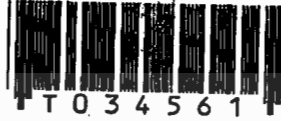


การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอ็กเซอร์ยีในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร

ENERGY ANALYSIS IN FOOD INDUSTRIAL PLANT VIA EXERGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-576-6

ดุษฎี.....  
เลขทะเบียน... 34561  
ัน, เดือน, ปี 16 พ.ย. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ENERGY ANALYSIS IN FOOD INDUSTRIAL PLANT VIA EXERGY



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

1999

ISBN 974-622-576-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอ็กเซอร์ยีในโรงงาน

อุตสาหกรรมอาหาร

นักศึกษา

นางสาวสุจิตตา เรืองรัมย์

รหัสประจำตัว

39066001

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

พ.ศ.

2542

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.รุจิรา คาปราบ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (fish snack process) และกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ (bean snack process) โดยเน้นการวิเคราะห์พลังงานความร้อนเป็นหลัก จากการวิเคราะห์กระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา โดยแบ่งเป็น 2 กระบวนการย่อย พบว่าผลการวิเคราะห์ผลรวมของกระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา โดยวิเคราะห์ด้วยเอนทัลปีมีประสิทธิภาพโดยรวม 25.41 % แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอ็กเซอร์ยีพบว่ามีประสิทธิภาพ 4.74 % โดยมีหน่วยการผลิตย่อยประกอบด้วย ส่วนไล่ความชื้น (preheating unit) มีประสิทธิภาพ 27.26 % ประสิทธิภาพ 4.93 % และส่วนดูลอบ (drying unit) มีประสิทธิภาพ 38.21 % ประสิทธิภาพ 8.95 % ในส่วนกระบวนการย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา ซึ่งมีส่วนย่าง (roasting unit) เพียงอย่างเดียวประสิทธิภาพ 51.12 % และมีประสิทธิภาพ 16.70 %

สำหรับกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบได้แบ่งเป็นกระบวนการย่อย 2 กระบวนการ พบว่ากระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยการผลิตต่างๆ คือ ส่วนเตาทอด (frying unit) มีประสิทธิภาพ 99.09 % ประสิทธิภาพ 94.50 % ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger unit) มีประสิทธิภาพ 25.57 % ประสิทธิภาพ 25.46 % และส่วนหม้อไอน้ำ (boiler unit) มีประสิทธิภาพ 75.94 % ประสิทธิภาพ 25.56 % ผลรวมของกระบวนการมีประสิทธิภาพ 7.79 % ประสิทธิภาพ 3.02 % และกระบวนการย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ที่เป็นส่วนการคั่ว (parching unit) อย่างเดียวมีประสิทธิภาพ 21.25 % ประสิทธิภาพ 5.09 %

แนวคิดของการปรับปรุงกระบวนการได้เสนอแนะดังนี้ ในส่วนไล่ความชื้นถ้าใช้แผ่นสังกะสีติดตั้งด้านข้างของอุปกรณ์เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน จะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 864 กิโลกรัมต่อปี และถ้านำความร้อนทิ้งจากส่วนย่างมาใช้ในส่วนไล่ความชื้นจะสามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 1,440 กิโลกรัมต่อปี สำหรับกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบนั้นมีแนว

ทางการปรับปรุงคือ ที่ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถ้าติดตั้งฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้ว จะสามารถเก็บความร้อนได้ถึง 99.94 % และในกระบวนการผลิตนี้ทางโรงงานได้ทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดย การนำตู้นี้มาใช้ในกระบวนการก่อนที่วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาทอดพบว่ามีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น



<b>Thesis title</b>	Energy Analysis in Food Industrial Plant via Exergy
<b>Student</b>	Miss Sujitta Raungrusmee
<b>Student ID.</b>	39066001
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Food Science
<b>Year</b>	1999
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Ruchira Taprap

## ABSTRACT

This research was carried on the exergy analysis of the fish snack process and the bean snack process. From the analysis, the fish snack process had two subprocesses. Subprocess 1 of fish snack process had the overall efficiency 25.41 % and its effectiveness 4.74 % . In this subprocess, there were the preheating unit and the drying unit . Their efficiencies were 27.26 % and 38.21 % and their effectivenesses are 4.93 % and 8.95 %, respectively. Subprocess 2 of fish snack process was only composed of roasting unit. It had efficiency 51.12 % and effectiveness 16.70 %.

For the bean snack process, two additional processes were subprocess 1 and subprocess 2 . Subprocess 1 of bean snack process was composed of frying unit, heat exchanger unit and boiler unit. Their efficiencies were 99.09% , 25.57% and 75.94% and their effectivenesses were 94.50% , 25.46% and 25.56% , respectively. The overall efficiency of this subprocess was 7.79% and effectiveness 3.02%. For subprocess 2 of bean snack process , parching unit only , it had efficiency 21.25 % and effectiveness 5.09 %.

For the improvement of the process at preheating unit , the zinc plate was proposed to install as a heat loss protection. The plate could save LPG about 864 kg per year. By recovering heat form hot air of the roasting unit could save LPG about 1,440 kg per year. For bean snack process, by installing fiber glass 3 inch thickness insulation , the energy could be saved to 99.94%. To modify the bean snack process, the factory had been installed the steaming unit before entering the frying unit. The efficiency was not much improved but the quality of products were better.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุจิรา ตาปราบ ที่ได้ให้เกียรติเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำแนวทางและข้อคิดเห็นต่างๆแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท พี.एम.ฟูด จำกัด และคุณวัลลพ น้อยจันทร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้กรุณาแนะนำและเอื้อเฟื้อข้อมูลในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระติพร หาเรือนกิจ และ ดร.พอใจ ฉามากร ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษาจนกระทั่งข้าพเจ้ามีโอกาสรบความสำเร็จ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้ และคุณนุจรีย์ อินอุดม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาปริญญาโทที่ได้ให้ความช่วยเหลือและความปรารถนาดีเสมอมาทุกคน

สุดท้ายนี้ขอรำลึกถึงพระคุณและความปรารถนาดีของบิดามารดา พี่สาว และญาติมิตร ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

สุจิตตา เรืองรัมย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญภาพ .....	IX
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีของการวิเคราะห์พลังงาน .....	3
2.1 ความสำคัญของการวิเคราะห์พลังงาน .....	3
2.2 การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี.....	8
บทที่ 3 การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานตัวอย่าง.....	25
3.1 กระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	25
3.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา .....	27
3.3 กระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	35
3.4 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ.....	36
3.5 การประยุกต์ EUD สำหรับกรวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการ .....	46
3.6 กระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง .....	56
บทที่ 4 แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน .....	58
4.1 แนวทางการประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา .....	58
4.2 แนวทางการประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ.....	62
4.3 แนวทางการประหยัดพลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง .....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป .....	69
5.1 ผลการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	69
5.2 ผลการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	70
บรรณานุกรม .....	72
ภาคผนวก .....	74
ก. การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปี.....	75
ข. การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ตัดแปลง .....	88
ค. การคำนวณสำหรับการเขียนกราฟ EUD .....	94
ง. การปรับปรุงส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน .....	96
จ. การปรับปรุงส่วนไล่ความชื้นและส่วนย่าง .....	99
ประวัติผู้เขียน .....	105

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการใช้พลังงานของกลุ่มอุตสาหกรรมต่างๆในสหรัฐอเมริกา.....	5
2.2 ชนิดและปริมาณพลังงานใน โรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่าง14 โรงงานในปี 1993.....	6
3.1 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนไต่ความชื้นในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	28
3.2 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนไต่ความชื้นในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	28
3.3 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนไต่ความชื้นในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	30
3.4 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนไต่ความชื้นในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	30
3.5 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมของกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตอาหารว่าง จากปลา .....	32
3.6 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมของกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตอาหารว่าง จากปลา .....	32
3.7 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนการข้างในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	34
3.8 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนการข้างในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา.....	34
3.9 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนเตาทอดในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	37
3.10 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนเตาทอดในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	37
3.11 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ.....	39
3.12 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ.....	39
3.13 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	41
3.14 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	41
3.15 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	43
3.16 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	43
3.17 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนการคั่วในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	45
3.18 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนการคั่วในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	45
ข.1 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนตู้หนึ่งในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ.....	89
ข.2 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนตู้หนึ่งในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ.....	89
ข.3 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง .....	91
ข.4 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง .....	91

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.5 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ที่ตัดแปลง.....	93
ข.6 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ที่ตัดแปลง.....	93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงปริมาณการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆของประเทศไทย ในปี 1996 .....	7
2.2 พลังงานชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารปี 1996 .....	7
2.3 แสดงสมมูลมวลของเครื่องระเหย .....	11
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตอาหารว่างจากปลา .....	26
3.2 แสดงสมมูลมวลของส่วนไล่ความชื้น .....	27
3.3 แสดงสมมูลมวลของส่วนคั่วอบ .....	29
3.4 แสดงสมมูลมวลโดยรวมของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลากระบวนการ ย่อยที่ 1 .....	31
3.5 แสดงสมมูลมวลของส่วนย่าง .....	33
3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	35
3.7 แสดงสมมูลมวลของส่วนเตาทอด .....	36
3.8 แสดงสมมูลมวลของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน .....	38
3.9 แสดงสมมูลมวลของหม้อไอน้ำ .....	40
3.10 แสดงสมมูลมวลโดยรวมของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบกระบวนการย่อยที่ 3 .....	42
3.11 แสดงสมมูลมวลของส่วนการคั่ว .....	44
3.12 กราฟ EUD สำหรับการวิเคราะห์พลังงาน .....	46
3.13 กราฟ EUD ของส่วนไล่ความชื้น .....	47
3.14 กราฟ EUD ของส่วนคั่วอบ .....	48
3.15 กราฟ EUD ของส่วนการย่าง .....	49
3.16 กราฟ EUD โดยรวมของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา .....	50
3.17 กราฟ EUD ของส่วนหม้อไอน้ำ .....	51
3.18 กราฟ EUD ของส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน .....	52
3.19 กราฟ EUD ของส่วนเตาทอด .....	53
3.20 กราฟ EUD ของส่วนการคั่ว .....	54
3.21 กราฟ EUD โดยรวมของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ .....	55
3.22 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่คิดแปลง .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.23 กราฟ EUD โดยรวมของกระบวนการผลิตถ้วยบรอกที่ดัดแปลง .....	57
4.1 แสดงเครื่องไล่ความชื้นที่มีการใช้แผ่นสังกะสีกันทั้ง 5 ด้าน .....	59
4.2 แผนภาพแสดงการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยนำความร้อนทิ้งจากส่วนการย่าง มาไล่ความชื้น .....	60
4.3 แผ่นฟิล์มของอากาศ น้ำ และตระกรันบนผิวน้ำโลหะ ทำให้ลดประสิทธิภาพการถ่าย เทความร้อน .....	66
ก.1 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนเดาทอด .....	75
ก.2 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของหม้อไอน้ำ .....	78
ก.3 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนตู้อบ .....	83
ข.1 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนคั่ว .....	88
ข.2 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถ้วยบรอกที่ดัดแปลง .....	90
ข.3 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของผลรวมของกระบวนการผลิตถ้วยบรอกที่ดัดแปลง .....	92

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
$c_p$	=	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $kJ/kg^\circ C$ )
C	=	จำนวนคาร์บอนในองค์ประกอบ
Ex	=	เอ็กเซอร์ยี ( $kJ/h$ )
$e_{xj}$	=	เอ็กเซอร์ยีจำเพาะของไอน้ำ ( $kJ/kg$ )
g	=	ความเร่งภายใต้แรงดึงดูดของโลก ( $m/hr^2$ )
h	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา ( $kcal/m^2hC$ )
$h_j$	=	เอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำ ( $kJ/kg$ )
H	=	เอนทัลปี ( $kJ/h$ )
$H_{latent}$	=	ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ ( $kJ$ )
I	=	พลังงานที่ผันกลับไม่ได้ของระบบ ( $kW$ )
k	=	ค่าการนำความร้อน ( $W/mK$ )
K	=	ค่าการนำความร้อนของฉนวน ( $Btu-in/hft^2$ )
l	=	ความยาวตัวแทนของระบบ ( $m$ )
L	=	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $kJ/kg$ )
LHV	=	Low Heating Value ( $kJ/kg$ )
m	=	น้ำหนักของสาร ( $kg$ )
$m_j$	=	อัตราการไหลของไอน้ำ ( $kJ/s$ )
O	=	จำนวนออกซิเจนในองค์ประกอบ
P	=	ความดัน ( $atm$ )
q	=	พลังงานความร้อน ( $kJ$ )
$q_p$	=	ความร้อนที่เกิดภายใต้ความดันคงที่ ( $kJ$ )
$q_v$	=	ความร้อนที่เกิดภายใต้ปริมาตรคงที่ ( $kJ$ )
Q	=	การถ่ายเทพลังงานความร้อน ( $kJ/h$ )
$Q_F$	=	ความร้อนที่ส่งผ่านระนาบ ( $Btu/hft^2$ )
$Q_p$	=	ความร้อนที่ส่งผ่านท่อ ( $Btu/h lin ft$ )
$r_u$	=	รัศมีภายนอกท่อ ( $m$ )
$r_i$	=	รัศมีภายในท่อ ( $m$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

$R_f$	=	ความต้านทานความร้อนของฉนวน ( $\text{hft}^2\text{F/Btu}$ )
$R_s$	=	ความต้านทานที่พื้นผิว ( $\text{hft}^2\text{F/Btu}$ )
$S$	=	จำนวนเซลล์เฟอรินในองค์ประกอบ
$\Delta s$	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี
$\Delta s_{\text{sur}}$	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อม
$\Delta s_{\text{sys}}$	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ
$\Delta s_{\text{univ}}$	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของจักรวาล
$s_j$	=	เอนโทรปีจำเพาะของไอน้ำ ( $\text{kJ/kgK}$ )
$t_a$	=	อุณหภูมิอากาศ ( $^{\circ}\text{F}$ )
$t_{\text{ms}}$	=	อุณหภูมิสมมติ ( $^{\circ}\text{F}$ )
$t_s$	=	อุณหภูมิพื้นผิวของฉนวน ( $^{\circ}\text{F}$ )
$T$	=	อุณหภูมิ ( $\text{K}, ^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta T$	=	ผลต่างของอุณหภูมิตั้งหว่างผิวสองด้านของชั้นขอบเขต ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a$	=	อุณหภูมิภายนอก ( $\text{K}$ )
$T_i$	=	อุณหภูมิภายนอก ( $\text{K}$ )
$T_0$	=	อุณหภูมิอ้างอิง ( $25^{\circ}\text{C}$ )
$T_r$	=	298.16 K ที่ความดัน 1 บรรยากาศ
$T_s$	=	อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัส ( $^{\circ}\text{F}$ )
$\Delta T$	=	ผลต่างของอุณหภูมิตั้งหว่างผิวสองด้านของชั้นขอบเขต ( $^{\circ}\text{C}$ )
$U$	=	ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อน ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$V$	=	ปริมาตร ( $\text{m}^3$ )
$W$	=	งานหรือพลังงานที่ออกสู่ระบบ ( $\text{kW}$ )
$X$	=	ความหนาของวัสดุ ( $\text{m}$ )

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

### อักษรกรีก

- $\beta$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ( $1/^{\circ}\text{C}$ )
- $\lambda$  = การนำความร้อนของอากาศ ( $\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$ )
- $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\mu$  = ความหนืด (poise)

### ค่าคงที่

- $c$  = 0.53
- $m$  = 0.25
- $n$  = 0.25



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยหลักในอุตสาหกรรมการผลิต โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหาร พลังงานที่ใช้มีหลายรูปแบบ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งพลังงานเหล่านี้มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น ดังนั้นการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมควรใช้ให้มีประสิทธิภาพหรือคุณภาพสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง และเสนอแนวทางในการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อนในอุตสาหกรรมจากอดีตที่ผ่านมาจะวิเคราะห์โดยใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือที่เรียกว่าเอนทัลปี (enthalpy) ในกรณีที่เป็พลังงานความร้อนหรือวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงประสิทธิภาพ (efficiency) เท่านั้น แต่วิธีดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะบอกถึงประสิทธิภาพสูงสุดของโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างนั้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาแนวความคิดของเอ็กเซอร์ยี (exergy) มาเสริมในวิธีวิเคราะห์พลังงานด้วย เนื่องจากเอ็กเซอร์ยีเป็นดัชนีที่บอกถึงคุณภาพของพลังงาน ซึ่งทำให้สามารถบอกได้ว่ากระบวนการผลิตนั้นๆ ได้ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุด

ดังนั้นการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปี และเอ็กเซอร์ยีร่วมกันจะทำให้ทราบถึงการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

### 1.2 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่างด้วยเอนทัลปี และเอ็กเซอร์ยี โดยเลือกโรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่างมาศึกษา เพื่อรวบรวมข้อมูลในการใช้พลังงานต่างๆที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต จากนั้นทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานและหาประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในรูปแบบของเอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีของแต่ละระบบและของทั้งโรงงาน หลังการวิเคราะห์จะเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงการประหยัดพลังงาน และผลทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 ศึกษาการใช้พลังงานของโรงงานอาหารตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์ค่าเอนทัลปีและเอนโทรปีเพื่อหาประสิทธิภาพของพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่าง

1.3.2 จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น นำมาหาแนวทางในการประหยัดพลังงานให้มีการใช้พลังงานมีประสิทธิภาพสูงสุดในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่าง

1.3.3 วิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์



## บทที่ 2

# ทฤษฎีของการวิเคราะห์พลังงาน

### 2.1 ความสำคัญของการวิเคราะห์พลังงาน

จากวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เป็นสาเหตุให้นักอุตสาหกรรมหันมาเอาใจใส่เกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานในโรงงานของตนมากยิ่งขึ้น รวมทั้งวิธีการต่างๆที่จะใช้พลังงานในรูปที่มีอยู่ให้ได้ประโยชน์สูงสุด จะเห็นได้ว่าโรงงานขนาดใหญ่หลายแห่งในต่างประเทศได้ตั้งหน่วยงานเฉพาะกิจขึ้นเพื่อทำหน้าที่จัดการด้านการประหยัดพลังงานโดยตรง ในขณะที่เดียวกันได้มีบริษัทหลายแห่งที่ตั้งขึ้นมาเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำ และบริการทางด้านการประหยัดพลังงานแก่โรงงานต่างๆที่ขาดกำลังคนทางด้านนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก ในประเทศไทยที่มีโรงงานอุตสาหกรรมอาหารขนาดกลางและขนาดเล็กจำนวนมากที่มีได้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า ซึ่งถ้าได้มีการประหยัดพลังงานอย่างจริงจังแล้วจะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้มาก เพราะพลังงานเป็นค่าที่ทุกคนนำมาใช้โดยไม่เห็นคุณค่าความสำคัญมาโดยตลอด แต่ในปัจจุบันพลังงานกลายเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นพื้นฐานของชีวิต การเพิ่มขึ้นของต้นทุนพลังงาน เป็นตัวบีบบังคับให้ผู้คนตระหนักถึงคุณค่าของพลังงานมากกว่าในอดีตที่ผ่านมา

การประหยัดพลังงานใน โรงงานอุตสาหกรรมอาจพิจารณาถึงประเด็นต่างๆ ได้หลายประเด็น กล่าวคือ

- การจัดการให้การทำงานของโรงงานมีประสิทธิภาพสูงสุด รวมทั้งการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน
- การดัดแปลงหรือแก้ไขเครื่องจักร-อุปกรณ์ที่ใช้มานานให้อยู่ในสภาพที่ดีขึ้นเพื่อลดความสูญเสียเปล่าในโรงงาน
- การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต
- การนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้

การตรวจสอบการใช้พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ โรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการให้มีการจัดการพลังงานที่ดีซึ่งจะบ่งชี้ให้เห็นถึงแนวทางในการประหยัดพลังงาน และส่วนใดที่มีศักยภาพการประหยัดพลังงานได้สูงซึ่งจะเป็นการช่วยให้เกิดการตัดสินใจที่จะลดต้นทุนการผลิตขั้นอุตสาหกรรมได้ง่ายขึ้น การตรวจสอบการใช้พลังงานมิใช่เป็นสิ่งที่ทำครั้งเดียวแล้วใช้ได้ตลอดไป แต่เป็นงานต่อเนื่องเพื่อจะได้มีการเปรียบเทียบระหว่างภาคทฤษฎีและผลทางปฏิบัติ เพื่อให้ทราบว่าการเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานได้ถูกใช้ไปอย่างไรบ้างและเสียค่าใช้จ่ายเท่าใด เมื่อได้ทราบถึงรายละเอียดดังกล่าวแล้วจะทำให้มองเห็นแนวทางที่จะประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการผลิตได้

ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกระบบรวมทั้งอุตสาหกรรมอาหารที่ใช้พลังงานจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นเสมอ แต่ในหลายกรณีผู้ใช้พลังงานไม่ทราบอย่างชัดเจนว่าระบบที่ตนเองใช้อยู่ที่มีการสูญเสียพลังงานมากน้อยเพียงใด ความคุ้นเคยกับการสูญเสียพลังงานและความที่ไม่รู้ถึงปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผู้ใช้พลังงานขาดความระมัดระวังในการใช้พลังงานให้ได้ประโยชน์คุ้มค่าที่สุด ในแง่ของเจ้าของกิจการ การประหยัดพลังงานโดยการใชพลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุดและการป้องกันการสูญเสียพลังงานจนเกินขอบเขตจะทำให้ลดต้นทุนการผลิตซึ่งจะทำให้สินค้าที่ผลิตขึ้นมามีราคาถูกลง และหมายถึงผลกำไรที่มากขึ้นและความสามารถที่จะแข่งขันได้กับสินค้าประเภทเดียวกันทั้งในตลาดภายในและภายนอกประเทศ นอกจากนี้ในฐานะที่ประเทศยังต้องพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศอยู่มาก การประหยัดพลังงานจะลดการสูญเสียดุลการค้าและการสูญเสียเงินตราต่างประเทศ ซึ่งจะทำให้เศรษฐกิจของประเทศดีขึ้น โดยส่วนรวมอันจะเอื้ออำนวยต่อการดำรงอยู่ของกิจการต่างๆ และเจ้าของกิจการโดยทางอ้อมอีกด้วย

ในปีค.ศ. 1974 คณะกรรมการจาก Federal Energy Administration และ U.S. Department of Commerce ทำการรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงาน พบว่าอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้พลังงานสูงเป็นอันดับ 6 ของอุตสาหกรรมทั้งหมด โดยอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดคืออุตสาหกรรมเหล็กมีการใช้พลังงาน 22 % รองลงมาคืออุตสาหกรรมเคมี 21 % , อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและถ่านหิน 10% , อุตสาหกรรมหิน แร่ และแก้ว 9% , อุตสาหกรรมกระดาษ 9% และอุตสาหกรรมอาหาร 7% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการใช้พลังงานของกลุ่มอุตสาหกรรมต่างๆในสหรัฐอเมริกา

No	Industry Group	Gross energy (%)	Employment (%)	Value Added (%)	Value of shipment (%)
1	Primary Metals Industries	22	7	7	8
2	Chemicals and Allied Products	21	5	9	8
3	Petroleum and Coal Products	10	1	2	4
4	Stone, Clay, and Glass Products	9	3	3	2
5	Paper and Allied Products	9	4	4	4
6	Food and Kindred Products	7	9	11	15
Total		78	29	36	41
Other manufacturing industries		22	71	64	59

ที่มา : Samuel (1975 )

จากการสำรวจของ USDA (U.S. Department of Agriculture, 1974) พบว่ามีการใช้พลังงานสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร 28 % พลังงานทั้งหมดคิดเป็น 4,667 ล้านล้าน BTU โดยพบว่าอุตสาหกรรมการบรรจุเนื้อสัตว์ (meat packing) มีการใช้พลังงานมากถึง 99 ล้านล้าน BTU เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์คือ 11.9 % ของทั้งหมด ในปี 1974 พลังงานที่ใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมอาหารคือ ก๊าซธรรมชาติที่มีมากถึง 48% รองลงมาคือพลังงานจากไฟฟ้า 28% และถ่านหิน 9% ส่วนพลังงานที่เหลือเป็น residue fuel oil 7%, middle distillation 5%, propane หรือ butane 1% และน้ำมันหล่อลื่นอื่นๆอีก 2% ตารางที่ 2.2 แสดงถึงปริมาณพลังงานต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

ตารางที่ 2.2 ชนิดและปริมาณพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่าง 14 โรงงานในปี 1974

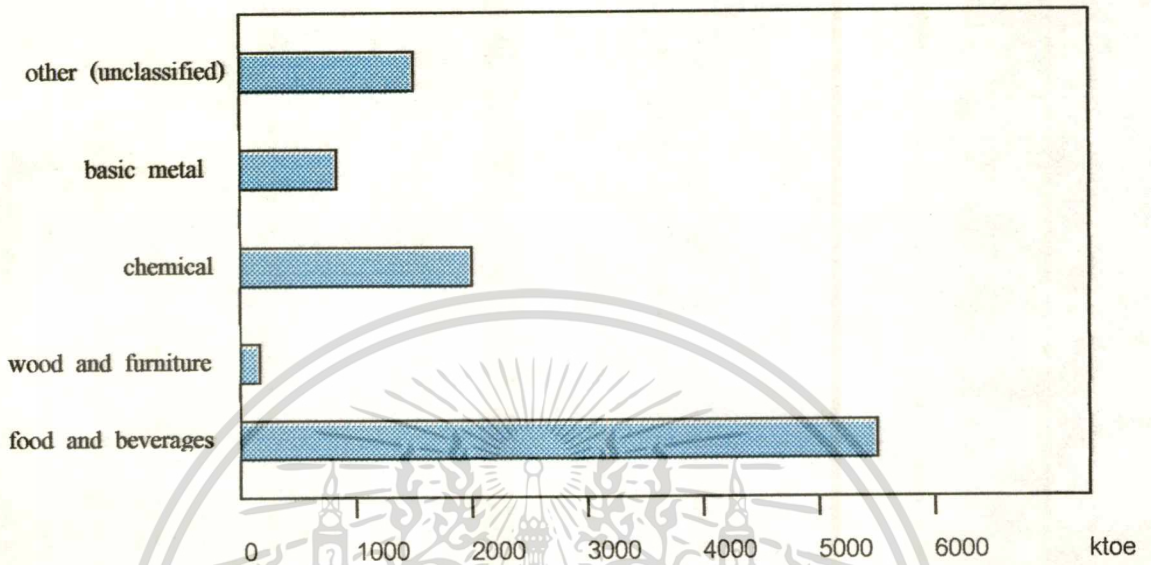
Industry	Natural	Purchased	Petroleum	Coal	Other	Total
	gas	electricity	products			
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Meat Packing	46	31	14	9	0	100
Prepared Animal Feeds	52	38	10	1	0	100
Wet Corn Milling	43	14	7	36	0	100
Fluid Milk	33	47	17	3	0	100
Beet Sugar Processing	65	1	5	25	4	100
Malt Beverages	38	37	18	7	0	100
Bread and Related Products	34	28	38	0	0	100
Frozen Fruits and Vegetables	41	50	5	4	0	100
Soybean oil Mills	47	28	9	16	0	100
Canned Fruits and Vegetables	66	16	15	3	0	100
Cane Sugar Refining	66	1	33	0	0	100
Sausage and other Meat	46	38	15	1	0	100
Animal and Marine Fats and Oils	65	17	17	1	0	100
Manufactured Ice	12	85	3	0	0	100

ที่มา : Samuel ( 1975 )

พลังงานจากก๊าซธรรมชาติจะถูกนำมาใช้มากที่สุดเกือบทุกอุตสาหกรรม แต่ในอุตสาหกรรมนม (fluid milk), อุตสาหกรรมผักผลไม้แช่แข็ง (frozen fruits and vegetables) และอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็ง (manufactured ice) จะใช้พลังงานจากไฟฟ้ามากที่สุด ส่วนพลังงานจากก๊าซธรรมชาติที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด คือ อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลจากหัวบีท (beet sugar processing) และอุตสาหกรรมข้าวโพด (wet corn milling) ส่วนอุตสาหกรรมผลิตขนมปัง (bread and related products) ใช้พลังงานจากน้ำมันมากที่สุด

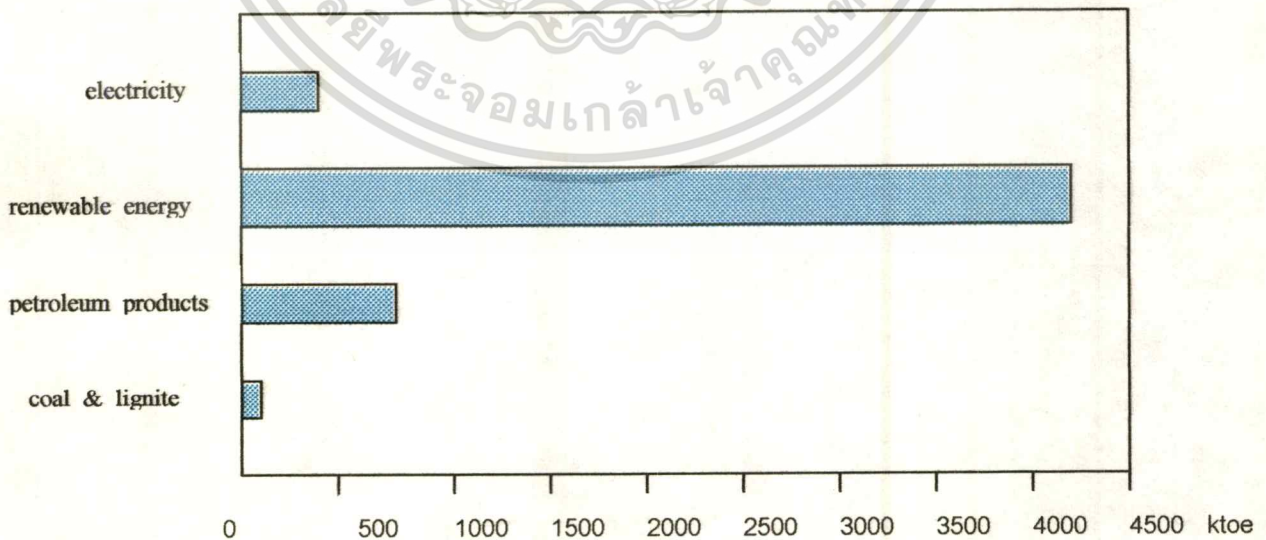
สำหรับประเทศไทยจากรายงานพลังงานของประเทศไทยปี 1996 จากกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พบว่าอุตสาหกรรมอาหารมีการเอกรสารเป็นเอกรสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกรสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้พลังงานสูงเป็นอันดับ 1 จากอุตสาหกรรมอื่นๆ และมีค่าการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นทุกปีโดยเฉลี่ย 2-5 % ต่อปี ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงปริมาณการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ของประเทศไทยในปี 1996  
ที่มา : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

พลังงานที่ใช้มากในการผลิตคือ น้ำมันปิโตรเลียม, ถ่านหิน และพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2.2 พลังงานชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารปี 1996

เอกสารนี้มา : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม การการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี

### 2.2.1 การวิเคราะห์พลังงาน (energy analysis)

Singh (1978) ได้พัฒนาการวิเคราะห์โดยการทำรูปแบบ (model) ของกระบวนการผลิตขึ้นมาเพื่อเป็นการแสดงภาพรวม โดยวิธีการวิเคราะห์พลังงาน มีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 7 ขั้นตอนคือ

#### 1. ตั้งวัตถุประสงค์ (decide on objective)

ในขั้นแรกต้องตั้งวัตถุประสงค์ที่จะคำนวณพลังงาน วัตถุประสงค์ที่ตั้งต้องมีโอกาสเป็นไปได้ที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานภายในโรงงาน โดยเฉพาะแหล่งของพลังงานความร้อนต่างๆ เช่น ไอน้ำ (steam) , ลมร้อน (heated air)

#### 2. เลือกขอบเขตของระบบ (choose a system boundary)

การเลือกขอบเขตของระบบจะทำให้โดยการพิจารณากระบวนการ พยายามทำในส่วนที่จำเป็นและเห็นว่าสำคัญ ในขั้นตอนนี้ค่อนข้างยากเมื่อต้องการวิเคราะห์ในระบบที่ใหญ่เกินไป อย่างไรก็ตามการเลือกขอบเขตของระบบจะมีความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์พลังงานของเครื่องมือในกระบวนการนั้น

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

เป็นการวาดแผนผัง (flow chart) ของกระบวนการผลิตภายใต้การคำนวณพลังงาน

#### 4. แสดงมวลและพลังงานเข้า (identify all mass and energy input)

เขียนมวลและพลังงานเข้าทั้งหมดที่มีผลต่อกระบวนการ โดยเขียนมวลและพลังงานทั้งหมดรวมถึงทิศทางการไหลด้วย ตัวอย่างของพลังงานเช่น ไอน้ำ, ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลของมวลและพลังงานรวมถึงค่าต่างๆจะต้องมีความถูกต้อง

#### 5. กำหนดปริมาณของมวลและพลังงานเข้าทั้งหมด (quantify all mass and energy input)

คำนวณมวลและพลังงานทั้งหมดในกระบวนการ โดยคำนวณพลังงานของแต่ละเครื่องมือการผลิต โดยคิดทีละขั้นตอนเช่น คิดจากทิศทางการไหลของไอน้ำ, ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งแสดงเป็นหน่วยมวลของการผลิตต่อเวลาเช่น กิโลกรัมต่อชั่วโมง

#### 6. แสดงมวลและพลังงานขาออก (identify all mass and energy output)

เขียนพลังงานและมวลออกของระบบและหามวลที่อาจเกิดขึ้นได้จากระบบ เช่น ไอน้ำ หรือ การเพิ่มพลังงานภายในผลิตภัณฑ์เช่น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์

#### 7. กำหนดปริมาณมวลและพลังงานออก (quantify all mass and energy output)

ขั้นตอนสุดท้ายนี้พลังงานจะถูกคำนวณตามทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และชนิดของพลังงานความร้อน

Singh (1978) ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานในโรงงานบรรจุส้มตัวอย่างร่วมกับ มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย (university of califormia) เพื่อหาการใช้พลังงานในโรงงานและแนวทางการประหยัดพลังงาน โดยผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่ได้รับส่วนมากมาจากไอน้ำซึ่งจะถูกนำไปใช้ใน 3 ขั้นตอน คือขั้นตอนการล้าง, เคลือบไข (wax) และการทำให้แห้งในตู้อบ (dryer) โดยไอน้ำถูกผลิตออกมาจากหม้อไอน้ำ (boiler) ซึ่งใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าจะใช้ไอน้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นสาเหตุของการใช้พลังงานมากเกินไปก็ตาม เพราะต้องมีการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติโดยตรงเพื่อให้ได้อากาศร้อนเพื่อที่สร้างพลังงานป้อนเข้าหม้อไอน้ำต่อไป ซึ่งถือว่าเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน จึงได้มีการเสนอแนวคิดในการปรับปรุงการใช้พลังงานจากแสงแดดเพื่อทดแทนในกระบวนการที่ต้องการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก เหมือนกับการใช้พลังงานแสงแดดในการต้มน้ำ หรืออาจมีการปรับปรุงความยาวของสายพานหรือมีการปรับปรุงรูปแบบสายพานใหม่เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต และมีการทำฉนวนหุ้มที่ประตูและอุปกรณ์เพื่อเป็นการลดการสูญเสียพลังงาน โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์พลังงานจะช่วยให้ในการดูว่าพื้นที่ใดที่สามารถอนุรักษ์

#### ● สมดุลมวล (mass balance)

ในกระบวนการอุตสาหกรรม สมดุลมวลสารจะช่วยให้วางแผนการออกแบบกระบวนการ แล้วประเมินคุณค่าทางเศรษฐกิจของกระบวนการที่มีอยู่แล้วหรือกระบวนการใหม่ เช่นในกระบวนการสกัดน้ำมันออกจากถั่วเหลือง เมื่อคำนวณหาปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องการต่อถั่วเหลือง 1 ตัน หรือระยะเวลาที่ต้องการเพื่อให้แผ่นกรองเต็ม สามารถใช้ข้อมูลนี้ไปออกแบบเครื่องมือ หรือประเมินคุณค่าทางเศรษฐกิจของกระบวนการได้ นอกจากนี้ ยังอาจใช้สมดุลมวลสารในการตัดสินใจของผู้จัดการ โรงงานเป็นประจำ ซึ่งจะช่วยทำให้ทราบถึงการไหลขององค์ประกอบผ่านแต่ละหน่วยในแต่ละจุด รวมทั้งใช้คำนวณถึงจุดที่ไม่สามารถเข้าไปวัดได้โดยตรงได้อีกด้วย

โรงงานทั่วไป ข้อมูลของมวลสารจะอยู่ในรูปปริมาณและส่วนประกอบของวัตถุดิบ ผลผลิตขั้นต้น (intermediates) ของเสีย ผลผลิตสุดท้าย และผลผลิตรวม ซึ่งหน่วยต่างๆของบริษัทสามารถนำไปรวมกันเข้าเพื่อแสดงถึงกระบวนการทั้งหมดของบริษัทได้

กระบวนการอุตสาหกรรมอาจแบ่งออกตามชนิดการปฏิบัติการได้ 2 ชนิด คือชนิดที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น และชนิดที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

ชนิดที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอาจแบ่งได้เป็นชนิดที่เป็นการผสมรวม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ในการผสมมวลสารกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกัน และไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงวิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับชนิดที่เป็นการแยกซึ่งมีการแยกทางฟิสิกส์ของมวลสารมากกว่าหนึ่งชนิดออกจากกัน โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคหรือไม่ก็ได้ ตัวอย่างเช่น การกลั่น การสกัดน้ำมัน

ชนิดที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้แก่ การปฏิบัติการที่มีตัวทำปฏิกิริยาตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไปเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กลายเป็นผลผลิตตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป ทั้งนี้โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคหรือไม่ก็ได้ ตัวอย่างเช่น การผลิตกรดซัลฟูริก

การทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ขึ้นนั้นอาจกระทำโดยต่อเนื่องโดยใส่มวลเข้าไปและดึงมวลออกด้วยอัตราเร็วคงที่ตลอดเวลาของการปฏิบัติการ หรือการทำให้เป็นครั้งคราวโดยใส่มวลเข้าไปตอนเริ่มต้นการปฏิบัติการ แล้วไม่เติมเข้าไปอีกเลยจนสิ้นสุดการปฏิบัติการ ส่วนการดึงมวลออกอาจกระทำตลอดเวลา หรือหลังจากการสิ้นสุดการปฏิบัติการแล้วก็ได้

การปฏิบัติการชนิดที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นนั้น ความสัมพันธ์ของมวลสารอยู่ในหน่วยของมวลหรือน้ำหนักเท่านั้น จึงต้องใช้หลักอ้างอิงในการคำนวณ เป็นหน่วยอัตราโดยน้ำหนักหรือของสารประกอบใดสารประกอบหนึ่งที่มีส่วนประกอบแน่นอน

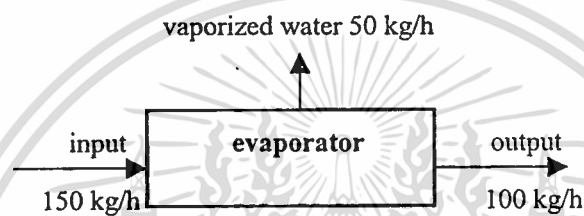
ส่วนการปฏิบัติการชนิดที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นนั้น นอกจากจะมีความสัมพันธ์ของมวลสารตามกฎอนุรักษ์มวลสารแล้ว ยังมีความสัมพันธ์ในแง่มวลสารสัมพันธ์ระหว่างตัวทำปฏิกิริยาและผลผลิตอีกด้วย ซึ่งมีความสัมพันธ์ในหน่วยโมลหรืออะตอม ดังนั้นจึงควรใช้หน่วยโมลของสารประกอบเป็นหลักอ้างอิงในการคำนวณ และคำนวณหาสมมูลของโมลขององค์ประกอบแต่ละตัวที่ไม่มีการสลายตัว หรือเปลี่ยนแปลง หรือคำนวณหาสมมูลของอะตอมของธาตุใดธาตุหนึ่งในระบบ แม้จะใช้หลักมวลสารสัมพันธ์มาคำนวณจำนวนโมลของสารประกอบใดๆ แต่เมื่อหาสมมูลของมวลสารรวมของระบบแล้วจะต้องถูกต้องด้วย

จากกฎของการอนุรักษ์มวล กล่าวว่า สารใดๆ ไม่อาจถูกสร้างขึ้นหรือกำจัดหมดไปได้ ดังนั้นในกระบวนการใดๆ อาจเขียนแสดงมวลสมมูลมวลสารได้ดังนี้

$$\text{mass input} = \text{mass output} + \text{mass accumulation}$$

mass input คือมวลสารที่เข้าสู่ระบบหรือกระบวนการนั้นๆ ส่วน mass output คือมวลสารที่ออกสู่ระบบนั้นๆ อาจรวมถึงมวลที่สลายไปโดยทางปฏิบัติการทางเคมีหรือทางชีวภาพ ถ้าหากไม่มีการสะสมหรือ mass accumulation เท่ากับศูนย์ ทำให้ mass input มีค่าเท่ากับ mass output หรือมวลเข้าเท่ากับมวลที่ออกและเรียกกระบวนการนี้ว่า อยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) แต่ถ้าหากมีการสะสมหรือ mass accumulation ไม่เท่ากับศูนย์ หรือปริมาณและความเข้มข้นขององค์ประกอบในระบบอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เรียกกระบวนการนี้ว่าอยู่ในสภาวะไม่คงที่ (unsteady state) ส่วนงานวิจัยนี้การวิเคราะห์พลังงานจะอยู่ในสภาวะคงที่ ดังนั้นหลังจากที่เขียนขอบเขตของระบบแล้วจำเป็นต้องทำสมดุลมวล เพื่อตรวจสอบว่าในระบบนั้นมีมวลขาออกจากระบบหรือไม่ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากมีมวลออกจากระบบต้องคำนวณว่ามีปริมาณเท่าไร ยกตัวอย่างเช่น ในระบบหนึ่งซึ่งอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) มีอุปกรณ์คือเครื่องระเหย (evaporator) ซึ่งจะระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ โดยป้อนวัตถุดิบเข้าไป 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากเครื่องนี้จะมีลักษณะแห้งและมีมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากกฎทรงมวลได้กล่าวไว้ว่า สสารใดๆไม่อาจถูกสร้างขึ้นได้หรือกำจัดหมดไป เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ควรวาดแผนภาพสมดุลมวลสารประกอบการคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงสมดุลมวลของเครื่องระเหย

จากแผนภาพสมดุลมวลสารของเครื่องระเหยพบว่ามวลเข้ามีปริมาณ 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มวลที่ออกจากเครื่องเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ระบบนี้อยู่ในสภาวะคงที่ไม่มีมวลสะสม (mass accumulation = 0) ดังนั้นมวลไอน้ำระเหย (vaporized water) ที่ได้จากการทำสมดุลมวลมีค่าเท่ากับ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

สมการสมดุลพลังงาน :

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \text{mass input} &= \text{mass output} + \text{mass accumulation} \\ 150 &= 100 + 50 + 0 \\ 150 &= 150 \end{aligned}$$

ก่อนการวิเคราะห์จำเป็นต้องทำสมดุลมวลสารก่อนทุกครั้งเสมอ และในการทำสมดุลพลังงานก็มีแนวคิดคล้ายๆกัน

สมดุลพลังงานรอบๆระบบใดๆมีพื้นฐานจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (กฎของการอนุรักษ์พลังงานไม่มีการสูญหายแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้) พลังงานเชิงกล(งาน) พลังงานความร้อน อาจดรูปให้มีหน่วยเดียวกันได้ การกำหนดขอบเขตโดยรอบของระบบเพื่อทำสมดุลพลังงานก็มีขั้นตอนคล้ายกับการคำนวณสมดุลมวล โดยมีพื้นฐานดังนี้

$$\text{energy input} = \text{energy output} + \text{energy accumulation}$$

ถ้าหากระบบอยู่ในสภาวะคงที่เทอมการสะสม (energy accumulation) จะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าในสภาวะไม่คงที่เทอมการสะสมจะแสดงอยู่ในรูปของอนุพันธ์เมื่อนำสมการข้างต้นมาใช้จะต้องนับรวมเทอมพลังงานทุกเทอมที่เปลี่ยนแปลงภายในระบบ ปริมาณความร้อนที่แสดงในรูปเอนทัลปี มีพื้นฐานมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าเอนทัลปีจากอุณหภูมิตั้งแต่

- ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)

ค่าความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) คือ ปริมาณความร้อนของการทำให้มวลหนึ่งหน่วยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปหนึ่งองศา ค่าความร้อนจำเพาะจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอุณหภูมิ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงลงมากในแก๊สของเหลวและของแข็งตามลำดับ ของแข็งและของเหลวส่วนใหญ่จะมีค่าความร้อนจำเพาะค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงกว้างของอุณหภูมิ

$$c_p = \frac{dq}{dT} \tag{1}$$

เมื่อ  $q$  = พลังงานความร้อน (kJ)  
 $T$  = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $c_p$  = ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )

สำหรับกรณีของวัตถุคิบ หรือวัสดุบางอย่างสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิงที่ได้ทำการทดลองไว้แล้ว

- เอนทัลปี (enthalpy)

เอนทัลปี (H) เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้ความดันคงที่ ( $q_p$ ) ซึ่งต่างไปจากความร้อน (E) ที่เกิดขึ้นภายใต้ปริมาตรคงที่ ( $q_v$ ) เมื่อนำกฎข้อที่ 1 เทอร์โมไดนามิกส์มาพิจารณาความร้อนทั้งสองที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ต่างกัน จะให้ความร้อนทั้งสองอยู่ในรูปสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$q_p = \Delta H \quad (2)$$

$$q_v = \Delta E \quad (3)$$

ความร้อนทั้งสองแบบมีความสัมพันธ์กันตามนิยามของเอนทัลปี คือ

$$H = E + PV \quad (4)$$

เอนทัลปีเป็นฟังก์ชันของ E, P และ V ซึ่งต่างก็เป็นฟังก์ชันของสถานะทำให้  $\Delta H$  เป็นฟังก์ชันของสถานะด้วย เมื่อระบบมีการเปลี่ยนสถานะสมการ (4) จะเปลี่ยนมาเป็น

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV) \quad (5)$$

ถ้า  $\Delta H$  มีค่าเป็นบวก ระบบจะดูดความร้อนเข้าไป แต่ถ้า  $\Delta H$  มีค่าเป็นลบ หมายความว่าระบบจะคายความร้อนออกมา

จากนิยามของความร้อนจำเพาะ ณ จุดใดๆ ตามเส้นทางที่กำหนดมาให้จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเขียนเป็นสมการ (1) ได้คือ

$$c_p = \frac{dq}{dT}$$

ถ้าต้องการทราบปริมาณความร้อนที่ทำให้ 1 โมลของสารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก  $T_1$  ไปเป็น  $T_2$  สามารถคำนวณได้จากการจัดเรียงสมการ (1) แล้วอินทิเกรตจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$q = cdT \quad (6)$$

ปริมาณความร้อน ( $q$ ) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของวัตถุมวลใดๆ ( $m$ ) กิโลกรัม จะขึ้นไปตามสมการดังนี้

$$q = mc_p \Delta T \quad (7)$$

เมื่อ  $m$  = มวลของสาร (kg/h)

จากที่กล่าวมา สามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ความดันคงที่ และปริมาตรคงที่ในเทอมของความจุความร้อนได้คือ

$$q_p = \Delta H = mc_p \Delta T \quad (8)$$

$$q_v = \Delta E = nc_v \Delta T \quad (9)$$

โดยการคิดเอนทัลปีจะเลือกสถานะอ้างอิงสำหรับองค์ประกอบทั้งหมดที่เข้าและออกจากระบบ นั่นคือการเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทัลปีขององค์ประกอบจากสถานะอ้างอิงไปเป็นสถานะปัจจุบันโดยพิจารณาในรูปของค่าเอนทัลปีสมบูรณ์ของระบบอุณหภูมิอ้างอิง ( $T_0$ ) สำหรับอุณหภูมิอ้างอิงในงานวิจัยนี้คือ  $25^\circ\text{C}$

ถ้าหากว่าในระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสถานะก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ (enthalpy change with a change in phase) ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณความร้อนที่ต้องกำจัดออกในระหว่างการทำให้แห้งในผลิตภัณฑ์อาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเข้ามาเกี่ยวข้อง และต้องพิจารณาค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอโดยจะนำเพียงบางส่วน (ไม่ทั้งหมด) ที่จะเปลี่ยนเป็นไอน้ำที่จุดเดือด ค่าความร้อนแฝงของความร้อนคือ

$$\Delta H = mL \quad (10)$$

เมื่อ  $L$  = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

ดังนี้

จากสมการข้างต้น สามารถนำมาเขียนเป็นสมดุลเอนทัลปีทั้งระบบเปิดและระบบปิดได้

สมดุลเอนทัลปีระบบเปิด :

ปริมาณการเพิ่มเอนทัลปีของระบบ = (ผลรวมของปริมาณความร้อนที่ระบบได้รับ) - (ผลรวมของปริมาณงานกลและไฟฟ้าที่ระบบจ่าย)

สมดุลเอนทัลปีระบบปิด :

ปริมาณการเพิ่มพลังงานภายในระบบ = (ผลรวมของปริมาณความร้อนที่ระบบได้รับ) - (ผลรวมของปริมาณงานกลและไฟฟ้าที่ระบบจ่าย)

ทั้งนี้ โดยถือว่าทั้งระบบเปิดและระบบปิด มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์น้อยมากจนตัดทิ้งไปได้

หนึ่งประสิทธิภาพ (efficiency) ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ประเมินได้จากค่าจำกัดความต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ (\%)} &= \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้า}} \times 100 \\ &= \frac{(\sum \text{output})}{(\sum \text{input})} \times 100 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าเอนทัลปีเฉพาะเช่น ค่าเอนทัลปีของเชื้อเพลิงหรือความร้อนที่สูญเสียไปกับผนังอุปกรณ์ได้ดังนี้คือ (โยชิฮิโกะ ทาคะมูระ. 2527)

$$\text{ค่าเอนทัลปีของเชื้อเพลิง} = m \times \text{LHV}$$

เมื่อค่า LHV = Low Heating Value (kJ/kg)

m = ปริมาณเชื้อเพลิง (kg/h)

พลังงานที่สูญเสียไปกับผนังอุปกรณ์ (Q) หาได้จากสูตร (โยซิชิโกะ ทาคะมูระ. 2527)

$$Q = UA\Delta T$$

เมื่อ  $T$  = อุณหภูมิ (K)

$A$  = พื้นที่ของอุปกรณ์ ( $m^2$ )

$U$  = ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อน (overall heat transfer coefficient) ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

สามารถหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อน ( $U$ ) ได้จาก

$$\frac{1}{U} = \frac{x}{k}$$

เมื่อ  $x$  = ความหนาของวัสดุ (m)

$k$  = ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ( $W/mk$ )

ในส่วนของการคิดเอนทัลปีของพลังงานไอน้ำซึ่งเป็นพลังงานที่นิยมใช้สามารถอ่านค่าได้จากตารางอ้างอิง

## 2.2.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี (exergy analysis)

จากในอดีต การวิเคราะห์การใช้พลังงาน โดยเฉพาะพลังงานความร้อน จะพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพของพลังงานในแง่เอนทัลปี (enthalpy) ผลรวมของพลังงานความร้อนที่แฝงอยู่ในวัตถุหรือระบบเท่านั้น ซึ่งวิธีดังกล่าวไม่สามารถบอกให้ทราบว่ากระบวนการผลิตนั้นใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด หรือใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุดแล้วหรือยัง ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการนำเอาแนวความคิดการวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยใช้เอ็กเซอร์ยี ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพของพลังงานมาร่วมวิเคราะห์ด้วย ซึ่งจะสามารถบอกได้ทันทีว่ากระบวนการผลิตนั้นๆ ได้ใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่สุดแล้วหรือไม่ exergy ประกอบด้วยคำสองคำซึ่งได้แก่ คำว่า ex ซึ่งเป็นคำเดิมหน้า

ภาษาละติน ที่แปลว่า ให้ หรือ ออก และคำว่า ergon ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษากรีกที่แปลว่างาน ดังนั้นเมื่อนำมารวมเป็นคำว่า exergy จะมีความหมายว่าเป็นงานที่สามารถได้รับจากระบบโดยมีค่าของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็นค่ามาตรฐาน ก่อนที่จะเกิดคำนี้ขึ้นมานักวิทยาศาสตร์ได้ใช้คำว่า

ความสามารถในการให้พลังงาน (availability) หรือ available energy หรือ usable energy ซึ่งคำเหล่านี้ได้เกี่ยวข้องกับโดยตรงกับกฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยกฎข้อที่ 1 ของ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวว่าพลังงานของระบบสามารถสงวนรักษาไว้ หรือไม่มีการสูญเสียของพลังงาน ส่วนกฎข้อที่ 2 มีการอธิบายไว้หลายประเด็นที่ว่า คุณภาพของพลังงานจะลดลงเมื่อความไม่เป็นระเบียบของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งความไม่เป็นระเบียบวัดในรูปของ เอนโทรปี (entropy) นั่นคือถ้าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีเพิ่มขึ้นคุณภาพของพลังงานของระบบนั้นจะถูกทำให้ลดลง กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะสัมพันธ์โดยตรงกับเอ็กเซอร์ยี

Gaggioli (1980) ได้ทำการหาค่าเอ็กเซอร์ยี (exergy value) ขององค์ประกอบของสารบริสุทธิ์และสารผสมเช่น ฟรีออน และ แอมโมเนีย เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าเอ็กเซอร์ยีขององค์ประกอบทางเคมี และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (heating value) หลายอย่างๆ ได้ ซึ่งค่าเอ็กเซอร์ยีเหล่านี้เป็นพื้นฐานในการนำเอาแนวความคิดของเอ็กเซอร์ยีมาวิเคราะห์ในการใช้พลังงาน

Fang (1995) ได้นำเอ็กเซอร์ยีมาวิเคราะห์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์พลังงานโดยวิธีเดิมคือวิเคราะห์พลังงานด้วยกฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่ 1 ในโรงงานผลิตนมพบว่าคุณภาพพลังงานที่คิดจากวิธีเดิมได้ค่ามากกว่าความเป็นจริง ในกระบวนการผลิตนมมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการโฮโมจิไนซ์ และการลดอุณหภูมิในกระบวนการต่างๆ ดังกล่าวนี้อาจเกี่ยวข้องกับการรับพลังงานความร้อน และการคายพลังงานความร้อน โดยมีกระบวนการดังนี้คือ นำนมดิบจะไหลผ่านมายังเครื่องเจนนอเรเตอร์ (regenerator) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ นมจะผ่านไปยังเครื่องโฮโมจิไนซ์ (homogenizer) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลหรืออนุภาคของไขมันนมแตกตัว และจะเพิ่มความร้อนสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิพาสเจอร์ไรซ์ และทิ้งไว้ในท่อพัก ซึ่งนมจะค้างอยู่จนกระทั่งแบคทีเรียถูกทำลาย ต่อจากนั้นลดอุณหภูมินมให้ต่ำจนถึงอุณหภูมิเก็บรักษา โดยพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานที่ผันกลับไม่ได้ รวมถึงประสิทธิภาพของพลังงาน และเอ็กเซอร์ยี ในระบบที่คงที่ทุกๆ ไป พลังงานและเอ็กเซอร์ยีสามารถแสดงโดย

$$\text{สมดุลพลังงาน} \quad Q = \sum_{\text{output}} (mh)_j - \sum_{\text{input}} (mh)_j + W \quad (11)$$

$$\text{สมดุลเอ็กเซอร์ยี} \quad I = \sum_{\text{input}} (me_x)_j - \sum_{\text{output}} (me_x)_j - (1 - \frac{T_r}{T_s})Q - W \quad (12)$$

- เมื่อ
- Q = พลังงานที่เข้าสู่ระบบ (kW)
  - W = งานหรือพลังงานที่ออกสู่ระบบ (kW)
  - I = พลังงานที่ผันกลับไม่ได้ของระบบ (kW)
  - $m_j$  = อัตราการไหลของไอน้ำ (kJ/s)
  - $h_j$  = เอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg)
  - $s_j$  = เอนโทรปีจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg)
  - $e_{xj}$  =  $h_j - h_r - T_r (s_j - s_r)$ , เอ็กเซอร์ยีจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_s =$  อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัส ( $^{\circ}\text{F}$ )

$T_r = 298.16 \text{ K}$  ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

1 J พลังงานไฟฟ้า = 3.6 J พลังงานความร้อน

จากผลการวิเคราะห์พบว่าให้ผลใกล้เคียง 100 % ในการคิดประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อวิเคราะห์พลังงานโดยใช้ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 จะแสดงให้เห็นค่าพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ ผลการคำนวณประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของเครื่องไฮโมจิโนสได้ 54.9 % เมื่อคำนวณประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ได้เพียง 6.8 % ความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากค่าของพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้ที่เกิดจากช่วงต่างๆของกระบวนการ ซึ่งประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 จะคำนวณค่านี้ได้ แต่ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ไม่สามารถพิจารณาค่าพลังงานที่ไม่ผันกลับได้ ในระบบนี้มีการสูญเสียพลังงานไป 23.04 kW แต่ถ้าวิเคราะห์ด้วยเอ็กเซอร์ยีมีการสูญเสียพลังงานไปมากถึง 25.01 kW และเมื่อเดินเครื่องจะมีการสูญเสียพลังงานแบบผันกลับไม่ได้สูงถึง 8.14 kW แทนที่จะมีค่าแค่ 6.95 kW และในกระบวนการนี้มีค่าการใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิสูงคือที่ 420 K มากกว่าที่จะเป็นคืออุณหภูมิแค่ 373 K ในกระบวนการผลิตนมได้ใช้การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในโรงงาน ถึงแม้ว่าการทำนมให้เย็น, การให้ความร้อนแก่นม และการอุ่นนม จะมีค่าการใช้พลังงานสูงก็ตาม การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีจะเป็นแนวทางในการบอกถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เช่นจะมีค่าเล็กน้อยในส่วนของไฮโมจิโนสเมื่อทำให้ความดันลดลง แต่จะใช้พลังงานมากในส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ในการวิเคราะห์นั้นนอกจากจะบอกถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานแล้วยังบอกถึงวิธีพัฒนาให้มีการใช้พลังงานให้มีประโยชน์สูงสุด

จากรายงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น การนำเอาเอ็กเซอร์ยีมาวิเคราะห์ทำให้ทราบได้ว่ากระบวนการผลิตนั้นใช้พลังงานอย่างมีคุณภาพหรืออย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดหรือไม่

ในการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอ็กเซอร์ยีนั้น พลังงานที่ถูกวิเคราะห์โดยกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว จะถูกนำมาคำนวณโดยใช้แนวคิดเอ็กเซอร์ยีด้วยกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

- การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy change)

กระบวนการแบบใดสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้หรือไม่นั้น จะพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของจักรวาล ซึ่งประกอบด้วยเอนโทรปีของระบบและสิ่งแวดล้อมเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้คือ

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{syst}} + \Delta S_{\text{surr}} \quad (13)$$

เมื่อ  $\Delta S_{\text{univ}}$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของจักรวาล  
 $\Delta S_{\text{syst}}$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ  
 $\Delta S_{\text{surr}}$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อม

กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ได้กล่าวไว้ว่า “ กระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจะต้องเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของจักรวาลในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ” นั่นคือ  $\Delta S_{\text{univ}} > 0$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า “ กระบวนการใดที่มีการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจากมีระเบียบไปเป็นไม่มีระเบียบภายในระบบแล้วกระบวนการนั้นสามารถเกิดขึ้นได้เอง ”

- เอนโทรปี (entropy)

เอนโทรปี (S) เป็นแฟคเตอร์บอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการแบบต่างๆ หรือหมายถึงปริมาณที่บอกให้ทราบว่าในระบบหนึ่งๆ จะมีการจัดเรียงตัวของสารอย่างมีระเบียบมากน้อยเพียงใด และได้กำหนดนิยามของเอนโทรปีไว้ว่า

$$dS = \frac{dq}{T} \quad (14)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะจาก 1 ไปเป็น 2 ภายใต้อุณหภูมิกงที่ สมการ (14) จะเปลี่ยน  
มาเป็น

$$\begin{aligned}\Delta S &= S_2 - S_1 \\ &= \frac{q}{T}\end{aligned}\quad (15)$$

โดยที่  $\Delta S$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ซึ่งจัดเป็นฟังก์ชันของสถานะการเปลี่ยนแปลง  
เอนโทรปีในกระบวนการผันกลับไม่ได้ พิจารณาได้จากการขยายตัวของก๊าซเข้าสู่สุญญากาศภายใต้  
อุณหภูมิกงที่จะได้  $\Delta S_{\text{univ}} > 0$  เสมอ แสดงว่าการขยายตัวของก๊าซดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง  
ตามธรรมชาติ จึงสรุปได้ว่าในกระบวนการผันกลับไม่ได้การเปลี่ยนแปลงสามารถเกิดขึ้นเองได้  
ตามธรรมชาติ การคำนวณ  $\Delta S_{\text{univ}}$  ในกรณีนี้สามารถหาได้จากผลรวมของ  $\Delta S_{\text{sys}}$  และ  $\Delta S_{\text{surr}}$

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในกระบวนการผันกลับได้ จะพิจารณาได้จากการขยายตัวและ  
การอัดตัวของก๊าซภายใต้อุณหภูมิกงที่จะได้ค่า  $\Delta S_{\text{univ}} = 0$  เสมอ จึงสรุปได้ว่า การขยายตัวและ  
การอัดตัวของก๊าซในกระบวนการผันกลับได้ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ เพราะไม่มีการ  
เปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของจักรวาล ถ้าทราบค่า  $\Delta S_{\text{sys}}$  จะได้ค่า  $\Delta S_{\text{surr}}$  เท่ากับ  $-\Delta S_{\text{sys}}$   
ดังสมการ

$$\therefore \Delta S_{\text{sys}} = -\Delta S_{\text{surr}} \quad (16)$$

พิจารณาค่า  $\Delta S_{\text{sys}}$  ในกระบวนการผันกลับได้ที่มีรูปแบบต่างๆกัน โดยอาศัยสมการ (16)

- (1) กระบวนการแบบไอโซคอริก (isochoric) เป็นกระบวนการที่ปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง ( $V$  คงที่)

$$\Delta S_{\text{sys}} = nC_V \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (17)$$

- (2) กระบวนการแบบไอโซเทอร์มอล (isothermal) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้  
อุณหภูมิกงที่ ( $T$  คงที่)

$$\Delta S_{\text{sys}} = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (18)$$

$$= \frac{nR \ln(P_1)}{(P_2)} \quad (19)$$

(3) กระบวนการแบบไอโซบาริก (isobaric) เป็นกระบวนการที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน (P คงที่)

$$\Delta S_{\text{sys}} = nc_v \ln \frac{(T_2)}{(T_1)} \quad (20)$$

(4) กระบวนการเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนสถานะจะเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิและดันคงที่ อาทิ การหลอมเหลว การกลายเป็นไอ และการระเหิด

$$\Delta S_{\text{sys}} = \frac{\Delta H_{\text{latent}}}{T} \quad (21)$$

เมื่อ  $\Delta H_{\text{latent}}$  คือ ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ  
 $T$  คือ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะ

ตัวอย่างเช่นการกลายเป็นไอ  $\Delta H$  คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $\Delta H_{\text{vap}}$ ) และ  $T$  คืออุณหภูมิ ( $T_b$ ) สมการ (21) จะเปลี่ยนมาเป็น

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{vap}} &= S (\text{ไอ}) - S (\text{ของเหลว}) \\ &= \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{T_b} \end{aligned} \quad (22)$$

ในทุกกระบวนการในอุณหพลศาสตร์จะต้องประกอบไปด้วยกระบวนการสองกระบวนการเป็นอย่างน้อย ที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานเกิดขึ้น (energy transformation) ซึ่งกระบวนการหนึ่งจะถูกเรียกว่า กระบวนการให้พลังงาน (energy donating process) และอีกกระบวนการหนึ่งจะถูกเรียกว่า กระบวนการรับพลังงาน (energy accepting process) จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์

ที่กล่าวว่าพลังงานจะไม่สูญหายไปไหนหรือพลังงานจะถูกอนุรักษ์ จึงสามารถเขียนสมการที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสองกระบวนการได้ดังนี้

$$\Delta H_{ed} + \Delta H_{ca} = 0 \quad (23)$$

โดยตัวที่ห้อย ed (energy donating process) หมายถึง กระบวนการให้พลังงาน และ ea (energy accepting process) หมายถึงกระบวนการรับพลังงาน จากกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\Delta S_{ed} + \Delta S_{ca} \geq 0 \quad (24)$$

จากนิยามของเอนโทรปีที่ว่า เอนโทรปีคืองานที่สามารถได้รับจากระบบโดยมีค่าของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็นค่ามาตรฐาน ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\Delta E_x = \Delta H_m - T_0 \Delta S_m \quad (25)$$

และได้มีนิยามของเทอมอีกหนึ่งเทอมนั่นคือ  $A_m$  ซึ่งหมายถึงเป็นค่าที่แสดงถึงระดับของพลังงาน (energy level) ดังสมการต่อไปนี้

$$A_m = 1 - \frac{T_0 \Delta S_m}{\Delta H_m} \quad (26)$$

โดยที่ตัวห้อย m อาจจะเป็นได้ทั้งตัวห้อย ed หรือ ea ในสมการที่ (25) หรือ (26)

จากสมการที่ (26) ถ้าค่าของ  $A_m$  สูง จะบ่งบอกถึงระดับพลังงาน (energy level) ของกระบวนการนั้นมีคุณภาพสูงนั่นเอง นอกจากนี้สมการที่ (25) เมื่อใช้สมการที่ (26) รวมด้วยอาจจะสามารถเขียนได้ในรูปอีกรูปหนึ่งคือ

$$\Delta E_x = \Delta H_m \times A_m \quad (27)$$

จากสมการที่ (27) ใช้ร่วมกับสมการที่ (23) และ (24) จะสามารถพบได้ว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (สมการที่ (25) ) สำหรับทุกกระบวนการในทางอุตสาหกรรมจะสามารถเขียนการสูญเสียเอนทัลปี (EXL) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} EXL &= -\sum E_m = -E_{cd} - E_{ca} \\ &= -\Delta H_{cd} A_{cd} - \Delta H_{ca} A_{ca} \\ &= \Delta H_{ca} A_{cd} - \Delta H_{ca} A_{ca} \\ &= \Delta H_{ca} (A_{cd} - A_{ca}) \geq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเอนทัลปีของระบบปิดและระบบเปิดได้ดังนี้คือ

$$\text{ในกรณีระบบเปิด : } Ex = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$$

$$\text{ในกรณีระบบปิด : } Ex = (U - U_0) - T_0(S - S_0)$$

สำหรับสมการสมดุลของเอนทัลปีคือ

เอนทัลปีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ = (เอนทัลปีที่ไหลออกจากระบบ) + (เอนทัลปีสูญเสีย) + (เอนทัลปีที่ถูกทำลายเนื่องจากความย้อนกลับไม่ได้)

$$\sum \text{exergy input} = \sum \text{exergy output} + \sum \text{exergy stored} + \text{irreversibility}$$

โดยพลังงานที่มีการใช้จะเรียกพลังงานนี้ว่า availability แต่พลังงานที่เป็น irreversibility คือพลังงานที่ไม่สามารถผันกลับได้

หนึ่งประสิทธิผลของเอนทัลปีสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ประสิทธิผล (\%)} = \frac{\text{เอนทัลปีที่ใช้งานได้จริง}}{\text{เอนทัลปีที่ป้อนเข้า}} \times 100$$

นอกจากนี้ยังมีการหาค่าเอนทัลปีของเชื้อเพลิงได้โดยสมการนี้คือ (โยชิโกะ ทาคะมูระ. 2527)

$$\text{exergy} = \text{LHV} [1.0038 + (0.1365 \times \underline{H}) + (0.0308 \times \underline{O}) + (0.0104 \times \underline{S})] \quad (29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (C) ศึกษาเท่านั้น (C) อนุญาตให้นำไป (C) ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $H$  = จำนวนไฮโดรเจนในองค์ประกอบ  
 $O$  = จำนวนออกซิเจนในองค์ประกอบ  
 $C$  = จำนวนคาร์บอนในองค์ประกอบ  
 $S$  = จำนวนซัลเฟอร์ในองค์ประกอบ

ส่วนเอ็กเซอร์ยีของความร้อนที่ผ่านผนังอุปกรณ์สามารถหาได้จากสมการนี้

$$\text{exergy} = \frac{(1-T_0)Q}{T} \quad (30)$$

เมื่อ  $Q$  = พลังงานที่สูญเสียไปกับผนังอุปกรณ์ (kJ/h)

ในกรณีเอ็กเซอร์ยีของไอน้ำในส่วนของเอ็กเซอร์ยีคิดเหมือนกับพลังงานความร้อนอื่นๆ และจากแนวคิดของเอ็กเซอร์ยีสามารถคำนวณพลังงานที่สูญเสียไป ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยกราฟนี้คือ EUD (Energy Utilization Diagram) โดยรูปกราฟนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26)

จากรายละเอียดของการวิเคราะห์พลังงานต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงได้นำเอาแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์พลังงาน โดยวิธีเดิมมาเปรียบเทียบกับการใช้เอ็กเซอร์ยีในการหาประสิทธิภาพของระบบหรือกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่าง และนำเสนอในรูปกราฟ EUD พร้อมทั้งหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการต่อไปเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

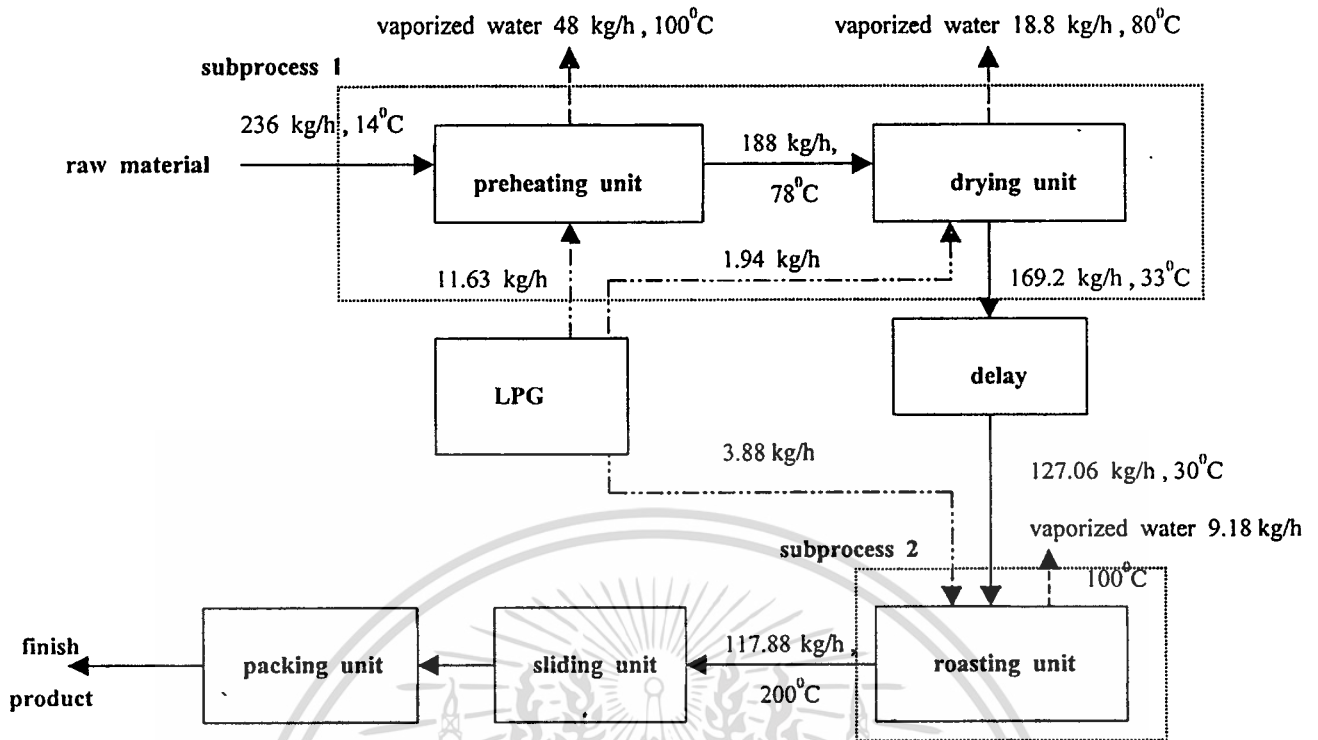
## บทที่ 3

# การวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอนโทรปี ของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานอุตสาหกรรมอาหารตัวอย่างที่เลือกทำการวิเคราะห์นี้ มีการผลิตอาหารประเภทขบเคี้ยว (snack) โดยมีวัตถุดิบหลักคือ ถั่ว (bean) และปลา (fish) มีแหล่งพลังงานความร้อนแตกต่างกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์การใช้พลังงานพบว่าในบางหน่วยการผลิตมีการใช้พลังงานอย่างไม่มีคุณค่า ซึ่งผลการศึกษาจะกล่าวแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ดังนี้

### 3.1 กระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (Fish Snack Process)

วัตถุดิบคือปลาที่มีอุณหภูมิต่ำ จะถูกลำเลียงมาบดและเคี้ยวส่วนผสมต่างๆ ซึ่งในส่วนนี้จะจัดอยู่ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ (raw material) ในขั้นตอนนี้จะไม่มีพลังงานความร้อนเกี่ยวข้อง หลังจากนั้นเนื้อปลาจะถูกขึ้นรูปให้เป็นแผ่นและถูกให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นบางส่วนออก เรียกส่วนนี้ว่า ส่วนไล่ความชื้น (preheating unit) โดยในหน่วยการผลิตนี้อยู่ในสถานะเปิด (open system) หลังจากนั้นเส้นปลาจะถูกส่งไปยังส่วนตู้อบ (drying unit) ซึ่งมีอุณหภูมิภายใน  $80^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้เส้นปลาที่  $78^{\circ}\text{C}$  แห้ง เส้นปลาจะมีอุณหภูมิลดลงเหลือ  $33^{\circ}\text{C}$  และเส้นปลาจะถูกพักไว้ หลังจากนั้นจะนำไปในส่วนย่าง (roasting unit) เพื่อให้สุก พอง และมีสีที่น่ารับประทาน โดยในขั้นตอนนี้มีการใช้ก๊าซเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนและหน่วยการผลิตนี้จะอยู่ในสถานะเปิด เช่นเดียวกับส่วนไล่ความชื้น ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ค่อนข้างมาก โดยแผนผังของกระบวนการผลิตจะมีตัวเลขที่แสดงถึงมวลเข้าของวัตถุดิบ และก๊าซเหลวพร้อมทั้งอุณหภูมิวัตถุดิบ ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการผลิตได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตอาหารว่างจากปลา

จากกระบวนการผลิตจะแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ส่วนย่อย คือ

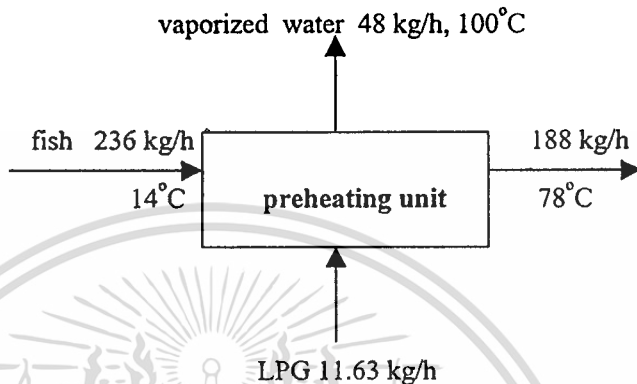
1. ส่วนแรกได้แก่ ส่วนไล่ความชื้น (preheating unit) รวมทั้งส่วนของเตาอบ (drying unit) จะเรียกส่วนนี้ว่า กระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (subprocess 1 of fish snack process)

2. ส่วนที่สองได้แก่ ส่วนของการย่าง (roasting unit) เรียกส่วนนี้ว่ากระบวนการย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (subprocess 2 of fish snack process)

ทั้งนี้เพราะช่วงของการย่างเป็นช่วงที่ไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงแบ่งกระบวนการผลิตออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน และพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือ ก๊าซเหลวเพียงอย่างเดียว ดังแสดงไว้ในรูป และก่อนทำการวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีนี้ต้องทำสมดุลมวลก่อนทุกครั้ง หลังจากที่สมดุลมวลแล้วพบว่าในกระบวนการนี้มีส่วนของไอน้ำ (vaporized water) ที่ออกจากวัตถุดิบที่สูญเสียไปกับความร้อนดังแสดงข้อมูลอยู่ในวงเล็บของแผนภาพ

### 3.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

#### 3.2.1 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีของส่วนไล่ความชื้น (preheating unit)



รูปที่ 3.2 แสดงสมดุลมวลของส่วนไล่ความชื้น

วัตถุดิบจะถูกป้อนเข้ามาปริมาณ 236 kg/h มีอุณหภูมิ 14°C ให้ความร้อนโดยการเผาไหม้ก๊าซเหลวที่เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง ใช้ก๊าซเหลวปริมาณ 11.63 kg/h เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ ทำให้มีน้ำหนักลดลงเหลือ 188 kg/h จึงมีส่วนที่น้ำในวัตถุดิบระเหยออกไป 48 kg/h น้ำที่ระเหยนี้ถือว่ามีอุณหภูมิ 100°C ในการคำนวณปลา มีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 3.433 kJ/kg°C และค่าความร้อนค่าของก๊าซเหลวมีค่าเท่ากับ 45,606 kJ/kg หลังจากวิเคราะห์ในหน่วยไล่ความชื้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 27.26 % แต่ค่าประสิทธิภาพที่วิเคราะห์จากเอนทาลปีมีค่าเพียงแค่ 4.93 % โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.1 แสดงการคำนวณเอนทาลปีในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนไต่ความชื้นในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. fish	-8912.07	-1.7	1. fish	$3.42 \times 10^4$	6.6
2. LPG	$5.30 \times 10^5$	101.7	2. vaporized water	$1.08 \times 10^5$	20.7
			3. loss	$3.79 \times 10^5$	72.7
			- heat loss*	$2.32 \times 10^4$	6.1
			- other	$3.56 \times 10^5$	93.9
$\Sigma H$	$5.21 \times 10^5$	100.0	$\Sigma H$	$5.21 \times 10^5$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(1.42 \times 10^5)}{(5.21 \times 10^5)} \times 100$ $= 27.26 \%$					

ประสิทธิภาพ (efficiency, eff) คือ ผลรวมเอนทัลปีขาออกทั้งหมดที่ใช้ประโยชน์หารด้วยผลรวมเอนทัลปีขาเข้าทั้งหมดที่เข้าไปในกระบวนการคูณด้วย 100

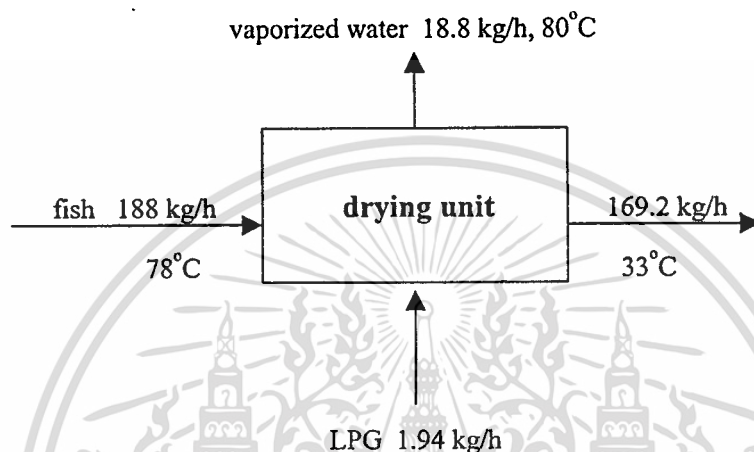
ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีส่วนไต่ความชื้นในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. fish	341.40	0.06	1. fish	$5.16 \times 10^3$	0.9
2. LPG	$5.46 \times 10^5$	100.0	2. vaporized water	$2.17 \times 10^4$	4.0
			3. loss	$1.25 \times 10^5$	22.9
			- heat loss	$6.85 \times 10^3$	5.5
			4. irreversibility	$3.94 \times 10^5$	72.2
$\Sigma Ex$	$5.46 \times 10^5$	100.0	$\Sigma Ex$	$5.46 \times 10^5$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(2.69 \times 10^4)}{(5.46 \times 10^5)} \times 100$ $= 4.93 \%$					

\*heat loss คือ อากาศร้อนที่รอบๆ อุปกรณ์เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ (ดังแสดงการคำนวณอยู่ในภาคผนวก จ) และ เป็นส่วนหนึ่งของพลังงานที่สูญเสียทั้งหมด (enthalpy loss) ส่วนพลังงานอื่นๆ (other) ที่สูญเสียกับกระบวนการจะแสดงอยู่ในตารางด้วยเช่นกัน

ประสิทธิผล (effectiveness,  $eff_c$ ) หาได้จากผลรวมของเอ็กเซอร์ยีชียาออกทั้งหมดหารด้วยผลรวมของเอ็กเซอร์ยีชียาเข้าทั้งหมดคูณด้วย 100

### 3.2.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอ็กเซอร์ยีชียของตู้อบ (drying unit)



รูปที่ 3.3 แสดงสมดุลมวลของส่วนตู้อบ

วัตถุดิบหลังจากออกจากส่วนไล่ความชื้นจะเข้าสู่เตาอบ โดยมีก๊าซเหลวเป็นตัวให้พลังงาน ความร้อนวัตถุดิบที่มีน้ำหนัก 188 kg/h หลังออกจากตู้อบจะมีน้ำหนัก 169.2 kg/h โดยมีน้ำส่วนที่ระเหยออกไป 18.8 kg/h หลังออกจากตู้อบวัตถุดิบจะมีอุณหภูมิ 33°C จากการคำนวณในส่วนของตู้อบพบว่าประสิทธิภาพของระบบนี้เท่ากับ 38.21 % แต่มีประสิทธิผลที่วิเคราะห์ได้จากเอ็กเซอร์ยีชียเพียงแค่ 8.95 % และในส่วนนี้มีการสูญเสียพลังงานไปกับผนังอุปกรณ์ โดยตู้อบมีขนาดตู้กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2.33 x 6.4 x 4.50 เมตร โดยวัสดุที่ใช้ในการทำตู้อบคือ สแตนเลสมีเยกั่วเป็นฉนวนกันความร้อน จึงต้องมีการคิดพลังงานที่เสียไปกับผนังอุปกรณ์ด้วย (แสดงไว้ในภาคผนวก ก) ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.3 แสดงการคำนวณเอ็กเซอร์ยีชียในตารางที่ 3.4

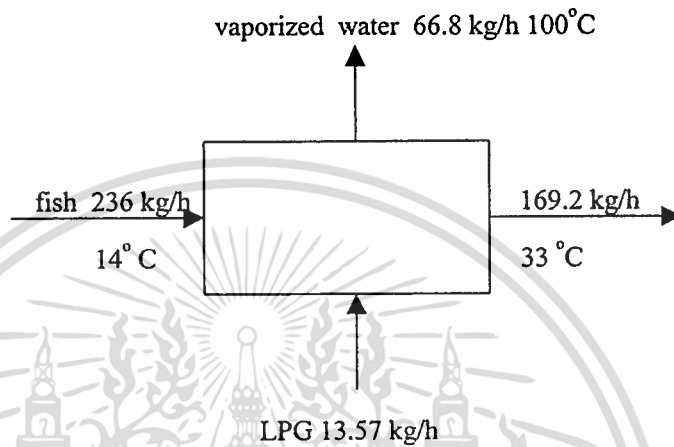
ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนต้อบในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. fish	$3.42 \times 10^4$	28.0	1. fish	$4.65 \times 10^3$	3.8
2. LPG	$8.85 \times 10^4$	72.0	2. vaporized water	$4.23 \times 10^4$	34.4
			3. loss	$7.60 \times 10^4$	61.8
			- wall	$5.43 \times 10^3$	7.1
			- other	$7.06 \times 10^4$	92.9
$\Sigma H$	$1.23 \times 10^5$	100.0	$\Sigma H$	$1.23 \times 10^5$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(4.70 \times 10^4)}{(1.23 \times 10^5)} \times 100$ $= 38.21 \%$					

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีส่วนต้อบในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. fish	$5.16 \times 10^3$	5.4	1. fish	121.51	0.1
2. LPG	$9.11 \times 10^4$	94.6	2. vaporized water	$8.50 \times 10^3$	8.8
			3. loss	$3.41 \times 10^3$	3.6
			- wall	309.16	9.1
			4. irreversibility	$8.43 \times 10^4$	87.5
$\Sigma Ex$	$9.63 \times 10^4$	100.0	$\Sigma Ex$	$9.63 \times 10^4$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(8.61 \times 10^3)}{(9.63 \times 10^4)} \times 100$ $= 8.95 \%$					

### 3.2.3 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของกระบวนการผลิตย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (subprocess 1 of fish snack process)



รูปที่ 3.4 แสดงสมดุลมวลโดยรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

วัตถุดิบที่เข้ามาทั้งหมดมีมวลรวม 236 kg/h อุณหภูมิ 14°C และออกไปมีมวล 169.2 kg/h ใช้ก๊าซเหลวปริมาณ 13.57 kg/h ส่วนแรกมีน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบรวม 66.8 kg/h กระบวนการผลิตในระบบย่อยที่ 1 คือช่วงตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจนถึงการอบ สามารถคิดประสิทธิภาพรวมของการผลิตได้คือ 25.41 % เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอนโทรปีแล้วประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 4.74 % โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5 แสดงการคำนวณเอนโทรปีในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมของกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

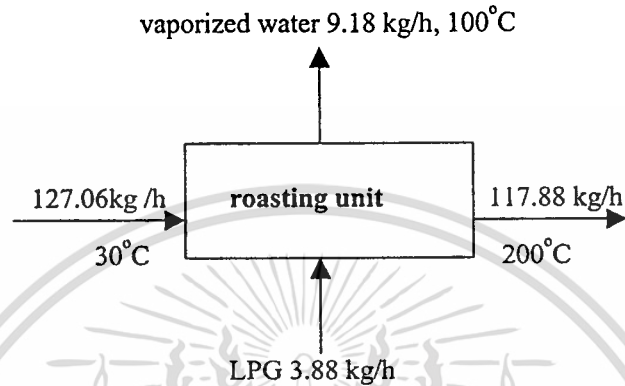
enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. fish	-8,912.07	-1.5	1. fish	$4.65 \times 10^3$	0.8
2. LPG	$6.19 \times 10^5$	101.5	2. vaporized water	$1.50 \times 10^5$	24.6
			3. loss	$4.55 \times 10^5$	74.6
$\Sigma H$	$6.10 \times 10^5$	100.0	$\Sigma H$	$6.10 \times 10^5$	100.0
			$\text{eff}_c = \frac{(1.55 \times 10^5)}{(6.10 \times 10^5)} \times 100$ $= 25.41 \%$		

ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีผลรวมของกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. fish	341.40	0.05	1. fish	121.51	0.0
2. LPG	$6.37 \times 10^5$	100.0	2. vaporized water	$3.01 \times 10^4$	4.7
			3. loss	$9.67 \times 10^4$	15.2
			4. irreversibility	$5.10 \times 10^5$	80.1
$\Sigma Ex$	$6.37 \times 10^5$	100.0	$\Sigma Ex$	$6.37 \times 10^5$	100.0
			$\text{eff}_c = \frac{(3.02 \times 10^4)}{(6.37 \times 10^5)} \times 100$ $= 4.74 \%$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของกระบวนการผลิตย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (subprocess 2 of fish snack process)



รูปที่ 3.5 แสดงสมดุลมวลของส่วนย่อย

กระบวนการผลิตย่อยที่ 2 นี้คือ ขั้นตอนการย่าง วัตถุดิบจะมีความชื้นน้อยกว่าส่วนอื่น ๆ ทั้งนี้เพราะวัตถุดิบจะผ่านขั้นตอนการไล่ความชื้นและการอบมาแล้ว วัตถุดิบที่เข้าส่วนการย่างมีน้ำหนัก 127.06 kg/h อุณหภูมิ 30°C ได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซเหลวเช่นเดียวกันในปริมาณ 3.88 kg/h ทำให้วัตถุดิบมีน้ำหนักเหลือ 117.88 kg/h อุณหภูมิ 200°C เมื่อทำสมดุลมวลพบว่ามีส่วนของน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบเพียง 9.18 kg/h และประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยเอนทัลปี พบว่ามีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 51.12 % และค่าประสิทธิผลที่คิดด้วยแนวคิดเอนโทรปี 16.70 % ซึ่งรายละเอียดมีดังแสดงในตารางที่ 3.7 แสดงการคำนวณเอนโทรปีในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนที่รับข้างในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

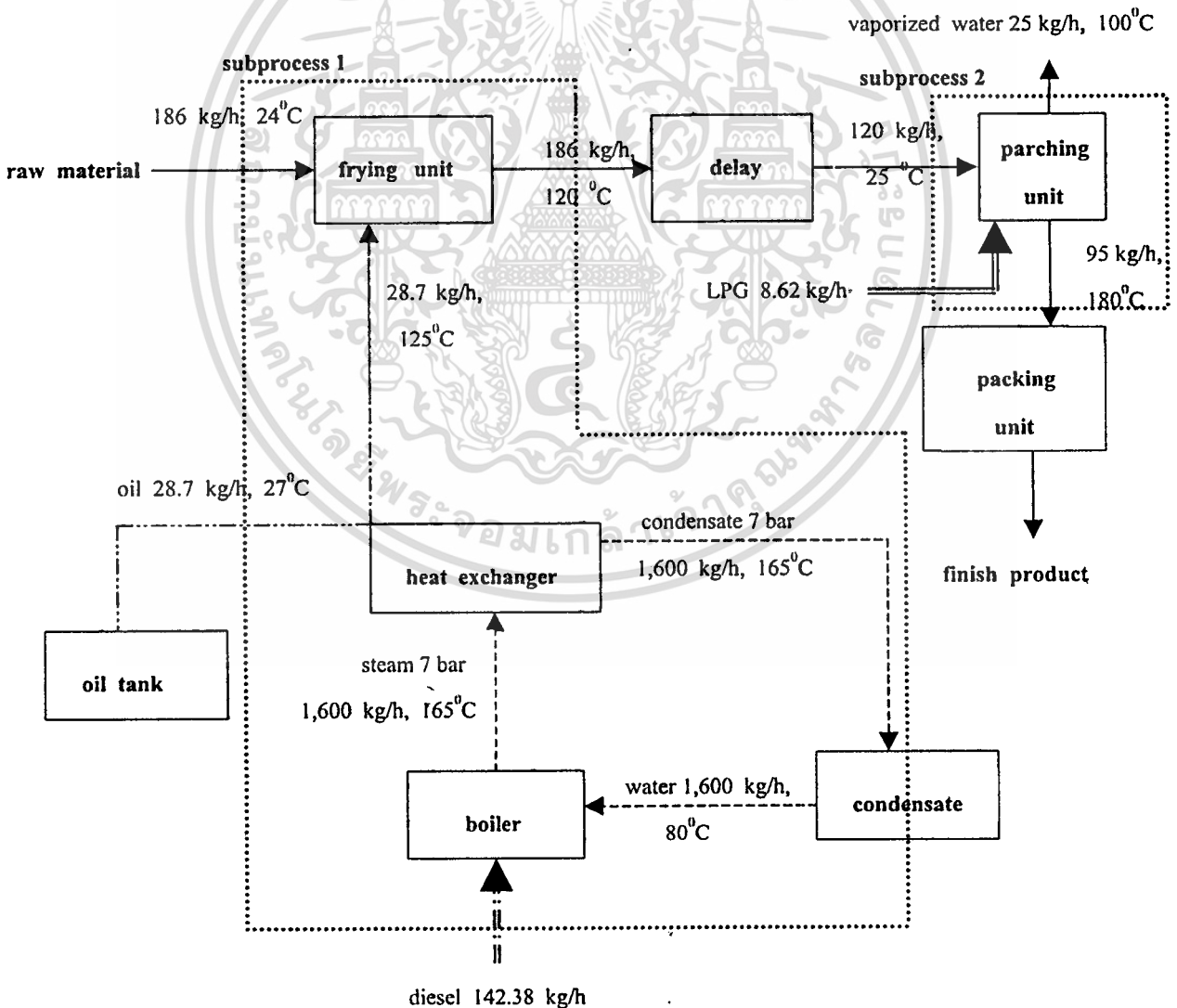
enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. fish	$2.18 \times 10^3$	1.2	1. fish	$7.08 \times 10^4$	39.6
2. LPG	$1.77 \times 10^5$	98.8	2. vaporized water	$2.07 \times 10^4$	11.6
			3. loss	$8.75 \times 10^4$	48.8
			- heat loss	$9.09 \times 10^3$	10.4
			-other	$7.84 \times 10^4$	89.6
$\Sigma H$	$1.79 \times 10^5$	100.0	$\Sigma H$	$1.79 \times 10^5$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(9.15 \times 10^4)}{(1.79 \times 10^5)} \times 100$ $= 51.12\%$					

ตารางที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีส่วนที่รับข้างในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. fish	35.96	0.0	1. fish	$2.62 \times 10^4$	14.4
2. LPG	$1.82 \times 10^5$	100.0	2. vaporized water	$4.16 \times 10^3$	2.3
			3. loss	$2.58 \times 10^4$	14.2
			- heat loss	$3.00 \times 10^3$	11.6
			4. irreversibility	$1.26 \times 10^5$	69.1
$\Sigma Ex$	$1.82 \times 10^5$	100.0	$\Sigma Ex$	$1.82 \times 10^5$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(3.04 \times 10^4)}{(1.82 \times 10^5)} \times 100$ $= 16.70\%$					

### 3.3 กระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ (Bean Snack Process)

ถั่วจะถูกนำไปทอดในน้ำมันร้อนที่มีอุณหภูมิ  $125^{\circ}\text{C}$  โดยทำให้ถั่วอุณหภูมิ  $24^{\circ}\text{C}$  น้ำหนัก  $186\text{ kg/h}$  มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น  $120^{\circ}\text{C}$  น้ำมันที่ใช้ทอดจะถูกทำให้ร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) โดยความร้อนที่แลกเปลี่ยนกันคือไอน้ำ ไอน้ำผลิตขึ้นจากหม้อไอน้ำ (boiler) ที่มีน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงาน หลังจากนั้นถั่วที่ถูกทอดจะนำไปพักไว้ให้เย็น และจะนำไปคั่วให้มีสีเหลืองนารับประทาน ก่อนนำไปคั่วถั่วมีน้ำหนัก  $120\text{ kg/h}$  อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  เมื่อคั่วเสร็จแล้วถั่วจะมีน้ำหนักเหลือเพียง  $95\text{ kg/h}$  อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  หลังจากคั่วเสร็จแล้วจะถึงขั้นตอนบรรจุเพื่อจำหน่าย



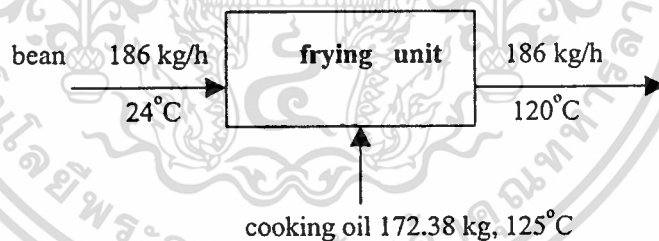
จากกระบวนการผลิตแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ส่วนย่อยคือ

1. ส่วนแรกได้แก่ส่วนเตรียมวัตถุดิบรวมทั้งส่วนเตาทอด (frying unit) ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger unit) และส่วนของหม้อน้ำ (boiler unit) เรียกส่วนนี้ว่ากระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ (subprocess 1 of bean snack process)
2. ส่วนที่สองนี้ได้แก่ส่วนของการคั่ว (parching unit) เรียกส่วนนี้ว่ากระบวนการย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ (subprocess 2 of bean snack process)

ทั้งนี้เพราะช่วงของการคั่วไม่เป็นการทำงานที่ต่อเนื่องกับขั้นตอนการทอด ดังนั้นในการคิดพลังงานรวมจึงต้องคิดแยกเป็น 2 ส่วนย่อย โดยมีค่าความจุความร้อนจำเพาะของถั่วลันเตาเท่ากับ  $1.85 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

### 3.4 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทัลปีของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

#### 3.4.1 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทัลปีของเตาทอด (frying unit)



รูปที่ 3.7 แสดงสมดุลมวลของส่วนเตาทอด

วัตถุดิบจะเข้าสู่เตาทอดปริมาณ  $186 \text{ kg/h}$  มีอุณหภูมิ  $24^\circ\text{C}$  เมื่อเข้าสู่เตาทอดที่มีน้ำมันทอดปริมาณ  $172.38 \text{ kg}$  อยู่เต็มถึงอุณหภูมิ  $125^\circ\text{C}$  ทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง  $120^\circ\text{C}$  จากการคำนวณพลังงาน โดยค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันทอดมีค่าเท่ากับ  $1.93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  และการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอนทัลปีนั้นไม่มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก โดยการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีมีค่า  $99.09 \%$  และค่าที่วิเคราะห์จากเอนทัลปีมีค่า  $94.50 \%$  ซึ่งมีรายละเอียดของพลังงานดังแสดงในตารางที่ 3.9 แสดงการคำนวณเอนทัลปีในตารางที่ 3.1

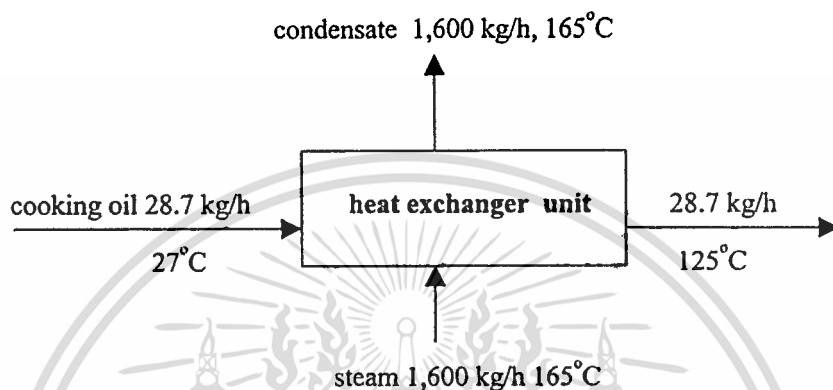
ตารางที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนเตาทอดในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. bean	-344.1	-1.0	1. bean	$3.27 \times 10^4$	99.1
2. cooking oil	$3.33 \times 10^4$	101.0	2. loss	$3.00 \times 10^2$	0.9
$\Sigma H$	$3.30 \times 10^4$	100.0	$\Sigma H$	$3.30 \times 10^4$	100.0
			$\text{eff}_c = \frac{(3.27 \times 10^4)}{(3.30 \times 10^4)} \times 100$ $= 99.09 \%$		

ตารางที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีส่วนเตาทอดในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. bean	1.16	0.0	1. bean	$7.90 \times 10^3$	94.5
2. cooking oil	$8.36 \times 10^3$	100.0	2. loss	88.62	1.1
			3. irreversibility	$3.71 \times 10^2$	4.4
$\Sigma Ex$	$8.36 \times 10^3$	100.0	$\Sigma Ex$	$8.36 \times 10^3$	100.0
			$\text{eff}_c = \frac{(7.90 \times 10^3)}{(8.36 \times 10^3)} \times 100$ $= 94.50 \%$		

### 3.4.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger unit)



รูปที่ 3.8 แสดงสมมูลมวลของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมันทอดกับไอน้ำ โดยน้ำมันทอดนำมาจากถังเก็บปริมาณ 28.7 kg/h ที่อุณหภูมิ 27°C และทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อใช้ทอดที่อุณหภูมิ 125°C โดยใช้ไอน้ำที่ 165°C ความดัน 7 บาร์ ปริมาณ 1,600 kg/h ในการให้ความร้อน และไอน้ำที่ถูกนำมาใช้ในการให้ความร้อนจะถูกนำกลับไปในส่วนคอนเดนเสต (condensate) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ในส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเอนทัลปีมีค่าเท่ากับ 25.57 % และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเอนโทรปีมีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่า 25.46 % ซึ่งค่าทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งได้แสดงรายละเอียดของพลังงานไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.11 แสดงการคำนวณเอนโทรปีในตารางที่ 3.12

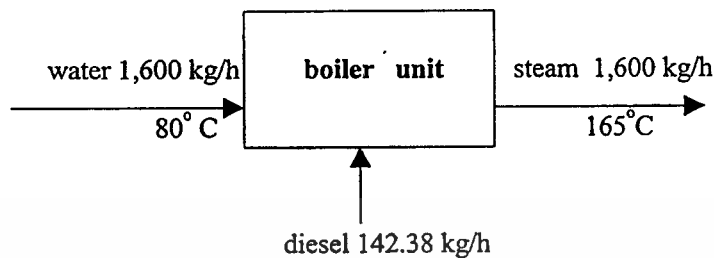
ตารางที่ 3.11 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตถ้วยบกรอบ

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. cooking oil	110.78	0.0	1. cooking oil	$5.54 \times 10^3$	0.1
2. steam	$4.42 \times 10^6$	100.0	2. condensate	$1.12 \times 10^6$	25.4
			3. loss	$3.29 \times 10^6$	74.5
$\Sigma H$	$4.42 \times 10^6$	100.0	$\Sigma H$	$4.42 \times 10^6$	100.0
$\text{eff}_e = \frac{(1.12 \times 10^6)}{(4.42 \times 10^6)} \times 100$ $= 25.57 \%$					

ตารางที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตถ้วยบกรอบ

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. cooking oil	0.74	0.0	1. cooking oil	$1.39 \times 10^3$	0.1
2. steam	$1.41 \times 10^6$	100.0	2. condensate	$3.58 \times 10^5$	25.4
			3. loss	$7.95 \times 10^5$	56.4
			4. irreversibility	$2.56 \times 10^5$	18.1
$\Sigma Ex$	$1.41 \times 10^6$	100.0	$\Sigma Ex$	$1.41 \times 10^6$	100.0
$\text{eff}_e = \frac{(3.58 \times 10^5)}{(1.41 \times 10^6)} \times 100$ $= 25.46 \%$					

### 3.4.3 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีของหม้อไอน้ำ (boiler unit)



รูปที่ 3.9 แสดงสมดุลมวลของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำซึ่งใช้น้ำมันดีเซลปริมาณ 142.38 kg/h เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เพื่อให้ น้ำร้อนกลายเป็นไอน้ำได้ความดัน 7 บาร์ โดยใช้น้ำปริมาณ 1,600 kg/h ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (treatment) ที่อุณหภูมิ 80°C ทำให้เป็นไอน้ำปริมาณ 1,600 kg/h อุณหภูมิ 165°C ความดัน 7 บาร์ ค่าความร้อนค่าน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 42,384 kJ/kg และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเมื่อคิดด้วยเอนทัลปีมีค่าเท่ากับ 75.94 % แต่มีคิดด้วยเอนทาลปีมีค่าเท่ากับ 25.56 % ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพแตกต่างกันมากและได้ทำการคำนวณอากาศทิ้งเนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (โดยแสดงไว้ในภาคผนวก ก) และรายละเอียดของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.13 แสดงการคำนวณเอนทาลปีในตารางที่ 3.14

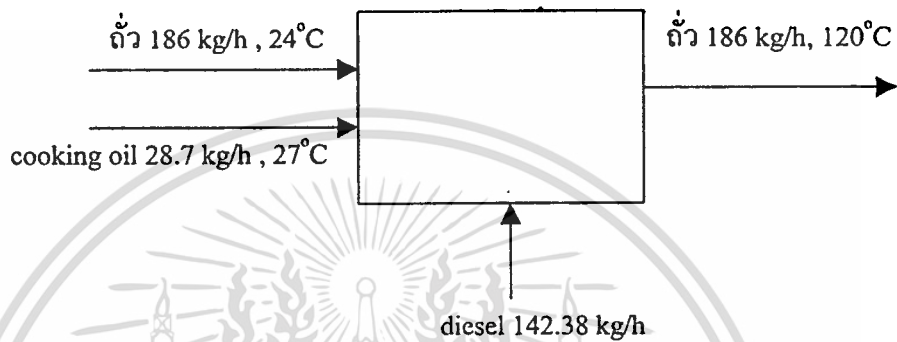
ตารางที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถ้วยครอบ

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. water	$3.69 \times 10^5$	5.8	1. steam	$4.42 \times 10^6$	69.1
2. fuel	$6.03 \times 10^6$	94.2	2. flue gas	$4.37 \times 10^5$	6.8
			3. loss	$1.54 \times 10^6$	24.1
$\Sigma H$	$6.40 \times 10^6$	100.0	$\Sigma H$	$6.40 \times 10^6$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(4.86 \times 10^6)}{(6.40 \times 10^6)} \times 100$ $= 75.94 \%$					

ตารางที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตถ้วยครอบ

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. water	$5.74 \times 10^4$	1.0	1. steam	$1.41 \times 10^6$	22.7
2. fuel	$6.16 \times 10^6$	99.0	2. flue gas	$1.78 \times 10^5$	2.8
			3. loss	$5.70 \times 10^5$	9.2
			4. irreversibility	$4.06 \times 10^6$	65.3
$\Sigma Ex$	$6.22 \times 10^6$	100.0	$\Sigma Ex$	$6.22 \times 10^6$	100.00
$\text{eff}_e = \frac{(1.59 \times 10^6)}{(6.22 \times 10^6)} \times 100$ $= 25.56 \%$					

### 3.4.4 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของกระบวนการผลิตย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ (subprocess 1 of bean snack process)



รูปที่ 3.10 แสดงสมดุลมวลโดยรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

วัตถุดิบที่เข้ามาทั้งหมดมีด้วยกันสองส่วนคือ ถั่ว 186 kg/h ที่อุณหภูมิ 24°C และออกไปที่อุณหภูมิ 120°C และมีน้ำมันทอด ส่วนที่ให้พลังงานคือน้ำมันดีเซล ในกระบวนการผลิตย่อยที่ 1 นี้ สามารถคิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลได้คือ 7.79 % และ 3.02 % ตามลำดับโดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.15 แสดงการคำนวณเอนโทรปีในตารางที่ 3.16

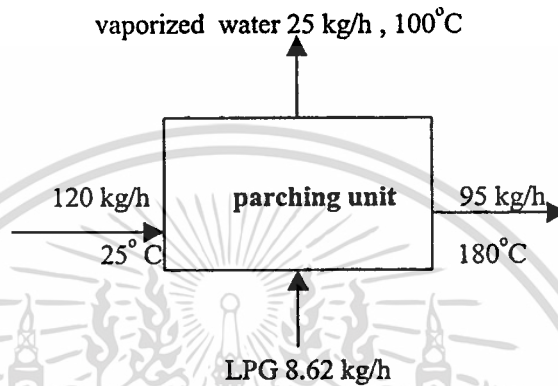
ตารางที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. bean	-344.1	-0.006	1. bean	$3.27 \times 10^4$	0.5
2. cooking oil	110.782	0.002	2. flue gas	$4.37 \times 10^5$	7.3
3. fuel	$6.03 \times 10^6$	100.0	3. loss	$5.56 \times 10^6$	92.2
$\Sigma H$	$6.03 \times 10^6$	100.0	$\Sigma H$	$6.03 \times 10^6$	100.0
			$eff_e = \frac{(4.70 \times 10^5)}{(6.03 \times 10^6)} \times 100$ $= 7.79 \%$		

ตารางที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

exergy input	kJ/hr	%	exergy output	kJ/hr	%
1. bean	1.16	0.0	1. bean	$7.90 \times 10^3$	0.1
2. cooking oil	0.74	0.0	2. flue gas	$1.78 \times 10^5$	2.9
3. fuel	$6.16 \times 10^6$	100.0	3. loss	$1.70 \times 10^6$	27.6
			4. irreversibility	$4.27 \times 10^6$	69.4
$\Sigma Ex$	$6.16 \times 10^6$	100.0	$\Sigma Ex$	$6.16 \times 10^6$	100.0
			$eff_e = \frac{(1.86 \times 10^5)}{(6.16 \times 10^6)} \times 100$ $= 3.02 \%$		

### 3.4.5 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของกระบวนการผลิตย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ (subprocess 2 of bean snack process)



รูปที่ 3.11 แสดงสมดุลมวลของส่วนการคั่ว

กระบวนการผลิตย่อยที่ 2 คือส่วนการคั่ว (parching unit) โดยมีการผลิตดังนี้คือ ถั่ว ปริมาณ 120 kg/h อุณหภูมิ 25°C ถูกนำมาคั่วให้แห้งจนมีอุณหภูมิ 180°C ปริมาณเหลือ 95 kg/h โดยน้ำหนักส่วนที่หายก็คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกไป 25 kg/h โดยในส่วนนี้จะใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซเหลวปริมาณ 8.62 kg/h เพื่อใช้ในการคั่ว ประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเอนทัลปีมีค่าเท่ากับ 21.25 % แต่ประสิทธิภาพที่วิเคราะห์ด้วยเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 5.09 % รายละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.17 และ 3.18

ตารางที่ 3.17 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนการคั่วในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. bean	0	0.00	1. bean	$2.72 \times 10^4$	6.9
2. LPG	$3.93 \times 10^5$	100.0	2. vaporized water	$5.63 \times 10^4$	14.3
			3. loss	$3.10 \times 10^5$	78.8
			- heat loss	$1.75 \times 10^4$	5.6
			- other	$2.93 \times 10^5$	94.4
$\Sigma H$	$3.93 \times 10^5$	100.0	$\Sigma H$	$3.93 \times 10^5$	100.0
			$\text{eff}_c = \frac{(8.35 \times 10^4)}{(3.93 \times 10^5)} \times 100$ $= 21.25 \%$		

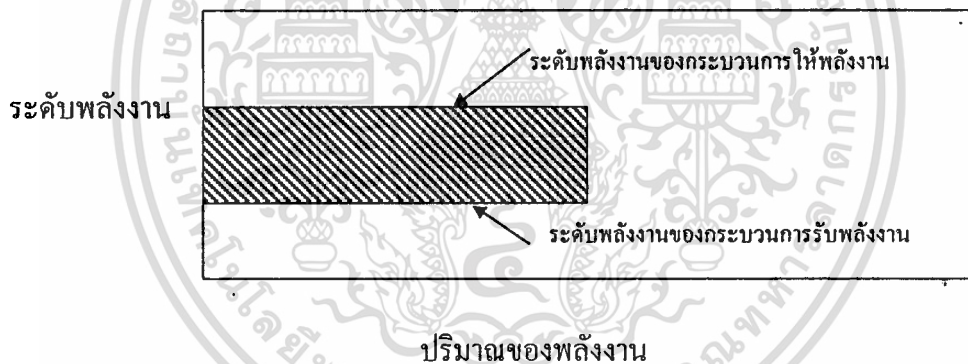
ตารางที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีส่วนการคั่วในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. bean	0	0.0	1. bean	$9.30 \times 10^3$	2.3
2. LPG	$4.05 \times 10^5$	100.0	2. vaporized water	$1.13 \times 10^4$	2.8
			3. loss	$2.57 \times 10^4$	6.3
			- heat loss	$1.45 \times 10^3$	5.6
			4. irreversibility	$3.59 \times 10^5$	88.6
$\Sigma Ex$	$4.05 \times 10^5$	100.0	$\Sigma Ex$	$4.05 \times 10^5$	100.0
			$\text{eff}_c = \frac{(2.06 \times 10^4)}{(4.05 \times 10^5)} \times 100$ $= 5.09 \%$		

### 3.5 การประยุกต์ EUD สำหรับการวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการ

ประโยชน์ที่สำคัญของการประยุกต์ใช้ EUD (Energy Utilization Diagram) สำหรับการวิเคราะห์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมคือ EUD สามารถแสดงถึงการสูญเสียเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการต่างๆ ได้ในรูปของพื้นที่บนกราฟ ปริมาณของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ และคุณภาพของพลังงาน โดยทั่วไปแล้วกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างกระบวนการสองกระบวนการเป็นอย่างน้อย

ดังนั้นในการวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบใดๆก็ตามสิ่งที่ควรปฏิบัติคือ ต้องคำนวณหาระดับพลังงานของแต่ละกระบวนการต่างๆ จากสมการที่ (26) ไม่ว่าจะจะเป็นกระบวนการผู้ให้พลังงานหรือผู้รับพลังงานของระบบรวมทั้งหมดที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์พลังงานเพื่อที่จะสร้างกราฟ EUD จากนั้นให้มองหาแนวทางในการที่จะปรับปรุงการใช้พลังงานของระบบนั้น โดยเน้นความสนใจไปที่กระบวนการที่มีการสูญเสียเอ็กเซอร์ยีมากที่สุดว่าจะมีแนวทางใดบ้างที่จะสามารถปรับปรุงการใช้พลังงานให้ดีขึ้นได้ ถ้าหากว่าเป็นไปได้ยากในการปรับปรุง ก็ให้พิจารณาส่วนที่มีการสูญเสียเอ็กเซอร์ยีที่มีมารองลงมาตามลำดับได้



รูปที่ 3.12 รูปรกราฟ EUD สำหรับการวิเคราะห์พลังงาน

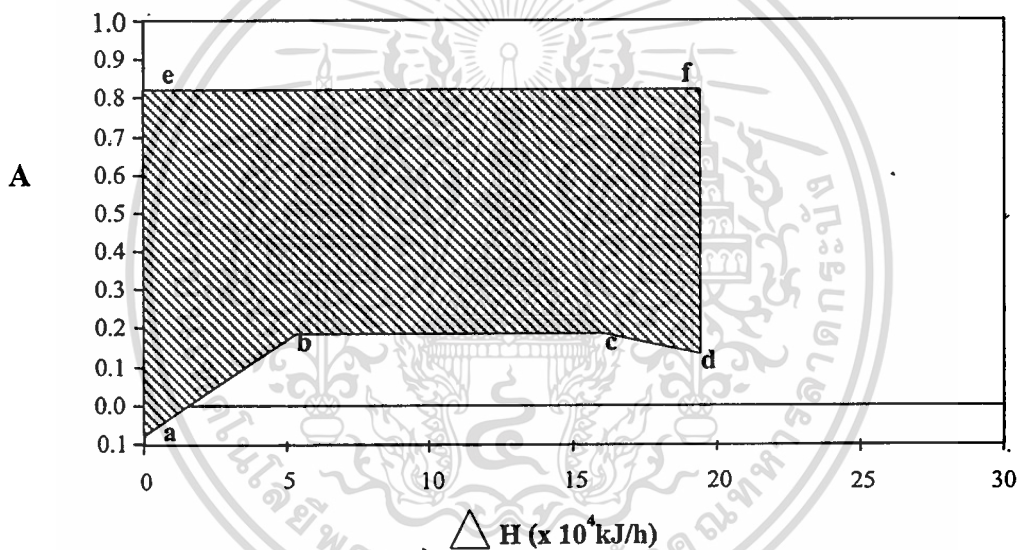
จากรูปกราฟ EUD นี้มีคุณลักษณะคือ

1. แกนในแนวนอนของรูปกราฟจะแสดงค่าของปริมาณของการเปลี่ยนแปลงพลังงานของกระบวนการให้พลังงาน ( $\Delta H_{out}$ ) หรือกระบวนการรับพลังงาน ( $\Delta H_{in}$ )
2. แกนในแนวตั้งของรูปกราฟจะแสดงค่าของระดับพลังงาน ( $A_{out}$  และ  $A_{in}$ ) หรือคุณภาพของพลังงาน

3. พื้นที่ภายในของขอบเขตที่เกิดจาก  $(A_{out} - A_{in})$  และ  $\Delta H_{out}$  ที่แสดงโดยส่วนที่แสดงในรูปกราฟจะแสดงการสูญเสียเอ็กเซอร์ยี (EXL) ของการแลกเปลี่ยนพลังงานของกระบวนการต่างๆ

### 3.5.1 EUD กระบวนการผลิตของโรงงานอาหารตัวอย่างกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

หลังจากทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีแล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณ (ดูตัวอย่างการคำนวณได้ที่ภาคผนวก ค) แล้วเขียนกราฟ EUD โดยแสดงแยกเป็นหน่วยการผลิตต่างๆ ดังต่อไปนี้

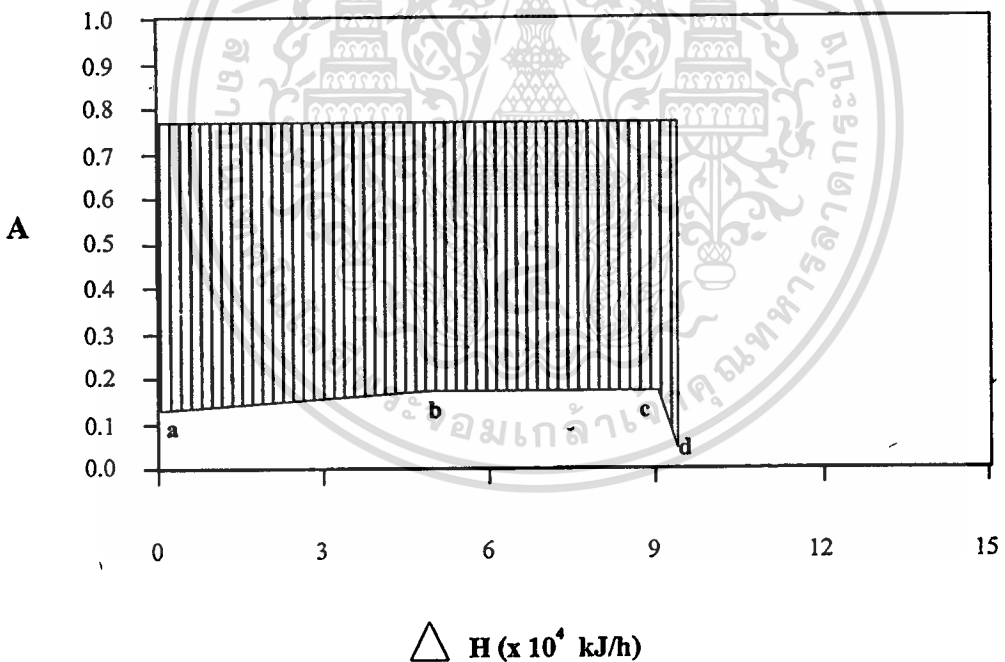


รูปที่ 3.13 กราฟ EUD ของส่วนไล่ความชื้น

รูปที่ 3.13 นี้แสดงส่วนไล่ความชื้นโดยแหล่งของผู้ให้พลังงานความร้อน (energy donor) ของหน่วยนี้ คือก๊าซเหลว (LPG) ซึ่งมีค่าการเผาไหม้อยู่ที่  $1,100^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นระดับผู้ให้พลังงานมีค่าอยู่ที่ 0.78 คือเส้น ef และในกระบวนการผลิตนี้ วัตถุดิบคือเส้นปลาซึ่งถือว่าเป็นผู้รับพลังงาน (energy acceptor) จะถูกขึ้นรูปและไล่ความชื้นจากอุณหภูมิ  $14^{\circ}\text{C}$  เป็น  $78^{\circ}\text{C}$  น้ำหนัก 236 kg/h เหลือ 188 kg/h ดังนั้นจึงมีส่วนของไอน้ำระเหย (vaporized water) 48 kg/h ที่  $100^{\circ}\text{C}$  ในส่วนแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

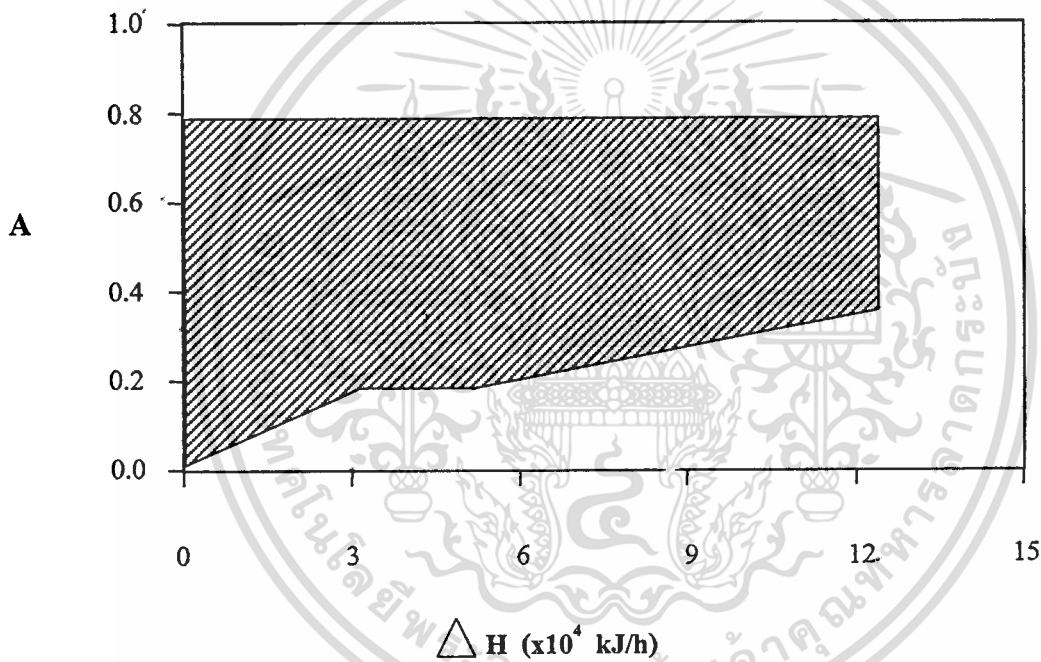
ภายในอาหารมีอุณหภูมิจาก  $14^{\circ}\text{C}$  สูงขึ้น  $100^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีระดับพลังงานจาก  $-0.04$  เปลี่ยนไปเป็น  $0.2$  มีค่าพลังงานเท่ากับ  $6.08 \times 10^4$  kJ/h และเรียกช่วง ab นี้ว่าความร้อนสัมผัส (sensible heat). หลังจากนั้น น้ำ  $48$  kg/h เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นไอน้ำที่  $100^{\circ}\text{C}$  ระดับพลังงาน  $0.2$  มีค่าพลังงานเท่ากับ  $10.8 \times 10^4$  kJ/h เรียกส่วนนี้ว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat) คือเส้น bc หลังจากนั้นวัตถุดิบเหลืออุณหภูมิ  $78^{\circ}\text{C}$  ก่อนเข้าตู้อบ (dryer) จึงทำให้สายของเส้นปลา มีระดับลดลงมาอยู่ที่  $0.15$  (เส้น cd) มีค่าพลังงาน  $3.42 \times 10^4$  kJ/h โดยในส่วนของความชื้น นี้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนเท่ากับ  $20.3 \times 10^4$  kJ/h พื้นที่แฉงในรูปกราฟจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียเอ็กเซอร์ยี พื้นที่แฉงในกราฟมากแสดงว่ามีการสูญเสียพลังงานมาก ถ้าพื้นที่ในกราฟน้อยมีการสูญเสียเอ็กเซอร์ยีน้อย ดังนั้นในแนวทางการปรับปรุงจึงต้องหาวิธีการที่จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด เมื่อนำมาเขียนกราฟพื้นที่ในส่วนแฉงจะลดลง



รูปที่ 3.14 กราฟ EUD ของส่วนตู้อบ

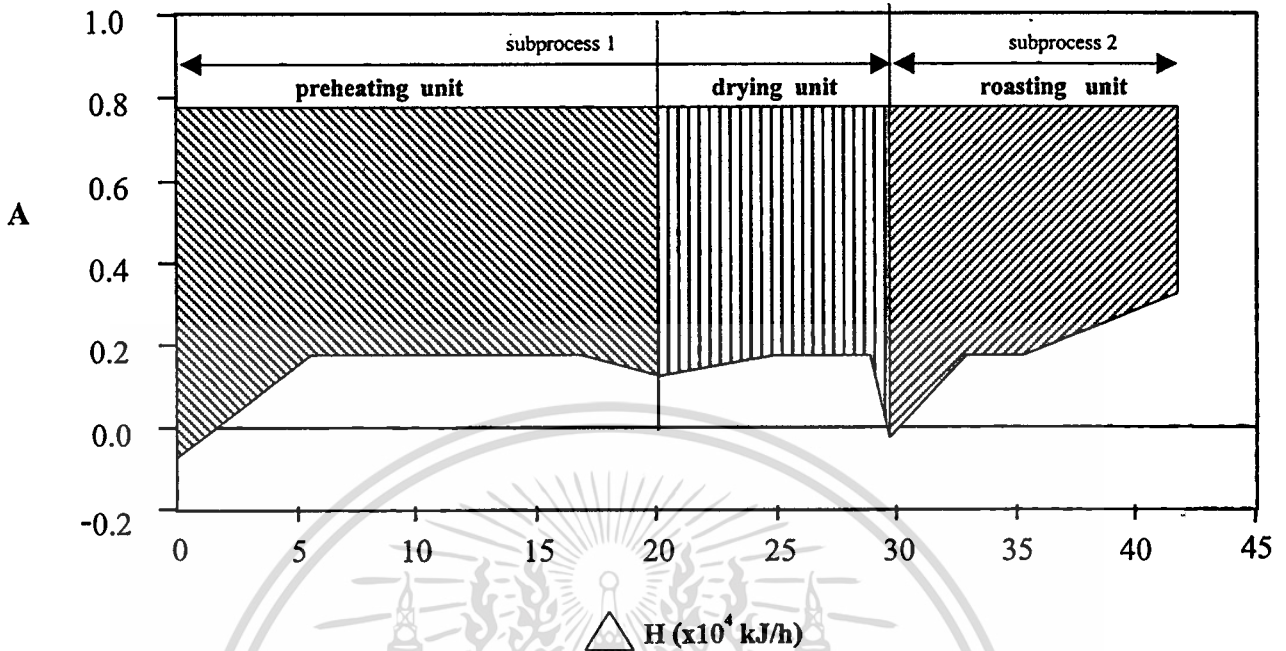
เส้นปลาที่ออกจากส่วนของความชื้น จะถูกกล้ำเลียงโดยสายพานเข้าตู้อบ (dryer) เพื่อทำให้เส้นปลาสุกและแห้งที่อุณหภูมิ  $78^{\circ}\text{C}$  โดยมีก๊าซเหลว (LPG) เป็นแหล่งให้พลังงาน โดยมีการเผาไหม้อยู่ที่ระดับ  $0.78$  ในส่วนของเส้นปลาเมื่อโดนความร้อนจนถึง  $80^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

ความร้อนของการกลายเป็นไอ  $80^{\circ}\text{C}$  มีค่าพลังงาน  $4.84 \times 10^4 \text{ kJ/h}$  (แสดงไว้ในเส้น bc) หลังจากนั้น เส้นปลาจะถูกไล่เลียงตามสายพานภายในตู้อบจนอุณหภูมิลดลงเหลือ  $33^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้ระดับพลังงานลดลงอยู่ที่ 0.03 ส่วนตู้อบที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าส่วนอื่นเนื่องจากตู้อบนี้มีสูญเสียพลังงานความร้อนกับอากาศมีน้อย และเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนไปกับผนังอุปกรณ์เป็นบางส่วน



รูปที่ 3.15 กราฟ EUD ของส่วนการย่าง

ส่วนการย่างเป็นขั้นตอนในการย่างเส้นปลาให้สุก พอง และเกิดสีน้ำตาล โดยได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซเหลว (LPG) เช่นเดียวกัน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเส้นปลาจาก  $30^{\circ}\text{C}$  เป็น  $200^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้เส้นกราฟสูงขึ้นจนถึงระดับ 0.37 แต่ขั้นตอนนี้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นน้อยอยู่แล้ว จึงทำให้การทำแห้งใช้เวลาไม่มากนัก การสูญเสียพลังงานความร้อนกับไอน้ำระเหยจึงมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับกรณีของ ส่วนไล่ความชื้นเพราะเป็นระบบเปิดเหมือนกัน มีค่าพลังงาน  $1.24 \times 10^4 \text{ kJ/h}$

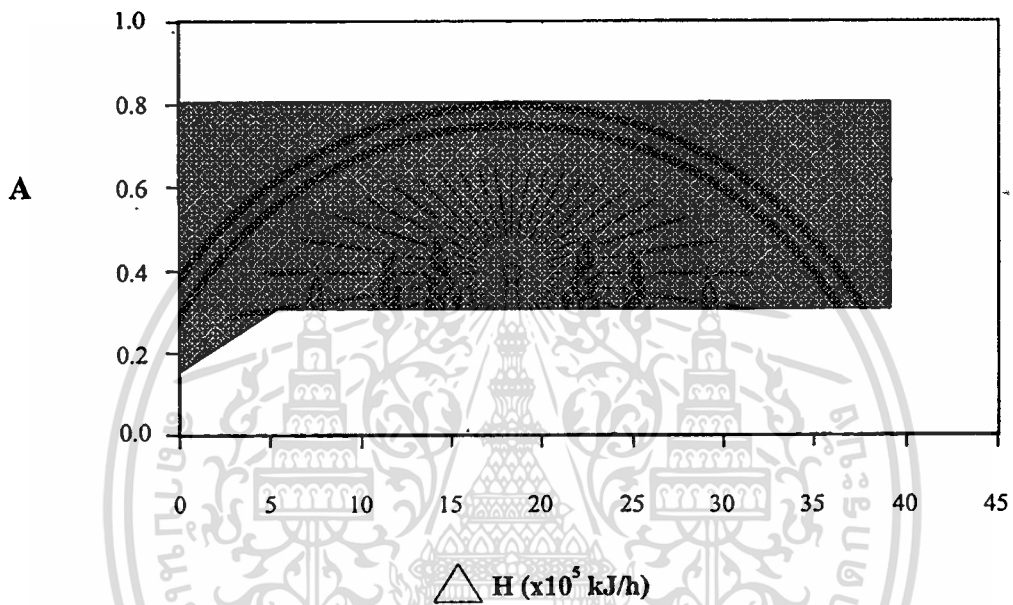


รูปที่ 3.16 กราฟ EUD โดยรวมของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

รูปที่ 3.16 นี้แสดงถึงการสูญเสียเอ็กเซอร์จีของหน่วยการผลิตต่างๆของกระบวนการอาหารว่างจากปลา โดยมีแหล่งของพลังงานความร้อนคือการเผาไหม้ของก๊าซเหลว (LPG) เป็นผู้ให้พลังงานตลอดกระบวนการ วัตถุประสงค์จะผ่านการไล่ความชื้น (preheating unit) เข้าสู่ตู้อบ (drying unit) และส่วนเตาย่าง (roasting unit) ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าในส่วนไล่ความชื้น มีการใช้พลังงานมากที่สุดถึง  $20.3 \times 10^4 \text{ kJ/h}$  รองลงมาคือส่วนการย่าง  $12.4 \times 10^4 \text{ kJ/h}$  และส่วนของตู้อบคือ  $9.54 \times 10^4 \text{ kJ/h}$  สาเหตุที่มีการใช้พลังงานของส่วนไล่ความชื้น และส่วนย่างสูงกว่าของส่วนตู้อบ เพราะในสองส่วนแรกมีการสูญเสียพลังงานไปกับอากาศร้อนทั้งแต่ในส่วนของตู้อบ ตู้อบที่ใช้เป็นตู้ที่มีการปิดด้านข้างและด้านบน คือมีการหมุนเวียนพลังงานความร้อนภายใน ดังนั้นจึงมีการแลกเปลี่ยนพลังงานของผู้ให้พลังงานกับผู้รับพลังงานได้ดี และมีการสูญเสียพลังงานกับสิ่งแวดล้อมภายนอกน้อย จึงใช้พลังงานมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และจากเส้นกราฟจะเห็นว่าช่วงที่มีการสูญเสียพลังงานไปมากคือ ช่วงที่วัตถุดิบออกมาจากตู้อบและรอการผลิตในส่วนการย่างต่อนั้น วัตถุดิบที่ออกมาอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ( $33^\circ\text{C}$ ) ก่อนนำไปย่างให้มีอุณหภูมิสูง ( $200^\circ\text{C}$ ) จึงทำให้ช่วงนี้เกิดการสูญเสียเอ็กเซอร์จีมาก ถ้าหากมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เส้นปลาที่ออกจากตู้อบมีอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ ก็อาจทำให้ระดับพลังงานของส่วนตู้อบและส่วนการย่างสูงขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียเอ็กเซอร์จิน้อยได้เช่นกัน

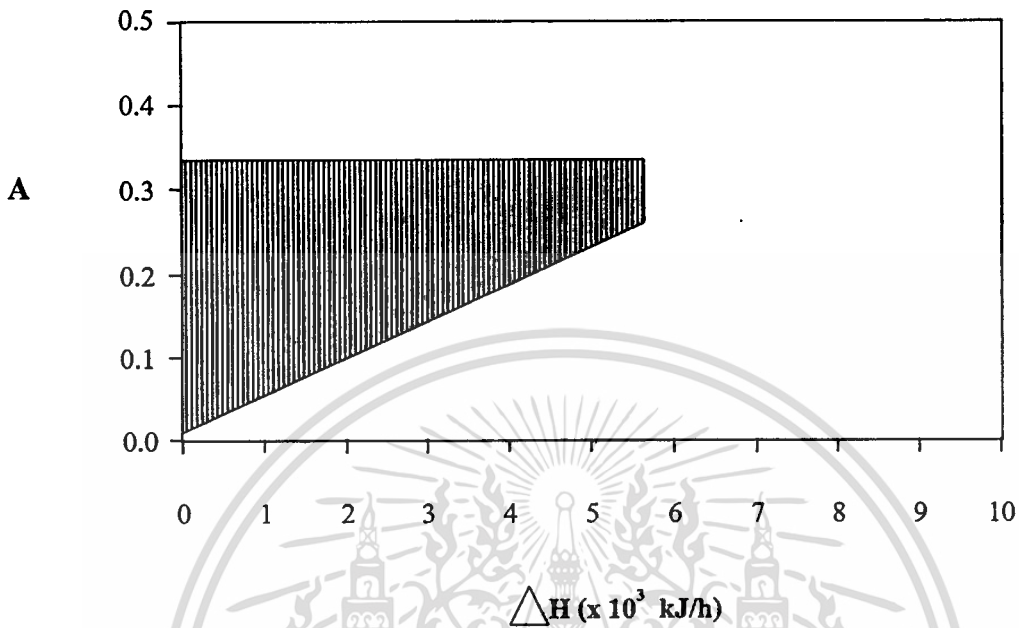
### 3.5.2 EUD กระบวนการผลิตของโรงงานอาหารตัวอย่างกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

ในส่วนของการผลิตถั่วอบกรอบนี้เมื่อนำมาคำนวณหาค่าพลังงานและระดับพลังงาน เพื่อนำมาเขียนกราฟ EUD แล้วนำมาแสดงโดยแยกเป็นหน่วยการผลิตดังนี้



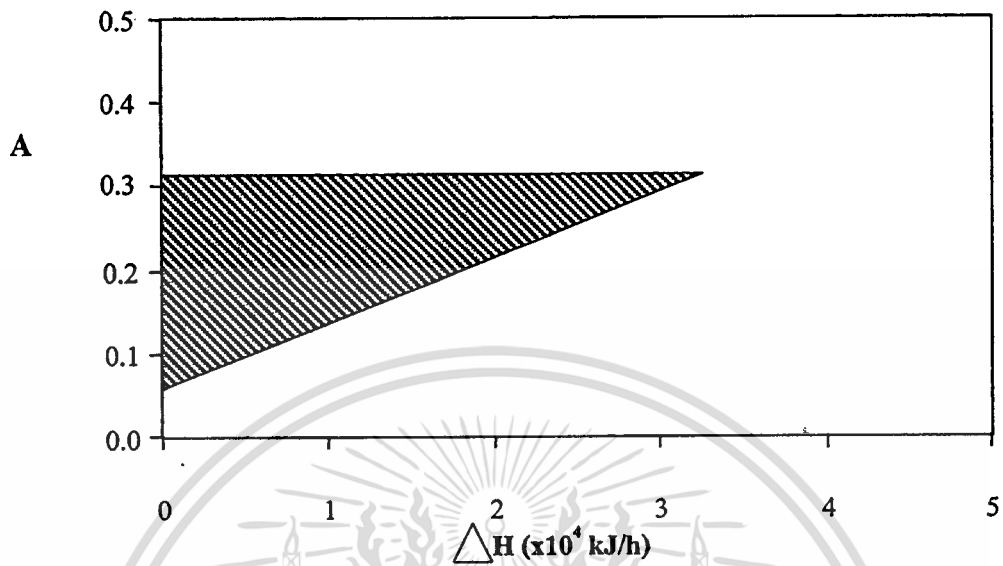
รูปที่ 3.17 กราฟ EUD ของส่วนหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำ (boiler) เป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไอน้ำ โดยหม้อไอน้ำของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบนี้ ได้รับความร้อนจากการสันดาปของน้ำมันดีเซล โดยมีค่าพลังงานการสันดาปอยู่ที่ระดับ 0.78 (ค่าการเผาไหม้ที่  $1,100^{\circ}\text{C}$ ) และผู้รับความร้อนคือน้ำ ในส่วนแรกน้ำที่เข้ามาจากส่วนคอนเดนเสด (condensate) จะได้รับการปรับสภาพของน้ำและอุณหภูมิของน้ำให้เหมาะสมก่อนเข้าหม้อไอน้ำ คือมีอุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  ทำให้ระดับพลังงานเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 0.16 หลังจากนั้น น้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ  $165^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 7 bar จึงมีระดับพลังงานอยู่ที่ 0.32 โดยในส่วนที่สองคือส่วนของความร้อนแฝงของไอน้ำมีค่ามากถึง  $33.1 \times 10^5 \text{ kJ/h}$



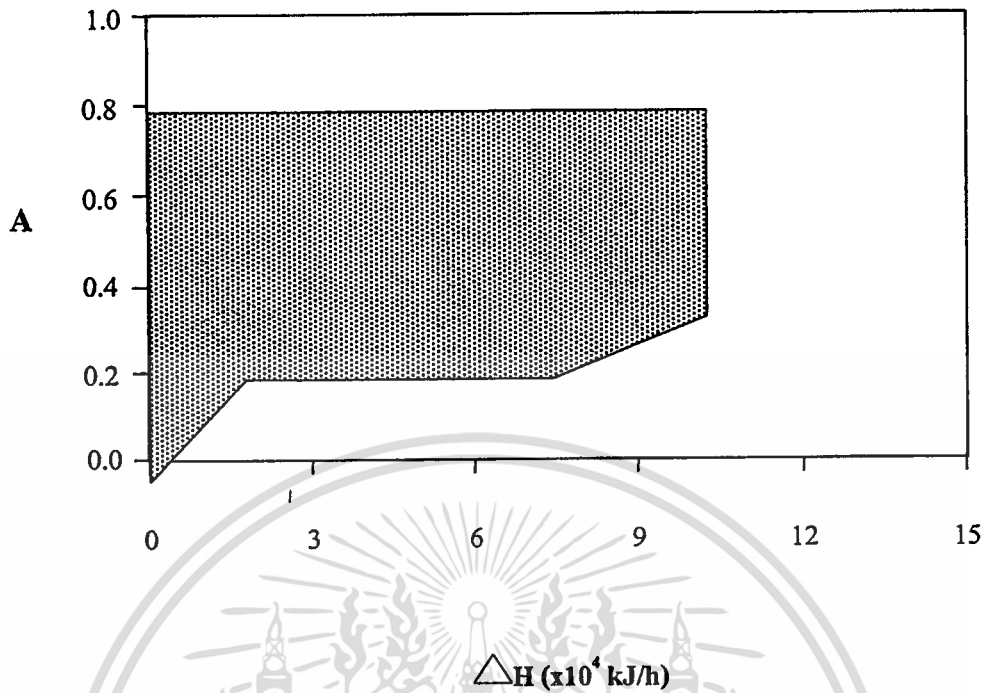
รูปที่ 3.18 กราฟ EUD ของส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นส่วนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมันทอด (cooking oil) กับไอน้ำ (steam) เพื่อทำให้น้ำมันทอดมีอุณหภูมิจาก  $27^{\circ}\text{C}$  สูงถึง  $125^{\circ}\text{C}$  เพื่อใช้ในการทอดถั่ว ดังนั้นผู้ให้พลังงานความร้อนในส่วนนี้คือไอน้ำ มีระดับพลังงานอยู่ที่ 0.32 ทำให้น้ำมันทอดถั่วมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก  $27^{\circ}\text{C}$  เป็น  $125^{\circ}\text{C}$  คือจากระดับพลังงาน 0.01 เป็น 0.25 โดยมีปริมาณพลังงานทั้งหมด  $5.54 \times 10^3 \text{ kJ/h}$  และเป็นส่วนที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดของกระบวนการผลิตนี้



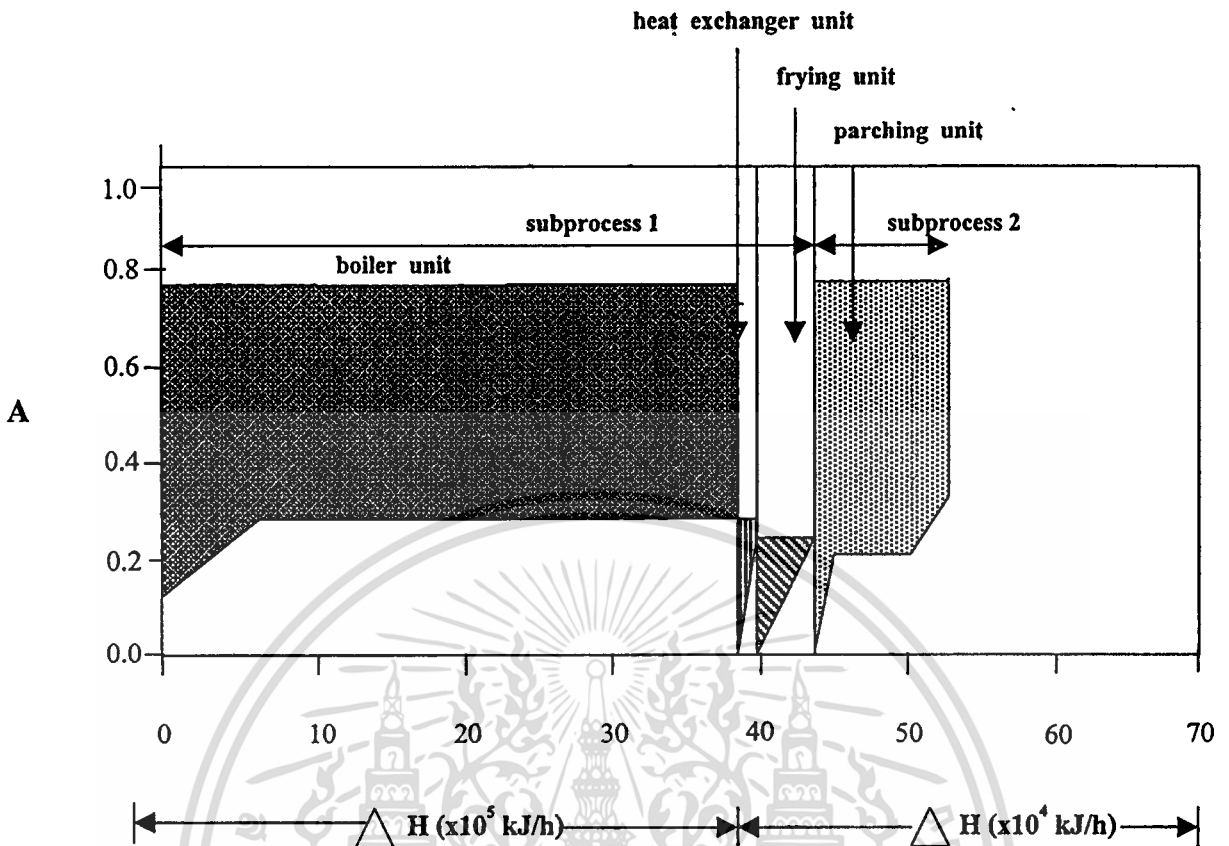
รูปที่ 3.19 กราฟ EUD ของส่วนเตาทอด

ส่วนเตาทอดเป็นส่วนที่ใช้ในการทอดถั่วโดยมีน้ำมันทอดที่ถูกทำให้ร้อนจากส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นผู้ให้พลังงานที่อุณหภูมิ  $125^{\circ}\text{C}$  มีระดับพลังงานอยู่ที่ 0.25 ทำให้ถั่วมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก  $24^{\circ}\text{C}$  เป็น  $120^{\circ}\text{C}$  มีปริมาณพลังงานเท่ากับ  $3.27 \times 10^4 \text{ kJ/h}$  และในส่วนนี้เป็นระบบที่ไม่มีการถ่ายเทพลังงานกับสิ่งแวดล้อมมากนัก จึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปกับสิ่งแวดล้อมค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับส่วนการผลิตอื่นๆเช่น ส่วนของการคั่ว



รูปที่ 3.20 กราฟ EUD ของส่วนการคั่ว

ถั่วหลังจากทอดแล้วจะถูกนำไปพักไว้เพื่อให้เย็นก่อนนำไปคั่วอีกครั้งเพื่อความกรอบแห้ง และทำให้มีสีสวย ในส่วนของการคั่วนี้จะใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซเหลว (LPG) โดยตรง และเป็นระบบที่มีการสูญเสียพลังงานไปกับอากาศส่วนหนึ่ง ดังจะเห็นจากกราฟว่ามีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าในหน่วยกระบวนการผลิตอื่นๆ ในขั้นตอนการผลิตเดียวกัน และมีการสูญเสียน้ำโดยระเหยไปกับอากาศถึง  $5.63 \times 10^4$  kJ/h ซึ่งทำให้มีการใช้พลังงานในส่วนนี้มากถึง  $1.002 \times 10^5$  kJ/h

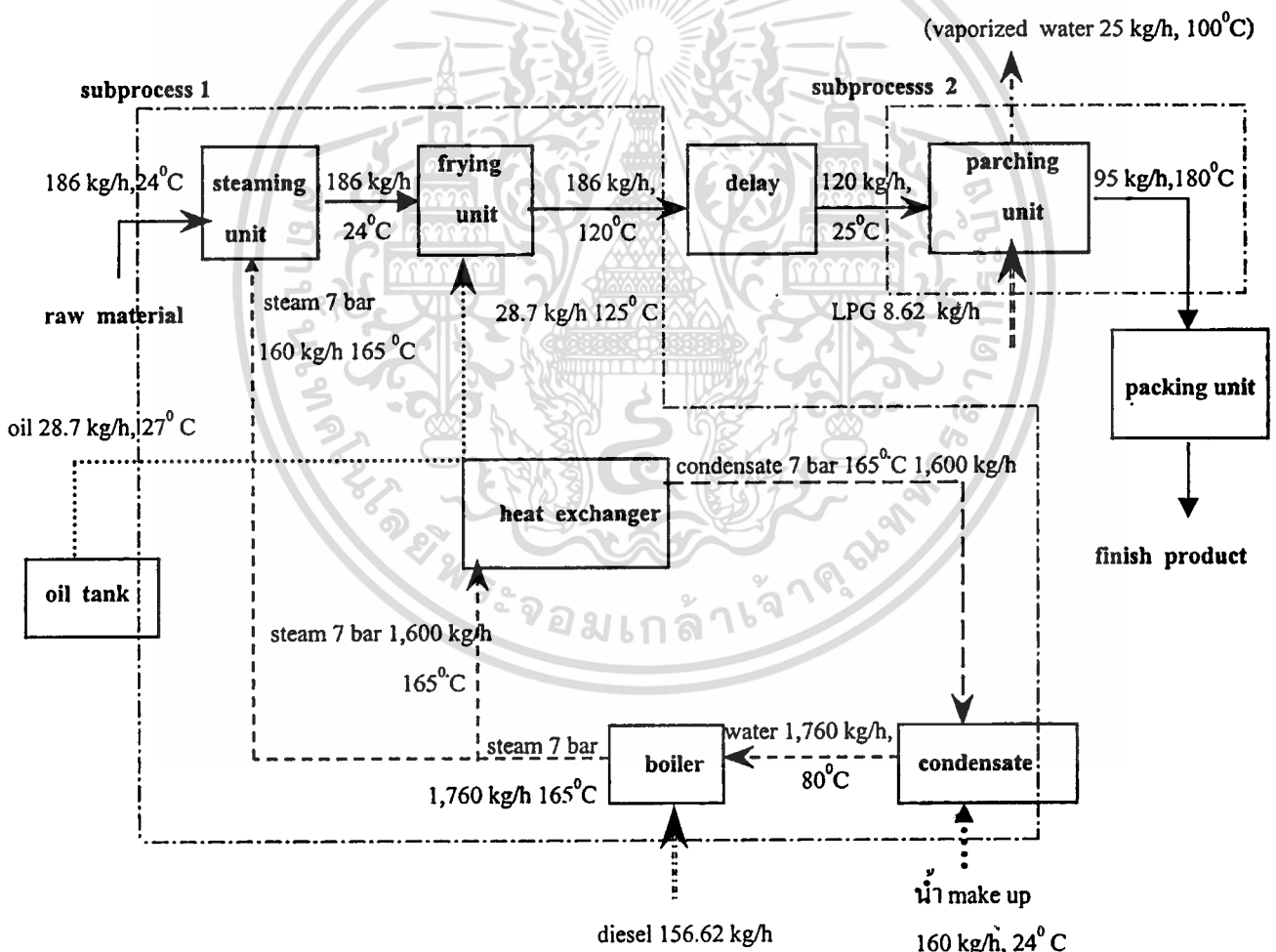


รูปที่ 3.21 กราฟ EUD โดยรวมของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

รูปที่ 3.21 นี้เป็นภาพรวมของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ โดยกระบวนการนี้ส่วนที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดคือส่วนของหม้อไอน้ำ (boiler) เพราะเป็นส่วนที่ให้พลังงานที่มีคุณภาพสูงและรองลงมาคือส่วนการคั่วเพราะในส่วนนี้มีการสูญเสียพลังงานไปถึง  $1.002 \times 10^5$  kJ/h แต่ในส่วนเตาทอด มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างน้ำมันทอดและถั่วที่มีอุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนัก จึงมีช่วงความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟของผู้ให้และผู้รับพลังงานน้อยเมื่อเทียบกับในส่วนต่างๆ ซึ่งแสดงว่ามีการสูญเสียพลังงานน้อย แต่ก็ยังมากกว่าในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะในส่วนนี้เป็นระบบปิดดังนั้นการสูญเสียพลังงานไปกับสิ่งแวดล้อมจึงมีน้อย และอุณหภูมิของผู้ให้และผู้รับมีความแตกต่างกันไม่มากนัก จากเส้นกราฟจะสังเกตว่าการพักถั่วก่อนนำไปคั่วอีกครั้งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนในถั่ว ถ้าหากกระบวนการผลิตนี้สามารถดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง (continuous process) อาจทำให้เกิดการสูญเสียเอนทัลปีน้อยลง เพราะความร้อนที่สะสมอยู่ในถั่วจะถูกลำนำไปใช้ประโยชน์เส้นกราฟที่ได้ก็จะต่อเนื่องกัน

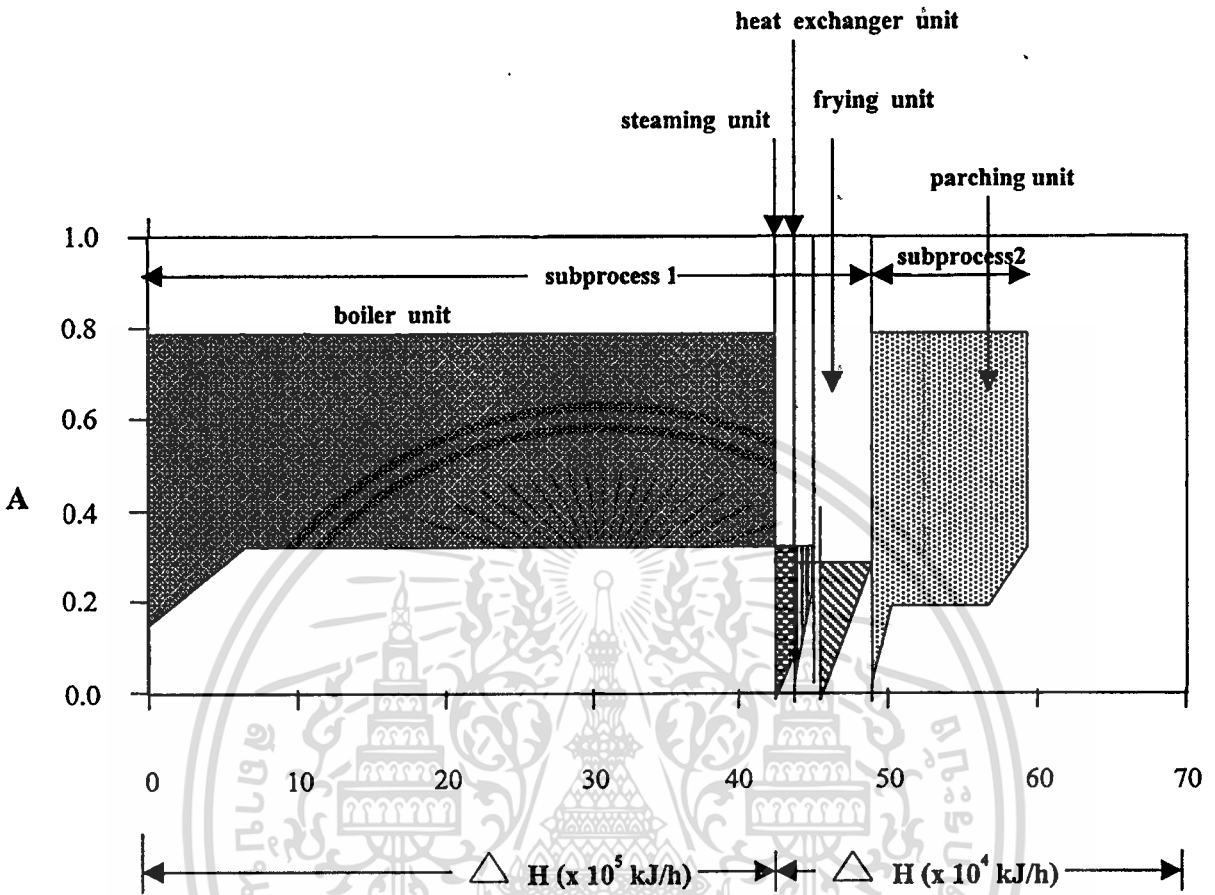
### 3.6 กระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง (modified bean snack process)

ในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบนี้ ได้วิเคราะห์ถึงการปรับปรุงวิธีการโดยการนำเอาตู้หนึ่ง (steamer) มาใช้เสริมเข้าในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ โดยตู้หนึ่งจะใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนกับถั่วก่อนที่จะนำไปทอด ไอน้ำผลิตมาจากหม้อไอน้ำส่วนน้ำทิ้ง (condensate) ก็ไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ โดยถั่วอุณหภูมิ  $24^{\circ}\text{C}$  จะถูกนำไปนิ่งตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นจะพักถั่วให้แห้งก่อนจนอุณหภูมิลดลงเหลือ  $24^{\circ}\text{C}$  จึงนำไปทอดตามกระบวนการผลิตเดิม พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการโดยรวมมีค่าต่ำกว่าและไม่แตกต่างจากวิธีเดิมมากนักดังแสดงไว้ในกราฟ EUD แต่จะมีแง่ดีในส่วนของการผลิตภัณฑ์ (โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.22 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 กราฟ EUD โดยรวมกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง

รูปที่ 3.23 นี้แสดงถึงการสูญเสียเอนทัลปีของกระบวนการทั้งหมดของกระบวนการถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง โดยมีส่วนของหม้อหนึ่งด้วย การที่มีการนำเอาส่วนคู่นี้มาใช้ในการผลิตโดยได้รับพลังงานความร้อนมาจากไอน้ำนั้นมีการสูญเสียเอนทัลปีไม่มากนักเมื่อเทียบกับหน่วยการผลิตอื่น ส่วนหนึ่งมีการสูญเสียพลังงานความร้อนคือการไม่ได้ให้นำน้ำทิ้งกลับมาใช้ในส่วนของหม้อไอน้ำ (boiler) ใหม่ ซึ่งเป็นการทิ้งพลังงานโดยเปล่าประโยชน์แต่ในส่วนอื่นของกระบวนการก็มีประสิทธิภาพ ประสิทธิผลและการใช้พลังงานเหมือนกับกระบวนการผลิตที่ไม่มีส่วนคู่นี้ กราฟโดยรวมที่ได้จึงไม่มีความแตกต่างกันไปจากกระบวนการผลิตเดิม

## บทที่ 4

### แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอนโทรปีแล้ว ทำให้เราทราบว่าในแต่ละขั้นตอนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการวิเคราะห์โรงงานอาหารตัวอย่าง มีหลายจุดที่ต้องการทำการปรับปรุง และในการปรับปรุงสามารถทำได้หลายวิธี อาจแบ่งเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

- (1) ปรับปรุงกระบวนการผลิตใหม่ ซึ่งในส่วนนี้อาจเป็นการขากในการปรับปรุงเพราะต้องมีการศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับการผลิตและผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด และอาจต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างยาวนาน และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงมาก
- (2) ปรับปรุงกระบวนการที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น โดยอาจมีการเพิ่มส่วนใดส่วนหนึ่งเข้าไปในกระบวนการผลิต หรือทำการปรับปรุงอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เช่น การหุ้มฉนวนป้องกันความร้อน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนไปโดยเปล่าประโยชน์ การปรับปรุงนี้ค่อนข้างจะใช้ระยะเวลาน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีที่ 1

#### 4.1 แนวทางการประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา (Fish Snack Process)

จากการวิเคราะห์ประสิทธิผล (effectiveness) ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลาในแต่ละอุปกรณ์พบว่า ส่วนไต้ความชื้นมีค่า 4.93 % ส่วนตู้อบมีค่า 8.95 % และ ส่วนเตาต้มมีค่า 16.70 % ดังนั้นในแนวทางในการปรับปรุงแต่ละอุปกรณ์ไม่ว่าจะมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การบำรุงดูแลรักษาเพื่อให้มีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเล็กน้อย เพื่อเป็นแนวทางนั้นจะขอแยกเป็นแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

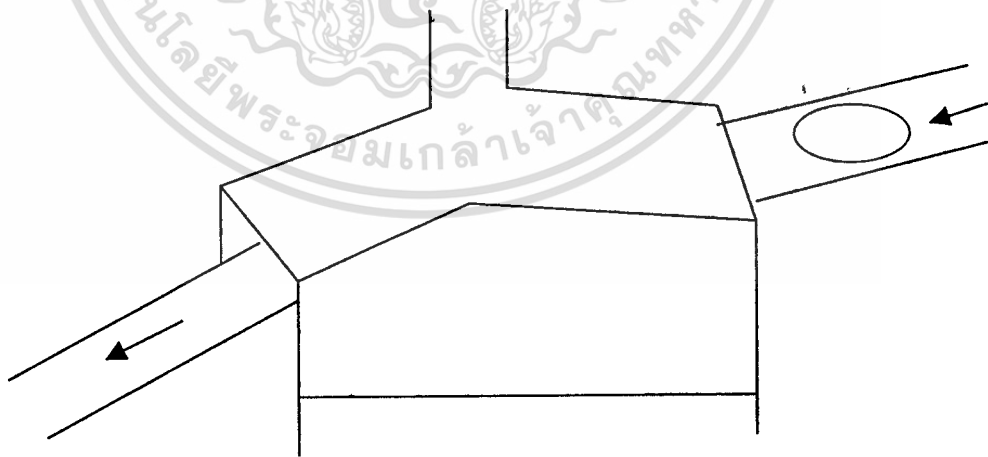
##### 4.1.1 ส่วนของไต้ความชื้น (preheating unit)

ส่วนไต้ความชื้นนี้เป็นส่วนที่ต้องการระเหยน้ำบางส่วนออกจากวัตถุดิบ โดยใช้การเผาไหม้ของก๊าซเหลว (LPG) โดยตรงเป็นตัวให้ความร้อนและกระทำในระบบอากาศเปิด จากกราฟ EUD ของผลรวมของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา พบว่าในส่วนไต้ความชื้นเป็นส่วนที่มีการสูญเสียพลังงานมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์เดิมสายของวัตถุดิบที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_0$  ( $25^{\circ}\text{C}$ )

จะถูกลำเลียงมาตามสายพาน โดยได้รับความร้อนจากหัวเผาที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งไม่มีที่กั้นด้านข้างและไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปกับอากาศบางส่วน เพราะจุดประสงค์ของการเผาไหม้คือการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้กลายเป็นพลังงานความร้อน เพื่อนำความร้อนไปใช้ในกระบวนการตามต้องการ โดยการพาและการแผ่รังสีความร้อน โดยทั่วไปก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศมาก ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้นำไปใช้ประโยชน์บางส่วนและบางส่วนสูญเสียไปกับก๊าซเสีย การใช้ปริมาณอากาศที่ไม่เหมาะสมในการเผาไหม้ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อน เพราะเป็นการใช้เชื้อเพลิงอย่างไม่มีประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์พบว่าการสูญเสียพลังงานไปกับอากาศร้อนถึง 6.12 % ดังนั้นถ้ามีการกั้นอากาศบางส่วนไม่ให้มีการสูญเสียไปก็จะเป็นการประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่ง การป้องกันการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้จึงได้เสนอแนวคิดถึงผลการคำนวณทางทฤษฎีต่อ 1 แถว (line) การผลิตเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการต่อไป โดยมีวิธีดังนี้คือ

(ก) ใช้แผ่นสังกะสีกั้นด้านข้างของอุปกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้มีการสูญเสียความร้อนไปกับอากาศร้อนรอบข้าง ถ้าหากติดตั้งที่กั้นด้านข้างรอบอุปกรณ์จะสามารถทำให้อากาศรอบข้างที่ร้อนไม่สูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ เพราะสังกะสีกั้นด้านข้างกั้นอากาศเอาไว้ ซึ่งวิธีนี้สามารถประหยัดก๊าซเหลวในระยะเวลา 1 ปีได้ถึง 864 กิโลกรัม คิดเป็นเงิน 6,048 บาทต่อปี ทำให้ลดต้นทุนการผลิตลดลง ในส่วนของต้นทุนในการติดตั้งรวมทั้งอุปกรณ์ลงทุนเพียงแค่ 1,098.24 บาท เท่านั้น (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก จ) สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 0.18 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.1



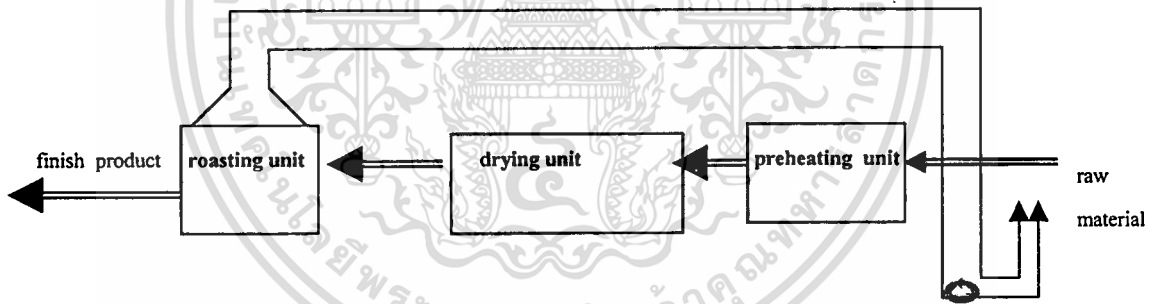
รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องไล่ความร้อนที่มีการใช้แผ่นสังกะสีกั้นทั้ง 4 ด้าน

(ข) จากวิธีแรกหลังจากกั้นด้านทั้ง 4 ของอุปกรณ์แล้วด้านบนใช้แผ่นสังกะสีที่มีรูกั้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดที่มีการซื้อขายเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกได้ และให้เขม่าของการเผาไหม้ของก๊าซไหลออกไปได้ด้วย โดยจะมีปล่องอยู่ทางด้านบนอีกทีหนึ่ง จะทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงไปได้ถึง 1,152 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นเงิน 8,064 บาท ซึ่งถือว่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย โดยใช้ต้นทุนในการติดตั้งราคา 1,612.8 บาท คืนทุนภายในระยะเวลา 0.2 ปี

(ค) มีการนำเอาความร้อนทั้งจากส่วนการย่าง มาไล่ความชื้นปลาอบบางส่วนก่อนปลาเส้นจะเข้าส่วนไล่ความชื้น เมื่อปลาเส้นได้รับความร้อนน้ำจะระเหยออกไปบางส่วนทำให้ส่วนไล่ความชื้น อาจไม่จำเป็นที่ต้องทำในระยะเวลาเท่าเดิม หรือใช้ความร้อนและปริมาณก๊าซไหลเท่าเดิม โดยใช้ความร้อนทั้งจากส่วนการย่าง ที่มีพัดลมแบบหอยโข่งดูดอากาศร้อนทั้งผ่านท่อที่หุ้มฉนวนมายังปลายท่อที่ติดตั้งก่อนเครื่องไล่ความชื้น การทำวิธีนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้แต่ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยเพิ่มอัตราการผลิตต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยต้นทุนการติดตั้งเครื่องมือ 53,619 บาท (แสดงในภาคผนวก จ) ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งวิธีนี้สามารถช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงที่จะใช้กับเครื่องไล่ความชื้นได้ 1,440 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นเงิน 10,080 บาท และสามารถคืนทุนในระยะเวลา 5.3 ปี



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยนำความร้อนทั้งจากส่วนการย่างมาไล่ความชื้น

(ง) ในส่วนของหัวเผาที่ใช้ในการเผาไหม้ก๊าซไหลอาจปิด-เปิด สลับกัน เพื่อไม่ให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากเกินไปหรือเปิดความแรงพอเหมาะ ถ้าเปิดให้เกิดมีความแรงมากเกินไป อาจเป็นการใช้พลังงานโดยสิ้นเปลืองได้ เพราะพลังงานเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งต้องทำให้อากาศส่วนเกินร้อนและการดูแลรักษาไม่ให้เกิดเขม่าหรืออุดตันก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดอายุหัวเผา และการปรับปรุงควบคุมปริมาณความร้อนอาจกระทำโดยการปิด-เปิดหัวเผา เมื่อจำนวนครั้งของการปิด-

เปิดมีมากขึ้นไม่เพียงแต่ความร้อนที่สูญเสียไปในขณะปิดหัวเผาจะเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่การจุดไฟดับ ซ้ำๆ ซากๆ จะมีผลเสียต่อหัวเผาคด้วย

(จ) หัวเผาอาจมีการออกแบบให้มีรูที่มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มปริมาณหัวแก๊สให้มีปริมาณมากขึ้น เพื่อจะได้กระจายความร้อนให้ทั่วถึง อาจทำให้มีการระเหยน้ำออกไปได้เร็วขึ้น และจะใช้เวลาที่น้อยลงจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงอีกทางหนึ่ง

(ฉ) มีการปรับระดับความร้อนของสายพานให้มีความเร็วมากขึ้นเพื่อที่จะใช้ระยะเวลาในส่วนนี้น้อยลง และจะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้อีกทางหนึ่ง

(ช) กระบวนการผลิตอาจทำอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะได้ไม่สูญเสียความร้อนที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์อย่างไม่มีค่า เพราะกราฟ EUD ของผลรวมของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา จะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงของหน่วยการผลิตวัตถุดิบจะมีอุณหภูมิค่า และต้องกลับมาทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกครั้งสามารถดูได้จากระดับพลังงาน (A) ที่แสดงในกราฟ EUD ซึ่งถือว่าเป็นการใช้พลังงานอย่างไม่มีคุ่มค่า ซึ่งนั้นควรกระทำการผลิตอย่างต่อเนื่องนั่นเอง

#### 4.1.2 ส่วนดrying (drying unit)

ดrying (dryer) ของโรงงานที่มีอยู่เดิมมีลักษณะเป็นห้องกั้น พลังงานที่สูญเสียไปทั้งหมดคิดเป็น 61.8 % แต่จากอุปกรณ์เดิมมีการหุ้มฉนวนอยู่แล้ว ดังนั้นในส่วนนี้อาจจะต้องมีการดูแลรักษาอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ให้มีความพร้อมอยู่เสมอเช่น ดูแลรักษาหัวเผาไม่ให้อุดตัน และอาจมีการตรวจฉนวนที่หุ้มไว้แล้วเริ่มชำรุดหรือยังถ้าเริ่มชำรุดควรมีการซ่อมแซม หรือถ้าหากมีการชำรุดมากอาจต้องมีการหุ้มฉนวนใหม่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนได้

#### 4.1.3 ส่วนย่าง (roasting unit)

อุปกรณ์เตาย่างมีลักษณะการทำงานคล้ายๆกันส่วนไล่ความร้อน แต่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนน้อยกว่าทั้งนี้เพราะอุณหภูมิของปลาสูงกว่า และมีส่วนของน้ำระเหยน้อยกว่าคือมี 11.6 % แต่ส่วนไล่ความร้อนมีค่า 20.7 % เพราะความแตกต่างของอุณหภูมิของเนื้อปลานั้นเอง ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงก็มีลักษณะเหมือนกัน แต่พบว่าในส่วนนี้มีการสูญเสียกับอากาศร้อนไปถึง 10.4 % และถ้าได้ทำแนวตั้งกะสิกันทั้ง 4 ด้าน เหมือนส่วนไล่ความร้อน จะช่วยประหยัดพลังงานไปได้

2,232 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นเงินมูลค่า 15,624 บาท ถือว่าคุ้มกับการลงทุนสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 0.7 ปี ส่วนแนวทางอื่นๆ ก็เช่นเดียวกันกับส่วนไล่ความชื้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

## 4.2 แนวทางการประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ( Bean Snack Process )

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพผลของกระบวนการผลิตในแต่ละอุปกรณ์พบว่า ส่วนของเตาทอคมมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือมีค่า 94.50 % ดังนั้นในส่วนนี้จึงไม่ต้องทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลง แต่ยังคงต้องดูแลรักษาเครื่องให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพอย่างสม่ำเสมอ ในส่วนอื่นๆคือ ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพคือ 25.46 % หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพคือ 25.56 % และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนการคั่วมีค่า 5.09 % ดังนั้นในทั้ง 3 ส่วนนี้จึงได้เสนอแนวทางในการประหยัดพลังงานในแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

### 4.2.1 ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger unit)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำที่  $165^{\circ}\text{C}$  และน้ำมัน  $27^{\circ}\text{C}$  ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น  $125^{\circ}\text{C}$  และจากการวิเคราะห์พบว่ามี การสูญเสียความร้อน 56.4% การสูญเสียพลังงานแบบผันกลับไม่ได้มีค่า  $2.56 \times 10^7$  kJ/h คิดเป็น 18.1 % คิดเทียบได้ว่าการสูญเสียพลังงานไปกับอุปกรณ์ถึง 95.44 % ของการสูญเสียพลังงานทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากในอุปกรณ์เดิมไม่ได้มีการหุ้มฉนวนทำให้พลังงานความร้อนสูญเสียเปล่า อุณหภูมิตรวจสอบภายนอกอุปกรณ์พบว่ามีอุณหภูมิ  $67^{\circ}\text{C}$  แนวทางในการปรับปรุงจึงได้เสนอแนวคิดในการหุ้มฉนวน พร้อมทั้งผลการคำนวณในการปรับปรุงนี้ โดยการเก็บรักษาพลังงานความร้อนที่จะสูญเสียในส่วนนี้ด้วยการหุ้มฉนวนจะสามารถเก็บรักษาความร้อนได้ถึง 99.94 % ( $3.138 \times 10^6$  kJ/h) โดยติดตั้งฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้ว อุณหภูมิภายนอกอุปกรณ์จะมีค่าลดลงเหลือเพียง  $44^{\circ}\text{C}$  (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ง) ทั้งนี้เพราะฉนวนมีคุณสมบัติสภาพการนำความร้อนต่ำทำให้ลดการสูญเสียพลังงาน ควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการได้ และป้องกันเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งป้องกันการเกิดไอน้ำกลั่นตัวบนผิววัสดุ โดยการนำฉนวนใยแก้วมาใช้เพราะมีคุณสมบัติดังนี้ มีสภาพการนำความร้อนต่ำ มีความหนาแน่นน้อยและน้ำหนักเบา ทนต่อแรงดึงและแรงอัดได้ดี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้างไม่ดูดความชื้นและน้ำ ติดไฟได้ยาก ป้องกันการกัดกร่อนได้ดี ราคาถูกหาซื้อได้ง่ายและการติดตั้งสะดวก

#### 4.2.2 ส่วนหม้อไอน้ำ (boiler unit)

ในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบไอน้ำเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากไอน้ำเป็นตัวพาความร้อนที่ดี มีความจุความร้อน สามารถคายความร้อนแฝงที่อุณหภูมิคงที่ และน้ำมีราคาถูก แต่การใช้ไอน้ำส่วนใหญ่แล้วยังไม่ถูกต้องทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปโดยใช่เหตุ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ดีมีค่าประมาณ 83 % สำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง และประมาณ 79 -81 % สำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ก๊าซ ในส่วนของหม้อไอน้ำ (boiler) ของโรงงานตัวอย่างพบว่ามีประสิทธิภาพอยู่ใกล้เคียงเกณฑ์มาตรฐานคือมีค่า 75.94 % ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงจึงนำเสนอในแนวทางของการดูแลรักษาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ จะดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น การสูญเสียความร้อนของก๊าซร้อนจากปล่องควันมากเกินไป จากการวิเคราะห์พบว่าการสูญเสียไปกับอากาศในการเผาไหม้ถึง  $4.37 \times 10^7$  kJ/h (6.8 %) ในส่วนของการสูญเสียด้านอื่นๆ อาจเกิดจากหลายสาเหตุ การถ่ายเทความร้อนด้านน้ำและด้านไฟไม่ดี อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่ถูกต้อง ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงจึงนำเสนอในแนวทางของการดูแลรักษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่มีอยู่ให้มีการใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยแบ่งเป็นส่วนๆ ดังนี้

(ก) การปรับปรุงการเผาไหม้ การเผาไหม้หม้อไอน้ำถ้าหากมีการใช้เชื้อเพลิงหรืออากาศมากเกินไปจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แล้วจะเกิดการสูญเสียของเชื้อเพลิงในกรณีที่อากาศน้อยไปการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ ซึ่งหมายความว่าพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดควันและมีเขม่าจับในหม้อไอน้ำ ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำไม่ดี ถ้าหากอากาศมากเกินไปพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการทำให้อากาศส่วนเกินร้อนแล้วปล่อยทิ้งทางปล่องควัน

(ข) การถ่ายเทความร้อนด้านน้ำ การเกิดตะกอนในท่อน้ำของหม้อไอน้ำอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากเกินไป เนื่องจากตะกอนจะทำตัวเป็นฉนวนซึ่งจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงซึ่งหมายถึงการลดลงของอัตราการผลิตไอน้ำและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรุงแต่งน้ำป้อน หรือมีการนำคอนเดนเสด (condensate) กลับมาใช้เป็นวิธีที่ดีประการหนึ่งสำหรับลดตะกอน ทั้งนี้เนื่องจากคอนเดนเสดเป็นน้ำที่กลั่นแล้ว แต่ถ้าหากพบว่ามีตะกอนมากเกินไปสามารถแก้ไขโดยการล้างด้วยสารเคมี

(ค) การถ่ายเทความร้อนด้านไฟ เมื่อหม้อไอน้ำทำงานนานเข้าจะมีเขม่าจับบนผิวถ่ายเทความร้อนด้านไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่หม้อไอน้ำใช้เชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูง เขม่าจะทำให้ไม่ทั่วกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้การถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังน้ำลดลง เนื่องจากความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถสังเกตได้จากการที่อุณหภูมิของก๊าซร้อนจากปล่องควันจะสูงขึ้น โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  $15^{\circ}\text{C}$  จะหมายถึงประสิทธิภาพของการเผาไหม้ลดลง 1 % ผู้ใช้หม้อไอน้ำควรจะได้ตรวจสอบเขม่าที่จับบนผิวถ่ายเทความร้อนด้านไฟและทำความสะอาดปีละครั้ง หรือเมื่อพบว่าอุณหภูมิของก๊าซสูงเกินไปจากปกติควรจะหยุดเดินหม้อไอน้ำเพื่อทำความสะอาด

(ง) การควบคุมโบลดาวน์ น้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำอาจมีสิ่งเจือปนอยู่ซึ่งถ้าหากไม่กำจัดทิ้งจะทำให้เกิดตะกรันในท่อน้ำได้ การกำจัดสิ่งเจือปนนี้สามารถทำได้โดยการปล่อยน้ำร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ (blow-down) ซึ่งจะให้ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนลดลง อัตราของการโบลดาวน์ซึ่งมีนิยามเป็นอัตราส่วนของน้ำที่ปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ ต่อปริมาณน้ำป้อนหม้อไอน้ำ อาจมีค่าสูงถึง 10 % การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการโบลดาวน์ในกรณีนี้จะมีค่า 1.5 % ของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้หม้อไอน้ำ ในหลายกรณีผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ อาจจะโบลดาวน์มากกว่าความจำเป็น ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานการใช้อัตราการโบลดาวน์ที่ถูกต้องและการนำความร้อนจากโบลดาวน์กลับมาใช้จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้

(จ) การรั่วของไอน้ำ การสูญเสียพลังงานในระบบจ่ายไอน้ำที่เห็นได้ชัดเจนและร้ายแรงที่สุดคือ การรั่วของไอน้ำ เมื่อพบว่ามีการรั่วของไอน้ำควรซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน อย่าปล่อยทิ้งไว้ เนื่องจากจะเป็นการสูญเสียพลังงานแล้วอาจจะเป็นอันตรายต่อผู้กำลังปฏิบัติงานได้ด้วย

(ฉ) การใช้ฉนวน การไม่ใช้ฉนวนหุ้มจ่ายท่อไอน้ำ หรือการใช้ฉนวนหุ้มอย่างไม่ถูกต้อง รวมทั้งฉนวนที่หุ้มท่อเกิดการชำรุด และไม่รีบดำเนินการแก้ไขก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการสูญเสียความร้อนได้

(ช) การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ คอนเดนเสท คือ น้ำกลั่นร้อนที่เหมาะสมต่อการป้อนกลับให้หม้อไอน้ำ การนำคอนเดนเสทป้อนกลับให้หม้อไอน้ำไม่เพียงแต่จะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง แต่ยังเป็นการประหยัดน้ำ ค่าปรุ้งแตงน้ำ ชีตอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำ และระบบไอน้ำ เมื่อคิดรวมกันแล้วจะทำให้สามารถประหยัดเงินได้เป็นจำนวนมาก จากงานวิจัย (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, 2538) พบว่า ถ้าหากไอน้ำที่ใช้มีความดัน 700 kPa คอนเดนเสทจะมีพลังงานประมาณ 25 % ของความร้อนที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ ถ้าหากคอนเดนเสทถูกปล่อยทิ้ง ประสิทธิภาพของการใช้ไอน้ำจะน้อยกว่า 75 % อย่างไรก็ตามการนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ต้องมีข้อควรระวังอยู่บ้าง คอนเดนเสทที่มีอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดฟองอากาศ (cavitation) ขึ้นกับปั๊มป้อนน้ำได้ แต่ก็มีวิธีป้องกันได้โดยให้ทางเข้าปั๊มมีเสถียรความดันพอเพียง โดยยกถังป้อนน้ำให้สูงกว่าตัวปั๊มปีตามเกณฑ์ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

88	องศาเซลเซียส	ใช้เฮค	1.6 เมตร
93	องศาเซลเซียส	ใช้เฮค	3.1 เมตร
99	องศาเซลเซียส	ใช้เฮค	4.6 เมตร
100	องศาเซลเซียส	ใช้เฮค	5.2 เมตร

เหตุผลหนึ่งที่คนไม่นิยมนำคอนเดนเสดกลับมาใช้เนื่องจากคอนเดนเสดถูกเจือปนด้วยสารต่างๆในกระบวนการผลิต ในกรณีนี้เราสามารถใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของคอนเดนเสดกลับมาใช้ได้อยู่ดี เพื่อที่จะนำความร้อนจากคอนเดนเสดกลับมาใช้มากที่สุด ท่อคอนเดนเสดควรหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

(ซ) สติมแท๊ป เป็นอุปกรณ์สำหรับปล่อยคอนเดนเสดออกจากระบบไอน้ำและป้องกันคอนเดนเสดท่วมผิวการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้อาจทำหน้าที่ปล่อยอากาศและก๊าซที่ไม่ควบแน่นทิ้งไป การรั่วของสติมแท๊ปหรือการล้นเหลวจากการเปิดค้ำงให้ไอน้ำไหลผ่าน ได้เป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานอย่างมากมาเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อนควรจะได้มีแผนตรวจการทำงานของสติมแท๊ปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้การเลือกใช้ประเภทและขนาดสติมแท๊ปที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้สติมแท๊ปทำงานโดยไม่มีประสิทธิภาพเต็มที่ และอาจนำไปสู่การล้นเหลวของสติมแท๊ปก่อนเวลาอันควร

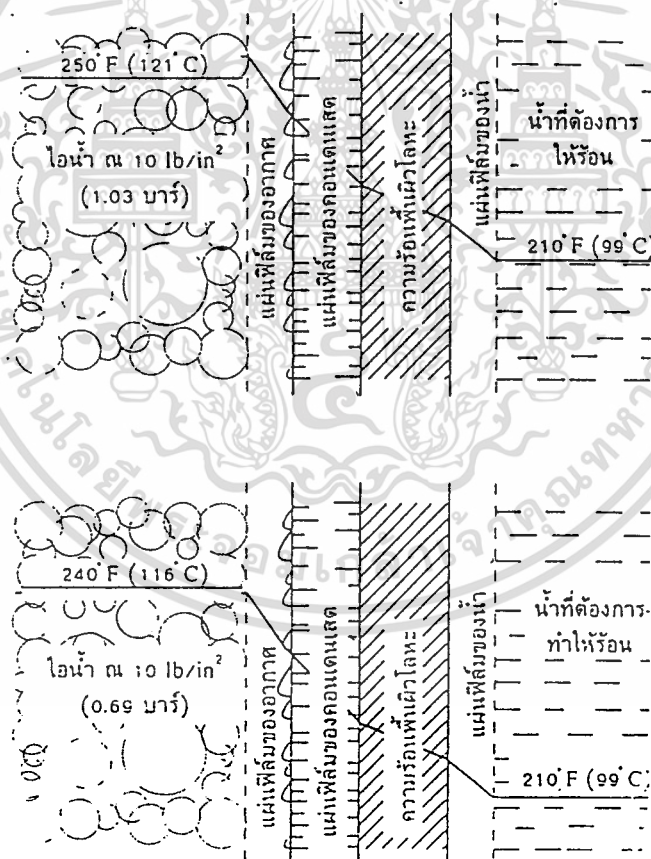
(ฉ) แฟลชสติม คอนเดนเสดที่เกิดขึ้นภายใต้ความดันจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 °C เมื่อคอนเดนเสดผ่านสติมแท๊ป ความดันของคอนเดนเสดลดลง แต่อุณหภูมิยังคงที่ ทำให้คอนเดนเสดบางส่วนระเหยกลายเป็นไออีก ไอที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แฟลชสติม ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยใช้ถังแฟลชซึ่งทำหน้าที่เก็บแฟลชสติมเอาไว้ใช้ประโยชน์ต่อไปได้ เช่น การใช้แฟลชสติมในกระบวนการไล่ความชื้นหรือในกระบวนการที่ต้องการใช้ไอน้ำความดันต่ำเป็นต้น

(ญ) การระบายอากาศ การระบายอากาศหรือก๊าซที่ไม่ควบแน่นอื่นๆออกจากระบบไอน้ำเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากอากาศหรือก๊าซนี้จะลดการถ่ายเทความร้อนทำให้ระบบร้อนช้า และสูญเสียพลังงาน นอกจากนี้จุดเย็น (cold spot) อาจเกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำความร้อนบิดเบี้ยวเสียหายได้ เพื่อการระบายอากาศออก จึงควรที่จะติดตั้งสติมแท๊ปที่มีตัวระบายอากาศในตัวและติดตั้งตัวระบายอากาศที่อุปกรณ์ซึ่งใช้ไอน้ำ

(ฎ) ถังป้อนน้ำและปั๊มปี การสูญเสียความร้อนจากถังป้อนน้ำสามารถป้องกันได้โดยการหุ้มฉนวนถัง และถังควรมีฝาปิด ถังจะต้องโตพอที่จะป้อนน้ำให้แก่หม้อไอน้ำและรับน้ำจากระบบได้ทัน เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียแฟลชสติม ท่อคอนเดนเสดควรต่อกับถังโดยให้ต่ำกว่าระดับไม่ต่ำกว่าครึ่งถึงหนึ่ง อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำในถัง ถ้าหากอุณหภูมิของคอนเดนเสดสูงเกินไปให้ตรวจสอบว่าสตีมแท้ปล้มเหลวหรือไม่ ถ้าหากสตีมแท้ปทำงานปกติให้ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับคอนเดนเสดเสียก่อนที่จะปล่อยเข้าถัง

(ก) การถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำผ่านผนังโลหะ เป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจและจะทำให้เข้าใจถึงความจำเป็นของการระบายอากาศและคอนเดนเสดออกจากระบบไอน้ำ โดยทั่วไปความต้านทานต่อการไหลของความร้อนในพวกโลหะและโลหะผสมจะมีค่าน้อย อย่างไรก็ตาม โลหะมักจะมีชั้นของตะกรันเกิดขึ้นเนื่องจากการออกซิเดชันหรือการกัดกร่อน สารบางอย่างอาจจะตกตะกอนติดอยู่กับผิวของโลหะ นอกจากนี้จะมีฟิล์มของน้ำเกิดขึ้นบนด้านกระบวนการ และบนด้านไอน้ำจะมีฟิล์มของคอนเดนเสดและอากาศซ้อนกันอยู่ด้วย ฟิล์มเหล่านี้จะทำให้เกิดความต้านทานต่อความร้อนมากขึ้นดังรูป



รูปที่ 4.3 แผ่นฟิล์มของอากาศ น้ำ และตะกรันบนพื้นผิวโลหะ ทำให้ลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

#### 4.2.3 ส่วนการคั่ว (parching unit)

ในส่วนคั่วจะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากลักษณะการทำงานและลักษณะอุปกรณ์เหมือนกันกับในส่วนการย่าง กล่าวคือจะใช้ก๊าซเหลวเป็นตัวให้พลังงานความร้อนโดยมีหัวเผาอยู่ด้านล่าง วัตถุประสงค์หลังจากผ่านการทอดแล้วจะถูกนำมาทำให้เย็นก่อนเข้าในส่วนนี้ แต่ในส่วนนี้พบว่าการสูญเสียพลังงานไปกับอากาศร้อนเพียง 5.6 % เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์มีความแตกต่างจากส่วนการย่าง คือภาชนะที่รองรับวัตถุประสงค์มีลักษณะเป็นถาด แต่ในส่วนของการย่างมีลักษณะเป็นสายพานโปร่งจึงมีการระบายอากาศได้ดีกว่า ดังนั้นส่วนคั่วเมื่อวิเคราะห์เรื่องการสูญเสียพลังงานความร้อนทั้งกับอากาศจึงมีค่าน้อยกว่า ในส่วนแนวทางอื่นๆที่ปรับปรุงลักษณะเดียวกันคือ นำแผ่นสังกะสีกั้นรอบด้านข้างอุปกรณ์ ดูแลการใช้งานการปิด-เปิดของหัวเผา และการกระทำการผลิตอย่างต่อเนื่อง

#### 4.2.4 ส่วนของตู้หนึ่ง (steaming unit)

ในส่วนแรกกระบวนการผลิตยังไม่มีส่วนของตู้หนึ่ง แต่ทางโรงงานได้มีการปรับปรุงการผลิตโดยให้มีส่วนของตู้หนึ่งเข้ามาก่อนที่วัตถุประสงค์จะเข้าสู่เตาทอด ซึ่งถือได้ว่าเป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตแบบหนึ่งที่เรียกว่า การปรับปรุงในระดับการเปลี่ยนแปลงกระบวนการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลของการปรับปรุงวิธีนี้พบว่า ประสิทธิภาพโดยรวมและในบางอุปกรณ์ลดลงเล็กน้อย เช่น ในส่วนของหม้อไอน้ำก่อนที่จะมีส่วนของตู้หนึ่งจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 75.94 % แต่เมื่อกระบวนการมีตู้หนึ่งทำให้ประสิทธิภาพลดลงเหลือ 75.74 % ซึ่งไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากหม้อไอน้ำต้องทำการผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้น และไอน้ำที่ใช้เสร็จไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ แต่ในส่วนหน่วยการผลิตอื่นๆยังคงมีค่าเหมือนเดิม ทั้งนี้เพราะวัตถุประสงค์ที่ผ่านออกจากส่วนตู้หนึ่ง จะต้องทำให้แห้งและมีอุณหภูมิใกล้เคียงของเดิมก่อนเข้าสู่การผลิตในขั้นต่อไป แต่ข้อดีของการปรับปรุงส่วนนี้คือทำให้ผลิตภัณฑ์ มีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเดิม

### 4.3 แนวทางการประหยัดพลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

การประหยัดพลังงานไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องเริ่มทำตั้งแต่การออกแบบที่ดีให้สามารถประหยัดพลังงาน การเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ประหยัดพลังงาน วิธีการใช้งาน ตลอดจนวิธีการบำรุงรักษาอย่างถูกต้อง แต่เนื่องจากว่าอาคารและโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่เห็นในปัจจุบันนี้ ได้รับการออกแบบก่อสร้างตั้งแต่เมื่อพลังงานเชื้อเพลิง พลังงานไฟฟ้านั้นหาได้ง่ายและมีราคาถูก โดยไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนวิสาขาลัยบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยอาคารค่านึงถึงเรื่องการประหยัดพลังงานเลย รูปแบบอาคาร ระบบเครื่องปรับอากาศ ระบบเครื่องกลไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารจึงออกแบบโดยเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างเป็นหลักใหญ่ โดยมีได้คำนึงถึงการใช้พลังงานที่สิ้นเปลืองไปในระยะข้างหน้า ดังนั้นหากโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ ได้มีการปรับปรุงระบบไฟฟ้าเดิมให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับปรุงอาจคุ้มทุนได้ในระยะเวลาอันสั้น หลักการสำคัญในการประหยัดพลังงานมีดังนี้

- การเลือกวิธีให้แสงสว่างที่พอเหมาะสมควรและตรงกับความต้องการ
- การเลือกใช้หลอดไฟฟ้าให้เหมาะสม
- การออกแบบให้มีสวิตช์ปิดเปิดได้สะดวกและมีสวิตช์มาก
- การเลือกปิดเปิดหลอดบางหลอดในโคมเดียวกัน
- การใช้แสงสว่างเปิดสวิตช์
- การใช้แสงจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันให้เป็นประโยชน์
- การแก้ไขสภาพภายในโรงงานหรืออาคารที่ขัดขวางสมรรถนะของการให้แสงสว่าง
- การคำนวณและเลือกขนาดสายไฟฟ้าให้มีค่าความสูญเสียต่ำ

แนวทางการประหยัดพลังงานนั้นเป็นเพียงข้อเสนอแนะ ซึ่งอาจจะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้บ้างในบางส่วน ซึ่งถ้ารวมกันแล้วหรือใช้ระยะเวลานานก็จะสามารถประหยัดพลังงานได้มากมาย ซึ่งการประหยัดพลังงานนั้นอาจจะไม่เห็นผลในวันสองวัน แต่จะใช้เวลาอาจจะเป็นหลายๆ เดือนหรือเป็นปีก็ได้

## บทที่ 5

### บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการวิเคราะห์พลังงานของโรงงานอาหารตัวอย่าง 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา และกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ จากการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอน็ทรีโดยแบ่งเป็นแต่ละหน่วยการผลิตและผลรวมของกระบวนการย่อยแต่ละการผลิต โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้มีดังนี้

#### 5.1 ผลการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา

5.1.1 กระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา ได้แก่

- ส่วนไล่ความชื้นมีประสิทธิภาพ 27.26 % ประสิทธิภาพ 4.93 %
- ส่วนเตาอบมีประสิทธิภาพ 38.21 % ประสิทธิภาพ 8.95 %
- ผลรวมของกระบวนการมีประสิทธิภาพ 25.41 % ประสิทธิภาพ 4.74 %

5.1.2. กระบวนการย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา ได้แก่

- ส่วนย่างมีประสิทธิภาพ 51.12 % ประสิทธิภาพ 16.70 %

จากการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพหรือคุณภาพสูงสุดของการใช้พลังงานนั้นๆ ได้ จึงได้นำแนวคิดของเอน็ทรีมาร่วมในการวิเคราะห์พลังงานด้วย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าในทุกกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา ประสิทธิภาพที่วิเคราะห์ด้วยเอนทัลปีนั้นมีค่าสูงกว่าค่าประสิทธิภาพที่วิเคราะห์ด้วยเอน็ทรี ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเอน็ทรีได้นำเอากฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์เข้ามาร่วมวิเคราะห์ด้วย ซึ่งสามารถบอกถึงพลังงานที่ผันกลับไม่ได้ที่สูญเสียไปในกระบวนการ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกันมากๆ จะทำให้ทราบว่าอุปกรณ์นั้นมีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เช่นส่วนไล่ความชื้นจากประสิทธิภาพ 27.26 % แต่ค่าประสิทธิภาพเพียง 4.93 % ในขณะที่ส่วนย่างมีค่าประสิทธิภาพ 51.12 % ค่าประสิทธิภาพ 16.70 % นั้นแสดงให้เห็นว่าจากส่วนการย่างมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ หลังจากทราบผลการวิเคราะห์พลังงานแล้ว จึงมองหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

## 5.2 ผลการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

### 5.2.1 กระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ได้แก่

- ส่วนเตาทอดมีประสิทธิภาพ 99.09 % ประสิทธิภาพผล 94.50 %
- ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพ 25.57 % ประสิทธิภาพผล 25.46 %
- ส่วนหม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 75.94 % ประสิทธิภาพผล 25.56 %
- ผลรวมของกระบวนการมีประสิทธิภาพ 7.79 % ประสิทธิภาพผล 3.02 %

### 5.2.2 กระบวนการย่อยที่ 2 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ ได้แก่

- ส่วนคั่วมีประสิทธิภาพ 21.25 % ประสิทธิภาพผล 5.09 %

ผลการวิเคราะห์ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบพบว่า ค่าประสิทธิภาพและประสิทธิผลของส่วนเตาทอดและส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานในหน่วยการผลิต 2 หน่วยนี้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะผลการวิเคราะห์พลังงานด้วยเอนทัลปีและเอนทาลปีที่ได้ไม่แตกต่างกัน แต่ในส่วนของหม้อไอน้ำ, ผลรวมของกระบวนการย่อยที่ 1 ของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ และส่วนการคั่ว มีค่าประสิทธิภาพและประสิทธิผลแตกต่างกันมาก หมายความว่า การใช้พลังงานยังไม่มีคุณภาพนั่นเอง

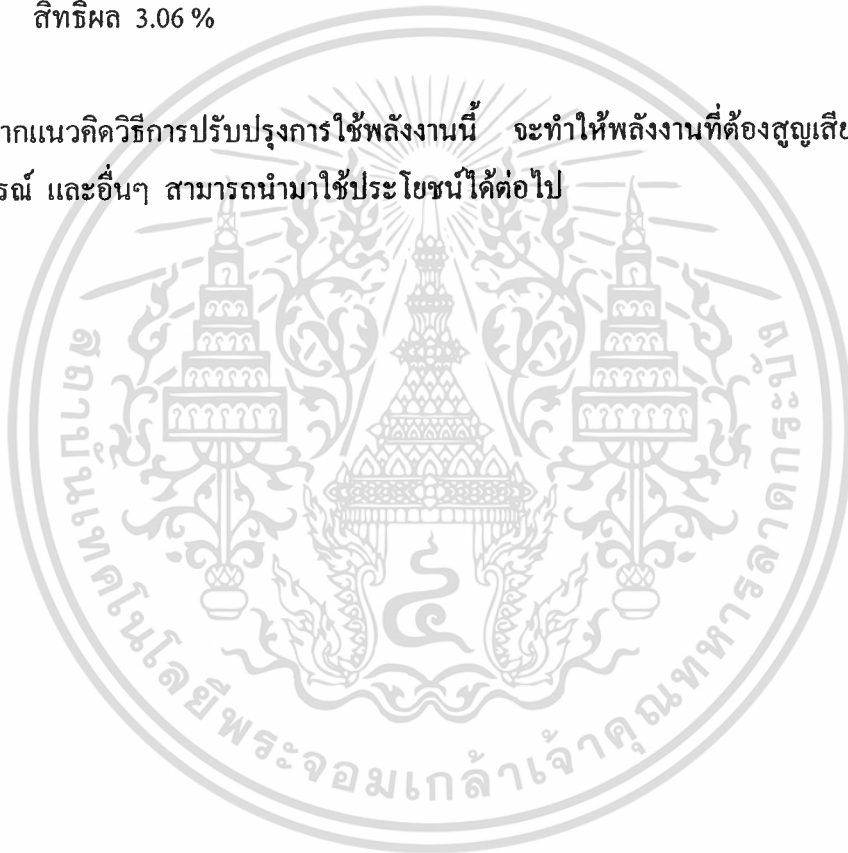
จากผลการวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีพบว่ามีการใช้พลังงานอย่างไม่มีคุณภาพและสูญเสียพลังงานในบางหน่วย ดังนั้นจึงได้เสนอแนวคิดในการปรับปรุงการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น แต่แนวคิดที่เสนอนี้เป็นเพียงแนวทางของการปรับปรุงเท่านั้น ซึ่งทางโรงงานยังไม่ได้นำไปทดลองปฏิบัติ ซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในบทที่ 4 จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ส่วนของการไล่ความชื้น ถ้าติดตั้งแผ่นสังกะสีกันค้ำข้างของอุปกรณ์จะป้องกันการสูญเสียความร้อนไปกับอากาศร้อนรอบข้างได้ ซึ่งวิธีนี้จะสามารถประหยัดเชื้อเพลิง 864 กิโลกรัมต่อปีต่อ 1 แถวการผลิต คิดเป็นเงิน 1,098.24 บาท สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 0.18 ปี
- (2) ส่วนของการย่างมีอากาศร้อนทิ้งจำนวนหนึ่ง ถ้านำอากาศร้อนทิ้งมาใช้ในการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้น โดยการสร้างอุปกรณ์ที่มีพัดลมดูดความร้อนผ่านมาทางท่อที่หุ้มฉนวน พบว่าจะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 1,440 กิโลกรัมต่อปีต่อ 1 แถวการผลิต สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 5.3 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถ้าติดตั้งจนวนไขแก้วหนา 3 นิ้วมาหุ้มจะสามารถเก็บความร้อนได้ถึง 99.94 % ทำให้อุณหภูมิภายนอกผิวอุปกรณ์ลดลงไปอีก  $23^{\circ}\text{C}$  จะสามารถประหยัดพลังงานและน้ำมันดีเซลได้  $5.33 \times 10^7$  กิโลกรัมต่อปี
- (4) การปรับปรุงในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ตัดแปลงโดยนำคั่วนี้มาใช้ในกระบวนการผลิต ผลการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างจากกระบวนการผลิตเดิม โดยผลการวิเคราะห์รวมของกระบวนการย่อยที่ 3 ที่ได้ตัดแปลงมีประสิทธิภาพ 7.76 % ประสิทธิภาพ 3.06 %

จากแนวคิดวิธีการปรับปรุงการใช้พลังงานนี้ จะทำให้พลังงานที่ต้องสูญเสียไปกับอากาศทิ้ง, อุปกรณ์ และอื่นๆ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ต่อไป



## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. รายงานพลังงานของประเทศไทย. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- พงษ์ธร จรัญญากรณ์. 2534. เทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพฯ : เอช-เอน การพิมพ์.
- มนตรี พิรุณเกษตร. 2539. อุณหพลศาสตร์. กรุงเทพฯ : พิมพ์ดีจำกัด.
- โยชิฮิโกะ ทาคะมุระ. 2527. เทคนิคการประหยัดพลังงานภาคความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร:การถนอมอาหาร. กรุงเทพฯ : โอเอส การพิมพ์.
- รุจิรา ตาปราบ. 2531. “การประหยัดพลังงานในโรงงานโดยการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิวัฒน์ ศัลยกำธร. 2526. อุปรกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์. 2538. เทคนิคการประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์.
- สุชัย ศศิวิมลพันธุ์. 2526. เทคโนโลยีไอน้ำ. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.
- Fang, Z.et.al. 1995. “Exergy Analysis of a Milk Processing System” American Society of Agricultural Engineers. 38 (6) : 1825 – 1832.
- FEA. 1976. Energy use in the food system. Washington D.C. : Office of Industrial Programs, Federal Energy Administration U.S. Govt. Print Office.
- Gaggioli, R. A. 1980. Thermodynamics : Second Law Analysis. Washington D.C : The Mc. Graw – Hill Companies , Inc.
- John , E.A. 1980. The Exergy method of Energy Systems Analysis. The United State of America : John Wiley & Sons , Inc.
- Larson , D.L. and Cortez , L.A.B. 1995. “Exergy Analysis : Essential to Effective Energy Management ”. American Society of Agricultural Engineers. 38 (4) : 1173 – 1178.
- Michael , J.L. 1987. Physical properties of foods and food processing system. Great Britain : Hartolls, Limited.

- Samuel ,G.U. 1975. “ Energy Utilization in the Leading Energy – Consuming Food Processing Industries.” **Food Technology**. 29(1) : 33 – 45
- Singh , R.P. 1978. “ Energy Accounting in food Processing Operations” **Food Technology** . 32(1) :40-46
- USDA. 1974. **The U.S. food and fiber Energy use and outlook**. Economic Research Service , U.S. Dept. of Agriculture : Washington D.C.
- Yunus A. and Michael , A. B. 1998. **Thermodynamics**. The United States of American : The Mc. Graw – Hill Companies , Inc.





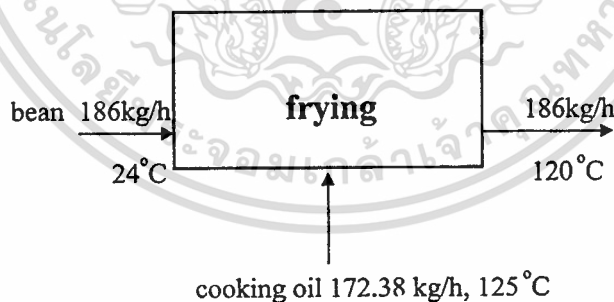
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปี

## ก.1 ส่วนเตาทอด (frying unit)

ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์พลังงานคือการทำสมดุลมวล เนื่องจากมวลของถั่วไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการทอด และน้ำมันที่ใช้ทอดก็ไม่ได้สูญเสียระหว่างทอด แต่จะทิ้งต่อเมื่อเปลี่ยนกะทำงาน และในการวิเคราะห์นี้อยู่ในสถานะคงที่ (steady state) ดังนั้นมวลสะสมจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ผลรวมมวลเข้าทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมมวลออกทั้งหมดและรวมมวลสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการด้วย ในการวิเคราะห์พลังงานนั้นค่าความร้อนจำเพาะของถั่วมีค่า  $1.85 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  และของน้ำมันทอดมีค่า  $1.93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  หลังจากวิเคราะห์พลังงานแล้วค่าที่ได้จะนำไปทำการวิเคราะห์เอนโทรปีต่อไป อุณหภูมิอ้างอิงที่  $25^\circ\text{C}$  ดังแสดงไว้ข้างล่างนี้



รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนเตาทอด

## Mass Balance ของถั่ว

$$\text{mass input} = \text{mass output} + \text{mass accumulation}$$

$$186 = 186 + 0$$

$$186 = 186 \text{ kg}$$

## Energy Balance

พลังงานขาเข้า

$$\begin{aligned} H_{in, \text{air}} &= mc_p \Delta T \\ &= 186 \times 1.85 \times (24-25) \\ &= -344.1 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{input, oil} &= mc_p \Delta T \\ &= 172.38 \times 1.93 \times (125-25) \\ &= 3.33 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

พลังงานขาออก

$$\begin{aligned} H_{out, \text{air}} &= mc_p \Delta T \\ &= 186 \times 1.85 \times (120-25) \\ &= 3.27 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \text{input} &= \sum \text{output} + \text{loss} \\ -344.1 + (3.33 \times 10^4) &= 3.27 \times 10^4 + (3.00 \times 10^2) \\ 3.30 \times 10^4 &= 3.30 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{(\sum \text{output}) \times 100}{(\sum \text{input})} \\ &= \frac{(3.27 \times 10^4) \times 100}{(3.30 \times 10^4)} \\ &= 99.09 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ loss} &= \frac{(\sum \text{input} - \sum \text{output}) \times 100}{(\sum \text{input})} \\ &= 0.91 \% \end{aligned}$$

## Exergy Balance

$$\begin{aligned}
 E_{\text{input, gas}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\
 &= -344.1 - \frac{(298.15 \times (-344.1))}{(297.15)} \\
 &= 1.16 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\text{input, oil}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\
 &= 3.33 \times 10^4 - \frac{(298.15 \times 3.33 \times 10^4)}{(398.15)} \\
 &= 8.36 \times 10^3 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\text{output, gas}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\
 &= (3.27 \times 10^4) - \frac{(298.15 \times 3.27 \times 10^4)}{(393.15)} \\
 &= 7.90 \times 10^3 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma \text{ input} &= \Sigma \text{ output} + \text{loss} \\
 1.16 + (8.36 \times 10^3) &= 7.90 \times 10^3 + 460 \\
 8.36 \times 10^3 &= 8.36 \times 10^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{(\Sigma \text{ output})}{(\Sigma \text{ input})} \times 100 \\
 &= \frac{(7.90 \times 10^3)}{(8.36 \times 10^3)} \times 100 \\
 &= 94.50 \%
 \end{aligned}$$

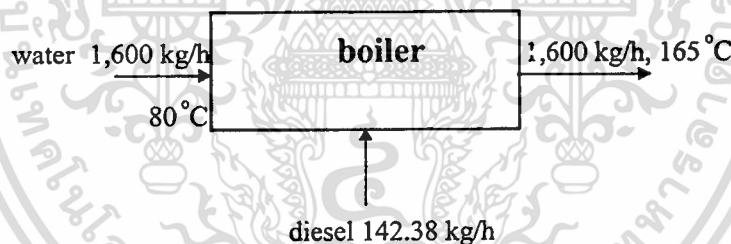
$$\begin{aligned}
 E_{\text{output, loss}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\
 &= 3.00 \times 10^2 - \frac{(298.15 \times 3.00 \times 10^2)}{(423.15)} \\
 &= 88.62 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \% \text{ loss} &= \frac{(\sum \text{input} - \sum \text{output})}{(\sum \text{input})} \times 100 \\ &= 5.50\% \end{aligned}$$

## ก.2 ส่วนหม้อไอน้ำ (boiler unit)

ในส่วนของหม้อไอน้ำนี้มีน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการสันดาปค่าความร้อนต่อ หน่วยของน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 42,384 kJ/h โดยมีน้ำอุณหภูมิ 80 °C จำนวน 1,600 kg/h เป็นพลังงานขาเข้า และพลังงานออกหลังจากผ่านหม้อไอน้ำ น้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำจำนวน 1,600 kg/h อุณหภูมิ 165 °C มีค่าเอนทัลปีของไอน้ำคือ 2,763.5 kJ/h และในส่วนหม้อไอน้ำนี้ยังแสดงถึงวิธีการคำนวณพลังงานของอากาศร้อนทั้งในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอีกด้วยดังนี้



รูป ก.2 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนหม้อไอน้ำ

### Mass Balance ของน้ำ

$$\text{mass input} = \text{mass output} + \text{mass accumulation}$$

$$1,600 = 1,600 + 0$$

$$1,600 = 1,600 \text{ kg}$$

## Energy Balance

พลังงานขาเข้า

$$\begin{aligned} H_{in,น้ำ} &= mc_p \Delta T \\ &= 1,600 \times 4.19 \times (80-25) \\ &= 3.69 \times 10^5 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{input,diesel} &= \text{Heating Value} \times m \\ &= 42,384 \times 142.38 \\ &= 6.03 \times 10^6 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

พลังงานขาออก

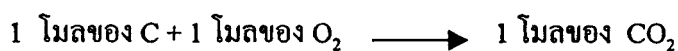
$$\begin{aligned} H_{out,steam} &= \text{enthalpy} \times m \\ &= 2,763.5 \times 1,600 \\ &= 4.42 \times 10^6 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

การหาปริมาณอากาศที่พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับน้ำมันดีเซล จากข้อมูลน้ำมันดีเซลประกอบด้วย C = 86 % , H = 13.2 % , S = 0.8 %

วิธีการหาจำนวน O<sub>2</sub> ทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จากปฏิกิริยาเคมีแล้วนำจำนวน O<sub>2</sub> ทั้งหมดเทียบหาจำนวนหรือปริมาณอากาศอีกค่อหนึ่ง



จาก (1) สำหรับคาร์บอน

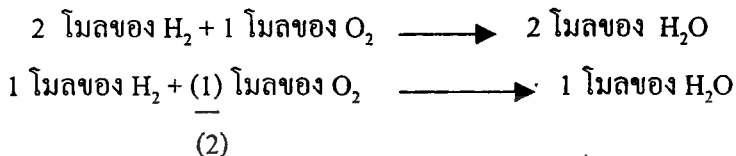


$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{O_2}{C} = \frac{32}{12} = 2.667 \text{ kg } O_2/\text{kg } C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{\text{CO}_2}{\text{C}} = \frac{44}{12} = 3.667 \text{ kg CO}_2/\text{kg C}$$

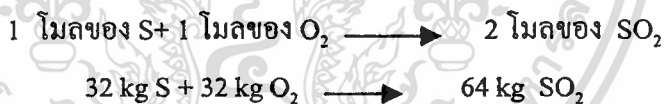
จาก (2) สำหรับไฮโดรเจน



$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{\text{O}_2}{\text{H}} = \frac{16}{2} = 8.0 \text{ kg O}_2/\text{kg H}_2$$

$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}} = \frac{18}{2} = 9.0 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg H}_2$$

จาก (3) สำหรับกำมะถัน



$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{\text{O}_2}{\text{S}} = \frac{32}{32} = 1.0 \text{ kg O}_2/\text{kg S}_2$$

$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{\text{SO}_2}{\text{S}} = \frac{64}{32} = 2.0 \text{ kg SO}_2/\text{kg S}$$

ดังนั้นจำนวน O<sub>2</sub> ที่ใช้ในการเผาไหม้

$$= [(\text{O}_2 \text{ ที่ใช้ในการเผาไหม้กับ C}) + (\text{O}_2 \text{ ที่ใช้ในการเผาไหม้กับ H}_2) + (\text{O}_2 \text{ ที่ใช้ในการเผาไหม้กับ S})]$$

$$= \left[ \frac{(\text{อัตราส่วนของ } O_2)(C \text{ ในเชื้อเพลิง})}{(\text{อัตราส่วนของ } C)} \right] + \left[ \frac{(\text{อัตราส่วนของ } O_2)(H \text{ ในเชื้อเพลิง})}{(\text{อัตราส่วนของ } H)} \right] + \left[ \frac{(\text{อัตราส่วนของ } O_2)(S \text{ ในเชื้อเพลิง})}{(\text{อัตราส่วนของ } S)} \right]$$

$$= (2.667 \times 0.86) + (8 \times 0.132) + (1 \times 0.008)$$

$$= 3.36 \text{ kg } O_2 / \text{kg คีเซล}$$

จำนวนอากาศที่พอดีในการเผาไหม้น้ำมันดีเซลให้สมบูรณ์

$$= \frac{(\text{จำนวน } O_2 \text{ บริสุทธิ์ที่ใช้})}{(\text{องค์ประกอบโดยมวลของ } O_2 \text{ ในอากาศ})}$$

$$= \frac{(3.36)}{(0.23)}$$

$$= 14.61 \text{ kg อากาศ / kg น้ำมันดีเซล}$$

ดังนั้น 1 kg น้ำมันดีเซล จะใช้อากาศ 14.61 kg อากาศ / kg น้ำมันดีเซล

142.38 kg น้ำมันดีเซล จะใช้อากาศ  $14.61 \times 142.38 = 2.08 \times 10^3 \text{ kg}$

$$H_{\text{out, flue gas}} = mc_p \Delta T$$

$$= 2.08 \times 10^3 \times 1.026 \times (230-25)$$

$$= 4.37 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$\Sigma \text{ input} = \Sigma \text{ output} + \text{loss}$$

$$(3.69 \times 10^5) + (6.03 \times 10^6) = (4.42 \times 10^6) + (4.37 \times 10^5) + (1.54 \times 10^6)$$

$$6.40 \times 10^6 = 6.40 \times 10^6$$

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{(\Sigma \text{ output})}{(\Sigma \text{ input})} \times 100$$

$$= \frac{(4.86 \times 10^6)}{(6.40 \times 10^6)} \times 100$$

$$= 75.94 \%$$

$$\begin{aligned}\% \text{ loss} &= \frac{(\sum \text{input} - \sum \text{output}) \times 100}{(\sum \text{input})} \\ &= 24.06 \%\end{aligned}$$

### Exergy Balance

$$\begin{aligned}E_{\text{input, water}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= (3.69 \times 10^5) - \frac{(298.15 \times 3.69 \times 10^5)}{(353.15)} \\ &= 5.74 \times 10^4 \text{ kJ/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_{\text{input, diesel}} &= \text{LHV} [1.0038 + (0.1365 \times \frac{\text{(H)}}{\text{(C)}}) + (0.0308 \times \frac{\text{(O)}}{\text{(C)}}) + (0.0104 \times \frac{\text{(S)}}{\text{(C)}})] \times m \\ &= 43,232 \times 142.38 \\ &= 6.16 \times 10^6 \text{ kJ/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_{\text{output, steam}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= (4.42 \times 10^6) - \frac{(298.15 \times 4.42 \times 10^6)}{(438.15)} \\ &= 1.41 \times 10^6 \text{ kJ/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_{\text{output, flue gas}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= (4.37 \times 10^5) - \frac{(298.15 \times 4.37 \times 10^5)}{(503.15)} \\ &= 1.78 \times 10^5 \text{ kJ/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum \text{input} &= \sum \text{output} + \text{loss} \\ (5.74 \times 10^4) + (6.16 \times 10^6) &= (1.41 \times 10^6) + (1.78 \times 10^5) + (4.63 \times 10^6) \\ 6.22 \times 10^6 &= 6.22 \times 10^6\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

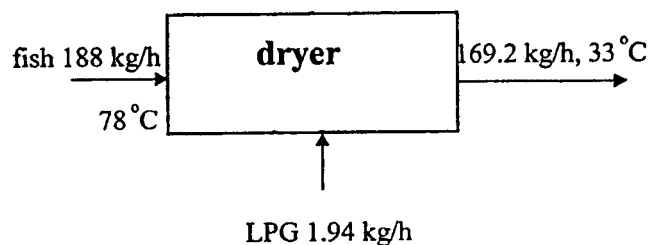
$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{(\sum \text{output})}{(\sum \text{input})} \times 100 \\
 &= \frac{(1.59 \times 10^6)}{(6.22 \times 10^6)} \times 100 \\
 &= 25.56 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\text{output,loss}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\
 &= 1.54 \times 10^6 - \frac{(298.15 \times 1.54 \times 10^6)}{(473.15)} \\
 &= 5.70 \times 10^5 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ loss} &= \frac{(\sum \text{input} - \sum \text{output})}{(\sum \text{input})} \times 100 \\
 &= 74.44\%
 \end{aligned}$$

### ก.3 ส่วนตู้อบ (drying unit)

ส่วนตู้อบเป็นส่วนของกระบวนการผลิตอาหารว่างจากปลา ขนาดของตู้กว้าง 2.33 ม. ยาว 6.44 ม. สูง 4.50 ม ทำจากเหล็กและหุ้มฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้ว ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์พลังงานที่สูญเสียไปผนังเตาด้วย และค่าความร้อนต่ำของก๊าซเหลวมี่ค่า 45,606 kJ/kg ผลหลังจากการวิเคราะห์มีดังนี้



รูปที่ ก.3 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนตู้อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Mass Balance ของปลา

$$\text{mass input} = \text{mass output} + \text{mass accumulatoin}$$

$$236 = 169.2 + 18.8 + 0$$

$$236 = 236 \text{ kg}$$

## Energy Balance

พลังงานขาเข้า

$$\begin{aligned} H_{\text{in,ปลา}} &= mc_p \Delta T \\ &= 188 \times 3.433 \times (78-25) \\ &= 3.42 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{input,LPG}} &= \text{Heating Value} \times m \\ &= 45,606 \times 1.94 \\ &= 8.85 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

พลังงานขาออก

$$\begin{aligned} H_{\text{out,ปลา}} &= mc_p \Delta T \\ &= 169.2 \times 3.433 \times (33-25) \\ &= 4.65 \times 10^3 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{output,vaporized water}} &= \text{Latent Heat} \times m \\ &= 2,250 \times 18.8 \\ &= 4.23 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\Sigma \text{input} = \Sigma \text{output} + \text{loss}$$

$$(3.42 \times 10^4) + (8.85 \times 10^4) = (4.65 \times 10^3) + (4.23 \times 10^4) + (7.60 \times 10^4)$$

$$1.23 \times 10^5 = 1.23 \times 10^5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{(\sum \text{output})}{(\sum \text{input})} \times 100 \\ &= \frac{(4.70 \times 10^4)}{(1.23 \times 10^5)} \times 100 \\ &= 38.21 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ loss} &= \left\{ \frac{(\sum \text{input} - \sum \text{output})}{(\sum \text{input})} \right\} \times 100 \\ &= 61.79 \% \end{aligned}$$

### Exergy Balance

$$\begin{aligned} E_{\text{input, ปกติ}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= (3.42 \times 10^4) - \frac{(298.15 \times (3.42 \times 10^4))}{(351.15)} \\ &= 5.16 \times 10^3 \text{ kJ/h} \\ E_{\text{input, LPG}} &= \text{LHV} [1.0038 + (0.1365 \times \frac{\text{(H)}}{\text{(C)}}) + (0.0308 \times \frac{\text{(O)}}{\text{(C)}}) + (0.0104 \times \frac{\text{(S)}}{\text{(C)}})] \times m \\ &= 46,974 \times 1.94 \\ &= 9.11 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{output, ปกติ}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= 4.65 \times 10^3 - \frac{(298.15 \times (4.65 \times 10^3))}{(306.15)} \\ &= 121.51 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{output, vaporized water}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= (4.23 \times 10^4) - \frac{(298.15 \times 4.23 \times 10^4)}{(373.15)} \\ &= 8.50 \times 10^3 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไปว่ากรณิดางทั้งสี่ ลึกทั้งห้ากรณิดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Sigma \text{ input} &= \Sigma \text{ output} + \text{loss} \\ (5.16 \times 10^3) + (9.11 \times 10^4) &= (8.50 \times 10^3) + (121.51) + (8.77 \times 10^4) \\ 9.63 \times 10^4 &= 9.63 \times 10^4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{(\Sigma \text{ output})}{(\Sigma \text{ input})} \times 100 \\ &= \frac{(8.62 \times 10^3)}{(9.63 \times 10^4)} \times 100 \\ &= 8.95 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_{\text{output,loss}} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\ &= 7.60 \times 10^4 - \frac{(298.15 \times 7.60 \times 10^4)}{(312.15)} \\ &= 3.41 \times 10^3 \text{ kJ/h} \\ \% \text{ loss} &= \frac{(\Sigma \text{ input} - \Sigma \text{ output})}{\Sigma \text{ input}} \times 100 \\ &= 91.05 \%\end{aligned}$$

การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนโทรปีของพลังงานที่สูญเสียไปกับผนังเตาหาได้ดังนี้

จากสูตร  $Q = UA \Delta T$

$$\begin{aligned}\frac{1}{U} &= \frac{(X)}{(K_{\text{stainless}})} + \frac{(X)}{(K_{\text{foam}})} + \frac{(X)}{(K_{\text{stainless}})} \\ &= \frac{(3.5 \times 10^{-3})}{(47.6)} + \frac{(2.54 \times 10^{-2} \times 3)}{(0.035)} + \frac{(2.2 \times 10^{-3})}{(47.6)} \\ &= 2.18 \\ U &= 0.46 \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-1}\end{aligned}$$

ขนาดของตู้กว้าง x ยาว x สูง คือ 2.33 x 6.44 x 4.50 m มีพื้นที่ผิวทั้ง 5 ด้าน ไม่รวมพื้นที่ด้านบน

ถ้างมีค่าเท่ากับ 93.94 m<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{แทนค่า } Q &= UA \Delta T \\
 &= 0.46 \times 93.94 \times (78-43) \\
 &= 1.51 \text{ kW} \\
 &= 5.43 \times 10^3 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

ในส่วนการคำนวณของเอ็กเซอร์ยีใช้สูตร

$$\begin{aligned}
 \text{exergy} &= \frac{[1-(T_0)] Q}{T} \\
 &= \frac{[1-(298.15)]}{(316.15)} \times (5.43 \times 10^3) \\
 &= 309.16 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

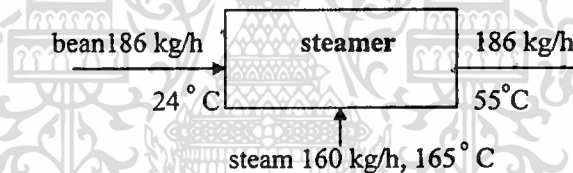


## ภาคผนวก ข

## การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทัลปีของกระบวนการผลิต ถั่วอบกรอบที่ดัดแปลง

### ข.1 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทัลปีของตู้หนึ่ง (steaming unit)

โดยผลการวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทัลปีของตู้หนึ่ง โดยมีปริมาณถั่วเข้า 186 kg/h อุณหภูมิ 24 °C ได้รับความร้อนจากไอน้ำปริมาณ 160 kg/h อุณหภูมิ 165 °C และไอน้ำส่วนนี้ไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ถั่วที่ออกมาจากหม้อหนึ่งจะมีอุณหภูมิ 55 °C ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงสมดุลมวลของส่วนตู้หนึ่ง

ในส่วนนี้ไม่มีการนำเอาไอน้ำกลับมาใช้ใหม่ จึงมีการสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งและมีประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเอนทัลปีมีค่า 2.33 % และการวิเคราะห์ด้วยเอนทัลปีมีค่า 0.67 % ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ดังนี้

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. bean	-344.1	0	1. bean	$1.03 \times 10^4$	2.3
2. steam	$4.42 \times 10^5$	100.0	2. loss	$4.32 \times 10^5$	97.7
$\Sigma H$	$4.42 \times 10^5$	100.0	$\Sigma H$	$4.42 \times 10^5$	100.0

$$\text{eff}_e = \frac{(1.03 \times 10^4)}{(4.42 \times 10^5)} \times 100$$

$$= 2.33 \%$$

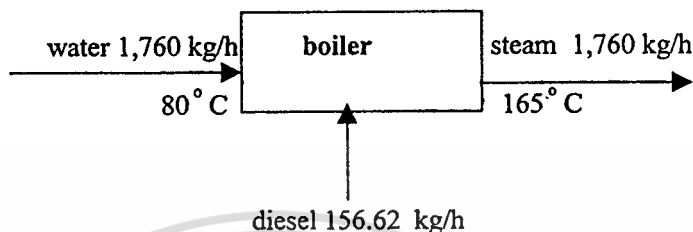
ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบ

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. bean	1.16	0.0	1. bean	941.64	0.6
2. steam	$1.41 \times 10^5$	100.0	2. loss	$1.28 \times 10^5$	90.8
			3. irreversibility	$1.21 \times 10^4$	8.6
$\Sigma Ex$	$1.41 \times 10^5$	100.0	$\Sigma Ex$	$1.41 \times 10^5$	100.00

$$\text{eff}_e = \frac{(941.64)}{(1.41 \times 10^5)} \times 100$$

$$= 0.67 \%$$

ข.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีของหม้อไอน้ำ (boiler unit) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตตัวประกอบที่ดัดแปลง



รูปที่ ข.2 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตตัวประกอบที่ดัดแปลง

หม้อไอน้ำซึ่งใช้น้ำมันดีเซลปริมาณ 156.62 kg/h เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เพื่อให้ น้ำ 1,760 kg/h ที่อุณหภูมิ 80° C เป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 165° C ความดัน 7 บาร์ ปริมาณ 1,760 kg/h ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคิดด้วยเอนทัลปีมีค่าเท่ากับ 75.74 % แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอนทาลปีมีค่าเท่ากับ 25.62 % ซึ่งประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำทั้งก่อนและหลังกระบวนการดัดแปลงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ข.3 แสดงการคำนวณเอนทาลปีในตารางที่ ข.4

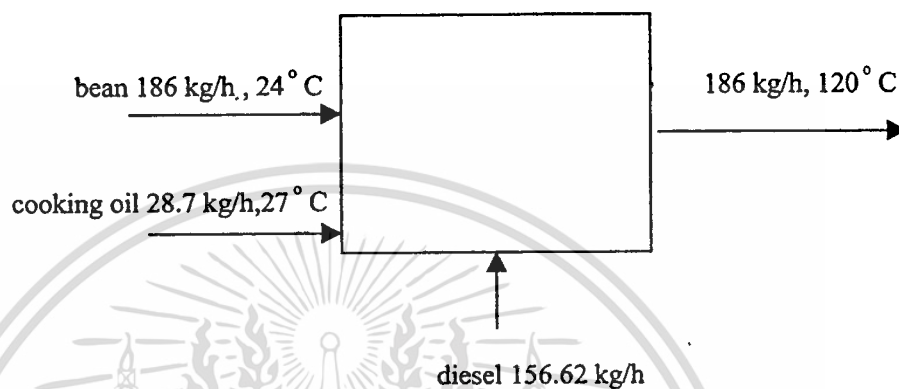
ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตด้วยรอบตัดแปลง

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. water	$4.06 \times 10^5$	5.8	1. steam	$4.86 \times 10^6$	68.9
2. fuel	$6.64 \times 10^6$	94.2	2. flue gas	$4.82 \times 10^5$	6.8
			3. loss	$1.71 \times 10^6$	24.3
$\Sigma H$	$7.05 \times 10^6$	100.0	$\Sigma H$	$7.05 \times 10^6$	100.0
			$\text{eff}_1 = \frac{(5.34 \times 10^6)}{(7.05 \times 10^6)} \times 100$ $= 75.74 \%$		

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของส่วนหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตด้วยรอบตัดแปลง

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. water	$6.32 \times 10^4$	0.9	1. steam	$1.55 \times 10^6$	22.7
2. fuel	$6.77 \times 10^6$	99.1	2. flue gas	$1.96 \times 10^5$	2.9
			3. loss	$6.32 \times 10^5$	9.2
			4. irreversibility	$4.45 \times 10^6$	65.2
$\Sigma Ex$	$6.83 \times 10^6$	100.0	$\Sigma Ex$	$6.83 \times 10^6$	100.0
			$\text{eff}_e = \frac{(1.75 \times 10^6)}{(6.83 \times 10^6)} \times 100$ $= 25.62 \%$		

ข.3 แสดงการวิเคราะห์เอนทัลปีและเอนทาลปีของผลรวมกระบวนการผลิตย่อยที่ 1  
ของกระบวนการถั่วอบกรอบตัดแปลง



รูปที่ ข.3 แผนภาพแสดงสมดุลมวลของผลรวมของกระบวนการผลิตถั่วอบกรอบที่ตัดแปลง

วัตถุดิบต่างๆ จะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะมีปริมาณน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นในปริมาณมากขึ้นเป็น 156.62 kg/h และปริมาณไอน้ำที่ผลิตก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบ  
กรอบที่ตัดแปลง

enthalpy input	kJ/h	%	enthalpy output	kJ/h	%
1. bean	-344.1	0.0	1. bean	$3.27 \times 10^4$	0.5
2. cooking oil	110.782	0.0	2. flue gas	$4.82 \times 10^5$	7.3
3. fuel	$6.64 \times 10^6$	100.0	3. loss	$6.13 \times 10^6$	92.2
$\Sigma H$	$6.64 \times 10^6$	100.0	$\Sigma H$	$6.64 \times 10^6$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(5.15 \times 10^5)}{(6.64 \times 10^6)} \times 100$ $= 7.76 \%$					

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีผลรวมกระบวนการย่อยที่ 1 ในกระบวนการผลิตถั่วอบ  
กรอบที่ตัดแปลง

exergy input	kJ/h	%	exergy output	kJ/h	%
1. bean	1.16	0.0	1. bean	$7.90 \times 10^3$	0.1
2. cooking oil	0.74	0.0	2. flue gas	$1.96 \times 10^5$	2.9
3. fuel	$6.77 \times 10^6$	100.0	3. loss	$1.86 \times 10^6$	27.5
			4.irreversibility	$4.71 \times 10^6$	69.5
$\Sigma Ex$	$6.77 \times 10^6$	100.0	$\Sigma Ex$	$6.77 \times 10^6$	100.0
$\text{eff}_c = \frac{(2.07 \times 10^5)}{(6.77 \times 10^6)} \times 100$ $= 3.06 \%$					

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณสำหรับการเขียนกราฟ EUD

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับการเขียนกราฟ EUD ของส่วนไล่ความชื้น ในส่วนของผู้ให้พลังงาน (energy donating process) คือ การเผาไหม้ก๊าซเหลวที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  โดยคิดค่าระดับพลังงาน (A) ตามสมการที่ (26) ดังนี้

จากสูตร

$$A = 1 - \frac{(T_0)}{(T)}$$
$$= 1 - \frac{(298.15)}{(1,373.15)}$$
$$= 0.78$$

มีค่าพลังงาน  $H_{\text{input,LPG}} = \text{Heating Value} \times m$

$$= 45,606 \times 11.63$$
$$= 5.30 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

ในส่วนของผู้รับพลังงาน (energy acceptor) คือ ส่วนของปลา ในส่วนไล่ความชื้น เมื่อปลาได้รับความร้อนจนกระทั่งถึง  $100^{\circ}\text{C}$  น้ำที่อยู่ภายในวัตถุดิบจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยออกไป จากการทำสมดุลมวลพบว่าในส่วนนี้มีน้ำระเหยปริมาณ  $48 \text{ kg/h}$  จึงนำมาคิดหาค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอโดยใช้ค่าความร้อนแฝงของน้ำ  $2,250 \text{ kJ/kg}$  และในส่วนพลังงานความร้อนสัมผัส (sensible heat) จะคิดโดยใช้สูตรเหมือนกับการคิดพลังงานทั่วไปโดยเทียบอุณหภูมิขณะนั้นกับอุณหภูมิมาตรฐาน แล้วนำมาเขียนกราฟโดยการคำนวณมีดังนี้

ปลาอุณหภูมิที่  $14^{\circ}\text{C}$  จากสูตรสามารถนำมาคิดค่าระดับพลังงานได้โดยใช้สูตร

$$A = 1 - \frac{(T_0)}{(T)}$$
$$= 1 - \frac{(298.15)}{(287.15)}$$
$$= -0.04$$

หลังจากปลาได้รับความร้อนไปจนกระทั่ง  $100^{\circ}\text{C}$  จะทำให้ปลามีระดับพลังงานอยู่ที่

$$\begin{aligned} A &= 1 - \frac{(T_0)}{(T)} \\ &= 1 - \frac{(298.15)}{(373.15)} \\ &= 0.2 \end{aligned}$$

มีค่าพลังงานเมื่อเทียบกับ อุณหภูมิอ้างอิง

$$\begin{aligned} H &= mc_p \Delta T \\ &= 236 \times 3.433 \times (100-25) \\ &= 6.08 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

หลังจากปลามีอุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  แล้วน้ำที่อยู่ภายในจะระเหยออกมา สามารถคิดพลังงานได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} H &= m \times \text{latent heat} \\ &= 48 \times 2,250 \\ &= 1.08 \times 10^5 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

ปลาที่อุณหภูมิ  $78^{\circ}\text{C}$  จะมีระดับพลังงานอยู่ที่

$$\begin{aligned} A &= 1 - \frac{(T_0)}{(T)} \\ &= 1 - \frac{(298.15)}{(351.15)} \\ &= 0.15 \end{aligned}$$

มีปริมาณพลังงาน

$$\begin{aligned} H &= mc_p \Delta T \\ &= 188 \times 3.433 \times (78-25) \\ &= 3.42 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

จากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟให้ค่าแกน X เป็นปริมาณพลังงาน ในส่วนแกน Y เขียน

ระดับพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เอกสารนี้เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## การปรับปรุงส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณการสูญเสียพลังงานกับอุปกรณ์ในส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน(heat exchanger unit) พร้อมทั้งแนวทางในการปรับปรุงและราคาการลงทุน โดยส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนมีรัศมี 0.28 เมตร ทำจากเหล็กหนา 1 นิ้ว ยาว 3 เมตร มีการสูญเสียพลังงานไปกับอุปกรณ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร } Q &= \frac{[2\pi L\lambda(T_i - T_o)]}{[\ln(r_o/r_i)]} \\
 &= \frac{[2\pi \cdot 3 \cdot 44.9 \cdot (438 - 340)]}{\ln \frac{0.28}{0.2546}} \\
 &= 873.07 \text{ kW} \\
 &= 3.14 \times 10^6 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

จากข้อมูลพบว่าในส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการสูญเสียพลังงานทั้งหมด  $3.29 \times 10^6$  kJ/h ดังนั้นการสูญเสียพลังงานไปกับอุปกรณ์มีค่า  $3.14 \times 10^6$  kJ/h คิดเป็น 95.44 % ของปริมาณการสูญเสียทั้งหมด ดังนั้นจึงเสนอแนวคิดโดยการติดตั้งฉนวนใยแก้ว (fiber glass) หนา 3 นิ้ว มาหุ้มโดยรอบอุปกรณ์ วิเคราะห์พบว่าหลังติดตั้งฉนวนใยแก้วแล้วอุณหภูมิภายนอกจากเดิม  $67^\circ\text{C}$  จะลดลงเหลือเพียง  $44.415^\circ\text{C}$  ดังการคำนวณดังต่อไปนี้

อุณหภูมิภายในอุปกรณ์  $329^\circ\text{F}$  ภายนอก  $152.67^\circ\text{F}$  อากาศภายนอก  $100.4^\circ\text{F}$

สมมติค่า  $t_{ms} = 110$  เพื่อหาค่า K

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(t_h + t_c)}{2} \\
 &= \frac{(390 + 110)}{2} \\
 &= 219.5^\circ\text{F}
 \end{aligned}$$

ค่า K ที่  $200^\circ\text{F} = 0.30 \text{ Btu-in/hft}^2\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_s$  ของอะลูมิเนียมที่ใช้หุ้มภายนอก  $t_s - t_a = 110 - 100.4$

$$= 10$$

หาค่า  $R_s$  จากตาราง = 0.90

$$R_1 = \frac{\text{ความหนาของฉนวน}}$$

K

$$= \frac{3}{0.30}$$

$$= 10 \text{ hft}^2\text{F/Btu}$$

$$Q_r = \frac{(T_i - t_s)}{(R_1 - R_s)}$$

$$= \frac{(329 - 100.4)}{(0.90 - 10)}$$

$$= 20.97 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$= 20.97 \text{ Btu/h ft}^2$$

$$Q_p = \frac{Q_r (2\pi r_2)}{12}$$

$$= \frac{20.97 \times 2 \times \pi \times 1.169}{12}$$

$$= 12.83 \text{ Btu/hft}$$

$$= 12.83 \text{ Btu/hft}$$

$$T_s = R_s Q_p + T_a$$

$$= (0.90 \times 12.83) + 100.4$$

$$= 111.947 \text{ }^\circ\text{F} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$$

$\therefore$  อุณหภูมิที่ผิวฉนวน  $44 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{tm เพื่อตรวจสอบ } \frac{(111.947 + 329)}{2} = 220.4735$$

2

เมื่อ  $T_i$  = อุณหภูมิภายนอกท่อ (K)

$T_a$  = อุณหภูมิภายในท่อ (K)

$r_a$  = รัศมีภายนอกท่อ (m)

$r_i$  = รัศมีภายในท่อ (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_{ms}$  = อุณหภูมิสมมติ (°F)

$t_s$  = อุณหภูมิพื้นผิวของฉนวน (°F)

$t_a$  = อุณหภูมิอากาศ (°F)

$R_s$  = ความต้านทานที่พื้นผิว ( $hft^2F/Btu$ )

$R_i$  = ความต้านทานความร้อนของฉนวน ( $hft^2F/Btu$ )

$Q_F$  = ความร้อนที่ส่งผ่านระนาบ ( $Btu/hft^2$ )

$Q_p$  = ความร้อนที่ส่งผ่านท่อ ( $Btu/h \text{ lin ft}$ )

$K$  = ค่าการนำความร้อนของฉนวน ปกติจะหาตรงอุณหภูมิเฉลี่ย ( $Btu-in/hft^2$ )

หลังการติดตั้งฉนวนใยแก้วแล้ว โดยมีแผ่นเหล็กอะลูมิเนียม (หนา 0.016 นิ้ว) ปิด พบว่า  
จะมีอุณหภูมิผิวภายนอกเท่ากับ  $44^\circ C$  จึงนำมาคำนวณพลังงานที่สามารถเก็บสะสมได้

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2\pi L(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\lambda_3} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \\ &= \frac{2\pi \cdot 3 \cdot (165 - 44)}{\frac{1}{44.9} \ln\left(\frac{0.28}{0.2546}\right) + \frac{1}{0.058} \ln\left(\frac{0.3562}{0.28}\right) + \frac{1}{204} \ln\left(\frac{0.3566}{0.3562}\right)} \\ &= 0.55 \text{ kW} \\ &= 1.979 \times 10^3 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

ก่อนหุ้มฉนวนพลังงานที่ออกจากอุปกรณ์  $3.14 \times 10^6$  kJ/h หลังจากหุ้มฉนวนแล้วพลังงานที่ออกมา มีค่า  $1.979 \times 10^3$  kJ/h ดังนั้นพลังงานที่เก็บได้คิดเป็น  $3.138 \times 10^6$  kJ/h หรือ 99.94 %  
ราคาในการติดตั้งขนาดรัศมีท่อ 0.28 เมตร ยาว 3 เมตร ราคาวัสดุอุปกรณ์รวมค่าติดตั้ง 3,280 บาท ในส่วนนี้สามารถประหยัดพลังงานของเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ของน้ำมัน ได้คือ

$$H = \text{heating value} \times m$$

$$3.138 \times 10^6 = 42,384 \times m$$

$$m = 74.04 \text{ kg/h}$$

สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 74.04 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ  $6.20 \times 10^5$  ลิตรต่อปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## การปรับปรุงในส่วนไล่ความชื้น (preheating unit) และส่วนย่าง (roasting unit)

### ก. การปรับปรุงส่วนไล่ความชื้น (preheating unit)

การปรับปรุงส่วนการไล่ความชื้นคำนวณหาปริมาณอากาศที่พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับก๊าซธรรมชาติ (LPG) ก๊าซธรรมชาติประกอบด้วย  $C = 38\%$ ,  $H = 17\%$ ,  $S = 0\%$   
วิธีการหาจำนวน  $O_2$  ทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จากปฏิกิริยาเคมีแล้วนำจำนวน  $O_2$  ทั้งหมดเทียบหาจำนวนหรือปริมาณอากาศอีกต่อหนึ่ง



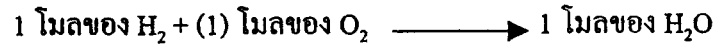
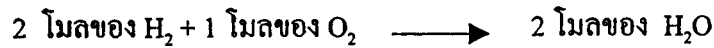
จาก (1) สำหรับคาร์บอน



$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{O_2}{C} = \frac{32}{12} = 2.667 \text{ kg } O_2/\text{kg } C$$

$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{CO_2}{C} = \frac{44}{12} = 3.667 \text{ kg } CO_2/\text{kg } C$$

จาก (2) สำหรับไฮโดรเจน



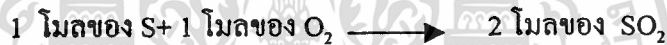
(2)



$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{O_2}{H} = \frac{16}{2} = 8.0 \text{ kg } O_2/\text{kg } H_2$$

$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{H_2O}{H} = \frac{18}{2} = 9.0 \text{ kg } H_2O/\text{kg } H_2$$

จาก (3) สำหรับกำมะถัน



$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{O_2}{S} = \frac{32}{32} = 1.0 \text{ kg } O_2/\text{kg } S_2$$

$$\text{อัตราส่วนของ } \frac{SO_2}{S} = \frac{64}{32} = 2.0 \text{ kg } SO_2/\text{kg } S$$

ดังนั้นจำนวน  $O_2$  ที่ใช้ในการเผาไหม้

$$= [(O_2 \text{ ที่ใช้ในการเผาไหม้กับ } C) + (O_2 \text{ ที่ใช้ในการเผาไหม้กับ } H_2) + (O_2 \text{ ที่ใช้ในการเผาไหม้กับ } S)]$$

$$= \left[ \frac{(\text{อัตราส่วนของ } O_2)}{(\text{อัตราส่วนของ } C)} (C \text{ ในเชื้อเพลิง}) \right] + \left[ \frac{(\text{อัตราส่วนของ } O_2)}{(\text{อัตราส่วนของ } H)} (H \text{ ในเชื้อเพลิง}) \right] +$$

$$\left[ \frac{(\text{อัตราส่วนของ } O_2)}{(\text{อัตราส่วนของ } S)} (S \text{ ในเชื้อเพลิง}) \right]$$

$$= (2.667 \times 0.83) + (8 \times 0.17) + (1 \times 0)$$

$$= 3.574 \text{ kg } O_2/\text{kg } LPG$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & \text{จำนวนอากาศที่พอดีในการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (LPG) ให้สมบูรณ์} \\
 & = \frac{(\text{จำนวน } O_2 \text{ บริสุทธิ์ที่ใช้})}{(\text{องค์ประกอบโดยมวลของ } O_2 \text{ ในอากาศ})} \\
 & = \frac{(3.574)}{(0.23)} \\
 & = 15.54 \text{ kg อากาศ / kg LPG}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น 1 kg LPG จะใช้อากาศ 15.54 kg อากาศ / kg LPG

$$11.63 \text{ kg LPG/h จะใช้อากาศ } 15.54 \times 11.63 = 180.7302 \text{ kg อากาศ}$$

$$\begin{aligned}
 H_{\text{out, heat loss}} &= mc_p \Delta T \\
 &= 180.7302 \times 1.026 \times (150-25) \\
 &= 2.32 \times 10^4 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

มีการสูญเสียจากหน่วยการผลิตนี้ทั้งหมด  $3.79 \times 10^5$  kJ/h ดังนั้นอากาศร้อนทิ้งที่เสียไปคิดเทียบได้เป็น 6.12 % ของพลังงานที่ทิ้งทั้งหมด หลังจากทราบว่าพลังงานความร้อนสูญเสียไปกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ว่ามีปริมาณเท่าไร ต่อจากนั้นทำการปรับปรุงในส่วนนี้และวิเคราะห์ผลโดยการติดตั้งแผ่นสังกะสี No.24 กันทั้ง 4 ด้านของอุปกรณ์จะสามารถประหยัดเชื้อเพลิง โดยวิเคราะห์จากการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร } Q = hA\Delta T$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดย } h &= \frac{\lambda c}{l} \frac{[\rho^2 \beta g (\Delta T)]^m}{\mu^2} \frac{[c_p \mu]^n}{\lambda} \\
 &= \frac{(0.027 \times 0.53)}{(2.6)} \frac{[(2.6)^3 (0.8195)^2 (0.0024) (9.8) (423-311)]^{0.25}}{(23.683 \times 10^{-6})^2} \frac{(1,028.5 \times 23.683 \times 10^{-6})^{0.25}}{(0.027)} \\
 &= 9.324 \text{ kJ/m}^2 \text{ K h}
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $Q$  = การถ่ายเทพลังงานความร้อนแบบการพา (kJ/h)

$h$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา (kcal/m<sup>2</sup>hC)

$A$  = พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน (m<sup>2</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

$\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวสองด้านของชั้นขอบเขต( $^{\circ}C$ )

$\lambda$  = การนำความร้อนของอากาศ (kcal/mh $^{\circ}C$ )

$l$  = ความยาวตัวแทนของระบบ (m)

$c, m$  และ  $n$  = กว้างค่าคงที่

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m $^3$ )

$\mu$  = ความหนืด (poise)

$g$  = ความเร่งภายใต้แรงดึงดูดของโลก (m/h $^2$ )

$c_p$  = ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของการไหล (kcal/kg $^{\circ}C$ )

$\beta$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (1/ $^{\circ}C$ )

พื้นที่ของรอบข้างที่เสริมมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 0.7 x 2.6 x 0.8 m

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสูตร} \quad Q &= hA\Delta T \\ &= 9.324 \times 5.28 \times (423-311) \\ &= 5,513.84 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

ถ้าหากกันขอบด้านข้างลงมาตามขนาดด้านบน ภายใน 1 ชั่วโมงการทำงานจะสามารถประหยัดพลังงานได้ 5,513.84 kJ/h ประหยัดเชื้อเพลิงได้

$$H = \text{heating value} \times m$$

$$5,513.84 = 45,606 \times m$$

$$m = 0.12 \text{ kg/h}$$

ภายใน 1 ชั่วโมงประหยัดได้ 0.12 kg ภายใน 1 ปีสามารถประหยัดได้ 864 kg คิดเป็นเงิน 6,048บาทต่อปีต่อ 1 แถวการผลิต

ราคาค่าวัสดุอุปกรณ์และค่าติดตั้งอุปกรณ์ในการปรับปรุงโดยใช้สังกะสีกันเสริมด้านข้างในส่วนของใต้ความชื้น และราคาค่าติดตั้งรวมวัสดุอุปกรณ์ของท่อที่ต่อมาจากส่วนข้างเข้าส่วนใต้ความชื้น

$$\text{พื้นที่ที่ต่อเติมทั้งหมด} = 5.28 \text{ m}^2$$

สังกะสี No.24 ขนาด 4 x 8 ฟุต ราคา 384 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานหอการค้าไทยที่ขอนแก่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สังกะสีทั้งหมด 2 แผ่น ราคา 768 บาทและรวมค่าวัสดุและราคาค่าติดตั้งรวมเป็นเงินทั้งสิ้น 1,098.24 บาท

ในส่วนของการทำท่อที่ต่อจากปลายปล่องเตาข้างเพื่อนำความร้อนทิ้งมาไล่ความชื้น ท่อทำจากสังกะสีและหุ้มฉนวนหนา 3 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 16 นิ้ว ปลายท่อกับพัดลมดูดอากาศ (blower) แบบบอยโง่ง สามารถคิดการประหยัดพลังงานและคิดค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้ดังนี้

อากาศร้อนทิ้งที่สูญเสียมาจากเตาข้างมีค่า 9,093.84 kJ/h นำมาใช้ในการประหยัดเชื้อเพลิงของส่วนไล่ความชื้นได้คือ

$H = \text{heating value} \times m$

$$9,093.84 = 45,606 \times m$$

$$= 0.20 \text{ kg/h}$$

สามารถประหยัดได้ 0.20 กิโลกรัมต่อชั่วโมงหรือ 1,440 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นเงิน 10,800 บาท และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ท่อทั้งหมด} &= 2\pi rL \\ &= 2\pi (8 \times 2.54 \times 10^{-2} \text{ m}) \times 16 \\ &= 20.43 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ใช้สังกะสีทั้งหมด 7 แผ่น ราคา 2,688 บาท

ราคาค่าแรงและวัสดุ 3,843.84 บาท

ค่าฉนวนใยแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 นิ้ว หนา 3 นิ้ว ยาว 16 เมตร ราคา 27,904 บาท  
รวมค่าติดตั้ง 36,275 บาท

ราคาพัดลมดูดอากาศ 17,344 บาท

รวมราคาทั้งหมดคิดเป็นเงิน 53,619 บาท

จากราคาค่าติดตั้งและวัสดุเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิง ทำให้ทราบว่าทางโรงงานสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 5.3 ปี

## ข. การปรับปรุงในส่วนย่าง (roasting unit)

การปรับปรุงในส่วนย่างการวิเคราะห์เหมือนกับการวิเคราะห์ในส่วนไล่ความชื้น โดยวิเคราะห์ได้ดังนี้

จากสูตร  $Q = hA\Delta T$

$$\begin{aligned} \text{โดย } h &= \frac{\lambda}{l} \frac{c}{\mu^2} \frac{[\rho^2 \beta g (\Delta T)]^m}{\lambda} [c_p \mu]^n \\ &= \frac{(0.027 \times 0.53)}{(3.8)} \frac{[(3.8)^3 (0.77)^2 (0.0023) (9.8) (445-311)]^{0.25}}{(24.688 \times 10^{-6})^2} \frac{(1,031.75 \times 24.688 \times 10^{-6})^{0.25}}{(0.027)} \\ &= 8.496 \text{ kJ/m}^2 \text{Kh} \end{aligned}$$

พื้นที่ของรอบข้างที่เสริมมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1.10 x 3.8 x 1.25 m

แทนค่าในสูตร  $Q = hA\Delta T$

$$= 8.496 \times 12.25 \times (445-311)$$

$$= 13,946.184 \text{ kJ/h}$$

ดังนั้นถ้านำสังกะสี No.24 ขนาดเดียวกันจำนวน 3 แผ่น รวมค่าวัสดุและค่าติดตั้งคิดเป็นเงินมูลค่า 1,613 บาท จะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงส่วนนี้ได้ ดังการคำนวณต่อไปนี้

$$H = \text{heating value} \times m$$

$$13,946.184 = 45,606 \times m$$

$$m = 0.31 \text{ kg/h}$$

ภายใน 1 ชั่วโมงสามารถประหยัดพลังงานไปได้ 0.31 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ภายใน 1 ปีสามารถประหยัดพลังงานได้ 2,232 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นเงิน 15,624 บาท ซึ่งถือว่าคุ้มกับการลงทุนเพราะสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 0.7 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุจิตตา เรืองรัมย์ เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2518 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารจากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ปีการศึกษา 2538 และศึกษาต่อในระดับวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารในปี พ.ศ. 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้