

การศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม
ในกระบวนการผลิตน้ำตาล

นายธีรวัฒน์ กลับคล้าย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**UNCERTAINTY EFFECT STUDY ON APPROPRIATE
STEAM CONSUMPTION IN SUGAR
PRODUCTION PROCESS**

Teerawat Klaklay

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of technology
Academic Year 2012**

การศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้อำนาจที่เหมาะสม
ในกระบวนการผลิตน้ำตาล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ทวิข จิตรสมบูรณ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีรวัฒน์ กลับคล้าย : การศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำ
ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำตาล (UNCERTAINTY EFFECT STUDY ON
APPROPRIATE STEAM CONSUMPTION IN SUGAR PRODUCTION PROCESS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์, 136 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของความไม่แน่นอนที่มี
ผลต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำตาล ปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ
ประกอบไปด้วย อัตราการผลิต ค่าบริกซ์เริ่มต้นของน้ำอ้อย อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการ
อุ่น อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่น อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม อัตราการ
จ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการเคี้ยว และค่าบริกซ์สุดท้ายของน้ำเชื่อมหลังจากผ่านกระบวนการต้ม
นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา ผลของรูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการอุ่น
ลักษณะการแจกแจงความดันของระบบหม้อต้มที่ทำให้ระบบใช้น้ำน้อยที่สุด สุดท้ายทำการศึกษา
พฤติกรรมของระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ผลการศึกษานี้ที่สำคัญสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้ วิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โม
ไดนามิกส์ โดยวิธีนิวตัน-รัปสันเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์กระบวนการต้มและอุ่น
น้ำอ้อย ความเบี่ยงเบนของอัตราการผลิตมีอิทธิพลสูงสุดต่ออัตราการใช้น้ำของระบบเมื่อเทียบกับ
ปัจจัยความไม่แน่นอนตัวอื่น ๆ อุณหภูมิของไอหัวหม้อในหม้อต้ม และความดันในหม้อต้มแต่ละ
ขั้นตอนควรควบคุมให้มีค่าต่ำที่สุด โดยที่อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวของไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นจะต้อง
สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำอ้อยที่หม้ออุ่นได้อย่างเพียงพอ

TEERAWAT KLABKLAY : UNCERTAINTY EFFECT STUDY ON
APPROPRIATE STEAM CONSUMPTION IN SUGAR PRODUCTION
PROCESS. THESIS ADVISOR : TEERACHART PORNPIBUL, Ph.D.,
136 PP.

STEAM CONSUMPTION/UNCERTAINTY/SUGAR PRODUCTION PROCESS

The objective of the research is to present the method to analyze the appropriate steam consumption in sugar production process under uncertainty effect. The uncertainty factors consist of the production rate, the initial brix of juice, the temperature of juice inlet to the heating process, the temperature of juice outlet to the heating process, the temperature of juice inlet to the first evaporator, the vapor supply to the vacuum pan process, the brix of syrup after evaporation process. Further, this research studies the effect of vapor supply patterns, and the vapor pressure distribution in the evaporators on appropriate steam consumption. Finally, the dynamic behavior of the process is also studied in this research.

The significant results of this research can be summarized as follows; The Newton-Raphson simulation is an effective method to analyze for evaporation and heating process. The deviation of production rate is the most influential to steam consumption. The vapor temperature in the evaporators and the vapor pressure distribution should be lowest and must be enough for heat exchanged to juice supplied to the heater.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้ศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีรัฐผล ที่กรุณาให้ความรู้ในด้านวิชาการ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชนกนันท์ สุขกำเนิด และคุณสาธิต จันทร์ทอง ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้เรื่องเกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำตาลอย่างละเอียด รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏชื่อในเอกสารอ้างอิงที่ผู้ศึกษาใช้อ้างอิงทางวิชาการ

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาวิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตานุชาแต่ พ่อวสันต์ และแม่ลำเพย คลับคล้าย ครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรม.....	5
2.1 งานวิจัยของ จิระพันธ์ เนื่องจากนิล.....	5
2.2 งานวิจัยของ บันเทิง สีสุตทอง สมหมาย ปรีเปรม และชนกนันท์ สุขกำเนิด.....	5
2.3 งานวิจัยของ สฤณี ป็องกันภัย.....	6
2.4 งานวิจัยของณัฐคนัย มูลศิริ ชนกนันท์ สุขกำเนิด และสมหมาย ปรีเปรม.....	6
2.5 งานวิจัยของ Taylor, Hodge, and James.....	7
2.6 งานวิจัยของ Urbaniec.....	7
2.7 งานวิจัยของ Jayes.....	8
3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย.....	10
3.1 กระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย.....	10
3.2 การจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1	สมดุลพลังงานที่หม้ออุ่น.....	11
3.2.2	สมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อต้ม.....	13
3.2.3	การประมาณค่าอัตราการใช้น้ำในกระบวนการเคี้ยว.....	16
3.2.4	ประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี้ยว น้ำตาลทรายดิบ.....	16
3.2.5	ประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี้ยว น้ำตาลทรายขาว.....	17
3.3	การสร้างแบบจำลองกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย.....	18
3.3.1	จำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มและหม้ออุ่น ในรูปแบบทั่วไป.....	18
3.3.2	ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่น และหม้อต้ม.....	19
3.3.3	รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานต่าง ๆ.....	20
3.3.4	ระบบสมการของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อย ของโรงงานต่าง ๆ.....	22
3.4	การแก้ปัญหาหาระบบทางความร้อนโดยวิธีนิวตัน-รัปสัน.....	24
3.5	เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตรวจวัด.....	26
3.5.1	เปรียบเทียบค่าบริคซ์ที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองกับค่าบริคซ์ ที่ได้จากการวัด.....	26
3.5.2	การวิเคราะห์หาค่าอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม.....	28
3.6	สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	32
4	การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย.....	33
4.1	การวิเคราะห์ปัจจัยความไม่แน่นอน.....	33
4.1.1	ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อการใช้น้ำในกระบวนการต้ม และอุ่นน้ำอ้อย.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2	อิทธิพลจากปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อ อัตราการใช้ไอน้ำของระบบ.....	35
4.1.3	ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อม ในกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย.....	40
4.1.4	ขนาดของอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอน.....	47
4.1.5	วิเคราะห์ผลขนาดของอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอน.....	50
4.2	การวิเคราะห์รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ.....	53
4.3	การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายความดันของหม้อต้มที่เหมาะสม.....	57
4.4	การวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัว.....	62
4.4.1	พิจารณาหม้อต้มขั้นตอนที่ 1.....	63
4.4.2	พิจารณาหม้อต้มขั้นตอนที่ 2 3 4 และขั้นตอนที่ 5.....	67
4.4.3	ผลการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัว.....	68
4.4.4	สรุปผลการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัว.....	71
5	การนำผลวิจัยมาใช้ประโยชน์.....	72
5.1	วิธีการประยุกต์ใช้งานจริง.....	72
5.2	วิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย.....	73
5.3	สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	74
	รายการอ้างอิง.....	75
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ปัจจัยการผลิตของโรงงาน.....	77
	ภาคผนวก ข. ผลการคำนวณ.....	85
	ภาคผนวก ค. ผลการอพติไมเซชัน.....	90
	ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัว.....	106
	ภาคผนวก จ. โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	113
	ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	123
	ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การกระจายความดันลดในหม้อต้มระเหยระหว่างชั้นตอนแบบต่าง ๆ..... 15
3.2	แสดงค่าบริคซ์ของเมทคิทที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคี้ยวที่มีสัดส่วน การใช้ไอน้ำต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากระบบในกระบวนการเคี้ยว..... 17
3.3	ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้ม แต่ละชั้นตอนในรูปแบบทั่วไป..... 19
3.4	ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้ม แต่ละชั้นตอนของโรงงานที่ 1..... 22
3.5	ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้ม แต่ละชั้นตอนของโรงงานที่ 2..... 23
3.6	ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้ม แต่ละชั้นตอนของโรงงานที่ 3..... 23
3.7	ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้ม แต่ละชั้นตอนของโรงงานที่ 4..... 24
4.1	ตารางแสดงอุณหภูมิน้ำอ้อยที่ถูกควบคุมบริเวณทางออกของแต่ละหม้ออุ่นสูงสุด ที่ใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มแต่ละชั้นตอน และแสดงความดันอิมตัว..... 58
4.2	ช่วงของความดันสูงสุด ต่ำสุด ของหม้อต้มแต่ละชั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 59
4.3	ช่วงของการเปลี่ยนแปลงระบบก่อนเข้าสู่สถานะคงตัว..... 63
5.1	ผลการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากอิทธิพลของปัจจัย ความไม่แน่นอนในรูปแบบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง..... 72
ก.1.1	ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 1..... 78
ก.1.2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 1..... 78
ก.2.1	ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2..... 79
ก.2.2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 2..... 80
ก.3.1	ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 3..... 80
ก.3.2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของ โรงงานที่ 3..... 81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4.1	ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 4..... 81
ก.4.2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 4..... 82
ก.5.1	ช่วงเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตที่มีอิทธิพลแบบผันตรง ที่ได้จากฐานข้อมูลจากการตรวจวัดของโรงงานโดยเฉลี่ย..... 82
ก.5.2	ช่วงเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตที่มีอิทธิพลแบบผกผัน ที่ได้จากฐานข้อมูลจากการตรวจวัดของโรงงาน โดยเฉลี่ย..... 83
ก.6.1	ข้อกำหนดของระบบลำเลียงของหม้อต้มของโรงงานที่ 2..... 83
ก.7.1	ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่สภาวะต่าง ๆ..... 83
ก.8.1	ความหนืดพลวัตของน้ำเชื่อมที่สภาวะต่าง ๆ..... 84
ข.1.1	ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม และอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 1..... 86
ข.1.2	ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม และอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2..... 86
ข.1.3	ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม และอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 3..... 87
ข.1.4	ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม และอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 4..... 87
ข.2.1	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอน ที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำ..... 88
ข.3.1	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอน ที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อม..... 88
ข.4.1	อัตราการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ของระบบต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่ มีลักษณะแปรผันตรง..... 89
ค.1.1	ผลการคำนวณของอัตราการใช้น้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ ของโรงงาน 2 ในแต่ละกรณี..... 91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1.2 ผลการคำนวณของอัตราการใช้อินน้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ ของโรงงาน 3 ในแต่ละกรณี.....	92
ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้อินน้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ ของโรงงานที่ 3.....	95
ง.1.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อยจนเข้าใกล้ สภาวะของผสมอิ่มตัว (ระยะที่ 1) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 โรงงานที่ 3.....	107
ง.1.2 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริกซ์ควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 โรงงานที่ 3.....	107
ง.2.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริกซ์ควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 2 โรงงานที่ 3.....	108
ง.3.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริกซ์ควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 3 โรงงานที่ 3.....	109
ง.4.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริกซ์ควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 โรงงานที่ 3.....	110
ง.5.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริกซ์ควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 5 โรงงานที่ 3.....	111

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การใช้พลังงานที่ค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่เข้าระบบหม้อเคียว 3 ชั้นตอน..... 8
3.1	กระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในรูปแบบทั่วไป..... 11
3.2	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำในหม้ออุ่น..... 12
3.3	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำในหม้อต้มระเหย..... 14
3.4	รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 1..... 20
3.5	รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2..... 20
3.6	รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 3..... 21
3.7	รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 4..... 21
3.8	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 1..... 26
3.9	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 2..... 27
3.10	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 3..... 27
3.11	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 4..... 28
3.12	เปรียบเทียบอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมกับอัตราการใช้น้ำจริง ของแต่ละโรงงาน..... 29
3.13	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 1..... 29
3.14	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 2..... 30
3.15	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 3..... 30
3.16	ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 4..... 31
3.17	ค่าบริกซ์ที่ได้จากการจ่ายไอน้ำมากหรือน้อยกว่าค่าที่เหมาะสม โดยไม่มีการปรับแต่งไอหัวหม้อ..... 31
3.18	อัตราการจ่ายไอน้ำในลักษณะต่างๆที่ส่งผลต่อค่าบริกซ์..... 32
4.1	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับอัตราการผลิต..... 36
4.2	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น..... 36
4.3	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับอุณหภูมิ น้ำอ้อย ขาเข้ากระบวนการอุ่น..... 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับอุณหภูมิน้ำอ้อย ขาออกกระบวนการอุ่น..... 37
4.5	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับอุณหภูมิน้ำอ้อย ขาเข้ากระบวนการต้ม.....38
4.6	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับอัตราการจ่ายไอหัวหม้อ ไปสู่กระบวนการเคี้ยว.....38
4.7	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำเทียบกับความเข้มข้นน้ำอ้อย หลังจากกระบวนการต้ม.....39
4.8	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการผลิตของโรงงานที่ 1..... 40
4.9	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการผลิตของโรงงานที่ 2..... 41
4.10	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการผลิตของโรงงานที่ 3..... 41
4.11	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการผลิตของโรงงานที่ 4..... 42
4.12	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น..... 42
4.13	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอุณหภูมิของน้ำอ้อย ขาเข้ากระบวนการอุ่น..... 43
4.14	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอุณหภูมิของน้ำอ้อย ขาออกกระบวนการอุ่น..... 43
4.15	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอุณหภูมิของน้ำอ้อย ขาเข้ากระบวนการต้ม..... 44
4.16	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการจ่ายไอหัวหม้อ ไปสู่กระบวนการเคี้ยว.....44
4.17	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำ ให้กับกระบวนการต้มของโรงงานที่ 1..... 45
4.18	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำ ให้กับกระบวนการต้มของโรงงานที่ 2..... 45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้มของโรงงานที่ 3..... 46
4.20	อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อมเทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้มของ โรงงานที่ 4..... 46
4.21	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 1..... 48
4.22	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 2..... 49
4.23	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 3..... 49
4.24	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 4..... 50
4.25	ระบบส่งจ่ายไอหัวหม้อในรูปทั่วไป..... 53
4.26	รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ โรงงานที่ 2..... 54
4.27	รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ โรงงานที่ 3..... 54
4.28	อัตราการใช้น้ำของระบบของรูปแบบการวางท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อแบบต่าง ๆ ของโรงงานที่ 2..... 55
4.29	อัตราการใช้น้ำของระบบของรูปแบบการวางท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อแบบต่าง ๆ ของโรงงานที่ 3..... 56
4.30	ลักษณะรูปแบบระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อที่ใช้ไอน้ำน้อยที่สุดของ โรงงานที่ 3..... 57
4.31	แผนผังการหาคำตอบโดยวิธีเสิร์ช..... 60
4.32	กรณีลักษณะการแจกแจงความดันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ..... 61
4.33	กรณีลักษณะอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวตามความดันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ..... 62
4.34	การทำงานเริ่มต้นของหม้อต้มในระยะที่ 1..... 63
4.35	การทำงานเริ่มต้นของหม้อต้มในระยะที่ 2..... 65
4.36	การทำงานเริ่มต้นของหม้อต้มในระยะที่ 3..... 66
4.37	พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1..... 68
4.38	พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 2..... 69
4.39	พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 3..... 69
4.40	พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4..... 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41	
พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสถานะไม่คงตัว ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 5.....	70
4.42	
พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสถานะไม่คงตัว ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5.....	71



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

i	=	ลำดับของหม้อต้ม
j	=	ลำดับของหม้ออุ่น
m	=	จำนวนหม้ออุ่นของแต่ละกลุ่มที่ใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มขั้นตอนใด ๆ
n	=	จำนวนหม้อต้มของระบบ
\dot{m}	=	อัตราการไหลของน้ำอ้อย
\dot{m}_i	=	อัตราการใช้ไอหัวหม้อที่หม้ออุ่น
$\dot{m}_{s,in}$	=	อัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย
\dot{w}	=	อัตราการเกิดไอหัวหม้อของหม้อต้ม
\dot{F}	=	อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่เข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนถัดไป
B	=	ค่าความเข้มข้น หรือค่าบาริซของน้ำอ้อย
T	=	อุณหภูมิของน้ำอ้อย
T_v	=	อุณหภูมิของไอหัวหม้อ
$T_{s,in}$	=	อุณหภูมิของไอน้ำที่จ่ายเข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนแรก
C_p	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำอ้อย
h_g	=	เอนทัลปีที่สภาวะไอน้ำอิ่มตัว
h_f	=	เอนทัลปีที่สภาวะของเหลวอิ่มตัว
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ
\dot{E}_{in}	=	พลังงานที่เข้าสู่ระบบ
\dot{E}_{out}	=	พลังงานที่ออกจากระบบ
\dot{Q}	=	พลังงานความร้อนที่จ่ายเข้าสู่ระบบ
BPE	=	ระดับการเพิ่มขึ้นของจุดเดือดของน้ำอ้อย
P_{abs}	=	ความดันสมบูรณ์ของหม้อต้ม
$\dot{\omega}$	=	อัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี้ยว
c	=	ปัจจัยความไม่แน่นอนชนิดต่าง ๆ
v	=	ความเร็ว
k	=	สัดส่วนการใช้ไอน้ำต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากระบบ ในกระบวนการเคี้ยว

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

h_{loss}	=	การสูญเสียเฮด
ρ_{syrup}	=	ความหนาแน่นของน้ำอ้อย
V	=	ความหนืดของน้ำอ้อย
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
ΔP_{drop}	=	ความดันตกคร่อม
L	=	ความยาวท่อส่งจ่ายน้ำอ้อยระหว่างหม้อต้ม
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งจ่ายน้ำอ้อยระหว่างหม้อต้ม
f	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดาร์ซี
Re	=	เรโนลด์ส์นัมเบอร์
E_{sys}	=	พลังงานภายในระบบ
U	=	พลังงานภายใน
t	=	เวลา
J	=	เมตริกอนุพันธ์ หรือเมตริกสัมประสิทธิ์ (Coefficient matrix)
Δ	=	เมตริกผลต่างของคำตอบในการแก้ปัญหาโดยวิธีนิวตัน-รัปสัน
F	=	เมตริกของการแทนค่าฟังก์ชัน
δ	=	ปัจจัยที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง
\dot{m}_0	=	อัตราการผลิต
B_0	=	ค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น
$T_{j,\text{in}}$	=	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น
$T_{j,\text{out}}$	=	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพักใส
T_0	=	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม
$\dot{m}_{\text{vacuumpan}}$	=	อัตราการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการเคี้ยว
B_5	=	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการผลิตน้ำตาล มีกระบวนการที่เกี่ยวข้องโดยสังเขปคือ กระบวนการหีบ อุ่น พักใส่ คัม เคี้ยว ปั่นแยก และอบแห้ง กระบวนการที่ใช้พลังงานสูงสุดคือกระบวนการต้มซึ่งใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำอ้อยเพื่อระเหยน้ำที่อยู่ในน้ำอ้อยออกไปทำให้น้ำอ้อยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรียกว่าน้ำเชื่อม และจะได้ไอน้ำจากการระเหยของน้ำที่อยู่ในน้ำอ้อย (ไอหัวหม้อ) ที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับกระบวนการอื่น ๆ ได้อีกด้วย ส่วนกระบวนการที่มีการใช้พลังงานไอน้ำสูงถัดจากกระบวนการต้มคือกระบวนการอุ่นและกระบวนการเคี้ยวซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จะใช้พลังงานความร้อนจากไอหัวหม้อที่ได้จากกระบวนการต้มเป็นแหล่งพลังงานอีกทีหนึ่ง ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยจึงมีความสำคัญอย่างมากที่ทำให้ทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งจะเป็แนวทางในการกำหนดอัตราการผลิตไอน้ำจากหม้อไอน้ำที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำตาล การจ่ายไอน้ำในอัตราที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตนอกจากจะทำให้ประหยัดพลังงานแล้วยังมีผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มอีกด้วย กล่าวคือการใช้ไอน้ำในอัตราที่เหมาะสมจะมีผลทำให้ค่าความเข้มข้น (ค่าบริกซ์) ของน้ำอ้อยมีค่าที่เหมาะสมเมื่อผ่านกระบวนการต้มตามที่โรงงานได้ควบคุมไว้

ในกระบวนการผลิตมักพบว่า อัตราการผลิต ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น อุณหภูมิ น้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพักใส่ อุณหภูมิ น้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้มระเหย อัตราการใช้ไอน้ำในกระบวนการเคี้ยว และความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายเป็นปัจจัยที่ไม่แน่นอน (Uncertainty factor) ที่เกิดขึ้นอยู่เสมอในกระบวนการผลิต ซึ่งมีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย ดังนั้นในทางปฏิบัติโรงงานจะทำการจ่ายไอน้ำที่มากกว่าค่าที่เหมาะสมอยู่เสมอ เพื่อรองรับปัจจัยไม่แน่นอนต่าง ๆ ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นการเผื่ออัตราการจ่ายไอน้ำอย่างไม่มีทิศทาง จึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานและยังส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้ม และอุ่นน้ำอ้อย เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของกระบวนการต้มระเหย

และอุณหภูมิที่ต่ำ และเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดอัตราการจ่ายไอน้ำที่เหมาะสมให้กับระบบ นอกจากนี้จะทำการนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยความไม่แน่นอน ซึ่งประกอบด้วย อัตราการผลิต ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ อุณหภูมิน้ำอ้อยที่ขาเข้ากระบวนการต้มระเหย อัตราการใช้ไอน้ำในกระบวนการเลี้ยง และความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย ที่มีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสม และทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยความไม่แน่นอนดังกล่าวที่มีอิทธิพลต่อค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการผลิต รวมไปถึงทำการศึกษารูปแบบการวางระบบท่อของไอหัวหม้อและทำการศึกษาลักษณะการแจกแจงความดันของน้ำเชื่อมในแต่ละขั้นตอนการต้มที่เหมาะสมต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่น้อยที่สุดของกระบวนการผลิตน้ำตาล สุดท้ายทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำอ้อยในระบบหม้อต้มหลายขั้นตอนในสถานะไม่คงตัว (Unsteady state)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. นำเสนอแนวทางการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมเชิงกลของกระบวนการและเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการหาอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของกระบวนการ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วย อัตราการผลิต ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้มระเหย อัตราการใช้ไอน้ำในกระบวนการเลี้ยง และความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย รวมไปถึงวิเคราะห์ผลกระทบของคุณภาพน้ำเชื่อมจากปัจจัยความไม่แน่นอนดังกล่าว
3. เพื่อศึกษารูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยที่ทำให้ระบบมีอัตราการใช้ไอน้ำที่น้อยที่สุด
4. เพื่อศึกษาลักษณะการแจกแจงความดันในระบบหม้อต้มแบบหลายขั้นตอน (Multiple effect evaporation) ที่ทำให้ระบบมีอัตราการใช้ไอน้ำที่น้อยที่สุด
5. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำอ้อยในระบบหม้อต้มแบบหลายขั้นตอนในสถานะไม่คงตัว (Unsteady state)

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. ศึกษาในขอบเขตของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยเท่านั้น
2. การวิเคราะห์ระบบอยู่ภายใต้สภาวะคงตัวและเป็นกระบวนการไหลคงที่ แต่จะทำการวิเคราะห์ระบบในช่วงสภาวะไม่คงตัวในวัตถุประสงค์งานวิจัยในหัวข้อที่ 5 ภายหลัง
3. การวิเคราะห์รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อในกระบวนการต้มระเหยและอุ่นของโรงงานที่ 2 และโรงงานที่ 3 จะวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลปัจจัยการผลิตจริงของกระบวนการผลิตทั้ง 2 โรงงาน ดังแสดงในข้อที่ 5
4. การวิเคราะห์ลักษณะการแจกแจงความดันของระบบหม้อต้มแบบหลายชั้นตอนที่ทำให้ระบบใช้ไอน้ำที่น้อยที่สุด จะใช้ระบบในโรงงานที่ 3 ภายใต้ข้อมูลจริงของกระบวนการผลิต ดังที่แสดงในข้อที่ 5
5. การศึกษาวิจัยจะใช้ระบบของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยและข้อมูลการตรวจวัดของโรงงานจริงจำนวน 4 โรงงานเพื่อเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ผล ซึ่งมีกำลังการผลิตต่าง ๆ ดังนี้ โรงงานที่ 1 มีกำลังการผลิต 1,027 ตันต่อชั่วโมง โรงงานที่ 2 และโรงงานที่ 3 มีกำลังการผลิต 900 ตันต่อชั่วโมง โรงงานที่ 4 มีกำลังการผลิต 750 ตันต่อชั่วโมง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. สามารถทำนายอัตราการใช้ไอน้ำและอัตราการเกิดไอหัวหม้อที่เหมาะสม รวมไปถึงค่าความเข้มข้น (ค่าปริกซ์) ที่มีความเหมาะสมของระบบหม้อต้มแบบหลายชั้นตอน (Multiple effect evaporation) ในกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อย
2. สามารถอธิบายผลกระทบที่มีต่ออัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยทั้งขนาดและทิศทางเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ (Uncertainty factor) ซึ่งจะนำไปสู่แผนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องต่อไอน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำตาล
3. สามารถอธิบายผลกระทบที่มีต่ออัตราการใช้ไอน้ำเมื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อในกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยได้
4. สามารถอธิบายผลกระทบที่มีต่ออัตราการใช้ไอน้ำเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความดันของระบบหม้อต้มแบบหลายชั้นตอน (Multiple effect evaporation)
5. ได้แนวทางประหยัดพลังงานของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต และคุณภาพของน้ำตาล

1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 6 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย ขอบเขตของการศึกษาวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ โดยเป็นงานศึกษาวิจัยที่เป็นบทความรวมไปถึงวิทยานิพนธ์ในเรื่องต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้

บทที่ 3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย กล่าวถึงการจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนได้แก่หม้ออุ่น หม้อต้มระเหย และอธิบายหลักการในการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย รวมไปถึงอธิบายการหาอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมจากแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลปัจจัยการผลิตจากโรงงานตัวอย่าง จำนวน 4 โรงงาน

บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย อธิบายถึงผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยมี 4 หัวข้อซึ่งประกอบไปด้วย (1) การวิเคราะห์ปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม และคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ได้จากการต้ม (2) การวิเคราะห์รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อที่ทำให้ระบบใช้น้ำน้อยที่สุด (3) การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายความดันของหม้อต้มที่ทำให้ระบบใช้น้ำน้อยที่สุด และ (4) การวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงที่ขึ้นกับเวลา (Dynamics behavior) หรือช่วงสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state)

บทที่ 5 การนำผลวิจัยมาใช้ประโยชน์ อธิบายถึงการนำผลจากการศึกษาวิจัยไปใช้ประโยชน์ โดยการแสดงตัวอย่างในการใช้งานอย่างเป็นลำดับขั้นตอน วิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย และสรุปผลการศึกษาวิจัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 งานวิจัยของ จิระพันธ์ เนื่องจกนิล (2542)

ได้ทำการศึกษาวิจัยวิเคราะห์การใช้พลังงานทั้งหมดของโรงงานน้ำตาล การศึกษาวิจัยเริ่มตั้งแต่การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในกระบวนการหีบอ้อย กระบวนการอุ่นน้ำอ้อย กระบวนการพักไศ เพื่อตกตะกอนสิ่งสกปรก กระบวนการต้มระเหย กระบวนการเคี้ยว กระบวนการปั่นแยก รวมถึงพลังงานที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาล โดยใช้หลักการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน และวิธีวิเคราะห์ฟินซ์ ในการวิเคราะห์ปัญหา และนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่มีการใช้พลังงานมากเกินไปจนเกินความจำเป็น ในการศึกษาวิจัยได้ทำการศึกษาแนวทางประหยัดพลังงานใน 3 แนวทางกล่าวคือ (1) การนำไอน้ำความดันสูงที่จ่ายเป็นส่วนเสริมการผลิต (Make up) ไปผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (2) การลดอัตราการใช้ไอน้ำความดันสูงโดยให้อัตราการผลิตไฟฟ้าเท่าเดิม และ (3) การลดอัตราการใช้ไอน้ำความดันสูงโดยให้เหมาะสมกับภาระความร้อนของกระบวนการผลิตโดยให้อัตราการผลิตเท่าเดิม โดยผลลัพธ์จากการศึกษาจะแสดงในรูปแบบผลลัพธ์เชิงเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังไม่ได้นำไปสู่แนวทางการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของกระบวนการต้มระเหย เนื่องจากการศึกษานี้ได้ใช้ค่าปริกซ์ที่ได้จากการวัด

2.2 งานวิจัยของ บันเทิง สีกุดทอง สมหมาย ปรีเปรม และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด (2552)

ได้ทำการศึกษาวิธีการทำนายอัตราการเกิดไอหั่วหม้อและอัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยเมื่อกระบวนการผลิตเปลี่ยนไปโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ทางความร้อนโดยใช้หลักการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อต้มและหม้ออุ่นในการวิเคราะห์ เพื่อนำไปออกแบบพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อต้มและหม้ออุ่นต่อไป และได้ทำการทดลองกับหม้อต้มรีไฟน์เนื่องจากควบคุมได้ง่ายและมีโครงสร้างแบบเดียวกับหม้อต้มระเหยเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่าความต้องการใช้ไอน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังการผลิต และขนาดของหม้อต้มที่มีความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศหรือมากกว่าจะต้องใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากการต้มในหม้อต้มชุดแรก ๆ จะมี

อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการต้มในหม้อต้มชุดท้าย ๆ ที่มีความเป็นสุญญากาศจึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนไม่มากนักแต่ก็สามารถทำให้น้ำอ้อยเกิดการระเหยได้ ซึ่งการทำนายอัตราการใช้น้ำจากบทความที่สร้างขึ้นนี้เป็นเพียงการหาผลลัพธ์เฉพาะจุดเท่านั้น กล่าวคือเป็นการสมมูลมวลและสมมูลพลังงานในแต่ละอุปกรณ์โดยใช้ค่าบริจจจากการตรวจวัดในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้อัตราการใช้น้ำที่วิเคราะห์ได้นั้นเป็นอัตราการใช้น้ำที่ได้รับผลกระทบจากการถดถอยของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มและหม้ออุ่นรวมอยู่ด้วย ทำให้อัตราการใช้น้ำที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม และวิธีการดังกล่าวไม่สามารถชี้แจงถึงความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระอื่น ๆ ได้เมื่อเกิดความไม่แน่นอนของตัวแปรควบคุมของกระบวนการผลิตบางตัว ในการศึกษาพฤติกรรมของอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยร่วมกันอย่างเป็นระบบ ควรกำหนดให้ค่าบริจจเป็นตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์เนื่องจากค่าบริจจสามารถปรับเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่หม้อต้มนั้น ๆ

2.3 งานวิจัยของ สฤณี ป้องกันภัย (2552)

ได้ทำการศึกษากระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย และกระบวนการเกี่ยวน้ำตาล โดยเน้นหนักไปที่กระบวนการเกี่ยวเป็นหลักเพื่อต้องการบริหารจัดการแผนการเกี่ยวน้ำตาลของแผนกหม้อเกี่ยวให้มีความต่อเนื่องมากที่สุด และเพื่อทำนายอัตราการใช้น้ำและเพื่อนำไปทดสอบจัดแผนการเกี่ยวโดยวิเคราะห์จากแบบจำลองกระบวนการเกี่ยวที่สร้างขึ้น โดยใช้หลักการสมมูลมวลและสมมูลพลังงาน และใช้โปรแกรมมิชวลเบสิก (Visual basic) จากผลการศึกษาพบว่าในกระบวนการผลิตน้ำตาลนั้น ใช้น้ำที่เข้าและออกจากระบบมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ โดยรวมอยู่แล้ว เพียงแต่มีปัจจัยบางอย่างซึ่งทำให้ในบางเวลาการใช้น้ำของระบบจำเป็นต้องใช้น้ำเพิ่มเติมจากระบบที่ส่งให้ โดยเฉพาะในระบบหม้อเกี่ยวเนื่องจากลักษณะการทำงาน ไม่มีความต่อเนื่อง

2.4 งานวิจัยของ ณัฐนัย มูลศิริ ชนกนันท์ สุขกำเนิด

และ สมหมาย ปรีเปรม (2553)

ได้ทำการศึกษาปัจจัยในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบหม้ออุ่นและหม้อต้มแบบหลายขั้นตอน (Multiple Effect Evaporation) ซึ่งประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการทำนายอัตราการใช้น้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย อุณหภูมิของไอหัวหม้อ และอุณหภูมิของน้ำเชื่อมหลังจากการต้ม ที่หม้อต้มขั้นตอนต่าง ๆ โดยใช้หลักการสมมูลมวล และสมมูลพลังงานในแต่ละอุปกรณ์ทางความร้อน เพื่อนำไปสู่การออกแบบหม้อต้มและหม้ออุ่นแบบเปลือกและท่อในโรงงาน

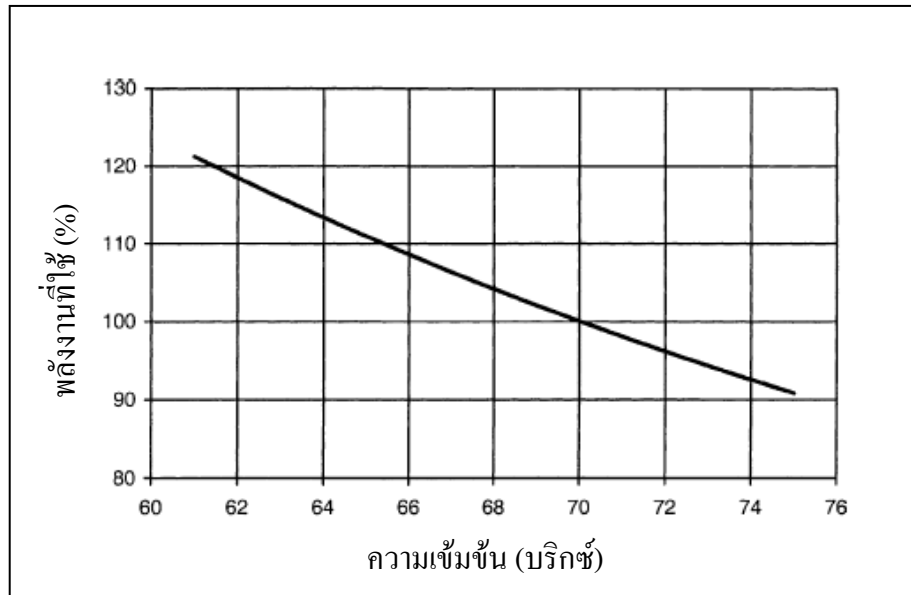
น้ำตาล โดยการป้อนค่าตัวแปรที่ต้องการออกแบบลงใน โปรแกรมที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรมเอ็กซ์เซลในการประมวลผล จากผลการศึกษาพบว่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อต้มและหม้ออุ่นที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจริง แต่ยังมีบางขั้นตอน (Effect) ค่าที่ได้จากการออกแบบไม่ตรงกับข้อมูลจริง เนื่องจากมีการปรับค่าปริศน์ในการต้มแต่ละขั้นตอน โดยการแทนค่าที่ผู้ศึกษาวิจัยได้ประมาณการขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นค่าปริศน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นอาจไม่สอดคล้องต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการวิเคราะห์พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อต้มและหม้ออุ่นที่ใช้ ดังนั้นในการวิเคราะห์กระบวนการต้มระเหยควรกำหนดให้ค่าปริศน์เป็นตัวแปรอิสระของกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อจะได้อัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการในอัตราที่เหมาะสมขึ้น

2.5 งานวิจัยของ Taylor, Hodge, and James (1997)

ศึกษาการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวิเคราะห์ระบบทางความร้อนซึ่งประยุกต์ใช้กับระบบของการไหลในท่อ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอธิบายถึงค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรที่พิจารณาจะขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ทั้งหมดในรูปแบบของฟังก์ชันแบบรากกำลังที่สอง (Root sum square) ซึ่งประกอบไปด้วย ความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของน้ำมันในท่อ ความไม่แน่นอนของความดันลดที่เกิดขึ้น เพื่อใช้ในการเลือกปั๊มที่รองรับกับความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ ส่วนความไม่แน่นอนของตัวแปรที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประกอบไปด้วย อัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิของของไหล

2.6 งานวิจัยของ Urbaniec (2002)

ได้เขียนบทความอธิบายถึงขั้นตอนการผลิตและวิวัฒนาการของกระบวนการผลิตน้ำตาล รวมไปถึงปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตน้ำตาล เช่น จำนวนขั้นตอน (Effect) ของหม้อต้มระเหย รูปแบบการวางระบบท่อการส่งจ่ายไอหัวหม้อ รูปแบบการวางระบบท่อการส่งจ่ายน้ำอ้อยในกระบวนการผลิต สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อต้มระเหย ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ต้องการหลังกระบวนการต้ม เป็นต้น ซึ่งบทความนี้เป็นแรงบันดาลใจที่นำไปสู่การศึกษาปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้



รูปที่ 2.1 การใช้พลังงานที่ค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่เข้าระบบหม้อเคี้ยว 3 ขั้นตอน

2.7 งานวิจัยของ Jayes (2004)

ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมของระบบหม้อต้มระเหยแบบหลายขั้นตอน (Multiple effect evaporators) ดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1. Buczolic และ Zadori

ใช้หลักการวิเคราะห์แบบสัดส่วนระหว่างพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอุณหภูมิแตกต่างของหม้อต้มแต่ละขั้นตอน

$$\frac{A_i}{\Delta T_i} = C \quad \text{ซึ่ง } C \text{ เป็นค่าคงที่}$$

วิธีที่ 2. Hugot

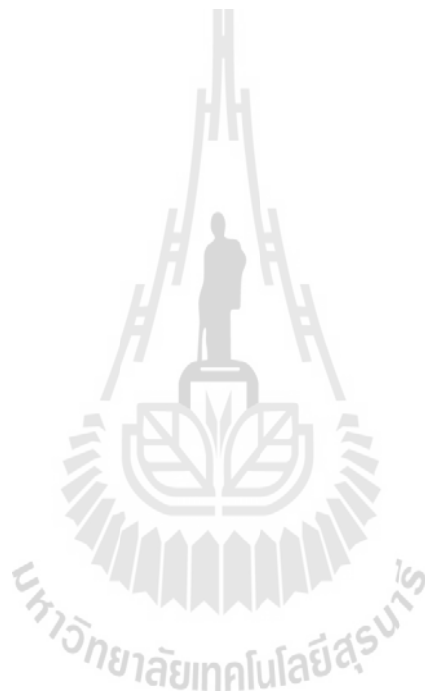
มีหลักการวิเคราะห์แบบสัดส่วนระหว่างพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่หม้อต้มที่พิจารณากับพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่รวมของหม้อต้มทุกขั้นตอนเท่ากับสองเท่าของสัดส่วนของอุณหภูมิแตกต่างของหม้อต้มที่พิจารณากับผลรวมของอุณหภูมิแตกต่างของหม้อต้มทุกขั้นตอน

$$\frac{A_i}{\Delta T_i} = 2 \cdot \frac{\sum_{j=i+1}^n A_j}{\sum_{j=i+1}^n \Delta T_j}$$

วิธีที่ 3. Jayes

ใช้หลักการของสมมูลมวลและสมมูลพลังงาน

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^n v m_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$



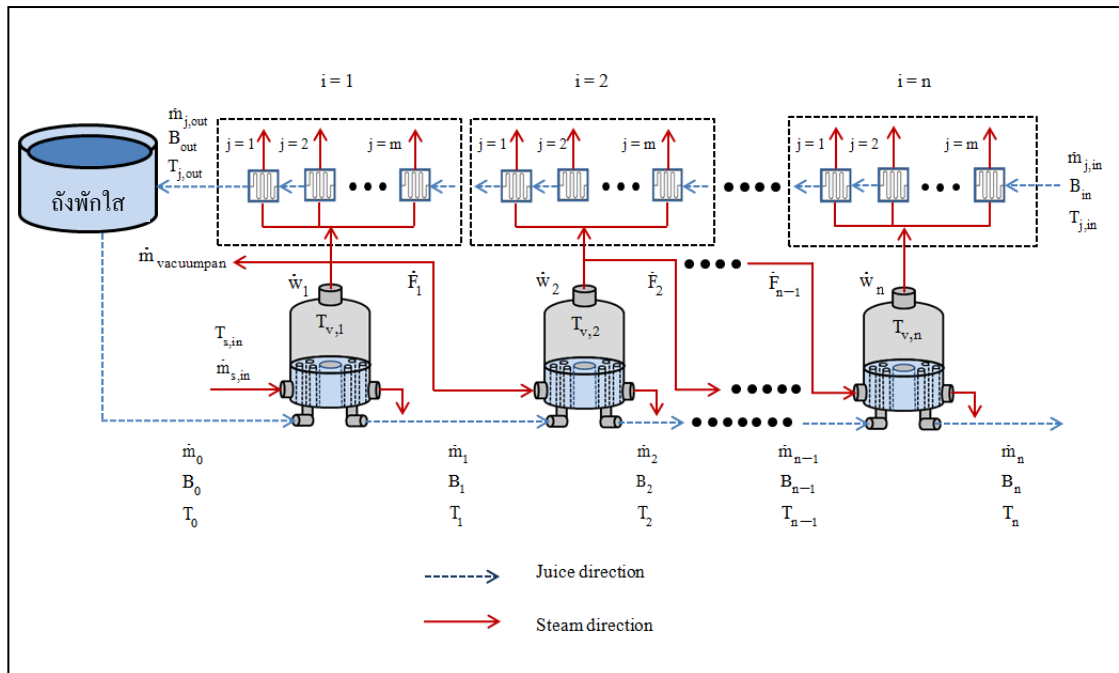
บทที่ 3

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย

3.1 กระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย

อุปกรณ์ทางความร้อนหลัก ๆ ที่ใช้ในกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย ประกอบไปด้วย ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) หม้อต้มหลายขั้นตอน (Multiple effect evaporation) และหม้ออุ่น (Heater) ซึ่งในแต่ละโรงงานจะมีจำนวนหม้อต้ม และจำนวนหม้ออุ่นที่แตกต่างกัน รวมไปถึงปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ของแต่ละโรงงานก็มีความแตกต่างกัน เช่น อัตราการผลิต ค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อยที่ได้จากกระบวนการหีบอ้อย (ค่าบrixเริ่มต้น) อุณหภูมิของน้ำอ้อยที่ออกจากกระบวนการหีบเข้าสู่กระบวนการอุ่น เป็นต้น แต่มีปัจจัยบางอย่างที่ทุก ๆ โรงงานจะต้องควบคุมเหมือนกันทั้งหมด คือสถานะของไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำอ้อยที่หม้อต้มขั้นตอนแรกจะควบคุมให้อยู่ในสถานะไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสมบูรณ์เท่ากับ 2 บาร์ อุณหภูมิของน้ำอ้อยเข้าสู่กระบวนการพักไสจะควบคุมไว้ที่ประมาณ 103-106°C อุณหภูมิของน้ำอ้อยที่เข้าสู่กระบวนการต้มจะควบคุมไว้ที่ประมาณ 90-100°C ความดันที่หม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายจะควบคุมไว้ที่ประมาณ 0.160-0.164 บาร์ซึ่งเป็นสุญญากาศ และค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (น้ำเชื่อม) ที่ต้องการหลังจากผ่านกระบวนการต้มจะควบคุมไว้ที่ประมาณ 60-70°บrix เป็นต้น เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำตาลหากไม่อยู่ในขอบเขตตามที่ได้กล่าวมานี้ ถึงแม้ว่าจะมีความหลากหลายของระบบหรือกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในแต่ละโรงงานที่มีความแตกต่างกัน แต่ก็สามารถที่จะแสดงระบบต่างๆเหล่านั้นให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1

บันทึก ลี กุศลทอง สมหมาย ปรีเปรม และ ชนกันันท์ สุขกำเนิด (2552) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยเพื่อทำนายอัตราการใช้น้ำจริงของโรงงาน โดยใช้ค่าบrixจากการตรวจวัดและใช้วิธีสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในการวิเคราะห์ ซึ่งต่างจากหัวข้อการวิจัยนี้เล็กน้อย กล่าวคือหัวข้อของงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์หาอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม โดยการสร้างระบบสมการที่มีปฏิสัมพันธ์กันทั้งระบบจากการสมดุลมวล และสมดุลพลังงาน แต่ให้ค่าบrixเป็นตัวแปรอิสระ และหาคำตอบโดยวิธีนิวตัน-รัปสัน ซึ่งใช้ปัจจัยการผลิตของโรงงานจริงจำนวน 4 โรงงานในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.1 กระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในรูปทั่วไป

- โดยที่ i แทน ไอหัวหม้อจากหม้อต้มขั้นตอนที่ i ที่จ่ายไปยังหม้ออุ่นลำดับที่ j
- j แทน ลำดับของหม้ออุ่นที่ใช้ไอหัวหม้อของหม้อต้มขั้นตอนที่ i
- m แทน จำนวนหม้ออุ่นที่ใช้ไอหัวหม้อของของหม้อต้มขั้นตอนที่ i
- n แทน จำนวนหม้อต้มของระบบ

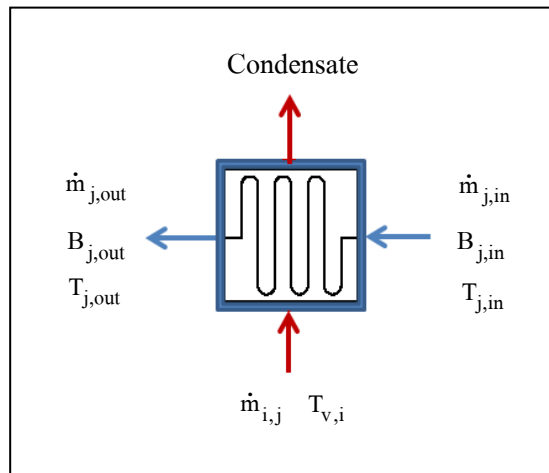
3.2 การจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน

3.2.1 สมดุลพลังงานที่หม้ออุ่น

สมดุลพลังงาน จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{cv} \tag{3.1}$$

เนื่องจากไม่มีพลังงานความร้อน (\dot{Q}) และงาน (\dot{W}) ผ่านปริมาตรควบคุมของระบบและพลังงานในระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากพิจารณาในระบบในสภาวะคงตัว ดังนั้นทำให้ $\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out}$ และจัดรูปสมการเพื่อคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ต้องการของหม้ออุ่นได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำในหม้ออุ่น

$$\dot{m}_{i,j} = \frac{\dot{m}_{j,in} C_{p,in} (T_{j,out} - T_{j,in})}{h_{fg@T_{v,i}}} \quad (3.2)$$

ค่าความจุความร้อนน้ำอ้อย

$$C_{p,in} = (1 - 0.006B_{j,in}) \times 4.1866 \quad (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (3.3)$$

โดยที่	$\dot{m}_{i,j}$	แทน	อัตราการไหลของไอน้ำที่หม้อต้มขึ้นตอนที่ i แยกไหลเข้าสู่หม้ออุ่นขึ้นตอนที่ j (kg/s)
	$\dot{m}_{j,in}$	แทน	อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้ออุ่นซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลของน้ำอ้อยขาออกจากหม้ออุ่น (kg/s)
	$T_{j,in}$	แทน	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้ออุ่น ($^\circ\text{C}$)
	$T_{j,out}$	แทน	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้ออุ่น ($^\circ\text{C}$)
	$T_{v,i}$	แทน	อุณหภูมิไอน้ำที่เกิดขึ้นของหม้อต้มระเหยขึ้นตอนที่ i ($^\circ\text{C}$)
	$B_{j,in}$	แทน	ค่าความเข้มข้นหรือค่าบrixของน้ำอ้อยขาเข้าหม้ออุ่นซึ่งมีค่าเท่ากับค่าบrixของน้ำอ้อยขาออกจากหม้ออุ่น ($^\circ\text{Brix}$)
	$h_{fg@T_{v,i}}$	แทน	ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำที่เข้าสู่หม้ออุ่นที่อุณหภูมิ $T_{v,i}$ (kJ/kg)

3.2.2 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อต้ม สมดุลมวลของแข็ง

$$\dot{m}_{i-1}B_{i-1} = \dot{m}_iB_i \quad (3.4)$$

สมดุลมวลน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)

$$\dot{w}_i = \dot{m}_{i-1} - \dot{m}_i \quad (3.5)$$

สมดุลมวลทางแยกไหลของไอหัวหม้อ

$$\dot{F}_i = \dot{w}_i - \sum_{j=1}^m \dot{m}_{i,j} - * \dot{m}_{\text{vacuumpan}} \quad (3.6)$$

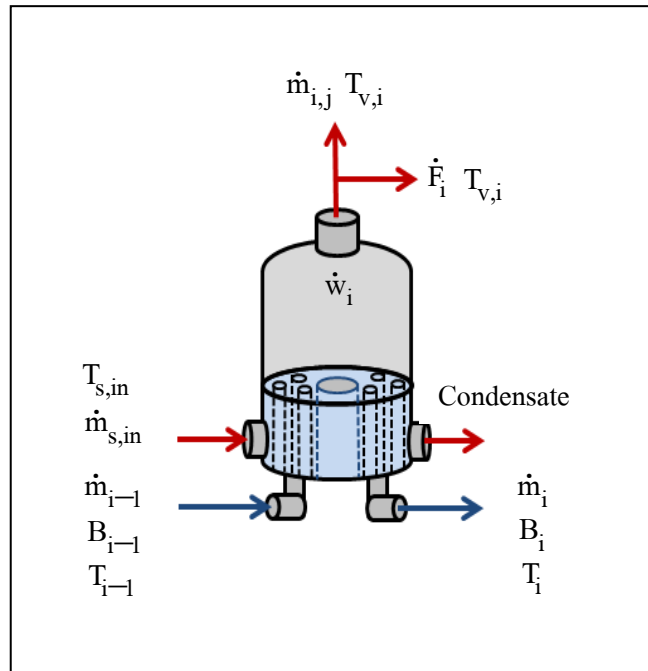
* $\dot{m}_{\text{vacuumpan}}$ ในกรณีที่มีการส่งจ่ายไอหัวหม้อไปยังหม้อเคียว

สมดุลพลังงานที่หม้อต้ม จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในสมการที่ (3.1) เนื่องจากไม่มีพลังงานความร้อน (\dot{Q}) และงาน (\dot{W}) ผ่านปริมาตรควบคุมของระบบและพลังงานในระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากพิจารณาระบบในสภาวะคงตัว ดังนั้นทำให้ $\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out}$ เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ (3.1) คือสมการสมดุลพลังงานที่หม้อต้มขั้นตอนที่ i ซึ่งอยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$\dot{m}_{i-1}c_{p,i-1}T_{j,i-1} + \dot{F}_{i-1}h_{fg@T_{v,i-1}} = \dot{w}_i h_{g@T_{v,i}} + \dot{m}_i c_{p,i} T_{j,i} \quad (3.7)$$

จัดรูปสมการที่ (3.7) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเท่ากับศูนย์เพื่อใช้ในการแก้ระบบสมการโดยวิธีนิวตัน-รpson ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.4

$$f_k = \dot{w}_i h_{g@T_{v,i}} + \dot{m}_i c_{p,i} T_{j,i} - \dot{m}_{i-1} c_{p,i-1} T_{j,i-1} - \dot{F}_{i-1} h_{fg@T_{v,i-1}} = 0 \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.3 ทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำในหม้อต้มระเหย

โดยที่	f_k	แทน	ฟังก์ชันที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานลำดับที่ k
	$\dot{m}_{s,in}$	แทน	อัตราการไหลของไอน้ำที่ใช้จากกังหันไอน้ำที่เข้าสู่หม้อต้มระเหย ซึ่งมีค่าเท่ากับ \dot{F}_0 (kg/s)
	\dot{m}_{i-1}	แทน	อัตราการไหลของน้ำอ้อย (น้ำเชื่อม) ที่เข้าหม้อต้มชั้นตอนที่ i (kg/s)
	\dot{m}_i	แทน	อัตราการไหลของน้ำอ้อย (น้ำเชื่อม) ที่ออกหม้อต้มชั้นตอนที่ i (kg/s)
	\dot{w}_i	แทน	อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นในหม้อต้มชั้นตอนที่ i (kg/s)
	B_{i-1}	แทน	ค่าบrixซ์ของน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้มชั้นตอนที่ i ($^{\circ}$ Brix)
	B_i	แทน	ค่าบrixซ์ของน้ำอ้อย (น้ำเชื่อม) ที่ออกจากหม้อต้มชั้นตอนที่ i ($^{\circ}$ Brix)
	$c_{p,i}$	แทน	ค่าความจุความร้อนของน้ำอ้อยหรือน้ำเชื่อมใช้สมการที่ (3.3) (kJ/kg. $^{\circ}$ C)
	\dot{F}_i	แทน	อัตราการไหลของไอหัวหม้อชั้นตอนที่ i ที่แยกไหลไปสู่หม้อต้มชั้นตอนที่ $i+1$ (kg/s)
	$h_{g@T_{v,i}}$	แทน	เอนทาลปีของไอหัวหม้อที่อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวของหม้อต้มชั้นตอนที่ i (kJ/kg)
	$h_{fg@T_{v,i}}$	แทน	ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำที่อุณหภูมิ $T_{v,i}$ (kJ/kg)

T_{i-1} แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มชั้นตอนที่ i ($^{\circ}\text{C}$)

T_i แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้อต้ม ($^{\circ}\text{C}$)

$$T_i = T_{v,i} + \text{BPE} \quad (3.9)$$

BPE แทน ระดับจุดเดือดที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)

BPE หาได้จากการทดลองของ Thieme ดังนี้

$$\text{BPE} = \frac{2B_i}{100 - B_i} \quad (3.10)$$

$T_{v,i}$ แทน อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยชั้นตอนที่ i ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{s,in}$ แทน อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสมบูรณ์ของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่เข้าสู่หม้อต้มชั้นตอนที่ 1 ซึ่ง ($T_{s,in} = T_{v,0}$) ($^{\circ}\text{C}$)

$h_{fg@T_{s,in}}$ แทน ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่เข้าสู่หม้อต้มชั้นตอนที่ 1 (kJ/kg)

P_{abs} แทน ความดันสมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยจะมีลักษณะที่ลดหลั่นลงไปตามพฤติกรรมที่ได้จากการประมาณของ Hugot ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกระจายความดันลดในหม้อต้มระเหยระหว่างชั้นตอนแบบต่าง ๆ

ระบบหม้อต้ม	ลักษณะการกระจายความดันของหม้อต้ม
ระบบ 3 ชั้นตอน	$\frac{11}{30} + \frac{10}{30} + \frac{9}{30}$
ระบบ 4 ชั้นตอน	$\frac{11}{40} + \frac{10.3}{40} + \frac{9.7}{40} + \frac{9}{40}$
ระบบ 5 ชั้นตอน	$\frac{11}{50} + \frac{10.5}{50} + \frac{10}{50} + \frac{9.5}{50} + \frac{9}{50}$

ความสัมพันธ์ของอัตราการใช้น้ำจากการวิเคราะห์โดยการสร้างปริมาตรควบคุมรอบกระบวนการต้มในรูปที่ 3.1 และทำการสมดุลพลังงานจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{m}_n h_{g@T_{v,n}} + \dot{m}_n c_{p,n} T_n - \dot{m}_0 c_{p,0} T_0 + m_{vac} h_{g@T_{v,1}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\dot{m}_0 c_{p,0} \Delta T_j}{h_{fg@T_{vi}}} \times h_{g@T_{v,i}} + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{F}_i h_{f@T_{v,i}} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{s,in} = \frac{\quad}{h_{fg@T_{s,in}}}$$

สมการที่ (3.11) แสดงถึงขนาดและทิศทางของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ในการส่งอิทธิพลถึงอัตราการใช้น้ำของระบบซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการอธิบายถึงขนาดและทิศทางในการส่งผลกระทบของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำของระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

3.2.3 การประมาณค่าอัตราการใช้น้ำในกระบวนการเคี้ยว

ในกระบวนการเคี้ยวมีอยู่ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ กระบวนการเคี้ยวสำหรับผลิตน้ำตาลทรายดิบ และ กระบวนการเคี้ยวสำหรับผลิตน้ำตาลทรายขาว ดังนั้นอัตราการใช้น้ำในกระบวนการเคี้ยวทั้งหมดคือ

$$\dot{m}_{vacuumpan} = (k\dot{\omega})_{raw} + (k\dot{\omega})_{refine} \quad (3.12)$$

โดยที่ $\dot{m}_{vacuumpan}$ แทน อัตราการใช้น้ำในกระบวนการเคี้ยวทั้งหมด (kg/s)
 k แทน สัดส่วนการใช้น้ำต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระบวนการในกระบวนการเคี้ยว (kg/s/kg/s)
 $\dot{\omega}$ แทน อัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี้ยว (kg/s)

3.2.4 ประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี้ยวน้ำตาลทรายดิบ ($\dot{\omega}_{raw}$)

การประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี้ยวน้ำตาลทรายดิบสามารถหาได้จากการสมดุลมวลที่หม้อเคี้ยวน้ำตาลทรายดิบ

$$\dot{\omega}_{\text{raw}} = \dot{m}_{\text{syrup}} \frac{B_{\text{syrup}}}{B_{\text{mas}}} \quad (3.13)$$

โดยที่	$\dot{\omega}_{\text{raw}}$	แทน	อัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาลทรายดิบ (kg/s)
	\dot{m}_{syrup}	แทน	อัตราการไหลของน้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการต้ม (kg/s)
	B_{syrup}	แทน	ค่าบrixของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มระเหย (°Brix)
	B_{mas}	แทน	ค่าบrixของเมทคิท Masecuite ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาลทรายดิบ (°Brix)

3.2.5 การประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาลทรายขาว ($\dot{\omega}_{\text{refine}}$)

การประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาลทรายขาวสามารถหาได้จากการสมดุลมวลที่หม้อเคี่ยวน้ำตาลทรายขาว

$$\dot{\omega}_{\text{refine}} = \dot{m}_{\text{refine}} \frac{B_{\text{refine}}}{B_{\text{mas}}} \quad (3.14)$$

โดยที่	$\dot{\omega}_{\text{refine}}$	แทน	อัตราการระเหยของน้ำในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาลทรายขาว (kg/s)
	\dot{m}_{refine}	แทน	อัตราการไหลของ Fine liquor จากการละลายน้ำตาลทรายดิบ (kg/s)
	B_{refine}	แทน	ค่าบrixของ Fine liquor จากการละลายน้ำตาลทรายดิบ (°Brix)
	B_{mas}	แทน	ค่าบrixของเมทคิท (Masecuite) ในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาลทรายขาว (°Brix)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าบrixของเมทคิท (Masecuite) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคี่ยวที่มีสัดส่วนการใช้ไอน้ำต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากระบบในกระบวนการเคี่ยว (k) เท่ากับ 1.5

Masecuite	ค่าบrixที่ได้จากการเคี่ยวน้ำตาลทรายดิบ	ค่าบrixที่ได้จากการเคี่ยวน้ำตาลทรายขาว
Masecuite (B_{mas})	92-96	89-93
ค่าบrixโดยเฉลี่ย	94	91

3.3 การสร้างแบบจำลองกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย

3.3.1 จำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มและหม้ออุ่นในรูปแบบทั่วไป

ตัวแปรอิสระของระบบ

1. อัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย ($\dot{m}_{s,in}$)
2. ความเข้มข้น (ค่าบริกซ์) ของน้ำเชื่อมที่หม้อต้มขั้นตอนต่าง ๆ ที่อยู่ระหว่างหม้อต้มขั้นตอนแรกและขั้นตอนสุดท้าย (B_1, B_2, \dots, B_n)
3. อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่แยกไหลเข้าสู่หม้อต้มชุดถัดไปของหม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($\dot{F}_1, \dot{F}_2, \dots, \dot{F}_{n-1}$)

ตัวแปรควบคุม

1. อัตราการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย ($\dot{m}_0 = \dot{m}_{j,in}$)
2. ผลต่างของอุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและขาออกที่หม้ออุ่น (ΔT_j)
3. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้ม (T_0)
4. ความเข้มข้นของน้ำอ้อยก่อนเข้าหม้ออุ่นและหม้อต้ม (B_0)
5. ความดันสมบูรณ์ขณะต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($P_{abs,i}$)
6. อัตราการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการเกี่ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)
7. สภาวะของไอน้ำที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการแลกเปลี่ยนความร้อน (การต้ม) ให้กับน้ำอ้อยที่หม้อต้มขั้นตอนแรก ($T_{s,in}$, $P_{s,in}$)
8. ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่หม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_n)
9. อัตราการผลิตเมทกิท (Massecuite) เพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาว (\dot{m}_{mas})

ตัวแปรตามตัวแปรอิสระ

1. อัตราการเกิดไอหัวหม้อของหม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($\dot{w}_1, \dot{w}_2, \dot{w}_3, \dots, \dot{w}_n$)
2. อัตราการไหลของน้ำอ้อย (น้ำเชื่อม) เมื่อผ่านการต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_{n-1}$)
3. อุณหภูมิของน้ำอ้อย (น้ำเชื่อม) หลังจากผ่านการต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน (T_1, T_2, \dots, T_{n-1})

ตัวแปรตามตัวแปรควบคุม

1. อัตราการจ่ายไอหัวหม้อของหม้อต้มแต่ละขั้นตอนไปยังหม้ออุ่น ($\dot{m}_{i,j}$)
2. อัตราการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการเกี่ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)
3. อัตราการไหลของน้ำเชื่อมหลังจากผ่านการต้มที่หม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (\dot{m}_n)
4. อุณหภูมิของน้ำเชื่อมหลังจากผ่านการต้มที่หม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (T_n)

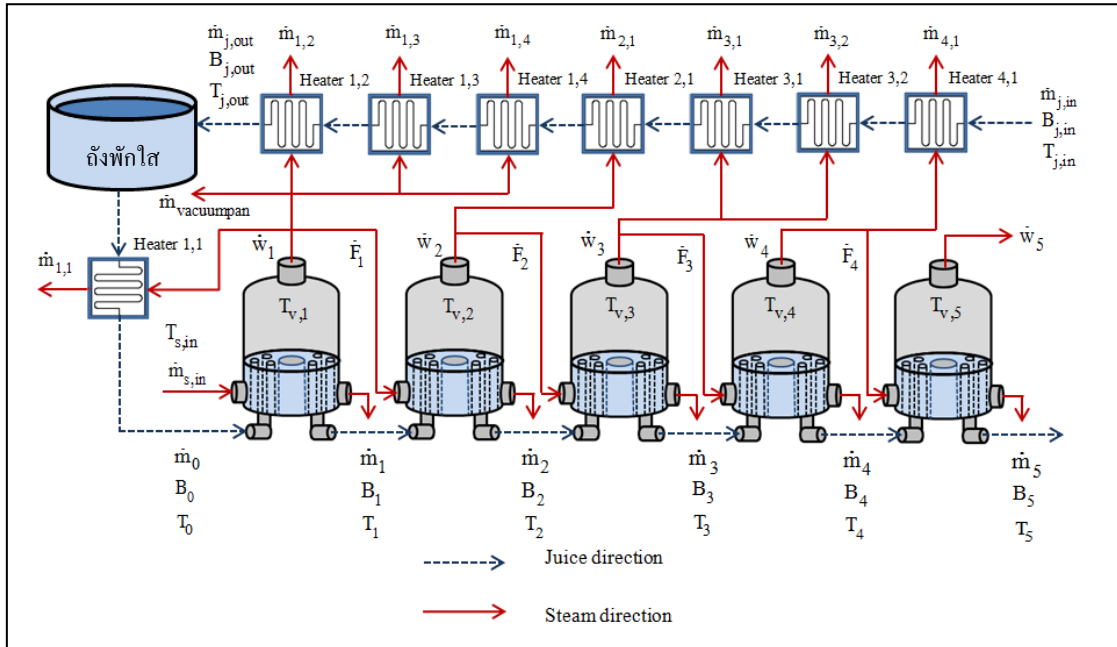
3.3.2 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้ม ในรูปแบบทั่วไป

จากระบบของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในรูปแบบทั่วไปดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 และหลักการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในหม้ออุ่นและหม้อต้มดังที่แสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 และหัวข้อที่ 3.2.2 นำไปสู่สร้างระบบสมการเพื่อหาอัตราการใช้อินน้ำที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 3.3

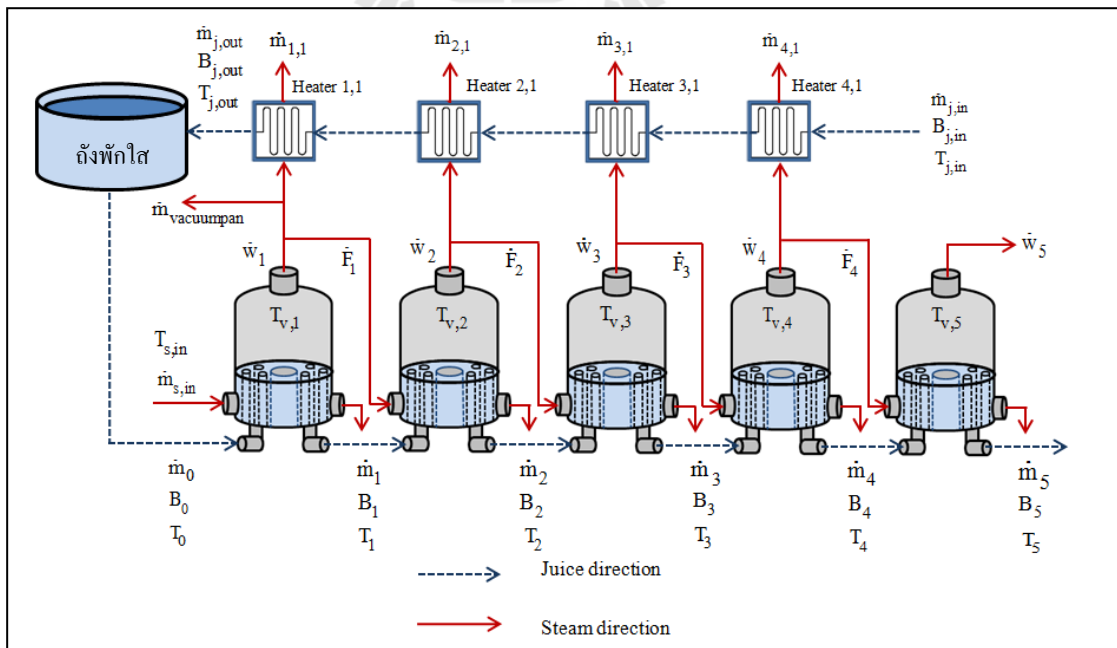
ตารางที่ 3.3 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้มแต่ละขั้นตอน
ในรูปแบบทั่วไป

หม้อต้มขั้นตอนที่ (i)	ฟังก์ชัน
สมดุลมวล	
i=1 k=1	$f_1 = \dot{F}_1 - \dot{w}_1 + \sum_{j=1}^m \dot{m}_{1,j} + \dot{m}_{\text{vacuumpan}} = 0$
i=2 k=2	$f_2 = \dot{F}_2 - \dot{w}_2 + \sum_{j=1}^m \dot{m}_{2,j} = 0$
i=3 k=3	$f_3 = \dot{F}_3 - \dot{w}_3 + \sum_{j=1}^m \dot{m}_{3,j} = 0$
□	□
□	□
i=n k=p	$f_p = \dot{F}_n - \dot{w}_n + \sum_{j=1}^m \dot{m}_{n,j} = 0$
สมดุลพลังงาน	
i=1 k=p+1	$f_{p+1} = h_{fg@T_{s,in}} \dot{m}_{s,in} - \dot{w}_1 h_{g@T_{V,1}} - \dot{m}_1 c_{p,1} T_1 + \dot{m}_0 c_{p,0} T_0 = 0$
i=2 k=p+2	$f_{p+2} = h_{fg@T_{V,1}} \dot{F}_1 - \dot{w}_2 h_{g@T_{V,2}} - \dot{m}_2 c_{p,2} T_2 + \dot{m}_1 c_{p,1} T_1 = 0$
i=3 k=p+3	$f_{p+3} = h_{fg@T_{V,2}} \dot{F}_2 - \dot{w}_3 h_{g@T_{V,3}} - \dot{m}_3 c_{p,3} T_3 + \dot{m}_2 c_{p,2} T_2 = 0$
□	□
□	□
i=n k=p+n	$f_{p+n} = h_{fg@T_{V,n-1}} \dot{F}_{n-1} - \dot{w}_n h_{g@T_{V,n}} - \dot{m}_n c_{p,n} T_n + \dot{m}_{n-1} c_{p,n-1} T_{n-1} = 0$

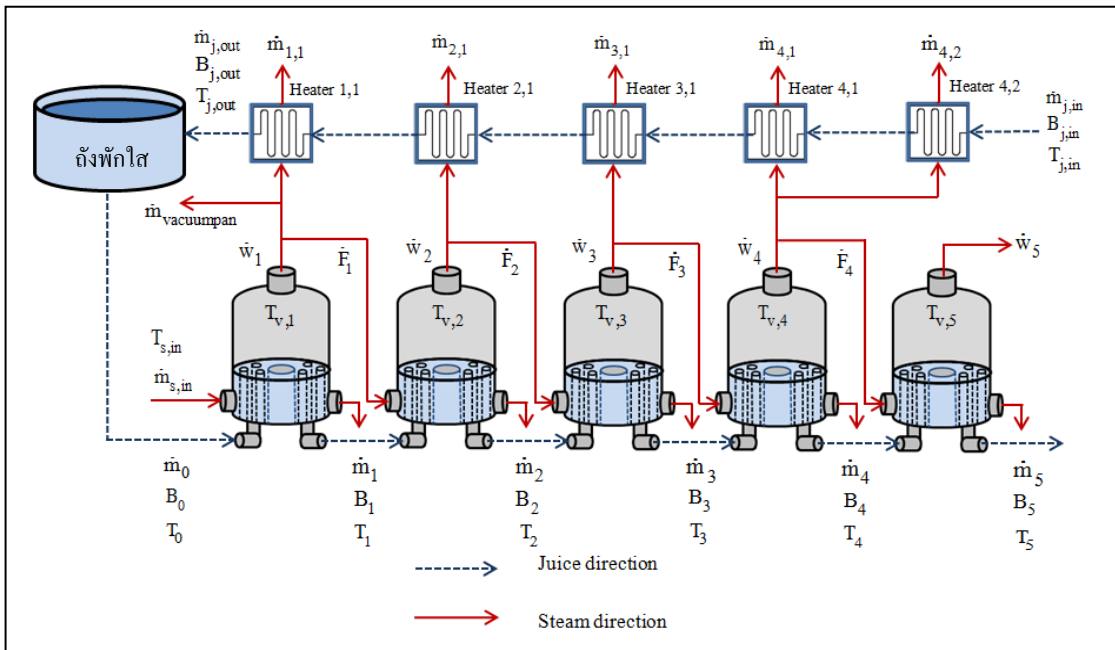
3.3.3 รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานต่าง ๆ



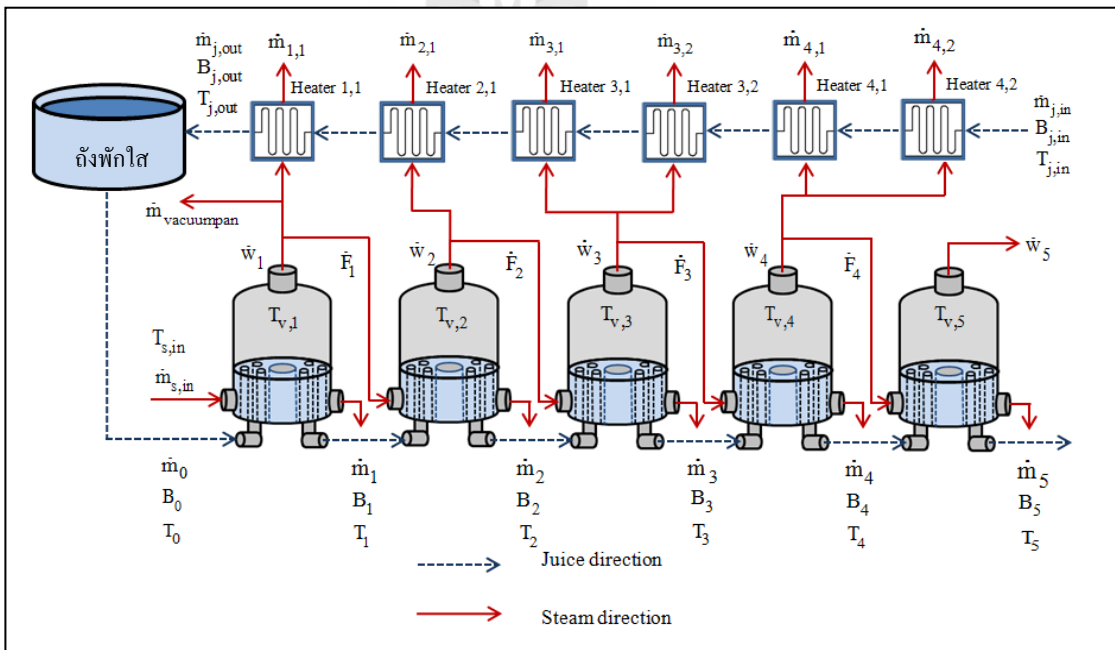
รูปที่ 3.4 รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 1



รูปที่ 3.5 รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2



รูปที่ 3.6 รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 3



รูปที่ 3.7 รูปแบบกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 4

3.3.4 ระบบสมการของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานต่าง ๆ

กระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานต่าง ๆ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากแต่ละโรงงานมีจำนวนอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน เช่น จำนวนหม้ออุ่น หรือจำนวนหม้อต้ม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.7 ซึ่งทั้ง 4 โรงงานมีจำนวนหม้ออุ่นที่แตกต่างกัน แต่มีจำนวนหม้อต้ม 5 ชั้นตอนเท่ากันทั้งหมด รวมไปถึงปัจจัยการผลิตต่าง ๆ (ตัวแปรควบคุม) ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.3.1 ของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจากระบบของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยและปัจจัยการผลิตของโรงงานที่ 1 ถึงโรงงานที่ 4 ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.7 และตารางที่ ก.1.1 ถึงตารางที่ ก.4.2 ซึ่งแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. จะนำไปสู่การสร้างระบบสมการเพื่อใช้วิเคราะห์หาอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมของแต่ละโรงงาน ซึ่งระบบสมการที่ได้ของโรงงานที่ 1 แสดงอยู่ในตารางที่ 3.4 ระบบสมการที่ได้ของโรงงานที่ 2 แสดงอยู่ในตารางที่ 3.5 ระบบสมการที่ได้ของโรงงานที่ 3 แสดงอยู่ในตารางที่ 3.6 และระบบสมการที่ได้ของโรงงานที่ 4 แสดงอยู่ในตารางที่ 3.7 ซึ่งระบบสมการของทั้ง 4 โรงงานจะมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 9 ตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์กันทั้งระบบ

ตารางที่ 3.4 ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้ออุ่นและหม้อต้มแต่ละขั้นตอนของโรงงานที่ 1

ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
$f_1 = \dot{F}_1 - \dot{w}_1 + \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{v3} + \dot{m}_{v4} + \dot{m}_{vacuumpan} = 0$	$f_1 = f(\dot{F}_1, B_1)$
$f_2 = \dot{F}_2 - \dot{w}_2 + \dot{m}_{v5} = 0$	$f_2 = f(\dot{F}_2, B_2)$
$f_3 = \dot{F}_3 - \dot{w}_3 + \dot{m}_{v6} + \dot{m}_{v7} = 0$	$f_3 = f(\dot{F}_3, B_3)$
$f_4 = \dot{F}_4 - \dot{w}_4 + \dot{m}_{v8} = 0$	$f_4 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_5 = h_{fg@T_{V1}} \dot{F}_1 - \dot{w}_2 h_{g@T_{V2}} - \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 + \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 = 0$	$f_5 = f(\dot{F}_1, B_1, B_2)$
$f_6 = h_{fg@T_{V2}} \dot{F}_2 - \dot{w}_3 h_{g@T_{V3}} - \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 + \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 = 0$	$f_6 = f(\dot{F}_2, B_2, B_3)$
$f_7 = h_{fg@T_{V3}} \dot{F}_3 - \dot{w}_4 h_{g@T_{V4}} - \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 + \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 = 0$	$f_7 = f(\dot{F}_3, B_3, B_4)$
$f_8 = h_{fg@T_{V4}} \dot{F}_4 - \dot{w}_5 h_{g@T_{V5}} - \dot{m}_5 c_{p@B_5} T_5 + \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 = 0$	$f_8 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_9 = h_{fg@T_{s,in}} \dot{m}_{s,in} - \dot{w}_1 h_{g@T_{V1}} - \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 + \dot{m}_0 c_{p@B_0} T_0 = 0$	$f_9 = f(B_1, \dot{m}_{s,in})$

ตารางที่ 3.5 ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อไอน้ำและหม้อต้ม
แต่ละขั้นตอนของโรงงานที่ 2

ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
$f_1 = \dot{F}_1 - \dot{w}_1 + \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{\text{vacuumpan}} = 0$	$f_1 = f(\dot{F}_1, B_1)$
$f_2 = \dot{F}_2 - \dot{w}_2 + \dot{m}_{v2} = 0$	$f_2 = f(\dot{F}_2, B_2)$
$f_3 = \dot{F}_3 - \dot{w}_3 + \dot{m}_{v3} = 0$	$f_3 = f(\dot{F}_3, B_3)$
$f_4 = \dot{F}_4 - \dot{w}_4 + \dot{m}_{v4} = 0$	$f_4 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_5 = h_{fg@T_{V1}} \dot{F}_1 - \dot{w}_2 h_{g@T_{V2}} - \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 + \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 = 0$	$f_5 = f(\dot{F}_1, B_1, B_2)$
$f_6 = h_{fg@T_{V2}} \dot{F}_2 - \dot{w}_3 h_{g@T_{V3}} - \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 + \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 = 0$	$f_6 = f(\dot{F}_2, B_2, B_3)$
$f_7 = h_{fg@T_{V3}} \dot{F}_3 - \dot{w}_4 h_{g@T_{V4}} - \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 + \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 = 0$	$f_7 = f(\dot{F}_3, B_3, B_4)$
$f_8 = h_{fg@T_{V4}} \dot{F}_4 - \dot{w}_5 h_{g@T_{V5}} - \dot{m}_5 c_{p@B_5} T_5 + \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 = 0$	$f_8 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_9 = h_{fg@T_{s,in}} \dot{m}_{s,in} - \dot{w}_1 h_{g@T_{V1}} - \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 + \dot{m}_0 c_{p@B_0} T_0 = 0$	$f_9 = f(B_1, \dot{m}_{s,in})$

ตารางที่ 3.6 ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อไอน้ำและหม้อต้ม
แต่ละขั้นตอนของโรงงานที่ 3

ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
$f_1 = \dot{F}_1 - \dot{w}_1 + \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{\text{vacuumpan}} = 0$	$f_1 = f(\dot{F}_1, B_1)$
$f_2 = \dot{F}_2 - \dot{w}_2 + \dot{m}_{v2} = 0$	$f_2 = f(\dot{F}_2, B_2)$
$f_3 = \dot{F}_3 - \dot{w}_3 + \dot{m}_{v3} = 0$	$f_3 = f(\dot{F}_3, B_3)$
$f_4 = \dot{F}_4 - \dot{w}_4 + \dot{m}_{v4} + \dot{m}_{v5} = 0$	$f_4 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_5 = h_{fg@T_{V1}} \dot{F}_1 - \dot{w}_2 h_{g@T_{V2}} - \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 + \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 = 0$	$f_5 = f(\dot{F}_1, B_1, B_2)$
$f_6 = h_{fg@T_{V2}} \dot{F}_2 - \dot{w}_3 h_{g@T_{V3}} - \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 + \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 = 0$	$f_6 = f(\dot{F}_2, B_2, B_3)$
$f_7 = h_{fg@T_{V3}} \dot{F}_3 - \dot{w}_4 h_{g@T_{V4}} - \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 + \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 = 0$	$f_7 = f(\dot{F}_3, B_3, B_4)$
$f_8 = h_{fg@T_{V4}} \dot{F}_4 - \dot{w}_5 h_{g@T_{V5}} - \dot{m}_5 c_{p@B_5} T_5 + \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 = 0$	$f_8 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_9 = h_{fg@T_{s,in}} \dot{m}_{s,in} - \dot{w}_1 h_{g@T_{V1}} - \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 + \dot{m}_0 c_{p@B_0} T_0 = 0$	$f_9 = f(B_1, \dot{m}_{s,in})$

ตารางที่ 3.7 ระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อไอน้ำและหม้อต้ม
แต่ละชั้นตอนของโรงงานที่ 4

ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
$f_1 = \dot{F}_1 - \dot{w}_1 + \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{\text{vacuumpan}} = 0$	$f_1 = f(\dot{F}_1, B_1)$
$f_2 = \dot{F}_2 - \dot{w}_2 + \dot{m}_{v2} = 0$	$f_2 = f(\dot{F}_2, B_2)$
$f_3 = \dot{F}_3 - \dot{w}_3 + \dot{m}_{v3} + \dot{m}_{v4} = 0$	$f_3 = f(\dot{F}_3, B_3)$
$f_4 = \dot{F}_4 - \dot{w}_4 + \dot{m}_{v5} + \dot{m}_{v6} = 0$	$f_4 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_5 = h_{fg@T_{V1}} \dot{F}_1 - \dot{w}_2 h_{g@T_{V2}} - \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 + \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 = 0$	$f_5 = f(\dot{F}_1, B_1, B_2)$
$f_6 = h_{fg@T_{V2}} \dot{F}_2 - \dot{w}_3 h_{g@T_{V3}} - \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 + \dot{m}_2 c_{p@B_2} T_2 = 0$	$f_6 = f(\dot{F}_2, B_2, B_3)$
$f_7 = h_{fg@T_{V3}} \dot{F}_3 - \dot{w}_4 h_{g@T_{V4}} - \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 + \dot{m}_3 c_{p@B_3} T_3 = 0$	$f_7 = f(\dot{F}_3, B_3, B_4)$
$f_8 = h_{fg@T_{V4}} \dot{F}_4 - \dot{w}_5 h_{g@T_{V5}} - \dot{m}_5 c_{p@B_5} T_5 + \dot{m}_4 c_{p@B_4} T_4 = 0$	$f_8 = f(\dot{F}_4, B_4)$
$f_9 = h_{fg@T_{s,in}} \dot{m}_{s,in} - \dot{w}_1 h_{g@T_{V1}} - \dot{m}_1 c_{p@B_1} T_1 + \dot{m}_0 c_{p@B_0} T_0 = 0$	$f_9 = f(B_1, \dot{m}_{s,in})$

3.4 การแก้ระบบสมการโดยวิธีนิวตัน-ร็พสัน (Newton-Raphson)

เป็นวิธีการแก้ระบบสมการที่ไม่ต้องสร้างแผนผังทิศทางการคำนวณ แต่จะต้องจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเท่ากับศูนย์และต้องเป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ ซึ่งมีหลักการคือเปลี่ยนฟังก์ชันลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นอยู่ในระบบเมตริกเพื่อให้ง่ายต่อการแก้ปัญหาผลลัพธ์ที่ได้จะเข้าสู่คำตอบอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อเสียคือ (1) ฟังก์ชันแต่ละฟังก์ชันจะต้องหาอนุพันธ์ได้ (2) ระบบสมการที่มีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลอยู่ในฟังก์ชันการแก้ระบบสมการโดยวิธีนิวตัน-ร็พสันจะทำให้เกิดการลู่ออกได้ง่ายเนื่องจากการกำหนดค่าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการเข้าสู่คำตอบอยู่ในช่วงที่แคบมาก และเนื่องจากพฤติกรรมของสมการเอกซ์โพเนนเชียลมีความเปลี่ยนแปลงความชันอย่างรุนแรง ซึ่งในบางครั้งจะต้องใช้เทคนิคควอซา-นิวตัน (Quasi-Newton) มาช่วยในการปรับค่าใหม่ให้มีความเหมาะสมมากขึ้นและนำค่าใหม่ที่ได้แทนค่ากลับในรอบถัดไปของการทำซ้ำ แต่การแก้ระบบสมการโดยวิธีนิวตัน-ร็พสันมีข้อดีคือสามารถใส่ค่าดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกอนุพันธ์ของระบบที่เข้าสู่คำตอบนำไปคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมบางตัวได้ ซึ่งหลักการแก้ระบบสมการโดยวิธีนิวตัน-ร็พสัน ทำได้ดังนี้

$$J\Delta = -F \quad (3.15)$$

โดยที่

$$J = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \cdots & \partial f_1 / \partial x_n \\ \vdots & & \vdots \\ \partial f_n / \partial x_1 & \cdots & \partial f_n / \partial x_n \end{bmatrix} \quad \Delta = \begin{Bmatrix} x_{1,\text{new}} - x_{1,\text{old}} \\ \vdots \\ x_{n,\text{new}} - x_{n,\text{old}} \end{Bmatrix} \quad \text{และ } F = \begin{Bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_2 \end{Bmatrix}$$

โดยที่ f_i แทน ฟังก์ชันที่ i ของระบบสมการที่มีฟังก์ชันทั้งหมด n ฟังก์ชัน

โดยแต่ละฟังก์ชันสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$f_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

x_i แทน ตัวแปรอิสระที่ i ของระบบซึ่งมีทั้งหมด n ตัว

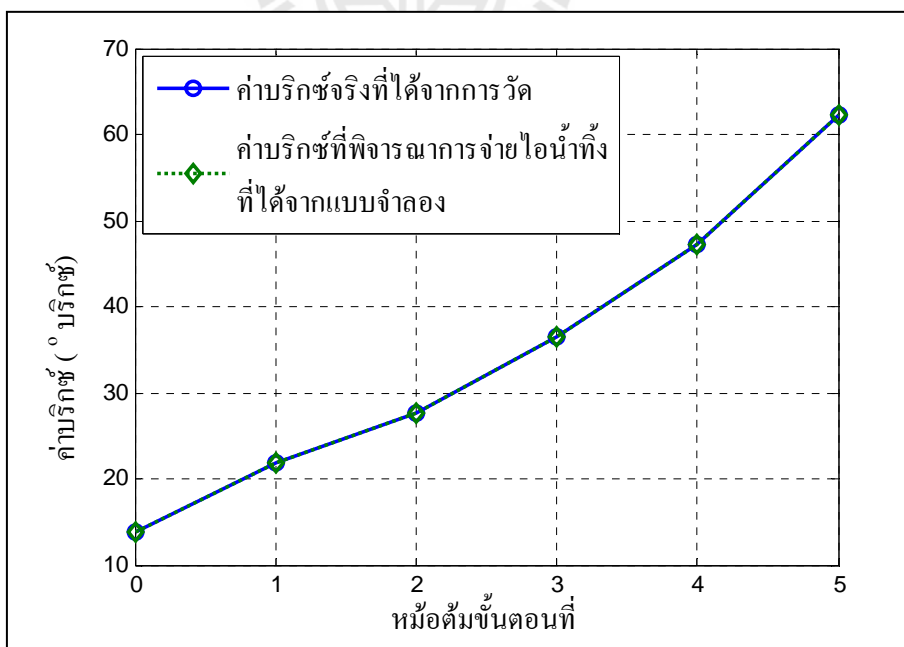
ในการคำนวณรอบแรกจะได้ค่าคงที่ของเมตริก Δ ออกมาค่าหนึ่ง และจะได้คำตอบของตัวแปรอิสระของระบบคือ $x_{n,\text{new}} = x_{n-1} + \Delta$ โดยใช้ค่า $x_{n,\text{new}}$ เป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณรอบถัดไปจนกว่าผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่ค่าตอบ และเมื่อทำการคำนวณซ้ำด้วยวิธีการนิวตัน-รัปสันจนกระทั่งผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่ค่าตอบ สุดท้ายจะทำให้ $\Delta = 0$ และ $F = 0$ และ J จะเป็นเมตริกที่มีค่าคงที่ที่อยู่ในเมตริกนั้นซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระได้ในกรณีที่ตัวแปรควบคุมมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากระบบสมการในตารางที่ 3.3 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกเพื่อแก้ปัญหาได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial B_1 & \square & \square & \partial f_1 / \partial B_{n-1} & \partial f_1 / \partial \dot{F}_0 & \square & \square & \partial f_1 / \partial \dot{F}_{n-1} \\ \partial f_2 / \partial B_1 & \square & \square & \partial f_2 / \partial B_{n-1} & \partial f_2 / \partial \dot{F}_0 & \square & \square & \partial f_2 / \partial \dot{F}_{n-1} \\ \partial f_3 / \partial B_1 & \square & \square & \partial f_3 / \partial B_{n-1} & \partial f_3 / \partial \dot{F}_0 & \square & \square & \partial f_3 / \partial \dot{F}_{n-1} \\ \partial f_4 / \partial B_1 & \square & \square & \partial f_4 / \partial B_{n-1} & \partial f_4 / \partial \dot{F}_0 & \square & \square & \partial f_4 / \partial \dot{F}_{n-1} \\ \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \partial f_{p+n} / \partial B_1 & \square & \square & \partial f_{p+n} / \partial B_{n-1} & \partial f_{p+n} / \partial \dot{F}_0 & \square & \square & \partial f_{p+n} / \partial \dot{F}_{n-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta B_1 \\ \square \\ \square \\ \Delta B_{n-1} \\ \Delta \dot{F}_0 \\ \square \\ \square \\ \Delta \dot{F}_{n-1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ \square \\ \square \\ \square \\ f_{p+n} \end{Bmatrix}$$

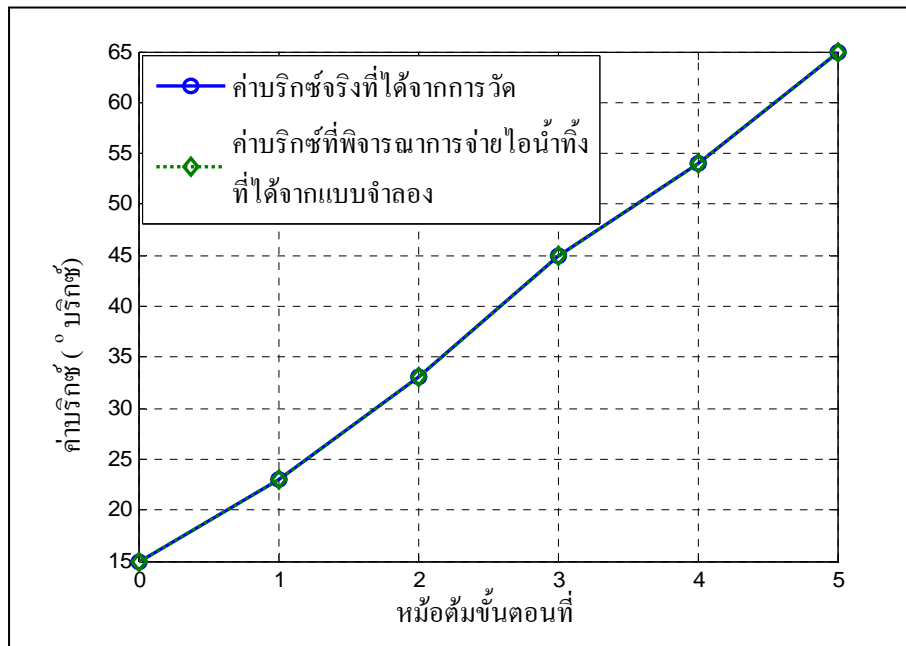
3.5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

3.5.1 เปรียบเทียบค่าบริกซ์ที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองกับค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัด

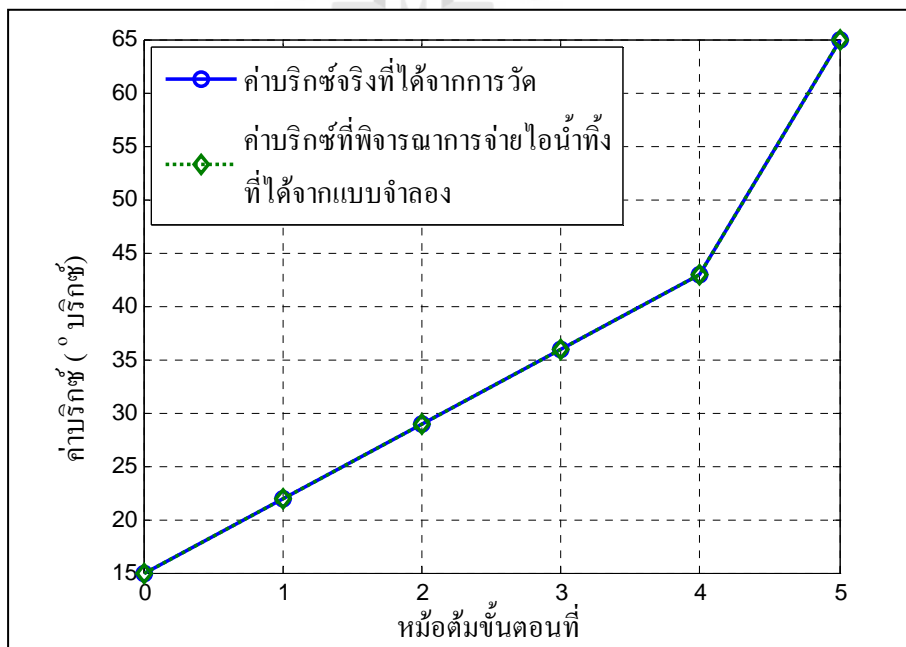
ในทางปฏิบัติโรงงานผลิตน้ำตาลจะทำการเพื่อจ่ายไอน้ำที่มากกว่าค่าที่เหมาะสม อยู่เสมอเนื่องจากมีความกังวลถึงปัจจัยความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำ ในอัตราที่สูงขึ้นหรือน้อยลงซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ จากการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสมจากการเพื่อจ่ายไอน้ำในอัตราที่สูงขึ้นจึงทำให้เกิดไอหัวหม้อในอัตราที่มากเกินไปต่อการถ่ายเทความร้อนในหม้อต้มขั้นตอนถัดไปที่จะทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อม (ค่าบริกซ์) ตามที่ต้องการควบคุม ดังนั้น โรงงานผลิตน้ำตาลจึงจำเป็นต้องมีการจ่ายไอน้ำ (ไอหัวหม้อ) ที่อยู่ เสมอเพื่อควบคุมค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อม (ค่าบริกซ์) ให้มีความเหมาะสมและเพื่อให้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมสุดท้ายมีความเหมาะสมต่อการเคี้ยวในกระบวนการเคี้ยวต่อไป ถ้าหากระบบไม่มีการจ่ายไอหัวหม้อทิ้งและนำไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นนำไปใช้ในกระบวนการต้มทั้งหมดอาจทำให้น้ำเชื่อมมีค่าบริกซ์มากเกินไปหรืออาจทำให้เกิดการไหม้ของน้ำเชื่อมได้ เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองโดยพิจารณาการจ่ายไอน้ำทั้งในอัตราที่เท่ากับกระบวนการผลิตจริงพบว่า ลักษณะของค่าบริกซ์ที่วิเคราะห์โดยแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าบริกซ์จริงซึ่งได้จากการตรวจวัดอย่างมากซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองนี้ได้เป็นอย่างดี ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.11



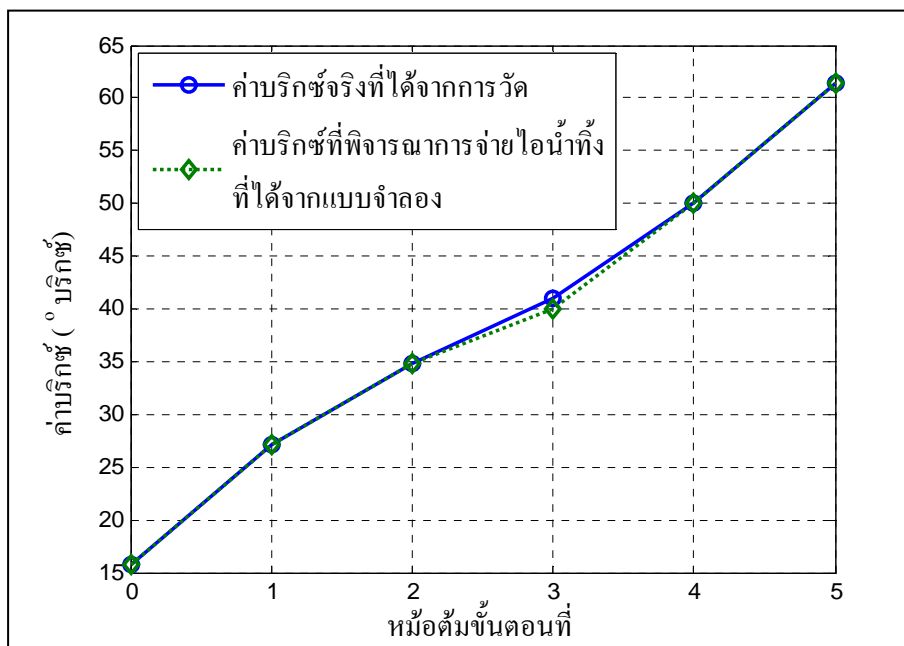
รูปที่ 3.8 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 1



รูปที่ 3.9 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 2



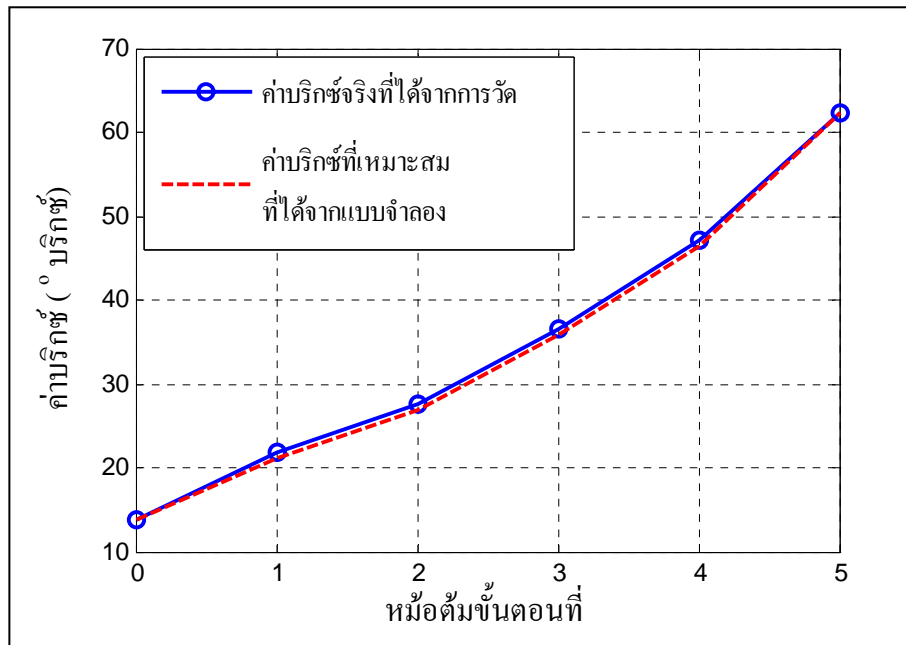
รูปที่ 3.10 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 3



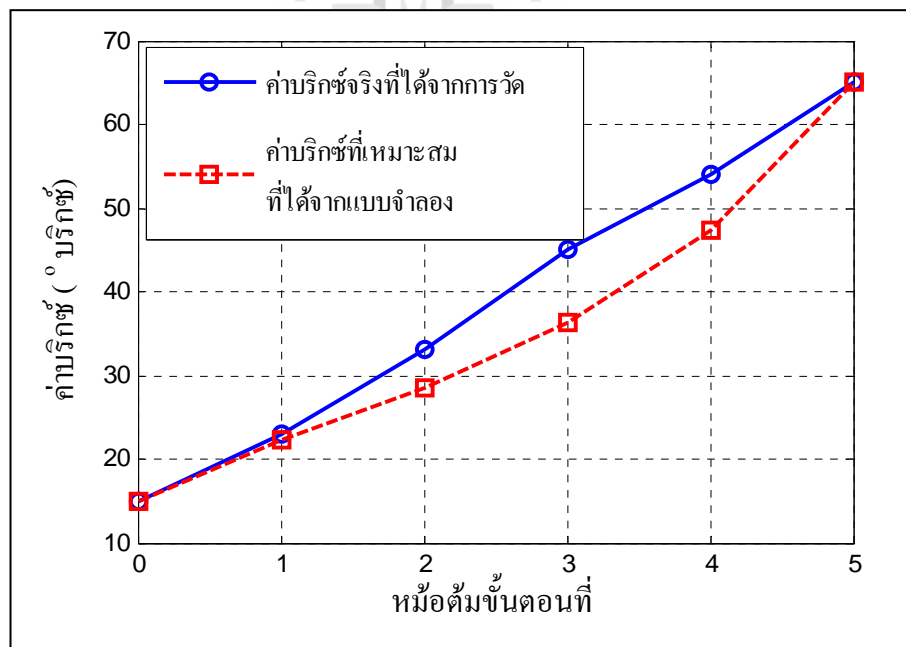
รูปที่ 3.11 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการตรวจวัดของโรงงานที่ 4

3.5.2 การวิเคราะห์หาค่าอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม

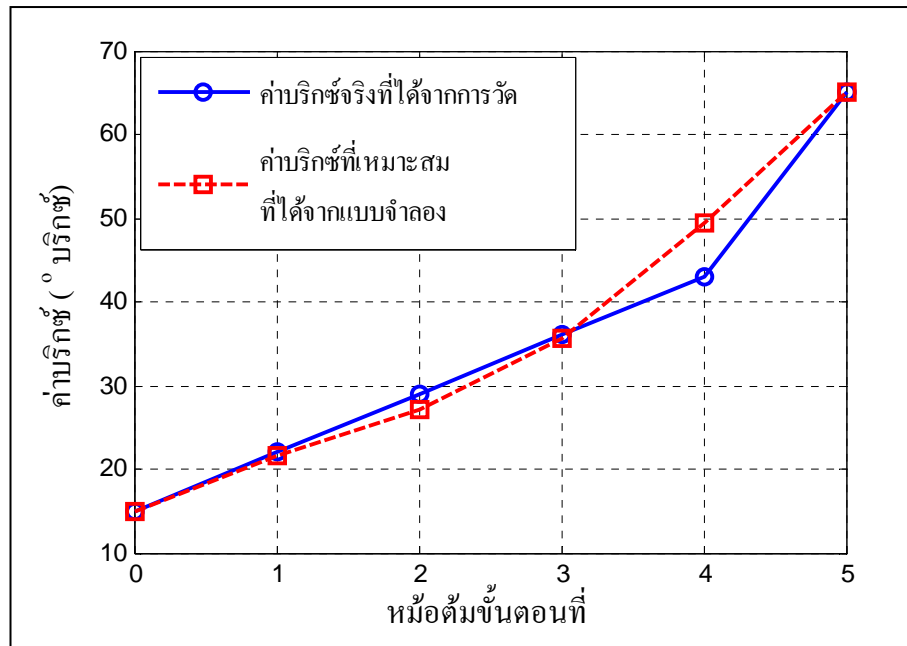
ผู้ประกอบการมักจะเพื่อจ่ายไอน้ำให้กับระบบเนื่องจากมีความกังวลถึงปัจจัยความไม่แน่นอน และเป็นการเพื่อจ่ายไอน้ำที่ไม่มีทิศทางทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยภายใต้ปัจจัยการผลิตของแต่ละโรงงาน อัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมคือ อัตราการใช้น้ำที่มีความพอดีต่อการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำอ้อย หรือน้ำเชื่อมเพื่อระเหยน้ำออกไปจนทำให้ได้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นตามค่าที่ควบคุม โดยไม่มีการปรับแต่งไอหัวหม้อที่เกิดจากการต้มในหม้อต้มแต่ละชั้นตอน (ไม่มีการจ่ายไอน้ำทิ้งเพื่อปรับค่าบริกซ์) เมื่อทราบค่าอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมของระบบจะทำให้ทราบค่าบริกซ์ที่เหมาะสมด้วยเช่นกันเนื่องจากทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.15 เมื่อนำผลลัพธ์ของวิเคราะห์อัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับอัตราการใช้น้ำจริงที่ได้จากการตรวจวัดทำให้สามารถทราบถึงความสิ้นเปลืองพลังงานจากการเพื่อจ่ายไอน้ำอย่างไม่มีทิศทางของโรงงานดังที่แสดงในรูปที่ 3.16 เมื่อใดก็ตามที่ทำการจ่ายไอน้ำมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่เหมาะสมของระบบและไม่มีการปรับแต่งไอหัวหม้อดังที่แสดงในรูป 3.18 จะส่งผลต่อค่าบริกซ์สุดท้ายของกระบวนการต้มทันทีดังที่แสดงในรูปที่ 3.17



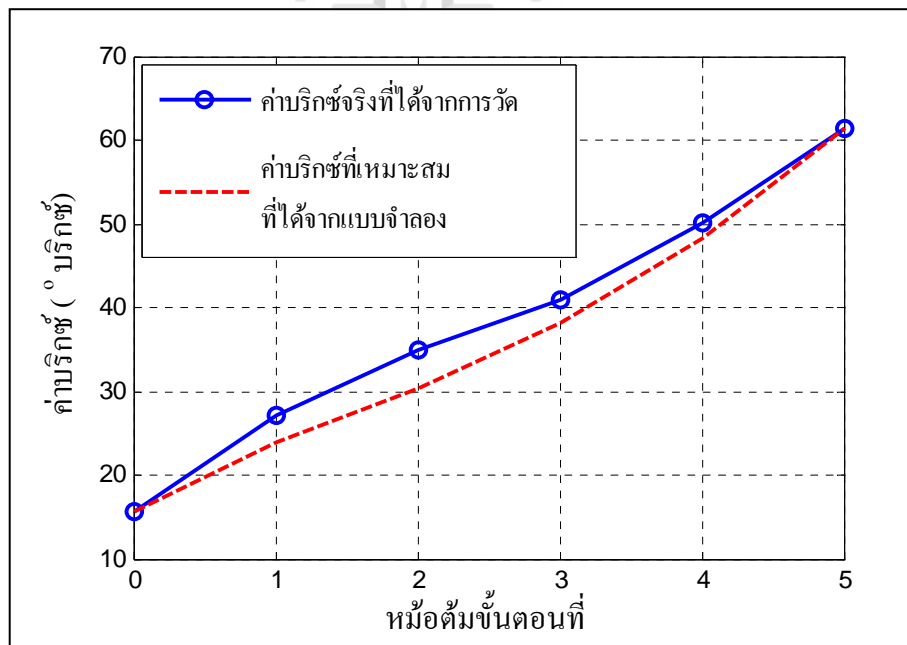
รูปที่ 3.12 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองโดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 1



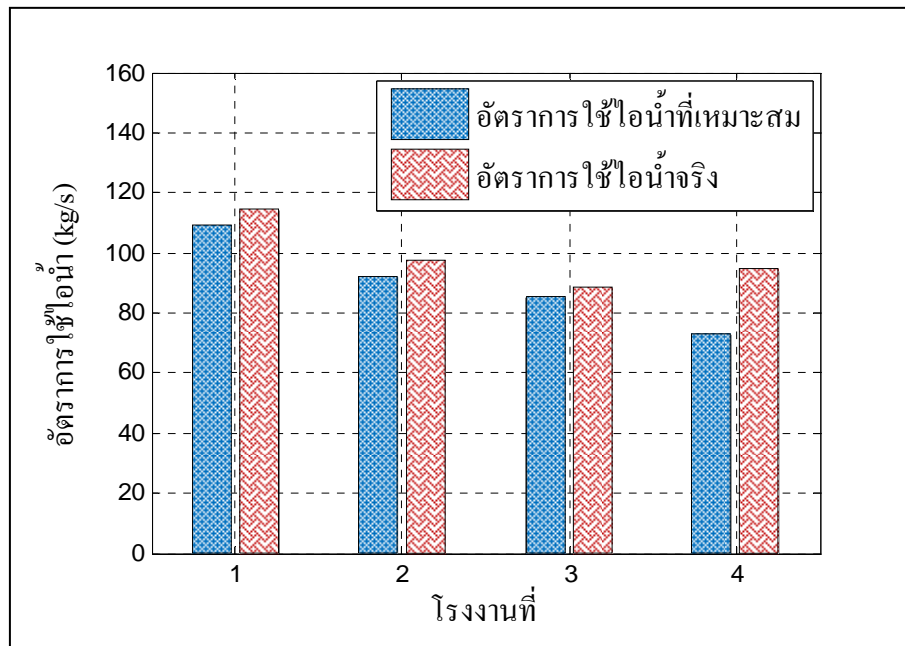
รูปที่ 3.13 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองโดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 2



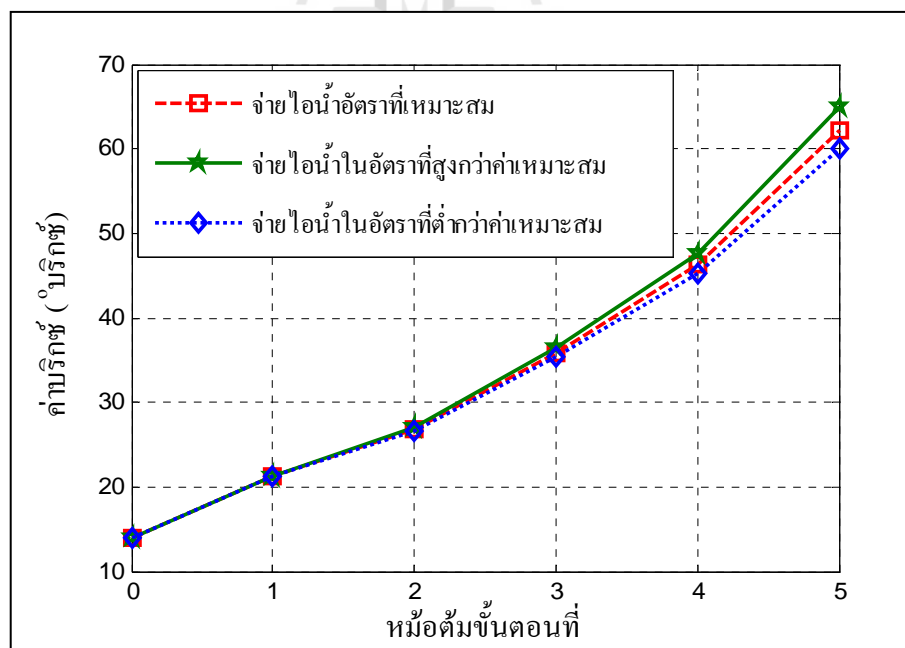
รูปที่ 3.14 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองโดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 3



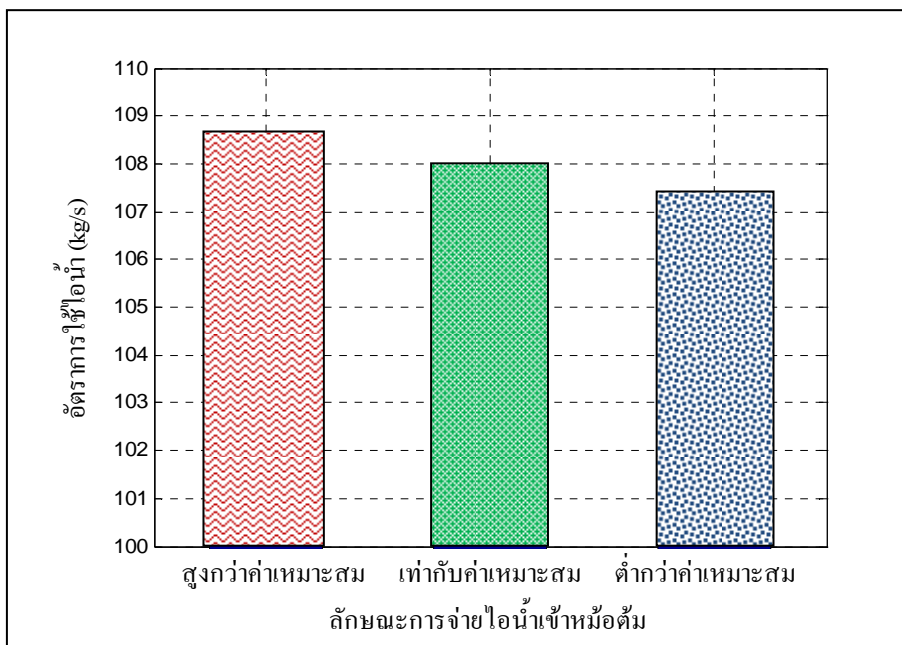
รูปที่ 3.15 ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองโดยจากการจ่ายไอน้ำทิ้งของโรงงานที่ 4



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมกับอัตราการใช้น้ำจริงของแต่ละโรงงาน



รูปที่ 3.17 ค่าปริกซ์ที่ได้จากการจ่ายไอน้ำมากหรือน้อยกว่าค่าที่เหมาะสม โดยไม่มีการปรับแต่งไอหัวหม้อ



รูปที่ 3.18 อัตราการจ่ายไอน้ำในลักษณะต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าบริจค์

3.6 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์จะเห็นว่าสามารถใช้ทำนายค่าอัตราการใช้ไอน้ำ และค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อมได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์หาค่าอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมภายใต้ปัจจัยการผลิตคงที่ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยได้อีกด้วย ซึ่งทำให้ทราบถึงปริมาณไอน้ำที่มีความเพียงพอต่อการถ่ายเทความร้อนกับน้ำอ้อยและทำให้ได้ค่าความเข้มข้นที่ควบคุมโดยไม่ต้องมีการจ่ายไอน้ำทิ้งเหมือนอย่างระบบเดิมก่อนหน้านี้ จากการวิเคราะห์หาค่าอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมทำให้เห็นถึงความสิ้นเปลืองในการจ่ายไอน้ำของระบบจริงที่มากกว่าค่าที่เหมาะสมเกินความจำเป็นคิดเป็น 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ซึ่งเป็นขนาดของการสูญเสียที่มีนัยสำคัญ ทำให้ระบบเกิดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

การวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมในบทที่ 3 นี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงปัจจัยความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของระบบที่มักเกิดขึ้นอยู่เสมอ เพียงแต่สมมุติฐานให้ปัจจัยการผลิตเป็นปัจจัยคงที่เท่านั้น อัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ในครั้งนี้จึงยังไม่ใช่อัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมอย่างแท้จริง ซึ่งในบทที่ 4 จะกล่าวถึงวิธีการหาค่าอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมโดยพิจารณาปัจจัยความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ในบทที่ 3 นี้จะถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์หาค่าอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมโดยพิจารณาปัจจัยความไม่แน่นอนที่จะได้ศึกษาต่อไปในบทที่ 4 ด้วย

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หาอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย ส่วนในบทนี้จะพิจารณาถึงความไม่แน่นอนที่ (Uncertainty) เกิดขึ้นของปัจจัยการผลิตด้วย เนื่องจากในทางปฏิบัติปัจจัยการผลิตของระบบมักจะเกิดความไม่แน่นอนอยู่เสมอ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผู้ประกอบการมักจ่ายไอน้ำเกินความจำเป็นเพื่อชดเชยปัจจัยความไม่แน่นอนเหล่านี้ อย่างไรก็ตาม ซึ่งปัจจัยความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิตประกอบไปด้วย (1) อัตราการผลิต (2) ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น (3) อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น (4) อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่น (5) อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (6) อัตราการใช้น้ำในกระบวนการเลี้ยง และ (7) ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย

ดังนั้นการวิเคราะห์หาอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมต่อกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยที่สามารถรองรับกับความเบี่ยงเบนของความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่อการใช้ไอน้ำจากปัจจัยความไม่แน่นอนทั้งหมดดังกล่าว

4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยความไม่แน่นอน

การวิเคราะห์ปัจจัยความไม่แน่นอนเป็นการวิเคราะห์เพื่อทำให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นน้ำอ้อยเมื่อเกิดความไม่แน่นอนของปัจจัยการผลิตเกิดขึ้น ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ในเรื่องนี้จะใช้ผลลัพธ์บางส่วนที่ได้จากการแก้สมการโดยวิธีนิวตัน-ร่าปสัน (Newton-Raphson) ที่ได้อธิบายในบทที่ 3 เป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์หาคำตอบโดยการหาค่าดิเทอร์มิแนนต์ของเมตริกอนุพันธ์ของฟังก์ชัน (เมตริก J) ที่มีการดูเข้าสู่คำตอบแล้วมาช่วยในการคำนวณ

ผลลัพธ์ที่เข้าสู่คำตอบโดยวิธีนิวตัน-ร่าปสัน จะทำให้เมตริก $\Delta = 0$ และเมตริก $F = 0$ และจะทำให้ทราบค่าของเมตริก J ซึ่งเป็นค่าคงที่ เมื่อต้องการทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระบางตัวซึ่งในที่นี้คืออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสม ($\dot{m}_{s,in}$) จากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมบางตัว (ปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไม่มาก) ที่อยู่ในฟังก์ชัน f_j ของระบบสมการ ดังนั้นจะได้ว่า

$$J\Delta = - \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \delta_i \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

จากกฎของครอเมอร์ทำให้ได้

$$\Delta x_j = - \frac{\delta_i J_{ij}}{\det J} \quad (4.2)$$

โดยที่ J_{ij} แทน โคแฟกเตอร์ $i-j$
 i แทน เลขจำนวนเต็มบ่งแถวของเมตริก
 j แทน เลขจำนวนเต็มบ่งหลักของเมตริก
 ดังนั้นจะได้ว่า

$$\delta_i = \frac{\partial}{\partial c_i} f_i \times \Delta c_i \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.2) หารตลอดด้วย Δc_i และเมื่อ $\Delta c_i \rightarrow 0$ จะได้ว่า

$$\lim_{\Delta c_i \rightarrow 0} \frac{\Delta x_j}{\Delta c_i} = - \frac{\partial}{\partial c_i} f_i \times \frac{J_{ij}}{\det J} \quad (4.4)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial c_i} x_j = - \frac{\partial}{\partial c_i} f_i \frac{J_{ij}}{\det J} \quad (4.5)$$

4.1.1 ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อการใช้ไอน้ำในกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย

ถ้าเราจำแนกปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการจะสามารถจำแนกได้เป็น 7 ปัจจัยดังนี้

1. อัตราการผลิต (\dot{m}_0) มีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากเสถียรภาพของระบบควบคุมการจ่ายน้ำอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิตที่ไม่คงที่ตลอดเวลา หรือนโยบายของโรงงานที่ต้องการเพิ่มหรือลดอัตราการผลิตในช่วงเวลาการผลิตนั้น ๆ

2. ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น (B_0) มีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากคุณภาพของต้นอ้อยที่เก็บเกี่ยวในแต่ละพื้นที่ หรือกรรมวิธีในการเพาะปลูกที่มีความแตกต่างกัน

3. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$) มีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากกระบวนการหีบอ้อยที่เกิดการเสียดสีกันระหว่างต้นอ้อยกับเครื่องจักรซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำอ้อยให้คงที่ได้ตลอดเวลา และอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อม (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม) ที่ไม่สามารถควบคุมได้

4. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพักไส ($T_{j,out}$) มีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหม้ออุ่นแต่ละขั้นตอนที่ลดลงจากตะกรันที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่ในผนังท่อส่งน้ำอ้อยเมื่อผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ๆ

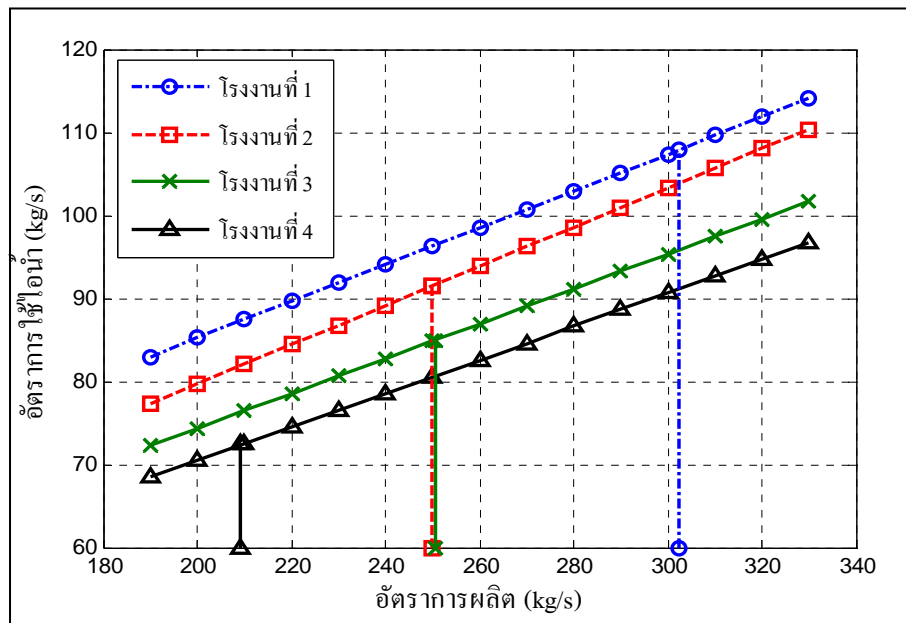
5. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0) มีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหม้ออุ่นน้ำอ้อยดังที่กล่าวในข้อที่ 5

6. อัตราการใช้ไอน้ำในกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$) มีความไม่แน่นอนที่เกิดจากเสถียรภาพของระบบควบคุมอัตราการจ่ายน้ำเชื่อมหรือสารละลายน้ำตาลเข้าสู่กระบวนการเคี้ยวที่ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ตลอดเวลา

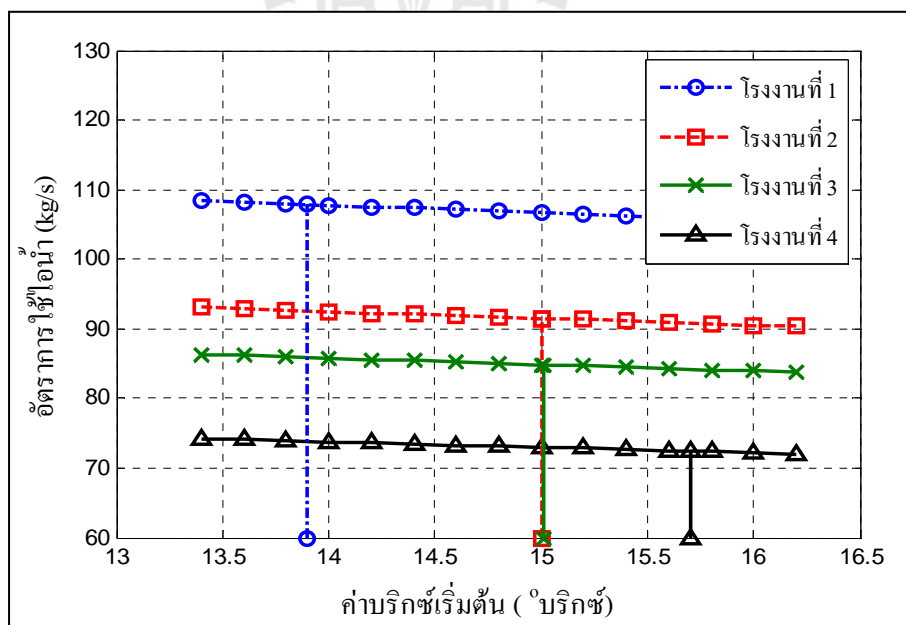
7. ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_5) มีความไม่แน่นอนที่เกิดจากนโยบายด้านพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของโรงงาน กล่าวคือ โรงงานที่เน้นด้านการประหยัดพลังงานจะกำหนดค่าบริคซ์ของน้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการต้มที่มีค่าต่ำ (ประมาณ 60°บริคซ์) ส่วนโรงงานที่เน้นด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะกำหนดค่าบริคซ์ที่ได้จากกระบวนการต้มที่มีค่าสูง (ประมาณ 70°บริคซ์)

4.1.2 อิทธิพลจากปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำของระบบ

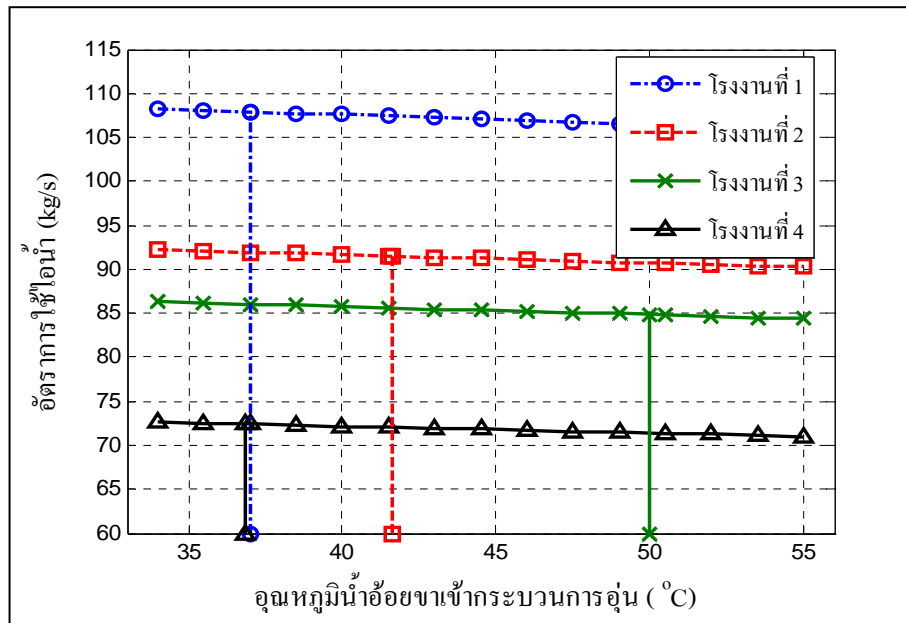
จากการวิเคราะห์ผลของการส่งอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสม โดยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการที่ (4.5) ได้ผลดังนี้



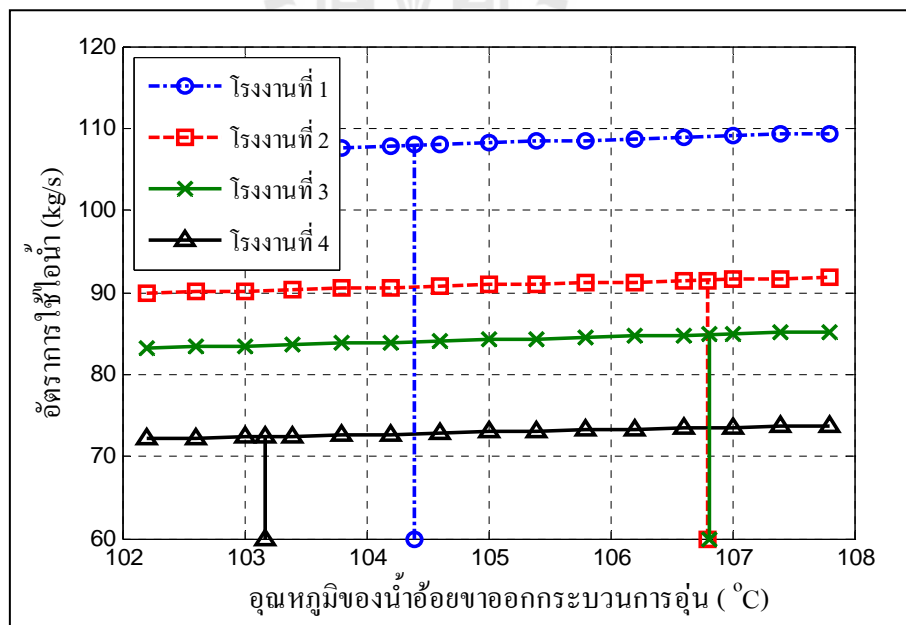
รูปที่ 4.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$)
เทียบกับอัตราการผลิต (\dot{m}_0)



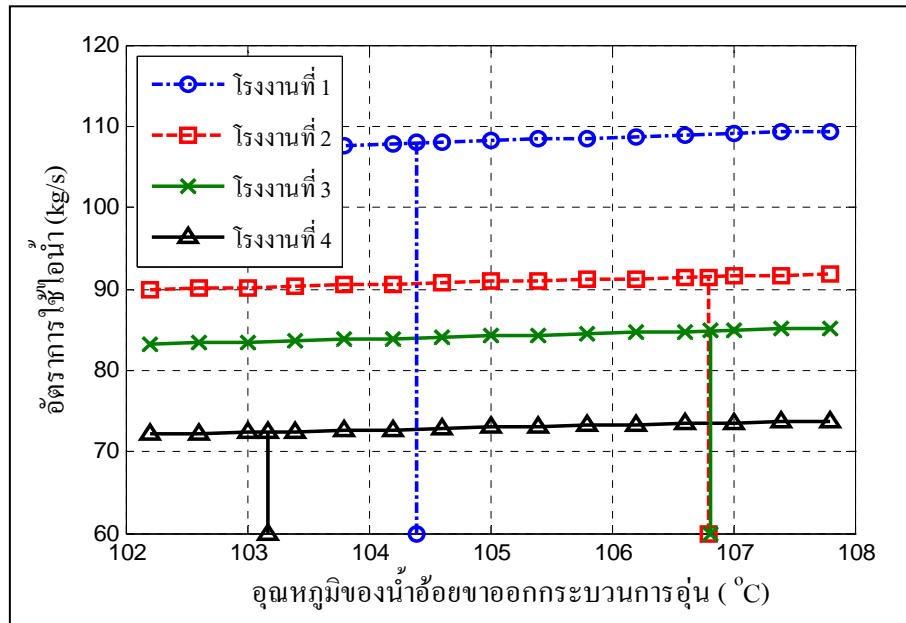
รูปที่ 4.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$)
เทียบกับความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น (B_0)



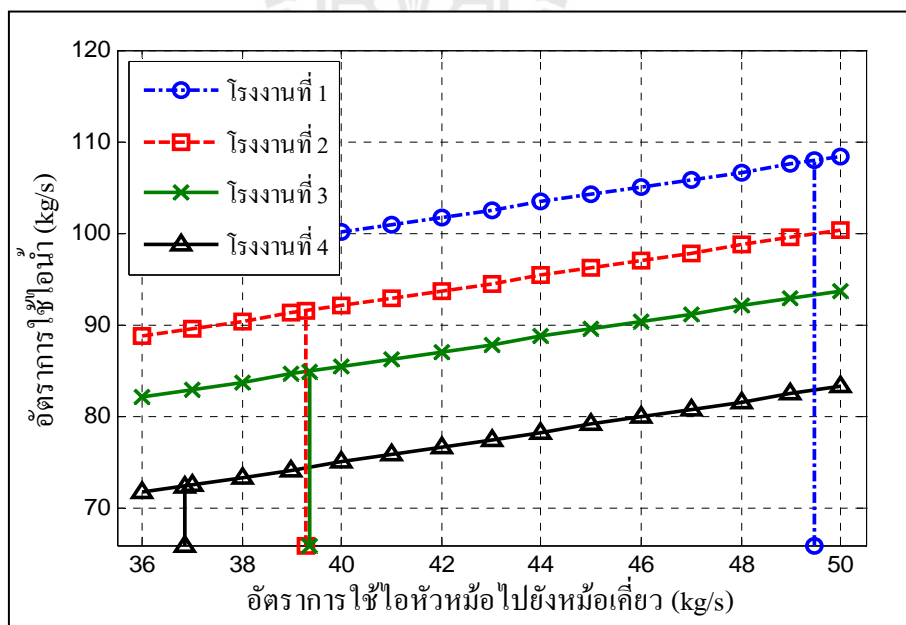
รูปที่ 4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$)
เทียบกับอุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$)



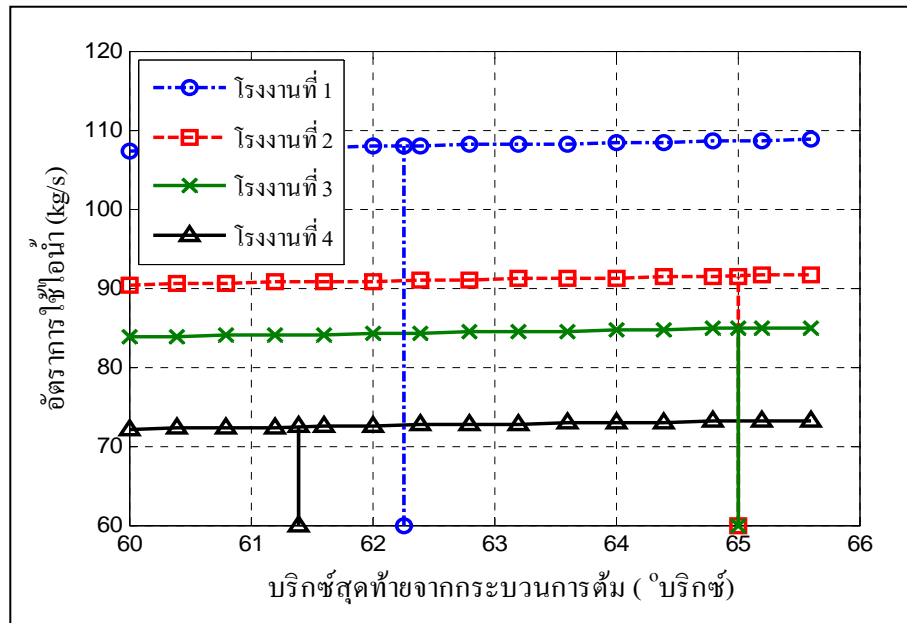
รูปที่ 4.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$)
เทียบกับอุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่น ($T_{j,out}$)



รูปที่ 4.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$)
เทียบกับอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0)



รูปที่ 4.6 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$) เทียบกับ
อัตราการจ่ายไอน้ำไปสู่กระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)



รูปที่ 4.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำ ($\dot{m}_{s,in}$) เทียบกับ ความเข้มข้นน้ำอ้อยหลังจากกระบวนการต้ม (B_5)

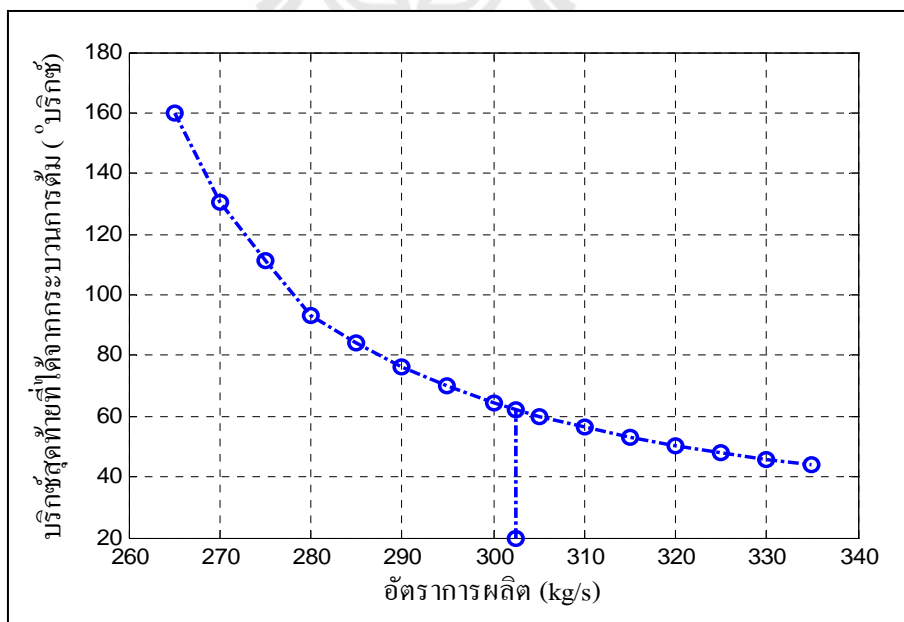
จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อการใช้น้ำในกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.7 มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากการพิจารณาปัจจัยความไม่แน่นอนในช่วงความเบี่ยงเบนแคบ ๆ สาเหตุที่พิจารณาในช่วงแคบ ๆ เนื่องจากปัจจัยความไม่แน่นอนที่กล่าวถึงเป็นปัจจัยการผลิตที่พยายามควบคุมให้คงที่เพราะมีผลต่อคุณภาพของน้ำตาลปัจจัยการผลิตดังกล่าวจึงไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ยกเว้นแต่เพียงอัตราการผลิต (\dot{m}_0) ที่ถูกพิจารณาในช่วงความเบี่ยงเบนกว้างเนื่องจากอัตราการผลิตอาจเปลี่ยนแปลงได้มากจากการเพิ่มอัตราการผลิตของโรงงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ในการพิจารณาผลกระทบของปัจจัยความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจะพิจารณาใน 2 ลักษณะคือ (1) ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมแบบผันตรงได้แก่ อัตราการผลิต (\dot{m}_0) อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่น ($T_{j,out}$) อัตราการจ่ายไอหัวมือไปสู่กระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$) และความเข้มข้นของน้ำเชื่อมหลังจากผ่านกระบวนการต้ม (B_5) (2) ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมแบบผกผันได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำอ้อย (B_0) อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$) และอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0) ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมเมื่อเกิดความไม่แน่นอนในแต่ละโรงงานมีค่าต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากในแต่ละโรงงานมีปัจจัยการผลิตที่ต่างกัน

4.1.3 ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมในกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย

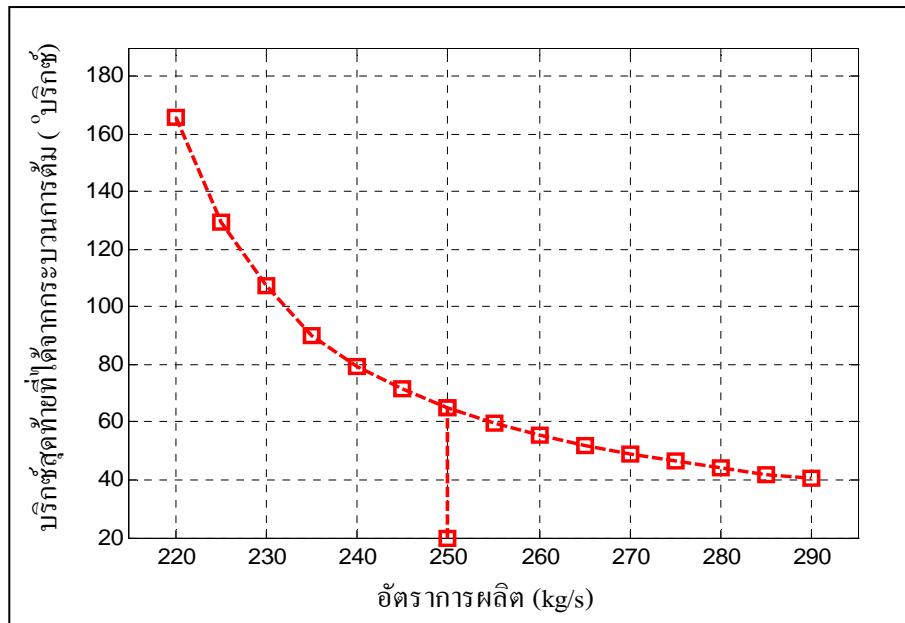
ถ้าเราจำแนกปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมจะสามารถจำแนกได้เป็น 7 ปัจจัยดังนี้

1. อัตราการผลิต (\dot{m}_0)
2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำอ้อย (B_0)
3. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$)
4. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นไปสู่กระบวนการพักใส่ ($T_{j,out}$)
5. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0)
6. อัตราการจ่ายไอหัวหม้อไปกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacumpant}$)
7. อัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย ($\dot{m}_{s,in}$)

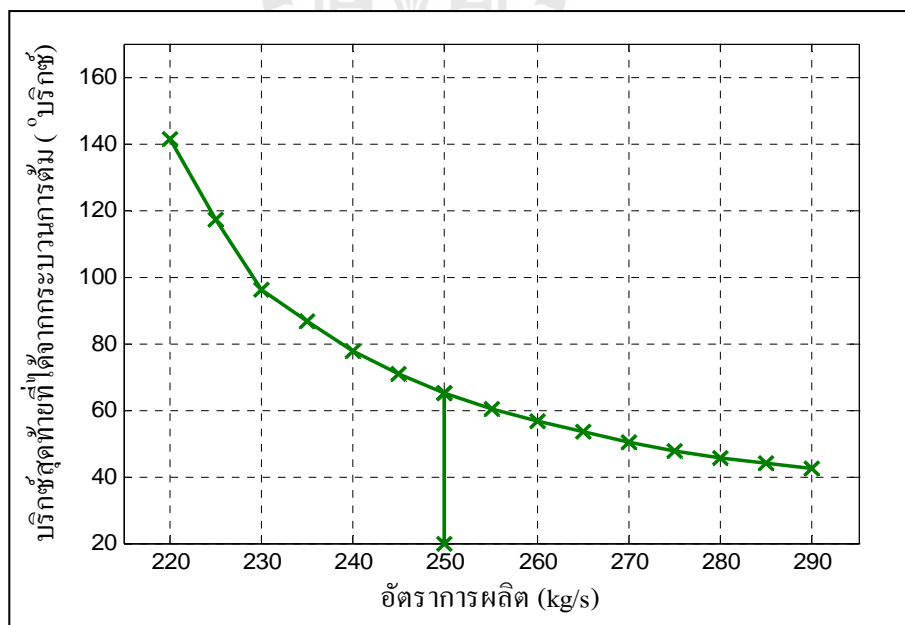
สาเหตุของการเกิดความไม่แน่นอนของปัจจัยการผลิตในข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 6 ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1.1 ส่วนความไม่แน่นอนในข้อที่ 7 คือ อัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย มีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากการจ่ายไอน้ำเข้าสู่กระบวนการต้ม โดยการประมาณการจากประสบการณ์ของพนักงานปฏิบัติการของผู้ประกอบการ



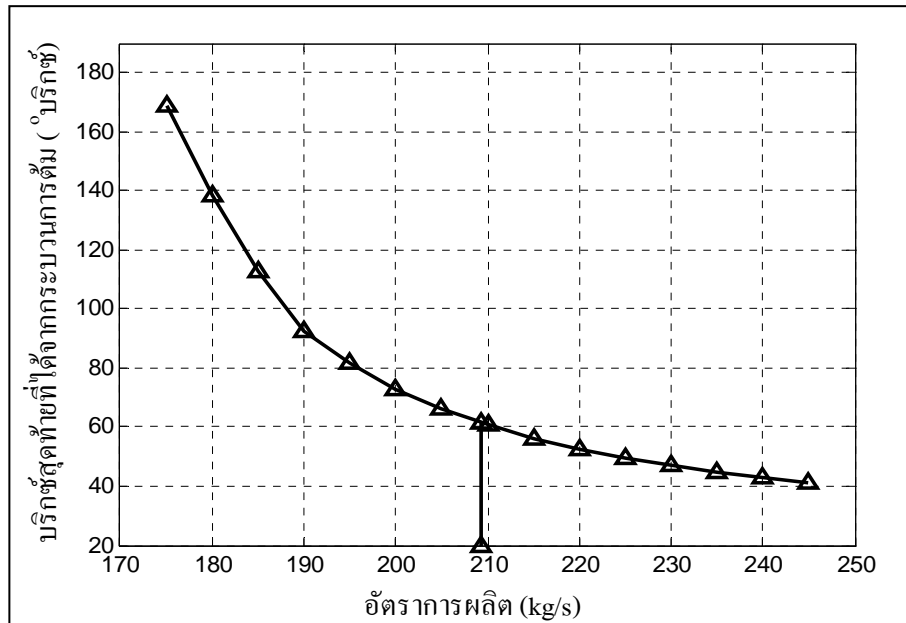
รูปที่ 4.8 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5) เทียบกับอัตราการผลิต (\dot{m}_0) ของโรงงานที่ 1



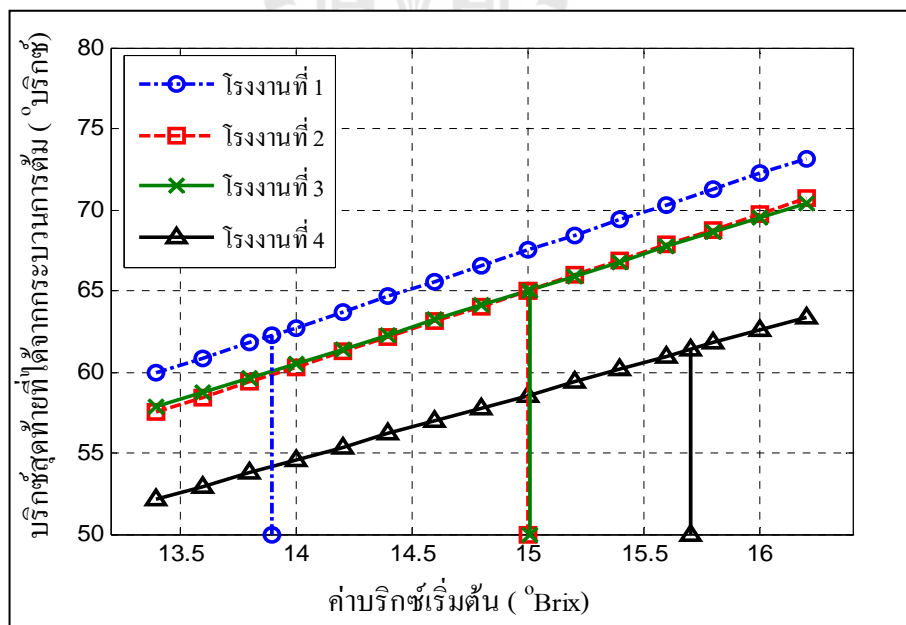
รูปที่ 4.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5)
เทียบกับอัตราการผลิต (\dot{m}_0) ของโรงงานที่ 2



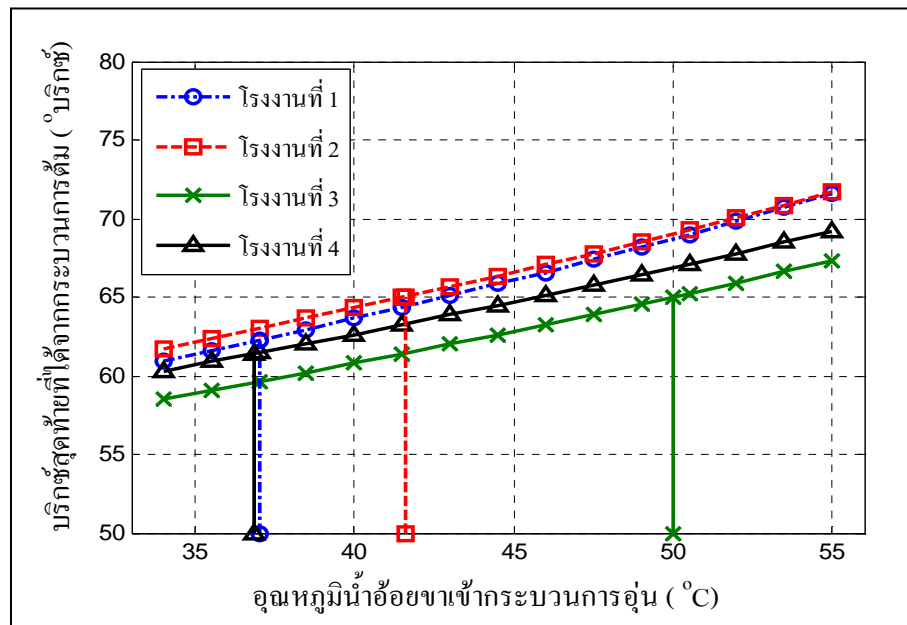
รูปที่ 4.10 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5)
เทียบกับอัตราการผลิต (\dot{m}_0) ของโรงงานที่ 3



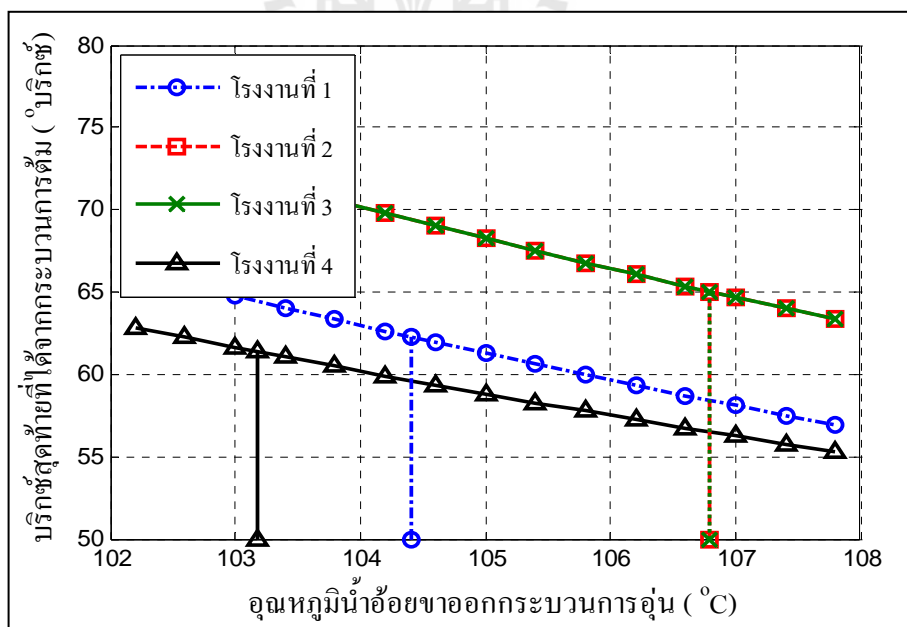
รูปที่ 4.11 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5)
เทียบกับอัตราการผลิต (m_0) ของโรงงานที่ 4



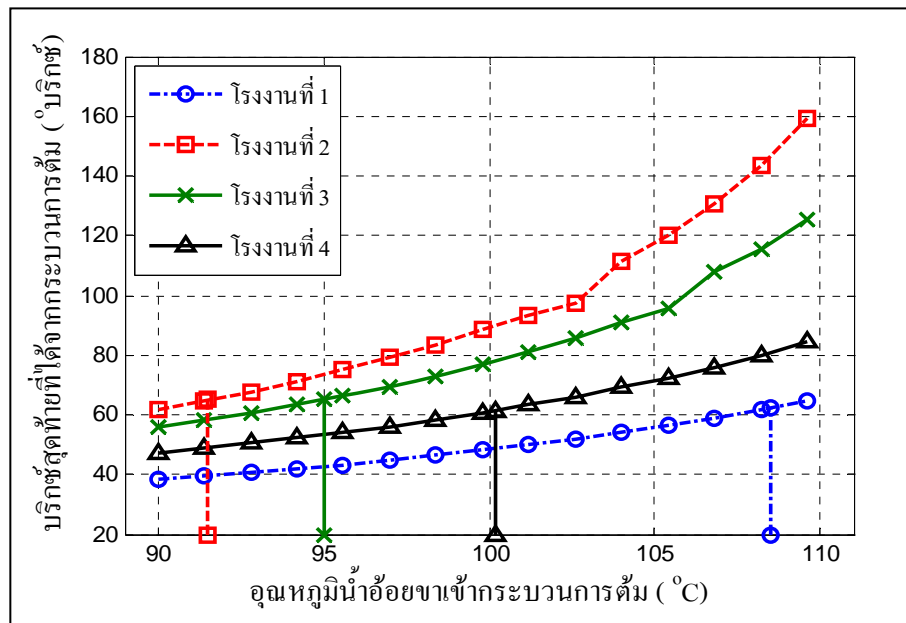
รูปที่ 4.12 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5)
เทียบกับความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น (B_0)



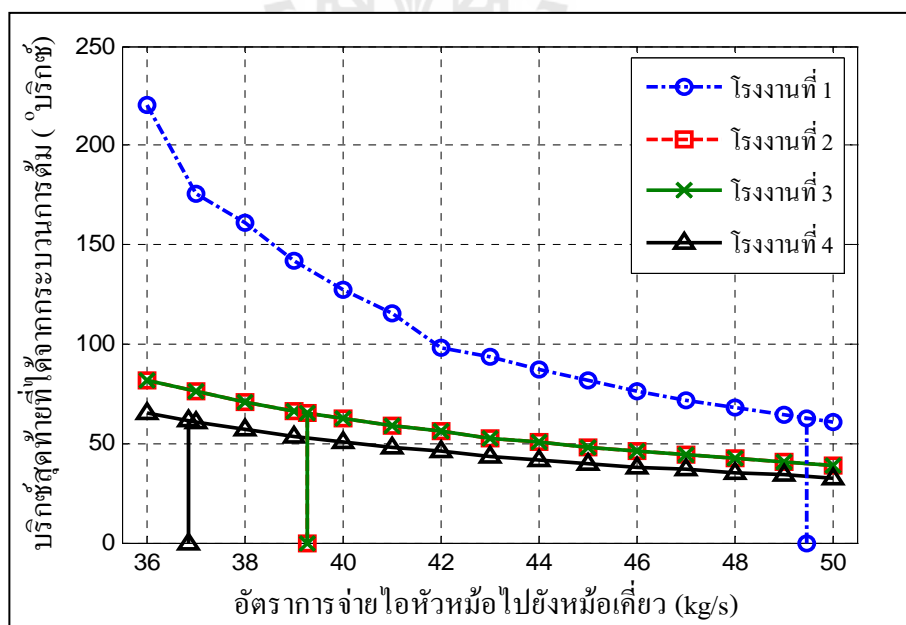
รูปที่ 4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5) เทียบกับ อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$)



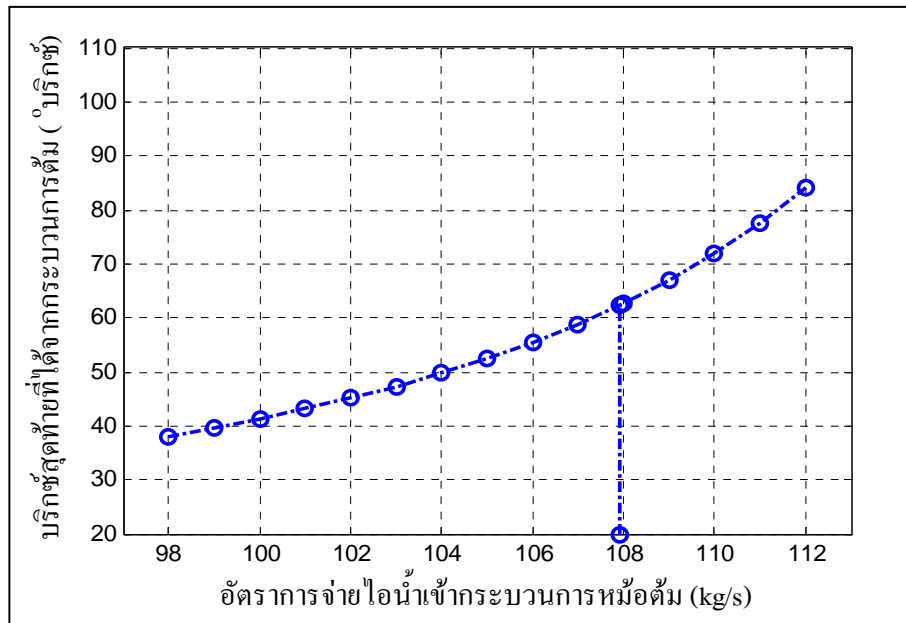
รูปที่ 4.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5) เทียบกับ อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่น ($T_{j,out}$)



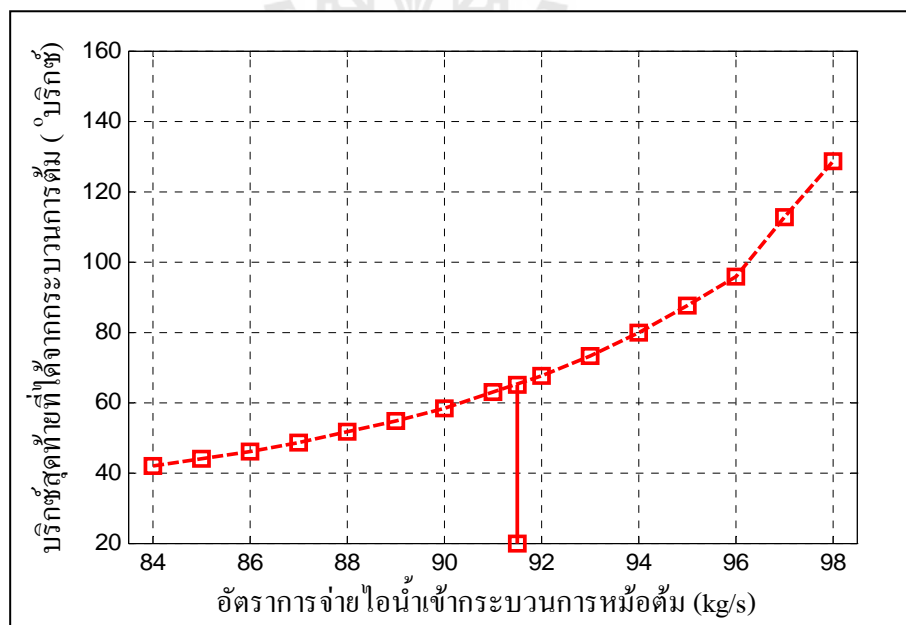
รูปที่ 4.15 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5) เทียบกับ อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0)



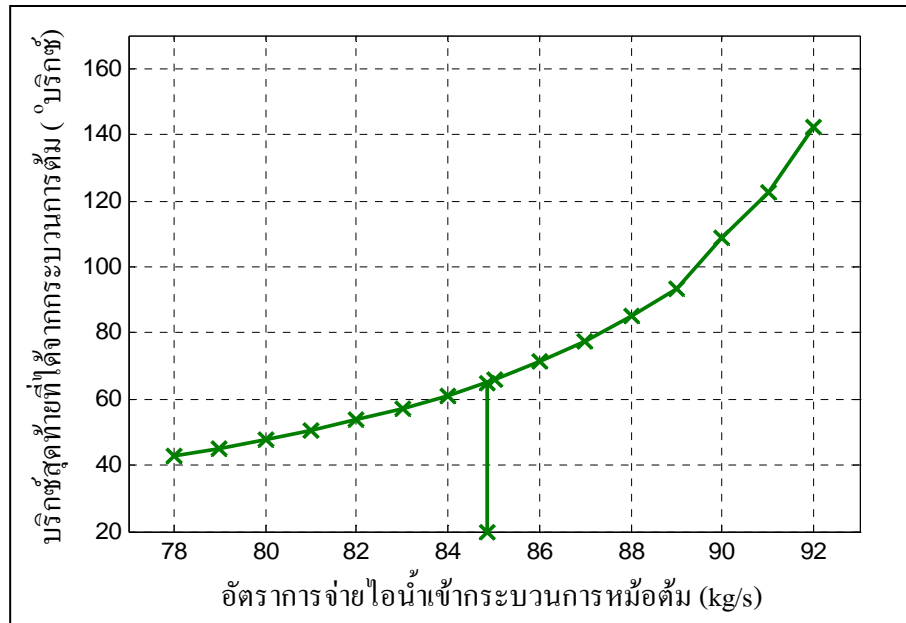
รูปที่ 4.16 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_5) เทียบกับ อัตราการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการเคี้ยว ($m_{vacuumpan}$)



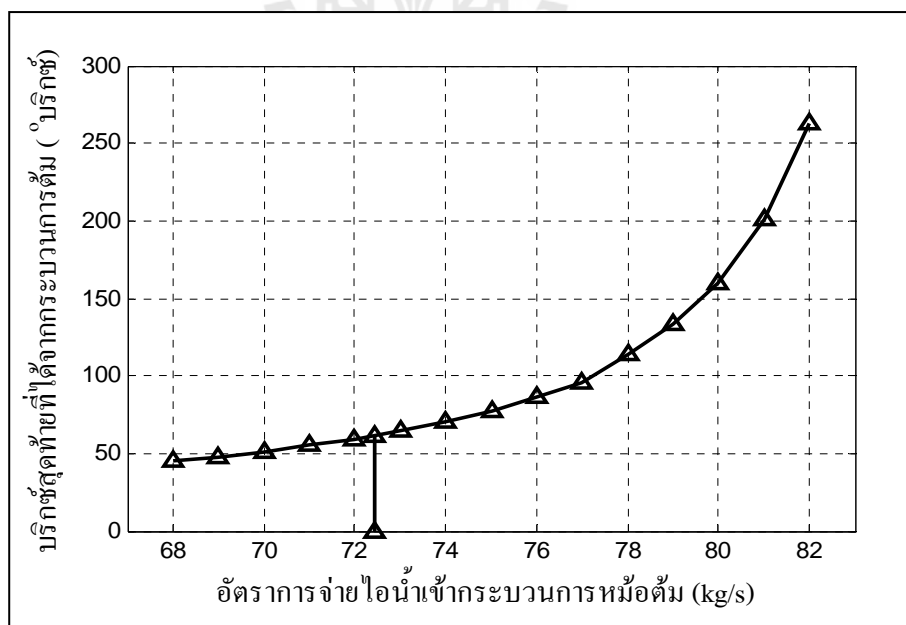
รูปที่ 4.17 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_s) เทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้ม ($\dot{m}_{s,in}$) ของโรงงานที่ 1



รูปที่ 4.18 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_s) เทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้ม ($\dot{m}_{s,in}$) ของโรงงานที่ 2



รูปที่ 4.19 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_s) เทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้ม ($\dot{m}_{s,in}$) ของโรงงานที่ 3



รูปที่ 4.20 อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเชื่อม (B_s) เทียบกับอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับกระบวนการต้ม ($\dot{m}_{s,in}$) ของโรงงานที่ 4

ปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนอกจากจะส่งผลต่อการใช้ไอน้ำแล้ว ยังส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมอีกด้วย คุณภาพของน้ำเชื่อมในที่นี้หมายถึงค่าความเข้มข้น (ค่าบริกซ์) ของน้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการต้ม (B_s) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อมภายใต้ปริมาณไอน้ำที่จ่ายให้กับระบบหม้อต้มที่มีความเหมาะสมกับปัจจัยการผลิตเริ่มต้น จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตจะต้องอยู่ในช่วงความเบี่ยงเบนแคบ ๆ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตในช่วงที่กว้างเกินไปจะทำให้เกิดการไหม้ของน้ำเชื่อมในกรณีที่อัตราการผลิตต่ำเกินไป (เส้นแนวโน้มลู่เข้าสู่นันต์) หรือจะทำให้ให้น้ำเชื่อมมีความเข้มข้นน้อยเกินไปสำหรับการเคี่ยวในกรณีที่อัตราการผลิตสูงเกินไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น (B_0) และอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$) จะส่งผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อมภายใต้ปริมาณไอน้ำที่จ่ายให้กับระบบหม้อต้มที่มีความเหมาะสมกับปัจจัยการผลิตเริ่มต้น จะเห็นว่ามิลักษณะความเป็นเชิงเส้นในช่วงโดเมนสั้น ๆ ซึ่งมีความแปรผันโดยตรงต่อค่าบริกซ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการต้มดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นเข้าสู่กระบวนการพักใส ($T_{j,out}$) จะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมลักษณะเชิงเส้นแบบผกผันต่อค่าบริกซ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการต้มดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0) จะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมภายใต้ปริมาณไอน้ำที่ให้กับระบบหม้อต้มที่มีความเหมาะสมกับปัจจัยการผลิตเริ่มต้น จะเห็นว่ามีลักษณะความเป็นเชิงเส้นในช่วงโดเมนสั้น ๆ และแปรผันโดยตรงต่อค่าบริกซ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการต้มดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 อัตราการจ่ายไอหัวหม้อของหม้อต้มขั้นตอนแรกไปสู่หม้อเคี่ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$) ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมลักษณะที่เป็นเชิงเส้นในช่วงความเบี่ยงเบนแคบ ๆ และแปรผันตรงต่อค่าบริกซ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการต้มดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 อัตราการจ่ายไอน้ำให้กับระบบหม้อต้ม ($\dot{m}_{s,in}$) ไม่ควรมีความผันผวนมากเกินไป ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายไอน้ำให้กับระบบหม้อต้มในช่วงที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการไหม้ของน้ำเชื่อมในกรณีที่อัตราการจ่ายไอน้ำให้กับระบบหม้อต้มสูงเกินไป (เส้นแนวโน้มลู่เข้าสู่นันต์) หรือจะทำให้ให้น้ำเชื่อมมีความเข้มข้นน้อยเกินไปสำหรับการเคี่ยวในกรณีที่อัตราการจ่ายไอน้ำให้กับระบบหม้อต้มต่ำเกินไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ถึงรูปที่ 2.13

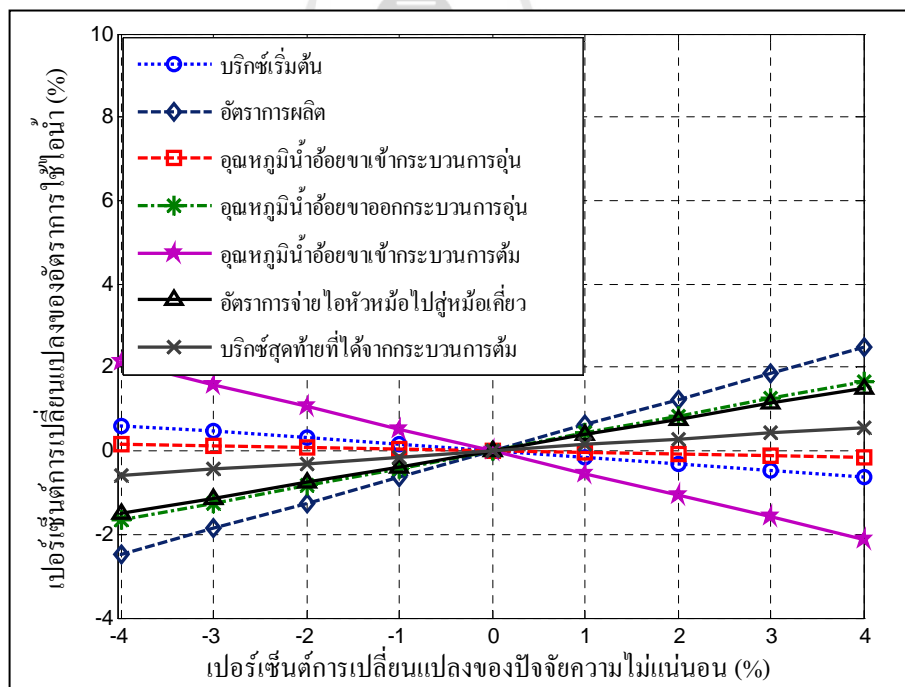
4.1.4 ขนาดของอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอน

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำเมื่อปัจจัยความไม่แน่นอนต่างๆของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละปัจจัย เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวใน 2 ทิศทางคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบผันตรง และอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบผกผัน

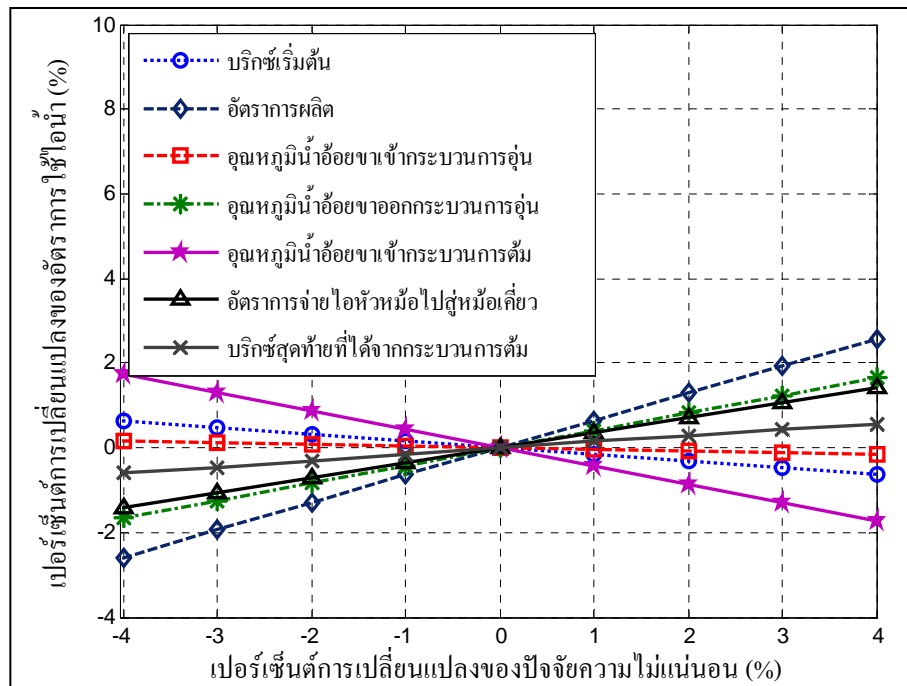
จากตารางที่ ก.5.1 และตารางที่ ก.5.2 ในภาคผนวก ก แสดงถึงช่วงของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตแต่ละปัจจัยที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการผลิตโดยเฉลี่ยที่อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ ± 4.0 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะทำการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมเมื่อปัจจัยการผลิตเปลี่ยนในรูปของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่โดเมนเดียวกันคือ ± 4.0 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของอิทธิพลส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำของระบบของปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta \dot{m}_{s,in} = \frac{\partial}{\partial c} \dot{m}_{s,in} \times (c) \% \text{change} \quad (4.6)$$

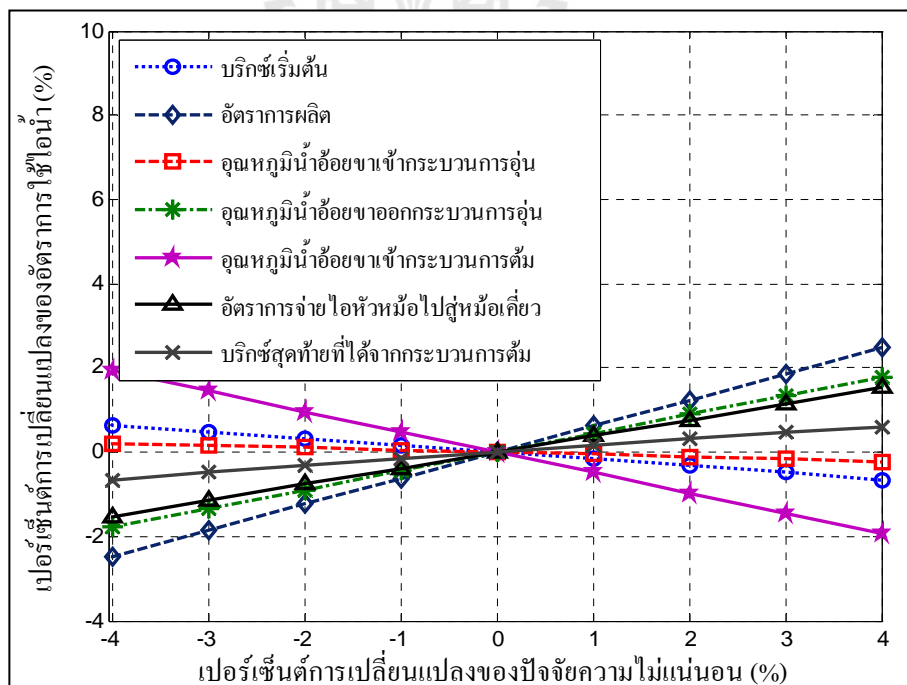
$$\dot{m}_{s,in} \left(\frac{\% \text{change}}{\text{uncertainty}(c)} \right) = \frac{\Delta \dot{m}_{s,in}}{\dot{m}_{s,in} \left(\frac{\% \text{change}}{\text{properly}} \right)} \times 100\% \quad (4.7)$$



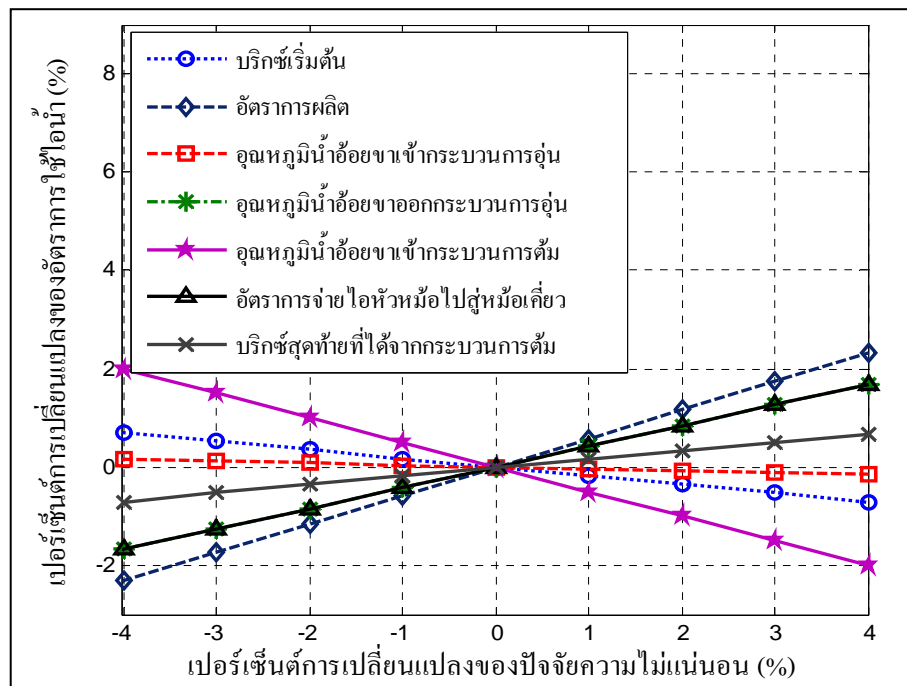
รูปที่ 4.21 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 1



รูปที่ 4.22 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 2



รูปที่ 4.23 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 3



รูปที่ 4.24 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำในรูปของเปอร์เซ็นต์ของโรงงานที่ 4

จากสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.7) นำไปสู่ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนต่างๆ (Uncertainty factor) เกิดขึ้น การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำให้เห็นถึงขนาดและทิศทางของการส่งอิทธิพลที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่สามารถเปรียบเทียบได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลสูงสุดต่ออัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการ และปัจจัยใดมีอิทธิพลน้อยที่สุดต่ออัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการ รวมถึงทิศทางที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำว่ามีลักษณะอย่างไร ซึ่งแนวโน้มการส่งอิทธิพลของแต่ละปัจจัยในแต่ละโรงงานมีแนวโน้มของทิศทางการส่งผลที่เหมือนกันแต่จะต่างกันเล็กน้อยที่ขนาดของการส่งอิทธิพลหรือความชันของกราฟที่ได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.24 สาเหตุที่ขนาดของการส่งผลต่อการใช้น้ำที่ต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากปัจจัยการผลิตของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกัน

4.1.5 วิเคราะห์ผลขนาดของอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอน

จากสมการที่ (3.11) ในบทที่ 3 ทำการแยกพจน์สมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \dot{w}_n h_{g@T_{v,n}} + \dot{m}_n c_{p,n} T_n - \dot{m}_0 c_{p,0} T_0 + m_{vac} h_{g@T_{v,1}} \\
& \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \\
& \quad (5) \quad (6) \\
\dot{m}_{s,in} = & \frac{+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\dot{m}_0 c_{p,0} \Delta T_j}{h_{fg@T_{v,i}}} \times h_{g@T_{v,i}} + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{F}_i h_{f@T_{v,i}}}{h_{fg@T_{s,in}}} \quad (3.11)
\end{aligned}$$

ปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแบบผันตรงที่มีผลต่ออัตราการใช้อิอน้ำมากที่สุดต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคือ อัตราการผลิต (\dot{m}_0) เนื่องจากอิทธิพลในพจน์ที่ (5) ของสมการที่ (3.11) ซึ่งเป็นอิทธิพลของพลังงานที่ใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยที่จ่ายให้กับระบบสูงขึ้นเมื่อมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นซึ่งมีสัดส่วนที่สูงสุดเนื่องจากต้องจ่ายไอหัวหม้อ (สถานะไอน้ำอิ่มตัว) จากหม้อต้มชั้นตอนต่าง ๆ ให้กับหม้ออุ่นทุกตำแหน่ง (i, j) และอัตราการผลิตที่เข้าสู่หม้อต้มชั้นตอนแรกจะต้องถูกต้มจนทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นไอน้ำมากพอต่อการส่งจ่ายไปยังกระบวนการเคี้ยว และเนื่องจากหม้อต้มชั้นตอนแรกมีความดันสูงสุดในระบบหม้อต้มแบบหลายชั้นตอนดังนั้นการที่จะทำให้น้ำอ้อยเกิดการเปลี่ยนเฟสกลายเป็นไอน้ำอิ่มตัวได้จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในหม้อต้มชั้นตอนแรกจึงมีค่าสูงสุดตามไปด้วย เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อการใช้ไอน้ำสูงเป็นอันดับสองคือ อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นเพื่อเข้าสู่กระบวนการพักไส และอัตราการจ่ายไอหัวหม้อสู่กระบวนการเคี้ยวซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากอิทธิพลในพจน์ที่ (5) และพจน์ที่ (4) ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของการใช้อิอน้ำของระบบที่ใกล้เคียงกันสาเหตุที่อิทธิพลน้อยกว่าอัตราการผลิตเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่นมีขนาด ΔT_j ที่หม้ออุ่นตำแหน่ง $j=1$ และ $i=1$ ซึ่งใช้ไอหัวหม้อที่ได้จากการต้มน้ำอ้อยของหม้อต้มชุดแรก ($i=1$) เป็นแหล่งพลังงานเท่านั้น เช่นเดียวกับไอหัวหม้อที่จ่ายไปสู่หม้อเคี้ยวจึงส่งผลกระทบต่อการใช้ไอน้ำของระบบน้อยกว่าอัตราการผลิต สุดท้ายปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่ออัตราการใช้อิอน้ำแบบผันตรงน้อยที่สุดคือ ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ต้องการหลังจากผ่านกระบวนการต้มมีผลต่ออัตราการใช้อิอน้ำน้อยที่สุดเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในหม้อต้มชั้นตอนสุดท้ายเป็นพลังงานความร้อนของไอหัวหม้อของหม้อต้มชั้นตอนก่อนหน้าซึ่งมีค่าต่ำเนื่องจากหม้อต้มชุดท้าย ๆ มีความเป็นสุญญากาศ ทำการจ่ายไอหัวหม้อดังกล่าวให้กับหม้อต้มชั้นตอนสุดท้ายที่มีความเป็นสุญญากาศมากที่สุด (ประมาณ 0.16 บาร์) ของระบบหม้อต้มแบบหลายชั้นตอนจึงทำให้มีอิทธิพลต่อการใช้พลังงานน้อยกว่าปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้อิอน้ำแบบผันตรงในรูป

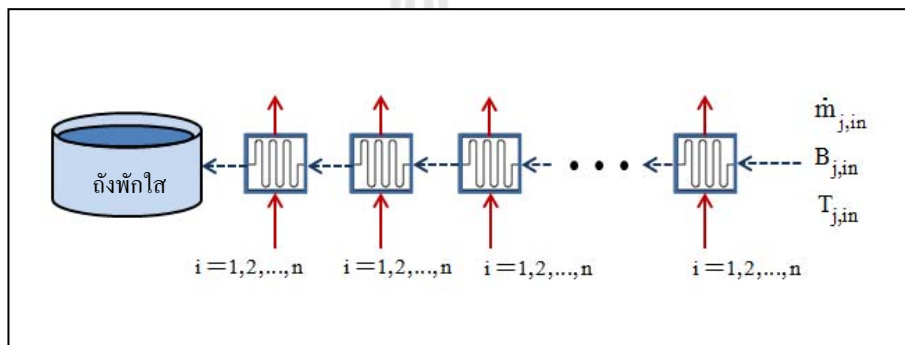
ของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงมีลักษณะดังนี้ $(\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial \dot{m}_0} > \frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial T_{j,out}} \approx \frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial \dot{m}_{vac}} > \frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial B_5})$ ส่วนปัจจัย

การผลิตที่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแบบผกผันที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำมากที่สุดต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคือ อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม และความเข้มข้นน้ำอ้อยเริ่มต้นซึ่งได้รับอิทธิพลในพจน์ที่ (3) เนื่องจากน้ำอ้อยจากกระบวนการพักใส่ที่ถูกส่งจ่ายไปยังหม้อต้มขั้นตอนแรกมีความเข้มข้นที่ต่ำที่อุณหภูมิใกล้จุดเดือด (T_0) จะต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการต้ม หากความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น และอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มลดลง เพื่อระเหยน้ำที่อยู่ในน้ำอ้อยออกไปจนทำให้น้ำอ้อยมีความเข้มข้นสูงขึ้น และต้องได้ปริมาณไอหัวหม้อที่มากพอต่อการส่งจ่ายให้กับระบบหม้ออุ่นและระบบหม้อเดี่ยว ซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานที่สูงกว่าการต้มที่หม้อต้มขั้นตอนอื่น ๆ ในระบบหม้อต้มแบบหลายขั้นตอน เนื่องจากหม้อต้มขั้นตอนแรกมีความดันสูงสุด แต่ที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้มมีผลกระทบต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมที่สูงกว่าค่าความเข้มข้นน้ำอ้อยเริ่มต้น เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม มีช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำอ้อยจึงทำให้เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้มมากกว่าความเข้มข้นน้ำอ้อยเริ่มต้นจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้มมีผลต่ออัตราการใช้น้ำมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นน้ำอ้อยเริ่มต้นในรูปของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง และปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมแบบผกผันที่น้อยที่สุดคือ อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่นมีขนาด ΔT_j ที่หม้ออุ่นตำแหน่ง $j = m$ ใช้พลังงานจากไอหัวหม้อที่หม้อต้มขั้นตอนท้าย ๆ ส่วนใหญ่ขั้นตอนที่ 4 ($i = 4$) ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนจากอุณหภูมิไอน้ำอิมตัวที่ความดันต่ำเนื่องจากหม้อต้มมีความเป็นสุญญากาศจึงทำให้ส่งผลต่อการใช้น้ำของระบบน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำแบบผกผันมีลักษณะดังนี้ $(\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial T_0} > \frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial B_0} > \frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial T_{j,in}})$ ทั้งนี้ส่วนใหญ่ความไม่แน่นอนของปัจจัยต่าง ๆ มักเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ซึ่งเป็นการส่งอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มากกว่า 1 ปัจจัย ซึ่งสามารถทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่ออัตราการใช้น้ำของระบบได้จากสมการที่ (4.9)

$$\dot{m}_{s,in} \Big|_{total} = \dot{m}_{s,in} \Big|_{properly} + \dot{m}_{s,in} \Big|_{properly} \times \sum_{i=1}^n \dot{m}_{s,in} \Big|_{uncertainty(c)}^{ \% change } \quad (4.9)$$

4.2 การวิเคราะห์รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ

ไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นจากการต้มน้ำอ้อยของหม้อต้มแต่ละชั้นตอนมีสถานะที่แตกต่างกันตามความดันที่ควบคุมในหม้อต้มแต่ละชั้นตอน ดังนั้นการจ่ายไอหัวหม้อให้กับระบบหม้ออุ่นในรูปแบบของระบบท่อที่แตกต่างกันจะทำให้ระบบมีการใช้พลังงานที่ต่างกันด้วย ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษารูปแบบของระบบท่อในการจ่ายไอหัวหม้อสู่ระบบหม้ออุ่นที่มีความเหมาะสมที่สุดในการประหยัดพลังงานโดยใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ และหลักการการถ่ายเทความร้อนช่วยในการวิเคราะห์จากกรณีของรูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อของระบบที่เป็นไปได้ในการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดและใช้วิธีการเสิร์ชในการหาคำตอบ ซึ่งจะใช้ระบบของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2 และ โรงงานที่ 3 ในการวิเคราะห์

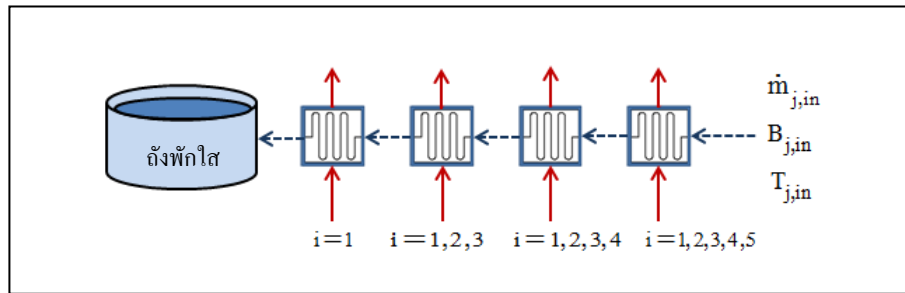


รูปที่ 4.25 ระบบส่งจ่ายไอหัวหม้อในรูปแบบทั่วไป

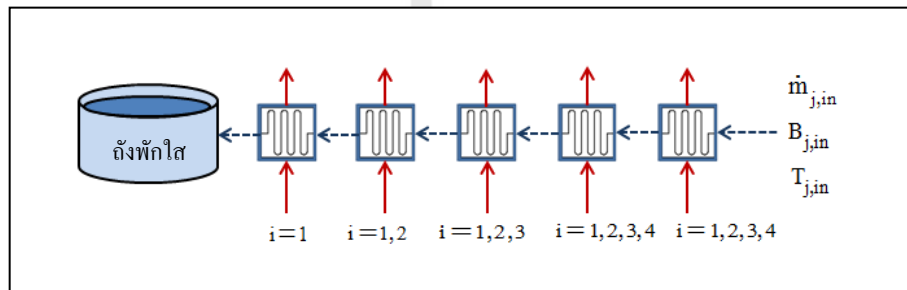
หลักการการถ่ายเทความร้อน $Q = UA\Delta T_{lm}$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{v,i} - T_{j,in}) - (T_{v,i} - T_{j,out})}{\ln \frac{T_{v,i} - T_{j,in}}{T_{v,i} - T_{j,out}}} \quad ; T_{v,i} > T_{j,out} \text{ เสมอ} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) แสดงถึงอุณหภูมิของไอหัวหม้อจากหม้อต้ม ($T_{v,i}$) จะต้องมียุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิขาออกของน้ำอ้อยที่ต้องการ ($T_{j,out}$) จึงจะสามารถถ่ายเทความร้อนจากไอหัวหม้อสู่น้ำอ้อยได้ซึ่งจะนำไปสู่ขอบเขตของกรณีต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ของรูปแบบระบบท่อในการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นทั้งหมดของโรงงานที่ 2 และ โรงงานที่ 3



รูปที่ 4.26 รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโรงงานที่ 2



รูปที่ 4.27 รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโรงงานที่ 3

จากรูปที่ 4.26 รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโรงงานที่ 2 ไอหัวหม้อที่จ่ายไปสู่หม้ออุ่นที่ 4 สามารถใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มทุกๆ ขั้นตอนได้ เนื่องจากอุณหภูมิน้ำอ้อยออกจากหม้ออุ่นที่ต้องการอยู่ที่ 51.8°C (จากตารางที่ ก.2.2 ในภาคผนวก ก) อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวของไอหัวหม้อของหม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายมีค่าประมาณ 55.7°C เป็นอุณหภูมิไอหัวหม้อที่ต่ำที่สุดในระบบหม้อต้มแบบหลายขั้นตอนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิน้ำอ้อยที่ออกจากหม้ออุ่นที่ 4 จึงสามารถใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มทุกขั้นตอนมาใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยที่หม้ออุ่นนี้ได้ อุณหภูมิของน้ำอ้อยที่ต้องการจากการอุ่นที่หม้ออุ่นที่ 3 อยู่ที่ 66.4°C (จากตารางที่ ก.2.2 ในภาคผนวก ก) ซึ่งไอหัวหม้อจากหม้อต้มชุดสุดท้ายไม่สามารถจ่ายให้กับหม้ออุ่นที่ 3 ได้เนื่องจากอุณหภูมิของไอหัวหม้อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการหลังการอุ่นของหม้ออุ่นที่ 3 อุณหภูมิของน้ำอ้อยที่ต้องการหลังจากการอุ่นที่หม้ออุ่นที่ 2 อยู่ที่ 92.1°C (จากตารางที่ ก.2.2 ในภาคผนวก ก) ไอหัวหม้อจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายและขั้นตอนที่ 4 ไม่สามารถใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยที่หม้ออุ่นที่ 2 ได้เนื่องจากอุณหภูมิของไอหัวหม้อนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำอ้อยที่ต้องการหลังจากการอุ่นที่หม้ออุ่นที่ 2 สุดท้ายหม้ออุ่นที่ 1 จะสามารถใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มขั้นตอนแรกเท่านั้นเนื่องจากอุณหภูมิไอน้ำ

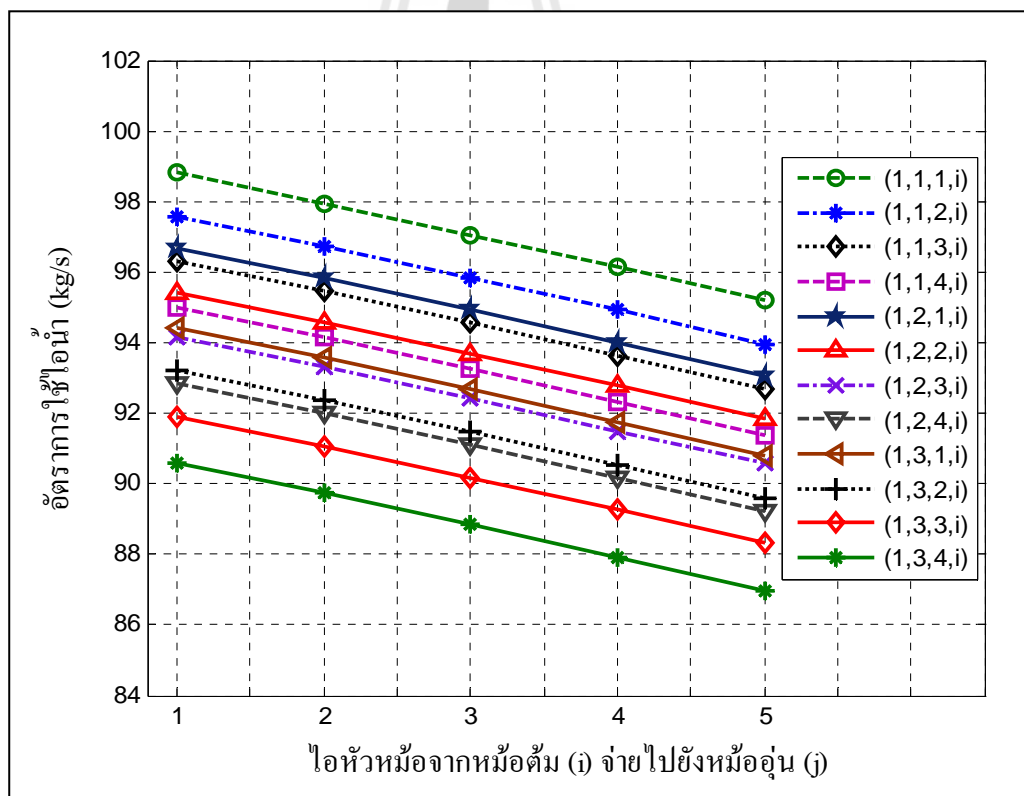
อิมตัวของไอหัวหม้อที่หม้อต้มชั้นตอนอื่น ๆ ต่ำเกินไปที่จะสามารถใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยเพื่อทำให้อุ่นน้ำอ้อยให้ได้คุณภาพควบคุม ดังนั้นรูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นของโรงงานที่ 2 ที่เป็นไปได้ทั้งหมดมี $1 \times 3 \times 4 \times 5 = 60$ วิธี และในทำนองเดียวกันรูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นของโรงงานที่ 3 ที่เป็นไปได้ทั้งหมดมี $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 4 = 96$ วิธี

สัญลักษณ์ของการชี้แจงถึงกรณีต่าง ๆ ของรูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่น

ตำแหน่ง: (หม้ออุ่นที่ 1, หม้ออุ่นที่ 2, ..., หม้ออุ่นที่ m)

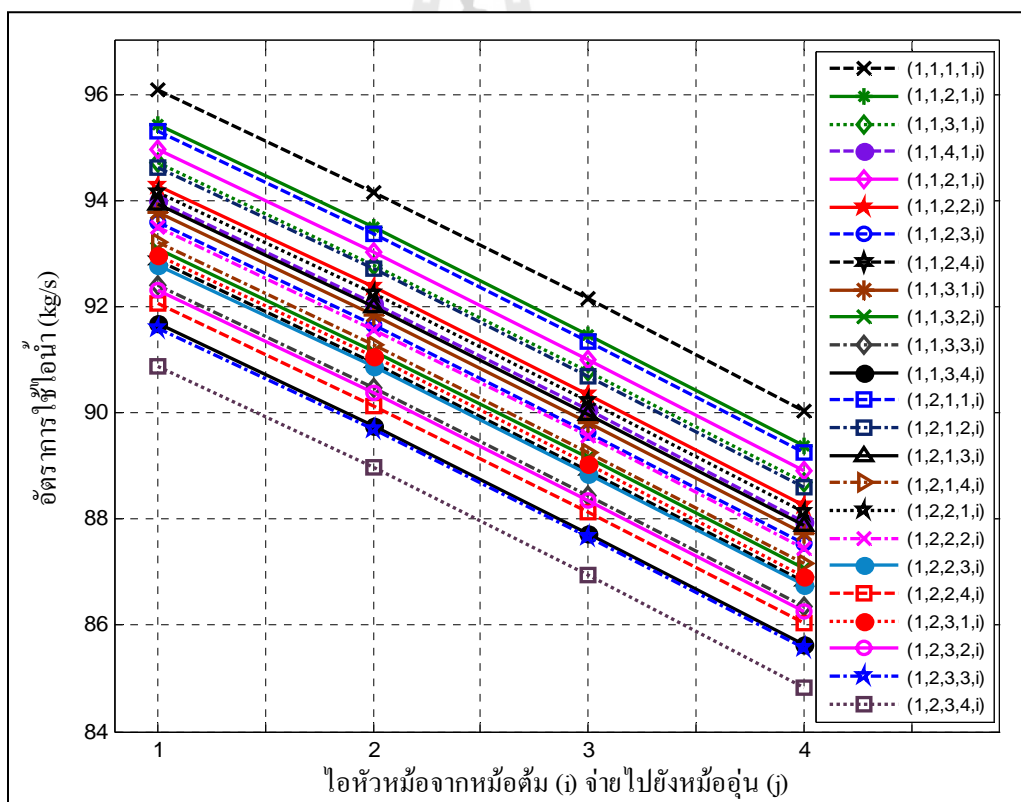
ตัวเลข: (ไอหัวหม้อจากหม้อต้มที่ i, ไอหัวหม้อจากหม้อต้มที่ i, ไอหัวหม้อจากหม้อต้มที่ i)

โดยที่ $i=1,2,3,\dots,n$ และ n คือ หม้อต้มชั้นตอนสุดท้าย เช่น (1, 3, 4, 2) หมายความว่า มีจำนวนหม้ออุ่นในระบบ 4 ชุด และหม้ออุ่นชุดที่ 1 ได้รับไอหัวหม้อจากหม้อต้มชั้นตอนที่ 1 หม้ออุ่นชุดที่ 2 ได้รับไอหัวหม้อจากหม้อต้มชั้นตอนที่ 3 หม้ออุ่นชุดที่ 3 ได้รับไอหัวหม้อจากหม้อต้มชั้นตอนที่ 4 และหม้ออุ่นชุดที่ 4 ได้รับไอหัวหม้อจากหม้อต้มชั้นตอนที่ 2



รูปที่ 4.28 อัตราการใช้ไอน้ำของระบบของรูปแบบการวางท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อแบบต่าง ๆ ของโรงงานที่ 2

ผลที่ได้จากการคำนวณอัตราการใช้น้ำจากการปรับเปลี่ยนรูปแบบของระบบท่อที่ใช้ในการส่งจ่ายไอหัวหม้อลักษณะต่าง ๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.28 รูปแบบของระบบท่อในการส่งจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นที่ใช้น้ำน้อยที่สุดของโรงงานที่ 2 คือ รูปแบบ (1,3,4,5) ซึ่งใช้ปริมาณน้ำที่อัตรา 86.99 kg/s โดยที่รูปแบบเดิม (1,2,3,4) ใช้ปริมาณน้ำที่อัตรา 91.50 kg/s สามารถประหยัดการใช้น้ำได้ 4.51 kg/s (16 Ton/hr) หรือลดลงจากเดิม 4.93 เป็นเปอร์เซ็นต์ รูปแบบของระบบท่อในการส่งจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นที่ใช้น้ำน้อยที่สุดของโรงงานที่ 3 คือรูปแบบ (1,2,3,4,4) ซึ่งเป็นรูปแบบปัจจุบันที่โรงงานใช้อยู่และใช้ปริมาณน้ำที่อัตรา 84.84 kg/s จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการใช้น้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของการปรับเปลี่ยนระบบท่อการส่งจ่ายไอหัวหม้อของทั้งสองโรงงานนั้นมีทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ รูปแบบระบบท่อของการส่งจ่ายไอน้ำที่จะทำให้ระบบนั้นประหยัดการใช้น้ำมากที่สุดคือ การจ่ายไอหัวหม้อของหม้อต้มใด ๆ ที่มีสถานะที่เพียงพอต่อการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำอ้อยที่หม้ออุ่นได้

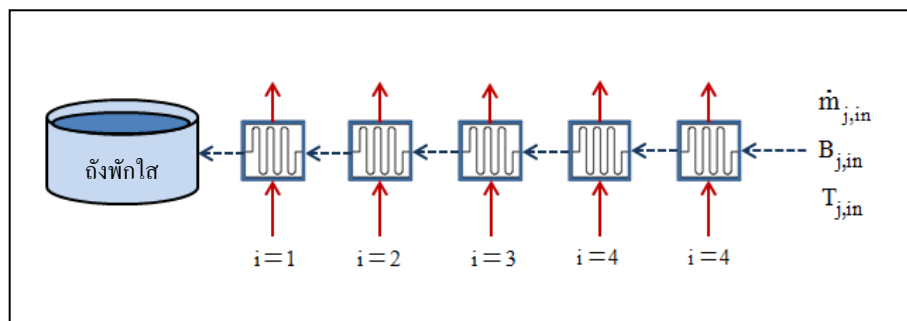


รูปที่ 4.29 อัตราการใช้น้ำของระบบของรูปแบบการวางท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อแบบต่าง ๆ ของโรงงานที่ 3

ก็ควรใช้ไอหัวหมอนั้นให้คุ้มค่าที่สุด เพื่อที่จะทำให้ภาระการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นของหม้อต้มขั้นตอนแรกน้อยที่สุด หากสถานะของไอหัวหม้อของหม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายมีสถานะที่ไม่เหมาะสมหรือเป็นไปได้ในการถ่ายเทความร้อนที่หม้ออุ่นใด ๆ จะต้องใช้ไอหัวหม้อของหม้อต้มลำดับถัดไปจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายภายใต้สถานะของไอหัวหม้อที่มีความเป็นไปได้ในการถ่ายเทความร้อนจะเป็นแนวทางการประหยัดการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยที่สุด

4.3 การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายความดันของหม้อต้มที่เหมาะสม

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษารายละเอียดของระบบหม้อต้มแบบหลายขั้นตอน ซึ่งพิจารณาถึงลักษณะการแจกแจงความดันของระบบหม้อต้มลักษณะใดที่ทำให้ระบบมีการใช้ไอน้ำที่น้อยที่สุด ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ก็คือ จะทำการหากรณีการแจกแจงความดันลักษณะต่าง ๆ ที่สามารถเป็นไปได้ ดังนั้นจำเป็นต้องทราบขอบเขตของความดันที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในหม้อต้มแต่ละขั้นตอน โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำเชื่อมจากการต้มที่ความดันนั้น จากสมการที่ (4.10) แสดงถึงอุณหภูมิของไอหัวหม้อจากหม้อต้ม ($T_{v,i}$) จะต้องมีความมากกว่าอุณหภูมิขาออกของน้ำอ้อยที่ต้องการ ($T_{j,out}$) จึงจะสามารถถ่ายเทความร้อนจากไอหัวหม้อสู่น้ำอ้อยได้ซึ่งจะนำไปสู่การทราบค่าของความดันต่ำสุดที่เป็นไปได้ของหม้อต้มขั้นตอนนั้น ๆ จากอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการอุ่นน้ำอ้อยโดยใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มขั้นตอนใด ๆ ซึ่งจะใช้ความดันอิมตัวที่อุณหภูมิน้ำอ้อยสูงสุดที่ถูกควบคุมเป็นความดันต่ำสุดในหม้อต้มนั้น ซึ่งการศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเฉพาะโรงงานที่ 3 (โดยใช้รูปแบบของระบบส่งจ่ายที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.30 และใช้อุณหภูมิน้ำอ้อยสูงสุดในหม้ออุ่นที่หม้อต้มนั้นได้การจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้ออุ่นในกรณีที่มีมากกว่า 1 หม้ออุ่น ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.30 ลักษณะรูปแบบระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อที่ใช้ไอน้ำน้อยที่สุดของโรงงานที่ 3

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอุณหภูมิน้ำอ้อยที่ถูกควบคุมบริเวณทางออกของแต่ละหม้ออุ่นสูงสุดที่ใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มแต่ละขั้นตอน และแสดงความดันอิมตัว

หม้อต้ม ขั้นตอนที่	ไอหัวหม้อที่ใช้ในการอุ่นเพื่อ เพิ่มอุณหภูมิน้ำอ้อยสูงสุด (°C)	ความดันอิมตัวที่อุณหภูมิ น้ำอ้อยสูงสุดที่หม้ออุ่น	ความดันต่ำสุด ของหม้อต้ม
5	N/A	N/A	16.4
4	76.1	40.54	40.54
3	89.7	69.44	69.44
2	99.2	98.73	98.73
1	106.8	129.00	129.00

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) หรือสมการอนุรักษ์พลังงานสามารถใช้หาความดันตกคร่อม (Pressure drop) ระหว่างหม้อต้มที่อยู่ระหว่างกันที่เชื่อมต่อกันด้วยท่อส่งจ่ายน้ำอ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้วโดยประมาณ และมีความยาวประมาณ 5 เมตร ซึ่งความดันตกคร่อมจะทำให้ทราบถึงความดันแตกต่างน้อยที่สุดที่จะทำให้ น้ำอ้อยเกิดการไหลในระบบได้

$$\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{\text{loss}}$$

$$P_1 - P_2 = \gamma h_{\text{loss}}$$

$$\gamma = \rho_{\text{syrup}} g$$

$$\Delta P_{\text{drop}} = \gamma h_{\text{loss}}$$

โดยที่ ΔP_{drop} แทน ความดันตกคร่อมเนื่องจากการไหลในท่อ (bar)

ρ_{syrup} แทน ความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (kg / m^3)

g แทน ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m / s^2)

h_{loss} แทน การสูญเสียเฮด (Head loss) (m)

ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ดาร์ซี-ไวส์บัค (Darcy-Weisbach's relation)

$$h_{\text{loss}} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (4.12)$$

โดยที่	L	แทน	ความยาวท่อลำเลียงน้ำเชื่อม (m)
	D	แทน	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลำเลียงน้ำเชื่อม (m)
	V	แทน	ความเร็วของการไหลในท่อของน้ำเชื่อม (m/s)
	g	แทน	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)
	f	แทน	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดาร์ซี (Darcy's friction factor)

$$f = \begin{cases} \frac{64}{\text{Re}}, & \text{Re} < 2300 \\ \frac{1}{\sqrt[4]{100\text{Re}}}, & 2300 < \text{Re} < 10^5 \\ 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}, & \text{Re} > 10^5 \end{cases} \quad (4.13)$$

โดยที่ Re แทน เรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

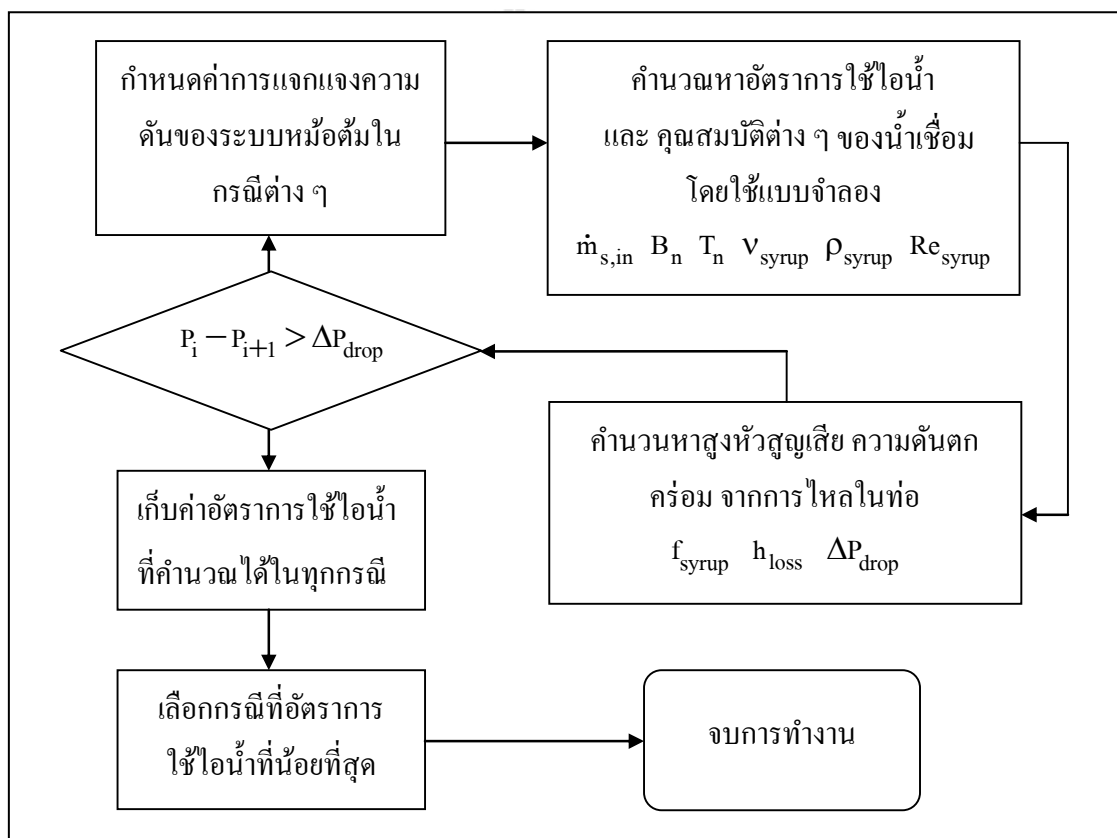
$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (4.14)$$

V แทน ความหนืดของน้ำเชื่อมในท่อลำเลียง (m²/s)

ตารางที่ 4.2 ช่วงของความดันสูงสุด ต่ำสุด ของหม้อต้มแต่ละขั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์

หม้อต้มขั้นตอนที่	ความดันต่ำสุด (kPa)	ความดันสูงสุด (kPa)
1	$P_{1,\text{min}} = P_{\text{sat}@T_{\text{max,heater1}}}$	$P_{1,\text{max}} = P_{\text{sat}@T_{\text{max,heater1}}}$
2	$P_{2,\text{min}} = P_{\text{sat}@T_{\text{max,heater2}}}$	$P_{2,\text{max}} = P_1 - \Delta P_{\text{drop},12}$
3	$P_{3,\text{min}} = P_{\text{sat}@T_{\text{max,heater3}}}$	$P_{3,\text{max}} = P_2 - \Delta P_{\text{drop},23}$
4	$P_{4,\text{min}} = P_{\text{sat}@T_{\text{max,heater4}}}$	$P_{4,\text{max}} = P_3 - \Delta P_{\text{drop},34}$
5	$P_{5,\text{min}} = 16.4$	$P_{5,\text{max}} = P_4 - \Delta P_{\text{drop},45}$

ความดันในหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 มีค่าสูงสุดไม่เกิน 160 kPa (เงื่อนไขการผลิต) และความดันต่ำสุดเท่ากับความดันอิมตัวของอุณหภูมิน้ำอ้อยสูงสุดที่หม้ออุ่น โดยใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 ในการถ่ายเทความร้อน และเนื่องจากที่ความดันต่ำจะใช้พลังงานน้อยกว่าในการต้มเพื่อระเหยน้ำออกไปจนน้ำเชื่อมได้ค่าบrixที่เหมาะสม ดังนั้นจึงตัดค่าความดันอื่น ๆ ออกไป และใช้ความดันต่ำสุดเป็นค่าคงที่ในการวิเคราะห์ และความดันในหม้อต้มขั้นตอนสุดท้ายหรือหม้อต้มขั้นตอนที่ 5 มีความดันต่ำสุดที่ประมาณ 16.4 kPa ซึ่งเป็นค่าที่ต้องควบคุมไว้เนื่องจากมีผลต่อคุณภาพน้ำตาลส่วนหม้อต้มขั้นตอนอื่น ๆ มีความดันต่ำสุดสูงสุดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

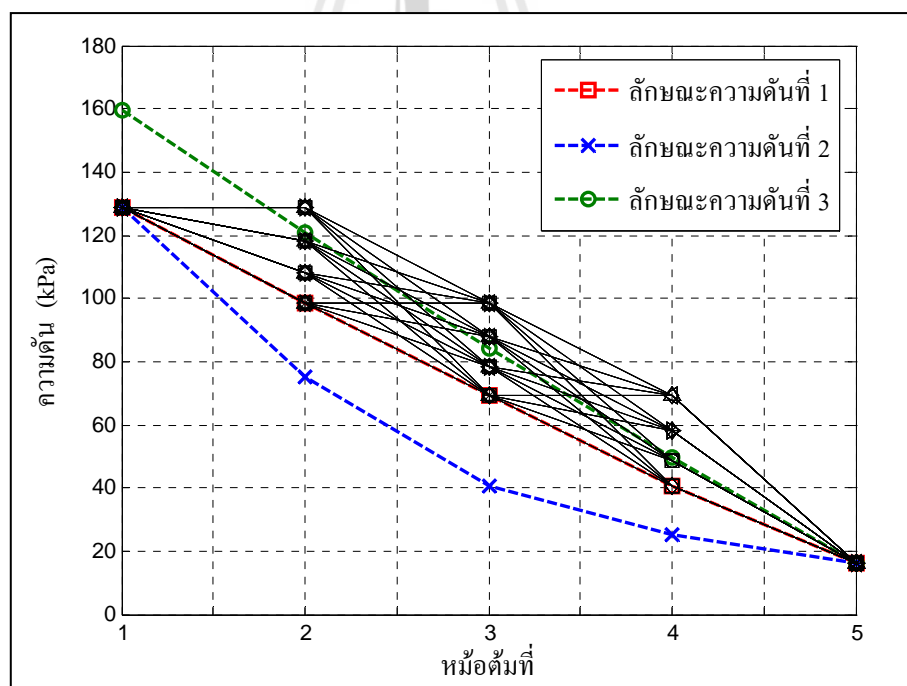


รูปที่ 4.31 แผนผังการหาค่าตอบโดยวิธีเสิร์ช

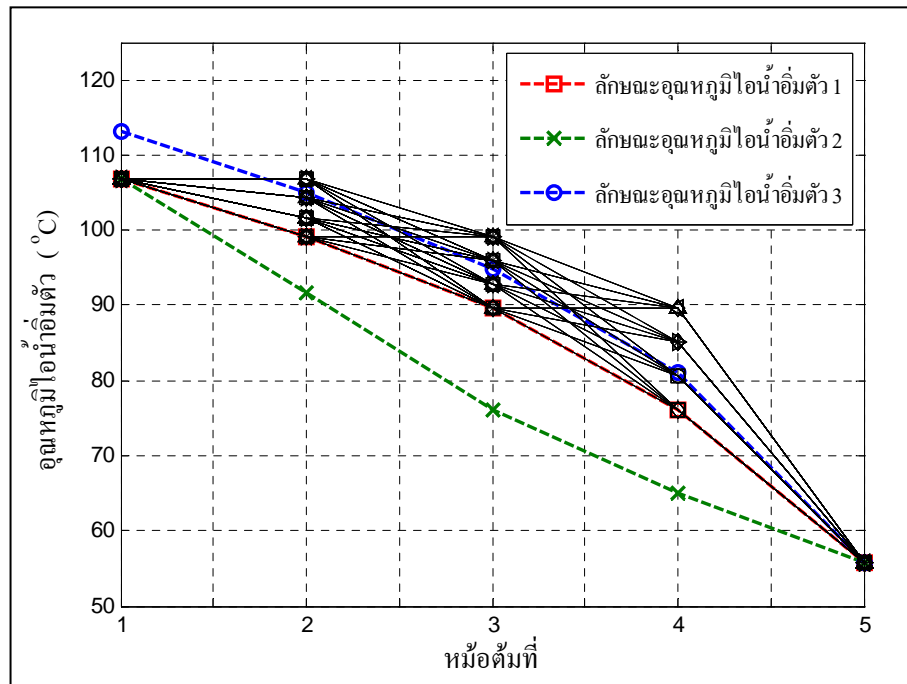
จากรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33 และ ผลการคำนวณในตารางที่ ค.2.1 ในภาคผนวก ค. ลักษณะความดันของระบบหม้อต้มของโรงงานที่ 3 ที่ทำให้ใช้น้ำน้อยที่สุดคือลักษณะความดันที่ 1 ใช้น้ำในอัตรา 82.90 kg/s และลักษณะความดันโดยหลักการของสุกที่อด (ลักษณะความดันที่ 3) ใช้น้ำในอัตรา 84.83 kg/s ลักษณะความดันที่ 1 สามารถลดการใช้น้ำจากเดิมประมาณ 2.28 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้ เป็นเพราะว่าลักษณะความดันที่ 1 มีการจัดการที่ดีกว่านั่นเอง กล่าวคือ ไอห้วงมือของหม้อต้มแต่ละชั้นตอนที่ส่งจ่ายไปยังหม้ออุ่นเป็นไอห้วงมือที่เกิดขึ้นในสภาวะความดันต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้ ส่วนลักษณะความดันที่ 2 เป็นลักษณะความดันที่สมดุลขึ้นมาเพื่อคุ้อุณหภูมิใช้น้ำของระบบหม้อต้มที่ความดันต่ำ ๆ ซึ่งพบว่าระบบจะใช้น้ำที่ลดลงจริง แต่ไอห้วงมือที่เกิดขึ้นจะมีอุณหภูมิที่ต่ำลงไปด้วยซึ่งมีผลต่อกระบวนการอุ่นน้ำอ้อยทำให้น้ำอ้อยมีอุณหภูมิต่ำลงไม่ได้ตามค่าที่ต้องการควบคุมซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการพักใสอาจทำให้การตกตะกอนของสิ่งปนื้อกได้ไม่ดีขึ้น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะความดันที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นลักษณะความดันที่ 1 เนื่องจากลักษณะความดันที่ 1 ทำให้ระบบใช้น้ำน้อยที่สุดและยังคงสามารถผลิตไอห้วงมือในแต่ละหม้อต้มที่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสามารถใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยเพื่อทำให้น้ำอ้อยได้ อุณหภูมิได้ตามค่าที่ควบคุม ข้อเสนอแนะในทางปฏิบัติควรควบคุมความดันของระบบหม้อต้มให้สูงกว่าการลักษณะความดันที่ 1 เล็กน้อย เพื่อเป็นการเผื่อการลดลงของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของระบบหม้อต้มและหม้ออุ่น จะทำให้ได้อุณหภูมิของน้ำอ้อยจากการอุ่นตามที่ควบคุมได้โดยง่าย



รูปที่ 4.32 กรณีลักษณะการแจกแจงความดันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ



รูปที่ 4.33 กรณิลักษณะอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวตามความดันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ

4.4 การวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัว

ในหัวข้อของการศึกษาวิจัยก่อนหน้าทำการวิเคราะห์ระบบในสภาวะคงตัว (Steady state) ทั้งสิ้น แต่การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาระบบในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) ซึ่งสภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการผลิตก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งจะได้ความสัมพัทธ์ดังนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{sys}}{dt} \quad (4.15)$$

การทำงานเริ่มต้นของระบบหม้อต้มเริ่มจากระบบจะทำการต้มน้ำออกจากการพักใส่ที่หม้อต้มเพื่อทำให้เกิดไอหัวหม้อเลี้ยงระบบจนกระทั่งระบบหม้อต้มเข้าสู่สภาวะสมดุล หลังจากนั้นจึงทำการจ่ายน้ำออกจากกระบวนการที่บเข้าสู่ระบบหม้ออุ่น ในการวิเคราะห์ระบบในสภาวะไม่คงตัวนั้นจำเป็นต้องมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ซึ่งในที่นี้จะถือว่าขณะเริ่มต้นนั้นมีน้ำอ้อยบรรจุอยู่เต็มหม้อต้มซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลวอัดตัว (Compressed liquid) ที่มีอุณหภูมิสูงใกล้จุดเดือดที่ความดันในหม้อต้มขั้นตอนแรกซึ่งถูกควบคุมไว้ จากนั้นจะให้ความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะของผสมอิ่มตัว (Saturated vapor mixture) ภายใต้อุณหภูมิที่ เมื่อน้ำบางส่วนได้ระเหยกลายเป็นไอจนทำ

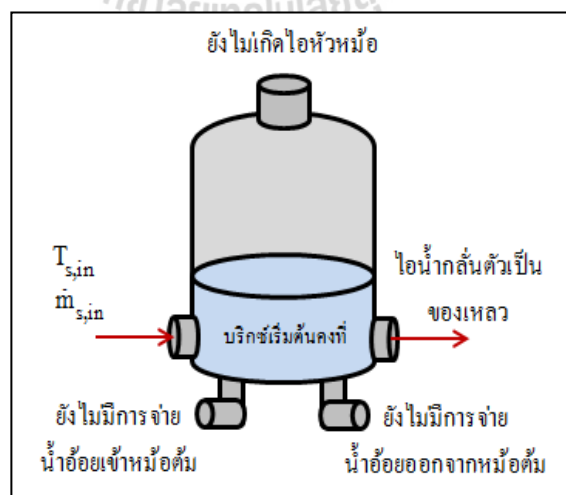
ให้ค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อยเพิ่มขึ้นได้ตามค่าที่ควบคุมไว้ระบบจะทำการจ่ายน้ำอ้อยออกจากระบบและจะเติมน้ำอ้อยเข้าสู่ระบบด้วยการไหลแบบคงตัว (Steady flow) เพื่อรักษาค่าปริกซ์ของน้ำอ้อยไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจึงเข้าสู่สภาวะคงตัว สำหรับหม้อต้มขั้นตอนอื่น ๆ น้ำอ้อยที่ได้จากหม้อต้มก่อนหน้าจะมีสภาวะของเหลวอัดตัวที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าเข้ามาถ่ายเทความร้อนหรือทำการต้มในระบบ จึงมีการลดความดันที่เอนทาลปีคงที่จึงทำให้สภาวะของน้ำอ้อยก่อนเข้าสู่ระบบจะอยู่ในสภาวะของเหลวผสมแก๊ส ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการวิเคราะห์หม้อต้มขั้นตอนที่ 2 3 4 และขั้นตอนที่ 5 จนกระทั่งระบบหม้อต้มเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ช่วงของการเปลี่ยนแปลงระบบก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว

หม้อต้ม	ระยะที่ 1	ระยะที่ 2	ระยะที่ 3
1	เพิ่มอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะของผสมอัดตัว	นำระเหยกลายเป็นไอจนได้ค่าความเข้มข้นที่ควบคุม	จ่ายน้ำอ้อย เข้า-ออก จากระบบ เพื่อรักษาค่าปริกซ์
2-5	ลดความดันเข้าสู่สภาวะของผสมอัดตัว	นำระเหยกลายเป็นไอจนได้ค่าความเข้มข้นที่ควบคุม	จ่ายน้ำอ้อย เข้า-ออก จากระบบ เพื่อรักษาค่าปริกซ์

4.4.1 พิจารณาหม้อต้มขั้นตอนที่ 1

ระยะที่ 1 ไม่มีงาน ($\dot{W} = 0$) ไม่มีพลังงานเนื่องจากการไหลเข้าสู่ระบบ ($\dot{E}_{in} = 0$) และไม่มีพลังงานเนื่องจากการไหลออกสู่ระบบ ($\dot{E}_{out} = 0$) ดังนั้นจากสมการที่ (4.15) จะได้ว่า



รูปที่ 4.34 การทำงานเริ่มต้นของหม้อต้มในระยะที่ 1

$$\dot{Q} = \frac{dE_{\text{sys}}}{dt}$$

เนื่องจากระบบไม่มีการเคลื่อนที่และไม่มีพลังงานศักย์ (Stationary system) และทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\dot{Q}\Delta t = m_j(u_2 - u_1)$$

เนื่องจากอยู่ในสถานะของเหลวอัดตัว (Compressed liquid)

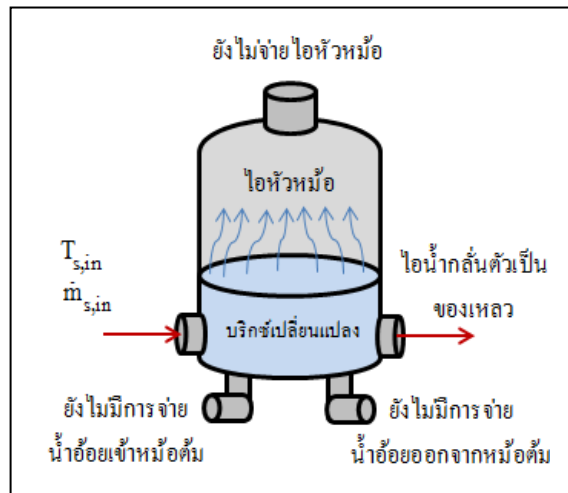
$$u = u_f \approx h_f = c_p \times T_j$$

$$u_2 = u_1 + \frac{\dot{m}_{s,\text{in}} h_{fg@T_{s,\text{in}}} \times \Delta t}{m_j} \quad (4.16)$$

วิธีการวิเคราะห์ระบบเริ่มต้นจากการกำหนดสถานะเริ่มต้นของระบบที่พิจารณาซึ่งนำไปสู่การหาค่าพลังงานภายใน (Internal energy) ของระบบเริ่มต้น (u_1) หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าพลังงานภายในช่วงเวลาถัดไป (u_2) ได้ แล้วตรวจสอบค่าพลังงานภายในที่ช่วงเวลาใหม่นี้ว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบเข้าใกล้สถานะที่ทำการควบคุมหรือไม่ (สถานะไอน้ำอัดตัวซึ่งขึ้นอยู่กับความดันของหม้อต้มที่ต้องการควบคุม) ถ้าค่าพลังงานภายในที่เวลาใหม่นี้ยังไม่เข้าใกล้ค่าที่ควบคุมจะต้องทำการแทนค่ากลับในสมการเดิม (สมการที่ 4.16) โดยค่าพลังงานภายในที่เวลาใหม่นี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานภายในเริ่มต้นแทน แล้วทำการหาค่าพลังงานภายในที่เวลาถัดไปอีกครั้ง จนกว่าค่าพลังงานภายในค่าใหม่ที่ได้จะเข้าสู่สถานะที่ควบคุมถือว่าสิ้นสุดของการเปลี่ยนแปลงของระบบในระยะที่ 1

ระยะที่ 2 น้ำอ้อยเริ่มเข้าสู่สถานะของผสมอัดตัว (Saturated vapor mixture) ไม่มีงาน ($\dot{W} = 0$) ไม่มีพลังงานเนื่องจากการไหลเข้าสู่ระบบ ($\dot{E}_{\text{in}} = 0$) และไม่มีพลังงานเนื่องจากการไหลออกสู่ระบบ ($\dot{E}_{\text{out}} = 0$) ดังนั้นจากสมการที่ (4.16) จะได้ว่า

$$\dot{Q}\Delta t = m_j(u_{f2} + x_2 u_{fg2} - u_{f1} - x_1 u_{fg1})$$



รูปที่ 4.35 การทำงานเริ่มต้นของหม้อต้มในระยษะที่ 2

$$\dot{Q}\Delta t = m_j(u_{f2} + \left(\frac{m_j - m_{f2}}{m_j}\right)u_{fg2}) - u_{f1} - \left(\frac{m_j - m_{f1}}{m_j}\right)u_{fg1}$$

$$\dot{Q}\Delta t = m_{f1}u_{fg1} - m_{f2}u_{fg2}$$

โดยที่ $u_{fg1} = u_g - u_{f1}$

$$u_{fg1} = u_g - c_{p1}T_j = u_g - 4.1866(1 - 0.006 \times B_1)T$$

$$u_{fg2} = u_g - u_{f2}$$

$$u_{fg2} = u_g - c_{p2}T_j = u_g - 4.1866\left(1 - 0.006 \times \frac{m_{f1}B_1}{m_{f2}}\right)T_j$$

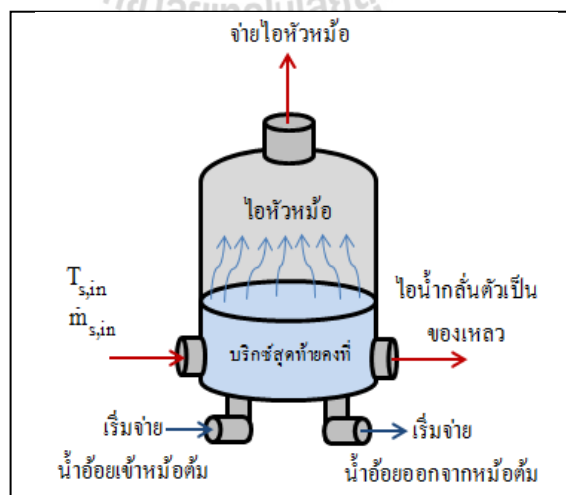
ดังนั้นจะได้ว่า

$$m_{f2} = \frac{\dot{Q}\Delta t - m_{f1}c_{p1}T_j + 0.0251196m_{f1}B_1T_j}{4.1866T_j - u_g} \quad (4.17)$$

โดยที่ m_{f1} แทน มวลของน้ำอ้อยเมื่อผ่านการต้มที่เวลาเริ่มต้น
 m_{f2} แทน มวลของน้ำอ้อยเมื่อผ่านการต้มที่เวลาถัดไป

จากสมการที่ (4.17) ได้เปลี่ยนรูปการพิจารณาจากพลังงานภายในเป็นการพิจารณามวลของน้ำอ้อยแทนหรืออาจเปลี่ยนเป็นการพิจารณาค่าบริกซ์ของน้ำอ้อยก็ได้ เนื่องจากทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์ที่ขึ้นต่อกัน กล่าวคือสามารถเปลี่ยนตัวแปรในการพิจารณาจาก m_{f1} เป็น $B_{out,1}$ ที่เวลาเริ่มต้น และเปลี่ยนจาก m_{f2} เป็น $B_{out,2}$ ที่เวลาถัดไปได้ ซึ่งการพิจารณาค่าบริกซ์จะทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพได้ชัดเจนกว่าการพิจารณามวลของน้ำอ้อย การวิเคราะห์ระบบในระยะที่ 2 เริ่มจากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นในระยะที่ 2 ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากที่เวลาสุดท้ายของระบบในระยะที่ 1 ยังไม่มีการระเหยของไอน้ำ แต่สภาวะเริ่มต้นของระบบระยะที่ 2 จะเป็นสภาวะไอน้ำอิ่มตัว กล่าวคือ เริ่มมีการระเหยของไอน้ำออกไปจากสารละลายน้ำอ้อย และเริ่มทำให้ค่าบริกซ์ของน้ำอ้อยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อทราบสภาวะเริ่มต้นก็จะสามารถคำนวณหาค่าบริกซ์ที่เปลี่ยนไปในเวลาถัดไปได้คือ $B_{out,2}$ แล้ว ตรวจสอบว่าค่า $B_{out,2}$ ที่คำนวณได้เข้าใกล้กับค่าบริกซ์ที่ต้องการควบคุมหรือไม่ ถ้าไม่จะต้องใช้ค่า $B_{out,2}$ แทนค่าในสมการเดิม (สมการที่ 4.17) โดยการทำให้ค่า $B_{out,2}$ จะกลายเป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้นแทน จากนั้นก็ทำการคำนวณหาค่า $B_{out,2}$ อีกครั้งจนกว่าค่า $B_{out,2}$ จะเข้าสู่ค่าที่ได้ทำการควบคุมจะถือว่าเป็นการสิ้นสุดในระยะที่ 2

ระยะที่ 3 เมื่อน้ำบางส่วนระเหยออกไปจากสารละลายน้ำอ้อยจนได้ค่าบริกซ์ตามที่ได้ควบคุมไว้ จึงทำการจ่ายน้ำอ้อยออกจากระบบและเติมน้ำอ้อยเข้าสู่ระบบ จากสมการที่ (4.15) จะได้



รูปที่ 4.36 การทำงานเริ่มต้นของหม้อต้มในระยะที่ 3

$$(\dot{Q} + E_{in} - E_{out})\Delta t = m_{f1}u_{fg1} - m_{f2}u_{fg2}$$

เมื่อทำการจ่ายน้ำอ้อยออกจากระบบ และเติมน้ำอ้อยเข้าสู่ระบบเพื่อควบคุมค่าบริกซ์ทำให้

$$m_{f1}u_{fg1} - m_{f2}u_{fg2} = 0 \quad \text{ดังนั้นระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล}$$

4.4.2 พิจารณาม้อต้มขั้นตอนที่ 2 3 4 และขั้นตอนที่ 5

ประกอบด้วย 3 ระยะคือ ระยะที่ 1 การลดความดันเข้าสู่สภาวะของผสมอิมตัว เพื่อให้สภาวะของน้ำอ้อยที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนก่อนหน้านี้มีสภาวะเดียวกันกับหม้อต้มขั้นตอนปัจจุบันที่น้ำอ้อยกำลังเข้าสู่หม้อต้มนั้นเพื่อทำการต้มที่สภาวะเดียวกัน ส่วนระยะที่ 2 และระยะที่ 3 จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการต้มในหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 ดังที่ได้อธิบายข้างต้น

ระยะที่ 1 ลดความดันเข้าสู่สภาวะของผสมอิมตัว

$$h_{j1} = h_{f@T_{j2}} + xh_{fg@T_{j2}}$$

$$x = (h_{j1} - h_{f@T_{j2}}) / h_{fg@T_{j2}}$$

$$x = \frac{m_{f1} - m_{f2}}{m_{f1}} \quad \text{ดังนั้นจะได้ว่า}$$

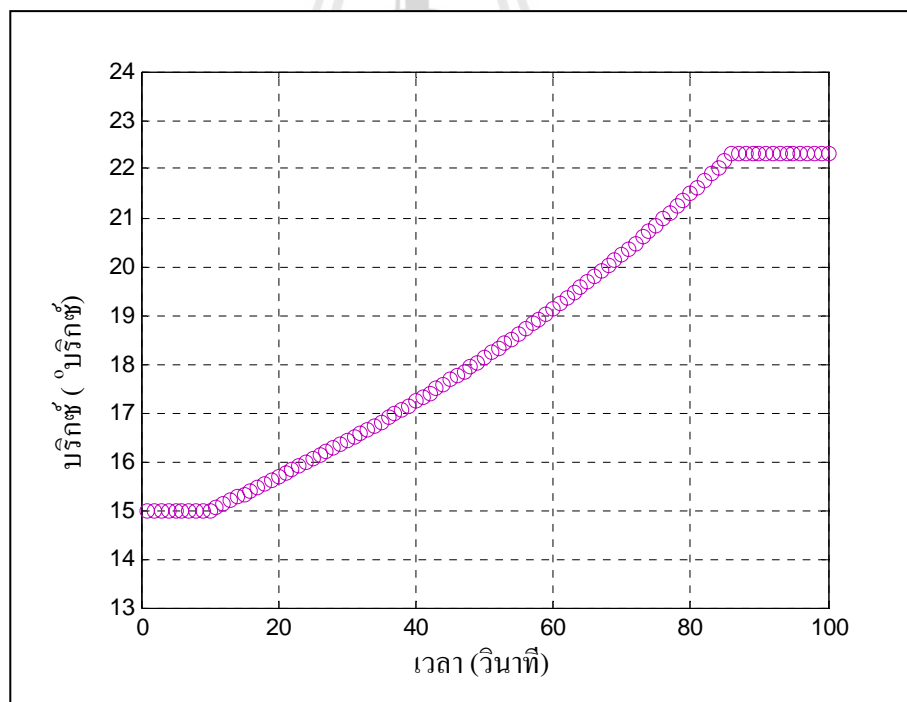
$$m_{f2} = \frac{h_{j1} + 0.0251196T_{j2}B_1 - h_{g@T_{j2}}}{(4.1866T_{j1} - h_{g@T_{j2}}) / m_{f1}} \quad (4.18)$$

ค่าความเข้มข้น (ค่าบริกซ์) ของน้ำอ้อยเริ่มต้นเริ่มต้นของโรงงานที่ 2 มีค่าประมาณ 15°บริกซ์ จากรูปที่ 4.34 ในระยะที่ 1 ของหม้อต้มขั้นตอนแรก น้ำอ้อยได้รับพลังงานความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อยเพื่อให้ น้ำอ้อยเข้าสู่อุณหภูมิไอน้ำอิมตัว ในระยะนี้ น้ำอ้อยจะยังไม่เกิดการระเหยของน้ำในน้ำอ้อยจึงทำให้ค่าบริกซ์คงที่ เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 10 วินาที ระบบเข้าสู่ระยะที่ 2 กล่าวคือ อุณหภูมิของน้ำอ้อยเริ่มเข้าสู่สภาวะของผสมอิมตัวจึงเริ่มมีการระเหยของน้ำในน้ำอ้อยออกไปเป็นไอหัวหม้อ และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงประมาณวินาทีที่ 90 น้ำที่ระเหยออกไปเป็นไอหัวหม้อมากพอและทำให้ค่าความเข้มข้น (ค่าบริกซ์) ของน้ำอ้อยมีค่าสูงขึ้นจนมีค่าดังที่ได้ควบคุม

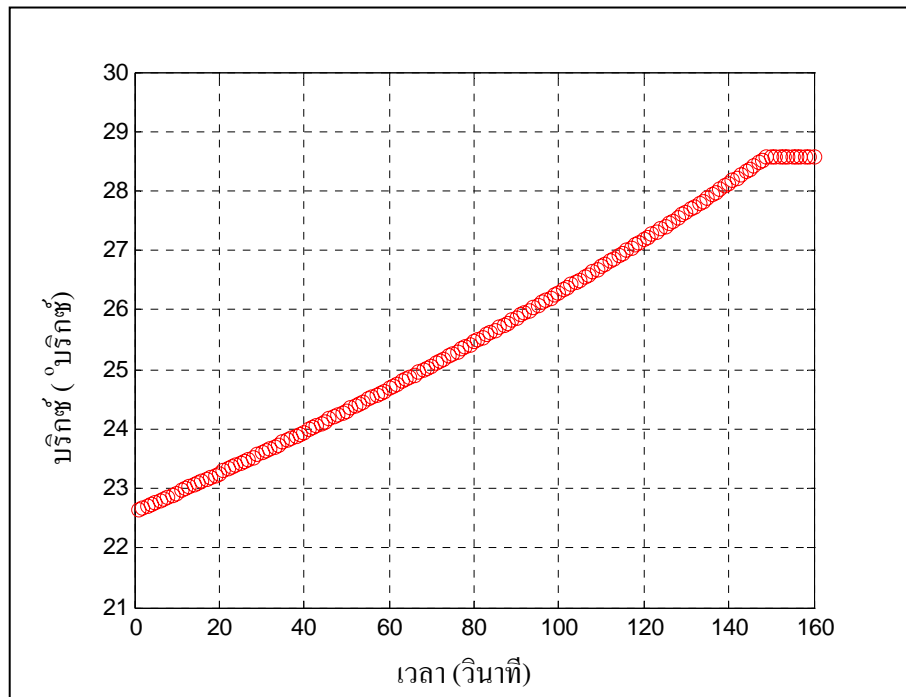
ระยะที่ 3 ให้น้ำอ้อยเข้าและออกหม้อต้มเพื่อรักษาสภาพค่าปริกซ์ที่เกิดขึ้นจากการต้มให้คงที่ และเข้าสู่ภาวะสมดุล น้ำอ้อยที่ผ่านการต้มที่หม้อต้มขั้นตอนที่ 1 ก่อนเข้าสู่การต้มในหม้อต้ม ขั้นตอนที่ 2 มีสถานะเป็นของเหลวอัดตัวซึ่งจะถูกลดความดันที่เอนทาลปีคงที่จนมีความดันเท่ากับ หม้อต้มขั้นตอนที่ 2 จึงทำให้น้ำอ้อยกลายเป็นสถานะของผสมอิมัตวเล็กน้อย ก่อนที่จะเข้าสู่ หม้อต้มขั้นที่ 2 เมื่อน้ำอ้อยถูกส่งเข้ามายังหม้อต้มขั้นตอนที่ 2 ก็เกิดการถ่ายเทความร้อนกับไอหัว หม้อที่เกิดจากการต้มในหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 จนกระทั่งการระเหยของน้ำมากพอ และทำให้ค่าปริกซ์ ได้ค่าตามที่ควบคุมไว้ จากนั้นจะทำการจ่ายน้ำอ้อยที่มีความเข้มข้นตามที่ควบคุมมุ่งสู่หม้อต้ม ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 ต่อไปโดยมีหลักการเดียวกันจากรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.42

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสถานะไม่คงตัว

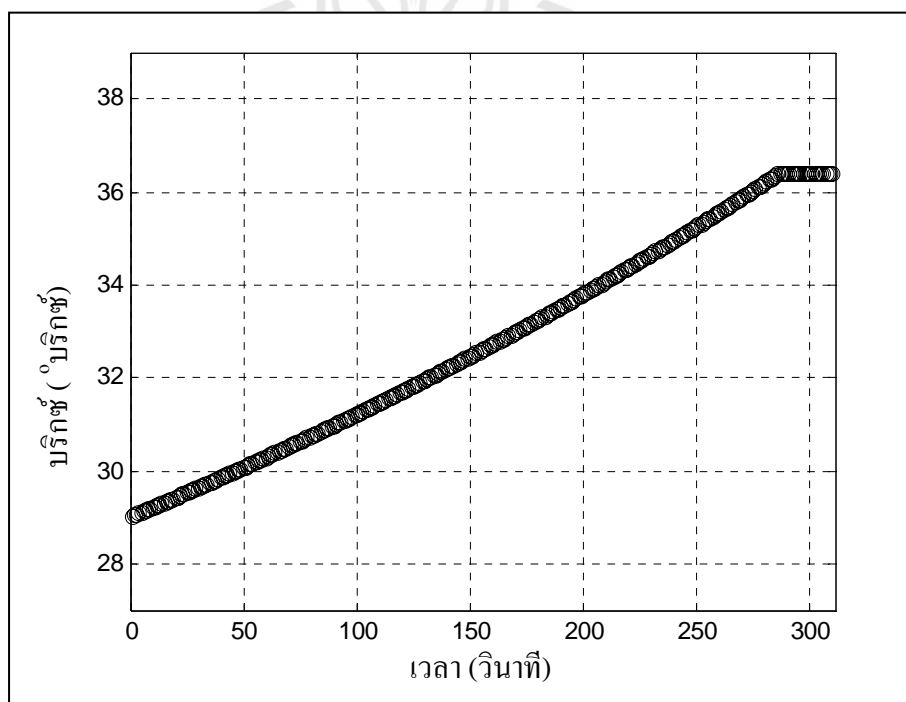
จากการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสถานะไม่คงตัวในหัวข้อที่ 4.4.1 และใน หัวข้อที่ 4.4.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกราฟเพื่อให้เห็นถึงช่วงเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุล ของหม้อต้มแต่ละขั้นตอน และการเข้าสู่สมดุลของระบบหม้อต้มทั้งหมดได้ดังนี้



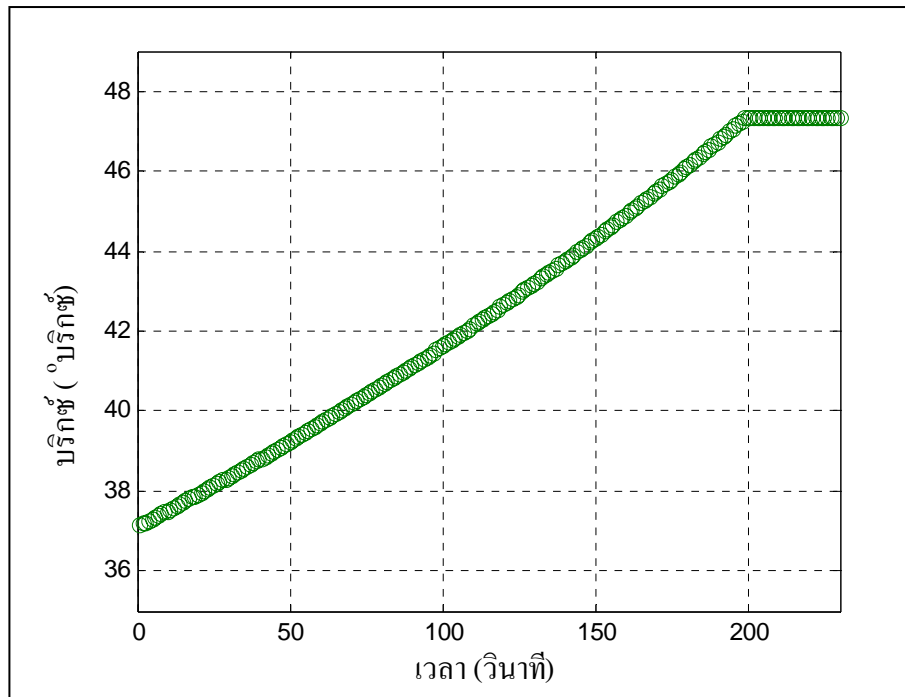
รูปที่ 4.37 พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสถานะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1



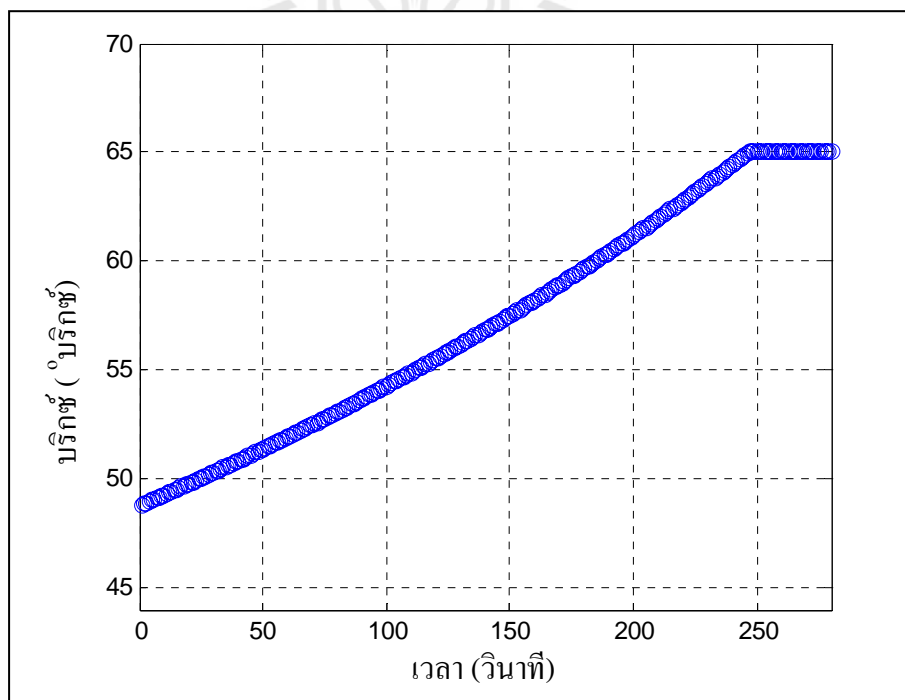
รูปที่ 4.38 พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 2



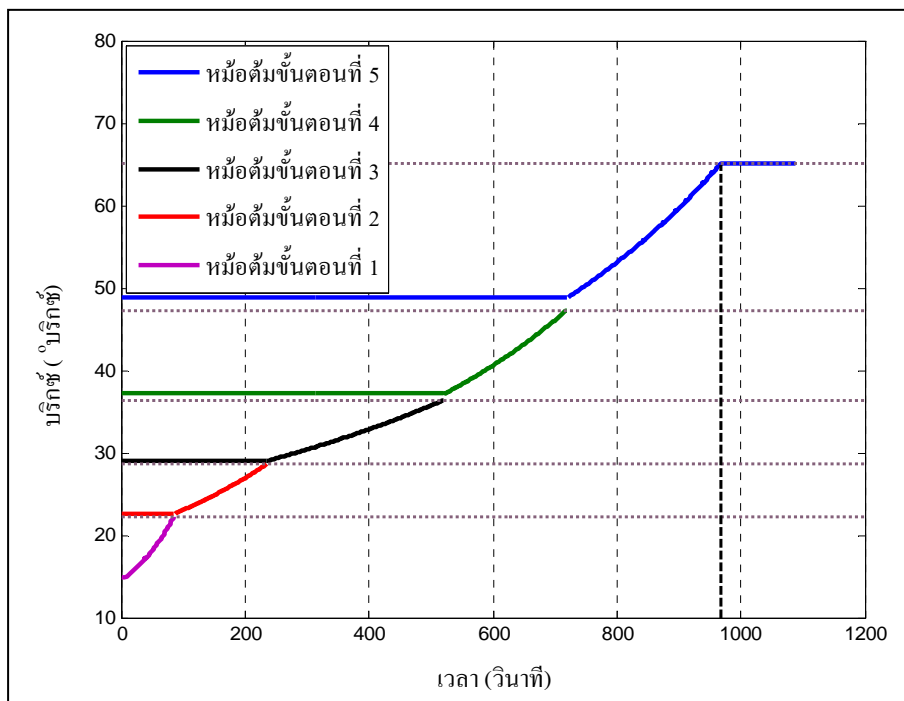
รูปที่ 4.39 พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 3



รูปที่ 4.40 พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4



รูปที่ 4.41 พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 5



รูปที่ 4.42 พฤติกรรมของกระบวนการต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5

4.4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสภาวะไม่คงตัว

ผลของการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบหม้อต้มทุกขั้นตอนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ที่อธิบายข้างต้นในหัวข้อที่ 4.4 ของโรงงานที่ 3 ใช้ระยะเวลาประมาณ 983 วินาที หรือประมาณ 16.38 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับระบบจริงพบว่าใช้เวลาต่างกันประมาณ 2 เท่า โดยทั่วไปการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบจริงจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นเพราะว่าสภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบในครั้งนี้ต่างกับระบบจริง กล่าวคือ สภาวะเริ่มต้นของระบบที่ทำการพิจารณานั้นเป็นสภาวะที่เข้าใกล้สู่สภาวะไอน้ำอิ่มตัวซึ่งจะเห็นว่า ระยะที่ 1 ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 จะใช้เวลาเพียง 10 วินาทีเท่านั้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่งในระบบจริงนั้นอุณหภูมิของน้ำอ้อยเริ่มต้นจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 อยู่มาก ดังนั้นระบบจริงจึงใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลในช่วงระยะที่ 1 ของหม้อต้มที่ 1 นานกว่าการเข้าสู่สภาวะสมดุลของระบบหม้อต้มที่วิเคราะห์ในครั้งนี้

บทที่ 5

การนำผลวิจัยมาใช้ประโยชน์

จุดประสงค์เพื่อต้องการแสดงขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์หาอัตราการเพื่อจ่ายไอน้ำให้กับระบบหม้อต้มภายใต้ปัจจัยการผลิตของ โรงงานที่มีความผันผวนหรือปัจจัยความไม่แน่นอนของระบบ (Uncertainty) อย่างครอบคลุมและคุ้มค่า และได้คุณภาพน้ำเชื่อมหลังกระบวนการต้มตามวัตถุประสงค์ของโรงงาน

5.1 วิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

การวิเคราะห์หาอัตราการเพื่อจ่ายไอน้ำของระบบจะใช้ระบบของโรงงานที่ 4 (รูปที่ 3.7) และมีปัจจัยการผลิตดังตารางที่ ก.4.1 และ ก.4.2 โดยใช้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ในตารางที่ ก.5.1 และ ก.5.2 ในภาคผนวก ก ซึ่งมีวิธีการหาคำตอบตามขั้นตอนดังนี้

1. หาอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของระบบโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังที่ได้แสดงวิธีการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 72.4163 kg/s
2. วิเคราะห์ปัจจัยความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของระบบที่เกิดขึ้นของโรงงาน โดยใช้ผลการตรวจวัดที่แสดงในตารางที่ ก.5.1 และ ก.5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนในรูปแบบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

อิทธิพลของการแปรผัน	ปัจจัยความไม่แน่นอน (Uncertainty)	เพิ่มขึ้น สูงสุด 4%	ลดลง สูงสุด 4%
แปรผันตรง	1. อัตราการผลิต (\dot{m}_0)	2.3	-2.3
	2. อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกกระบวนการอุ่น ($T_{j,out}$)	1.7	-1.7
	3. อัตราการจ่ายไอหัวหม้อไปสู่หม้อเคี้ยว (\dot{m}_{vac})	1.7	1.7
	4. ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมหลังจากการต้ม (B_5)	0.7	-0.7
แปรผกผัน	1. อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการต้ม (T_0)	-2.0	2.0
	2. ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำอ้อย (B_0)	-0.7	0.7
	3. อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้ากระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$)	-0.2	0.2

พิจารณาค่าเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นที่ทำให้ใช้ปริมาณไอน้ำสูงสุดในตารางที่ 5.1 กล่าวคือ ปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำแบบผันตรงจะพิจารณาที่เพิ่มขึ้นสูงสุด 4 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำแบบผกผันจะพิจารณาที่ลดลงสูงสุด 4 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสูงสุดของระบบ

$$\dot{m}_{s,in} \Big|_{total} = \dot{m}_{s,in} \Big|_{properly} + \dot{m}_{s,in} \Big|_{properly} \times \sum_{i=1}^n \dot{m}_{s,in} \Big|_{uncertainty(c)} \%change$$

$$\dot{m}_{s,in} \Big|_{total} = (72.4163 \text{ kg/s}) + (72.4163 \text{ kg/s}) \{2.3\% + 1.7\% + 1.7\% + 0.7\% + 2.0\% + 0.7\% + 0.2\%\}$$

$$\dot{m}_{s,in} \Big|_{total} = 79.1510 \text{ kg/s}$$

5.2 วิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย

จากข้อมูลจากการตรวจวัดพบว่าในโรงงานที่ 4 ผู้ประกอบการทำการจ่ายไอน้ำที่สถานะไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 120°C เข้าสู่กระบวนการต้มที่หม้อต้มขั้นตอนแรกในอัตรา 95.61 kg/s จากการศึกษาผลของความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมในบทที่ 4 สามารถตรวจสอบได้ว่าอัตราการจ่ายไอน้ำดังกล่าวเป็นอัตราการเพื่อจ่ายไอน้ำที่มากเกินไปสำหรับการรองรับอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสมถึง 16 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสม จึงทำให้ระบบการผลิตนั้นต้องมีการจ่ายไอหัวหม้อทิ้งบางส่วนที่บริเวณจุดแยกไหลของไอหัวหม้อในระหว่างหม้อต้มแต่ละขั้นตอนก่อนที่จะทำการจ่ายเข้าสู่หม้อต้มและหม้ออุ่นในขั้นตอนถัดไปเพื่อควบคุมคุณภาพ (ค่าปริกซ์) ของน้ำเชื่อมจากการต้มให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าควบคุม จากการจ่ายไอน้ำทิ้งจึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสูงมาก จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าระบบหม้อต้มและอุ่นน้ำอ้อยในโรงงานที่ 4 ควรจะมีอัตราการเพื่อจ่ายไอน้ำสำหรับการรองรับอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนอยู่ที่ประมาณ 80 kg/s ก็มีความเพียงพอที่จะทำให้ได้คุณภาพน้ำเชื่อมตามวัตถุประสงค์ของโรงงาน และทำให้ประหยัดการใช้ไอน้ำมากกว่าระบบเดิมประมาณ 15 kg/s หรือประมาณ 54 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งมีขนาดที่มีนัยสำคัญมาก

5.3 สรุปผลการศึกษาวิจัย

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยความไม่แน่นอนในครั้งนี้จะนำไปสู่การเพื่อจ่ายไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพไม่จำเป็นต้องจ่ายไอน้ำให้กับระบบที่มากเกินไปอีกต่อไปซึ่งก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ และสามารถทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงปัจจัยการผลิตสำคัญที่ส่งผลอย่างมากกับอัตราการใช้ไอน้ำของระบบในทิศทางต่าง ๆ อีกทั้งในการศึกษาผลของรูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อไปสู่กระบวนการอุ่นพบว่า ควรนำไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นของหม้อต้มในขั้นตอนลำดับท้าย ๆ มาใช้ในกระบวนการอุ่นมากที่สุดจะทำให้ระบบโดยรวมมีการใช้ไอน้ำที่น้อยลง อย่างไรก็ตามการนำไอหัวหม้อในลำดับท้าย ๆ มาใช้ในการถ่ายเทความร้อนย่อมมีข้อจำกัด เนื่องจากอุณหภูมิของไอหัวหม้อของหม้อต้มดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำเกินไป สำหรับการศึกษาลักษณะการแจกแจงความดันของหม้อต้มนั้นพบว่า ความดันในหม้อต้มควรจะมีค่าความดันที่น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้จะทำให้ระบบโดยรวม มีการใช้ไอน้ำลดลงซึ่งความดันที่น้อยที่สุดนี้ก็คือความดันที่ทำให้ไอน้ำที่อยู่ในน้ำอ้อยเกิดเป็นไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิของไอหัวหม้อนั้นจะต้องสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำอ้อยที่หม้ออุ่นได้อย่างเพียงพอ เพื่อให้ไอน้ำอ้อยได้อุณหภูมิที่ควบคุมไว้ก่อนที่จะเข้าไปสู่กระบวนการพาสเจอร์



รายการอ้างอิง

- จิระพันธ์ เนื่องจกนิล (2542). บูรณาการระบบพลังงานความร้อนและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 44-48 และ หน้า 89-90
- ณัฐคนัย มูลศิริ ชนกนันท์ สุขกำเนิด และ สมหมาย ปรีเปรม (2553). การออกแบบหม้ออุ่นและหม้อต้มแบบเปลือกและท่อในโรงงานน้ำตาล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24 (ME-NETT24). 20-22 ตุลาคม 2553. หน้า 6-7.
- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และ ธีระชาติ พรพิบูลย์ (2555). แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (E-NETT8). 2-4 พฤษภาคม 2555. หน้า 1-11.
- บันเทิง สีกุดทอง สมหมาย ปรีเปรม และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด (2552). การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มโรงงานน้ำตาล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 (ME-NETT23). 4-7 พฤศจิกายน 2552. หน้า 3-5.
- พงษ์ธร จริญญากรณ์ (2538) เทอร์โมไดนามิกส์ บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด
- มนตรี พิรุณเกษตร (2538) อุณหพลศาสตร์ 1 บริษัท วิทย์พัฒนา จำกัด
- ราชบัณฑิตยสถาน (2554) พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมเครื่องกล : กลศาสตร์วิศวกรรม ห้างหุ้นส่วน จำกัดโครงการพิมพ์
- สฤษฎี ป้องกันภัย (2552). แบบจำลองกระบวนการเกี่ยวน้ำตาลเพื่อการใช้ไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 27-30.
- ASHRAE Fundamentals Handbook, (2001). **Thermophysical Properties Refrigerants.**
- Cengel, Y.A., and Boles, M.A. (1994). **Thermodynamics an engineering approach. (3th edition),** MaGrawHill.

- Ensinas, A.V., and Nebra, S.A. (2006) Optimization of Thermal energy Consumption in Sugar Cane Factories. **The 19th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems (ECOS)**. 12-14 July, pp. 1-8.
- Ensinas, A.V., and Nebra, S.A. (2007). Design of Evaporation Systems and Heaters Networks in Sugar Cane Factories Using a Thermo-economic Optimization Procedure. **International Centre for Applied Thermodynamics**. pp. 1-9.
- Hugot, E. (1972). **Handbook of cane sugar engineering**. (2th edition), Elsevier Publishing Company.
- Jayes, W.E.G. (2004) Optimum distribution of heating surface in a multiple effect evaporator train. **The 78th Annual Congress of South African Sugar Technologists' Association**. 27-30 July, pp. 1-16.
- Taylor, R.P., Hodge, B.K., and James, C.A. (1997). Estimating uncertainty in thermal system analysis and design. **Applied Thermal Engineering**. pp. 1-23.
- Stoecker, W.F. (1989). **Design of Thermal Systems**. (3th edition), McGrawHill.
- Urbaniec, K. (2002). The evolution of evaporator stations in the beet-sugar industry. **Journal of Food Engineering**. pp. 1-4.



ก.1 ปัจจัยการผลิตของโรงงานที่ 1

ตารางที่ ก.1.1 ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 1

ลำดับ	ตัวแปรควบคุม	จำนวน	หน่วย
1	อัตราการผลิต ($\dot{m}_0 = \dot{m}_{j,in}$)	302.4	kg/s
2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและขาออกที่หม้ออุ่น	ตารางที่ ก.2	°C
3	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 (T_0)	108.5	°C
4	ความเข้มข้นของน้ำอ้อยก่อนเข้าหม้ออุ่นและหม้อต้ม ($B_0 = B_{in}$)	13.9	°Brix
5	ความดันสัมบูรณ์ขณะต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($P_{abs,n}$)	ตารางที่ 3.1	bar
6	ไอหัวหม้อที่จ่ายให้กับกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)	49.5	kg/s
7	สภาวะไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{s,in}$)	$T_{sat,v@2bar}$	°C
8	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_5)	65	°Brix
9	อัตราการผลิต Massecurite เพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาว (\dot{m}_m)	34	kg/s

ตารางที่ ก.1.2 อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 1

หม้ออุ่น	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อย	จำนวน	หน่วย
i=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	97.9	°C
	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	108.5	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	102.3	°C
	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	104.4	°C
i=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	100.4	°C
	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	102.3	°C
j=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	85.7	°C
	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	100.4	°C

ตารางที่ ก.1.2 อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 1 (ต่อ)

หม้ออุ่น	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อย	จำนวน	หน่วย
i=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	76.8	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	85.7	°C
i=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	70.3	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	76.8	°C
i=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	48.5	°C
j=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	70.3	°C
i=4	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	37	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	48.5	°C

ก.2 ปัจจัยการผลิตของโรงงานที่ 2

ตารางที่ ก.2.1 ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2

ลำดับ	ตัวแปรควบคุม	จำนวน	หน่วย
1	อัตราการผลิต ($\dot{m}_0 = \dot{m}_{j,in}$)	250	kg/s
2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและขาออกที่หม้ออุ่น	ตารางที่ ก.4	°C
3	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 (T_0)	91.5	°C
4	ความเข้มข้นของน้ำอ้อยก่อนเข้าหม้ออุ่นและหม้อต้ม ($B_0 = B_{in}$)	15	°Brix
5	ความดันสัมบูรณ์ขณะต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($P_{abs,n}$)	ตารางที่ 3.1	bar
6	ไอหัวหม้อที่จ่ายให้กับกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)	39.3	kg/s
7	สถานะไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{s,in}$)	$T_{sat,v@2\text{bar}}$	°C
8	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_5)	65	°Brix
9	อัตราการผลิต Masecuite เพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาว (\dot{m}_m)	28	kg/s

ตารางที่ ก.2.2 อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 2

หม้ออุ่นที่	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อย	จำนวน	หน่วย
i=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	92.1	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	106.8	°C
i=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	66.4	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	92.1	°C
i=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	51.8	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	66.4	°C
i=4	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	41.6	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	51.8	°C

ก.3 ปัจจัยการผลิตของโรงงานที่ 3

ตารางที่ ก.3.1 ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 3

ลำดับ	ตัวแปรควบคุม	จำนวน	หน่วย
1	อัตราการผลิต ($\dot{m}_0 = \dot{m}_{j,in}$)	250	kg/s
2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและขาออกที่หม้ออุ่น	ตารางที่ ก.6	°C
3	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 (T_0)	95	°C
4	ความเข้มข้นของน้ำอ้อยก่อนเข้าหม้ออุ่นและหม้อต้ม ($B_0 = B_{in}$)	15	°Brix
5	ความดันสัมบูรณ์ขณะต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($P_{abs,n}$)	ตารางที่ 3.1	bar
6	ไอหัวหม้อที่จ่ายให้กับกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)	39.3	kg/s
7	สถานะไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{s,in}$)	$T_{sat,v@2\text{ bar}}$	°C
8	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_5)	65	°Brix
9	อัตราการผลิต Masecuite เพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาว (\dot{m}_m)	28	kg/s

ตารางที่ ก.3.2 อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 3

หม้ออุ่นที่	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อย	จำนวน	หน่วย
i=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	99.2	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	106.8	°C
i=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	89.7	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	99.2	°C
i=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	76.1	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	89.7	°C
i=4	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	68.1	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	76.1	°C
i=4	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	50.0	°C
j=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	73.1	°C

ก.4 ปัจจัยการผลิตของโรงงานที่ 4

ตารางที่ ก.4.1 ปัจจัยการผลิตของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 4

ลำดับ	ตัวแปรควบคุม	จำนวน	หน่วย
1	อัตราการผลิต ($\dot{m}_0 = \dot{m}_{j,in}$)	209.27	kg/s
2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและขาออกที่หม้ออุ่น	ตารางที่ ก.6	°C
3	อุณหภูมิของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 (T_0)	100.17	°C
4	ความเข้มข้นของน้ำอ้อยก่อนเข้าหม้อต้มและหม้อต้ม ($B_0 = B_{in}$)	15.7	°Brix
5	ความดันสมบูรณ์ขณะต้มที่หม้อต้มแต่ละขั้นตอน ($P_{abs,n}$)	ตารางที่ 3.1	bar
6	ไอหัวหม้อที่จ่ายให้กับกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)	36.86	kg/s
7	สถานะไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{s,in}$)	$T_{sat,v @ 2 bar}$	°C
8	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_5)	61.39	°Brix
9	อัตราการผลิต Massequite เพื่อผลิตน้ำตาลทรายขาว	20	kg/s

ตารางที่ ก.4.2 อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าและออกหม้ออุ่นของโรงงานที่ 4

หม้ออุ่นที่	ทิศทางการไหลของน้ำอ้อย	จำนวน	หน่วย
i=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	98.92	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	103.17	°C
i=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	66.92	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	90.42	°C
i=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	59.42	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	67.75	°C
i=3	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	52.67	°C
j=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	59.42	°C
i=4	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	42.50	°C
j=1	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	52.67	°C
i=4	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า	36.83	°C
j=2	อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก	42.50	°C

ก.5 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตของโรงงานทั่วไป

ตารางที่ ก.5.1 ช่วงเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตที่มีอิทธิพลแบบผันตรง
ที่ได้จากฐานข้อมูลจากการตรวจวัดของโรงงาน โดยเฉลี่ย

ลำดับที่	ปัจจัยการผลิต	ช่วงเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลง (%)
1	อัตราการผลิต (\dot{m}_0)	± 1.5
2	อุณหภูมิของน้ำอ้อยหลังกระบวนการอุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการพักใส่ ($T_{j,out}$)	± 1.0
3	อัตราการใช้น้ำในกระบวนการเคี้ยว ($\dot{m}_{vacuumpan}$)	± 4.0
4	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (B_5)	ขึ้นอยู่กับนโยบายของโรงงาน

ตารางที่ ก.5.2 ช่วงเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการผลิตที่มีอิทธิพลแบบผกผัน
ที่ได้จากฐานข้อมูลจากการตรวจวัดของโรงงาน โดยเฉลี่ย

ลำดับที่	ปัจจัยการผลิต	ช่วงเปอร์เซ็นต์ของ การเปลี่ยนแปลง (%)
1	อุณหภูมิของน้ำอ้อยที่เข้าสู่กระบวนการต้ม (T_0)	± 1.0
2	ความเข้มข้นของน้ำอ้อยเริ่มต้น (B_0)	± 2.5
3	อุณหภูมิน้ำอ้อยก่อนเข้าสู่กระบวนการอุ่น ($T_{j,in}$)	± 4.0

ก.6 ข้อกำหนดของระบบลำเลียงของหม้อต้ม

ตารางที่ ก.6.1 ข้อกำหนดของระบบลำเลียงของหม้อต้มของโรงงานที่ 2

ลำดับ	ข้อกำหนดของระบบลำเลียงของหม้อต้ม	ขนาด	หน่วย
1	ความยาวท่อลำเลียงของหม้อต้ม (Length)	5.0	m
2	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลำเลียง (Diameter)	0.51	m
4	ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่ผ่านท่อลำเลียง (Density)	ตารางที่ ก.7	kg/m^3
5	ความหนืดของน้ำเชื่อมที่ผ่านท่อลำเลียง (Viscosity)	ตารางที่ ก.8	mP.s

ก.7 ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่สถานะต่าง ๆ

ตารางที่ ก.7.1 ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่สถานะต่าง ๆ (kg/m^3)

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นน้ำอ้อย (°บริกซ์)										
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
115	1,006	1,027	1,049	1,071	1,095	1,120	1,146	1,172	1,200	1,229	1,259
110	1,010	1,031	1,052	1,075	1,099	1,123	1,149	1,176	1,204	1,232	1,262
105	1,013	1,034	1,056	1,079	1,102	1,127	1,153	1,179	1,207	1,236	1,266
100	1,017	1,039	1,060	1,083	1,106	1,131	1,156	1,183	1,211	1,239	1,269
95	1,021	1,042	1,063	1,086	1,110	1,134	1,160	1,186	1,214	1,243	1,272
90	1,024	1,045	1,067	1,090	1,113	1,138	1,163	1,190	1,217	1,246	1,276
85	1,027	1,048	1,070	1,093	1,117	1,141	1,167	1,193	1,221	1,249	1,279

ตารางที่ ก.7.1 ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่สภาวะต่างๆ (kg/m^3) (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นน้ำอ้อย (°บริกซ์)										
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
80	1,031	1,052	1,074	1,096	1,120	1,145	1,170	1,197	1,224	1,253	1,282
75	1,034	1,055	1,077	1,100	1,123	1,148	1,173	1,200	1,227	1,256	1,286
70	1,037	1,058	1,080	1,103	1,126	1,151	1,177	1,203	1,231	1,259	1,289
65	1,040	1,061	1,083	1,106	1,129	1,154	1,180	1,206	1,234	1,262	1,292
60	1,042	1,064	1,086	1,109	1,132	1,157	1,183	1,209	1,237	1,265	1,295
55	1,045	1,066	1,088	1,111	1,135	1,160	1,186	1,212	1,240	1,268	1,298

ก.8 ความหนืดพลวัตของน้ำเชื่อมที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ ก.8.1 ความหนืดพลวัตของน้ำเชื่อมที่สภาวะต่างๆ (m.Pa.s)

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นน้ำอ้อย (°บริกซ์)										
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
115	0.330	0.443	0.512	0.599	0.712	0.864	1.073	1.373	1.821	2.531	3.737
110	0.404	0.462	0.535	0.629	0.751	0.915	1.143	1.472	1.970	2.769	4.150
105	0.371	0.422	0.484	0.562	0.662	0.794	0.972	1.221	1.585	2.140	3.044
100	0.441	0.507	0.591	0.699	0.841	1.036	1.310	1.712	2.336	3.363	5.201
95	0.463	0.534	0.623	0.740	0.895	1.107	1.409	1.858	2.560	3.735	5.876
90	0.487	0.563	0.660	0.786	0.955	1.188	1.523	2.025	2.821	4.173	6.683
85	0.513	0.595	0.700	0.837	1.023	1.280	1.653	2.218	3.126	4.691	7.657
80	0.543	0.632	0.746	0.896	1.100	1.386	1.803	2.443	3.484	5.310	8.844
75	0.577	0.673	0.797	0.962	1.188	1.507	1.977	2.706	3.909	6.056	10.30
70	0.614	0.719	0.856	1.038	1.289	1.647	2.180	3.016	4.417	6.962	12.12
65	0.657	0.772	0.923	1.125	1.406	1.810	2.419	3.386	5.030	8.077	14.40
60	0.707	0.833	1.000	1.226	1.542	2.002	2.702	3.829	5.778	9.462	17.31
55	0.763	0.904	1.090	1.344	1.703	2.230	3.042	4.368	6.700	11.21	21.07



ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณ

ข.1 ผลการคำนวณหาค่าตอบโดยวิธีนิวตัน-รัปสันในการวิเคราะห์หาอัตราการใช้ ไอน้ำที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.1.1 ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม
และอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 1

รอบที่	B_1 (°Brix)	B_2 (°Brix)	B_3 (°Brix)	B_4 (°Brix)	\dot{F}_1 (kg/s)	\dot{F}_2 (kg/s)	\dot{F}_3 (kg/s)	\dot{F}_4 (kg/s)	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
1	18.00	30.00	42.00	56.00	50.00	35.00	30.00	25.00	100.00
2	20.73	26.52	34.80	44.38	39.52	37.13	24.65	20.80	107.91
3	21.20	26.88	35.83	46.29	39.52	37.13	24.65	20.79	107.92
4	21.22	26.88	35.86	46.38	39.52	37.13	24.65	20.79	107.92
5	21.22	26.88	35.86	46.38	39.52	37.13	24.65	20.79	107.92
6	21.22	26.88	35.86	46.38	39.52	37.13	24.65	20.79	107.92
7	21.22	26.88	35.86	46.38	39.52	37.13	24.65	20.79	107.92

ตารางที่ ข.1.2 ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม
และอุ่นน้ำอ้อยของโรงงานที่ 2

รอบที่	B_1 (°Brix)	B_2 (°Brix)	B_3 (°Brix)	B_4 (°Brix)	\dot{F}_1 (kg/s)	\dot{F}_2 (kg/s)	\dot{F}_3 (kg/s)	\dot{F}_4 (kg/s)	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
1	18.00	30.00	42.00	56.00	50.00	35.00	30.00	25.00	100.00
2	21.41	28.48	35.52	45.72	35.61	26.55	22.13	19.60	91.50
3	22.18	28.55	36.36	47.26	35.61	26.55	22.13	19.59	91.50
4	22.21	28.55	36.38	47.31	35.61	26.55	22.13	19.59	91.50
5	22.21	28.55	36.38	47.31	35.61	26.55	22.13	19.59	91.50
6	22.21	28.55	36.38	47.31	35.61	26.55	22.13	19.59	91.50
7	22.21	28.55	36.38	47.31	35.61	26.55	22.13	19.59	91.50

ตารางที่ ข.1.3 ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม
และอุณหภูมิของโรงงานที่ 3

รอบที่	B_1 (°Brix)	B_2 (°Brix)	B_3 (°Brix)	B_4 (°Brix)	\dot{F}_1 (kg/s)	\dot{F}_2 (kg/s)	\dot{F}_3 (kg/s)	\dot{F}_4 (kg/s)	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
1	18.00	30.00	42.00	56.00	50.00	35.00	30.00	25.00	100.00
2	20.97	26.79	34.55	48.50	33.56	31.47	27.54	16.33	84.83
3	21.55	27.09	35.63	49.36	33.56	31.47	27.54	16.33	84.83
4	21.56	27.10	35.67	49.38	33.56	31.47	27.54	16.33	84.83
5	21.56	27.10	35.67	49.38	33.56	31.47	27.54	16.33	84.83
6	21.56	27.10	35.67	49.38	33.56	31.47	27.54	16.33	84.83
7	21.56	27.10	35.67	49.38	33.56	31.47	27.54	16.33	84.83

ตารางที่ ข.1.4 ผลการคำนวณการทำซ้ำโดยหลักการนิวตัน-รัปสันของกระบวนการต้ม
และอุณหภูมิของโรงงานที่ 4

รอบที่	B_1 (°Brix)	B_2 (°Brix)	B_3 (°Brix)	B_4 (°Brix)	\dot{F}_1 (kg/s)	\dot{F}_2 (kg/s)	\dot{F}_3 (kg/s)	\dot{F}_4 (kg/s)	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
1	18.00	30.00	42.00	56.00	50.00	35.00	30.00	25.00	100.00
2	21.96	29.28	36.30	45.80	28.59	21.84	18.02	14.03	72.41
3	23.03	29.29	36.97	47.31	28.59	21.84	18.02	14.02	72.41
4	23.08	29.29	36.98	47.37	28.59	21.84	18.02	14.02	72.41
5	23.08	29.29	36.98	47.37	28.59	21.84	18.02	14.02	72.41
6	23.08	29.29	36.98	47.37	28.59	21.84	18.02	14.02	72.41
7	23.08	29.29	36.98	47.37	28.59	21.84	18.02	14.02	72.41

ข.2 ผลการคำนวณปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำ

ตารางที่ ข.2.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำ

อัตราการเปลี่ยนแปลง	โรงงานที่1	โรงงานที่2	โรงงานที่3	โรงงานที่4
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial \dot{m}_0}$	0.2218	0.2329	0.2096	0.2006
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial B_0}$	-1.1842	-0.9613	-0.9229	-0.8118
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial T_{j,in}}$	-0.1128	-0.0926	-0.0926	-0.0772
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial T_{j,out}}$	0.4343	0.3541	0.3541	0.2950
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial T_0}$	-0.5271	-0.4326	-0.4326	-0.3605
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial \dot{m}_{vac}}$	0.8256	0.8256	0.8257	0.8257
$\frac{\partial \dot{m}_{s,in}}{\partial B_5}$	0.2506	0.2054	0.2054	0.2015

ข.3 ผลการคำนวณปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อม

ตารางที่ ข.3.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อม

อัตราการเปลี่ยนแปลง	โรงงานที่1	โรงงานที่2	โรงงานที่3	โรงงานที่4
$\frac{\partial B_5}{\partial \dot{m}_0}$	-0.8848	-1.1501	-1.0202	-0.9956
$\frac{\partial B_5}{\partial B_0}$	4.7249	4.7074	4.4931	4.0290
$\frac{\partial B_5}{\partial T_{j,in}}$	0.4502	0.4510	0.4510	0.3831

ตารางที่ ข.3.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อม (ต่อ)

อัตราการเปลี่ยนแปลง	โรงงานที่1	โรงงานที่2	โรงงานที่3	โรงงานที่4
$\frac{\partial B_5}{\partial T_{j,out}}$	-1.7211	-1.7239	-1.7237	-1.4641
$\frac{\partial B_5}{\partial T_0}$	2.1030	2.1064	2.1062	1.7889
$\frac{\partial B_5}{\partial \dot{m}_{vac}}$	-3.2941	-4.0201	-4.0196	-4.0976
$\frac{\partial B_5}{\partial \dot{m}_{s,in}}$	3.9898	4.8689	4.8683	4.9627

ข.4 ผลการคำนวณของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนที่มีผลต่ออัตราการใช้น้ำ

ตารางที่ ข.4.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้น้ำของระบบต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่มีลักษณะแปรผันตรง

ปัจจัยความไม่แน่นอน	โรงงานที่ 1	โรงงานที่ 2	โรงงานที่ 3	โรงงานที่ 4
\dot{m}_0 (kg/s)	0.6214	0.6454	0.6175	0.5797
$T_{j,out}$ (°C)	0.4173	0.4133	0.4457	0.4203
$\dot{m}_{vacuumpan}$ (kg/s)	0.3786	0.3546	0.3825	0.4203
B_5 (°Brix)	0.1463	0.1476	0.1593	0.1729
T_0 (°C)	-0.5299	-0.4326	-0.4844	-0.4986
B_0 (°Brix)	-0.1525	-0.1585	-0.1632	-0.1760
$T_{j,in}$ (°C)	-0.0387	-0.0421	-0.0546	-0.0392



ภาคผนวก ค

ผลการอพติไมเซชัน

ค.1 ผลการออกประเมินเชิงชั้นรูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อที่ทำให้ระบบมีการใช้ไอน้ำน้อยที่สุด

ตารางที่ ค.1.1 ผลการคำนวณของอัตราการใช้ไอน้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อของโรงงาน 2 ในแต่ละกรณี

กรณีที่	รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อ	อัตราการใช้ไอน้ำ (kg/s)	กรณีที่	รูปแบบการจ่ายไอหัวหม้อ	อัตราการใช้ไอน้ำ (kg/s)
1	(1,1,1,1)	98.80	2	(1,1,1,2)	97.95
3	(1,1,1,3)	97.06	4	(1,1,1,4)	96.13
5	(1,1,1,5)	95.19	6	(1,1,2,1)	97.58
7	(1,1,2,2)	96.74	8	(1,1,2,3)	95.84
9	(1,1,2,4)	94.92	10	(1,1,2,5)	93.97
11	(1,1,3,1)	96.31	12	(1,1,3,2)	95.46
13	(1,1,3,3)	94.57	14	(1,1,3,4)	93.64
15	(1,1,3,5)	92.70	16	(1,1,4,1)	94.98
17	(1,1,4,2)	94.13	18	(1,1,4,3)	93.24
19	(1,1,4,4)	92.32	20	(1,1,4,5)	91.37
21	(1,2,1,1)	96.66	22	(1,2,1,2)	95.81
23	(1,2,1,3)	94.92	24	(1,2,1,4)	93.99
25	(1,2,1,5)	93.05	26	(1,2,2,1)	95.44
27	(1,2,2,2)	94.60	28	(1,2,2,3)	93.70
29	(1,2,2,4)	92.78	30	(1,2,2,5)	91.83
31	(1,2,3,1)	94.17	32	(1,2,3,2)	93.32
33	(1,2,3,3)	92.43	34*	(1,2,3,4)*	91.50*
35	(1,2,3,5)	90.56	36	(1,2,4,1)	92.84
37	(1,2,4,2)	91.99	38	(1,2,4,3)	91.10
39	(1,2,4,4)	90.18	40	(1,2,4,5)	89.23
41	(1,3,1,1)	94.41	42	(1,3,1,2)	93.56
43	(1,3,1,3)	92.67	44	(1,3,1,4)	91.75

ตารางที่ ค.1.1 ผลการคำนวณของอัตราการใช้น้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ
ของโรงงาน 2 ในแต่ละกรณี (ต่อ)

กรณี	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้น้ำ (kg/s)	กรณี	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้น้ำ (kg/s)
45	(1,3,1,5)	90.80	46	(1,3,2,1)	93.20
47	(1,3,2,2)	92.35	48	(1,3,2,3)	91.46
49	(1,3,2,4)	90.53	50	(1,3,2,5)	89.59
51	(1,3,3,1)	91.92	52	(1,3,3,2)	91.07
53	(1,3,3,3)	90.18	54	(1,3,3,4)	89.26
55	(1,3,3,5)	88.31	56	(1,3,4,1)	90.60
57	(1,3,4,2)	89.75	58	(1,3,4,3)	88.86
59	(1,3,4,4)	87.93	60**	(1,3,4,5)**	86.99**

หมายเหตุ :

* แทน รูปแบบระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อปัจจุบันของโรงงานที่ 2

** แทน รูปแบบระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อที่ทำให้ใช้น้ำในระบบน้อยที่สุดของโรงงานที่ 2

ตารางที่ ค.1.2 ผลการคำนวณของอัตราการใช้น้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ
ของโรงงาน 3 ในแต่ละกรณี

กรณี	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้น้ำ (kg/s)	กรณี	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้น้ำ (kg/s)
1	(1,1,1,1,1)	96.08	2	(1,1,1,1,2)	94.16
3	(1,1,1,1,3)	92.14	4	(1,1,1,1,4)	90.04
5	(1,1,1,2,1)	95.42	6	(1,1,1,2,2)	93.49
7	(1,1,1,2,3)	91.47	8	(1,1,1,2,4)	89.38
9	(1,1,1,3,1)	94.72	10	(1,1,1,3,2)	92.79
11	(1,1,1,3,3)	90.77	12	(1,1,1,3,4)	88.68
13	(1,1,1,4,1)	93.66	14	(1,1,1,4,2)	92.07
15	(1,1,1,4,3)	90.05	16	(1,1,1,4,4)	87.95

ตารางที่ ค.1.2 ผลการคำนวณของอัตราการใช้น้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ
ของโรงงาน 3 ในแต่ละกรณี (ต่อ)

กรณีที่	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้น้ำ (kg/s)	กรณีที่	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้น้ำ (kg/s)
17	(1,1,2,1,1)	94.95	18	(1,1,2,1,2)	93.03
19	(1,1,2,1,3)	91.01	20	(1,1,2,1,4)	88.91
21	(1,1,2,2,1)	94.28	22	(1,1,2,2,2)	92.36
23	(1,1,2,2,3)	90.34	24	(1,1,2,2,4)	88.24
25	(1,1,2,3,1)	93.58	26	(1,1,2,3,2)	91.66
27	(1,1,2,3,3)	89.64	28	(1,1,2,3,4)	87.55
29	(1,1,2,4,1)	92.86	30	(1,1,2,4,2)	90.93
31	(1,1,2,4,3)	88.92	32	(1,1,2,4,4)	86.82
33	(1,1,3,1,1)	93.76	34	(1,1,3,1,2)	91.84
35	(1,1,3,1,3)	89.82	36	(1,1,3,1,4)	87.72
37	(1,1,3,2,1)	93.09	38	(1,1,3,2,2)	91.17
39	(1,1,3,2,3)	89.15	40	(1,1,3,2,4)	87.06
41	(1,1,3,3,1)	92.40	42	(1,1,3,3,2)	90.47
43	(1,1,3,3,3)	88.45	44	(1,1,3,3,4)	86.36
45	(1,1,3,4,1)	91.67	46	(1,1,3,4,2)	89.75
47	(1,1,3,4,3)	87.73	48	(1,1,3,4,4)	85.63
49	(1,2,1,1,1)	95.29	50	(1,2,1,1,2)	93.37
51	(1,2,1,1,3)	91.35	52	(1,2,1,1,4)	89.25
53	(1,2,1,2,1)	94.63	54	(1,2,1,2,2)	92.70
55	(1,2,1,2,3)	90.68	56	(1,2,1,2,4)	88.59
57	(1,2,1,3,1)	93.93	58	(1,2,1,3,2)	92.00
59	(1,2,1,3,3)	89.98	60	(1,2,1,3,4)	87.89
61	(1,2,1,4,1)	93.20	62	(1,2,1,4,2)	91.28
63	(1,2,1,4,3)	89.26	64	(1,2,1,4,4)	87.16
65	(1,2,2,1,1)	94.16	66	(1,2,2,1,2)	92.24
67	(1,2,2,1,3)	90.22	68	(1,2,2,1,4)	88.12

ตารางที่ ค.1.2 ผลการคำนวณของอัตราการใช้ไอน้ำที่รูปแบบการวางระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อ
ของโรงงาน 3 ในแต่ละกรณี (ต่อ)

กรณีที่	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้ไอน้ำ (kg/s)	กรณีที่	รูปแบบการจ่าย ไอหัวหม้อ	อัตราการใช้ไอน้ำ (kg/s)
69	(1,2,2,2,1)	93.49	70	(1,2,2,2,2)	91.57
71	(1,2,2,2,3)	89.55	72	(1,2,2,2,4)	87.45
73	(1,2,2,3,1)	92.79	74	(1,2,2,3,2)	90.87
75	(1,2,2,3,3)	88.85	76	(1,2,2,3,4)	86.75
77	(1,2,2,4,1)	92.07	78	(1,2,2,4,2)	90.14
79	(1,2,2,4,3)	88.12	80	(1,2,2,4,4)	86.03
81	(1,2,3,1,1)	92.97	82	(1,2,3,1,2)	91.05
83	(1,2,3,1,3)	89.03	84	(1,2,3,1,4)	86.93
85	(1,2,3,2,1)	92.30	86	(1,2,3,2,2)	90.38
87	(1,2,3,2,3)	88.36	88	(1,2,3,2,4)	86.26
89	(1,2,3,3,1)	91.60	90	(1,2,3,3,2)	89.68
91	(1,2,3,3,3)	87.66	92	(1,2,3,3,4)	85.57
93	(1,2,3,4,1)	90.88	94	(1,2,3,4,2)	88.96
95	(1,2,3,4,3)	86.94	96***	(1,2,3,4,4)***	84.84***

หมายเหตุ :

*** แทน รูปแบบระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อปัจจุบันของโรงงานที่ 3 และเป็นรูปแบบระบบท่อส่งจ่ายไอหัวหม้อที่ทำให้ใช้ไอน้ำในระบบน้อยที่สุดของโรงงานที่ 3

ค.2 ผลการอพติไมเซชันลักษณะการแจกแจงความดันของระบบหม้อต้มแบบหลาย ขั้นตอนที่ทำให้ระบบมีการใช้น้ำน้อยที่สุด

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
1	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	89.70	76.10	55.76	82.90*
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	69.44	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	29.29	28.90	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0411	0.0275	0.0172	0.0109	
2	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	89.70	80.63	55.76	83.07
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	69.44	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	29.29	20.71	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0411	0.0274	0.0171	0.0107	
3	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	89.70	85.16	55.76	83.23
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	69.44	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	29.29	11.18	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0410	0.0272	0.0170	0.0105	
4	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	89.70	89.70	55.76	83.40
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	69.44	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	29.29	0.00	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0271	0.0168	0.0103	
5	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	92.87	76.10	55.76	83.10
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	78.46	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	20.27	37.92	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0410	0.0273	0.0171	0.0109	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
6	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	92.87	80.63	55.76	83.27
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	106.80	99.20	89.70	76.10	55.76	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	129.00	98.73	69.44	40.54	16.40	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	30.27	29.29	28.90	24.14	
7	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	92.87	85.16	55.76	83.43
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	78.46	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	20.27	20.20	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0271	0.0169	0.0105	
8	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	92.87	89.70	55.76	83.60
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	78.46	69.44	16.4	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	20.27	9.02	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0270	0.0167	0.0103	
9	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	96.03	76.10	55.76	83.29
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	88.07	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	10.66	47.53	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0410	0.0272	0.0170	0.0109	
10	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	96.03	80.63	55.76	83.46
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	88.07	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	10.66	39.43	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0271	0.0169	0.0107	
11	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	96.03	85.16	55.76	83.63
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	88.07	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	10.66	29.81	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0270	0.0168	0.0105	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
12	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	96.03	89.70	55.76	83.79
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	88.07	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	10.66	18.63	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0269	0.0166	0.0103	
13	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	99.20	76.10	55.76	83.49
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	98.73	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	0.00	58.19	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0271	0.0169	0.0109	
14	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	99.20	80.63	55.76	83.66
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	98.73	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	0.00	50.00	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0269	0.0168	0.0107	
15	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	99.20	85.16	55.76	83.82
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	98.73	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	0.00	40.47	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0268	0.0167	0.0105	
16	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	99.20	99.20	89.70	55.76	83.99
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	98.73	98.73	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	30.27	0.00	29.29	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0267	0.0165	0.0103	
17	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	89.70	76.10	55.76	83.12
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	69.44	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	38.72	28.90	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0410	0.0274	0.0173	0.0109	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
18	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	89.70	80.63	55.76	83.29
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	69.44	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	38.72	20.71	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0410	0.0273	0.0171	0.0107	
19	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	89.70	85.16	55.76	83.46
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	69.44	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	38.72	11.18	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0272	0.0170	0.0105	
20	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	89.70	89.70	55.76	83.63
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	69.44	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	38.72	0.00	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0271	0.0169	0.0103	
21	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	92.87	76.10	55.76	83.32
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	78.46	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	29.70	37.92	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0410	0.0273	0.0172	0.0109	
22	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	92.87	80.63	55.76	83.49
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	78.46	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	29.70	29.73	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0272	0.0170	0.0107	
23	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	92.87	85.16	55.76	83.66
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	78.46	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	29.70	20.20	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0271	0.0169	0.0105	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
24	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	92.87	89.70	55.76	83.83
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	78.46	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	29.70	9.32	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0270	0.0168	0.0103	
25	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	96.03	76.10	55.76	83.52
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	88.07	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	20.09	47.53	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0272	0.0171	0.0109	
26	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	96.03	80.63	55.76	83.69
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	88.07	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	20.09	39.34	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0271	0.0169	0.0107	
27	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	96.03	85.16	55.76	83.86
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	88.07	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	20.09	29.81	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0269	0.0168	0.0105	
28	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	96.03	89.70	55.76	84.02
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	88.07	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	20.09	18.63	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0268	0.0167	0.0103	
29	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	99.20	76.10	55.76	83.72
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	98.73	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	9.43	58.19	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0270	0.0170	0.0109	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
30	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	99.20	80.63	55.76	83.89
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	98.73	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	9.43	50.00	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0269	0.0168	0.0107	
31	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	99.20	85.16	55.76	84.05
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	98.73	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	9.43	40.47	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0268	0.0167	0.0105	
32	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	101.73	99.20	89.70	55.76	84.22
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	108.16	98.73	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	20.84	9.43	29.29	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0267	0.0166	0.0103	
33	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	89.70	76.10	55.76	83.35
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	69.44	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	48.58	28.90	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0274	0.0173	0.0109	
34	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	89.70	80.63	55.76	83.52
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	69.44	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	48.58	20.71	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0273	0.0172	0.0107	
35	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	89.70	85.16	55.76	83.69
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	69.44	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	48.58	11.18	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0272	0.0170	0.0105	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
36	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	89.70	89.70	55.76	83.85
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	69.44	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	48.58	0.00	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0271	0.0169	0.0103	
37	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	92.87	76.10	55.76	83.55
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	78.46	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	39.56	37.92	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0409	0.0273	0.0172	0.0109	
38	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	92.87	80.63	55.76	83.72
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	78.46	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	39.56	29.73	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0272	0.0171	0.0107	
39	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	92.87	85.16	55.76	83.89
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	78.46	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	39.56	20.20	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0271	0.0169	0.0105	
40	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	92.87	89.70	55.76	84.05
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	78.46	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	39.56	9.02	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0269	0.0168	0.0103	
41	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	96.03	76.10	55.76	83.75
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	88.07	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	29.95	47.53	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0271	0.0171	0.0109	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
42	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	96.03	80.63	55.76	83.92
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	88.07	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	29.95	39.34	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0270	0.0170	0.0107	
43	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	96.03	85.16	55.76	84.08
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	88.07	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	29.95	29.81	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0269	0.0168	0.0105	
44	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	96.03	89.70	55.76	84.25
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	88.07	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	29.95	18.63	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0268	0.0167	0.0103	
45	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	99.20	76.10	55.76	83.94
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	98.73	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	19.29	58.19	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0270	0.0170	0.0109	
46	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	99.20	80.63	55.76	84.11
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	98.73	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	19.29	50.00	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0269	0.0169	0.0107	
47	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	99.20	85.16	55.76	84.28
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	98.73	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	19.29	40.47	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0268	0.0167	0.0105	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
48	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	104.26	99.20	89.70	55.76	84.45
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	118.02	98.73	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	10.98	19.29	29.29	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0405	0.0267	0.0166	0.0103	
49	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	89.70	76.10	55.76	83.57
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	69.44	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	59.56	28.90	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0274	0.0173	0.0109	
50	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	89.70	80.63	55.76	83.74
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	69.44	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	59.56	20.71	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0273	0.0172	0.0107	
51	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	89.70	85.16	55.76	83.91
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	69.44	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	59.56	11.18	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0272	0.0171	0.0105	
52	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	89.70	89.70	55.76	84.08
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	69.44	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	59.56	0.00	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0271	0.0169	0.0103	
53	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	92.87	76.10	55.76	83.77
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	78.46	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	50.54	37.92	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0408	0.0273	0.0172	0.0109	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการใช้น้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
54	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	92.87	80.63	55.76	83.94
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	78.46	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	50.54	29.73	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0272	0.0171	0.0107	
55	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	92.87	85.16	55.76	84.11
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	78.46	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	50.54	20.20	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0270	0.0170	0.0105	
56	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	92.87	89.70	55.76	84.28
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	78.46	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	50.54	9.02	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0269	0.0168	0.0103	
57	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	96.03	76.10	55.76	83.97
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	88.07	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	40.93	47.53	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0407	0.0271	0.0171	0.0109	
58	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	96.03	80.63	55.76	84.14
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	88.07	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	40.93	39.34	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0270	0.0170	0.0107	
59	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	96.03	85.16	55.76	84.31
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	88.07	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	40.93	29.81	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0405	0.0269	0.0169	0.0105	

ตารางที่ ค.2.1 ผลการคำนวณอัตราการไหลไอน้ำที่ลักษณะการแจกแจงความดันในกรณีต่าง ๆ
ของโรงงานที่ 3 (ต่อ)

กรณีที่	สภาวะ	หม้อต้ม ที่ 1	หม้อต้ม ที่ 2	หม้อต้ม ที่ 3	หม้อต้ม ที่ 4	หม้อต้ม ที่ 5	$\dot{m}_{s,in}$ (kg/s)
60	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	96.03	89.70	55.76	84.48
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	88.07	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	40.93	18.63	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0405	0.0268	0.0167	0.0103	
61	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	99.20	76.10	55.76	84.17
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	98.73	40.54	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	30.27	58.19	24.14	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0406	0.0270	0.0170	0.0109	
62	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	99.20	80.63	55.76	84.34
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	98.73	48.73	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	30.27	50.00	32.33	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0405	0.0269	0.0169	0.0107	
63	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	99.20	85.16	55.76	84.51
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	98.73	58.26	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	30.27	40.47	41.86	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0405	0.0268	0.0168	0.0105	
64	$T_{v,i}$ (°C)	106.80	106.8	99.20	89.70	55.76	84.67
	$P_{sat@T_{v,i}}$ (kPa)	129.00	129.00	98.73	69.44	16.40	
	$\Delta P_{i,i+1}$ (kPa)	N/A	0.00	30.27	29.29	53.04	
	$\Delta P_{friction}$ (kPa)	N/A	0.0404	0.0267	0.0166	0.0103	

หมายเหตุ :

* แทน ลักษณะการแจกแจงความดันของระบบหม้อต้มที่ใช้ไอน้ำที่น้อยที่สุด

N/A แทน ไม่มีข้อมูล (Not available)



ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ระบบหม้อต้มในช่วงสถานะไม่คงตัว

ง.1 ระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ ง.1.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อยจนเข้าใกล้สภาวะของผสมอิมิตัว (ระยะที่ 1) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 โรงงานที่ 3

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ(°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
1	357.4180	15.00	8162.6736
2	366.2387	15.00	8364.1201
3	375.0594	15.00	8565.5666
4	383.8801	15.00	8767.0131
5	392.7008	15.00	8968.4596
6	401.5215	15.00	9169.9061
7	410.3422	15.00	9371.3526
8	419.1629	15.00	9572.7991
9	427.9837	15.00	9774.2456
≈ 10	431.5146	15.00	9854.8848

ตารางที่ ง.1.2 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริมาตรควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 โรงงานที่ 3

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ(°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
1	22739.3442	15.0650	9894.2479
2	22640.7940	15.1306	10095.6944
3	22542.2439	15.1967	10297.1409
4	22443.6938	15.2635	10498.5874
5	22345.1437	15.3308	10700.0338
6	22246.5935	15.3987	10901.4803

ตารางที่ ง.1.2 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริมาตรควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 1 โรงงานที่ 3 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ(°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
7	22148.0434	15.4672	11102.9268
8	22049.4933	15.5363	11304.3733
9	21950.9431	15.6061	11505.8198
10	21852.3930	15.6765	11707.2663
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
73	15643.7349	21.8981	24398.3954
74	15545.1848	22.0369	24599.8419
75	15446.6347	22.1775	24801.2884
≈ 76	15348.0845	22.2184	25002.7349

ง.2 ระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 2

ตารางที่ ง.2.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริมาตรควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 2 โรงงานที่ 3

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
1	27234.9970	22.6354	10445.3275
2	27196.7594	22.6673	10524.4348
3	27158.5218	22.6992	10603.5421
4	27120.2841	22.7312	10682.6495
5	27082.0465	22.7633	10761.7568
6	27043.8088	22.7955	10840.8641

ตารางที่ ง.2.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าบrixควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 2 โรงงานที่ 3 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
7	27005.5712	22.8277	10919.9714
8	26967.3336	22.8601	10999.0787
9	26929.0959	22.8926	11078.1860
10	26890.8583	22.9251	11157.2934
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
146	21690.5391	28.4214	21915.8887
147	21652.3015	28.4716	21994.9960
148	21614.0639	28.5220	22074.1033
≈ 149	21575.8262	28.5575	22153.2106

ง.3 ระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 3

ตารางที่ ง.3.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าบrixควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 3 โรงงานที่ 3

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
1	39981.5538	29.0126	13289.8714
2	39953.1620	29.0332	13349.4289
3	39924.7703	29.0539	13408.9863
4	39896.3785	29.0745	13468.5438
5	39867.9867	29.0952	13528.1012
6	39839.5950	29.1160	13587.6587

ตารางที่ ง.3.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าบrixควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 3 โรงงานที่ 3 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
7	39811.2032	29.1367	13647.2161
8	39782.8114	29.1575	13706.7736
9	39754.4196	29.1783	13766.3310
10	39726.0279	29.1992	13825.8885
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
284	31946.6825	36.3095	30144.6301
285	31918.2907	36.3418	30204.1875
256	31889.8989	36.3742	30263.7450
≈ 287	31861.5072	36.3882	30323.3024

ง.4 ระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4

ตารางที่ ง.4.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าบrixควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 โรงงานที่ 3

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
1	21638.0679	37.1297	5835.9787
2	21614.5421	37.1701	5886.2136
3	21591.0163	37.2106	5936.4484
4	21567.4905	37.2512	5986.6832
5	21543.9647	37.2918	6036.9181
6	21520.4389	37.3326	6087.1529

ตารางที่ ง.4.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริมาตรควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 โรงงานที่ 3 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
7	21496.9131	37.3735	6137.3877
8	21473.3874	37.4144	6187.6226
9	21449.8616	37.4554	6237.8574
10	21426.3358	37.4966	6288.0923
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
211	16697.6529	48.1154	16385.2945
212	16674.1271	48.1833	16435.5293
213	16650.6013	48.2514	16485.7642
≈ 214	16627.0755	48.3196	16535.9990

ง.5 ระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะคงตัวของหม้อต้มขั้นตอนที่ 5

ตารางที่ ง.5.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าปริมาตรควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 5 โรงงานที่ 3

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
1	20229.9231	48.8170	7023.4328
2	20209.3925	48.8666	7068.6066
3	20188.8618	48.9163	7113.7804
4	20168.3312	48.9661	7158.9542
5	20147.8006	49.0160	7204.1280
6	20127.2699	49.0660	7249.3018

ตารางที่ ง.5.1 เวลาที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำอ้อย เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าสู่ค่าบrixควบคุม (ระยะที่ 2) ของหม้อต้มขึ้นตอนที่ 5 โรงงานที่ 3 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	มวลน้ำอ้อยหลังจาก การระเหยของน้ำ (kg/s)	ความเข้มข้นของน้ำอ้อย หลังจากการระเหยของ น้ำ (°Brix)	พลังงานภายในระบบ หลังจากการระเหยของ น้ำ (MJ)
7	20106.7393	49.1161	7294.4756
8	20086.2087	49.1663	7339.6494
9	20065.6781	49.2166	7384.8232
10	20045.1474	49.2670	7429.9970
11	20024.6168	49.3175	7475.1708
12	20004.0862	49.3681	7520.3446
13	19983.5555	49.4188	7565.5184
14	19963.0249	49.4696	7610.6922
15	19942.4943	49.5206	7655.8660
16	19921.9637	49.5716	7701.0398
17	19901.4330	49.6227	7746.2136
18	19880.9024	49.6740	7791.3874
19	19860.3718	49.7253	7836.5612
20	19839.8411	49.7768	7881.7350
21	19819.3105	49.8284	7926.9088
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
241	15302.5720	64.5358	17865.1452
242	15282.0414	64.6225	17910.3190
243	15261.5108	64.7094	17955.4928
244	15240.9802	64.7966	18000.6666
245	15220.4495	64.8840	18045.8404
246	15199.9189	64.9716	18091.0142
≈ 247	15179.3883	65.0000	18136.1880



ภาคผนวก จ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมการหาคุณสมบัติของน้ำ (interpolation)

```

function [Tnew hgnew hfgnew] = interpolate(p)
%Input data=====
P = [15.76, 19.95, 25.04, 31.20, 38.60, 47.41, 57.87, 70.18, 84.61, 101.42, 120.90,
      143.38, 169.18, 198.67, 232.24, 270.28];
T = [55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130];
hg = [2600.09, 2608.83, 2617.5, 2626.1, 2634.6, 2643.02, 2651.33, 2659.53, 2667.61,
      2675.57, 2683.39, 2691.06, 2698.58, 2705.93, 2713.10, 2720.08];
hf = [230.26, 251.18, 272.12, 293.07, 314.03, 335.01, 356.01, 377.04, 398.09, 419.17,
      440.27, 461.42, 482.59, 503.81, 525.07, 546.38];
% p=200;
%=====
for i=1:15
    hfg(i)=hg(i)-hf(i);
end
for i=1:15
    if p>P(i)&&p<P(i+1)
        P0=P(i); P1=P(i+1); T0=T(i); T1=T(i+1);
        hg0=hg(i); hg1=hg(i+1); hfg0=hfg(i); hfg1=hfg(i+1);
        dt=T1-T0; dp=P1-P0; pmid=P1-p; dtmid=pmid*dt/dp; Tnew=T1-dtmid;
        dhg=hg1-hg0; dhgmid=dhg*pmid/dp; hgnew=hg1-dhgmid;
        dhfg=hfg1-hfg0; dhfgmid=dhfg*pmid/dp; hfgnew=hfg1-dhfgmid;
    elseif p==P(i)
        Tnew=T(i);
        hgnew=hg(i);
        hfgnew=hfg(i);
    end
end
end

```

โปรแกรมการแก้ระบบสมการโดยวิธีนิวตัน-รัปสัน (Newton-Raphson)

```
function newton
%Input data =====
    Pe=[200,159.61,121.05,84.33,49.45,16.4];
    Tj1=106.800000;   Tj2=92.100000;   Tj3=66.400000;   Tj4=51.800000;
    B0=15;
    m0=250;
    mvac=39.3;
    B5=65;
    T0=91.5;
    Tjin=41.6;
% property of steam =====
    Tnews=zeros(1,6);
    hgnews=zeros(1,6);
    hfgnews=zeros(1,6);
    for i=1:6
        [Tnew hgnew hfgnew]=interpolate(Pe(i));
        Tnews(1,i)=Tnew;
        hgnews(1,i)=hgnew;
        hfgnews(1,i)=hfgnew;
    end
    syms F1 F2 F3 F4 B1 B2 B3 B4 msin
    m1=m0*B0/B1;   m2=m0*B0/B2;   m3=m0*B0/B3;   m4=B0*m0/B4;   m5=B0*m0/B5;
    cp=4.1866*(1-0.006*B0);   cp1=4.1866*(1-0.006*B1);   cp2=4.1866*(1-0.006*B2);
    cp3=4.1866*(1-0.006*B3);   cp4=4.1866*(1-0.006*B4);   cp5=4.1866*(1-0.006*B5);
    T1=Tnews(1,2)+2*B1/(100-B1);   T2=Tnews(1,3)+2*B2/(100-B2);
    T3=Tnews(1,4)+2*B3/(100-B3);   T4=Tnews(1,5)+2*B4/(100-B4);
    T5=Tnews(1,6)+2*B5/(100-B5);
```

```

mv1=m0*cp*(Tj1-Tj2)/hfgnews(1,2);
mv2=m0*cp*(Tj2-Tj3)/hfgnews(1,3);
mv3=m0*cp*(Tj3-Tj4)/hfgnews(1,4);
mv4=m0*cp*(Tj4-Tjin)/hfgnews(1,5);
fprintf('\nmv1=%.4f mv2=%.4f mv3=%.4f mv4=%.4f\n',mv1,mv2,mv3,mv4);

f1=F1-m0+(m0*B0/B1)+mvac+mv1;
f2=F2-B0*m0*((1/B1)-(1/B2))+mv2;
f3=F3-B0*m0*((1/B2)-(1/B3))+mv3;
f4=F4-B0*m0*((1/B3)-(1/B4))+mv4;
f5=hfgnews(1,2)*F1+m1*cp1*T1-m0*B0*((1/B1)-(1/B2))*hfgnews(1,3)-m2*cp2*T2;
f6=hfgnews(1,3)*F2+m2*cp2*T2-m0*B0*((1/B2)-(1/B3))*hfgnews(1,4)-m3*cp3*T3;
f7=hfgnews(1,4)*F3+m3*cp3*T3-m0*B0*((1/B3)-(1/B4))*hfgnews(1,5)-m4*cp4*T4;
f8=hfgnews(1,5)*F4+m4*cp4*T4-m0*B0*((1/B4)-(1/B5))*hfgnews(1,6)-m5*cp5*T5;
f9=hfgnews(1,1)*msin+m0*cp*T0-m0*(1-B0/B1)*hfgnews(1,2)-m1*cp1*T1;

% coefficient from diff
a1=diff(f1,F1);      a2=diff(f1,B1);
b1=diff(f2,F2);      b2=diff(f2,B1);      b3=diff(f2,B2);
c1=diff(f3,F3);      c2=diff(f3,B2);      c3=diff(f3,B3);
d1=diff(f4,F4);      d2=diff(f4,B3);      d3=diff(f4,B4);
e1=diff(f5,F1);      e2=diff(f5,B1);      e3=diff(f5,B2);
g1=diff(f6,F2);      g2=diff(f6,B2);      g3=diff(f6,B3);
h1=diff(f7,F3);      h2=diff(f7,B3);      h3=diff(f7,B4);
i1=diff(f8,F4);      i2=diff(f8,B4);
j1=diff(f9,B1);      j2=diff(f9,msin);

```

```

% start value =====
a(1)=50; b(1)=35; c(1)=30; d(1)=25;           %Flowrate of vapor
e(1)=18; f(1)=30; g(1)=42; h(1)=56;         % Brix
j(1)=100;                                     %Steam consumption

for i=1:5

    o1=subs(f1,{F1,B1},{a(i),e(i)});
    o2=subs(f2,{F2,B1,B2},{b(i),e(i),f(i)});
    o3=subs(f3,{F3,B2,B3},{c(i),f(i),g(i)});
    o4=subs(f4,{F4,B3,B4},{d(i),g(i),h(i)});
    o5=subs(f5,{F1,B1,B2},{a(i),e(i),f(i)});
    o6=subs(f6,{F2,B2,B3},{b(i),f(i),g(i)});
    o7=subs(f7,{F3,B3,B4},{c(i),g(i),h(i)});
    o8=subs(f8,{F4,B4},{d(i),h(i)});
    o9=subs(f9,{B1,msin},{e(i),j(i)});

Aa1=subs(a1,F1,a(i));  Aa2=subs(a2,B1,e(i));
Ab1=subs(b1,F2,b(i));  Ab2=subs(b2,B1,e(i));  Ab3=subs(b3,B2,f(i));
Ac1=subs(c1,F3,c(i));  Ac2=subs(c2,B2,f(i));  Ac3=subs(c3,B3,g(i));
Ad1=subs(d1,F4,d(i));  Ad2=subs(d2,B3,g(i));  Ad3=subs(d3,B4,h(i));
Ae1=subs(e1,F1,a(i));  Ae2=subs(e2,B1,e(i));  Ae3=subs(e3,B2,f(i));
Ag1=subs(g1,F2,b(i));  Ag2=subs(g2,B2,f(i));  Ag3=subs(g3,B3,g(i));
Ah1=subs(h1,F3,c(i));  Ah2=subs(h2,B3,g(i));  Ah3=subs(h3,B4,h(i));
Ai1=subs(i1,F4,d(i));  Ai2=subs(i2,B4,h(i));
Aj1=subs(j1,B1,e(i));  Aj2=subs(j2,msin,j(i));

```

```

A=[Aa1 0 0 0 Aa2 0 0 0 0;
    0 Ab 1 0 0 Ab2 Ab3 0 0 0;
    0 0 Ac1 0 0 Ac2 Ac3 0 0;
    0 0 0 Ad1 0 0 Ad2 Ad3 0;
    Ae1 0 0 0 Ae2 Ae3 0 0 0;
    0 Ag1 0 0 0 Ag2 Ag3 0 0;
    0 0 Ah1 0 0 0 Ah2 Ah3 0;
    0 0 0 Ai1 0 0 0 Ai2 0;
    0 0 0 0 Aj1 0 0 0 Aj2];

F=[o1;o2;o3;o4;o5;o6;o7;o8;o9];
B=inv(A)*F;

s1=B(1,1);    s2=B(2,1);    s3=B(3,1);    s4=B(4,1);    s5=B(5,1);
s6=B(6,1);    s7=B(7,1);    s8=B(8,1);    s9=B(9,1);
P1=a(i)-s1;   P2=b(i)-s2;   P3=c(i)-s3;   P4=d(i)-s4;   P5=e(i)-s5;
P6=f(i)-s6;   P7=g(i)-s7;   P8=h(i)-s8;   P9=j(i)-s9;

a(i+1)=P1;    b(i+1)=P2;    c(i+1)=P3;    d(i+1)=P4;    e(i+1)=P5;
f(i+1)=P6;    g(i+1)=P7;    h(i+1)=P8;    j(i+1)=P9;

fprintf('\nround%d dF1=%.5f dF2=%.5f dF3=%.5f dF4=%.5f\n',i,s1,s2,s3,s4);
fprintf('round%d dB1=%.5f dB2=%.5f dB3=%.5f dB4=%.5f\n',i,s5,s6,s7,s8);
fprintf('round%d F1=%.5f F2=%.5f F3=%.5f F4=%.5f\n',i,P1,P2,P3,P4);
fprintf('round%d B1=%.5f B2=%.5f B3=%.5f B4=%.5f\n',i,P5,P6,P7,P8);
fprintf('round%d msin=%.5f\n',i,P9);

end

```


โปรแกรมการหาความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (interpolation)

```

function density = inter_density2(b,t)
%Input data =====
b=15;
t=41.6;
% =====
B=[10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70];
T=[115; 110; 105; 100; 95; 90; 85; 80; 75; 70; 65; 60; 55];
d=[985.4 1005.6 1026.7 1048.6 1071.4 1095.1 1119.8 1145.5 1172.2 1200.1 1229.1 1259.2 1290.6;
  989.2 1009.5 1030.5 1052.4 1075.2 1098.8 1123.5 1149.1 1175.8 1203.5 1232.4 1262.4 1293.6;
  993.0 1013.3 1034.3 1056.2 1078.9 1102.5 1127.1 1152.7 1179.3 1207.0 1235.8 1265.7 1296.8;
  996.7 1016.9 1038.5 1059.8 1082.6 1106.2 1130.7 1156.3 1182.8 1210.5 1239.2 1269.0 1300.0;
  1000.3 1020.5 1041.6 1063.4 1086.1 1109.8 1134.3 1159.8 1186.3 1213.9 1242.6 1272.3 1303.2;
  1003.7 1024.0 1045.1 1066.9 1089.6 1113.3 1137.8 1163.3 1189.8 1217.3 1245.9 1275.6 1306.5;
  1007.1 1027.4 1048.4 1070.3 1093.1 1116.7 1141.2 1166.7 1193.2 1220.7 1249.3 1279.0 1309.7;
  1010.3 1030.6 1051.7 1073.6 1096.4 1120.0 1144.5 1170.0 1196.5 1224.0 1252.6 1282.2 1313.0;
  1013.4 1033.7 1054.9 1076.8 1099.6 1123.2 1147.8 1173.3 1199.8 1227.3 1255.9 1285.5 1316.2;
  1016.4 1036.8 1057.9 1079.9 1102.7 1126.4 1150.9 1176.5 1203.0 1230.5 1259.1 1288.7 1319.4;
  1019.2 1039.7 1060.9 1082.9 1105.7 1129.4 1154.0 1179.6 1206.1 1233.6 1262.2 1291.9 1322.6;
  1022.0 1042.4 1063.7 1085.7 1108.6 1132.3 1157.0 1182.6 1209.1 1236.7 1265.3 1295.0 1325.7;
  1024.5 1045.1 1066.3 1088.4 1111.4 1135.1 1159.8 1185.5 1212.1 1239.7 1268.3 1298.0 1328.7];

for i=1:13
    for j=1:13
        if b>B(i)&&b<B(i+1)&&t<T(j)&&t>T(j+1)
            B0=B(i); B1=B(i+1); a=i;
            T0=T(j); T1=T(j+1); k=j;
            D0=d(k,a); D1=d(k,a+1); D2=d(k+1,a); D3=d(k+1,a+1);

```

```

%Operate1
    db=B1-B0;    drol=D1-D0;    dB=B1-b;
    dr=db*drol/db; rol1=D1-dr;
%Operate2
    drol2=D3-D2; dr2=dB*drol2/db; rol2=D3-dr2;
%Operate3
    dT=T0-T1; drolnet=rol1-rol2; dt=T0-t;
    dRol=dt* drolnet/dT;    Rol=rol1-dRol;

elseif b==B(i)&&t<T(j)&&t>T(j+1)
    a=i;
    T0=T(j); T1=T(j+1); k=j;
    D0=d(k,a); D2=d(k+1,a);
    drol2=D0-D2; dT=T0-T1; dt=T0-t;
    dRol=dt* drol2/dT;    Rol=D0-dRol;

elseif b>B(i)&&b<B(i+1)&&t==T(j)
    a=i; k=j;
    Bi=B(i); Bo=B(i+1);
    D0=d(k,a); D1=d(k,a+1);
    dB=Bo-Bi; drol=D1-D0; db=Bo-b;
    dr=db*drol/dB; Rol=D1-dr;

elseif b==B(i)&&t==T(j)
    Rol=d(j,i);
end
end
end
end

```

โปรแกรมการหาความหนืดของน้ำเชื่อม (interpolation)

```
function viscosity = inter_viscosity2(b,t)
%Input data =====
b=30;
t=75;
% =====
B=[10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70];
T=[115; 110; 105; 100; 95; 90; 85; 80; 75; 70; 65; 60; 55];
d=[0.342 0.388 0.443 0.512 0.599 0.712 0.864 1.073 1.373 1.821 2.531 3.737 5.984;
  0.356 0.404 0.462 0.535 0.629 0.751 0.915 1.143 1.472 1.970 2.769 4.150 6.776;
  0.371 0.422 0.484 0.562 0.662 0.794 0.972 1.221 1.585 2.140 3.044 4.632 7.721;
  0.387 0.441 0.507 0.591 0.699 0.841 1.036 1.310 1.712 2.336 3.363 5.201 8.859;
  0.405 0.463 0.534 0.623 0.740 0.895 1.107 1.409 1.858 2.560 3.735 5.876 10.240;
  0.425 0.487 0.563 0.660 0.786 0.955 1.188 1.523 2.025 2.821 4.173 6.683 11.932;
  0.448 0.513 0.595 0.700 0.837 1.023 1.280 1.653 2.218 3.126 4.691 7.657 14.024;
  0.473 0.543 0.632 0.746 0.896 1.100 1.386 1.803 2.443 3.484 5.310 8.844 16.640;
  0.500 0.577 0.673 0.797 0.962 1.188 1.507 1.977 2.706 3.909 6.056 10.303 19.948;
  0.532 0.614 0.719 0.856 1.038 1.289 1.647 2.180 3.016 4.417 6.962 12.117 24.184;
  0.567 0.657 0.772 0.923 1.125 1.406 1.810 2.419 3.386 5.030 8.077 14.399 29.684;
  0.608 0.707 0.833 1.000 1.226 1.542 2.002 2.702 3.829 5.778 9.462 17.309 36.933;
  0.655 0.763 0.904 1.090 1.344 1.703 2.230 3.042 4.368 6.700 11.206 21.069 46.645];

for i=1:13
  for j=1:13
    if b>B(i)&&b<B(i+1)&&t<T(j)&&t>T(j+1)
      B0=B(i); B1=B(i+1); a=i;
      T0=T(j); T1=T(j+1); k=j;
      D0=d(k,a); D1=d(k,a+1); D2=d(k+1,a); D3=d(k+1,a+1);
```

```

%Operate1
    db=B1-B0;    drol=D1-D0;    dB=B1-b;
    dr=db*drol/db; rol1=D1-dr;
%Operate2
    drol2=D3-D2; dr2=dB*drol2/db; rol2=D3-dr2;
%Operate3
    dT=T0-T1; drolnet=rol1-rol2; dt=T0-t;
    dRol=dt* drolnet/dT;    Vis=rol1-dRol;

elseif b==B(i)&&t<T(j)&&t>T(j+1)
    a=i;
    T0=T(j); T1=T(j+1); k=j;
    D0=d(k,a); D2=d(k+1,a);
    drol2=D0-D2; dT=T0-T1; dt=T0-t;
    dRol=dt* drol2/dT;    Vis=D0-dRol;

elseif b>B(i)&&b<B(i+1)&&t==T(j)
    a=i; k=j;
    Bi=B(i); Bo=B(i+1);
    D0=d(k,a); D1=d(k,a+1);
    dB=Bo-Bi; drol=D1-D0; db=Bo-b;
    dr=db*drol/dB; Vis=D1-dr;

elseif b==B(i)&&t==T(j)
    Vis=d(j,i);
end
end
end
end

```



ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และ ธีระชาติ พรพิบูลย์ (2555) แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (E-NETT8). 2-4 พฤษภาคม 2555.





การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย
แบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล
Thermodynamics Model of Multiple Boiling and Heating
in Production Sugar Process

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย¹, ธีระชาติ พรพิบูลย์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044 224498 โทรสาร 044 224613 E-mail: teeracha@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการทำนายการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในกระบวนการผลิตน้ำตาลต้องอาศัยการวัดค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (ค่าบrix) ที่หม้อต้มขั้นตอนต่างๆ และทำการวิเคราะห์การใช้ไอน้ำของระบบรวมถึงไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นโดยการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน โดยปราศจากการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างหม้อต้มและหม้ออุ่นในขั้นตอนต่างๆ ร่วมกัน จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการจ่ายไอหัวหม้อให้กับหม้อต้มและหม้ออุ่นไม่เพียงพอหรือมากเกินไปต่อความต้องการในกระบวนการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นแบบหลายขั้นตอนที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณไอหัวหม้อที่จ่ายไปยังหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไปและมีความสอดคล้องต่อความต้องการที่แท้จริงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าบrixที่ได้จากแบบจำลองกับค่าบrixที่ได้จากการวัด พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ในส่วนที่แตกต่างเล็กน้อยของค่าบrixที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากความถดถอยของประสิทธิภาพของหม้อต้มหรือหม้ออุ่นที่เกิดขึ้น

คำหลัก: การวิเคราะห์ทางความร้อน, กระบวนการผลิตน้ำตาล, กระบวนการต้มระเหย

Abstract

Currently, the steam consumption of multiple effect evaporation and juice heating in sugar production process is predicted by mass and heat balance methods from a concentration of juice (brix) which is measured from each effect of evaporator. There are no consideration for the thermodynamics relation of each effect caused the steam flow rate from each evaporator is not enough or more appropriate for heat transfer supplied to heater and the next evaporator. The objective of this paper is to present the thermodynamics model for finding the necessary steam consumption and the properly brix pattern of the multiple effect evaporation and juice heating considered for the thermodynamics relation of each effect. The brix pattern from simulation is trend to nearly the brix pattern from measurement. In the



other hand there is still a part of different brix caused by the efficiency reduction of the evaporator or the heater.

Keywords: Thermal processing, Production sugar process, Evaporation process

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อต้มระเหยแบบหลายขั้นตอนและหม้ออุ่นร่วมในกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ทำนายปริมาณการใช้ไอน้ำ และปริมาณไอหัวหม้อของระบบหม้อต้มระเหยที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่าบrixจากการวัด [1], [2], [3] เพียงแต่ขาดการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของหม้อต้มและหม้ออุ่นร่วมกันทั้งระบบ ซึ่งในบางกรณีพบว่าอัตราการจ่ายไอหัวหม้อของหม้อต้มไม่เพียงพอหรือมากเกินไปต่อความต้องการของหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไป จากวิธีการดังกล่าวเป็นการทำนายเพื่อหาปริมาณการใช้ไอน้ำของระบบจริง ซึ่งมีความหมายเป็นนัยว่า ผลเฉลยนั้นได้รับผลกระทบจากการชดเชยพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิทธิพลของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มที่มีความถดถอยจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งด้วย ซึ่งส่งผลต่อค่าบrixของน้ำเชื่อมที่หม้อต้มในแต่ละขั้นตอนที่ได้ทำการวัด

ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นทั้งกระบวนการโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระของหม้อต้มแต่ละขั้นตอนร่วมกันโดยไม่คิดการชดเชยพลังงานส่วนหนึ่งให้กับหม้อต้มและหม้ออุ่นที่ประสิทธิภาพมีความถดถอยลง และแสดงการเปรียบเทียบค่าบrix และปริมาณการใช้ไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับกระบวนการต้มระเหยจริง โดยจะใช้ข้อมูลจริงจากโรงงานตัวอย่าง 3 โรงงาน ใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลอง

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.1 หม้ออุ่น

จากการสมดุลพลังงานภายใต้สมมุติฐานกระบวนการจะไม่มีพลังงานถ่ายเทระหว่างระบบกับ

สิ่งแวดล้อมและกระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ของหม้ออุ่นดังรูปที่ 1

ดังนั้น $\sum E_{in} = \sum E_{out}$ จะได้

$$\dot{m}_{vn} = \frac{\dot{m}_{j,in} c_{p,in} (T_{j,out} - T_{j,in})}{h_{fg@T_{vn}}} \quad (1)$$

ค่าความจุความร้อนน้ำอ้อย [4]

$$c_p = (1 - 0.006B) \times 4.1866 \quad (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

โดยที่

\dot{m}_{vn} แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่หม้อต้มระเหยขั้นตอน n ที่แยกไหลเข้าสู่หม้ออุ่น (kg/s)

$\dot{m}_{j,in}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้ออุ่นซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลน้ำอ้อยขาออก (kg/s)

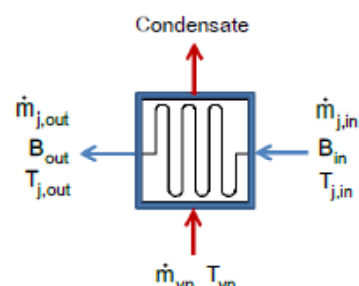
$T_{j,in}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้ออุ่น ($^\circ\text{C}$)

$T_{j,out}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้ออุ่น ($^\circ\text{C}$)

T_{vn} แทน อุณหภูมิไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นของหม้อต้มระเหยขั้นตอน n ($^\circ\text{C}$)

$h_{fg@T_{vn}}$ แทน ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของไอหัวหม้อที่เข้าหม้ออุ่นที่อุณหภูมิ T_{vn} (kJ/kg)

B แทน ค่าบrixของน้ำอ้อย ($^\circ\text{Brix}$)



รูปที่ 1 แสดงทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำในหม้ออุ่น



2.2 หม้อต้มระเหย

จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของหม้อต้มดังรูปที่ 2 จะได้

สมดุลมวลของแข็ง

$$\dot{m}_{j,in} B_{in} = \dot{m}_{j,out} B_{out} \quad (3)$$

สมดุลมวลน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)

$$\dot{w}_n = \dot{m}_{j,in} - \dot{m}_{j,out} \quad (4)$$

สมดุลมวลทางแยกไหลของไอหัวหม้อ

$$\dot{F}_n = \dot{w}_n - \dot{m}_{vn} - \dot{m}_{vacuumpan} \quad (5)$$

*ในกรณีที่มีการส่งจ่ายไอหัวหม้อไปยังหม้อเคียว

สมดุลพลังงาน

จากสมดุลพลังงานภายใต้สมมติฐานกระบวนการจะไม่มีพลังงานถ่ายเทระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมและกระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state)

ดังนั้น $\sum E_{in} = \sum E_{out}$ จะได้

$$\begin{aligned} & \dot{w}_n h_{g@T_{vn}} \\ & + \dot{m}_{j,out} c_{p,out} T_{j,out} \\ \dot{m}_{s,in} = & \frac{-\dot{m}_{j,in} c_{p,in} T_{j,in}}{h_{fg@T_{s,in}}} \end{aligned} \quad (6)$$

ค่าความจุความร้อนน้ำอ้อย [4]

$$c_p = (1 - 0.006B) \times 4.1866 \quad (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

โดยที่

$\dot{m}_{s,in}$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่เข้าหม้อต้มระเหย (kg/s)

$\dot{m}_{j,in}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)ที่เข้าหม้อต้มระเหย (kg/s)

$\dot{m}_{j,out}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)ที่ออกหม้อต้มระเหย (kg/s)

\dot{w}_n แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นในหม้อต้มระเหยขั้นตอนที่ n (kg/s)

B_{in} แทน ค่าบrixของน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม ($^\circ\text{Brix}$)

B_{out} แทน ค่าบrixของน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)ที่ออกจากหม้อต้มระเหย ($^\circ\text{Brix}$)

\dot{F}_n แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อขั้นตอนที่ n ที่แยกไหลไปสู่หม้อต้มระเหยชุดถัดไป (kg/s)

$h_{g@T_{vn}}$ แทน เอนทาลปีของไอหัวหม้อที่อุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวของหม้อต้มระเหยขั้นตอนที่ n (kJ/kg)

$h_{fg@T_{s,in}}$ แทน ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่อุณหภูมิ $T_{s,in}$ (kJ/kg)

$T_{s,in}$ แทน อุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวจากกังหันไอน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ประมาณ 2 บาร์ ($^\circ\text{C}$)

$T_{j,in}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้ม ($^\circ\text{C}$)

$T_{j,out}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้อต้ม ($^\circ\text{C}$)

$$T_{j,out} = T_{vn} + \text{BPE} \quad (7)$$

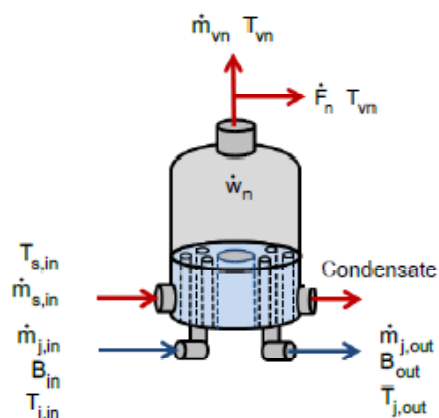
BPE แทน ระดับจุดเดือดที่เพิ่มขึ้น ($^\circ\text{C}$)

BPE หาได้จากการทดลองของ Thieme [4] ดังนี้

$$\text{BPE} = \frac{2B_{out}}{100 - B_{out}} \quad (8)$$

T_{vn} แทน อุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวที่ความดันสัมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยขั้นตอน n ($^\circ\text{C}$)

P_{abs} แทน ความดันสัมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยจะมีลักษณะที่ลดหลั่นลงไปตามพฤติกรรมที่ได้จากการประมาณของ E. HUGOT [4] ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำในหม้อต้มระเหย



ตารางที่ 1 การกระจายความดันลดในหม้อต้มระเหยระหว่างขั้นตอนแบบต่างๆ [4]

การกระจายของความดันลดในหม้อต้มระเหยแต่ละขั้นตอนที่รูปแบบของระบบแบบต่างๆ					
ระบบ 3 ขั้นตอน	$\frac{11}{30}$	$\frac{10}{30}$	$\frac{9}{30}$		
ระบบ 4 ขั้นตอน	$\frac{11}{40}$	$\frac{10.3}{40}$	$\frac{9.7}{40}$	$\frac{9}{40}$	
ระบบ 5 ขั้นตอน	$\frac{11}{50}$	$\frac{10.5}{50}$	$\frac{10}{50}$	$\frac{9.5}{50}$	$\frac{9}{50}$

3. การสร้างแบบจำลอง

3.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมและตัวแปรอิสระ

จากรูปที่ 3 ตัวแปรที่ต้องควบคุมในกระบวนการผลิต

$\dot{m}_{j,in}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้ออุ่นซึ่ง

มีค่าเท่ากับอัตราการไหลน้ำอ้อยขาออก (kg/s)

T_n แทน อุณหภูมิมีน้ำอ้อยเข้า-ออกที่หม้ออุ่น (°C)

$\dot{m}_{vacuumpan}$ แทนอัตราการไหลของไอหัวหม้อที่จ่าย

ไปยังหม้อเดี่ยวสุญญากาศ (kg/s)

$T_{s,in}$ แทน อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวจากกังหันไอน้ำ (°C)

$\dot{m}_{j,0}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนแรก (kg/s)

B_0 แทน ค่าบrixของน้ำอ้อยเริ่มต้นที่เข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนแรก (°Brix)

$T_{j,0}$ แทนอุณหภูมิมีน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มขั้นตอนแรก (°C)

B_5 แทน ค่าบrixของน้ำอ้อยสุดท้ายที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (°Brix)

$\dot{m}_{v,n}$ แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่หม้อต้มระเหยขั้นตอนใดๆ ที่แยกไหลเข้าสู่หม้ออุ่น (kg/s)

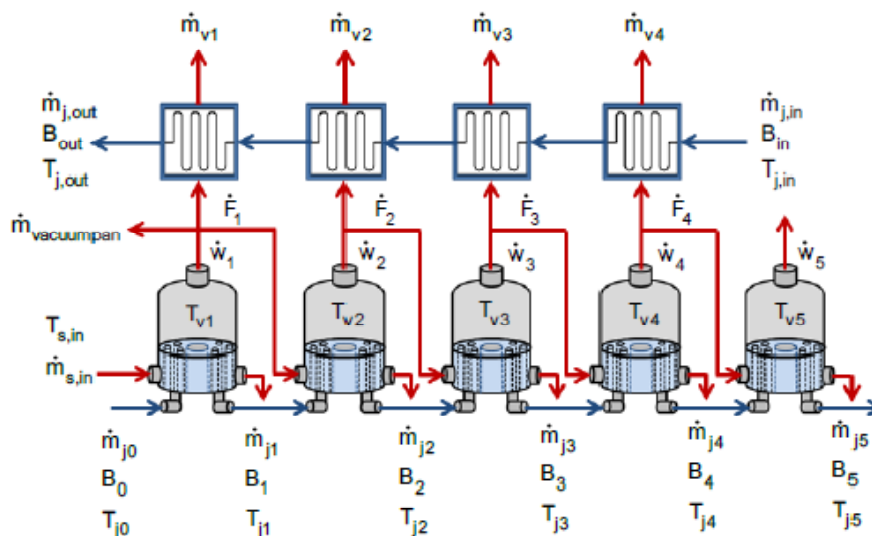
P_{abs} แทน ความดันสัมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยแต่ละขั้นตอน (kPa)

ตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์มีดังนี้

\dot{F}_n แทน อัตราการไหลไอหัวหม้อขั้นตอนที่ n ที่แยกไหลไปสู่ม้อต้มระเหยชุดถัดไป (kg/s)

B_n แทน ค่าบrixของน้ำอ้อยที่หม้อต้มระหว่างหม้อต้มขั้นตอนแรกและหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย (°Brix)

$\dot{m}_{s,in}$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่เข้าหม้อต้มระเหย (kg/s)



รูปที่ 3 ทิศทางการไหลของน้ำอ้อยและไอน้ำ (ไอหัวหม้อ)

และแสดงตัวแปรต่างๆของระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มระเหยตัวอย่าง



3.2 สมดุลพลังงานที่หม้อไอน์

คำนวณปริมาณการใช้ไอหัวหม้อของหม้อไอน์แต่ละขั้นตอน (\dot{m}_{vn}) ที่ใช้ในกระบวนการอุ่นน้ำอ้อยได้จากสมการที่ (1) และใช้ข้อมูลในตารางที่ 4 จะได้ผลลัพธ์ออกมาดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณปริมาณการใช้ไอหัวหม้อ (\dot{m}_{vn}) ของหม้อไอน์จากการสมดุลพลังงานที่หม้อไอน์

\dot{m}_{vn}	โรงงานที่ 1	โรงงานที่ 2	โรงงานที่ 3
\dot{m}_{v1}	5.54	6.30	3.26
\dot{m}_{v2}	1.10	10.91	4.03
\dot{m}_{v3}	0.99	6.13	5.71
\dot{m}_{v4}	7.68	4.21	3.30
\dot{m}_{v5}	4.60	N/A	N/A
\dot{m}_{v6}	3.32	N/A	N/A
\dot{m}_{v7}	11.15	N/A	N/A
\dot{m}_{v8}	5.79	N/A	N/A

3.3 สมดุลมวล และพลังงานที่หม้อต้มระเหย

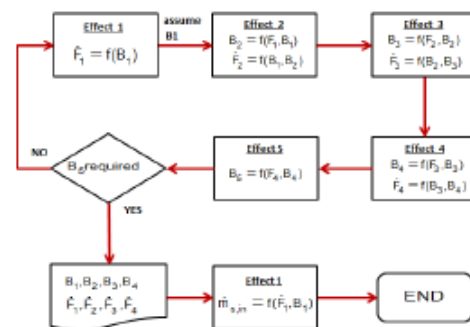
เพื่อต้องการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระให้มีความสัมพันธ์กันในทุกๆ ขั้นตอนของหม้อต้มระเหย ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในรูปแบบของฟังก์ชันดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในรูปแบบของฟังก์ชันหลังจากการสมดุลมวลและ สมดุลพลังงานของระบบหม้อต้มระเหยในทุกๆ ขั้นตอน

หม้อต้มระเหย	ความสัมพันธ์ของตัวแปร	จากสมการ
หม้อต้มขั้นตอนที่ 1	$\dot{F}_1 = f(B_1)$	(1),(2),(3),(4),(5)
หม้อต้มขั้นตอนที่ 2	$B_2 = f(F_1, B_1)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)

(ต่อ)	$\dot{F}_2 = f(B_1, B_2)$	(1),(2),(3),(4),(5)
หม้อต้มขั้นตอนที่ 3	$B_3 = f(F_2, B_2)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)
	$\dot{F}_3 = f(B_2, B_3)$	(1),(2),(3),(4),(5)
หม้อต้มขั้นตอนที่ 4	$B_4 = f(F_3, B_3)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)
	$\dot{F}_4 = f(B_3, B_4)$	(1),(2),(3),(4),(5)
หม้อต้มขั้นตอนที่ 5	$B_5 = f(F_4, B_4)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)

3.4 การแก้ปัญหาระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและพลังงานของอุปกรณ์ทางความร้อนโดยวิธี Sequential Simulation [5]



รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนและทิศทางการแก้ปัญหาโดยวิธี Sequential Simulation

4. ข้อมูลจากการวัดของโรงงานตัวอย่างจำนวน 3 โรงงาน และเงื่อนไขการผลิตอื่นๆ

4.1 ข้อมูลจากการวัดของโรงงานตัวอย่าง

4.1.1 อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำอ้อยที่หม้อไอน์ซึ่งใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลอง



ตารางที่ 4 อุณหภูมิของน้ำอ้อยที่เข้าและออกหม้ออุ่น
ของแต่ละโรงงาน [1], [2], [3]

อุณหภูมิ น้ำอ้อย	โรงงาน 1 (°C)	โรงงาน 2 (°C)	โรงงาน 3 (°C)
เข้าหม้ออุ่น 1	37.0	41.6	50.0
ออกหม้ออุ่น 1	48.5	51.8	73.1
เข้าหม้ออุ่น 2	48.5	51.8	68.1
ออกหม้ออุ่น 2	70.3	66.4	76.1
เข้าหม้ออุ่น 3	70.3	66.4	76.1
ออกหม้ออุ่น 3	76.8	92.1	89.7
เข้าหม้ออุ่น 4	76.8	92.1	89.7
ออกหม้ออุ่น 4	85.7	106.8	99.2
เข้าหม้ออุ่น 5	85.7	N/A	99.2
ออกหม้ออุ่น 5	100.4	N/A	106.8
เข้าหม้ออุ่น 6	100.4	N/A	N/A
ออกหม้ออุ่น 6	102.3	N/A	N/A
เข้าหม้ออุ่น 7	102.3	N/A	N/A
ออกหม้ออุ่น 7	104.4	N/A	N/A
เข้าหม้ออุ่น 8	97.9	N/A	N/A
ออกหม้ออุ่น 8	108.5	N/A	N/A

4.1.2 กำลังการผลิต ค่าบrixของหม้อต้มระเหย และ
อุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม

กำลังการผลิต (\dot{m}_0) ค่าบrixเริ่มต้น (B_0)
ค่าบrixของน้ำอ้อยที่หม้อต้มระเหยขั้นตอนสุดท้าย
สุดท้าย (B_5) และอุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม
($T_{j,in@evap}$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัด จะถูกใช้
เป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลองทางเทอร์
โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบ
หลายขั้นตอน ซึ่งได้แสดงดังในตารางที่ 5

ส่วนการทำนายโดยแบบจำลองเดิมจะใช้กำลัง
การผลิต (\dot{m}_0) ค่าบrixทั้งหมดในหม้อต้มระเหย
($B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$) และอุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้า
หม้อต้ม ($T_{j,in@evap}$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัด จะ

ถูกใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลองซึ่ง
ได้แสดงดังในตารางที่ 5

4.2 เงื่อนไขอื่นๆของกระบวนการผลิต

4.2.1 สภาวะของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่ใช้เป็น
พลังงานความร้อนในการต้มระเหยน้ำอ้อยซึ่งจะถูก
ส่งผ่านเข้าหม้อต้มระเหยขั้นตอนแรกเป็นสภาวะไอน้ำ
อิ่มตัวที่ความดันสัมบูรณ์ 2 บาร์

4.2.2 ความดันสัมบูรณ์ที่หม้อต้มระเหยขั้นตอน
สุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 0.164 บาร์ ซึ่งเป็นข้อจำกัดใน
กระบวนการต้มระเหยที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อม
หากใช้ความดันที่ต่ำกว่า 0.16 บาร์ มากเกินไป

จากข้อมูลที่ได้ในข้อที่ 4.2.1 และข้อที่ 4.2.2 ทำ
ให้สามารถคำนวณหาความดันสัมบูรณ์ (P_{abs}) ที่
เกิดขึ้นในหม้อต้มระเหยขั้นตอนอื่นๆได้โดยคำนวณ
จากตารางที่ 1 และใช้ค่าความดันสัมบูรณ์ที่คำนวณ
ได้ดังกล่าวไปคำนวณหาอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวของไอน้ำ
หัวหม้อ ($T_{v,n}$) ที่เกิดขึ้นของหม้อต้มขั้นตอนต่างๆ
ซึ่งน้ำอ้อยที่ผ่านการต้มจากหม้อต้มแต่ละขั้นตอนจะมี
ความเข้มข้นมากขึ้นเสมอ (ค่าบrixเพิ่มขึ้น)
เนื่องจากมีการระเหยของน้ำในน้ำอ้อยบางส่วน
ออกไปเป็นไอหัวหม้อทุกๆการต้มในหม้อต้มระเหย
แต่ละขั้นตอน

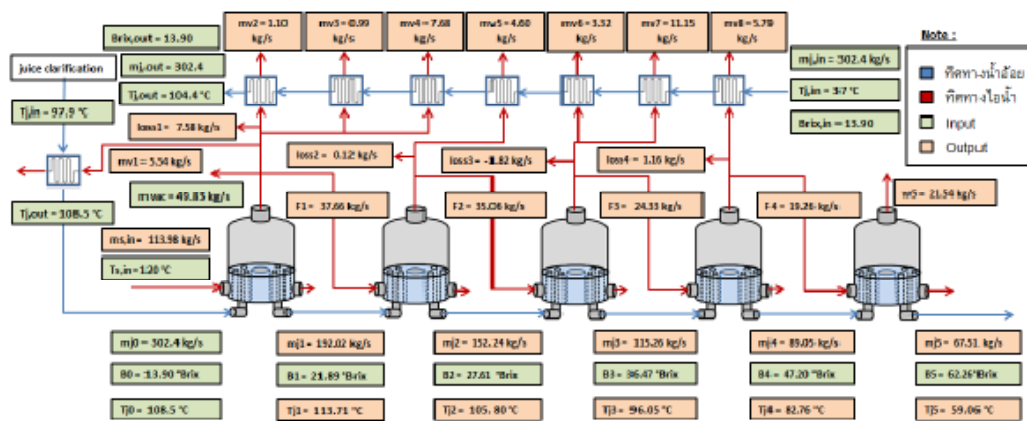
ตารางที่ 5 กำลังการผลิต ค่าบrixของหม้อต้ม
ระเหย และอุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม [1], [2], [3]

ข้อมูล	โรงงาน 1	โรงงาน 2	โรงงาน 3
\dot{m}_0 (kg/s)	302.40	250.00	250.00
B_0 (°Brix)	13.90	15.00	15.00
B_1 (°Brix)	21.89	23.00	22.00
B_2 (°Brix)	27.61	33.00	29.00
B_3 (°Brix)	36.47	45.00	36.00
B_4 (°Brix)	47.20	54.00	43.00
B_5 (°Brix)	62.26	65.00	65.00
$T_{j,in@evap}$	108.50	91.50	95.00



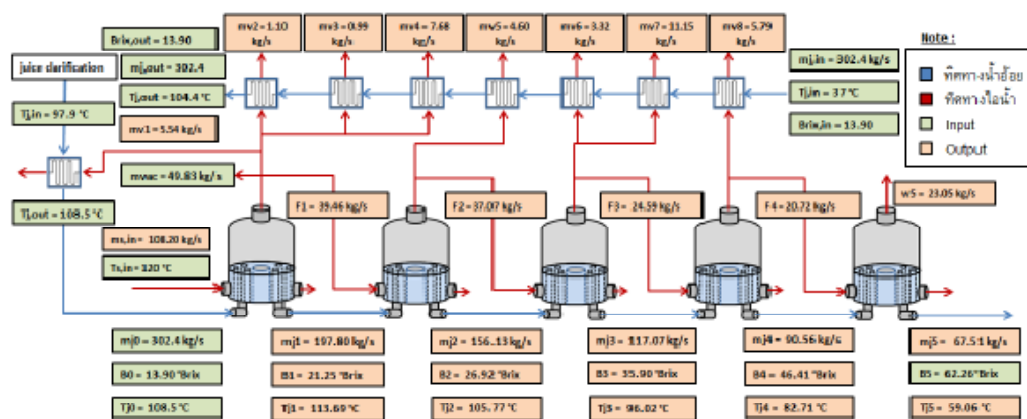
5. ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณ

5.1 ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าปริกซ์ที่ได้จากการวัดของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในกระบวนการผลิตน้ำตาลระบบจริงของโรงงานที่ 1



รูปที่ 5 ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าปริกซ์ที่ได้จากการวัด (ระบบจริง) ของโรงงานที่ 1

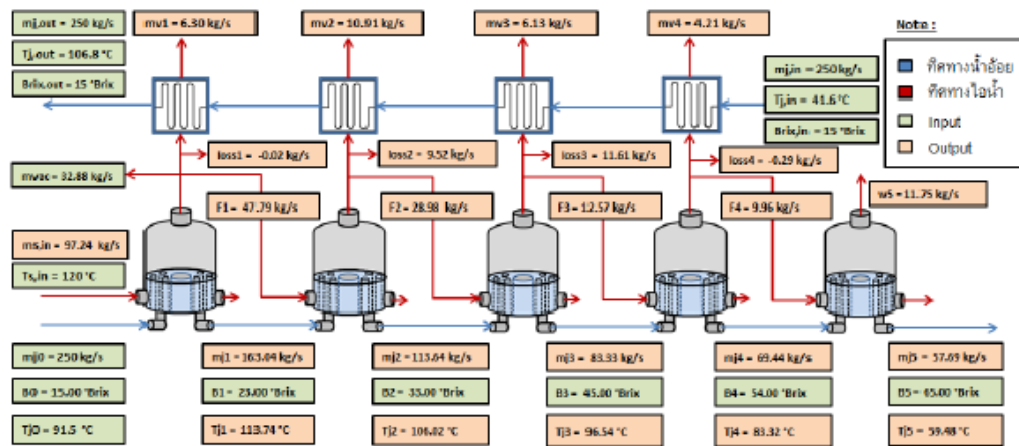
5.2 ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานที่ 1



รูปที่ 6 ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนของโรงงานที่ 1

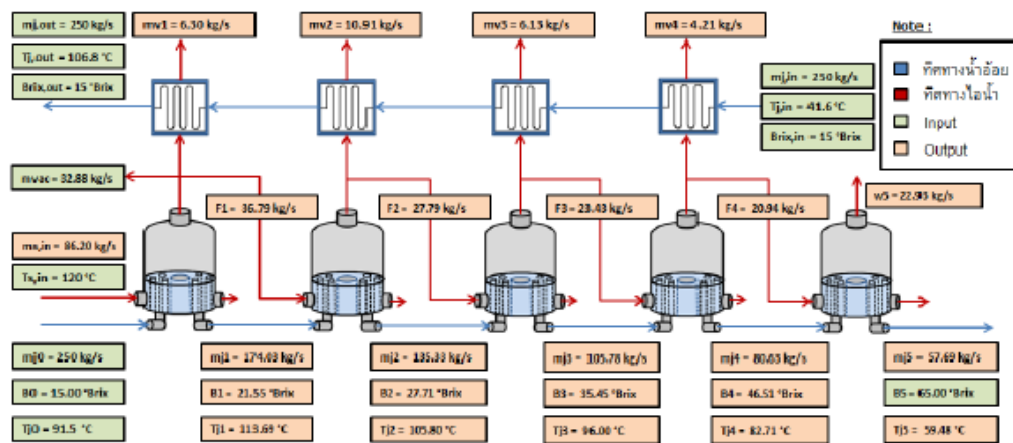


5.3 ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าปริกซ์ที่ได้จากการวัดของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในกระบวนการผลิตน้ำตาลระบบจริงของโรงงานที่ 2



รูปที่ 7 ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าปริกซ์ที่ได้จากการวัด (ระบบจริง) ของโรงงานที่ 2

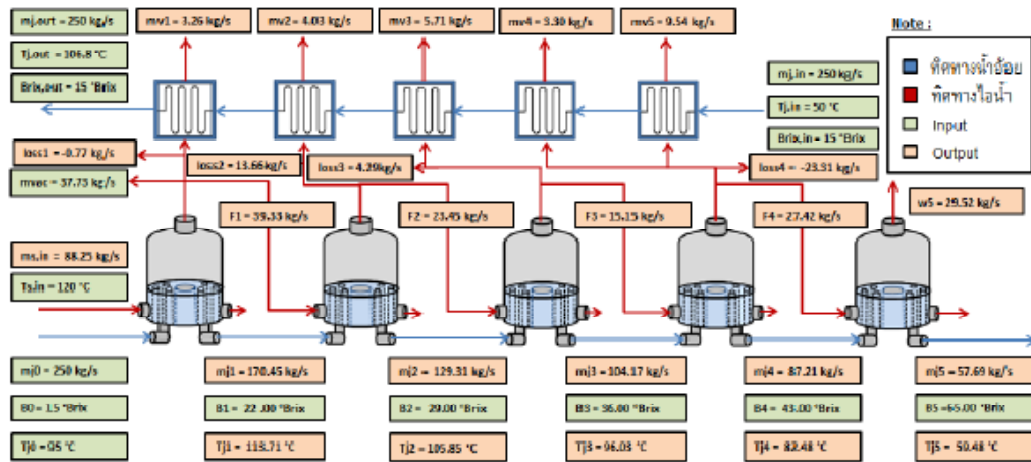
5.4 ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานที่ 2



รูปที่ 8 ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนของโรงงานที่ 2

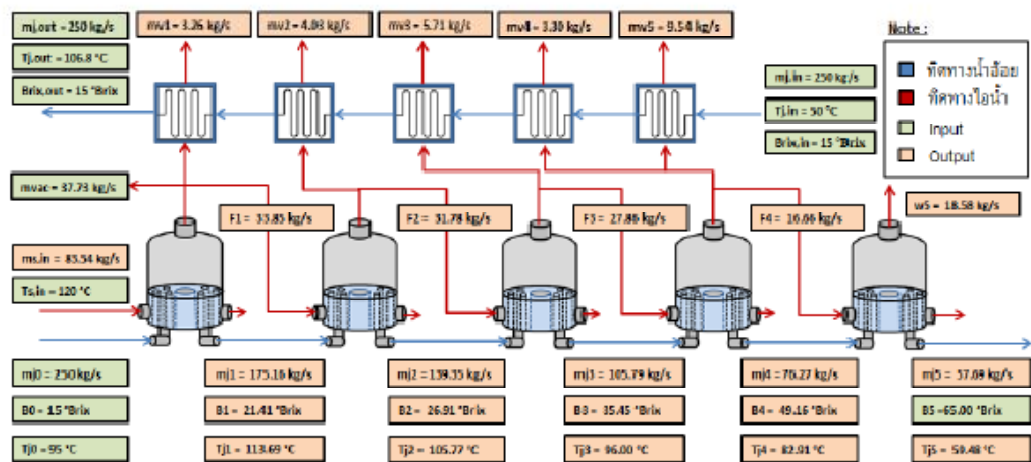


5.5 ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัดของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในกระบวนการผลิตน้ำตาลระบบจริงของโรงงานที่ 3



รูปที่ 9 ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัด (ระบบจริง) ของโรงงานที่ 3

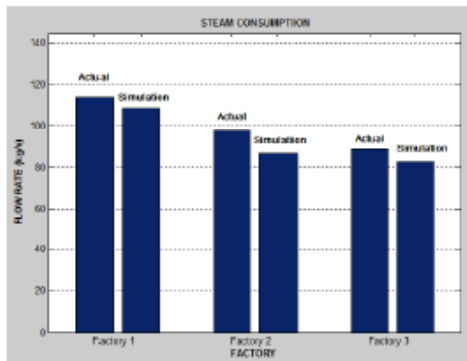
5.6 ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานที่ 3



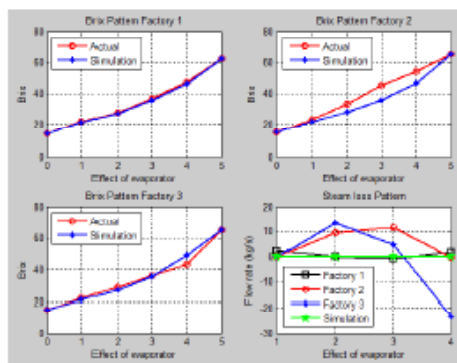
รูปที่ 10 ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนของโรงงานที่ 3



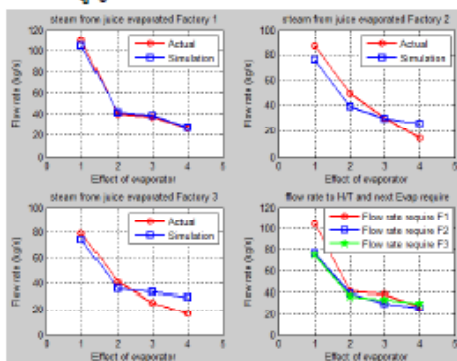
5.7 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบจริงกับแบบจำลอง (Simulation)



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ใช้ของกระบวนการต้มระเหย



รูปที่ 12 ผลการเปรียบเทียบค่าบrixและไอน้ำสูญเสีย ของระบบจริงกับแบบจำลอง



รูปที่ 13 ผลการเปรียบเทียบไอหัวหม้อของระบบจริงกับแบบจำลอง

ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มระเหยระบบจริงกับแบบจำลอง

โรงงาน	อัตราการไหล	หน่วย
โรงงานที่ 1		
ระบบจริง	113.98	kg/s
แบบจำลอง	108.20	kg/s
แตกต่าง	5.07	%
โรงงานที่ 2		
ระบบจริง	97.24	kg/s
แบบจำลอง	86.20	kg/s
แตกต่าง	11.35	%
โรงงานที่ 3		
ระบบจริง	88.25	kg/s
แบบจำลอง	83.54	kg/s
แตกต่าง	5.34	%

6. วิเคราะห์ผล

จากรูปที่ 11 และตารางที่ 6 ชี้ให้เห็นว่าปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากระบบจริง (โดยคำนวณจากค่าบrixจากการวัด) มีค่าสูงกว่าปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นแบบหลายขั้นตอนที่สร้างขึ้นใหม่ (แบบจำลอง) เล็กน้อย เนื่องจากระบบจริงนั้นจะได้รับผลกระทบจากการชดเชยพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งให้กับอิทธิพลของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มระเหยและหม้ออุ่นที่มีความลดถอยจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งด้วย จึงทำให้ระบบมีการใช้ปริมาณไอน้ำที่สูงกว่า

จากรูปที่ 12 ค่าบrixของน้ำเชื่อมที่คำนวณได้ที่หม้อต้มระเหยแต่ละขั้นตอนด้วยแบบจำลองของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นมีค่าใกล้เคียงกับการวัด โดยเฉพาะที่โรงงานที่ 1 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้ได้ แต่จะเห็นว่ายังมีบางจุดของ



ค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองต่างกับค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัด เช่นที่โรงงานที่ 2 ค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัดนั้นมีค่าสูงกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองในทุกๆ ขั้นตอนของหม้อต้ม ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการจ่ายไอน้ำเข้าหม้อต้มชุดแรกมากเกินไป จนทำให้หม้อต้มชุดแรกผลิตไอหัวหม้อที่สูงเกินความต้องการของหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดที่ 2 และเมื่อถึงหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 ไอหัวหม้อที่ผลิตได้กลับไม่เพียงพอต่อการจ่ายให้กับหม้ออุ่นและหม้อต้มในขั้นตอนที่ 5 สังเกตได้จากรูปที่ 13 โรงงานที่ 2 ขั้นตอนที่ 4 เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มที่ขั้นตอน 4 ลดลงนั่นเอง จากรูปที่ 12 โรงงานที่ 3 จะเห็นว่าค่าบริกซ์ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 นั้นลดต่ำลงเล็กน้อยจากค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง เป็นเพราะประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มในขั้นตอนที่ 4 และหม้ออุ่นมีความถดถอยลง จนทำให้ไอหัวหม้อที่ผลิตได้จากขั้นตอนที่ 3 ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะใช้ในหม้ออุ่นและหม้อต้มในขั้นตอนที่ 4 สังเกตได้จากรูปที่ 13 โรงงานที่ 3 ขั้นตอนที่ 3 และ ขั้นตอนที่ 4

7. สรุปผล

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลที่สร้างขึ้นใหม่นี้ เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถทำนายการใช้ไอน้ำได้อย่างแม่นยำ ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับตะกอนต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นในท่อส่งผ่านน้ำอ้อยของหม้อต้มระเหยที่ขั้นตอนต่างๆ ทำให้ประสิทธิภาพมีความถดถอยลง ซึ่งจะขจัดปัญหาความไม่สอดคล้องของการทำนายอัตราการเกิดไอหัวหม้อที่หม้อต้มขั้นตอนต่างๆ ไม่เพียงพอต่อหรือมากเกินไปต่อการจ่ายให้กับหม้ออุ่น และหม้อต้มระเหยในขั้นตอนถัดไปดังที่เกิดขึ้นจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเดิม และแบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่นี้ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าบริกซ์

จากการวัดเป็นตัวแปรควบคุมในการวิเคราะห์ระบบ แต่ค่าบริกซ์จะเป็นตัวแปรอิสระที่ได้จากการแก้ระบบสมการของแบบจำลองนี้ ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของพฤติกรรมของน้ำอ้อยในกระบวนการต้มระเหย นอกจากนี้ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนนี้ยังทำให้เห็นถึงความถดถอยของอุปกรณ์ทางความร้อนในทุกขั้นตอนเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระบบจริงดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 6 จึงสามารถใช้เป็นมุมมองในการซ่อมบำรุงได้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] บันเทิง สีกุดทอง, สมหมาย ปรีเปรม, ชนกนันท์ สุขกำเนิด การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มโรงงานน้ำตาล Development of Model for Designing of Evaporator and Heater System of Sugar Processing.
- [2] ณัฐดนัย มูลศิริ, ชนกนันท์ สุขกำเนิด, สมหมาย ปรีเปรม การออกแบบหม้ออุ่นและหม้อต้มแบบเปลือกและท่อในโรงงานน้ำตาล Design of Shell and Tube Heater and Evaporator for Cane Sugar Processing.
- [3] จิระพันธ์ เนื่องจากนิล บูรณาการระบบพลังงาน ความร้อนและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล Heat and Power Integration in Sugar cane Factory.
- [4] E. HUGOT, handbook of cane sugar engineering, second, completely revised, edition Elsevier Publishing Company 1972.
- [5] W.F. STOECKER, DESIGN OF THERMAL SYSTEMS, THIRD EDITION.
- [6] 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook (SI) Thermophysical Properties Refrigerants.

ประวัติผู้เขียน

นายธีรวัฒน์ คลับคล้าย เกิดวันที่ 13 มกราคม 2528 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคงคาราม อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2550 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ทำงานที่บริษัท เอสทีพี แอนด์ ไอ จำกัด มหาชน ในตำแหน่งวิศวกร 1 (Piping Engineer) เป็นเวลา 3 ปี หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในรายวิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2

ผู้เขียนได้นำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง “แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ระหว่างวันที่ 2 - 4 พฤษภาคม 2555 ณ โรงแรมตักสิลา จังหวัดมหาสารคาม โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก จ.

