

การพัฒนาแบบจำลองสมรรถนะซิลเลอร์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ Chiller Performance Modeling Development by Multiple Linear Regressions

วสภ วิษณุสันต์กุล¹ และ เด่นชัย วรเดชจำเริญ^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมระบบเครื่องกลและนวัตกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม บางเขน 2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนา
นิคม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

*ติดต่อ: ติดต่อบุคคล: denchai.wora@gmail.com, 094-850-3366, 0257911111 ต่อ 2147

บทคัดย่อ

การจัดการพลังงานถูกนำมาใช้ควบคุมและปรับการทำงานเครื่องซิลเลอร์โดยอาศัยประสบการณ์ของผู้ดูแลอาคาร เพื่อมุ่งเน้นการประหยัดพลังงาน โดยมักจะทำการเพิ่มค่าอุณหภูมิน้ำเย็นด้านออกของอีวาพอเรเตอร์ และลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นด้านเข้าคอนเดนเซอร์เพื่อลดการใช้งานพลังงานของเครื่องซิลเลอร์ หากแต่จะขาดการคำนึงถึงความสะดวกสบายของผู้ใช้อาคารรวมถึงผลกระทบต่อส่วนอื่นของระบบเพราะการปรับแต่งค่าในระบบ 1 ค่าจะส่งผลกระทบต่อการทำงานในส่วนอื่นๆ เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (steady-state) นอกจากนี้ผู้ดูแลอาคารส่วนใหญ่จะเป็นช่างเทคนิค หรือวิศวกรไฟฟ้าซึ่งขาดประสบการณ์ปรับแต่งค่าที่กล่าวมา การตั้งค่าการทำงานที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดการใช้พลังงานเกินความจำเป็นได้ หรือส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวมและไม่สามารถคืนสู่การทำงานแบบเดิมได้ (system recovery)

ดังนั้นเพื่อหาวิธีการปรับแต่งค่าแบบ non-intrusive คือไม่ไปยุ่งเกี่ยวกับระบบเดิม บทความนี้ทำการพัฒนาแบบจำลองสมรรถนะซิลเลอร์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อใช้การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าก่อนที่จะลงมือปรับแต่งการทำงานจริงเพื่อป้องกันความเสียหายของระบบโดยรวม โดยทำการเปรียบเทียบกับสมการ ข้อมูลปราศจากความผิดพลาด (fault-free data) และข้อมูลความผิดพลาด (faulty data) มาตรฐานของสมาคมปรับอากาศสหรัฐอเมริกา (ASHRAE) แบบจำลองที่มีความแม่นยำสามารถนำไปต่อยอดและประยุกต์ใช้กับตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากอาคารในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก: การจัดการพลังงาน; ข้อมูลปราศจากความผิดพลาด; ข้อมูลความผิดพลาด; การไม่รบกวนการทำงานระบบเดิม

Abstract

Energy management process is mainly utilized for manipulating and adjusting chiller operations based on experienced and well-trained building operators to accomplish energy savings. Typically, increasing in outlet evaporator water temperature and reduction in inlet condenser water temperature can decrease energy consumptions of chiller operations. However, thermal comfort of occupants and overall system effect caused by parameter adjustment are seldom considered and analyzed because a system parameter adjustment will affect the coupled system when the system response reached to steady-state. In addition, most of building operators are electrical engineers or technicians which are not well-trained or do not have experience in the aforementioned adjustment. The improper setting results in excessive power consumptions or affects overall system performance without system recovery.

To suitably adjust the parameters via non-intrusive techniques, this paper mainly develops chiller performance model based on multiple linear regression (MLR) to predict the overall system change in advance before setting actual parameters for overall system failure protection. With the comparisons with ASHRAE standard of chiller models, fault-free and faulty data, the accurate MLR-based chiller performance model can be effectively applied in filed test data in Thailand.

Keywords: Energy Management; Fault-free data; Faulty data; Non-intrusive

1. บทนำ

การจัดการพลังงาน (energy management) แบบดั้งเดิมทำการควบคุมและปรับการทำงานเครื่องชิลเลอร์โดยอาศัยประสบการณ์ของผู้ดูแลอาคารหรือคำแนะนำจากคู่มือการใช้ของผู้ผลิต โดยจะทำการปรับตั้งค่า [1] ดังนี้ 1) ทำการปรับ set-point เพิ่มหรือลดอุณหภูมิน้ำออกจาก evaporator ที่ชิลเลอร์ตัวใดตัวหนึ่ง 2) เมื่ออุณหภูมิบริเวณปรับอากาศยังไม่ได้ตามที่ต้องการมักเปิดชิลเลอร์เพิ่ม 3) หากแต่การทำงานที่ evaporator จะแปรผันตามการทำงานที่ cooling tower ที่ช่วยระบายความร้อนออกจากวงจร จึงต้องทำการเปิด cooling tower เพื่อระบายความร้อนออกให้ทันตามโหลดการทำงานที่มากขึ้นและ 4) เมื่อรู้ช่วงการทำงานของจำนวนชิลเลอร์แล้วจะทำการเพิ่มอุณหภูมิน้ำออกให้สูงขึ้นเพื่อลดปริมาณการทำงานของ compressor จะพบว่า การปรับตั้งค่าเช่นนี้ การปรับตั้งค่าในระบบ 1 ค่าจะส่งผลกระทบต่อการทำงานในส่วนอื่นๆเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

หากแต่ผู้ดูแลอาคารส่วนใหญ่จะเป็นช่างเทคนิคหรือวิศวกรไฟฟ้าซึ่ง ขาดประสบการณ์ปรับตั้งค่าที่กล่าวมา การควบคุมการทำงานที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดการใช้พลังงานเกินความจำเป็นได้หรือส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวมและไม่สามารถปรับแต่งให้คืนสู่การทำงานแบบเดิมได้ เรียกว่าระบบ intrusive

ดังนั้นเพื่อหาวิธีการปรับตั้งค่าแบบ non-intrusive คือไม่ไปยุ่งเกี่ยวกับระบบเดิม โครงการนี้ทำการหาแบบจำลองด้วยสมการ multiple linear regression (MLR) แสดงการเปลี่ยนแปลงการทำงานของชิลเลอร์ เมื่อทำการปรับตั้งค่าโดยแบบจำลองสามารถใช้การคาดเดาการเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าก่อนที่จะลงมือปรับแต่งการทำงานจริง เพื่อป้องกันระบบโดยรวมเสียหายโดยการอ้างอิงจากงานวิจัย ASHRAE RP-1043 [2] และ ASHRAE RP-1275 [3] เพื่อศึกษารูปแบบการสร้างแบบจำลองและนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากอาคารในประเทศไทย

2. Backgrounds

2.1 พฤติกรรมการปรับแต่งการทำงานของ chiller

2.1.1 ผู้ดูแลอาคารจะทำการปรับค่า set-point

อุณหภูมิน้ำที่ออกจาก evaporator เพิ่มหรือลดตามโหลดที่เปลี่ยนแปลงโดยถ้าอุณหภูมิบริเวณปรับอากาศไม่ได้ตามต้องการจะทำการเปิด chiller เพิ่ม

2.1.2 การทำงานของ evaporator จะแปรผันตาม cooling tower ที่ช่วยระบายความร้อนออกจากวงจร โดยจะเปิด cooling tower เพิ่มเพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้ได้ตามต้องการ

2.1.3 เมื่อรู้ช่วงการทำงานของจำนวน chiller ที่ใช้คุมอุณหภูมิแล้วจะปรับ set-point อุณหภูมิน้ำเย็นลง

2.2 ข้อมูล fault-free และ faulty – data

งานวิจัย ASHRAE RP-1043 [2] ดำเนินการทดลองการเดินเครื่องชิลเลอร์ในห้อง lab เพื่อสร้างข้อมูลที่ไม่มีความผิดพลาด (fault – free) ค่าทั้งหมดสามารถนำไปเปรียบเทียบหรือเป็น guide line ในการสร้างแบบจำลองให้กับชิลเลอร์ขนาดอื่นๆที่ระบายความร้อนด้วยน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ RP-1043 ได้ทดสอบ fault ที่เกิดขึ้นในระบบชิลเลอร์เรียกว่า fault simulation หลายๆเงื่อนไขตามลักษณะของ typical faults 6 อย่างคือ 1) reduced water evaporator 2) reduced water condenser 3) refrigerant leakage 4) refrigerant overcharge 5) non-condensable gas 6) condenser fouling

2.3 แบบจำลอง non – linear

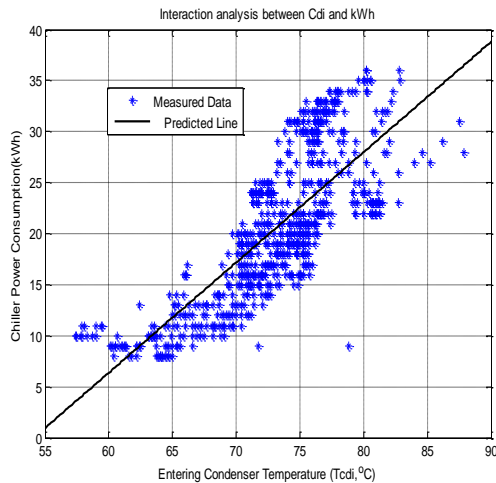
งานวิจัย ASHRAE RP-1043 ใช้ข้อมูล fault-free และ fault simulation ในการสร้างแบบจำลอง fault-free chiller ถูกระบุว่าสามารถใช้ตัวแปรอิสระเพียง 3 ตัวแปร คือ T_{evo} , T_{cdi} , Load or Q_{ch} เพียงพอต่อการใช้คาดเดา [2] ดังสมการที่ 1

$$y = a_0 + a_1 T_{evo} + a_2 T_{cdi} + a_3 Q_{ch} + a_4 T_{evo} Q_{ch} + a_5 T_{cdi} Q_{ch} + a_6 Q_{ch}^2 \quad (1)$$

งานวิจัย ASHRAE RP-1275 [3] ทำการปรับปรุงสมการที่ 3 ด้วยกระบวนการทางสถิติเพื่อต้องการคาดเดาค่า CQ 1-7 (characteristic quantities) และ CP 1-7 (characteristic performance) ดังสมการที่ 2

$$y = a + B_1 T_{cdi} + B_2 T_{evo} + B_3 Q_{ch} + B_4 T_{cdi}^2 + B_5 T_{evo}^2 + B_6 Q_{ch}^2 + B_7 Q_{ch}^2 + B_8 T_{cdi} Q_{ch} + B_9 T_{evo} Q_{ch} \quad (2)$$

2.4 Interaction



รูปที่ 1 ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบปกติระหว่าง T_{cdi} และ KW[1]

คือการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับใดโดยค่า Coefficient of correlation (r) จะอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 ค่าที่อยู่ใกล้ -1.00 , 1.00 จะถือว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันมาก , ค่าเท่ากับ 0 จะถือว่าตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กัน ส่วนเครื่องหมาย + และ - สามารถบ่งบอกรูปแบบของความสัมพันธ์ได้ว่าความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรเป็นไปตามกันหรือผกผันเช่นรูปที่1 ตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร T_{cdi} , และ kWh ค่า R เครื่องหมาย + แปลความหมายได้ในกรณีที่ความสัมพันธ์ของทั้งสองค่าเป็นไปตามกันคือ ค่า T_{cdi} เพิ่มขึ้นขณะที่ kWh เพิ่มขึ้น

2.5 Multiple Linear Regression (MLR)

สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณคือการใช้ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวในการสร้างสมการเพื่อคาดเดาตัวแปรตาม 1 ตัว โดยมีข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติดังนี้ 1) ตัวแปรอิสระแต่ละตัวต้องไม่มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง (multiple collinearity) 2) ข้อมูลเป็นการแจกแจงโค้งปกติ(normality distribution) 3) ตัวแปรอิสระแต่ละตัวต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรตามสมการ MLR มีรูปแบบดังสมการที่ 3

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

เมื่อ

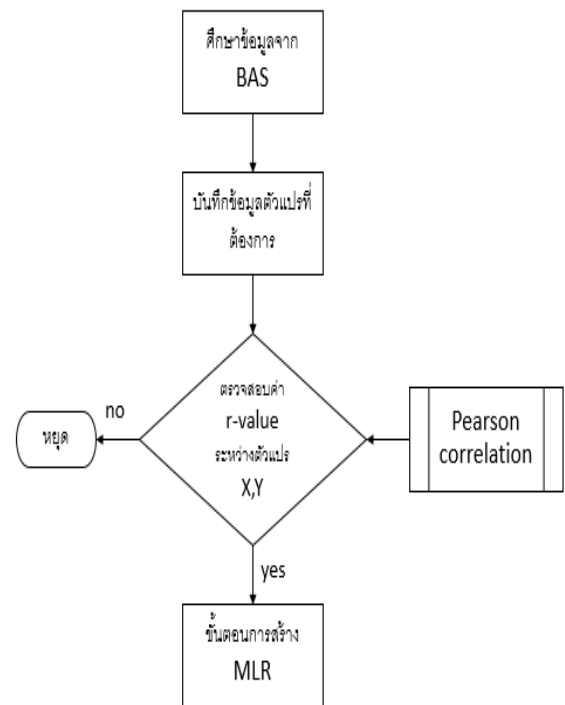
y = ตัวแปรที่ต้องการคาดเดา (criterion variable)

b_0 = จุดตัดแกน Y (intercept)

$b_{1,2,...,n}$ = สัมประสิทธิ์ของตัวแปร x ที่ใช้คาดเดาตัวแปร y

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนหลักของการดำเนินงานการพัฒนาแบบจำลอง chiller ด้วย สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณแสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้ 1.) ศึกษาข้อมูลจากระบบ building automation system (BAS) 2.) ทำการบันทึกข้อมูลตัวแปรที่ต้องใช้ในกระบวนการสร้าง แบบจำลอง 3.) ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรตามกับ ตัวแปรอิสระแต่ละตัว 4.) ขั้นตอนการสร้างและตรวจสอบเงื่อนไข แบบจำลอง MLR โดยแบบจำลองจะถูกพิจารณาด้วยค่า Coefficient of Determination (R^2) จะต้องมากกว่า 70 % [1] แบบจำลองจึงจะ ใช้คาดเดา chiller ได้อย่างแม่นยำหากค่า R^2 มีค่าต่ำกว่าจะไม่สามารถใช้คาดเดาได้ ด้วยสาเหตุอันเนื่องมาจากวิธีการเก็บข้อมูลหรือเกิดปัญหาจากระบบปรับอากาศ งานวิจัยนี้จะไม่ลงรายละเอียด ในส่วนของการแก้ปัญหาของระบบ chiller



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานขั้นตอนการดำเนินงาน จาก flowchart รูปที่ 1 มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ศึกษาข้อมูลดิบของระบบ BAS

ข้อมูลการของตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากระบบบันทึก ข้อมูล BAS แสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากระบบ BAS

Paramet	Refrigerant-side		Water-side	
	Evaporat	ความ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ
Condens	ความ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิออก
Load	% การทำงานของระบบ chiller			
kWh	ยูนิตการใช้ไฟฟ้า			

โดยที่คำอธิบายตัวแปรเพิ่มมีดังนี้ น้ำด้านเข้า evaporator (Inlet Chilled Liquid Temperature, T_{cdi}) น้ำด้านออก evaporator (Outlet Chilled Liquid Temperature, T_{evo}) น้ำด้านออกจาก condenser (Outlet Condenser Liquid Temperature, T_{cdo}) น้ำด้านเข้า condenser (Inlet Condenser Liquid Temperature, T_{cdi}) พลังงานที่ระบบใช้ใน 1 ชั่วโมง (kWh) เปอร์เซ็นต์ โหลดการทำงานของ chiller (Load) โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่ค่าของตัวแปรอิสระเพียง 3 ตัวซึ่งเพียงพอ ต่อการใช้ขาดเดา [2] คือ T_{evo} , T_{cdi} , load สามารถใช้ภาระโหลดของ evaporator (evap ton or Q_{ch}) แทนได้

3.2 บันทึกข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง MLR

ตารางที่ 2 ข้อมูล fault-free แยกตาม stage การทำงานจาก ASHRAE RP-1043

T_{evo}	T_{cdi}	Q_{ch}	CQ1
49.93	70.57	82.82	9.21
45.79	85	83.29	9.29
40.44	79.94	85.85	9.57
40.14	66.01	88.9	9.94
50.42	85.46	90.12	10.02
45.22	70.04	93.45	10.41
45.33	75.2	97.52	10.86
40.51	69.71	97.67	10.9
50.08	75.54	98.89	10.99

ตัวอย่างหากต้องการสร้างแบบจำลองเพื่อขาดเดาค่า $T_{evi} - T_{evo}$ (CQ1) เรียกว่า characteristic quality

1 จะต้องใช้ตัวแปรอิสระดังนี้ T_{evo} , T_{cdi} , evap ton และตัวแปรตามดังนี้ CQ1 ข้อมูล fault-free จากงานวิจัย ASHRAE RP1043 ทำการทดลองแบ่งข้อมูลออก 3 state การทำงานตามภาระโหลด ดังนั้นต้องแยกข้อมูลการทำงานออกเป็น 1 state จะได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2

3.3 ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระแต่ละตัว กับตัวแปรตาม

การสร้างแบบจำลอง MLR ตัวแปรอิสระแต่ละตัว ต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรตามสามารถใช้ค่า Pearson's correlation (r) ทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระคือ T_{cdi} , T_{evo} , evap ton กับตัวแปรตาม CQ1 โดยเกณฑ์ความสัมพันธ์ถูกพิจารณาจากข้อมูล fault - free แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เกณฑ์การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลด้วย

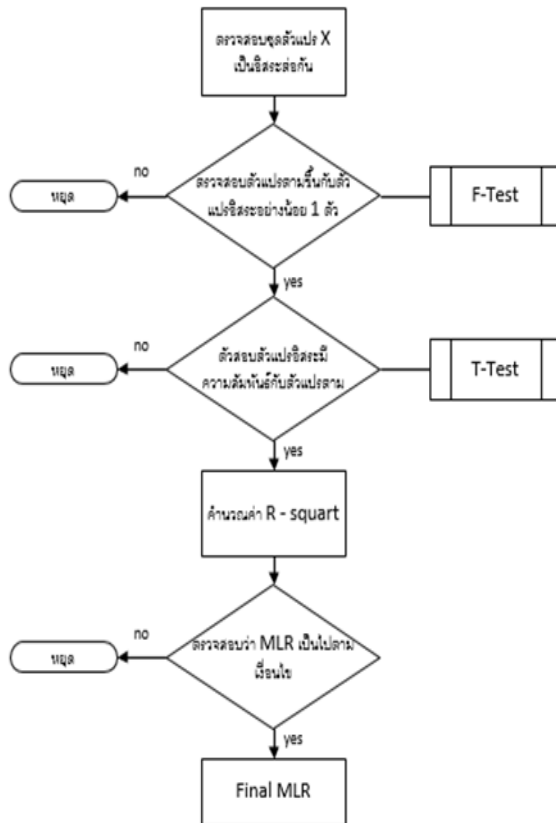
Parameters	Pearson's correlation level
T_{cdi}	ระดับต่ำ (เครื่องหมายลบ)
เมื่อภาระโหลดสูงขึ้นมีการปรับค่า T_{cdi} ลงเพื่อให้สามารถระบายความร้อนออกจากน้ำยาทางฝั่ง condenser ได้ทันค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองจึงออกมาต่ำกว่าที่ควรจะเป็น	
T_{evo}	ระดับต่ำ (เครื่องหมายลบ)
การทดลองในห้อง Lab ที่ถูกตั้ง set-point ไว้ที่ประมาณ 40,45,50 องศาฟาเรนไฮต์ค่าความสัมพันธ์จึงออกมาต่ำกว่าที่ควรจะเป็น	
Evap ton	ระดับสูง (เครื่องหมายบวก)
เนื่องจากค่าที่ใช้เป็นภาระโหลดของ evaporator ที่ถูกคำนวณจาก ค่า CQ1 ดังนั้นระดับความสัมพันธ์ควรจะเป็นระดับสูง	

หมายเหตุ : ระดับต่ำ (0-0.50), ระดับกลาง (0.51-0.89) and ระดับสูง (0.9-1.0)

3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง MLR

การสร้างแบบจำลอง MLR โดยใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบ Backward Elimination เป็นวิธีคัดเลือกตัวแปรที่ดีที่สุดและได้โมเดลที่ประหยัดเหมาะกับการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Microsoft Excel) ที่ ไม่มี Mode ให้เลือกวิธีคัดเลือกตัวแปร ขั้นตอนแรกจะนำตัวแปรทั้งหมดเข้าสมการแล้วจึงดำเนินการพิจารณาตัวแปรอิสระแต่ละตัว ด้วยสถิติ T-test โดยถ้าค่า p-value ของตัวแปรอิสระตัวใดมากกว่า ค่านัยสำคัญที่กำหนดจะทำการตัดตัวแปรออกจากสมการต่อจากนั้นดำเนินการทดสอบว่าค่า R^2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ถ้าพบว่าจะลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญแสดงตัวแปรนั้นไม่ทำมีส่วนทำให้ขาดเดาตัวแปรตามได้มากขึ้นจึงสามารถตัดตัวแปร

ตัวนั้นนอกจากสมการได้ต่อจากนั้นจึงดำเนินการขจัดตัวแปรที่ตัวอื่นด้วยวิธีการพิจารณาเดียวกันหากถ้าพบว่าค่า R^2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญแสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญต่อการใช้คาดเดา ถ้าตัดออกจากสมการจะส่งผลให้ความสามารถในการเดาตัวแปรตามน้อยลง และต่อจากนี้จะนำข้อมูล fault-free จากหัวข้อ 7.2 มาแสดงตัวอย่างวิธีการสร้าง แบบจำลองคาดเดาค่า CQ1 ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการพิจารณาสร้างสมการ MLR รายละเอียดมีดังนี้

3.4.1 จากข้อมูลที่ตรวจสอบแล้วให้ทำการเช็คค่าความเป็นอิสระต่อกันโดยการคำนวณค่า Tolerance หรือ $1-R^2$ ถ้าค่านี้สูงกว่า 0.1 ถือว่าตัวแปรอิสระทั้ง 2 มีความเหมาะสมในการใช้สร้าง MLR [1] ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วย

$1-R^2$	Tcdi	Tevo	Evap ton
Tcdi	0	0.90	0.77
Tevo	0.90	0	0.89
Evap ton	0.77	0.89	0

3.4.2 ทำการตรวจสอบว่าตัวแปรตามขึ้นกับค่าตัวแปรอิสระที่ได้เลือกไว้อย่างน้อย 1 ค่าหรือไม่โดยใช้สถิติ F-test ที่นัยสำคัญที่กำหนด (0.05) โดยมีการตั้งสมมุติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่ขึ้นกับตัวแปรตาม

H_a : มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นกับตัวแปรตาม

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	6.830616	2.276872	4088.588	6.82673E-09
Residual	5	0.002784	0.000557		
Total	8	6.8334			

รูปที่ 4 การทดสอบด้วย F-test

จากรูปที่ 4 คือผลลัพธ์ของการทดสอบสมมุติฐานได้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจะปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 สรุปได้ว่า มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นกับตัวแปรตาม

3.4.3 คำนวณค่าสถิติ T-test และ p-value ของตัวแปรอิสระทุกตัวและทำการพิจารณาตัวแปรที่มีค่า p-value มากที่สุดเพื่อเปรียบเทียบค่า p-value กับระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ถ้าค่า p-value มากกว่าค่า นัยสำคัญจะตัดตัวแปรนั้นออกจากสมการโดยมีการตั้งสมมุติฐานของการทดสอบ T-test ดังนี้

H_0 : สัมประสิทธิ์ (b_0) ของตัวแปรอิสระเท่ากับ 0 ; $b_0 = 0$

H_a : สัมประสิทธิ์ (b_0) ของตัวแปรอิสระไม่เท่ากับ 0 ; $b_0 \neq 0$

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0.109076083	0.215825398	0.50539	0.634769108
Tevo	-0.002901486	0.002198409	-1.31981	0.24409329
Tcdi	0.001254127	0.001528826	0.82032	0.449358176
Evap Ton	0.110561994	0.001164312	94.95905	2.45531E-09

รูปที่ 5 การทดสอบด้วย T-test

จากรูปที่ 5 คือผลลัพธ์ของการทดสอบตัวแปรอิสระแต่ละตัวด้วย สถิติ T-test จากการพิจารณาตัวแปรที่มีค่า p-value สูงที่สุดคือ T_{cdi} และทำการเปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญที่กำหนดพบว่ามีความมากกว่า

0.05 เพราะฉะนั้นจึงตัดตัวแปร T_{cdi} ออกจากสมการ MLR

-4.4 คำนวณค่าสถิติ T-test และ p-value ของตัวแปรอิสระที่เหลือในสมการแล้วดำเนินการซ้ำตามข้อ 7.4.3 จนกว่าจะไม่มีตัวแปรตัวใดมีค่า p-value มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญแสดงได้ดังรูปที่ 6

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0.227164081	0.156359831	1.452829	0.196486919
Tevo	-0.00256775	0.002100726	-1.22232	0.267422396
Evap Ton	0.110160655	0.001027332	107.2299	4.4342E-11

รูปที่ 6 การทดสอบด้วย T-test

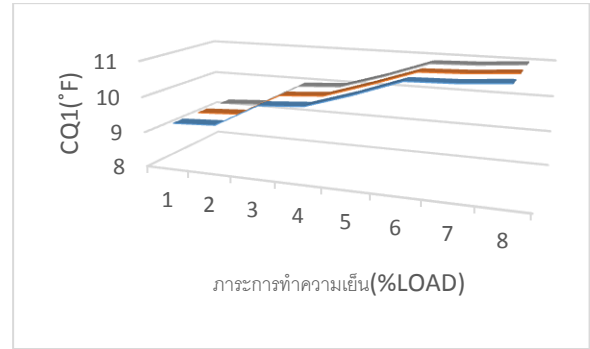
3.5 ประสิทธิภาพของสมการ MLR เทียบกับสมการ non-linear

สมการรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) จากงานวิจัย RP-1043 ตั้งสมการที่ 5 และ RP-1275 ตั้งสมการที่ 2 เมื่อนำมาใช้คาดเดาค่า CQ1 จากข้อมูล fault-free ชุดเดียวกันจากตารางที่ 2 เมื่อทำการคำนวณหาค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวจะได้ สมการ non-linear ของงานวิจัย RP-1043 , RP-1275 ตั้งสมการที่ 4 , 5 ตามลำดับ

$$CQ1_{1043} = 0.07 - 0.00031Tevo - 0.0008Tcdi + 0.1107Evapton + (2.52E - 05Tcdi \cdot Evapton) - (2E - 05Tevo \cdot Evapton) - (4.1E - 06Evapton) \quad (4)$$

$$CQ1_{1275} = -1.09 + 0.04Tevo + 0.008Tevo + 0.111Evapton - 0.00038Tevo^2 - (6E - 05Tcdi^2) - (6E - 06Evapton^2) - (1.1E - 05Tcdi \cdot Tevo) + (3.34E - 05Tcdi \cdot Evapton) - (2.6E - 05Tevo \cdot Evap) \quad (5)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการแบบจำลอง MLR กับ non-linear โดยทำการแทนข้อมูลตัวแปรอิสระชุดเดิมกลับเข้าไปในสมการที่ 1 และ 2 ต่อจากนั้นสร้างการเปรียบเทียบค่า CQ1 ในรูปแบบกราฟดังรูป



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการคาดเดาข้อมูลด้วยแบบจำลอง

จากรูปที่ 7 พบว่า MLR มีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้คาดเดาค่า CQ1 ได้อย่างแม่นยำ โดยที่ข้อมูลแต่ละจุดของสมการ MLR เทียบกับสมการ non-linear บนกราฟเกือบจะเป็นจุดเดียวกันทั้งในระดับจุดทศนิยมเท่านั้น หรือมีค่าความแตกต่างจากข้อมูลจริงไม่เกิน 2 % ซึ่งสังเกตได้จากตารางที่ 5

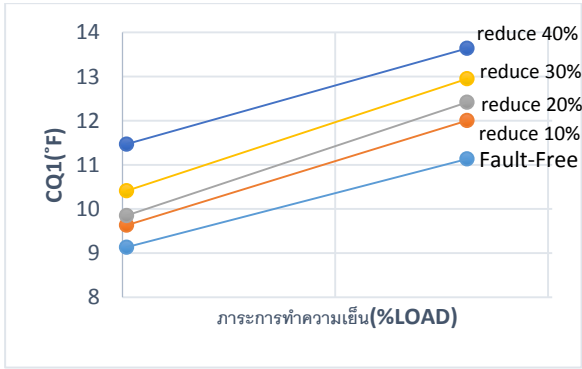
ตารางที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบการคาดเดาข้อมูลด้วยแบบจำลอง

ชนิดสมการ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8
ค่าจริง	9.21	9.29	9.94	10.02	10.41	10.86	10.9	10.99
MLR	9.21554	9.278955	9.929856	10.01659	10.41188	10.8603	10.89827	10.9928
RP-1043	9.21326	9.28346	9.92862	10.0178	10.4189	10.8563	10.9013	10.9898
RP-1275	9.21	9.29	9.94	10.02	10.41	10.86	10.9	10.99

3.6 ผลลัพธ์การสร้างแบบจำลอง MLR กับข้อมูลที่มีความผิดพลาด

นำสมการ MLR มาตรวจสอบกับข้อมูลที่ปราศจากความผิดพลาดและ ข้อมูลที่มีความผิดพลาดที่มีการลดอัตราการไหลของน้ำเย็น ซึ่งจะส่งผลกับผลต่างอุณหภูมิ น้ำเย็น (CQ1) ซึ่งสามารถทำการคาดเดาในความผิดพลาดแต่ละระดับซึ่งจะได้ผลตามรูปที่ 8

เนื่องด้วยการลดอัตราการไหลของน้ำจะส่งผลทำให้ อุณหภูมิ ผลต่างของน้ำฝั่งน้ำเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง



รูปที่ 8 แสดงผลการคาดเดาด้วยสมการ MLR ของความผิดพลาดที่ลดอัตราการไหลของน้ำเย็น

4. การนำสมการไปสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบระบบ commissioning ก่อนส่งมอบงาน

โดยปกติการทดสอบ commissioning ระบบปรับอากาศก่อนส่งมอบงานจะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้องอาศัยทีมชำนาญการเข้าดูแลความเหมาะสมจึงทำให้เป็นหน้าที่ของบริษัทที่ทำการผลิตระบบปรับอากาศโดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

4.1 บันทึกของมูลพื้นฐานของ chiller เช่น nameplate, ชนิดสารทำความเย็น, หมายเลขรหัสโมเดลของอุปกรณ์ในระบบ

4.2 บันทึกและตรวจสอบการติดตั้งระบบ เช่น ตรวจสอบ รอยรั่วตามจุดต่างๆ, ตรวจสอบ การบาลานซ์ น้ำ รวมไปถึงสภาพของอุปกรณ์

4.3 สอบเทียบการควบคุม ในการควบคุมของระบบ chiller จะใช้ sensor เป็นอุปกรณ์วัด เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensors) , หน้าสัมผัสสั่งการควบคุม

4.4 บันทึกและตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จุดประสงค์การตรวจสอบเพื่อให้ระบบทำงานได้ตามค่าที่ออกแบบจากผู้ผลิตอาทิเช่น 1) ผู้ดูแลอาคาร จะทำการปรับค่า set-point อุณหภูมิน้ำที่ออกจาก evaporator เพิ่มหรือลดตามโหลดที่เปลี่ยนแปลง โดยถ้าอุณหภูมิบริเวณปรับอากาศไม่ได้ตามต้องการจะทำการเปิด chiller เพิ่มขึ้น 2) การทำงานของ evaporator จะแปรผันตาม Cooling tower ที่ช่วยระบายความร้อนออกจากวงจร โดยจะเปิด Cooling tower เพิ่มเพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้ได้ตามต้องการ 3) รู้ช่วงการทำงานของจำนวน chiller ที่ใช้คุมอุณหภูมิแล้วจะปรับอุณหภูมิน้ำเย็นลง 4) การตั้งค่าอุณหภูมิน้ำเย็นออก Chiller ให้สูงขึ้นทุก 1 °F จะ

สามารถประหยัดพลังงานได้ 0.5% - 0.75% (Operation Load 40% - 80%) และ 5) การปรับตั้งค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นด้านเข้า Condenser ให้ต่ำลงทุก 1 °F จะสามารถประหยัดพลังงานได้ 1.5% (Full Load Operation)

หากแต่การตรวจสอบข้างต้นเป็นการคาดคะเนจากประสบการณ์โดยเมื่อทำการปรับตั้งค่าการทำงานให้ได้ตามที่ผู้ออกแบบได้ระบุไว้ เมื่อระบบมีการติดตั้งผิดพลาด ผู้ทดสอบจะไม่สามารถระบุผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นได้ด้วยการตรวจสอบจากวิธีการแบบเดิม เพื่อให้สามารถทราบหรือประเมินผลการทดสอบและปรับแต่งค่า สมการที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปสร้าง excel worksheet ในการคำนวณตัวแปรที่เราไม่ต้องการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 8 โดยใช้ฟังก์ชัน solver ของ Microsoft excel ในการคำนวณค่าทั้งหมดที่สามารถทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากระบบตรวจวัดหรือค่าที่ได้จากระบบอาคารอัตโนมัติได้ล่วงหน้าก่อนมีการปรับตั้งค่าจริง เพื่อลดปัญหาและความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นได้

Decision Function						
	Tcdi	Tevo	Load	Constant		
Parameters	85.00	46.00	0.67	1.00		
Objective Function						
	Tcdi	Tevo	Load	Constant		
Parameters	85.00	46.00	0.67	1.00		
Coefficient of conditions	0.22	-0.53	64.37	-0.63		
Total kWh	36.60					
Constraints						
Coefficient of conditions	Tcdi	Tevo	Load	Constant	Total	Constraint
Tevo	0.00	1.00	0.00	0.00	46.00	<= 49.00
Tevo	0.00	1.00	0.00	0.00	46.00	>= 46.00
Evaporator Temp	0.04	0.96	-5.60	-0.45	43.21	<= 51.00
Evaporator Temp	0.04	0.96	-5.60	-0.45	43.21	>= 42.00
Load condition	0.00	0.00	1.00	0.00	0.67	>= 0.30
Load condition	0.00	0.00	1.00	0.00	0.67	<= 0.70
CQ	-0.10	0.04	16.30	0.49	5.00	>= 3.00
CQ	-0.10	0.04	16.30	0.49	5.00	<= 5.00
Tcdi	1.00	0.00	0.00	0.00	85.00	>= 55.00
Tcdi	1.00	0.00	0.00	0.00	85.00	<= 85.00
Constant condition	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	= 1.00

รูปที่ 9 Excel worksheet ที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆของระบบล่วงหน้าก่อนการปรับค่าจริง

5. สรุป

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง สมการ MLR และสมการจาก ASHRAE RP-1043 และ RP-1275 พบว่ามีประสิทธิภาพการคาดเดา ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความซับซ้อนที่น้อยกว่ามากเหมาะสมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้าง

dashboard หรือ optimization worksheet เพื่อการ
คาดเดาการทำงานก่อนปรับค่าต่างๆล่วงหน้าได้ดี ซึ่ง
สามารถลดต้นทุนการสั่งซื้อ software ราคา 200,000
บาทต่อเครื่องได้ และเพิ่มประสิทธิภาพมูลค่างานการ
commissioning ให้กับระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Widsankun, W., Woradechjumroen, D. and Eiamworawutthikul, C. (2016). Power Consumption Modeling of building and chiller systems utilizing Smart Building Energy Solutions Technologies, paper presented in the ME-NETT 30, 2016, Thailand.
- [2] Comstock, M.C. and Braun, J.E. (1999). Experimental data from fault detection and diagnostic studies on a centrifugal chiller, ASHRAE Research Project 1043-RP 1999.
- [3] Reddy, A. (2009). Evaluation and assessment of fault detection and diagnostic methods for centrifugal chillers – II. ASHRAE Research Project 1275-RP 2009.