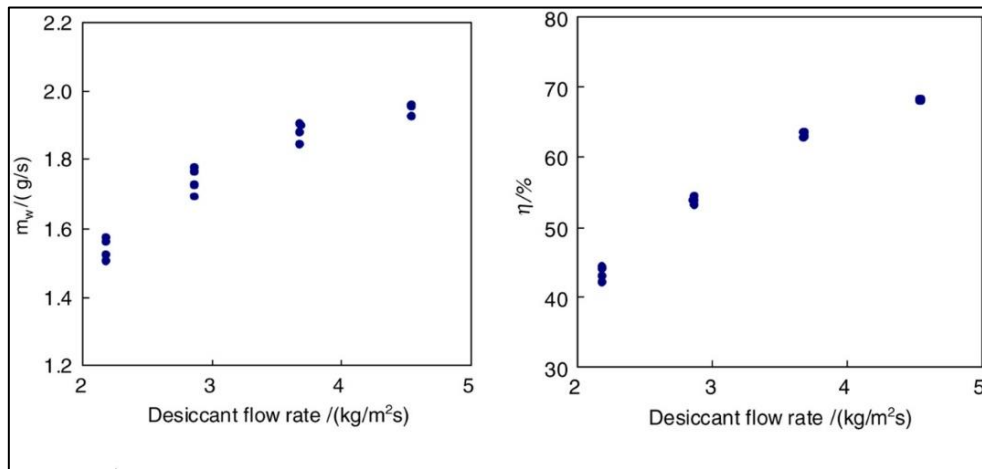
## 2.9.2 ผลกระทบจากตัวแปรฝั่งสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น

### 2.9.2.1 อัตราการไหลของสารดูดความชื้น (Desiccant flow rate)

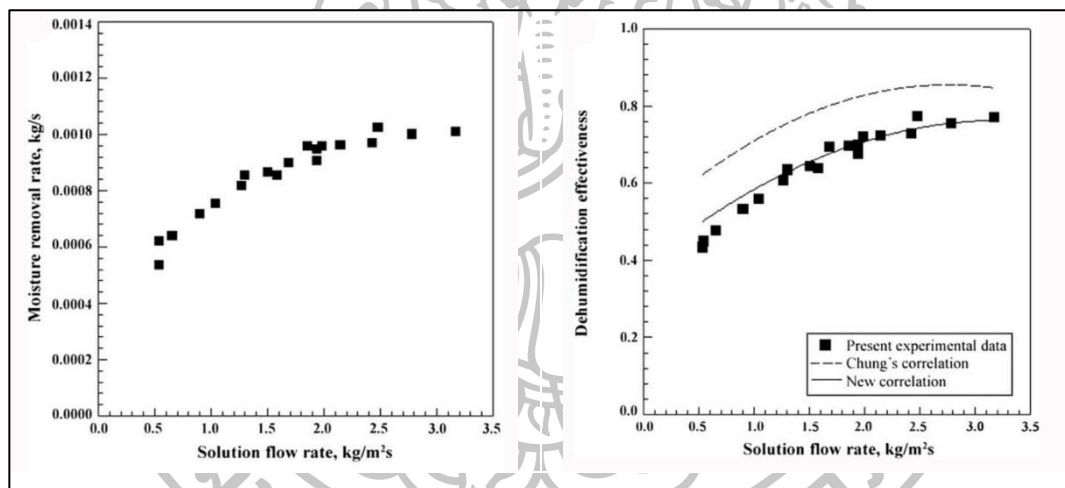
อัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 2.22 ถึง 2.24 เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้การสัมผัสกันระหว่างอากาศและสารดูดความชื้นดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล



รูปที่ 2.22 ผลกระทบของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น [32]



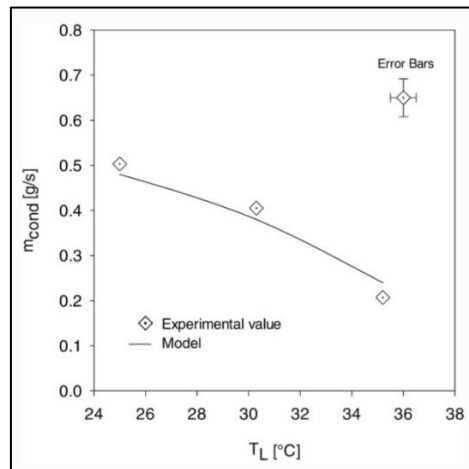
รูปที่ 2.23 ผลกระทบของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [51]



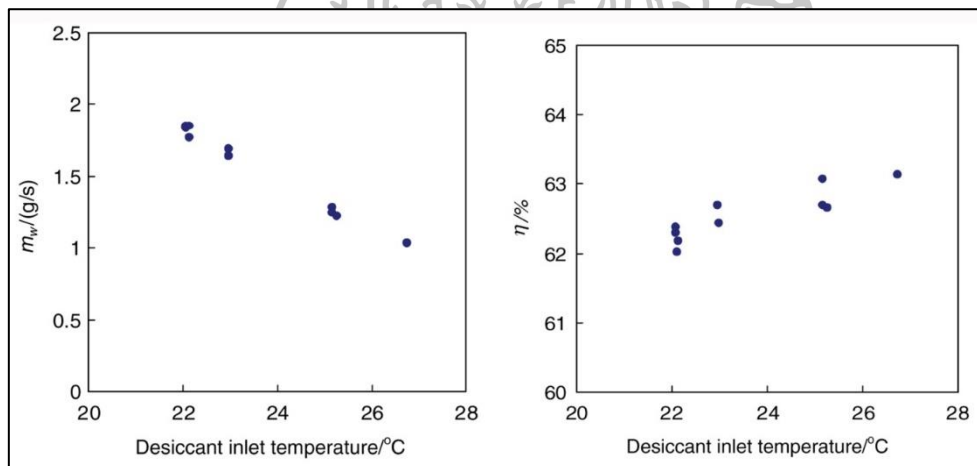
รูปที่ 2.24 ผลกระทบของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [41]

### 2.9.2.2 อุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (Desiccant inlet temperature)

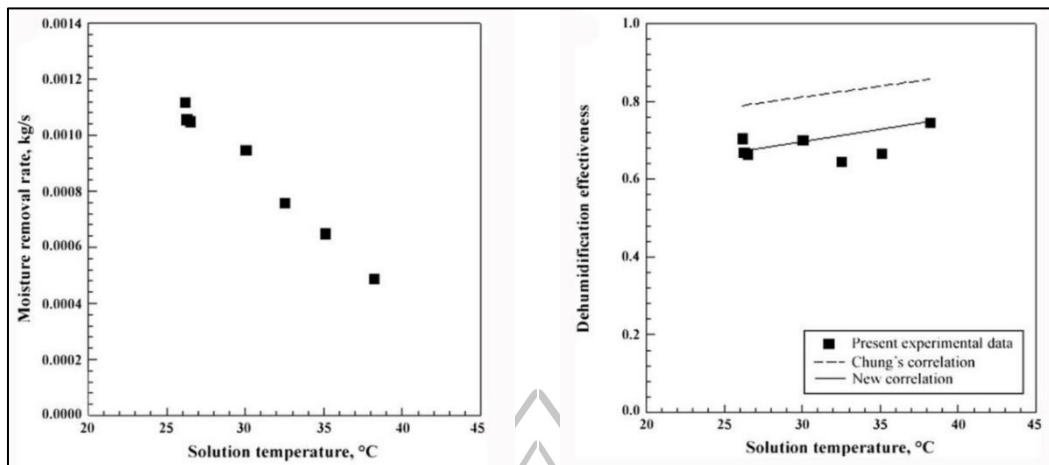
อัตราการดูดความชื้นลดลง เมื่ออุณหภูมิของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.25 ถึง 2.27 เนื่องจากความดันไอของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างสารดูดความชื้นและไอน้ำในอากาศลดลง แต่ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.25 ผลกระทบของอุณหภูมิสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น [32]



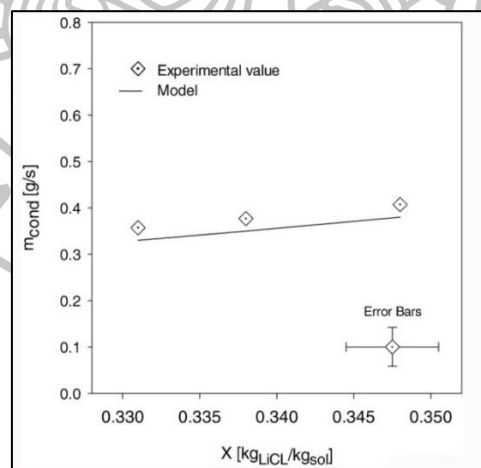
รูปที่ 2.26 ผลกระทบของอุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น [51]



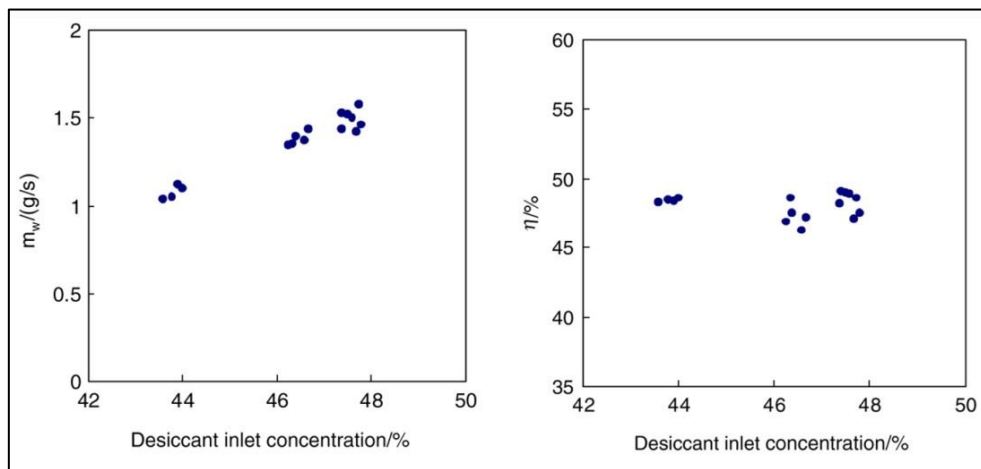
รูปที่ 2.27 ผลกระทบของอุณหภูมิของสารดูดความชื้นเข้าเครื่องดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [41]

### 2.9.2.3 ความเข้มข้นของสารความชื้น (Desiccant concentration)

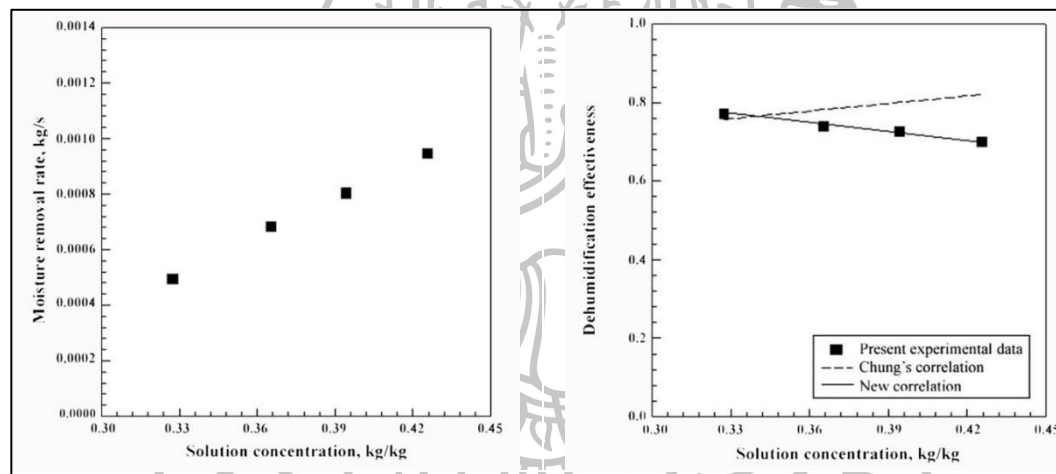
อัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อสารดูดความชื้นมีความเข้มข้นขึ้น เนื่องจากความดันอากาศย่อยของสารดูดความชื้นลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น และการถ่ายเทมวลระหว่างสารดูดความชื้นและไอน้ำในอากาศเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของสารดูดความชื้นไม่เห็นผลต่อประสิทธิผลของการดูดความชื้นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.28 ถึง 2.30 ตามลำดับ



รูปที่ 2.28 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น [32]



รูปที่ 2.29 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [51]



รูปที่ 2.30 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้นและประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น [41]

จากข้อมูลทั้งหมดสามารถสรุปแนวโน้มของผลกระทบของตัวแปรต้นที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบดูดความชื้นได้ ดังนี้ เมื่อต้องการให้อัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น จำเป็นที่ต้องมีอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนความชื้นของอากาศ อัตราการไหลของสารดูดความชื้น และความเข้มข้นของสารดูดความชื้นที่สูงขึ้น ส่วนอุณหภูมิของอากาศและสารดูดความชื้นจำเป็นจะต้องต่ำลง เมื่อต้องการให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเพิ่มขึ้นจะต้องมีสัดส่วนความชื้นของอากาศ และอัตราการไหล ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารดูดความชื้นจะต้องสูงขึ้น ส่วนอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศจะต้องต่ำลง

## 2.10 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว

ในงานวิจัยของ Ullah et al. [24] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้รูปแบบของการคำนวณการถ่ายเทมวลและความร้อน ใช้เครื่องดูดความชื้นชนิดแพ็คทาวเวอร์ (Packed tower) ที่มีความสูงของแพ็คกิ้งที่แตกต่างกัน คือ 0.40, 0.70 และ 1.00 เมตร ซึ่งอากาศและสารดูดความชื้นสัมผัสกันในทิศทางสวนทางกัน โดยใช้สารดูดความชื้นชนิดเหลวที่ใช้ในการงานวิจัย คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.034 กิโลโมลต่อวินาที-ตารางเมตร และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.060 กิโลโมลต่อวินาที-ตารางเมตร โดยแบบจำลองนี้เป็นการพัฒนาสมการประสิทธิภาพของเครื่องดูดความชื้นชนิดแพ็คทาวเวอร์ คือ ความชื้นของอากาศจริงที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการดูดความชื้นต่อความชื้นสูงสุดที่เป็นไปได้ภายใต้สภาวะนั้น ๆ ดังสมการที่ 2-35

$$\varepsilon = \frac{HR_{in} - HR_{out}}{HR_{in} - HR_{out,min}} = \frac{1 - \left(\frac{HR_{out}}{HR_{in}}\right)}{1 - \left(\frac{HR_{out,min}}{HR_{in}}\right)} \quad (2-35)$$

โดยที่

$RH_{in}$  = สัดส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (ร้อยละ)

$RH_{out}$  = สัดส่วนความชื้นของอากาศขาออกเครื่องดูดความชื้น (ร้อยละ)

ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องดูดความชื้นชนิดแพ็คทาวเวอร์ คือ สัดส่วนความชื้นของอากาศขาออกเครื่องดูดความชื้นที่เป็นไปได้น้อยที่สุด ( $RH_{out,min}$ ) ดังสมการที่ 2-36 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอุณหภูมิของอากาศต่อความเข้มข้นของสารดูดความชื้น

$$RH_{out,min} = \frac{C_4 \exp(C_5 T_{Lin})}{\xi_{in}^{C_6}} \quad (2-36)$$

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความสูงของแพ็คกิ้งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของแพ็คกิ้งเท่ากับ 1.2 เมตร มีประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นสูงถึงร้อยละ 100 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายเท่ากับร้อยละ 5 สำหรับแบบจำลองในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ที่เครื่องดูดความชื้นเป็นชนิดแพ็คทาวเวอร์แสดงดังสมการที่ 2-37 [24]

$$\varepsilon = \frac{1 - \left\{ \frac{C_1 e^{-C_2(t_{Gin}/t_{Lin})}}{\xi_{in}^{C_3}} \right\}}{1 - \left\{ \frac{C_4 e^{C_5 t_{Lin}}}{HR_{in} \xi_{in}^{C_6}} \right\}} \quad (2-37)$$

โดยที่

$t_{Gin}$  = อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)

$t_{Gin}$  = อุณหภูมิของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)

$\xi_{in}$  = ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น (ร้อยละโดยมวล)

ตารางที่ 2.11 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น

ความสูงของแพ็คเกจ (Z), เมตร	$C_1$	$C_2$	$C_3$
0.40	0.442912	0.0690233	1.031115
0.70	0.2981767	1.109408	1.730188
1.00	0.2524813	1.429286	2.148012

สำหรับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์  $C_4 = 0.0002144$ ,  $C_5 = 0.0589$ ,  $C_6 = 2.345999$

ในการวิจัยของ Chung [25] เป็นการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ โดยสารดูดความชื้นชนิดเหลวที่ใช้คือ สารละลายไตรเอทิลีนไกลคอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยมวล และสารละลายลิเทียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล เครื่องดูดความชื้นเป็นชนิดแพ็คเกจ โดยแบบจำลองทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นนี้เป็นการพัฒนาต่อจากงานวิจัยข้างต้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) โดยจะครอบคลุมอิทธิพลของตัวแปรต้น ได้แก่ อัตราการไหลของสารดูดความชื้นและอากาศ อุณหภูมิของสารดูดความชื้นและอากาศ และความเข้มข้นของสารดูดความชื้น ดังสมการที่ 2-38 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองร้อยละ 7

$$\alpha_{ab} = \left\{ 1 - \frac{0.205 \left( \frac{G_{a,in}}{G_{s,in}} \right)^{0.174} \exp \left[ 0.985 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{aZ^{0.184} X^{1.680}} \right\} \left/ \left\{ 1 - \frac{0.152 \exp \left[ 0.686 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{X^{3.388}} \right\} \right. \quad (2-38)$$

โดยที่

X = ค่าลดของความดัน (Vapor pressure depression)

ในวิจัยของ Martin and Goswami [26] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้สารละลายไตรเอทิลีนไกลคอลเป็นสารดูดความชื้น ซึ่งได้พิจารณาในช่วงอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 3.5 ถึง 15.4 เครื่องดูดความชื้นเป็นชนิดแพ็คเกจ โดยได้พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ได้แก่ อัตราการไหลของสารดูดความชื้นและอากาศ เอนทาลปีของสารดูดความชื้นและอากาศ อัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของแพ็คเกจ (Packing) และความสูงของแพ็คเกจ ดังสมการที่ 2-39 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 15

$$\alpha_{ab} = 1 - C_1 \left( \frac{G_{s,in}}{G_{a,in}} \right)^x \left( \frac{h_{a,in}}{h_{s,in}} \right)^y (aZ)^z \quad (2-39)$$



โดยที่

$$x = k_1 \frac{y_s}{y_o} + m_1$$

$$z = k_2 \frac{y_s}{y_o} + m_2$$

ค่าคงที่ในสมการ คือ

$$C_1 = 48.3 \quad y = -0.751$$

$$k_1 = 0.396 \quad m_1 = -1.57$$

$$K_2 = 0.0331 \quad m_2 = -0.906$$

ในงานวิจัยของ Abdul-Wahab et al. [52] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นและทำนายอัตราการดูดความชื้น ดังสมการที่ 2-40 และ 2-41 โดยใช้เครื่องดูดความชื้นชนิดแพ็คทาวเวอร์ที่มีความสูง 0.6 เมตร สารดูดความชื้นที่ให้ป็นสารดูดความชื้นชนิดเหลว คือ สารละลายไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 93 ถึง 98 โดยมวล และมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.13 ถึง 1.00 กิโลกรัมต่อตารางเมตร-วินาที โดยใช้แพ็คกิ้งชนิดเป็นระเบียบ (Structure packing) ที่ความสูง 0.48 เมตร และมีความหนาแน่นแตกต่างกันคือ 77, 100 และ 200 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.613 กิโลกรัมต่อตารางเมตร-วินาที โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ของอัตราการดูดความชื้นเท่ากับ 0.81 และประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเท่ากับ 0.91

$$\alpha_{ab} = 0601 + 0.25L - 0.00072a - 0.0105T_{a,in} \quad (2-40)$$

$$m_{cond} = -1.491 + 0.813L - 0.622(L^2) + 0.0172X_{in} - 0.0046T_{a,in} \quad (2-41)$$

โดยที่

L = ฟลักซ์การไหลเชิงมวลของสารดูดความชื้น (กิโลกรัมต่อตารางเมตร-วินาที)

a = อัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของแพ็คกิ้ง (ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)

$X_{in}$  = ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น (กิโลกรัมของสารละลายไตรเอทิลีนไกลคอลต่อกิโลกรัมสารละลาย)

$T_{a,in}$  = อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องดูดความชื้น (องศาเซลเซียส)

ในการวิจัยของ Liu et al. [53] ได้การทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลของเครื่องดูดความชื้นชนิดไหลตัดกัน โดยใช้สารละลายลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดความชื้น ที่มีความเข้มข้นของสารดูดความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 42 ถึง 49 โดยมวล และมีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศ อยู่ที่ 0.44 ถึง 1.12 ซึ่งได้พัฒนาสมการทำนายประสิทธิภาพของ

กระบวนการดูดความชื้นของ Ullah et al. (1988) และ Chung (1994) ดังสมการที่ 2-42 มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 6

$$\eta = \frac{1 - \left\{ \frac{0.642(G/L)^{0.1} \exp[-0.2(T_{a,in}/T_{z,in})]}{(\xi/100)^{0.537}} \right\}}{1 - \left\{ \frac{0.496 \exp[-0.945(T_{a,in}/T_{z,in})]}{(\xi/100)^{1.558}} \right\}} \times 100\% \quad (2-42)$$

ในการวิจัยของ Moon et al. [41] ซึ่งวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับเครื่องดูดความชื้นชนิดไหลตัดผ่านกัน โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดความชื้น โดยมีความเข้มข้นร้อยละ 43 โดยมีมวล และมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.175 กิโลกรัมต่อวินาที ส่วนอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.112 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการพัฒนาสมการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา ดังสมการที่ 2-43 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองร้อยละ 15

$$\alpha_{ab} = \left\{ 1 - \frac{0.363 \left[ \frac{G_{a,in}}{G_{s,in}} \right]^{-0.038} \exp \left[ 1.012 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{\left( 1 - \frac{p_a}{p_w} \right)^{0.362}} \right\} / \left\{ 1 - \frac{0.267 \exp \left[ 1.401 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{\left( 1 - \frac{p_a}{p_w} \right)^{0.363}} \right\} \quad (2-43)$$

โดยที่

$p_a$  = ความดันไอของอากาศ (กิโลปาสคาล)

$p_w$  = ความดันไอน้ำ (กิโลปาสคาล)

การทำนายค่าอัตราการดูดความชื้นสามารถทำนายผ่านประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นได้ ดังสมการที่ 2-44

$$\dot{m}_{ab} = \dot{m}_a \alpha (\omega_{a,in} - \omega_{s,in}) \quad (2-44)$$

โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังที่กล่าวข้างต้นพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นต่อเนื่องจากงานวิจัยของ Chung แต่เนื่องจากงานวิจัยของ Chung ไม่ได้พิจารณาในเรื่องของพื้นที่เปียกภายในเครื่องดูดความชื้น ซึ่งงานวิจัยของ Martin and Goswami ได้ทำการศึกษาเรื่องพื้นที่เปียก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา 2 งาน คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami มาปรับปรุงชุดค่าคงที่เพื่อให้เหมาะสมกับช่วงการทำงานที่กว้างขึ้น

## 2.11 การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน

### 2.11.1 การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute error) คือ ความแตกต่างของค่าจริงกับค่าประมาณที่ดีที่สุดจากการวัด และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) คือ อัตราส่วนของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ต่อค่าประมาณที่ดีที่สุดจากการวัด

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องดูดความชื้น สามารถหาได้จากความถูกต้องของเครื่องมือที่ใช้วัด เช่น เทอร์โมคัลเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์อยู่ที่  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส และเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์อยู่ที่  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ทั้งสองของการวัดสามารถคำนวณได้จากค่าของการวัดที่ข้อมูลแต่ละจุด

สำหรับข้อมูลที่ไม่ได้จากการวัดโดยตรง เช่น อัตราการดูดความชื้น ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ที่เป็นสมรรถนะหลักของกระบวนการดูดความชื้น ค่าความคลาดเคลื่อนจำเป็นที่จะต้องคำนวณเป็นค่าความคลาดเคลื่อนสะสม

#### 2.11.1.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการดูดความชื้น

จากสมการคำนวณอัตราการดูดความชื้นสมการที่ 2-29 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการดูดความชื้นจะขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของอากาศ โดยอัตราการไหลของอากาศ สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นและความเร็วลมของอากาศ และพื้นที่ของท่อลม ดังสมการที่ 2-45

$$G_a = \rho_a \cdot v_a \cdot A_{duct} \quad (2-45)$$

พื้นที่ของท่อลม เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง ( $w_{duct}$ ) และความยาว ( $l_{duct}$ ) ของพื้นที่หน้าตัดท่อลม ซึ่งเป็นสามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้จากสมการที่ 2-46 และความเร็วลม สามารถวัดค่าได้จากเครื่องมือวัด

$$\frac{\delta A_{duct}}{A_{duct}} = \sqrt{\left(\frac{\delta w_{duct}}{w_{duct}}\right)^2 + \left(\frac{\delta l_{duct}}{l_{duct}}\right)^2} \quad (2-46)$$

ดังนั้นความคลาดเคลื่อนอัตราการไหลของอากาศจะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-47

$$\frac{\delta G_a}{G_a} = \sqrt{\left(\frac{\delta vel}{vel}\right)^2 + \left(\frac{\delta A_{duct}}{A_{duct}}\right)^2} \quad (2-47)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนความถี่ของอากาศขาเข้าและออกเครื่องดูดความถี่ความถี่สัมพันธ์คำนวณได้ดังสมการที่ 2-48

$$\delta(\omega_{a,in} - \omega_{a,out}) = \sqrt{(\delta\omega_{a,in})^2 + (\delta\omega_{a,out})^2} \quad (2-48)$$

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการดูดความถี่สามารถคำนวณจากสมการที่ 2-49

$$\frac{\delta m_{w,ab}}{m_{w,ab}} = \sqrt{\left(\frac{\delta G_a}{G_a}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\omega_{a,in} - \omega_{a,out})}{\omega_{a,in} - \omega_{a,out}}\right)^2} \quad (2-49)$$

#### 2.11.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิผลของกระบวนการดูดความถี่

จากสมการคำนวณประสิทธิผลของกระบวนการดูดความถี่ สมการที่ 2-32 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะขึ้นกับความแตกต่างสัดส่วนความถี่ของอากาศขาเข้าและขาออกเครื่องดูดความถี่ ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการที่ 2-48 และความแตกต่างของสัดส่วนความถี่อากาศและสารดูดความถี่ขาเข้าเครื่องดูดความถี่สามารถคำนวณได้สมการที่ 2-50

$$\delta(\omega_{a,in} - \omega_{s,in}) = \sqrt{(\delta\omega_{a,in})^2 + (\delta\omega_{s,in})^2} \quad (2-50)$$

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิผลของกระบวนการดูดความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-51

$$\frac{\delta \alpha_{ab}}{\alpha_{ab}} = \sqrt{\left(\frac{\delta(\omega_{a,in} - \omega_{a,out})}{\omega_{a,in} - \omega_{a,out}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\omega_{a,in} - \omega_{s,in})}{\omega_{a,in} - \omega_{s,in}}\right)^2} \quad (2-51)$$



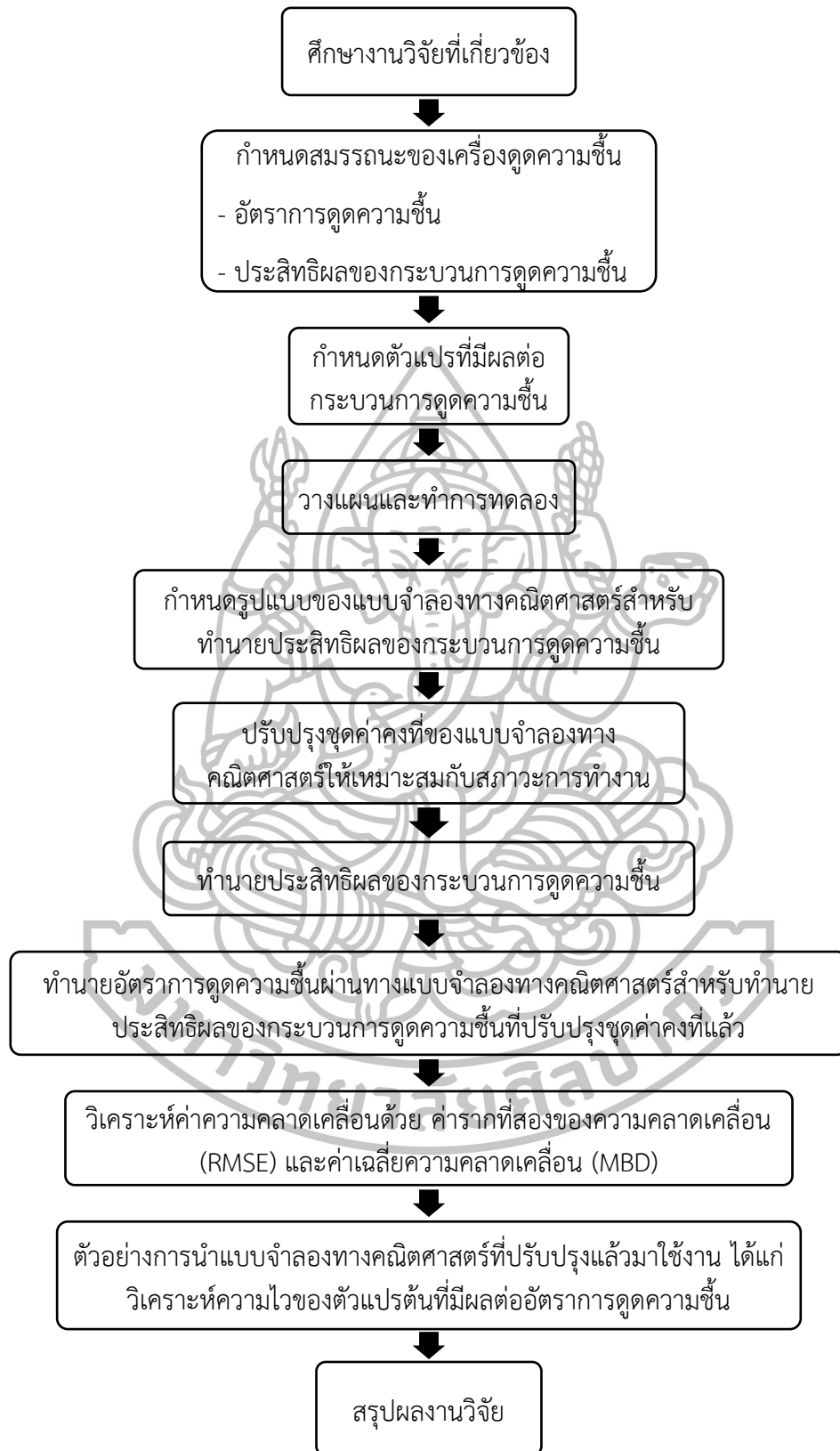
### บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ เป็นการศึกษาเพื่อเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับช่วงอัตราการไหลของอากาศที่ 35 ถึง 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1 ถึง 9 ลิตรต่อนาที โดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งผลของการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้สามารถทำนายอัตราการดูดความชื้นได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเมื่อนำมาใช้จริง เช่น การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น จะทำให้ทราบถึงภาวะการทำงาน หรือการออกแบบเครื่องดูดความชื้นที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

บทนี้เป็นคำแนะนำเกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 7 ส่วน คือ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย กำหนดตัวแปรการทดลอง ระบบดูดความชื้นที่ใช้และขั้นตอนการทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง จุดตรวจวัดระบบดูดความชื้น ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของระบบดูดความชื้น ขั้นตอนการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปงานวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 กำหนดตัวแปรของการทดลอง

สำหรับตัวแปรในการทดลองระบบดูดความชื้นนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวแปรด้านกายภาพ และตัวแปรด้านการทำงานขาเข้าเครื่องดูดความชื้น โดยตัวแปรด้านต่าง ๆ มีดังนี้

#### 3.2.1 ตัวแปรด้านกายภาพของอุปกรณ์

3.2.1.1 สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของแพ็คเกจ (a, ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)

3.2.1.2 ความสูงของแพ็คเกจ (Z, เมตร)

#### 3.2.2 ตัวแปรด้านการทำงานขาเข้าเครื่องดูดความชื้น

3.2.2.1 อัตราการไหลของอากาศ ( $\dot{m}_a$ , กิโลกรัมต่อวินาที)

3.2.2.2 อัตราการไหลของสารดูดความชื้น ( $\dot{m}_s$ , กิโลกรัมต่อวินาที)

3.2.2.3 อุณหภูมิของอากาศ ( $T_a$ , องศาเซลเซียส)

3.2.2.4 อุณหภูมิของสารดูดความชื้น ( $T_s$ , องศาเซลเซียส)

3.2.2.5 อัตราส่วนความชื้นอากาศ ( $\omega_a$ , กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)

3.2.2.6 ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น ( $\xi$ , ร้อยละโดยมวล)

สำหรับตัวแปรอุณหภูมิของอากาศ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ อุณหภูมิของสารดูดความชื้น เป็นสภาวะอากาศจริงจึงเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะแปรค่าตัวแปรเหล่านี้ได้ แต่ทำการบันทึกค่าเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป ดังนั้นตัวแปรที่จะทำการแปรค่าสำหรับการทดลองนี้ ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ และอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

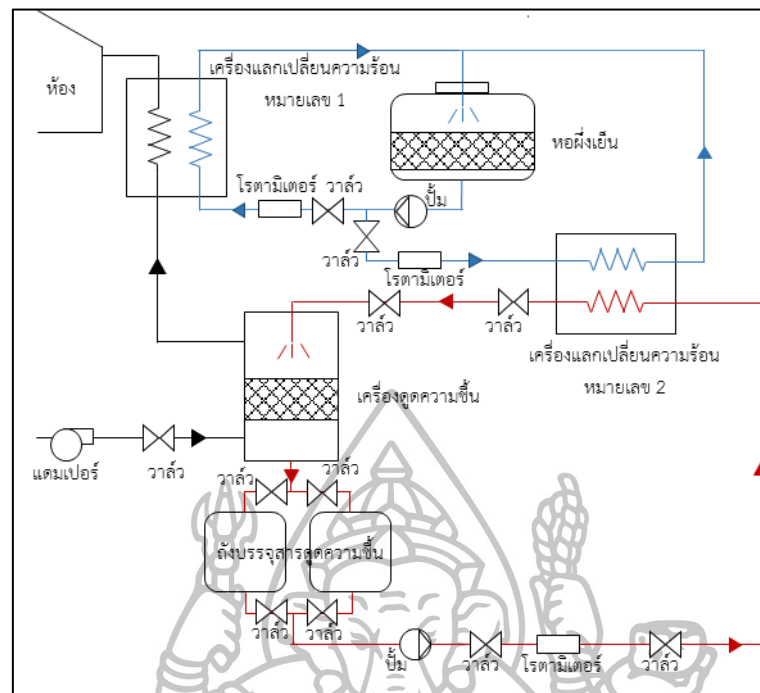
#### 3.2.3 สมรรถนะของระบบดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว

3.2.3.1 อัตราการดูดความชื้น ( $\dot{m}_{w,ab}$ , กิโลกรัมต่อวินาที)

3.2.3.2 ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ( $\alpha_{ab}$ , ไม่มีหน่วย)

### 3.3 ระบบดูดความชื้นที่ใช้และขั้นตอนการทดลอง

ระบบดูดความชื้นที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ระบบดูดความชื้น และระบบหล่อเย็น โดยแผนผังของระบบแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังระบบที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.1 หลักการการทำงานของระบบลดความดัน

เครื่องลดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิดแพ็คทาวเวอร์ โดยอากาศและสารลดความดันสัมผัสกันในทิศทางสวนทางกัน โดยอากาศจะไหลเข้าเครื่องลดความดันทางด้านล่าง และออกทางด้านบน แต่เนื่องจากอากาศที่ออกจากเครื่องลดความดันจะมีปริมาณความชื้นที่ต่ำมีอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างอากาศและสารลดความชื้น ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศจึงต้องผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหมายเลข 1 เพื่อลดอุณหภูมิและส่งเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศ ในส่วนของสารลดความชื้นเข้มข้นก่อนเข้าเครื่องลดความชื้นจำเป็นที่จะต้องมีการอุ่นหมักต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดความชื้น ดังนั้นจึงต้องลดอุณหภูมิที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหมายเลข 2 ก่อนที่จะเข้าเครื่องลดความชื้นทางด้านบน เมื่อสัมผัสอากาศแล้วจะเจือจางลง และไหลออกจากเครื่องลดความชื้นทางด้านล่างถูกนำไปเก็บที่ถังบรรจุน้ำลดความชื้น

### 3.3.2 รายละเอียดของการทดลอง

รายละเอียดการทดลองสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



3.3.2.1 สารดูดความชื้นที่ใช้เป็นสารดูดความชื้นชนิดของเหลว คือ สารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล

3.3.2.2 แปรค่าอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด 5 ค่า คือ 35, 110, 185, 260 และ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

3.3.2.3 แปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้นทั้งหมด 5 ค่า คือ 1, 3, 5, 7 และ 9 ลิตรต่อชั่วโมง

3.3.2.4 ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้า และทางออกเครื่องดูดความชื้น ตั้งแต่เวลา 8:00 ถึง 17:00 นาฬิกา

3.3.2.5 เก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ อุณหภูมิของสารดูดความชื้น ที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกเครื่องดูดความชื้นทุก ๆ 5 นาที

3.3.2.6 เก็บตัวอย่างความหนาแน่นสารดูดความชื้นทั้งทางเข้าและทางออก เครื่องดูดความชื้นทุก ๆ 20 นาที

3.3.2.7 ปรับอัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นจนครบทุกกรณี

3.3.2.8 นำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองระบบดูดความชื้น ประกอบด้วย เครื่องดูดความชื้น หอผึ่งเย็น เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เครื่องวัดความหนาแน่นของสารละลาย เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลว เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เทอร์โมคัปเปิลชนิด ที ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.4.1 เครื่องดูดความชื้น

เครื่องดูดความชื้นในอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบแพ็คทาวเวอร์ ที่มีการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นสัมผัสกันในทิศทางสวนทางกัน โดยเครื่องดูดความชื้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 เมตร และมีความสูง 1.90 เมตร ได้มีการหุ้มฉนวนใยแก้วเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนหนา 0.15 เมตร ใช้แพ็คเกจกึ่งชนิดพอลริ่งขนาด 25 มิลลิเมตร ทำจากพลาสติกพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 210 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และมีความสูงของแพ็คเกจเท่ากับ 0.50 เมตร ลักษณะของเครื่องดูดความชื้นแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องดูดความชื้นในอากาศ

#### 3.4.2 หอฝึ่งเย็น

หอฝึ่งเย็นในระบบดูดความชื้น ใช้เพื่อผลิตน้ำหล่อเย็นสำหรับนำไปใช้ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหมายเลข 1 และ 2 ซึ่งเป็นการลดอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศ และลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน โดยหอฝึ่งเย็นนี้มีขนาด 10 ตัน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หอฝึ่งเย็น

### 3.4.3 อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

เป็นอุปกรณ์จากบริษัท เบส เทคนิก โซลูชั่น จำกัด ยี่ห้อ Galltec ซีรีส์ KL มีช่วงการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างร้อยละ 0 ถึง 100 และมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 2 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

### 3.4.4 อุปกรณ์วัดค่าความหนาแน่นสารดูดความชื้น

อุปกรณ์ชื่อ Anton Paar รุ่น DMA 35N ใช้สำหรับวัดค่าความหนาแน่นของสารดูด-ความชื้น เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารดูดความชื้น มีค่าการวัดอยู่ในช่วง 0 ถึง 1.999 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนของความหนาแน่น 0.001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ 0.2 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนาแน่นของสารละลาย

### 3.4.5 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดวัดความเร็วลม

ใช้สำหรับวัดความเร็วลมเพื่อหาอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งเครื่องมือวัดความเร็วที่ใช้เป็นรุ่น 435 จากบริษัท Testo มีช่วงความเร็วลมที่สามารถวัดได้ คือ 0.2 ถึง 20 เมตรต่อวินาที และช่วงอุณหภูมิที่สามารถวัดได้ คือ 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วลมร้อยละ 5 และค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ 0.8 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความเร็วลม

### 3.4.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

เครื่องวัดอัตราการไหลชนิดโรตารีโรตัมเตอร์รุ่น Z-4001 จากบริษัท Rujira Group ใช้วัดอัตราการไหลของสารดูดความชื้นและน้ำหล่อเย็น โดยมีช่วงการวัดระหว่าง 1 ถึง 7 ลิตรต่อนาที ทำงานได้ภายใต้ความดันไม่เกิน 0.6 เมกะปาสกาล และมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ร้อยละ 4 ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

### 3.4.7 อุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูล

ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ รุ่น DL2200 จากบริษัท วิศณและสุภัค จำกัด มีจำนวนช่องในการรับสัญญาณ 8 ช่อง และสามารถขยายได้อีก 16 ช่อง มีความเร็วในเก็บสูงสุด 1 ช่องสัญญาณต่อ 100 มิลลิวินาที และสามารถรองรับหน่วยความจำได้ 1 จิกะไบต์ โดยสำหรับการบันทึกค่าอุณหภูมิมีความคลาดเคลื่อน 2 องศาเซลเซียส สามารถรองรับเทอร์โมคัปเปิล ชนิดอาร์ เอส เค อี เจ บี และที ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

### 3.4.8 เทอร์โมคัปเปิลชนิดที (Type - T thermocouple)

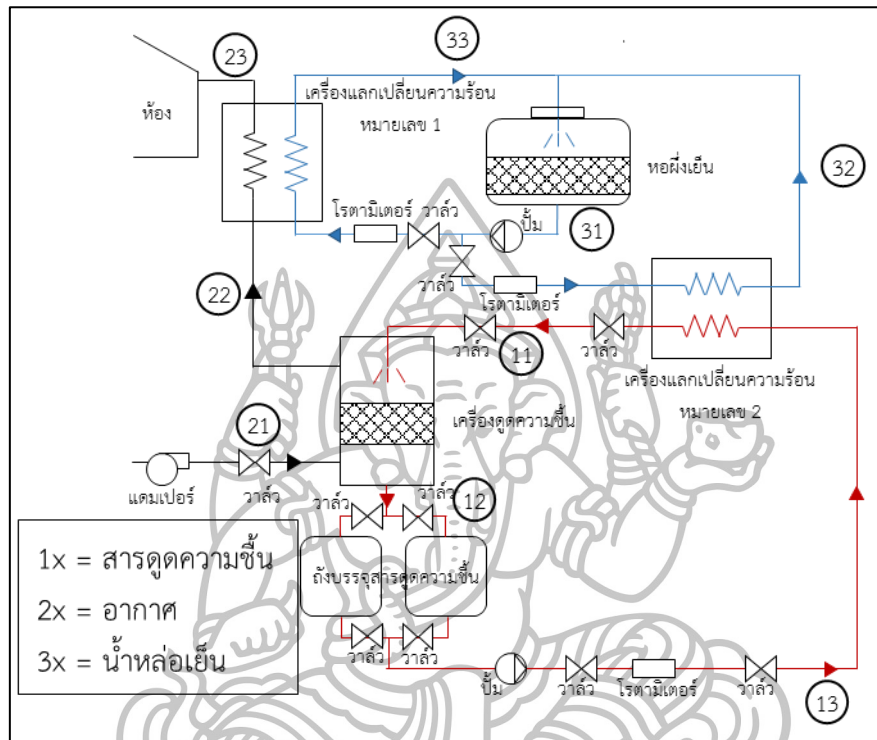
ใช้ในการวัดอุณหภูมิของสารและความชื้นและอากาศ โดยเทอร์โมคัปเปิล ชนิดที ที่ใช้เป็นรุ่น TT-T-24 จากบริษัท Omega สามารถอ่านค่าอุณหภูมิสูงสุดได้ 200 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิที่สามารถอ่านค่าได้คือ -200 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความไวในการอ่านค่าประมาณ 43 ไมโครวัตต์ต่อ 1 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความถูกต้อง 0.5 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เทอร์โมคัปเปิลชนิดที

### 3.5 จุดตรวจวัดระบบดูดความชื้น

จุดตรวจวัดระบบดูดความชื้นที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงดังรูปที่ 3.11 และตารางที่ 3.1 อธิบายถึงสิ่งที่ตรวจและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด



รูปที่ 3.11 จุดตรวจวัดระบบดูดความชื้นที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สิ่งตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดในจุดต่าง ๆ

จุด	ชื่อ	สิ่งที่ต้องตรวจวัด	เครื่องมือวัด	ความถี่ การเก็บข้อมูล
11	สถานะของสารดูดความชื้นที่ทางเข้าของเครื่องดูดความชื้น	- อุณหภูมิ - อัตราการไหล - ความเข้มข้น	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ - โรตารีมิเตอร์ - เครื่องวัดความหนาแน่นของสารละลาย	- 5 นาที - 20 นาที
12	สถานะของสารดูดความชื้นที่ทางออกของเครื่องดูดความชื้น	- อุณหภูมิ - ความเข้มข้น	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ - เครื่องวัดความหนาแน่นของสารละลาย	- 5 นาที - 20 นาที



ตารางที่ 3.1 สิ่งตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดในจุดต่าง ๆ (ต่อ)

จุด	ชื่อ	สิ่งที่ต้องตรวจวัด	เครื่องมือวัด	ความถี่ การเก็บข้อมูล
21	สภาวะของอากาศที่ ทางเข้าของเครื่องดูด ความชื้น	- อุณหภูมิ - อัตราส่วนความชื้น - อัตราการไหล	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ - เครื่องวัดความชื้นใน อากาศ - เครื่องวัดความเร็วลม	- 5 นาที - 5 นาที
22	สภาวะของอากาศที่ ทางออกของเครื่องดูด ความชื้น	- อุณหภูมิ - อัตราส่วนความชื้น	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ - เครื่องวัดความชื้นใน อากาศ	- 5 นาที - 5 นาที
23	สภาวะของอากาศ ก่อนเข้าสู่พื้นที่ปรับ อากาศ	- อุณหภูมิ - อัตราส่วนความชื้น	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ - เครื่องวัดความชื้นใน อากาศ	- 5 นาที - 5 นาที
31	น้ำหล่อเย็นที่ทางออก ของหอผึ่งเย็น	- อุณหภูมิ	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่	- 5 นาที
32	น้ำหล่อเย็นที่ทางออก ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนหมายเลข 2	- อุณหภูมิ	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่	- 5 นาที
33	น้ำหล่อเย็นที่ทางออก ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนหมายเลข 1	- อุณหภูมิ	- เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่	- 5 นาที

### 3.6 ขั้นตอนการคำนวณสมรรถนะของระบบดูดความชื้น

สำหรับในส่วนของการทดลองระบบดูดความชื้นในอากาศ สมรรถนะของระบบที่จะนำเสนอนี้มีด้วยกัน 2 ค่า ได้แก่ อัตราการดูดความชื้น และประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น ซึ่งมีลำดับการคำนวณ ดังนี้

3.6.1 คำนวณหาสัดส่วนความชื้นของอากาศทั้งขาเข้าและออกเครื่องดูดความชื้น โดยใช้สมการที่ 2-5 ถึง 2-8

3.6.2 คำนวณหาสัดส่วนความชื้นของสารดูดความชื้น โดยใช้สมการที่ 2-8 ถึง 2-11

3.6.3 คำนวณหาอัตราการดูดความชื้น โดยใช้สมการที่ 2-29

3.6.4 คำนวณหาประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้สมการที่ 2-32

### 3.7 ขั้นตอนการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงรูปแบบจากงานวิจัยของ Chung และ งานวิจัยของ Martin and Goswami โดยมีขั้นตอนการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

#### 3.7.1 ขั้นตอนการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung

3.7.1.1 รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย สัดส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น สัดส่วนอุณหภูมิของอากาศต่ออุณหภูมิของสารดูดความชื้น พื้นที่ผิวจำเพาะของแพ็คกิ้ง ความสูงของเบด และค่าลดของความดัน

3.7.1.2 ปรับปรุงค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยระเบียบวิธีการถดถอย (Regression analysis)

#### 3.7.2 ขั้นตอนการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami

3.7.2.1 รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนเอนทาลปีของอากาศต่อเอนทาลปีของสารดูดความชื้น ความหนืดของสารดูดความชื้น พื้นที่ผิวจำเพาะของแพ็คกิ้ง และความสูงของเบด

3.7.2.2 ปรับปรุงค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยระเบียบวิธีการถดถอย

### 3.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปงานวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

3.8.1 วิเคราะห์สมรรถนะของระบบดูดความชื้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลง

3.8.2 วิเคราะห์ผลการทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วเทียบกับผลการทดลองจริง โดยผ่านทางค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน (RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (MBD)

3.8.3 วิเคราะห์ผลการทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่เทียบกับผลการทดลองจริง โดยผ่านทางค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน



3.8.4 วิเคราะห์ผลการทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูความขึ้น เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วเทียบกับผลการทดลองจริง โดยผ่านทางค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน

3.8.5 ทดลองนำแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้วมาใช้งานจริง คือ การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูความขึ้น

### 3.9 สถานที่ทำวิจัย

ห้องวิจัยระบบพลังงานในอาคาร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

### 3.10 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย

เริ่มงานวิจัย ตั้งแต่เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555  
นำเสนองานวิจัย เมษายน พ.ศ. 2559



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ” สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ ผลของสมรรถนะระบบดูดความชื้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลง การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ โดยในส่วนตัวที่สุดท้าย คือ การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นมาใช้ในงานด้วยการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น

### 4.1 ผลของสมรรถนะระบบดูดความชื้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองระบบดูดความชื้นในอากาศ ซึ่งมีอัตราการไหลอากาศที่ทำการทดลอง ดังนี้ 35, 110, 185, 260, 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (0.0193, 0.0607, 0.1022, 0.1436, 0.1850 กิโลกรัมต่อวินาที) โดยสารดูดความชื้นที่ใช้ในการทดลองเป็นสารดูดความชื้นชนิดของเหลว คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1, 3, 5, 7, 9 ลิตรต่อชั่วโมง (0.0231, 0.0693, 0.1155, 0.1618, 0.2080 กิโลกรัมต่อวินาที) สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

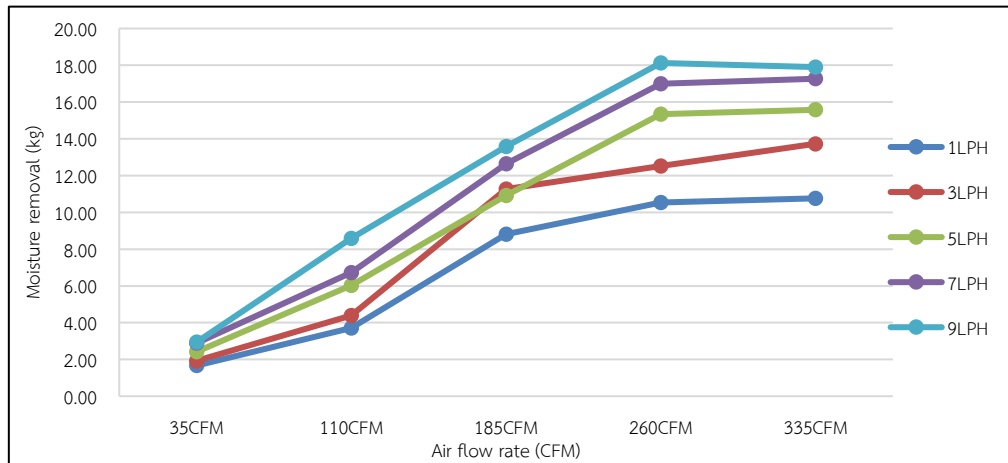
#### 4.1.1 ผลต่ออัตราการดูดความชื้น

##### 4.1.1.1 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก [14, 22, 36, 41, 49, 53-54]

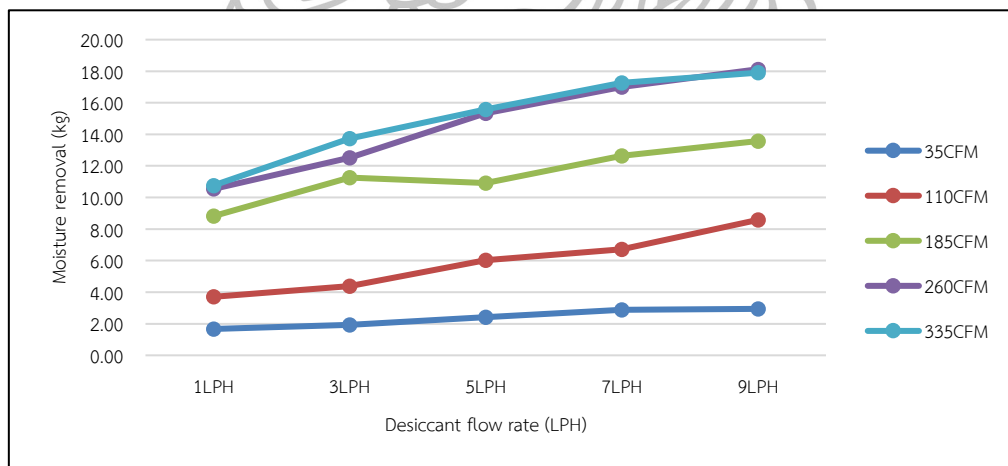
- ปริมาณความชื้นเข้าในระบบมากขึ้น
- ความชื้นในอากาศมีมากจะทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศและที่ผิวหน้าสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น

- ระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างอากาศและสารดูดความชื้นลดลง สัดส่วนความชื้นอากาศออกเครื่องดูดความชื้นจึงสูง ทำให้ความชื้นเฉลี่ยภายในเครื่องดูดความชื้นมีค่าสูงตลอด ความดันไอน้ำในอากาศจึงมีค่าสูง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้น

#### 4.1.1.2 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น

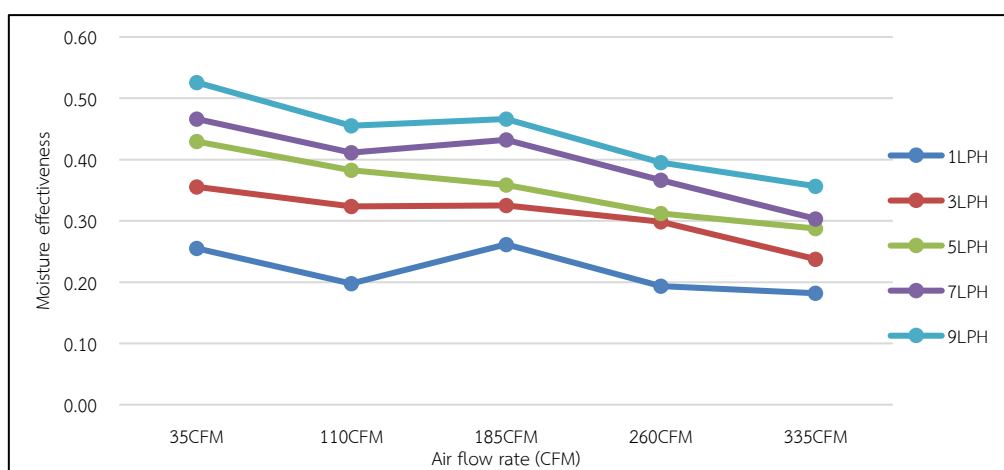
จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก [17, 32-33, 36-37, 41, 46, 49, 53]

- ปริมาณสารดูดความชื้นในระบบเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ระบบโดยตรง
- ปริมาณของสารดูดความชื้นมากขึ้น พื้นที่เปียกภายในเครื่องดูดความชื้นจึงเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลระหว่างอากาศและสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น

- เมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เป็นการลดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น อุณหภูมิและความดันไอที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้น ทำให้ความแตกต่างระหว่างความไอน้ำของอากาศและที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นสม่ำเสมอ

#### 4.1.2 ผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น

##### 4.1.2.1 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

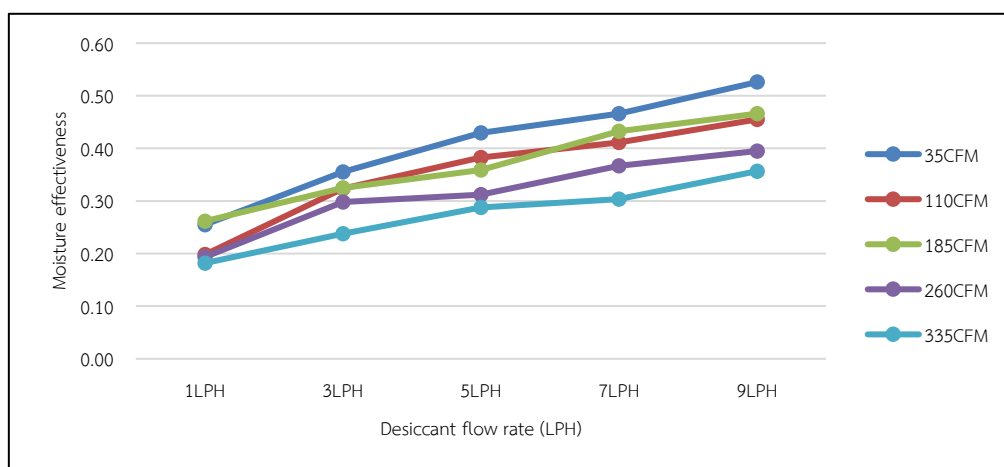


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นลดลง เนื่องจาก [15, 22, 24, 26, 41, 46, 49, 56]

- ระยะเวลาในสัมผัสกันระหว่างอากาศและสารดูดความชื้นลดลง ดังนั้นระยะเวลาการแลกเปลี่ยนมวลลดลง ส่งผลให้สัดส่วนความชื้นในอากาศลดลงเล็กน้อย
- อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณความชื้นสู่ระบบดูดความชื้น ซึ่งทำให้อัตราการดูดความชื้นเพิ่ม แต่สัดส่วนความชื้นในอากาศที่ออกจากเครื่องดูดความชื้นมีค่าสูง เนื่องจากปริมาณไอน้ำที่อยู่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นสูง ทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำของอากาศและที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นลดลง

#### 4.1.2.2 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก [11, 17, 40–42, 49, 54]

- อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณสารดูดความชื้นในระบบดูดความชื้นโดยตรง
- พื้นที่เปียกภายในเครื่องดูดความชื้นเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างไอน้ำในอากาศและสารดูดความชื้น

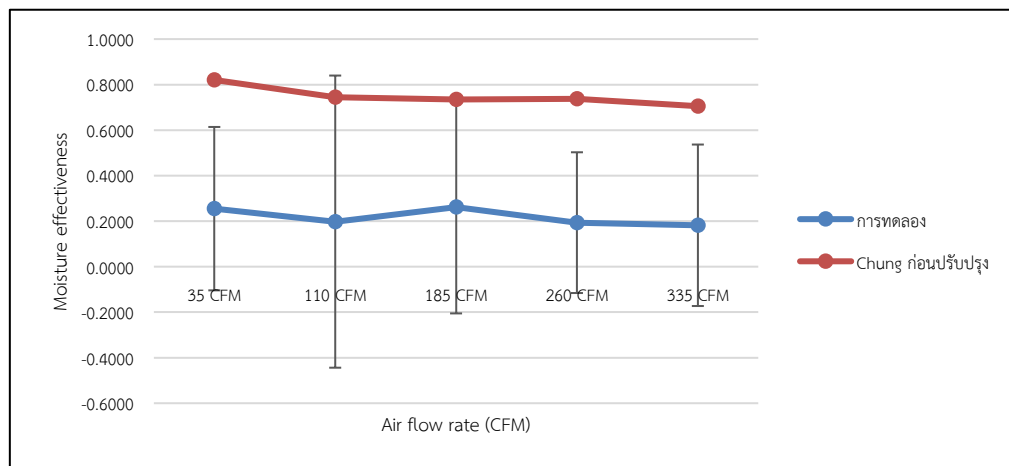
#### 4.2 การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นในงานวิจัยนี้ได้ นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านมา 2 งาน คือ งานวิจัยของ Chung ที่พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไว้เมื่อปี ค.ศ. 1994 ซึ่งเป็นการพัฒนาแบบจำลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา [24] โดยเป็นแบบจำลองที่ครอบคลุมตัวแปรต้นด้านการทำงาน คือ ตัวแปรด้านอากาศและด้านสารดูดความชื้น ดังสมการที่ 2-38 และงานวิจัยของ Martin and Goswami ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2000 [26] โดยจะพิจารณาพื้นที่เปียกของสารดูดความชื้นภายในเครื่องดูดความชื้น ซึ่งในงานวิจัยของ Chung ไม่ได้พิจารณา ดังสมการที่ 2-39 ซึ่งมีผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

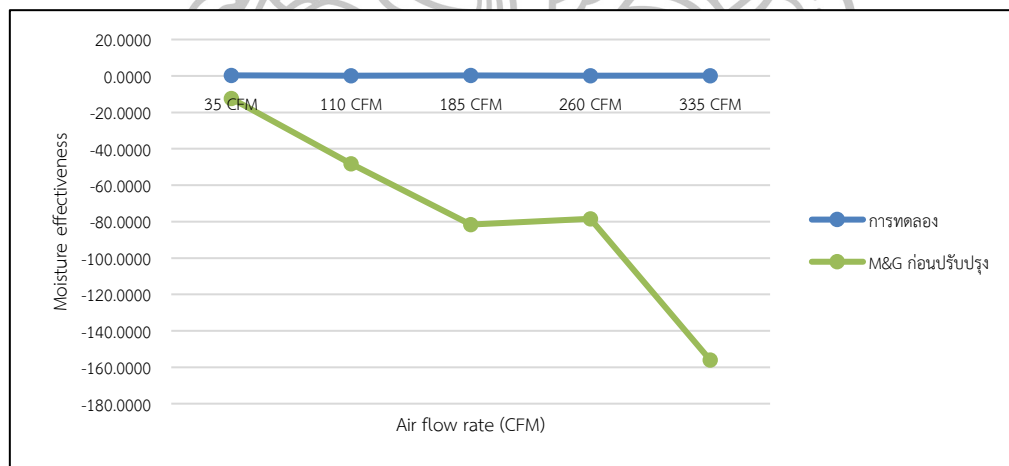
#### 4.2.1 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่

##### 4.2.1.1 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.9 เป็นผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Chung และ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น



(ก)

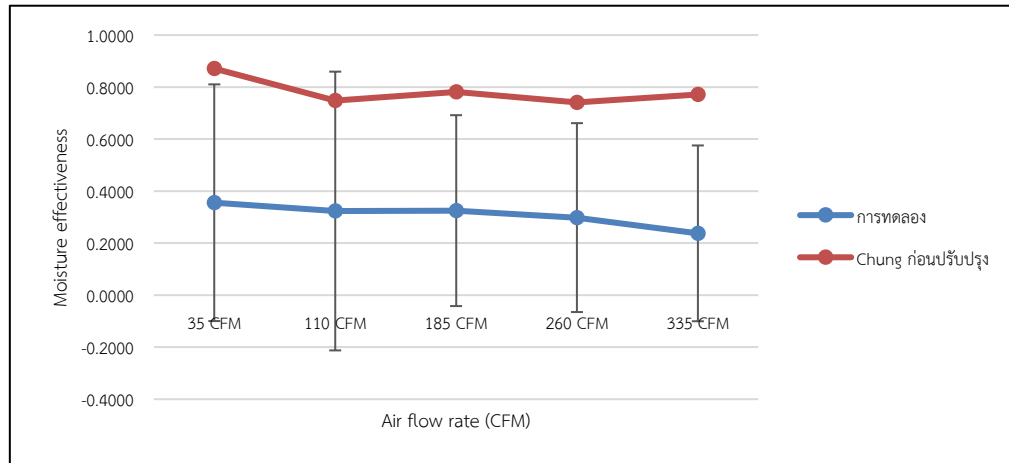


(ข)

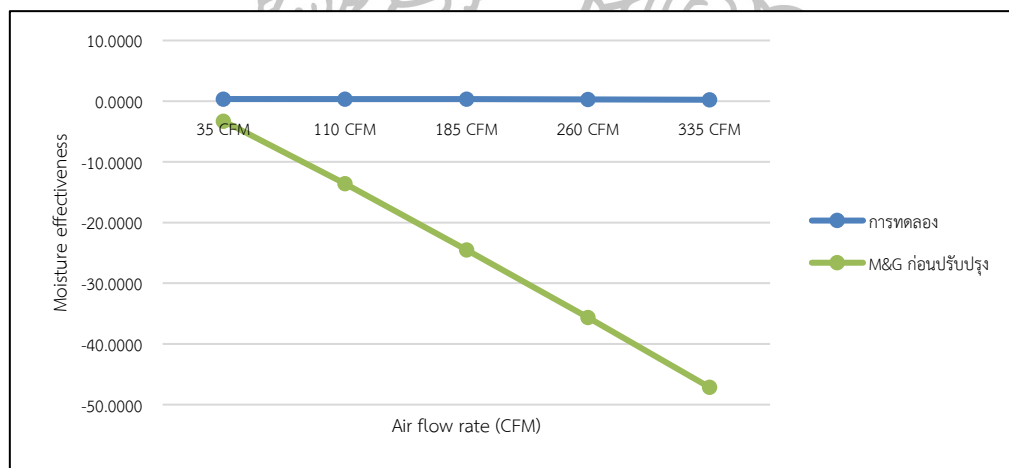
รูปที่ 4.5 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 1 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.5(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้น

เท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่าการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.5(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)

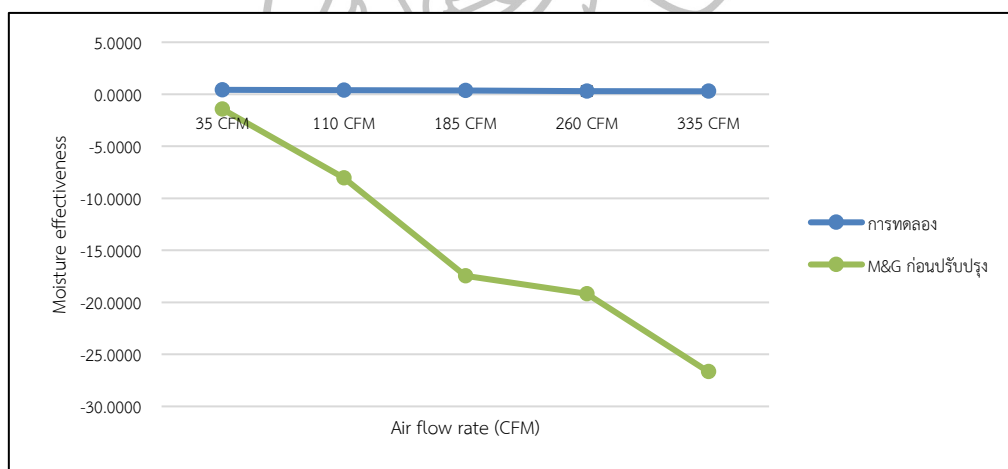
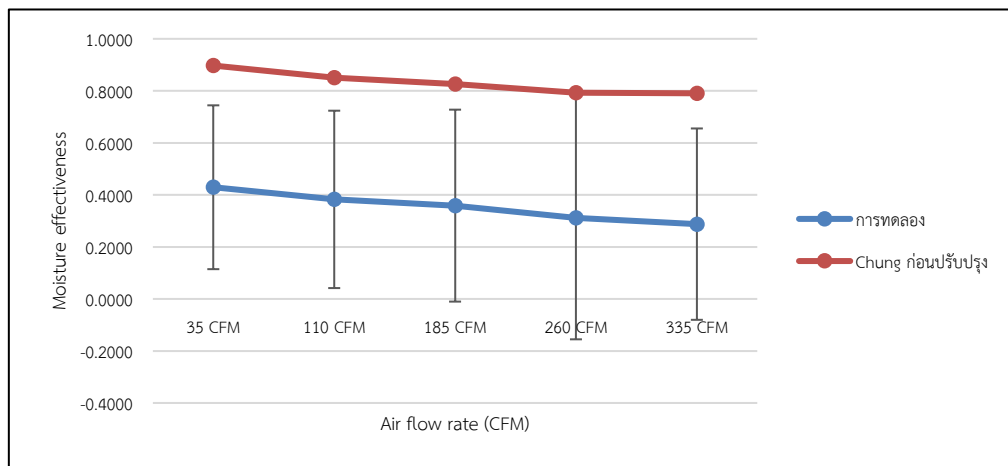


(ข)

รูปที่ 4.6 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 3 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.6(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือ รูปที่ 4.6(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูด

ความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่ อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่า ผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

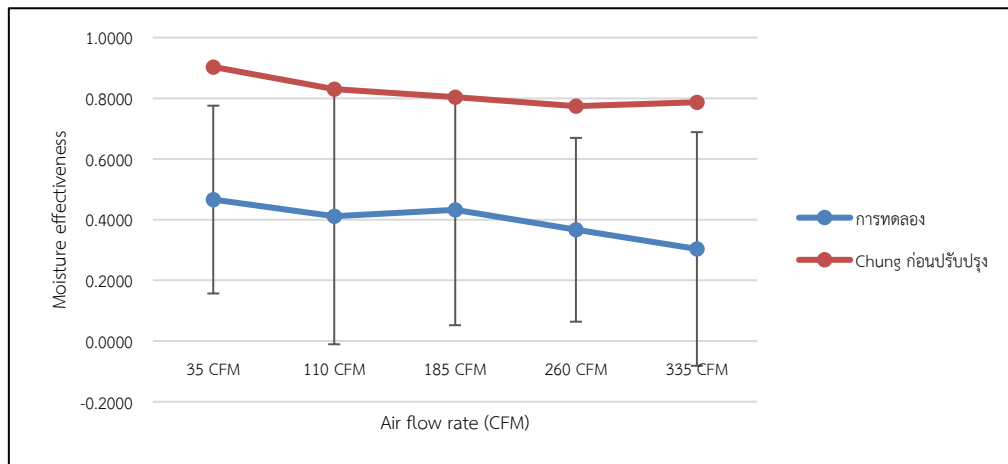


รูปที่ 4.7 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 5 ลิตรต่อชั่วโมง

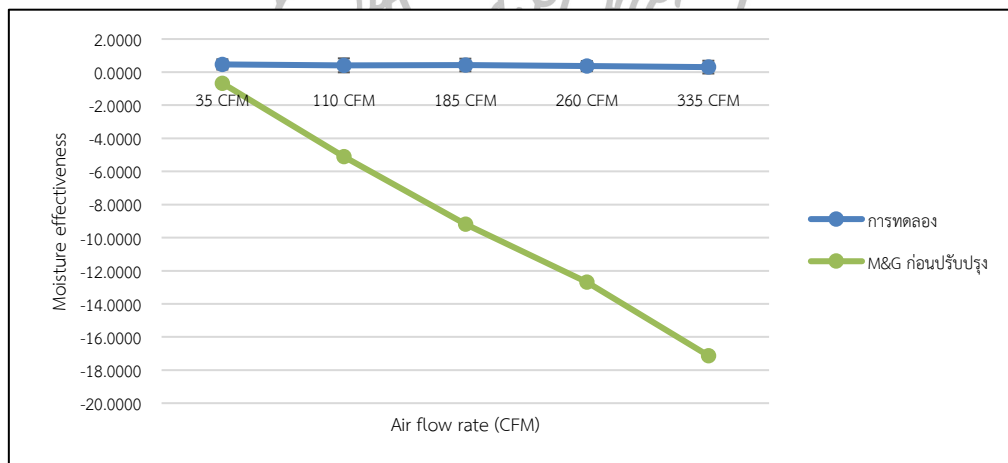
รูปที่ 4.7(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.7(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่



ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)

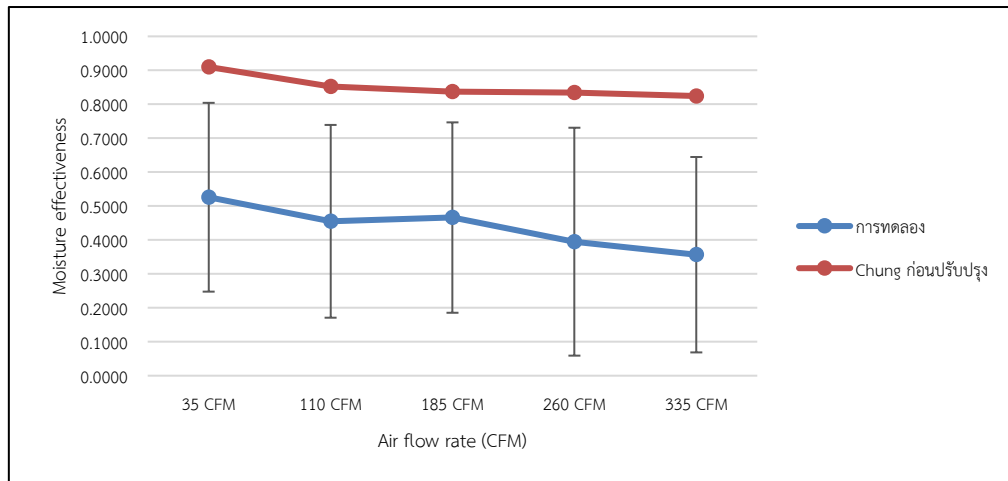


(ข)

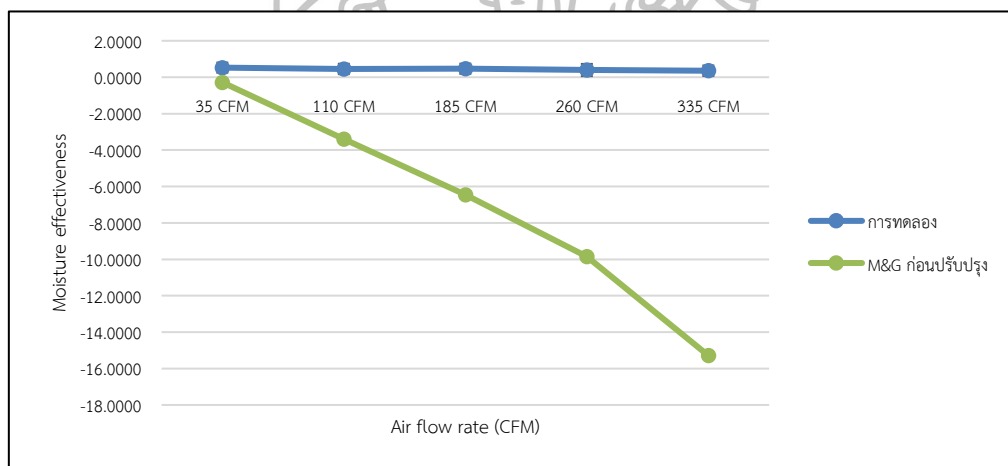
รูปที่ 4.8 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 7 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.8(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.8(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)



(ข)

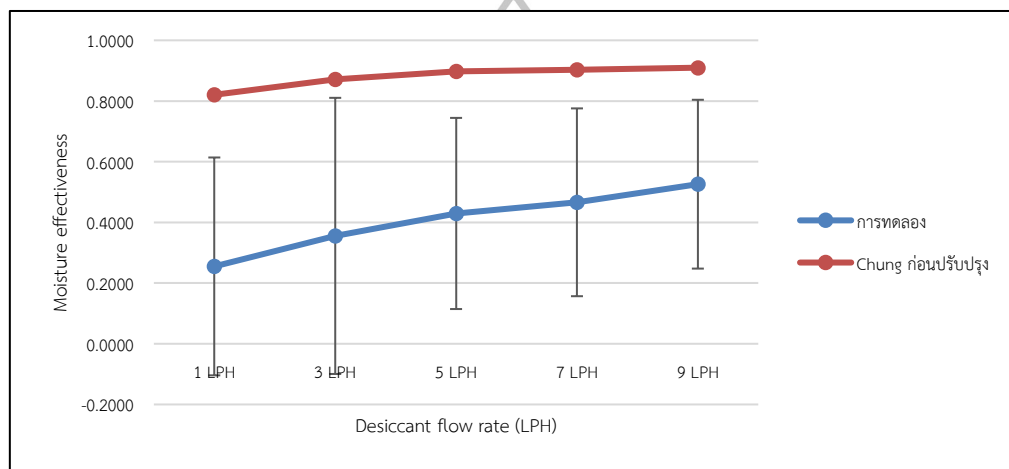
รูปที่ 4.9 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 9 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.9(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.9(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

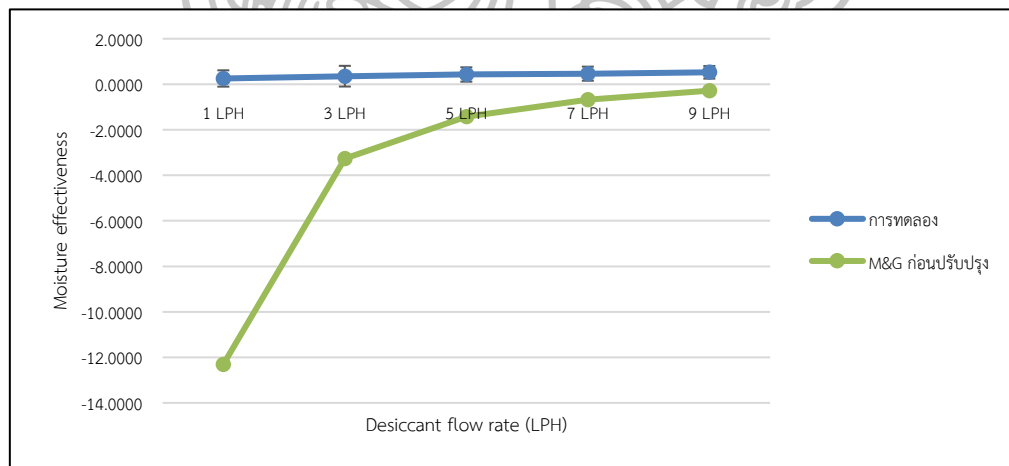
พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

#### 4.2.1.2 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.14 แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้ง 2 งาน ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงชุดค่าคงที่ เมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น



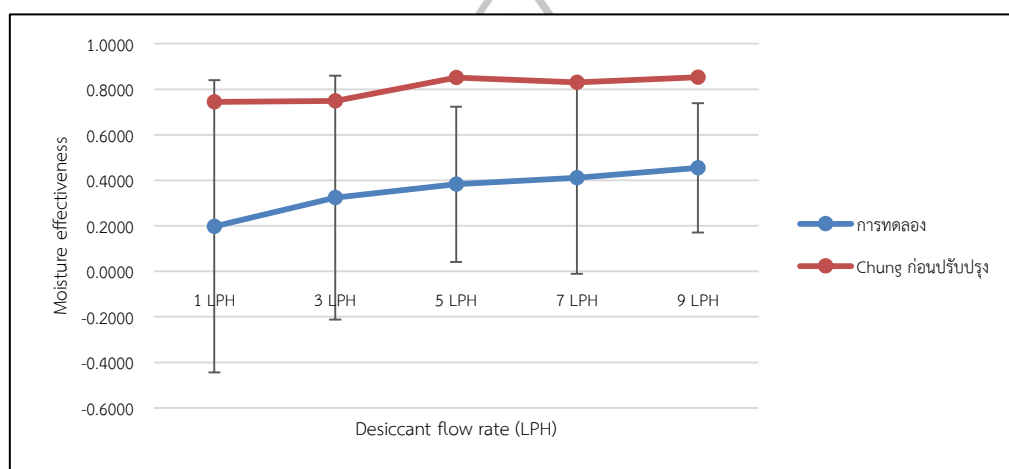
(ก)



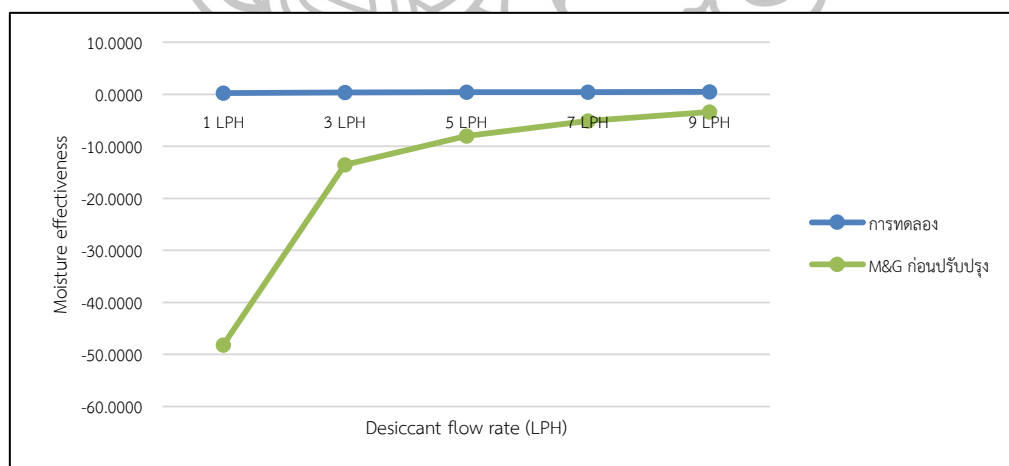
(ข)

รูปที่ 4.10 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.10(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.10(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



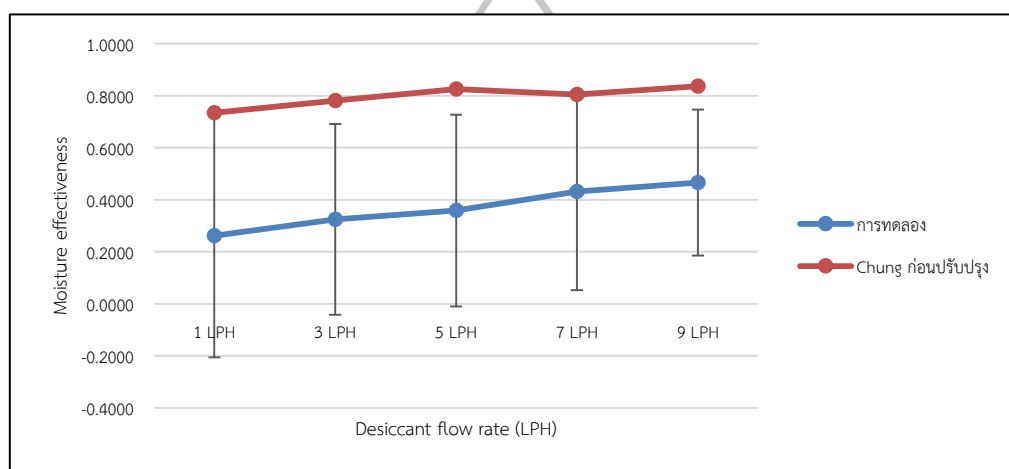
(ก)



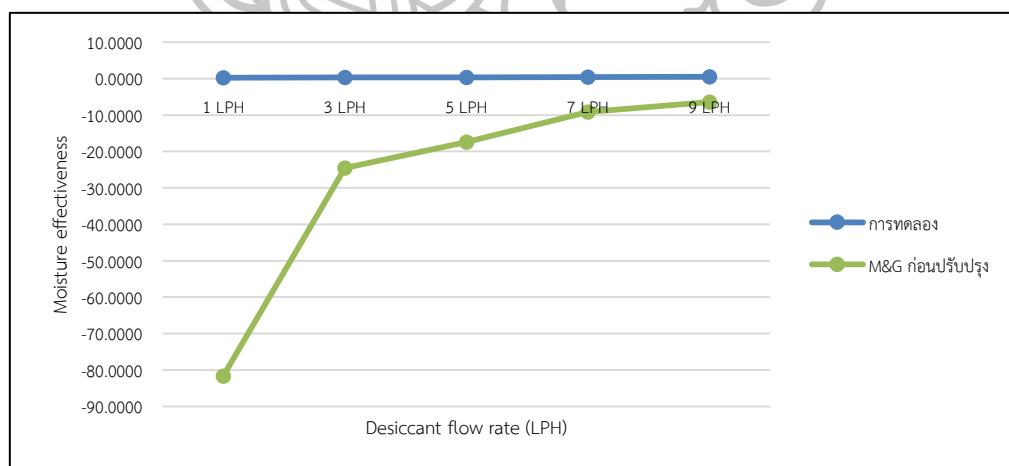
(ข)

รูปที่ 4.11 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.11(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.11(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



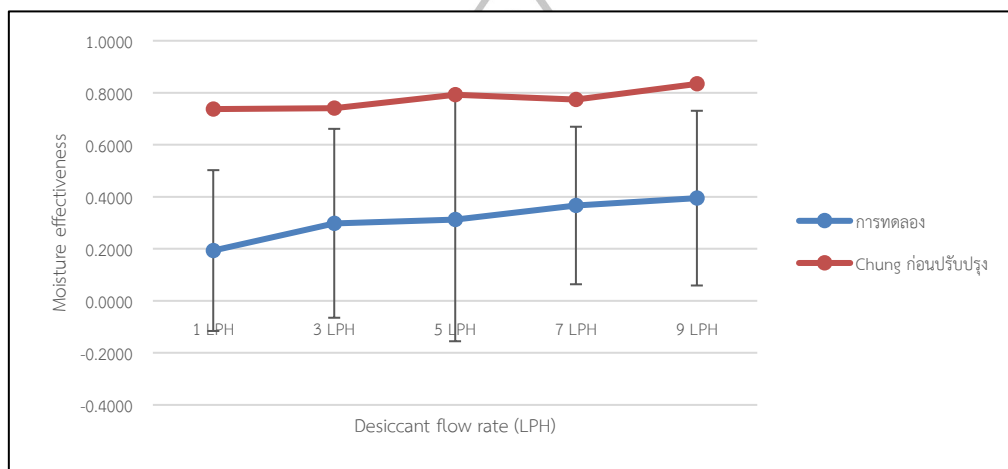
(ก)



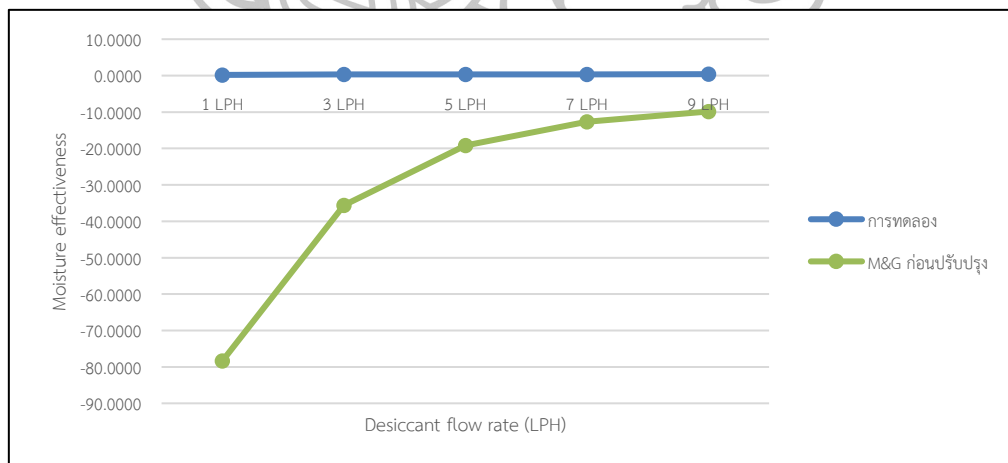
(ข)

รูปที่ 4.12 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.12(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.12(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



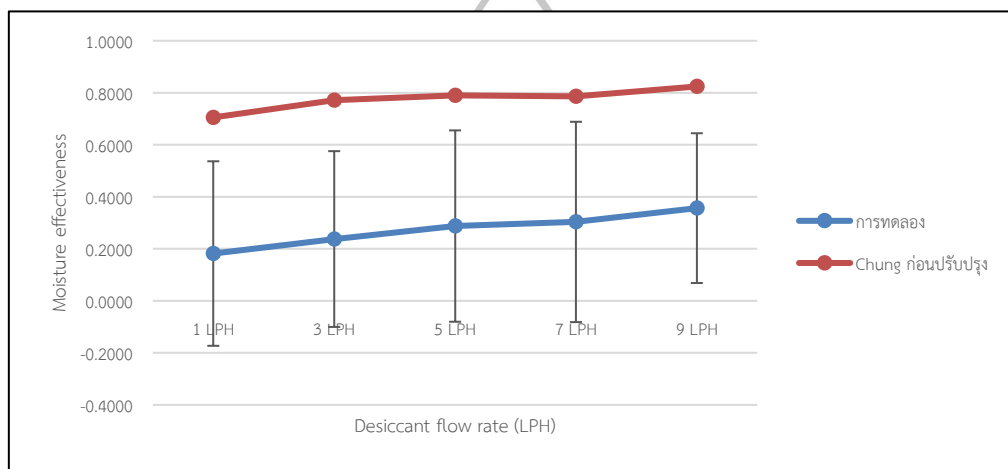
(ก)



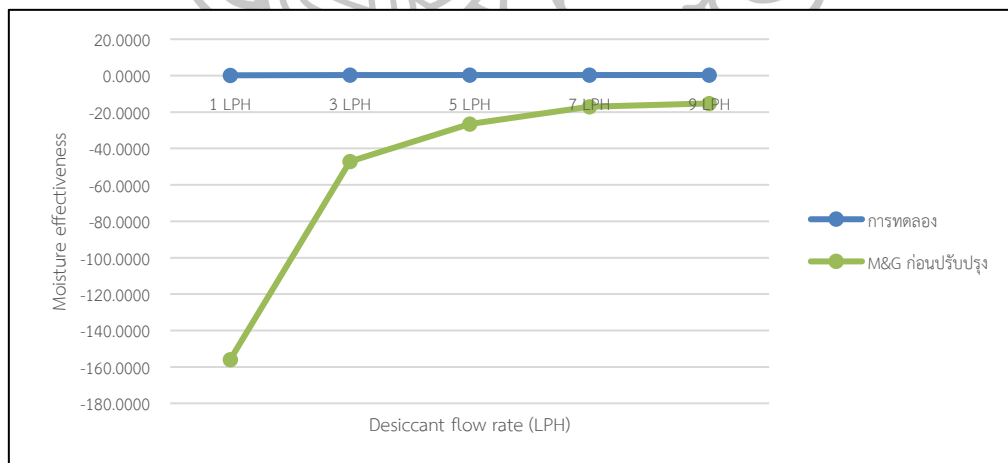
(ข)

รูปที่ 4.13 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.13(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.13(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.14(ก) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.14(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

ตารางที่ 4.1 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูความชื้น ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่

อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	อัตราการไหลของสารดูความชื้น (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
35	1	0.359	0.1410	0.0281	3.0819	-0.6149
	3	0.455	0.1077	0.0213	0.6773	-0.1352
	5	0.315	0.1038	0.0206	0.3163	-0.0629
	7	0.309	0.1096	0.0208	0.1584	-0.0314
	9	0.278	0.0852	0.0168	0.0611	-0.0120
110	1	0.642	0.3174	0.0633	28.3829	-5.6569
	3	0.536	0.2155	0.0423	6.8431	-1.3566
	5	0.341	0.2768	0.0551	4.7078	-0.9406
	7	0.422	0.2347	0.0465	2.8888	-0.5744
	9	0.284	0.2777	0.0550	2.3624	-0.4700
185	1	0.467	0.5578	0.1097	96.6068	-19.2721
	3	0.367	0.5141	0.1015	27.8909	-5.5506
	5	0.369	0.5603	0.1106	21.6629	-4.1392
	7	0.380	0.3909	0.0779	9.7170	-1.9384
	9	0.281	0.4379	0.0869	7.5934	-1.5162



ตารางที่ 4.1 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ (ต่อ)

อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	อัตราการไหลของสารดูดความชื้น (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
260	1	0.309	1.1081	0.2166	169.9352	-29.2908
	3	0.363	0.6494	0.1273	51.8590	-10.2745
	5	0.467	0.8840	0.1742	35.0972	-6.9619
	7	0.303	0.6927	0.1368	21.3441	-4.2454
	9	0.336	0.8078	0.1579	17.7294	-3.5202
335	1	0.355	1.1461	0.2285	341.5427	-68.2460
	3	0.338	1.1513	0.2291	101.6871	-20.3046
	5	0.368	1.1042	0.2192	58.2731	-11.6237
	7	0.385	1.0919	0.2173	38.5364	-7.6963
	9	0.288	0.9664	0.1898	32.5540	-6.1637
เฉลี่ย		0.3727	0.5573	0.1101	43.2604	-8.4239

จากผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung และ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น การทำนายค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นมีความไม่แม่นยำมากขึ้น และจากตารางที่ 4.1 ที่แสดงค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (MBD) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองของงานวิจัยของ Chung มีค่าเท่ากับ 0.5573 และ 0.1101 และงานวิจัยของ Martin and Goswami มีค่าเท่ากับ 43.2604 และ -8.4239 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด เนื่องจากแบบจำลองทั้งสอง เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับช่วงสภาวะการทำงานที่สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 3.5 ถึง 15.4 โดยเฉพาะงานวิจัยของ Martin and Goswami เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากสารละลายไตรเอทิลีนไกลคอล จึงทำให้การทำนายมีความแม่นยำน้อยกว่างานวิจัยของ Chung ที่ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในการพัฒนาแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของแบบจำลองทั้งสองก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ยังคงมีค่าสูงกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด จึงยังคงไม่เหมาะที่จะ

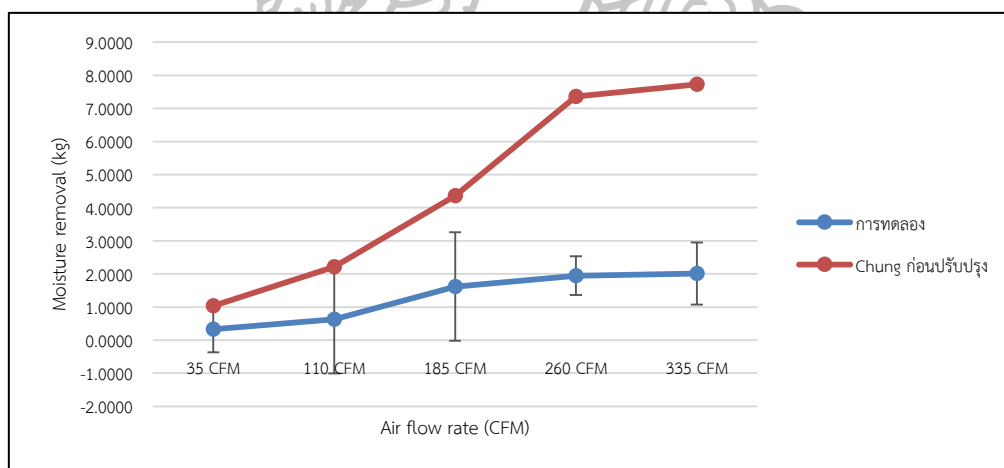
นำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่อยู่นอกช่วงการทำงานของแบบจำลองนั้น ๆ

#### 4.2.2 การทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่

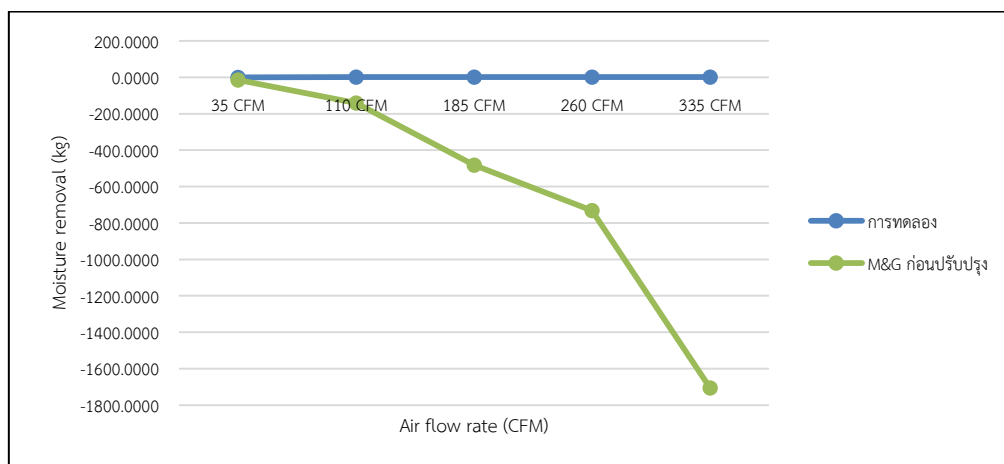
การทำนายอัตราการดูดความชื้นสามารถทำนายได้โดยการทำนายผ่านสมการประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นดังที่แสดงในสมการที่ 2-44 ซึ่งผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นที่ใช้แบบจำลองการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ และเมื่อแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น โดยมีผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นดังนี้

##### 4.2.2.1 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.19 เป็นผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Chung และ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลการทำนายดังนี้



(ก)

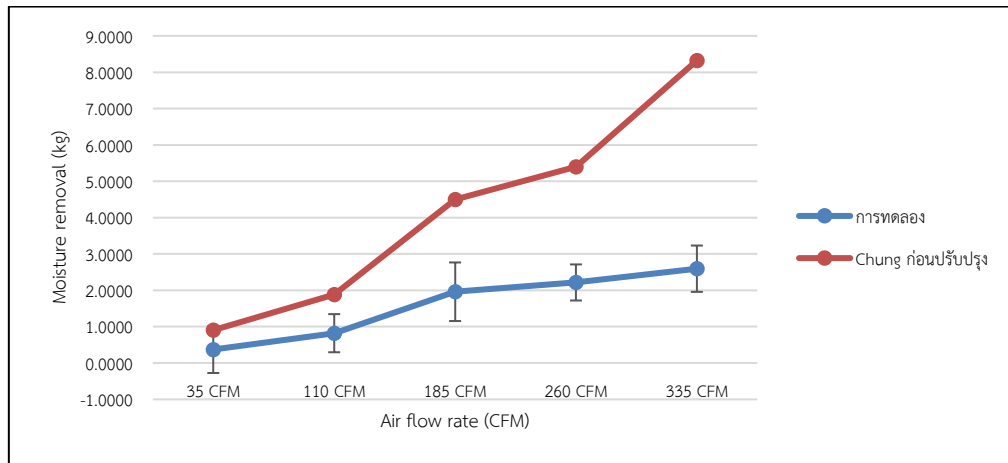


(ข)

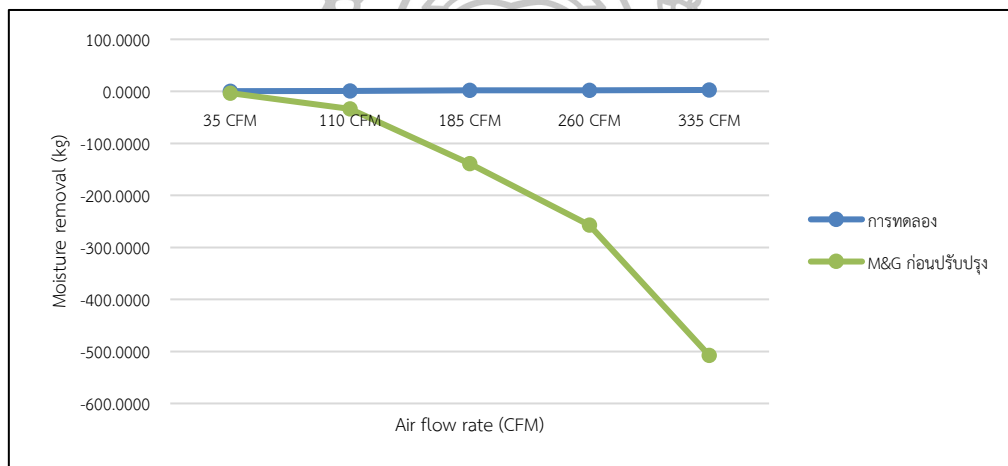
รูปที่ 4.15 การทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.15(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.15(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

รูปที่ 4.16(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.16(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



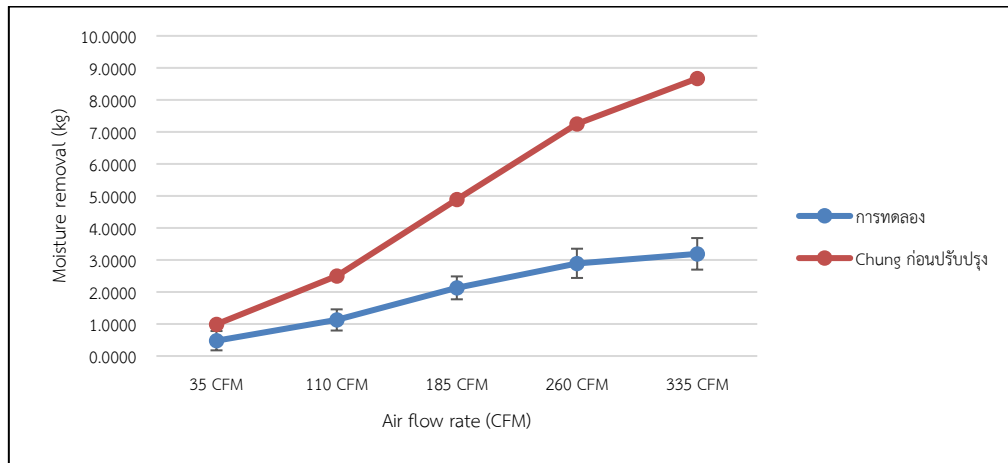
(ก)



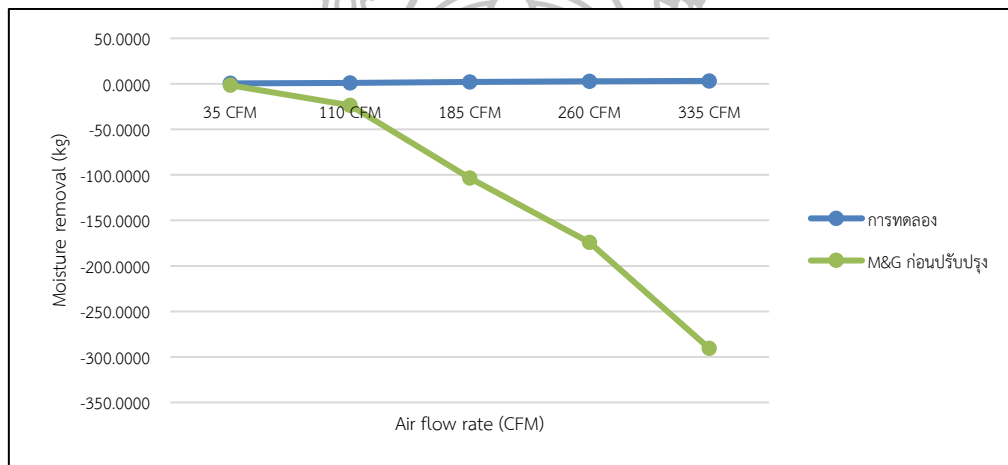
(ข)

รูปที่ 4.16 การทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 3 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.17(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.17(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



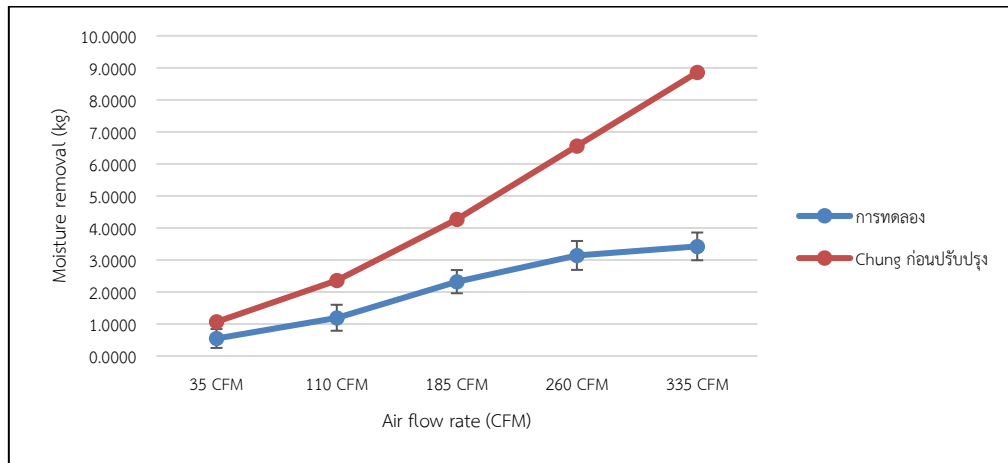
(ก)



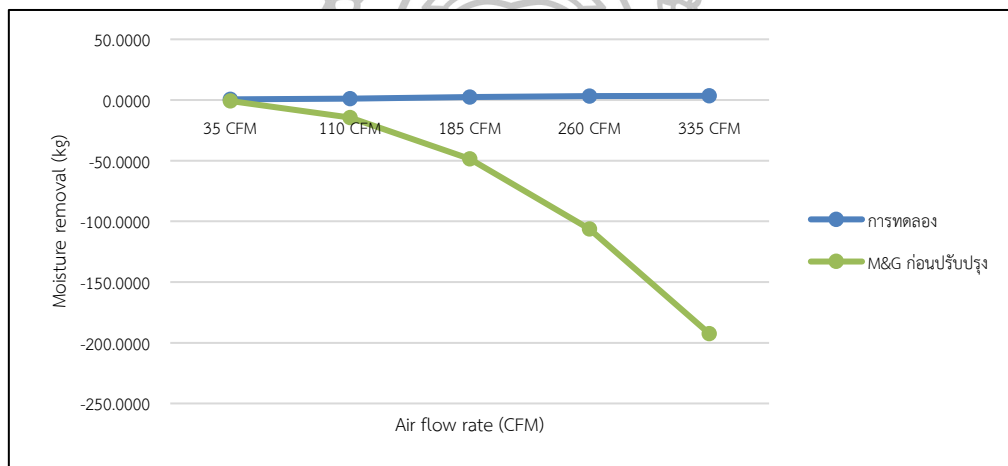
(ข)

รูปที่ 4.17 การทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 5 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.18(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.18(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือ



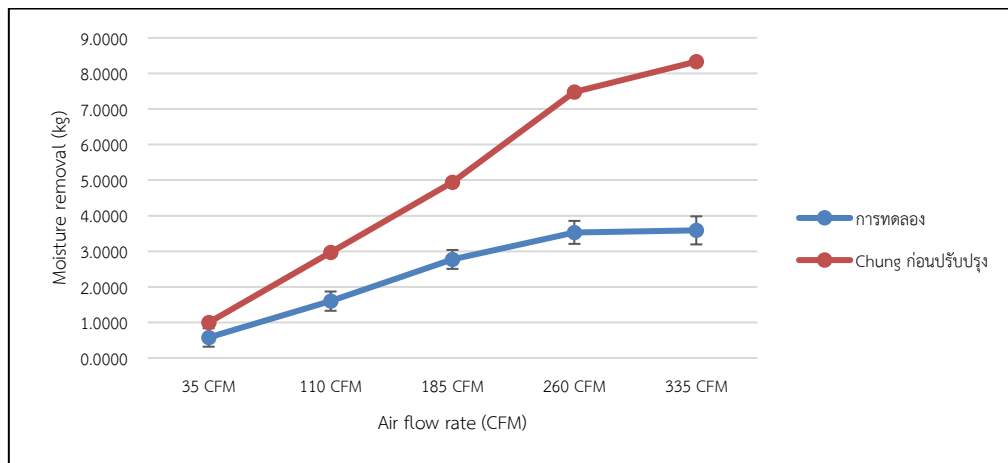
(ก)



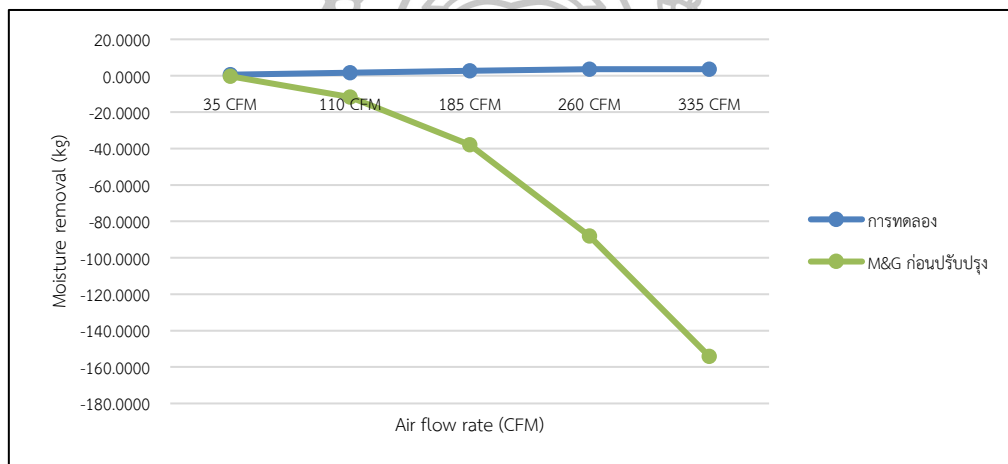
(ข)

รูปที่ 4.18 การทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของ สาร  
ดูดความชื้นที่ 7 ลิตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.19(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.19(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)

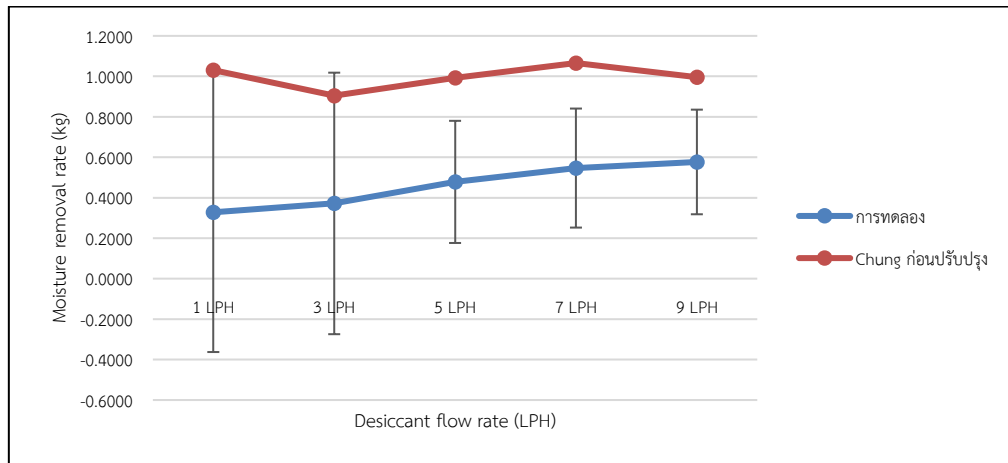


(ข)

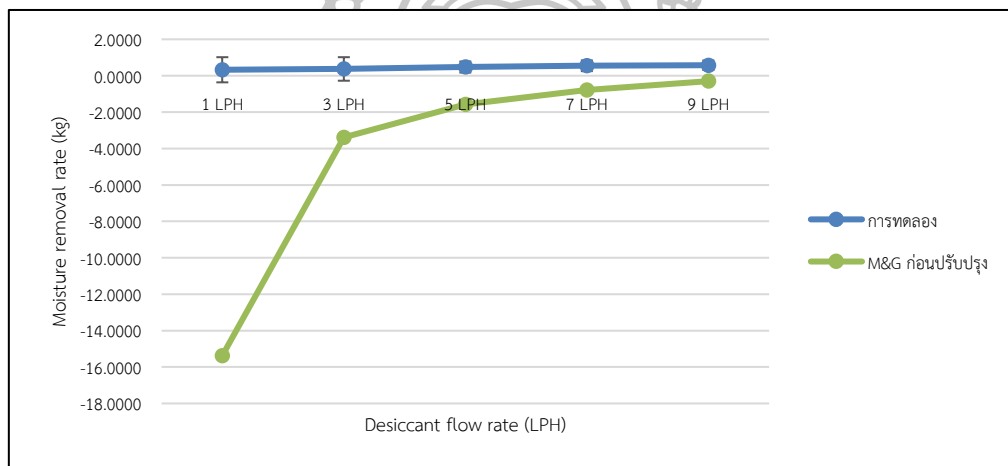
รูปที่ 4.19 การทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 9 ลิตรต่อชั่วโมง

#### 4.2.2.2 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.24 เป็นผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Chung และ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ เมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น มีผลการทำนายดังนี้



(ก)

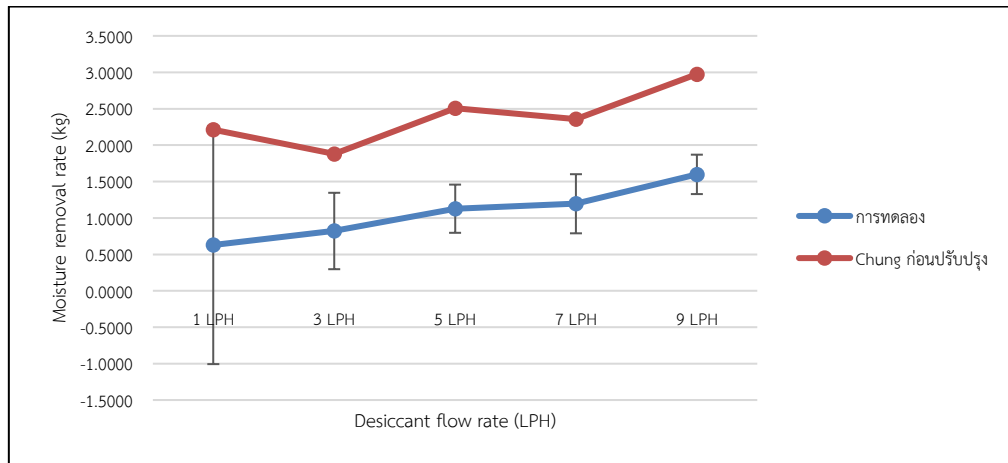


(ข)

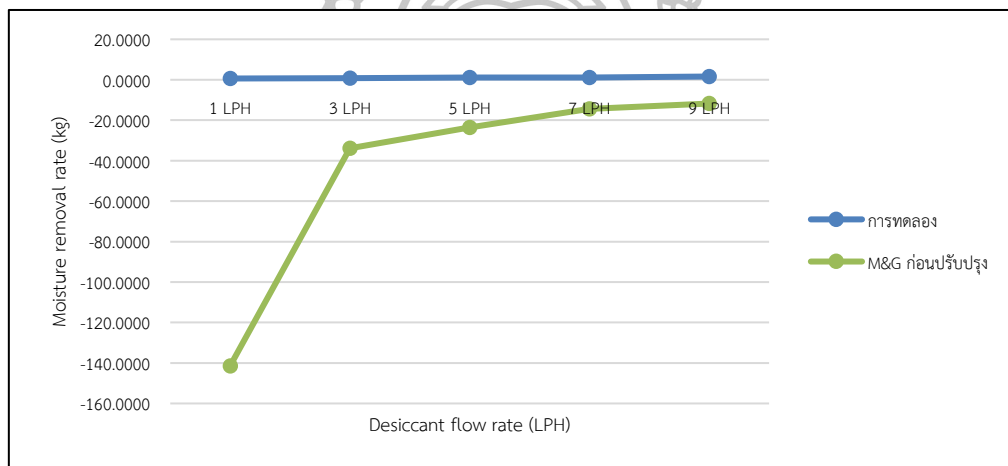
รูปที่ 4.20 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.20(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.20(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด





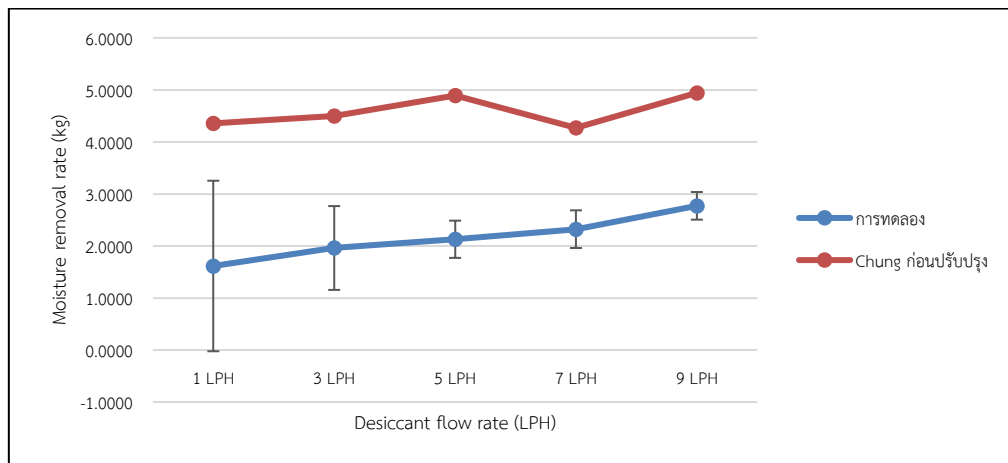
(ก)



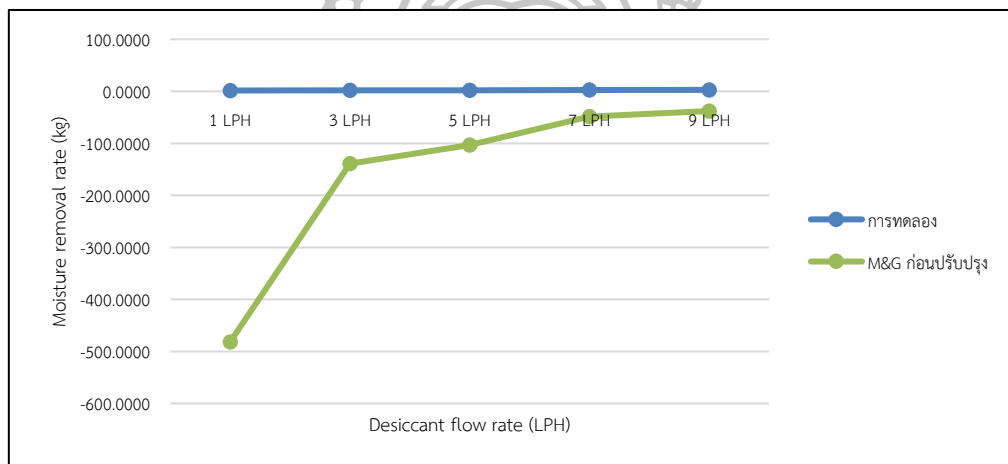
(ข)

รูปที่ 4.21 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.21(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.21(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



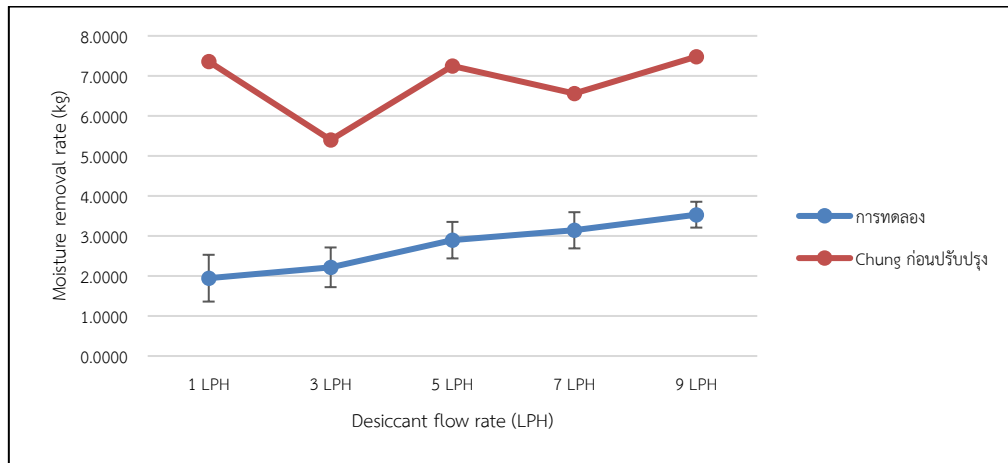
(ก)



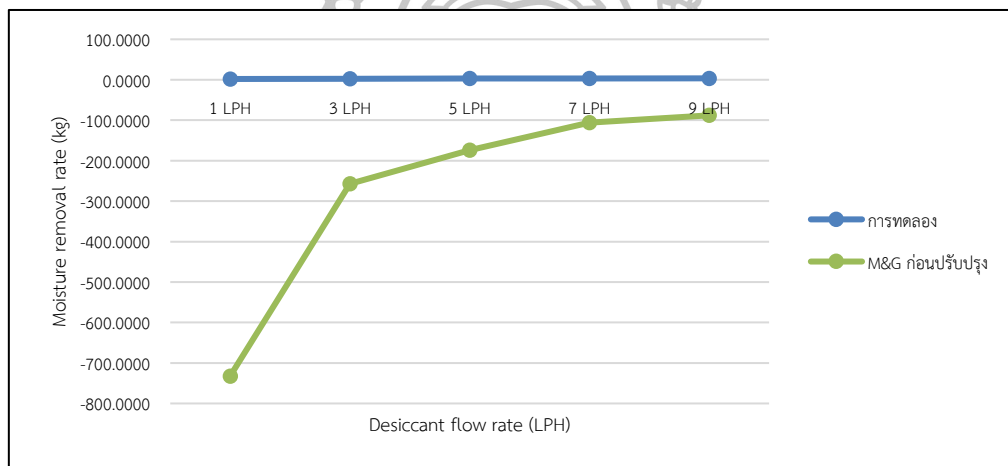
(ข)

รูปที่ 4.22 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.22(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.22(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



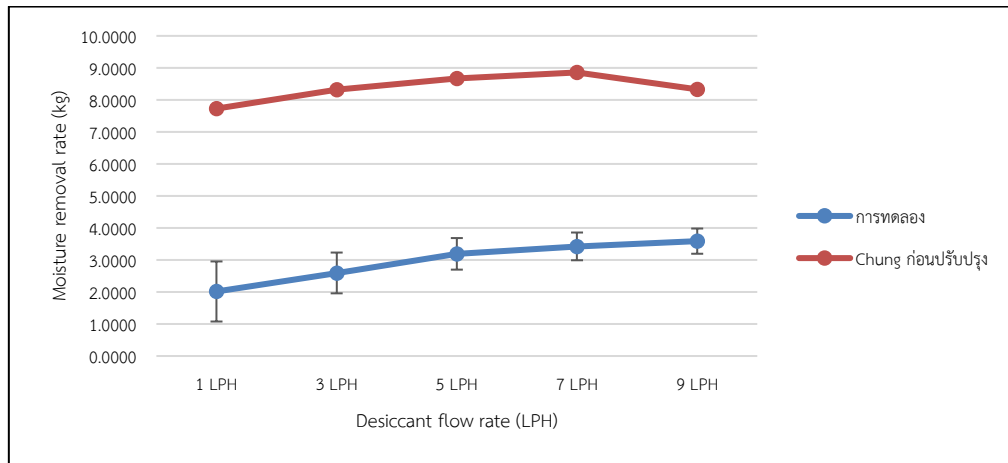
(ก)



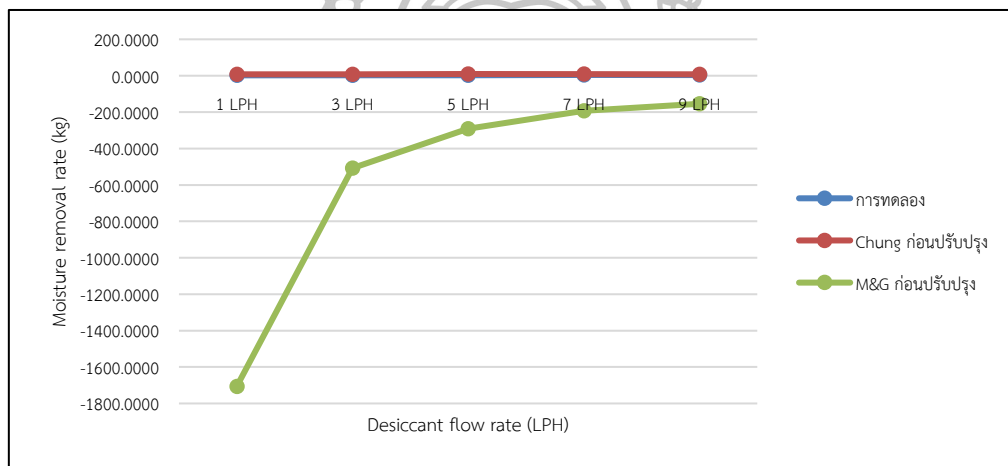
(ข)

รูปที่ 4.23 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.23(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.23(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

รูปที่ 4.24(ก) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่ากับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด รูปที่ 4.24(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น พบว่าผลการทำนายไม่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงและไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

ตารางที่ 4.2 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของการทำนายอัตราการดูดความชื้นจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่

อัตราการไหล ของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุต ต่อนาที)	อัตราการไหล ของสารดูด ความชื้น (ลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าความ คลาดเคลื่อน จาก เครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
35	1	0.691	0.1410	0.0281	3.0819	-0.6149
	3	0.646	0.1077	0.0213	0.6773	-0.1352
	5	0.302	0.1038	0.0206	0.3163	-0.0629
	7	0.294	0.1096	0.0208	0.1584	-0.0314
	9	0.259	0.0852	0.0168	0.0611	-0.0120
110	1	1.636	0.3174	0.0633	28.3829	-5.6569
	3	0.525	0.2155	0.0423	6.8431	-1.3566
	5	0.331	0.2768	0.0551	4.7078	-0.9406
	7	0.406	0.2347	0.0465	2.8888	-0.5744
	9	0.271	0.2777	0.0550	2.3624	-0.4700
185	1	1.639	0.5578	0.1097	96.6068	-19.2721
	3	0.806	0.5141	0.1015	27.8909	-5.5506
	5	0.358	0.5603	0.1106	21.6629	-4.1392
	7	0.362	0.3909	0.0779	9.7170	-1.9384
	9	0.266	0.4379	0.0869	7.5934	-1.5162
260	1	0.585	1.1081	0.2166	169.9352	-29.2908
	3	0.496	0.6494	0.1273	51.8590	-10.2745
	5	0.456	0.8840	0.1742	35.0972	-6.9619
	7	0.452	0.6927	0.1368	21.3441	-4.2454
	9	0.323	0.8078	0.1579	17.7294	-3.5202

ตารางที่ 4.2 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของการทำนายอัตราการดูดความชื้นจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ (ต่อ)

อัตราการไหล ของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุต ต่อนาที)	อัตราการไหล ของสารดูด ความชื้น (ลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าความ คลาดเคลื่อน จาก เครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
335	1	0.938	1.1461	0.2285	341.5427	-68.2460
	3	0.637	1.1513	0.2291	101.6871	-20.3046
	5	0.493	1.1042	0.2192	58.2731	-11.6237
	7	0.433	1.0919	0.2173	38.5364	-7.6963
	9	0.395	0.9664	0.1898	32.5540	-6.1637
เฉลี่ย		0.5599	0.5573	0.1101	43.2604	-8.4239

จากผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านมา ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ในตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่ได้อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด เนื่องจากแบบจำลองการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ไม่เหมาะสมกับสภาวะงานวิจัยนี้ จึงส่งผลทำให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย โดยพบว่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (MBD) ในการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ เมื่อใช้แบบจำลองของ Chung มีค่าเท่ากับ 0.557 และ 0.1101 งานวิจัยของ Martin and Goswami มีค่าเท่ากับ 43.260 และ -8.424 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด มีค่าเท่ากับ 0.5599

#### 4.3 การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่

ในการทำนายอัตราการดูดความชื้นของระบบดูดความชื้น ได้มีงานวิจัยบางงานได้กำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ [11, 14, 17] โดยค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่กำหนดให้เป็นค่าคงที่นั้นเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเท่ากับ 0.34294 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย

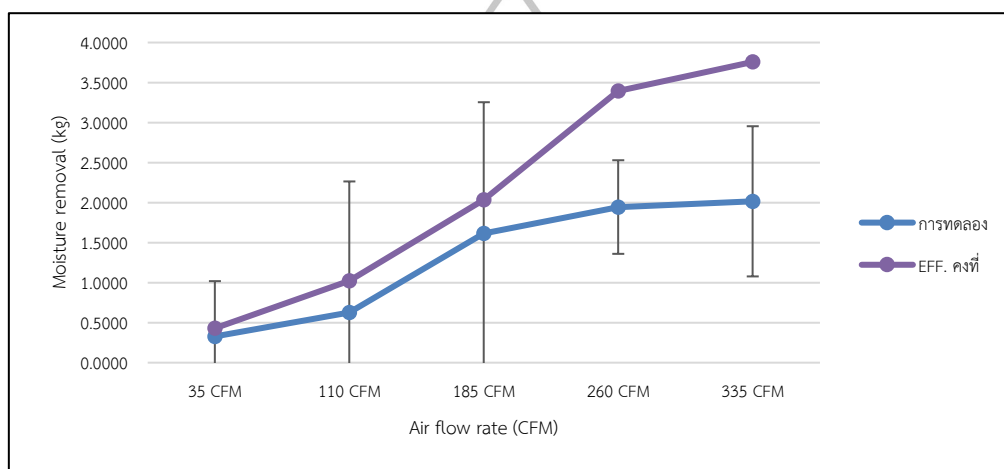
ของประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองจริงเช่นกัน ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ และ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการทดลองที่ใช้ในการกำหนดค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเท่ากับ 0.34294

อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุต ต่อนาที)	สัดส่วนความชื้นของอากาศ (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)		อัตราการไหลของสารดูดความชื้น (ลิตร ต่อชั่วโมง)	สัดส่วนความชื้นของสารดูดความชื้น (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง)		ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น
	ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
35	0.021493	0.016375	1	0.002551	0.270	
	0.020112	0.013664	3	0.002571	0.368	
	0.020616	0.015551	5	0.002564	0.281	
	0.020687	0.012193	7	0.002558	0.469	
	0.018963	0.009424	9	0.002573	0.582	
110	0.022033	0.013382	1	0.002532	0.444	
	0.017453	0.012293	3	0.002564	0.347	
	0.018409	0.011747	5	0.002481	0.418	
	0.020641	0.012092	7	0.002563	0.473	
	0.022353	0.011783	9	0.002501	0.532	
185	0.020865	0.015945	1	0.002576	0.269	
	0.020646	0.011398	3	0.002422	0.507	
	0.024442	0.011564	5	0.002552	0.588	
	0.023039	0.014521	7	0.002583	0.416	
	0.020453	0.013831	9	0.002544	0.370	
260	0.025646	0.018096	1	0.002432	0.325	
	0.021638	0.014788	3	0.002433	0.357	
	0.024397	0.017114	5	0.002296	0.330	
	0.023879	0.017395	7	0.002558	0.304	
	0.024283	0.016043	9	0.002579	0.380	
335	0.020725	0.013776	1	0.003449	0.402	
	0.026011	0.015906	3	0.002563	0.431	
	0.022282	0.014180	5	0.002575	0.411	
	0.024341	0.016495	7	0.002540	0.360	
	0.021212	0.012543	9	0.002581	0.465	

#### 4.3.1 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

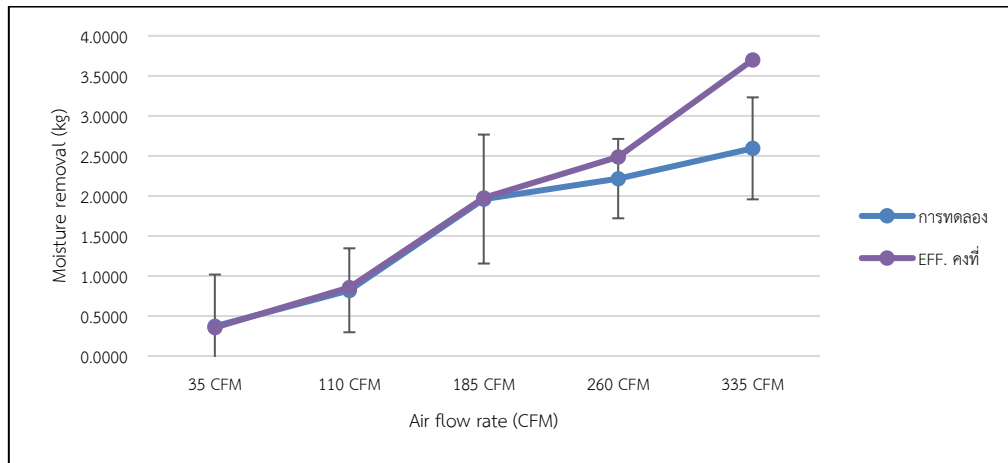
ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อใช้กำหนดให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ ดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.29 โดยจากรูปที่ 4.25 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากจากการทำนายเพิ่มเติม เช่นเดียวกับการทดลอง และอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.25 การทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 1 ลิตรต่อชั่วโมง

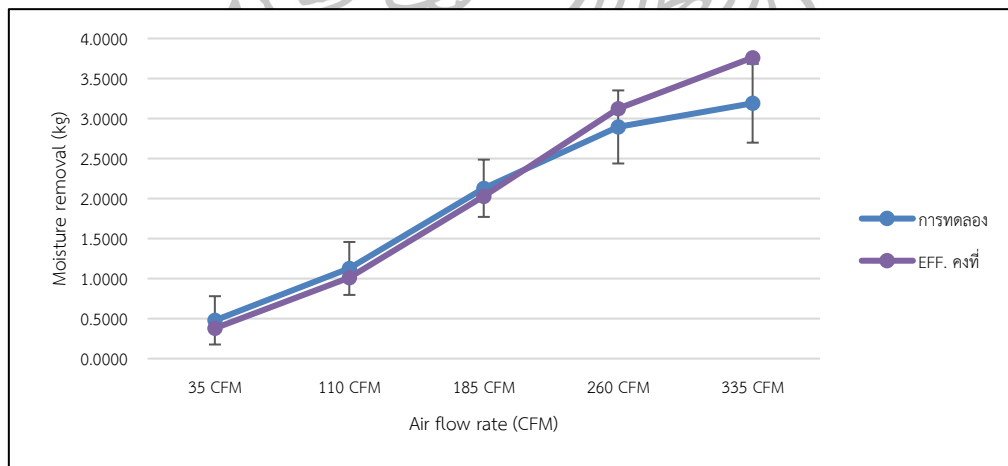
จากรูปที่ 4.26 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายเพิ่มเติม เช่นเดียวกับการทดลอง และอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด





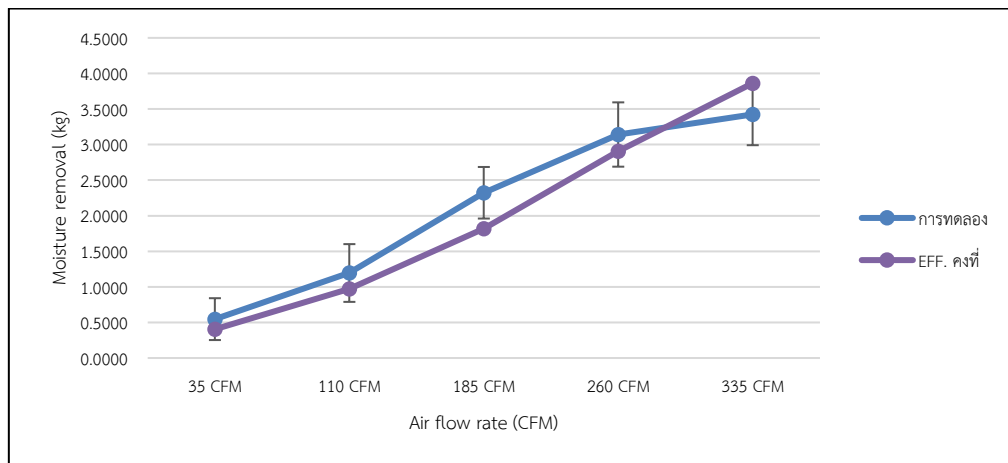
รูปที่ 4.26 การทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 3 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.27 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดลอง และอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



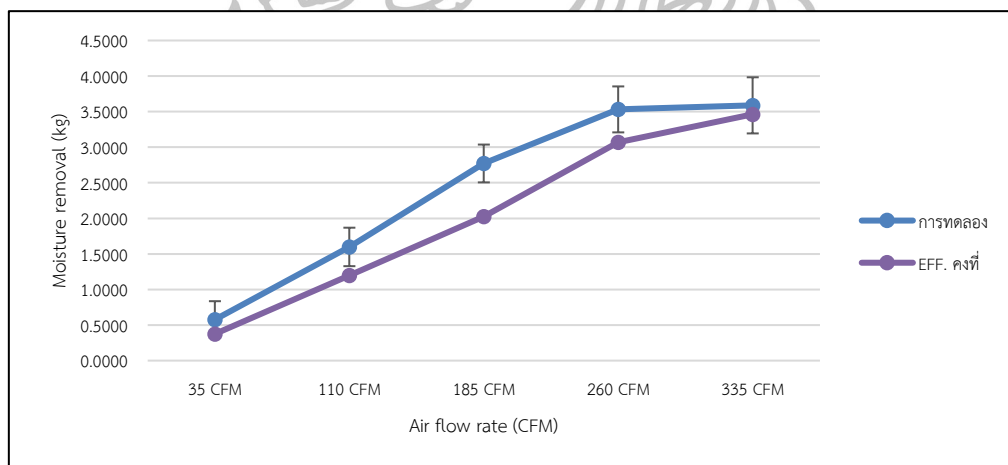
รูปที่ 4.27 การทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 5 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.28 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดลอง และอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.28 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 7 ลิตรต่อชั่วโมง

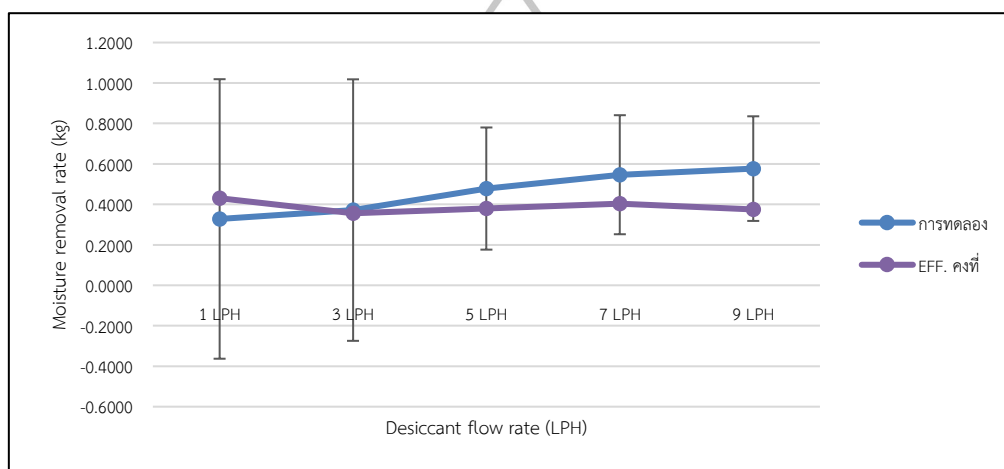
จากรูปที่ 4.29 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดลอง และอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.29 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 9 ลิตรต่อชั่วโมง

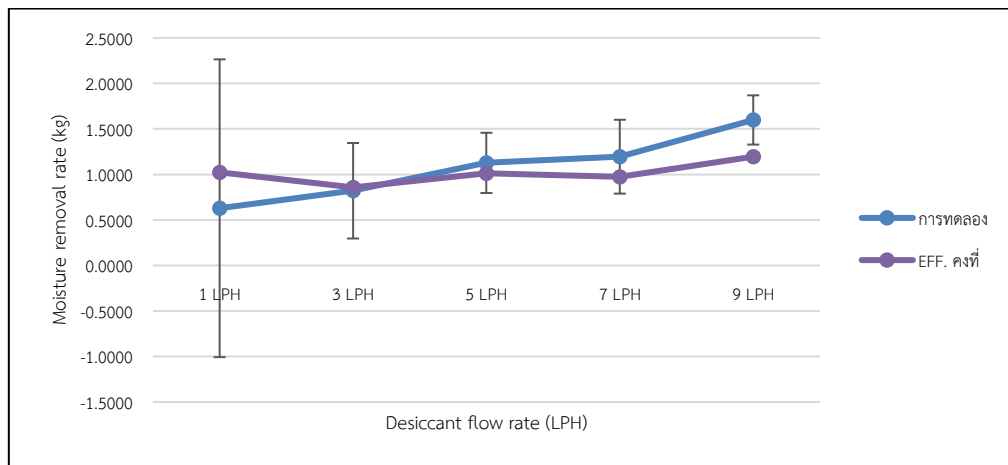
#### 4.3.2 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อใช้กำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น ดังรูปที่ 4.30 ถึง 4.34 โดยจากรูปที่ 4.30 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าผลของการทำนายอัตราการดูดความชื้นอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



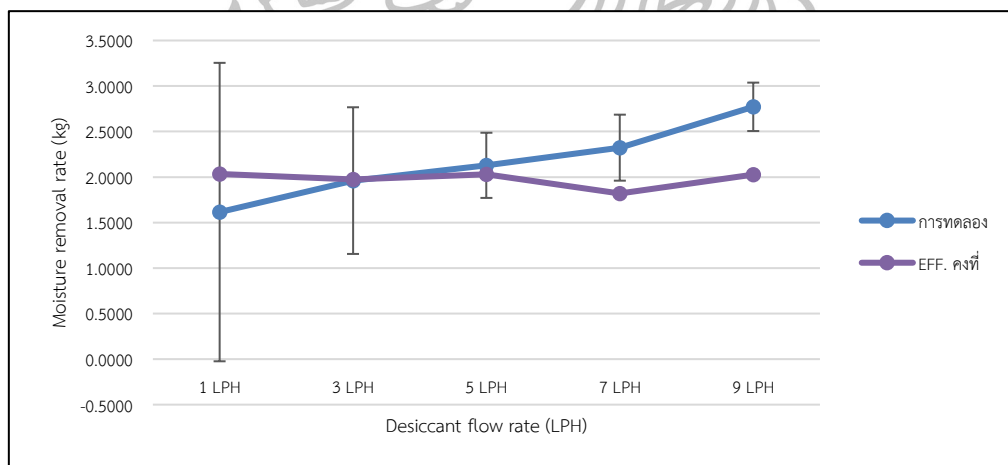
รูปที่ 4.30 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.31 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าผลของการทำนายอัตราการดูดความชื้นอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



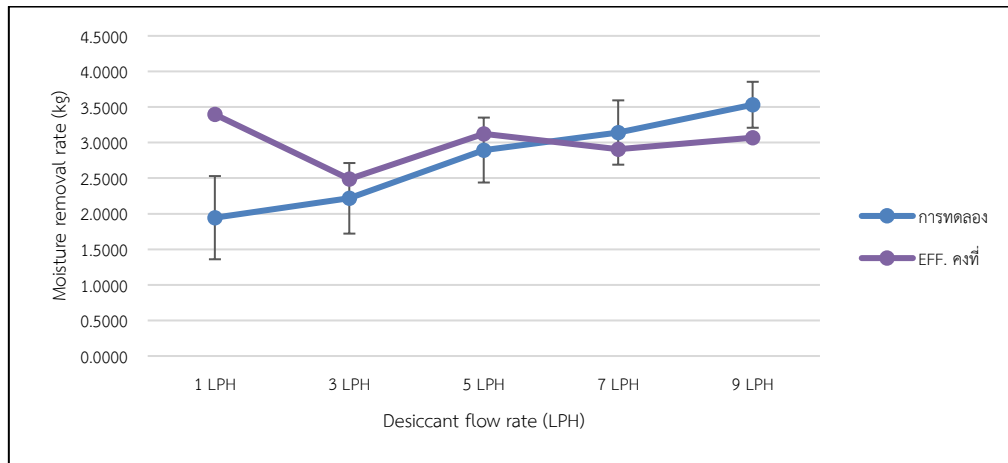
รูปที่ 4.31 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.32 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าผลของการทำนายอัตราการดูดความชื้นอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



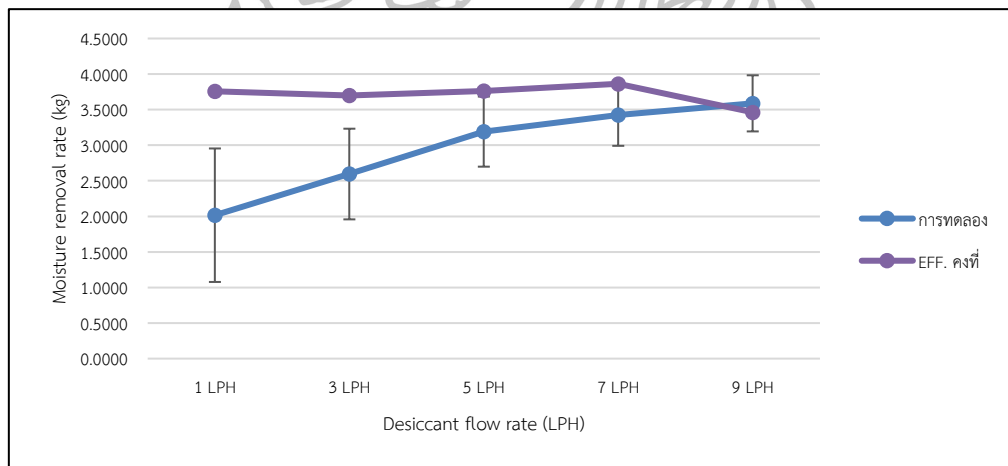
รูปที่ 4.32 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.33 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าผลของการทำนายอัตราการดูดความชื้นอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.33 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.34 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ โดยที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น พบว่าผลของการทำนายอัตราการดูดความชื้นอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.34 ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นเมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่

อัตราการไหล ของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	อัตราการไหล ของสารดูดความชื้น (ลิตรต่อชั่วโมง)	RMSE	MBD
35	1	0.0940	0.0181
	3	0.0727	0.0144
	5	0.0766	0.0153
	7	0.0814	0.0162
	9	0.0758	0.0150
110	1	0.3361	0.0493
	3	0.1916	0.0363
	5	0.2136	0.0419
	7	0.2038	0.0398
	9	0.2466	0.0485
185	1	0.9216	0.1099
	3	0.4953	0.0872
	5	0.4713	0.0873
	7	0.3916	0.0757
	9	0.4236	0.0833
260	1	1.4370	0.1792
	3	0.7160	0.1147
	5	0.7373	0.1353
	7	0.6485	0.1226
	9	0.6607	0.1280
335	1	2.8862	0.2514

ตารางที่ 4.4 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของการทำนายอัตราการดูดความชื้น เมื่อกำหนดให้ค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ (ต่อ)

อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	อัตราการไหลของสารดูดความชื้น (ลิตรต่อชั่วโมง)	RMSE	MBD
335	3	1.1857	0.1781
	5	0.9619	0.1677
	7	0.8821	0.1659
	9	0.7796	0.1476
เฉลี่ย		0.6076	0.0931

จากตารางที่ 4.4 ที่แสดงค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 มีค่าเท่ากับ 0.6076 และ 0.0931 การทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยที่กำหนดให้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ เนื่องจากประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ใช้ในการทำนายอัตราการดูดความชื้นเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจริง จึงทำให้สามารถทำนายอัตราการดูดความชื้นได้อย่างแม่นยำมากกว่าการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้ง 2 งาน

#### 4.4 การทำนายสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่

4.4.1 การปรับชุดค่าที่คงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น

##### 4.4.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung

จากสมการประสิทธิผลของเครื่องดูดความชื้นชนิดคอลัมน์ (Column effectiveness) [24] ดังสมการที่ 4-1 และ 4-2

$$\epsilon = \frac{HR_{in} - HR_{out}}{HR_{in} - HR_{out,min}} = \frac{1 - \left(\frac{HR_{out}}{HR_{in}}\right)}{1 - \left(\frac{HR_{out,min}}{HR_{in}}\right)} \quad (4-1)$$

$$\epsilon = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in} - W_{equ}} = \frac{1 - \left(\frac{W_{out}}{W_{in}}\right)}{1 - \left(\frac{W_{equ}}{W_{in}}\right)} \quad (4-2)$$

งานวิจัยของ Ullah et al. [24] ได้สร้างความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ ของเครื่องดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{HR_{out}}{HR_{in}} = \frac{HR_{out}}{HR_{in}} \left( \frac{t_{G,in}}{t_{L,in}}, \xi_{in} \right) \quad (4-3)$$

$$HR_{out,min} = HR_{out,min}(t_{L,in}, \epsilon_{in}) \quad (4-4)$$

หลังจากนั้นได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปทำการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve fit) พบความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{HR_{out}}{HR_{in}} = \frac{C_1 \exp(-C_2 t_{G,in}/t_{L,in})}{\xi_{in}^{C_3}} \quad (4-5)$$

$$HR_{out,min} = \frac{C_4 \exp(C_5 t_{L,in})}{\xi_{in}^{C_6}} \quad (4-6)$$

ค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการได้มาจากวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) ดังตารางที่ 2.10 และ Chung ได้พัฒนาสมการที่ 4-5 และ 4-6 คือความชื้นสมดุลหรือความชื้นน้อยสุดของอากาศ และอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารดูดความชื้นขาเข้าเครื่องดูดความชื้น ดังนี้

$$\frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{C_1 \exp(C_2 t_{G,in}/t_{L,in})}{\xi_{in} C_3} \quad (4-7)$$

$$W_{eq} = \frac{C_4 \exp(C_5/t_{L,in})}{\xi_{in} C_6} \quad (4-8)$$

นำสมการที่ 4-7 และ 4-8 กลับไปแทนค่าในสมการที่ 4-2 จะได้

$$\epsilon = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in} - W_{equ}} = \frac{1 - \left(\frac{W_{out}}{W_{in}}\right)}{1 - \left(\frac{W_{equ}}{W_{in}}\right)} = \frac{1 - \left(\frac{C_1 \exp(C_2 t_{G,in}/t_{L,in})}{\xi_{in} C_3}\right)}{1 - \left(\frac{C_4 \exp(C_5/t_{L,in})}{W_{in} \xi_{in} C_6}\right)} \quad (4-9)$$

ดังนั้นจึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ของสมการได้ ดังนี้

- พจน์เศษของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หมายถึง ความสามารถในการดูดความชื้นที่ทำได้จริง ดังสมการที่ 4-10

$$W_{a,in} - W_{a,out} = f \left( 1 - \frac{6.83693 \left[ \frac{G_{a,in}}{G_{s,in}} \right]^{0.09679} \exp \left[ 0.148 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{aZ^{0.51555} X^{0.00632}} \right) \quad (4-10)$$



- พจน์ส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Chung หมายถึง ความสามารถในการดูดความชื้นสูงสุดตามทฤษฎี ดังสมการที่ 4-11

$$W_{in} - W_{equ} = f \left( 1 - \frac{0.00008 \exp \left[ 5.07442 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{X^{2.60698}} \right) \quad (4-11)$$

- ข้อมูลจากการทดลองจริงที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยแยกพิจารณาระหว่างเศษและส่วน ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจากการทดลองจริงที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung

$\frac{G_{a,in}}{G_{s,in}}$	$\frac{T_{a,in}}{T_{s,in}}$	aZ	X	พจน์เศษของแบบจำลอง	$\frac{T_{a,in}}{T_{s,in}}$	X	พจน์ส่วนของแบบจำลอง
0.092926	0.907643	105	0.874308	0.0081	0.907643	0.874308	0.014395
0.119476	1.039604	105	0.902283	0.0116	1.039604	0.902283	0.018236
0.167266	0.979104	105	0.923082	0.0104	0.979104	0.923082	0.019698
0.278777	1.005970	105	0.897015	0.0080	1.005970	0.897015	0.018765
0.292053	1.045161	105	0.890510	0.0111	1.045161	0.890510	0.021474
0.375496	1.074324	105	0.904495	0.0079	1.074324	0.904495	0.017325
0.491179	0.977918	105	0.904309	0.0095	0.977918	0.904309	0.019600
0.525695	0.927083	105	0.898452	0.0073	0.927083	0.898452	0.015564
0.631516	1.050473	105	0.904193	0.0096	1.050473	0.904193	0.019017
0.690306	0.988095	105	0.905310	0.0091	0.988095	0.905310	0.022757
0.836332	1.000000	105	0.903090	0.0051	1.000000	0.903090	0.018942
0.876158	1.144269	105	0.886859	0.0064	1.144269	0.886859	0.015140
0.884123	0.854839	105	0.888269	0.0082	0.854839	0.888269	0.020667
0.887536	1.001604	105	0.908627	0.0065	1.001604	0.908627	0.027733
0.889433	0.878187	105	0.886068	0.0060	0.878187	0.886068	0.017080
1.143557	0.909348	105	0.879821	0.0042	0.909348	0.879821	0.017956
1.242551	1.033742	105	0.913035	0.0080	1.033742	0.913035	0.022509
1.473538	1.087838	105	0.891135	0.0126	1.087838	0.891135	0.021156
1.600979	0.951841	105	0.894415	0.0064	0.951841	0.894415	0.020298
2.070918	0.712185	105	0.920881	0.0048	0.712185	0.920881	0.020669
2.628473	1.051546	105	0.907568	0.0058	1.051546	0.907568	0.018161
2.668299	0.909341	105	0.883037	0.0045	0.909341	0.883037	0.019083
4.420614	1.087838	105	0.902870	0.0071	1.087838	0.902870	0.017394
6.212755	0.927027	105	0.907212	0.0039	0.927027	0.907212	0.022557
8.004896	0.903743	105	0.902105	0.0055	0.903743	0.902105	0.020558

แบบจำลองการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่แสดงดังสมการที่ 4-12

$$\alpha_{ab} = \left\{ 1 - \frac{6.83693 \left[ \frac{G_{a,in}}{G_{s,in}} \right]^{0.09679} \exp \left[ 0.148 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{aZ^{0.51555} x^{0.00632}} \right\} / \left\{ 1 - \frac{0.00008 \exp \left[ 5.07442 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{x^{2.60698}} \right\} \quad (4-12)$$

#### 4.4.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami

งานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาแล้วพบว่าพื้นที่เปียกภายในเครื่องดูดความชื้นยังไม่มีการศึกษา จึงทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยศึกษาและกำหนดตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [15] ใช้ Buckingham PI Theorem ในการจัดกลุ่มตัวแปรให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ดังสมการที่ 4-13

$$\epsilon = f \left( \frac{L}{G}, \frac{H_{a,in}}{H_{L,in}}, a_t Z, \frac{Y_L}{Y_C} \right) \quad (4-13)$$

จากความสัมพันธ์จากการวิจัยที่ผ่านมาดังสมการที่ 4-14

$$y_i = 1 - (1 - y) \left( \frac{x}{x_i} \right)^{F_L/F_G} \quad (4-14)$$

ดังนั้นการปรับปรุงชุดค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จึงสามารถนำมาเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลได้โดยไม่ต้องแยกพจน์ของเศษและส่วน โดยข้อมูลจากการทดลองจริงที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจากการทดลองจริงที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami

$\frac{G_{s,in}}{G_{a,in}}$	$\frac{h_{a,in}}{h_{s,in}}$	aZ	$\frac{Y_s}{Y_o}$	$\alpha_{\text{การทดลอง}}$
0.124924	2.150945	105	1.309536	0.4111
0.160959	2.568217	105	1.311961	0.32523
0.226213	2.111749	105	1.303057	0.26904
0.374771	2.248724	105	1.312746	0.33569
0.380449	2.330194	105	1.305311	0.44359
0.482878	2.064561	105	1.316587	0.3567
0.624618	2.409101	105	1.301963	0.45159
0.678639	2.118794	105	1.31361	0.50744
0.804796	2.463576	105	1.320105	0.32952
0.874465	2.325322	105	1.319067	0.30738

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami (ต่อ)

$\frac{G_{s,in}}{G_{a,in}}$	$\frac{h_{a,in}}{h_{s,in}}$	aZ	$\frac{Y_s}{Y_o}$	$\alpha_{\text{การทดลอง}}$
1.124312	2.338756	105	1.299614	0.46532
1.126714	2.6701	105	1.310276	0.35238
1.131065	2.193377	105	1.307364	0.58833
1.141347	2.105779	105	1.296008	0.34659
1.195697	2.274448	105	1.303315	0.27018
1.448633	2.054966	105	1.312073	0.31077
1.58349	2.29384	105	1.305507	0.41637
1.902245	2.078061	105	1.304526	0.41826
2.035916	2.361821	105	1.303872	0.22528
2.663143	2.204381	105	1.302323	0.47287
3.424041	2.353279	105	1.304402	0.53246
3.587091	1.80142	105	1.31103	0.36762
5.978484	1.855337	105	1.312534	0.28058
8.369878	2.019298	105	1.305196	0.46855
10.76127	2.110436	105	1.300107	0.58201

แบบจำลองทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วได้  
ดังสมการที่ 4-15

$$\alpha_{ab} = 1 - C_1 \left( \frac{G_{s,in}}{G_{a,in}} \right)^x \left( \frac{h_{a,in}}{h_{s,in}} \right)^y (aZ)^z \quad (4-15)$$

โดยที่

$$x = k_1 \frac{Y_s}{Y_o} + m_1$$

$$z = k_2 \frac{Y_s}{Y_o} + m_2$$

ค่าคงที่ในสมการ คือ

$$C_1 = -0.13624 \quad y = -4.09990$$

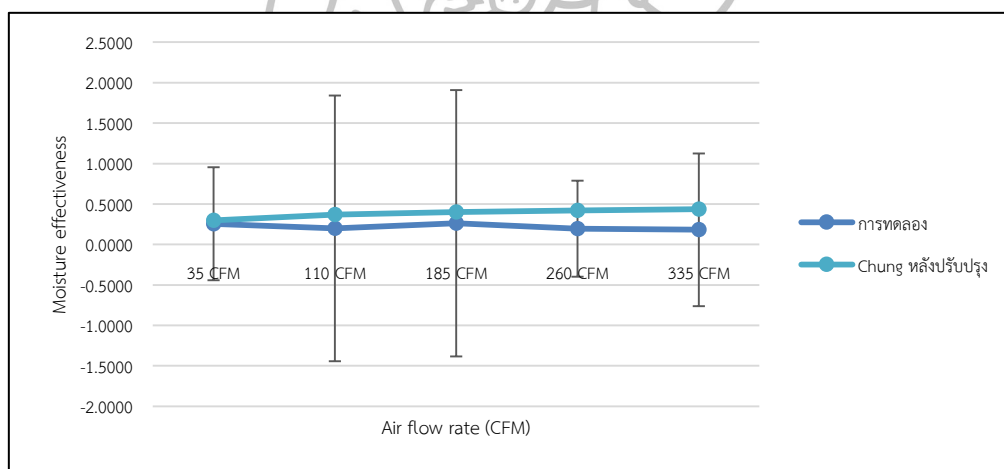
$$k_1 = -0.72853 \quad m_1 = 0.13956$$

$$K_2 = -0.38062 \quad m_2 = -0.62316$$

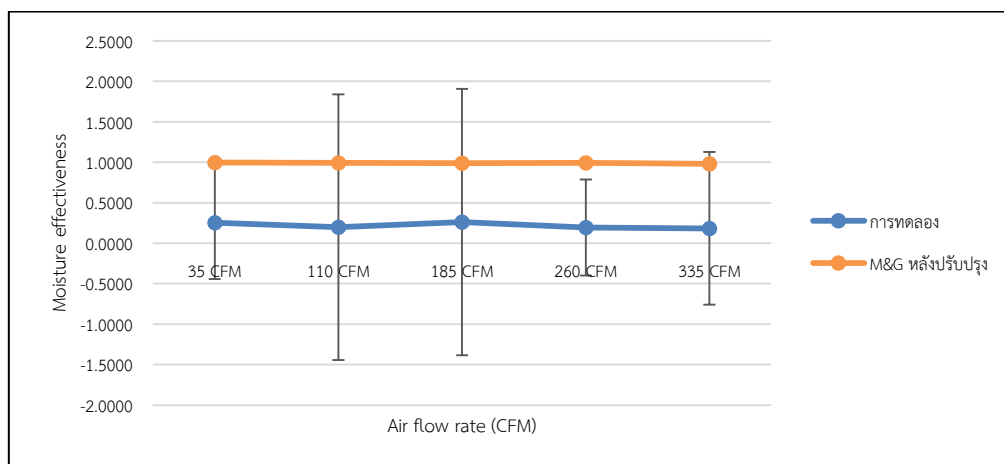
#### 4.4.2 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้ว

##### 4.4.2.1 ผลการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

รูปที่ 4.35 ถึง 4.39 แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.35(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ รูปที่ 4.35(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



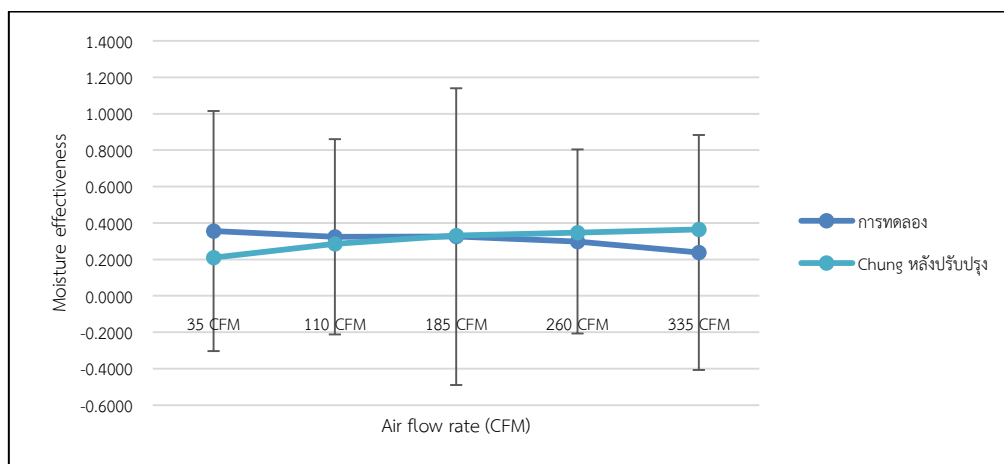
(ก)



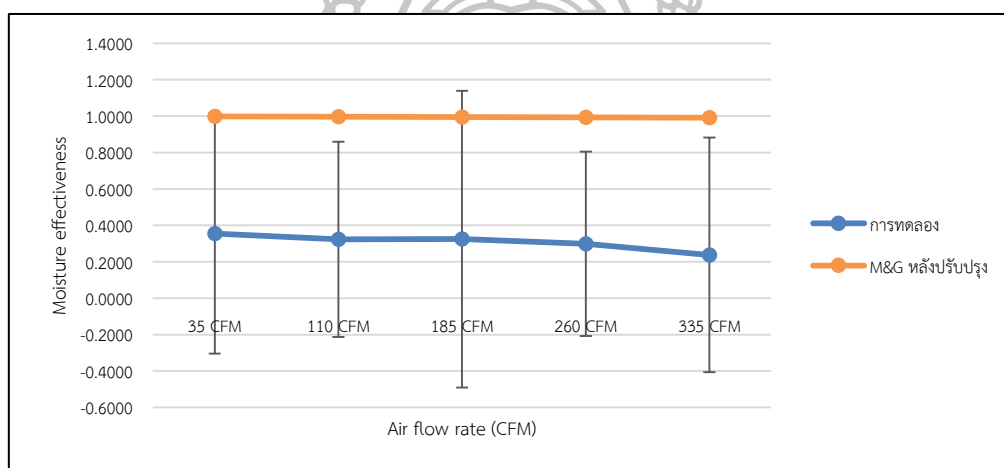
(ข)

รูปที่ 4.35 การทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.36(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.36(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



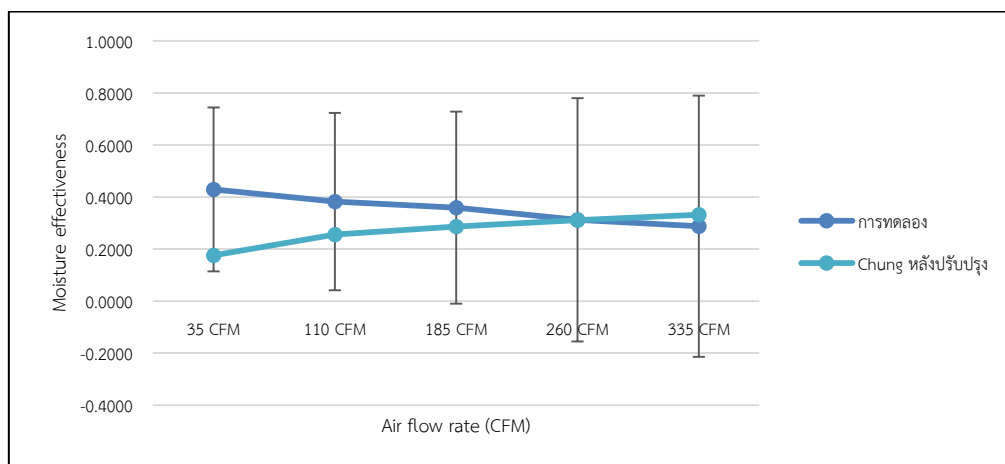
(ก)



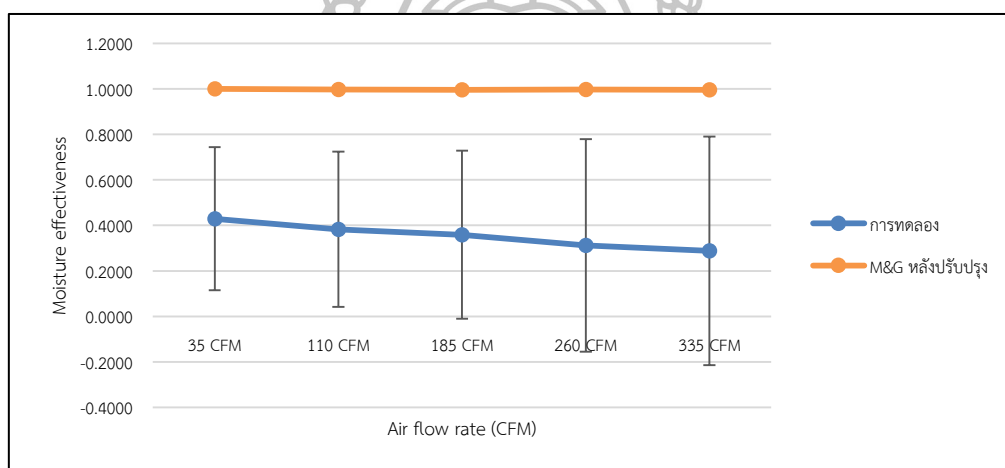
(ข)

รูปที่ 4.36 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 3 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.37(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.37(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



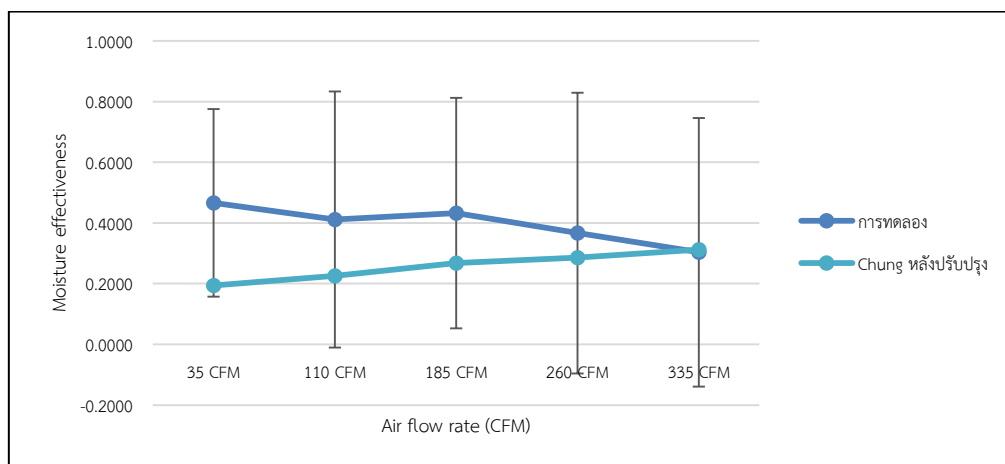
(ก)



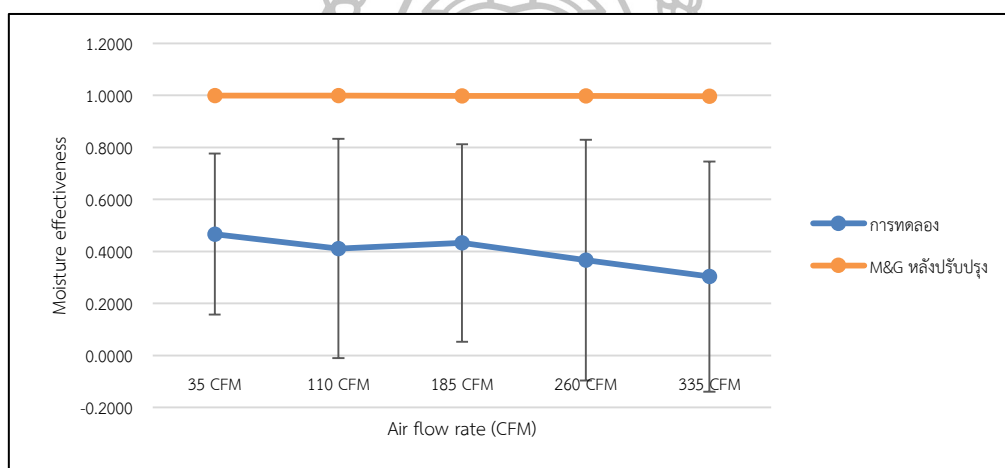
(ข)

รูปที่ 4.37 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 5 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.38(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.38(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)

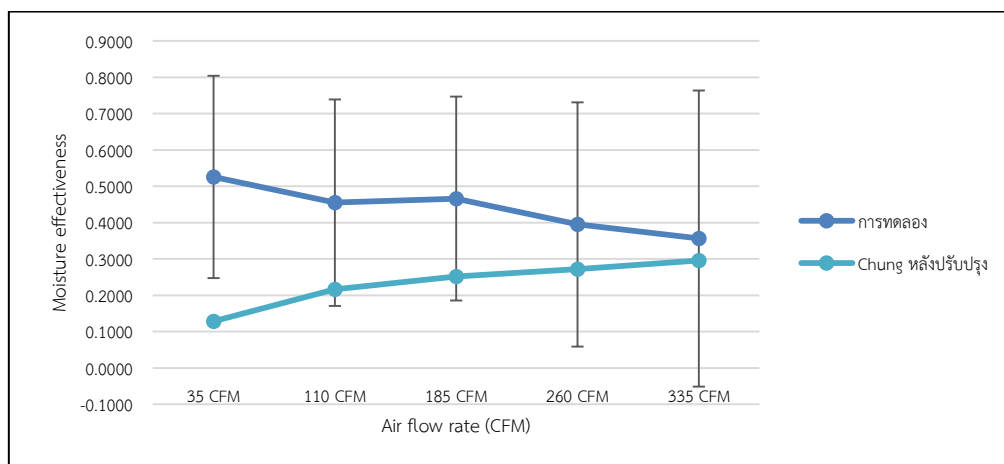


(ข)

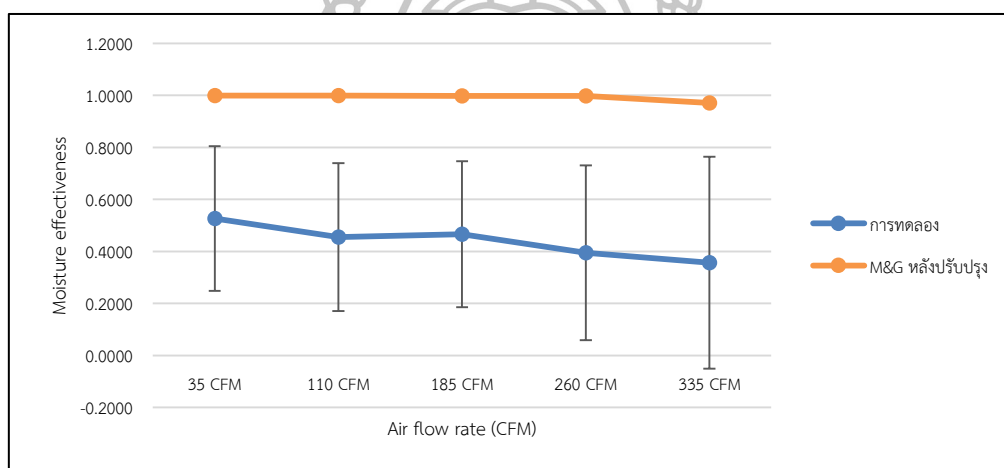
รูปที่ 4.38 การทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 7 ลิตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4.39(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.39(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด





(ก)



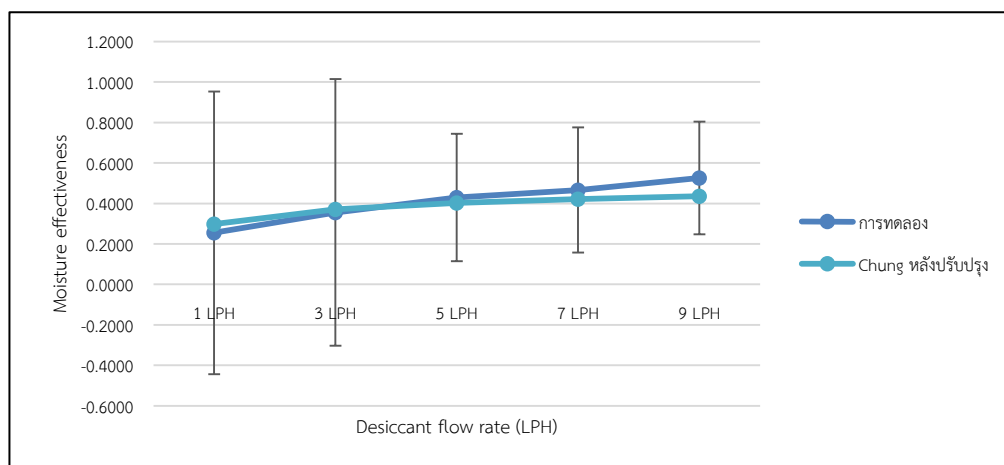
(ข)

รูปที่ 4.39 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 9 ลิตรต่อชั่วโมง

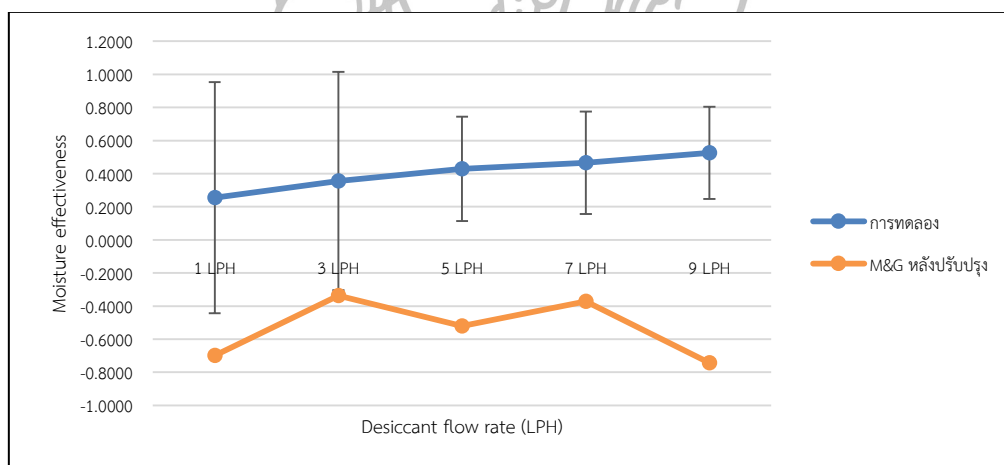
#### 4.4.2.2 ผลการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

จากรูปที่ 4.40 ถึง 4.44 แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.40(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.40(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่า

ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)

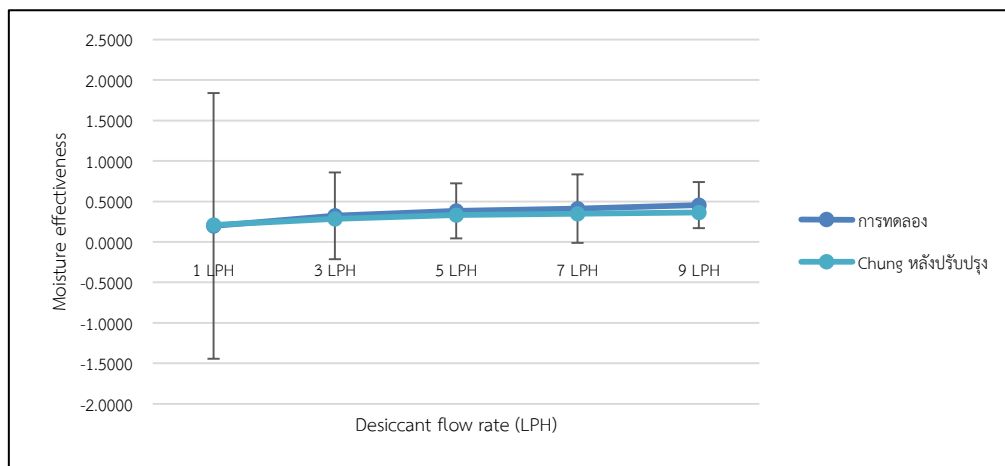


(ข)

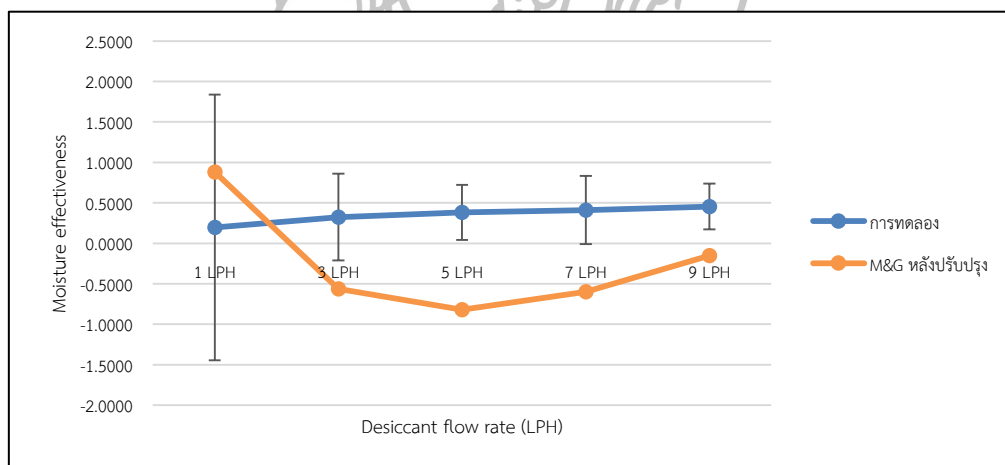
รูปที่ 4.40 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.41(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.41(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของ

อากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด



(ก)

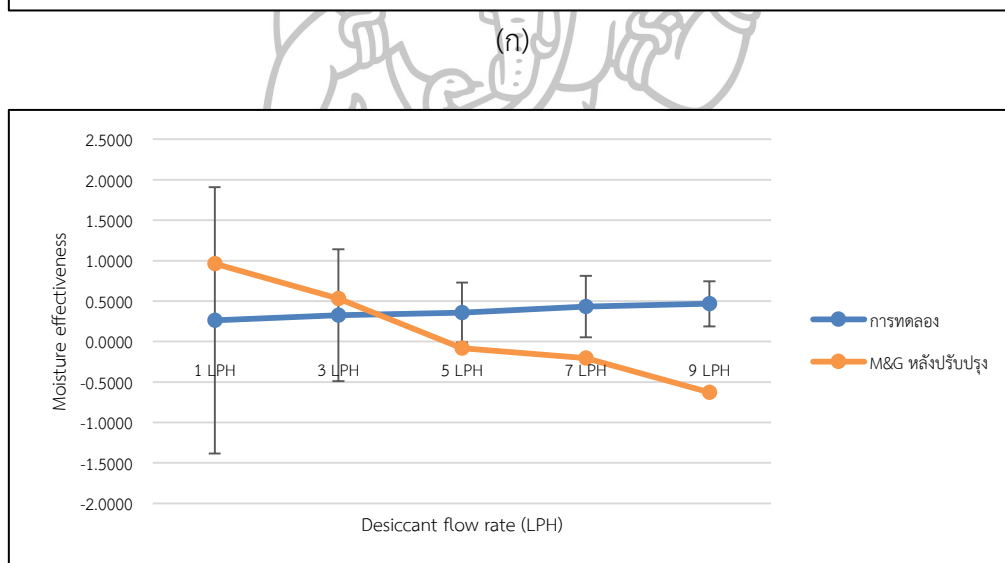
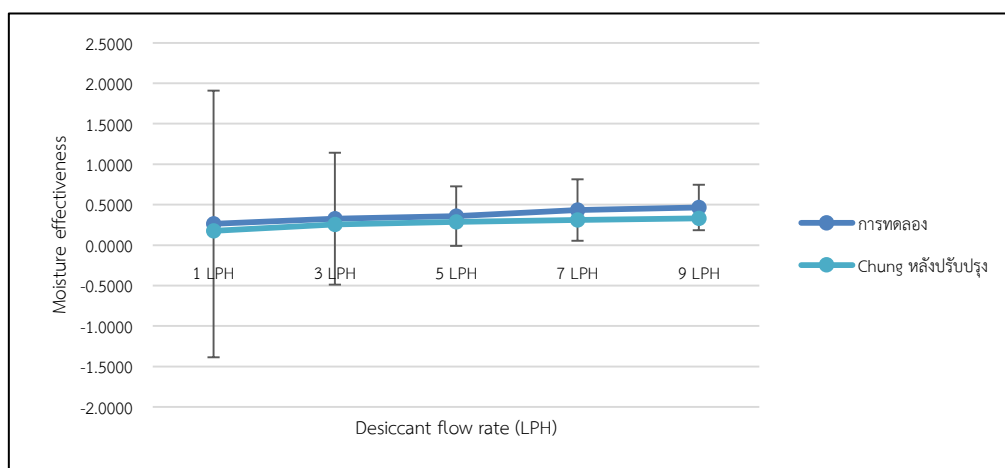


(ข)

รูปที่ 4.41 ผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.42(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.42(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของ

อากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ และมีทิศทางของผลการทำนายไม่เป็นแนวโน้มเดียวกับการทดลอง โดยค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดในช่วงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ำเท่านั้น

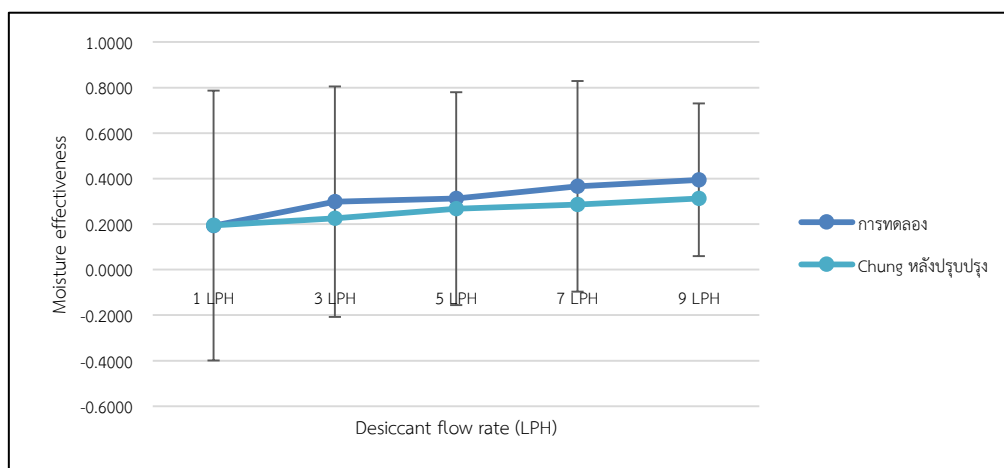


(ข)

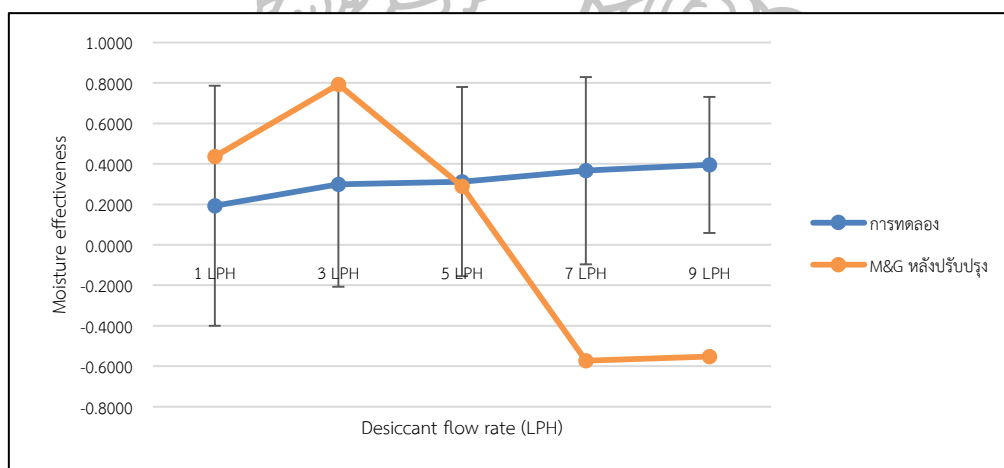
รูปที่ 4.42 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.43(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.43(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ และมีทิศทางของผลการทำนายไม่เป็นแนวโน้มเดียวกับการทดลอง โดยค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดในช่วงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ำเท่านั้น



(ก)

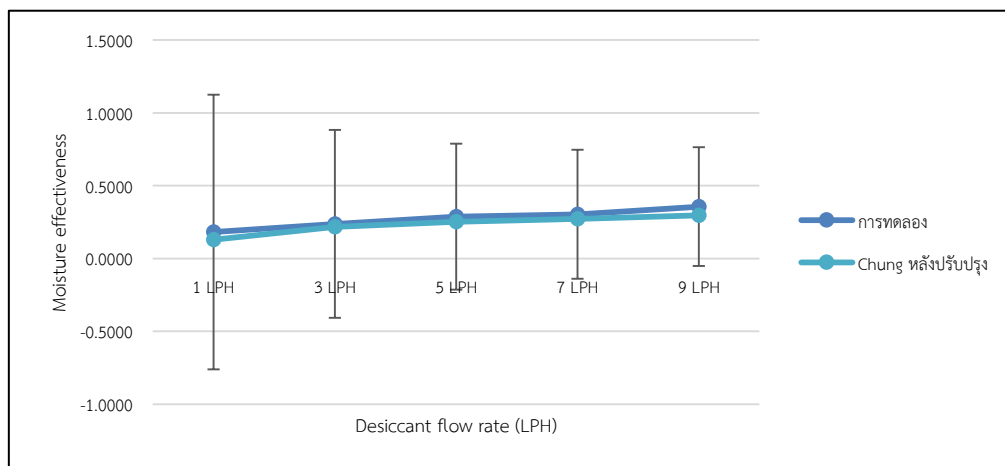


(ข)

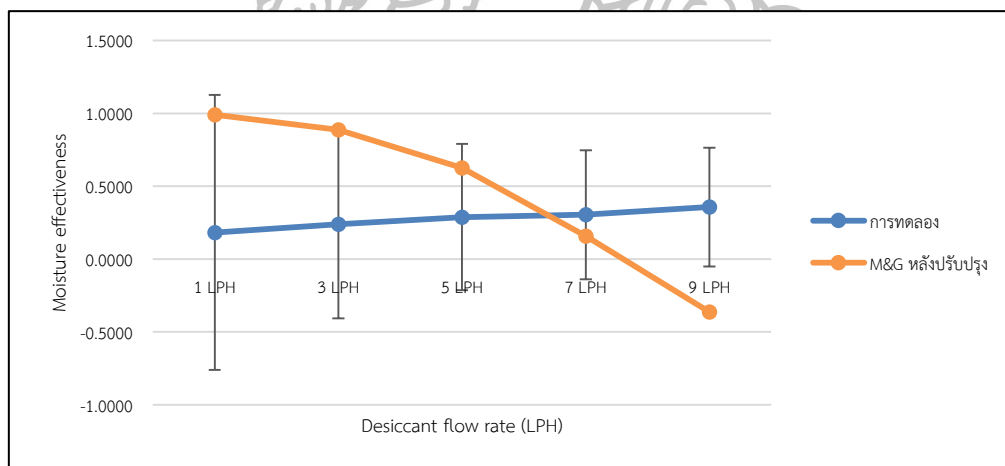
รูปที่ 4.43 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.44(ก) พบว่าการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของความคลาดเคลื่อน

ของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.44(ข) แสดงผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากงานวิจัยของ Martin and Goswami ใช้ช่วงสภาวะการทดลองที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.44 ผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

ในภาพรวมจากผลการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung และ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ พบว่าเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ จะได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น โดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด อีกทั้งค่าที่ได้จากการทำนายมี

แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองจริง โดยเมื่อพิจารณาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (MBD) ก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.5573 และ 0.1101 ตามลำดับ ส่วนหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.0582 และ 0.0116 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนลดลงอย่างชัดเจน

ส่วนเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีความแม่นยำมากขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มไปในทิศทางที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองจริง ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดเฉพาะช่วงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ำ จากการวิเคราะห์พบว่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่เท่ากับ 43.2604 และ -8.4239 ตามลำดับ และหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ค่ามีเท่ากับ 1.1753 และ 0.2335 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลดลงอย่างชัดเจน

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของผลลัพธ์เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ทั้งสอง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่

อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	อัตราการไหลของสารดูดความชื้น (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
35	1	0.691	0.0595	0.0119	0.2513	0.0501
	3	0.646	0.0739	0.0148	0.2078	0.0415
	5	0.302	0.0804	0.0161	0.2215	0.0442
	7	0.294	0.0842	0.0168	0.2364	0.0471
	9	0.259	0.0870	0.0174	0.2205	0.0437
110	1	1.636	0.0420	0.0084	0.5997	0.1183
	3	0.525	0.0571	0.0114	0.5025	0.0998
	5	0.331	0.0663	0.0132	0.5912	0.1177
	7	0.406	0.0691	0.0138	0.5734	0.1132
	9	0.271	0.0727	0.0145	0.7038	0.1392

ตารางที่ 4.7 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูความชื้น หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ (ต่อ)

อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)	อัตราการไหลของสารดูความชื้น (ลิตรต่อชั่วโมง)	ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
185	1	1.639	0.0350	0.0070	1.1765	0.2343
	3	0.806	0.0509	0.0102	1.1630	0.2293
	5	0.358	0.0572	0.0114	1.1821	0.2357
	7	0.362	0.0621	0.0124	1.0658	0.2117
	9	0.266	0.0663	0.0133	1.1834	0.2358
260	1	0.585	0.0410	0.0077	1.9830	0.3929
	3	0.496	0.0450	0.0090	1.4597	0.2884
	5	0.456	0.0536	0.0107	1.8318	0.3633
	7	0.452	0.0570	0.0114	1.7146	0.3383
	9	0.323	0.0623	0.0125	1.7950	0.3570
335	1	0.938	0.0256	0.0051	2.1512	0.4296
	3	0.637	0.0432	0.0086	2.1428	0.4279
	5	0.493	0.0503	0.0101	2.1975	0.4366
	7	0.442	0.0544	0.0109	2.2485	0.4491
	9	0.407	0.0591	0.0118	1.9787	0.3921
เฉลี่ย		0.571	0.0582	0.0116	1.1753	0.2335

#### 4.4.3 ผลการทำนายอัตราการดูความชื้นผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูความชื้นที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้ว

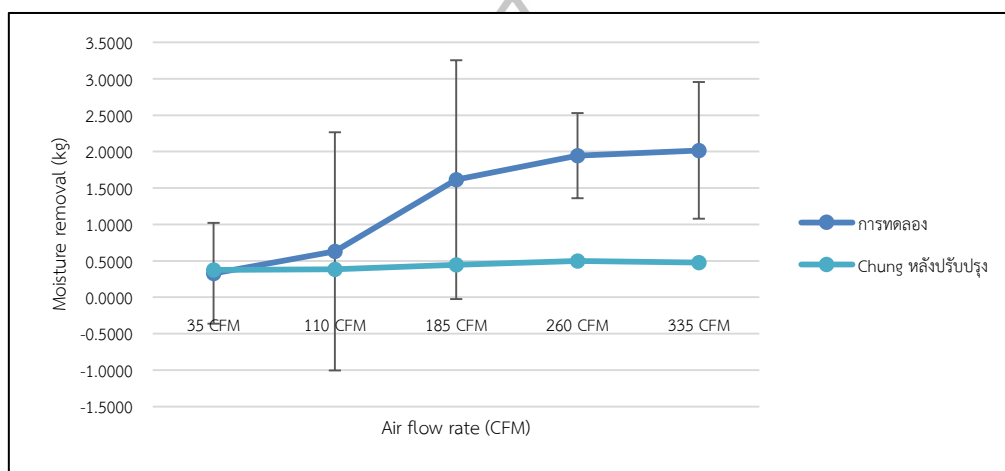
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ ของ Chung ที่ผ่านการปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วแสดงดังสมการที่ 4-12 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami ที่ผ่านการปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้ว แสดงดังสมการที่ 4-15 แบบจำลองทั้งสองได้นำมาทำนายอัตราการดูความชื้น ซึ่งผลการทำนายอัตราการดู



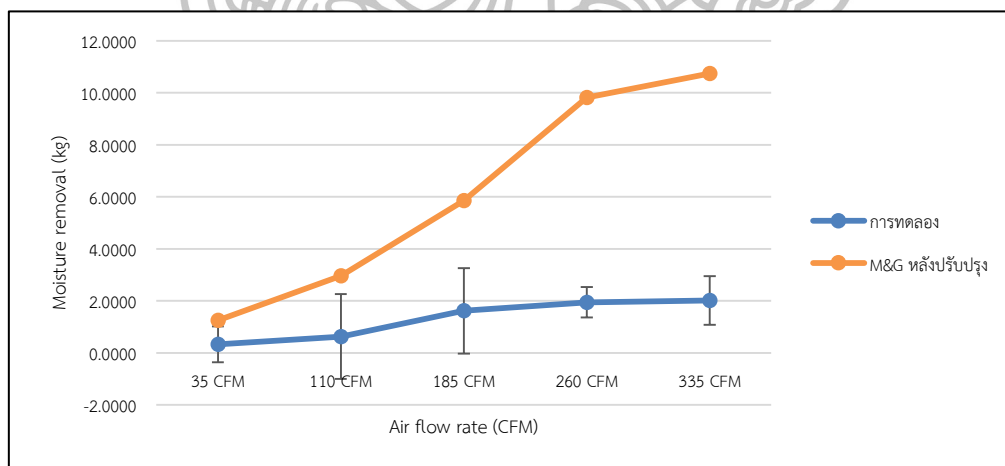
ความชื้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ และเมื่อแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น ซึ่งมีผลการทำนายมีดังนี้

#### 4.4.3.1 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศ

รูปที่ 4.45 ถึง 4.49 แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น



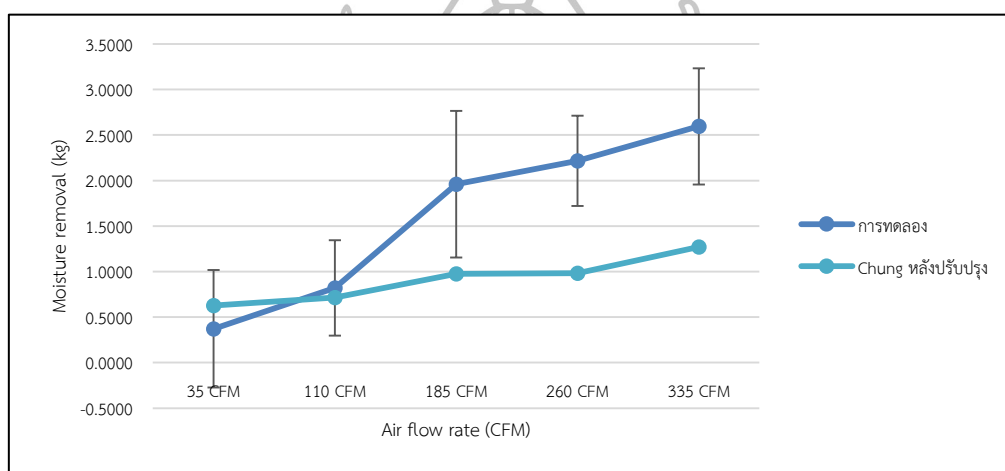
(ก)



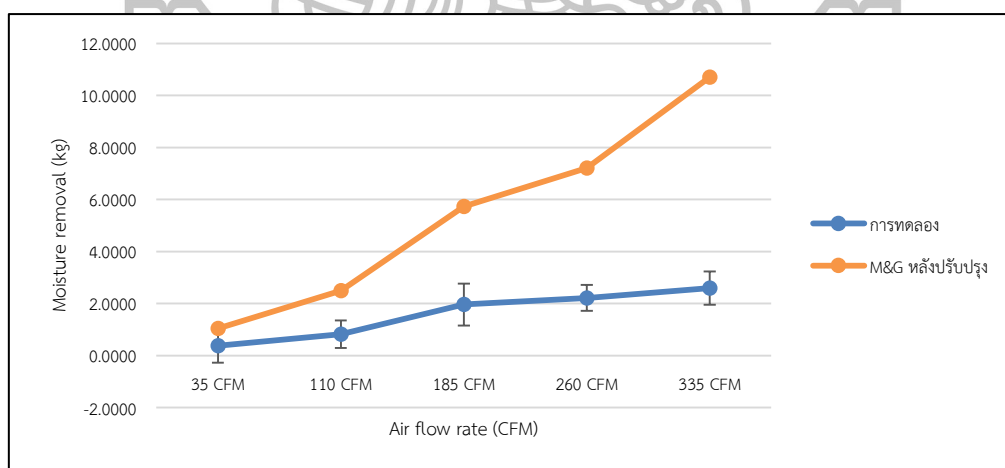
(ข)

รูปที่ 4.45 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 1 ลิตรต่ออนาที

จากรูปที่ 4.45(ก) พบว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.46(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



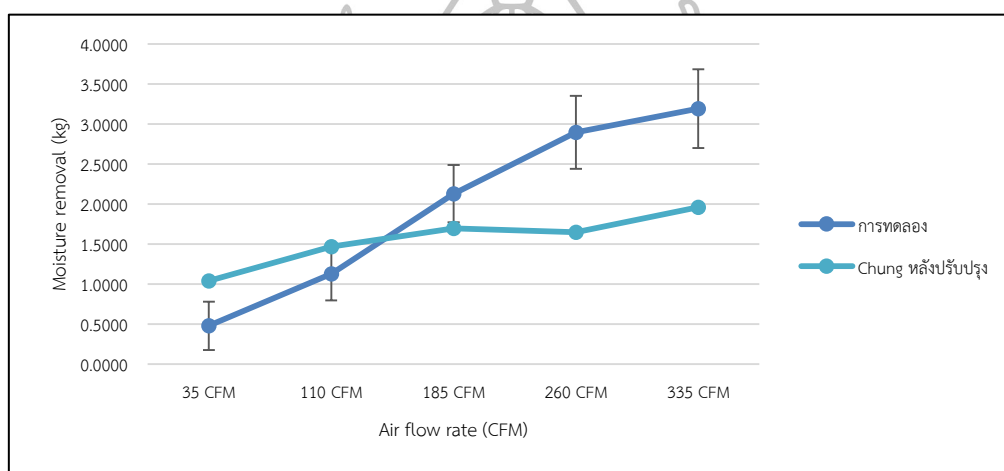
(ก)



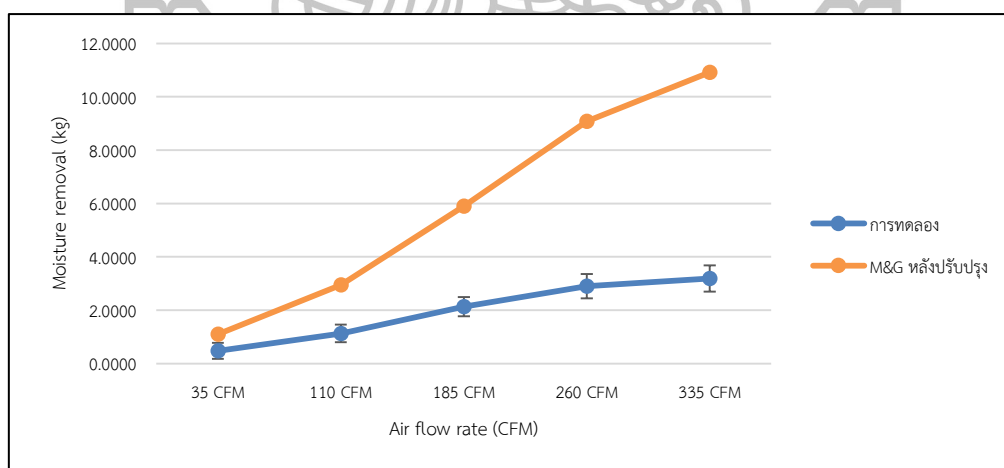
(ข)

รูปที่ 4.46 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 3 ลิตรต่ออนาที

จากรูปที่ 4.46(ก) พบว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.46(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 3 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



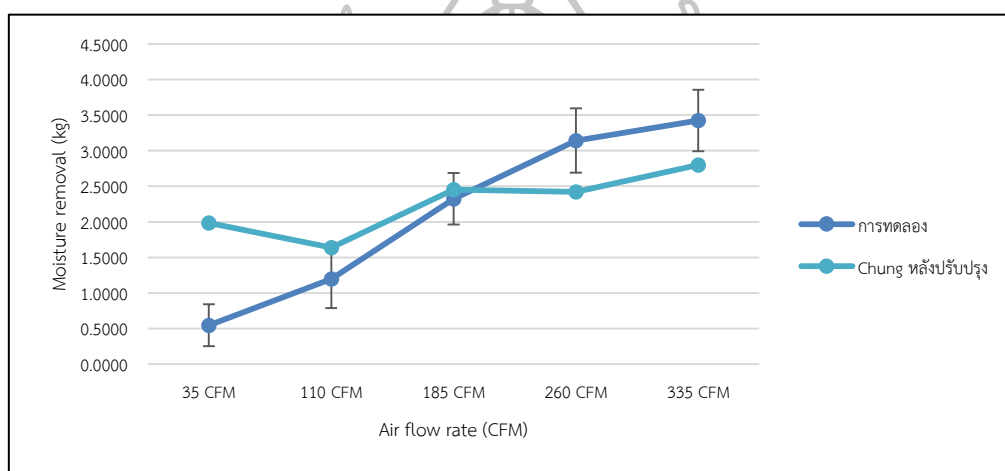
(ก)



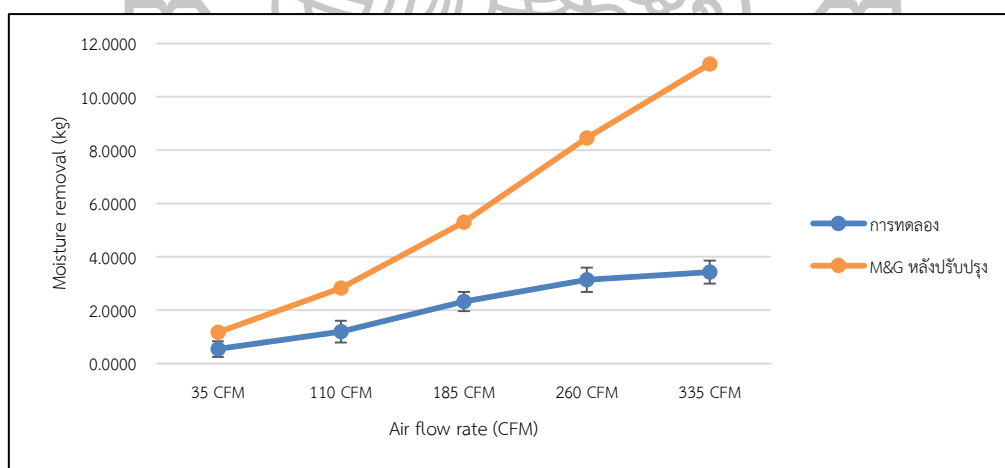
(ข)

รูปที่ 4.47 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 5 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.47(ก) พบว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.47(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 5 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



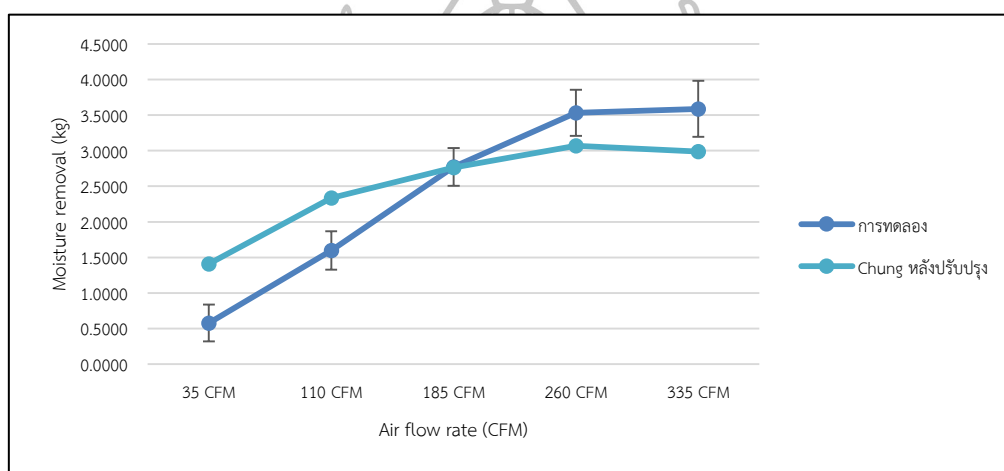
(ก)



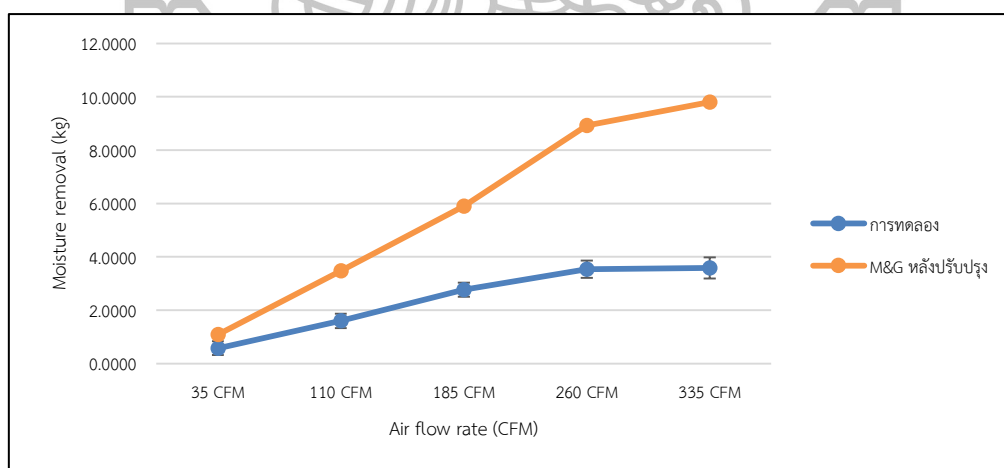
(ข)

รูปที่ 4.48 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 7 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.48(ก) การทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.48(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



(ก)



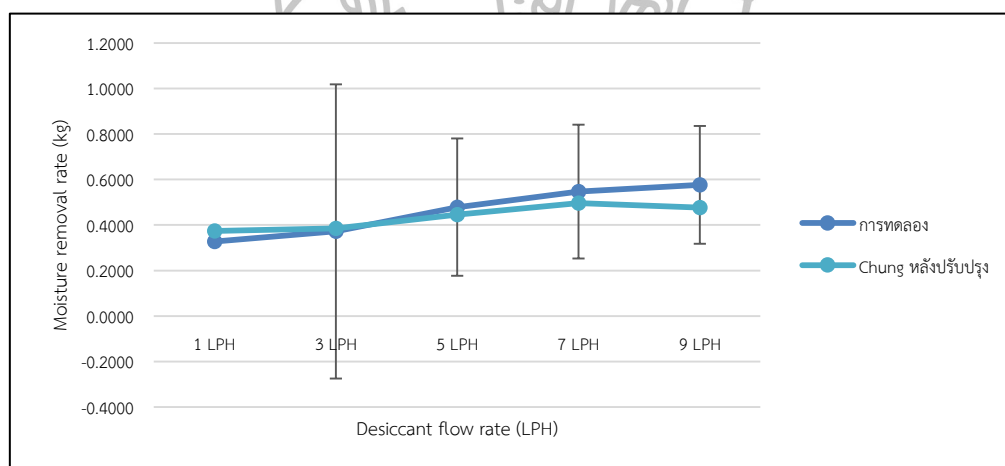
(ข)

รูปที่ 4.49 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้น 9 ลิตรต่ออนาที

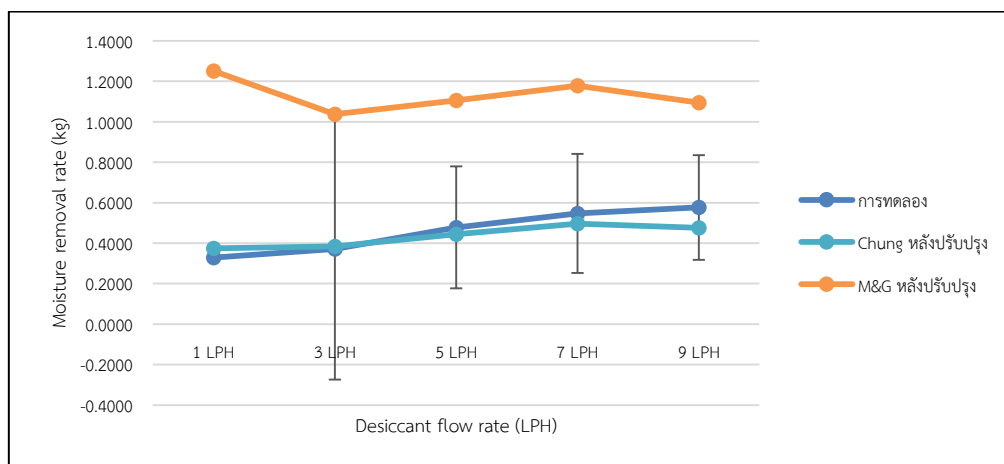
จากรูปที่ 4.49(ก) การทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.49(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่มีอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเท่ากับ 9 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย

#### 4.4.3.2 ผลจากการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้น

ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นที่ใช้แบบจำลองทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นของงานวิจัยของ Chnug และ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้นไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.50 ถึง 4.54



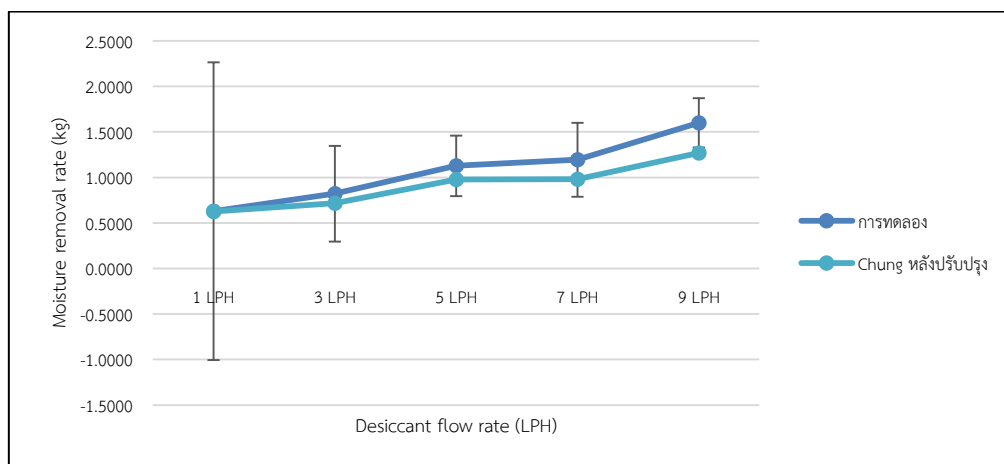
(ก)



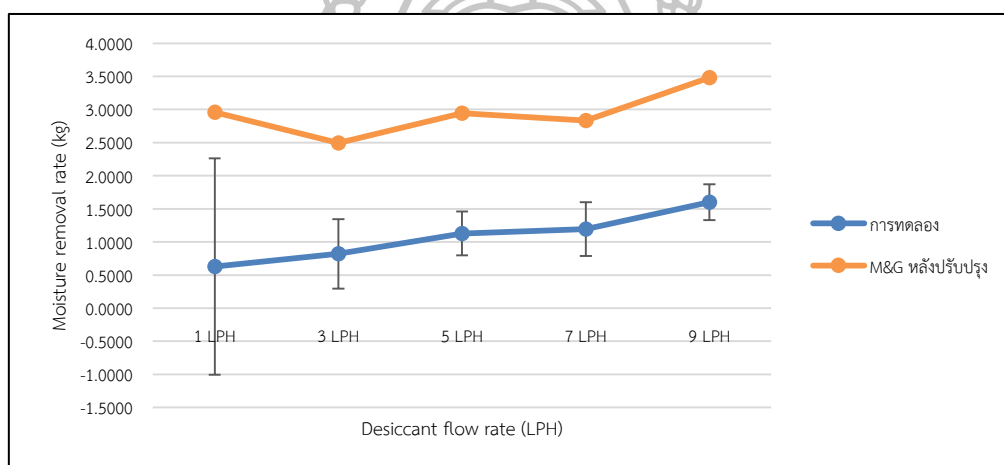
(ข)

รูปที่ 4.50 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.50(ก) ที่แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.50(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 35 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



(ก)

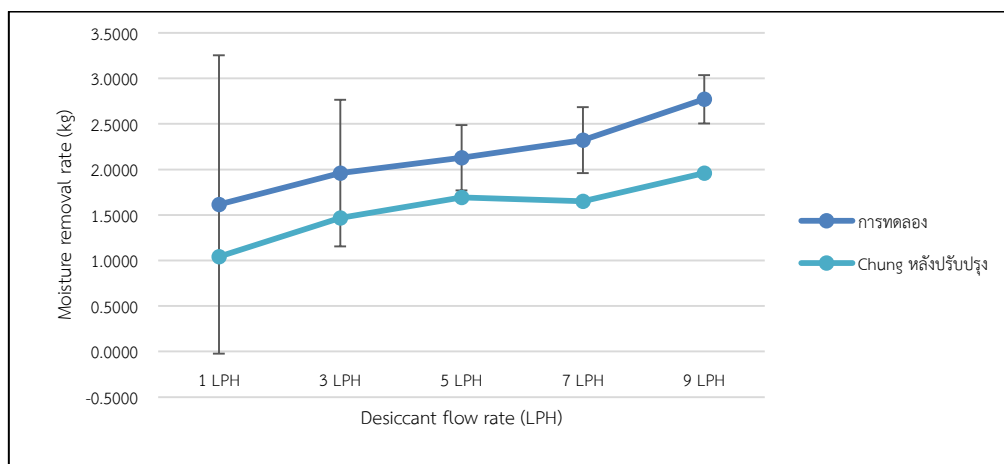


(ข)

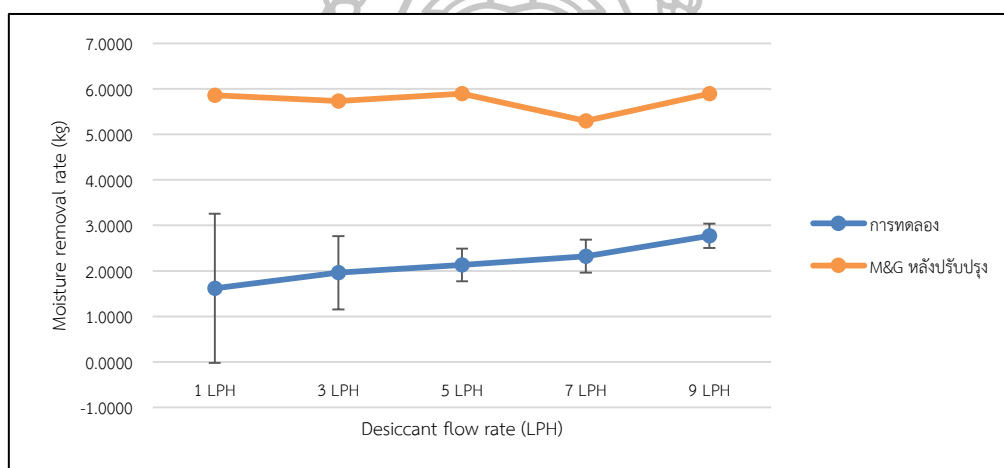
รูปที่ 4.51 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.51(ก) ที่แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.51(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย





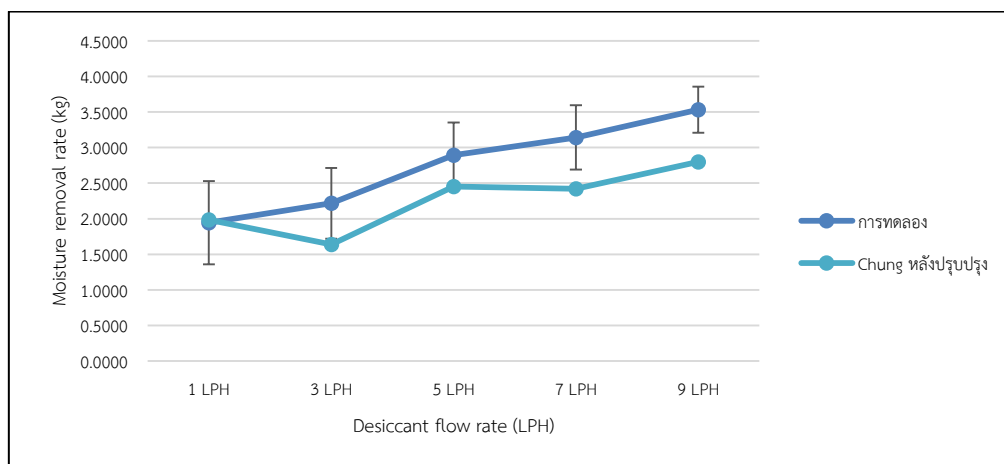
(ก)



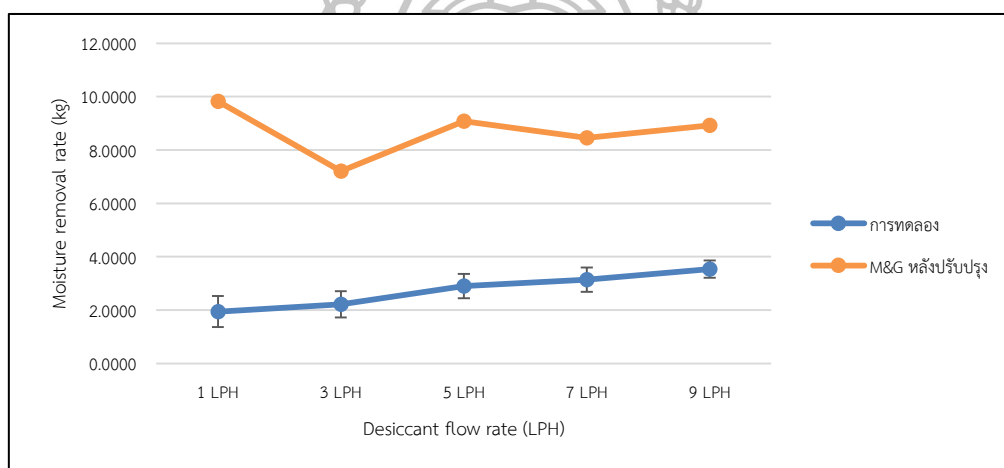
(ข)

รูปที่ 4.52 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.52(ก) ที่แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.52(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 185 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



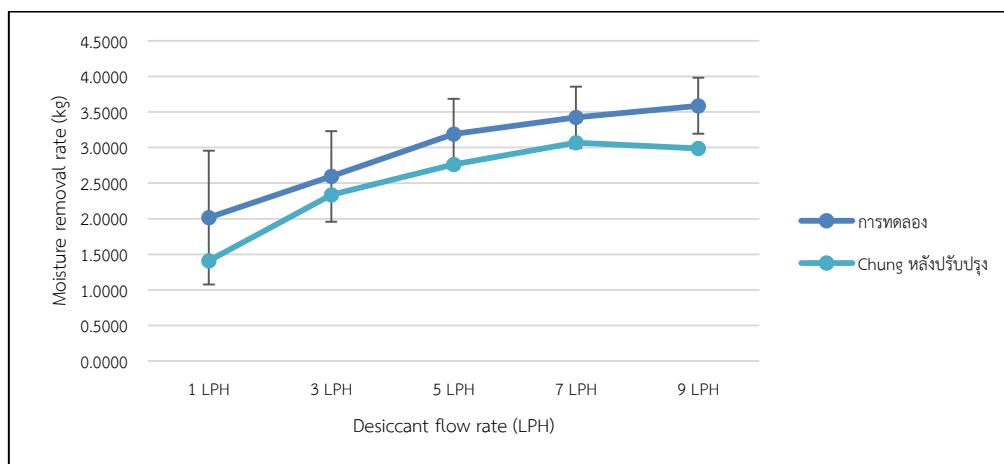
(ก)



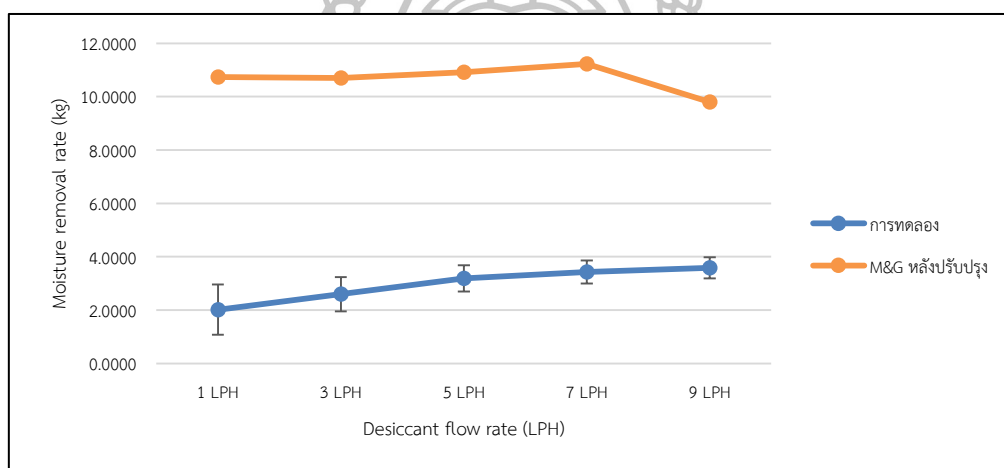
(ข)

รูปที่ 4.53 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.53(ก) ที่แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.53(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ ที่มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 260 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.54 การทำนายอัตราการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ต่ออัตราการไหลของอากาศ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากรูปที่ 4.54(ก) ที่แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสังเกตจากค่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงแถบของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด รูปที่ 4.54(ข) แสดงผลการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 335 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที พบว่าอัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่แม่นยำ เนื่องจากค่าประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดจึงส่งผลให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำด้วย

ตารางที่ 4.8 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของการทำนายอัตราการดูดความชื้นจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่

อัตราการไหล ของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุต ต่อนาที)	อัตราการไหล ของสารดูด ความชื้น (ลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าความ คลาดเคลื่อน จาก เครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
35	1	0.691	0.0750	0.0149	0.2513	0.0501
	3	0.646	0.0770	0.0154	0.2078	0.0415
	5	0.302	0.0891	0.0178	0.2215	0.0442
	7	0.294	0.0997	0.0199	0.2364	0.0471
	9	0.259	0.0960	0.0190	0.2205	0.0437
110	1	1.636	0.1261	0.0250	0.5997	0.1183
	3	0.525	0.1440	0.0286	0.5025	0.0998
	5	0.331	0.1957	0.0390	0.5912	0.1177
	7	0.406	0.1988	0.0392	0.5734	0.1132
	9	0.271	0.2564	0.0507	0.7038	0.1392
185	1	1.639	0.2085	0.0415	1.1765	0.2343
	3	0.806	0.2971	0.0586	1.1630	0.2293
	5	0.358	0.3400	0.0676	1.1821	0.2357
	7	0.362	0.3317	0.0659	1.0658	0.2117
	9	0.266	0.3929	0.0783	1.1834	0.2358
260	1	0.585	0.4369	0.0791	1.9830	0.3929
	3	0.496	0.3320	0.0654	1.4597	0.2884
	5	0.456	0.4950	0.0979	1.8318	0.3633
	7	0.452	0.4895	0.0966	1.7146	0.3383
	9	0.323	0.5625	0.1117	1.7950	0.3570

ตารางที่ 4.8 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของการทำนายอัตราการดูดความชื้นจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ (ต่อ)

อัตราการไหล ของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุต ต่อนาที)	อัตราการไหล ของสารดูด ความชื้น (ลิตรต่อ ชั่วโมง)	ค่าความ คลาดเคลื่อน จาก เครื่องมือวัด	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์			
			Chung		Martin&Goswami	
			RMSE	MBD	RMSE	MBD
335	1	0.938	0.2809	0.0560	2.1512	0.4296
	3	0.637	0.4668	0.0932	2.1428	0.4279
	5	0.493	0.5549	0.1103	2.1975	0.4366
	7	0.433	0.6135	0.1225	2.2485	0.4491
	9	0.395	0.5988	0.1194	1.9787	0.3921
เฉลี่ย		0.5599	0.3103	0.0613	1.1753	0.2335

จากผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านมาหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ โดยเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองจริง จึงส่งผลทำให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นแม่นยำด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ลดลง เท่ากับ 0.3103 และ 0.0613 ซึ่งลดลงร้อยละ 44.321 และ ร้อยละ 44.323 ตามลำดับ

ส่วนเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายจะไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด และมีแนวโน้มการทำนายแตกต่างกับผลการทดลองจริง จึงส่งผลทำให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำอีกด้วย ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 1.1753 และ 0.2335 ซึ่งลดลงร้อยละ 97.283 และร้อยละ 97.228 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แสดงผลสรุปของค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นทั้งสองหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่

จากการวิจัยครั้งนี้พบว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยทำนายผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น จากงานวิจัยของ Chung ให้ผลการทำนายอัตราการดูดความชื้นที่แม่นยำกว่าแบบจำลองจากงานวิจัยของ Martin and Goswami เนื่องจากการพัฒนาแบบจำลองของ Chung ได้มีการใช้ สารดูดความชื้นและชนิดของแพ็คเกจแบบเดียวกับงานวิจัยนี้ รวมทั้งยังให้ค่าของผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าการใช้ประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ ดังนั้นในการทดลองนำไปใช้งานจริงในหัวข้อถัดไปจึงจะนำแบบจำลองของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ไปใช้งาน

#### 4.5 ตัวอย่างการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้น

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung หลังปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วมาทดลองทำนายอัตราการดูดความชื้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น เพื่อให้สามารถกำหนดสภาวะการทำงานหรือการออกแบบของเครื่องดูดความชื้นได้อย่างเหมาะสม โดยสภาวะฐาน (Baseline condition) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความไวนี้เลือกมาจากค่ากลางของตัวแปรในการทดลองทั้งหมด ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งตัวแปรต้นที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวแปรด้านอากาศ 3 ตัว ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวแปรด้านสารดูดความชื้น 3 ตัว ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารดูดความชื้น ซึ่งตัวแปรทั้งหมดเป็นตัวแปรด้านขาเข้าเครื่องดูดความชื้น จากนั้นทำการแปรค่าตัวแปรต้นเพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 30 ทำการวิเคราะห์แนวโน้มโดยการพิจารณาเป็นเชิงเส้น และสังเกตเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น โดยพิจารณาเฉพาะขนาด

ตารางที่ 4.9 สภาวะฐานของตัวแปรต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์

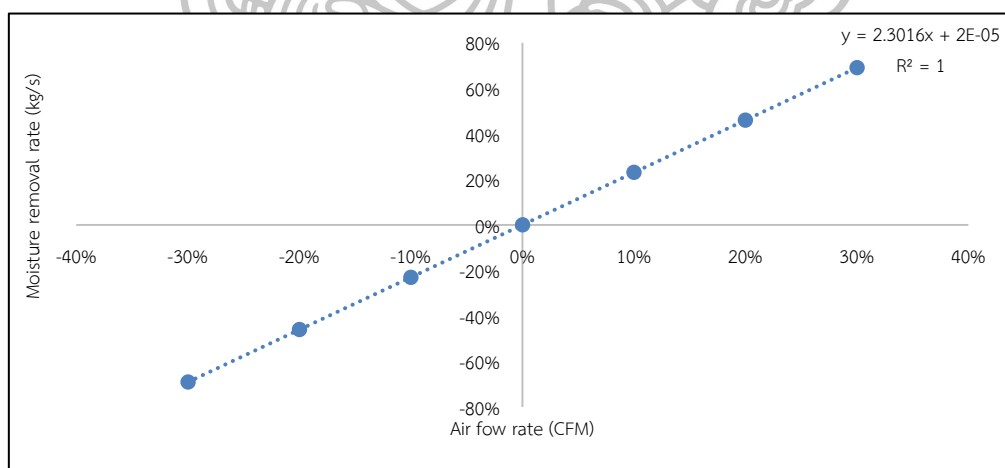
อากาศ	อัตราการไหล ( $\dot{m}_a$ )	92.5	ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที
	อุณหภูมิ ( $T_{a,in}$ )	33.7	องศาเซลเซียส
	ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	56.08	เปอร์เซ็นต์
สารดูดความชื้น	อัตราการไหล ( $\dot{m}_s$ )	0.3	ลิตรต่อชั่วโมง
	อุณหภูมิ ( $T_{s,in}$ )	35.1	องศาเซลเซียส
	ความเข้มข้น ( $\zeta$ )	32.5	เปอร์เซ็นต์

#### 4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีต่ออัตราการดูดความชื้น

ในการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีต่ออัตราการดูดความชื้นจะทำการวิเคราะห์โดยการแปรค่าตัวแปรต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 และลดลงร้อยละ 30 จากสถานะฐาน จากนั้นทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยทำนายผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิผลของกระบวนการดูดความชื้นที่ผ่านการปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้ว ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการดูดความชื้นในเชิงเส้น โดยพิจารณาเฉพาะขนาด ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ เมื่อพิจารณาตัวแปรด้านอากาศ และเมื่อพิจารณาตัวแปรด้านสารดูดความชื้น

##### 4.5.1.1 ผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีต่ออัตราการดูดความชื้น เมื่อพิจารณาตัวแปรด้านอากาศ

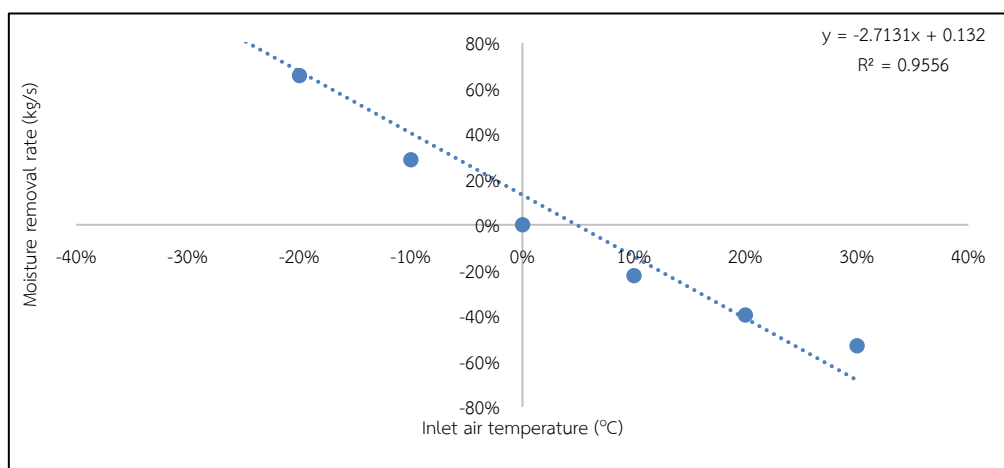
ผลการวิเคราะห์ความไวของของตัวแปรต้นด้านอากาศที่ผลต่ออัตราการดูดความชื้นแสดงดังรูปที่ 4.55 ถึง 4.57 โดยได้มีการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นและลดลงจากสถานะฐานของตัวแปร (92.5 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) ร้อยละ 30 รูปที่ 4.55 เป็นการวิเคราะห์ความไวของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการดูดความชื้น พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณความชื้นเข้าสู่ระบบ และเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอน้ำและสารดูดความชื้น [15, 32, 41, 42, 46, 49, 54, 57, 58] โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ |2.30 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.55 การวิเคราะห์ความไวของอัตราการไหลอากาศต่ออัตราการดูดความชื้น

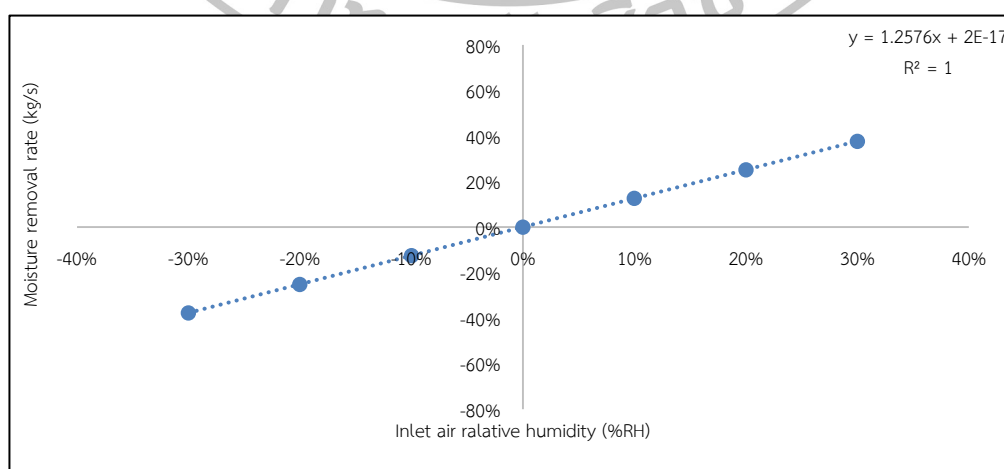
รูปที่ 4.56 แสดงการวิเคราะห์ความไวของอุณหภูมิอากาศต่ออัตราการดูดความชื้น โดยทำการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นและลดลงจากสถานะฐานของตัวแปร (33.7 องศาเซลเซียส) ร้อยละ 30 พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องดูดความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะลดลง

เนื่องจากความร้อนของอากาศถูกถ่ายเทไปยังสารดูดความชื้น ทำให้ความดันไอลอยยที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น และแรงขับเคลื่อนในการดูดความชื้นลดลง [27, 29, 41, 46] โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ  $|-2.7131$  เปอร์เซ็นต์ ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.56 การวิเคราะห์ความไวของอุณหภูมิอากาศต่ออัตราการดูดความชื้น

รูปที่ 4.57 แสดงการวิเคราะห์ความไวของความชื้นสัมพัทธ์อากาศ โดยทำการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ร้อยละ 56.08) เพิ่มขึ้นและลดลงจากสภาวะฐานของตัวแปรร้อยละ 30 พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าเครื่องดูดความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความชื้นเข้าสู่ระบบมากขึ้น ความดันไอลอยยของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างอากาศและสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น [15, 29, 32, 41, 46, 49, 58] โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ  $|1.2576$  เปอร์เซ็นต์ ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์



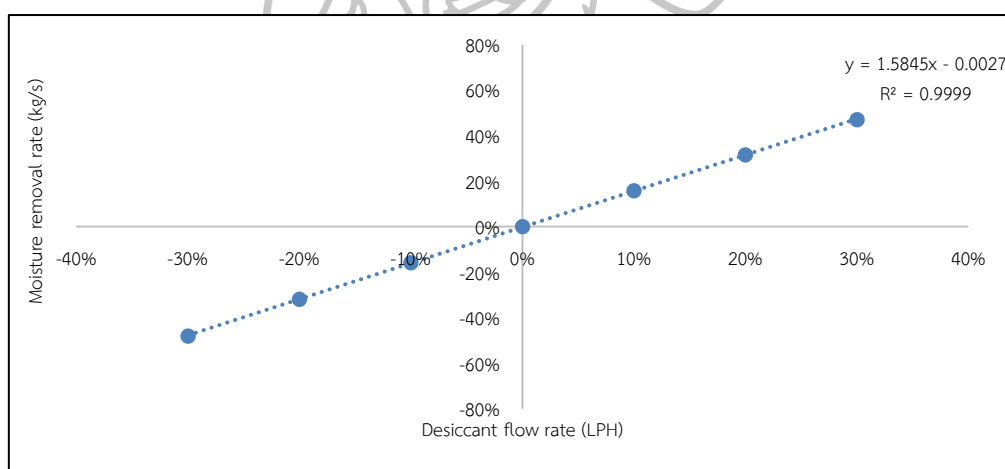
รูปที่ 4.57 การวิเคราะห์ความไวของความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ออัตราการดูดความชื้น



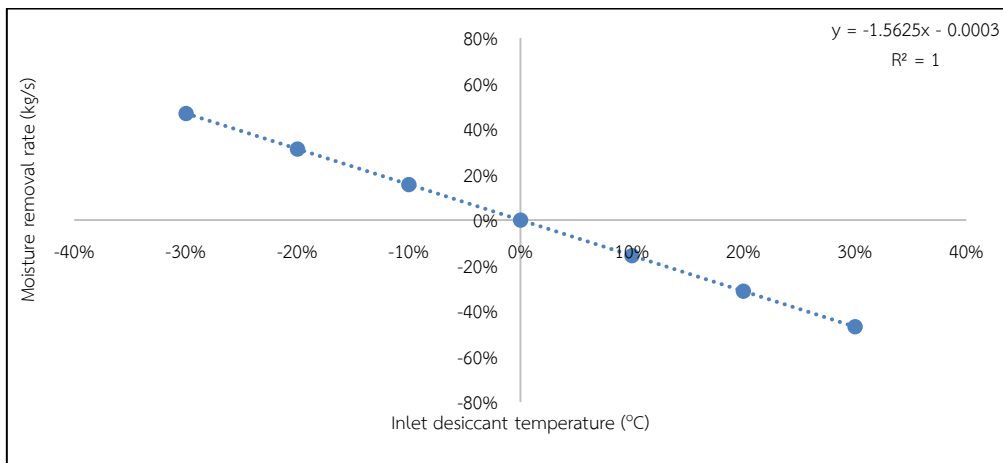
#### 4.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่ต่ออัตราการดูดความชื้น เมื่อพิจารณาตัวแปรด้านสารดูดความชื้น

ผลการวิเคราะห์ความไวของของตัวแปรต้นด้านสารดูดความชื้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น แสดงดังรูปที่ 4.58 ถึง 4.60 โดยได้มีการแปรค่าอัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นและลดลงจากสภาวะฐานของตัวแปร (0.3 ลิตรต่อชั่วโมง) ร้อยละ 30 ดังรูปที่ 4.58 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารดูดความชื้น และอัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างอากาศกับสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น [22, 29, 32, 33, 41, 46, 49, 53] โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ |1.5845 เปอร์เซ็นต์| ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.59 แสดงผลการวิเคราะห์ความไวของอุณหภูมิของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น โดยได้มีการแปรค่าอุณหภูมิของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นและลดลงจากสภาวะฐานของตัวแปร (35.1 องศาเซลเซียส) ร้อยละ 30 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารดูดความชื้นที่เข้าเครื่องดูดความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะลดลง เนื่องจากความดันไอที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทไอน้ำสู่สารดูดความชื้นลดลง [46, 49, 53] โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ |-1.5625 เปอร์เซ็นต์| ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์

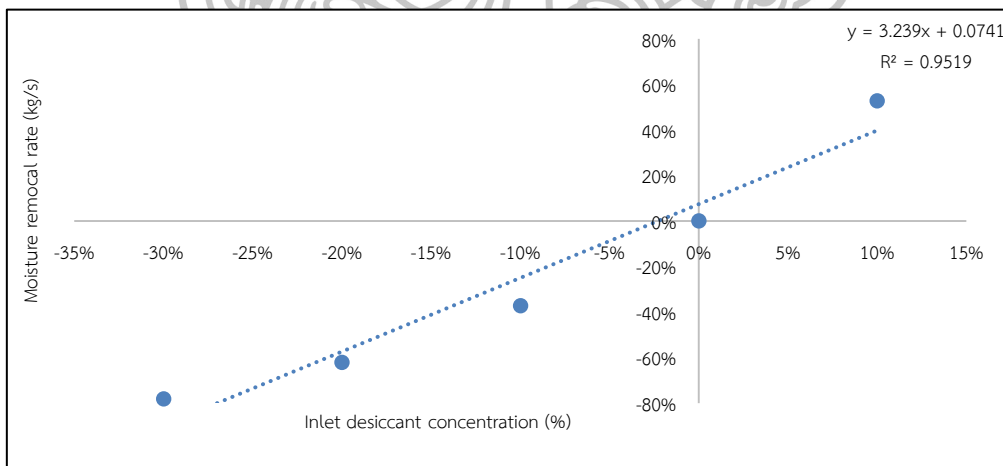


รูปที่ 4.58 การวิเคราะห์ความไวของอัตราการไหลของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น



รูปที่ 4.59 การวิเคราะห์ความไวของอุณหภูมิของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น

จากรูปที่ 4.60 แสดงผลการวิเคราะห์ความไวของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น โดยได้ทำการแปรค่าความเข้มข้นของสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นและลดลงจากสถานะฐานของตัวแปร (ร้อยละ 25 โดยมวล) ร้อยละ 30 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารดูดความชื้นที่เข้าเครื่องดูดความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันไอที่ผิวหน้าของสารดูดความชื้นลดลง ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลระหว่างสารดูดความชื้นและอากาศเพิ่มขึ้น [27, 29, 32, 40, 41, 46, 53, 56] โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ |3.239 เปอร์เซ็นต์| ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.60 การวิเคราะห์ความไวของความเข้มข้นของสารดูดความชื้นต่ออัตราการดูดความชื้น

#### 4.5.1.3 สรุปภาพรวม

การทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยทำนายผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น โดยไม่มีการปรับปรุงชุดค่าคงที่จะทำให้การทำนายอัตราการดูดความชื้นไม่แม่นยำ เนื่องจากแบบจำลองของงานวิจัยที่ผ่านมาั้นเหมาะสมเฉพาะช่วงการทำงานของงานวิจัยที่ใช้พัฒนาแบบจำลองนั้นขึ้นมา ดังนั้นจึงควรปรับปรุงชุดค่าคงที่ก่อนใช้งาน ซึ่งพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami เนื่องจากงานวิจัยของ Chung เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการใช้สารดูดความชื้น และลักษณะของเครื่องเช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ แต่ถ้าจะไม่ปรับปรุงชุดค่าคงที่ก็ควรกำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ซึ่งให้ผลลัพธ์ดีกว่านำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้ปรับปรุงชุดค่าคงที่มาใช้งาน

เมื่อทดลองนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วมาใช้งานจริง คือการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น เพื่อวิเคราะห์ว่าในการออกแบบหรือควบคุมการทำงานควรเน้นพิจารณาที่ตัวแปรใดมากน้อยกว่ากัน พบว่า ความเข้มข้นของสารดูดความชื้นมีความไวมากที่สุด คือ มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น  $|3.239\%|:1\%$  รองลงมา คือ อุณหภูมิของอากาศ  $(|-2.713\%|:1\%)$  อัตราการไหลของอากาศ  $(|2.302\%|:1\%)$  อัตราการไหลของสารดูดความชื้น  $(|-1.585\%|:1\%)$  อุณหภูมิของสารดูดความชื้น  $(|-1.563\%|:1\%)$  และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ  $(|1.258\%|:1\%)$  ตามลำดับ แต่ตัวแปรด้านอากาศเป็นสภาวะอากาศจริงจึงไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญแก่ตัวแปรด้านสารดูดความชื้นมากกว่า



## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น เพื่อนำมาใช้ทำนายอัตราการดูดความชื้น เนื่องจากอัตราการดูดความชื้นเป็นสมรรถนะหลักของกระบวนการดูดความชื้น ดังนั้นการมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงชุดค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา 2 งาน คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Martin and Goswami และนำมาทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยสามารถแยกเป็น 3 กรณี คือ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ การกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ อีกทั้งได้ยกตัวอย่างการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้งานจริง คือ การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น โดยตัวแปรต้นที่ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ ตัวแปรด้านอากาศ และตัวแปรด้านสารดูดความชื้น โดยทั้งหมดสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

### 5.1 การทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Chung และ Martin and Goswami ดังสมการที่ 2-38 และ 2-39 เมื่อนำมาทำนายอัตราการดูดความชื้นพบว่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการทำนายอัตราการดูดความชื้นของงานวิจัย Chung มีค่าเท่ากับ 0.5573 และ 0.1101 ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองในงานวิจัยของ Martin and Goswami มีค่าเท่ากับ 43.260 และ -8.424 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด โดยค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดเท่ากับ 0.5599 ซึ่งหมายความว่า แบบจำลองทั้งสองนั้นทำนายได้ไม่แม่นยำ

กรณีที่กำหนดให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.34294 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้นมีความแม่นยำ โดยพบว่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 0.6076 และ 0.0931 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการสมมติ

ให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นเป็นค่าคงที่สามารถทำได้ เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5599

กรณีที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นให้รองรับกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังสมการที่ 5-1 และ 5-2 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองของงานวิจัยของ Chung เท่ากับ 0.3103 และ 0.0613 ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ Martin and Goswami มีค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองเท่ากับ 1.1753 และ 0.2335 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองลดลงจากก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่อย่างชัดเจน อีกทั้งพบว่าเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่จากงานวิจัยของ Chung ค่าที่ได้จากการทำนายอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่ของงานวิจัย Martin and Goswami จะให้ค่าที่ได้จากการทำนายไม่อยู่ในช่วงของเครื่องมือวัด เนื่องจากการงานวิจัยของ Chung ได้ใช้ชนิดของสารดูดความชื้นและแพ็คเกจเดียวกับงานวิจัยนี้ จึงทำให้สามารถทำนายได้แม่นยำกว่างานวิจัยของ Martin and Goswami

$$\alpha_{ab} = \left\{ 1 - \frac{6.83693 \left( \frac{G_{a,in}}{G_{s,in}} \right)^{0.09679} \exp \left[ 0.148 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{aZ^{0.51555} x^{0.00632}} \right\} / \left\{ 1 - \frac{0.00008 \exp \left[ 5.07442 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{x^{2.60698}} \right\} \quad (5-1)$$

$$\alpha_{ab} = 1 - C_1 \left( \frac{G_{s,in}}{G_{a,in}} \right)^x \left( \frac{h_{a,in}}{h_{s,in}} \right)^y (aZ)^z \quad (5-2)$$

โดยที่

$$x = k_1 \frac{y_s}{y_o} + m_1$$

$$z = k_2 \frac{y_s}{y_o} + m_2$$

ค่าคงที่ในสมการ คือ

$$C_1 = -0.13624 \quad y = -4.09990$$

$$k_1 = -0.72853 \quad m_1 = 0.13956$$

$$K_2 = -0.38062 \quad m_2 = -0.62316$$

ตารางที่ 5.1 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MBD) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น

ค่าความคลาดเคลื่อน	ทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น				ทำนายอัตราการดูดความชื้น				ประสิทธิภาพเป็นค่าคงที่
	Chung		Martin and Goswami		Chung		Martin and Goswami		
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	
RMSE	0.5573	0.0582	43.2604	1.1753	0.5573	0.3103	43.2604	1.1753	0.6076
MBD	0.1101	0.0116	-8.4239	0.2335	0.1101	0.0613	-8.4239	0.2335	0.0931

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการทำนายอัตราการดูดความชื้นโดยทำนายผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น ควรที่จะปรับปรุงชุดค่าคงที่ที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเสียก่อน แต่ถ้าไม่ปรับปรุงชุดค่าคงที่ก็สามารถกำหนดให้ประสิทธิภาพเป็นค่าคงที่ในการทำนายอัตราการดูดความชื้นได้

## 5.2 การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของการดูดความชื้นมาใช้งานจริง

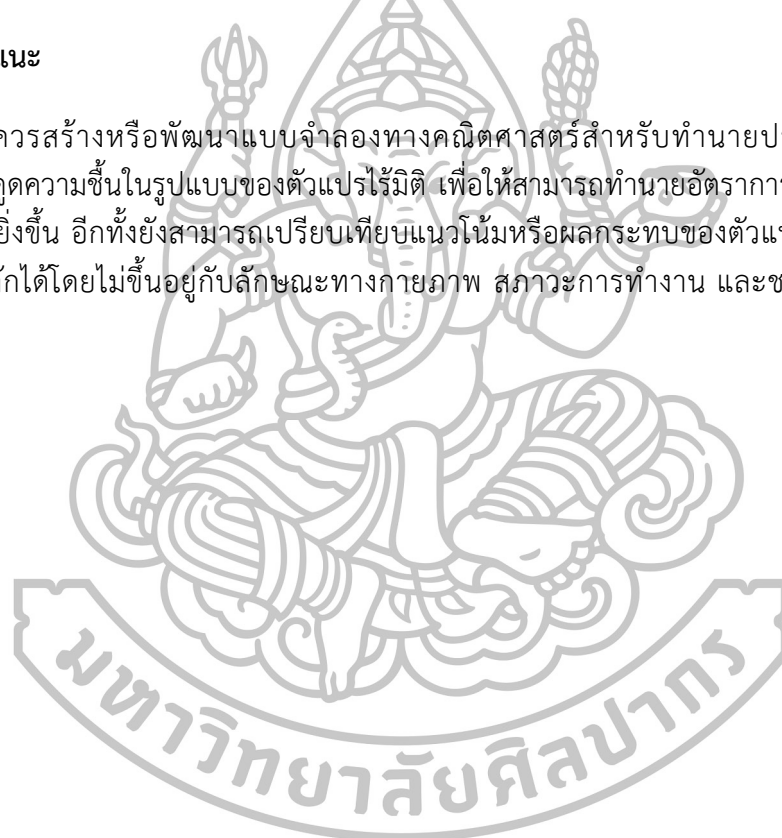
การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นมาใช้งานจริงในงานวิจัยนี้ คือ การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรที่มีต่ออัตราการดูดความชื้น เพื่อให้สามารถกำหนดหรือออกแบบสภาวะการทำงานและลักษณะของเครื่องดูดความชื้นได้อย่างเหมาะสม โดยตัวแปรต้นที่พิจารณาจะเป็นตัวแปรด้านขาเข้าเครื่องดูดความชื้น คือ ตัวแปรด้านอากาศ ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตัวแปรด้านสารดูดความชื้น ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้น ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.2 โดยจะพิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้น พบว่าความเข้มข้นของสารดูดความชื้นมีความไวมากที่สุด คือ มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น  $|3.239\%|:1\%$  รองลงมา คือ อุณหภูมิของอากาศ  $|(-2.713\%|:1\%)$  อัตราการไหลของอากาศ  $|2.302\%|:1\%$  อัตราการไหลของสารดูดความชื้น  $|1.585\%|:1\%$  อุณหภูมิของสารดูดความชื้น  $|(-1.563\%|:1\%)$  และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ  $|1.258\%|:1\%$  ตามลำดับ แต่เนื่องจากตัวแปรด้านอากาศเป็นสภาวะอากาศจริงที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงควรให้ความสำคัญแก่ตัวแปรด้านสารดูดความชื้น ได้แก่ ความเข้มข้น อัตราการไหล และอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นเท่ากับ  $|3.239\%|:1\%$ ,  $|1.585\%|:1\%$  และ  $|(-1.563\%|:1\%)$  ซึ่งพิจารณาเฉพาะขนาด ตามลำดับ เพื่อให้สามารถออกแบบหรือควบคุมการทำงานของเครื่องดูดความชื้นได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีต่ออัตราการดูดความชื้น

ตัวแปรต้น	ความไว (Sensitivity)
1. ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น	3.239% :1%
2. อุณหภูมิของอากาศ	-2.713% :1%
3. อัตราการไหลของอากาศ	2.302% :1%
4. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	1.257% :1%
5. อุณหภูมิของสารดูดความชื้น	-1.563% :1%
6. อัตราการไหลของสารดูดความชื้น	0.999% :1%

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรสร้างหรือพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ เพื่อให้สามารถทำนายอัตราการดูดความชื้นได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถเปรียบเทียบแนวโน้มหรือผลกระทบของตัวแปรต้นที่มีผลต่อสมรรถนะหลักได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ สภาพะการทำงาน และชนิดของสารดูดความชื้น



### รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศ. (2558), “สถานการณ์การใช้น้ำมันและไฟฟ้าของไทยปี 2558.” สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน.
- [2] S. Chirattananon. (2005). **Building for Energy Efficiency**. Thailand: Asian Institute of Technology.
- [3] กรมอุตุนิยมวิทยา กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, **สถิติกรมอุตุนิยมวิทยา ปี 2557 สำนักงานสถิติแห่งชาติ**. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน . เข้าถึงได้จาก [https://www.m-society.go.th/ewt\\_news.php?nid=14571](https://www.m-society.go.th/ewt_news.php?nid=14571)
- [4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2010). **ASHRAE Standard 55-2010 Thermal environmental conditions for human occupancy**.
- [5] M. B. J. and T. Katejanekarn. (2004). “Dehumidification Characteristics of Commercial Building Applications.” **Academic Journal**, 110.
- [6] L. Mei and Y. J. Dai. (2008). “A technical review on use of liquid-desiccant dehumidification for air-conditioning application.” **Renewable and Sustainable Energy Review**, 12: 662–689.
- [7] M.-H. Kim, J.-S. Park, and J.-W. Jeong. (2013). “Energy saving potential of liquid desiccant in evaporative-cooling-assisted 100% outdoor air system.” **Energy**, 59: 726–736.
- [8] J. Ling, Y. Hwang, and R. Radermacher. (2010). “Theoretical study on separate sensible and latent cooling air-conditioning system.” **International Journal of Refrigeration**, 33: 510–520.
- [9] X. Han and X. Zhang. (2011) “Experimental study on a residential temperature–humidity separate control air-conditioner.” **Energy Building**, 43: 3584–3591.
- [10] J. L. Niu, L. Z. Zhang, and H. G. Zuo. (2002). “Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates.” **Energy Building**, 34: 487–495.
- [11] T. Katejanekarn. (2010). "A liquid desiccant air conditioning system for buildings in hot and humid climates, Ph.D. dissertation, Asian Institute of Tehnology." School of Environmental, Resources, and Development, Asian Institute of Tehnology.



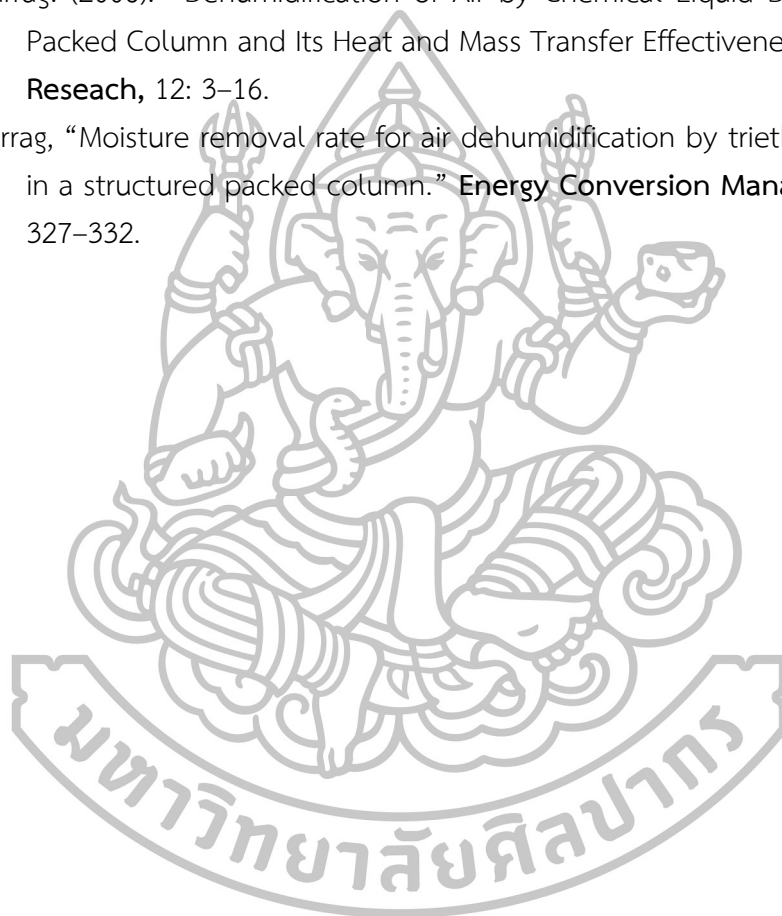
- [12] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2013) "2013 ASHRAE Handbook-Fundamentals."
- [13] Dow Chemical company. (2003). "Calcium Chloride Handbook." Michigan.
- [14] T. Katejanekarn, S. Chirattananon, and S. Kumar. (2009). "An experimental study of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system." **Solar Energy**, 83: 920–933.
- [15] V. Öberg and D. Y. Goswami. (1998). "Experimental Study of the Heat and Mass Transfer in a Packed Bed Liquid Desiccant Air Dehumidifier." **Journal of Solar Energy Engineering**, 120: 289–297.
- [16] P. Gandhidasan. (2004). "A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant." **Solar Energy**, 76: 409–416.
- [17] T. Katejanekarn and S. Kumar. (2008). "Performance of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system." **Energy Building**, 40: 1252–1267.
- [18] ชาญณรงค์ เปราปรำโมทย์ และจักรพันธ์ กันชนะ. (2553). "การทดสอบสมรรถนะของระบบดูดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดเหลว." *ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร.*
- [19] สมฤทัย น้อมชอบ และธนาวิทย์ สีโนทก. (2554). "การทดสอบสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการระเหยน้ำของระบบดูดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดเหลว." *ปริญญานิพนธ์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร.*
- [20] S. Alizadeh. (2008). "Performance of a solar liquid desiccant air conditioner – An experimental and theoretical approach." **Solar Energy**, 82: 563–572.
- [21] S. S. A. Lowenstein. (1993). "Advanced Commercial Liquid-Desiccant Technology Development Study," **National Renewable Energy Laboratory.**
- [22] T.-W. Chung, T. K. Ghosh, and A. L. Hines. (1993). "Dehumidification of air by aqueous Lithium Chloride in a packed column." **Separation Science and Technology**, 28: 533–550.
- [23] E. Elsarrag, E. E. M. Ali, and S. Jain. (2005). "Design guidelines and performance study on a structured packed liquid desiccant air-conditioning system." **HVACR Research**, 11: 319–337.
- [24] M. R. Ullah, C. F. Kettleborough, and P. Gandhidasan. (1988). "Effectiveness of Moisture Removal for an Adiabatic Counterflow Packed Tower Absorber Operating with  $\text{CaCl}_2$ -Air Contact System." **Journal of Solar Energy Engineering**, 110: 98–101.

- [25] T.-W. Chung. (1994). "Predictions of moisture removal efficiencies for packed-bed dehumidification systems." **Gas Separation & Purification**, 8: 265–268.
- [26] V. Martin and D. Y. Goswami. (2000). "Effectiveness of heat and mass transfer processes in a packed bed liquid desiccant dehumidifier/regenerator." **HVAC&R Researd**, 6: 21–39.
- [27] S. A. Abdul-Wahab, Y. H. Zurigat, and M. K. Abu-Arabi. (2004). "Predictions of moisture removal rate and dehumidification effectiveness for structured liquid desiccant air dehumidifier." **Energy**, 29: 19–34.
- [28] ทศพล เขตเจนการ และวทีญญ พนังนวงศ์. (2555). "ผลกระทบของตัวแปรต้นต่อสมรรถนะของกระบวนการดูดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดเหลว." เอกสารนำเสนอที่งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, จังหวัดเชียงราย.
- [29] S. Patnaik, T. G. Lenz, and G. O. G. Löf. (1990). "Performance studies for an experimental solar open-cycle liquid desiccant air dehumidification system," **Solar Energy**, 3: 123–135.
- [30] A. M. A. Kamal.N. Abdalla. (2012). "Moisture removal rate in a solar powered liquid desiccant air conditioning system." Paper presented at the The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment Official Conference Proceedings 2012, Osaka, Japan, 2012.
- [31] S. Jain and P. K. Bansal. (2007). "Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems," **International Journal of Refrigeration**, 30: 861–872.
- [32] N. Fumo and D. Y. Goswami. (2002). "Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration," **Solar Energy**, 72: 351–361.
- [33] Shyu RJ, Chen LC, and Kuo CL. (1989). "The performance of a packed bed dehumidifier for solar liquid desiccant systems." **In Proceedings of the 11th Annual ASME Solar Energy Conference**. 371–377.
- [34] S. Kavasogullari, P. Gandhidasan, A. Ertas, and E. E. Anderson. (1991). "Performance of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{LiCl}$  liquid desiccants in a dehumidifying packed tower." **ResearchGate**, 1991: 45–49.
- [35] M. Sadasivam and A. R. Balakrishnan. (1991). "Analysis of thermal effects in packed bed liquid desiccant dehumidifiers." **Chemical Engineering Processing Process: Intensification**, 30: 79–85.

- [36] T.-W. Chung and H. Wu. (2000). "Comparison between spray towers with and without fin coils for air dehumidification using Triethylene Glycol solutions and development of the mass-transfer correlations," **Industrial Engineering Chemistry Research**, 39: 2076–2084.
- [37] T.-W. Chung, T. K. Ghosh, and A. L. Hines. (1996). "Comparison between Random and Structured Packings for Dehumidification of Air by Lithium Chloride Solutions in a Packed Column and Their Heat and Mass Transfer Correlations." **Industrial Engineering Chemistry Research**, 35: 192–198.
- [38] A. M. Radhwan, H. N. Gari, and M. M. Elsayed. (1993). "Parametric study of a packed bed dehumidifier/regenerator using  $\text{CaCl}_2$  liquid desiccant." **Renewable Energy**, 3: 49–60.
- [39] X. Y. Chen, Z. Li, Y. Jiang, and K. Y. Qu. (2006). "Analytical solution of adiabatic heat and mass transfer process in packed-type liquid desiccant equipment and its application." **Solar Energy**, 80: 1509–1516.
- [40] R. Chengqin, J. Yi, and Z. Yianpin. (2006). "Simplified analysis of coupled heat and mass transfer processes in packed bed liquid desiccant-air contact system." **Solar Energy**, 80: 121–131.
- [41] C. G. Moon, P. K. Bansal, and S. Jain. (2009). "New mass transfer performance data of a cross-flow liquid desiccant dehumidification system," **International Journal of Refrigeration**, 32: 524–533.
- [42] L. Zhang, E. Hihara, F. Matsuoka, and C. Dang. (2010). "Experimental analysis of mass transfer in adiabatic structured packing dehumidifier/regenerator with liquid desiccant." **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 53: 2856–2863.
- [43] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2005). 2005 ASHRAE Handbook-Fundamental.
- [44] M. R. Conde. (2004). "Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design." **International Journal of Thermal Sciences**, 43: 367–382.
- [45] S. Jain, S. Tripathi, and R. S. Das. (2011). "Experimental performance of a liquid desiccant dehumidification system under tropical climates." **Energy Conversion Management**, 52: 2461–2466.

- [46] I. P. Koronaki, R. I. Christodoulaki, V. D. Papaefthimiou, and E. D. Rogdakis. (2013). “Thermodynamic analysis of a counter flow adiabatic dehumidifier with different liquid desiccant materials.” **Applied Thermal Engineering**, 50: 361–373.
- [47] Y. Yin, J. Qian, and X. Zhang. (2014). “Recent advancements in liquid desiccant dehumidification technology.” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 31: 38–52.
- [48] M. M. Bassuoni. (2014). “A simple analytical method to estimate all exit parameters of a cross-flow air dehumidifier using liquid desiccant.” **Journal of Advanced Research**, 5: 175–182.
- [49] X. H. Liu, Y. Zhang, K. Y. Qu, and Y. Jiang. (2006). “Experimental study on mass transfer performances of cross flow dehumidifier using liquid desiccant.” **Energy Conversion Management**, 47: 2682–2692.
- [50] M. A. Rady, A. S. Huzayyin, E. Arquis, P. Monneyron, C. Lebot, and E. Palomo. (2009). “Study of heat and mass transfer in a dehumidifying desiccant bed with macro-encapsulated phase change materials.” **Renewable Energy**, 34: 718–726.
- [51] X. H. Liu, K. Y. Qu, and Y. Jiang. (2006). “Empirical correlations to predict the performance of the dehumidifier using liquid desiccant in heat and mass transfer.” **Renewable Energy**, 31: 1627–1639.
- [52] S. A. Abdul-Wahab, M. K. Abu-Arabi, and Y. H. Zurigat. (2004). “Effect of structured packing density on performance of air dehumidifier.” **Energy Conversion Management**, 45: 2539–2552.
- [53] X. H. Liu, Y. Jiang, and K. Y. Qu. (2007). “Heat and mass transfer model of cross flow liquid desiccant air dehumidifier/regenerator.” **Energy Conversion Management**, 48: 546–554.
- [54] M. M. Bassuoni. (2011). “An experimental study of structured packing dehumidifier/regenerator operating with liquid desiccant.” **Energy**, 36: 2628–2638.
- [55] Y. Yin, X. Zhang, and Z. Chen. (2007). “Experimental study on dehumidifier and regenerator of liquid desiccant cooling air conditioning system.” **Building and Environment**, 42: 2505–2511.

- [56] C. Q. Ren. (2008). "Effectiveness–NTU relation for packed bed liquid desiccant–air contact systems with a double film model for heat and mass transfer." **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 51: 1793–1803.
- [57] Y. H. Zurigat, M. K. Abu-Arabi, and S. A. Abdul-Wahab. (2004). "Air dehumidification by triethylene glycol desiccant in a packed column." **Energy Conversion Management**, 45: 141–155.
- [58] E. Elsarrag. (2006). "Dehumidification of Air by Chemical Liquid Desiccant in a Packed Column and Its Heat and Mass Transfer Effectiveness." **HVAC&R Research**, 12: 3–16.
- [59] E. Elsarrag, "Moisture removal rate for air dehumidification by triethylene glycol in a structured packed column." **Energy Conversion Management**, 48: 327–332.





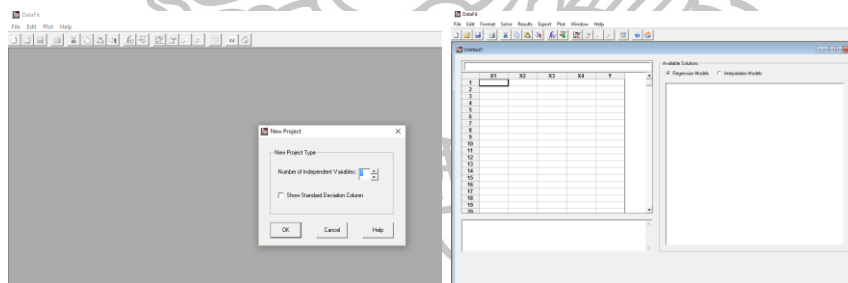
### ก. 1 ขั้นตอนการปรับปรุงชุดค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Chung

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Chung แสดงดังสมการที่ ก.1-1

$$\alpha_{ab} = \left\{ 1 - \frac{0.205 \left[ \frac{G_{a,in}}{G_{s,in}} \right]^{0.174} \exp \left[ 0.985 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{aZ^{0.184} X^{1.680}} \right\} \left/ \left\{ 1 - \frac{0.152 \exp \left[ 0.686 \left( \frac{T_{a,in}}{T_{s,in}} \right) \right]}{X^{3.388}} \right\} \right. \quad (ก.1-1)$$

โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า DataFit โดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) ดังที่กล่าวข้างต้นสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chung ต้องแยกพิจารณาระหว่างพจน์เศษและพจน์ส่วน ซึ่งมีขั้นตอนการใช้โปรแกรมในการปรับปรุงชุดค่าคงที่ของพจน์เศษและส่วน ซึ่งทั้งสองมีขั้นตอนการปรับปรุงชุดค่าคงที่เหมือนกันสามารถทำได้มีดังนี้

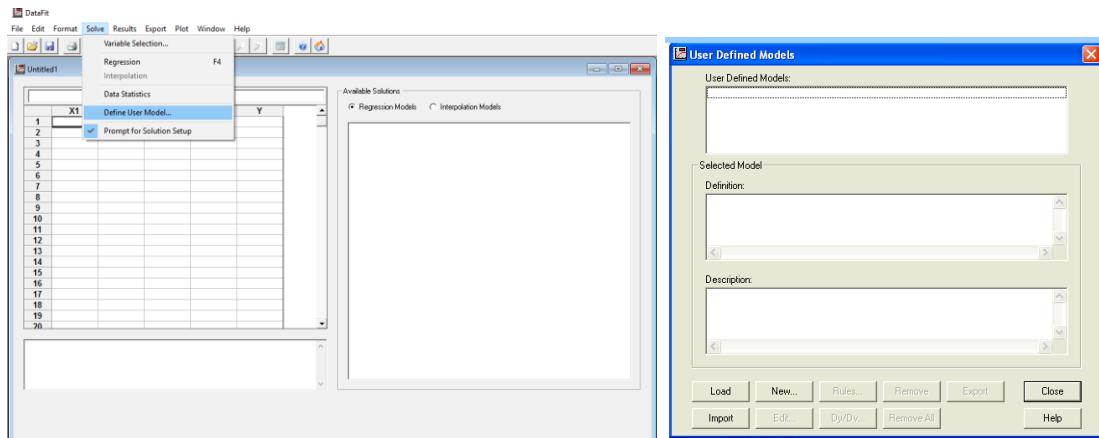
ก.1.1 จากสมการที่ ก.1 พบว่าพจน์เศษมีตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวแปร โดยสามารถจัดกลุ่มได้ 4 กลุ่ม ดังนั้นในช่อง Number of independent variables มีค่าเท่ากับ 4 คือ  $\frac{G_{a,in}}{G_{s,in}}$ ,  $\frac{T_{a,in}}{T_{s,in}}$ ,  $aZ$  และ  $X$  จะปรากฏช่องให้ค่าทั้งหมด 5 ช่อง ดังรูปที่ ก.1 โดยช่องสุดท้าย คือ ค่าของพจน์เศษ ซึ่งค่าทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ ก.1 Number of independent variables

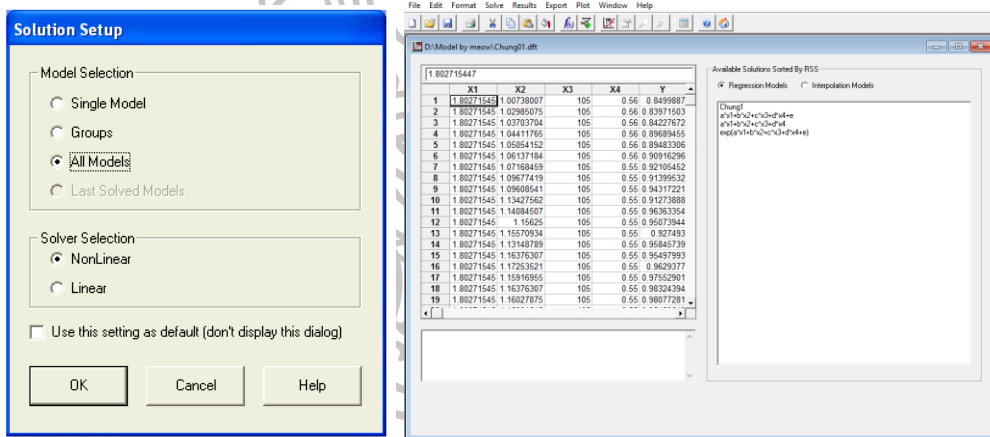
ก.1.2 เนื่องจากโปรแกรมไม่มีรูปแบบสมการของ Chung จึงต้องกำหนดรูปแบบสมการเข้าไปในโปรแกรมก่อน โดยเลือกคำสั่ง Define user model... และเลือก New เพื่อกำหนดรูปแบบของแบบจำลองดังรูปที่ ก.2 ที่ต้องการโดยจะต้องกำหนดให้สอดคล้องกับชื่อของหัวตารางดังรูปที่ ก.1 เช่น พจน์เศษ ดังสมการที่ ก.1-2

$$Y = \left\{ 1 - \frac{a[X_1]^b \exp[c(X_2)]}{X_3^d X_4^e} \right\} \quad (ก.1-2)$$



รูปที่ ก.2 คำสั่งที่ใช้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองของ Chung

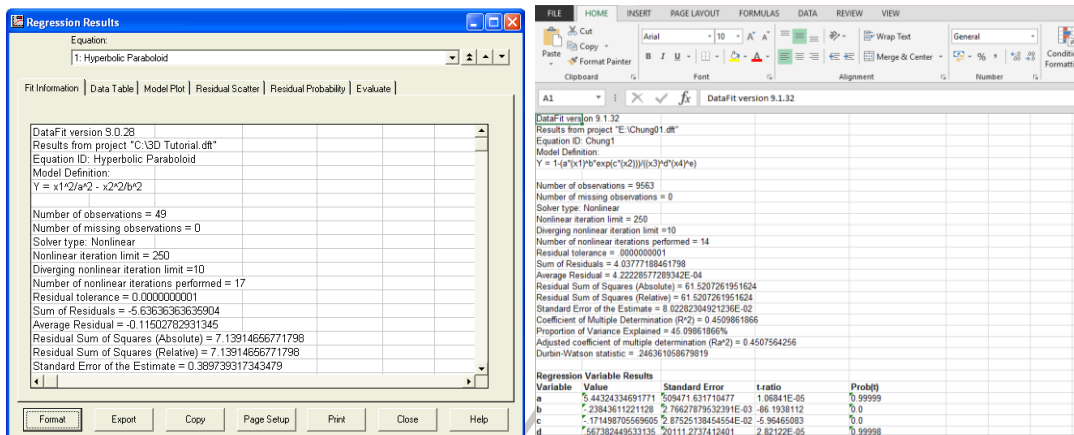
ก.1.3 เริ่มต้นให้โปรแกรมปรับปรุงชุดค่าคงที่โดยเลือกคำสั่ง Regression และเลือกให้โปรแกรมวิเคราะห์รูปแบบของแบบจำลองทั้งหมด ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 คำสั่งเริ่มต้นโปรแกรม

ก.1.4 ผลการปรับปรุงชุดค่าคงที่ที่สามารถบันทึกออกมาในรูปของโปรแกรม Microsoft Excel ได้ดังรูปที่ ก.4





รูปที่ ก.4 ผลการปรับปรุงชุดค่าคงที่

ก. 2 ขั้นตอนการปรับปรุงชุดค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นจากงานวิจัยของ Martin and Goswami

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นของ Martin and Goswami แสดงดังสมการที่ ก.1-3 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำมาปรับชุดค่าคงที่ได้โดยไม่ต้องแยกพจน์ในการวิเคราะห์ โดย Number of independent variables มีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.7

$$\alpha_{ab} = 1 - C_1 \left( \frac{G_{s,in}}{G_{a,in}} \right)^x \left( \frac{h_{a,in}}{h_{s,in}} \right)^y (aZ)^z \tag{ก.1-3}$$

โดยที่

$$x = k_1 \frac{Y_s}{Y_o} + m_1$$

$$z = k_2 \frac{Y_s}{Y_o} + m_2$$

ค่าคงที่ในสมการ คือ

$$\begin{aligned} C_1 &= 48.3 & y &= -0.751 \\ k_1 &= 0.396 & m_1 &= -1.57 \\ k_2 &= 0.0331 & m_2 &= -0.906 \end{aligned}$$

เนื่องจากโปรแกรมไม่มีรูปแบบสมการของ Martin and Goswami จึงต้องกำหนดรูปแบบสมการเข้าไปในโปรแกรมก่อน โดยเลือกคำสั่ง Define user model... เนื่องจากแบบจำลองนี้มีสมการซ่อนอยู่ด้านในคือตัวแปร x และ z เลือก Add F1 และ Add F2 ดังนั้นจึงต้องสร้างรูปแบบ

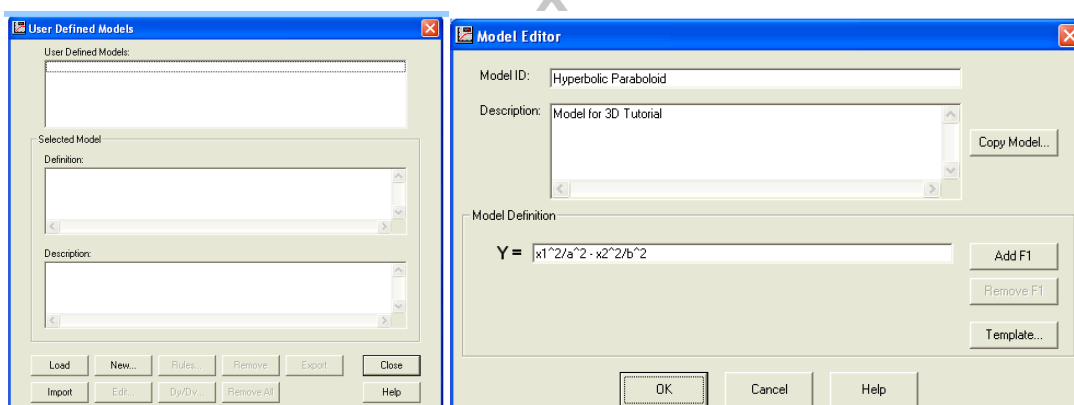
ขั้นตอนดังรูปที่ ก.5 โดยมีรูปแบบการกำหนดสมการในแบบจำลองดังสมการที่ ก.1-4 และเริ่มการทำงานของโปรแกรมเหมือนกับข้างต้น

$$Y = 1 - a(X_1)^{F1}(X_2)^b(X_3)^{F2} \quad (\text{ก.1-3})$$

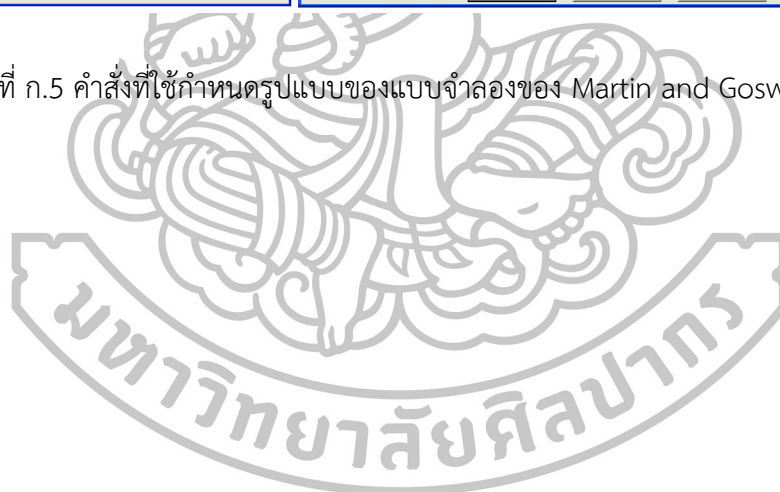
โดยที่

$$F1 = cX_4 + d$$

$$F2 = eX_4 + d$$



รูปที่ ก.5 คำสั่งที่ใช้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองของ Martin and Goswami



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นางสาวศุภมาศ วิชัยสินธุ์
ที่อยู่	38 หมู่ 2 ตำบลหนองโรง อำเภอพนมทวน จังหวัดกาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2553	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2554	ศึกษาต่อระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอมือง จังหวัดนครปฐม



54406208 : สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คำสำคัญ : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์/ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้น/อัตราการดูดความชื้น/การวิเคราะห์ความไว

ศุภมาศ วิชัยสินธุ์ : การปรับปรุงแบบจำลองในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ทสพล เขตเจนการ. 147 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดูดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลวเพื่อทำนายอัตราการดูดความชื้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ผ่านของ Chung (1994) และ Martin and Goswami (2000) เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานโดยมีช่วงอัตราการไหลของอากาศที่ 35 - 335 CFM และอัตราการไหลของสารดูดความชื้นที่ 1 - 9 LPH ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 40% เป็นสารดูดความชื้น ทำการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อน (RMSE) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแบบจำลอง (MBD) แบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีก่อนปรับปรุงชุดค่าคงที่ กรณีกำหนดให้เป็นค่าคงที่ และกรณีหลังปรับปรุงชุดค่าคงที่

ผลลัพธ์กรณีแรกพบว่า RMSE ของ Chung และ Martin and Goswami เท่ากับ 0.5573, 43.26 และ MBD เท่ากับ 0.1101, -8.424 ตามลำดับ กรณีที่สองพบว่า RMSE และ MBD เท่ากับ 0.6076, 0.0931 และกรณีสุดท้าย RMSE ของ Chung และ Martin and Goswami เท่ากับ 0.3103, 1.1753 และ MBD เท่ากับ 0.0613, 0.2335 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองลดลงอย่างชัดเจน เมื่อใช้แบบจำลองที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้ว ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลองของ Chung ที่ปรับปรุงชุดค่าคงที่แล้วมาทดลองใช้งานจริง คือ การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรต้นที่มีผลต่ออัตราการดูดความชื้น สามารถเรียงลำดับความไวได้ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารดูดความชื้น, อุณหภูมิของอากาศ, อัตราการไหลของอากาศและสารดูดความชื้น, อุณหภูมิของสารดูดความชื้น และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แต่ตัวแปรด้านอากาศจะเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากเป็นสภาพอากาศจริง ดังนั้น ในการออกแบบและใช้งานเครื่องดูดความชื้นจึงควรให้ความสำคัญกับตัวแปรด้านสารดูดความชื้นก่อน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....