

การจัดตารางการดำเนินการของระบบทำความเ็นในกระบวนการผลิตพีวีซี

นายโชคพินิจ ล้อมคำดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

SCHEDULING OF CHILLER SYSTEM OPERATION IN PVC PRODUCTION PROCESS

Mr. Chokpinid Lomkamdee

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดตารางการดำเนินการของระบบทำความเย็นใน กระบวนการผลิตพีวีซี
โดย	นายโชคพินิจ ล้อมคำดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

โชคพินิจ ล้อมคำดี : การจัดตารางการดำเนินการของระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตพีวีซี. (SCHEDULING OF CHILLER SYSTEM OPERATION IN PVC PRODUCTION PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สุรเทพ เชี่ยวหอม, 77 หน้า.

โครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะนำไปใช้หาสถานะการดำเนินการของระบบทำความเย็นที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตพีวีซีด้วยวิธีการจัดตารางการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบคายความร้อนประมาณ 1,531 กิโลจูลต่อกิโลกรัมของโวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (VCM)ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกโดยใช้น้ำเย็น (Chilled water) และยังคงใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน การควบคุมการเดินเครื่องทำความเย็นแบบดั้งเดิมในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้คนในการควบคุมการปฏิบัติงานซึ่งมีข้อด้อยในแง่ประสิทธิภาพของการควบคุมและเป็นผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน

กระบวนการถูกสร้างขึ้นสำหรับการคำนวณกำลังการผลิตสูงสุดของโหลดทำความเย็นและโหลดความร้อนจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมดและมีการพัฒนาและปรับปรุงการแบบจำลองกระบวนการด้วยตรรกะสอดคล้องกับข้อมูลในโรงงานและใช้วิธีการควบคุมแบบลำดับการเดินเครื่องทำความเย็นในการควบคุมระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าที่สุด โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบการควบคุมแบบลำดับการเดินเครื่องทำความเย็นและการควบคุมแบบดั้งเดิม ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมแบบลำดับการเดินเครื่องทำความเย็นสามารถลดการใช้พลังงานของไฟฟ้าของหน่วยผลิตน้ำเย็นลงได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนอกจากเป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำความเย็น และเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังพบว่าไม่มีผลกระทบต่อการควบคุมปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์แต่อย่างใด

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา....2554.....

5171454421: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POLYMERIZATION/EXOTHERMIC REACTION /CHILLER SEQUENCING
CONTROL ALGORITHM

CHOKPINID LOMKAMDEE: SCHEDULING OF CHILLER SYSTEM OPERATION
IN PVC PRODUCTION PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. SOORATHEP
KHEAWHOM, Ph. D., 77 pp.

This research aimed to analyze and develop a computer program for scheduling of chiller system operation in PVC production process. The polyvinyl chloride (PVC) polymerization process is an exothermic reaction which is carried out in a batch reactor around 1531kJ/kg of vinyl chloride monomer (VCM). The chilled water is used to remove exothermic heat and controlled temperature in reactor during polymerization. In plant the traditional operation of chiller was controlled by manual operation which it had disadvantages in term of control efficiency, resulting in lost energy.

A simplified model was created for computing the maximum cooling capacity and heat load of user were developed, validated using field data and used chiller sequencing control algorithm to optimize system. The performance of the proposed chiller sequencing control algorithm was tested and compared with the traditional control. Test results are presented showing that the proposed strategy can decrease the energy consumption of chiller plant by 5% and it does not effect to reaction control in the reactor

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

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

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความรู้ ความกรุณา ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแนวทางการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ข้อคิดคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นแหล่งให้ศึกษา วิชาความรู้ ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ เอื้อเพื่อเอกสาร และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานให้แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อนๆ พี่ๆ วิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ให้ทั้งคำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติ พี่ น้อง ทุกคนที่ให้ความรัก กำลังใจ และการสนับสนุนในการศึกษามาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัยและแหล่งที่มาของข้อมูล.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.1 ระบบทำความเย็นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียน.....	12
3.2 สมดุลพลังงานที่สำคัญที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	15
3.3 สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบทำความเย็น.....	16
บทที่ 4 แบบจำลองและกระบวนการการดำเนินการของระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตผงพีวีซี.....	18
4.1 เป้าหมายการดำเนินการ (Objective Function).....	18
4.2 แบบจำลองและกระบวนการการดำเนินการของระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตผงพีวีซี.....	18
4.3 แบบตซ์โพลิเมอร์ไรเซชัน (Batch Polymerization)	23
4.4 เงื่อนไขของเครื่องแปรที่ใช้ในวิธีออปติไมซ์เซชัน	24
4.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model).....	26

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและข้อมูลการทดลอง.....	29
5.1 ระบบอุปกรณ์และเครื่องจักรในโรงงาน.....	29
5.2 ข้อมูลที่ใช้สำหรับแบบจำลอง reactor and Chiller system.....	30
5.3 สภาวะการทดลองของระบบ.....	35
5.4 การนำไปใช้ปฏิบัติในโรงงาน (Industrial Implementation).....	41
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	52
6.1 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	52
6.2 สรุปผลการทดลอง.....	56
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB).....	65
ภาคผนวก ข หลักการวัดการประหยัดพลังงานโดยวิธี CUMSUM.....	71
ภาคผนวก ค การประชุมทางวิชาการ.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงค่าพลังงานในการคายความร้อนระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ของแต่ละสายการผลิต.....	1
1.2	แสดงสัดส่วนในการใช้น้ำเย็นของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ.....	2
5.1	รายการและขนาดของอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการศึกษา.....	29
5.2	ข้อมูลสำหรับใช้ในแบบจำลองของ Reactor and Chiller system.....	31
5.3	ไซเคิลของแบตช์ (Batch cycle time).....	32
5.4	เงื่อนไขการหยุดดำเนินการของเครื่องทำความเย็นแต่ละตัว.....	42
5.5	เงื่อนไขการเริ่มดำเนินการของเครื่องทำความเย็นแต่ละตัว.....	42
5.6	พารามิเตอร์ที่สำคัญของโปรแกรมของวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบ ลำดับขั้นตอนในระบบDCS.....	43
ก-1	แสดงการแบ่ง Sector ในโปรแกรมแมทแลบ.....	65

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพกระบวนการไหลของระบบการทำความเย็น (Process flow diagram of chiller unit).....	3
1.2	กราฟแสดงสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าของแต่ละหน่วยการผลิตของโรงงานผลิตพีวีซี	4
1.3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	7
2.1	แผนผังขั้นตอนของวิธีการรวมข้อมูล (Fusion method)	9
2.2	แสดงแผนผังขั้นตอนปรับปรุงแก้ไขของความน่าเชื่อถือของวิธีการควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control: CSC) โดยการคำนวณและออนไลน์การสอบเทียบค่ากับความสามารถในการทำความเย็นสูงสุด (Maximum cooling capacity: MCC).....	10
3.1	วัฏจักรการทำความเย็นของสารทำความเย็น.....	13
3.2	แผนภาพแสดงแผนผังอุณหภูมิกับเอนโทรปีของวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle).....	14
3.3	แสดงสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นระบบทำความเย็น.....	16
4.1	แสดงถึงแผนภาพของกระบวนการผลิตของพอลิเมอร์ ซึ่งจะมีเครื่องทำความเย็น 3 ตัว เป็นแหล่งผลิตน้ำเย็นเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	19
4.2	แผนภาพแสดงการทำงานช่วงการดำเนินการเบตซ์โพลิเมอร์ไรเซชัน.....	24
4.3	แผนภาพแสดงลำดับการควบคุม (Control Sequence Sample) เครื่องทำความเย็น.....	25
4.4	แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย.....	27
5.1	เปรียบเทียบค่าสภาวะการดำเนินการจริงที่โรงงานกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB)	33
5.2	กราฟแสดงตารางการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น.....	34
5.3	กราฟแสดงการขจัดความร้อนของแต่ละสายการผลิต.....	37
5.4	ช่วงการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นและอุณหภูมิของน้ำเย็น.....	38

รูปที่	หน้า
5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระดับถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับช่วงการ..... 39
5.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับของถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับอัตราการคายความร้อนรวมของสายการผลิตทั้งหมด..... 40
5.7	วิธีการดำเนินการและนำไปการนำไปปฏิบัติในโรงงานซึ่งโปรแกรมจะสร้างในในระบบ ควบคุมแบบกระจาย (Distributed control system: DCS)..... 41
5.8	แผนภาพแสดงการทำงานของวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอนของ LCP (Logic Controlled Program) เพื่อ start/stop chiller..... 44
5.9	แผนภาพแสดงการควบคุมระบบการทำความเย็นในระบบ DCS 45
5.10	กราฟแสดงการขจัดความร้อนของแต่ละสายการผลิต..... 47
5.11	แสดงการหยุดดำเนินการและการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นระหว่าง 1 ตัวและ 2 ตัวที่ในช่วงเวลา 1 วัน..... 48
5.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระดับถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับช่วงการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น..... 49
5.13	แสดงความร้อนที่ออกจากกระบวนการผลิตและความสามารถทำความเย็นของน้ำเย็นในช่วงเวลา 2 วัน..... 50
5.14	ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP) 51
6.1	ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP)..... 53
6.2	ลักษณะการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบดั้งเดิม..... 54
6.3	ลักษณะการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm)..... 55
6.4	เปรียบเทียบข้อมูลก่อนงานวิจัยและหลังงานวิจัยของจำนวนการทำงานของเครื่องทำความเย็น (Chiller)..... 55
6.5	เปรียบเทียบข้อมูลก่อนงานวิจัยและหลังงานวิจัยของการแกว่งตัวของระดับถังน้ำเย็น (Supply chilled water tank)..... 56
6.6	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์ของแต่ละเดือนตั้งแต่ปี 2008 ถึง 2011..... 57

รูปที่		หน้า
6.7	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์ของแต่ละปีตั้งแต่ปี 2006 ถึง 2011.....	58
6.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับปริมาณการผลิตในแต่ละเดือน(Energy Production Graph).....	58
6.9	CUSUM (Cumulative sum of difference) Graph.....	59
6.10	แสดงตัวอย่างการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น.....	59
๗-1	Scatter Diagram.....	72
๗-2	Baseline ของพลังงานและผลิต.....	74
๗-3	CUSUM Chart ของพลังงานและผลิต.....	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_{CD}	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์	m^2
A_J	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของ Double Jacket Reactor	m^2
C_{PM}	ความจุความร้อนเฉพาะของโมโนเมอร์	$kJ / kg ^\circ C$
C_{PP}	ความจุความร้อนเฉพาะของโพลีเมอร์	$kJ / kg ^\circ C$
C_{PW}	ความจุความร้อนเฉพาะของน้ำที่ความดันคงที่	$kJ / kg ^\circ C$
COP	ประสิทธิภาพของระบบการทำความเย็น (Coefficient of performance)	
ΔH_R	ความร้อนของปฏิกิริยา(Heat of reaction)	kJ / kg
I	ปริมาณเริ่มต้นของ initiator	kg
m_o	ปริมาณเริ่มต้นของโมโนเมอร์	kg
m_{cd}	อัตราการไหลของน้ำเย็นในคอนเดนเซอร์	kg / s
m_{com}	อัตราการไหลของน้ำเข้าเตาปฏิกรณ์	kg / s
m_J	อัตราการไหลของน้ำเย็นใน Double Jacket Reactor	kg / s
m_w	อัตราการไหลของ "Cold shot"	kg / s
$m_{w,tot}$	ปริมาณน้ำเริ่มต้นในเครื่องปฏิกรณ์	kg
N_C	จำนวนของเครื่องทำความเย็น(optimal number of operating chillers)	-

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$Q_{Chilleri}$	ความสามารถในการทำความเย็นของซิลเลอร์แต่ละตัว (cooling capacity of individual chillers)	kW
Q_{bw}	Heat removed	kW
T	อุณหภูมิของปฏิกิริยา	$^{\circ}C$
T_{CD}	อุณหภูมิขาเข้าของคอนเดนเซอร์	$^{\circ}C$
T_{CD0}	อุณหภูมิขาออกของ คอนเดนเซอร์	$^{\circ}C$
T_W	อุณหภูมิขาเข้าของcommon unit	$^{\circ}C$
T_J	อุณหภูมิขาออกของ Double Jacket Reactor	$^{\circ}C$
T_{J0}	อุณหภูมิขาเข้าของ Double Jacket Reactor	$^{\circ}C$
T_{RCW}	อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลเข้าเครื่องทำความเย็น	$^{\circ}C$
T_{SCW}	อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายจากเครื่องทำความเย็น	$^{\circ}C$
t	เวลา	s
U_{CD}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของคอนเดนเซอร์	$W/m^2^{\circ}C$
U_J	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ Double Jacket Reactor	$W/m^2^{\circ}C$
x	อัตราการแปลงจากวีซีเอ็มเป็นพีวีซี(Conversion rate)	%

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตพีวีซีเรซิน(PVC resin) จะผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) สำหรับโรงงานที่ถุกนำข้อมูลมาศึกษาจะมีเทคโนโลยีในการผลิตที่แตกต่างกัน 3 แบบได้แก่ซัสเพนชันพีวีซี (PVC Suspension) และการผลิตแบบอิมัลชันพีวีซี (PVC Emulsion) และการผลิตแบบ ไมโคร-ซัสเพนชันพีวีซี (PVC micro-suspension)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากได้อุณหภูมิประมาณ (55-65 องศาเซลเซียส) และสภาวะความดัน (8-10 บาร์) ชนิดของปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน (ค่าความร้อน ในการพอลิเมอไรเซชันของไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (VCM) เป็นโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เท่ากับ -1,531 กิโลจูลต่อกิโลกรัม) โดยแสดงค่าความร้อนในการพอลิเมอไรเซชันของแต่ละสายการผลิตดังตารางที่ 1.1ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออก โดยใช้น้ำเย็น (Chilled water) ที่อุณหภูมิประมาณ 4-6 องศาเซลเซียสโดยเข้าสู่ช่องระบายความร้อนที่อยู่บริเวณรอบๆเครื่องปฏิกรณ์ (autoclave jacket) เพื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันให้ได้ตามที่กำหนด

ตารางที่ 1.1 แสดงค่าพลังงานการคายความร้อนระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของแต่ละสายการผลิต

Data	Unit	Production line					
		1	2	3	4	5	6
VCM	ton/batch	51.5	47	46.5	54	22	23.5
Conversion rate	%	92	81	80	84	79	93
Exothermic reaction	kJ/kg	1,531	1,531	1,531	1,531	1,531	1,531
	MJ/batch	72,775	58,163	56,896	69,446	26,474	33,368

ลักษณะการทำงานของหน่วยปฏิบัติการผลิตน้ำเย็น (Chiller unit) ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1. ถังเก็บน้ำอุ่น(Returned chilled water tank)

ถังเก็บน้ำอุ่นมีขนาด 1,100 ลูกบาศก์เมตร (ลบ.ม.)และถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน และถูกส่งผ่านโดยปั๊มหอยโข่ง(Centrifugal pump) ไปยังเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)

2. เครื่องทำน้ำเย็น(Chiller)

น้ำจากถังเก็บน้ำอุ่น (Return chilled water tank) ที่อุณหภูมิประมาณ 10-12 องศาเซลเซียสจะถูกส่งผ่านเข้าไปยังเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เพื่อที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นซึ่งชนิดสารทำความเย็นที่ใช้คือคลอโรไดฟลูออโรมีเทน(Chlorodifluoromethane,R-22) หลังจากที่แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะได้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4-6 องศาเซลเซียส และจะถูกส่งไปยังถังเก็บน้ำเย็น (Supply chilled water tank)

3. ถังเก็บน้ำเย็น(Supply chilled water tank)

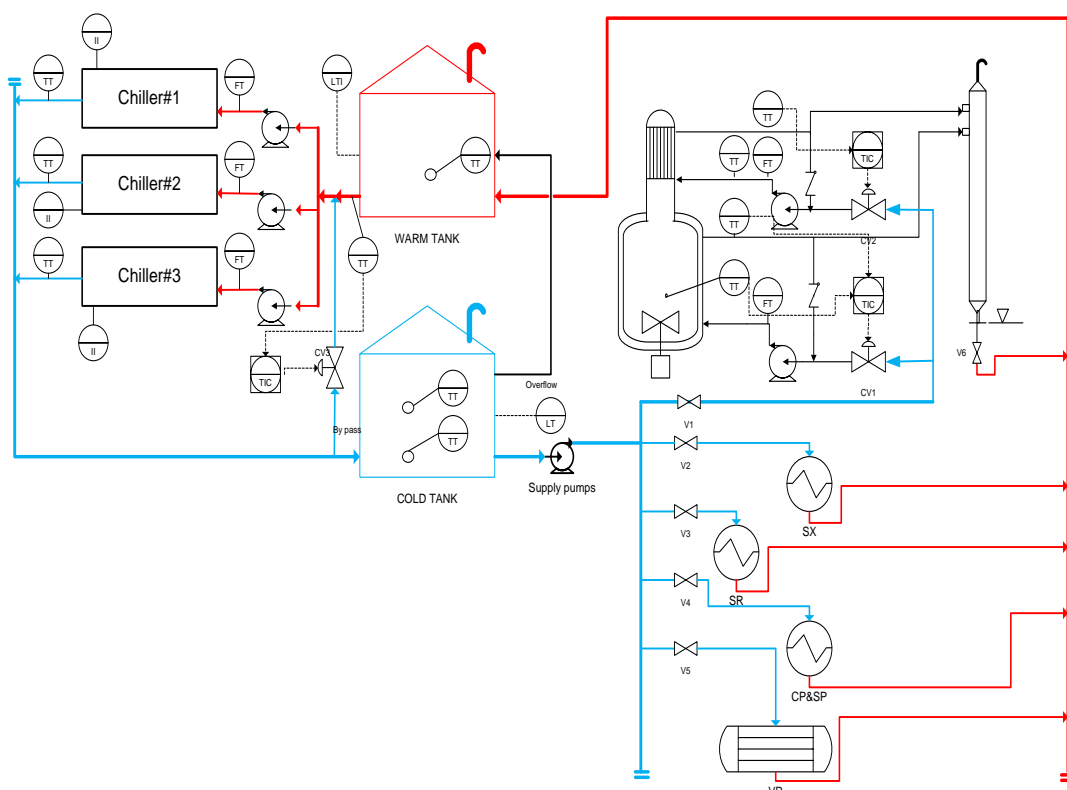
ถังเก็บน้ำเย็นมีขนาด 1,100 ลูกบาศก์เมตร (ลบ.ม.) และถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน และถูกส่งผ่านโดยปั๊มหอยโข่งเพื่อนำเข้าสู่ช่องระบายความร้อนที่อยู่บริเวณรอบๆเตาปฏิกรณ์ (autoclave jacket)

โดยที่ปริมาณ 92.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำเย็น (chilled water) ที่ผลิตได้ทั้งหมดถูกใช้กับสายการผลิตหลักและส่วนที่เหลือประมาณ7.5เปอร์เซ็นต์ถูกนำไปใช้ในหน่วยสนับสนุนการผลิต (Support unit) ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงสัดส่วนในการใช้น้ำเย็นของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

Process	Chilled water	
	Consumption (%)	Flow regulation
Polymerization unit	92.5%	Control valve
VCM recovery unit	3.9%	Manual valve
Initiator synthesis unit	1.9%	Manual valve
Dispersing preparation unit	1.1%	Manual valve
Vacuum unit	0.6%	Manual valve

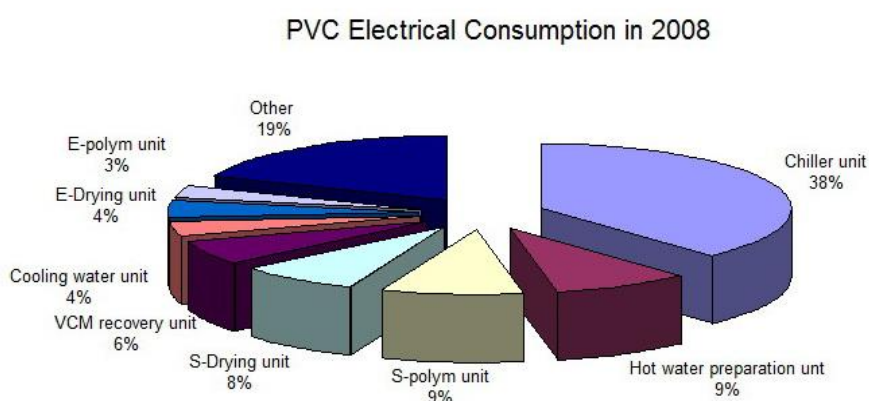
แผนภาพกระบวนการไหลของระบบการทำความเย็นและเครือข่ายในกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 1.1 โดยน้ำเย็น(chilled water)ที่ผลิตได้จากเครื่องทำความเย็น(Chillers)จะถูกส่งไปพักที่ถังเก็บน้ำเย็น(Supply chilled water tank) หลังจากนั้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตและใช้ในหน่วยสนับสนุนการผลิตต่างๆได้แก่ หน่วยนำรีไซเคิลส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา(Unreacted)มาใช้ใหม่ (VCM recovery unit), หน่วยการสังเคราะห์สารก่อเกิดปฏิกิริยา (Initiator synthesis unit) หน่วยการเตรียมตัวช่วยกระจาย(Dispersing preparation unit) และหน่วยทำแรงดันสุญญากาศ (Vacuum unit)ซึ่งน้ำเย็น(Chilled water)ที่ผ่านกระบวนการเหล่านี้จะถูกส่งไปพักที่ถังเก็บน้ำอุ่น(Returned chilled water tank)เพื่อเตรียมป้อนเข้าเครื่องผลิตน้ำเย็น (Chillers) ดังนั้นการผลิตน้ำเย็น Chilled water) จะเป็นแบบระบบปิด



รูปที่ 1.1 แผนภาพกระบวนการไหลของระบบการทำความเย็น
(Process flow diagram of chiller unit)

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของหน่วยการผลิตน้ำเย็น(Chilled water) คิดเป็น 38% ของปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของโรงงานผลิตพีวีซี (PVC plant) ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งการควบคุมการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ยังไม่เป็นระบบแบบอัตโนมัติ (manual control)

สำหรับปัญหาที่เกิดกับลักษณะการทำงานแบบดั้งเดิม(Traditional operation) การควบคุมการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ที่ไม่เหมาะสม อาทิเช่น การหยุดการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ที่ซ้ำทำให้สิ้นเปลืองพลังงานหรือในทางกลับกันคือการหยุดการทำงานของเครื่องทำความเย็น (Chillers) ก่อนก็เป็นผลให้น้ำเย็น (Chilled water) ในระบบไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการควบคุมปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมปฏิกิริยาและคุณภาพของพีวีซีที่ผลิตได้



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าของแต่ละหน่วยการผลิตของโรงงานผลิตพีวีซี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่าและเพื่อลดต้นทุนในการผลิตพีวีซี (PVC) โดยทำการลดค่าไฟฟ้าต่อหน่วยการผลิตพีวีซี (PVC) โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจัดตารางสำหรับการทำงานและหยุดทำงานของเครื่องทำความเย็น(Chillers)และหลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาและปรับปรุงสถานะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องทำความเย็นในโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตการดำเนินการ (Scope of research)

1. ศึกษาข้อมูลในสภาพปัจจุบันของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการผลิตน้ำเย็น(Chilled water) สภาวะการดำเนินงานจริงของกระบวนการในโรงงานเทียบกับ โมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematical model)
2. ศึกษาข้อมูลหลังจากปรับปรุงการควบคุมมาเป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic control) ด้วยใช้วิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (chiller sequencing control algorithm)
3. เปรียบเทียบผลการดำเนินการของงานวิจัยนี้เมื่อได้ปรับปรุงแล้วเทียบกับสภาวะก่อนที่จะทำการศึกษาโดยแสดงผลการเปรียบเทียบให้เห็นเป็นค่าที่วัดได้ชัดเจน
4. ครอบคลุมหกเครื่องปฏิกรณ์(Autoclave reactors)แบ่งเป็น 4 สายการผลิตของ ซัสเพนชันพีวีซี(Suspension PVC) และ 2 สายการผลิตของอิมัลชัน (Emulsion PVC) และเวลาเริ่มต้นในการเริ่มแบตช์ของแต่ละสายการผลิตจะถูกกำหนดตามข้อมูลของโรงงาน

1.3.2 สมมติฐาน (Assumption)

1. อัตราการแปลงของการพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมดถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่
2. ไม่นำการดำเนินงานของกระบวนการที่ผิดปกติมาพิจารณาเช่นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถควบคุมได้, อุปกรณ์พังหรือไม่สามารถใช้งานได้หรือการลดกำลังการผลิตเนื่องจากสถานการณ์การตลาด
3. ข้อจำกัดของกระบวนการคือ ยูทิลิตี้ที่ใช้ร่วมกัน(Common Utilities) ดังนั้นแบตช์ จะไม่ถูกเริ่มพร้อมกัน
4. ข้อบังคับของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller constraints)
 - ก. การปิดสวิตช์เครื่องทำน้ำเย็น(Chiller) จะต้องกระทำหลังจากเดินเครื่องมาแล้วไม่ต่ำกว่า 20 นาที ($T_{mu} > 20$ minutes) โดยไม่ควรปิดเครื่องทันทีหลังจากที่เปิดเครื่องเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร
 - ข. การเปิดสวิตช์เครื่องทำน้ำเย็น(Chiller) จะต้องกระทำหลังจากปิดเครื่องไปแล้วไม่ต่ำกว่า 20 นาที ($T_{md} > 20$ minutes) โดยไม่ควรเปิดเครื่องทันทีหลังจากที่ปิดเครื่องเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร

- ค. เครื่องทำน้ำเย็น(Chiller)จะต้องไม่ start มากกว่า 3 ครั้ง/ชม.เพื่อป้องกันการเสียหายที่เกิดเครื่องจักร
- ง. เครื่องทำน้ำเย็น(Chiller)แต่ละตัว จะต้องไม่ start เวลาเดียวกัน เพื่อควบคุมค่าความต้องการพลังงานสูงสุด(Peak demand)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำความรู้และผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากแบบจำลอง นำไปประยุกต์ใช้กับการดำเนินการของระบบทำน้ำเย็น(Chiller system) ในกระบวนการผลิตพีวีซีเพื่อให้เกิดใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและคุ้มค่าที่สุด รวมทั้งสามารถลดต้นทุนการผลิตด้านพลังงานได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและแหล่งที่มาของข้อมูล

1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

- (1) ตรวจสอบเอกสาร (Literature review) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- (2) ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการและการดำเนินการของระบบทำความเย็น เพื่อให้มีความเข้าใจชัดเจน
- (3) พัฒนาแบบจำลองกระบวนการเพื่อแสดงการดำเนินการของกระบวนการจริงโดยใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) เวอร์ชัน R2008b
- (4) ตรวจสอบแบบจำลองกระบวนการที่ใช้
- (5) แก้ไขปัญหาโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (6) ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับกระบวนการจริง
- (7) สรุปและวิจารณ์ผลงานวิจัย
- (8) จัดทำรูปเล่ม

ซึ่งสามารถเขียนแผนงานต่อกันดังรูปที่ 1.3 วิธีดำเนินการวิจัย



รูปที่ 1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

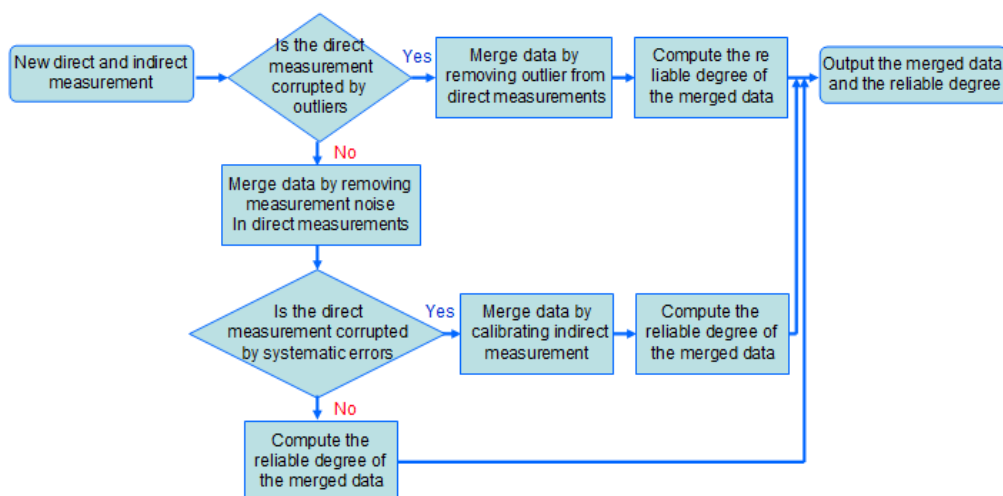
บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการดำเนินการของระบบทำความเย็น

ในการควบคุมการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นโดยอัตโนมัติ (Automatic chiller sequencing control) จะพบปัญหาเกี่ยวกับความไม่แม่นยำ (Inaccuracy) และความไม่น่าเชื่อถือ (Unreliable) ที่เกิดขึ้นจากการวัดทำให้บ่อยครั้งจำเป็นต้องกลับมาใช้คนในการควบคุม (Manual control) ในปี 2008 Gongsheng H. และคณะได้ทำการศึกษาการควบคุมการทำงานของเครื่องทำความเย็นที่ใช้กับอาคารมาทำการปรับปรุงวิธีการควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control) โดยการใช้เทคนิคการรวมข้อมูล (Data fusion Technique) ในการปรับปรุงการวัดโหลดความเย็น (Cooling load) โดยรูปที่ 2.1 คือแผนผังซึ่งแสดงขั้นตอนวิธีการรวมข้อมูล (Data fusion algorithm) ซึ่งมีการพัฒนาเพื่อรวมทั้งสองประเภทได้แก่

- การวัดทางตรง (Direct measurement) โดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำเย็นเพื่อทำการวัดโหลดความเย็นในอาคาร (Building cooling load)
- การวัดทางอ้อม (Indirect measurement) โดยจะใช้การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์ของเครื่องทำน้ำเย็นแต่ละตัวเพื่อคำนวณหาภาระการทำความเย็น (Cooling load)

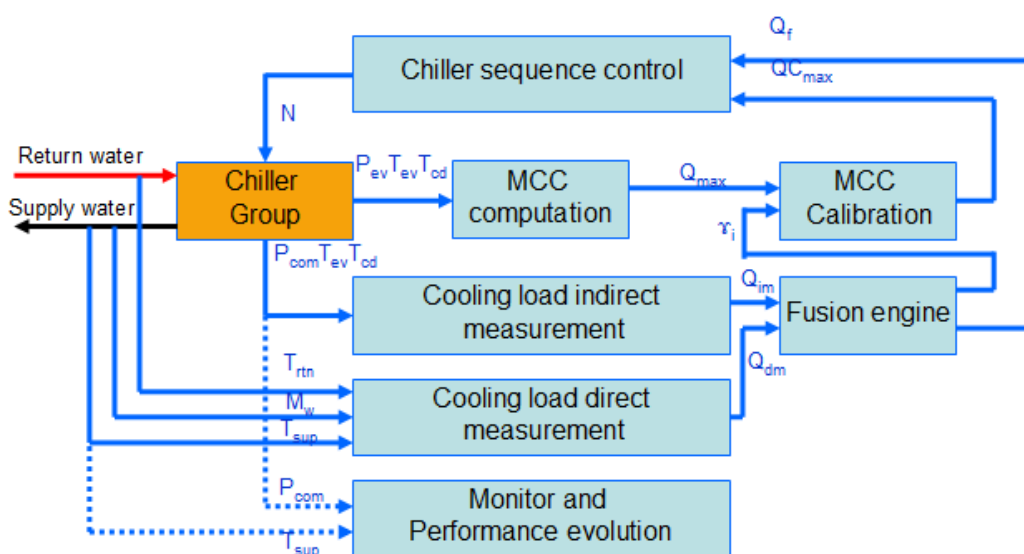


รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนของวิธีการรวมข้อมูล (Fusion method)

ที่มาจาก Gongsheng Huang (2008)

ต่อมาในปี 2009 Yongujun S. และคณะทำการทำการศึกษเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการควบคุมแบบ Data fusion strategy และ นำเสนอกกลยุทธ์สำหรับการปรับปรุงความนำเชื่อถือและประสิทธิภาพด้านพลังงานของควบคุมลำดับเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller sequencing control) ด้วยใช้การวัดภาวะการทำความเย็นรวมของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ทั้งหมดโดยรูปที่ 2.2 แสดงแผนผังขั้นตอนปรับปรุงแก้ไขของความนำเชื่อถือของวิธีการควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control: CSC) โดยการคำนวณและออนไลน์การสอบเทียบค่ากับความสามารถในการทำความเย็นสูงสุด (Maximum cooling capacity: MCC) สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วนในการปรับปรุงดังต่อไปนี้

- 1) การวัดแบบรวม (fused measurement) ของภาวะการทำความเย็น (cooling load) ถูกใช้แทนที่การวัดแบบทางตรง/ทางอ้อม (direct/indirect measurement)
- 2) การหาค่าทำความเย็นสูงสุดของแต่ละเครื่องทำน้ำเย็น (chiller) จะถูกคำนวณโมเดลแบบง่ายของแบบจำลองเครื่องทำความเย็นประเภทเซนตริฟูกอล (centrifugal chiller model)
- 3) ค่าทำความเย็นสูงสุดที่คำนวณออนไลน์จะถูกสอบเทียบตามคุณภาพของการวัดแบบการรวมข้อมูล (fused measurement) เพื่อจัดการกับพฤติกรรมเป็นไปไม่ได้ในเครื่องมือวัด.



รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังขั้นตอนปรับปรุงแก้ไขของความสำเร็จของวิธีการควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control: CSC) โดยการคำนวณและออนไลน์ การสอบเทียบค่ากับความสามารถในการทำความเย็นสูงสุด (Maximum cooling capacity: MCC)

ที่มา Yongujun Sun (2009)

จากการวิจัยนี้สามารถทำการเปรียบเทียบระหว่าง วิธีการควบคุมเครื่องทำน้ำเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequence control) กับวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอนแบบดั้งเดิม (Conventional chiller sequencing control algorithm) พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น (chiller) แบบแรกมีปรับปรุงประสิทธิภาพ, ความสำเร็จและลดการใช้พลังงานมากกว่าแบบดั้งเดิม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองสำหรับกระบวนการเคมีแบบแบตช์

แบบจำลองสำหรับกระบวนการเคมีแบบแบตช์ (Model for batch chemical process) การควบคุมกระบวนการแบบแบตช์เป็นลักษณะการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนแรก: ให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่เหมาะสมของปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่สอง: ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมตลอดการผลิต

โดยในปี ค.ศ. 1996 Daniel R. และคณะได้ศึกษาแบบจำลองและการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ในโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับการผลิตพีวีซีแบบซัสเพนชัน (Modeling and Control of an Industrial PVC Suspension Polymerization Reactor) ซึ่งกระบวนการผลิตพีวีซีแบบซัสเพนชันเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนซึ่งอาจมีเหตุการณ์ที่คาดไม่ถึงเกี่ยวกับการควบคุมความร้อนซึ่งสามารถเกิดได้ทุกแบตช์ซึ่งลักษณะพฤติกรรมแบบนี้ทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพของผงพีวีซี โดยทั่วไปกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์มีอิทธิพลมากต่อโครงสร้างทางโมเลกุลของโพลิเมอร์ ดังนั้นอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบคุมอย่าง

เหมาะสมโดยตัวแปรปรับ(Manipulated variable) คือค่าความร้อนที่เข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำเย็นที่ช่องระบายความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ (Double jacket reactor) แบบจำลองจลนพลศาสตร์(Kinetic model) และประเมินพารามิเตอร์ถูกนำเสนอโดย Lewin ซึ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงจากวีซีเอ็มเป็นพีวีซี (Conversion rate) และหาจุดเหมาะสมของกระบวนการ(Optimal process condition)

โดยในปี ค.ศ. 2007 Zulkeflee S. ได้ศึกษาแบบจำลองอุณหภูมิของการพีวีซีโพลีเมอร์ไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของการควบคุมโพลีเมอร์ไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์และเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์อนุพันธ์หรือพีไอดี (Proportional Integral Derivative control, PID control) และการควบคุมแบบจำลองภายในหรือไอเอ็มซี (Internal Model Control, IMC) และใช้วิธี 4th /5th order Runge Kutta ในโปรแกรมแมทแล็บ (Matlab) ในการแก้ปัญหาซึ่งพบว่าการควบคุมแบบไอเอ็มซี (IMC) ได้ผลดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี(PID)

บทที่ 3

ทฤษฎี

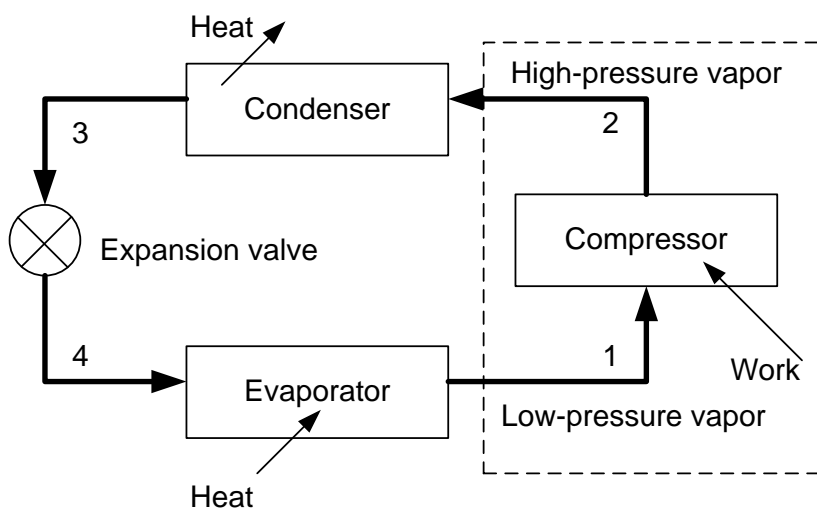
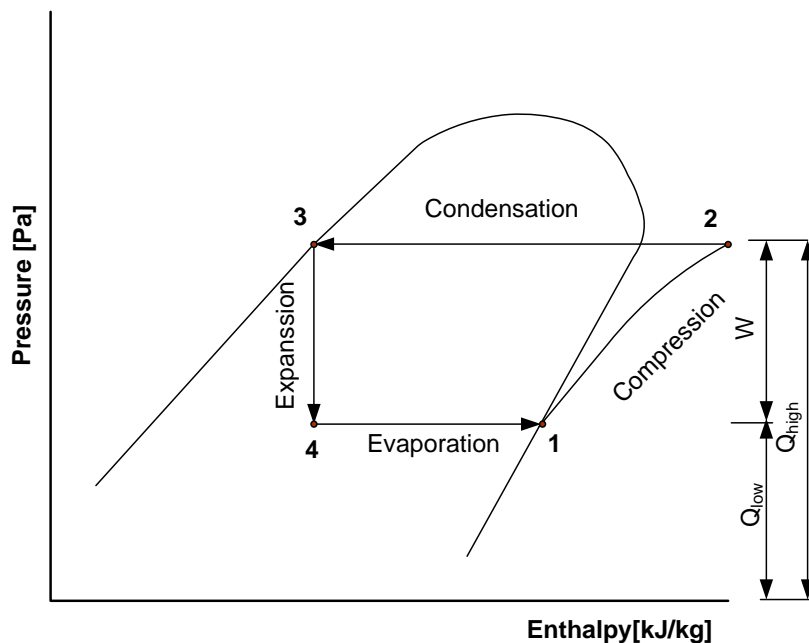
3.1 ระบบทำความเย็นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียน

สำหรับระบบการทำความเย็น(Chiller) ด้วยน้ำเย็นหมุนเวียนนั้นจะประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ คอมเพรสเซอร์ (compressor),อีวาโปเรเตอร์ (evaporator),ระบบปั๊มน้ำ(pump) และ หอทำน้ำเย็น(cooling tower) โดยระบบจะทำการผลิตน้ำเย็น(chilled water)ที่ ใช้กับสำหรับเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)ในกระบวนการผลิตหลังจากนั้นน้ำเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วไหลวนกลับเข้ามาในระบบซึ่งจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและน้ำเย็นจะถูกลดอุณหภูมิและนำกลับไปใช้ในระบบอีกครั้งเป็นวงจรของระบบทำความเย็นด้วยน้ำหมุนเวียน

วัฏจักรการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นดังรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งการทำงานออกได้ดังต่อไปนี้

1. 1 --> 2: กระบวนการอัดโดยตัวคอมเพรสเซอร์ (Compressor)
สารนำสารทำความเย็น (ก๊าซเย็นความดันต่ำ) โดยอยู่ในสถานะไออิ่มตัวมาอัดโดยตัวคอมเพรสเซอร์ (Compressor) จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดโดยเครื่องอัด จนมีสถานะเป็นไอร้อน (Superheated Vapor) มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง
2. 2 --> 3: กระบวนการควบแน่น
สารทำความเย็นจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อถ่ายเทความร้อนออกทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะ เป็นของเหลวอิ่มตัวที่มีความดันสูงและมีอุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากสารทำความเย็นจะทำการ ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็น (Cooling water)
3. 3 --> 4: กระบวนการขยายตัวผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve)
ของเหลวอิ่มตัวความดันสูงจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ขยายตัว (อุปกรณ์ลดแรงดัน) สารทำความเย็นจะมี 2 สถานะ คือ ของเหลวและก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ
4. 4 --> 1 : กระบวนการระเหยผ่านชุดคอยล์เย็น(Evaporator)
สารทำความเย็นรับความร้อนจากการไหลวนนั้นๆ และกลายเป็นไออิ่มตัว

ซึ่งวัฏจักรทำความเย็นจะดำเนินเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ หมุนเวียนเป็นวงจรเช่นนี้ตลอดเวลา จึงทำให้เครื่องทำน้ำเย็น(Chiller) สามารถผลิตน้ำเย็นได้ต่อเนื่อง



รูปที่ 3.1 วัฏจักรการทำความเย็นของสารทำความเย็น
ที่มา Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th

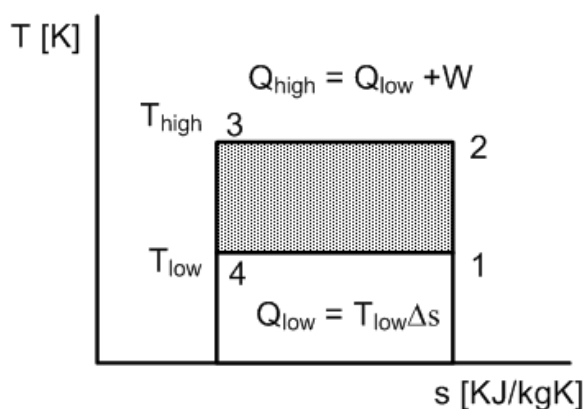
วัฏจักรทำความเย็นคาร์โนต์(Carnot refrigeration cycle) เป็นวัฏจักรในอุดมคติ นิยมใช้สำหรับเปรียบเทียบกับวัฏจักรจริงว่ามีประสิทธิภาพดีเพียงใด วัฏจักรที่ใกล้เคียงคาร์โนต์มากย่อมมีความสมบูรณ์มาก

ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นจะถูกวัดในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) สำหรับระบบทำความเย็น (Refrigeration system) เป็นอัตราส่วนของ Heat removed (Q_{low}) จากระดับอุณหภูมิต่ำ (low-temperature level) ต่อดังงานที่ป้อน (W)

$$COP_R = \frac{Q_{low}}{W} \quad (3.1)$$

สำหรับการทำงานของ Heat pump, Q_{high} คือความร้อนที่ (heat rejected) ถูกทิ้งที่อุณหภูมิสูง

$$COP_{HP} = \frac{Q_{high}}{W} = \frac{Q + W}{W} = COP_R + 1 \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงแผนผังอุณหภูมิกับเอนโทรปีของวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle).

ที่มา Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th

สำหรับวัฏจักรทำความเย็นคาร์โนต์ซึ่ง $\Delta Q = T\Delta S$ ดังนั้น COP จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (K)

$$COP_R = \frac{T_{low}}{T_{high}c - T_{low}} \quad (3.3)$$

และสำหรับ Heat pump application:

$$COP_{HP} = \frac{T_{high}}{T_{high}c - T_{low}} \quad (3.4)$$

3.2 สมดุลพลังงานที่สำคัญที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับสมดุลพลังงานที่สำคัญที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงได้ดังนี้

$$Q_{CH} = \dot{m}_c C_p (CHWRT - CHWTS) \quad (3.5)$$

$$Q_E = UA(LMTD) \quad (3.6)$$

$$Q_R = \dot{m}_r \Delta h \quad (3.7)$$

$$Q_C = \dot{m}_h C_p (LCDWT - ECDWT) \quad (3.8)$$

เมื่อ Q_{CH} = ความร้อนที่น้ำเย็นที่ไหลกลับเข้ามาถ่านเทให้กับสารทำความเย็น

Q_E = ความร้อนที่สารทำความเย็นรับมาจากน้ำเย็นที่ไหลกลับเข้ามา

Q_R = ความร้อนของการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำความเย็น

Q_C = ความร้อนที่น้ำในคอนเดนเซอร์รับมาจากสารทำความเย็น

\dot{m}_c = อัตราการไหลของน้ำเย็น

\dot{m}_h = อัตราการไหลของน้ำร้อน

\dot{m}_r = อัตราการไหลของสารทำความเย็น

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A = พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน

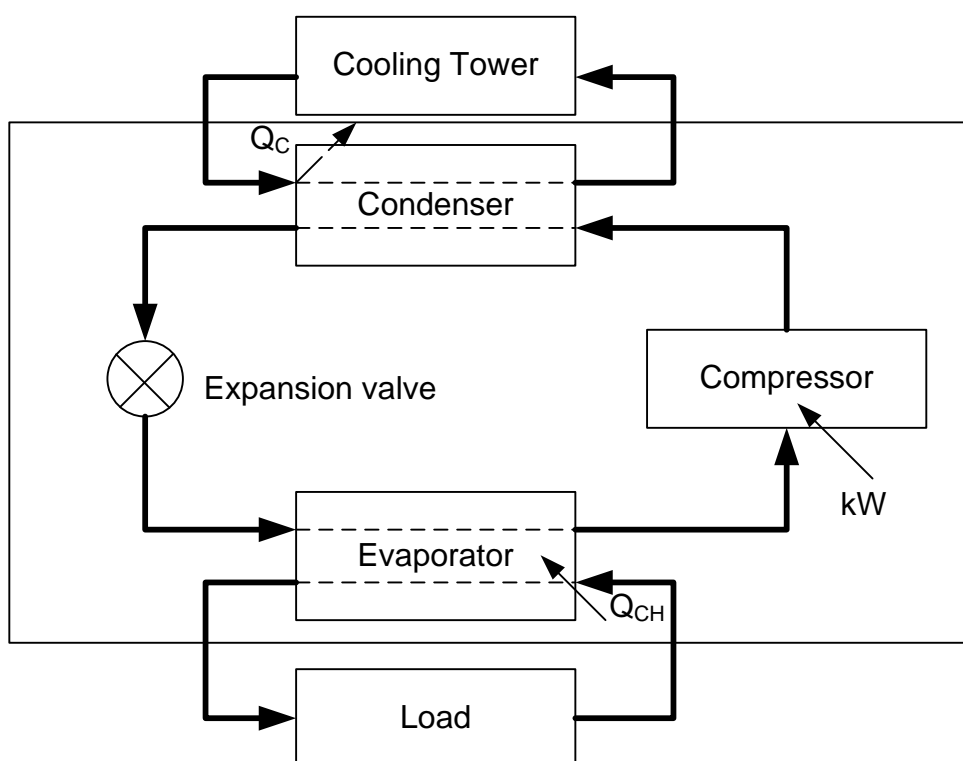
$LMTD$ = LOG MEAN TEMPERATURE DEFFERANCE ($^{\circ}C$)

Δh = ผลต่างของเอนทาลปีของสารทำความเย็นในการเปลี่ยนสถานะ

เมื่อค่าอัตราการไหลของน้ำเย็นและความจุความร้อนจำเพาะของน้ำคงที่จะได้ว่า Q_{CH} จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลกลับเข้ามา (CHWTR) และจ่ายออกไป (CHWTS) จากอีวาโปเรเตอร์ส่วน Q_E นั้นเมื่อสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนและพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนคงที่ก็จะแปรผันตามค่าแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก(LMTD) ซึ่งได้แสดงสมการของความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการที่ (3.5) และ(3.6)และเมื่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นจะได้ว่า Q_R จะขึ้นอยู่กับค่าเอนโทรปีของสารทำความเย็นส่วน Q_C นั้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำร้อนและความจุความร้อนจำเพาะของน้ำคงที่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลกลับเข้ามา (ECDWT)และไหลออกไป(LCDWT) จากคอนเดนเซอร์ซึ่งได้แสดงสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการที่ (3.7) และ(3.8)

3.3 สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบทำความเย็น

จากความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนอีวาโปเรเตอร์(Q_{CH}) และคอนเดนเซอร์ (Q_C) กับกำลังงานที่ต้องใช้ในคอมเพรสเซอร์ (kW) ที่เกิดขึ้นภายในวัฏจักรการทำความเย็นรูปที่ 3.3 นั้นจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณทั้ง 3 ได้สามได้ดังสมการที่ (3.9)



รูปที่ 3.3 แสดงสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นระบบทำความเย็น

$$Q_C = Q_{CH} + kW \quad (3.9)$$

จากสมการที่(3.9) จะเห็นได้ว่ากำลังงานที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์นั้นจะขึ้นกับทั้ง Q_C และ Q_{CH} ซึ่งปริมาณทั้งสองนั้นได้ถูกนำเสนอมาแล้วในรูปของสมการที่ (3.5) และ(3.8) นอกจากนั้นกำลังงานที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์ยังสามารถที่แสดงสมการความสัมพันธ์กับภาระการทำความเย็น (TON)

บทที่ 4

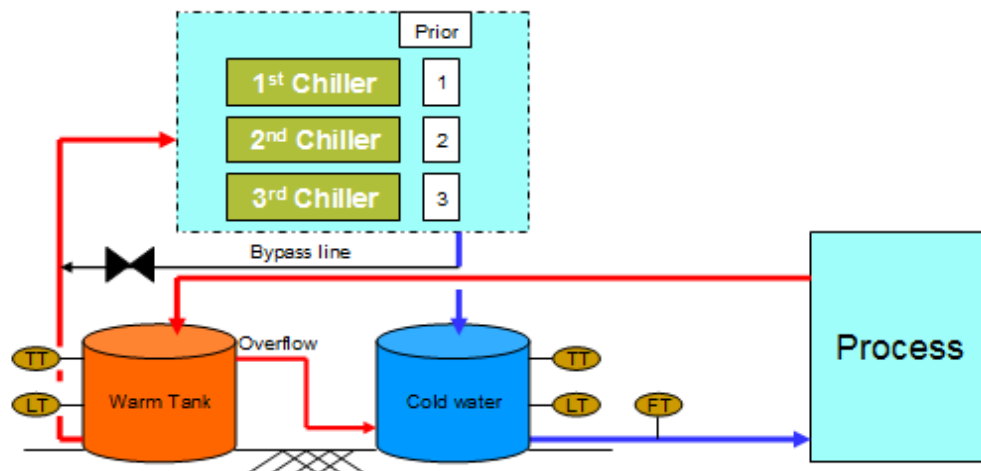
แบบจำลองและกระบวนการการดำเนินการของระบบทำความเย็น ในกระบวนการผลิตผงพีวีซี

การจำลองระบบเพื่อการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดของงานวิจัยในครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อที่จะทำให้เกิดการใช้พลังงานของระบบให้เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากภาระการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller load) และภาระของการใช้งาน (User load) ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตและสภาวะการทำงานของเครื่องที่ได้กำหนดไว้ซึ่งมีลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

4.1 เป้าหมายการดำเนินการ

การควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm) เพื่อจัดตารางการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นด้วยพิจารณาจากความต้องการโหลดทำความเย็นในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันซึ่งจำนวนเครื่องทำความเย็นมีทั้งหมด 3 ตัว

4.2 แบบจำลองและกระบวนการการดำเนินการของระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตผงพีวีซี



รูปที่ 4.1 แสดงถึงแผนภาพของกระบวนการผลิตของพอลิเมอร์ซึ่งจะมีเครื่องทำความเย็น 3 ตัว เป็นแหล่งผลิตน้ำเย็นเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

นำข้อมูลจริงจากโรงงานมาศึกษาร่วมกับแบบจำลองเพื่อหาค่าการดำเนินงานที่เหมาะสม โดยอาศัยการเขียนจำลองผ่านโปรแกรมแมทแล็บ(MATLAB) ตามสมการสำคัญดังนี้

4.2.1 สมการการ สมดุลพลังงานของเตาปฏิกรณ์ (Heat balance)

$$(m_M C_{PM} + m_P C_{PP} + m_{Wtot} C_{PW}) \frac{dT}{dt} = (-\Delta H_R) m_o \frac{dx}{dt} - a - b - c \quad (4.1)$$

โดยที่ x คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของวิซีเอ็มเป็นพีวีซี (Conversion rate).

ΔH_R คือ Heat of reaction (kJ/kg)

โดยกำหนดให้

- (1) ความร้อนที่สะสมที่ Jacket และ Condenser ไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากมีค่าน้อยมาก
- (2) ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกนอกระบบ
- (3) ความร้อนที่สะสมที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์น้อยมากเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของเตาปฏิกรณ์ ดังนั้นความร้อนนี้ไม่ถูกนำมาพิจารณา
- (4) กำหนดให้สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเป็นค่าคงที่

$$a = m_J C_{PW} (T_J - T_{J0}) \quad (4.2)$$

$$\alpha_J = \frac{m_J C_{PW}}{(UA)_J} \quad (4.2.1)$$

$$T_J = \frac{T + \alpha_J T_{J0}}{1 + \alpha_J} \quad (4.2.2)$$

$$T_{J0} = (T_{J,i-1} - T_{SCW}) / 2 \quad (4.2.3)$$

โดยที่ a คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ Double jacket reactor (kW)

m_J คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็นที่ผ่าน Double jacket reactor (kg/s)

C_{PW} คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kgK)

T_{J0} คือ อุณหภูมิขาเข้าของ Double jacket reactor (°C) ซึ่งหาค่าได้จากสมการ (4.2.1)

T_J คือ อุณหภูมิขาออกของ Double jacket reactor ($^{\circ}\text{C}$) ซึ่งหาค่าได้จากสมการ (4.2.2)

T_{SCW} คือ อุณหภูมิของ Supply chilled water ($^{\circ}\text{C}$)

$$b = m_{CD} C_{CD} (T_{CD} - T_{J0}) \quad (4.3)$$

$$\alpha_{CD} = \frac{m_{CD} C_{PW}}{(UA)_{CD}} \quad (4.3.1)$$

$$T_{CD} = \frac{T + \alpha_{CD} T_{CD0}}{1 + \alpha_{CD}} \quad (4.3.2)$$

$$T_{CD0} = (T_{CD,t-1} - T_{SCW}) / 2 \quad (4.3.3)$$

โดยที่

b คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ Condenser (kW)

m_{CD} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็นที่ผ่าน Condenser (kg/s)

C_{PW} คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kgK)

T_{CD0} คือ อุณหภูมิขาเข้า Condenser ($^{\circ}\text{C}$) ซึ่งหาค่าได้จากสมการ (4.3.3)

T_{CD} คือ อุณหภูมิขาออก Condenser ($^{\circ}\text{C}$) ซึ่งหาค่าได้จากสมการ (4.3.2)

$$c = m_W C_{PW} (T - T_W) \quad (4.4)$$

โดยที่

c คือ พลังงานความร้อนของน้ำที่เข้าไปใน Reactor (kW)

m_W คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่เข้าไปใน Reactor (kg/s)

C_{PW} คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kgK)

T คือ อุณหภูมิของการโพลิเมอร์ไรเซชันขาเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

T_{CD} คือ อุณหภูมิน้ำที่เข้า ($^{\circ}\text{C}$)

4.2.2 สมการสมดุลมวลสาร (Mass balance) [Kiparissides and shah, 1983]

$$\frac{dx}{dt} = K_I \sqrt{I} (1 + Q_X) \quad (4.5)$$

โดยที่

$$\frac{dI}{dt} = Ke^{-Ea/R(T+273.16)} \quad (4.5.1)$$

$$K_I = K_0 e^{-Ea/R(T+273.16)} \quad (4.5.2)$$

$$Q = \frac{(P(1-x_c)-1)}{x_c} \quad (4.5.3)$$

$$P = 27.0 - 0.14T \quad (4.5.4)$$

อัตราการแปลงวีซีเอ็มเป็นพีวีซี (Conversion rate) หาได้จากสมการที่ 4.6

$$x_t = x * Polym_TIME \quad (4.6)$$

โดยที่

x = อัตราการแปลงวีซีเอ็มเป็นพีวีซี fraction/sec

$Polym_TIME$ = เวลาของการโพลิเมอร์เซชัน (Sec/batch)

ความหนาแน่นของ วีซีเอ็มและพีวีซีหาได้จากสมการที่ 4.7.1 และ 4.7.2

$$d_{VC} = \left(353.705 + 615.9066 \times \left(\frac{156-T}{169.9} \right)^{0.41859} \right) \times 10^{-3} \quad (4.7.1)$$

$$d_{PVC} = 1.433 - 0.00078T \quad (4.7.2)$$

d_{VC} คือค่าความหนาแน่นของวีซีเอ็ม, kg/m³

d_{PVC} คือค่าความหนาแน่นของพีวีซี, kg/m³

T คืออุณหภูมิในการโพลิเมอร์เซชัน, Polymerization temperature (°C)

ในการควบคุมปฏิกิริยาช่วงท้ายของการโพลิเมอร์ไรเซชันจะมีการเพิ่มอุณหภูมิในโพลิเมอร์ไรเซชันเพื่อให้มีการใช้ตัวเริ่มกิริยา (Initiator) ถูกใช้ให้หมดซึ่งเทคนิคนี้จะถูกเลือกกว่า Heat-kick [Antonio Rodrigues Tacidelli, 2009] โดยการกำหนดค่า P_K ประมาณ 0.3-0.4 สำหรับเริ่ม Heat-kick

อัตราการเปลี่ยนแปลงของวีซีเอ็มเป็นพีวีซีจะพิจารณาจาก

1) ความดันลดลง (เปรียบเทียบกับทฤษฎีความดันไอ)

2) อุณหภูมิของโพลิเมอร์เซชัน

$$\log_{10} P_S = 3.9803 - \frac{883.44}{T_{AC} + 236.1} \quad (4.8)$$

$$P_K = \frac{P_S - P_{AC}}{P_S} \quad (4.9)$$

โดยที่

P_{AC} : ค่าสุดท้ายของความดันการเกิดปฏิกิริยา, end of the reaction pressure(bar abs)

T_{AC} : ค่าสุดท้ายของอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา, end of the reaction temperature ($^{\circ}\text{C}$)

P_S : ความดันไอของวีซีเอ็ม, Vapor pressure of VC at T_{AC} (bar abs)

P_K : ความดันสัมพัทธ์, Relative pressure.(-)

x : อัตราการเปลี่ยนแปลงของวีซีเอ็มเป็นพีวีซี, Conversion rate (%)

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของวีซีเอ็มเป็นพีวีซีสามารถคำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } P_K &\leq 0.5 \\ x &= 0.7453 + 0.63P_K - 0.5333(P_K)^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } P_K > 0.5 \text{ and } T_{AC} > 46.75^{\circ}\text{C} \\ x &= 0.922 + \left[\frac{T_{AC}}{100} - 0.376 - 4 \times 10^{-5} T_{AC} \right] (P_K - 0.5) \end{aligned} \quad (4.11)$$

ส่วนวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน(Chiller sequencing control algorithm) เพื่อควบคุมการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็นทั้ง3ตัวรูปที่ 4.2 สมการที่ใช้ประกอบในวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน

$$\dot{m}_i = \rho_i \dot{V}_i \quad (4.10)$$

$$\dot{Q}_{CL} = \dot{m}_{scw} C_{p_{scw}} (T_{RCW} - T_{SCW}) \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_R = \frac{\dot{Q}_i}{3517} \quad (4.12)$$

$$\dot{Q}_{Chilleri} = \dot{m}_{RCW} C_{p_{RCW}} (T_{RCW} - T_{Outputi}) \quad (4.13)$$

$$P = \frac{\sqrt{3}IV \cdot PF}{1000} \quad (4.14)$$

โดยที่

P = กำลังไฟฟ้า (Electric Power)

V = แรงดันไฟฟ้า (Electric Voltage) โวลต์ (Volt)

I = กระแสไฟฟ้า (Electric Current), แอมแปร์ (Amp)

PF = Power factor คืออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าใช้จริงกับกำลังไฟฟ้าปรากฏหรือกำลังไฟฟ้าเสมือน

ประสิทธิภาพการทำความเย็น(Coefficient of Performance, COP) ถูกใช้เปรียบเทียบระหว่างพลังความเย็นที่ผลิตได้กับพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องทำความเย็นจะได้ว่า

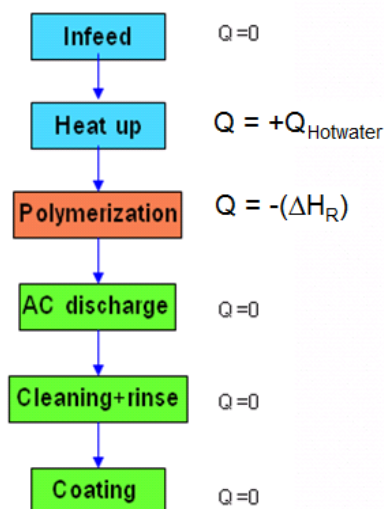
$$COP = \frac{Q_{Chilleri}}{P} \quad (4.15)$$

$$\sum_{i=1}^3 Q_{Chilleri} - Q_{CL} \geq \min(Q_{Chiller1}, Q_{Chiller2}, Q_{Chiller3}) \quad (4.16)$$

4.3 แบตช์โพลิเมอร์ไรเซชัน (Batch Polymerization)

ในการโพลิเมอร์ไรเซชันในแต่ละแบตช์สามารถแบ่งช่วงการดำเนินการออกเป็น 6 ช่วงดังต่อไปนี้

- 1) Infeed: ช่วงที่ทำการป้อนสารตั้งต้นเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ เช่น น้ำ, ตัวช่วยกระจาย (dispersing agent) ใช้สำหรับซัสเพนชันพีวีซี หรือ อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ใช้สำหรับอิมัลชันพีวีซี, วัชชีเอ็มและสาร ริเริ่ม (initiator)
- 2) Heat-Up: ช่วงที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิโดยเติมน้ำร้อนจนถึงค่าที่ต้องการตามเกณฑ์การผลิต
- 3) Polymerization: หลังการได้อุณหภูมิและปฏิกิริยาโพลิเมอร์เซชันก็เริ่มซึ่งจะมีการคายความร้อนตลอดเวลาโดยปฏิกิริยาสามารถควบคุมได้โดยใช้น้ำเย็นในการระบายความร้อน
- 4) AC discharge: หลังจากจบโพลิเมอร์เซชันพีวีซีที่ได้จะถูกส่งต่อไปเพื่อแยกวัชชีเอ็มที่หลงเหลือออกโดยการต้ม(Stripping process) และน้ำจะถูกแยกออกในกระบวนการแยกน้ำ(dewatering)และอบแห้ง(drying)
- 5) Cleaning+rinse: ขั้นตอนการล้างเตาปฏิกรณ์เพื่อป้องกันการหลงเหลือของ พีวีซี และตัวหยุดปฏิกิริยา(Inhibitor) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณภาพและอัตราการเกิดปฏิกิริยา
- 6) Coating: เติมสาร Anti-fouling ลงไปในผิวของเตาปฏิกรณ์เพื่อป้องกันพีวีซีเกาะระหว่างโพลิเมอร์เซชัน



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการทำงานช่วงการดำเนินการแบตช์โพลีเมอร์ไรเซชัน

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าช่วงการใช้น้ำเย็นจะอยู่เฉพาะช่วง Polymerization ดังนั้นในการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็นจะพิจารณาเฉพาะช่วง Polymerization เท่านั้น

4.4 เงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้

4.4.1 ขอบเขตอุณหภูมิของน้ำเย็นและน้ำร้อนที่ใช้ในการวิจัย

$$4^{\circ}\text{C} \leq \text{Supply Chilled Water} \leq 6^{\circ}\text{C}$$

$$10^{\circ}\text{C} \leq \text{Return Chilled Water} \leq 12^{\circ}\text{C}$$

$$30^{\circ}\text{C} \leq \text{Cooling Water} \leq 37^{\circ}\text{C}$$

4.4.2 อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายออกจากอีวาโปรเตออร์คือ 5°C ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและออก อีวาโปรเตออร์ ระหว่าง 5°C ถึง 11°C

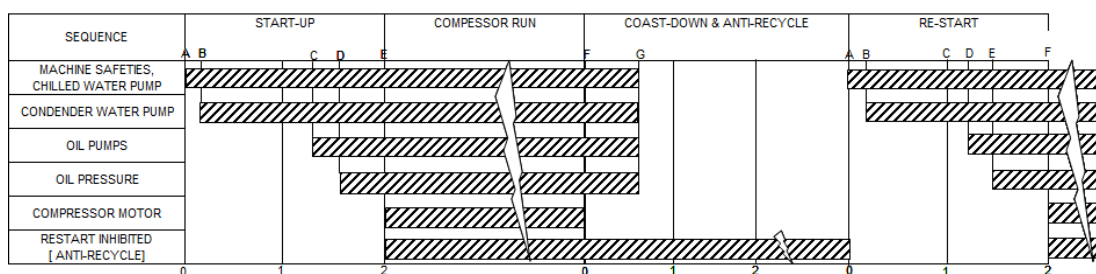
4.4.3 ภาระการทำความเย็น

ภาระการทำความเย็นสำหรับ 6 สายการผลิตและ ขนาดแบตช์ (Batch size) เวลาของการโพลีเมอร์ไรเซชัน (Time of polymerization) ไซเคิลของเวลาแบตช์ (Cycle time of batch) จะถูกกำหนดโดยใช้ข้อมูลจริงของโรงงาน

4.3.3 เงื่อนไขของการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็น (Constraints Function)

- 4.3.3.1 การปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็นจะต้องกระทำหลังจากเดินเครื่องมาแล้วไม่ต่ำกว่า 20 นาที ($T_{mu} > 20$ minutes) โดยไม่ควรปิดเครื่องทันทีหลังจากเปิดเครื่อง
- 4.3.3.2 การเปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็น จะต้องกระทำหลังจากปิดเครื่องไปแล้วไม่ต่ำกว่า 20 นาที ($T_{md} > 20$ minutes) โดยไม่ควรเปิดเครื่องทันทีหลังจากปิดเครื่อง
- 4.3.3.3 เครื่องทำความเย็นจะต้องไม่ Start มากกว่า 3 ครั้ง/ชม. เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องจักร
- 4.3.3.3 เครื่องทำความเย็นแต่ละตัว จะต้องไม่ Start เวลาเดียวกันเพื่อป้องกันใช้ไฟฟ้าสูงสุด

สำหรับวิธีการเริ่มเดินและหยุดเครื่องทำความเย็นจะมีลำดับขั้นตอนตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมเชิงตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้(Programmable Logic Control, PLC) เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ในช่วงระหว่างเริ่มใช้งานและหยุดทำงาน



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงลำดับการควบคุม (Control Sequence Sample) เครื่องทำความเย็น

ที่มา คือมือการใช้งานเครื่องทำน้ำเย็น(Chiller manual Carrier)

- โดยที่
- A = คำสั่งเริ่มทำงานซิลเลอร์ (Start initiated, Safeties checked)
 - B = ปั๊มของน้ำหล่อเย็นเริ่มทำงานหลังจากขั้นตอน A (Condenser water pump started [5 sec after A])
 - C = ตัวควบคุมตรวจสอบและยืนยันถึงความถูกต้องของการทำงานของอัตราการไหลของน้ำมัน (Controller Verifies Water Flow. All Oil Pumps Started). เวลาของขั้นตอนจะอยู่ระหว่าง 1 นาทีถึง 5 นาทีหลังจากขั้นตอน B [Minimum 1 Minute- Maximum 5 Minute after B])

D = ตรวจสอบความถูกต้องแรงดันของน้ำมันซึ่งขั้นตอนนี้จะเสร็จภายใน 15 วินาที หลังจากขั้นตอน C (Oil Pressure Verified [Within 15 Sec. after C])

E = คอมเพรสเซอร์เริ่มทำงานหลังจากขั้นตอน D 15 วินาที (Compressor Starts [10 Sec. after D])

F = คำสั่งหยุดทำงานของซิลเลอร์และคอมเพรสเซอร์หยุดทำงาน (Shut-down Initiated. Compressor Stops)

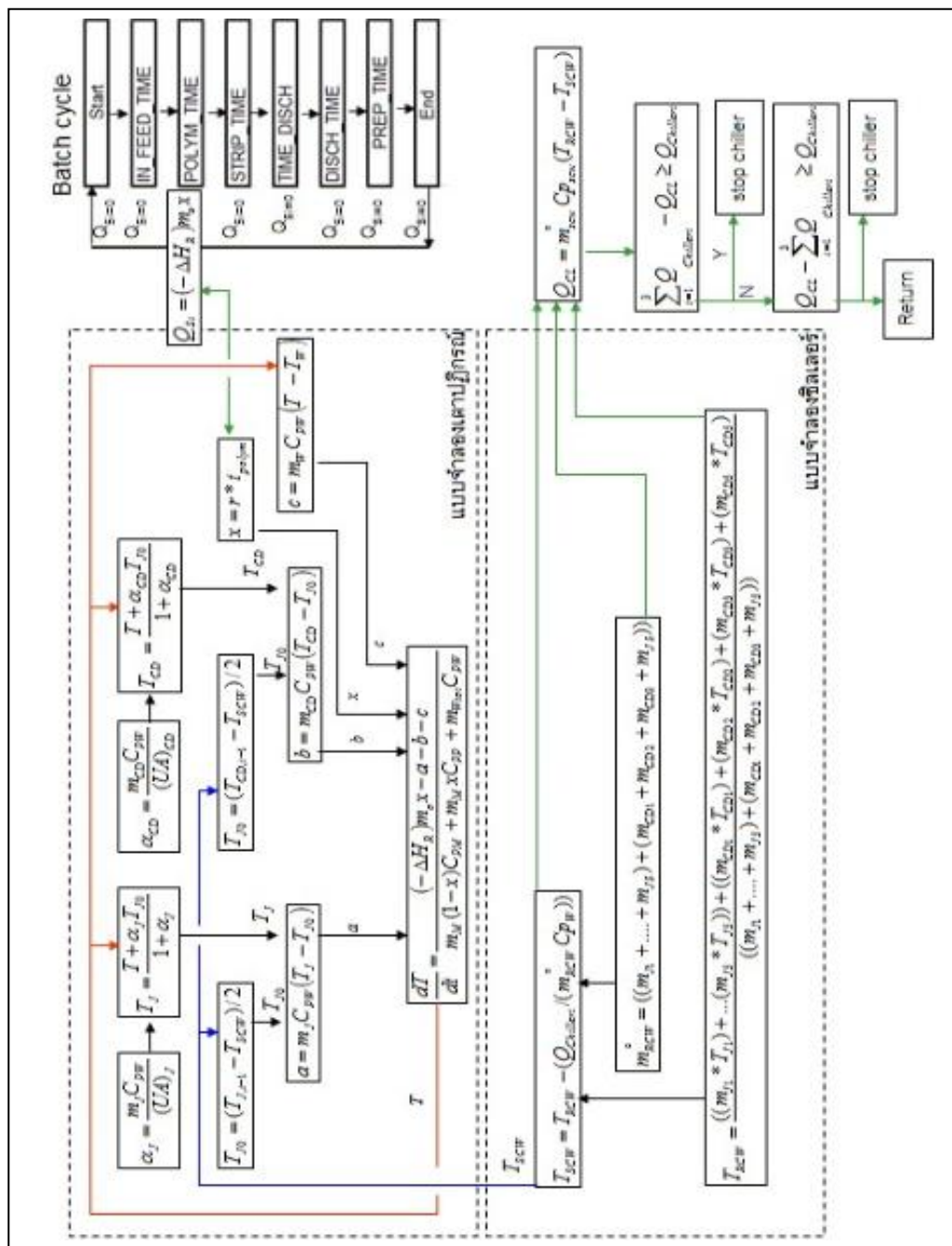
G = ปั๊มน้ำมัน, ปั๊มน้ำเย็นและปั๊มน้ำหล่อเย็นหยุดทำงานหลังจากขั้นตอน F 30 วินาที (Oil Pump, Evaporator and Condenser Pumps De-energized, Expect When Started contacts Welded [30 Sec. after F])

E To A [Start to Start] = ขั้นตอนการทำงานระหว่างการเริ่มทำงานของซิลเลอร์ต้องต่างกันอย่างน้อย 15 นาที (15 Minutes Minimum)

F To A [Stop to Start] = ขั้นตอนการทำงานระหว่างการเริ่มทำงานและหยุดทำงานของซิลเลอร์ต้องต่างกันอย่างน้อย 3 นาที (3 Minutes Minimum)

4.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ แบบจำลองที่ใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับการอธิบายพฤติกรรมต้นแบบของกระบวนการที่สนใจศึกษา ในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการเริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาของกระบวนการจริงที่ได้ศึกษาดังวิธีการตามแผนผังรูปที่ 4.5 ได้อธิบายลำดับขั้นตอนการนำแบบจำลองมาใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.4 แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในกรณีวิจัย

ค่าที่จะนำไปใช้งานคือ T_J , T_{CD} และ m_J , m_{CD} เป็นค่าคงที่

$$T_{RCW} = \frac{((m_{J1} * T_{J1}) + \dots (m_{J5} * T_{J5})) + ((m_{CD1} * T_{CD1}) + (m_{CD2} * T_{CD2}) + (m_{CD3} * T_{CD3}) + (m_{CD5} * T_{CD5}))}{((m_{J1} + \dots + m_{J5}) + (m_{CD1} + m_{CD2} + m_{CD3} + m_{J5}))} \quad (4.14)$$

โดยที่

T_{RCW} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นที่ไหลวนกลับ (Return chilled water), °C

$$\dot{m}_{RCW} = ((m_{J1} + \dots + m_{J5}) + (m_{CD1} + m_{CD2} + m_{CD3} + m_{J5})) \quad (4.15)$$

โดยที่

\dot{m}_{RCW} คือ อัตราไหลของน้ำเย็นที่ไหลวนกลับ (kg / s)

1, 2, 3,4,5,6 คือ lineการผลิต, คอนเดนเซอร์ของสายการผลิตที่ 4 ใช้น้ำหล่อเย็น (cooling water) จึงไม่ถูกนำมาคิด

$$T_{SCW} = T_{RCW} - (Q_{Chilleri} / (\dot{m}_{RCW} C_{pW})) \quad (4.16)$$

$$Q_{Chilleri} = 6993.33 \text{ kJ/s} \quad \text{Chiller มีจำนวน 3 ตัว}$$

นำ T_{SCW} ไปแทนในสมการที่ (2C) และ (3C) และ (9)

$$Q_{CL} = \dot{m}_{scw} C_{p_{scw}} (T_{RCW} - T_{SCW}) \quad (4.17)$$

โดยที่

Q_{CL} ภาระของการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น(kW)

เงื่อนไขการเริ่มทำงานหรือการหยุดทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นจะพิจารณาจากสมดุลพลังงานและเงื่อนไขบังคับ

$$\sum_{i=1}^3 Q_{Chilleri} - Q_{CL} \geq Q_{Chilleri} \quad \text{และ} \quad \text{ระดับของถังเก็บน้ำเย็นมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์}$$

ระบบจะทำการหยุดเครื่องทำความเย็น 1 ตัว

$$Q_{CL} - \sum_{i=1}^3 Q_{Chilleri} \geq Q_{Chilleri} \quad \text{และ} \quad \text{ระดับของถังเก็บน้ำเย็นน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์}$$

ระบบจะทำการเริ่มการทำงานของเครื่องทำความเย็น 1 ตัว

บทที่ 5

การทดลองและข้อมูลการทดลอง

จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาและศึกษาการทำงานของระบบภายหลังจากการปรับเปลี่ยนลักษณะการทำงานแบบเดิมของระบบหลังจากนั้นทำการปรับปรุงการทำงานของเครื่องทำความเย็นและนำไปปฏิบัติใช้ในโรงงานซึ่งโปรแกรมจะถูกสร้างไว้ในระบบควบคุมของโรงงาน(Distributed control system: DCS)

5.1 ระบบอุปกรณ์และเครื่องจักรในโรงงาน

ระบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักที่ถูกติดตั้งและใช้งานในการศึกษา ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รายการและขนาดของอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการศึกษา

Equipment	Number	Capacity	Operation
Autoclave	1	140 m3	Batch
	3	120 m3	Batch
	2	60 m3	Batch
Chillers	3	Cooler 4667kW,700m3/hr,Compressor 1420 kW	Continuous
Chilled Water Storage Tank	1	1100 m3	Continuous
Chiller Water Supply Pump	3	1000 m3/hr, P 4bar and E.m. 160 kW	Continuous
Return Chilled Water Storage Tank	1	1100 m3	Continuous
Chilled Water Circulation Pumps	3	700m3/hr,P 3bar and E.m. 90 kW	Continuous

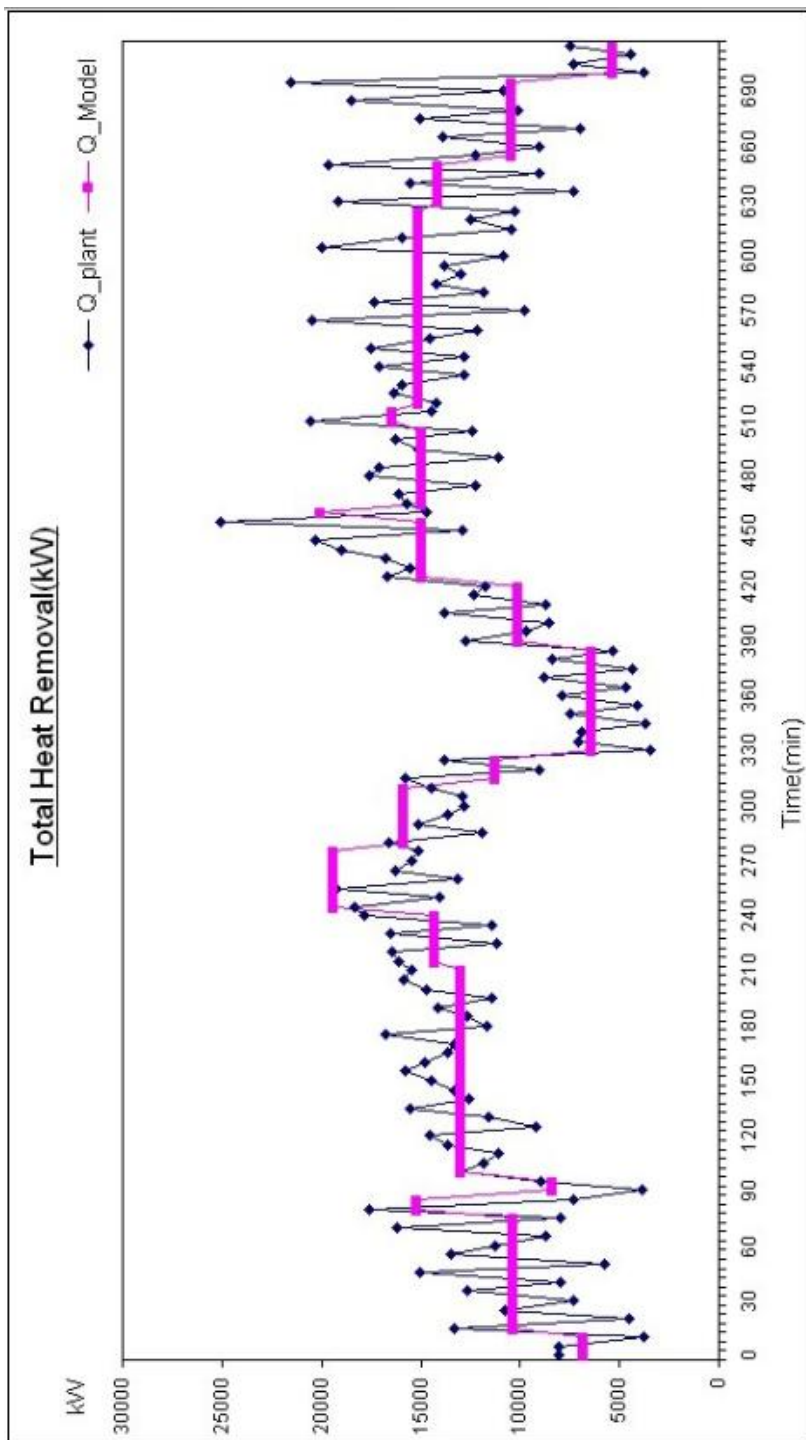
5.2 ข้อมูลที่ใช้สำหรับแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์(Reactor)และระบบผลิตน้ำเย็น (Chiller system)

นำข้อมูลจริงจากโรงงานมาศึกษาร่วมกับแบบจำลองเพื่อหาค่าการดำเนินงานที่เหมาะสม โดยอาศัยการเขียนจำลองผ่านโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ตามสมการสำคัญในบทที่ 4 ซึ่งข้อมูลค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้ในโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3

การศึกษาดำเนินการเครื่องทำความเย็นและสร้างแบบจำลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ใช้ข้อมูลค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตจริงดังแสดงในตารางที่ 5.2-5.3 เป็นค่าสถานะการดำเนินการจริงที่โรงงานเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) และเลียนแบบกระบวนการโดยเทียบจากค่าการคายความร้อนของกระบวนการผลิตดังรูปที่ 5.1 เพื่อนำไปหาตารางการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นดังรูปที่ 5.2 จากผลการจำลองสามารถหยุดการทำงานของเครื่องทำความเย็นได้ 1-2 ตัว

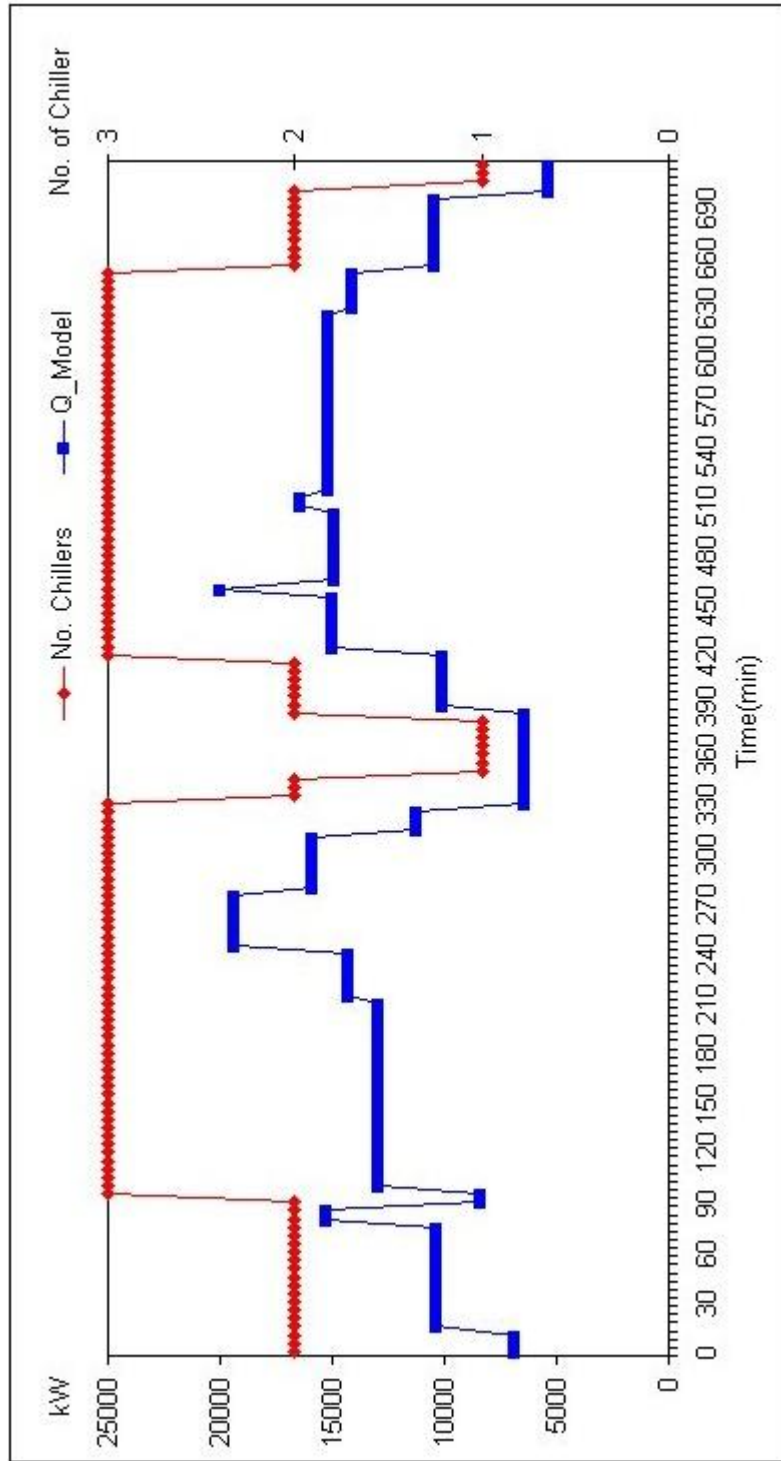
ตารางที่ 5.3 ไซเคิลของแบตช์ (batch cycle time)

ตัวแปร	หน่วย	S1	S2	S3	S4	S5	S6
INFEED_TIME	นาที	36	44	42	44	58	86
POLYM_TIME	นาที	293	204	267	221	320	321
STRIP_TIME	นาที	0	0	0	0	75	75
TIME_DISCH	นาที	0	8	0	23	54	34
DISCH_TIME	นาที	34	42	45	50	45	35
PREP_TIME	นาที	26	19	25	25	71	29
CYCLE_TIME	นาที	388	317	379	363	624	580



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าสถานะการดำเนินงานกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนโปรแกรมโดยใช้

โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB)



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงตารางการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็น

5.3 สภาวะการทดลองของระบบ

5.3.1 สภาพก่อนปรับปรุง

ลักษณะการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นก่อนปรับปรุงจะใช้อุณหภูมิของน้ำเย็นในการเริ่มและหยุดการทำงานของเครื่องทำความเย็นซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ถ้าอุณหภูมิของน้ำเย็นน้อยกว่า 3.5 องศาเซลเซียสจะมีสัญญาณเตือนมาที่ห้องควบคุม (Control room) เพื่อให้ผู้ควบคุม (Board man) พิจารณาสั่งเครื่องทำความเย็นให้หยุดทำงาน
- 2) ถ้าอุณหภูมิของน้ำเย็นมากกว่า 4.5 องศาเซลเซียสจะมีสัญญาณเตือนมาที่ห้องควบคุม (Control room) เพื่อให้ผู้ควบคุม (Board man) พิจารณาสั่งเครื่องทำความเย็นให้เริ่มทำงาน

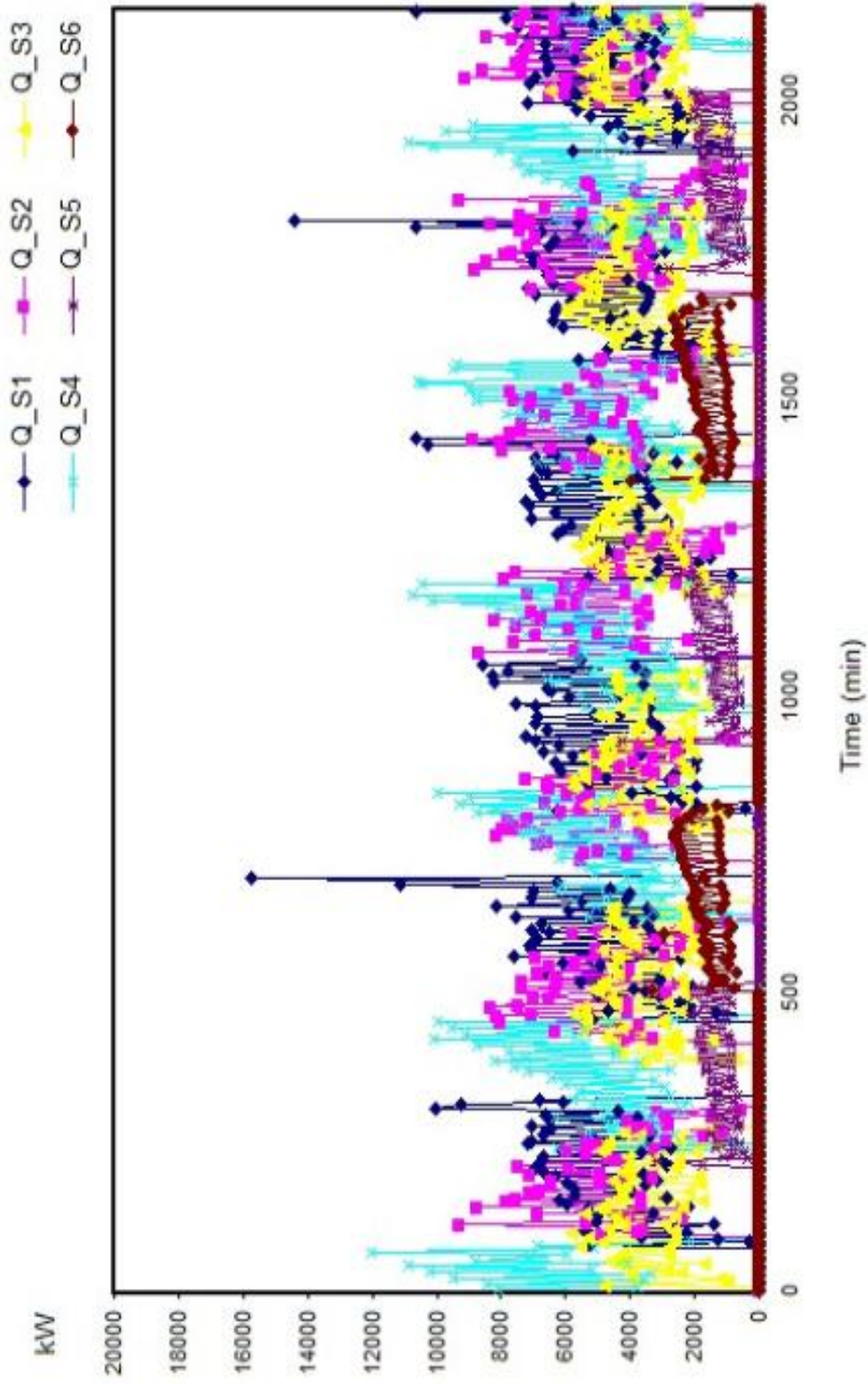
จากความแตกต่างของเวลาของไซเคิลแบตช์และการเริ่มแบตช์ที่ไม่พร้อมกันทำให้ช่วงของการพอลิเมอไรเซชันมีการทับซ้อนกันไม่มากโดยรูปที่ 5.3 คือกราฟแสดงการขจัดความร้อนของแต่ละสายการผลิตซึ่งพบว่าเครื่องทำความเย็นมีหยุดทำงาน 1 ตัวจากทั้งหมด 3 ตัวประมาณ 4 ชั่วโมงต่อ 1 วัน โดยรูปที่ 5.4 แสดงช่วงการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็น (Chiller) ซึ่งเครื่องทำความเย็นจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 3.5 องศาเซลเซียสและเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิของน้ำเย็นมากกว่า 4.5 องศาเซลเซียสดังนั้นช่วงการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็น (Chiller) จะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 ตัว

ส่วนกรณีที่อัตราการใช้น้ำเย็น (Chilled water) สูงกว่าอัตราการผลิตน้ำเย็นของเครื่องทำความเย็นซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี หนึ่ง คือกรณีที่เครื่องทำความเย็น (Chiller) ทำงานไม่ครบ 3 ตัวดังรูปที่ 5.5 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระดับถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับช่วงการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น หรือ สองคือกรณีที่สายการผลิต (line production) มีการโพลิเมอไรเซชันซ้อนกันมากดังรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับของถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับอัตราการคายความร้อนรวมของสายการผลิตทั้งหมด ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำเย็นในถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) จะถูกใช้รองรับความไม่สมดุลดังที่กล่าวมาข้างต้นโดยที่ระดับน้ำจะแกว่งตัวอยู่ในช่วง 75-90 เปอร์เซ็นต์ของถัง

ข้อควรระวังจากความไม่เหมาะสมระหว่างอัตราการใช้น้ำเย็นและอัตราการผลิตน้ำ

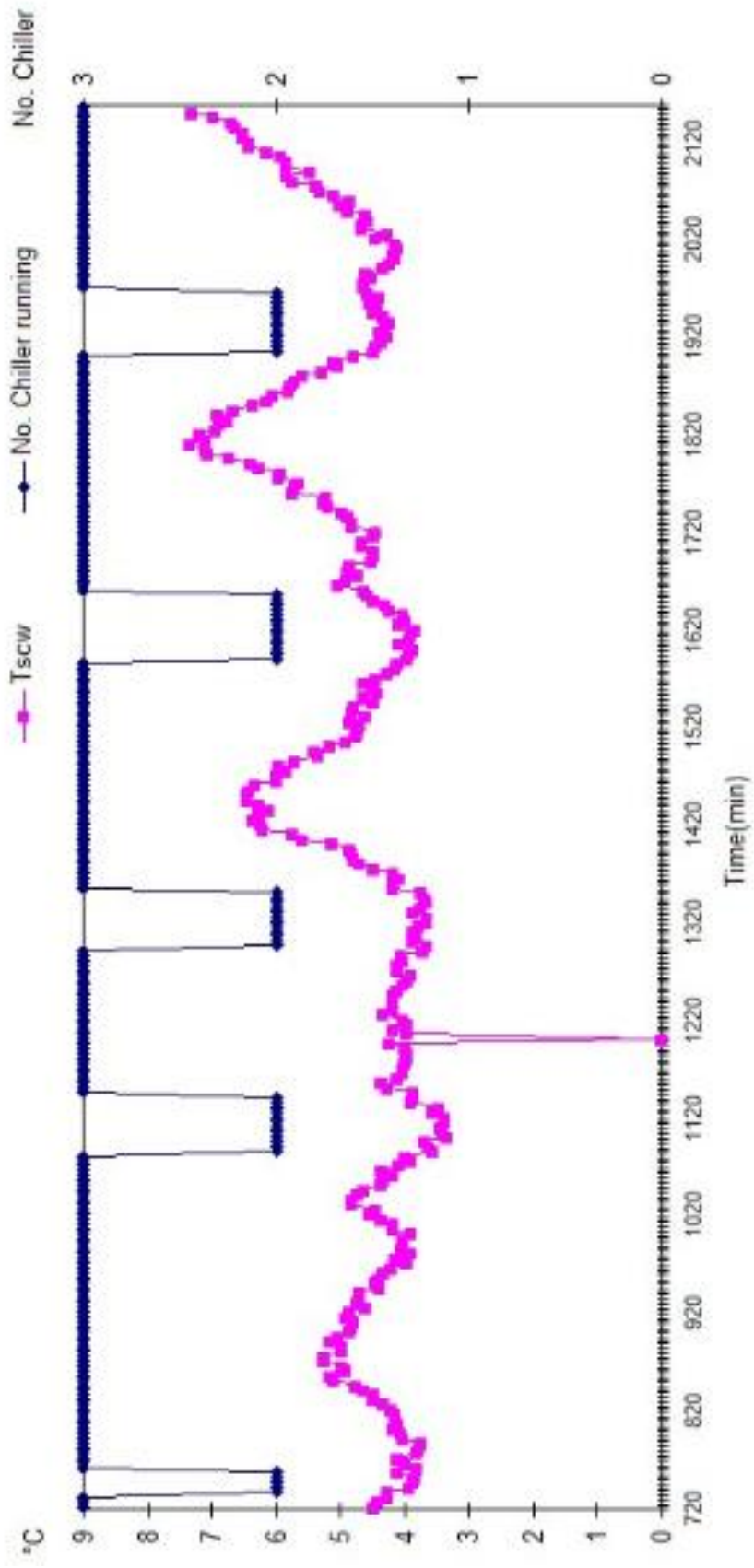
เย็นซึ่งในกรณีที่อัตราการใช้น้ำเย็นมากกว่าอัตราการผลิตน้ำเย็นจะทำให้ระดับของน้ำอุ่น (Retuned Chilled Water Tank) สูงขึ้นและไหลล้น (Overflow) ไปยังถังเก็บน้ำเย็น (Chilled Water Tank) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเย็นสูงขึ้นและเป็นผลให้อัตราการขจัดความร้อนในช่วง โพลีเมอร์เซชันลดลงและเวลาของแบตเตอรี่ไซเคิลยาวขึ้นหรือกรณีที่เลวร้ายสุดก็คือไม่สามารถ ควบคุมปฏิกิริยาได้และต้องป้อนสารยับยั้งปฏิกิริยา(Inhibitor) สุดท้ายได้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ ดังนั้นการควบคุมระดับน้ำของถังน้ำเย็นที่เหมาะสมจึงเป็นตัวแปรสำคัญจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้

Heat removal of S1-S6 during 7/03/09-8/03/09



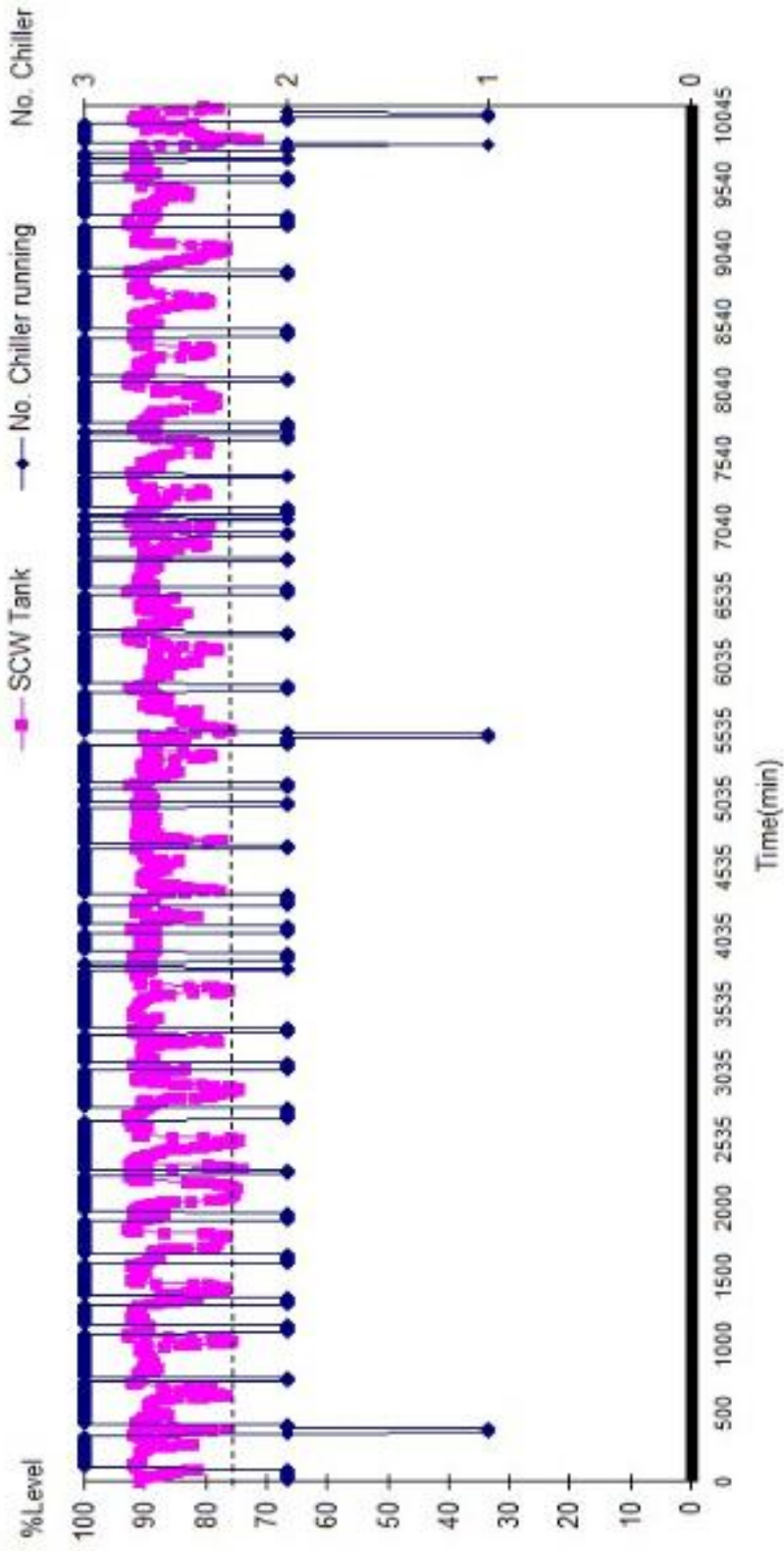
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการวัดความร้อนของแต่ละสายการผลิต

Chillers start/stop on 8 -Mar-09



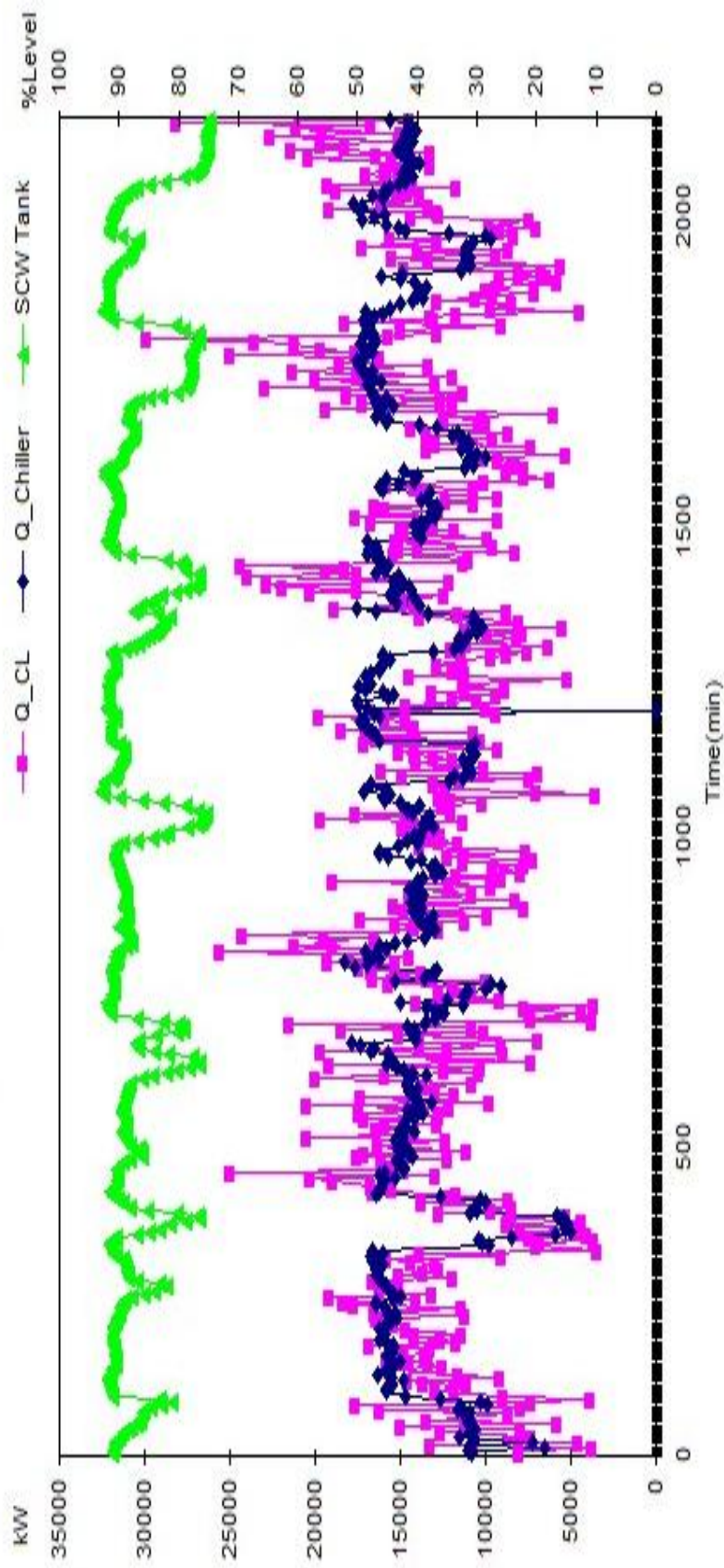
รูปที่ 5.4 ช่วงการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นและอุณหภูมิของน้ำเย็น

Chillers start/stop during 7/3/09-14/03/09



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระดับเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับช่วงการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น

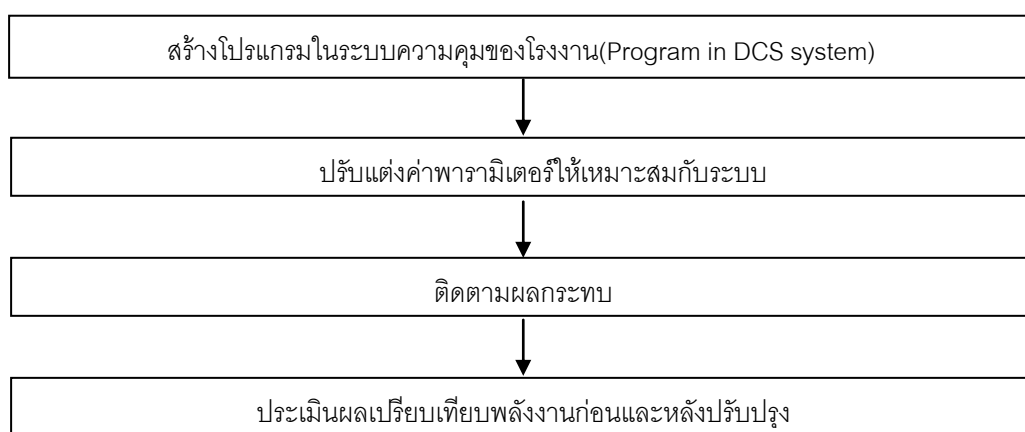
Total heat removal during 7/03/09-8/03/09



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับของถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับอัตราการคายความร้อนรวมของสายการผลิตทั้งหมด

5.4 การนำไปปฏิบัติใช้ในโรงงาน (Industrial Implementation)

นำแบบจำลองที่ได้ศึกษาแล้วมาประยุกต์ใช้ในโรงงานโดยโปรแกรมควบคุมการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็นซึ่งมีวิธีดำเนินการดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วิธีการดำเนินการและนำไปการนำไปปฏิบัติในโรงงานซึ่งโปรแกรมจะสร้างในในระบบควบคุมแบบกระจาย (Distributed control system: DCS).

โรงงานที่ทำการศึกษาคจะใช้ระบบ DCS ในการควบคุมดังนั้นวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอนจึงถูกเขียนลงในระบบ DCS โดยตารางที่ 5.5 แสดงพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้คำนวณหาภาระการทำความเย็นสูงสุดของเครื่องทำความเย็น (Chillers) แต่ตัวเพื่อคำนวณเปรียบเทียบกับความต้องการของสายการผลิตทั้งหมดโดยมีเป้าหมายที่จะจัดตารางการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นโดยแสดงแผนภาพการทำงานของวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอนสำหรับการเริ่มและหยุดทำงานของเครื่องทำความเย็นซึ่งมีเงื่อนไขที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. กำหนดลำดับของเครื่องทำความเย็นลำดับที่หนึ่ง, ลำดับที่สองและลำดับที่สามโดยที่เครื่องทำความเย็นที่มีค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น (Coefficient of performance: COP) สูงสุดจะถูกจัดให้เป็นลำดับที่หนึ่งส่วนลำดับที่สองและลำดับที่สามคือเครื่องทำความเย็นที่มีค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นรองลงมาตามลำดับ

2. เงื่อนไขทั่วไปของการเริ่มทำงานและหยุดทำงานของเครื่องทำความเย็น
 - ก. เครื่องทำความเย็นแต่ละตัวต้องเริ่มและหยุดทำงานต่างกันเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาทีต่อครั้ง
 - ข. ช่วงเริ่มทำงานหรือช่วงหยุดทำงานเครื่องทำความเย็นทั้งสามตัวต้องไม่พร้อมกัน
3. เงื่อนไขการหยุดการทำงานของเครื่องทำความเย็นซึ่งเครื่องทำความเย็นแต่ละตัวจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อ 1) เงื่อนไขทั้ง 3 ดังตารางที่ 5.4 และ 2) เงื่อนไขข้อ 2 เป็นจริงทั้งหมด

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการหยุดดำเนินการของเครื่องทำความเย็นแต่ละตัว

1. อัตราการผลิตน้ำเย็น	2. อุณหภูมิของน้ำเย็น (SCW))	3. ระดับของถังน้ำเย็น	เครื่องทำความเย็นหยุดทำงาน
น้อยกว่าอัตราการใช้น้ำเย็น	น้อยกว่า 4.5 องศาเซลเซียส	มากกว่า 88 เปอร์เซ็นต์	เครื่องทำความเย็นลำดับที่สาม
น้อยกว่าอัตราการใช้น้ำเย็น	น้อยกว่า 4.2 องศาเซลเซียส	มากกว่า 88 เปอร์เซ็นต์	เครื่องทำความเย็นลำดับที่สอง
น้อยกว่าอัตราการใช้น้ำเย็น	น้อยกว่า 3.5 องศาเซลเซียส	มากกว่า 88 เปอร์เซ็นต์	เครื่องทำความเย็นลำดับที่หนึ่ง

4. เงื่อนไขการเริ่มการทำงานของเครื่องทำความเย็นซึ่งเครื่องทำความเย็นแต่ละตัวจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อ 1) เงื่อนไข ข้อ 1 และ 2 หรือ 3 ในตารางที่ 5.5 เป็นจริง และ 2) เงื่อนไขข้อ 2 เป็นจริง

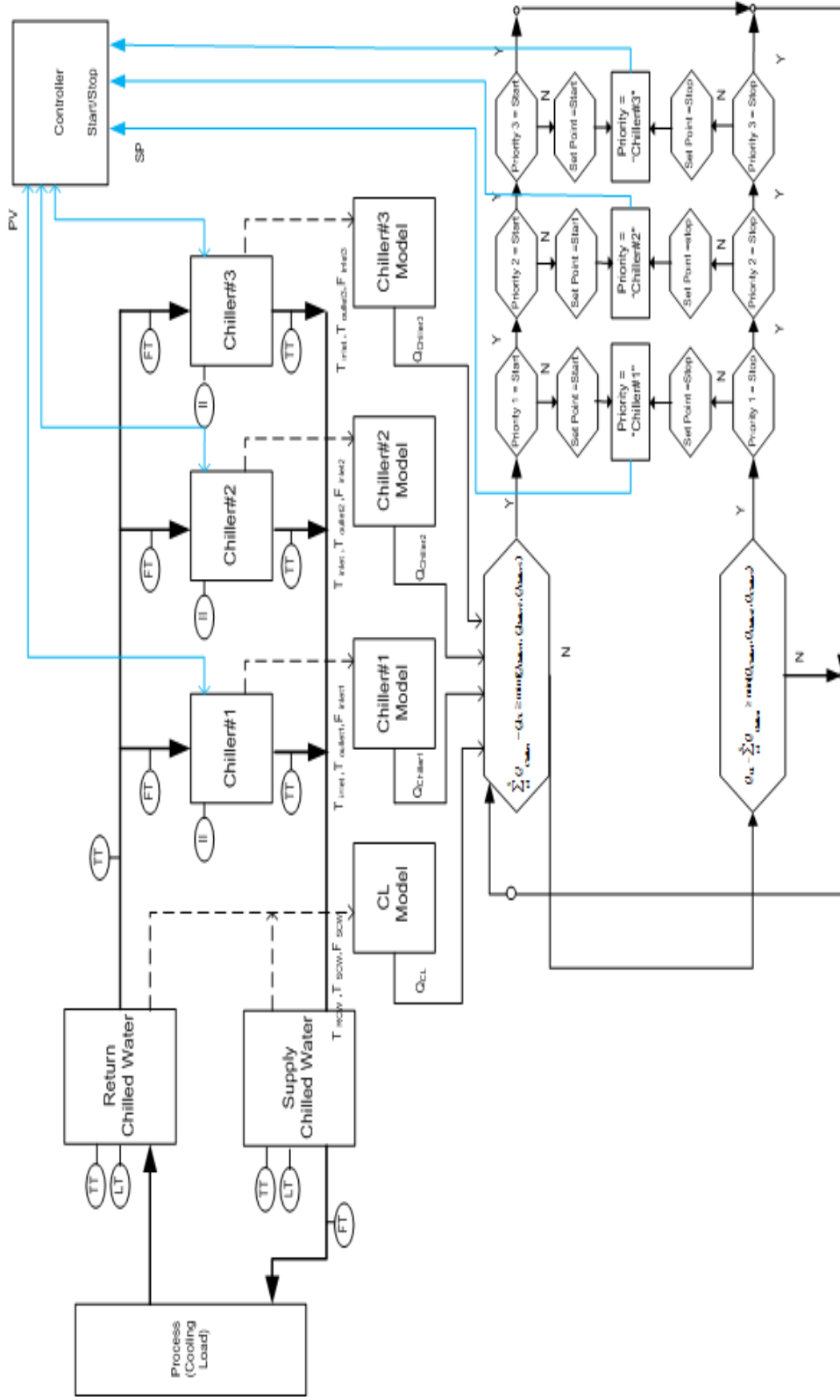
ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขการเริ่มดำเนินการของเครื่องทำความเย็นแต่ละตัว

1. อัตราการผลิตน้ำเย็น	2. อุณหภูมิของน้ำเย็น (SCW))	3. ระดับของถังน้ำเย็น	เครื่องทำความเย็นหยุดทำงาน
มากกว่าอัตราการใช้น้ำเย็น	น้อยกว่า 4 องศาเซลเซียส	น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์	เครื่องทำความเย็นลำดับที่สาม

มากกว่าอัตราการใช้น้ำเย็น	น้อยกว่า5 องศาเซลเซียส	น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์	เครื่องทำความเย็นลำดับที่สอง
มากกว่าอัตราการใช้น้ำเย็น	น้อยกว่า6 องศาเซลเซียส	มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์	เครื่องทำความเย็นลำดับที่หนึ่ง

ตารางที่5.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญของโปรแกรมของวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอนในระบบ DCS

พารามิเตอร์		คำอธิบาย	หน่วย
Level	LI-CG001	Level of SCW Tank	%
	LI-CG011	Level of RCW Tank	%
Temperature	TI-CG001	Chilled water Temperature	°C
	TI-CG011	Return Chilled water Temperature	°C
	TI-CG2011	Outlet chilled water Temperature of Chiller No.1	°C
	TI-CG2012	Outlet chilled water Temperature of Chiller No.2	°C
	TI-CG2013	Outlet chilled water Temperature of Chiller No.3	°C
Motor	YM-CG2011	Start/stop Compressor motor No.1	start/stop
	YM-CG2012	Start/stop Compressor motor No.2	start/stop
	YM-CG2013	Start/stop Compressor motor No.3	start/stop
Flowrate	FI -CG711	Chilled water flowrate to user	m3/h
	FI -CG2011	Flowrate of chiller no.1	m3/h
	FI -CG2012	Flowrate of chiller no.2	m3/h
	FI -CG2013	Flowrate of chiller no.3	m3/h
Current	II -CG7051	Motor current of Chiller no.1	Amp
	II -CG7052	Motor current of Chiller no.2	Amp
	II -CG7053	Motor current of Chiller no.3	Amp

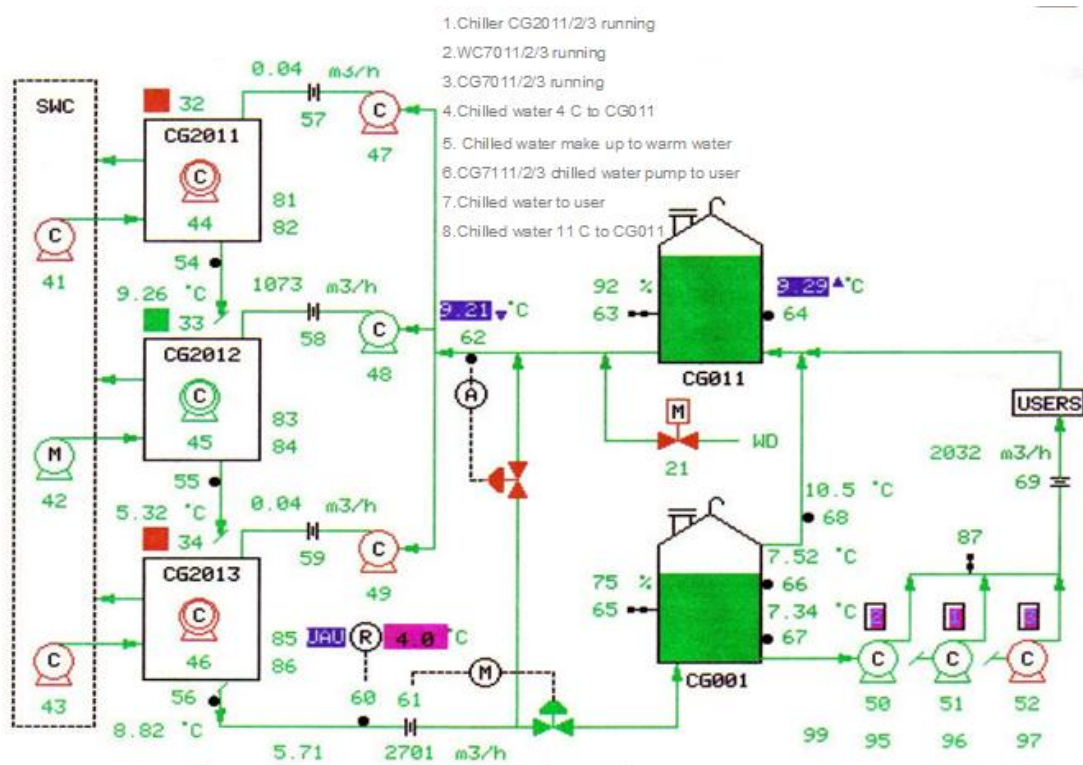


รูปที่ 5.8 แผนภาพแสดงการทำงานของวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอนของ LCP (Logic Controlled Program) เพื่อ start/stop chiller

สภาพหลังปรับปรุง

รูปแบบของการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm) โดยรูปที่ 5.9 ผู้ควบคุม (Board man) สามารถเลือกการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็นเป็น 2 แบบคือ การควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic control) และการควบคุมไม่อัตโนมัติ (Manual control)

การควบคุมแบบอัตโนมัติ(Automatic control) โปรแกรมจะใช้แบบวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm) ซึ่งตารางการทำงานของเครื่องทำความเย็นจะถูกจัดโดยโปรแกรมส่วนการควบคุมไม่อัตโนมัติ (Manual control) จะถูกเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติได้ด้วยอย่างเช่น level transmitter, Flow transmitter มีการวัดที่คาดเคลื่อนทำให้โปรแกรมคำนวณผิดพลาด



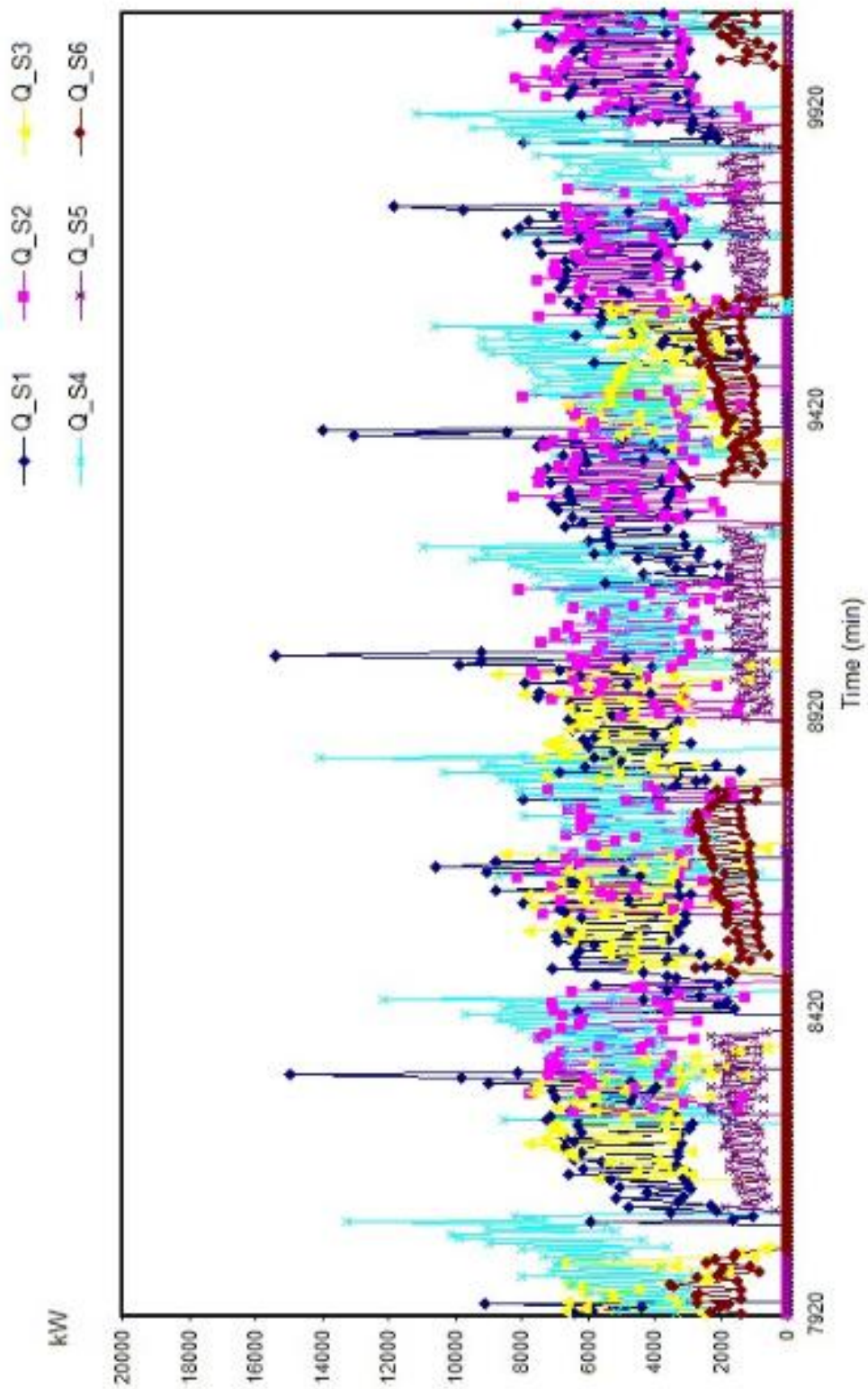
รูปที่ 5.9 แผนภาพแสดงการควบคุมระบบการทำความเย็นในระบบ DCS

จากการดำเนินงานของเครื่องทำความเย็นทั้ง 3 ตัวถูกควบคุมโดยระบบแบบอัตโนมัติและความแตกต่างของเวลาของไซเคิลเบตซ์และการเริ่มเบตซ์ที่ไม่พร้อมกันทำให้ช่วงของการโพลีเมอร์เซชันมีการทับซ้อนกันไม่มากโดยรูปที่ 5.10 ซึ่งเครื่องทำความเย็นมีการหยุดทำงานของบ่อยมากขึ้นในช่วงเวลา 30 นาทีจำนวน 1-2 ตัวดังรูปที่ 5.11 อุณหภูมิน้ำเย็นจะอยู่ประมาณ 4-5 องศาเซลเซียส

ส่วนกรณีที่ใช้ถ้ำการใช้น้ำเย็น (Chilled water) สูงกว่าอัตราการผลิตน้ำเย็นของเครื่องทำความเย็นซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี หนึ่ง คือการที่เครื่องทำความเย็น (Chiller) ทำงานไม่ครบ 3 ตัวสองคือการที่สายการผลิต (line production) มีการโพลีเมอร์เซชันซ้อนกันมากดังรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับของถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับอัตราการคายความร้อนรวมของสายการผลิตทั้งหมดซึ่งพบว่าปริมาณน้ำเย็นในถังเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) จะถูกใช้รองรับความไม่สมดุลดังที่กล่าวมาข้างต้นโดยที่ระดับน้ำจะแกว่งตัวอยู่ในช่วง 60-90 เปอร์เซ็นต์ของถังดังรูปที่ 5.12 ซึ่งกว้างกว่าสภาพก่อนปรับปรุง

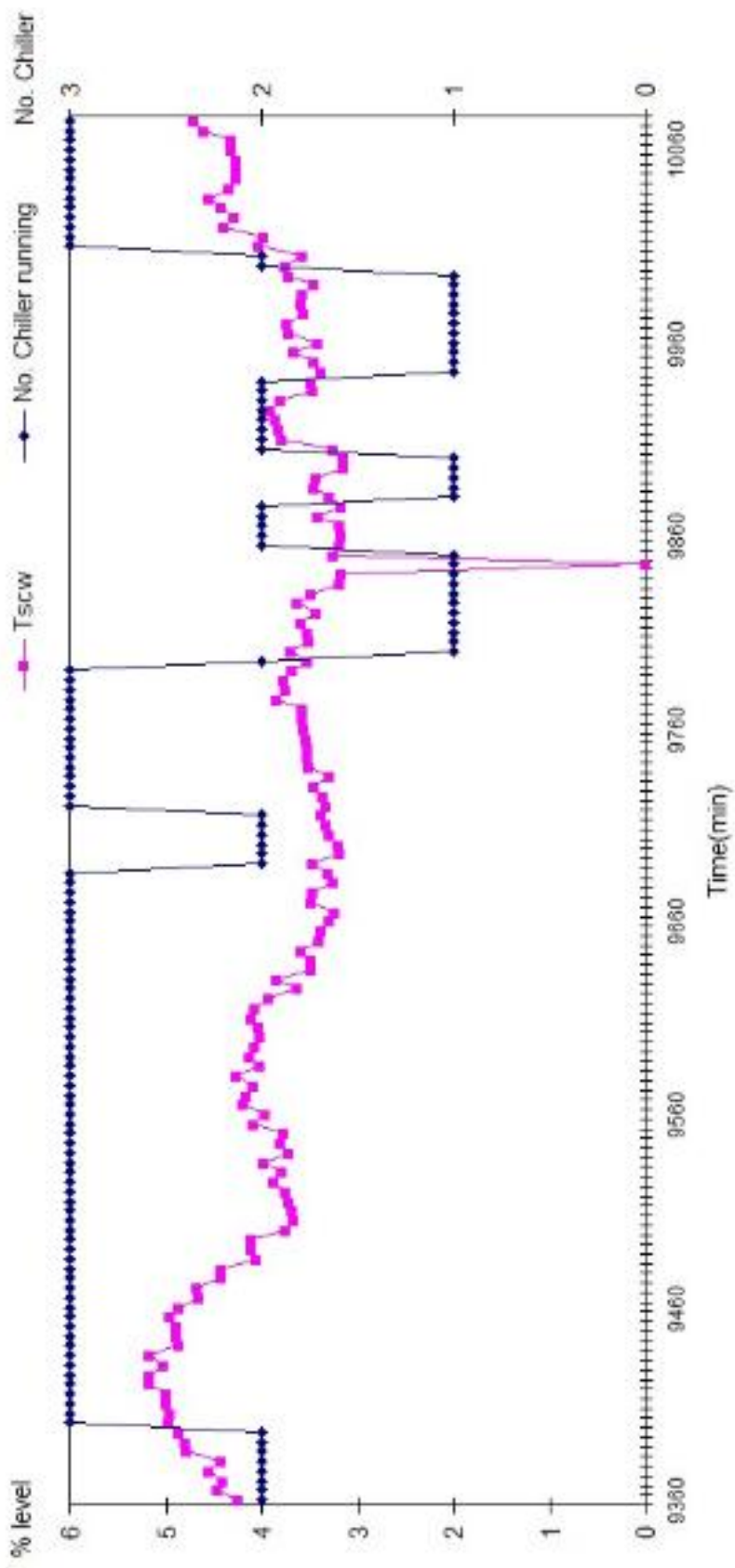
ค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น (Coefficient of performance: COP) จะถูกติดตามแบบออนไลน์ ดังรูปที่ 5.14 เพื่อกำหนดลำดับการทำงานของเครื่องทำความเย็น

Heat removal of S1-S6 during 1/07/09-8/07/09



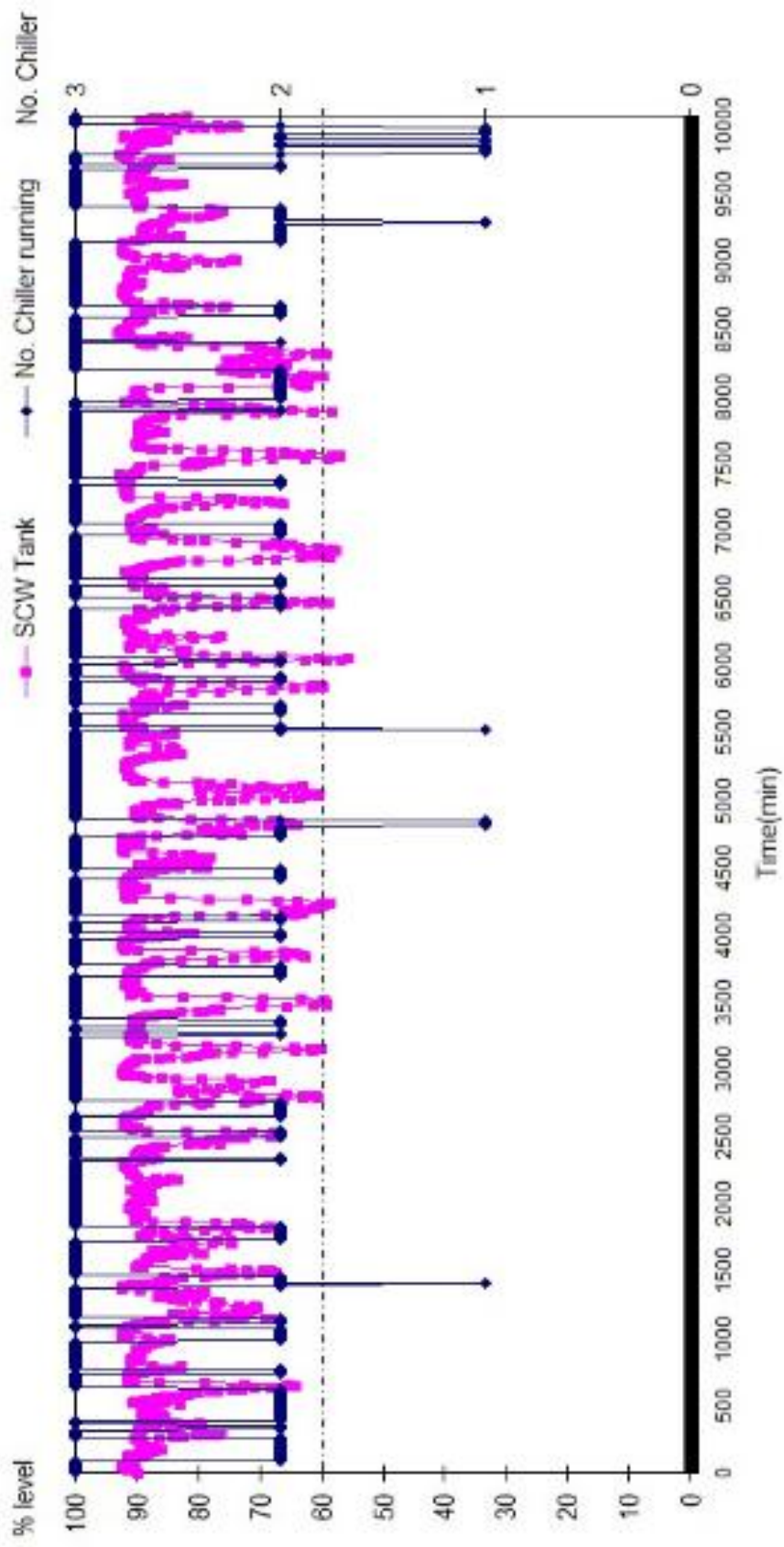
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการจัดการจุดความร้อนของแต่ละสายการผลิต

Chillers start/stop on 8-Jul-09



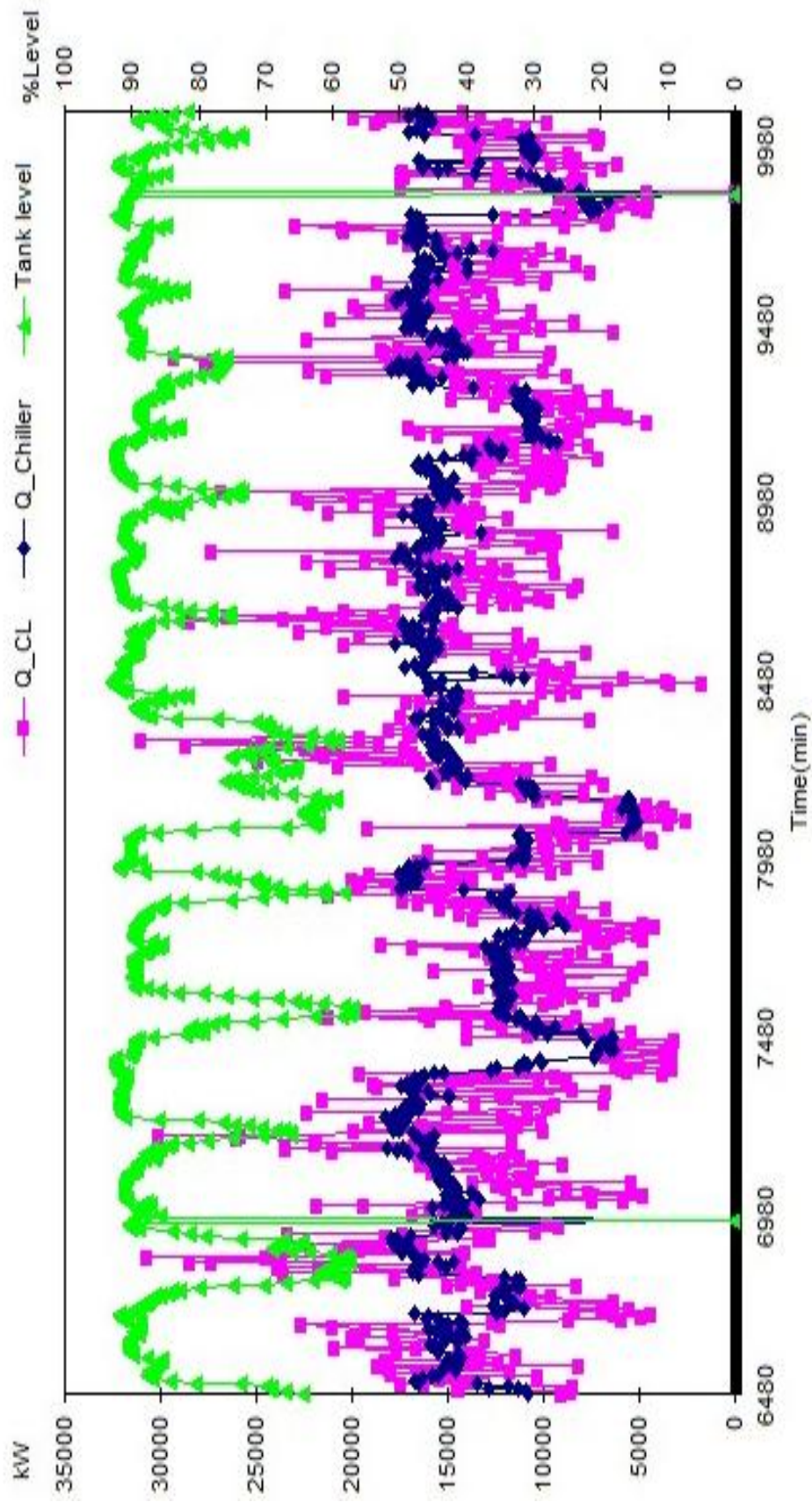
รูปที่ 5.11 แสดงการหยุดดำเนินการและการดำเนินการของเครื่องทำความเย็นระหว่าง 1 ตัวและ 2 ตัวที่ในช่วงเวลา 1 วัน

Chillers start/stop during 1/07/09-8/07/09



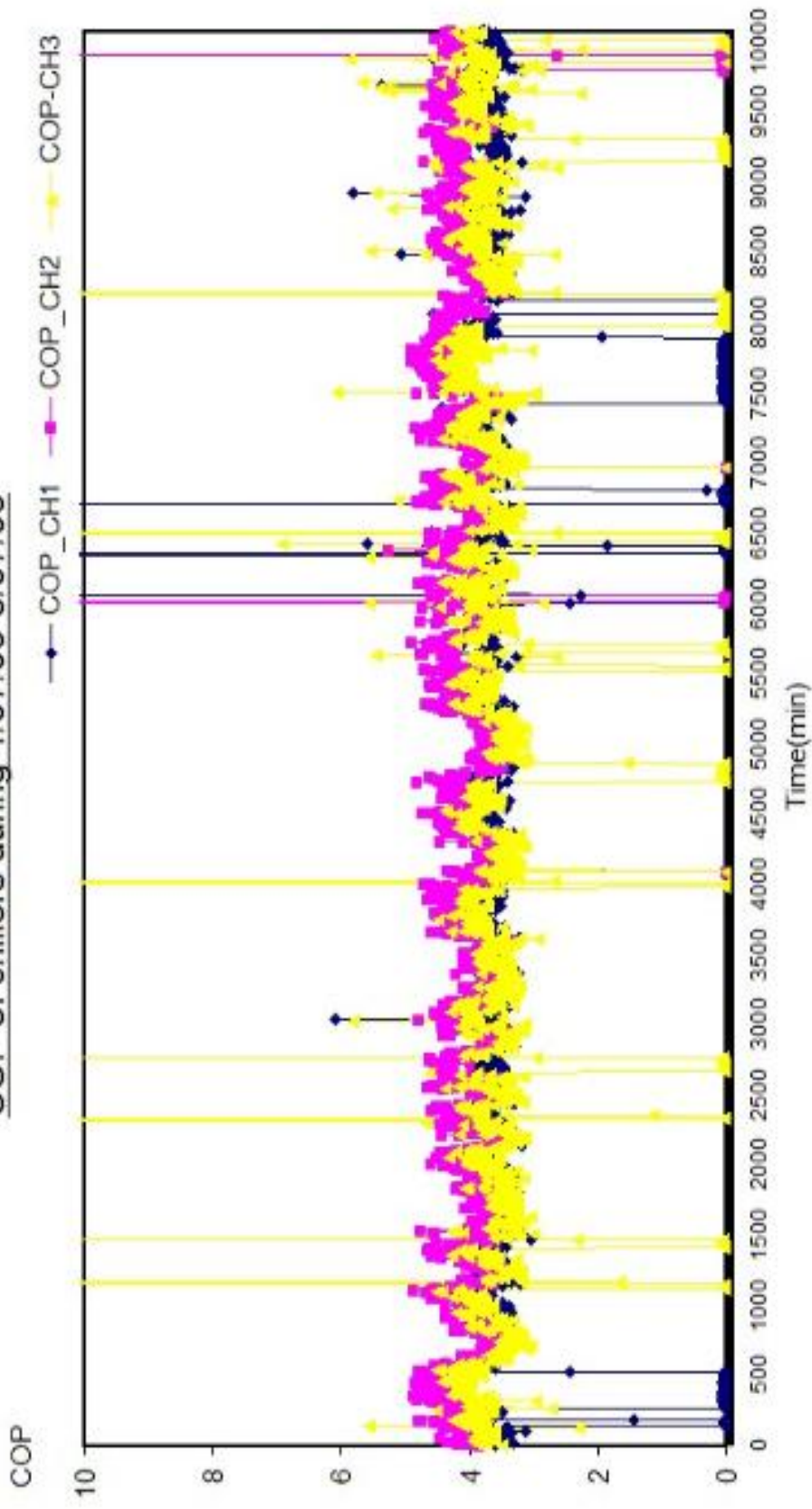
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระดับเก็บน้ำเย็น (SCW Tank) กับช่วงการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น

Total heat removal during 6/07/09-8/07/09



รูปที่ 5.13 แสดงความร้อนที่ออกจากระบบการผลิตและความสามารถในการนำเย็นในช่วงเวลา 2 วัน

COP of chillers during 1/07/09-8/07/09



รูปที่ 5.14 ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 ผลการทดลองและวิจารณ์

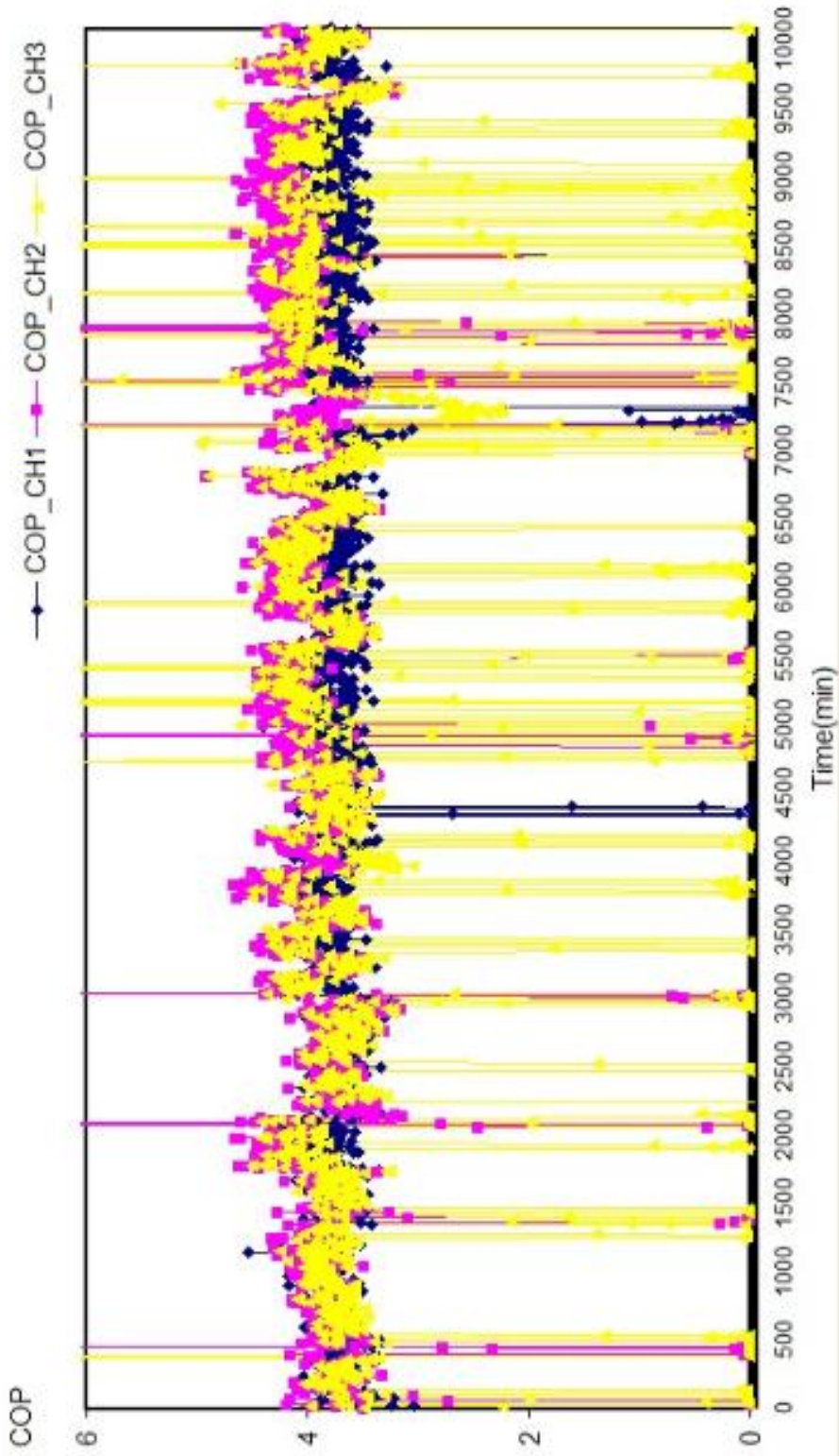
6.1.1 การหาสถานะที่เหมาะสมของระบบ

สำหรับการทดสอบระบบในขั้นแรกจะเริ่มต้นจากการเดินทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance) เพื่อจัดลำดับการเดินเครื่องทำความเย็นดังรูปที่ 6.1 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- เครื่องทำความเย็นเครื่องที่ 1 วัดกระแสไฟฟ้าใช้งานจริงได้ประมาณ 152.7 แอมแปร์และคำนวณค่า COP = 3.6
- เครื่องทำความเย็นเครื่องที่ 2 วัดกระแสไฟฟ้าใช้งานจริงได้ประมาณ 151 แอมแปร์และคำนวณค่า COP = 4.1
- เครื่องทำความเย็นเครื่องที่ 3 วัดกระแสไฟฟ้าใช้งานจริงได้ประมาณ 153 แอมแปร์และคำนวณค่า COP = 3.8

ดังนั้นเครื่องทำความเย็นเครื่องที่สองถูกจัดเป็นลำดับที่หนึ่งและเครื่องทำความเย็นที่สามและหนึ่งถูกจัดให้เป็นลำดับที่สองและลำดับที่สามในการเดินเครื่องทำความเย็นโดยวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm)

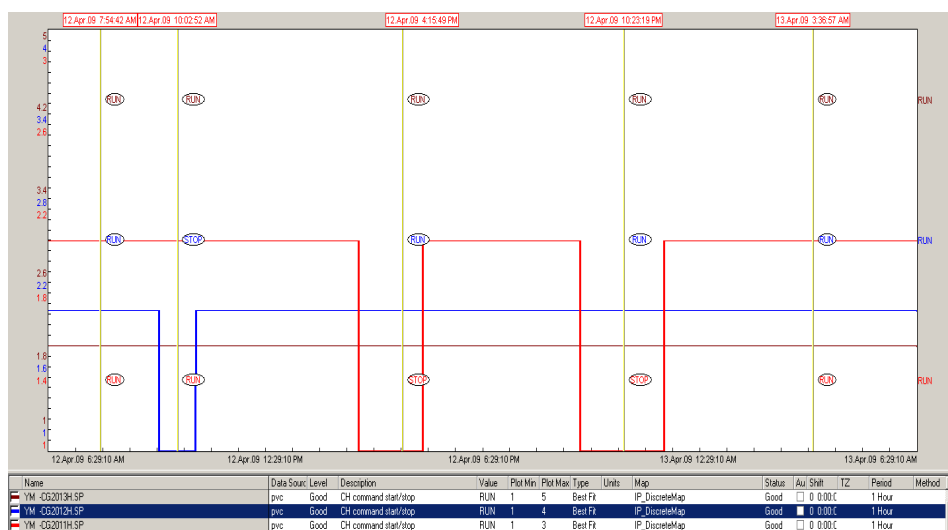
COP of chillers during 1/07/10-8/07/10



รูปที่ 6.1 ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP)

6.1.2 การวิเคราะห์รูปแบบของการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบเดิม

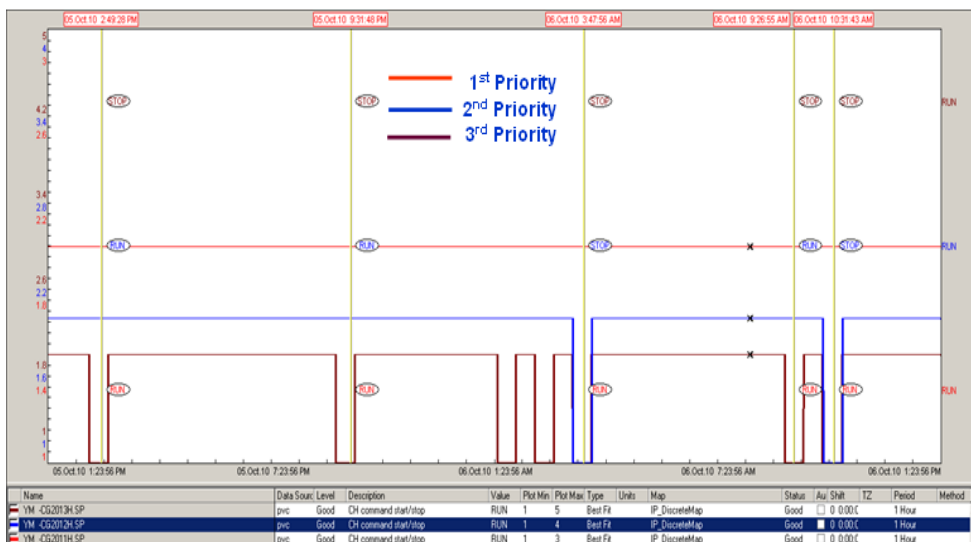
สำหรับการเดินเครื่องในสภาพปกตินั้น เครื่องทำน้ำเย็นลำดับที่หนึ่งจะถูกใช้งานตลอดเวลาส่วนลำดับที่สองและสามจะถูกใช้งานตามภาระการทำความเย็นโดยที่การทำงานจะใช้คนในการควบคุม (Manual control) สำหรับการเริ่มทำงานและหยุดทำงานของเครื่องทำความเย็นโดยพิจารณาจากอุณหภูมิของน้ำเย็นซึ่งปัญหาที่พบเกี่ยวกับการดำเนินการของระบบทำความเย็นคือการหยุดของเครื่องทำความเย็นที่ซ้ำทำให้สิ้นเปลืองพลังงานดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ลักษณะการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบดั้งเดิม

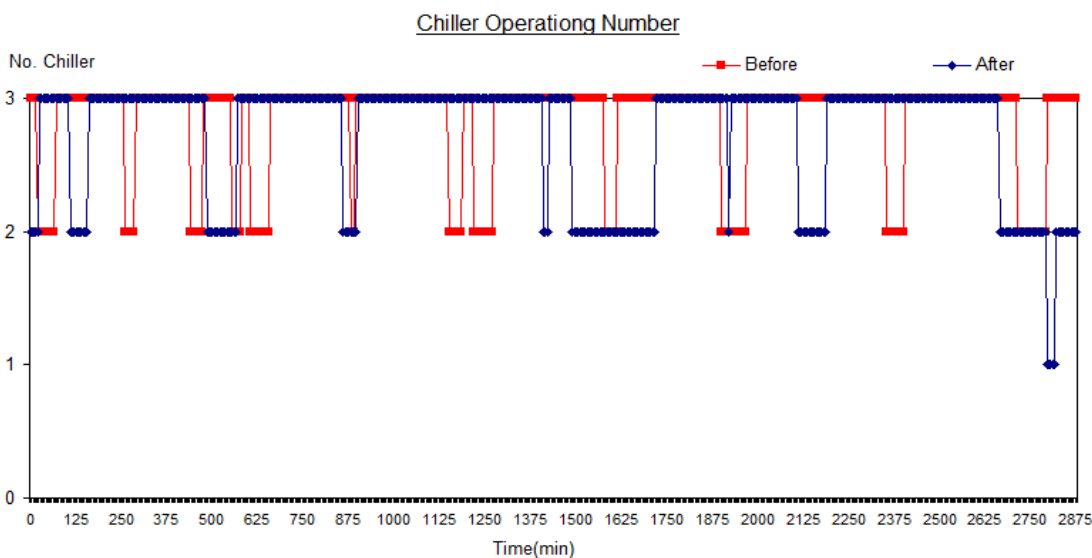
6.1.3 การวิเคราะห์รูปแบบของการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับขั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm)

เครื่องทำความเย็นทั้งสามตัวจะเริ่มทำงานและหยุดทำงานโดยการใช้เทคนิคการสมดุลพลังงานของระบบเพื่อหาช่วงดำเนินงานที่เหมาะสมเครื่องทำความเย็นทั้งสามตัวภายใต้ข้อจำกัดดังถูกกล่าวมาในบทที่ 5 ซึ่งผลที่ได้คือมีการหยุดทำงานของเครื่องทำความเย็นบ่อยมากขึ้นในส่วเวลา 20-30 นาที ดังรูปที่ 6.3

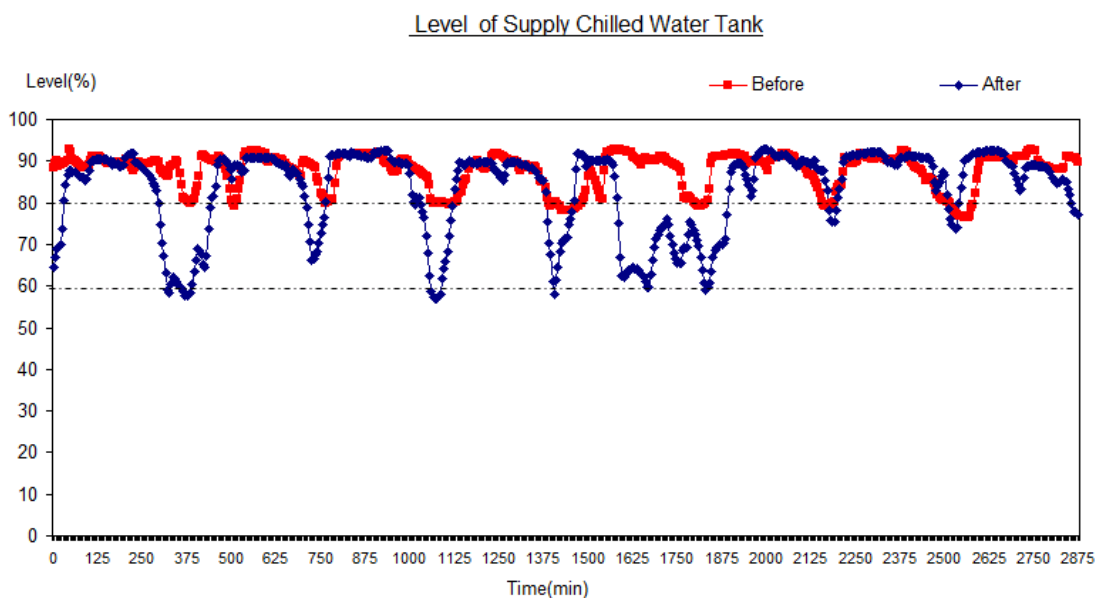


รูปที่ 6.3 ลักษณะการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบวิธีการควบคุมเครื่องทำความเย็นแบบลำดับชั้นตอน (Chiller sequencing control algorithm)

การเปรียบเทียบจำนวนการทำงานของเครื่องทำความเย็นก่อนและหลังงานการวิจัยแสดงดังรูปที่ 6.4 มีการหยุดทำงานของเครื่องทำความเย็นลำดับที่สามและลำดับที่สองบ่อยขึ้นเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลก่อนงานวิจัยซึ่งสอดคล้องกับช่วงการแกว่งตัวของระดับถังน้ำเย็นที่กว้างขึ้นดังรูปที่ 6.5 เพื่อรองรับความร้อนส่วนเกิน



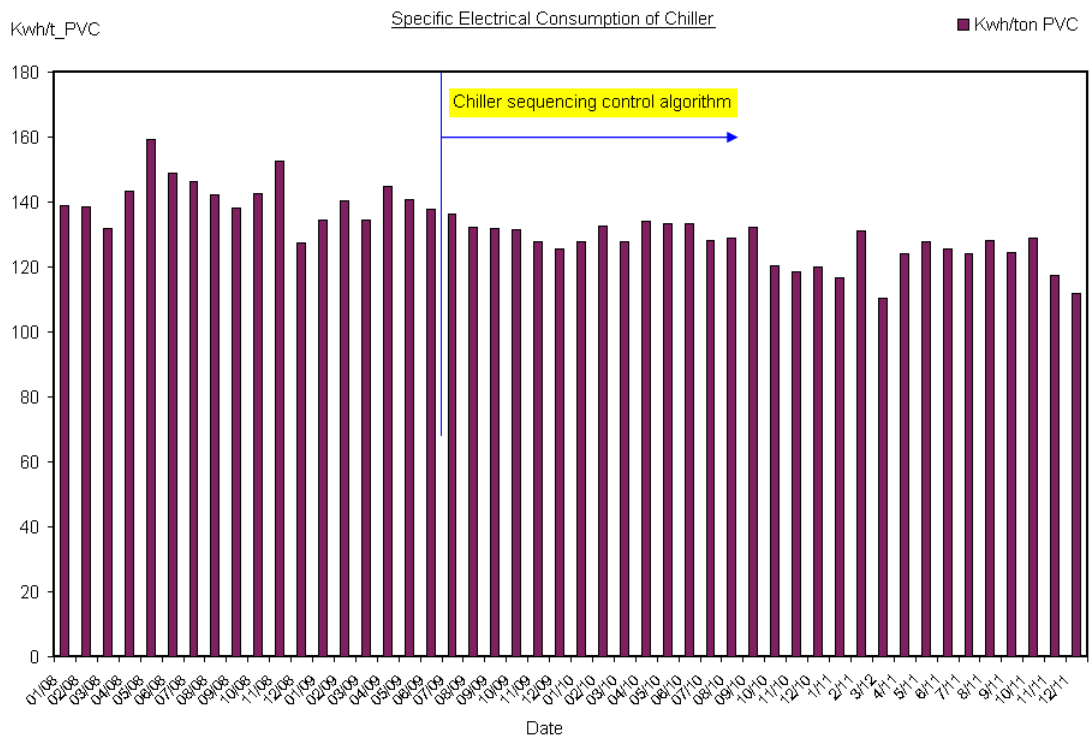
รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบข้อมูลก่อนงานวิจัยและหลังงานวิจัยของจำนวนการทำงานของเครื่องทำความเย็น (Chiller)



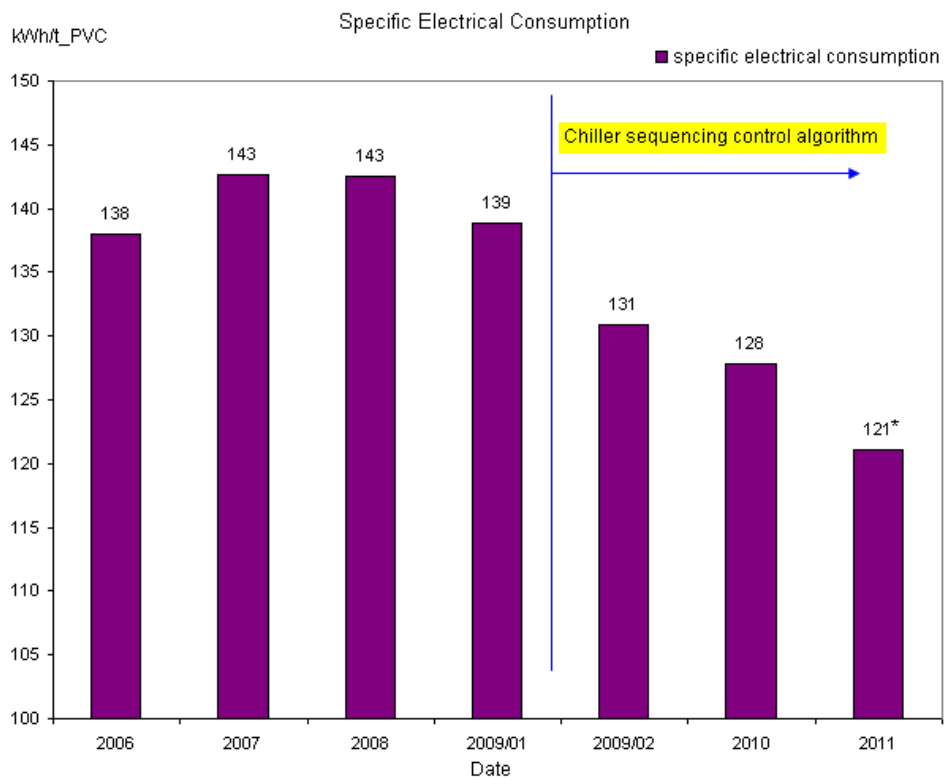
รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังงานวิจัยของช่วงการแกว่งตัวของระดับถังน้ำเย็น (Supply chilled water tank)

6.2. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมแบบลำดับการเดินเครื่องทำความเย็นสามารถลดการใช้พลังงานของไฟฟ้าของหน่วยผลิตน้ำเย็นลงได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์ของปี 2010 เทียบกับปี 2009 ดังแสดงในรูปที่ 6.6



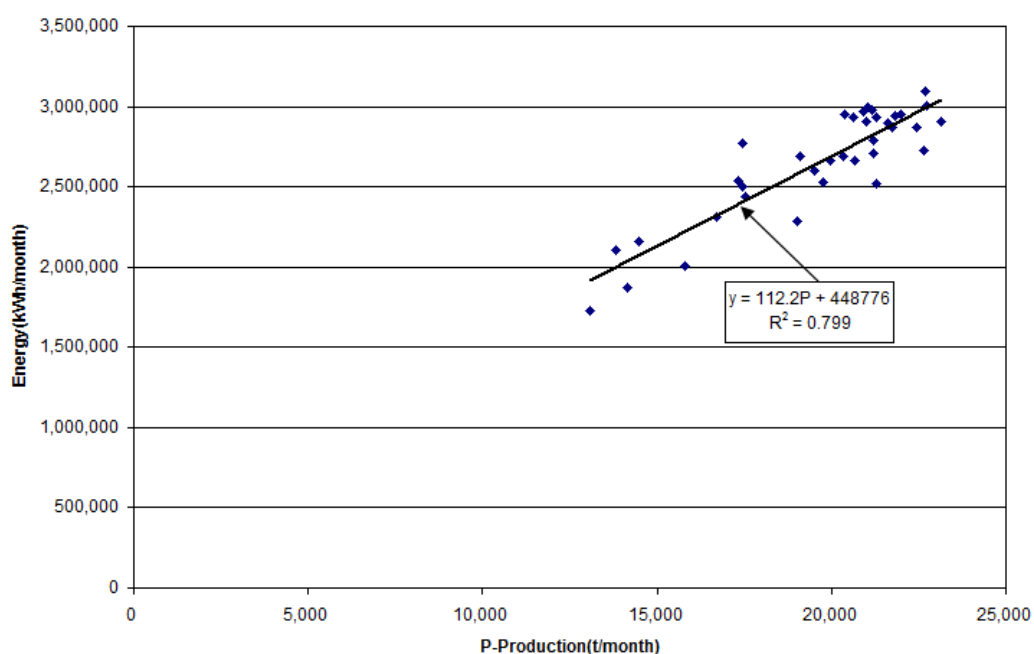
รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์ของแต่ละเดือนตั้งแต่ปี 2008 ถึง 2011



รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์ของแต่ละปีตั้งแต่ปี 2006 ถึง 2011

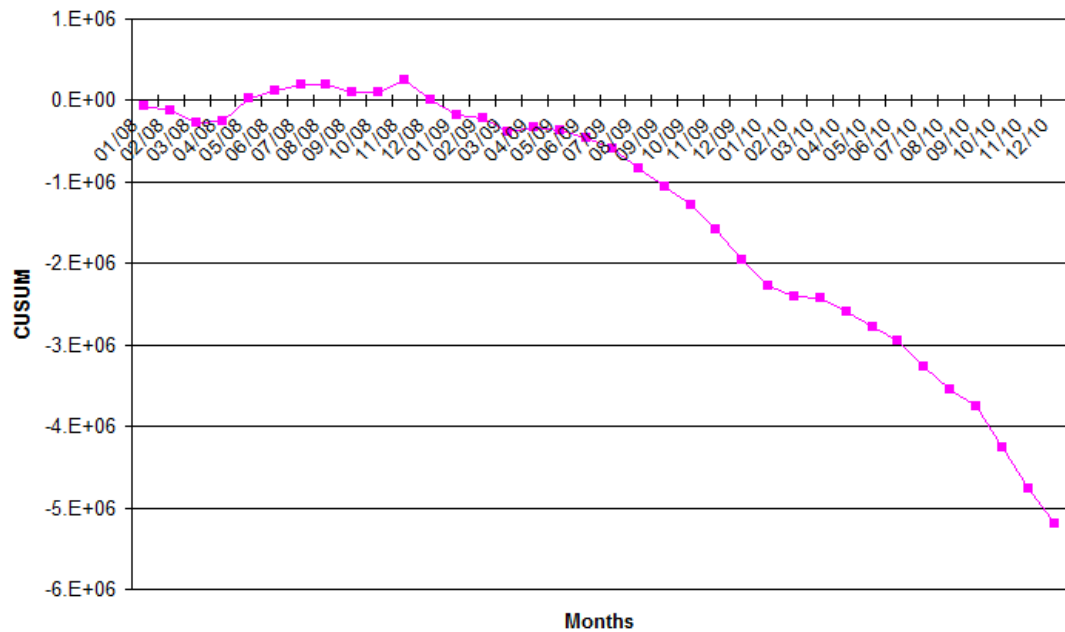
*มีการทำ high pressure cleaning ที่คอนเดนเซอร์ของเครื่องทำความเย็นระหว่างการซ่อมบำรุงใหญ่ในปี 2011.

สัดส่วนระหว่างการใช้พลังงานและการผลิต ($R^2 = 0.799$) แสดงในรูปที่ 6.8 ข้อมูลระหว่างปี 2008 ถึง 2010 ทั้งหมด 36 เดือนโดยใช้ข้อมูลปี 2008 เป็นฐานข้อมูลซึ่งจะเห็นนัยสำคัญของแนวโน้มการประหยัดพลังงานในปี 2009-2010 รูปที่ 6.9



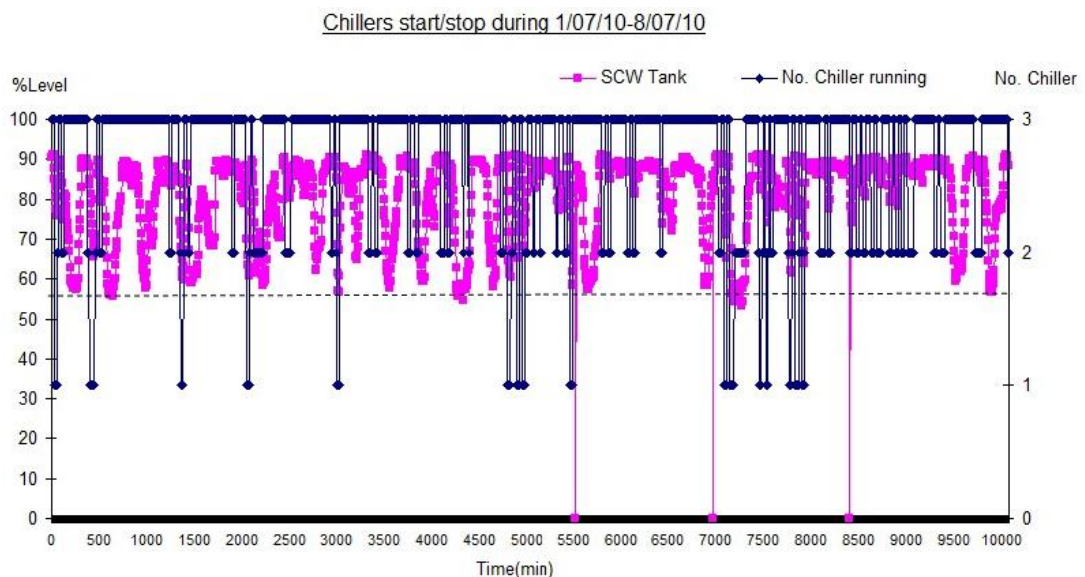
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับปริมาณการผลิตในแต่ละเดือน

(Energy Production Graph)



รูปที่ 6.9 CUSUM (Cumulative sum of difference)

โดยที่โปรแกรมถูกนำมาใช้งานตลอดตั้งแต่ปี 2009 ถึงปัจจุบันซึ่งรูปที่ 6.10 แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมในช่วงปี 2010



รูปที่ 6.10 แสดงตัวอย่างการดำเนินการของเครื่องทำความเย็น

นอกจากเป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำความเย็นเพื่อสามารถนำ ความรู้และผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากแบบจำลอง นำไปประยุกต์ใช้กับการดำเนินการของระบบทำ น้ำเย็น(Chiller system) ในกระบวนการผลิตพีวีซีเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสม และคุ้มค่าที่สุดแล้ว สามารถลดต้นทุนการผลิตด้านพลังงานได้ประมาณ 5เปอร์เซ็นต์และยังพบว่า ไม่มีผลกระทบต่อการควบคุมปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์แต่อย่างใด

6.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับระบบผลิตน้ำเย็น(Chiller system) ที่ถูกใช้ งานสำหรับกระบวนการผลิตแบบแบตช์ (Batch Process) ที่มีหลายสายการผลิต โดยการจัดการ ดำเนินการของระบบภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับของขนาดและกำลังการผลิตของอุปกรณ์ที่มีอยู่ ซึ่ง จากการได้นำไปประยุกต์ใช้จริงกับการดำเนินการของระบบทำน้ำเย็น (Chiller system) ใน กระบวนการผลิตพีวีซี ผลที่ได้พบว่ามีผลลดต้นทุนและสามารถประหยัดใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่าง เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าบางครั้งจะเกิดความไม่สมดุลระหว่างอัตราการผลิตและอัตรา การใช้น้ำเย็น และสามารถแก้ปัญหาได้โดยการใช้ถังน้ำเย็น (SCW tank) เป็นตัวรองรับความไม่ สมดุลที่เกิดขึ้น แต่ทั้งนี้ในกรณีที่มีการใช้น้ำเย็นมากซึ่งเกิดจากการจัดแบตช์ที่ไม่เหมาะสม จะมี ช่วงของการโพลีเมอร์เซชันซ้อนทับกันมาก ถึงเก็บน้ำเย็นนี้จะไม่สามารถรองรับความไม่สมดุลที่ เกิดขึ้นได้ ดังนั้นผู้ที่สนใจจะทำการศึกษาต่อ ควรศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการจัดแบตช์ของ สายการผลิต เพื่อคำนวณหาความต้องการการใช้น้ำเย็น และนำข้อมูลที่ได้ไปจัดตารางการ ดำเนินการของเครื่องทำความเย็น เพื่อจะได้ข้อมูลการลดต้นทุนและสามารถประหยัดใช้ พลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดอีกวิธีหนึ่ง

นอกจากนี้ข้อเสนอนี้เพิ่มเติมสำหรับงานอุตสาหกรรมใหม่คือการพิจารณาออกแบบ ขนาดของถังน้ำเย็น (Chilled water supply tank) ที่เหมาะสมเพื่อความยืดหยุ่นสำหรับการจัดการ กับช่วงการดำเนินการของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) และเพื่อเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่า ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ฉัตรชัย เปล่งสะอาด. การหาสภาพที่เหมาะสมของลำดับการเดินเครื่องทำน้ำเย็น.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2547.

ภาษาอังกฤษ

Antonio Rodrigues Tacidelli., Jose Jailso Nicacio Alves. Increasing PVC suspension polymerization productivity—An industrial application. Chemical Engineering and Processing 48 (2009):485–492.

Carrier Corporation (Owner: Vinythai Co. LTD).1990. Instruction Manual of Centrifugal Refrigeration Machine (Chiller package).

Don W. Green., Robert H. Perry.2008. Perry's Chemical Engineers' Hand Book. 8 th Edition. Section 11 Heat Transfer Equipment. McGraw-Hill.

Gongsheng, Huang., Shengwei,Wang., Fu Xiao, Yongjun, Sun 2008. A data fusion scheme for building automation systems of building central chilling plants. Automation in Construction 18 (2009): 302–309.

Kiparissides, C. and Shah, S. L. (1983). Self-tuning and stable adaptive control of a batch polymerization reactor, Automatica, 19(1983): 225.

Lewin, D. R. ., 1996, Modelling and control of an industrial PVC suspension polymerization reactor, Computer and Chemical Engineering, 20(1996): 865-870.

S.A. Zulkeflee., N. Aziz., C.K. Chan. Temperature Control in Polyvinyl Chloride Production: Internal ModelControl (IMC) and Proportional, Integral and Derivative (PID) controller. School of Chemical Engineering,Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia(2007).

Thomas, F. Optimization of Chemical Processes. 2nd Edition. USA: McGraw-Hill, 2001

Yongjun, Sun., Shengwei, Wang., Gongsheng, Huang. Chiller Sequencing Control with Enhanced Robustness For Energy Efficient Operation. Energy and Buildings, 41(2009):1246-1255.

Xiangming, Hua., Sohrab, Rohani., Arthur, Jutan. Cascade closed-loop optimization and control of batch reactors. Elsevier chemical Engineering science 59(2004): 5695 – 5708.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB)

ภาคผนวก ก

โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB)

โครงสร้างโปรแกรมจะประกอบได้ดังต่อไปนี้

- 1) สายการผลิตทั้ง 6 สายจะแทนโดย S1,S2,S3,S4,S5,S6
- 2) ในละสายการผลิตแบบออกเป็น Sector ย่อยได้อีก 31 Sector เป็นระยะเวลา 7วันและ
คำนวณตั้งแต่ 1-10080 นาที

ตารางที่ ก-1 แสดงการแบ่ง sector ในโปรแกรมแมทแล็บ

Line	Start	Sector1		Sector2		Sector29		Sector30		Sector31	
		start	stop	start	stop	start	stop	start	stop	start	Stop
S1	0	36	329	473	766						10080
S2	0	84	288	441	645	9443	9647	9760	9964	10077	10080
S3	0	122	389	519	786						10080
S4	0	164	385	561	782						10080
S5	0	118	438	742	1062						10080
S6	0	106	427	686	1007						10080

ตัวอย่างของโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB)

```
%%%%%%%%%%%%%% S1 %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
mj1 = 8945;
```

```
mcd1 = 2062.7;
```

```
mj2 = 11523.4;
```

```
mcd2 = 3872.6;
```

```
mj3 = 8171.8;
```

```
mcd3 = 3201.7;
```

```
mj4 = 12615.7;
```

```
mcd4 = 2597.9;
```

```
mj5 = 3263.4;
```

```
mcd5 = 1857.2;
```

```
mj6 = 3425.9;
```

```
mcd6 = 1855.5;
```

%% sector 1 %%%

mwtot = 51500;

m0 = 51500;

mj1 = 8945;

mcd1 =2062.7;

Cpw = 4.196;

Cpp = 1.43;

Cpm = 1.42 ;

Qchi = 6993.33*60;

x = 0.00296;

Tj = 11;

Tcd = 11;

Tj0 = 5;

Tcd0 = 5;

Trcw = 11;

Tscw = 5;

UAj = 79;

UAcd = 18;

T = 57.25;

deltaHr = 1531;

Tj1_line1(35) = 5;

AFAcd = 7.9;

Tcd1_line1(35) =5;

mw = 61.5;

Tw = 25;

mm = 51.5*1000;

mj2 = 8945 ;

$Tcd1 = (T+(AFAcd*Tj0)) / (1+AFAcd);$


```

for t = 36:329
    Tj0_line1(t) = (Tj1_line1(t-1) - Tscw) / 2;
    Tj1_line1(t) = (T+(AFAc*d*Tj0_line1(t))) / (1+AFAc);
end

```

```

for t = 36:329
    Tcd0_line1(t) = (Tcd1_line1(t-1) - Tscw) / 2;
    Tcd1_line1(t) = (T+(AFAc*d*Tcd0_line1(t))) / (1+AFAc);
end

```

```
end
```

```
%col = length(Tj0);
```

```

for t = 36:329
    a(t) = mj1*Cpw*(Tj1_line1(t)-Tj0_line1(t));
end

```

```

for t = 36:329
    b(t) = mcd1*Cpw*(Tcd1_line1(t) - Tj0_line1(t));
end

```

```

for t = 36:329
    c(t) = mw*Cpw*(T - Tw);
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for t = 36:329
```

```

xt(t) = x*(t-35);
end
%col = length(xt);

for t = 36:329
    dT_dt_sector1_line1(t) = (((deltaHr)*m0*xt(t)) - a(t) - b(t) - c(t)) / ((mm*(1-xt(t))*Cpm) +
(mm*xt(t)*Cpp) + (mwtot*Cpw));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% START MRCW, TRCW and TSCW %%%%%%%%%%%%%%%

mrcw = (mj1+mj2+mj3+mj4+mj5+mj6) + (mcd1+mcd2+mcd3+mcd5+mj6);
Tj1_line2(9835:10080) = 0;
Tcd1_line2(9835:10080) = 0;
Tj2_line1(767:10080) = 0;
Tcd2_line1(767:10080) = 0;
Tj2_line2(9835:10080) = 0;
Tcd2_line2(9835:10080) = 0;
.
.
.
Tj30_line2(9965:10080) = 0;
    Tcd30_line2(9965:10080) = 0;
    Tj31_line1(1:10080) = 0;
    Tcd31_line1(1:10080) = 0;
    Tj31_line3(1:10080) = 0;
    Tcd31_line3(1:10080) = 0;
    Tj31_line4(1:10080) = 0;
    Tcd31_line4(1:10080) = 0;

```

```

Tj31_line5(1:10080) = 0;
Tcd31_line5(1:10080) = 0;
Tj31_line6(1:10080) = 0;
Tcd31_line6(1:10080) = 0;

Cpscw = 1;
time = 1:10080;
for t = 1:10080
Trcw_sector1(t) = (((mj1*Tj1_line1(t)) + (mj2*Tj1_line2(t)) + (mj3*Tj1_line3(t)) +
(mj4*Tj1_line4(t)) +(mj5*Tj1_line5(t)) +(mj6*Tj1_line6(t))) + ((mcd1*Tcd1_line1(t)) +
(mcd2*Tcd1_line2(t)) + (mcd3*Tcd1_line3(t)) + (mcd5*Tcd1_line4(t)) +
(mcd5*Tcd1_line5(t)) + (mcd6*Tcd1_line6(t)))) / (((mj1+mj2+mj3+mj4+mj5+mj6) +
(mcd1+mcd2+mcd3+mcd5+mj6)));
Tscw_sector1(t) = Trcw_sector1(t) - (Qchi / (mrcw*Cpw));
%QCL(t) = (mrcw*Cpscw).*(Trcw_sector1-Tscw_sector1);
end

QCL1 = (mrcw*Cpscw).*(Trcw_sector1-Tscw_sector1);
figure(),
plot(time,QCL1)
title('QCL1')
xlabel('Time')
ylabel('QCL1')
for t = 1:10080
Trcw_sector2(t) = (((mj1*Tj2_line1(t)) + (mj2*Tj2_line2(t)) + (mj3*Tj2_line3(t)) +
(mj4*Tj2_line4(t)) +(mj5*Tj2_line5(t)) +(mj6*Tj2_line6(t))) + ((mcd1*Tcd2_line1(t)) +
(mcd2*Tcd2_line2(t)) + (mcd3*Tcd2_line3(t)) + (mcd5*Tcd2_line4(t)) +
(mcd5*Tcd2_line5(t)) + (mcd6*Tcd2_line6(t)))) / (((mj1+mj2+mj3+mj4+mj5+mj6) +
(mcd1+mcd2+mcd3+mcd5+mcd4+mj6)));
Tscw_sector2(t) = Trcw_sector2(t) - (Qchi / (mrcw*Cpw));
end

```

```

.
.
.

for t = 1:10080
Trcw_sector30(t) = (((mj1*Tj30_line1(t)) + (mj2*Tj30_line2(t)) + (mj3*Tj30_line3(t)) +
(mj4*Tj30_line4(t)) +(mj5*Tj30_line5(t)) +(mj6*Tj30_line6(t))) + ((mcd1*Tcd30_line1(t)) +
(mcd2*Tcd30_line2(t)) + (mcd3*Tcd30_line3(t)) + (mcd5*Tcd30_line4(t)) +
(mcd5*Tcd30_line5(t)) + (mcd6*Tcd30_line6(t)))) / (((mj1+mj2+mj3+mj4+mj5+mj6) +
(mcd1+mcd2+mcd3+mcd5+mcd4+mj6)));
Tscw_sector30(t) = Trcw_sector30(t) - (Qchi / (mrcw*Cpw));
end
QCL30 = (mrcw*Cpscw).*(Trcw_sector30-Tscw_sector30);

figure(),
plot(time,QCL30)
title('QCL30')
xlabel('Time')
ylabel('QCL30')
for t = 1:10080
Trcw_sector31(t) = (((mj1*Tj31_line1(t)) + (mj2*Tj31_line2(t)) + (mj3*Tj31_line3(t)) +
(mj4*Tj31_line4(t)) +(mj5*Tj31_line5(t)) +(mj6*Tj31_line6(t))) + ((mcd1*Tcd31_line1(t)) +
(mcd2*Tcd31_line2(t)) + (mcd3*Tcd31_line3(t)) + (mcd5*Tcd31_line4(t)) +
(mcd5*Tcd31_line5(t)) + (mcd6*Tcd31_line6(t)))) / (((mj1+mj2+mj3+mj4+mj5+mj6) +
(mcd1+mcd2+mcd3+mcd5+mcd4+mj6)));
Tscw_sector31(t) = Trcw_sector31(t) - (Qchi / (mrcw*Cpw));
end
QCL31 = (mrcw*Cpscw).*(Trcw_sector31-Tscw_sector31);

```

ภาคผนวก ข
หลักการวัดการประหยัดพลังงานโดยวิธี CUMSUM

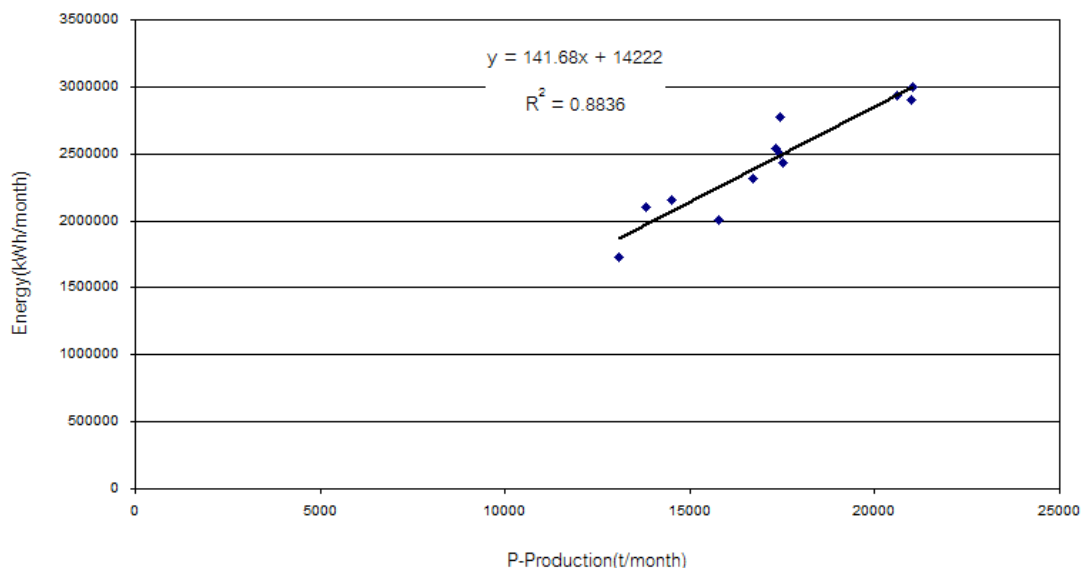
ภาคผนวก ข

หลักการวัดการประหยัดพลังงานโดยวิธีแผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม (Cumulative Sum Control Chart: CUSUM)

กิจกรรมอนุรักษ์พลังงานแบบต่อเนื่องจะนำวิธี CUSUM เพื่อเป็นดัชนีการใช้จ่ายพลังงานและผลประหยัดพลังงานซึ่งวิธี CUSUM สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอน (ที่มา: โครงการอนุรักษ์พลังงานแบบมีส่วนร่วม, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีจดหมายข่าวโครงการรายสองเดือน ฉบับที่ 4 กุมภาพันธ์—มีนาคม 2551, หน้า 3)

1) หาสมการตัวแทนของข้อมูลที่เหมาะสม (Best fit line)

โดยทั่วไปการใช้จ่ายพลังงานของโรงงานจะแปรผันตามปริมาณผลผลิต ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการตั้งเป้าหมายการใช้พลังงานได้โดยเรียกชื่อกราฟในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและผลผลิตนี้ว่า Scatter Diagram กราฟนี้จะ Plot ข้อมูลโดยให้แกนตั้งเป็นปริมาณพลังงานและแกนนอนเป็นปริมาณผลผลิต แล้วหาสมการตัวแทนของข้อมูลที่เหมาะสม (Best fit line)



รูปที่ ข-1 Scatter Diagram

จะความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กับผลผลิตที่ได้จะแปรผันตามสมการ

โดยที่

$$Y = aP + b$$

Y = พลังงานที่ใช้

P = ผลผลิตที่เกิดขึ้น

a = ปริมาณการใช้พลังงานที่แปรเปลี่ยนไปตามหน่วยการผลิตหรือดัชนีการใช้พลังงาน

b = Fixed Energy คือพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดผลผลิต เช่น การใช้พลังงานของสำนักงาน หรือ พลังงานสูญเสียต่างๆ

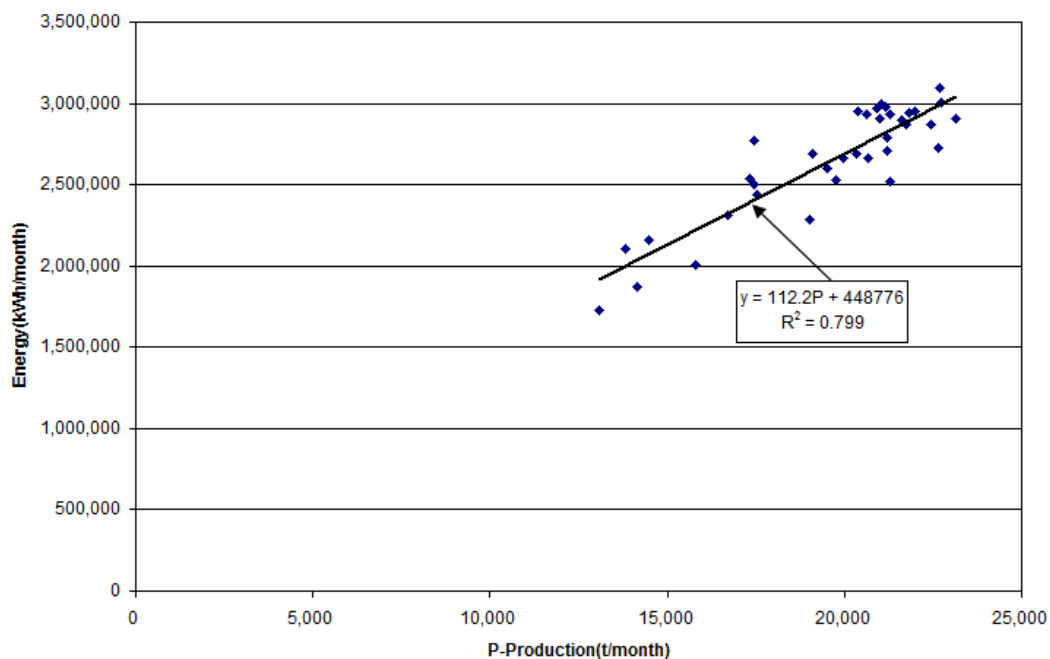
R^2 = Coefficient of Variation หรือ การกระจายตัว (scatter) ของข้อมูลกับเส้น Best fit

ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกความแม่นยำของสมการ โดยสมการที่สามารถนำมาใช้

วิเคราะห์ได้ควรมีค่า $R^2 \geq 0.75$

2) CUSUM Chart

ในการนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและผลผลิตมาใช้งานนั้น ต้องมีการนำค่าพลังงานและผลผลิตที่จะใช้เป็นค่า Baseline มาทำการสร้างกราฟดังรูปที่รูปที่ ๗-2 จากนั้นนำค่าที่ต้องการวิเคราะห์ Plot ลงไปยังกราฟ Baseline ถ้าค่าที่ plot ลงไปอยู่เหนือเส้นกราฟ Baseline แสดงว่ามีการใช้พลังงานสูงกว่าที่ควรจะเป็น แต่ถ้าอยู่ใต้เส้นกราฟแสดงว่ามีการใช้พลังงานน้อยกว่า Baseline หรือมีการประหยัดพลังงาน



รูปที่ ข-2 Baseline ของพลังงานและผลิต

จากนั้นนำค่าความแตกต่างของพลังงานของช่วงที่ต้องการเทียบกับ Baseline ของแต่ละเดือนมาทำการสะสมกัน ตัวอย่างเช่น

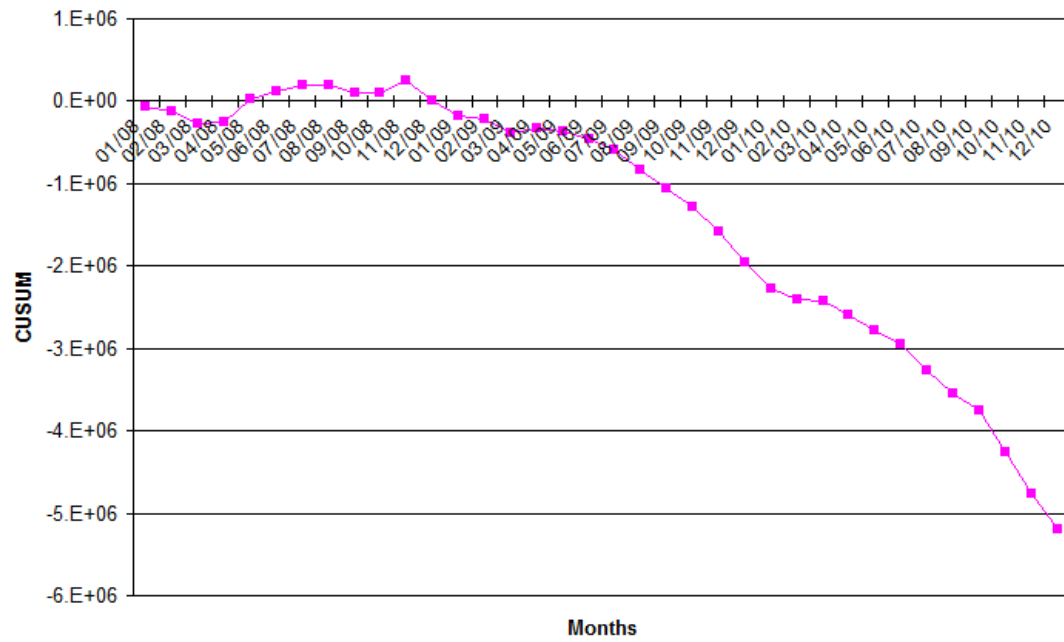
ค่าความแตกต่างเดือนที่ 1 = - 176,780 kWh (เครื่องหมาย - หมายถึงใช้พลังงานน้อยกว่า Baseline)

ค่าความแตกต่างเดือนที่ 2 = - 35,951 kWh

ดังนั้น

ผลรวมสะสม ของ 2 เดือน = - 212,731 kWh

นำค่าผลรวมสะสมของแต่ละเดือนมา Plot กราฟ โดยเรียกกราฟดังกล่าวว่า CUSUM Chart (Cumulative Sum of Difference Chart) ดังรูปที่รูปที่ ข-3 ซึ่งกราฟนี้จะสามารถบอกทิศทางของการใช้พลังงานช่วงที่ต้องการติดตามเทียบกับ Baseline ได้ และสามารถบอกได้ว่ามีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเท่าใดหรือประหยัดพลังงานเท่าใด รวมทั้งยังสามารถบอกได้ว่ามีการใช้พลังงานผิดปกติ (Critical Point) เมื่อใด เพื่อใช้ในการหาสาเหตุที่ผิดปกติดังกล่าว



รูปที่ ข-3 CUSUM Chart ของพลังงานและผลิต

ภาคผนวก ค**การประชุมทางวิชาการ**

Chokpinid Lomkamdee and Soorathep Kheawhom. Optimizaton of chiller system in PVC production process. The 3rd SUT Graduate Conference, Nakhon Ratchasima, Thailand, November 21-23, 2010: GD32010159 (IN THAI)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

โชคพินิจ ล้อมคำดี เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 อำเภอเมือง จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร