การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF CANNED FRUIT JUICE PLANT

ปพิชญา บัวโชติ
PAPITCHAYA BUACHOTE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

KMITL-2007-AI-M-053-037

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF CANNED FRUIT JUICE PLANT

ปพิชญา บัวโชติ

PAPITCHAYA BUACHOTE

เลขหมู่.........
เลขทะเบียน 76754
วัน,เดือน,ปี - 6 ส.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-AI-M-053-037

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF CANNED FRUIT JUICE PLANT

PAPITCHAYA BUACHOTE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

KMITL-2007-AI-M-053-037

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง
นักศึกษา	นางสาวปพิชญา บัวโชติ
รหัสนักศึกษา	47063204
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. รุจิรา ตาปราบ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อนของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ของโรงงานตัวอย่างประกอบด้วย 3 หน่วยหลัก ได้แก่ หน่วยการทำน้ำร้อน หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ และหน่วยการฆ่าเชื้อ โดยหน่วยการทำน้ำร้อนใช้ไอน้ำ 781 kg/h ที่อุณหภูมิ 170 °C เพื่อทำให้น้ำ 12200 kg/h มีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 55°C เป็น 92 °C เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำผลไม้ที่อุณหภูมิ 37 °C ให้สูงขึ้นเป็น 85 °C ที่หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ จากนั้นน้ำผลไม้จะถูกบรรจุในกระป๋องเพื่อทำการฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 175 °C ในหน่วยการฆ่าเชื้อ เมื่อทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อนโดยอาศัยหลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีพบว่า หน่วยการทำน้ำร้อนมีประสิทธิภาพเอนทัลปี 93% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 74% สำหรับหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 48% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 47% และหน่วยการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพเอนทัลปี 80% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 69% จากนั้นได้วิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทำงานของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์และหน่วยการทำน้ำร้อนด้วยหลักการของประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี โดยให้มวลและอุณหภูมิของน้ำร้อนเป็นตัวแปร และให้มวลกับอุณหภูมิของน้ำผลไม้มีค่าเท่ากับค่าจริงของโรงงานตัวอย่าง พบว่าได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของหน่วยการผลิตได้ โดยในหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์จะได้ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีมีค่าเท่ากันประมาณ 57% เมื่อเลือกใช้มวลของน้ำ 10,000 kg/h ที่อุณหภูมิ 92 °C ให้ความร้อนกับน้ำผลไม้ ส่วนหน่วยการทำน้ำร้อนเมื่อเลือกใช้มวลของไอน้ำ 665 kg/h ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นตัวให้ความร้อนกับน้ำจำนวน 10,000 kg/h ที่อุณหภูมิ 52 °C ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 92 °C ที่เงื่อนไขนี้พบว่าหน่วยการทำน้ำร้อนมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีเท่ากับ 95% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีนี้สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์ที่เหมาะสมของแต่ละหน่วยการผลิตของโรงงานน้ำผลไม้ตัวอย่างได้

Thesis Title	Energy and Exergy Analysis of Canned Fruit Juice Plant
Student	Miss Papitchaya Buachote
Student ID.	47063204
Degree	Master of science
Program	Food science
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ruchira Taprap

ABSTRACT

This research was aimed to analyse the thermal energy of the canned fruit juice process. This process comprises of three main units: heating unit, pasteurization unit and retort unit. At the heating unit, the mass flow rate 781 kg/h of steam at 170°C is used to raise the temperature of 12,200 kg/h water from 55°C to 92°C in order to heat fruit juice from 37°C to 85°C at the pasteurization unit. Then juice is filled into can and sterilized by steam at 175°C in the retort unit. When the enthalpy and exergy analyses were conducted, the results revealed that the enthalpy efficiency and exergy efficiency of the heating unit were 93% and 74%, whereas the efficiencies in the pasteurization unit were 48% and 47% and in the retort unit were 80% and 69%, respectively. Then the operational variables of the pasteurization unit and the heating unit were analysed based on the definition of enthalpy efficiency and exergy efficiency. the mass flow rate and temperature of fruit juice were kept at the same values as of the real process, but varied the mass flow rate and temperature of hot water in the input stream. From the analysis, the data were shown graphically in a good relation and can be used as a tool for the selection of the process criteria. When the mass flow rate of water was selected at 10,000 kg/h and its temperature at 92°C for exchanging heat with fruit juice, the enthalpy efficiency and the exergy efficiency of the pasteurization unit were found to be equal around 57%. At the heating unit, the proper condition was found when the mass flow rate of steam of 665 kg/h at 170°C to exchange heat with the water of 10,000 kg/h that resulted increasing its temperature from 52°C to 92°C. At this condition, its enthalpy efficiency and its exergy efficiency were 95% and 75%, respectively. The results of energy analysis based on the enthalpy efficiency and exergy efficiency can be used as a tool to select the suitable criterion for each unit of the fruit juice plant.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก รศ. ดร. รุจิรา ตาปราบ ที่ได้ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำแนวทางและข้อคิดเห็นต่างๆ แก่ข้าพเจ้าตลอดมา ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน) และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้กรุณาแนะนำและเอื้อเฟื้อข้อมูลในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ปพิชญา บัวโชติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

คำอธิบายสัญลักษณ์.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 บทนำ.....1

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

1.4 วัตถุประสงค์.....2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 การวิเคราะห์พลังงาน.....3

2.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี.....7

2.3 การวิเคราะห์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....11

บทที่ 3 การวิเคราะห์พลังงานของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง.....14

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....14

3.2 ข้อมูลและกระบวนการผลิตน้ำผลไม้.....14

3.3 การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี.....19

บทที่ 4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการผลิต.....26

4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์.....26

4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน.....32

4.3 การวิเคราะห์ผลของประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยการผลิต.....37

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 บทสรุป..39

5.1 ผลการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิต...............39

5.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการผลิต.................39

บรรณานุกรม..41

ภาคผนวก..43

ก. การวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการผลิตน้ำผลไม้...44

ข. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหน่วยการผลิต...56

ค. การคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ...69

ง. ตารางค่าคงที่..70

ประวัติผู้เขียน..73

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ข้อมูลของหน่วยการผลิต....17
3.2 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของหน่วยการทำน้ำร้อน....20
3.3 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน....20
3.4 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์....22
3.5 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์....22
3.6 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของหน่วยการฆ่าเชื้อ....24
3.7 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหน่วยการฆ่าเชื้อ....24
4.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์....31
4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดของหน่วยการทำน้ำร้อน....36
4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดของหน่วยการผลิต....38
ข.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์....62
ข.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน....68
ค.1 ข้อมูลส่วนประกอบของน้ำผลไม้กระป๋อง....69
ง.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำที่ความดันอิ่มตัว....70
ง.2 คุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว....71
ง.3 ความร้อนจำเพาะของอาหารและวัสดุบางชนิด....72

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง....................16

3.2 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการทำน้ำร้อน....................19

3.3 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์....................21

3.4 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการฆ่าเชื้อ....................23

3.5 แสดงผลสรุปประสิทธิภาพและการสูญเสียของเอนทัลและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิต....................25

4.1 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 1 27

4.2 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 2 28

4.3 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 3 28

4.4 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 4 29

4.5 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 5 29

4.6 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 6 30

4.7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 1..........33

4.8 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 2..........33

4.9 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 3..........34

4.10 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 4..........34

4.11 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 5..........35

4.12 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 6..........35

ก.1 แสดงสมดุลมวลของหน่วยการทำน้ำร้อน....................44

ก.2 แสดงสมดุลมวลของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์....................48

ก.3 แสดงสมดุลมวลของหน่วยการฆ่าเชื้อ....................52

ข.1 แสดงสมดุลของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ตัวอย่างที่ 1....................59

ข.2 แสดงสมดุลของหน่วยการทำน้ำร้อนตัวอย่างที่ 1....................64

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

C_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะของสาร (kJ/kg.K)
E	=	พลังงานภายใน (kJ)
E_f	=	ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (%)
Ex	=	เอ็กเซอร์ยี (kJ/h)
ε	=	ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (%)
h	=	เอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำ (kJ/h)
H	=	เอนทัลปี (kJ/h)
m	=	มวลของสาร (kg/h)
η	=	ประสิทธิภาพเอนทัลปี (%)
P	=	ความดันสมบูรณ์ (N/m^2)
q	=	ปริมาณความร้อน (kJ)
q_p	=	ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้ความดันคงที่ (kJ)
q_{ac}	=	ความร้อนที่ถ่ายเทจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (kJ/h)
q_{max}	=	ความร้อนที่ถ่ายเทได้มากที่สุด (kJ/h)
ΔS	=	เอนโทรปี (kJ/kg.K)
T	=	อุณหภูมิของสาร (°C)
T_o	=	อุณหภูมิอ้างอิง (25°C)
ΔT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (°C)
V	=	ปริมาตรของระบบ (m^3)

ตัวห้อย

c	=	สายเย็น
con	=	คอนเดนเสต
d	=	น้ำทิ้ง
h	=	สายร้อน
hw	=	น้ำร้อน
i	=	ขาเข้า
j	=	น้ำผลไม้

jc	=	น้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง
L	=	loss
o	=	ขาออก
s	=	ไอน้ำ
w	=	น้ำ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

น้ำผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแปรรูปจากผลไม้อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์และเป็นการยืดอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ได้มีการพัฒนาขึ้นมาก เนื่องจากความเจริญทางเทคโนโลยี และน้ำผลไม้ถือได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยจากรายงานสินค้าส่งออกสำคัญของไทยในปี 2549 โดยกรมส่งเสริมการส่งออกกระทรวงพาณิชย์ พบว่าการแปรรูปผลไม้เป็นสินค้าส่งออกสำคัญอันดับ 2 ของไทยในกลุ่มอุตสาหกรรมเกษตร ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปจะมีการใช้พลังงานไม่มากก็น้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมนั้นๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ก็เป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เพื่อให้ทราบถึงสภาวะปัจจุบันของการใช้พลังงานของแต่ละกระบวนการจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การใช้พลังงานเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่แท้จริงของโรงงาน

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โรงงานอุตสาหกรรมควรที่จะรู้ถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานของหน่วยการผลิตต่างๆในโรงงาน ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์พลังงาน เมื่อวิเคราะห์พลังงานโดยใช้หลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีจะสามารถแสดงผลของประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ชัดเจนและถูกต้องมากขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้จัดเป็นอุตสาหกรรมอาหารที่มีการใช้พลังงานความร้อนเช่นกัน เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้จำเป็นที่จะต้องเพิ่มอุณหภูมิของน้ำผลไม้ให้สูงขึ้นในระดับที่เพียงพอต่อการถนอมรักษาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงควรที่จะทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของแต่ละหน่วยการผลิตที่มีการใช้พลังงานความร้อน ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนในโรงงานที่แท้จริง และหาแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานเพื่อให้โรงงานน้ำผลไม้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุดได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานของโรงงานผลิตน้ำผลไม้ โดยทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋องและนำมาเขียนแผนภาพการผลิต ทำการตรวจสอบว่าหน่วยการผลิตใดบ้างที่มีการใช้พลังงานความร้อน จากนั้นวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อนและประสิทธิภาพของแต่ละหน่วยการผลิตที่มีการใช้พลังงานโดยอาศัยหลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี แล้วพิจารณาดูว่าหน่วยการผลิตใดมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ และหาแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานเพื่อให้โรงงานน้ำผลไม้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

1.4 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการใช้พลังงานความร้อนโดยทำการวิเคราะห์ค่าเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีเพื่อหาประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในโรงงานน้ำผลไม้
2. เพื่อหาแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานของโรงงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
3. เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับโรงงานน้ำผลไม้อื่นๆ หรือโรงงานที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. โรงงานตัวอย่างสามารถทราบถึงการใช้พลังงานที่แท้จริงในกระบวนการผลิต
2. โรงงานตัวอย่างสามารถนำข้อเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงการใช้พลังงานไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้
3. สามารถใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับโรงงานน้ำผลไม้อื่นๆ หรือโรงงานที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีศึกษาที่สนใจจะทำการวิเคราะห์พลังงาน

บทที่ 2
ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์การใช้พลังงานของกระบวนการผลิตใดก็ตาม จำเป็นที่จะต้องทราบถึงสภาพการใช้พลังงานในปัจจุบันของโรงงานนั้น ๆ เช่น ในกระบวนการผลิตต้องใช้ไอน้ำในปริมาณเท่าใด มีความดันและอุณหภูมิเป็นเท่าใด เป็นต้น เมื่อทราบถึงข้อมูลเบื้องต้นเหล่านี้แล้วก็จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานได้ พลังงานไม่ว่าในรูปแบบใดสามารถอธิบายได้ทั้งเชิงปริมาณ (quantity) และคุณภาพ (quality) ดังนั้นในการวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบถึงค่าเอนทัลปี (enthalpy) และเอนโทรปี (entropy) ซึ่งเอนทัลปีจะบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่นำไปใช้งานและปริมาณความร้อนที่สูญเสีย ส่วนเอนโทรปีจะสามารถบอกได้ถึงคุณภาพของพลังงาน

2.1 การวิเคราะห์พลังงาน (Energy Analysis)

Singh (1978) ได้พัฒนาการวิเคราะห์โดยการทำรูปแบบของกระบวนการผลิตขึ้นมาเพื่อเป็นการแสดงภาพรวม โดยวิธีการวิเคราะห์พลังงาน มีอยู่ 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. ตั้งวัตถุประสงค์ (decide on objective)

ในขั้นแรกจะต้องตั้งวัตถุประสงค์ที่จะต้องคำนวณพลังงาน วัตถุประสงค์ที่ตั้งต้องมีโอกาสเป็นไปได้ที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานภายในโรงงาน โดยเฉพาะแหล่งของพลังงานความร้อนต่างๆ เช่น ไอน้ำ ลมร้อน เป็นต้น

2. เลือกขอบเขตของระบบ (choose a system boundary)

การเลือกขอบเขตของระบบจะทำได้โดยการพิจารณาขอบเขตของกระบวนการ พยายามทำในส่วนที่จำเป็นและเห็นว่าสำคัญ ในขั้นตอนนี้ค่อนข้างยากเมื่อต้องทำการวิเคราะห์ในระบบที่ใหญ่เกินไป อย่างไรก็ตามการเลือกขอบเขตของระบบจะมีความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์พลังงานของเครื่องมือในกระบวนการนั้น

3. วาดแผนผังของกระบวนการ (draw a flow diagram of the process)

เป็นการวาดแผนผัง (flow chart) ของกระบวนการผลิตภายใต้การคำนวณพลังงาน

4. แสดงมวลและพลังงานขาเข้า (identify all mass and energy input)

เขียนมวลและพลังงานขาเข้าทั้งหมดที่มีผลต่อกระบวนการ โดยเขียนมวลและพลังงานทั้งหมดรวมถึงทิศทางการไหลด้วย ตัวอย่างของพลังงาน เช่น ไอน้ำ ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลของมวลและพลังงานรวมถึงค่าต่างๆจะต้องมีความถูกต้อง

5. กำหนดปริมาณของมวลและพลังงานขาเข้าทั้งหมด (quantify all mass and energy input)

คำนวณมวลและพลังงานทั้งหมดในกระบวนการ โดยคำนวณพลังงานของแต่ละเครื่องมือการผลิต โดยคิดทีละขั้นตอน เช่น คิดจากทิศทางการไหลของไอน้ำ ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์เป็นต้น ซึ่งเขียนเป็นหน่วยมวลของการผลิตต่อเวลา เช่น กิโลกรัมต่อชั่วโมง

6. แสดงมวลและพลังงานขาออก (identify all mass and energy output)

เขียนมวลและพลังงานขาออกของระบบ และหามวลที่อาจเกิดขึ้นได้จากระบบ เช่น ไอน้ำหรือ การเพิ่มพลังงานภายในผลิตภัณฑ์ เช่น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์

7. กำหนดปริมาณมวลและพลังงานออก (quantify all mass and energy output)

ขั้นตอนสุดท้ายนี้พลังงานจะถูกคำนวณตามทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และชนิดของพลังงานความร้อน

2.1.1 สมดุลมวล (Mass Balance)

การทำสมดุลมวลมีความสำคัญต่อการควบคุมการแปรรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมการผลิต (yeild) ของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใดๆเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาสมดุลของมวลที่เกิดขึ้นใหม่ด้วย สมดุลของมวลสามารถแสดงในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$m_i - m_o = m_{accumulation} + m_{generation} - m_{consumption} \qquad (2.1)$$

เมื่อ m_i = มวลขาเข้าของระบบ

m_o = มวลขาออกของระบบ

$m_{accumulation}$ = มวลสะสมภายในระบบ

$m_{generation}$ = มวลที่เกิดขึ้นภายในระบบ

$m_{consumption}$ = มวลที่ใช้ไปของระบบ

ถ้าไม่มีการใช้หรือเกิดมวลขึ้น จะเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.2)

$$m_i = m_o + m_{accumulation} \qquad (2.2)$$

นอกจากนี้ ถ้าเป็นสภาวะที่เรียกว่า steady – state จะไม่มีการสะสมของมวลเกิดขึ้นภายในขอบเขตของระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$m_i = m_o \tag{2.3}$$

2.1.2 สมดุลพลังงาน (Energy Balance)

พลังงานอาจอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น ความร้อน พลังงานจลน์ พลังงานเคมี พลังงานศักย์ แต่การแยกพลังงานแต่ละอย่างออกมาทำได้ไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตามการใช้สมดุลของพลังงานในการหาค่าต้นทุนและลักษณะคุณภาพของการแปรรูปก็ยังเป็นที่นิยม ในทำนองเดียวกันกับสมดุลมวล สมดุลพลังงานในระบบที่ไม่มีการสร้างพลังงานและไม่มีการใช้พลังงานจะได้สมการดังต่อไปนี้ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535)

$$E_i = E_o + E_{accumulation} \tag{2.4}$$

เมื่อ E_i = พลังงานขาเข้าของระบบ

E_o = พลังงานขาออกของระบบ

$E_{accumulation}$ = พลังงานสะสมภายในระบบ

สมดุลของพลังงานอาจคำนวณจากพลังงานภายนอกที่ใช้ต่อมวลผลิตภัณฑ์หนึ่งกิโลกรัม หรือมวลของแข็งแห้งหรืออื่นๆ ดังนั้นสมดุลพลังงานจะเขียนได้จากการกำหนดขอบเขตของระบบรอบเครื่องมือต่างๆ หรือขั้นตอนการแปรรูป หรือตลอดโรงงาน ในที่นี้สมมติว่าไม่มีความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น งาน (work)

2.1.3 เอนทัลปี (Enthalpy)

เอนทัลปี (H) เป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งที่แตกต่างจากพลังงานภายใน ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีและพลังงานภายในสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H = E + PV \tag{2.5}$$

เมื่อ E = พลังงานภายในระบบ (J)

P = ความดันสัมบูรณ์ (N/m^2)

V = ปริมาตรของระบบ (m^3)

สำหรับกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นโดยที่ความดันของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีของระบบจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ให้เข้าไป และสามารถหาค่าเอนทัลปีได้ดังสมการ (2.6)

$$\Delta H = q_p \tag{2.6}$$

เอนทัลปีเป็นฟังก์ชันของ E , P และ V ซึ่งต่างก็เป็นฟังก์ชันของสถานะทำให้ ΔH เป็นฟังก์ชันของสถานะด้วย เมื่อระบบมีการเปลี่ยนสภาวะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV) \tag{2.7}$$

ถ้า ΔH มีค่าเป็นบวกแสดงว่าระบบจะรับความร้อนเข้าไป แต่ถ้า ΔH มีค่าเป็นลบแสดงว่าระบบจะคายความร้อนออกมา

ปริมาณความร้อน (q) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของวัตถุมวลใดๆ (m) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$q = mC_p \Delta T \tag{2.8}$$

เมื่อ C_p = ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg °C)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (°C)

จากที่กล่าวมาสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ความดันคงที่ในเทอมของความร้อนจำเพาะได้ดังนี้

$$q_p = \Delta H = mC_p\Delta T \tag{2.9}$$

การคิดเอนทัลปีจะเลือกสถานะอ้างอิงสำหรับองค์ประกอบทั้งหมดที่เข้าและออกจากระบบ นั้นคือ การเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทัลปีขององค์ประกอบจากสถานะอ้างอิงไปเป็นสถานะปัจจุบัน

โดยพิจารณารูปของค่าเอนทัลปีสมบูรณ์ของระบบอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) ในงานวิจัยนี้มีค่า 25 องศาเซลเซียส

สมการสมดุลเอนทัลปี คือ

เอนทัลปีที่เข้าสู่ระบบ = เอนทัลปีที่ออกจากระบบ + เอนทัลปีที่สูญเสีย

หรือ $$\Delta H_i = \Delta H_o + \Delta H_L \qquad (2.10)$$

ประสิทธิภาพเอนทัลปี (cnthalpy efficiency , η) ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถหาได้ดังนี้

$$\% \eta = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้า}} \times 100\%$$

$$= \frac{\text{enthalpy output}}{\sum \text{enthalpy input}} \times 100\% \qquad (2.11)$$

2.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี (Exergy Analysis)

หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์พลังงาน โดยกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างงานและความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการทางอุตสาหกรรม แต่ไม่ได้กำหนดทิศทางของการถ่ายเทของงานและความร้อนคือ ทิศทางการถ่ายเทจะเป็นแบบใดก็ได้ซึ่งอาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง สำหรับกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะมีการกำหนดทิศทางการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นได้จริง ดังนั้นกระบวนการจะเกิดขึ้นได้จริงต้องเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (สิทธิพร พึ่งใหญ่, 2542) ในอดีตการวิเคราะห์พลังงานโดยเฉพาะพลังงานความร้อนจะทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของพลังงานโดยใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะหมายถึงเอนทัลปี ส่วนการวิเคราะห์หาคุณภาพของพลังงานจะต้องใช้กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งจะหมายถึงเอนโทรปี ทั้งเอนทัลปีและเอนโทรปีสามารถสร้างความสัมพันธ์กันได้ เรียกว่าเอ็กเซอร์ยี ซึ่งการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีสามารถบอกได้ว่าที่ใดในกระบวนการผลิตมีการใช้พลังงาน

อย่างไม่มีประสิทธิภาพและสามารถคำนวณหาปริมาณการสูญเสียที่แท้จริงได้ (Dincer และCengel, 2001)

2.2.1 เอนโทรปี (Entropy)

เอนโทรปี (S) เป็น ตัวแปรสำคัญในการบอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการต่างๆ โดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี เป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิสัมบูรณ์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dS = dq / T \tag{2.12}$$

เมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะจาก 1 ไปเป็น 2 ภายใต้อุณหภูมิคงที่ สมการ (2.12) จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

$$= q / T \tag{2.13}$$

จากนิยามของเอ็กเซอร์ยีที่ว่า เอ็กเซอร์ยี คือ งานที่สามารถได้รับจากระบบโดยตรงมีค่าของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นค่ามาตรฐาน ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดัง นี้

$$\Delta Ex = \Delta H - T_o \Delta S \tag{2.14}$$

สำหรับสมการสมดุลเอ็กเซอร์ยีคือ

เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ = (เอ็กเซอร์ยีที่ไหลออกจากระบบ) + (เอ็กเซอร์ยีที่สูญเสีย) + (เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้)

หรือ

$$\Delta Ex_i = \Delta Ex_o + \Delta Ex_L + \text{irreversibility} \tag{2.15}$$

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยี (exergy efficiency , ε) สามารถหาได้ดังสมการนี้

$$\%\varepsilon = \frac{\text{เอ็กเซอร์ยีที่ใช้ประโยชน์}}{\text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้า}} \times 100\%$$

$$= \frac{\text{exergy output}}{\sum \text{exergy input}} \times 100\% \qquad (2.16)$$

สำหรับงานวิจัยทางด้านอาหารที่นำหลักการของเอ็กเซอร์ยีไปใช้ในการวิเคราะห์พลังงานควบคู่กับเอนทัลปี ได้แก่

Fang และคณะ (1995) ได้นำเอ็กเซอร์ยีมาใช้ในการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการผลิตนมและนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์พลังงานด้วยกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (หรือเอนทัลปี) ในกระบวนการผลิตนมมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และการลดอุณหภูมิในกระบวนการต่างๆดังกล่าวนี้จะเกี่ยวข้องกับการรับพลังงานความร้อน และการให้พลังงานความร้อน เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานพบว่าประสิทธิภาพเอนทัลปีมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี เช่น ในส่วนของการโฮโมจีไนซ์มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 54.9% แต่มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเพียง 6.8 % เป็นต้น

สุดสาคร นุ้ยดี (2538) ได้ศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานความร้อนในโรงงานปลาทูน่ากระป๋องโดยอาศัยหลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี อุปกรณ์หลักในกระบวนการผลิตประกอบด้วย หม้อไอน้ำ อ่างต้มปลา หม้อนึ่งปลา และหม้อฆ่าเชื้อ จากการวิเคราะห์พบว่าหม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี มีค่า 40.5% และ12.2% ตามลำดับ อ่างต้มปลามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 44.4% แต่มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเพียง 9.2% ส่วนหม้อนึ่งปลามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 36.1% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 9.3% และหม้อฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพเอนทัลปี และเอ็กเซอร์ยี 44.4% และ 19.8% ตามลำดับ ความแตกต่างของประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีนั้นมีผลมาจากค่าของพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับที่เกิดจากช่วงต่างๆ ของกระบวนการ

สุจิตตา เรืองรัศมี (2542) ทำการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปี และเอ็กเซอร์ยี ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารประเภทขบเคี้ยว (snack) โดยมีวัตถุดิบหลัก คือ ถั่ว และปลา จากการวิเคราะห์พลังงานพบว่าบางส่วนมีประสิทธิภาพเอนทัลปีสูงกว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี เช่น ส่วนไล่ความชื้นมีประสิทธิภาพเอนทัลปี 27.26% แต่มีค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเพียง 4.93% แต่บางส่วนมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีใกล้เคียงกัน เช่น ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของส่วนเตาทอด มีค่า 98.2% และ 94.49% ตามลำดับ

Midilli และKucuk (2003) ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการอบแห้งของ pistachio ชนิดปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการทำแห้งโดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง พบว่าในการทำแห้งของ pistachio ชนิดปอกเปลือกมีการใช้พลังงานในช่วง 0 - 637 J/s คิดเป็น % EUR (energy utilization ratio) ได้ 0 – 24.9% ซึ่งทำให้มีน้ำหนักลดลงจาก 100 กรัม ไปเป็น 75.95 กรัม ส่วนการทำแห้งของ pistachio ชนิดไม่ปอกเปลือกมีน้ำหนักลดลงจาก 100 กรัม ไปเป็น 74.35 กรัม โดยใช้พลังงานในการทำแห้งไป 0 – 891 J/s ซึ่งคิดเป็น % EUR ได้ 0 – 34.8 % และเมื่อทำการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีในการทำแห้งของ pistachio ทั้งสองชนิดพบว่าการทำแห้ง pistachio ชนิดปอกเปลือกมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 27.84 - 100 % และมีเอ็กเซอร์ยีสูญเสียไประหว่างช่วง 0.07 – 2.64 kJ/kg ส่วนการทำแห้งpistachio ชนิดไม่ปอกเปลือกมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 10.86 – 100 % และมีเอ็กเซอร์ยีสูญเสีย 0.13 – 3.24 kJ/kg ซึ่งจากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าการทำแห้ง pistachio ชนิดปอกเปลือกมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากกว่าชนิดไม่ปอกเปลือก และปริมาณพลังงานที่สูญเสียมากที่สุดจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำแห้ง pistachio ชนิดไม่ปอกเปลือก

กุลพร พุทธมี (2546) ได้ศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานปลากระป๋อง โดยจะเน้นการวิเคราะห์ด้านพลังงานความร้อนเป็นหลัก เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานแล้วพบว่าบางส่วนมีประสิทธิภาพเอนทัลปีสูงกว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี เช่น หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพเอนทัลปี และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี คือ 39.46% และ12.14% เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้ พบว่ามีค่าสูงถึง 81.69% เป็นต้น และบางส่วนมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีใกล้เคียงกัน เช่น ส่วนของการฆ่าเชื้อมีค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี คือ 30.94% และ 25.17% โดยมีค่าพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้ 37.62%

เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีแล้วจะทำให้ทราบถึงค่าประสิทธิภาพเอนทัลปี และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี ถ้าทั้งสองค่านี้แตกต่างกันมากๆ แสดงว่าหน่วยการผลิตนั้นมีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากค่าพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้ที่เกิดจากช่วงต่างๆ ของกระบวนการ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเอ็กเซอร์ยีสามารถคำนวณหาค่าพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้ แต่การคำนวณประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 หรือเอนทัลปีไม่สามารถพิจารณาค่าพลังงานผันกลับไม่ได้ ถ้าอุปกรณ์ใดมีค่าพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้สูงก็แสดงว่ามีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

2.3 การวิเคราะห์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(Energy Analysis of Heat Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายเทพลังงานความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน หน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการ และมีประสิทธิภาพ การจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกแบ่งตามทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเครื่องแลกเลี่ยนความร้อน แบ่งได้ 3 ลักษณะคือ แบบไหลสวนทาง (counter current flow) แบบไหลขนานกัน (parallel flow) และแบบไหลตั้งฉากกัน (cross flow) (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2533)

การคำนวณประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness of Heat Exchanger)

ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E_f) คือ อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (actual heat transfer,q_{ac}) ต่อความร้อนที่จะถ่ายเทได้มากที่สุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (maximum possible heat transfer, q_{max}) (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2533)

$$E_f = \frac{\text{actual heat transfer}}{\text{maximum possible heat transfer}} = \frac{q_{ac}}{q_{max}} \qquad (2.17)$$

การคำนวณหาค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้ดังนี้

กรณีที่ 1 : เมื่อ $m_c C_{pc} > m_h C_{ph}$

ความร้อนที่ถ่ายเทจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{ac}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.18)

$$q_{ac} = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \qquad (2.18)$$

โดยที่ m_h = มวลของสายร้อน (kg/h)

m_c = มวลของสายเย็น (kg/h)

C_{ph} = ความร้อนจำเพาะของสายร้อน (kJ/kg °C)

C_{pc} = ความร้อนจำเพาะของสายเย็น (kJ/kg °C)

T_{hi} = อุณหภูมิของสายร้อนขาเข้า (°C)

T_{ho} = อุณหภูมิของสายร้อนขาออก (°C)

T_{ci} = อุณหภูมิของสายเย็นขาเข้า (°C)

T_{co} = อุณหภูมิของสายเย็นขาออก (°C)

ความร้อนที่จะถ่ายเทได้มากที่สุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{max}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.19)

$$q_{max} = (mC_p)_{min}(T_{hi} - T_{ci}) = m_h C_{ph}(T_{hi} - T_{ci}) \tag{2.19}$$

ดังนั้นประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_f = \frac{q_{ac}}{q_{max}} = \frac{m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho})}{(mC_p)_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \tag{2.20}$$

กรณีที่ 2 : เมื่อ $m_c C_{pc} < m_h C_{ph}$

ความร้อนที่ถ่ายเทจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{ac}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.21)

$$q_{ac} = m_c C_{pc}(T_{co} - T_{ci}) \tag{2.21}$$

ความร้อนที่จะถ่ายเทได้มากที่สุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{max}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.22)

$$q_{max} = (mC_p)_{min} (T_{hi} - T_{ci}) = m_c C_{pc} (T_{hi} - T_{ci}) \tag{2.22}$$

ดังนั้นประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_f = \frac{q_{ac}}{q_{max}} = \frac{m_c C_{pc}(T_{co} - T_{ci})}{(mC_p)_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \tag{2.23}$$

สำหรับงานวิจัยนี้จะนำสมการต่างๆข้างต้นมาใช้เพื่อวิเคราะห์พลังงานของโรงงานตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์เอนทัลปีจะใช้สมการที่ (2.9) ถึง (2.11) การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีจะใช้สมการที่ (2.13) ถึง (2.16) โดยแสดงในบทที่ 3 สำหรับส่วนของการหาแนวทางปรับปรุงให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดจะแสดงในบทที่ 4

บทที่ 3
การวิเคราะห์พลังงานของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

1. ศึกษากระบวนการผลิตน้ำผลไม้
2. ศึกษาอุปกรณ์หลักในกระบวนการผลิตที่มีการใช้พลังงานความร้อน
3. เขียนสมการสมดุลมวลและพลังงานเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลที่ต้องเก็บ
4. เก็บข้อมูล โดยชนิดของข้อมูลที่เก็บแบ่งเป็น
   - ข้อมูลที่เก็บโดยตรง เช่น อุณหภูมิ
   - ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจากโรงงาน
   - ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ เช่น ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำผลไม้
   - ข้อมูลที่ได้จากตาราง ได้แก่ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ และค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุบางชนิด

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

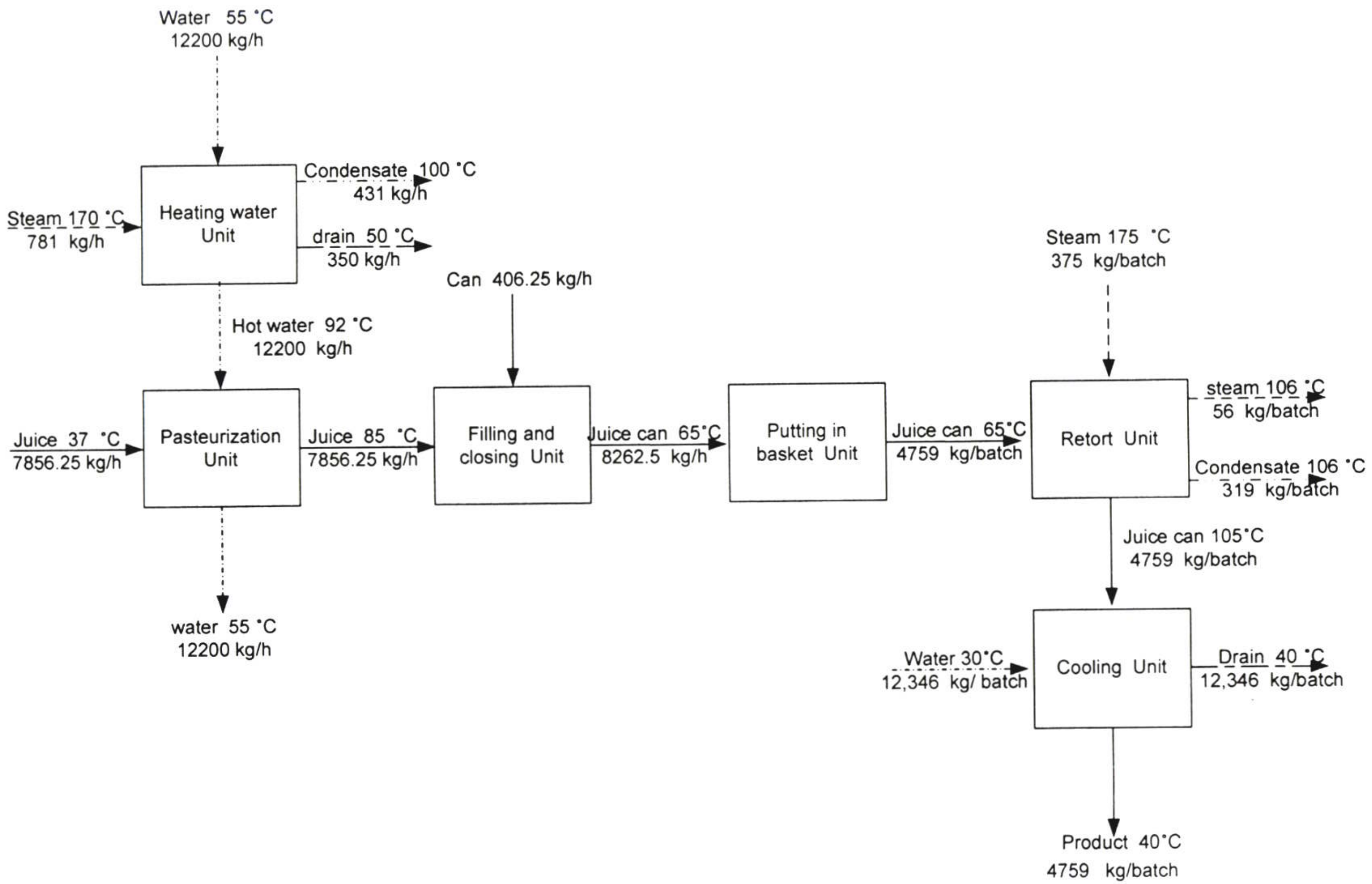
1. เทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรด
2. บีกเกอร์
3. นาฬิกาจับเวลา

3.2 ข้อมูลและกระบวนการผลิตน้ำผลไม้

3.2.1 กระบวนการผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง

จากการเยี่ยมชมโรงงานและเก็บข้อมูลจริง พบว่าในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้กระป๋องนั้นทางโรงงานจะมีขั้นตอนการเตรียมน้ำผลไม้เพื่อให้ได้ความหวาน 12 °brix น้ำผลไม้ที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมเสร็จแล้วจะมีอุณหภูมิ 37 °C จากนั้นน้ำผลไม้จะถูกส่งไปพาสเจอร์ไรซ์ในหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 92 °C เพื่อให้น้ำผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 85 °C ซึ่งน้ำร้อน 92 °C ได้มาจากการนำน้ำอุณหภูมิ 55 °C มาแลกเปลี่ยน

ความร้อนกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 170 °C ในหน่วยการทำน้ำร้อน สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนในหน่วยการทำน้ำร้อนและหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ทางโรงงานใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ท่อและเชลล์ (shell and tube) จากนั้นน้ำผลไม้ที่อุณหภูมิ 85 °C จะถูกส่งไปยังหน่วยบรรจุและปิดฝาเพื่อทำการบรรจุและปิดฝาในกระป๋องอลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักบรรจุเฉลี่ย 252 กรัมต่อกระป๋อง จากนั้นทำการเรียงน้ำผลไม้กระป๋องในตะกร้ารถเข็นจนเต็ม จำนวนกระป๋องที่บรรจุในตะกร้ารถเข็น 1 คัน เท่ากับ 3,000 กระป๋อง ในการฆ่าเชื้อแต่ละครั้ง (หรือ 1 batch) จะใช้ตะกร้ารถเข็นจำนวน 6 คัน การฆ่าเชื้อทำในหน่วยการฆ่าเชื้อ (retort unit) โดยใช้ไอน้ำที่ความดัน 9 bar อุณหภูมิ 175 °C ในการฆ่าเชื้อ 1 batch ใช้เวลา 18 นาที (โดยใช้เวลาในการไล่อากาศ 13 นาที และใช้เวลาในการฆ่าเชื้อ 5 นาที) หลังจากฆ่าเชื้อเสร็จแล้วจะมีการควบคุมความดันภายในหม้อฆ่าเชื้อให้ค่อยๆลดลง และมีการปล่อยน้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของกระป๋องให้มีอุณหภูมิประมาณ 40 °C โดยแผนผังกระบวนการผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋องแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

3.2.2 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของโรงงาน

จากกระบวนการผลิตพบว่าหน่วยการผลิตที่มีการใช้พลังงานความร้อน พบว่ามี 3 หน่วยการผลิตด้วยกัน ได้แก่

1. หน่วยการทำน้ำร้อน (Heating unit)
2. หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization unit)
3. หน่วยการฆ่าเชื้อ (Retort unit)

โดยข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์พลังงานได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของหน่วยการผลิต

หน่วยการผลิต	ข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล
การทำน้ำร้อน		
ขาเข้า		
น้ำ	มวล 12200 kg/h	การคำนวณ
	อุณหภูมิ 55 °C	อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์
ไอน้ำ	มวล 781 kg/h	เปิดตาราง
	อุณหภูมิ 170 °C	อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์
	ความดัน 8 bar	อ่านจากเกจ์
ขาออก		
น้ำ	มวล 12200 kg/h	การคำนวณ
	อุณหภูมิ 92 °C	อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์
คอนเดนเสต	มวล 431 kg/h	การคำนวณ
	อุณหภูมิ 100 °C	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
น้ำทิ้ง	มวล 350 kg/h	การตวงวัด
	อุณหภูมิ 50 °C	วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรด

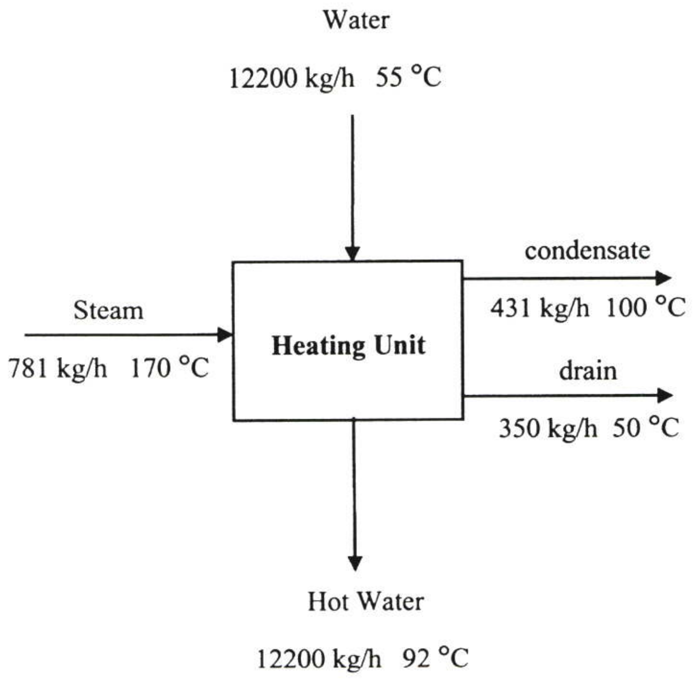
ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

หน่วยการผลิต	ข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล
<u>การพาสเจอร์ไรซ์</u>		
ขาเข้า		
น้ำผลไม้	มวล 7856.25 kg/h	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
	อุณหภูมิ 37 °C	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
น้ำร้อน	มวล 12200 kg/h	การคำนวณ
	อุณหภูมิ 92 °C	อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์
ขาออก		
น้ำผลไม้	มวล 7856.25 kg/h	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
	อุณหภูมิ 85 °C	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
น้ำ	มวล 12200 kg/h	การคำนวณ
	อุณหภูมิ 55 °C	อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์
<u>การฆ่าเชื้อ</u>		
ขาเข้า		
น้ำผลไม้กระป๋อง	มวล 4759 kg/batch	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
	อุณหภูมิ 65 °C	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
ไอน้ำ	มวล 375 kg/batch	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
	อุณหภูมิ 175 °C	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
	ความดัน 9 bar	อ่านจากเกจ์
ขาออก		
น้ำผลไม้กระป๋อง	มวล 4759 kg/batch	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
	อุณหภูมิ 105 °C	การบันทึกข้อมูลของโรงงาน
ไอน้ำ	มวล 56 kg/batch	การคำนวณ
	อุณหภูมิ 106 °C	อ่านจากเกจ์
คอนเดนเสต	มวล 319 kg/batch	การตวงวัด
	อุณหภูมิ 106 °C	วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรด

3.3 การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี (Energy Analysis with Enthalpy and Exergy)

3.3.1 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน

จากรูปที่ 3.2 แสดงมวลและอุณหภูมิของวัตถุดิบที่ใช้ในหน่วยการทำน้ำร้อน โดยหน่วยนี้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ 12200 kg/h อุณหภูมิ 55 °C กับไอน้ำ 781 kg/h อุณหภูมิ 170 °C น้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิ 92 °C เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานความร้อนพบว่าหน่วยนี้มีประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) 93 % และเอนทัลปีสูญเสีย (H_L) 3.7×10^4 kJ/h และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (ε) และเอ็กเซอร์ยีสูญเสีย (Ex_L) เท่ากับ 74 % และ 1.77×10^5 kJ/h ตามลำดับ โดยค่า Ex_L นั้นเป็นผลรวมของเอ็กเซอร์ยีที่สูญเสียและเอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้ ผลของการวิเคราะห์เอนทัลปีแสดงในตารางที่ 3.2 และผลของการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีแสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนการคำนวณการวิเคราะห์พลังงานแสดงในภาคผนวก ก.1



รูปที่ 3.2 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการทำน้ำร้อน (Heating Unit)

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของหน่วยการทำน้ำร้อน

Enthalpy input	kJ/h	%	Enthalpy output	kJ/h	%
1. water	1.53×10^6	41.45	1. hot water	3.44×10^6	93.12
2. steam	2.16×10^6	58.55	2. condensate	1.81×10^5	4.89
			3. drain	3.66×10^4	0.99
			4. loss	3.70×10^4	1.00
ΣH input	3.69×10^6	100.00	ΣH output	3.69×10^6	100.00

$$\%\eta = \frac{3.44 \times 10^6}{3.69 \times 10^6} \times 100\,\%$$

$$= 93.12\,\% \approx 93\%$$

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน

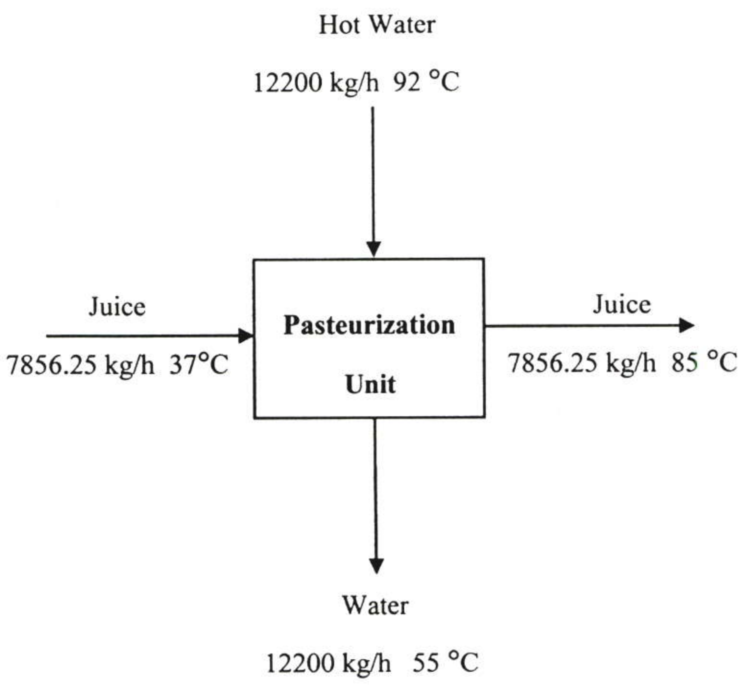
Exergy input	kJ/h	%	Exergy output	kJ/h	%
1. water	1.40×10^5	16.51	1. hot water	6.31×10^5	74.46
2. steam	7.07×10^5	83.49	2. condensate	3.63×10^4	4.28
			3. drain	2.83×10^3	0.34
			4. loss	1.77×10^5	20.92
ΣEx input	8.47×10^5	100.00	Σ Ex output	8.47×10^5	100.00

$$\%\varepsilon = \frac{6.31 \times 10^5}{8.47 \times 10^5} \times 100\,\%$$

$$= 74.46\,\% \approx 74\,\%$$

3.3.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

จากรูปที่ 3.3 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์นี้เป็นการทำให้น้ำผลไม้ 7856.25 kg/h อุณหภูมิ 37 °C มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 85 °C โดยได้รับความร้อนจากน้ำร้อน 12200 kg/h อุณหภูมิ 92 °C เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานความร้อนพบว่ามี η และ H_L เท่ากับ 48 % และ 4.51×10^5 kJ/h ตามลำดับ และมี ε และ Ex_L เท่ากับ 47 % และ 2.0×10^5 kJ/h ตามลำดับ ผลของการวิเคราะห์เอนทัลปีแสดงในตารางที่ 3.4 และผลของการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีแสดงในตารางที่ 3.5 ส่วนการคำนวณการวิเคราะห์พลังงานแสดงในภาคผนวก ก.2



รูปที่ 3.3 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization Unit)

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

Enthalpy input	kJ/h	%	Enthalpy output	kJ/h	%
1. juice	3.64×10^5	9.58	1. juice	1.82×10^6	47.89
2. hot water	3.44×10^6	90.42	2. water	1.53×10^6	40.25
			3. loss	4.51×10^5	11.86
ΣH input	3.80×10^6	100.00	ΣH output	3.80×10^6	100.00

$$\%\eta = \frac{1.82 \times 10^6}{3.80 \times 10^6} \times 100\%$$

$$= 47.89\% \approx 48\%$$

ตารางที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

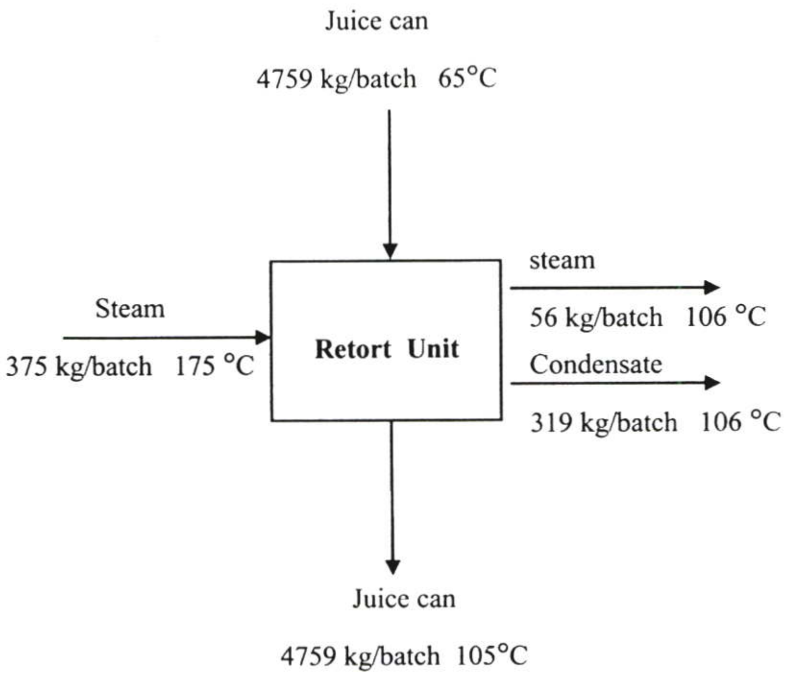
Exergy input	kJ/h	%	Exergy output	kJ/h	%
1. juice	1.41×10^4	2.18	1. juice	3.05×10^5	47.30
2. hot water	6.31×10^5	97.82	2. water	1.40×10^5	21.69
			3. loss	2.00×10^5	31.01
Σ Ex input	6.45×10^5	100.00	Σ Ex output	6.45×10^5	100.00

$$\%\varepsilon = \frac{3.05 \times 10^5}{6.45 \times 10^5} \times 100\%$$

$$= 47.30\% \approx 47\%$$

3.3.3 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการฆ่าเชื้อ

จากรูปที่ 3.4 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการฆ่าเชื้อ (Retort Unit) น้ำผลไม้กระป๋องจำนวน 4759 kg/batch อุณหภูมิ 65 °C ถูกฆ่าเชื้อด้วยความร้อนจากไอน้ำ 375 kg/batch ที่ความดัน 9 bar อุณหภูมิ 175 °C ในการฆ่าเชื้อ 1 batch ใช้เวลา 18 นาที เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานพบว่ามี η และ H_L เท่ากับ 81 % และ 4.18×10^4 kJ/batch ตามลำดับ และมี ε และ Ex_L เท่ากับ 69 % และ 7.03×10^4 kJ/batch ตามลำดับ ผลของการวิเคราะห์เอนทัลปีแสดงในตารางที่ 3.6 และผลของการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีแสดงในตารางที่ 3.7 ส่วนการคำนวณการวิเคราะห์พลังงานแสดงในภาคผนวก ก.3



รูปที่ 3.4 แสดงมวลและอุณหภูมิของหน่วยการฆ่าเชื้อ (Retort Unit)

ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของหน่วยการฆ่าเชื้อ

Enthalpy input	kJ/ batch	%	Enthalpy output	kJ/batch	%
1. juice can	7.08×10^5	40.49	1. juice can	1.42×10^6	80.98
2. steam	1.04×10^6	59.51	2. steam	1.50×10^5	8.60
			3. condensate	1.40×10^5	8.03
			4. loss	4.18×10^4	2.39
ΣH input	1.75×10^6	100.00	ΣH output	1.75×10^6	100.00

$$\%\eta = \frac{1.42 \times 10^6}{1.75 \times 10^6} \times 100\,\%$$

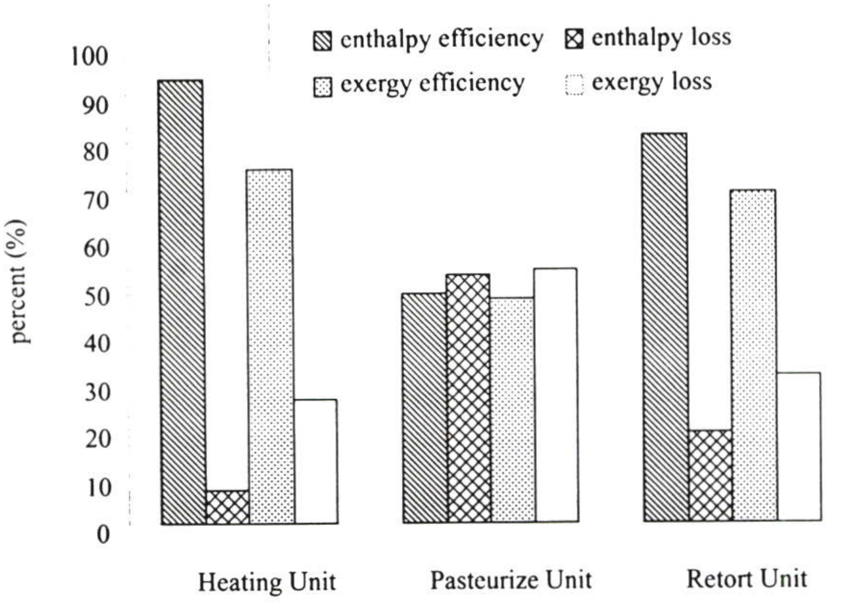
$$= 80.98\,\% \approx 81\,\%$$

ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหน่วยการฆ่าเชื้อ

Exergy input	kJ/ batch	%	Exergy output	kJ/batch	%
1. juice can	8.37×10^4	19.38	1. juice can	2.99×10^5	69.34
2. steam	3.48×10^5	80.62	2. steam	3.21×10^4	7.43
			3. condensate	3.00×10^4	6.95
			4. loss	7.03×10^4	16.28
Σ Ex input	4.32×10^5	100.00	Σ Ex output	4.32×10^5	100.00

$$\%\varepsilon = \frac{2.99 \times 10^5}{4.32 \times 10^5} \times 100\,\%$$

$$= 69.34\,\% \approx 69\,\%$$



รูปที่ 3.5 แสดงผลสรุปประสิทธิภาพและloss ของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิต

จากรูปที่ 3.5 แสดงค่าประสิทธิภาพและ loss ของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีในหน่วยเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี โดยกราฟแท่งที่ 1 แสดงประสิทธิภาพเอนทัลปี กราฟแท่งที่ 2 แสดงค่า enthalpy loss กราฟแท่งที่ 3 แสดงประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี และกราฟแท่งที่ 4 แสดงค่า exergy loss โดยทางทฤษฎีค่าของประสิทธิภาพเอนทัลปีจะมีค่าสูงกว่าค่าของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี ถ้าทั้งสองค่านี้แตกต่างกันมากๆ แสดงว่าหน่วยการผลิตนั้นมีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาหน่วยการทำน้ำร้อนพบว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) 93 % enthalpy loss 7 % ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (ε) 74 % และexergy loss 26 % ส่วนหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์สามารถอ่านค่าจากกราฟได้เช่นเดียวกับหน่วยการทำน้ำร้อน โดยพบว่ามี η 48 % และมีค่า ε 47 % และสำหรับหน่วยการฆ่าเชื้อพบว่ามี η 81 % และมีค่า ε เท่ากับ 69 % เมื่อใช้ความร้อนจากไอน้ำปริมาณ 375 kg/batch อุณหภูมิ 175°C ในการฆ่าเชื้อน้ำผลไม้บรรจุกระป๋องจำนวน 4759 kg/batch ที่อุณหภูมิ 65°C เพื่อทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 105°C โดยในงานวิจัยของกุลพร (2006) ได้นำหลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีไปใช้ในการวิเคราะห์พลังงานความร้อนในการฆ่าเชื้อเช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ โดยใช้ไอน้ำปริมาณ 532.6 kg/batch อุณหภูมิ 166°C ในการฆ่าเชื้อปลากระป๋องจำนวน 2040 kg/batch ที่อุณหภูมิ 71°C เพื่อทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 118 °C พบว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 30.94% และค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีค่า 25.17% จากประสิทธิภาพและ loss ของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของทั้งสามหน่วยการผลิตของโรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง พบว่าหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์นั้นยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 หน่วยการผลิต ดังนั้นจึงควรหาแนวทางปรับปรุงเพื่อให้ส่วนของการพาสเจอร์ไรซ์มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยแนวทางปรับปรุงจะกล่าวถึงในบทที่ 4

บทที่ 4

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการผลิต

จากการวิเคราะห์พลังงานของหน่วยการผลิตทั้ง 3 หน่วยในบทที่ 3 พบว่าหน่วยการทำน้ำร้อนมีประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) 93 % และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (ε) 74 % หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มี η และ ε เท่ากับ 48 % และ 47 % ตามลำดับ และหน่วยการฆ่าเชื้อเมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานพบว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 81 % และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 69 % จะเห็นได้ว่าหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์นั้นยังมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกันทั้ง 3 หน่วยการผลิต ดังนั้นจึงควรหาแนวทางปรับปรุงเพื่อให้ส่วนของการพาสเจอร์ไรซ์มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้สนใจศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทำงานของหน่วยการผลิตเพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยอาศัยหลักการของประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี โดยที่ประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (ε) ได้นิยามไว้ดังนี้

$$\eta = \frac{\text{enthalpy output}}{\Sigma\,\text{enthalpy input}} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{\text{exergy output}}{\Sigma\,\text{exergy input}} \times 100\%$$

4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

ในหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์เป็นหน่วยการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำผลไม้กับน้ำร้อนเพื่อทำให้น้ำผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีดังนี้

- มวลของน้ำผลไม้ (m_j)
- อุณหภูมิของน้ำผลไม้ขาเข้า (T_{ji}) และขาออก (T_{jo})
- มวลของน้ำร้อน (m_{hw}) ซึ่งมีค่าเท่ากันกับมวลของน้ำขาออก (m_{wo})
- อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้า (T_{hw})

- อุณหภูมิของน้ำขาออก (T_{wo}) โดยค่าอุณหภูมิของน้ำขาออกหลังการแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถหาได้ดังนี้

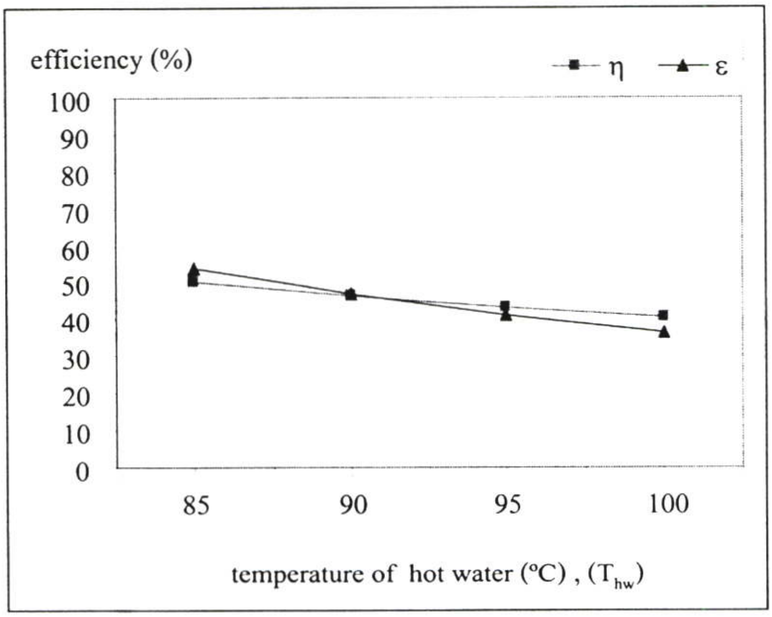
$$E_f\,(m_{hw}C_{pw}\,(T_{hw} - T_{wo})) \;=\; m_jC_{pj}\,(T_{jo} - T_{ji})) \qquad (4.1)$$

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเพื่อหาค่าที่เหมาะสมให้กับมวลและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำผลไม้ โดยการวิเคราะห์ในหน่วยนี้แบ่งเป็น 6 กรณีดังนี้

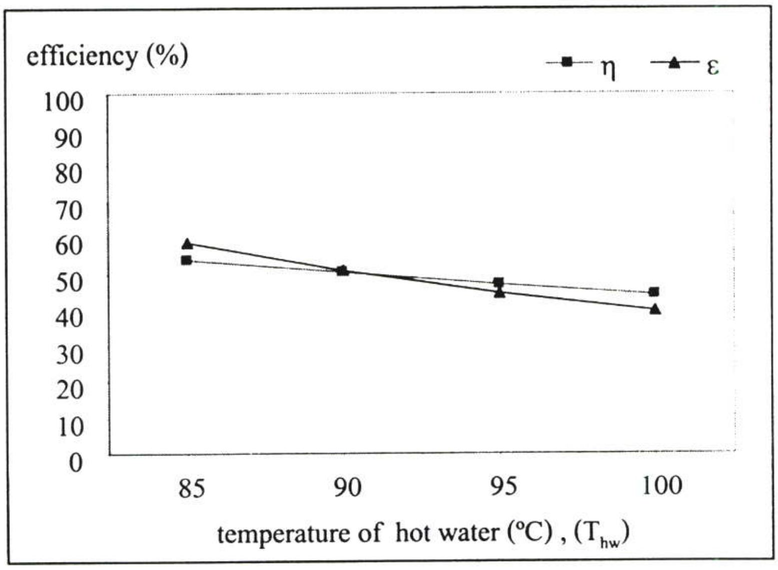
กรณีที่1 กำหนดให้ m_{hw} = 13,000 kg/h กรณีที่4 กำหนดให้ m_{hw} = 10,000 kg/h
กรณีที่2 กำหนดให้ m_{hw} = 12,000 kg/h กรณีที่5 กำหนดให้ m_{hw} = 9,000 kg/h
กรณีที่3 กำหนดให้ m_{hw} = 11,000 kg/h และกรณีที่6 กำหนดให้ m_{hw} = 8,000 kg/h

โดยในแต่ละกรณีจะมีค่าต่างๆดังนี้ อุณหภูมิของน้ำร้อน (T_{hw}) ได้ทดลองเลือกใช้มีดังนี้ 85 °C, 90 °C, 95 °C และ 100 °C และมวลน้ำผลไม้ อุณหภูมิของน้ำผลไม้ขาเข้า และขาออก ใช้เท่ากับค่าจริงของโรงงานน้ำผลไม้ตัวอย่าง คือ 7856.25 kg/h 37 °C และ 85 °C ตามลำดับ

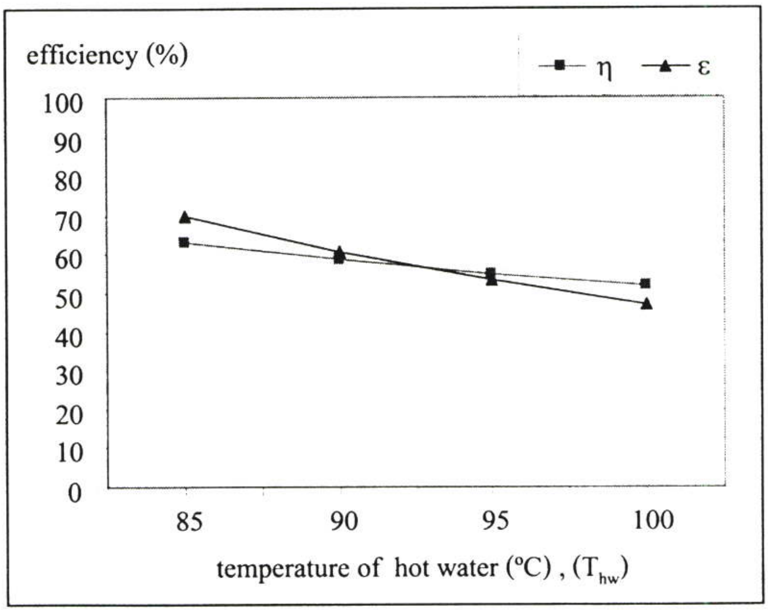
สำหรับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพแสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 ของทั้ง 6 กรณี และภาคผนวก ข.1 ได้แสดงวิธีการคำนวณและแสดงผลของกรณีที่ 1



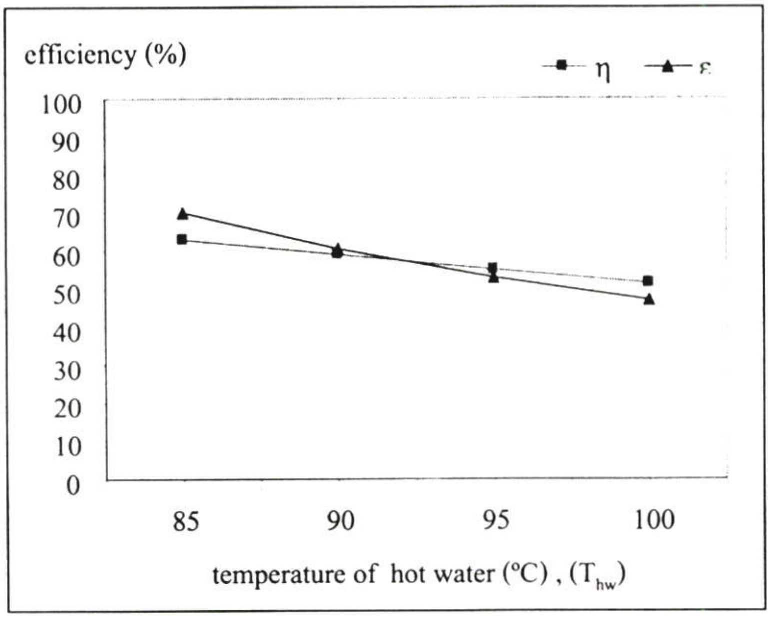
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 1 เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 13,000 kg/h



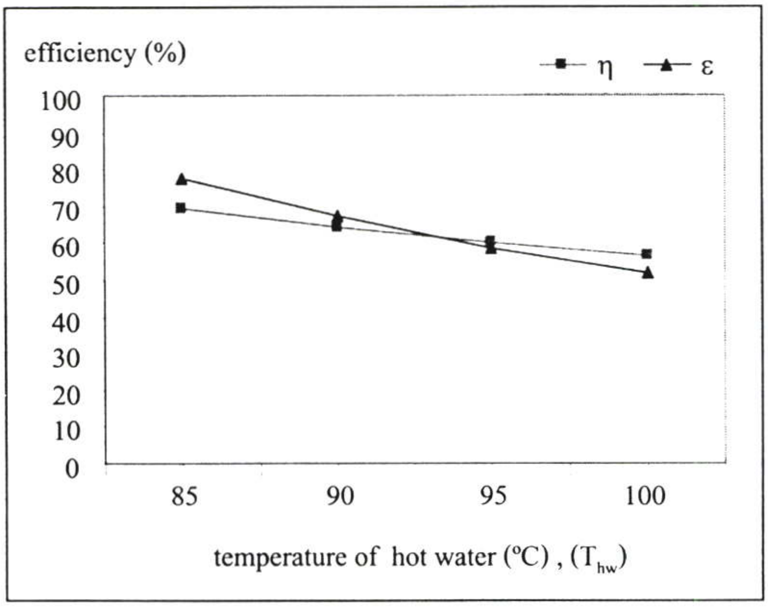
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 2 เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 12,000 kg/h



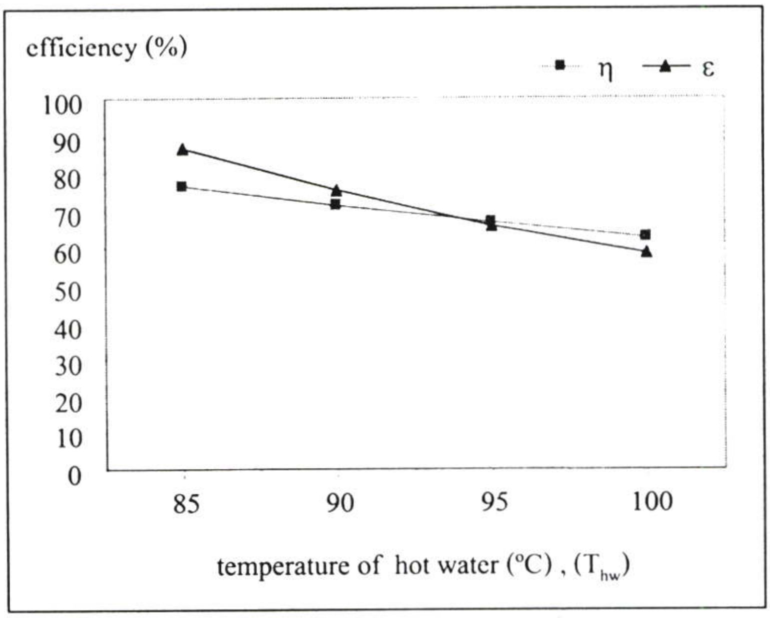
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 3 เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 11,000 kg/h



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 4 เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 10,000 kg/h



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 5 เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 9,000 kg/h



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยพาสเจอร์ไรซ์กรณีที่ 6 เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 8,000 kg/h

จากรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 แกนแนวนอนของกราฟแสดงอุณหภูมิของน้ำร้อน (T_{hw}) ที่อุณหภูมิ 85 °C, 90 °C, 95 °C และ100 °C แกนแนวตั้งแสดงประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (ε) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) และจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีจะมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี และเมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนสูงขึ้นค่าของประสิทธิภาพเอนทัลปีมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี โดยเชิงทฤษฎีค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีควรมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเสมอ ดังนั้นจึงสามารถใช้กราฟเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ได้ โดยจุดที่ประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีค่าเท่ากันจะพบได้ที่จุดตัดของกราฟ ที่จุดนี้จะใช้เป็นเกณฑ์บ่งบอกถึงประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดของหน่วยการผลิตนี้ได้ โดยแต่ละกรณีจะมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดแตกต่างกัน เมื่อมวลของน้ำร้อนน้อยลงจุดตัดของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเลือกใช้ T_{hw} ที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่จุดตัดของเส้นกราฟ สำหรับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อ่านค่าได้จากกราฟรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 ของแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

กรณี	มวลของน้ำร้อน (kg/h)	อุณหภูมิของน้ำร้อน (°C)	ประสิทธิภาพสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อน	
			%η	%ε
1	13,000	90	47	47
2	12,000	91	49	49
3	11,000	92	54	54
4	10,000	92	57	57
5	9,000	93	62	62
6	8,000	94	68	68

จากตารางที่ 4.1 ในกรณีที่ 1 เมื่อ m_{hw} เป็น 13,000 kg/h จุดตัดกราฟแสดง T_{hw} ที่ 90°C จะมีค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีมีค่าเท่ากันซึ่งถือเป็นค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีค่าเท่ากับ 47 % กรณีที่ 2 เมื่อ m_{hw} เป็น 12,000 kg/h พบว่า T_{hw} ที่เหมาะสมมีค่า 91°C และมีค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเท่ากับ 49 % กรณีที่ 3 เมื่อ m_{hw} มีค่า 11,000 kg/h จุดตัดกราฟแสดง T_{hw} ที่ 92 °C ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดมีค่าประมาณ 54 % กรณีที่ 4 เมื่อ m_{hw} มีค่าลดลงเป็น 10,000 kg/h จะเห็นว่าจุดตัดกราฟแสดง T_{hw} ที่ 92 °C เช่นเดียวกับกรณีที่ 3 แต่ค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดของกรณีนี้มีค่าประมาณ 57 % กรณีที่ 5 เมื่อ m_{hw} มีค่า 9,000 kg/h พบว่าจุดตัดกราฟแสดง T_{hw} ที่ 93 °C และค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดนั้นมีค่าประมาณ 62 % และกรณีที่ 6 เมื่อ m_{hw} ลดลงถึง 8,000 kg/h พบว่าจุดตัดกราฟแสดงที่ 94 °C ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดประมาณ 68 %

จากกรณีศึกษาพบว่า เมื่อมวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่าน้อยลง อุณหภูมิของน้ำร้อน (T_{hw}) ที่จุดตัดกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อนก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่า กรณีที่ 1 เมื่อ m_{hw} เท่ากับ 13,000 kg/h พบว่าจุดตัดกราฟแสดงที่ T_{hw} เท่ากับ 90 °C ส่วนค่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดมีค่า 47 % ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาอื่น แต่เมื่อ m_{hw} มีค่าลดลงเป็น 8,000 kg/h อุณหภูมิของน้ำร้อนที่จุดตัดกราฟมีค่าสูงขึ้นเป็น 94 °C และมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 68% ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพที่สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น แต่ทั้งนี้เนื่องจากน้ำร้อนที่ใช้ในหน่วยพาสเจอร์ไรซ์นี้ได้มาจากการหน่วยการทำน้ำร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในหน่วยการทำน้ำร้อนด้วย เพื่อหากรณีที่เหมาะสมที่จะทำให้หน่วยการผลิตทั้งสองหน่วยมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 4.2

4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน

หน่วยการทำน้ำร้อนเป็นหน่วยที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยรับความร้อนจากไอน้ำ ซึ่งในหัวข้อ 4.2 นี้เป็นการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมให้กับน้ำและไอน้ำเพื่อให้หน่วยการผลิตนี้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้แก่

- มวลของน้ำขาเข้า (m_{wi}) ซึ่งมีค่าเท่ากันกับมวลของน้ำร้อนขาออก (m_{hw}) , อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (T_{wi}) และ อุณหภูมิของน้ำร้อนขาออก (T_{hw})
- มวลของไอน้ำ (m_s) , อุณหภูมิของไอน้ำ (T_s)
- มวลของคอนเดนเสต (m_{con}) , อุณหภูมิของคอนเดนเสต (T_{con})
- มวลของน้ำทิ้ง (m_d) , อุณหภูมิของน้ำทิ้ง (T_d)

สำหรับค่ามวลของน้ำร้อน (m_{hw}) และ อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (T_{wi}) ขาออก (T_{hw}) จะเลือกใช้เงื่อนไขจากหัวข้อ 4.1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณที่ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยแบ่งเป็น 6 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อ m_{hw} = 13,000 kg/h, T_{wi} = 59 °C และ T_{hw} = 90 °C

กรณีที่ 2 เมื่อ m_{hw} = 12,000 kg/h, T_{wi} = 58 °C และ T_{hw} = 91 °C

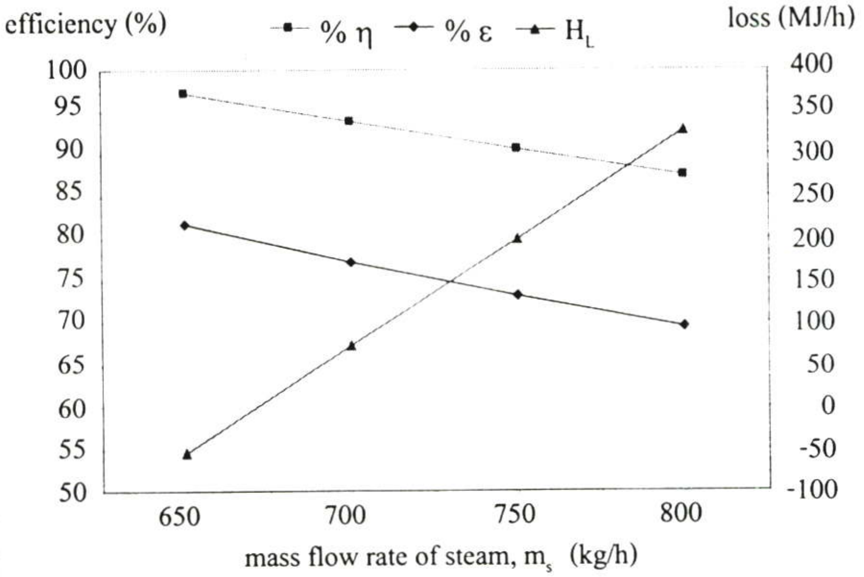
กรณีที่ 3 เมื่อ m_{hw} = 11,000 kg/h, T_{wi} = 56 °C และ T_{hw} = 92 °C

กรณีที่ 4 เมื่อ m_{hw} = 10,000 kg/h, T_{wi} = 52 °C และ T_{hw} = 92 °C

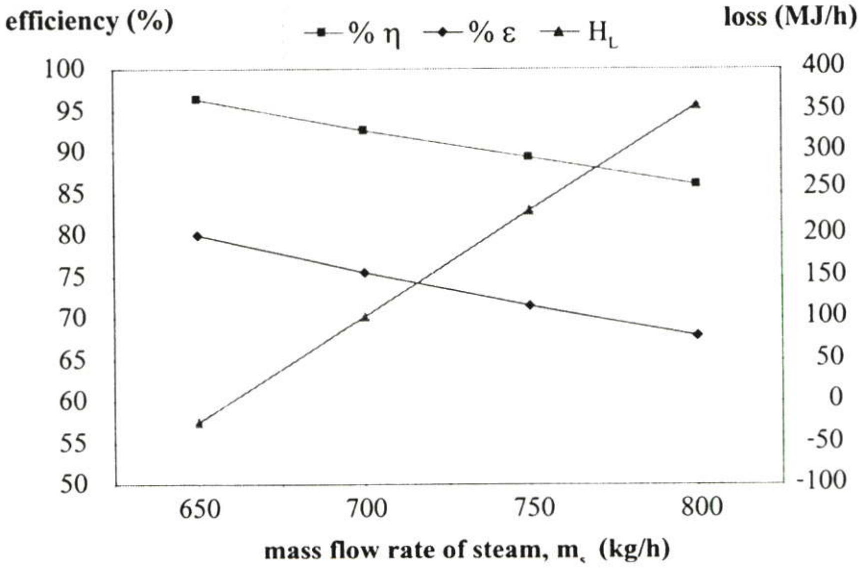
กรณีที่ 5 เมื่อ m_{hw} = 9,000 kg/h, T_{wi} = 49 °C และ T_{hw} = 93 °C

กรณีที่ 6 เมื่อ m_{hw} = 8,000 kg/h, T_{wi} = 44 °C และ T_{hw} = 94 °C

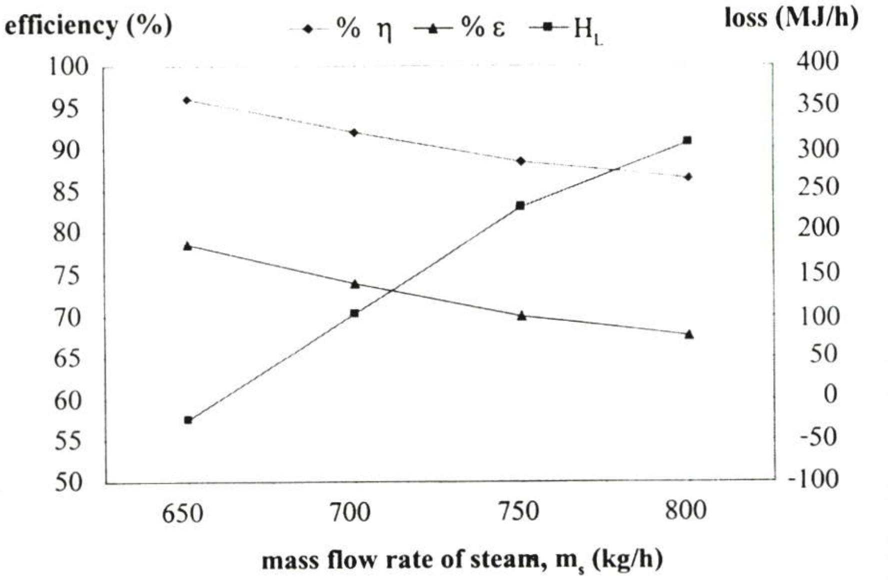
โดยที่ในแต่ละกรณีจะมีค่าต่างๆ ดังนี้ มวลของไอน้ำ (m_s) ที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำนั้นจะทดลองเลือกใช้ 650 kg/h, 700 kg/h, 750 kg/h และ 800 kg/h สำหรับอุณหภูมิของไอน้ำ (T_s) จะใช้เท่ากับค่าจริงของโรงงานนั่นคือ 170 °C ส่วนมวลของคอนเดนเสต (m_{con}) และน้ำทิ้ง (m_d) จะแปรผันตามค่าของไอน้ำที่ใช้โดย m_{con} คิดเป็น 55 % ของมวลไอน้ำ และ m_d คิดเป็น 45% ของมวลไอน้ำ และอุณหภูมิของคอนเดนเสตและน้ำทิ้งใช้เท่ากับค่าจริงของทางโรงงานคือ 100 °C และ 50 °C ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.12 และภาคผนวก ข.2 แสดงวิธีการคำนวณและแสดงผลของกรณีที่ 1



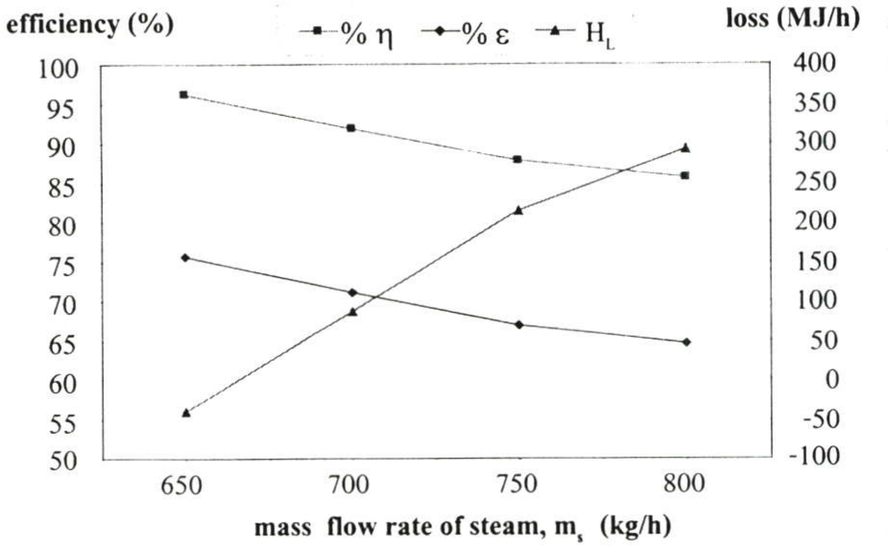
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 1 เมื่อมวลน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 13,000 kg/h และอุณหภูมิน้ำร้อน (T_{hw}) มีค่า 90 °C



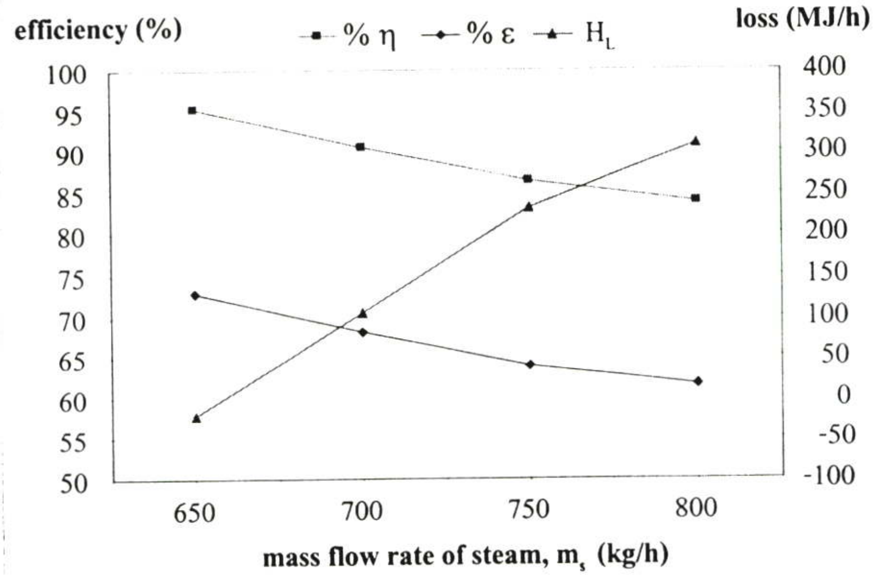
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 2 เมื่อมวลน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 12,000 kg/h และอุณหภูมิน้ำร้อน (T_{hw}) มีค่า 91 °C



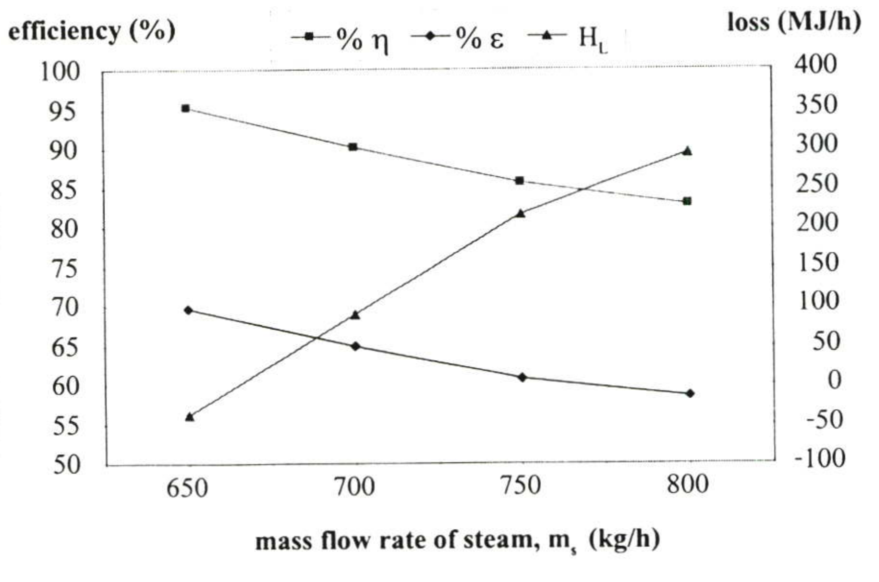
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 3 เมื่อมวลน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 11,000 kg/h และอุณหภูมิน้ำร้อน (T_{hw}) มีค่า 92 °C



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 4 เมื่อมวลน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 10,000 kg/h และอุณหภูมิน้ำร้อน (T_{hw}) มีค่า 92 °C



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 5 เมื่อมวลน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 9,000 kg/h และอุณหภูมิน้ำร้อน (T_{hw}) มีค่า 93 °C



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนกรณีที่ 6 เมื่อมวลน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่า 8,000 kg/h และอุณหภูมิน้ำร้อน (T_{hw}) มีค่า 94 °C

จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.12 แกนแนวนอนแสดงมวลไอน้ำ (m_S) ในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/h) แกนแนวตั้งด้านขวาแสดงเอนทัลปีสูญเสีย (H_L) ในหน่วยเมกกะจูลต่อชั่วโมง (MJ/h) แกนแนวตั้งซ้ายแสดงค่าประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี (ε) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อ m_S มีค่ามาก ค่า H_L ก็มีค่ามาก เมื่อค่า m_S ลดลง ค่า H_L จะมีค่าต่ำลงเช่นกัน และเมื่อค่า m_S ลดลงจนถึงค่าหนึ่งจะเห็นว่า H_L มีค่าเป็นศูนย์ และถ้าลดค่าของ m_S ให้ต่ำลงไปอีกจะทำให้ค่า H_L มีค่าติดลบ โดยทั่วไปสมการสมดุลเอนทัลปีสามารถเขียนได้ดังนี้

เอนทัลปีที่เข้าสู่ระบบ (H_i) = เอนทัลปีที่ออกจากระบบ (H_o) + เอนทัลปีที่สูญเสีย (H_L)

ดังนั้นการที่ H_L มีค่าติดลบแสดงว่าเอนทัลปีหรือพลังงานเข้าสู่ระบบมีค่าน้อยกว่าพลังงานหรือเอนทัลปีที่ต้องการนำไปใช้ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วพลังงานขาเข้าจะน้อยกว่าพลังงานที่ต้องการนำไปใช้ไม่ได้ ดังนั้นจากกราฟจึงสามารถใช้จุดที่ H_L มีค่าเท่ากับศูนย์เป็นเกณฑ์ในการเลือกค่า m_s ที่น้อยที่สุดของหน่วยการผลิตนี้ได้ และที่ค่า m_s นี้จะทำให้หน่วยการผลิตมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุด สำหรับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดที่อ่านค่าได้จากกราฟรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.12 ของแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดของหน่วยการทำน้ำร้อน

กรณี	มวลของน้ำร้อน (kg/h)	อุณหภูมิของน้ำร้อน (°C)	มวลของไอน้ำ (kg/h)	ประสิทธิภาพสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อน	
				%η	%ε
1	13,000	90	670	96	80
2	12,000	91	660	95	79
3	11,000	92	660	95	75
4	10,000	92	665	95	75
5	9,000	93	660	94	71
6	8,000	94	665	94	67

จากตารางที่ 4.2 จะได้ว่ากรณีที่ 1 เมื่อ m_{hw} มีค่าเป็น 13,000 kg/h จะเห็นว่า m_S ควรมีค่ามากกว่า 670 kg/h โดยที่ค่า m_S นี้จะทำให้มีประสิทธิภาพเอนทัลปี (η) และเอ็กเซอร์ยี (ε) สูงสุดประมาณ 96% และ 80% ตามลำดับ กรณีที่ 2 เมื่อ m_{hw} มีค่าเป็น 12,000 kg/h ควรเลือกใช้ m_S

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดของหน่วยการผลิต

กรณีที่	มวลน้ำร้อน (kg/h)	อุณหภูมิน้ำร้อน (°C)	หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์		หน่วยการทำน้ำร้อน	
			%η	%ε	%η	%ε
1	13,000	90	47	47	96	80
2	12,000	91	49	49	95	79
3	11,000	92	54	54	95	75
4	10,000	92	57	57	95	75
5	9,000	93	62	62	94	71
6	8,000	94	68	68	94	67

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในแต่ละหน่วยการผลิตซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 ทำให้ทราบว่ากรณีศึกษาใดที่ทำให้หน่วยการผลิตมีประสิทธิภาพสูงสุดและต่ำสุด โดยกรณีศึกษาบางกรณีทำให้หน่วยการผลิตหนึ่งมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีต่ำสุด แต่ในทางตรงข้ามกลับทำให้อีกหน่วยการผลิตมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุด เช่น กรณีที่ 1 เมื่อมวลน้ำร้อนมีค่าเป็น 13,000 kg/h กรณีนี้ทำให้หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณากรณีที่ 1 เมื่อมวลน้ำร้อนมีค่าเป็น 13,000 kg/h นี้ในหน่วยการทำน้ำร้อน พบว่ากรณีนี้ทำให้มีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ดังนั้นในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมจึงต้องเลือกเงื่อนไขที่ทำให้ทั้งสองหน่วยการผลิตมีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีสูงขึ้นกว่าเดิม

โดยจากการศึกษาของทั้งสองหน่วยการผลิต พบว่ากรณีที่ 4 เมื่อมวลของน้ำร้อน 10,000 kg/h อุณหภูมิ 92 °C ถูกนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำผลไม้จะทำให้หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีมีค่าเท่ากันโดยมีค่าประมาณ 57% และเมื่อพิจารณาหน่วยการทำน้ำร้อนในกรณีที่4 เมื่อเลือกใช้มวลของไอน้ำ 665 kg/h ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นตัวให้ความร้อนกับน้ำ 10,000 kg/h อุณหภูมิ 52 °C เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 92 °C พบว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเท่ากับ 95% และ 75% ตามลำดับ ซึ่งกรณีที่ 4 นี้เป็นกรณีที่ทำให้ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีในการแลกเปลี่ยนความร้อนของทั้งหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์และหน่วยการทำน้ำร้อนมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ดังนั้นกรณีนี้อาจเป็นทางเลือกให้กับหน่วยการผลิตทั้งสองเพื่อทำให้หน่วยการผลิตมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยลดการใช้ปริมาณน้ำและไอน้ำได้อีกด้วย

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 ผลการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง

จากการศึกษากระบวนการผลิตน้ำผลไม้กระป๋องของโรงงานน้ำผลไม้ตัวอย่าง พบว่ามี 3 หน่วยการผลิตที่มีการใช้พลังงานความร้อน ได้แก่ หน่วยการทำน้ำร้อน สำหรับในหน่วยนี้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับไอน้ำโดยนำน้ำ 12200 kg/h อุณหภูมิ 55°C มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำ 781 kg/h ที่อุณหภูมิ 170 °C น้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิ 92 °C สำหรับหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ หน่วยนี้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำผลไม้และน้ำเพื่อทำให้น้ำผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยนำน้ำผลไม้ 7856.25 kg/h อุณหภูมิ 37 °C ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ 12200 kg/h อุณหภูมิ 92 °C หลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วน้ำผลไม้จะมีอุณหภูมิ 85 °C และหน่วยการฆ่าเชื้อ ในหน่วยนี้น้ำผลไม้กระป๋องจำนวน 4759 kg/batch อุณหภูมิ 65 °C ถูกฆ่าเชื้อด้วยความร้อนจากไอน้ำ 375 kg/batch อุณหภูมิ 175 °C จากนั้นวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อนของแต่ละหน่วยการผลิตโดยอาศัยหลักการของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยี โดยผลการศึกษาการใช้พลังงานของโรงงานผลิตน้ำผลไม้บรรจุกระป๋องสรุปได้ดังนี้

หน่วยการทำน้ำร้อน มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 93% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 74%
หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 48% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 47%
หน่วยการฆ่าเชื้อ มีประสิทธิภาพเอนทัลปี 81% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี 69%

5.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการผลิต

5.2.1 หน่วยการทำน้ำร้อน

จากการวิเคราะห์พลังงานในโรงงานน้ำผลไม้ตัวอย่างของหน่วยการผลิตนี้ในสภาพปัจจุบันของโรงงาน พบว่าเมื่อน้ำ 12200 kg/h ที่อุณหภูมิ 55 °C ถูกทำให้ร้อนขึ้นเป็น 92 °C โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำ 781 kg/h ที่อุณหภูมิ 170 °C ผลจากการวิเคราะห์จะได้ว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 93% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเท่ากับ 74% จากนั้นเมื่อใช้หลักการวิเคราะห์ของประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีโดยใช้จุดตัดกราฟเป็นเกณฑ์ในการเลือกเงื่อนไข พบว่าเมื่อใช้ไอน้ำ 665 kg/h ที่อุณหภูมิ 170 °C มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ10,000

kg/h อุณหภูมิ 52 °C เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 92 °C พบว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 95% และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีเท่ากับ 75%

5.2.2 หน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

จากการวิเคราะห์พลังงานของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ในสภาพปัจจุบัน เมื่อน้ำผลไม้ 7856.25 kg/h ที่อุณหภูมิ 37 °C ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อน 12200 kg/h ที่อุณหภูมิ 92 °C เพื่อทำให้น้ำผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 85 °C ผลจากการวิเคราะห์พบว่ามีประสิทธิภาพเอนทัลปี 48% และมีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ 47% จากนั้นเมื่อทำการหาแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของประสิทธิภาพเอนทัลปี และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของหน่วยการผลิตนี้ได้ โดยพบว่าเมื่อใช้น้ำร้อน 10,000 kg/h อุณหภูมิ 92 °C มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำผลไม้ 7856.25 kg/h ที่อุณหภูมิ 37 °C เพื่อทำให้น้ำผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 85°C พบว่าประสิทธิภาพเอนทัลปีและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีค่าเท่ากันโดยมีค่าเท่ากับ 57%

บรรณานุกรม

กรมส่งเสริมการส่งออกกระทรวงพาณิชย์. 2549. *สินค้าส่งออกสำคัญของไทยในกลุ่มอุตสาหกรรมเกษตร*. [Online]. เข้าถึงได้จาก http://www2.ops2.moc.go.th/export/recode_export_rank/report.asp

กุลพร พุทธมี. 2546. " การศึกษาการใช้พลังงาน และเอ็กเซอร์ยีของโรงงานปลากระป๋อง ". วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. 2533. *การถ่ายเทความร้อน*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

รุ่งนภา พงษ์สวัสดิ์มานิต. 2535. *วิศวกรรมแปรรูปอาหาร*. กรุงเทพฯ : โอเอสการพิมพ์.

สิทธิพร พึ่งใหญ่. 2542. *หลักพื้นฐานและประยุกต์ทางอุณหพลศาสตร์*. กรุงเทพฯ : ศูนย์การพิมพ์แก่นจันทร์.

สุจิตตา เรืองรัศมี. 2542. " การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอ็กเซอร์ยีในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุดสาคร นุ้ยดี. 2538. " การศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานและลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในโรงงานปลาทูน่ากระป๋อง ". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Dincer, I. and Cengel, A. Y. 2001. Energy entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entrop - International Journal.* 3 : 116-149.

Fang, Z. Larson, D. L. and Fleischmen, G. 1995. Exergy analysis of milk processing system. *American Society of Agriculture Engineers.* 38 : 1825-1832.

Keenan, J. H. Keyes. F. G. Hill. P. G. and Moore. J. G. 1969. *Steam Tables-Metri Units.* New york : John Wiley & Son.

Lamb, J. 1976. Influence of water on the thermal properties of foods. *Chem. Ind.* 24 : 1046-1048.

Michael, J. Lewis. 1990. *Physical Properties of food and food processing system.* England : Ellis Horwood.

Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy.* 28 : 539-556.

Raznjeric, K. 1978. *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts.* New york : McGraw-hill.

Singh, R.P. 1978. " Energy Accounting in food Processing Operation ". *Food Technology.* 32 :40-46.

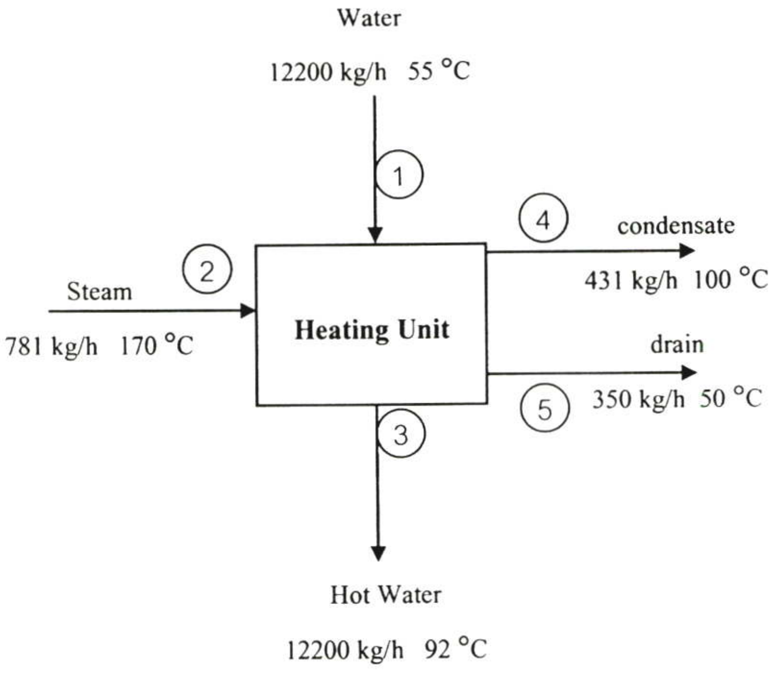
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการผลิตน้ำผลไม้

ก.1 การวิเคราะห์พลังงานของหน่วยการทำน้ำร้อน (Heating unit)

ในหน่วยการทำน้ำร้อนเป็นการทำให้น้ำ 12200 kg/h อุณหภูมิ 55 °C ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 92 °C โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำ 781 kg/h อุณหภูมิ 170 °C



รูปที่ ก.1 แสดงสมดุลของหน่วยการทำน้ำร้อน

<u>สมดุลเอนทัลปี</u>

ขาเข้า (input)

$$\Delta H_1 \text{, water} = m_1 \times C_{p1} \times (T_1 - T_o)$$

$$= 12200 \times 4.179 \times (55-25)$$

$$= 1.53 \times 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta H_2 \text{, steam} = m_2 \times h_2$$
$$= 781 \times 2768.7$$
$$= 2.16 \times 10^6 \text{ kJ/h}$$

ขาออก (output)

$$\Delta H_3 \text{, hot water} = m_3 \times C_{p3} \times (T_3 - T_o)$$
$$= 12200 \times 4.2036 \times (92-25)$$
$$= 3.44 \times 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta H_4 \text{ ,condensate} = m_4 \times h_4$$
$$= 431 \times 419.04$$
$$= 1.81 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta H_5 \text{, drain} = m_5 \times C_{p5} \times (T_5 - T_o)$$
$$= 350 \times 4.178 \times (50-25)$$
$$= 3.66 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$H_L = \Sigma\Delta H_i - \Sigma\Delta H_o$$
$$= [(1.53 \times 10^6) + (2.16 \times 10^6)] - [(3.44 \times 10^6) + (1.81 \times 10^5) + (3.66 \times 10^4)]$$
$$= 3.70 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\% \text{ enthalpy efficiency } ,(\eta) = \frac{\Delta H_3}{\Sigma\Delta H_i}$$
$$= \frac{3.44 \times 10^6}{3.69 \times 10^6} \times 100 \%$$
$$= 93 \%$$

$$\% \text{ enthalpy loss} = \frac{(\Sigma\Delta H_i) - (\Delta H_3)}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(3.69\times10^6) - (3.44\times10^6)}{3.69\times10^6} \times 100\%$$

$$= 7\ \%$$

<u>สมดุลเอ็กเซอร์ยี</u>

$$\Delta Ex = \Delta H - T_o \Delta S$$

$$= \Delta H - T_o(\Delta H / T)$$

ขาเข้า (input)

$$\Delta Ex_1, \text{water} = \Delta H_1 - T_o(\Delta H_1 / T_1)$$

$$= 1.53 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.53 \times 10^6))}{328.15}$$

$$= 1.40 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta Ex_2, \text{steam} = \Delta H_2 - T_o(\Delta H_2 / T_2)$$

$$= 2.16 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (2.16 \times 10^6))}{443.15}$$

$$= 7.08 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ขาออก (output)

$$\Delta Ex_3, \text{hot water} = \Delta H_3 - T_o(\Delta H_3 / T_3)$$

$$= 3.44 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (3.44 \times 10^6))}{365.15}$$

$$= 6.31 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta Ex_4 \text{ , condens} = \Delta H_4 - T_o(\Delta H_4 / T_4)$$

$$= 1.81 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (1.81 \times 10^5))}{373.15}$$

$$= 3.63 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta Ex_5 \text{ , drain} = \Delta H_5 - T_o(\Delta H_5 / T_5)$$

$$= 3.66 \times 10^4 - \frac{(298.15 \times (7.33 \times 10^4))}{323.15}$$

$$= 2.83 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

$$Ex_L = \Sigma\Delta Ex_i - \Sigma\Delta Ex_o$$

$$= [(1.40 \times 10^5) + (7.08 \times 10^5)] - [(6.31 \times 10^5) + (3.63 \times 10^4) + (2.83 \times 10^3)]$$

$$= 1.77 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\% \text{ exergy efficiency , } (\varepsilon) = \frac{\Delta Ex_3}{\Sigma \Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{6.31 \times 10^5}{8.47 \times 10^5} \times 100\%$$

$$= 74 \%$$

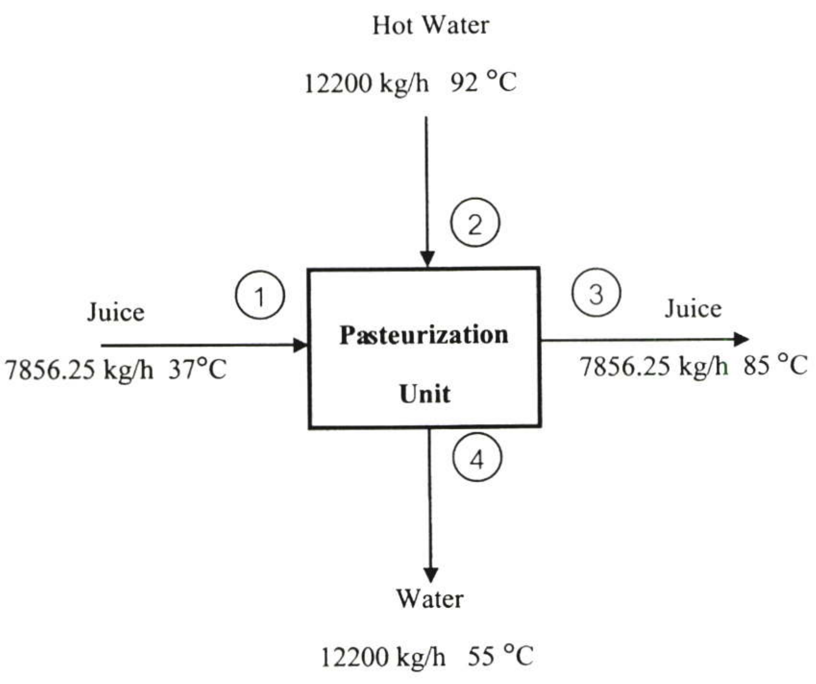
$$\% \text{ exergy loss} = \frac{(\Sigma\Delta Ex_i) - (\Delta Ex_3)}{\Sigma\Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(8.47 \times 10^5) - (6.31 \times 10^5)}{8.47 \times 10^5} \times 100\%$$

$$= 26 \%$$

ก.2 การวิเคราะห์พลังงานของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization unit)

ส่วนการพาสเจอร์ไรซ์นี้เป็นการนำน้ำผลไม้ 7856.25 kg/h อุณหภูมิ 37 °C ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อน 12200 kg/h อุณหภูมิ 92 °C น้ำผลไม้ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิ 85 °C



รูปที่ ก.2 แสดงสมดุลของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

<u>สมดุลเอนทัลปี</u>

ขาเข้า (input)

ΔH_1 , juice $= m_1 \times C_{p1} \times (T_1 - T_o)$

$= 7856.25 \times 3.864 \times (37-25)$

$= 3.64 \times 10^5$ kJ/h

ΔH_2 , hot water $= m_2 \times C_{p2} \times (T_2 - T_o)$

$= 12200 \times 4.2036 \times (92-25)$

$= 3.44 \times 10^6$ kJ/h

ขาออก (output)

ΔH_3 , juice $= m_3 \times C_{p3} \times (T_3 - T_o)$

$= 7856.25 \times 3.864 \times (85-25)$

$= 1.82 \times 10^6$ kJ/h

ΔH_4 , water $= m_4 \times C_{p4} \times (T_4 - T_o)$

$= 12200 \times 4.179 \times (55 - 25)$

$= 1.53 \times 10^6$ kJ/h

$H_L = \Sigma\Delta H_i - \Sigma\Delta H_o$

$= [(3.64 \times 10^5) + (3.44 \times 10^6)] - [(1.82 \times 10^6) + (1.53 \times 10^6)]$

$= 4.51 \times 10^5$ kJ/h

$$\% \ \eta = \frac{\Delta H_3}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{1.82 \times 10^6}{3.80 \times 10^6} \times 100\%$$

$= 48$ %

$$\% \text{ enthalpy loss} = \frac{(\Sigma\Delta H_i) - (\Delta H_3)}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(3.80 \times 10^6) - (1.82 \times 10^6)}{(3.80 \times 10^6)} \times 100\%$$

$= 52$ %

<u>สมดุลเอ็กเซอร์ยี</u>

ขาเข้า (input)

$$\Delta Ex_1\text{, juice} = \Delta H_1 - T_o(\Delta H_1 / T_1)$$

$$= 3.64 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (3.64 \times 10^5))}{310.15}$$

$$= 1.41 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta Ex_2\text{, hot water} = \Delta H_2 - T_o(\Delta H_2 / T_2)$$

$$= 3.44 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (3.44 \times 10^6))}{365.15}$$

$$= 6.31 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ขาออก (output)

$$\Delta Ex_3\text{, juice} = \Delta H_3 - T_o(\Delta H_3 / T_3)$$

$$= 1.82 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.82 \times 10^6))}{358.15}$$

$$= 3.05 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta Ex_4\text{, water} = \Delta H_4 - T_o(\Delta H_4 / T_4)$$

$$= 1.53 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.53 \times 10^6))}{328.15}$$

$$= 1.40 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$Ex_L = \Sigma\Delta Ex_i - \Sigma\Delta Ex_o$$

$$= [(1.41 \times 10^4) + (6.31 \times 10^5)] - [(3.05 \times 10^5) + (1.40 \times 10^5)]$$

$$= 2 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\% \ \varepsilon = \frac{\Delta Ex_3}{\Sigma \Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(3.05 \times 10^5)}{(6.45 \times 10^5)} \times 100\%$$

$$= 47 \ \%$$

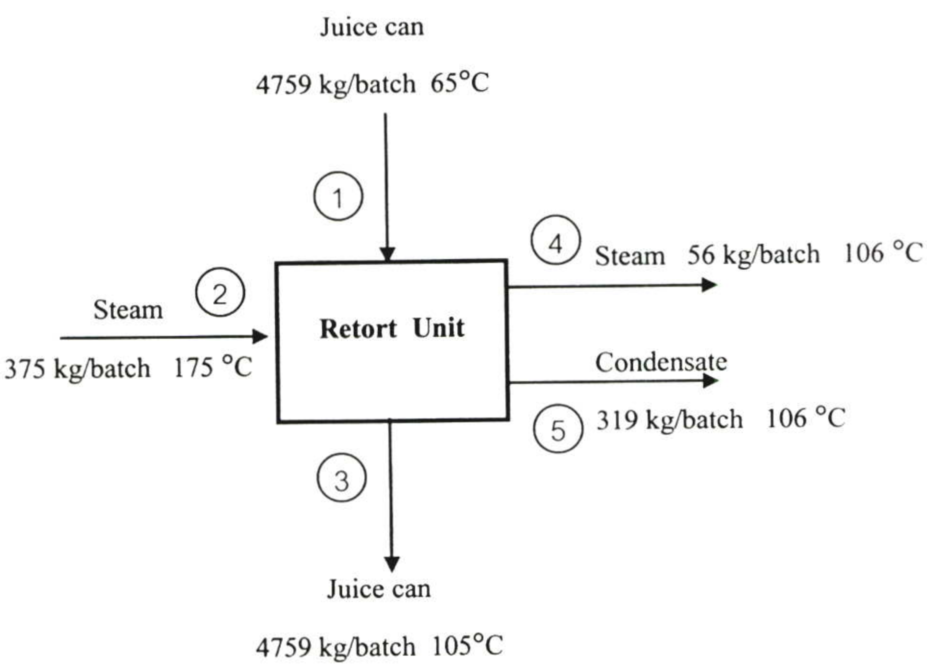
$$\% \text{ exergy loss} = \frac{(\Sigma \Delta Ex_i) - (\Delta Ex_3)}{\Sigma \Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(6.45 \times 10^5) - (3.05 \times 10^5)}{(6.45 \times 10^5)}$$

$$= 53 \ \%$$

ก.3 การวิเคราะห์พลังงานของหน่วยการฆ่าเชื้อ (Retort unit)

ในหน่วยการฆ่าเชื้อน้ำผลไม้ 1 batch จำนวน 4759 kg/batch อุณหภูมิ 65 °C จะใช้เวลาในการฆ่าเชื้อ 18 นาที โดยจะได้รับความร้อนจากไอน้ำปริมาณ 375 kg/batch อุณหภูมิ 175 °C สำหรับน้ำผลไม้ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วจะมีอุณหภูมิ 105 °C



รูปที่ ก.3 แสดงสมดุลของหน่วยการฆ่าเชื้อ

<u>สมดุลเอนทัลปี</u>

ขาเข้า (input)

ΔH_1 , juice can = $m_1 \times C_{p1} \times (T_1 - T_o)$

= $4759 \times 3.718 \times (65 - 25)$

= 7.08×10^5 kJ/batch

ΔH_2 , steam = $m_2 \times h_2$

= 375×2773.93

= 1.04×10^6 kJ/batch

ขาออก (output)

ΔH_3 , juice can $= m_3 \times C_{p3} \times (T_3 - T_o)$

$= 4759 \times 3.718 \times (105 - 25)$

$= 1.42 \times 10^6$ kJ/batch

ΔH_4 , steam $= m_4 \times h_4$

$= 56 \times 2683.8$

$= 1.50 \times 10^5$ kJ/batch

ΔH_5 , condensate $= m_5 \times h_5$

$= 319 \times 440.15$

$= 1.40 \times 10^5$ kJ/batch

$H_L = \Sigma\Delta H_i - \Sigma\Delta H_o$

$= [(7.08 \times 10^5) + (1.04 \times 10^6)] - [(1.42 \times 10^6) + (1.50 \times 10^5) + (1.40 \times 10^5)]$

$= 4.18 \times 10^4$ kJ/batch

$$\% \ \eta = \frac{\Delta H_3}{\Sigma \Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(1.42 \times 10^6)}{(1.75 \times 10^6)}$$

$$= 81 \ \%$$

$$\% \text{ enthalpy loss} = \frac{(\Sigma\Delta H_i) - (\Delta H_3)}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(1.75 \times 10^6) - (1.42 \times 10^6)}{(1.75 \times 10^6)} \times 100\%$$

$$= 19 \ \%$$

<u>สมดุลเอ็กเซอร์ยี</u>

ขาเข้า (input)

ΔEx_1 , juice can $= \Delta H_1 - T_o(\Delta H_1 / T_1)$

$$= 7.08 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (7.08 \times 10^5))}{338.15}$$

$$= 8.37 \times 10^4 \text{ kJ/batch}$$

ΔEx_2 , steam $= \Delta H_2 - T_o(\Delta H_2 / T_2)$

$$= 1.04 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.04 \times 10^6))}{448.15}$$

$$= 3.48 \times 10^5 \text{ kJ/batch}$$

ขาออก (output)

ΔEx_3 , juice can $= \Delta H_3 - T_o(\Delta H_3 / T_3)$

$$= 1.42 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.42 \times 10^6))}{378.15}$$

$$= 2.99 \times 10^5 \text{ kJ/batch}$$

ΔEx_4 , steam $= \Delta H_4 - T_o(\Delta H_4 / T_4)$

$$= 1.50 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (1.50 \times 10^5))}{379.15}$$

$$= 3.21 \times 10^4 \text{ kJ/batch}$$

ΔEx_5 , condensate $= \Delta H_5 - T_o(\Delta H_5 / T_5)$

$$= 1.40 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (1.40 \times 10^5))}{379.15}$$

$$= 3 \times 10^4 \text{ kJ/batch}$$

$$Ex_{loss} = \Sigma\Delta Ex_i - \Sigma\Delta Ex_o$$

$$= [(8.37 \times 10^4) + (3.48 \times 10^5)] - [(2.99 \times 10^5) + (3.21 \times 10^4) + (3 \times 10^4)]$$

$$= 7.03 \times 10^4 \text{ kJ/batch}$$

$$\% \ \varepsilon = \frac{\Delta Ex_3}{\Sigma \Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(2.99 \text{x} 10^5)}{(4.32 \text{x} 10^5)}$$

$$= 69 \ \%$$

$$\% \text{ exergy loss} = \frac{(\Sigma\Delta Ex_i) - (\Delta Ex_3)}{\Sigma\Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(4.32 \text{x} 10^5) - (2.99 \text{x} 10^5)}{(4.32 \text{x} 10^5)} \times 100\%$$

$$= 31 \ \%$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหน่วยการผลิต

ข.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

ภาคผนวก ข. 1 เป็นการแสดงวิธีการคำนวณการหาค่าที่เหมาะสมให้กับเงื่อนไขของการทำงานในหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ โดยการวิเคราะห์ในหน่วยนี้แบ่งเป็น 6 กรณีดังนี้

กรณีที่1 กำหนดให้ m_{hw} = 13,000 kg/h กรณีที่4 กำหนดให้ m_{hw} = 10,000 kg/h

กรณีที่2 กำหนดให้ m_{hw} = 12,000 kg/h กรณีที่5 กำหนดให้ m_{hw} = 9,000 kg/h

กรณีที่3 กำหนดให้ m_{hw} = 11,000 kg/h และกรณีที่6 กำหนดให้ m_{hw} = 8,000 kg/h

โดยในแต่ละกรณีจะมีค่าต่างๆดังนี้ 1. อุณหภูมิของน้ำร้อน (T_{hw}) ได้ทดลองเลือกใช้มีดังนี้ 85 °C, 90 °C, 95 °C และ 100 °C และ 2. มวลน้ำผลไม้ อุณหภูมิของน้ำผลไม้ขาเข้า และขาออก ใช้เท่ากับค่าจริงของโรงงานน้ำผลไม้ตัวอย่าง คือ 7856.25 kg/h 37 °C และ 85 °C ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ โดยที่

- มวลของน้ำผลไม้ (m_j) 7856.25 kg/h ค่าความร้อนจำเพาะ (C_{pj}) 3.864 kJ/kg K
  (การคำนวณหาค่า C_{pj} แสดงในภาคผนวก ค.1)
- อุณหภูมิขาเข้า (T_{ji}) 37 °C
- อุณหภูมิขาออก (T_{jo}) 85 °C
- มวลของน้ำร้อน (m_{hw}) มีค่าเท่ากันกับมวลของน้ำขาออก (m_{wo}) คือ 13,000 kg/h
- อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า (T_{hw}) 85 °C ค่าความร้อนจำเพาะ (C_{phw}) 4.198 kJ/kg K
  (ค่า C_{pw} แสดงในภาคผนวก ง.1)

สำหรับอุณหภูมิของน้ำขาออก (T_{wo}) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$E_f\,(m_w C_{pw}\,(T_{hw} - T_{wo})) \quad = \quad m_j C_{pj}\,(T_{jo} - T_{ji})$$

จากสมการจะเห็นว่าต้องทราบค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(E_f) การคำนวณหาค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นต้องใช้ข้อมูลจริงของโรงงานมาคำนวณหา

การคำนวณหาค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้ดังนี้

$$E_f = \frac{\text{actual heat transfer}}{\text{maximum possible heat transfer}} = \frac{q_{ac}}{q_{max}}$$

สามารถแบ่งการคำนวณได้เป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 : เมื่อ $m_hC_{ph} < m_cC_{pc}$
ความร้อนที่ถ่ายเทจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{ac}) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$q_{ac} = m_hC_{ph}(T_{hi} - T_{ho})$$

ความร้อนที่จะถ่ายเทได้มากที่สุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{max}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_{max} = (mC_p)_{min}(T_{hi} - T_{ci}) = m_hC_{ph}(T_{hi} - T_{ci})$$

กรณีที่ 2 : เมื่อ $m_cC_{pc} < m_hC_{ph}$
ความร้อนที่ถ่ายเทจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{ac}) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$q_{ac} = m_cC_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

ความร้อนที่จะถ่ายเทได้มากที่สุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (q_{max}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_{max} = (mC_p)_{min}(T_{hi} - T_{ci}) = m_cC_{pc}(T_{hi} - T_{ci})$$

พิจารณาค่า m_cC_{pc} และ m_hC_{ph}

$$m_cC_{pc} = (7856.25 \text{ kg/h}) \times (3.864 \text{ kJ/kg.K}) = 30{,}357 \text{ kJ/h.K}$$

$$m_hC_{ph} = (12200 \text{ kg/h}) \times (4.2036 \text{ kJ/kg.K}) = 51{,}284 \text{ kJ/h.K}$$

จะเห็นว่าค่า $m_cC_{pc} < m_hC_{ph}$ ดังนั้นการคำนวณหาค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E_f) สามารถคำนวณได้ดังสมการในกรณีที่ 2 เมื่อ $m_cC_{pc} < m_hC_{ph}$ ดังนี้

$$q_{ac} = m_cC_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

$$q_{max} = (mC_p)_{min}(T_{hi} - T_{ci}) = m_cC_{pc}(T_{hi} - T_{ci})$$

ดังนั้น

$$E_f = \frac{q_{ac}}{q_{max}} = \frac{m_cC_{pc}(T_{co} - T_{ci})}{(mC_p)_{min}(T_{hi} - T_{ci})}$$

$$= \frac{7856.25 \times 3.864 \times (85 - 37)}{7856.25 \times 3.864 \times (92 - 37)}$$

$$= 0.87 \text{ หรือ } 87\%$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในหน่วยของการพาสเจอร์ไรซ์นี้มีประสิทธิภาพ (E_f) เท่ากับ 87% ดังนั้นสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำขาออก (T_{wo}) ได้ดังนี้

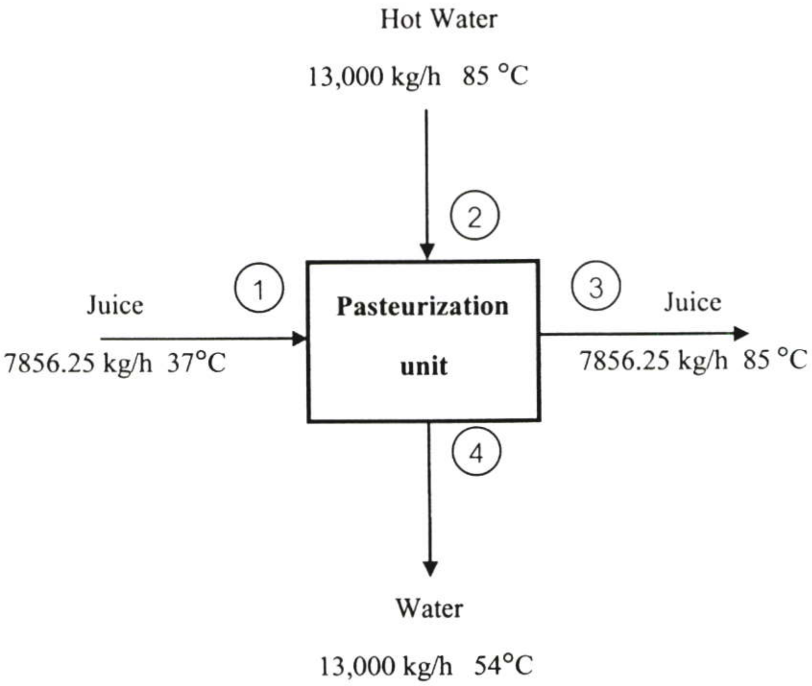
จากสมการ

$$E_f\,(m_wC_{pw}(T_{hw} - T_{wo})) = m_jC_{pj}(T_{jo} - T_{ji})$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการได้ดังนี้

$$\frac{87}{100}((13{,}000) \times (4.198) \times (85 - T_{wo})) = (7856.25) \times (3.864) \times (85 - 37)$$

$$T_{wo} = 54°C$$



รูปที่ ข.1 แสดงสมดุลของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์ตัวอย่างที่ 1

<u>สมดุลเอนทัลปี</u>

ขาเข้า (input)

ΔH_1 , juice $= m_1 \times C_{p1} \times (T_1 - T_o)$

$= 7856.25 \times 3.864 \times (37\text{-}25)$

$= 3.64 \times 10^5$ kJ/h

ΔH_2 , hot water $= m_2 \times C_{p2} \times (T_2 - T_o)$

$= 13{,}000 \times 4.198 \times (85\text{-}25)$

$= 3.27 \times 10^6$ kJ/h

ขาออก (output)

ΔH_3 , juice $= m_3 \times C_{p3} \times (T_3 - T_o)$

$= 7856.25 \times 3.864 \times (85\text{-}25)$

$= 1.82 \times 10^6$ kJ/h

ΔH_4 , water $= m_4 \times C_{p4} \times (T_4 - T_o)$

$= 13,000 \times 4.1776 \times (54 - 25)$

$= 1.58 \times 10^6$ kJ/h

$H_L = \Sigma\Delta H_i - \Sigma\Delta H_o$

$= [(3.64 \times 10^5) + (3.27 \times 10^6)] - [(1.82 \times 10^6) + (1.58 \times 10^6)]$

$= 2.42 \times 10^5$ kJ/h

$$\% \ \eta = \frac{\Delta H_3}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{1.82 \times 10^6}{3.64 \times 10^6} \times 100\%$$

$= 50\ \%$

$$\%\ \text{enthalpy loss} = \frac{(\Sigma\Delta H_i) - (\Delta H_3)}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(3.64 \times 10^6) - (1.82 \times 10^6)}{(3.64 \times 10^6)} \times 100\%$$

$= 50\ \%$

<u>สมดุลเอ็กเซอร์ยี</u>

ขาเข้า (input)

ΔEx_1 , juice $= \Delta H_1 - T_o(\Delta H_1 / T_1)$

$$= 3.64 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (3.64 \times 10^5))}{310.15}$$

$= 1.41 \times 10^4$ kJ/h

ΔEx_2 , hot water $= \Delta H_2 - T_o(\Delta H_2 / T_2)$

$$= 3.27 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (3.27 \times 10^6))}{358.15}$$

$$= 5.49 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ขาออก (output)

ΔEx_3 , juice $= \Delta H_3 - T_o(\Delta H_3 / T_3)$

$$= 1.82 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.82 \times 10^6))}{358.15}$$

$$= 3.05 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ΔEx_4 , water $= \Delta H_4 - T_o(\Delta H_4 / T_4)$

$$= 1.58 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.58 \times 10^6))}{327.15}$$

$$= 1.40 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

Ex_L $= \Sigma\Delta Ex_i - \Sigma\Delta Ex_o$

$$= [(1.41 \times 10^4) + (5.49 \times 10^5)] - [(3.05 \times 10^5) + (1.4 \times 10^5)]$$

$$= 1.18 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\% \varepsilon = \frac{\Delta Ex_3}{\Sigma \Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(3.05 \times 10^5)}{(5.63 \times 10^5)} \times 100\%$$

$$= 54 \%$$

$$\% \text{ exergy loss} = \frac{(\Sigma\Delta Ex_i) - (\Delta Ex_3)}{\Sigma\Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(5.63 \times 10^5) - (3.05 \times 10^5)}{(5.63 \times 10^5)}$$

$$= 46\ \%$$

สำหรับกรณีอื่นๆ สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ 1 และผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกรณีอื่นๆ แสดงดังตาราง ข.1

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์

T_{wi}	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2		กรณีที่ 3		กรณีที่ 4		กรณีที่ 5		กรณีที่ 6	
	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε
85 °C	50	54	54	59	58	64	63	70	69	77	77	87
90 °C	47	47	50	51	54	55	59	61	65	67	71	75
95 °C	43	41	47	44	51	48	55	53	60	59	67	66
100 °C	41	36	44	39	47	43	52	47	57	52	63	58

ข.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน

ภาคผนวก ข. 2 นี้เป็นการแสดงวิธีการคำนวณการหาค่าที่เหมาะสมให้กับเงื่อนไขของการทำงานของหน่วยการทำน้ำร้อน โดยค่ามวลของน้ำร้อน (m_{hw}) และ อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (T_{wi}) ขาออก (T_{hw}) จะเลือกใช้เงื่อนไขจากหัวข้อ 4.1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณที่ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยการพาสเจอร์ไรซ์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยแบ่งเป็น 6 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อ m_{hw} = 13,000 kg/h, T_{wi} = 59 °C และ T_{hw} = 90 °C

กรณีที่ 2 เมื่อ m_{hw} = 12,000 kg/h, T_{wi} = 58 °C และ T_{hw} = 91 °C

กรณีที่ 3 เมื่อ m_{hw} = 11,000 kg/h, T_{wi} = 56 °C และ T_{hw} = 92 °C

กรณีที่ 4 เมื่อ m_{hw} = 10,000 kg/h, T_{wi} = 52 °C และ T_{hw} = 92 °C

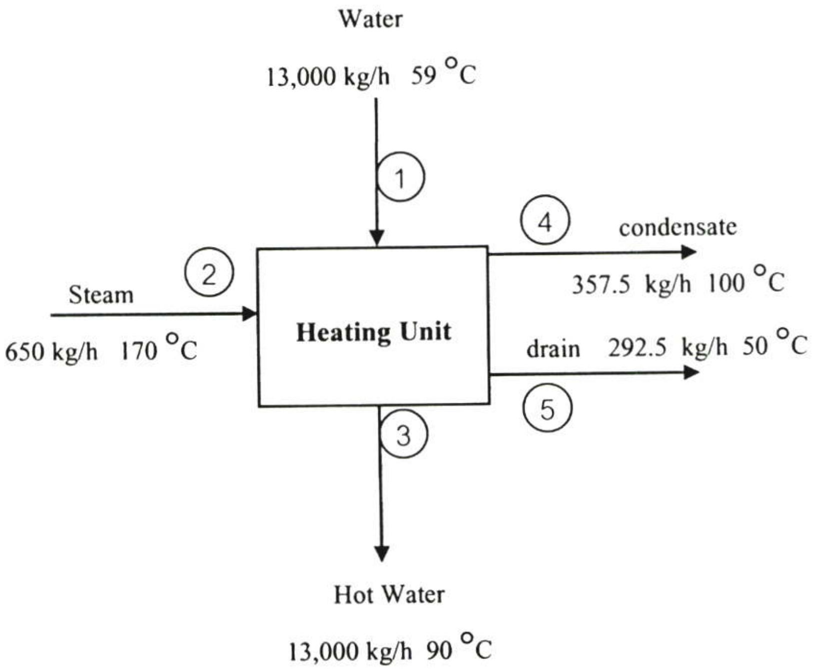
กรณีที่ 5 เมื่อ m_{hw} = 9,000 kg/h, T_{wi} = 49 °C และ T_{hw} = 93 °C

กรณีที่ 6 เมื่อ m_{hw} = 8,000 kg/h, T_{wi} = 44 °C และ T_{hw} = 94 °C

โดยที่ในแต่ละกรณีจะมีค่าต่างๆ ดังนี้ 1. มวลของไอน้ำ (m_s) ที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำนั้นจะทดลองเลือกใช้ 650 kg/h, 700 kg/h, 750 kg/h และ 800 kg/h 2. อุณหภูมิของไอน้ำ (T_s) นั้นจะใช้เท่ากับค่าจริงของโรงงานนั่นคือ 170 °C 3. มวลของคอนเดนเสต (m_{con}) และน้ำทิ้ง (m_d) จะแปรผันตามค่าของไอน้ำที่ใช้โดย m_{con} คิดเป็น 55 % ของมวลไอน้ำ และ m_d คิดเป็น 45% ของมวลไอน้ำ และ 4. อุณหภูมิของคอนเดนเสตและน้ำทิ้งใช้เท่ากับค่าจริงของทางโรงงานคือ 100 °C และ 50 °C ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อนโดยที่

- มวลของน้ำขาเข้า (m_{wi}) มีค่าเท่ากันกับมวลของน้ำร้อนขาออก (m_{hw}) คือ 13,000 kg/h
- อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (T_{wi}) 59 °C ความจุความร้อนจำเพาะ (C_{pwi}) 4.1806 kJ/kg K
  (ค่า C_{pw} แสดงในภาคผนวก ง.1)
- อุณหภูมิของน้ำร้อนขาออก (T_{hw}) 90 °C และ C_{phw} = 4.202 kJ/kg K
- มวลของไอน้ำ (m_s) 650 kg/h
- อุณหภูมิของไอน้ำ (T_s) 170 °C เอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำ (h_s) 2768.7 kJ/h
  (ค่า h แสดงในภาคผนวก ง.2)
- มวลของคอนเดนเสต (m_{con}) 357.5 kg/h
- อุณหภูมิของคอนเดนเสต (T_{con}) 100 °C และ h_{con} = 419.04 kJ/h
- มวลของน้ำทิ้ง (m_d) 292.5 kg/h
- อุณหภูมิของน้ำทิ้ง (T_d) 50 °C และ C_{pd} = 4.178 kJ/kg K



รูปที่ ข.1 แสดงสมดุลของหน่วยการทำน้ำร้อนตัวอย่างที่ 1

<u>สมดุลเอนทัลปี</u>

ขาเข้า (input)

ΔH_1 , water $= m_1 \times C_{p1} \times (T_1 - T_o)$

$= 13{,}000 \times 4.1806 \times (59-25)$

$= 1.85 \times 10^6$ kJ/h

ΔH_2 , steam $= m_2 \times h_2$

$= 650 \times 2768.7$

$= 1.80 \times 10^6$ kJ/h

ขาออก (output)

ΔH_3 , hot water $= m_3 \times C_{p3} \times (T_3 - T_o)$

$= 13{,}000 \times 4.202 \times (90-25)$

$= 3.55 \times 10^6$ kJ/h

$$\Delta H_4 \text{, condensate} = m_4 \times h_4$$

$$= 357.5 \times 419.04$$

$$= 1.50 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta H_5 \text{, drain} = m_5 \times C_{p5} \times (T_5 - T_o)$$

$$= 292.5 \times 4.178 \times (50-25)$$

$$= 1.22 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

$$H_L = \Sigma\Delta H_i - \Sigma\Delta H_o$$

$$= [(1.85 \times 10^6) + (1.80 \times 10^6)] - [(3.55 \times 10^6) + (1.50 \times 10^5) + (1.22 \times 10^3)]$$

$$= -5.42 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

$$\eta = \frac{\Delta H_3}{\Sigma\Delta H_i}$$

$$= \frac{3.55 \times 10^6}{3.65 \times 10^6} \times 100\ \%$$

$$= 97\ \%$$

$$\%\ \text{enthalpy loss} = \frac{(\Sigma\Delta H_i) - (\Delta H_3)}{\Sigma\Delta H_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(3.65 \times 10^6) - (3.55 \times 10^6)}{(3.65 \times 10^6)} \times 100\%$$

$$= 3\ \%$$

<u>สมดุลเอ็กเซอร์ยี</u>

ขาเข้า (input)

ΔEx_1 , water $= \Delta H_1 - T_o(\Delta H_1 / T_1)$

$$= 1.85 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.85 \times 10^6))}{332.15}$$

$$= 1.89 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ΔEx_2 , steam $= \Delta H_2 - T_o(\Delta H_2 / T_2)$

$$= 1.80 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (1.80 \times 10^6))}{443.15}$$

$$= 5.89 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ขาออก (output)

ΔEx_3 , hot water $= \Delta H_3 - T_o(\Delta H_3 / T_3)$

$$= 3.55 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times (3.55 \times 10^6))}{363.15}$$

$$= 6.36 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ΔEx_4 , condens $= \Delta H_4 - T_o(\Delta H_4 / T_4)$

$$= 1.50 \times 10^5 - \frac{(298.15 \times (1.50 \times 10^5))}{373.15}$$

$$= 3.01 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

ΔEx_5 , drain $= \Delta H_5 - T_o(\Delta H_5 / T_5)$

$$= 1.22 \times 10^3 - \frac{(298.15 \times (1.22 \times 10^3))}{323.15}$$

$$= 0.945 \times 10^{2} \text{ kJ/h}$$

$$Ex_L = \Sigma\Delta Ex_i - \Sigma\Delta Ex_o$$

$$= [(1.89 \times 10^{5}) + (5.89 \times 10^{5})] - [(6.36 \times 10^{5}) + (3.01 \times 10^{4}) + (0.945 \times 10^{2})]$$

$$= 1.12 \times 10^{5} \text{ kJ/h}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta Ex_3}{\Sigma\Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{6.36 \times 10^{5}}{7.78 \times 10^{5}} \times 100\%$$

$$= 82\ \%$$

$$\%\text{ exergy loss} = \frac{(\Sigma\Delta Ex_i) - (\Delta Ex_3)}{\Sigma\Delta Ex_i} \times 100\%$$

$$= \frac{(7.78 \times 10^{5}) - (6.31 \times 10^{5})}{7.78 \times 10^{5}} \times 100\%$$

$$= 18\ \%$$

สำหรับกรณีอื่นๆ สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ 1 และผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกรณีอื่นๆ แสดงดังตาราง ข.2

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหน่วยการทำน้ำร้อน

m_s	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2		กรณีที่ 3		กรณีที่ 4		กรณีที่ 5		กรณีที่ 6	
(kg/h)	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε	%η	%ε
650	97	82	96	81	96	77	96	77	95	73	95	70
700	94	77	93	77	92	73	92	72	91	68	90	65
750	90	73	89	73	88	69	88	68	86	64	86	61
800	87	70	86	69	86	66	86	66	84	62	83	59

ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ

ค.1 ความร้อนจำเพาะของน้ำผลไม้ (Lamb, 1976)

น้ำผลไม้มีความเข้มข้น 12 องศาบริกซ์

$$Cp_j = 1.470 + 2.72 \times (\%\ \text{ปริมาณน้ำ})$$

$$= 1.470 + 2.72 \times 88\%$$

$$= 1.470 + 2.72 \times \frac{88}{100}$$

$$= 3.864 \quad kJ / kg.K$$

ค.2 ความร้อนจำเพาะของน้ำผลไม้กระป๋อง

น้ำผลไม้กระป๋อง 1 กระป๋องหนัก 265 g. หรือ 0.265 kg.

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลส่วนประกอบของน้ำผลไม้กระป๋อง

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก (kg)	เปอร์เซ็นต์ (%)	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ /kg K)
น้ำผลไม้	0.252	95.1	3.864
กระป๋องรวมฝา	0.013	4.9	0.89
รวม	0.265	100.00	-

$$Cp_{jc} = \frac{Cp_j \times \%m_j}{100} + \frac{Cp_{can} \times \%m_{can}}{100}$$

$$= \frac{3.864 \times 95.1}{100} + \frac{0.89 \times 4.9}{100}$$

$$= 3.718 \quad kJ / kg.K$$

ภาคผนวก ง

ตารางค่าคงที่

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำที่ความดันอิ่มตัว

Temperature t (°C)	T (K)	Density ρ (kg/m^3)	Coefficient of volumetric expansion β $(x10^{4} 1/K)$	Specific heat Cp (kJ/kgK)	Thermal conductivity k (W/mK)	Thermal diffusivity α $(x10^{-6} m^2/s)$	Absolute viscosity μ $(x10^{-6} Pa.s)$	Kinematic viscosity ν $(x10^{-6} m^2/s)$	Prandtl number Pr
0	273.15	999.9	-0.7	4.226	0.558	0.131	1793.636	1.789	13.7
5	278.15	1000.0	-	4.206	0.568	0.135	1534.741	1.535	11.4
10	283.15	999.7	0.95	4.195	0.577	0.137	1296.439	1.300	9.5
15	288.15	999.1	-	4.187	0.587	0.141	1135.610	1.146	8.1
20	293.15	998.2	2.1	4.182	0.597	0.143	993.414	1.006	7.0
25	298.15	997.1	-	4.178	0.606	0.146	880.637	0.884	6.1
30	303.15	995.7	3.0	4.176	0.615	0.149	792.377	0.805	5.4
35	308.15	994.1	-	4.175	0.624	0.150	719.808	0.725	4.8
40	313.15	992.2	3.9	4.175	0.658	0.151	658.026	0.658	4.3
45	318.15	990.2	-	4.176	0.640	0.155	605.070	0.611	3.9
50	323.15	988.1	4.6	4.178	0.647	0.157	555.056	0.556	3.55
55	328.15	985.7		4.179	0.652	0.158	509.946	0.517	3.27
60	333.15	983.2	5.3	4.181	0.658	0.159	471.650	0.478	3.00
65	338.15	980.6	-	4.184	0.663	0.161	435.415	0.444	2.76
70	343.15	977.8	5.8	4.187	0.668	0.163	404.034	0.415	2.55
75	348.15	974.9	-	4.190	0.671	0.164	376.575	0.366	2.23
80	353.15	971.8	6.3	4.194	0.673	0.165	352.059	0.364	2.25
85	358.15	968.7	-	4.198	0.676	0.166	328.523	0.339	2.04
90	363.15	965.3	7.0	4.202	0.678	0.167	308.909	0.326	1.95
95	368.15	961.9	-	4.206	0.680	0.168	292.238	0.310	1.84
100	373.15	958.4	7.5	4.211	0.682	0.169	277.528	0.295	1.75
110	383.15	951.0	8.0	4.224	0.684	0.170	254.973	0.268	1.57
120	393.15	943.5	8.5	4.232	0.685	0171	235.360	0.244	1.43
130	403.15	934.8	9.1	4.250	0.686	0.172	211.824	0.226	1.32
140	413.15	926.3	9.7	4.257	0.684	0.172	201.036	0.212	1.23
150	423.15	916.9	10.3	4.270	0.684	0.173	185.346	0.201	1.17
160	433.15	907.6	10.8	4.285	0.680	0.173	171.616	0.191	1.10
170	443.15	897.3	11.5	4.396	0.679	0.172	162.290	0.181	1.05
180	453.15	886.6	12.1	4.396	0.673	0.172	152.003	0.173	1.01
190	463.15	876.0	12.8	4.480	0.670	0.171	145.138	0.166	0.97
200	473.15	862.8	13.5	4.501	0.665	0.170	139.254	0.160	0.95
210	483.15	852.8	14.3	4.560	0.655	0.168	131.409	0.154	0.92
220	493.15	837.0	15.2	4.605	0.652	0.167	124.544	0.149	0.90
230	503.15	827.3	16.2	4.690	0.637	0.164	119.641	0.145	0.88
240	513.15	809.0	17.2	4.731	0.634	0.162	113.757	0.141	0.86
250	523.15	799.2	18.6	4.857	0.618	0.160	109.834	0.137	0.86

ที่มา : ดัดแปลงจาก Raznjevic (1978)

ตารางที่ ง.2 คุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว

Temperature (°C)	Vapor pressure (kPa)	Specific volume (m^3/kg) Liquid	Specific volume (m^3/kg) Saturated vapor	Enthalpy (kJ/kg) Liquid (H_L)	Enthalpy (kJ/kg) Saturated vapor (H_v)	Entropy (kJ/kg. K) Liquid	Entropy (kJ/kg. K) Saturated vapor
0.01	0.6113	0.0010002	206.136	0.00	2501.4	0.0000	9.1562
3	0.7577	0.0010001	168.132	12.57	2506.9	0.0457	9.0773
6	0.9349	0.0010001	137.734	25.20	2512.4	0.0912	9.0003
9	1.1477	0.0010003	113.386	37.80	2517.9	0.1362	8.9253
12	1.4022	0.0010005	93.784	50.41	2523.4	0.1806	8.8524
15	1.7051	0.0010009	77.926	62.99	2528.9	0.2245	8.7814
18	2.064	0.0010014	65.038	75.58	2534.4	0.2679	8.7123
21	2.487	0.0010020	54.514	88.14	2539.9	0.3109	8.6450
24	2.985	0.0010027	45.883	100.70	2545.4	0.3534	8.5794
27	3.567	0.0010035	38.774	113.25	2550.8	0.3954	8.5156
30	4.246	0.0010043	32.894	125.79	2556.3	0.4369	8.4533
33	5.034	0.0010053	28.011	138.33	2561.7	0.4781	8.3927
36	5.947	0.0010063	23.940	150.86	2567.1	0.5188	8.3336
40	7.384	0.0010078	19.523	167.57	2574.3	0.5725	8.2570
45	9.593	0.0010099	15.258	188.45	2583.2	0.6387	8.1648
50	12.349	0.0010121	12.032	209.33	2592.1	0.7038	8.0763
55	15.758	0.0010146	9.568	230.23	2600.9	0.7679	7.9913
60	19.940	0.0010172	7.671	251.13	2609.6	0.8312	7.9096
65	25.03	0.0010199	6.197	272.06	2618.3	0.8935	7.8310
70	31.19	0.0010228	5.042	292.98	2626.8	0.9549	7.7553
75	38.58	0.0010259	4.131	313.93	2635.3	1.0155	7.6824
80	47.39	0.0010291	3.407	334.91	2643.7	1.0753	7.6122
85	57.83	0.0010325	2.828	355.90	2651.9	1.1343	7.5445
90	70.14	0.0010360	2.361	376.92	2660.1	1.1925	7.4791
95	84.55	0.0010397	1.9819	397.96	2668.1	1.2500	7.4159
100	101.35	0.0010435	1.6729	419.04	2676.1	1.3069	7.3549
105	120.82	0.0010475	1.4194	440.15	2683.8	1.3630	7.2958
110	143.27	0.0010516	1.2102	461.30	2691.5	1.4185	7.2387
115	169.06	0.0010559	1.0366	482.48	2699.0	1.4734	7.1833
120	198.53	0.0010603	0.8919	503.71	2706.3	1.5276	7.1296
125	232.1	0.0010649	0.7706	524.99	2713.5	1.5813	7.0775
130	270.1	0.0010697	0.6685	546.31	2720.5	1.6344	7.0269
135	313.0	0.0010746	0.5822	567.69	2727.3	1.6870	6.9777
140	316.3	0.0010797	0.5089	589.13	2733.9	1.7391	6.9299
145	415.4	0.0010850	0.4463	610.63	2740.3	1.7907	6.8833
150	475.8	0.0010905	0.3928	632.20	2746.5	1.8418	6.8379
155	543.1	0.0010961	0.3468	653.84	2752.4	1.8925	6.7935
160	617.8	0.0011020	0.3071	675.55	2758.1	1.9427	6.7502
165	700.5	0.0011080	0.2727	697.34	2763.5	1.9925	6.7078
170	791.7	0.0011143	0.2428	719.21	2768.7	2.0419	6.6663
175	892.0	0.0011207	0.2168	741.17	2773.6	2.0909	6.6256
180	1002.1	0.0011274	0.19405	763.22	2778.2	2.1396	6.5857
190	1254.4	0.0011414	0.15654	807.62	2786.4	2.2359	6.5079
200	1553.8	0.0011565	0.12736	852.45	2793.2	2.3309	6.4323
225	2548	0.0011992	0.07849	966.78	2803.3	2.5639	6.2503
250	3973	0.0012512	0.05013	1085.36	2801.5	3.7927	6.0730
275	5942	0.0013168	0.03279	1210.07	2785.0	3.0208	5.8938
300	8581	0.0010436	0.02167	1344.00	2749.0	3.2534	5.7045

ที่มา : ดัดแปลงจาก Keenan และคณะ (1969)

ตารางที่ ง.3 ความร้อนจำเพาะของอาหารและวัสดุบางชนิด

Food and Material	Temperature	Specific heat (kJ/kg K)
Water	59 F	4.18
Ice	32 F	2.04
Water vapor	212 F	2.05
Air	-10 F to + 80 F	1.00
Copper	20 °C	0.38
Aluminium	20 °C	0.89
Stainless steel	20 °C	0.46
Ethyl glycol	40 °C	2.21
Ethyl alcohol	0 °C	2.24
Glycerol	18-15 °C	2.43
Oil, maze	20 °C	1.73
Oil, sunflower	0 °C	1.86
Oil, sunflower	20 °C	1.93
Apples (84.1% moisture content)	Above freezing point	3.59
Apples (84.1% moisture content)	Below freezing point	1.88
Potatoes (77.8% moisture content)	Above freezing point	3.43
Potatoes (77.8% moisture content)	Below freezing point	1.80
Potatoes dried (77.8% moisture content)		1.85
Lamb (58% moisture content)	Above freezing point	2.80
Lamb (58% moisture content)	Below freezing point	1.25
Cod	Above freezing point	3.76
Cod	Below freezing point	2.05
Milk (87.5% moisture content)	Above freezing point	3.89
Milk (87.5% moisture content)	Below freezing point	2.05
Soya beans (8.7% moisture content)		1.85
Wheat (10.0% moisture content)		1.46-1.80

ที่มา : Michael (1990)

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปพิชญา บัวโชติ เกิดเมื่อวันที่ 2 มกราคม 2524 ที่จังหวัดตราด จบการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2545 และศึกษาต่อในระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง