

การวิเคราะห์การใช้ไอหน้าที่เหมาะสมของเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำโดยตรง  
ในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันเพื่อการประหยัดพลังงาน



นางสาวศศิธร พยัคฆ์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

**STEAM CONSUMPTION ANALYSIS OF DIRECT  
STEAM RETORT IN STERILIZATION  
PROCESS FOR ENERGY SAVING**




**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical and  
Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2017**

การวิเคราะห์การใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำโดยตรง  
ในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันเพื่อการประหยัดพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

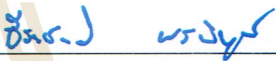
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



---

(ผศ. ดร. กิรติ สุตักษณ์)

ประธานกรรมการ



---

(อ. ดร. ชีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



---

(ผศ. ดร. สมชาย มณีวรรณ)

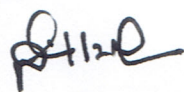
กรรมการ



---

(ผศ. ดร. กระวี ตรีอำรรค)

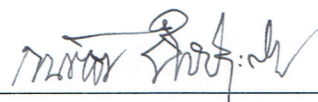
กรรมการ



---

(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



---

(รศ. ร.อ. ดร. กนัตถ์ร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศศิธร พยัคฆ์ทอง : การวิเคราะห์การใช้ไอน้ำที่เหมาะสมของเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำ โดยตรงในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันเพื่อการประหยัดพลังงาน (STEAM CONSUMPTION ANALYSIS OF DIRECT STEAM RETORT IN STERILIZATION PROCESS FOR ENERGY SAVING) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการในการวิเคราะห์หาปริมาณการใช้ไอน้ำสำหรับเครื่องฆ่าเชื้อ ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน เนื่องจากการตรวจวัดหาปริมาณการใช้ไอน้ำสำหรับเครื่องฆ่าเชื่อนั้นไม่สามารถทำได้ เพราะมีการปล่อยไอน้ำบางส่วนทิ้งในระหว่างกระบวนการ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจริงจึงจำเป็นต้องทำการผลิตไอน้ำในปริมาณที่มากกว่าความต้องการเพื่อให้แน่ใจว่ามีไอน้ำที่เพียงพอต่อการฆ่าเชื้อ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ และใช้วิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution) เพื่อจำลองพฤติกรรมของเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระสำหรับการวิเคราะห์ ประกอบด้วย อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ ปริมาณไอน้ำและอากาศแห้งที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ

ผลการศึกษาวิจัยเทียบกับกรณีศึกษาจากการตรวจวัดจริงเมื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด พบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีพฤติกรรมและแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดภายใต้เวลาของกระบวนการฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับสถานะจริง จากกรณีศึกษาของงานวิจัย พบว่าโดยผลการวิเคราะห์ต่อรอบการผลิตปริมาณไอน้ำสูงสุดที่ใช้จะอยู่ในช่วงของการไล่อากาศมีค่าเท่ากับ 98.47 กิโลกรัม และปริมาณการใช้ไอน้ำตลอดกระบวนการมีค่าเท่ากับ 216.71 กิโลกรัม เมื่อทำการจัดการการเดินเครื่องฆ่าเชื้อจากข้อมูลที่ได้และพิจารณาปริมาณการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อในวันการผลิตจริง พบว่าสามารถลดปริมาณการผลิตไอน้ำได้ 873.28 กิโลกรัมต่อวัน หากคิดเป็นค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงน้ำมันเตาเกรด C ที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ 724.71 บาทต่อวัน ดังนั้นการทราบปริมาณการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการของการฆ่าเชื้อจากวิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการจัดการเดินเครื่องฆ่าเชื้อเพื่อการประหยัดพลังงาน

SASITHORN PAYAKTHONG : STEAM CONSUMPTION ANALYSIS OF  
DIRECT STEAM RETORT IN STERILIZATION PROCESS FOR ENERGY  
SAVING. THESIS ADVISOR : TEERACHART PORNPIBUL, Ph.D., 134  
PP.

#### STERILIZATION/VENTING/STEAM CONSUMPTION

This study's objective was to propose methods for analyzing and calculating steam consumption by retort; since steam consumption could not be measured due to the release of some steam during the process. Thus, it was necessary to produce more steam than necessary during the production process. This study created thermodynamic models and used successive substitution to reproduce retort behaviors. The independent variables of the analysis include internal temperatures of retort, steam quantity, and dry air quantity.

When comparing the study results with those of the case study's actual measurements, it was discovered that the model's temperature values had inclined in the same direction as those of actual measurements during the sterilization period, which was an indicator that the model was close to the actual sterilizer in terms of accuracy. From the case study, it was found that the highest quantity of steam was used during the venting phase, which was 98.47 kilograms, and the quantity of steam consumption throughout the process was 216.71 kilograms. When operating the retort with the data obtained while considering the quantity of the retort's steam consumption for actual production, it was discovered that daily steam production can be reduced by 873.28 kilograms. When calculated in terms of fuel costs (C-grade fuel oils), costs of

724.71 baht could be saved daily. Thus, being aware of the quantity of steam consumption during the process of sterilization via this study's proposed analysis method will be important in managing sterilizers to conserve energy.



School of Mechanical Engineering

Student's Signature Sasithorn

Academic Year 2017

Advisor's Signature Teechart Porngitkul

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับ โอกาสและความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง ความทุ่มเทของอาจารย์ และ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท นูบูน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณไพฑูริยา แสงบางปลา และคุณนที ฐานมั่น ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้เรื่องกระบวนการผลิตและ กระบวนการฆ่าเชื้อสำหรับเครื่องคั้นกระป๋องอย่างละเอียด

ขอขอบพระคุณ คุณกัมพล อรนนท์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณอาจารย์ ผองเพื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบิดา มารดา และ ครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจมาโดยตลอด และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญให้แก่ผู้วิจัย จนทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศศิธร พยัคฆ์ทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	3
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ขั้นตอนการผลิตอาหารและเครื่องดื่มนับรุกรองเบื้องต้น.....	4
2.2 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	5
2.2.1 การไล่อากาศ.....	6
2.2.2 การทำอุณหภูมิ.....	7
2.2.3 การฆ่าเชื้อ.....	7
2.2.4 การทำความสะอาดหลังจากการฆ่าเชื้อ.....	8
2.3 ประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	9
2.3.1 ประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการฆ่าเชื้อ.....	9



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1.1	เครื่องฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงาน.....	9
2.3.1.2	เครื่องฆ่าเชื้อแบบทำงานต่อเนื่อง.....	11
2.4	หน้าที่และหลักการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำ โดยตรง.....	13
2.5	มาตรฐานการผลิตของน้ำมะพร้าวกระป๋อง.....	16
2.6	แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	18
2.6.1	กฎอนุรักษ์มวล.....	19
2.6.2	การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว.....	20
2.6.3	การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบไม่คงตัว.....	21
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1	กระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	25
3.2	การจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน.....	27
3.2.1	พิจารณาในช่วงกระบวนการไต่อากาศ.....	28
3.2.1.1	สมดุลมวลของระบบ.....	28
3.2.1.2	สมดุลพลังงานของระบบ.....	29
3.2.1.3	สมดุลมวลและพลังงานของอุปกรณ์.....	31
3.2.2	พิจารณาในช่วงกระบวนการฆ่าเชื้อ.....	37
3.3	การสร้างแบบจำลองของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	38
3.3.1	จำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์ระบบของเครื่องฆ่าเชื้อ.....	38
3.3.2	ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่เครื่องฆ่าเชื้อ.....	39
3.4	การแก้ระบบสมการโดยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง.....	42
3.5	การหาค่าความสูญเสียด้วยระเบียบวิธีกึ่งประจักษ์.....	44
4	การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย.....	48
4.1	ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	48
4.1.1	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในเครื่องได้วิเคราะห์จากแบบจำลอง กับค่าอุณหภูมิภายในเครื่องที่ได้จากการตรวจวัด.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

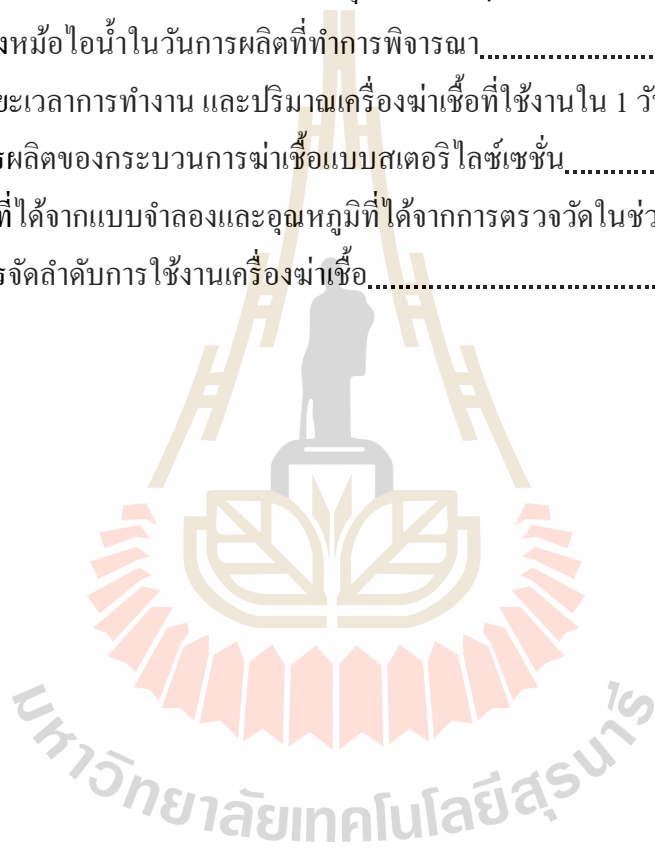
4.1.2	การวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอร์ไลซ์เซชัน.....	51
4.1.3	สัดส่วนการใช้พลังงานของกระบวนการฆ่าเชื้อในช่วงไต่อากาศ.....	53
4.2	ผลการวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิต.....	55
4.3	ผลการวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงประเภทผลิตภัณฑ์.....	57
4.4	การวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำของเครื่องฆ่าเชื้อจากแบบจำลองเทียบกับการตรวจวัด.....	59
5	การจัดการการเดินเครื่องฆ่าเชื้อเพื่อการประหยัดพลังงาน.....	61
5.1	ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานในส่วนของไอน้ำ.....	61
6	สรุปผลการวิเคราะห์.....	61
6.1	วิธีการประยุกต์ใช้งานจริง.....	65
6.2	สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	66
	รายการอ้างอิง.....	68
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ของการไหลผ่านระบบท่อไต่อากาศและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ.....	69
	ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์หัตถการใช้น้ำของอุปกรณ์ทางความร้อนจากการตรวจวัด.....	74
	ภาคผนวก ค. ปัจจัยการผลิตของโรงงาน.....	92
	ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง.....	94
	ภาคผนวก จ. การหามวลน้ำมันเตาที่ใช้จากสูตรประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ.....	97
	ภาคผนวก ฉ. ลำดับการเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อในวันการผลิตที่ทำการวิเคราะห์.....	99
	ภาคผนวก ช. โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	111
	ภาคผนวก ซ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	120
	ประวัติผู้เขียน.....	133

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและพลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการ ฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันในรูปทั่วไป.....	41
3.2 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและพลังงานของระบบในกระบวนการฆ่าเชื้อ แบบสเตอริไลซ์เซชันในรูปทั่วไป.....	42
4.1 ปริมาณและอัตราการใช้น้ำที่ได้จากแบบจำลองในช่วงกระบวนการต่างๆ.....	52
4.2 อัตราการใช้พลังงานในส่วนต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองของกระบวนการไล่อากาศ.....	54
4.3 ปริมาณและอัตราการใช้น้ำที่ได้จากแบบจำลองในช่วงกระบวนการไล่อากาศ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน.....	55
4.4 ปริมาณการใช้น้ำในช่วงกระบวนการไล่อากาศของกาแพะป้องกันและน้ำมะพร้าว กระป๋องที่ได้จากแบบจำลอง.....	58
5.1 ข้อมูลพื้นฐานของหม้อน้ำของโรงงาน.....	62
5.2 อุปกรณ์ทางความร้อนที่เปิดใช้งานในวันการผลิตที่ทำการวิเคราะห์.....	62
5.3 ปริมาณไอน้ำที่ผลิต (16 พฤษภาคม 2558) ได้จากการอ่านมิเตอร์น้ำเข้าหม้อไอน้ำ.....	63
5.4 มาตรการประหยัดพลังงานในส่วนของการผลิตไอน้ำ.....	64
6.1 อัตราการใช้น้ำเมื่อเพิ่มจำนวนเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงไล่อากาศ.....	65
ก.1 ตารางบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลผ่านระบบท่อไล่อากาศ ( $K_V$ ) และค่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ ( $K_S$ ) จากวิธีการ เชมิ เอ็มพีริคัล โดยใช้ระเบียบ วิธีแบบแลททิซ.....	70
ก.2 ตารางตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลผ่านระบบ ท่อไล่อากาศ ( $K_V$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ ( $K_S$ ) ด้วย ระเบียบวิธีแบบแลททิซ.....	72
ข.1 การหาอัตราการใช้น้ำของ APV1700L.....	75
ข.2 การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างกระป๋อง.....	77
ข.3 การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างห้องบรรจุ.....	78

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.4 การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำ.....	79
ข.5 แสดงอัตราการใช้น้ำรายอุปกรณ์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	88
ข.6 แสดงอัตราและปริมาณการใช้น้ำของอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงอัตราการผลิต น้ำของหม้อไอน้ำในวันการผลิตที่ทำการพิจารณา.....	88
ข.7 แสดงระยะเวลาการทำงาน และปริมาณเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้งานใน 1 วันการผลิต.....	89
ค.1 ปัจจัยการผลิตของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	93
ง.1 อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงเวลาต่างๆ.....	95
ฉ.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ.....	100



## สารบัญรูป

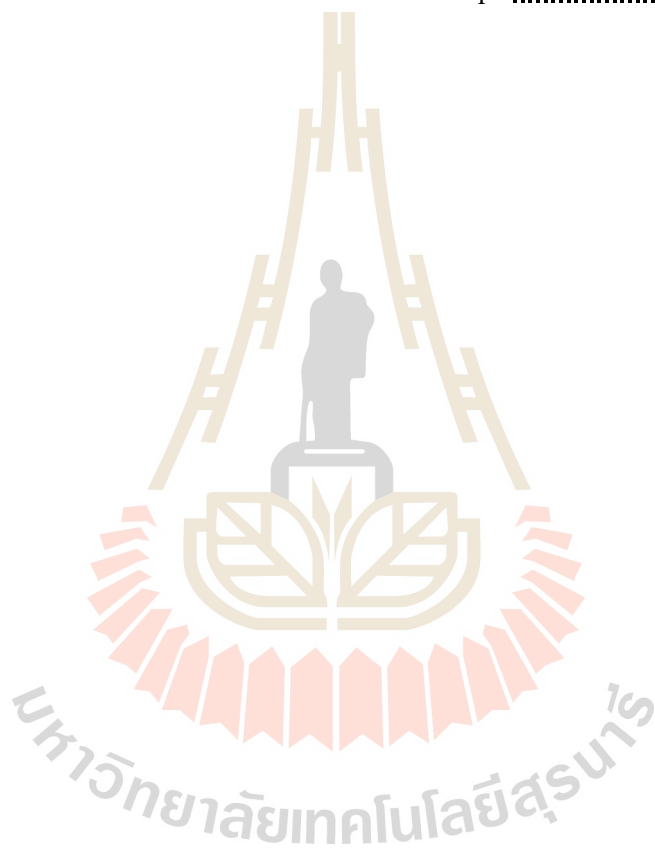
รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการผลิตอาหารกระป๋อง..... 4
2.2	กราฟของการแทรกซึมความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์..... 6
2.3	หลักการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อ..... 8
2.4	เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวตั้ง (Vertical Retort)..... 10
2.5	เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวนอน (Horizontal Retort)..... 10
2.6	เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้น้ำโดยตรงชนิดแนวนอน (Horizontal Direct Steam Retort)..... 11
2.7	เครื่องฆ่าเชื้อแบบ Continuous Rotary Sterilizer..... 12
2.8	เครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้แรงดันน้ำ (Hydrostatic sterilizer)..... 12
2.9	อุปกรณ์และท่อต่างๆ ภายในเครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวนอน..... 13
2.10	มาตรฐานการผลิตน้ำมะพร้าวกระป๋อง..... 17
2.11	ลักษณะของระบบเปิด (Open System)..... 18
2.12	การถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม..... 20
3.1	ภาพตัดด้านข้างของเครื่องฆ่าเชื้อแนวนอนแบบใช้น้ำให้ความร้อนโดยตรง ในกระบวนการ ฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน..... 27
3.2	การถ่ายเทมวลและพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม (ในช่วงไต่อากาศ)..... 28
3.3	ท่อกระจายไอน้ำที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ..... 31
3.4	ทิศทางการไหลของไอน้ำผ่านรูกระจายไอน้ำ..... 31
3.5	ทิศทางการไหลของไอน้ำผ่านรูระบายไอน้ำ (Bleeder)..... 33
3.6	ทิศทางการไหลของไอน้ำและอากาศแห้งผ่านท่อไต่อากาศ..... 34
3.7	การถ่ายเทมวลและพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม (ในช่วงฆ่าเชื้อ)..... 37
3.8	แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการจากการสมดุลมวลและพลังงาน ของทั้งระบบและแต่ละอุปกรณ์ในวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง..... 43
3.9	กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากเครื่องฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง..... 44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงไล่อากาศและช่วงฆ่าเชื้อ ต่อ 1 รอบการฆ่าเชื้อ ของน้ำมะพร้าวกระป๋อง .....	45
3.11 วิธีการค้นหาแบบแลตทิซ (Lattice Search) .....	46
3.12 แผนผังการหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยวิธีการค้นหาแบบแลตทิซ.....	47
4.1 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับค่าอุณหภูมิ ภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงไล่อากาศของน้ำมะพร้าวกระป๋อง.....	49
4.2 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับค่าอุณหภูมิภายในเครื่อง ฆ่าเชื้อที่ได้จากการตรวจวัด ในช่วงไล่อากาศและช่วงฆ่าเชื้อ ของน้ำมะพร้าวกระป๋อง.....	49
4.3 กราฟเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จาก แบบจำลองเทียบ กับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด ของน้ำมะพร้าวกระป๋อง.....	50
4.4 สัดส่วนการใช้ปริมาณไอน้ำในช่วงกระบวนการต่างๆ ของการฆ่าเชื้อ แบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	52
4.5 อัตราการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการต่างๆ ของการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน.....	53
4.6 สัดส่วนของอัตราการใช้พลังงานไอน้ำในส่วนต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองของไล่อากาศ.....	54
4.7 อัตราการใช้ไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองในช่วงกระบวนการไล่อากาศ ของปริมาณการผลิตที่ แตกต่างกัน โดยพิจารณาต่อ 1 หน่วยผลิตภัณฑ์ (กระป๋อง).....	56
4.8 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณผลิตภัณฑ์.....	57
4.9 ปริมาณการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการไล่อากาศ ของกาแฟกระป๋องและน้ำมะพร้าวกระป๋อง .....	58
4.10 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับค่าอุณหภูมิภายใน เครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงไล่อากาศของกาแฟกระป๋องและ น้ำมะพร้าวกระป๋อง .....	59
ข.1 เงื่อนไขในการต้มน้ำเพื่อทำอุณหภูมิของหม้อต้ม.....	82
ข.2 การหาอัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม.....	83
ข.3 เงื่อนไขในการต้มเพื่อรักษาอุณหภูมิในหม้อต้ม.....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.4	เงื่อนไขในการต้มน้ำเพื่อทำอุณหภูมิของถังน้ำร้อนหม้อสกด.....85
ข.5	การหาอัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม.....86
ข.6	กราฟ T-s ของกระบวนการลดความดันแบบ Isentropic.....90



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$g$	คือ	ความโน้มถ่วงมาตรฐานของโลก ( $m/s^2$ )
$h$	คือ	เอนทาลปีจำเพาะ หรือ เอนทาลปีต่อหน่วยมวล ( $kJ/kg$ )
$m_{a,in}$	คือ	มวลของอากาศแห้งที่ไหลเข้าสู่ท่อไล่อากาศ ( $kg$ )
$m_{a,out}$	คือ	มวลของอากาศแห้งที่ไหลออกจากท่อไล่อากาศ ( $kg$ )
$m_{b,in}$	คือ	มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบไอน้ำ ( $kg$ )
$m_{b,out}$	คือ	มวลของไอน้ำที่ไหลออกจากระบบไอน้ำ ( $kg$ )
$m_{s,in}$	คือ	มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ท่อกระจายไอน้ำ ( $kg$ )
$m_{s,out}$	คือ	มวลของไอน้ำที่ไหลออกจากท่อกระจายไอน้ำ ( $kg$ )
$m_{v,in}$	คือ	มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ท่อไล่อากาศ ( $kg$ )
$m_{v,out}$	คือ	มวลของไอน้ำที่ไหลออกจากท่อไล่อากาศ ( $kg$ )
$\bar{v}$	คือ	ความเร็ว ( $m/s$ )
$A_{Bleeder}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของระบบไอน้ำ ( $m^2$ )
$A_{Hole}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรูกระจายไอน้ำที่ท่อกระจายไอน้ำ ( $m^2$ )
$A_{vent}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของท่อไล่อากาศ ( $m^2$ )
$C_v$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะที่สภาวะปริมาตรคงที่ ( $kJ/kg \cdot K$ )
$C_1$	คือ	ค่าความสูญเสียที่ท่อกระจายไอน้ำ
$C_2$	คือ	ค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อไล่อากาศ
KE	คือ	พลังงานจลน์ ( $kJ$ )
PE	คือ	พลังงานศักย์ ( $kJ$ )
$P_{a,inside}$	คือ	ความดันของอากาศแห้งภายในเครื่องฆ่าเชื้อ ( $kPa$ )
$P_{atm}$	คือ	ความดันบรรยากาศ ( $kPa$ )
$P_{b,in}$	คือ	ความดันที่ทางเข้าของระบบไอน้ำ ( $kPa$ )
$P_{b,out}$	คือ	ความดันที่ทางออกของระบบไอน้ำ ( $kPa$ )
$P_{inside}$	คือ	ความดันรวมระหว่างไอน้ำกับอากาศแห้งภายในเครื่องฆ่าเชื้อ ( $kPa$ )
$P_{s,in}$	คือ	ความดันของไอน้ำที่ทางเข้าท่อกระจายไอน้ำ ( $kPa$ )



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$P_{s,out}$	คือ	ความดันที่ทางออกท่อกระจายไอน้ำ (kPa)
$P_{t,in}$	คือ	ความดันที่ทางเข้าท่อไต่อากาศ (kPa)
$P_{t,out}$	คือ	ความดันที่ทางออกท่อไต่อากาศ (kPa)
$P_{v,inside}$	คือ	ความดันของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (kPa)
$Q$	คือ	การถ่ายโอนความร้อน (kJ)
$V$	คือ	ปริมาตร ( $m^3$ )
$W$	คือ	งาน (kJ)
$v_{a,in}$	คือ	ปริมาตรจำเพาะของอากาศแห้งที่ทางเข้าท่อไต่อากาศ ( $m^3 / kg$ )
$v_s$	คือ	ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำที่เข้าท่อกระจายไอน้ำ ( $m^3 / kg$ )
$v_{t,in}$	คือ	ปริมาตรจำเพาะของอากาศที่ทางเข้าท่อไต่อากาศและระบายไอน้ำ ( $m^3 / kg$ )
$v_{t,out}$	คือ	ปริมาตรจำเพาะของอากาศที่ทางออกท่อไต่อากาศและระบายไอน้ำ ( $m^3 / kg$ )
$v_{v,in}$	คือ	ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำที่ทางเข้าท่อไต่อากาศ ( $m^3 / kg$ )
$\Delta t$	คือ	ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (sec)
$\Delta E_{sys}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิของระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
$\Delta U_a$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอากาศแห้ง (kJ)
$\Delta U_p$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลิตภัณฑ์ (kJ)
$\Delta U_{sys}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
$\Delta U_v$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของไอน้ำ (kJ)
$\Sigma E_{in}$	คือ	ผลรวมของการถ่ายโอนพลังงานสุทธิเข้าระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
$\Sigma E_{out}$	คือ	ผลรวมของการถ่ายโอนพลังงานสุทธิออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันซึ่งเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อสำหรับอาหารหรือเครื่องคัมที่ผ่านการบรรจุภัณฑ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยหลักการทำงานของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันคือ การให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส กับผลิตภัณฑ์โดยตรง ซึ่งแหล่งความร้อนที่นิยมใช้ในการกระบวนการผลิตและกระบวนการฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมอาหาร คือ ไอน้ำในสถานะไออิ่มตัว (Saturated Vapor) โดยหากต้องการใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมากสำหรับการผลิต ซึ่งปัจจัยหลักในการผลิตไอน้ำจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ทางความร้อนที่เปิดใช้งานในวันการผลิตนั้นๆ และจำนวนของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต โดยอุปกรณ์ทางความร้อนที่ใช้ในการผลิตและในการฆ่าเชื้อมีเพียงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันเท่านั้นที่ไม่สามารถทราบอัตราการใช้ไอน้ำได้อย่างแน่ชัด ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้แน่ใจว่ามีไอน้ำที่เพียงพอต่อการใช้งานจึงจำเป็นต้องผลิตไอน้ำในอัตราที่สูงเกินกว่าความจำเป็น

โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันสำหรับการศึกษาวิจัยนี้คือ เครื่องฆ่าเชื้อแนวนอนแบบใช้ไอน้ำโดยตรง (Horizontal Direct Steam Retort) โดยขั้นตอนการทำงานของเครื่องฆ่าเชื่อนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการไล่อากาศ (Venting Process) ซึ่งจะทำการฉีดไอน้ำเข้าไปภายในเพื่อไล่อากาศออกจากเครื่อง และในขั้นตอนนี้ยังเป็นขั้นตอนของการเพิ่มอุณหภูมิให้กับภายในเครื่องฆ่าเชื้ออีกด้วย เมื่อจบขั้นตอนการไล่อากาศแล้วอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อจะต้องมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการฆ่าเชื้อ จึงทำให้ในขั้นตอนของการไล่อากาศนี้มีอัตราการใช้ไอน้ำที่สูงที่สุดของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันและในขั้นตอนถัดมา คือ ขั้นตอนของการฆ่าเชื้อ (Cooking Process) ในขั้นตอนนี้จะมีการระบายไอน้ำบางส่วนออกทางรูระบายไอน้ำ (Bleeder) เพื่อรักษาความดันภายในและจะมีการฉีดไอน้ำเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ส่วนในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการระบายความร้อนออกจากเครื่องฆ่าเชื้อ (Cooling Process) ก่อนนำผลิตภัณฑ์ออกมา ซึ่งระยะเวลาและอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยหากทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำสูงสุดของเครื่องฆ่าเชื้อจะทำให้สามารถประมาณการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ (Boiler)

ได้ ทำให้มั่นใจว่าจะมีไอน้ำที่เพียงพอสำหรับวันผลิตนั้นๆ และทำให้ไม่ต้องผลิตไอน้ำเกินกว่าความต้องการของอุปกรณ์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีการนำเสนอแนวทางการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่องฆ่าเชื้อในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน เพื่อหาอัตราการใช้ไอน้ำสูงสุดของเครื่องฆ่าเชื้อ และอัตราการใช้ไอน้ำต่อรอบของการฆ่าเชื้อ เพื่อพิจารณาหาอัตราการผลิตไอน้ำที่เหมาะสม และสามารถจัดการจำนวนการเปิดใช้งานของเครื่องฆ่าเชื้อให้เหมาะสม โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งจะประกอบด้วยจำนวนผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ, อุณหภูมิและความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อ, เงื่อนไขในการผลิตซึ่งก็คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำการฆ่าเชื้อในแต่ละวันการผลิต และระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาอัตราการใช้ไอน้ำสูงสุดของเครื่องฆ่าเชื้อ และปริมาณการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อต่อรอบของการฆ่าเชื้อ เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการผลิตไอน้ำที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการผลิตและกระบวนการฆ่าเชื้อ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งจะประกอบด้วยจำนวนผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ, อุณหภูมิและความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อ, เงื่อนไขในการผลิต ซึ่งก็คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำการฆ่าเชื้อในแต่ละวันการผลิต และระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ในการศึกษาวิจัยนี้จะเน้นหนักสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมะพร้าวบรรจุกระป๋อง

1.3.2 เครื่องฆ่าเชื้อแนวนอนแบบใช้ไอน้ำโดยตรง (Horizontal Direct Steam Retort) ที่มีหลักการการฆ่าเชื้อโดยฉีดไอน้ำสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง

1.3.3 สถานะไอน้ำสำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งผลิตจากหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire Tube Boiler)

1.3.4 ระยะเวลาในช่วงไล่อากาศ (Venting) อย่างน้อย 8 นาที หรือจนกว่าอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 104 องศาเซลเซียส

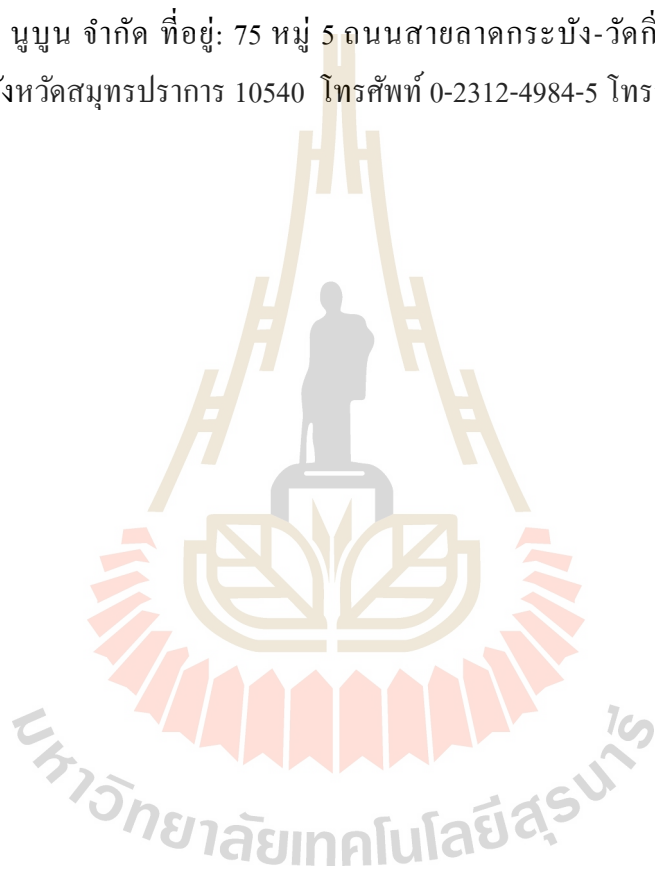
1.3.5 ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิฆ่าเชื้อหรืออุณหภูมิในช่วงสเตอริไลซ์เซชันที่มีค่าประมาณ 119-121 องศาเซลเซียส

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

เพื่อทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน เพื่อจะสามารถประเมินการผลิตไอน้ำในแต่ละวันการผลิตได้อย่างเหมาะสม และเพียงพอต่อความต้องการใช้ไอน้ำในวันการผลิตนั้นๆ รวมถึงสามารถจัดการจำนวนการเปิดใช้งานของเครื่องฆ่าเชื้อให้เหมาะสม

#### 1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

บริษัท นูบุน จำกัด ที่อยู่: 75 หมู่ 5 ถนนสายลาดกระบัง-วัดกึ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540 โทรศัพท์ 0-2312-4984-5 โทรสาร 0-2312-4986



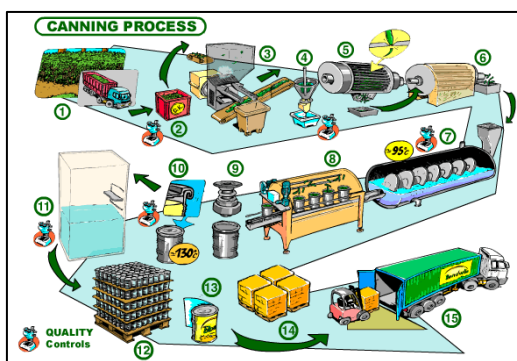
## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่มบรรจุกระป๋องเบื้องต้น กระบวนการฆ่าเชื้อในอาหารและเครื่องดื่มกระป๋องหรือกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน หลักการฆ่าเชื้อของเครื่องฆ่าเชื้อแต่ละประเภท หน้าที่และหลักการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ มาตรฐานการผลิตของน้ำมะพร้าวกระป๋อง รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบทางความร้อนด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

#### 2.1 ขั้นตอนการผลิตอาหารและเครื่องดื่มบรรจุกระป๋องเบื้องต้น

การผลิตอาหารกระป๋อง (Canning) เป็นวิธีการถนอมอาหารด้วยความร้อน (Thermal Processing) ที่ค้นคิดโดย Nicholas Appert ในปี ค.ศ. 1809 การผลิตอาหารกระป๋องเป็นการทำให้ปลอดเชื้อในบรรจุภัณฑ์ (In-Container Sterilization) มีหลักการคือ บรรจุอาหารในภาชนะปิดผนึกสนิท (Hermetically Sealed Container) เช่น กระป๋อง (Can) ถุงทนร้อนสูง (Retort Pouch) หรือขวดแก้วแล้วฆ่าเชื้อด้วยความร้อน โดยใช้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด (Schedule Process) ในระดับการฆ่าเชื้อเชิงการค้า (Commercial Sterilization) เพื่อให้อาหารปลอดภัยจากจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogen) และจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (Food Spoilage) ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ โดยไม่เสื่อมเสียเป็นเวลาอย่างน้อย 6 เดือน หรืออาจจะถึง 1 ปี



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตอาหารกระป๋อง

กระบวนการผลิตอาหารกระป๋องสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ดังนี้  
 การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation) เพื่อเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในรูปที่พร้อม  
 สำหรับการบรรจุกระป๋อง

การบรรจุ (Filling) อาหารที่บรรจุอาจเป็นของเหลวอย่างเดียว เช่น น้ำผลไม้ ของแข็ง  
 (ชิ้นผลไม้ ชิ้นเนื้อ) ผสมกับส่วนที่เป็นของเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำเกลือ น้ำมัน ซอส ในการบรรจุ  
 จะต้องบรรจุให้อาหารมีปริมาตรน้ำหนักรวม (ไม่บรรจุจนเต็มพอดี เพราะระหว่างการให้ความ  
 ร้อนจะมีการขยายตัวของของเหลว )

การไล่อากาศ (Exhausting) เพื่อให้ภายในกระป๋องมีสภาวะเป็นสุญญากาศ (Vacuum)  
 สำหรับยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน และป้องกันปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดกับอาหาร  
 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สี กลิ่น และรสชาติ ทำได้โดยการพ่นไอน้ำร้อนไปที่ผิวหน้าของ  
 อาหารด้วยเครื่องไล่อากาศ (Exhauster) เมื่อปิดฝาไอน้ำร้อนจะควบแน่นทำให้ที่ว่างเหนือกระป๋อง  
 เป็นสุญญากาศ หรืออาจใช้การดูดอากาศออกก่อนการปิดผนึก

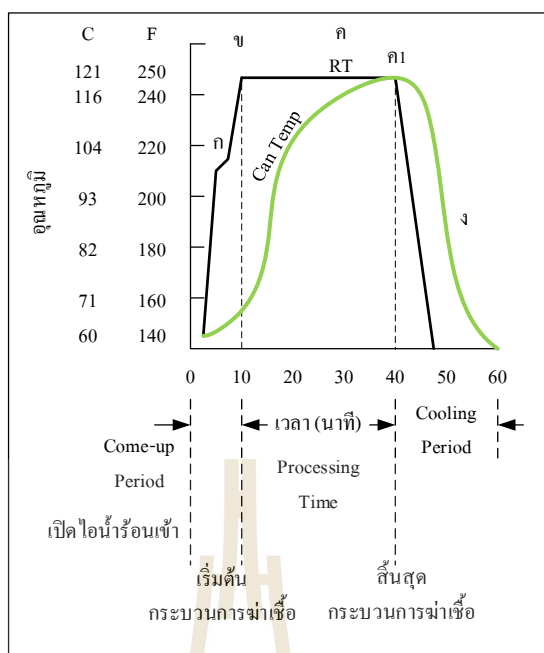
ปิดผนึกสนิท (Hermitically Seal) โดยใช้ภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (Hermetically Sealed  
 Container) เพื่อป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ และสิ่งปนเปื้อนจากภายนอกรวมทั้งไอน้ำและอากาศผ่านเข้า  
 ไปภายในบรรจุภัณฑ์ภายหลังการฆ่าเชื้อแล้ว การปิดฝากระป๋องใช้เครื่องปิดฝากระป๋อง (Double  
 Seam)

การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (Thermal Processing) โดยการใช้ความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์  
 ให้เพียงพอต่อการฆ่าเชื้อระดับการค้า (Commercial Sterilization) ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่  
 กำหนด (Schedule Process) การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำ  
 ในเครื่องฆ่าเชื้อ (Retort) ซึ่งเป็นเครื่องฆ่าเชื้อภายใต้ความดันสูง หากฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 100  
 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าสามารถฆ่าเชื้อในหม้อต้ม (Cooker) ที่ความดันบรรยากาศ ปกติได้เพื่อให้  
 อาหารปลอดภัยและเก็บรักษาไว้ได้ในระยะเวลาที่กำหนด

การทำให้เย็นภายหลังการฆ่าเชื้อ (Cooling) ต้องทำให้เย็นทันที เพื่อป้องกันไม่ให้แบคทีเรีย  
 ที่ทนร้อน (Thermophilic Bacteria) ซึ่งอาจหลงเหลืออยู่เจริญได้ การทำเย็นทำได้โดยใช้น้ำเย็นที่  
 สะอาด โดยขั้นตอนการผลิตอาหารกระป๋องดังกล่าวมาข้างต้นแสดง ดังรูปที่ 2.1

## 2.2 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน (Sterilization Process)

เป็นการฆ่าเชื้อสำหรับอาหารที่ผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์หรือในขั้นตอนนี้ก็คือ อาหารจำพวก  
 อาหารกระป๋อง ซึ่งการให้ความร้อนแก่อาหารกระป๋องนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้  
 ในการฆ่าเชื้อโดยพิจารณาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในเครื่องฆ่าเชื้อ รวมถึงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ใน  
 การให้ความร้อนแทรกซึมเข้าไปถึงจุดที่ร้อนช้าที่สุด (Cold Point) ของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟของการแทรกซึมความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์

ลักษณะของกราฟการแทรกซึมความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ (Can Temp.) คือ อุณหภูมิภายในกระป๋องโดยวัดที่จุดที่ร้อนช้าที่สุด ตำแหน่ง ค1 คือ จุดที่มีการให้ความร้อนที่สมบูรณ์ตามที่กำหนด โดยที่อุณหภูมิของ Cold Point จะเท่ากับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ โดยจากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า ณ จุดที่มีการให้ความร้อนสมบูรณ์ตามที่กำหนด อุณหภูมิของเครื่องฆ่าเชื้อจะเท่ากับอุณหภูมิที่จุดที่ร้อนช้าที่สุดระหว่างที่อาหารกระป๋องอยู่ในเครื่องฆ่าเชื่อนี้จะต้องมีการควบคุมการดำเนินการใช้เครื่องฆ่าเชื้อ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย

### 2.2.1 การไล่อากาศ

การไล่อากาศ (Venting) เป็นขั้นตอนเริ่มแรกของการใช้เครื่องฆ่าเชื้อจัดว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก เพราะช่วยให้อุณหภูมิทุกตำแหน่งภายในเครื่องฆ่าเชื้อเท่ากัน ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ทุกกระป๋องที่อยู่ตามตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องฆ่าเชื้อสามารถได้รับความร้อนระดับเท่ากัน ความจำเป็นในการไล่อากาศออกจากเครื่องฆ่าเชื้อเกิดจากการที่ส่วนผสมของอากาศและไอน้ำมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ลดลง การไล่อากาศทำได้โดยใช้ไอน้ำร้อนจากเครื่องกำเนิดไอน้ำร้อนไล่อากาศ ในขณะที่เริ่มเปิดไอน้ำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อจะต้องเปิดวาล์วไล่อากาศที่ควบคุมท่ออากาศทั้งหมดรวมทั้งวาล์วท่อระบายน้ำ และช่องระบายไอน้ำทั้งหมดเพื่อช่วยในการไล่อากาศ ตัวอย่างของอุณหภูมิและเวลาในการไล่อากาศ ดังแสดงในตำแหน่ง ก รูปที่ 2.2

เนื่องจากในช่วงไต่อากาศเป็นช่วงที่มีอัตราการใช้อุณหภูมิไต่อากาศสูง ดังนั้น M.N.Berteil และคณะ (ค.ศ.2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการระบายอากาศภายในเครื่องฆ่าเชื้อก่อนเข้าสู่ช่วงสเตอริไลซ์ โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการระบายอากาศจากเดิมที่จะต้องใช้การฉีดไอน้ำเพื่อไต่อากาศโดยตรง ซึ่งในกระบวนการนี้จะใช้ระยะเวลาอยู่ที่ 9-15 นาที และต้องใช้ปริมาณของไอน้ำมากพอสมควร กระบวนการที่ปรับเปลี่ยนคือ การนำไอน้ำบางส่วนมาอุ่นน้ำที่เก็บอยู่ในถังพักที่เพิ่มเข้ามาในระบบ จากนั้นเมื่อน้ำได้อุณหภูมิตามต้องการน้ำจะถูกส่งไปยังหัวฉีดเพื่อไต่อากาศแทนไอน้ำจากการทดสอบพบว่าเมื่อน้ำร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในกระบวนการระบายอากาศอยู่ที่ 1.8 นาที และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นระยะเวลาที่จะลดลง

### 2.2.2 การทำอุณหภูมิ

การทำอุณหภูมิ คือ ช่วงเวลาที่อุณหภูมิในเครื่องฆ่าเชื้อถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อที่กำหนด ดังแสดงในตำแหน่ง ข รูปที่ 2.2 เป็นช่วงเวลาทั้งหมดนับตั้งแต่เริ่มเปิดไอน้ำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อผ่านขั้นตอนไต่อากาศจนอุณหภูมิในเครื่องฆ่าเชื้อถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อที่กำหนด ดังแสดงในตำแหน่ง ข ภายหลังจากที่ทำการไต่อากาศออกจากเครื่องฆ่าเชื้อ แล้วตามกำหนดการและเวลาที่สมบูรณ์แล้ว จึงทำการหรีวแล้วไต่อากาศจนปิดสนิท ไอน้ำที่ใส่เข้าไปจะทำให้อุณหภูมิของเครื่องฆ่าเชื้อถึงอุณหภูมิที่กำหนด สามารถตรวจสอบได้จากอุณหภูมิที่แผ่นบันทึกอุณหภูมิ (Temperature Chart) และเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทที่วัดอุณหภูมิในเครื่องฆ่าเชื้อเปรียบเทียบกับตลอดเวลา

### 2.2.3 การฆ่าเชื้อ

อุณหภูมิและเวลาในการฆ่าเชื้ออุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วอาหารที่มี pH สูงกว่า 4.6 นั้นมักมีแบคทีเรียที่สามารถสร้างสปอร์ที่ทนความร้อนเจริญอยู่ สำหรับการฆ่าเชื้อในเครื่องฆ่าเชื่อนั้น เมื่ออุณหภูมิของเครื่องฆ่าเชื้อถึงอุณหภูมิที่กำหนดในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องฆ่าเชื้อให้คงที่ (ดังแสดงในตำแหน่ง ข รูปที่ 2.2) โดยอาศัยการควบคุมวาล์วไอน้ำเข้า ทั้งนี้จะต้องตรวจสอบอุณหภูมิตลอดเวลาโดยดูจากเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทเท่านั้น เวลาในการฆ่าเชื้อจะต้องผ่านการทดสอบจากผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งกำหนดขึ้นใช้เฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท เวลาในการฆ่าเชื้อจะต้องนานพอที่จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ให้ลดลงอยู่ในระดับการปลอดเชื้อเชิงการค้า (Commercially Sterile) ได้ ทั้งนี้ระยะเวลาการฆ่าเชื้อจะสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับอุณหภูมิการฆ่าเชื้อ อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหาร ปริมาณการบรรจุ และขนาดของกระป๋อง

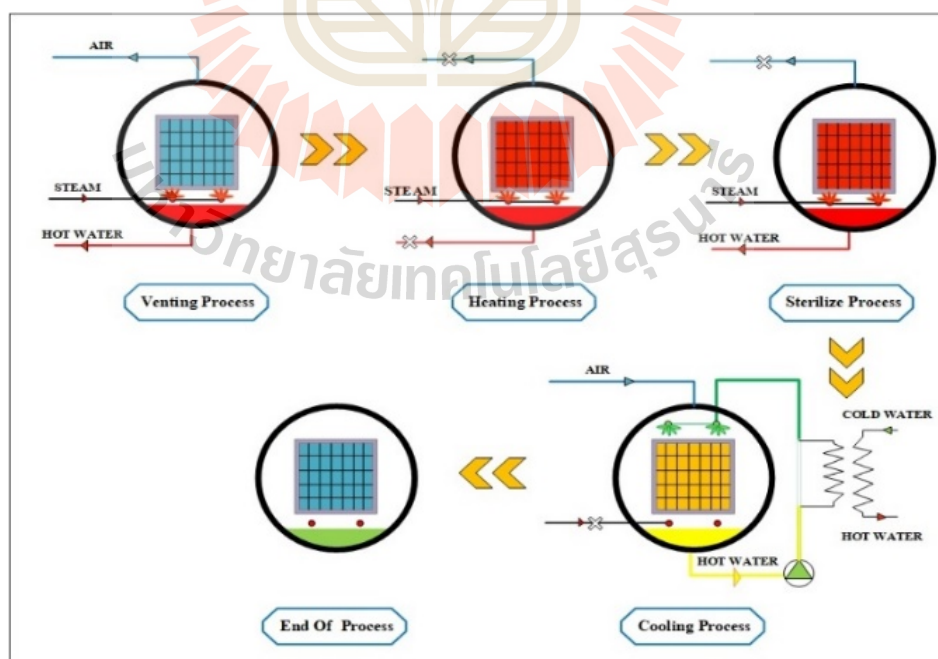
Mehmet Baris Ates และคณะ (ค.ศ.2016) ได้ทำการศึกษาค่าเหมาะสมของการฆ่าเชื้อ โดยจะเปรียบเทียบระหว่างเครื่องฆ่าเชื้อ 2 ชนิด โดยชนิดแรกคือ เครื่องฆ่าเชื้อแบบสั่น (Agitating Retort) และเครื่องฆ่าเชื้อแบบนิ่ง (Static Retort) โดยจะทำการจำลองระบบ (Simulation) ที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยจากเดิมเครื่องฆ่าเชื้อแบบสั่นจะใช้เวลาสำหรับการฆ่าเชื้อ ชนิด B. subtilis spores ที่ 17 นาที เทียบกับเครื่องฆ่าเชื้อแบบนิ่ง จะใช้เวลาอยู่ที่ 53 นาที หลังจากการวิเคราะห์และ



จำลองระบบพบว่า สามารถลดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อลงได้ สำหรับเครื่องฆ่าเชื้อแบบสั้นจะใช้เวลาฆ่าเชื้ออยู่ที่ 10 นาที เทียบกับเครื่องฆ่าเชื้อแบบนิ่งจะใช้เวลาอยู่ที่ 35 นาที

#### 2.2.4 การทำความเย็นหลังจากการฆ่าเชื้อ

การทำให้เย็น (Cooling) ให้ได้ผลดีควรทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นเร็วที่สุดและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เมื่อออกจากเครื่องฆ่าเชื้อ (ดังแสดงในตำแหน่ง รูปที่ 2.2) ควรมีอุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส และน้ำสำหรับทำเย็นผลิตภัณฑ์ควรมีอุณหภูมิต่ำ และมีความสะอาดและใส่คลอรีนให้มี free Cl ประมาณ 2-5 ppm ในขั้นตอนนี้ต้องระวังข้อบกพร่อง (Defect) ที่จะเกิดขึ้นคือ การโก่งตัว (Peaking), การเกิดสันนูน (Paneling Peaking) เกิดจากความดันภายในกระป๋องผลิตภัณฑ์สูงกว่าภายนอก จนฝาทนแรงดันไม่ได้จึงถูกดันออกมาจนเสียรูปเป็นสันนูน เกิดจากภายในกระป๋องผลิตภัณฑ์สูญญากาศ และถูกแรงดันภายนอกกระป๋องกระทำ ช่วงไล่อากาศ และดึงอุณหภูมิถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อ หลักสำคัญต้องเปิดไอน้ำกระป๋องยวบที่จริงแล้วการ โก่งตัว เกิดจากสูญญากาศสูง แต่หากแรงอัดจากน้ำหรือลมเป็นปัจจัยเสริมได้เนื่องจากช่วงนี้จะเปิดท่อน้ำ และลมเข้าซึ่งต่างมีความดันมากกว่า 40 psig เข้าเครื่องฆ่าเชื้อถ้าควบคุมไม่ดีน้ำเต็มเครื่องฆ่าเชื้อ หรือเปิดลมมากเกินไป จะเกิดความดันกระแทกเครื่องฆ่าเชื้อ อุปกรณ์และผลิตภัณฑ์เสียหายได้การทำเย็นที่เปิดท่ลมเข้าไปรักษาความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อเรียกว่า การทำเย็นแบบควบคุมความดัน (Pressure Cooling) จากหลักการข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนผังรูปภาพได้ดังนี้



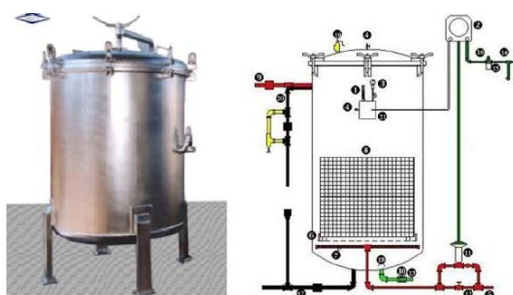
รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อ

## 2.3 ประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

เนื่องจากในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันจำเป็นต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งตัวกลางการให้ความร้อนที่สามารถให้อุณหภูมิที่สูงมีอยู่หลายประเภท ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำเป็นแหล่งให้ความร้อน ดังนั้นเมื่อต้องการใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความดันของไอน้ำนั้นสูงตามไปด้วย อุปกรณ์จึงต้องสามารถรับแรงดันที่ค่อนข้างสูงได้ ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้คือ เครื่องฆ่าเชื้อภายใต้ความดันสูง หรือที่นิยมเรียกกันว่า รีทอร์ต โดยหลักการการทำงานทั่วไปของเครื่องฆ่าเชื้อจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น แต่ยังคงมีความแตกต่างกันอยู่บางส่วนโดยสามารถแบ่งประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้ (สุภาวดี, 2547)

### 2.3.1 ประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการฆ่าเชื้อ

2.3.1.1 เครื่องฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงาน (Discontinuous Batch Retort) เครื่องฆ่าเชื้อประเภทนี้เป็นเครื่องมือที่เก่าที่สุดที่ใช้ในการแปรรูปด้วยความร้อน (Thermal Processing) ซึ่งนิยมใช้ในโรงงานอาหารกระป๋องทั้งขนาดใหญ่และเล็กรวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในภาชนะแก้วด้วยวิธีการ โดยพื้นฐานประกอบด้วยภาชนะนำตะกร้าภาชนะเข้าไปยังภาชนะเหล็ก ปิดฝาเครื่องและให้ความร้อน โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาที่ให้ความร้อนหาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าไปยังภาชนะ เมื่อได้เวลาตามที่กำหนดแล้วจะให้ความเย็นโดยการปิดท่อจ่ายความร้อนแล้วเปิดน้ำเย็นเข้าไป อย่างไรก็ตามภาชนะบรรจุโลหะขนาดใหญ่และขวดแก้วที่มีฝาแบบกด (Process-on) จำเป็นต้องกำจัดความดันอากาศก่อนเริ่มต้นให้ความเย็นเนื่องจากความดันที่แตกต่างระหว่างภายนอกและภายในภาชนะจะทำให้กระป๋อง โค้งงอ (Buckle) และฝาหลุดได้ (Dislodge) เครื่องฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงานมักนิยมใช้กันมาก แม้ว่าจะต้องใช้แรงงานมากก็ตามเนื่องจากสามารถใช้ได้กับภาชนะขนาดใดก็ได้และยังใช้ได้กับอาหารชนิดต่างๆ กัน โดยเครื่องฆ่าเชื้อประเภททำงานเป็นรอบการทำงานสามารถแบ่งตามลักษณะการวางของเครื่องได้อีก 2 ประเภทดังนี้



รูปที่ 2.4 เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวตั้ง (Vertical Retort)

1.) เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวตั้ง (Vertical Retort) เครื่องฆ่าเชื้อแบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากโหลบรรจุภัณฑ์ไม่สะดวก แต่มีข้อดีคือสามารถประหยัดพื้นที่การใช้งาน



รูปที่ 2.5 เครื่องฆ่าเชื้อ แบบแนวนอน (Horizontal Retort)

2.) เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวนอน (Horizontal Retort) เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม เนื่องจากสะดวกในการขนย้ายบรรจุภัณฑ์

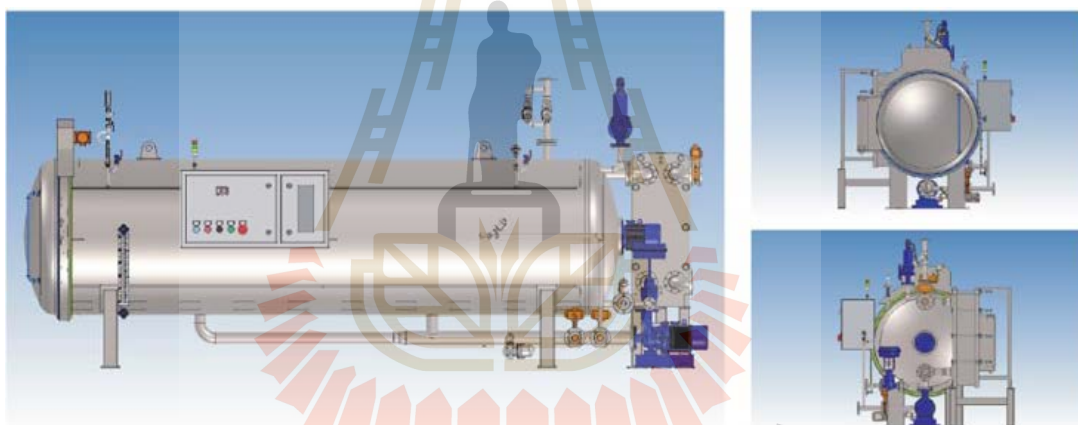
จากการแบ่งประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อข้างต้นแล้วยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกในส่วนของเครื่องฆ่าเชื้อที่ทำงานเป็นรอบ หรือก็คือ เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวตั้งและเครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวนอนนั่นเอง สามารถแบ่งออกตามตัวกลางการให้ความร้อนได้อีก 4 ประเภท เพื่อให้เหมาะสมกับบรรจุภัณฑ์ และชนิดของอาหารที่จะทำการฆ่าเชื้อ

- เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำ (Steam Retort)
- เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้การพ่นน้ำร้อน (Water Spray Retort)
- เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้น้ำร้อนท่วม (Water Immersion Retort)
- เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำผสมอากาศ (Horizontal Steam/Air Retorts)

H.S.Ramaswamy และคณะ (ค.ศ.1999) ได้ศึกษาการสเตอริไลซ์ของปลาแซลมอนในกระป๋องเหล็ก (Cylindrical Metal Cans : CMC) และกล่องพลาสติก (Semi-Rigid Plastic Containers : SPS) โดยใช้เครื่องฆ่าเชื้อแบบนอนที่มีหลักการทำงานสองแบบ ได้แก่ แบบที่ใช้ไอน้ำ (Steam-Air Retort) และแบบที่ใช้ น้ำร้อนเต็มเข้าไปในเครื่องฆ่าเชื้อให้ท่วมตะกร้า (Immersion Retort) ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำใช้เวลาน้อยกว่าแบบที่ใช้น้ำร้อนเต็มเข้าไปในเครื่องฆ่าเชื้อให้ท่วมตะกร้า สำหรับกระป๋องระยะเวลาในการฆ่าเชื้อของ

เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำคือ 15 นาที และแบบที่ใช้น้ำร้อนเดิมคือ 20 นาทีสำหรับกล่องพลาสติก ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อของเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำคือ 50 นาที และแบบที่ใช้น้ำร้อนเดิมคือ 60 นาที จากผลการทดสอบที่ได้ เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำใช้เวลาในการฆ่าเชื่อน้อยกว่าเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้น้ำร้อนเดิม เนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงกว่ามาก แต่ข้อเสียของเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำคือ จะทำให้อาหารสุกทำให้เสียรสชาติและทำลายวิตามินในอาหาร ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวทำให้ทราบว่าตัวกลางในการให้ความร้อนมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่จะทำการฆ่าเชื้อ ดังนั้นการเลือกชนิดตัวกลางในการให้ความร้อนให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์จึงเป็นเรื่องที่ต้องคำนึงเช่นเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในส่วนของเครื่องฆ่าเชื้อที่ทำงานเป็นรอบการทำงานวางตัวในแนวนอนและมีตัวกลางในการให้ความร้อนคือ ไอน้ำ เรียกเครื่องฆ่าเชื้อชนิดนี้ว่า Horizontal Direct Steam Retort หรือ Direct Steam Retort โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาร่วมด้วยคือ น้ำผลไม้บรรจุกระป๋องอูมิเนียม



รูปที่ 2.6 เครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำโดยตรงชนิดแนวนอน (Horizontal Direct Steam Retort)

### 2.3.1.2 เครื่องฆ่าเชื้อแบบทำงานต่อเนื่อง (Continuous Retort)

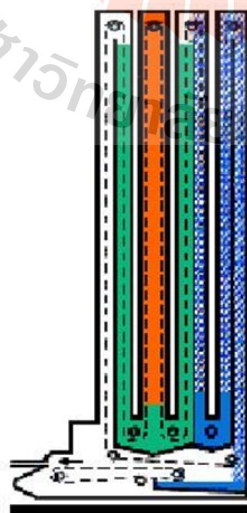
1.) Continuous Rotary Sterilizer กระป๋องจะเคลื่อนที่ไปตามทางที่เป็นวงก้นหอย ซึ่งยึดแน่นกับผนังด้านในของทรงกระบอกทั้งสามส่วน ส่วนปีกซึ่งติดกับเส้นรอบวงถึงกลางที่หมุนอย่างช้าๆ จะส่งกระป๋องไปรอบตลอดความยาวของแต่ละส่วนของทรงกระบอก โดยมีตัวล็อคความดันช่วยขนถ่ายเข้าและออกจากเครื่องและระหว่างส่วนทั้งสาม การกวนภายในกระป๋องจะเกิดขึ้นจากการหมุนและคลื่นไถล ขณะที่กระป๋องเคลื่อนที่รอบวงโค้ง (Helix) เครื่องฆ่าเชื้อประเภทนี้มีความจุสูงและทำให้การฆ่าเชื้อเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ แต่มีข้อเสียคือกระป๋องจำนวนมากจะได้รับ

ความร้อน ณ เวลานั้นๆ ดังนั้นถ้ามีการขาดช่วงขึ้นระหว่างการขนถ่ายจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นรวมทั้งความเครียดจากความดัน (Pressure Strain) และการช็อกเนื่องจากความร้อน (Thermal Shock)



รูปที่ 2.7 เครื่องฆ่าเชื้อแบบ Continuous Rotary Sterilizer

2.) Hydrostatic Sterilizer เครื่องฆ่าเชื้อชนิดนี้จะใช้วิธีกักไอน้ำด้วยคอลัมน์น้ำดังแสดงในรูปที่ 2.7 กระจกจะเคลื่อนผ่านหอไอน้ำ (Steam Tower) แล้วได้รับความดันจากน้ำที่อยู่ในคอลัมน์ (Water Column) สายพานประกอบด้วยคู่โซ่หมุนที่เคลื่อนที่อย่างช้าๆ กระจกจะเคลื่อนที่ในลักษณะแนวนอนตามแกนยาวกระจก ซึ่งช่วยถ่ายเทความร้อนแบบการพาภายในกระจก

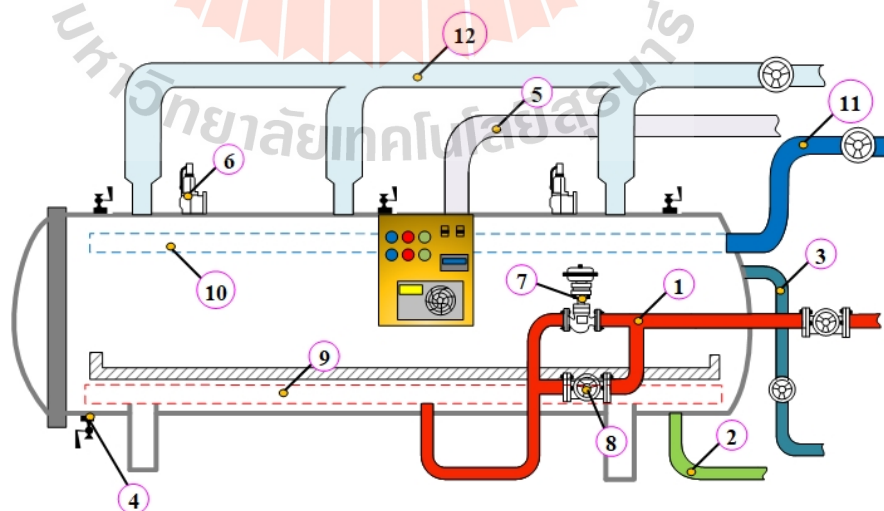


รูปที่ 2.8 เครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้แรงดันน้ำ (Hydrostatic sterilizer)

กระป๋องจะเข้าสู่ส่วนที่ให้ความร้อนเบื้องต้น (Lag) ในท่อของน้ำที่เป็นรูปตัวยูจะพบว่า อุณหภูมิน้ำตอนต้นของส่วนนี้ประมาณ 82-88 องศาเซลเซียสและทางออกประมาณ 107-118 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นกระป๋องจะเคลื่อนที่ไปยังห้องไอน้ำ (Steam Chamber) ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ซึ่งกระป๋องจะเคลื่อนที่ขึ้นและลงและออกจากห้องนี้ไปยังท่อน้ำรูปตัวยูอีกด้านหนึ่งจากนั้นจะให้ความเย็นแก่กระป๋อง เครื่องฆ่าเชื้อแบบนี้มีข้อดีคือ อาหารและกระป๋องเกิดการช็อกเนื่องจากอุณหภูมิและความดันน้อยที่สุด ใช้ได้กับภาชนะทุกชนิดและใช้ไอน้ำและน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.4 หน้าที่และหลักการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำโดยตรง

เครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อฆ่าเชื้ออาหารด้วยความร้อน (Thermal Processing) โดยใช้ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ภายใต้แรงดันเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน ใช้ฆ่าเชื้ออาหารที่ปิดผนึกสนิท (Hermetically Sealed Container) ซึ่งต้องการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 100 องศาเซลเซียส บรรจุภัณฑ์ต้องทนต่อแรงดันได้ดี ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ กระป๋อง ตัวเครื่องฆ่าเชื้อ (Vessel) สร้างจากโลหะหนา ความดันภายในเครื่องระหว่างการฆ่าเชื้อมีค่าสูงมาก เช่น การฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส มีความดันไอน้ำภายใน 15 psi. (คูตารางไอน้ำ) หรือเท่ากับแรงประมาณ 10 ตัน ผลักที่ตัวประตูของหม้อมีฝาเปิด-ปิด เพื่อนำผลิตภัณฑ์เข้าฆ่าเชื้อและปิดล็อกแน่นสนิท ระหว่างการฆ่าเชื้ออาหาร โดยทั่วไปเครื่องฆ่าเชื้อต้องแข็งแรงพอที่สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยที่ความดันมากกว่า 30 psi.



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์และท่อต่างๆ ภายในเครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวนอน

ส่วนประกอบของเครื่องฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องแบบใช้ไอน้ำโดยตรง

ท่อไอน้ำเข้า (Steam Inlet) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 1 รูปที่ 2.9 คือท่อไอน้ำเข้าสู่เครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งปกติจะติดตั้งอยู่ตรงกลางด้านล่างของเครื่องฆ่าเชื้อ โดยขนาดของท่อไอน้ำเข้าต้องมีขนาดเหมาะสมเพื่อจ่ายไอน้ำเพื่อไล่อากาศออกจากเครื่องฆ่าเชื้ออย่างรวดเร็วในช่วงไล่อากาศ แหล่งกำเนิดไอน้ำที่ความดันไอเท่ากัน ท่อขนาดใหญ่กว่า ใช้เวลาในการไล่อากาศสั้นกว่า แต่ท่อที่ขนาดใหญ่เกินไปจะลดความดันของไอน้ำได้ เครื่องฆ่าเชื้อมีความยาวมากกว่า 30 ฟุต ควรจะมีการติดตั้งท่อไอน้ำเข้า 2 จุด เพื่อให้ไอน้ำกระจายทั่วถึงไม่มีจุดอับภายใน

ท่อระบายน้ำ (Drain) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 2 รูปที่ 2.9 คือ ท่อระบายน้ำซึ่งเกิดขึ้นจากการควบแน่นเมื่อไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกระทบกับกระป๋องบรรจุอาหาร ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า กลายเป็นหยดน้ำตกลงสู่ด้านล่างของเครื่องฆ่าเชื้อต้องระบายออก เพื่อไม่ให้เกิดน้ำท่วมขังท่อกระจายไอน้ำ หรือท่วมกระป๋อง ท่อระบายน้ำจะอยู่ที่ด้านล่างของเครื่องฆ่าเชื้อ

ท่อน้ำล้น (Over Flow) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 3 รูปที่ 2.9 โดยปกติท่อน้ำล้นจะถูกติดตั้งให้สูงกว่าระดับขั้นที่สูงที่สุดของชั้นผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการระบายน้ำเมื่อมีน้ำเต็มเครื่องฆ่าเชื้อระหว่างการระบายความร้อน เนื่องจากมีเมื่อน้ำเต็มเครื่องฆ่าเชื้อจะทำให้เกิดความดันสูงซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อและผลิตภัณฑ์เสียหายได้ และขนาดของท่อน้ำล้นควรจะใหญ่กว่าท่อน้ำเข้า

รูระบายไอน้ำ (Bleeder) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 4 รูปที่ 2.9 ลักษณะของรูระบายไอน้ำจะเป็นรูเล็กๆ ขนาด 1/8 นิ้ว หน้าที่หลักเพื่อให้ไอน้ำในเครื่องฆ่าเชื้อไหลเวียนสม่ำเสมอ และเพื่อระบายอากาศหรือแก๊สรูระบายไอน้ำจะถูกเปิดตลอดเวลา เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงสถานะของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อ รูระบายไอน้ำจะไม่มีวาล์วเปิดและปิด และต้องตรวจสอบไม่ให้อุดตัน การติดตั้งรูระบายอากาศจะติดตั้งจากปลายเครื่องฆ่าเชื้อทั้งสองข้างเข้ามาเป็นระยะทาง 1 ฟุต และทุกๆ 8 ฟุต จะต้องมีรูระบายไอน้ำ 1 ตัวอยู่ด้วย

ท่อลมเข้า (Air Inlet) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 5 รูปที่ 2.9 ทำหน้าที่ปล่อยลมเข้าในเครื่องฆ่าเชื้อ เพื่อช่วยในการสมดุลระบบการไหลเวียนของไอน้ำและช่วยรักษาความสมดุลของความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงเริ่มต้นของการระบายความร้อน เพื่อไม่ให้กระป๋องเกิดการเสียรูปเมื่อมีการระบายความร้อน โดยปกติแล้วความดันภายในกระป๋องบรรจุอาหารจะอยู่ที่ประมาณ 20-25 ปอนด์/ตารางนิ้ว และความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (ด้านนอกของกระป๋อง) จะอยู่ที่ประมาณ 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว เมื่อมีการระบายความร้อนเกิดขึ้นจะทำให้ความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (ด้านนอกของกระป๋อง) ลดลงเป็นศูนย์เพราะไอน้ำเป็นคอนเดนเสท เมื่อมีการปล่อยน้ำเพื่อทำการระบายความร้อนความดันจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในกระป๋องและภายนอกกระป๋อง ซึ่งความแตกต่างของความดันนี้จะทำให้กระป๋องเสียรูป เพราะกระป๋องไม่สามารถทนความแตกต่างของดันมากๆ ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ลมเข้ามาช่วยสมดุลในระบบ

หมุนเวียนของน้ำเพื่อรักษาระดับของความดันและค่อยๆ ลดระดับของความดันลงมาเรื่อย ๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์ เพื่อไม่ให้เกิดความแตกต่างของความดันและเพื่อไม่ให้เกิดการเสีรูปของกระป๋อง เพราะเมื่อกระป๋องเกิดการเสีรูปลูกค้ำจะไม่ยอมรับในคุณภาพของสินค้า

วาล์วนิรภัย (Safety Valve) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 6 รูปที่ 2.9 ทำหน้าที่ระบายความดันส่วนเกิน เพื่อป้องกันการเกิดความดันที่เครื่องฆ่าเชื้อจะทนได้ ควรตั้งความดันสูงกว่าความดันที่ใช้งานเล็กน้อยประมาณ 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว

ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control Valve) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 7 รูปที่ 2.9 โดยปกติเครื่องฆ่าเชื้อแต่ละเครื่องจะต้องมีชุดควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ สำหรับรักษาอุณหภูมิในเครื่องฆ่าเชื้อ โดยใช้ร่วมกับเทอร์โมมิเตอร์ โดยมีปลายด้านหนึ่งวัดอุณหภูมิในเครื่องฆ่าเชื้อและอีกปลายอีกด้านหนึ่งเป็นวาล์วควบคุมไอน้ำ (Steam Control Valve) เมื่ออุณหภูมิภายใน เครื่องฆ่าเชื้อไม่เป็นไปตามที่กำหนดวาล์วควบคุมไอน้ำ จะถูกกำหนดให้ปล่อยไอน้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อตามที่ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control Valve) กำหนด

ท่อบายพาส (By-Pass) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 8 รูปที่ 2.9 คือ ท่อที่ต่อขนานกับวาล์วควบคุมไอน้ำ ซึ่งท่อบายพาสจะสามารถทำการเปิดและปิดได้ด้วยตัวผู้ปฏิบัติงานเอง และจะใช้ท่อบายพาสเมื่อวาล์วควบคุมไอน้ำเสีหรือขัดข้อง หรือเมื่อขนาดของท่อไอน้ำเข้ามีขนาดใหญ่กว่าท่อของวาล์วควบคุมไอน้ำ ซึ่งท่อบายพาสจะทำหน้าที่ช่วยวาล์วควบคุมไอน้ำระบายไอน้ำเข้าสู่เครื่องฆ่าเชื้อ และหลังจากที่กระบวนการไล่อากาศเสร็จสิ้นลงก็จะต้องทำการปิดท่อบายพาส และปล่อยให้วาล์วควบคุมไอน้ำทำงานต่อไป

ท่อกระจายไอน้ำ (Steam Spreader) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 9 รูปที่ 2.9 คือ ท่อที่ทำหน้าที่กระจายไอน้ำ โดยปกติท่อไอน้ำเข้าจะอยู่ตรงกลางด้านล่างของเครื่องฆ่าเชื้อ ดังนั้นเมื่อมีการปล่อยไอน้ำผ่านท่อไอน้ำเข้าจะทำให้ไอน้ำพุ่งขึ้นสู่ด้านบนและหลังจากนั้นจึงจะกระจายสู่ด้านข้างของเครื่องฆ่าเชื้อทำให้การกระจายไอน้ำไม่ทั่วเครื่องฆ่าเชื้อ ดังนั้นท่อกระจายไอน้ำจะทำหน้าที่กระจายไอน้ำ ซึ่งในการเจาะรูท่อกระจายไอน้ำนั้นมีความมาตรฐานในการเลือกใช้ตามจำนวนมาตรฐานของรูบนท่อกระจายไอน้ำ และตามวิธีเจาะรูบนท่อกระจายไอน้ำ

ท่อกระจายน้ำ (Water Spreader) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 10 ในรูปที่ 2.9 ทำหน้าที่กระจายน้ำที่ถูกส่งผ่านมาจากท่อไอน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำที่มีแรงดันสูงมากระทบกับกระป๋องโดยตรงเพราะถ้าแรงดันสูงมากระทบกับกระป๋องจะทำให้กระป๋องเสีรูปซึ่งจะทำให้ลูกค้ำไม่ยอมรับคุณภาพของสินค้า

ท่อน้ำเข้า (Water Inlet) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 11 รูปที่ 2.9 จะเป็นท่อน้ำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับการทำเย็นกระป๋องภายในเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งส่วนมากจะอยู่ด้านบนของเครื่องฆ่าเชื้อ และควรมีขนาดและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้ น้ำไหลเข้าเต็มเครื่องในเวลาอันสั้น เพื่อทำให้เกิดการระบาย

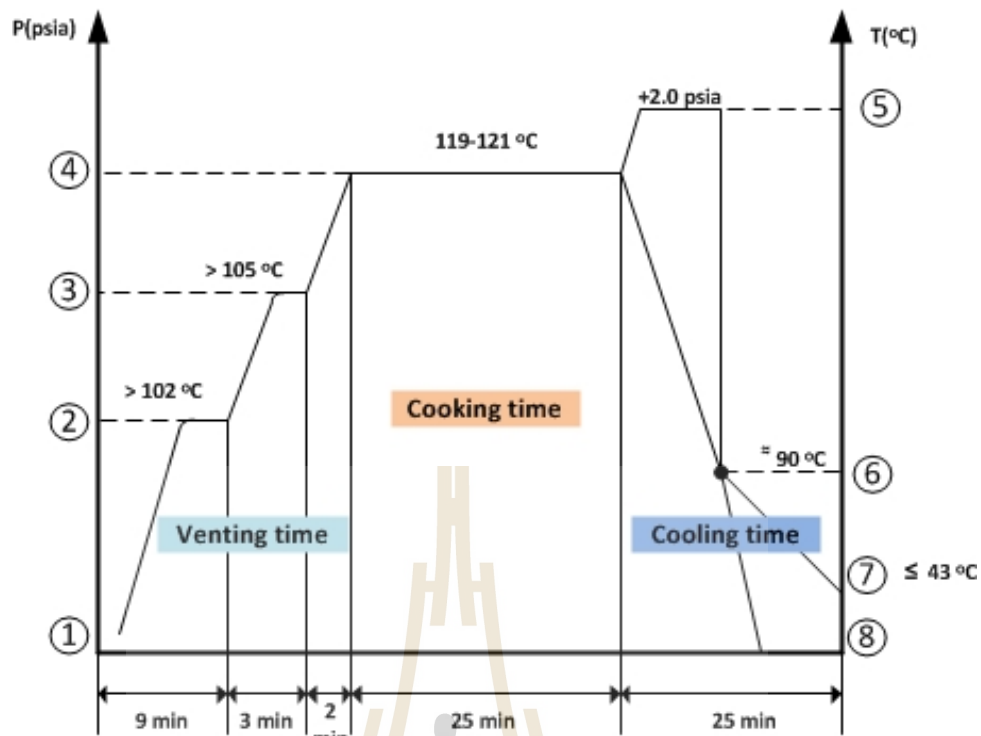


ความร้อนโดยเร็วที่สุด ด้วยความดันที่เหมาะสม เพราะน้ำที่ผ่านเข้ามาในท่อน้ำเข้าจะต้องมีความดันมากพอในการที่จะเอาชนะความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อปกติ ความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อจะมีอยู่ประมาณ 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว และควรจะต้องระวังไม่ให้หัวลว้ของท่อน้ำเข้ารั่วระหว่างการทำงานฆ่าเชื้อ เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อที่สมบูรณ์ ได้

ท่อระบายอากาศ (Vent) ดังแสดงในตำแหน่งที่ 12 รูปที่ 2.9 คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ระบายอากาศภายในเครื่องฆ่าเชื้อออกจากเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงไล่อากาศ และเมื่อมีการปล่อยไอน้ำจากด้านล่างของเครื่องฆ่าเชื้อไอน้ำจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องฆ่าเชื้อ ดังนั้นต้องหาทางออกให้กับไอน้ำด้วยโดยการติดตั้งท่อระบายอากาศ โดยในการติดตั้งท่อระบายอากาศนั้นจะต้องติดตั้งที่ทำให้อากาศระบายได้ง่ายขนาดของท่อระบายอากาศ ที่ติดตั้งควรมีขนาดมากกว่าท่อไอน้ำเข้าอยู่ 1 เท่า และถ้าเครื่องฆ่าเชื้อมีขนาดใหญ่ก็ควรจะต้องมีท่อระบายอากาศหลายช่อง เพื่อให้สามารถระบายอากาศได้อย่างครอบคลุมและทั่วถึง แต่หลักสำคัญคือจะต้องต่อท่อให้ตรงและสั้นที่สุด เพื่อให้อากาศถูกขจัดออกได้ง่ายและรวดเร็วและเมื่อมีท่อระบายอากาศ จำนวนหลายช่องก็จะทำให้ยากต่อการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน เพราะอาจจะต้องปิดท่อระบายอากาศจำนวนหลายครั้ง ดังนั้นเมื่อมีท่อระบายอากาศจำนวนหลายช่องสามารถต่อท่อร่วม (Manifold) ของท่อระบายอากาศให้มีทางออกเดียวและมีวาล์วเปิดปิดตัวเดียวได้ เพื่อง่ายต่อการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน

## 2.5 มาตรฐานการผลิตของน้ำมะพร้าวกระป๋อง

ในกระบวนการฆ่าเชื้อสำหรับอาหารและเครื่องดื่มแต่ละชนิดจะมีมาตรฐานการผลิตที่แตกต่างกัน โดยจะอ้างอิงจากประเภทของเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้ขนาดของเครื่องฆ่าเชื้อ บรรจุภัณฑ์ของอาหาร และชนิดของแบคทีเรียที่อยู่ในอาหารแต่ละประเภท ซึ่งมาตรฐานการผลิตนี้จะควบคุมระยะเวลาและอุณหภูมิในช่วงกระบวนการต่างๆ ของการฆ่าเชื้อ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยกระบวนการฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง และเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้เป็นชนิดแนวนอนที่ใช้แหล่งความร้อนคือ ไอน้ำ โดยใช้ไอน้ำให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์โดยตรง ขนาดของเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ฟุต x ความยาว 12 ฟุต



รูปที่ 2.10 มาตรฐานการผลิตน้ำมะพร้าวกระป๋อง

- ช่วงไล่อากาศ (Venting Time) Step 1-4: เป็นการไล่อากาศออกจากเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงไล่อากาศไอน้ำในท่อ Main จะต้องมีความดันไม่ต่ำกว่า 6.7 บาร์เกจ
  - 1) เปิดท่อระบายน้ำและท่อระบายอากาศ แล้วเปิดท่อไอน้ำ จ่ายไอน้ำเข้าไปภายในเครื่องฆ่าเชื้อเป็นเวลา 9 นาที
  - 2) เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อมีค่าประมาณ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำการปิดท่อระบายน้ำเหลือเพียงท่อระบายอากาศ เป็นเวลา 3 นาที
  - 3) เมื่อภายในเครื่องฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 105 องศาเซลเซียส ปกติจะอยู่ที่ประมาณ 110 องศาเซลเซียส จึงทำการปิดท่อระบายอากาศ
  - 4) ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ ทำการปิดท่อระบายน้ำและท่อระบายอากาศ มีเพียงรูระบายอากาศที่เปิดตลอดเวลาจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ
- ช่วงฆ่าเชื้อ (Cooking Time) : ช่วงฆ่าเชื้อ ใช้ไอน้ำฉีดเข้าไปในเครื่องฆ่าเชื้อ และมีรูระบายไอน้ำ คอยระบายไอน้ำ โดยมะพร้าวกระป๋อง ใช้อุณหภูมิค่าเชื้ออยู่ที่ 119 องศาเซลเซียส และความดันภายในเครื่องต้องไม่เกิน 12.5 psia ใช้ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อเป็นเวลา 25 นาที
- ช่วงระบายความร้อน (Cooling Time) Step 5-8: ปิดท่อไอน้ำเข้า

5) เปิดลมเข้าเครื่องฆ่าเชื้อประมาณ 30 วินาที จากนั้นจึงค่อยๆ เปิดน้ำจากหอผึ่งเย็น (Cooling Tower) เข้ามา แล้วควบคุมให้ความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นอีก 2 psig

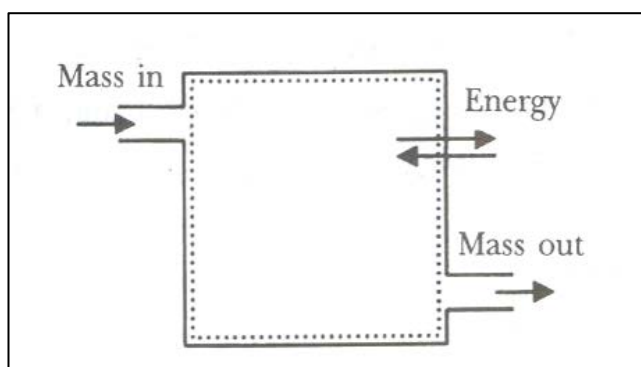
6) เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อลดลงเหลือประมาณ 90 องศาเซลเซียส จึงทำการปิดลมที่อัดเข้ามาภายในเครื่องฆ่าเชื้อ และเปิดท่อระบายอากาศการระบายความร้อนจะทำโดยเปิดน้ำเข้ามาภายในเครื่องฆ่าเชื้อจนเต็มในรอบแรกใช้เวลาประมาณ 8 นาที แล้วนำน้ำกลับไปที่หอผึ่งเย็นจนเกือบหมดหม้อ รวมเป็นเวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงเปิดน้ำเข้าและออกพร้อมกันให้น้ำท่วมกระป๋อง แต่ถ้าน้ำล้นจะล้นออกมาทางท่อน้ำล้นเอง

7) เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อมีค่าประมาณ 43 องศาเซลเซียส จึงทำการปิดน้ำและเปิดท่อระบายน้ำ

8) เมื่อระบายน้ำออกก็ถือว่าจบการระบายความร้อนใช้เวลารวมประมาณ 25 นาที

## 2.6 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

เนื่องจากหลักการทำงานของอุปกรณ์มีการปล่อยไอน้ำบางส่วนออกสู่บรรยากาศจึงทำให้ไม่ทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำที่แท้จริง ซึ่งจะส่งผลทำให้ในกระบวนการผลิตจริงจำเป็นต้องผลิตไอน้ำในปริมาณที่สูงเกินความจำเป็น เพื่อให้มั่นใจว่าจะมีไอน้ำที่เพียงพอต่อกระบวนการฆ่าเชื้อจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้คือ การหาอัตราการใช้ไอน้ำที่แท้จริงของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอร์ไลซ์เซชันของน้ำมะพร้าวกระป๋อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วถึงหลักการของอุปกรณ์ที่มีการปล่อยไอน้ำออกสู่บรรยากาศทำให้ไม่สามารถใช้วิธีการตรวจวัดปริมาตรของคอนเดนเสทได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งระบบที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นระบบเปิด (Open System) ซึ่งคือระบบที่มีการถ่ายโอนทั้งมวลและพลังงานผ่านขอบเขตของระบบ



รูปที่ 2.11 ลักษณะของระบบเปิด (Open System)

ในการวิเคราะห์กระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบเปิด (Open System) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปริมาตรควบคุม (Control Volume, CV) โดยขอบเขตของระบบเปิดได้จากการเลือกตามขนาด ปริมาตรควบคุมที่สนใจจะศึกษา และมีการโอนมวลผ่านขอบเขตระบบ กระบวนการในระบบเปิดแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady-Flow Process) และกระบวนการที่มีการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady-Flow Process) เนื่องจากระบบเปิดมีการถ่ายโอนมวลและพลังงาน ดังนั้นในการวิเคราะห์กระบวนการในระบบเปิดจึงต้องคำนึงถึงผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ทั้ง 2 ส่วน โดยผลของการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนพลังงานจะเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวลและอนุรักษ์พลังงานตามลำดับ (Yunus A. Cengel และ Michael A.Boles,2007)

### 2.6.1 กฎอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)

มวลภายในระบบเปิดหรือปริมาตรควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมวลที่เข้าระบบแตกต่างจากมวลที่ออกจากระบบ กล่าวคือเมื่อมวลที่เข้าระบบมากกว่ามวลที่ออกจากระบบจะทำให้มวลภายในระบบจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่มวลที่เข้าระบบน้อยกว่ามวลที่ออกจากระบบจะทำให้มวลภายในระบบลดลง มวลของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปจะเท่ากับผลต่างระหว่างมวลที่เข้าระบบและออกจากระบบนั้น หลักการดังกล่าวเรียกว่า กฎการอนุรักษ์มวล และแสดงอยู่ในรูปสมการดังแสดงในสมการที่ 2.1 (ธีระชาติ, 2015)

$$\Sigma m_{in} - \Sigma m_{out} = \Delta m_{cv} \quad [kg] \quad (2.1)$$

โดยที่

$\Sigma m_{in}$  แทน ผลรวมของมวลที่เข้าระบบ

$\Sigma m_{out}$  แทน ผลรวมของมวลที่ออกจากระบบ

$\Delta m_{cv}$  แทน มวลภายในระบบที่เปลี่ยนแปลง

#### 2.6.1.1 กฎอนุรักษ์มวลสำหรับกระบวนการที่มีการไหลคงตัว

ในกระบวนการที่มีการไหลคงตัวมวลภายในระบบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ( $m_{cv} = \text{คงที่}$ ) นั่นคือมวลที่ไหลเข้าเท่ากับมวลที่ไหลออกจากระบบ

$$\Sigma m_{in} = \Sigma m_{out} \quad [kg] \quad (2.2)$$

อุปกรณ์ทางวิศวกรรมจำนวนมากเมื่อทำงานอย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาหนึ่งจะมีลักษณะกระบวนการแบบสภาวะคงตัว (Steady State) และการไหลคงตัว (Steady Flow) เช่น

เทอร์ไบน์ (Turbine) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ท่อลู่เข้า (Nozzle) ท่อลู่ออก (Diffuser) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) วาล์วลดความดัน (Throttling Valve) และห้องผสม (Mixing Chamber) เป็นต้น สำหรับการทำงานวิจัยพบว่ามวลไอน้ำที่ไหลผ่านท่อกระจายไอน้ำ มีพฤติกรรมเหมือนกับมวลไอน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดันคือ มีการลดพื้นที่หน้าตัดของการไหลอย่างฉับพลัน

## 2.6.2 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว

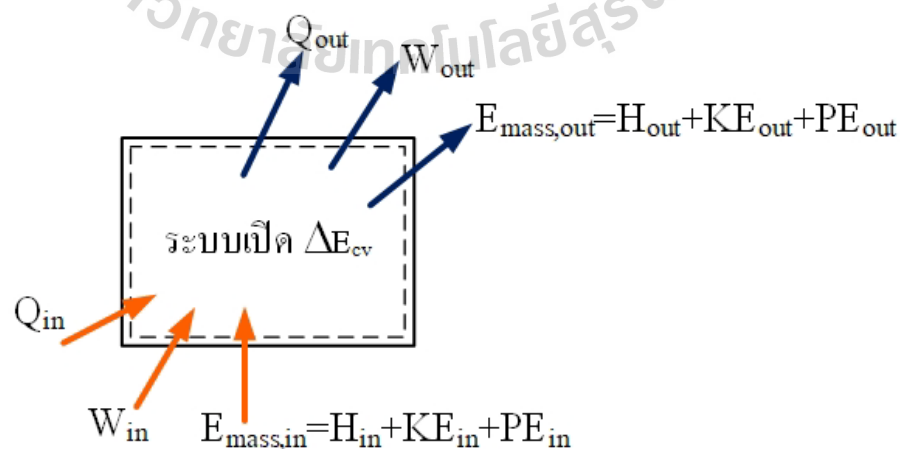
โดยทั่วไปการวิเคราะห์พลังงานจะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์มวลของระบบจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเป็นกฎที่ใช้แสดงหลักการอนุรักษ์พลังงานหรือหลักการสมดุลพลังงานสำหรับระบบใดๆ ในระหว่างกระบวนการใดๆ สามารถเขียนรูปสมการได้ดังนี้

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad [kJ] \quad (2.3)$$

เนื่องจากในกระบวนการไหลคงตัวพลังงานในระบบมีค่าคงที่ ( $E_{system}$  หรือ  $E_{cv} = \text{คงที่}$ ) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจึงเป็นศูนย์ ( $\Delta E_{cv} = 0$ ) นั่นคือ พลังงานรวมที่เข้าสู่ระบบ จะเท่ากับพลังงานรวมที่ออกจากระบบ ดังนั้นจะได้สมดุลพลังงานต่อหน่วยเวลาเป็นดังนี้

$$E_{in} = E_{out} \quad [kJ] \quad (2.4)$$

เมื่อแจกแจงรูปแบบของพลังงานที่เกิดการถ่ายโอนในสมการที่ 2.4 จะได้



รูปที่ 2.12 การถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม

$$\begin{aligned} & \left[ Q_{in} - W_{in} + \Sigma(H_{in} + KE_{in} + PE_{in}) \right] \\ & = \left[ Q_{out} - W_{out} + \Sigma(H_{out} + KE_{out} + PE_{out}) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยที่	Q	แทน	การถ่ายโอนความร้อน (kJ)
	W	แทน	งาน (kJ)
	$\Sigma E_{in}$	แทน	ผลรวมการถ่ายโอนพลังงานสุทธิเข้าระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
	$\Sigma E_{out}$	แทน	ผลรวมการถ่ายโอนพลังงานสุทธิออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
	H	แทน	เอนทาลปี (kJ)
	KE	แทน	พลังงานจลน์ (kJ)
	PE	แทน	พลังงานศักย์ (kJ)

### 2.6.3 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบไม่คงตัว

การวิเคราะห์ระบบเปิดที่มีการไหลไม่คงตัวจะเป็นการวิเคราะห์ในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ระบบปิด หากแต่มวลในระบบเปิดที่มีการไหลไม่คงตัวจะไม่คงที่ ในขณะที่มวลในระบบปิดมีค่าคงที่

ความแตกต่างระหว่างระบบเปิดที่มีการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัว คือ ระบบเปิดที่มีการไหลแบบคงตัวจะมีปริมาตรคงที่ ในขณะที่ระบบเปิดที่มีการไหลแบบไม่คงตัวอาจจะมีปริมาตรคงที่หรือไม่คงที่ก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของภาชนะจากสมการที่ 2.3 เมื่อแจกแจงรูปแบบของพลังงานจะได้

$$\begin{aligned} & \left[ Q_{in} - W_{in} + \Sigma(H_{in} + KE_{in} + PE_{in}) \right] \\ & - \left[ Q_{out} - W_{out} + \Sigma(H_{out} + KE_{out} + PE_{out}) \right] = \Delta E_{sys} \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดย  $\Delta E_{sys}$  แทน การเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิของระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)

จากทฤษฎีข้างต้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันโดยหากพิจารณาปริมาตรควบคุมให้เป็นแต่ละอุปกรณ์ภายในเครื่องฆ่าเชื้อพบว่า ระบบจะเป็นระบบการไหลคงตัว แต่เมื่อพิจารณาภาพรวมพบว่าระบบจะเป็นระบบการไหลไม่คงตัว ซึ่งจะได้อธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 3

R. Simpson และคณะ (ค.ศ.2005) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของกระบวนการสเตอร์ไรไลซ์เซชัน เพื่อหาอัตราการใช้ไอน้ำของกระบวนการนี้ โดยจะใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์มาเป็นเครื่องมือ โดยบทความวิจัยนี้จะแบ่งพิจารณาเป็น 2 ช่วงได้แก่ ช่วงของการไล่อากาศและช่วงของการฆ่าเชื้อ ในช่วงของการไล่อากาศจะทำการสมดุลมวล โดยจะพิจารณาให้มีการปล่อยคอนเดนเสทพร้อมกับอากาศออกตลอดเวลา และไอน้ำในอากาศมีสถานะเป็นไอน้ำอิ่มตัวทั้งหมด โดยจะได้สมการได้ดังนี้ สมดุลมวลรวม :

$$\dot{m}_s - \dot{m}_{sv} - \dot{m}_a = \frac{dM}{dt} \quad (2.7)$$

สมดุลมวลส่วนของอากาศแห้ง :

$$-\dot{m}_a = \frac{dM_a}{dt} \quad (2.8)$$

สมดุลมวลส่วนของไอน้ำ :

$$\dot{m}_s - \dot{m}_{sv} - \dot{m}_w = \frac{dM_{sv}}{dt} \quad (2.9)$$

เนื่องจากคอนเดนเสทเกิดจากไอน้ำที่กลั่นตัว ดังนั้นอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการนี้จะมีเพียงการพาความร้อนและการแผ่รังสี เพราะมีการหุ้มฉนวนที่เครื่องฆ่าเชื้อจึงไม่พิจารณาการนำความร้อนเมื่อทำการสมดุลพลังงาน ดังนั้นจึงได้สมการคอนเดนเสทในรูป

$$\dot{m}_w = \frac{hA(T_{in} - T_{amb}) + \sigma \epsilon A(T_{in}^4 - T_{amb}^4) + M_p C_{p_p} \frac{d\bar{T}_p}{dt} + M_{rt} C_{p_{rt}} \frac{d\bar{T}_{rt}}{dt} + M_e C_{p_e} \frac{d\bar{T}_e}{dt} + M_{in} C_{p_{in}} \frac{d\bar{T}_{in}}{dt}}{(H_{sv} - H_{sl})} \quad (2.10)$$

ในช่วงของการฆ่าเชื้อจะทำการปิดท่อระบายอากาศแต่จะมีการเปิดระบายไอน้ำ ซึ่งจะเป็ นท่อเล็กๆ อยู่ด้านบนของเครื่องฆ่าเชื้อมีหน้าที่แสดงว่ามีการทำงานภายในเครื่องฆ่าเชื้อ และความค ุ้มความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อ

สมดุลมวลรวม :

$$\dot{m}_s - \dot{m}_b = \frac{dM}{dt} \quad (2.11)$$

สมดุลมวลส่วนของไอน้ำ :

$$\dot{m}_s - \dot{m}_b - \dot{m}_w = \frac{dM_{sv}}{dt} \quad (2.12)$$

ส่วนของคอนเดนเสท :

$$\dot{m}_w = \frac{dM_w}{dt} \quad (2.13)$$

สมดุลพลังงาน :

$$\left[ H_{sv} m_b \right]_{in} - \left[ H_b + \frac{v^2}{2gc} m_b \right]_{out} = 0 \quad (2.14)$$

ทำการจัดรูปสมการจะได้

$$\dot{m}_b = \frac{P_s A_b}{\sqrt{\frac{RT_s}{\gamma}}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2.15)$$



จากสมการคอนเดนเสทและสมการรูระบายไอน้ำจะทำให้ทราบว่า อัตราการใช้ไอน้ำของ  
กระบวนการจากสมการ

$$\dot{m}_s = \dot{m}_w + \dot{m}_b \quad (2.16)$$



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 กระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

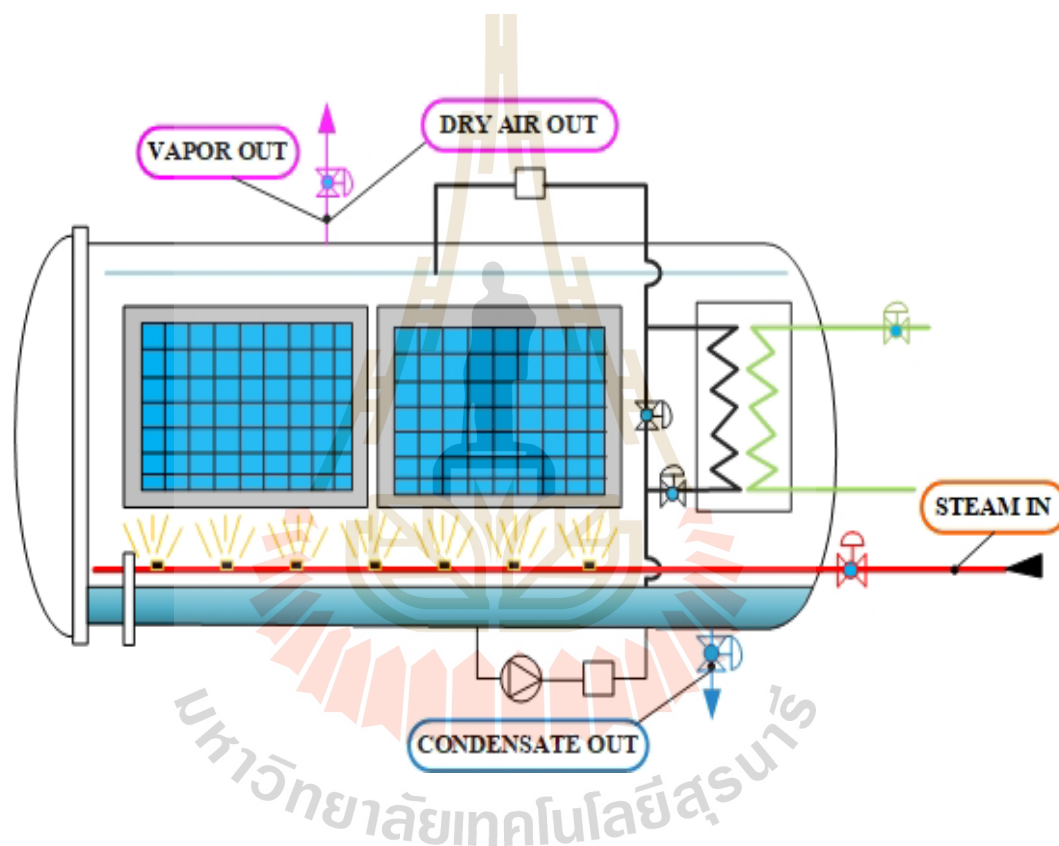
การฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน คือ การฆ่าเชื้อสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบรรจุภัณฑ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในวิธีนี้จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเนื่องจากต้องฆ่าเชื้อผ่านบรรจุภัณฑ์และมีเชื้อโรคบางชนิดที่ทนต่อความร้อนสูง ดังนั้นในการฆ่าเชื้อวิธีนี้จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส และในแต่ละชนิดของผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อโรคที่อยู่ภายในอาหารประเภทนั้นๆ โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทแต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เครื่องฆ่าเชื้อ หรือ หม้อฆ่าเชื้อภายใต้แรงดัน (Retort) หลักการทำงานของเครื่องฆ่าเชื่อนั้นจะใช้ไอน้ำในสถานะเป็น ไออิ่มตัว (Saturated Steam) ภายใต้แรงดันสูงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน และใช้ฆ่าเชื้อในอาหารที่ปิดผนึกสนิท ซึ่งในหนึ่งรอบของการฆ่าเชื้อจะใช้ไอน้ำในปริมาณมาก เนื่องจากต้องทำให้ภายในเครื่องฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการฆ่าเชื้อ ซึ่งระยะเวลาของการฆ่าเชื้อและอุณหภูมิของการฆ่าเชื่อนั้นจะถูกกำหนดโดยมาตรฐานการผลิตซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ทำการฆ่าเชื่อนั้นๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋องที่มีปริมาตรของกระป๋องเท่ากับ 210 มิลลิลิตร และบรรจุภัณฑ์ทำมาจากอลูมิเนียม ซึ่งตามมาตรฐานการผลิตอุณหภูมิฆ่าเชื้อจะอยู่ที่ 119 องศาเซลเซียส

โดยในการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันสามารถแบ่งช่วงกระบวนการทำงานได้เป็น 3 ช่วงกระบวนการ ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงไล่อากาศ ช่วงการฆ่าเชื้อ และช่วงระบายความร้อนก่อนจบกระบวนการ โดยในช่วงกระบวนการที่ 1 ซึ่งจะเป็นช่วงกระบวนการไล่อากาศ (Venting Process) ในช่วงนี้จะมีการเปิดท่อระบายอากาศหรือท่อไล่อากาศ (Vent Pipe) และทำการฉีดไอน้ำเข้าไปภายในเครื่องฆ่าเชื้อ เพื่อให้ไอน้ำไปแทนที่อากาศที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงนี้จะต้องทำให้อากาศเหลืออยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อให้น้อยที่สุด เนื่องจากหากมีอากาศอยู่ในเครื่องฆ่าเชื้อในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจุดที่ร้อนช้าที่สุดนั่นเอง ในช่วงไล่อากาศนั้นจะมีการเปิดและปิด ท่อไล่อากาศ และท่อระบายน้ำ (Drain Pipe) โดยอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อจะเป็นตัวกำหนด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จึงทำการแบ่งกระบวนการไล่อากาศออกเป็น 3 ช่วงย่อยคือ ในช่วงแรก จะเรียกว่าช่วง Venting 1 จะมีการเปิด

ท่อไต่อากาศ เปิดท่อไอน้ำเข้า ท่อระบายน้ำ และรูระบายไอน้ำ (Bleeder) ที่เปิดไว้ตลอดกระบวนการ ระยะเวลาของช่วง Venting 1 นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 9 นาที หรือจนกว่าอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ สูงกว่า 102 องศาเซลเซียส จึงจะทำการปิดท่อระบายน้ำ จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ซึ่งจะเรียกว่าช่วง Venting 2 ในระยะเวลาของช่วง Venting 2 นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 3 นาที หรือจนกว่าอุณหภูมิภายใน เครื่องฆ่าเชื้อสูงกว่า 105 องศาเซลเซียส จึงทำการปิดท่อไต่อากาศ เหลือเพียงท่อไอน้ำเข้า และ รูระบายไอน้ำ ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการไต่อากาศ ซึ่งจะเรียกว่าช่วง Venting 3 จะเป็นช่วงการ เพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อให้เท่ากับอุณหภูมิฆ่าเชื้อ ระยะเวลาของช่วง Venting 3 จะอยู่ ประมาณ 2 นาที หรือจนกว่าอุณหภูมิภายในจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิฆ่าเชื้อ จึงจะจบกระบวนการ ไต่อากาศเข้าสู่ช่วงกระบวนการฆ่าเชื้อหรือสู่ช่วงกระบวนการที่ 2 ของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ สเตอริไลซ์เซชัน ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตจะเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงฆ่าเชื้อ (Sterilize Process) หรือ (Cooking Process) จะเป็นช่วงของการรักษาอุณหภูมิเพื่อให้ความร้อนจากไอน้ำไปทำลายเชื้อโรค ในช่วงนี้จะมีการเปิดท่อระบายน้ำอีกครั้ง โดยในช่วงนี้จะมีการเปิดท่อไอน้ำ ท่อระบายน้ำ และ รูระบายไอน้ำ โดยระยะเวลาของช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา กระบวนการฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง โดยจะมีระยะเวลาการฆ่าเชื้ออยู่ที่ประมาณ 25 นาที หลังจากนั้นจึงทำการปิดท่อไอน้ำเข้า เพื่อจะเข้าสู่ช่วงระบายความร้อนหรือเรียกกันว่า ช่วงระบาย ความร้อน (Cooling Process) เป็นช่วงสุดท้ายของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน ในช่วง นี้จะมีการเปิดท่อกระจายน้ำ เพื่อลดอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อและผลิตภัณฑ์และอัดอากาศเข้า ทางท่อลมเข้า เพื่อรักษาความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว หากในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วจะทำให้กระป๋องเกิดการยุบตัว เนื่องจาก ความดันแตกต่าง โดยในช่วงนี้จะใช้ระยะเวลาประมาณ 25 นาที หรือจนกว่าอุณหภูมิภายใน เครื่องฆ่าเชื้อจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 43 องศาเซลเซียส จึงทำการปิดท่อกระจายน้ำและท่อลมเข้า เป็นการจบกระบวนการฆ่าเชื้อ

จากกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันที่ได้อธิบายข้างต้นจะพบว่า ช่วงกระบวนการที่มีการใช้ ไอน้ำจะมีเพียง 2 ช่วงกระบวนการคือ ช่วงการไต่อากาศ และช่วงของการฆ่าเชื้อ ในทั้งสองช่วงนี้ ไอน้ำจะมีการปล่อยทิ้งโดยในช่วงไต่อากาศจะปล่อยออกทางท่อไต่อากาศ และบางส่วนเป็น คอนเดนเสท เช่นเดียวกันกับช่วงการฆ่าเชื้อไอน้ำจะออกทางรูระบายไอน้ำและบางส่วนกลายเป็น คอนเดนเสท จึงไม่สามารถทำการวัดอัตราการใช้ไอน้ำได้อย่างแน่นอน จากงานวิจัยของ R.Simson C.Cortes และ A.Teixeira (2005) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการฆ่าเชื้อ แบบสเตอริไลซ์เซชัน เพื่อทำนายอัตราการใช้ไอน้ำจริงของกระบวนการ โดยทำการศึกษาอุปกรณ์ การฆ่าเชื้อคือ เครื่องฆ่าเชื้อแบบแนวตั้งใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนโดยตรง โดยใช้ วิธีสมมูลมวลและสมมูลพลังงานในการวิเคราะห์ ซึ่งต่างจากหัวข้อวิจัยนี้ทางด้าน การกำหนด

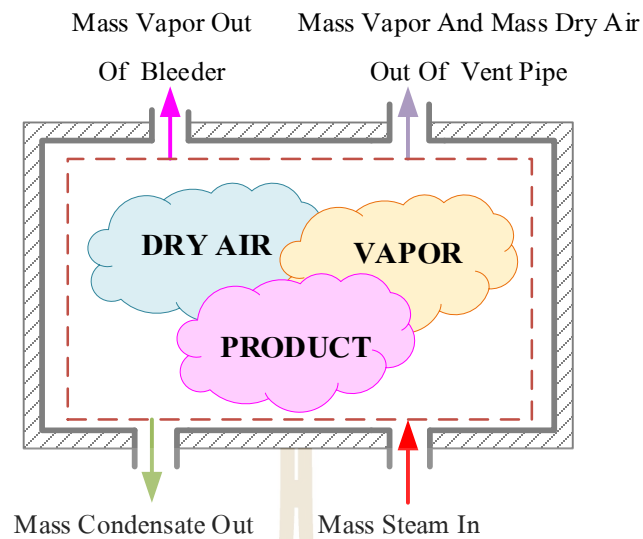
ตัวแปรอิสระและตัวแปรควบคุม กล่าวคือหัวข้อของงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์หาอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสม โดยใช้กระบวนการสมดุลมวลและพลังงาน และหาคำตอบด้วยวิธีการจำลองระบบทางความร้อน (Thermal Simulation) ซึ่งก็คือวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Simulation) ซึ่งจะใช้ปัจจัยกระบวนการผลิตของโรงงานจริง ในการวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องจากค่าอุณหภูมิที่สามารถตรวจวัดได้จากกระบวนการผลิตจริง และอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยของเครื่องฆ่าเชื้อที่ประเมินจากตรวจวัดจากการใช้ไอน้ำของอุปกรณ์ทางความร้อนอื่นๆ ในวันการผลิตที่มีการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน



รูปที่ 3.1 ภาพตัดด้านข้างของเครื่องฆ่าเชื้อแนวนอนแบบใช้ไอน้ำให้ความร้อนโดยตรงในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

## 3.2 การจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน

### 3.2.1 พิจารณาในช่วงกระบวนการไล่อากาศ



รูปที่ 3.2 การถ่ายเทมวลและพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม (ในช่วงไล่อากาศ)

จากรูปที่ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการสมดุลมวลและพลังงานของกระบวนการไล่อากาศในช่วงที่ 1 หรือ Venting 1 โดยพิจารณาให้ระบบคือ ไอ่น้ำ อากาศแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องฆ่าเชื้อ

### 3.2.1.1 สมดุลมวลของระบบ

พิจารณาเฉพาะในส่วนของไอ่น้ำภายในระบบ

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{sys,v} \quad (3.1)$$

$$m_s - m_v - m_w = \Delta m_{sys,v} \quad (3.2)$$

พิจารณาเฉพาะในส่วนของอากาศแห้งภายในระบบ

$$0 - m_a = \Delta m_{sys,a} \quad (3.3)$$

โดยที่	$\sum m_{in}$	แทน	ผลรวมของมวลที่เข้าสู่ระบบที่ทำการพิจารณา (kg)
	$\sum m_{out}$	แทน	ผลรวมของมวลที่ออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kg)
	$\Delta m_{sys}$	แทน	การเปลี่ยนแปลงมวลภายในระบบที่ทำการพิจารณา (kg)

$m_s$	แทน	มวลไอน้ำที่เข้าสู่ระบบที่ทำการพิจารณา (kg)
$m_v$	แทน	มวลของไอน้ำภายในที่ออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kg)
$m_w$	แทน	มวลของคอนเดนเสทที่ออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kg)
$m_a$	แทน	มวลของอากาศแห้งภายในที่ออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kg)

### 3.2.1.2 สมดุลพลังงานของระบบ

สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q - W + \Sigma E_{in} - \Sigma E_{out} = \Delta E_{sys} \quad (3.4)$$

$$\Delta E_{sys} = \left[ Q_{in} - W_{in} + \Sigma (H_{in} + KE_{in} + PE_{in}) \right] - \left[ Q_{out} - W_{out} + \Sigma (H_{out} + KE_{out} + PE_{out}) \right] \quad (3.5)$$

โดยความร้อน (Q) ที่ระบบสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากการหุ้มฉนวนจึงพิจารณาว่าระบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก

เนื่องจากพิจารณาให้ระบบคือ "ไอน้ำ อากาศแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อจึงไม่มีงาน (W) เข้าหรือออกจากระบบ พิจารณาให้ระบบได้รับความร้อนจากไอน้ำเท่านั้น พลังงานศักย์ (PE) และพลังงานจลน์ (KE) มีค่าน้อยมากจึงไม่ทำการพิจารณา สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\Sigma m_{in} h_{in} - \Sigma m_{out} h_{out} = \Delta U_{sys} \quad (3.6)$$

จากที่ได้กล่าวข้างต้นว่าทำการพิจารณาให้ระบบคือ "ไอน้ำ อากาศแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ" ดังนั้น  $\Delta U_{sys}$  ของระบบจะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta U_{sys} = \Delta U_a + \Delta U_p + \Delta U_v \quad (3.7)$$

เนื่องจากอากาศแห้งที่ทำการพิจารณามีพฤติกรรมเป็นแก๊สอุดมคติ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจึงสามารถหาได้จากคุณสมบัติของแก๊สอุดมคติ และในส่วนของผลิตภัณฑ์

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่นำการวิเคราะห์คือ น้ำผลไม้ที่บรรจุกระป๋องรวมถึงตะกร้าที่บรรจุผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากอิทธิพลของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของกระป๋องและตะกร้ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำผลไม้ ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ ในส่วนของน้ำผลไม้มีสถานะเป็นของเหลวที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ซึ่งจะสามารถจัดรูปสมการของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลิตภัณฑ์ ได้ดังนี้

$$\Delta U_a = [m_a C_{v,a} \Delta T] \quad (3.8)$$

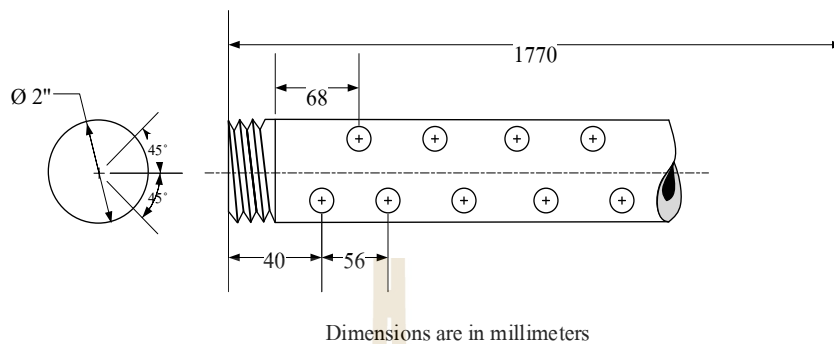
$$\Delta U_p = [m_p C_{v,p} \Delta T] \quad (3.9)$$

โดยที่	Q	แทน	การถ่ายโอนความร้อน (kJ)
	W	แทน	งาน (kJ)
	$\Sigma E_{in}$	แทน	ผลรวมของการถ่ายโอนพลังงานสุทธิเข้าระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
	$\Sigma E_{out}$	แทน	ผลรวมของการถ่ายโอนพลังงานสุทธิออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
	$\Delta E_{sys}$	แทน	การเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิของระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
	h	แทน	เอนทาลปีจำเพาะ หรือ เอนทาลปีต่อหน่วยมวล (kJ/kg)
	KE	แทน	พลังงานจลน์ (kJ)
	PE	แทน	พลังงานศักย์ (kJ)
	$C_v$	แทน	ค่าความร้อนจำเพาะที่สภาวะปริมาตรคงที่ (kJ/kg·K)
	$\Delta U_{sys}$	แทน	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)
	$\Delta U_a$	แทน	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอากาศแห้ง (kJ)
	$\Delta U_p$	แทน	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลิตภัณฑ์ (kJ)
	$\Delta U_v$	แทน	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของไอน้ำ (kJ)

จากสมการที่ (3.2) (3.3) และ (3.6) เนื่องจากไม่สามารถทราบมวลที่เข้าหรือออกจากระบบได้ ซึ่งในการผลิตจริงไม่สามารถทำการตรวจวัดอัตราการไหลได้เลย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาสมดุลมวลและพลังงานแยกเป็นแต่ละอุปกรณ์ย่อย เพื่อหามวลที่ผ่านเข้าและออกในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งทำการพิจารณาการไหลผ่านของมวลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องฆ่าเชื้อเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady Flow)

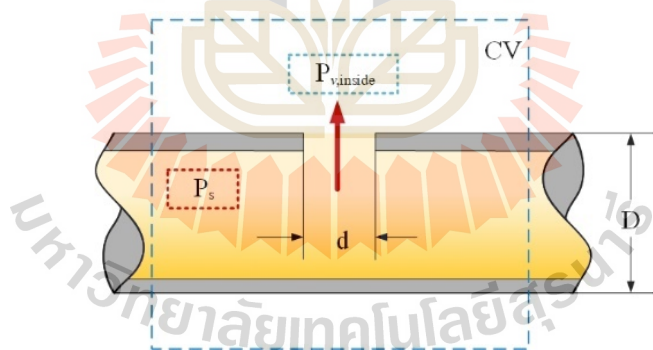
### 3.2.1.3 สมดุลมวลและพลังงานของอุปกรณ์

#### 1) พิจารณาการไหลของไอน้ำผ่านท่อกระจายไอน้ำ



รูปที่ 3.3 ท่อกระจายไอน้ำที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อ

ทำการพิจารณาการไหลของไอน้ำผ่านรูที่อยู่บริเวณท่อกระจายไอน้ำ โดยตั้งสมมติฐานว่าไอน้ำที่ไหลผ่านรูกระจายไอน้ำมีอัตราการไหลที่เท่ากันในทุกๆ รู



รูปที่ 3.4 ทิศทางการไหลของไอน้ำผ่านรูกระจายไอน้ำ

สมดุลมวลที่รูกระจายไอน้ำ

$$m_{s,in} = m_{s,out} \quad (3.10)$$



สมดุลพลังงานที่รูกระจายไอน้ำจากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในสมการที่ (3.5) เนื่องจากไม่มีพลังงานความร้อน (Q) และงาน (W) ผ่านปริมาตรควบคุมของระบบพลังงานภายในของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพิจารณาในระบบในสภาวะการไหลคงตัว ดังนั้นทำให้  $\Sigma E_{in} = \Sigma E_{out}$  เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (3.5) คือ สมดุลพลังงานที่รูกระจายไอน้ำได้ดังนี้

$$\left[ \frac{1}{2} m_{s,in} \bar{v}_{s,in}^2 + m_{s,in} g z_1 + P_{s,in} V \right] = \left[ \frac{1}{2} m_{s,out} \bar{v}_{s,out}^2 + m_{s,out} g z_2 + P_{s,out} V \right] \quad (3.11)$$

เมื่อ  $P_{s,out} = P_{s,in}$

เนื่องจากการไหลผ่านรูกระจายไอน้ำมีพฤติกรรมการไหลเสมือนกับการไหลผ่านอุปกรณ์ทอตทลิ่ง (Throttling Device) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับลดความดัน ลักษณะโดยทั่วไปจะเป็นสิ่งกีดขวางการไหลของสารทำงาน โดยเมื่อของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางแล้วจะทำให้ความดันลดลงและเกิดการขยายตัว ซึ่งจากการพิจารณาการไหลผ่านรูกระจายไอน้ำ พบว่ามีลักษณะคล้ายกับการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice Plate) โดยมีความแตกต่างของระดับที่ปากทางเข้าและปากทางออกน้อยมากจึงถือว่า  $g(z_2 - z_1) = 0$  และอัตราเร็วที่ปากทางเข้ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราเร็วที่ปากทางออก  $\bar{v}_{s,in}^2 \ll \bar{v}_{s,out}^2$  จึงไม่นำอัตราเร็วที่ปากทางเข้ามาพิจารณาสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

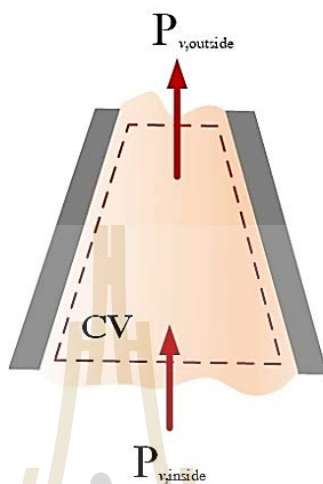
$$\bar{v}_{s,out} = C_1 \sqrt{2(P_{s,in} \nu_s - P_{s,in} \nu_{s,in})} \quad (3.12)$$

โดย  $C_1$  แทน ค่าความสูญเสียที่ท่อกระจายไอน้ำ

แต่เนื่องจากการพิจารณาแบบรวมมองว่าไม่มีการสูญเสียใดๆ เกิดขึ้น แต่ในความเป็นจริงมีการการสูญเสีย (Leak) ของความร้อนผ่านผนังเครื่องฆ่าเชื้อจึงทำให้ต้องพิจารณาการสูญเสียของความร้อนในส่วนนี้ร่วมด้วย ดังนั้นสามารถหามวลไอน้ำที่ไหลผ่านรูกระจายไอน้ำได้จาก

$$m_{s,in} = m_{s,out} = \Delta t (1/\nu_s) A_{Hole} C_1 \sqrt{2(P_{s,in} \nu_s - P_{s,in} \nu_{s,in})} \quad (3.13)$$

2) พิจารณาการไหลของไอน้ำผ่านรูระบายไอน้ำ (Bleeder) พิจารณาการไหลของไอน้ำผ่านรูระบายไอ พบว่าลักษณะการไหลเหมือนกับการไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle)



รูปที่ 3.5 ทิศทางการไหลของไอน้ำผ่านรูระบายไอน้ำ (Bleeder)

สมดุลมวลที่รูระบายไอน้ำ

$$m_{b,in} = m_{b,out} \quad (3.14)$$

สมดุลพลังงานที่รูระบายไอน้ำจากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในสมการที่ (3.5) เนื่องจากการไหลผ่านรูระบายไอน้ำมีพฤติกรรมไหลเหมือนกับการไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (3.4) คือ สมดุลพลังงานที่รูระบายไอน้ำได้ดังนี้

$$\left[ \frac{1}{2} m_{b,in} \bar{v}_{b,in}^2 + m_{b,in} g z_1 + P_{b,in} V \right] = \left[ \frac{1}{2} m_{b,out} \bar{v}_{b,out}^2 + m_{b,out} g z_2 + P_{b,out} V \right] \quad (3.15)$$

เมื่อ  $P_{b,in} = P_{Inside}$

$P_{b,out} = P_{atm}$

พิจารณาที่ปริมาตรควบคุมพบว่าไม่มีพลังงานความร้อน ( $Q$ ) และงาน ( $W$ ) ผ่านปริมาตรควบคุมของระบบพลังงานภายในของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพิจารณาระบบในสภาวะคงตัว ดังนั้นทำให้  $\Sigma E_{in} = \Sigma E_{out}$  โดยมีความแตกต่างของระดับที่ปากทางเข้าและปากทางออกน้อยมาก จึงถือว่า  $g(z_2 - z_1) = 0$  และอัตราเร็วที่ปากทางเข้ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราเร็วที่ปากทางออก  $\bar{v}_{b,in}^2 \ll \bar{v}_{b,out}^2$  จึงไม่นำอัตราเร็วที่ปากทางเข้ามาพิจารณา

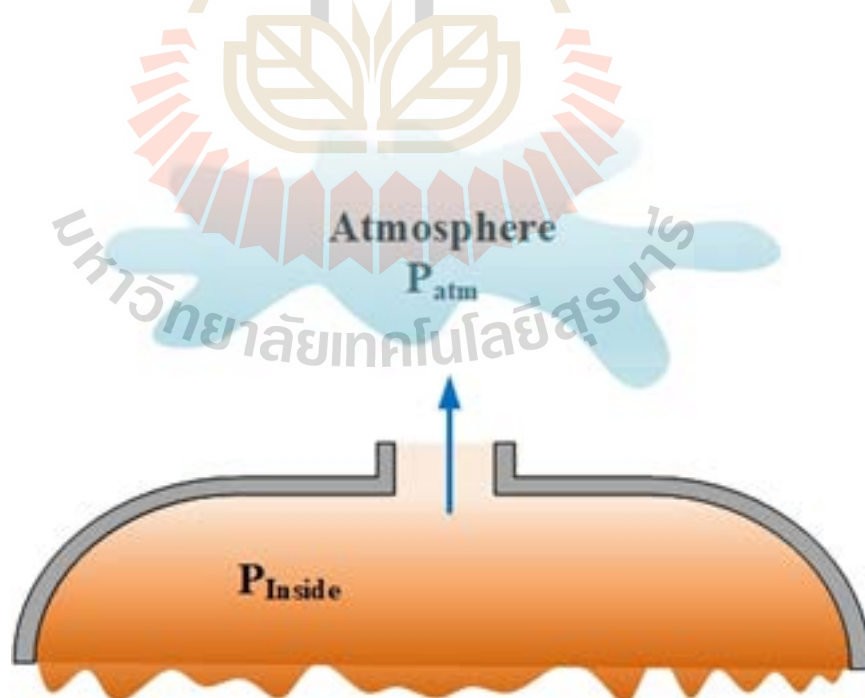
เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (3.4) คือ สมดุลพลังงานที่รูระบายไอน้ำได้ดังนี้

$$\bar{v}_{b,out} = \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} \quad (3.16)$$

ดังนั้นสามารถหามวลไอน้ำที่ไหลผ่านรูกระจายไอน้ำได้จาก

$$m_{b,in} = m_{b,out} = \Delta t (1/\nu_{v,in}) A_{Bleeder} \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} \quad (3.17)$$

### 3) พิจารณาการไหลของไอน้ำผ่านท่อไล่อากาศ (Vent Pipe)



รูปที่ 3.6 ทิศทางการไหลของไอน้ำและอากาศแห้งผ่านท่อไล่อากาศ

เนื่องจากการไหลออกของไอน้ำและอากาศผ่านท่อไล่อากาศ ไม่สามารถทำการตรวจวัด อัตราการไหลได้ และในส่วนของการทำงานของพัดติกรรมและอัตราการไหลของมวลอากาศแห้งและไอน้ำนั้นหากอ้างอิงตามสภาวะจริง ซึ่งจะต้องพิจารณาค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อพร้อมด้วย หากคิดตามความเป็นจริงแล้วการวางระบบท่อของแต่ละโรงงานการผลิตจะมีความแตกต่างและความซับซ้อนที่ต่างกันไป ดังนั้นการจะทำให้แบบจำลองนี้สามารถปรับใช้ได้กับโรงงานอื่นๆ นั้น ในส่วนของค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อจะเลือกใช้วิธีระเบียบแบบวิธีกึ่งประจักษ์ (Semi-Emprirical) มาวิเคราะห์แทนการคิดค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อโดยตรง โดยจะนำ ข้อมูลการตรวจวัดมาพิจารณารวมกับแบบจำลองและทำการหาค่าความสูญเสียจากระบบท่อ โดยใช้ ข้อมูลของอุณหภูมิจากการบันทึกผลของเครื่องฆ่าเชื้อ ดังนั้นในส่วนของ การวิเคราะห์สมดุล มวลและพลังงานของท่อไล่อากาศจะทำการตัดอิทธิพลของระบบท่อออกเสมือนมีการเปิดช่อง เพื่อระบายมวลอากาศแห้งและไอน้ำออกจากเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งสมการที่ได้จะเหมือนกับการพิจารณา การไหลผ่านรูระบายอากาศ แต่เพิ่มค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อเข้าจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{v}_{out} = C_2 \sqrt{2(P_{t,in} v_{t,in} - P_{t,out} v_{t,out})} \quad (3.18)$$

เมื่อ  $P_{t,in} = P_{v,inside} + P_{a,inside} = P_{inside}$   
 $P_{t,out} = P_{atm}$   
 โดย  $C_2$  แทน ค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อ

และเนื่องจากมวลอากาศและไอน้ำไหลออกพร้อมๆ กัน ดังนั้นจึงมีอัตราเร็วเท่ากัน ซึ่งมวล ของไอน้ำและมวลอากาศแห้งผ่านท่อไล่อากาศสามารถหาได้จาก

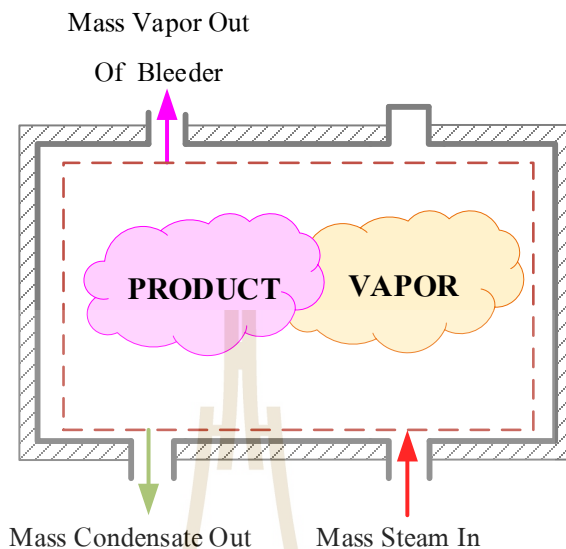
$$m_{v,in} = m_{v,out} = \Delta t (1/v_{v,in}) A_{vent} C_2 \sqrt{2(P_{inside} v_{inside} - P_{atm} v_{atm})} \quad (3.19)$$

$$m_{a,in} = m_{a,out} = \Delta t (1/v_{a,in}) A_{vent} C_2 \sqrt{2(P_{inside} v_{inside} - P_{atm} v_{atm})} \quad (3.20)$$

โดยที่  $\bar{v}$  แทน ความเร็ว (m/s)  
 $g$  แทน ความโน้มถ่วงมาตรฐานของโลก ( $g \approx 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$ )  
 $V$  แทน ปริมาตร ( $\text{m}^3$ )

$m_{s,in}$	แทน	มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ท่อกระจายไอน้ำ (kg)
$m_{s,out}$	แทน	มวลของไอน้ำที่ไหลออกจากท่อกระจายไอน้ำ (kg)
$m_{b,in}$	แทน	มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบไอน้ำ (kg)
$m_{b,out}$	แทน	มวลของไอน้ำที่ไหลออกจากระบบไอน้ำ (kg)
$m_{v,in}$	แทน	มวลของไอน้ำที่ไหลเข้าสู่ท่อไล่อากาศ (kg)
$m_{v,out}$	แทน	มวลของไอน้ำที่ไหลออกจากท่อไล่อากาศ (kg)
$m_{a,in}$	แทน	มวลของอากาศแห้งที่ไหลเข้าสู่ท่อไล่อากาศ (kg)
$m_{a,out}$	แทน	มวลของอากาศแห้งที่ไหลออกจากท่อไล่อากาศ (kg)
$P_{s,in}$	แทน	ความดันของไอน้ำที่ทางเข้าท่อกระจายไอน้ำ (kPa)
$P_{s,out}$	แทน	ความดันที่ทางออกท่อกระจายไอน้ำ (kPa)
$P_{b,in}$	แทน	ความดันที่ทางเข้า Bleeder (kPa)
$P_{b,out}$	แทน	ความดันที่ทางออก Bleeder (kPa)
$P_{t,in}$	แทน	ความดันที่ทางเข้าท่อไล่อากาศ (kPa)
$P_{t,out}$	แทน	ความดันที่ทางออกท่อไล่อากาศ (kPa)
$P_{v,inside}$	แทน	ความดันของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (kPa)
$P_{a,inside}$	แทน	ความดันของอากาศแห้งภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (kPa)
$P_{inside}$	แทน	ความดันรวมระหว่างไอน้ำกับอากาศแห้งภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (kPa)
$P_{atm}$	แทน	ความดันบรรยากาศ (kPa)
$U_s$	แทน	ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำที่เข้าท่อกระจายไอน้ำ ( $m^3 / kg$ )
$U_{t,out}$	แทน	ปริมาตรจำเพาะของอากาศที่ทางออกท่อไล่อากาศและ Bleeder ( $m^3 / kg$ )
$U_{t,in}$	แทน	ปริมาตรจำเพาะของอากาศที่ทางเข้าท่อไล่อากาศและ Bleeder ( $m^3 / kg$ )
$U_{v,in}$	แทน	ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำที่ทางเข้าท่อไล่อากาศ ( $m^3 / kg$ )
$U_{a,in}$	แทน	ปริมาตรจำเพาะของอากาศแห้งที่ทางเข้าท่อไล่อากาศ ( $m^3 / kg$ )
$A_{Hole}$	แทน	พื้นที่หน้าตัดของรูกระจายไอน้ำที่ท่อกระจายไอน้ำ ( $m^2$ )
$A_{Bleeder}$	แทน	พื้นที่หน้าตัดของ Bleeder ( $m^2$ )
$A_{vent}$	แทน	พื้นที่หน้าตัดของท่อไล่อากาศ ( $m^2$ )
$\Delta t$	แทน	ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (sec)

### 3.2.2 พิจารณาในช่วงกระบวนการฆ่าเชื้อ



รูปที่ 3.7 การถ่ายเทมวลและพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม (ในช่วงฆ่าเชื้อ)

ในช่วงของการฆ่าเชื้อจะทำการปิดท่อไต่อากาศเปิดไว้เพียงรูระบายไอน้ำเท่านั้น และระบบภายในจะเหลือเพียงแต่ไอน้ำและผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ในช่วงของการไต่อากาศแล้วสามารถนำสมการที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์มาปรับใช้ในช่วงของการฆ่าเชื้อได้โดยทำการตัดพารามิเตอร์บางตัวออก และเนื่องจากในช่วงฆ่าเชื้อเป็นช่วงที่ทำการรักษาอุณหภูมิภายใน ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลิตภัณฑ์ในช่วงนี้จึงมีผลน้อยมากต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ ซึ่งจากสมการสมดุลพลังงานสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\sum m_{in} h_{in} - \sum m_{out} h_{out} = \Delta U_v \quad (3.21)$$

$$m_s h_s - m_b h_b = \Delta U_v \quad (3.22)$$

โดย  $h_s$  แทน เอนทาลปีจำเพาะหรือเอนทาลปีต่อหน่วยมวลของไอน้ำที่ออกจากท่อกระจายไอน้ำ (kJ/kg)  
 $h_b$  แทน เอนทาลปีจำเพาะ หรือ เอนทาลปีต่อหน่วยมวลของไอน้ำที่ออกจาก Bleeder (kJ/kg)

เมื่อทราบค่า  $\Delta U_v$  จะสามารถทราบถึงพลังงานภายในของไอน้ำในสภาวะที่ 2 ส่งผลทำให้ทราบถึงอุณหภูมิของไอน้ำในสภาวะที่ 2 ได้เช่นเดียวกัน โดยค่าอุณหภูมิในสภาวะที่ 2 จะเป็นค่าที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด เนื่องจากเป็นเพียงค่าเดียวที่สามารถตรวจวัดได้จากเครื่องฆ่าเชื้อ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเป็นตัวที่สามารถวัดได้เพียงค่าเดียว การหาอัตราการใช้ไอน้ำจากแบบจำลองจึงต้องพิจารณาให้อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะที่ 2 เป็นตัวแปรอิสระในการพิจารณา

### 3.3 การสร้างแบบจำลองของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

#### 3.3.1 จำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์ระบบของเครื่องฆ่าเชื้อ

##### ตัวแปรอิสระของระบบ

1. อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะที่ 2 ( $T_{i2}$ )
2. ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำในสภาวะที่ 2 ( $v_{v2}$ )
3. ความดันของอากาศแห้งในสภาวะที่ 2 ( $P_{a2}$ ) จะพิจารณาเฉพาะในช่วงไต่อากาศ
4. ปริมาตรจำเพาะของอากาศแห้งในสภาวะที่ 2 ( $v_{a2}$ ) จะพิจารณาเฉพาะในช่วงไต่อากาศ

##### ตัวแปรควบคุม

1. มวลของผลิตภัณฑ์ ( $m_p$ )
2. อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสถานะเริ่มต้น ( $T_{i1}$ )
3. สภาวะของไอน้ำที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ( $T_{s,in}$ ,  $P_{s,in}$ )
4. ปริมาตรภายในของเครื่องฆ่าเชื้อ ( $V_{tank}$ )
5. มวลไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะเริ่มต้น ( $m_{v1}$ )
6. มวลอากาศแห้งภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะเริ่มต้น ( $m_{a1}$ )
7. ความดันไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะเริ่มต้น ( $P_{v1}$ )
8. ความดันอากาศแห้งภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะเริ่มต้น ( $P_{a1}$ )

##### ตัวแปรตามตัวแปรอิสระ

1. ความดันของไอน้ำในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะที่ 2 ( $P_{v2}$ )

2. มวลของไอน้ำที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์เชื้อ (  $m_s$  )
3. มวลของไอน้ำที่ออกจากเครื่องยนต์เชื้อทางท่อไต่อากาศ ในช่วงไต่อากาศ (  $m_v$  )
4. มวลของไอน้ำที่ออกจากเครื่องยนต์เชื้อทางระบายอากาศ (  $m_b$  )
5. มวลของอากาศแห้งที่ออกจากเครื่องยนต์เชื้อทางท่อไต่อากาศในช่วงไต่อากาศ (  $m_a$  )
6. มวลของคอนเดนเสท (  $m_w$  )
7. มวลไอน้ำภายในเครื่องยนต์เชื้อในสภาวะที่ 2 (  $m_{v2}$  )
8. มวลอากาศแห้งภายในเครื่องยนต์เชื้อในสภาวะที่ 2 (  $m_{a2}$  )
9. ความดันไอน้ำภายในเครื่องยนต์เชื้อในสภาวะที่ 2 (  $P_{v2}$  )
10. ความดันอากาศแห้งภายในเครื่องยนต์เชื้อในสภาวะที่ 2 (  $P_{a2}$  )

### 3.3.2 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่เครื่องยนต์เชื้อ

จากระบบของกระบวนการหมักเชื้อในรูปแบบทั่วไปที่แสดงในรูปที่ 3.1 และหลักการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในเครื่องยนต์เชื้อ โดยวิเคราะห์ในช่วงไต่อากาศซึ่งจะเป็นรูปทั่วไปของกระบวนการหมักเชื้อแบบสเตอร์ไรส์เซชัน จะมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิภายในเครื่องยนต์เชื้อในสภาวะที่ 2 (  $T_{i2}$  ) ปริมาตรจำเพาะของไอน้ำในสภาวะที่ 2 (  $v_{v2}$  ) ความดันของอากาศแห้งในสภาวะที่ 2 (  $P_{a2}$  ) และปริมาตรจำเพาะของอากาศแห้งในสภาวะที่ 2 (  $v_{a2}$  ) ในการสร้างระบบสมการจำเป็นต้องมีสมการที่สามารถหาค่าตัวแปรเหล่านี้ได้ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 นำไปสู่การสร้างระบบสมการเพื่อหาอัตราการใช้ไอน้ำที่เหมาะสม

สมดุลมวลของระบบในส่วนของไอน้ำ

จากสมการที่ 2 สามารถแจกแจงตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$m_s - m_v - m_w = (m_{v2} - m_{v1}) \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.23 จะทำให้สามารถทราบค่าของ  $m_{v2}$  ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าของปริมาตรจำเพาะของไอน้ำในสภาวะที่ 2 (  $v_{v2}$  ) ดังต่อไปนี้

$$v_{v2} = \left( \frac{V_{\text{tank}}}{m_{v2}} \right) \quad (3.24)$$



สมดุลมวลของระบบในส่วนของอากาศแห้ง

จากสมการที่ 2 สามารถแจกแจงตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$0 - m_a = (m_{a2} - m_{a1}) \quad (3.25)$$

จากสมการที่ 3.25 จะทำให้สามารถทราบค่าของ  $m_{a2}$  ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าของปริมาตรจำเพาะของไอน้ำในสถานะที่ 2 ( $v_{a2}$ ) ดังต่อไปนี้

$$v_{a2} = \left( \frac{V_{\text{tank}}}{m_{a2}} \right) \quad (3.26)$$

สมดุลพลังงานของระบบ

จากสมการที่ 6 สามารถแจกแจงตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} m_s h_s - m_{v,b} h_{v,b} - m_{v,vent} h_{v,vent} - m_{a,vent} h_{a,vent} - m_w h_w \\ = (\Delta U_p + \Delta U_a + \Delta U_v) \end{aligned} \quad (3.27)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่า  $\Delta U_v$  ซึ่งจะช่วยให้เราทราบค่าของ  $u_{v2}$  จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta U_v = m_v (\Delta u_v) \quad (3.28)$$

$$u_{v2} = u_{v1} + \left( \frac{\Delta U_v}{m_v} \right) \quad (3.29)$$

เมื่อทราบค่า  $u_{v2}$  ก็จะสามารถทราบค่าของอุณหภูมิและความดันของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสถานะที่ 2 ได้เนื่องจากทราบว่าไอน้ำที่ฉีดเข้าสู่เครื่องฆ่าเชื้อมีสถานะเป็นไออิ่มตัว (Saturated Vapor) ดังนั้นจึงสามารถใช้ตารางคุณสมบัติของไอน้ำในสถานะเป็นไออิ่มตัว เพื่อหาค่าอุณหภูมิและความดันได้เลย ในส่วนความดันของอากาศแห้งเนื่องจากทราบว่าอากาศมีคุณสมบัติ

เป็นแก๊สอุดมคติ ดังนั้นเมื่อต้องการทราบความดันของอากาศแห้งสามารถหาได้จากสมการของความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity,  $\omega$ ) หรือค่าอัตราส่วนความชื้น

$$\omega = \left( \frac{m_{v2}}{m_{a2}} \right) = \left( \frac{(P_{v2} V / R_v T_{i2})}{(P_{v2} V / R_v T_{i2})} \right) = \left( \frac{R_a}{R_v} \right) \left( \frac{P_{v2}}{P_{a2}} \right) = 0.622 \left( \frac{P_{v2}}{P_{a2}} \right) \quad (3.30)$$

$$P_{a2} = \left( \frac{0.622(P_{v2})}{(m_{v2} / m_{a2})} \right) \quad (3.31)$$

จากสมการของค่าตัวแปรอิสระและสมการต่างๆ ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.1.2 เมื่อทำการสร้างระบบสมการจะได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและพลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันในรูปทั่วไป

วิเคราะห์ที่อุปกรณ์	ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
ท่อกระจายไอน้ำ	$f_1 = \bar{v}_{s,out} - C_1 \sqrt{2(P_{s,in} \nu_s - P_{inside} \nu_{inside})} = 0$	$f_1 = f(P_{inside}, \nu_{inside})$
	$f_2 = m_{s,out} - \Delta t(1/\nu_s) A_{Hole} C_1 \sqrt{2(P_{s,in} \nu_s - P_{inside} \nu_{inside})} = 0$	$f_2 = f(f_1)$
รูระบายไอน้ำ	$f_3 = \bar{v}_{b,out} \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} = 0$	$f_3 = f(P_{inside}, \nu_{inside})$
	$f_4 = m_{b,out} - \Delta t(1/\nu_{v,in}) A_{Bleeder} \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} = 0$	$f_4 = f(f_3, \nu_{v,in})$
ท่อไล่อากาศ	$f_5 = \bar{v}_{out} - C_2 \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} = 0$	$f_5 = f(P_{inside}, \nu_{inside}, C_2)$
	$f_6 = m_{v,out} - \Delta t(1/\nu_{v,in}) A_{vent} C_2 \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} = 0$	$f_6 = f(f_5, \nu_{v,in})$
	$f_7 = m_{a,out} - \Delta t(1/\nu_{a,in}) A_{vent} C_2 \sqrt{2(P_{inside} \nu_{inside} - P_{atm} \nu_{atm})} = 0$	$f_7 = f(f_5, \nu_{a,in})$

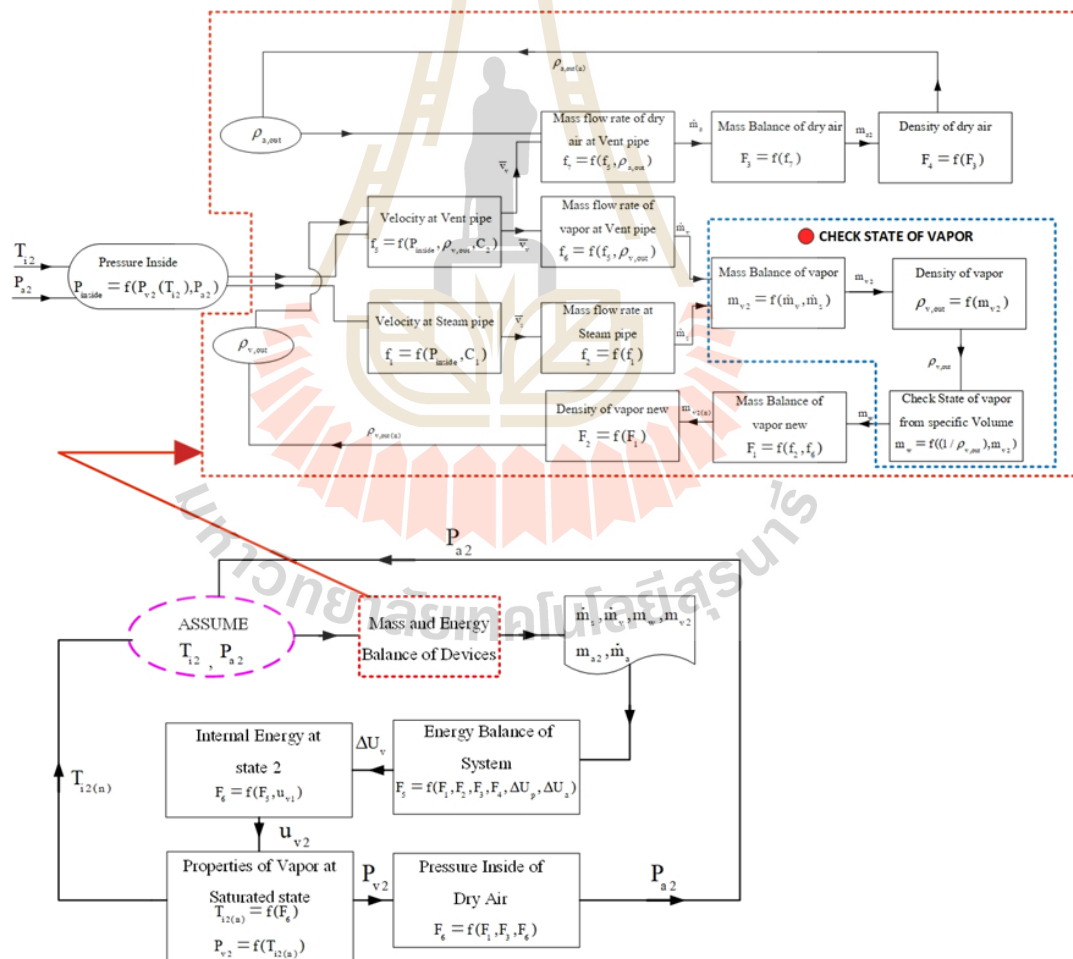
ตารางที่ 3.2 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและพลังงานของระบบในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันในรูปทั่วไป

วิเคราะห์ที่ระบบ	ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
สมดุลมวล		
ไอน้ำ	$F_1 = m_s - m_v - m_w - m_{v2} + m_{v1} = 0$	$F_1 = f(f_2, f_4, f_6)$
	$F_2 = U_{v2} - \left( \frac{V_{\text{tank}}}{m_{v2}} \right) = 0$	$F_2 = f(F_1)$
อากาศแห้ง	$F_3 = (m_{a2} - m_{a1}) + m_a = 0$	$F_3 = f(f_7)$
	$F_4 = U_{a2} - \left( \frac{V_{\text{tank}}}{m_{a2}} \right) = 0$	$F_4 = f(F_3)$
สมดุลพลังงาน		
	$F_5 = m_s h_s - m_{v,b} h_{v,b} - m_{v,vent} h_{v,vent} - m_{a,vent} h_{a,vent} - m_w h_w - \Delta U_p - \Delta U_a - \Delta U_v = 0$	$F_5 = f(F_1, F_2, F_3, F_4, \Delta U_p, \Delta U_a)$
	$F_6 = u_{v1} + \left( \frac{\Delta U_v}{m_v} \right) - u_{v2} = 0$	$F_6 = f(F_5, u_{v1})$
	$F_7 = P_{a2} - \left( \frac{0.622(P_{v2})}{(m_{v2} / m_{a2})} \right) = 0$	$F_7 = f(F_1, F_3, F_6)$

### 3.4 การแก้ระบบสมการโดยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution)

เนื่องจากระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและพลังงานของอุปกรณ์ทางความร้อนจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิและความหนาแน่นของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อในสภาวะที่ 2 เพื่อทำการหาอัตราการใช้ไอน้ำในแต่ละช่วงเวลาที่พิจารณา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การจำลองระบบมาช่วยเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาในระบบสมการนี้ได้ แต่เนื่องจากวิธีการจำลองระบบทางความร้อน (Thermal Simulation) มีอยู่หลากหลายวิธี เช่น วิธีของ Newton-Raphson Simulation วิธีนี้ระบบสมการจะต้องสามารถทำการหาค่าของอนุพันธ์ (Differential) ได้ทุกสมการ ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับระบบที่เป็นสภาวะคงตัว (Steady state) แต่ในงานวิจัยนี้เป็นระบบที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะจัดรูปให้อยู่ในฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ทุกสมการ ส่วนวิธีที่ 2 ซึ่งก็คือ

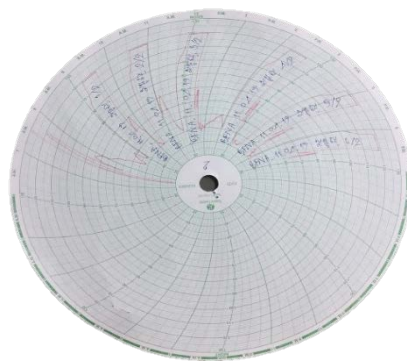
วิธีการแทนค่าเป็นลำดับขั้น (Sequential Simulation) เป็นการแทนค่าเป็นลำดับขั้นแต่อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ววาระบบที่ทำการวิจัยเป็นระบบที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) คือมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระอยู่ตลอดเวลาการใช้วิธีนี้จึงค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมกับปัญหามากที่สุด ซึ่งวิธีที่เหมาะสมและสามารถแก้ไขปัญหของระบบสมการจากแบบจำลองนี้ได้ คือ วิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution) เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องแทนค่าเป็นลำดับขั้นและระบบสมการไม่จำเป็นต้องหาค่าอนุพันธ์ได้ แต่หลักการของวิธีนี้คือการสุ่มค่าที่ตัวแปรอิสระ ซึ่งก็คือ อุณหภูมิภายใน ( $T_{12}$ ) และความหนาแน่นของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อ ( $\rho_{v,2}$ ) แล้วแทนลงในระบบสมการผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่าของตัวแปรอิสระ เมื่อได้ค่าใหม่นำค่าที่ได้ใหม่นั้นกลับไปแทนค่าตัวแปรที่ทำการสุ่ม แล้วทำการคำนวณซ้ำจนกว่าค่าที่ได้ใหม่นั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.8 แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการจากการสมดุลมวลและพลังงานของทั้งระบบและแต่ละอุปกรณ์ในวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง

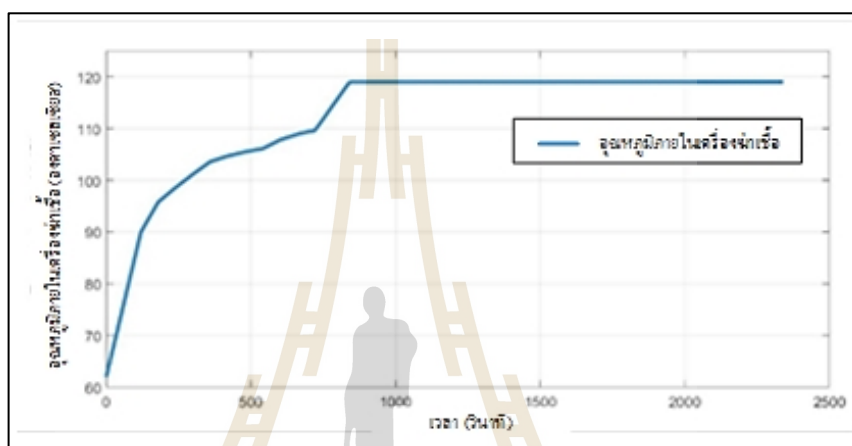
### 3.5 การหาค่าความสูญเสียด้วยระเบียบวิธีกึ่งประจักษ์ (Semi-Emprirical Method)

ระเบียบวิธีการคำนวณแบบระเบียบวิธีกึ่งประจักษ์ หมายถึง ระเบียบวิธีในการคำนวณที่อาศัยข้อมูลบางส่วนจากการทดลองเพื่อลดปริมาณการคำนวณ ซึ่งจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ข้างต้นได้ทำการตัดพฤติกรรมบางอย่างออก เพื่อง่ายต่อการพิจารณาและเพื่อให้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้เป็นรูปทั่วไปที่สามารถปรับใช้งานได้กับโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยพฤติกรรมแรกที่ไม่ได้ทำการพิจารณา คือ พฤติกรรมของการไหลผ่านระบบท่อของท่อไอล้อากาศ ซึ่งเราได้ลดความยุ่งยากในช่วงนี้ออกเนื่องจากแต่ละโรงงานมีการวางระบบท่อที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่าความสูญเสียที่เกิดจากระบบท่อจึงไม่เท่ากันรวมถึงค่าความสูญเสียนี้มีการแปรผันตรงต่อความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้ออยู่ตลอดเวลา จึงไม่สามารถพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ได้ ในส่วนพฤติกรรมถัดมา คือ การไหลผ่านท่อกระจายไอน้ำ ซึ่งถ้าเป็นในส่วนค่าความสูญเสียเนื่องจากการไหลเพียงอย่างเดียวสามารถหาค่าได้ เนื่องจากทราบว่า การไหลผ่านรูกระจายไอน้ำที่ท่อกระจายไอน้ำมีพฤติกรรมเหมือนการไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดัน แต่เนื่องจากระบบถูกพิจารณาให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม (Heat Leak) ดังนั้นจำเป็นต้องมีค่าบางอย่างเพื่อมาชดเชยในส่วนนี้ด้วย จากสมมูลพลังงานของระบบพบว่าพลังงานที่ให้กับระบบมีเพียงพลังงานเนื่องจากการไหลของไอน้ำจากท่อกระจายไอน้ำเท่านั้น และการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในก็จะขึ้นอยู่กับพลังงานที่เข้าระบบและพลังงานที่ออกจากระบบ ดังนั้นจึงทำให้ทราบความสัมพันธ์ของค่าความสูญเสียของทั้งสองพฤติกรรมที่ไม่ได้ทำการพิจารณา คือ หากไอน้ำที่เข้าระบบในปริมาณมากและออกในปริมาณน้อยจะส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อเพิ่มอย่างรวดเร็วและหากไอน้ำที่เข้าระบบในปริมาณน้อยและออกในปริมาณมากจะส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นช้า ดังนั้นการที่จะทราบว่าอุณหภูมิควรจะเพิ่มขึ้นอย่างไรจึงต้องนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา



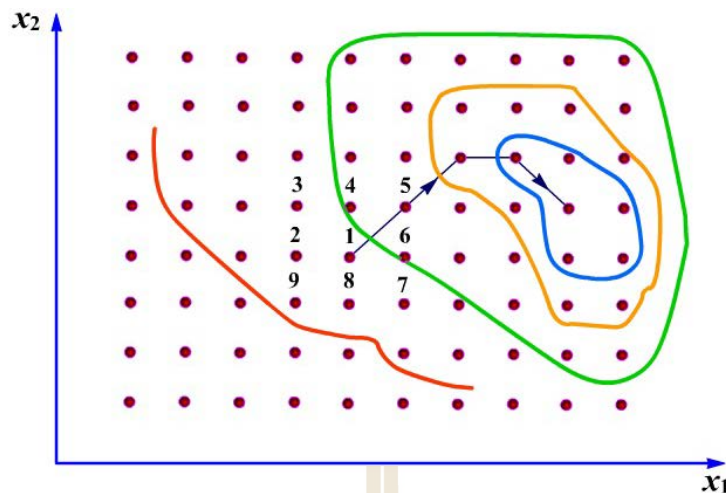
รูปที่ 3.9 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากเครื่องฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง

จากรูปที่ 3.9 เป็นกราฟของอุณหภูมิภายในเครื่องยนต์ที่ได้อาจเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งอยู่ในตัวเครื่อง โดยกราฟนี้จะแสดงค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะบันทึกตลอดวันการผลิต ดังนั้นกราฟนี้จึงบันทึกค่าอุณหภูมิของเครื่องยนต์ตลอดวันการผลิต หากต้องการพิจารณาต่อรอบการฆ่าเชื้อจึงต้องนำค่าจากกราฟที่ได้จากเครื่องยนต์ฆ่าเชื้อมาพล็อตใหม่ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาโดยให้แกน Y เป็นอุณหภูมิ และแกน X เป็นเวลา ดังนั้นจะได้กราฟอุณหภูมิภายในเทียบกับเวลาต่อ 1 รอบของการฆ่าเชื้อ



รูปที่ 3.10 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องยนต์ฆ่าเชื้อในช่วงไล่อากาศและช่วงฆ่าเชื้อ ต่อ 1 รอบการฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง

เนื่องจากระเบียบวิธีกึ่งประจักษ์มีอยู่หลายวิธีด้วยกันในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีที่เหมาะสมกับกระบวนการและข้อมูล โดยจะใช้วิธีการค้นหาแบบแลตทิซ (Lattice Search) เป็นวิธีการหาสถานะที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่ง โดยการแบ่งบริเวณที่สนใจออกเป็นช่องตาราง (Grid) แล้วพิจารณาเลือกจุดที่สนใจจุดหนึ่ง เมื่อได้ค่าของฟังก์ชันของจุดที่สนใจครั้งแรกแล้วให้หาค่าของฟังก์ชันรอบๆ จุดที่สนใจครั้งแรก แล้วเปรียบเทียบกันว่าจุดใดมีค่าน้อยกว่ากัน จุดที่อยู่รอบและมีค่าต่ำที่สุดจะเป็นจุดศูนย์กลางในการหาค้างต่อไป (เมื่อต้องการค่า Minimum) ทำการหาค่าฟังก์ชันของจุดรอบๆ จุดศูนย์กลาง แล้วพิจารณาลักษณะเดิมอีก ทำอย่างนี้จนกระทั่งพบว่าค่าที่หาได้จากจุดรอบๆ จุดศูนย์กลางทุกจุดมีค่ามากกว่าค่าที่จุดศูนย์กลาง ในการหานั้นจะได้ค่าที่จุดศูนย์กลางเป็นค่าต่ำสุด (Minimum) ส่วนในการหาค่าสูงสุดก็จะกลับกัน



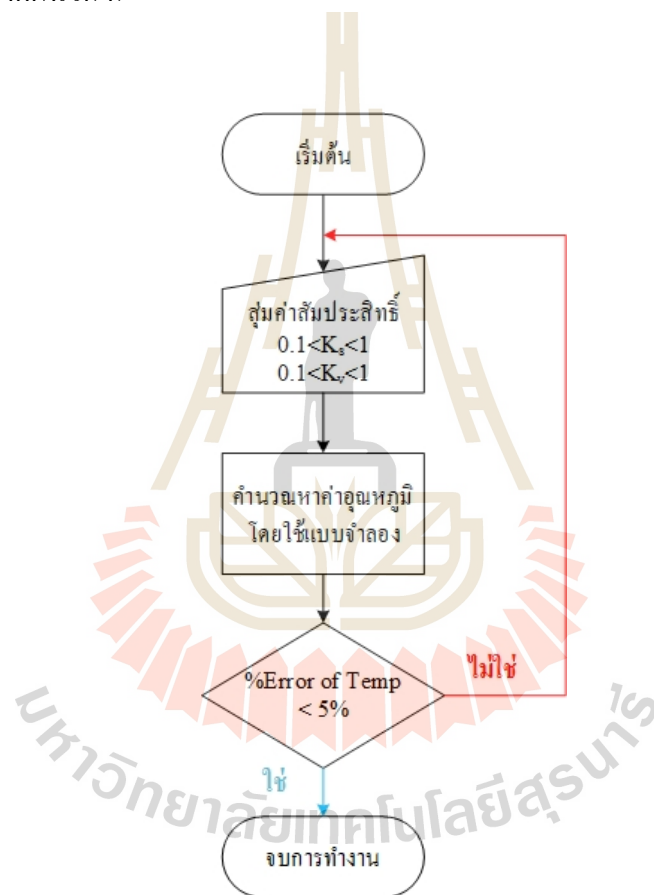
รูปที่ 3.11 วิธีการค้นหาแบบแลตทิซ (Lattice Search)

จากรูปที่ 3.11 ถ้าต้องการหาค่าสูงสุดของ  $y$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระ  $x_1, x_2, y = f(x_1, x_2)$  ทำการสร้างช่องตารางบนขอบเขต (Contour) ดังรูปจากนั้นเริ่มต้นที่ใจกลางของพื้นที่ที่พิจารณา (ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลว่าค่าต่ำสุดอยู่ที่ตำแหน่งใด) พิจารณาค่าของฟังก์ชันที่จุด 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 2 พบว่าที่จุด 5 ให้ค่าต่ำสุด ดังนั้นที่จุด 5 คือ จุดศูนย์กลางของการค้นหาครั้งต่อไป

ในการหาค่าความสูญเสียโดยจากระบบสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อแทนค่าความสูญเสียจากท่อกระจายไอน้ำและท่อไล่อากาศแล้วหาค่าอุณหภูมิในสภาวะที่ 2 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด โดยจะกำหนดให้  $K_s$  คือค่าความสูญเสียจากท่อกระจายไอน้ำ  $K_v$  คือ ค่าความสูญเสียที่ท่อไล่อากาศโดยค่าความสูญเสียจะอยู่ระหว่าง 0.1-1 และ  $y$  คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด ในที่นี้จะทำการหาค่าต่ำสุด (Minimum) ของค่า  $y$  จากหลักการข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.12

จากรูปที่ 3.12 แผนผังแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะเป็นค่าชดเชยอิทธิพลที่ไม่สามารถนำมาพิจารณาในสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแบบจำลองได้ โดยจะทำการหาค่าของ  $K_s$  ซึ่งจะเป็นตัวชดเชยค่าการสูญเสียในส่วนของอัตราการจ่ายไอน้ำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งเกิดมาจากอิทธิพลของการสูญเสียความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดมาจากการที่ไอน้ำไหลผ่านรูกระจายไอน้ำโดยเป็นการไหลแบบเปลี่ยนหน้าตัดการไหลอย่างฉับพลัน และในส่วนของ  $K_v$  จะเป็นตัวชดเชยค่าการสูญเสียในส่วนของการไหลในท่อไล่อากาศซึ่งเกิดมาจากอิทธิพลของการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานจากระบบท่อไล่อากาศ เนื่องจากทราบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย  $K_s$  และ  $K_v$  ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-1 ดังนั้นจากวิธีการค้นหา

แบบแลททิซจึงทำการสุ่มค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-1 แล้วแทนลงในสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากแบบจำลอง โดย  $K_s$  จะเท่ากับค่า  $C_1$  ในสมการที่ (3.13) และ  $K_v$  จะเท่ากับค่า  $C_2$  ในสมการที่ (3.18) หลังจากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาค่าอุณหภูมิ เมื่อได้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองแล้ว นำมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบคือค่าของ  $K_s$  และ  $K_v$  ที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเวลาที่ทำการพิจารณา โดยผลการคำนวณในแต่ละช่วงเวลาจะแสดงในตารางที่ ก.1 และ ก.2 และตัวอย่างการคำนวณจะแสดงในตาราง ก.3 ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.12 แผนผังการหาค่าสัมประสิทธิ์โดยวิธีการค้นหาแบบแลททิซ



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย

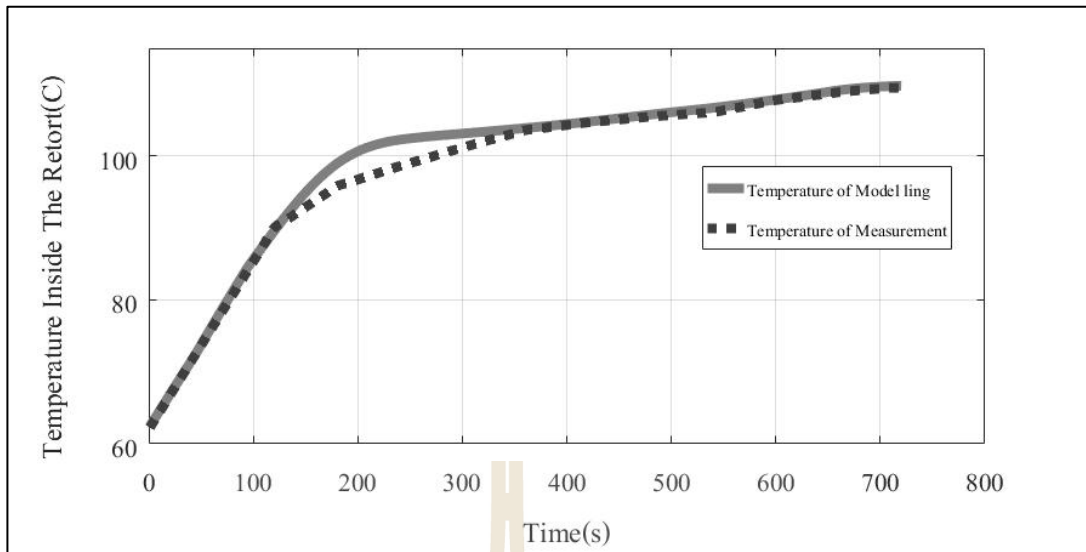
ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์หาอัตราการใช้ไอน้ำที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน โดยในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองสามารถทำนายอัตราการใช้ไอน้ำเทียบกับสถานะจริงจึงต้องทำการอ้างอิงมาตรฐานในการผลิต ได้แก่ ปริมาณผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิเริ่มต้นของเครื่องฆ่าเชื้อ ความดันและอุณหภูมิของไอน้ำที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ และระยะเวลาในกระบวนการต่างๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่ออัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

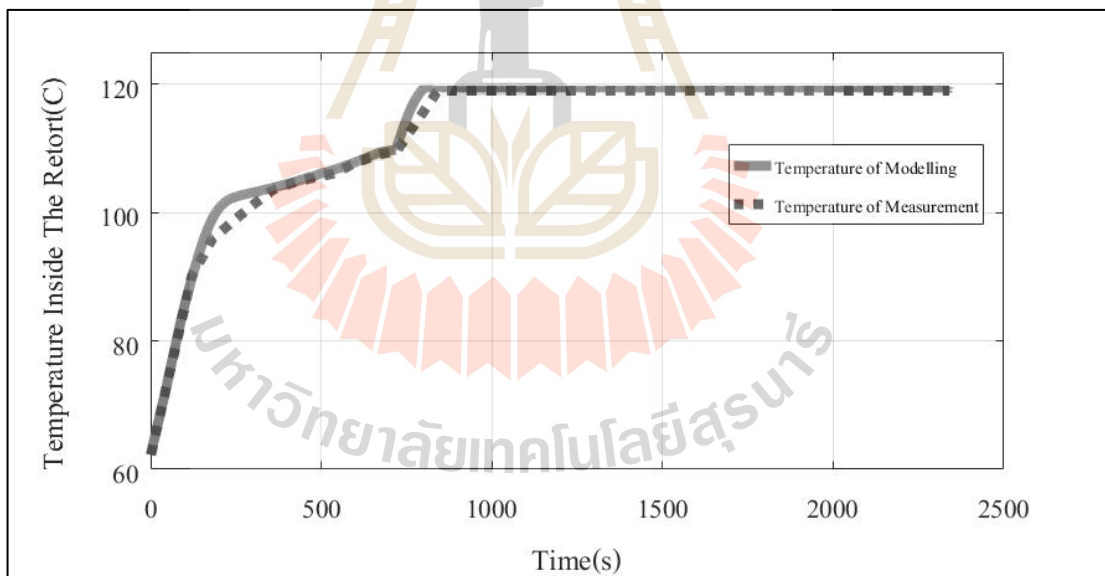
4.1.1 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ทำกรวิเคราะห์จากแบบจำลองเทียบกับค่าอุณหภูมิภายในเครื่องที่ได้จากการตรวจวัด

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 3 แล้วว่าสำหรับในแต่ละกระบวนการของฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันนั้น เราไม่สามารถตรวจวัดอัตราการใช้ไอน้ำจากการตรวจวัดปริมาตรของคอนเดนเสทได้ เนื่องจากในกระบวนการฆ่าเชื้อจะมีช่วงกระบวนการไล่อากาศและมีการปล่อยไอน้ำออกทางรูระบายไอน้ำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงไม่สามารถวัดไอน้ำที่สูญเสียไปในส่วนนั้นได้ แต่ในทางปฏิบัติจริงสามารถทราบอัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อได้โดยวิธีการตรวจวัดปริมาตรคอนเดนเสท เพื่อหาอัตราการใช้ไอน้ำของอุปกรณ์ทางความร้อนอื่นๆ ซึ่งสามารถนำมาหักล้างกับอัตราไอน้ำที่ผลิตทั้งหมดของโรงงานในวันผลิตนั้นๆ แต่ค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการใช้ไอน้ำของอุปกรณ์ แต่สำหรับแบบจำลองที่ได้ทำการวิเคราะห์จะทำการพิจารณาอัตราการใช้ไอน้ำของแต่ละช่วงกระบวนการ จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับอัตราที่ได้จากค่าเฉลี่ยได้ อย่างไรก็ตามภายในเครื่องฆ่าเชื้อจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิภายในแต่ละช่วงอย่างละเอียด ดังนั้นในการตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง จึงสามารถนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดได้

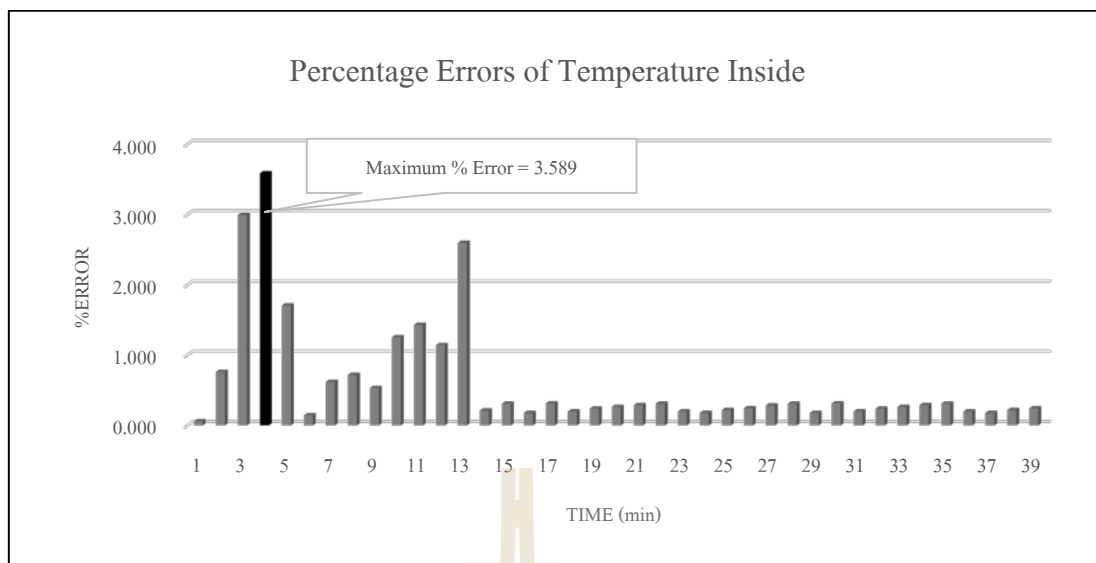
เมื่อนำค่าอุณหภูมิภายในเครื่องที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยจะพิจารณาในช่วงของการไล่อากาศ และพิจารณาทั้งในช่วงไล่อากาศและช่วงการฆ่าเชื้อ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับค่าอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงไต่อากาศของน้ำมะพร้าวกระป๋อง



รูปที่ 4.2 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับค่าอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงไต่อากาศและช่วงฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง



รูปที่ 4.3 กราฟเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากแบบจำลอง เทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดของน้ำมะพร้าวกระป๋อง

กราฟที่แสดงในรูปที่ 4.1 คือ กราฟอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงไต่อากาศ และกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.2 คือ กราฟอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดในทุกช่วงกระบวนการของการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน โดยแนวโน้มของอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดและแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ในกราฟรูปที่ 4.1 มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกของการไต่อากาศจะมีการจ่ายไอน้ำในปริมาณที่ค่อนข้างสูง เพราะไอน้ำที่จ่ายให้กับเครื่องฆ่าเชื้อจะไหลเข้าสู่เครื่องฆ่าเชื้อด้วยความดันแตกต่าง ดังนั้นในช่วงแรกที่ความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ จึงทำให้มีไอน้ำที่มีความดันสูงไหลเข้าสู่เครื่องฆ่าเชื้อในปริมาณมากและเมื่อความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อสูงขึ้นปริมาณไอน้ำที่จ่ายเข้าเครื่องฆ่าเชื้อจะค่อยๆ ลดลง และหยุดจ่ายเมื่อความดันภายในเท่ากับความดันของไอน้ำที่อยู่ภายในท่อจ่ายไอน้ำ และขณะเดียวกันในช่วงไต่อากาศนี้จะมีการเปิดท่อไต่อากาศจึงทำให้มีมวลอากาศแห้งและไอน้ำบางส่วนไหลออกทางท่อไต่อากาศด้วยความดันแตกต่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นในช่วงแรกของการไต่อากาศจะมีมวลไอน้ำและอากาศแห้งไหลออกทางท่อไต่อากาศเพียงเล็กน้อยและจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความดันภายในสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิในช่วงแรกของการไต่อากาศมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มที่จะช้าลงเมื่อความดันภายในสูงขึ้น ส่วนกราฟในรูปที่ 4.2 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการไต่อากาศแล้วจะทำการปิดท่อไต่อากาศและความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำภายในท่อจ่ายไอน้ำ ส่งผลให้มีการหยุดจ่ายไอน้ำ แต่เนื่องจากเครื่องฆ่าเชื้อมีการติดตั้งรูระบายไอน้ำที่จะเปิดไว้

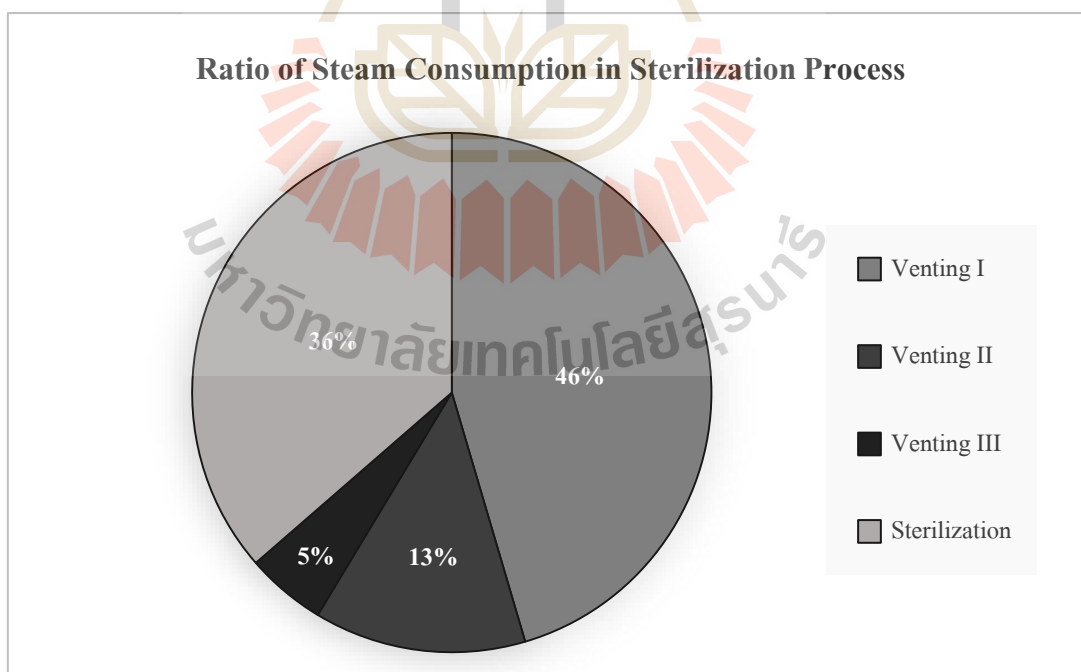
ตลอดเวลา เพื่อทำการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อทำให้มีไอน้ำบางส่วนไหลออกทางรูระบายไอน้ำนี้ ส่งผลให้ความดันภายในค่อยๆ ลดต่ำลงจนมีค่าน้อยกว่าความดันไอน้ำ จึงจะมีการจ่ายไอน้ำเข้าไปภายในเครื่องฆ่าเชื้ออีกครั้ง โดยในช่วงนี้จะเป็นช่วงของการรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ โดยในมาตรฐานการผลิตอุณหภูมิในช่วงฆ่าเชื้อจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 118.5 ถึง 119.5 องศาเซลเซียส จากกราฟรูปที่ 4.1 และ 4.2 ค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิ เนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดภายในเครื่อง จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในช่วงนี้ ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.059 ถึง 3.589 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองจึงมีความน่าเชื่อถือและแสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองนี้ได้เป็นอย่างดีโดยผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจะแสดงในตารางที่ ง.1 ภาคผนวก ง

#### 4.1.2 การวิเคราะห์หาอัตราการใช้ไอน้ำในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

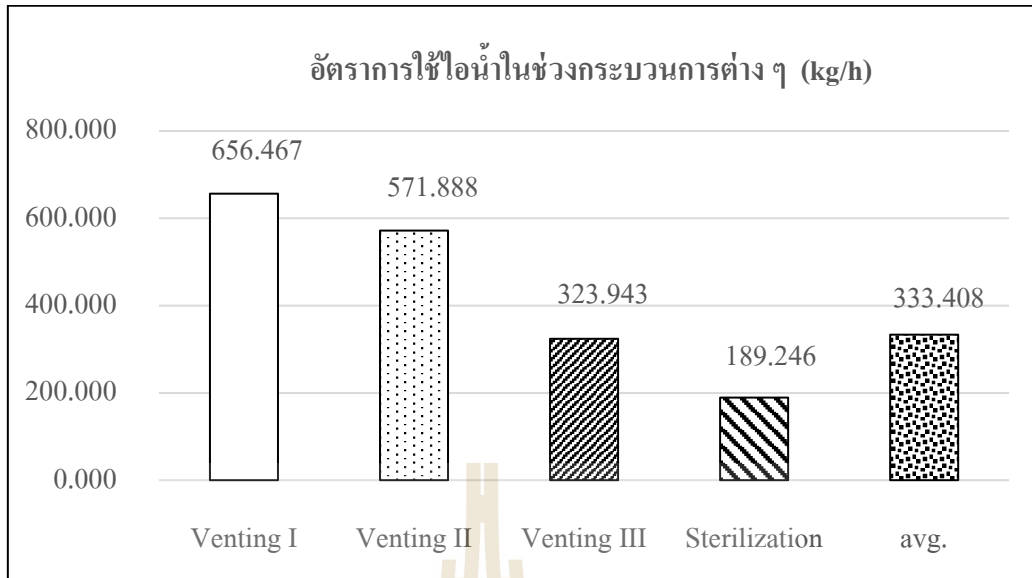
ในกระบวนการผลิตจริงไม่สามารถทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำที่แท้จริงของเครื่องฆ่าเชื้อในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันได้ และเนื่องจากในกระบวนการนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากกับคุณภาพของอาหารหรือเครื่องดื่ม หากในกระบวนการมีการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อไม่ถึงอุณหภูมิของการฆ่าเชื้อจะทำให้ยังคงมีแบคทีเรียหรือเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ในอาหารเหล่านั้นได้ก่อให้เกิดการเน่าเสียก่อนอายุการเก็บรักษาหรือเกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องผลิตไอน้ำเป็นจำนวนมากเพื่อรองรับการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน และการใช้ไอน้ำของอุปกรณ์ทางความร้อนอื่นๆ ที่ต้องใช้ในวันผลิตนั้นๆ ดังนั้นจากแบบจำลองสามารถทำนายอัตราการใช้ไอน้ำที่แท้จริงของเครื่องฆ่าเชื้อในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟรูปที่ 4.4 และกราฟรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ปริมาณและอัตราการใช้ออน้ำที่ได้จากแบบจำลองในช่วงกระบวนการต่างๆ

ช่วง กระบวนการ	ระยะเวลา (วินาที)	ปริมาณอน้ำที่ใช้ (kg)	อัตราอน้ำที่ใช้ (kg/h)
Venting I	540	98.470	656.467
Venting II	180	28.594	571.888
Venting III	120	10.798	323.943
Sterilization	1500	78.853	189.246
Total	2340	216.715	-
Avg.	-	-	333.408



รูปที่ 4.4 สัดส่วนการใช้ออน้ำในช่วงกระบวนการต่างๆ ของการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน



รูปที่ 4.5 อัตราการใช้น้ำในช่วงกระบวนการต่างๆ ของการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

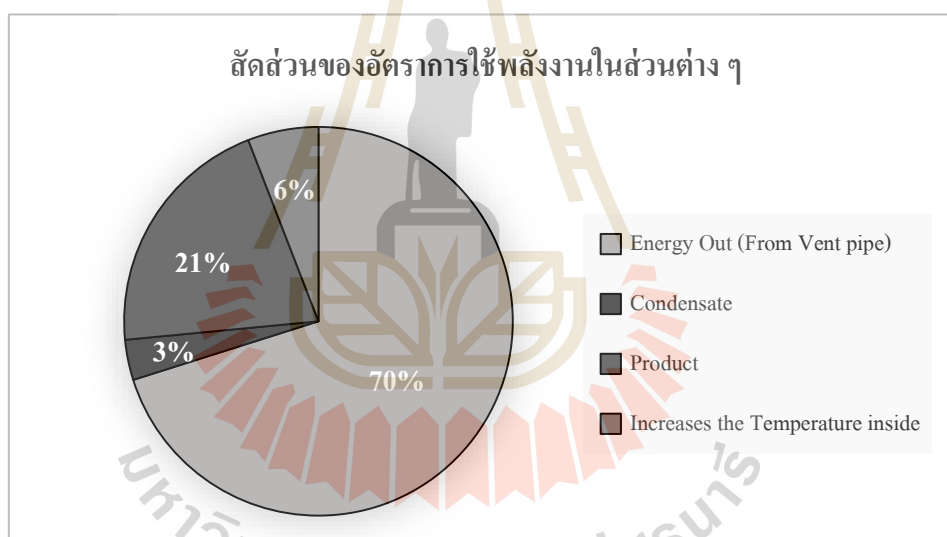
จากตารางที่ 4.1 แสดงอัตราการใช้น้ำในแต่ละช่วงกระบวนการของการฆ่าเชื้อ โดยอัตราการใช้น้ำสูงสุดจะอยู่ในช่วง Venting I หรือช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อค่อนข้างต่ำ โดยจากสมการอัตราการไหลของไอน้ำ ดังสมการที่ 3.13 ที่ได้จากแบบจำลองอัตราการไหลจะแปรผันตรงกับค่าความดันแตกต่างของความดัน ดังนั้นในช่วงนี้จึงมีอัตราการไหลของไอน้ำที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากต้องการให้ไอน้ำที่ฉีดเข้ามาขึ้นไปดันอากาศที่อยู่ภายในให้ไหลออกจากเครื่องฆ่าเชื้อให้เร็วที่สุดและจะเป็นช่วงที่กราฟอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 และจากกราฟรูปที่ 4.4 และกราฟรูปที่ 4.5 แสดงถึงสัดส่วนการใช้น้ำตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งจากที่ทราบว่าอัตราการไหลสูงสุดเกิดในช่วงแรกของการไล่อากาศ แม้ว่าในช่วงไล่อากาศนั้นจะมีระยะเวลาที่สั้นแต่มีปริมาณการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับช่วงฆ่าเชื้อที่เป็นเพียงการรักษาอุณหภูมิแต่มีระยะเวลาที่นานกว่ามาก

#### 4.1.3 สัดส่วนการใช้พลังงานของกระบวนการฆ่าเชื้อในช่วงไล่อากาศ

ในการวิเคราะห์สัดส่วนการใช้พลังงานจากไอน้ำในช่วงไล่อากาศ เนื่องจากในช่วงกระบวนการนี้มีการเปิดท่อไล่อากาศจึงทำให้มีไอน้ำบางส่วนไหลออกส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนเช่นเดียวกัน และการทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้พลังงานในช่วงนี้จึงค่อนข้างสูง ซึ่งจะสามารถแสดงแนวทางการวิเคราะห์พลังงานได้ในแต่ละกระบวนการดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 อัตราการใช้พลังงานในส่วนต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองของกระบวนการไล่อากาศ

พลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (จากไอน้ำที่จ่ายให้กับเครื่องฆ่าเชื้อ)	464.86	kW.
พลังงานที่สูญเสียจากมวลที่ไหลออก (จากท่อไล่อากาศ)	325.97	kW.
พลังงานที่สูญเสียจากการเกิดคอนเดนเสท	15.60	kW.
พลังงานที่ให้กับผลิตภัณฑ์	95.94	kW.
พลังงานที่ทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้น	25.694	kW.



รูปที่ 4.6 สัดส่วนของอัตราการใช้พลังงานไอน้ำในส่วนต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองของกระบวนการไล่อากาศ

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงถึงอัตราการใช้พลังงานในส่วนต่างๆ ซึ่งจะประกอบด้วยพลังงานจากไอน้ำที่ทำให้ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น พลังงานจากไอน้ำที่ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น พลังงานจากไอน้ำที่สูญเสียจากการเกิดคอนเดนเสทหรือสูญเสียจากการลดความดันอย่างรวดเร็ว และพลังงานจากไอน้ำที่สูญเสียกับการไหลออกของมวลไอน้ำ โดยจะเห็นว่าพลังงานที่สูญเสียไปกับการไหลออกของมวลไอน้ำนั้นค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับในส่วนอื่น และจาก

กราฟรูปที่ 4.6 เมื่อทำการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ พบว่าพลังงานจากไอน้ำที่สูญเสียในส่วนของกาไหลออกของมวลไอน้ำมีค่าถึง 70% ของพลังงานจากไอน้ำที่ให้แก่ระบบ ส่วนพลังงานจากไอน้ำที่ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 21% ซึ่งถือว่ามีผลต่อการใช้พลังงานของระบบค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไปกับการไหลออกของมวลไอน้ำ

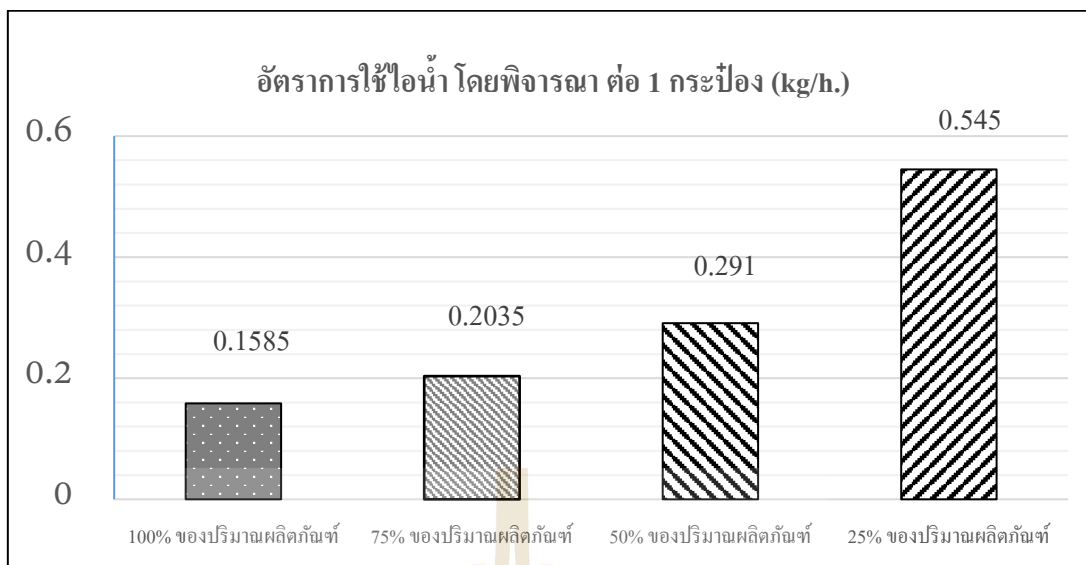
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิต

จากหัวข้อที่ 4.1.2 ที่ได้ทำการวิเคราะห์สัดส่วนการใช้พลังงานโดยพลังงานที่ให้กับผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 21% ของพลังงานทั้งหมด ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตในช่วงกระบวนการไล่อากาศ ซึ่งในช่วงนี้จะใช้ระยะเวลาประมาณ 12 นาทีหรือเท่ากับ 720 วินาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิต เพื่อที่จะทราบว่าปริมาณการผลิตมีผลต่อการใช้ไอน้ำมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะใช้ปัจจัยการผลิตในการวิเคราะห์เหมือนกันทุกประการ โดยปัจจัยการผลิตจะแสดงในตารางที่ ค.1 ในภาคผนวก ค ในการวิเคราะห์นี้จะทำการเปลี่ยนแปลงเพียงปริมาณการผลิต ซึ่งจะมีกรณีศึกษาทั้งหมด 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 คือ 100% ของปริมาณการผลิต หรือมีค่าเท่ากับน้ำมะพร้าวกระป๋องจำนวน 4,320 กระป๋อง กรณีที่ 2 คือ 75% ของปริมาณการผลิต หรือมีค่าเท่ากับน้ำมะพร้าวกระป๋องจำนวน 3,240 กระป๋อง กรณีที่ 3 คือ 50% ของปริมาณการผลิต หรือมีค่าเท่ากับน้ำมะพร้าวกระป๋องจำนวน 2,160 กระป๋อง และกรณีที่ 4 คือ 25% ของปริมาณการผลิต หรือมีค่าเท่ากับน้ำมะพร้าวกระป๋องจำนวน 1,080 กระป๋อง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ปริมาณและอัตราการใช้ไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองในช่วงกระบวนการไล่อากาศของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน

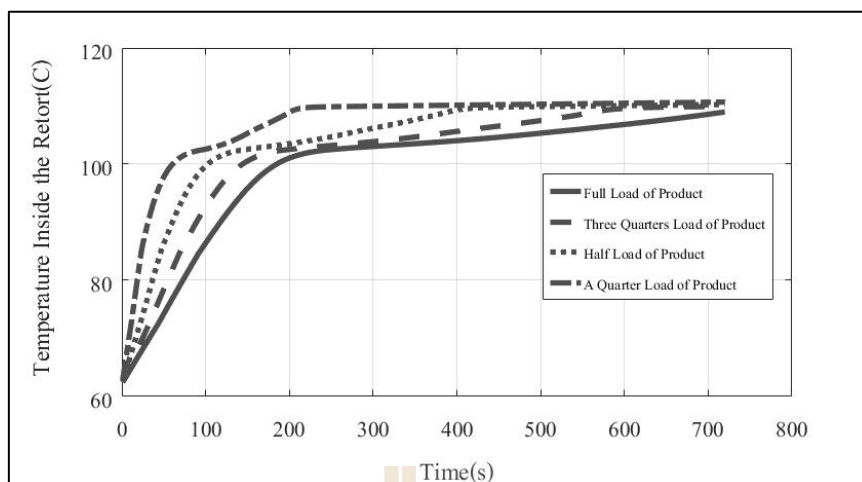
ปริมาณการผลิต	ปริมาณการใช้ไอน้ำ (kg/720 s)	อัตราการใช้ไอน้ำ พิจารณา ต่อ 1 กระป๋อง (kg/h.)
100% ของปริมาณการผลิต	127.0673	0.1585
75% ของปริมาณการผลิต	122.1620	0.2035
50% ของปริมาณการผลิต	116.5270	0.2910
25% ของปริมาณการผลิต	109.9290	0.5450





รูปที่ 4.7 อัตราการใช้น้ำที่ได้จากแบบจำลองในช่วงกระบวนการไล่อากาศของปริมาณการผลิตที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาต่อ 1 หน่วยผลผลิต (ไร่)

จากตารางที่ 4.3 แสดงถึงปริมาณใช้น้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิต โดยในเครื่องฆ่าเชื้อ 1 เครื่องสามารถบรรจุผลผลิตได้ทั้งหมด 4,320 ไร่ ดังนั้นจะทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นแบบ 100%, 75%, 50% และ 25% ของปริมาณการผลิตทั้งหมด โดยจากตารางที่ 4.3 ซึ่งจะแสดงในส่วนของการใช้น้ำที่ชี้ให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณการผลิตสูงจะทำให้ปริมาณใช้น้ำที่สูงขึ้นด้วยโดยจากรูปที่ 4.6 แสดงของอัตราการใช้น้ำในส่วนต่างๆ ของกระบวนการไล่อากาศ ซึ่งจะเห็นว่าในส่วนของการผลิตส่งผลต่อการใช้น้ำถึง 21% จึงไม่สามารถเปรียบเทียบอัตราการใช้น้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตได้ เนื่องจากมีปริมาณการผลิตที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาให้เป็นอัตราการใช้น้ำต่อ 1 หน่วยการผลิต หรือต่อ 1 ไร่ โดยจะเห็นว่าอัตราการใช้น้ำเมื่อเปรียบเทียบกันทั้งหมดจะเป็นว่าแบบ 100% หรือแบบเต็มเครื่องมีอัตราการใช้น้ำต่อไร่ที่น้อยที่สุดเนื่องจากในช่วงไล่อากาศนี้พลังงานน้ำส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับมวลน้ำที่ไหลออกทางท่อไล่อากาศถึง 70% ส่วนพลังงานที่ให้กับผลผลิตมีค่าเพียง 21% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าหากต้องการประหยัดน้ำจะต้องทำการบรรจุผลผลิตให้เต็มเครื่องฆ่าเชื้อหรือเท่ากับ 100% ของปริมาณการผลิต ซึ่งในการผลิตจริงจะทำการบรรจุแบบเต็ม ซึ่งในแต่ละ Batch การผลิตจะมีปริมาณการผลิตที่ไม่สามารถใส่เต็มได้ในทุกๆ รอบ ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องบรรจุแบบไม่เต็มเครื่องฆ่าเชื้อในรอบสุดท้าย



รูปที่ 4.8 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลิตภัณฑ์

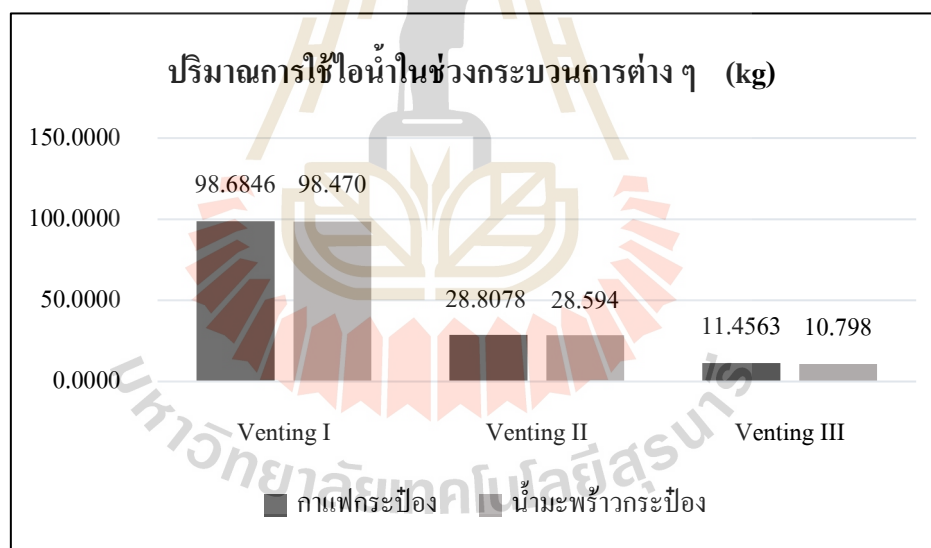
จากกราฟรูปที่ 4.8 แสดงถึงอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยพิจารณาที่ปริมาณการผลิตแตกต่างกัน จากกราฟรูปที่ 4.6 สัดส่วนการใช้พลังงานจะเห็นว่าในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าประมาณ 21% ของพลังงานทั้งหมด ดังนั้นเมื่อลดปริมาณของผลิตภัณฑ์ลงจึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิภายในสูงขึ้นเร็วกว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สูงและจะค่อยๆ ช้าลง เนื่องจากกลไกของเครื่องฆ่าเชื้อที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงประเภทผลิตภัณฑ์

เนื่องจากแบบจำลองที่ได้ทำการวิจัยถูกจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปของเครื่องฆ่าเชื้อแนวนอนแบบใช้ไอน้ำโดยตรง และรวมถึงสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่พิจารณาของโรงงานการผลิตนี้ ดังนั้นด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้หากมีการเปลี่ยนแปลงชนิดผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมะพร้าวกระป๋อง แบบจำลองนี้จะสามารถวิเคราะห์ผลออกมาได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ความแม่นยำของแบบจำลองจึงทำการเปลี่ยนชนิดของผลิตภัณฑ์จากน้ำมะพร้าวกระป๋องมาเป็นกาแฟกระป๋อง โดยทั้งสองผลิตภัณฑ์จะมีมาตรฐานการผลิตในช่วงไล่อากาศที่เหมือนกัน จึงทำการวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบผลในช่วงนี้ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.4 กราฟรูปที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.4 ปริมาณการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการไล่อากาศของกาแฟกระป๋องและน้ำมะพร้าวกระป๋องที่ได้จากแบบจำลอง

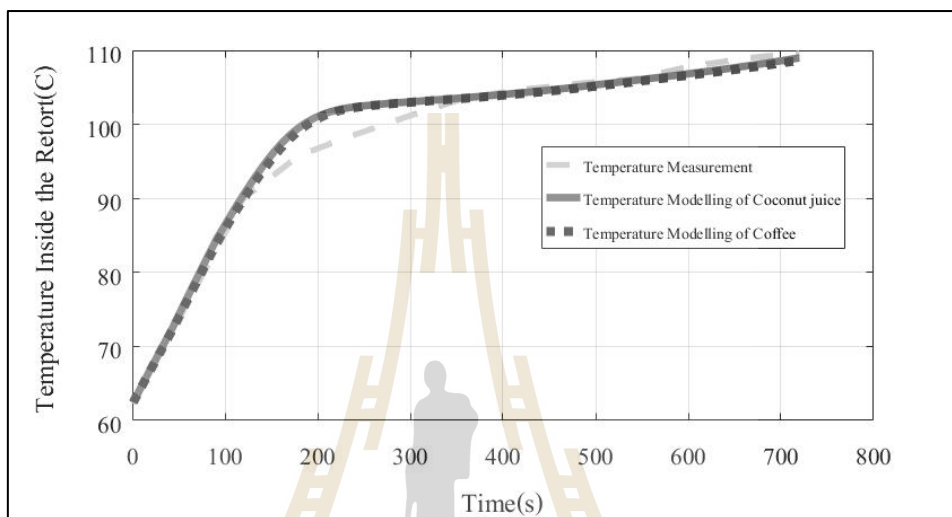
ช่วงกระบวนการ	ระยะเวลา (วินาที)	ปริมาณไอน้ำที่ใช้ของกาแฟกระป๋อง(kg)	ปริมาณไอน้ำที่ใช้ น้ำมะพร้าวกระป๋อง(kg)
Venting I	540	98.6846	98.470
Venting II	180	28.8078	28.594
Venting III	120	11.4563	10.798



รูปที่ 4.9 ปริมาณการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการไล่อากาศของกาแฟกระป๋องและน้ำมะพร้าวกระป๋อง

จากตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณการใช้ไอน้ำในช่วงไล่อากาศของกาแฟกระป๋องและน้ำมะพร้าวกระป๋องจะเห็นว่า ปริมาณการใช้ไอน้ำของกาแฟกระป๋องจะมากกว่าน้ำมะพร้าวเล็กน้อย เนื่องจากทั้งสองมีปริมาตรและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน โดยน้ำมะพร้าวจะมีปริมาตรต่อ

กระป๋องเท่ากับ 240 มิลลิลิตร และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สามารถบรรจุได้ต่อ 1 เครื่องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 4,230 กระป๋อง ส่วนของกาแฟกระป๋องมีปริมาตรต่อกระป๋องเท่ากับ 180 มิลลิลิตร และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สามารถบรรจุได้ต่อ 1 เครื่องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 5,400 กระป๋อง ซึ่งหากคิดเป็นมวลรวมแล้วกาแฟจะมีมวลมากกว่าน้ำมะพร้าวเพียงเล็กน้อยส่งผลให้มีปริมาณการใช้ไอน้ำที่มากกว่า ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.10 กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับค่าอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงไต่อากาศของกาแฟกระป๋องและน้ำมะพร้าวกระป๋อง

จากที่ได้กล่าวไปในข้างต้นแล้วว่า มาตรฐานการผลิตของกาแฟกระป๋องและน้ำมะพร้าวกระป๋องในช่วงไต่อากาศนั้นเหมือนกัน ดังนั้นกราฟอุณหภูมิของทั้งสองผลิตภัณฑ์ในช่วงนี้จะต้องเป็นกราฟเดียวกัน จากกราฟรูปที่ 4.10 พบว่า กราฟอุณหภูมิในช่วงไต่อากาศของทั้งสองผลิตภัณฑ์นั้นทับเป็นเส้นเดียวกัน ซึ่งเป็นก็เป็นที่ไปตามมาตรฐานการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดแล้วก็จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกันกับน้ำมะพร้าวที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

#### 4.4 การวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อจากแบบจำลองเทียบกับ

##### การตรวจวัด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือเพื่อหาอัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อเนื่องจากไม่สามารถทำการตรวจวัดอัตราการใช้ไอน้ำได้ ดังสาเหตุที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1 แต่ใน

กระบวนการผลิตได้ทำการประเมินการใช้ไอน้ำเฉลี่ยของเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งได้ทำการแสดงวิธีการวิเคราะห์ไว้ในภาคผนวก ข จากปริมาณไอน้ำที่ผลิตทั้งหมดในวันการผลิตที่มีการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้อัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยของเครื่องฆ่าเชื้อเท่ากับ 353.92 kg/h เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง (ตารางที่ 4.1) โดยการพิจารณาอัตราการใช้ไอน้ำรวมทุกกระบวนการ พบว่าอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยมีความใกล้เคียงแต่มีค่าน้อยกว่าเพียงเล็กน้อย แต่เนื่องจากการตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อยจึงทำให้เกิดความแตกต่างอย่างที่ปรากฏ



## บทที่ 5

### การจัดการการเงินเครื่องมือเพื่อการประหยัดพลังงาน

จุดประสงค์เพื่อต้องการแสดงถึงการจัดการการเปิดใช้งานของเครื่องมือ เพื่อให้สอดคล้องต่อความต้องการของปริมาณการผลิตในแต่ละวันผลิต และการเปิดใช้งานอุปกรณ์ทางความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อที่จะใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของทางโรงงานในส่วนของไอน้ำ

หม้อไอน้ำ (Boiler) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตไอน้ำโดยจะบรรจุน้ำอยู่ภายใน และได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง หรือแหล่งพลังงานความร้อนอื่นๆ จนน้ำที่บรรจุอยู่ภายในจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำที่ความดันตามต้องการ โรงงานนำความร้อนจากไอน้ำไปใช้งานในหลายวัตถุประสงค์คือ นำความร้อนจากไอน้ำไปใช้ในการฆ่าเชื้อในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์และสเตอริไรซ์ และนำความร้อนจากไอน้ำไปทำการผลิตน้ำร้อนสำหรับการล้างฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตต่างๆ หม้อไอน้ำของโรงงานเป็นแบบท่อไฟ (Fire Tube Boiler) ซึ่งเป็นหม้อไอน้ำที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบเปลือกและท่อ มีน้ำบรรจุอยู่ภายในเปลือก และมีก๊าซร้อนที่ไหลผ่านท่อที่อยู่ภายในเปลือก ความร้อนจะถ่ายเทออกสู่ผิวด้านนอกให้กับน้ำแล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ หม้อไอน้ำของโรงงานมีอยู่ 2 หม้อ คือ หม้อไอน้ำ 1 (Boiler 1) และหม้อไอน้ำ 2 (Boiler 2) โดยมีรูปแบบเบื้องต้นในการเปิดใช้งานคือ สำหรับวันที่ผลิตผลิตภัณฑ์พาสเจอร์ไรส์ จะเปิดใช้งานหม้อไอน้ำเพียง 1 หม้อ (ส่วนมากจะเปิดใช้งานหม้อไอน้ำ 2) และสำหรับวันที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์กระป๋องร่วมด้วยจะเปิดใช้งานหม้อไอน้ำทั้ง 2 หม้อร่วมกัน ซึ่งข้อมูลพื้นฐานของหม้อไอน้ำของโรงงานแสดงดังตารางที่ 5.1

ในกระบวนการผลิตจริงการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันจะมีข้อบังคับสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อคือ ในช่วงแรกของการฆ่าเชื่อนั้นคือ ช่วงกระบวนการไล่อากาศ ไม่สามารถไล่อากาศพร้อมกันได้ ดังนั้นในกระบวนการไล่อากาศนี้จะสามารถเปิดเครื่องฆ่าเชื้อได้เพียง 1 เครื่องเท่านั้น เนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงไม่สามารถประมาณการใช้ไอน้ำในแต่ละช่วงกระบวนการได้ เพียงให้แน่ใจว่าจะมีไอน้ำที่เพียงพอต่อกระบวนการฆ่าเชื้อ ดังนั้นการเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อจึงต้องมีการจัดลำดับการใช้งาน (ดังแสดงในภาคผนวก ก) โดยได้ทำการจัดลำดับการใช้งานเครื่อง

ฆ่าเชื้อสำหรับวันการผลิตที่ได้ทำการศึกษา (16 พฤษภาคม 2558) ซึ่งในวันการผลิตนี้จะมีการเปิดใช้อุปกรณ์ความร้อนต่างๆ ดังตารางที่ 5.2 และมีปริมาณการผลิตเท่ากับ 10 Batch หรือเท่ากับ 158,112 กระป๋อง

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลพื้นฐานของหม้อไอน้ำของโรงงาน

ข้อมูลพื้นฐานของหม้อไอน้ำ	
เป็นหม้อไอน้ำ แบบท่อไฟ (Fire tube boiler)	-
อัตราการกำเนิดไอน้ำต่อหม้อ (เต็มความจุ)	2 ton/h
ชนิดของเชื้อเพลิง	น้ำมันเตา เกรด A
ค่าความร้อนของน้ำมันเตา (LHV)	39.466 MJ/kg
อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเตา	25,000-40,000 L/เดือน
อุณหภูมิน้ำเข้าหม้อไอน้ำ	40-80°C
ความดันของไอน้ำ (ความดันเกจ)	8 bar <sub>g</sub>
อุณหภูมิของไอน้ำ	~170°C
อุณหภูมิที่ปล่องไฟ	140-260°C
อุณหภูมิอากาศที่ใช้เผาไหม้ (อากาศจ่ายเข้าหม้อไอน้ำ)	-
อุณหภูมิเชื้อเพลิงที่หัวพ่น	~100°C
%โดยมวลของ O <sub>2</sub> ในสิ่งแวดล้อม	17%

ตารางที่ 5.2 อุปกรณ์ทางความร้อนที่เปิดใช้งานในวันการผลิตที่ทำการวิเคราะห์

ลำดับที่	รายการอุปกรณ์	ปริมาณการผลิต (Batch)
1	หม้อต้ม 1	10
2	หม้อต้ม 2	10
3	APV 4000L	10
4	ถังน้ำร้อนล้างกระป๋อง	10
5	ถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำ	10
6	เครื่องฆ่าเชื้อ (Retort)	10

เนื่องจากอุปกรณ์ทางความร้อนอื่นๆ สามารถทำการตรวจวัดได้จากการตรวจปริมาณของคอนเดนเสท และจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ทำให้ทราบถึงอัตราการใช้น้ำของเครื่องฆ่าเชื้อในแต่ละช่วงกระบวนการ เมื่อทำการจัดการการเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อตามปริมาณการผลิตแล้ว พบว่าในวันการผลิตที่ทำการพิจารณาในส่วนของกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันมีปริมาณการใช้น้ำเท่ากับ 7982.783 กิโลกรัมต่อวัน โดยน้ำในส่วนนี้เป็นส่วนของการฆ่าเชื้อ แต่ในกระบวนการผลิตจริงจะมีการให้ความร้อนกับเครื่องฆ่าเชื้อก่อนกระบวนการผลิตเพื่อเป็นการอุ่นเครื่อง ระยะเวลาที่ใช้โดยประมาณคือ 30 นาทีโดยปริมาณน้ำที่ใช้ในช่วงของการอุ่นเครื่องมีค่าเท่ากับ 295.756 กิโลกรัมต่อเครื่อง ดังนั้นเมื่อรวมปริมาณการใช้น้ำของอุปกรณ์อื่นๆ (ตาราง ข.6 ภาคผนวก ข) ร่วมด้วยพบว่าในวันการผลิตที่ทำการพิจารณามีปริมาณการใช้น้ำเท่ากับ 21,126.72 กิโลกรัม เมื่อพิจารณาเวลาที่ผลิตในวันที่ 16 พฤษภาคม 2558 โดยอ่านจากมิเตอร์น้ำเข้าหม้อไอน้ำ พบว่าในวันที่ทำการพิจารณา มีอัตราการผลิต ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ปริมาณน้ำที่ผลิต (16 พฤษภาคม 2558) ได้จากการอ่านมิเตอร์น้ำเข้าหม้อไอน้ำ

แผนการผลิต	ปริมาณการผลิต (Batch)	ชม. ทำงาน	น้ำเต็มใหม่ (L)	น้ำเข้า Boiler (L)	น้ำกลับ (L)
น้ำมะพร้าวกระป๋อง	10	15.5	12,940	22,000	9,060

จากตารางที่ 5.3 พบว่ามีปริมาณการผลิตน้ำเท่ากับ 22,000 กิโลกรัม จะเห็นว่าเมื่อเราทราบปริมาณความต้องการใช้น้ำที่แท้จริงแล้ว พบว่าในกระบวนการผลิตจริงมีการผลิตน้ำในปริมาณที่เกินต่อความต้องการ เพราะเนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงไม่ทราบถึงปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริงของเครื่องฆ่าเชื้อ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผลิตในปริมาณที่เกินต่อความต้องการ และน้ำที่ถูกผลิตเกินเหล่านี้จะถูกส่งไปยังระบบท่อปลายทาง ซึ่งจากรูปแบบการวางท่อของทางโรงงานพบว่าท่อไอน้ำที่อยู่ห่างจากหม้อไอน้ำมากๆ จะไม่มีการเดินทวนกลับมายังหม้อไอน้ำ เนื่องจากพื้นที่มีความชื้นซอมนและไม่คุ้มค่ากับการเดินระบบท่อกับมา จึงมีการปล่อยน้ำเหล่านั้นทิ้งไป ซึ่งน้ำส่วนหนึ่งที่ปล่อยคือน้ำที่เกินต่อความต้องการของอุปกรณ์ เมื่อทำการพิจารณาเวลาที่เกินต่อความต้องการพบว่าในวันผลิตที่เป็นกรณีศึกษา มีการผลิตน้ำที่เกินต่อความต้องการในปริมาณเท่ากับ 873.28 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อคิดเป็นปริมาณในส่วนของการเชื้อเพลิง พบว่าในส่วนของการผลิตเกินจะใช้น้ำมันเตาในปริมาณเท่ากับ 68.91 กิโลกรัม หรือคิดเป็นเงิน 724.71 บาท ซึ่งถ้า



ปรับอัตราการผลิตไอน้ำลงมาตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้นจะทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ถึง 724.71 บาทต่อวัน ซึ่งสามารถสรุปเป็นมาตรการประหยัดพลังงานได้ดังนี้

ตารางที่ 5.4 มาตรการประหยัดพลังงานในส่วนของการผลิตไอน้ำ

การวิเคราะห์ผลตอบแทนและค่าใช้จ่าย		
ปริมาณไอน้ำที่ประหยัดได้	873.28	กิโลกรัม/วัน
คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อนที่ได้มาจากไอน้ำที่ประหยัดได้	724.71	บาท/วัน
การคำนวณมาตรการ		
ข้อมูลเบื้องต้น		
จำนวนเครื่องฆ่าเชื้อ	5	เครื่อง
ปริมาณไอน้ำที่ผลิตก่อนมาตรการ	22,000	กิโลกรัม/วัน
ปริมาณไอน้ำที่ผลิตหลังมาตรการ	21,126.72	กิโลกรัม/วัน
ราคาน้ำมันเตา	10.5	ลิตร/บาท
ระยะเวลาทำงาน	15.5	ชม./วัน
ผลประหยัด		
คิดเป็นปริมาณน้ำมันเตาที่ประหยัดได้	68.91	กิโลกรัม
คิดเป็นเงินที่ประหยัดปริมาณน้ำมันเตาได้	724.71	บาท

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิเคราะห์

จุดประสงค์เพื่อต้องการแสดงขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์หาอัตราการใช้น้ำของเครื่องฆ่าเชื้อในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันภายใต้ปัจจัยการผลิตของโรงงาน

#### 6.1 วิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

ในกระบวนการผลิตจริงการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน ช่วงที่สำคัญมากที่สุดของกระบวนการก็คือช่วงของไต่อากาศ เนื่องจากจำเป็นต้องกำจัดอากาศให้คงเหลืออยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อให้น้อยที่สุด เพราะหากภายในเครื่องฆ่าเชื้อยังคงมีอากาศหลงเหลืออยู่ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื่อนั้นมีค่าไม่สม่ำเสมอทำให้เชื้อโรคที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ไม่ถูกทำลายไปทั้งหมด และในช่วงของการไต่อากาศนี้ยังเป็นช่วงของการทำอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของการฆ่าเชื้อที่ถูกกำหนดขึ้น โดยมาตรฐานการผลิตของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงไม่สามารถทราบถึงอัตราการใช้น้ำที่แน่นอนในช่วงของการฆ่าเชื้อนี้ได้และเพื่อให้มั่นใจว่าจะมีไอน้ำที่เพียงพอสำหรับกระบวนการไต่อากาศจึงมีข้อกำหนดขึ้นมา คือหากมีการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันในช่วงไต่อากาศนั้นสามารถเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อได้เพียง 1 เครื่อง หมายความว่าไม่สามารถเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อได้พร้อมกัน 2 เครื่อง แต่หากเครื่องแรกเสร็จสิ้นกระบวนการไต่อากาศแล้วสามารถเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้ออีกเครื่องได้ โดยจากผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองพบว่าอัตราการใช้น้ำสูงสุดสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อเกิดขึ้นในช่วงของการไต่อากาศ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ จึงได้ทำการนำเสนอแนวความคิดต่อการไต่อากาศ ดังนี้

ตารางที่ 6.1 อัตราการใช้น้ำเมื่อเพิ่มจำนวนเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงไต่อากาศ

จำนวนเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้ในการไต่อากาศ	อัตราการใช้น้ำ (kg/h)
1	656.47
2	1312.93

ตารางที่ 6.1 อัตราการใช้ไอน้ำเมื่อเพิ่มจำนวนเครื่องฆ่าเชื้อในช่วงไต่อากาศ (ต่อ)

จำนวนเครื่องฆ่าเชื้อ ที่ใช้ในการไต่อากาศ	อัตราการใช้ไอน้ำ (kg/h)
3	1969.40
4	2625.87
5	3282.34

จากตารางที่ 6.1 แสดงถึงอัตราการใช้ไอน้ำในช่วงไต่อากาศ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนการใช้งานของเครื่องฆ่าเชื้อ โดยโรงงานการผลิตที่ได้ทำการศึกษาวิจัยนั้นมีเครื่องฆ่าเชื้อทั้งหมด 5 เครื่อง ดังนั้นจากตารางที่ 6.1 จึงทำให้ทราบว่าเมื่อต้องการเปิดใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อมากกว่า 1 เครื่องโดยเปิดใช้งานพร้อมกันในช่วงไต่อากาศจะต้องผลิตไอน้ำในอัตราเท่าใดจึงจะเพียงพอต่อกระบวนการนี้ แต่สำหรับกระบวนการผลิตจริงไม่ได้มีเฉพาะเครื่องฆ่าเชื้อเท่านั้นที่ต้องการใช้ไอน้ำ ยังมีการเปิดใช้งานอุปกรณ์ความร้อนอื่นๆ ร่วมด้วย และด้วยข้อจำกัดของการผลิตไอน้ำ เนื่องจากหม้อไอน้ำที่ใช้ในการผลิตไอน้ำมีอัตราการผลิตสูงสุดเท่ากับ 2,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จำนวน 2 หม้อ และในความเป็นจริงก็ไม่สามารถผลิตให้ได้ตามอัตราผลิตสูงสุดได้ และยังเป็นภาระสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นอย่างมากหากทำการผลิตที่อัตราสูงสุด ซึ่งจากการวิเคราะห์หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพเท่ากับ 90.7% ดังนั้นหากผลิตที่อัตราสูงสุดและพร้อมกันทั้งสองหม้อจะผลิตไอน้ำได้เพียงหม้อละ 766 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งไม่เพียงพอต่อการไต่อากาศเกิน 2 เครื่อง จากตารางที่ 6.1 เป็นเพียงการเสนอแนวทางหากต้องการไต่อากาศพร้อมกันมากกว่า 1 เครื่อง จะต้องมีอัตราการผลิตไอน้ำที่เท่ากับหรือมากกว่าค่าอัตราการใช้ไอน้ำดังที่แสดงในตารางที่ 6.1

## 6.2 สรุปผลการศึกษาวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยที่สำคัญสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้ วิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์กระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน โดยสามารถทราบได้จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยภายใต้กระบวนการผลิตที่ทำการศึกษาวิเคราะห์นั้นพบว่าในช่วงกระบวนการไต่อากาศมีอัตราการใช้ไอน้ำคิดเป็นร้อยละ 64 และในช่วงของการฆ่าเชื้อมีอัตราการใช้ไอน้ำคิดเป็นร้อยละ 36 ของอัตราการใช้ไอน้ำตลอดทั้งกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

โดยสาเหตุที่ทำให้ในช่วงของการปล่อยอากาศนั้นปริมาณการใช้ไอน้ำที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากในช่วงเริ่มต้นความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อต่ำกว่าความดันไอน้ำที่จ่ายเข้าไปมากทำไอน้ำที่ความดันสูงกว่าไหลเข้าไปภายในเครื่องฆ่าเชื้อเป็นจำนวนมากเนื่องจากความดันแตกต่าง รวมถึงในช่วงนี้มีการเปิดท่อปล่อยอากาศเพื่อระบายอากาศที่อยู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อออกทำให้มีไอน้ำบางส่วนไหลออกไปด้วย จากอัตราการจ่ายไอน้ำที่ค่อนข้างสูงในช่วงแรกนี้ส่งผลให้กราฟอุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ ทำให้กราฟอุณหภูมิในช่วงนี้มีความชันสูงเพราะอุณหภูมิเพิ่มอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปความดันภายในเครื่องฆ่าเชื้อสูงขึ้นทำให้อัตราการจ่ายไอน้ำค่อยๆ ลดลงส่งผลทำให้กราฟอุณหภูมิในช่วงเวลาต่อมามีความชันลดลงหรือก็คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หากทำการคิดเป็นอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชันใน 1 วันการผลิตสามารถคิดเป็นร้อยละ 46.97 ของปริมาณไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้ในวันการผลิตนั้นๆ จากการวิเคราะห์การเดินเครื่องของเครื่องฆ่าเชื้อพบว่าในวันการผลิตที่ทำการพิจารณามีการผลิตไอน้ำเกินต่อความต้องการถึง 873.28 กิโลกรัม หรือคิดเป็นเงินในส่วนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 724.71 บาท ดังนั้นหากลดอัตราการผลิตลงมาตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 5 จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ถึง 724.71 บาทต่อวัน ดังนั้นการทราบปริมาณการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการของการฆ่าเชื้อจากวิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการจัดการเดินเครื่องฆ่าเชื้อเพื่อการประหยัดพลังงาน

## รายการอ้างอิง

- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย (2555). การศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนที่มีต่ออัตราการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำตาล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ธีระชาติ พรพิบูลย์ (2559). เทอร์โมไดนามิกส์, ม.ป.ท.
- ศุภวุฒิ สารเชษฐ์ (2547). การปรับปรุงช่วงเวลาไล่อากาศของหม้อฆ่าเชื้อเพื่อประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ม.ป.ท.
- Cengel, Y.A, and Boles, M.A. (1994). **Thermodynamics an engineering approach (3<sup>th</sup> edition)**, McGrawHill.
- Stoecker, W.F. (1989). **Design of Thermal System (3<sup>th</sup> edition)**, McGrawHill
- ASHRAE Fundamentals Handbook, (2001). **Thermophysical Properties Refrigerants**.
- M.N.Berteli, A.A.Vitali, A. Marsaioli Jr, M.L.Berto. (2012). The analysis of an alternative approach to the venting process in retort operating under steam pressure, **Journal of food Engineering**, 109, pp. 388-398.
- H.S. Ramaswamy and S.Grabowski. (1999). Thermal Processing of Pacific Salmon in Steam / Air and Water-Immersion Still Retorts : Influence of Container Type/ Shape on Heating Behavior, **Lebensm- Wiss. u.Technol.**, 32, pp. 12-18.
- C.R. Chen, R.H. Ramaswamy. (2002). Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms, **Journal of food Engineering**, 53, pp. 209-220.
- Timothy D. Durand. (1997). Improving canned food quality variable retort temperature process, **Trends in food Science & Technology**, vol.8, pp.113-118.
- R.Simpson, C.Cortes, A.Teixeira. (2005). Energy consumption in batch thermal processing model development and validation, **Journal of food Engineering**, 73, pp. 217.



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลผ่านระบบ  
ท่อใล่อากาศ ( $K_c$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ ( $K_s$ )

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลผ่านระบบท่อไล่อากาศ ( $K_v$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ ( $K_s$ ) จากวิธีการ เซมิ เอ็มพีริคัล โดยใช้ระเบียบวิธีแบบแลททิซ

ความดัน ภายใน (kPa)	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไล่อากาศ ( $K_v$ )	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไอน้ำ ( $K_s$ )	ความดัน ภายใน (kPa)	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไล่อากาศ ( $K_v$ )	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไอน้ำ ( $K_s$ )
22.293	1.000	0.180	105.285	0.873	0.180
24.629	0.977	0.180	107.127	0.870	0.180
27.391	0.950	0.180	108.511	0.867	0.180
30.379	0.945	0.180	109.532	0.864	0.180
33.614	0.939	0.180	110.277	0.861	0.180
37.349	0.933	0.180	110.827	0.850	0.180
41.547	0.927	0.180	111.338	0.838	0.180
46.083	0.921	0.180	111.789	0.826	0.180
50.967	0.915	0.180	112.201	0.814	0.180
56.183	0.909	0.180	112.588	0.802	0.180
61.136	0.903	0.180	112.961	0.790	0.180
66.253	0.900	0.180	113.329	0.778	0.180
71.508	0.897	0.180	113.696	0.766	0.180
76.828	0.894	0.180	114.067	0.754	0.180
82.110	0.891	0.180	114.445	0.742	0.180
87.216	0.888	0.180	114.830	0.730	0.180
91.978	0.885	0.180	115.226	0.718	0.180
96.236	0.882	0.180	115.632	0.706	0.180
99.888	0.879	0.180	116.051	0.694	0.180
102.895	0.876	0.180	116.482	0.682	0.180

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลผ่านระบบท่อไล่อากาศ ( $K_v$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ ( $K_s$ ) จากวิธีการ เชมิ เอ็มพีริคัล โดยใช้ระเบียบวิธีแบบแลททิซ (ต่อ)

ความดัน ภายใน (kPa)	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไล่อากาศ ( $K_v$ )	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไอน้ำ ( $K_s$ )	ความดัน ภายใน (kPa)	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไล่อากาศ ( $K_v$ )	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย ของท่อไอน้ำ ( $K_s$ )
116.928	0.670	0.180	128.091	0.469	0.180
117.388	0.658	0.180	128.777	0.460	0.180
117.863	0.646	0.180	129.478	0.451	0.180
118.354	0.634	0.180	130.195	0.442	0.180
118.862	0.622	0.180	130.929	0.433	0.180
119.388	0.610	0.180	131.683	0.424	0.180
119.931	0.598	0.180	132.459	0.415	0.180
120.494	0.586	0.180	133.256	0.406	0.180
121.077	0.574	0.180	134.077	0.397	0.180
121.680	0.562	0.180	134.922	0.388	0.180
122.305	0.550	0.180	135.793	0.379	0.180
122.928	0.541	0.180	136.691	0.370	0.180
123.535	0.532	0.180	137.616	0.361	0.180
124.135	0.523	0.180	138.530	0.350	0.180
124.734	0.514	0.180			
125.414	0.505	0.180			
126.082	0.496	0.180			
126.747	0.487	0.180			
127.415	0.478	0.180			



ตารางที่ ก.2 ตารางตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของการไหลผ่านระบบท่อ  
ใล่อากาศ ( $K_v$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้าของไอน้ำ ( $K_s$ ) ด้วยระเบียบวิธี  
แบบแลททิซ

		$K_v$									
		1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
$K_s$	Percentage Error of Temperature between Modelling and Measurement										
0.1	0.14	0.16	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	
0.2	0.35	0.37	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.50	0.53	
0.3	0.55	0.58	0.60	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75	
0.4	0.76	0.79	0.81	0.83	0.86	0.88	0.90	0.92	0.93	0.95	
0.5	0.96	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	
0.6	1.16	1.19	1.21	1.23	1.25	1.27	1.29	1.31	1.33	1.35	
0.7	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45	1.47	1.49	1.51	1.53	1.55	
0.8	1.57	1.59	1.62	1.64	1.66	1.68	1.70	1.72	1.74	1.75	
0.9	1.78	1.80	1.83	1.85	1.87	1.89	1.91	1.93	1.95	1.96	
1	1.99	2.02	2.04	2.06	2.08	2.10	2.12	2.14	2.16	2.18	

		$K_v$				
		1.00	0.95	0.90	0.85	0.80
$K_s$	Percentage Error of Temperature between Modelling and Measurement					
0.10	0.136	0.124	0.164	0.105	0.189	
0.15	0.159	0.073	0.191	0.206	0.221	
0.20	0.346	0.275	0.372	0.306	0.396	
0.25	0.360	0.375	0.390	0.405	0.419	
0.30	0.554	0.475	0.579	0.504	0.603	

จากตารางที่ ก.2 จะเห็นว่าช่วงของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่มีค่าต่ำสุด  
จะอยู่ในช่วง ของ  $K_s$  มีค่าระหว่าง 0.1-0.3 และ  $K_v$  มีค่าระหว่าง 0.8-1 จากนั้นทำการแบ่งช่วงใน  
ค่าของ  $K_s$  และ  $K_v$  ให้มีช่วงที่ละเอียดมากขึ้นกว่าเดิมแล้วทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์

ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอีกครั้ง จนกว่าจะได้ค่า  $K_s$  และ  $K_v$  ที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิต่ำที่สุด



ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์อัตราการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางความร้อนจากการตรวจวัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 การหาอัตราการใช้น้ำของ APV1700L

การหาอัตราการใช้น้ำของ APV 1700 L ในขณะพาสเจอร์ไรส์น้ำกระเจี๊ยบ (Flow=1900 L/h.)

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	2.0	28.65	N/A	98.0	0.070	252.0
2	2.0	26.28	N/A	98.0	0.076	273.6
3	2.0	24.69	N/A	98.0	0.081	291.6
4	2.0	25.47	N/A	98.0	0.079	284.4
5	2.0	26.44	N/A	98.0	0.076	273.6
6	2.0	25.25	N/A	98.0	0.079	284.4
7	2.0	21.40	N/A	98.0	0.093	334.8
8	2.0	23.82	N/A	98.0	0.084	302.4
9	2.0	24.07	N/A	98.0	0.083	298.8
10	2.0	25.28	N/A	98.0	0.079	284.4
					เฉลี่ย	288.0

การหาอัตราการใช้น้ำของ APV 1700 L ในขณะพาสเจอร์ไรส์ Benecol (Flow=1670 L/h.)

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	2.0	39.81	N/A	110.0	0.050	180.0
2	2.0	40.50	N/A	110.0	0.049	176.4
3	2.0	40.44	N/A	110.0	0.049	176.4
4	2.0	38.91	N/A	110.0	0.051	183.6
5	2.0	39.22	N/A	110.0	0.051	183.6
6	2.0	39.54	N/A	110.0	0.051	183.6
7	2.0	41.00	N/A	110.0	0.049	176.4
8	2.0	40.56	N/A	110.0	0.049	176.4

การหาอัตราการใช้น้ำของ APV 1700 L ในขณะที่พาสเจอร์ไรส์ Benecol (Flow=1670 L/h.) (ต่อ)

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
9	2.0	37.72	N/A	110.0	0.053	190.8
10	2.0	40.75	N/A	110.0	0.049	176.4
					<b>เฉลี่ย</b>	180.4

การหาอัตราการใช้น้ำของ APV 1700 L ในขณะที่ล้างเครื่อง (Flow=5600 L/h.)

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	2.0	10.48	N/A	110.0	0.191	687.6
2	2.0	10.40	N/A	110.0	0.192	691.2
3	2.0	9.97	N/A	110.0	0.201	723.6
4	2.0	9.25	N/A	110.0	0.216	777.6
5	2.0	10.19	N/A	110.0	0.196	705.6
6	2.0	10.22	N/A	110.0	0.196	705.6
7	2.0	10.58	N/A	110.0	0.189	680.4
8	2.0	9.93	N/A	110.0	0.201	723.6
9	2.0	9.88	N/A	110.0	0.205	738.0
10	2.0	9.41	N/A	110.0	0.213	766.8
					<b>เฉลี่ย</b>	720.0

ตารางที่ ข.2 การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างกระป๋อง

การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างกระป๋องในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิ

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	1.0	20.38	0.7	29.1	0.0491	176.8
2	1.0	19.50	0.7	N/A	0.0513	184.7
3	1.0	20.00	0.7	N/A	0.0500	180.0
4	1.0	21.18	0.84	79.0	0.0472	169.9
<b>เฉลี่ย</b>						177.8

การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างกระป๋องในขณะที่รักษาอุณหภูมิ

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	1.0	99.66	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0100	36.0
2	1.0	49.28	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0200	72.0
3	1.0	108.06	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0090	32.4
4	1.0	59.91	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0170	61.2
5	1.0	135.78	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0070	25.2
6	1.0	148.97	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0070	25.2
7	1.0	44.22	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0230	82.8
8	1.0	174.66	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0060	21.6
9	1.0	50.57	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0200	72.0
10	1.0	90.94	ตัดต่อ 3.2-3.5	90.0	0.0110	39.6
<b>เฉลี่ย</b>						46.8

ตารางที่ ข.3 การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างห้องบรรจุ

การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างห้องบรรจุในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิ

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	0.5	7.00	1.0	94.8	0.0710	255.6
2	0.5	7.42	1.0	N/A	0.0670	241.2
3	0.5	6.44	1.0	N/A	0.0780	280.8
4	0.5	7.28	1.0	N/A	0.0690	248.4
5	0.5	6.77	1.2	94.8	0.0740	266.4
6	0.5	7.53	1.2	N/A	0.0660	237.6
7	0.5	7.54	1.2	N/A	0.0660	237.6
8	0.5	7.10	1.2	N/A	0.0700	252.0
9	0.5	7.84	1.4	N/A	0.0640	230.4
10	0.5	8.03	1.4	N/A	0.0620	223.2
					<b>เฉลี่ย</b>	<b>247.3</b>

การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนล้างห้องบรรจุในขณะที่รักษาอุณหภูมิ

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	1.0	160.25	ตัดต่อ 1.0-7.0	N/A	0.0060	21.6
2	3.8	80.00	ตัดต่อ 1.0-7.0	N/A	0.0480	172.8
3	5.8	548.59	ตัดต่อ 1.0-7.0	N/A	0.0110	39.6
4	2.0	339.21	ตัดต่อ 1.0-7.0	N/A	0.0060	21.6
5	4.0	552.97	ตัดต่อ 1.0-7.0	N/A	0.0070	25.2
					<b>เฉลี่ย</b>	<b>56.2</b>

ตารางที่ ข.4 การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำ

การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิ

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	0.5	62.19	ตัดต่อ 2.5-2.7	94.8	0.0080	28.8
2	0.5	47.41	ตัดต่อ 2.5-2.7	N/A	0.0105	37.8
3	0.5	53.00	ตัดต่อ 2.5-2.7	N/A	0.0094	33.8
4	0.5	47.94	ตัดต่อ 2.5-2.7	N/A	0.0104	37.4
5	0.5	47.87	ตัดต่อ 2.5-2.7	94.8	0.0109	39.2
6	0.5	65.12	ตัดต่อ 2.5-2.7	N/A	0.0077	27.7
7	0.5	45.94	ตัดต่อ 2.5-2.7	N/A	0.0109	39.2
8	0.5	56.00	ตัดต่อ 2.5-2.7	N/A	0.0089	32.0
					<b>เฉลี่ย</b>	<b>34.5</b>

การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำในขณะที่รักษาอุณหภูมิ

ครั้งที่	ปริมาตร (L)	เวลา (s)	ความดัน (Bar g)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเกิด Condensate (kg/s)	อัตราการเกิด Condensate (kg/h.)
1	0.5	85.31	ตัดต่อ 2.5-2.9	93.4	0.0059	21.2
2	0.5	71.29	ตัดต่อ 2.5-2.9	93.5	0.0070	25.2
3	0.5	76.97	ตัดต่อ 2.5-2.9	93.6	0.0065	23.4
4	0.5	71.00	ตัดต่อ 2.5-2.7	93.7	0.0070	25.2
5	0.5	87.63	ตัดต่อ 2.5-2.7	93.9	0.0057	20.5
6	0.5	69.97	ตัดต่อ 2.5-2.7	94.0	0.0071	25.6
7	0.5	75.46	ตัดต่อ 2.5-2.7	94.1	0.0066	23.8
8	0.5	68.28	ตัดต่อ 2.5-2.7	94.2	0.0079	28.4
					<b>เฉลี่ย</b>	<b>24.2</b>



น้ำร้อนจากถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำจะใช้ในการล้างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องผสมสาร ห้องต้ม ห้องสกัด ห้องล้างและห้องคั้นผลไม้ รวมไปถึงฉีดล้างในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีการใช้งานอย่างไม่มีรูปแบบที่ตายตัวไม่สามารถนับจำนวนครั้งที่ใช้งานหรือชั่วโมงการใช้งานที่แน่นอนได้ จึงถือเป็นส่วนการล้างสนับสนุนที่อยู่นอกเหนือจากผังผลิตภัณฑ์แทน ซึ่งมีอัตราการใช้น้ำประมาณ 400-600 kg/วัน

- การหาอัตราการใช้น้ำของ APV 4000L

คอนเดนเสทที่ได้จากเครื่อง APV 4000L จะถูกนำกลับถึงน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Feed Water Tank) ทั้งหมด โดยไม่มีการปล่อยทิ้งคอนเดนเสท ดังนั้นการหาอัตราการใช้น้ำจึงไม่สามารถใช้วิธีการตรวจวัดปริมาตรได้ ทั้งนี้เครื่อง APV 4000L ถือว่ามีขนาดเป็น 2 เท่าของเครื่อง APV 1700L ซึ่งมวลไอน้ำที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรส์ของ APV 1700L ที่อุณหภูมิ 98 °C และมีอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการประมาณ 2,000 L/h จะเท่ากับ 288.0 kg/h ดังนั้นเครื่อง APV 4000L จะใช้มวลไอน้ำในการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 98 °C และมีอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการประมาณ 4,000 L/h เท่ากับ  $288.0 \times 2 = 576.0$  kg/h

ในส่วนของการล้างเครื่อง APV 4000L จะมีอัตราการไหลที่เท่ากับกับเครื่อง APV 1700L คือ ประมาณ 5,500-6,000 L/h กล่าวคือ เครื่อง APV 1700L และ APV 4000L จะมีอัตราการใช้น้ำสำหรับกระบวนการล้างที่เท่ากันเท่ากับ 720.0 kg/h

เนื่องจากปริมาตรที่ได้จากการตรวจวัดปริมาตรคือคอนเดนเสทที่ปล่อยออกมาจากเครื่อง APV4000L ที่มีความดันภายในสูงกว่าความดันบรรยากาศจึงมีไอน้ำเกิดใหม่ หรือ Flash Steam เกิดขึ้นด้วยซึ่งส่วนนี้ก็เป็นอีกส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้จึงต้องวิเคราะห์ปริมาณไอน้ำส่วนนี้เพิ่มไปด้วย

วิเคราะห์ Flash Steam ของ APV 4000L เราสามารถหาอัตราการเกิด Flash Steam ได้จากการวิเคราะห์เนื่องจากไอน้ำส่วนนี้จะมีปริมาณความร้อนแฝง (Latent Heat) สูงเท่ากับไอน้ำปกติที่ความดันที่ถูกปล่อยออกมา ดังนั้น Flash Steam จะมีค่าเท่ากับ

$$x_{fs} = \frac{h_{f@P_1} - h_{f@P_2}}{h_{fg@P_2}}$$

$$x_{fs} = \frac{604.66 - 419.06}{2256.5}$$

$$x_{fs} = 0.082$$

$$\dot{m}_{fs} x_{fs} = \frac{\text{kg, flash}}{\text{kg, hot water}} = \frac{m_g}{m_{total}} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \quad \text{ดังนั้น เราสามารถหา Flash Steam หรือ}$$

$m_g$  ได้จาก

$$\dot{m}_g = \frac{0.082(576.0)}{(1-0.082)} \quad \text{kg/h}$$

$$\dot{m}_g = 51.45 \quad \text{kg/h}$$

ดังนั้นมวลไอน้ำที่อุปกรณ์ใช้จะมีค่าเท่ากับ มวลคอนเดนเสทที่ได้จากการตรวจวัดปริมาตรรวมกับ Flash Steam ที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าเท่ากับ 621.45 kg/h

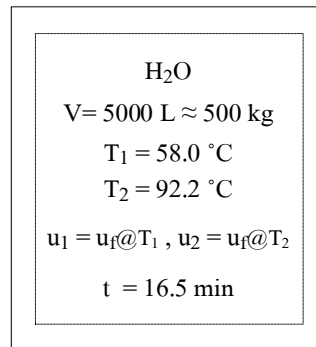
รวมถึงอุปกรณ์อื่นๆ ที่ทำการตรวจวัดปริมาตรจำเป็นต้องวิเคราะห์ Flash Steam ร่วมด้วย เนื่องจากทุกอุปกรณ์ที่มีการปล่อยคอนเดนเสทจึงมีการเกิด Flash Steam และไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นเพื่อความแม่นยำและเพื่อให้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีความถูกต้องมากขึ้นจำเป็นต้องพิจารณาส่วนนี้เพิ่มเข้าไป

- การหาอัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม

คอนเดนเสทที่ได้จากหม้อต้มจะถูกนำกลับถึงน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Feed Water Tank) ทั้งหมดโดยไม่มีการปล่อยทิ้งคอนเดนเสท ดังนั้นการหาอัตราการใช้ไอน้ำจึงไม่สามารถใช้วิธีการตรวจวัดปริมาตรได้เช่นกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำได้จากการสมดุลพลังงาน

จากการศึกษาการต้มน้ำของหม้อต้ม 1 ที่มีความจุประมาณ 500 L เริ่มต้มน้ำที่อุณหภูมิ 58.0°C ไปจนถึงอุณหภูมิ 92.2 °C ภายในเวลา 16.5 นาที จะสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการต้มได้ดังนี้

### Jacket 1



รูปที่ ข.1 เงื่อนไขในการต้มน้ำเพื่อทำอุณหภูมิของหม้อต้ม 1

$$Q - w = \Delta U \quad [\text{kJ}]$$

$$\dot{Q}_s - \dot{w} = \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad [\text{kW}]$$

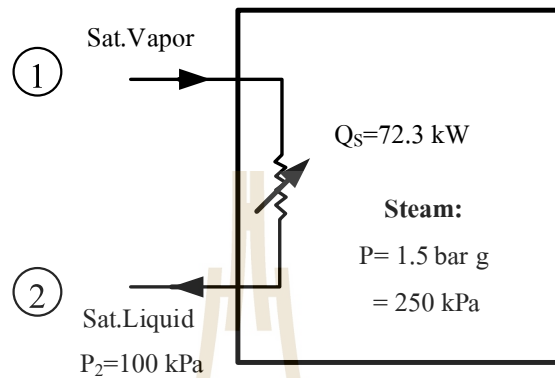
$$\dot{Q}_s = \frac{m(u_2 - u_1)}{\Delta t}$$

แทนค่า ลงในสมการ จะได้

$$\dot{Q}_s = \frac{(500 \text{ kg})(385.9 - 242.75 \text{ kJ/kg})}{16.5 \times 60 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_s = 72.3 \text{ kW}$$

ได้อัตราความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการภายในเวลา 16.5 นาที ของหม้อต้ม เท่ากับ 72.3 kW (เมื่อพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ) และสามารถคำนวณหาอัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม 1 ได้ ดังนี้



รูปที่ ข.2 การหาอัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม

$$-\dot{Q}_S = \dot{m}_S (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_S (h_{g@250\text{kPa}} - h_{f@100\text{kPa}})$$

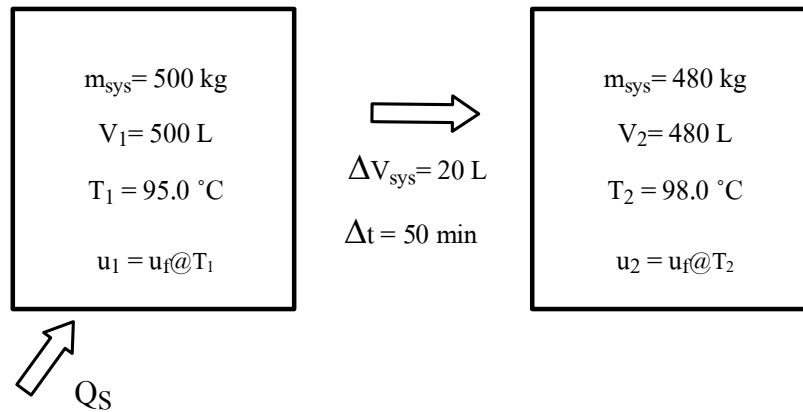
$$72.3 \text{ kW} = \dot{m}_S (2716.9 - 417.46 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{m}_S = 0.0314 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_S = 113.2 \text{ kg/h}$$

ได้อัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม 1 ในช่วงทำอุณหภูมิเท่ากับ 113.2 kg/h ซึ่งหม้อต้ม 2 ที่มีความจุเท่ากับหม้อต้ม 1 นั้น จะมีอัตราการใช้น้ำที่เท่ากับ 113.2 kg/h เช่นกัน

ในการวิเคราะห์อัตราการใช้น้ำในช่วงการรักษารูปร่างอุณหภูมินั้น จะมีวิธีการคำนวณในทำนองเดียวกัน พิจารณาจากมวลน้ำที่หายไปจากระบบในขณะที่ต้มเพื่อรักษารูปร่าง อุณหภูมิ ประมาณ 20 L ในช่วงเวลา 50 นาที ในที่นี้ใช้ความดันในการต้มน้ำ เท่ากับ 0.6 bar g (160 kPa)



รูปที่ ข.3 เงื่อนไขในการต้มเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำในหม้อต้ม

อัตราของมวลน้ำที่หายไปจากระบบสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\dot{m}_{\text{out}} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

$$\dot{m}_{\text{out}} = \frac{500 - 480 \text{ kg}}{50 \times 60 \text{ s}} = 0.0067 \text{ kg/s}$$

สามารถคำนวณอัตราการใช้พลังงานในการต้มเพื่อรักษาอุณหภูมิได้จาก

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_{\text{out}} h_{g@100\text{kPa}} + \frac{m_{\text{sys}1} u_1 - m_{\text{sys}2} u_2}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_S = (0.0067 \text{ kg/s})(2675.5 \text{ kJ/kg}) + \frac{(480 \text{ kg})(410.5 \text{ kJ/kg}) - (500 \text{ kg})(397.88 \text{ kJ/kg})}{50 \times 60 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_S = 17.3 \text{ kW}$$

ได้อัตราความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเวลา 50 นาที ที่ความดัน 160 kPa เท่ากับ 17.3 kW (เมื่อพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ) และสามารถคำนวณหาอัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม 1 ได้ด้วยวิธีการในแนวทางเดียวกัน ได้เท่ากับ 0.0079 kg/s หรือ 28.4 kg/h

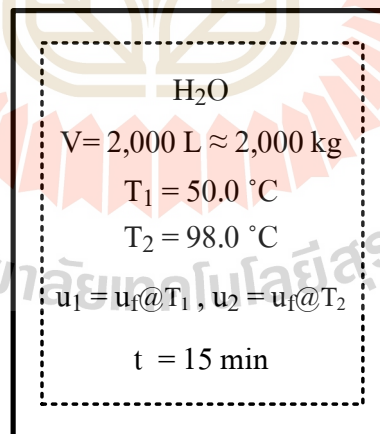
เนื่องจาก หม้อต้มมีทั้งช่วงทำอุณหภูมิและช่วงรักษาอุณหภูมิ เมื่อต้องการพิจารณาการใช้น้ำใน 1 ชม. จะต้องคิดรวมทั้ง 2 ช่วงโดยสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

อัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม = (อัตราการใช้น้ำช่วงทำอุณหภูมิ (kg/h))(16min/60min) (1h) + (อัตราการใช้น้ำช่วงรักษาอุณหภูมิ (kg/h))(44min/60min) (1h)

- การหาอัตราการใช้น้ำของถังน้ำร้อนหม้อสกัด

คอนเดนเสทที่ได้จากถังน้ำร้อนหม้อสกัด จะถูกนำกลับถึงน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Feed Water Tank) ทั้งหมดโดยไม่มีการปล่อยทิ้งคอนเดนเสท ดังนั้นการหาอัตราการใช้น้ำจึงไม่สามารถใช้วิธีการดวงวัดปริมาตรได้เช่นกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์อัตราการใช้น้ำได้จากการสมดุลพลังงาน

จากการศึกษาการต้มน้ำของถังน้ำร้อนสกัดกาแฟ ที่มีความจุประมาณ 2000 L เริ่มต้มน้ำที่อุณหภูมิ 50.0 °C ไปจนถึงอุณหภูมิ 98.0 °C ภายในเวลา 15 นาที จะสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการต้มได้ด้วยวิธีเดียวกันกับการวิเคราะห์อัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม ดังนี้



รูปที่ ข.4 เสร็จสิ้นในการต้มน้ำเพื่อทำอุณหภูมิของถังน้ำร้อนหม้อสกัด

$$Q - w = \Delta U \quad [\text{kJ}]$$

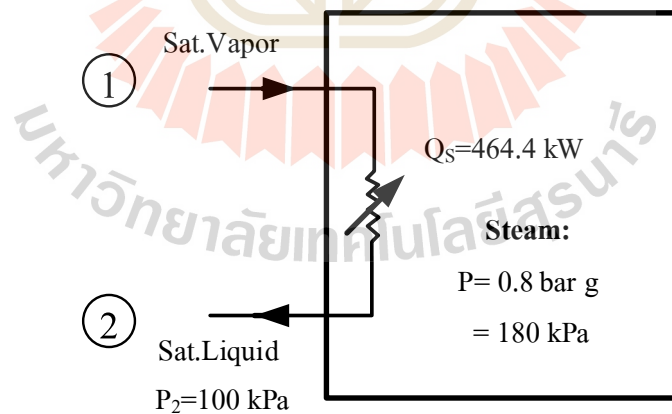
$$\dot{Q}_S - \dot{W} = \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad [\text{kW}]$$

$$\dot{Q}_S = \frac{m(u_2 - u_1)}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_S = \frac{(2,000 \text{ kg})(418.0 - 209.0 \text{ kJ/kg})}{15 \times 60 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_S = 464.4 \text{ kW}$$

ได้อัตราความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการภายในเวลา 15 นาที ของถังน้ำร้อนหม้อสกัด เท่ากับ 72.3 kW (เมื่อพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ) และสามารถคำนวณหาอัตราการใช้ไอน้ำของถังน้ำร้อนหม้อสกัดได้ดังนี้



รูปที่ ข.5 การหาอัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม

$$-\dot{Q}_S = \dot{m}_S (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_S (h_{g@180kPa} - h_{f@100kPa})$$

$$464.4 \text{ kW} = \dot{m}_S (2706.7 - 417.46 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{m}_S = 0.203 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_S = 730.8 \text{ kg/h}$$

ได้อัตราการใช้ไอน้ำของถังน้ำร้อนหม้อสกัด เท่ากับ 730.8 kg/h สำหรับการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำในช่วงการรักษาคอหมูนั้น ไม่สามารถคำนวณในวิธีเดียวกันกับหม้อต้มได้ เนื่องจากไม่ทราบว่าในระหว่างการรักษาคอหมู มวลของน้ำนั้นหายไปในปริมาณเท่าใด แต่สามารถเทียบค่าเอาถังกังน้ำร้อนล้างกระป๋องได้ เนื่องจากมีความดันที่ใช้ในการต้มน้ำเพื่อรักษาคอหมูที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งถังน้ำร้อนหม้อสกัดมิใช่ความดันในการรักษาคอหมูประมาณ 3.0-3.6 bar g ส่วนถังน้ำร้อนล้างกระป๋องใช้ความดันในการรักษาคอหมูเท่ากับ 3.2-3.5 bar g

ถังน้ำร้อนล้างกระป๋องมีความจุขนาดประมาณ 500 L มีอัตราการใช้ไอน้ำเพื่อรักษาคอหมูไว้ที่ 90 °C เท่ากับ 46.4 kg/h ดังนั้นถังน้ำร้อนหม้อสกัดจะมีอัตราการใช้ไอน้ำเพื่อรักษาคอหมูเท่ากับ  $(4.64 \times 4 = 186.4 \text{ kg/h})$

จากการวิเคราะห์อัตราการใช้ไอน้ำของแต่ละอุปกรณ์รวมถึงการวิเคราะห์ Flash Steam ที่เกิดขึ้น สามารถสรุปอัตราการใช้ไอน้ำของแต่ละอุปกรณ์ได้ดังนี้

ตารางที่ ข.5 แสดงอัตราการใช้ไอน้ำรายอุปกรณ์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลำดับ	รายการอุปกรณ์	อัตราการใช้ไอน้ำ (kg/h)		วิธีการ
		ทำคอหมู	รักษาคอหมู	
1	APV 1700L	180.8		การตวงปริมาตร
		288.0		
		720.0		
2	APV 4000L	627.45		การวิเคราะห์
		784.31		
3	หม้อต้ม 1 และ 2	119.41	29.96	การวิเคราะห์



ตารางที่ ข.5 แสดงอัตราการใช้น้ำรายอุปกรณ์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ต่อ)

ลำดับ	รายการอุปกรณ์	อัตราการใช้น้ำ (kg/h)		วิธีการ
		ทำอุณหภูมิ	รักษาอุณหภูมิ	
4	หม้อต้ม 3	238.82	59.92	การวิเคราะห์
5	ถังน้ำร้อนหม้อสกัด	730.8	185.8	การวิเคราะห์
6	ถังน้ำร้อนล้างกระป๋อง	182.92	50.92	การตวงปริมาตร
7	ถังน้ำร้อนล้างห้องบรรจุ	237.6	55.8	การตวงปริมาตร
8	ถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำ*	37.33	25.89	การตวงปริมาตร

- การหาอัตราการใช้น้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ

จากตารางที่ ข.5 แสดงถึงอัตราการใช้น้ำของอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้นหากต้องการทราบปริมาณไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อแล้วจำเป็นต้องทำการหาค่าอัตราการใช้น้ำของอุปกรณ์ทางความร้อนอื่นๆ จากปริมาณไอน้ำที่ผลิตทั้งหมดในวันการผลิตที่มีการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

ตารางที่ ข.6 แสดงอัตราและปริมาณการใช้น้ำของอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำในวันการผลิตที่ทำการพิจารณา (วันที่ทำการวิเคราะห์ 16/5/2558)

ลำดับ	อุปกรณ์	อัตราการใช้น้ำ (kg/h.)	ชั่วโมงการทำงาน (h.)	ปริมาณไอน้ำที่ใช้ (kg)	
อัตราการผลิตไอน้ำ (หม้อไอน้ำ)		1419.35	15.5	22000	
1	APV4000L	627.45	10.00	6274.50	
	APV4000L(ล้าง)	784.31	1.30	1019.60	
2	หม้อต้ม 1	ทำอุณหภูมิ	119.41	2.75	328.38
		รักษาอุณหภูมิ	29.96	0.50	14.98
3	หม้อต้ม 2	ทำอุณหภูมิ	119.41	0.28	33.43
		รักษาอุณหภูมิ	29.96	0.75	22.47
4	ถังน้ำร้อนล้างกระป๋อง	ทำอุณหภูมิ	183.92	0.50	91.96
		รักษาอุณหภูมิ	50.92	3.00	152.76

ตารางที่ ข.6 แสดงอัตราและปริมาณการใช้ไอน้ำของอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำในวันการผลิตที่ทำการพิจารณา (วันที่ทำการวิเคราะห์ 16/5/2558) (ต่อ)

ลำดับ	อุปกรณ์	อัตราการ ใช้ไอน้ำ (kg/h.)	ชั่วโมงการ ทำงาน (h.)	ปริมาณไอน้ำ ที่ใช้ (kg)	
5	ถังน้ำร้อนข้างหม้อไอน้ำ	ทำอุณหภูมิ	37.33	4.65	173.58
		รักษาอุณหภูมิ	25.82	10.85	280.15
6	ไอน้ำ Waste (ประมาณ 10% ของไอน้ำที่ผลิตต่อวัน)			2200	

จากตารางที่ ข.6 สามารถหาอัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันได้จาก

ปริมาณการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ = ปริมาณน้ำที่ผลิตต่อวัน - ปริมาณการใช้ไอน้ำ APV4000L ในส่วนผลิต - ปริมาณการใช้ไอน้ำ APV4000L ในส่วนล้าง - ปริมาณการใช้ไอน้ำของถังน้ำร้อนล้างกระป๋อง - ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม 1 และ 2 - ปริมาณการใช้ไอน้ำของถังน้ำร้อนข้าง Boiler - Flash Steam ของอุปกรณ์ที่มีการกลับของคอนเดนเสท - ไอน้ำ Waste (ประมาณ 10% ของไอน้ำที่ผลิตได้ต่อวัน)

ซึ่งจะได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ เท่ากับ 11408.18 kg จากแผนการผลิต เวลาทำงาน 15.5 ชั่วโมง จำนวน 10 Batch (น้ำมะพร้าวกระป๋อง) สามารถคิดเป็นอัตราที่ใช้ต่อ 1 เครื่องได้ดังต่อไปนี้

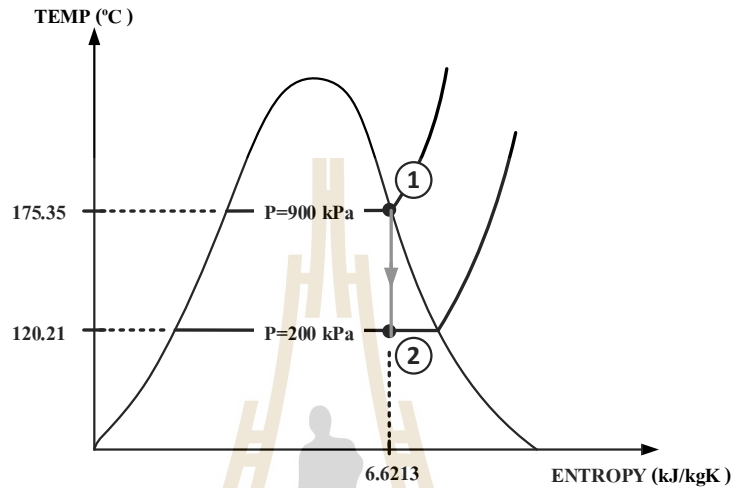
ตารางที่ ข.7 แสดงระยะเวลาการทำงาน และปริมาณเครื่องฆ่าเชื้อที่ใช้งานใน 1 วันการผลิต

เวลาที่ใช้งานของเครื่องฆ่าเชื้อ	15.5	ชม/วัน
เวลาที่ใช้ไอน้ำต่อ 1 เครื่อง	39	นาที/เครื่อง
จำนวนเครื่องที่ใช้งานต่อ 1 Batch	4	หม้อ/Batch

ใน 1 วันการผลิต เครื่องฆ่าเชื้อใช้ไอน้ำทั้งหมด 11408.18 kg แต่เนื่องจากไอน้ำที่ได้คือไอน้ำที่หม้อไอน้ำจ่ายมายังเครื่องฆ่าเชื้อ ไม่ใช่ไอน้ำที่เข้าเครื่องฆ่าเชื้อ อย่างเดียวดังนั้นหากต้องการทราบไอน้ำที่เข้าเครื่องฆ่าเชื้อเพื่อเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ปริมาณคอนเดนเสทที่เกิดจากการลดความดันก่อนเข้าเครื่องฆ่าเชื้อแล้วหักออกจากปริมาณไอน้ำที่ได้จากวิเคราะห์ข้างต้น

วิเคราะห์คอนเดนเสทของเครื่องฆ่าเชื้อ จากการลดความดัน

กราฟ T-s ของกระบวนการลดความดันแบบ Isentropic ของไอน้ำจากหม้อไอน้ำก่อนเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ



รูปที่ ข.6 กราฟ T-s ของกระบวนการลดความดันแบบ Isentropic

$$x = \frac{s_2 - s_{f@P_2}}{s_{fg@P_2}}$$

$$x = \frac{6.6213 - 1.5302}{5.5968}$$

$$x = 0.9140$$

เมื่อ  $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$  ดังนั้น เราสามารถหาคอนเดนเสท หรือ  $m_f$  ได้จาก

$$m_f = 11408.18(\text{kg}) \left( \frac{1}{0.9140} - 1 \right)$$

$$m_f = 1073.4 \quad (\text{kg})$$

ดังนั้นปริมาณไอน้ำที่เครื่องฆ่าเชื้อใช้สำหรับการฆ่าเชื้อใน 1 วันการผลิตมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการใช้อิน้ำของเครื่องฆ่าเชื้อ} &= (10334.7\text{kg} / 1 \text{ วัน}) \times (1 \text{ วัน} / 10 \text{ Batch}) \times (1 \text{ Batch} / 4 \text{ เครื่อง}) \\ &\quad \times (1 \text{ เครื่อง} / 0.73 \text{ h}) \\ &= 353.92 \text{ kg/h} \end{aligned}$$





ภาคผนวก ค

ปัจจัยการผลิตของโรงงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ปัจจัยการผลิตของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน

ลำดับ	ตัวแปรควบคุม	จำนวน	หน่วย	
1	อุณหภูมิเริ่มต้น	62	°C	
2	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	30	°C	
3	อุณหภูมิฆ่าเชื้อ	119	°C	
4	Temp.Control ในช่วงฆ่าเชื้อ	+/-0.5	°C	
5	ความดันไอน้ำ	200	kPa	
6	ปริมาตรของเครื่องฆ่าเชื้อ	4.071	m <sup>3</sup>	
7	ปริมาตรตะกร้าบรรจุผลิตภัณฑ์	0.556	m <sup>3</sup>	
8	มวลผลิตภัณฑ์	น้ำมะพร้าว	230	กรัม/กระป๋อง
		แก๊สไนโตรเจน	0.0125	กรัม/กระป๋อง
9	จำนวนผลิตภัณฑ์ต่อ 1 ตะกร้า	1080	กระป๋อง	
10	จำนวนตะกร้าต่อ 1 เครื่องฆ่าเชื้อ	4	ตะกร้า	
11	จำนวนรูเจาะบริเวณท่อกระจายไอน้ำ	122	รู	
12	เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะบริเวณท่อกระจายไอน้ำ	0.1875	นิ้ว	
13	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไล่อากาศ	Single Vent x 3	1	นิ้ว
		Vent Manifold	3	นิ้ว
14	เส้นผ่านศูนย์กลางของ Bleeder	0.125	นิ้ว	
15	จำนวนของ Bleeder	3	ชิ้น	



ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงเวลาต่างๆ

เวลา (นาทื)	อุณหภูมิจาก แบบจำลอง (°C)	อุณหภูมิจากการ ตรวจวัด (°C)	อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง แบบจำลองกับการตรวจวัด (°C)	% Errors
1	76.043	75.998	0.045	0.059
2	89.311	89.996	0.685	0.761
3	98.677	95.806	2.871	2.997
4	102.147	98.608	3.539	3.589
5	102.918	101.190	1.728	1.708
6	103.452	103.600	0.148	0.143
7	104.038	104.686	0.648	0.619
8	104.726	105.484	0.758	0.719
9	105.536	106.100	0.564	0.532
10	106.429	107.780	1.351	1.253
11	107.421	108.980	1.559	1.431
12	108.325	109.576	1.251	1.142
13	117.162	114.196	2.966	2.597
14	119.262	119.010	0.252	0.212
15	119.366	119.000	0.366	0.308
16	119.210	119.000	0.210	0.176
17	119.372	119.000	0.372	0.313
18	119.236	119.000	0.236	0.198
19	119.285	119.000	0.285	0.239
20	119.314	119.000	0.314	0.264
21	119.342	119.000	0.342	0.287
22	119.369	119.000	0.369	0.310
23	119.235	119.000	0.235	0.197
24	119.211	119.000	0.211	0.177
25	119.260	119.000	0.260	0.218



ตารางที่ ง.1 อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงเวลาต่างๆ (ต่อ)

เวลา (นาทื)	อุณหภูมิจาก แบบจำลอง (°C)	อุณหภูมิจาก การตรวจวัด (°C)	อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง แบบจำลองกับการตรวจวัด (°C)	% Errors
26	119.289	119.000	0.289	0.243
27	119.338	119.000	0.338	0.284
28	119.366	119.000	0.366	0.308
29	119.210	119.000	0.210	0.176
30	119.372	119.000	0.372	0.313
31	119.236	119.000	0.236	0.198
32	119.285	119.000	0.285	0.239
33	119.314	119.000	0.314	0.264
34	119.342	119.000	0.342	0.287
35	119.369	119.000	0.369	0.310
36	119.235	119.000	0.235	0.197
37	119.211	119.000	0.211	0.177
38	119.260	119.000	0.260	0.218
39	119.289	119.000	0.289	0.243



ภาคผนวก จ

การหามวลน้ำมันเตาที่ใช้ จากสูตรประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

พิจารณาการใช้น้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำปริมาณหนึ่ง สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำปริมาณดังกล่าว ด้วยหม้อไอน้ำ (Boiler) ที่มีค่าประสิทธิภาพคงที่ค่าหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta_{\text{Boiler}} = \frac{Q}{m_f \times \text{LHV}} = \frac{m\Delta h}{m_f \times \text{LHV}}$$

เมื่อ  $\eta_{\text{Boiler}}$  = ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ เท่ากับ 0.85 (85%)  
 $m$  = มวลของไอน้ำที่อุปกรณ์ใช้ (kg)  
 $\Delta h$  = Enthalpy Change (kJ/kg)  
 $m_f$  = มวลของน้ำมันเตาที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ (kg)  
 LHV = Low Heating Value เท่ากับ 39,466 kJ/kg

สำหรับค่า Enthalpy change จะพิจารณา ดังนี้

- ถ้าเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำคอนเดนเสทกลับได้ ค่า Enthalpy change จะเท่ากับ  

$$\Delta h = h_g@900\text{kPa} - h_f@100\text{kPa} = 2773.0 - 417.51 = 2,355.49 \text{ kJ/kg}$$
- ถ้าเป็นอุปกรณ์ที่ไม่สามารถนำคอนเดนเสทกลับได้ ค่า Enthalpy change จะเท่ากับ  

$$\Delta h = h_g@900\text{kPa} - h_f@30^\circ\text{C} = 2773.0 - 125.74 = 2,647.26 \text{ kJ/kg}$$

สามารถคำนวณมวลน้ำมันเตาที่ใช้ได้โดยจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$m_f = \frac{m\Delta h}{\eta_{\text{Boiler}} \times \text{LHV}}$$

และสามารถคำนวณราคาพลังงานส่วนน้ำมันเตาของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำได้จากความสัมพันธ์ของมวลและปริมาตรดังนี้

ราคาพลังงานส่วนน้ำมันเตาที่หม้อต้มใช้ =

$$(\text{มวลน้ำมันเตาที่ใช้}) \times (1/\text{ความหนาแน่นของน้ำมันเตา}) \times (\text{ราคาน้ำมันเตา})$$

หมายเหตุ: ราคาน้ำมันเตาที่ใช้ในการอ้างอิง เท่ากับ 10 บาท/ลิตร และความหนาแน่นของน้ำมันเตา A เท่ากับ 0.9509 kg/L



ภาคผนวก ฉ

ลำดับการเปิดใช้งานเครื่องมาเชื่อมในวันการผลิตที่ทำการวิเคราะห์  
(16 พฤษภาคม 2558)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ๑.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
9	Venting I	-	-	-	-	656.47	4320	98.470
3	Venting II	-	-	-	-	571.89	4320	28.594
2	Venting III	-	-	-	-	323.94	8640	10.798
9	Sterilization	Venting I	-	-	-	845.71	8640	126.857
3	Sterilization	Venting II	-	-	-	761.13	8640	38.057
2	Sterilization	Venting III	-	-	-	513.19	8640	17.106
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	-	-	1034.96	12960	155.244
3	Cooling	Sterilization	Venting II	-	-	761.13	12960	38.057
2	Cooling	Sterilization	Venting III	-	-	513.19	12960	17.106
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	-	1034.96	17280	155.244
3	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	-	950.38	17280	47.519
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	-	702.44	17280	23.415
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	21600	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	21600	31.679
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	21600	12.686

ตารางที่ ๓.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	21600	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Cooling	Sterilization	845.71	25920	126.857
3	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	25920	38.057
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	25920	17.106
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	30240	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	30240	31.679
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	30240	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	30240	17.106
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	Cooling	1034.96	34560	155.244
2	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	Cooling	950.38	34560	31.679
1	Cooling	Sterilization	Venting II	End	Cooling	761.13	34560	12.686
2	Cooling	Sterilization	Venting III	End	Cooling	513.19	34560	17.106
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	1034.96	38880	155.244
2	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	950.38	38880	31.679

ตารางที่ น.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
1	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	End	761.13	38880	12.686
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	End	513.19	38880	17.106
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	43200	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	43200	31.679
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	43200	12.686
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	43200	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	1034.96	47520	155.244
2	Venting II	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	950.38	47520	31.679
1	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	47520	12.686
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	47520	17.106
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	51840	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	51840	31.679
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	51840	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	51840	17.106

ตารางที่ น.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	Cooling	1034.96	56160	155.244
2	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	Cooling	950.38	56160	31.679
1	Cooling	Sterilization	Venting II	End	Cooling	761.13	56160	12.686
2	Cooling	Sterilization	Venting III	End	Cooling	513.19	56160	17.106
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	1034.96	60480	155.244
2	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	950.38	60480	31.679
1	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	End	761.13	60480	12.686
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	End	513.19	60480	17.106
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	64800	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	64800	31.679
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	64800	12.686
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	64800	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	1034.96	69120	155.244
2	Venting II	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	950.38	69120	31.679



ตารางที่ ๓.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ระยะเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
1	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	69120	12.686
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	69120	17.106
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	73440	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	73440	31.679
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	73440	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	73440	17.106
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	Cooling	1034.96	77760	155.244
2	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	Cooling	950.38	77760	31.679
1	Cooling	Sterilization	Venting II	End	Cooling	761.13	77760	12.686
2	Cooling	Sterilization	Venting III	End	Cooling	513.19	77760	17.106
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	1034.96	82080	155.244
2	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	950.38	82080	31.679
1	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	End	761.13	82080	12.686
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	End	513.19	82080	17.106

ตารางที่ ๓.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	86400	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	86400	31.679
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	86400	12.686
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	86400	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	1034.96	90720	155.244
2	Venting II	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	950.38	90720	31.679
1	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	90720	12.686
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	90720	17.106
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	95040	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	95040	31.679
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	95040	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	95040	17.106
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	Cooling	1034.96	99360	155.244
2	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	Cooling	950.38	99360	31.679

ตารางที่ ๓.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
1	Cooling	Sterilization	Venting II	End	Cooling	761.13	99360	12.686
2	Cooling	Sterilization	Venting III	End	Cooling	513.19	99360	17.106
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	1034.96	103680	155.244
2	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	950.38	103680	31.679
1	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	End	761.13	103680	12.686
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	End	513.19	103680	17.106
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	108000	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	108000	31.679
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	108000	12.686
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	108000	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	1034.96	112320	155.244
2	Venting II	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	950.38	112320	31.679
1	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	112320	12.686
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	112320	17.106

ตารางที่ น.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	116640	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	116640	31.679
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	116640	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	116640	17.106
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	Cooling	1034.96	120960	155.244
2	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	Cooling	950.38	120960	31.679
1	Cooling	Sterilization	Venting II	End	Cooling	761.13	120960	12.686
2	Cooling	Sterilization	Venting III	End	Cooling	513.19	120960	17.106
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	1034.96	125280	155.244
2	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	950.38	125280	31.679
1	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	End	761.13	125280	12.686
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	End	513.19	125280	17.106
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	129600	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	129600	31.679

ตารางที่ น.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	129600	12.686
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	129600	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	1034.96	133920	155.244
2	Venting II	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	950.38	133920	31.679
1	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	133920	12.686
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	133920	17.106
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	138240	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	138240	31.679
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	138240	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	138240	17.106
9	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	Cooling	1034.96	142560	155.244
2	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	Cooling	950.38	142560	31.679
1	Cooling	Sterilization	Venting II	End	Cooling	761.13	142560	12.686
2	Cooling	Sterilization	Venting III	End	Cooling	513.19	142560	17.106

ตารางที่ น.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาที)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
9	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	End	1034.96	146880	155.244
2	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	End	950.38	146880	31.679
1	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	End	761.13	146880	12.686
2	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	End	513.19	146880	17.106
9	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting I	1034.96	151200	155.244
2	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	Venting II	950.38	151200	31.679
1	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting II	761.13	151200	12.686
2	End	Cooling	Cooling	Sterilization	Venting III	513.19	151200	17.106
9	Venting I	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	1034.96	155520	155.244
2	Venting II	End	Cooling	Sterilization	Sterilization	950.38	155520	31.679
1	Venting II	End	Cooling	Cooling	Sterilization	761.13	155520	12.686
2	Venting III	End	Cooling	Cooling	Sterilization	513.19	155520	17.106
9	Sterilization	Venting I	End	Cooling	Sterilization	1034.96	158112	155.244
2	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Sterilization	950.38	158112	31.679

ตารางที่ ๓.1 แสดงการจัดลำดับการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อ (ต่อ)

ช่วงเวลา (นาทีก)	ช่วงกระบวนการ					อัตราไอน้ำที่ต้องการใช้ (kg/h)	จำนวน ผลิตภัณฑ์	ปริมาณไอน้ำ (kg)
	เครื่อง 1	เครื่อง 2	เครื่อง 3	เครื่อง 4	เครื่อง 5			
1	Sterilization	Venting II	End	Cooling	Cooling	761.13	158112	12.686
2	Sterilization	Venting III	End	Cooling	Cooling	513.19	158112	17.106
11	Sterilization	Sterilization	End	End	Cooling	378.49	158112	69.390
11	Cooling	Sterilization	End	End	End	189.25	158112	34.695
3	Cooling	Sterilization	End	End	End	189.25	158112	9.462
11	Cooling	Cooling	End	End	End	0.00	158112	0.000
14	End	End	End	End	End	0.00	158112	0.000
ผลรวมปริมาณไอน้ำ								7982.783433





โปรแกรมหาคุณสมบัติของไอน้ำในสถานะไออิ่มตัว

Specific Volume of Vapor

<code>function</code>	<code>function[vgnew]</code>
<code>[vfnew]=Interpvf(Ti)</code>	<code>=Interpvg(Ti)</code>
<code>Data3=[25 0.001003</code>	<code>Data3=[25 43.340</code>
<code>30 0.001004</code>	<code>30 32.879</code>
<code>35 0.001006</code>	<code>35 25.205</code>
<code>40 0.001008</code>	<code>40 19.515</code>
<code>45 0.001010</code>	<code>45 15.251</code>
<code>50 0.001012</code>	<code>50 12.026</code>
<code>55 0.001015</code>	<code>55 9.5639</code>
<code>60 0.001017</code>	<code>60 7.6670</code>
<code>65 0.001020</code>	<code>65 6.1935</code>
<code>70 0.001023</code>	<code>70 5.0396</code>
<code>75 0.001026</code>	<code>75 4.1291</code>
<code>80 0.001029</code>	<code>80 3.4053</code>
<code>85 0.001032</code>	<code>85 2.8261</code>
<code>90 0.001036</code>	<code>90 2.3593</code>
<code>95 0.001040</code>	<code>95 1.9808</code>
<code>100 0.001043</code>	<code>100 1.6720</code>
<code>105 0.001047</code>	<code>105 1.4186</code>
<code>110 0.001052</code>	<code>110 1.2094</code>
<code>115 0.001056</code>	<code>115 1.0360</code>
<code>120 0.001060</code>	<code>120 0.89133</code>
<code>125 0.001065];</code>	<code>125 0.77012];</code>
<code>T=Data3(:,1);</code>	<code>T=Data3(:,1);</code>
<code>vf=Data3(:,2);</code>	<code>vg=Data3(:,2);</code>
<code>p=spline(T,vf);</code>	<code>p=spline(T,vg);</code>
<code>%Ti=55;</code>	<code>%Ti=10</code>
<code>vfnew=ppval(p,Ti);</code>	<code>vgnew=ppval(p,Ti);</code>
<code>end</code>	<code>end</code>

## Enthalpy of Vapor

<pre>function(hfnew)= Interphf(Ti) Data1=[25 104.83         30 125.74         35 146.64         40 167.53         45 188.44         50 209.34         55 230.26         60 251.18         65 272.12         70 293.07         75 314.02         80 335.02         85 356.02         90 377.04         95 398.09         100 419.17         105 440.28         110 461.42         115 482.59         120 503.81         125 525.07];  T=Data1(:,1); hf=Data1(:,2); p=spline(T,hf); %Ti=60; hfnew=ppval(p,Ti); end</pre>	<pre>function(hgnew)= Interphg(Ti) Data1=[25 2546.5         30 2555.6         35 2564.6         40 2573.5         45 2582.4         50 2591.3         55 2600.1         60 2608.8         65 2617.5         70 2626.1         75 2634.6         80 2643.0         85 2651.4         90 2659.6         95 2667.6         100 2675.6         105 2683.4         110 2691.1         115 2698.6         120 2706.0         125 2713.1];  T=Data1(:,1); hg=Data1(:,2); p=spline(T,hg); %Ti=60; hgnew=ppval(p,Ti); end</pre>
--	--

## Entropy of Vapor

<code>function[sfnew]=</code>	<code>function[sgnew]=</code>
<code>Interpsf(Ti)</code>	<code>Interpsg(Ti)</code>
<code>Data1=[25 0.3672</code>	<code>Data1=[25 8.5567</code>
<code>30 0.4368</code>	<code>30 8.4520</code>
<code>35 0.5051</code>	<code>35 8.3517</code>
<code>40 0.5724</code>	<code>40 8.2556</code>
<code>45 0.6386</code>	<code>45 8.1633</code>
<code>50 0.7038</code>	<code>50 8.0748</code>
<code>55 0.7680</code>	<code>55 7.9898</code>
<code>60 0.8313</code>	<code>60 7.9082</code>
<code>65 0.8937</code>	<code>65 7.8296</code>
<code>70 0.9551</code>	<code>70 7.7540</code>
<code>75 1.0158</code>	<code>75 7.6812</code>
<code>80 1.0756</code>	<code>80 7.6111</code>
<code>85 1.1346</code>	<code>85 7.5435</code>
<code>90 1.1929</code>	<code>90 7.4782</code>
<code>95 1.2504</code>	<code>95 7.4151</code>
<code>100 1.3072</code>	<code>100 7.3542</code>
<code>105 1.3634</code>	<code>105 7.2952</code>
<code>110 1.4188</code>	<code>110 7.2382</code>
<code>115 1.4737</code>	<code>115 7.1829</code>
<code>120 1.5279</code>	<code>120 7.1292</code>
<code>125 1.5816];</code>	<code>125 7.0771];</code>
<code>T=Data1(:,1);</code>	<code>T=Data1(:,1);</code>
<code>sf=Data1(:,2);</code>	<code>sg=Data1(:,2);</code>
<code>p=spline(T, sf);</code>	<code>p=spline(T, sg);</code>
<code>%Ti=60;</code>	<code>%Ti=60;</code>
<code>sfnew=ppval(p, Ti);</code>	<code>sgnew=ppval(p, Ti);</code>
<code>end</code>	<code>end</code>

Temperature of Vapor  
from Internal Energy  
(Saturated vapor)

```
function[Tnew]=InterpT(ui)
Data2=[2409.1 25
        2415.9 30
        2422.7 35
        2429.4 40
        2436.1 45
        2442.7 50
        2449.3 55
        2455.9 60
        2462.4 65
        2468.9 70
        2475.3 75
        2481.6 80
        2487.8 85
        2494.0 90
        2500.1 95
        2506.0 100
        2511.9 105
        2517.7 110
        2523.3 115
        2528.9 120
        2534.3 125];
u=Data2(:,1);
T=Data2(:,2);
p=spline(u, T);
%ui=2511.3;
Tnew=ppval(p, ui);
End
```

Pressure of Vapor  
from Temperature  
(Saturated vapor)

```
function[Pnew]=InterpP(Ti)
Data4=[25 3.16698
        30 4.2469
        35 5.6291
        40 7.3851
        45 9.5953
        50 12.352
        55 15.763
        60 19.947
        65 25.043
        70 31.202
        75 38.597
        80 47.416
        85 57.868
        90 70.183
        95 84.609
        100 101.42
        105 120.90
        110 143.38
        115 169.18
        120 198.67
        125 232.23];
T=Data4(:,1);
Pi=Data4(:,2);
p=spline(T, Pi);
%Ti=55;
Pnew=ppval(p, Ti);
End
```

โปรแกรมการแก้ระบบสมการ โดยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution)

```

for k=1:50;

T_i2=T_i1+0.5;
Pai2=Pai1;
P_v2=InterpP(T_i2);

for j=1:25;

    v_v2=v_v1;
    v_air2=v_air1;

    %Ethalpy
    %Dry Air :
    h_a=1.005*(273-T_i2);
    %Vapor :check state:
    v_f=Interpvf(T_i2);
    v_g=Interpvg(T_i2);
    v_fg=v_g-v_f;

    if v_v2>v_g
        h_v2=(0.0011*P_v2+1.9065)*T_i2+(0.2392*P_v2+2498.3);
    elseif v_v2>v_f&&v_v2<v_g
        x=(v_v2-v_f)/v_fg;
        h_v2=Interphf(T_i2)+(x*(Interphg(T_i2)-Interphf(T_i2)));
    else
        h_v2=Interphg(T_i2);
    end
end
P_ti=(Pai2+P_v2);
Ab_humidity=0.622*(P_v2/(P_ti-P_v2));
h_total=h_a+(Ab_humidity*h_v2);

for i=1:15;
%shearching
C1=0.1; %loss coefficient steam pipe
C2=LossK(P_v2); %loss coefficient vent pipe
x1=(s_steam*Interpsf(T_i2))/(Interpsg(T_i2)+Interpsf(T_i2));
vs=C1*((2000*(h_s*h_total))^0.5);
%mass steam in
m_s1=del_T*A_steam*vs*den_steam;
m_w=m_s1*(1/x1-1);
m_s=m_s1-m_w;
%Temperature controll :Coconut juice
if T_i2> 119.5
    vs=0;
    m_s=0;
end
end

```

```

%consider at Bleeder:Mass and Energy Balance @Bleeder (Nozzle)
    den_vapor=l_v_v2;
    difP=(P_ti-P_tair);
    if difP>0 && k>=720
        vb=(2000*(h_total-h_air))^0.5;
    else
        vb=0;
    end
    %mass out from bleeder
    m_b (del_T*A_bleeder*vb)*den_vapor;

%consider at Vent pipe:Mass and Energy Balance @Vent pipe
    if difP>0
        vo C2*(2000*(h_total-h_air))^0.5;
    else
        vo=0;
    end

    if k>720
        m_vout=A_vent*del_T*vo*den_vapor;
    else
        m_vout=0;
    end

    m_vout=A_vent*del_T*vo*den_vapor;
%Dry Air:
    m_aout=(1/v_air2)*(del_T*A_vent*vo);
%Mass balance dry air:
    m_a2=m_a1-m_aout;
%specific volume of dry air:
    v_air2n=V_tank/m_a2;

%mass balance of vapor:
    m_v2=m_s-m_vout-m_b-m_v1;
    v_v2i=V_tank/m_v2;
%check condensate of vapor inside:
    v_f=Interpvf(T_i2);
    v_g=Interpvg(T_i2);
    v_fg=v_g-v_f;
%check condensate of vapor inside:
    if k<=840
    if v_v2i>v_g
        m_condl=0;
    elseif v_v2i>v_f&&v_v2i<v_g
        x=(v_v2i-v_f)/v_fg;
        m_condl=m_v2*(m_v2*x);
    else
        m_condl=m_s;
    end
end

```

```

end
    m_cond=m_cond1+m_w;
else
    m_cond=m_w;
end

%mass balance of vapor:
m_v2n=m_s-m_cond-m_vout-m_b+m_v1;
v_v2n=V_tank/m_v2n;

%Return Variables :
v_v2=v_v2n;
v_air2=v_air2n;
printf(' %d Pressure:%3f specific vol vapor:%3f  specific vol Dry Air:%3f
\n',i,P_t1,v_v2n,v_air2n);
end

%ENERGY BALANCE OF SYSTEM
%ENERGY IN:
E_steam=(0.5*m_s*vs^2*(10^-3)+m_s*hs);           %kj

%ENERGY OUT:
E_vapor=0.5*m_vout*vo^2*(10^-3)+m_vout*h_v2;     %kj
E_dryair=0.5*m_aout*vo^2*(10^-3)+m_aout*(1.006*(T_i2+273)); %kj
E_bleed=0.5*m_b*vb^2*(10^-3)+m_b*h_v2;          %kj

if k>540 && k<=720
    E_cond=0;
else
    E_cond=m_cond*(Interphfp(F_v2));             %kj
end

%INTERNAL ENERGY CHANGE :
%DRY AIR
del_Ua=(m_a2*0.718*(T_i2-T_i1));                 %kJ
%PRODUCT
del_Up=(m_H2O)*cv_H2O*(T_i2-T_i1);              %kJ
%VAPOR
del_U=(E_steam-E_vapor-E_dryair-E_bleed-E_cond); %kJ
del_Uv=(del_U)-del_Up-del_Ua;                   %kJ
%Internal Energy of vapor @state2:
u_v2=u_v1-(del_Uv/m_v2n);                       %kJ/kg
T_v2=InterpT(u_v2);
P_v2n=InterpP(T_v2);
h_v2n=Interphg(T_v2);

```

```

    if difP< 0
        P_dryAir=Pail;
    else
        P_dryAir (0.622*P_v2n*m_a2)/m_v2n;
    end
    T_r=InterpTemp(k);

    T2=T_vi2;
    P2=P_v2n;
    h2=h_v2n;
%Initial New
T_i2=T_vi2;
v_v2=v_v2n;
v_air2=v_air2n;
P_v2=P_v2n;
h_v2=h_v2n;

fprintf(' %d Temp:%3f Pressure total:%3f Pressure vapor:%3f specific vol vapor:
%3f specific vol Dry Air:%3f\n',j,T_i2,P_ti,P_v2,v_v2n,v_air2n);
end

%New Condition
m_v1=m_v2n;
P_v1=P_v2n;
Pail=P_dryAir;
T_i1=T_vi2;
u_v1=u_v2;
v_v1=v_v2n;
v_air1=v_air2n;
m_a1=m_a2;
h_v1=h_v2n;

fprintf(' %d Loos co:%3f Temp:%3f Pressure:%3f specific vol vapor:%3f mass
stam:%6f mass flow out:%6f mass dry air:%3f mass cond:%6f mass vapor inside:
%4f del_uv%4f u_v2:
%4f\n',k,C2,T_vi2,P_v2,v_v2n,m_s,m_vout,m_a2,m_cond,m_v2n,del_uv,u_v2);
end

```





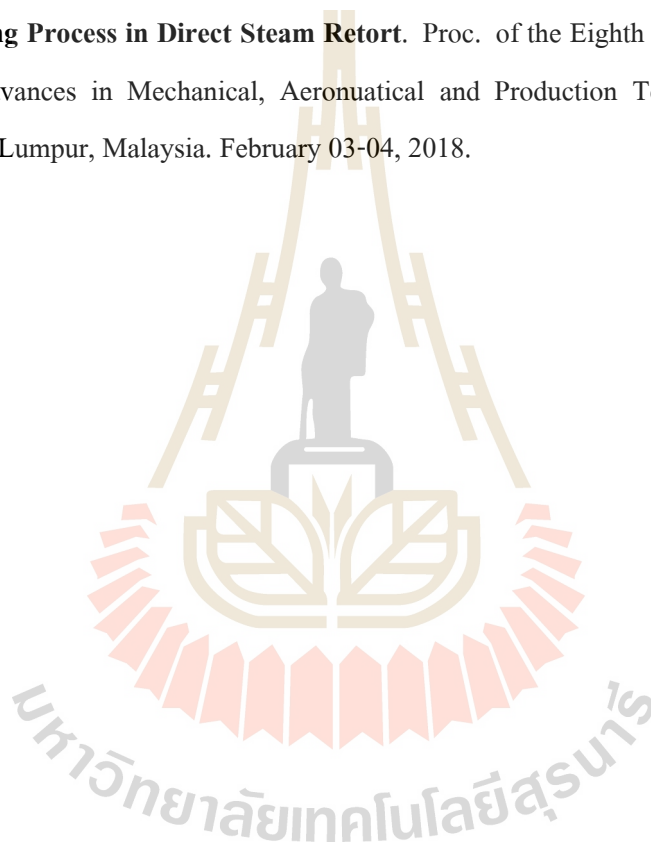
ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ศศิธร พยัคฆ์ทอง, ธีระชาติ พรพิบูลย์, (2560) การวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมสำหรับหม้อ  
ต้มเชื้อแรงดันสูงในกระบวนการสเตอร์ไรไลซ์เซชันเพื่อการประหยัดพลังงาน การประชุม  
วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 (ENETT 13). โรงแรมดิเอ็มเพรส  
จังหวัดเชียงใหม่, 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560

Sasithorn Payakthong, Teerachart Pornpibul, (2018) **Steam Consumption Analysis on The  
Venting Process in Direct Steam Retort.** Proc. of the Eighth International Conference  
on Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques- MAPT 2018,  
Kuala Lumpur, Malaysia. February 03-04, 2018.



การวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมสำหรับหม้อฆ่าเชื้อแรงดันสูงในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน  
 เพื่อการประหยัดพลังงาน

OPTIMUM STEAM CONSUMPTION ANALYSIS OF THE STERILIZATION PROCESS IN  
 HORIZONTAL STEAM AIR RETORT FOR ENERGY SAVING

ศศิธร พยัคฆ์ทอง<sup>1</sup> และ ชีระชาติ พรพิบูลย์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
 ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

**บทคัดย่อ**

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการฆ่าเชื้อหรือกระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน ของน้ำมะพร้าวกระป๋อง เพื่อหาค่าการ  
 การใช้ไอน้ำสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการคือหม้อฆ่าเชื้อแรงดันไอหรือรีทอร์ท ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่  
 ไม่สามารถทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำได้อย่างแน่ชัด ดังนั้นจึงทำการพิจารณากระบวนการสเตอริไลซ์เซชันโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง  
 ในช่วงแรกคือ ช่วงของการไล่อากาศออกจากรีทอร์ท (Venting Process) และช่วงของการฆ่าเชื้อ หรือเรียกว่าช่วงสเตอริไลซ์  
 (Sterilize Process) ในบทความวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการหาค่าการใช้อไอน้ำในช่วงของการสเตอริไลซ์ เนื่องจากเป็นช่วงที่มี  
 ความสำคัญและใช้เวลานานที่สุดในกระบวนการ โดยจะทำการหาค่าการใช้อไอน้ำด้วยการสมดุลมวลและพลังงานตาม  
 หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ และใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการคำนวณค่า เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการใช้อไ  
 น้ำเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด จากผลการจำลองพบว่าอัตราการใช้อไอน้ำที่ได้จากแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 13.8 % ของอัตราการใช้อไ  
 น้ำเฉลี่ย ทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าอัตราการใช้อไอน้ำเฉลี่ยมาก เนื่องจากจากอัตราการใช้อไอน้ำเฉลี่ยเป็น  
 ค่าเฉลี่ยตลอดกระบวนการ แต่สำหรับค่าที่ได้จากแบบจำลองจะพิจารณาในช่วงของการฆ่าเชื้อเท่านั้น และอุณหภูมิที่ได้จาก  
 แบบจำลองมีค่าเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งในทางปฏิบัติการที่จะรักษาอุณหภูมิในช่วงสเตอริไลซ์ ไม่สามารถทราบค่าอุณหภูมิ  
 ภายในที่แน่ชัด ดังนั้นค่าจริงที่ถูกต้องจะถูกกำหนดให้เป็นช่วงของอุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 119 องศาเซลเซียส  
 ในทางปฏิบัติจริงจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ 118-120 องศาเซลเซียส จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ทำการนำเสนอ  
 สามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิภายในได้ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน และทราบถึงปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน

**คำหลัก:** รีทอร์ท, สเตอริไลซ์เซชัน, การไล่อากาศ

**Abstract**

This research studies about the sterilization process for canned coconut waters, for determining the  
 steam consumption in the process. Because the devices use for the sterilization process is Retort which the  
 thermal device can't be aware exactly of steam consumption. Therefore, to consider the sterilization process  
 can be divided into 2 duration which are the Venting process duration and the Sterilization process duration.  
 This research will be presented about determining steam consumption in the sterilization process, because  
 the sterilization process duration is the most important in the sterilization and spend longest time during this  
 process. Therefore, the determination of steam consumption using the thermodynamics modelling and using  
 MATLAB to calculate the values to compare with the average steam consumption from the measurement.  
 The results revealed that the steam consumption from the modelling 13.8 % of the average steam  
 consumption. Therefore, the values of the modelling are less than the average steam consumption. Due to  
 the value of the average steam consumption is the steam consumption of the entire process but the values  
 of the modelling are only the steam consumption in the sterilization process. And temperature from the  
 modelling is 120 ° C. In the operating, maintaining the temperature during the sterilization can't know the  
 exact temperature inside so the actual temperature is controlled, it defined as the temperature range, in  
 actual practice is 118-120 ° C. This study suggests that the proposed the modelling can indicate internal

temperature which are similar to standard values. And knowing that used steam consumption in the sterilization process.

**Keywords:** Retort, sterilization, venting

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการบริโภคอาหารที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท จำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของอาหารและระยะเวลาในการเก็บรักษาดังนั้นในอุตสาหกรรมอาหารจึงจำเป็นต้องมีกรรมวิธีสำหรับการฆ่าเชื้อในอาหารเหล่านั้น เพื่อให้อาหารปราศจากเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย และเพื่อให้อาหารปราศจากจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย ซึ่งจะสามารถเจริญเติบโตภายในอาหารภายใต้สภาวะอุณหภูมิปกติของการเก็บรักษา ในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่นิยมใช้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้ออาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ในที่นี้จะพิจารณากลุ่มอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิด โดยสำหรับเครื่องดื่มจำพวก นม, กาแฟ และน้ำผลไม้ จะผ่านการฆ่าเชื้อถึงสองรอบโดยในรอบแรกจะฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่ำ จะอยู่ในช่วงของกรรมวิธีการผลิต ซึ่งจะเรียกรูปการฆ่าเชื่อนี้ว่า พาสเจอร์ไรซ์ สามารถทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค ได้แก่ *Mycobacterium tuberculosis* ซึ่งทำให้เกิดวัณโรค และ *Coxiella burnetti* ซึ่งทำให้เกิดโรค Q fever นอกจากนี้ ความร้อนยังเพียงพอที่จะทำลาย ยีสต์ รา แบคทีเรียแกรมลบ และแบคทีเรียแกรมบวก หลายชนิด แต่มีจุลินทรีย์ 2 กลุ่มที่อาจจะมีชีวิตรอดจากการทำลายด้วยการพาสเจอร์ไรซ์ คือ จุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อน (thermoduric microorganism) และจุลินทรีย์ที่ชอบเจริญที่อุณหภูมิสูง (thermophilic microorganism) จึงต้องเก็บรักษาอาหารที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์แล้วไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (cold storage) หรือหากต้องการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ต้องใช้วิธีการถนอมอาหารอื่นร่วมด้วย ซึ่งกระบวนการอีกกระบวนการหนึ่งที่จะสามารถฆ่าเชื้อโรคที่ทนต่อความร้อนสูง ได้แก่กระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน ซึ่งจะใช้ความร้อนที่สูงเกิน 100 องศาเซลเซียส ในการฆ่าเชื้อ โดยในกระบวนการนี้จะใช้พลังงานในการผลิตความร้อนสูงมาก ดังนั้นการจะประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ชนิด เครื่องดื่ม เราจึงพิจารณาในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน คือหม้อฆ่าเชื้อ ความดันไอ หรือรีโอร์ท ซึ่งจะใช้ไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิ เกิน 100 องศาเซลเซียส ในการฆ่าเชื้อ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้หม้อไอน้ำ (Boiler) ในการผลิตไอน้ำและใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นการที่จะลดพลังงานในการผลิตรวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องเราจึงเลือกพิจารณาในส่วนของการใช้ไอน้ำเป็นหลัก

### 2. สเตอริไลซ์เซชัน (Sterilization)

เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย ซึ่งมีความทนทานต่อความร้อนมากกว่าเซลล์ปกติ (Vegetative cell) ของมันมากจุดมุ่งหมายหลักของการสเตอริไลซ์เซชัน ของอาหาร คือ การทำให้จุลินทรีย์และสปอร์ของมันไม่สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้สภาวะปกติที่ใช้ในการเก็บรักษา หมายความว่าอาจมีจุลินทรีย์ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค เหลือรอดอยู่บ้างในอาหาร (พวกที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคต้องถูก ทำลายหมด) แต่สภาวะแวดล้อมทำให้มันไม่สามารถเจริญเติบโตขึ้นได้ เรียกรูปการให้ความร้อนกับอาหารโดยใช้หลักการนี้ว่า “การฆ่าเชื้อแบบเชิงการค้า” (Commercial sterilization) โดยทั่วไปอาหารที่อยู่ในสภาพปลอดเชื้อแบบเชิงการค้าจะอยู่ในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (Hermetically sealed containers) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนขึ้นอีกหลังการฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ตามหลักการผลิตอาหารในภาชนะปิดสนิท จะต้องทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่ในระดับต่ำมาก ดังนั้นจุลินทรีย์ที่ต้องใช้ออกซิเจน (Obligate aerobes) จึงไม่สามารถเจริญเติบโต และทำให้อาหารไม่เน่าเสีย หรือเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค นอกจากนี้สปอร์ของแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจนมีความทนทานต่อความร้อนน้อยกว่าสปอร์ของพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Facultative หรือ obligate anaerobes)

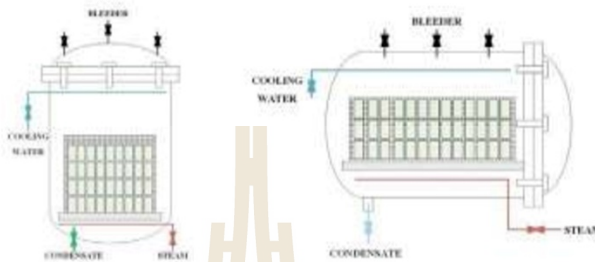
สำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำสภาพที่ไม่มีอากาศ ในกระป๋องจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการเจริญเติบโตและสร้างสปอร์ของ *C. botulinum* ดังนั้นการทำลายสปอร์ของแบคทีเรียนี้จึงเป็นเป้าหมายหลักของการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้ แบคทีเรียตัวนี้มีหลายสายพันธุ์ที่สามารถสร้างสปอร์ได้ แต่สปอร์ที่ทนทานต่อความร้อนได้มากที่สุดเป็นชนิด A และ B สารพิษที่สร้างขึ้นเป็นอันตรายมาก (เพียง 10-6 กรัม ก็สามารถฆ่าคนได้) แต่สามารถทำลายได้โดยใช้ความร้อนขึ้นที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

### 3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการสเตอริไลซ์เซชัน

ในกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์เซชัน อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการนี้คือ หม้อฆ่าเชื้อภายใต้ความดันไอ หรือเรียก วารีโอร์ท ซึ่งเป็อุปกรณ์ที่ทำงานภายใต้ความดันสูง ใช้สำหรับฆ่าเชื้ออาหารที่บรรจุในภาชนะเรียบร้อยแล้ว ไม่ว่าจะ เป็นกระป๋อง ขวดแก้วหรือถุง (Retort pouch) การฆ่าเชื้อ

อาศัยความร้อนจากไอน้ำ หรือไอน้ำผสมน้ำพร้อมอากาศอัด ความดันสูง (Overriding air pressure) รีทอร์ทที่ใช้กันอยู่ โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ แบบนิ่ง (still retort) กับแบบที่ทำงานต่อเนื่อง[2] ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบแรกเท่านั้น เพราะใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร

รีทอร์ทแบบนิ่ง (Still or batch retort) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการวาง คือ แบบแนวตั้ง (Vertical retort) และ แบบแนวนอน (Horizontal retort) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รีทอร์ท แบบแนวตั้งและแบบแนวนอน

4. ขั้นตอนการสเตอริไลซ์เซชั่น



รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการสเตอริไลซ์เซชั่น

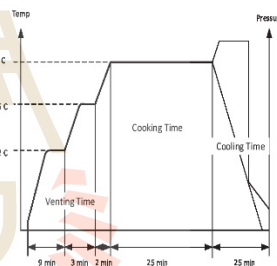
โดยในขั้นแรกคือการไล่อากาศ (venting) ออกจากรีทอร์ท ซึ่งปกติแล้วจะใช้แรงดันไอน้ำในการไล่อากาศออกจากรีทอร์ท

ในขั้นตอนที่สองคือการฆ่าเชื้อ (Sterilize) หรือเป็นช่วงการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ (Cooling) ซึ่งความร้อนที่จะมีอุณหภูมิสูงถึง 110-170 องศาเซลเซียส สำหรับฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ทนต่อความร้อนสูงได้

ในขั้นตอนสุดท้ายคือการระบายความร้อนและความดัน (Cooling) ภายในรีทอร์ท เพื่อป้องกันบรรจุภัณฑ์เสียรูปขณะนำออกมาเนื่องจากความดันที่แตกต่าง

ในกระบวนการฆ่าเชื้อในแต่ละผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องมีมาตรฐานการผลิตโดยแต่ละผลิตภัณฑ์จะมีมาตรฐานที่แตกต่าง

กันออกไป เนื่องจากชนิดของแบคทีเรียที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ดังนั้นมาตรฐานจึงมีไว้เพื่อยืนยันว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการฆ่าเชื้อปราศจากเชื้อแบคทีเรียอย่างแน่นอน

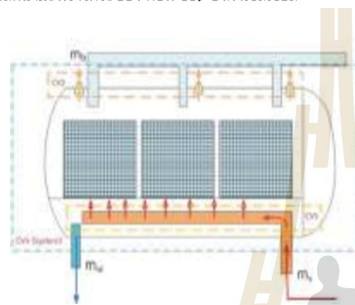


รูปที่ 3 มาตรฐานการผลิตน้ำมะพร้าวกระป๋อง

โดยรีทอร์ท ที่เราจะทำการศึกษาคงจะเป็นรีทอร์ทแบบแนวนอน ซึ่งใช้หลักการโดยการฉีดไอน้ำเข้าไปโดยตรง ในช่วงของการไล่อากาศและช่วงของการฆ่าเชื้อจะมีอัตราการฉีดที่ไม่เท่ากันเนื่องจากในช่วงไล่อากาศจะต้องใช้ไอน้ำจำนวนมากและฉีดอย่างต่อเนื่องในการไล่อากาศออกจากรีทอร์ท [2] และการทำให้อุณหภูมิภายในรีทอร์ทได้ตามที่ต้องการ ส่วนการฆ่าเชื้อจะใช้ไอน้ำในปริมาณมากขึ้นเนื่องด้วยระยะเวลาของการฆ่าเชื่อนั้นใช้เวลานานถึง 25 นาทีแต่อัตราการจ่ายไอน้ำจะต่ำกว่าช่วงไล่อากาศเพราะในช่วงฆ่าเชื้อเราต้องการเพียงรักษาอุณหภูมิและความดันให้คงที่เท่านั้น ในบทความนี้เราจะพิจารณาเฉพาะช่วงของการสเตอริไลซ์เพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษาอิทธิพลของการจ่ายไอน้ำเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ทำการตรวจวัดจากกระบวนการผลิตจริง

5. แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

บทความวิจัยนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยอิงจากสภาวะการผลิตจริงเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับสภาวะจริงและสามารถเห็นอิทธิพลที่ส่งผลต่ออัตราการใช้น้ำในเบื้องต้น โดยจะทำการพิจารณาในช่วงของการสเตอริไลซ์ หรือเป็นช่วงการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ (Cooling) โดยค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของกระบวนการจะอ้างอิงจากมาตรฐานการผลิตของกระบวนการผลิตนมมะพร้าวกระป๋อง คือที่ 119 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 กระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน ในช่วงสเตอริไลซ์

พิจารณาแยกแต่ละอุปกรณ์ เช่น พิจารณาการไหลผ่านเฉพาะในรูระบายอากาศ (Bleeder) หรือ เฉพาะท่อไอน้ำ (Steam pipe) โดยการไหลของไอน้ำที่ไหลผ่านรูระบายอากาศและท่อไอน้ำเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) [7]

เนื่องจากปริมาตรควบคุม 1 และ 2 มีกระบวนการที่เหมือนกัน ดังนั้นเราจึงพิจารณาที่ปริมาตรควบคุม 1 เป็นหลัก สมดุลมวล: โดยจะพิจารณาที่ปริมาตรควบคุม 1 (CV1)

$$\dot{m}_{out} - \dot{m}_{in} = \Delta \dot{m}_{CV1} \quad (1)$$

เมื่อ  $\Delta \dot{m}_{CV1}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ นั้นหมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม 1 ดังนั้น

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} \quad (2)$$

สมดุลพลังงาน: โดยจะพิจารณาที่ปริมาตรควบคุม 1 (CV1)

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{CV1} \quad (3)$$

เนื่องจากไอน้ำไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน  $\Delta E_{CV1} = 0$

$$\left( w + Q + U + \frac{1}{2}mv_{in}^2 + mgz + PV \right)_n = \left( w + Q + U + \frac{1}{2}mv_{out}^2 + mgz + PV \right)_{out} \quad (4)$$

ไม่มีการเข้าหรือออกจากระบบ  $W = 0$

ไม่มีการส่งผ่านความร้อน  $Q = 0$

พลังงานศักย์ มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา  $mgz = 0$

ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ  $\Delta U = 0$

มวลเข้าเท่ากับมวลออก  $m_{in} = m_{out}$

$$\left( \frac{1}{2}mv_{in}^2 + PV \right)_n = \left( \frac{1}{2}mv_{out}^2 + PV \right)_{out} \quad (5)$$

ความเร็วขาเข้า  $\vec{v}_{in}$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วขาออก  $\vec{v}_{out}$  ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากอิทธิพลน้อยมาก เราจึงได้สมการใหม่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\vec{v}_{out}^2 = 2(P_{in}v_{in} - P_{out}v_{out}) \quad (6)$$

จากอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) มีสมการ

$$\text{รูปทั่วไปดังนี้ } \dot{m} = \rho A \bar{v}$$

$$\therefore \dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \rho A \bar{v}_{out} \quad (7)$$

สมดุลพลังงานของระบบ : โดยจะพิจารณาที่ปริมาตรควบคุม 3 (CV3)

$$\Delta E_{sys} = E_{steam} - E_{bleeder} - E_{condensate} + (m_p C_p \Delta T)_{product} \quad (8)$$

$$\Delta U_{sys} = \left( w + Q + U + \frac{1}{2}mv_{in}^2 + mgh + PV \right)_s - \left( w + Q + U + \frac{1}{2}mv_{out}^2 + mgh + PV \right)_b - (mh)_w \quad (9)$$

ไม่มีการเข้าหรือออกจากระบบ  $W = 0$

ไม่มีการส่งผ่านความร้อน  $Q = 0$

เนื่องจากเป็นช่วงรักษาอุณหภูมิ  $\Delta T = 0$

พลังงานศักย์ มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา  $mgz = 0$

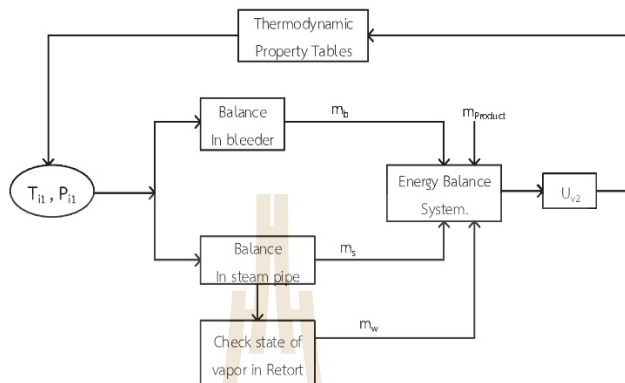
$$\Delta U_{sys} = \Delta U_s - \Delta U_b - \Delta U_w - \Delta U_{product} \quad (10)$$

$$\Delta U_{sys} = \left( \frac{1}{2}mv_{in}^2 + mh \right)_s - \left( \frac{1}{2}mv_{out}^2 + mh \right)_b - (mh)_w - (m_{product} C_{product} (\Delta T))_{product} \quad (11)$$

ในส่วนของ  $\Delta U_{product}$  ซึ่งจะประกอบไปด้วย น้ำมะพร้าว เนื้อมะพร้าว และกระป๋อง แต่ในกระบวนการนี้คือกระบวนการรักษาอุณหภูมิจึงทำให้  $\Delta T = 0$  ส่งผลให้  $\Delta U_{product}$  มีอิทธิพลน้อยมากในสมการที่(11) ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จึงไม่พิจารณาอิทธิพลของ  $\Delta U_{product}$  จึงทำให้ค่า  $\Delta U_{sys}$  คือ ส่วนของไอน้ำเพียงอย่างเดียว

หลังจากที่ได้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว เนื่องจากไม่สามารถทราบถึงสถานะของไอน้ำหลังจากฉีดเข้าไป

ภายในรีทอร์ทได้ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบสถานะของไอน้ำ ภายในรีทอร์ทว่ามีสถานะเป็นอย่างไร



รูปที่ 5 แผนผังแบบจำลองในกระบวนการในช่วงสเตอริไลซ์

ขั้นตอนตรวจสอบสถานะของไอน้ำในรีทอร์ท :

พิจารณาในระยะเวลาสั้นๆ สมมติให้ไม่มีการเปิดรูระบายอากาศ และท่อระบายน้ำ (Drain) ตรวจสอบสถานะของไอน้ำภายในรีทอร์ทว่าอยู่ในสถานะใด ได้โดย

ถ้า  $u_{v2} \leq u_f$  อยู่ในสถานะ ของเหลว

$u_f \geq u_{v2} \geq u_g$  อยู่ในสถานะ สารผสม

ดังนั้นจึงสามารถหาค่ามวลของคอนเดนเตส  $m_w$  ได้

จาก

$$m_w = \frac{m_{v2}}{x} - m_{v2} \quad (12)$$

$$\text{เมื่อ } x = \frac{u_{v2} - u_f}{u_{fg}} \quad (13)$$

จากสมการข้างต้นเมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในรีทอร์ท จะได้สมการดังต่อไปนี้

ท่อฉีดไอน้ำ

$$\vec{v}_s = \sqrt{2000(P_{s,in} v_{s,in} - P_{v,inside} v_{v,inside})} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{s,out} = \dot{m}_{s,in} = \rho_s A_s \sqrt{2000(P_{s,in} v_{s,in} - P_v v_v)} \quad (15)$$

รูระบายอากาศ

$$\vec{v}_b = \sqrt{2000(P_{v,inside} v_{v,inside} - P_{v,out} v_{v,out})} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{b,out} = \rho_v A_b \sqrt{2000(P_{v,in} v_{v,in} - P_{v,out} v_{v,out})} \quad (17)$$

พิจารณาทั้งรีทอร์ท โดยพิจารณาว่าสิ่งที่อยู่ภายในรีทอร์ททั้งหมดเป็นระบบ

$$u_{v2} = u_{v1} + \frac{\Delta U_{sys}}{m_{v2}} \quad (18)$$

$$\text{เมื่อ } m_{v2} = \frac{\text{ปริมาตร}}{\text{ปริมาตรจำเพาะ}} = \frac{V_{tank}}{v_2}$$

เมื่อทราบค่า  $u_{v2}$  ซึ่งเป็นไอน้ำในสถานะ ไออิ่มตัว (saturated vapor) เราสามารถทราบถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของไอน้ำภายในรีทอร์ทในเวลาต่าง ๆ ได้จากการคุณสมบัติของไออิ่มตัว

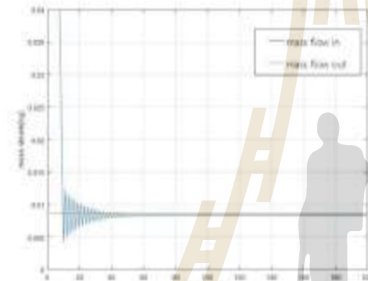
### 6. ผลการวิจัย

หลังจากที่ได้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณหาค่าอัตราการใช้ไอน้ำและอุณหภูมิภายใน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้ตรวจวัดจากกระบวนการผลิตจริง ซึ่งก็คืออัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ย

โดยค่าตัวแปรเริ่มต้น (initial condition) จะอิงตามค่ามาตรฐานการผลิต ของทางโรงงาน ตามตารางที่ 1 ตารางที่ 1 สภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อุณหภูมิเริ่มต้น	119	°C
ความดันไอน้ำ	200	kPa
อุณหภูมิถึงแควลล์	30	°C
ปริมาตรของรีทอร์ท	4.071	m <sup>3</sup>
มวลของผลิตภัณฑ์	น้ำมะพร้าว	240 กรัม/กะป๋อง
	เนื้อมะพร้าว	10 กรัม/กะป๋อง
	กะป๋อง	25 กรัม/กะป๋อง
จำนวนผลิตภัณฑ์ภายในรีทอร์ท	4320	กะป๋อง
พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดไอน้ำ	0.00435	m <sup>2</sup> /61 หัว
พื้นที่หน้าตัดของรูระบายอากาศ	0.00423	m <sup>2</sup> /3 รู

โดยเมื่อทำการการจ่ายระบบ แล้วสามารถนำมาพล็อตกราฟ อัตราการใช้น้ำที่ฉีดเข้ามาภายในรีทอร์ทและอัตราไอน้ำที่ออกทางรูระบายอากาศ ได้ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 6

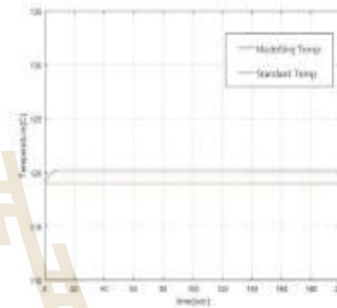


รูปที่ 6 กราฟแสดงอัตราการการใช้น้ำที่ฉีดจากแบบจำลองเทียบกับอัตราการใช้น้ำที่ได้จากการตรวจวัดจริง

จากกราฟรูปที่ 6 เราจะเห็นว่าในช่วงแรกของกระบวนการในช่วงสเตอริไลซ์ ไอน้ำจะฉีดเข้าไปในรีทอร์ทมากกว่าที่ออกทางรูระบายอากาศ ทำให้ในช่วงแรกจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเล็กน้อยและหลังจากนั้นปริมาณไอน้ำที่ฉีดเข้ารีทอร์ทจะค่อยๆลดลงและเท่ากับปริมาณที่ไหลออก ทำให้เกิดความสมดุลภายในรีทอร์ท ซึ่งก็คือการรักษาอุณหภูมิและความดันภายในหม้อไอน้ำได้ตามที่มาตรฐานกำหนด

ในส่วนของอัตราการใช้น้ำที่ได้จากการตรวจวัดเราไม่สามารถวัดอัตราการใช้น้ำของรีทอร์ทได้โดยตรงเนื่องจากหลักการของรีทอร์ท คือ เมื่อกระบวนการจะทำการปล่อยไอน้ำทิ้งทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่มีน้ำจากรีทอร์ทกลับเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) วิธีที่เราประมาณค่าอัตราการใช้น้ำของรีทอร์ทโดยประมาณ เราจะใช้การประเมินการใช้น้ำของทั้งโรงงานในวันที่มีการเปิดรีทอร์ท โดยดูจากน้ำที่เติมเข้าหม้อไอน้ำและทำการหักปริมาณไอน้ำที่อุปกรณ์ทางความร้อนอื่นๆ ใช้ออก รวมถึง ปริมาณการสูญเสียไอน้ำจากอุปกรณ์ต่าง ๆ อีก 10 %

จะได้ปริมาณไอน้ำที่รีทอร์ทใช้ ซึ่งก็คืออัตราการใช้น้ำเฉลี่ยตลอดกระบวนการ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองแล้ว พบว่าปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองคิดเป็น 13.8 % ของอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยตลอดกระบวนการ จะเห็นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่ามากเนื่องจากอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยเป็นค่าเฉลี่ยตลอดกระบวนการ แต่สำหรับแบบจำลองจะพิจารณาโดยการแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการย่อย และในช่วงของการเตอรีไลซ์ ก็คือ หนึ่งในกระบวนการย่อยที่มีการใช้อัตราการจ่ายไอน้ำค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ จึงทำให้ปริมาณไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยเมื่อเรานำมาเปรียบเทียบกับค่าการตรวจวัด



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในรีทอร์ท

จากกราฟรูปที่ 7 เป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในรีทอร์ทในช่วงแรกจะเห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและค่อยๆคงที่ โดยสาเหตุมาจากไอน้ำในช่วงแรกฉีดเข้ามาในรีทอร์ทในปริมาณมากกว่าการไหลออกทางรูระบายอากาศ จึงทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นแต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปอัตราไอน้ำไหลเข้าใกล้เคียงกับอัตราไอน้ำไหลออก ตามรูปที่ 6 ซึ่งก็ส่งผลให้อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ตั้งแต่ 25 วินาทีเป็นต้นไป

และจากกราฟรูปที่ 7 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่เป็นค่ามาตรฐานอยู่ประมาณ 1-1.2 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากในทางปฏิบัติจริง ไม่สามารถทราบค่าอุณหภูมิภายในที่แน่นอนได้ ดังนั้นค่าจริงที่ถูกควบคุมก็จะถูกกำหนดเป็นช่วงอุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิมาตรฐานอยู่ที่ 119 องศาเซลเซียส ในทางปฏิบัติจริงจะอยู่ที่ 118-120 องศาเซลเซียส



### 7.สรุป

แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลองของกระบวนการสเตอริไลซ์เซชัน หรือช่วงของการฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นช่วงที่ต้องรักษาอุณหภูมิและความดันภายในรีทอร์ทให้คงที่ ผลจากแบบจำลองพบว่าการใช้ไอน้ำในช่วงกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันคือ 62.91 kg/h หรือคิดเป็น 13.8% ของอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ย จะเห็นว่าอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยสูงกว่าที่ได้จากแบบจำลองเนื่องจากอัตราการใช้ไอน้ำเฉลี่ยเป็นการพิจารณาการใช้ไอน้ำตลอดกระบวนการ ไม่ได้พิจารณาเป็นช่วง เมื่อได้อัตราการใช้ไอน้ำในช่วงสเตอริไลซ์เซชันจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น จะนำไปสู่การหาแบบจำลองอัตราการใช้ไอน้ำในช่วงอื่นๆที่เหลือ และจะได้อัตราการใช้ไอน้ำที่แท้จริงของรีทอร์ทออกมา

เมื่อหาแบบจำลองดังกล่าวได้อย่างครบถ้วน จะนำไปสู่การทำนายอัตราการใช้ไอน้ำสุทธิของรีทอร์ทได้ โดยทั่วไปการผลิตไอน้ำสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อจะทำการผลิตไอน้ำที่มีความดัน ประมาณ 8 บาร์เกจ เพื่อให้ได้ปริมาณไอน้ำที่เพียงพอต่อการฆ่าเชื้อ แต่หากทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำที่แน่นอนสามารถลดความดันไอน้ำที่หม้อไอน้ำผลิตได้ เมื่อหม้อไอน้ำผลิตไอน้ำที่มีความดันน้อยลงก็จะทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำลงได้เช่นกัน

### 8. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$m_v$	มวลไอน้ำในรีทอร์ท (Vapor) , (Kg)
$m_s$	มวลไอน้ำ (Steam) , (Kg)
U	พลังงานภายใน , (KJ)
u	พลังงานภายในต่อหน่วยมวล ,(KJ/Kg)
V	ปริมาตรของรีทอร์ท ,(m <sup>3</sup> )
v	ปริมาตรจำเพาะ ,( m <sup>3</sup> /Kg)
T	อุณหภูมิ , (°C)
t	เวลา , (s)
E	พลังงาน , (KJ)
h	เอนทาลปี , (KJ/Kg)
$\bar{v}$	ความเร็ว (Velocity) , (m/s)
v	ไอน้ำในรีทอร์ท (vapor)
s	ไอน้ำ (Steam)
b	Bleeder
w	คอนเดนเสท (Condensate)
1	สภาวะเริ่มต้น
2	สภาวะที่ 2 เมื่อเวลาผ่านไป $\Delta t$

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.N.Berteli , A.A.Vitali, A. Marsaioli Jr. ,Ml.Berto, “ The analysis of an alternative approach to the venting process in retort operating under steam pressure ” , Journal of food Engineering 109, 2012, pp. 388-398
- [2] H.S. Ramaswamy and S.Grabowski , “Thermal Processing of Pacific Salmon in Steam / Air and Water-Immersion Still Retorts : Influence of Container Type/ Shape on Heating Behavior” ,Lebensm- Wiss. u.Technol. , 32,1999, pp. 12-18
- [3] M.N.Berteli , A.A.Vitali, A. Marsaioli Jr. ,Ml.Berto, “Alternative venting in steam retort – An approach to energy savings in thermal processing ” ,Chemical Engineering andProcessing 70 , 2013,pp.204-210
- [4] Anubhav Pratap Singh, Anika Singh , Hosahalli S. Ramaswamy, “Modification of a static steam retort for evaluating heat transfer under reciprocation agitation thermal processing ” , Journal of food Engineering 153, 2015, pp. 63-72
- [5] C. R. Chen,R.H. Ramaswamy, “ Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms”, Journal of food Engineering 53, 2002, pp. 209-220
- [6] Timothy D.Durance, “ Improving canned food quality variable retort temperature process ”,Trends in food Science & Technology April (Vol.8), 1997 , pp.113-118
- [7] R. Simpson ,C. Cortes ,A. Teixeira ,“Energy consumption in batch thermal processing model development and validation ”, Journal of food Engineering 73, 2005, pp. 217-224
- [8] Wei Liang Lau , John Reizes, Victoria Timchenko , Sami Kara , Bernard Kornfeld, “Numerical modelling of an industrial steamair sterilisation process with experimental validation”, Applied Thermal Engineering 75 , 2015, pp.122-134
- [9] Qingchun Yang , Yu Qian , Andrzej Kraslawski, Huairong Zhou , Siyu Yang , “Advanced exergy analysis of an oil shale retorting process”, Applied Energy 165 ,2016, pp. 405-415

## Steam Consumption Analysis on The Venting Process in Direct Steam Retort

[ Sasithorn Payakthong <sup>1</sup>, Teerachart Pompibul<sup>2</sup>]

**Abstract**— Presently, the steam consumption usage of the retort was unable to be found, since the equipment used in sterilization were those that used steam as a medium to provide heat. When high temperature steam is needed, the pressure of the steam becomes high as well. Thus, when sterilizing, pressure must also be maintained in addition to temperature, since high pressures can result in damage to the product, and temperatures can rise above the standard. Thus, some of the steam must be released throughout the process, and in the first parts of the sterilization, air must also be vented from the machine by opening the vent pipe. Since the inside of the retort contains steam and air mixed together, some steam is also released after the vent pipe has been opened. Thus, one can't measure the true amount of steam, resulting in the production of steam of excess pressure and amount than needed to support the steam needed for sterilization. This study will study the process of sterilization of canned coconuts and coffee. The period of venting is a very important period, since any leftover air in the retort can create a cool point, and it's also important to the temperature. Thus, this period is one that uses the most steam. This thesis aims to present a thermodynamics model for sterilization with the use of a direct steam retort in order to find the true rate of steam usage for this type of retort, since the period of venting in both types of the product tends to increase temperature and have similar product volumes for each sterilization cycle. Following an analysis from the model, it was discovered that the rate of steam usage for both coconut water and coffee have similar values, where the rate of steam usage was 0.237 kg/s for coconut water and 0.238 kg/s for coffee. After a comparison between the temperature obtained from the model compared to the measured value during the air expulsion period, it was discovered that both products have similar tendencies to increase temperature compared to the temperature obtained from measurement, with percentage error values between 0.5-1.8 %.

**Keywords**— Sterilization, Retort, Venting Process and Cool point

Sasithorn Payakthong

<sup>1</sup>Master degree student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering  
 Suranaree University of Technology  
 Thailand

Teerachart Pompibul

<sup>2</sup>Lecturer, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering  
 Suranaree University of Technology  
 Thailand

### Introduction

Presently, there are studies and construction of mathematical models of vertical direct steam retorts, which helps to find the rate of steam usage by proposing ways to create a model by considering the rate of heat transfer of various pieces of equipment inside the retort for the system (for sterilization). This adds a level of difficulty and complexity as one must consider heat transfer in many areas, resulting in many factors that must be considered, and the steam inside the retort is also considered to be an ideal gas. [6]. The aforementioned methods allow for finding the rate of steam usage of vertical direct steam retorts, which physically appears different from horizontal direct steam retorts, and the considerations concern only the retort itself, and not the actual installation. Thus, this thesis aims to present a thermodynamics model of sterilization by a horizontal direct steam retort, which uses the principles of the mass balance and energy balance in an unsteady state to consider. The system includes whatever is inside the retort, which includes steam, dry air, and the product. Other equipment includes the vent pipe, which is considered to be extubated from the retort in order to release air to the environment. A comparison of temperature results between the model and those recorded from the retort will be done, as well as the net rates of steam usage from the model with the approximated steam usage of the retort, which will be considered using the subtraction of steam usage of other heating equipment with known steam usage rates and the loss of steam, with added water taken into consideration.

### Sterilization

The process of sterilization can be divided into 3 parts, which are the venting, sterilizing, and cooling periods.

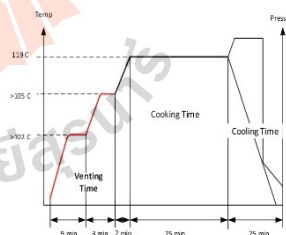


Fig. 1 Temperature and Pressure according to manufacturing standards

- The first step includes air venting from the retort, which normally will use steam pressure. It is the period where temperature will increase inside the retort until the temperature for sterilization is reached.

- The second step includes sterilization, or the period that 'cooks' the product. The temperature can range between 110-170 degrees Celsius for killing heat-resistant bacteria.
- The final step includes cooling inside the retort, to protect the container from losing shape due to differences in pressure.

## I. Methodology

### A. Heating Equipment Modelling

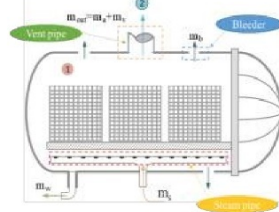


Fig. 2 Horizontal Steam-Air Retort (cross-sectional view of Horizontal Steam-Air Retort used for study)

- Modelling of the steam pipe within a horizontal steam-air retort

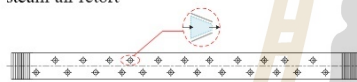


Fig. 3 Steam distribution pipe in a retort

The characteristics of the flow of steam through the steam pipe will be similar to flow through a nozzle, since there is a change in the cross section of the flow, resulting in the steam flowing through the holes around the pipe to be flowing at high speeds and be distributive due to the pressure inside the tank being different from the steam's pressure.



Fig. 4 Steam mass flow through Nozzle

#### Mass balance:

$$\sum \dot{m}_n - \sum \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{sys} \quad (1)$$

Since we have done an analysis of only the steam pipe, the rate of inward flow of the steam mass is equal to the outward flow of the steam mass, resulting in no changes to mass inside the analysed equipment.

$$\sum \dot{m}_n = \sum \dot{m}_{out} \quad (2)$$

#### Energy balance:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{sys} \quad (3)$$

Since there is no heat ( $\dot{Q}$ ) and work ( $\dot{W}$ ) through the control volume of the system and there being no changes in energy inside the system due to the consideration of a stable

system,  $\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out}$ , and the equation for calculating the desired amount of steam for the retort is as follows.

$$\left( \frac{1}{2} \dot{m}_{s,in} \bar{v}_{s,in}^2 + \dot{m}_{s,in} gZ + P_{s,in} V \right)_{in} = \left( \frac{1}{2} \dot{m}_{s,out} \bar{v}_{s,out}^2 + \dot{m}_{s,out} gZ + P_{inside} V \right)_{out} \quad (4)$$

Since the velocity of flow of steam inwards through the nozzle is very low when compared to that of outward flow ( $\bar{v}_{s,in} \ll \bar{v}_{s,out}$ ), for easier consideration the condition of ( $\bar{v}_{s,in} \approx 0$ ) is stipulated. Also, from the considered equipment, the potential energy has very little effect and is as such not considered. Thus, the equation can be rearranged as follows.

$$\bar{v}_{s,out} = \sqrt{2 \left( \frac{P_{s,in} - P_{inside}}{\rho_s} \right)} \quad (5)$$

The Mass flow rate can be obtained from ( $\dot{m} = \rho A \bar{v}$ )

$$\dot{m}_s = \rho_s A_s \sqrt{2 \left( \frac{P_{s,in} - P_{inside}}{\rho_s} \right)} \quad (6)$$

- Modelling of the bleeder of the horizontal direct steam retort

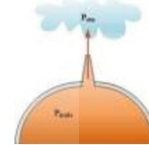


Fig. 5 Mass flow through Bleeder

The task of the bleeder is to maintain the pressure inside the tank. The venting period may not be very impactful to the rate of steam distribution, since the main potential will come from the mass that flowed out through the vent pipes. However, the importance of the bleeder will be clear in the sterilization period, which is to control pressure inside the retort and not letting it increase excessively. The mass of the steam flowing through the bleeder will be characteristically like flow through a nozzle [5]. Thus, we can use the same equations (5) and (6) for finding the rate of flow through the bleeder, resulting in the following equation.

$$\dot{m}_b = \rho_v A_b \sqrt{2 \left( \frac{P_{inside} - P_{atm}}{\rho_v} \right)} \quad (7)$$

- Modelling of the vent pipe of the horizontal steam direct retort.

Since the installation of retorts differ by manufacturing companies, including different pipe placements in reality, there will be difficulties and complexities that necessitate removing them and finding a loss coefficient to compensate for the removal of some variables.

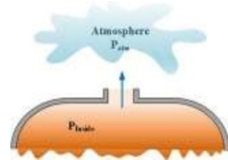


Fig. 6 Mass flow through Vent pipe

From Bernoulli's equation in the case where friction flow is discounted, it can be said that

$$\left( \frac{\bar{v}_{v,in}^2}{2g} + \frac{P_{inside}}{\rho g} + z_1 \right) = \left( \frac{\bar{v}_{v,out}^2}{2g} + \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_2 \right) \quad (8)$$

The inward velocity is very low compared to the outward velocity. ( $\bar{v}_{v,in} \ll \bar{v}_{v,out}$ ) Thus for the simplicity of consideration, it was decided that ( $\bar{v}_{v,in} \approx 0$ ) and since the impacts of pipe length, joints and bends were removed, there must be a coefficient as well, after which the equation can be rearranged as follows.

$$\bar{v}_{v,out} = C \sqrt{2 \left( \frac{P_{inside} - P_{atm}}{\rho_v} \right)} \quad (9)$$

The velocity obtained from the analysis is the speed of steam expelled from the vent pipe, but since steam and air are mixed together in there, the speed of air expelled from the vent pipe will also be equal ( $\bar{v}_{a,out} = \bar{v}_{v,out}$ )

$$\dot{m}_{v,out} = \rho_v A_v \sqrt{2 \left( \frac{P_{inside} - P_{atm}}{\rho_v} \right)} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{a,out} = \rho_a A_v \sqrt{2 \left( \frac{P_{inside} - P_{atm}}{\rho_a} \right)} \quad (11)$$

**B. Heating System Modelling**

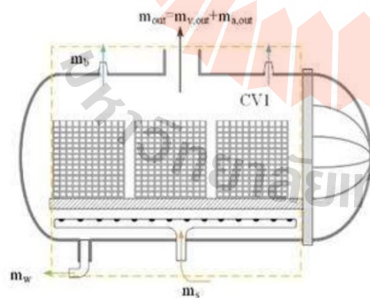


Fig. 7 control Volume 1 for Energy balance

Mass Balance:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{sys} \quad (12)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_s - \dot{m}_b - \dot{m}_{v,out} - \dot{m}_{cond} + \dot{m}_1$$

Energy Balance:

$$\Delta E_{sys} = \dot{Q} + \dot{W} + E_{steam} - E_{vent} - E_{bleeder} - E_{condensate} \quad (13)$$

$$\Delta U_{sys} = m_s \left( \frac{1}{2} \bar{v}_s^2 + h_s \right)_{steam} - m_{v,vent} \left( \frac{1}{2} \bar{v}_{v,vent}^2 + h_v \right)_{vent} - m_{b,vent} \left( \frac{1}{2} \bar{v}_{a,vent}^2 + h_a \right)_{vent} - m_b \left( \frac{1}{2} \bar{v}_b^2 + h_b \right)_{bleed} - (m h_f)_{cond} \quad (14)$$

- No work has entered or exited the system. ( $\dot{W} = 0$ )
- The system is considered to receive heat from steam only, where heat loss to the environment is minimal ( $\dot{Q} \approx 0$ )
- Changes of potential and kinetic energy in the system were not considered.

In consideration, the system includes the contents inside the retort, which are vapor, the product, and some dry air. Thus,  $\Delta U_{sys}$  is equal to

$$\Delta U_{sys} = \Delta U_{product} + \Delta U_{dryAir} + \Delta U_{vapor} \quad (15)$$

where dry air inside the retort is considered as an ideal gas. Thus,  $\Delta U_{dryAir}$  can be calculated from

$$\Delta U_{dryAir} = m_a C_{p,a} \Delta T \quad (16)$$

The following concerns  $\Delta U_{product}$  in the sterilization process of canned coconut water and canned coffee. The coconut water consists of 95.6% coconut water and 4.4% nitrogen in a can with a volume of 240 ml, whereas the coffee consist of 94.4% coffee and 5.5% nitrogen in a can with a volume of 180 ml. Nitrogen must be added in place of the air inside the can, since any leftover air can result in the growth of microbes that can spoil the food.

$\Delta U_{product}$  can be calculated from the following equation.

$$\Delta U_{product} = (m_{product} C_{p,product} (\Delta T)) + (m_N C_{p,N} (\Delta T)) \quad (17)$$

Substitution of  $\Delta U_{product}$  and  $\Delta U_{dryAir}$  in equation (15) will result in  $\Delta U_{vapor}$ , which is the part for vapor/steam when

$$\Delta U_{vapor} = U_2 - U_1 \quad (18)$$

Thus, when one is aware of the energy inside the steam in the 2<sup>nd</sup> state, they will be able to find the temperature of the 2<sup>nd</sup> state as well from determining that the system consists of steam/vapor, the product and some dry air. Thus, the temperature of the vapor will be equal to the temperature of dry air and the product.

**ii. System simulation**

Since the system of equations obtained from the modelling requires one to know the temperature and density of the steam inside the retort in the 2<sup>nd</sup> state in order to find the rate of steam usage during each considered time period, a simulation must also be used to help solve this problem regarding the system of equations. However, since there are many methods of thermal simulation, the most suitable method for the problem must be chosen. Here the most suitable method that can solve the equations' problems in this modelling is the method of successive simulation, which involves randomizing the values for the desired variables into the equations to obtain resulting values, which are

repeated until there are no changes in the obtained values. [2] The reason for choosing this method was that the equations did not have an sequence for value substitution. Thus, sequential simulation cannot be used.

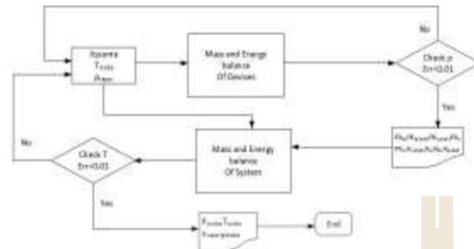


Fig. 8 Successive simulation Method Flow chart

### iii. Result And Discussion

After obtaining the thermodynamics model, the program MATLAB was then used to calculate the rates of steam usage and temperatures inside the retort for comparison with values obtained from measurement, where the initial condition will be set according to the standard of actual production from the studied factory.

TABLE I  
 INITIAL CONDITION OF MODELLING

Initial Condition	Coconut water	Coffee	Unit
Initial Temperature	60		°C
Pressure of steam		200	kPa
Surrounding Temperature		30	°C
Volume of Retort	4.27	4.27	m <sup>3</sup>
Mass Products	liquid	230	170 ml/can
	Nitrogen gas	10	10 ml/can
Quantity of Product	16,000	22,000	cans/ batch
Dimeter of Sicam Nozzle		3/16	in
Dimeter of Bleeder		1/8	in
Dimeter of Manifold Vent pipe		3	in
Temperature of Sterilization	119	121	°C

Here after system stimulation and graph plotting, the temperature of air venting of both products compared to the measured temperatures are displayed as graphs in figures 9 and 10.

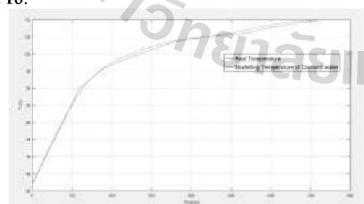


Fig. 9 Temperature inside of Coconut water(C) with Time(sec)

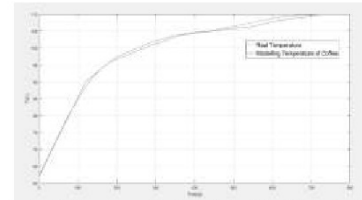


Fig. 10 Temperature inside of Coffee(C) with Time(sec)

Figures 9 and 10 display the temperature values during the venting period of the retort at various time points for both products compared with the temperatures measured using the thermometers inside the retort. The temperatures obtained from the model were like that from actual measurement, with the same tendency of increasing temperature. Since both products had different sterilization temperatures but have same temperatures during the venting period until the 12 minutes marker, the increases in temperature were different after opening the vent pipes. Furthermore, the differences between the real temperatures and that obtained from modelling were calculated as a percentage error as per figure 11.

$$\%Err = \left| \frac{(T_{real} - T_{model})}{T_{real}} \right| \times 100\% \quad (19)$$

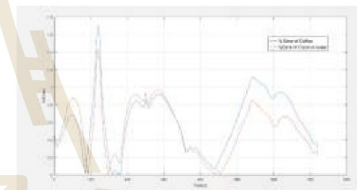


Fig. 11 %Error between Real Temperature and Temperature of Modeling with Time(sec)

Figure 11 displays the error values of temperatures obtained from the model and from measurement at various times. It can be seen that the maximum error values for are 1.42% for coconut water and 1.7% for coffee. The resulting error was very low, indicating that the tendencies for the model to be close to that of the real/measured ones and meaning that the amount of steam used in the venting period obtained from the modelling is similar to the actual amount of steam used.

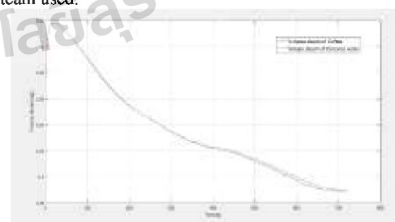


Fig. 11 mass steam(kg) with Time(sec)

#### IV. Conclusions

The results obtained from the modelling of the sterilization system during the venting period were that canned coconut water used 170.72 kg/12 mins while coffee used 171.13 kg/12 mins, and that the error values of temperature was the only value able to be measured. Thus, it was the only thing that can be used for comparison to ensure that the model is accurate and similar to the true value as much as possible, which was done through the analysis of errors in temperature during the venting period, which ranged between 0.5-1.8 %, which counts as very little. Thus, it can be believed that the amount obtained from the modelling was similar to that of the actual system.

#### v. Unit

##### Nomenclature

m	mass ,(kg)
U	Internal Energy , (kJ)
Q	Heat,(kJ)
W	Work ,(kJ)
u	Internal Energy by mass,(kJ/kg)
V	Volume ,(m <sup>3</sup> )
$\bar{v}$	Velocity , (m/s)
T	Temperature, (°C)
t	Time , (s)
C	Loss coefficient
C <sub>p</sub>	Specific heat, (kJ/kg °C)
E	Energy , (kJ)
h	Enthalpy , (kJ/kg)

##### Greek symbols

$\rho$	Density ,(kg/m <sup>3</sup> )
--------	-------------------------------

##### Subscripts

in	Flow in
out	Flow out
inside	inside the Retort
v	vapor
a	dry air
s	Steam
b	Bleeder
c	Condensate
1	Initial state of the Process
2	Final state of the Process

- [3] H.S. Ramaswamy and S.Grabowski ,“Thermal Processing of Pacific Salmon in Steam / Air and Water-Immersion Still Retorts : Influence of Container Type/ Shape on Heating Behavior” ,Lebensm-Wiss. u.Technol ., 32,1999, pp. 12-18
- [4] C.R. Chen,R.H.Ramaswamy, “ Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms”, Journal of food Engineering 53, 2002, pp. 209-220
- [5] Timothy D.Durance, “ Improving canned food quality variable retort temperature process ”,Trends in food Science & Technology April (Vol.8), 1997 , pp.113-118
- [6] R.Simpson ,C.Cortes ,A.Teixeira ,“Energy consumption in batch thermal processing model development and validation ”, Journal of food Engineering 73, 2005, pp. 217-224

About Author (s):



Sasithorn Payakthong was born in Nakhon Si Thammarat province, Thailand on March 16, 1993. She received her B.Eng. (2016) in Mechanical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. Currently, she is a master degree student in Mechanical Engineering Program, Suranaree University of Technology.

#### References

- [1] M.N.Berteli , A.A.Vitali, A. Marsaioli Jr. ,Ml.Berto, “ The analysis of an alternative approach to the venting process in retort operating under steam pressure ”, Journal of food Engineering 109, 2012, pp. 388-398
- [2] STOECKER W.F.Design of thermal systems, 3th ed.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวศศิธร พยัคฆ์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2536 ที่อำเภอเมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมตอนต้นและมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2557 หลังจากสำเร็จการศึกษา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2558 โดยระหว่าง การศึกษาได้มีโอกาสนำเสนอรายวิชาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ การเขียนแบบวิศวกรรม 1 ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้วิจัยและวิจัยร่วมกับคณาจารย์จนมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 2 เรื่อง ได้แก่

ผลงานทางวิชาการเรื่อง “การวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมสำหรับหม้อน้ำเชื้อ แรงดันสูงในกระบวนการสเตอริไลซ์เซชันเพื่อการประหยัดพลังงาน” ในงานประชุมวิชาการ เครื่องช่วยพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 ในระหว่างวันที่ 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน พ.ศ. 2560 จังหวัดเชียงใหม่

ผลงานทางวิชาการเรื่อง “Steam Consumption Analysis on The Venting Process in Direct Steam Retort” ในงานประชุมวิชาการ 8<sup>th</sup> International Conference on Advances In Mechanical, Aeronautical and Production Techniques ในระหว่างวันที่ 3 - 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 เมือง กัวลาลัมเปอร์ ประเทศมาเลเซีย