การประหยัดพลังงานในโรงงานโดยการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี

นางสาว รุจิรา ตาปราบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ.2531

ISBN 974-568-931-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014141

i17481183x

Energy Conservation in Plants by Exergy Analysis

Miss Ruchira Taprap

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-568-931-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประหยัดพลังงานในโรงงานโดยการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี
โดย	นางสาว รุจิรา ตาปราบ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร บุญ-หลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรพัฒน์ อรรถยุกติ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รุจิรา ตาปราบ : การประหยัดพลังงานในโรงงานโดยการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี (ENERGY CONSERVATION IN PLANTS BY EXERGY ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 164 หน้า.

งานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อนในโรงงานยิบซั่มบอร์ด ได้พิจารณาระบบของหม้อไอน้ำ, เตาอบบอร์ด, อุปกรณ์แคลไซน์แร่ (Imp. mill), เตาอบแบบหมุน โดยเน้นให้ทราบถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อน(กฎข้อที่หนึ่ง) (η) และประสิทธิผล(กฎข้อที่สอง) (ϵ) รวมทั้งการสูญเสียเนื่องจาก Irreversibility เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาการปรับปรุง เพื่อประหยัดพลังงานต่อไป จากการวิเคราะห์พบว่า หม้อไอน้ำมีค่า η = 90.90%, ϵ = 31.16% เตาอบบอร์ดมีค่า η = 45.23%, ϵ = 24.78% Imp. mill มีค่า η = 76.40%, ϵ = 16.16% และเตาอบแบบหมุนมีค่า η = 39.11%, ϵ = 6.81% และได้ทำการเสนอแนะมาตราการในการปรับปรุงกระบวนการ ดังนี้:- ทำการอุ่นบอร์ดล่วงหน้าก่อนเข้าเตาอบ จะประหยัดพลังงานในรูปของเชื้อเพลิงได้ 4.96 kg/h หรือเป็นเงิน 10,073.75 บาท/เดือน ระยะเวลาคืนทุน 7.05 ปี หุ้มฉนวนที่ตัวอุปกรณ์จะประหยัดพลังงานได้เป็นเงิน 14,076.0 บาท/ปี ระยะเวลาคืนทุน 4.6 ปี

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

RUCHIRA TAPRAP : ENERGY CONSERVATION IN PLANTS BY EXERGY ANALYSIS.
THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. DR.WIWUT TANTHAPANICHAKOON,Ed.D. 164 PP.

Thermal energy analyses of various pieces of equipment in a factory manufacturing gypsum boards were carried out. The energy analysis and exergy analysis were made for the boiler system, board dryer, impaction mill and rotary dryer. The first-law thermal efficiency and second-law effectiveness of the various apparata were found to be as follow: boiler has η = 90.90%, ϵ = 31.16%, board dryer has η = 45.23%, ϵ = 24.78%, impaction mill has η = 76.40%, ϵ = 16.16% and rotary dryer has η = 39.11%, ϵ = 6.81%. After the analysis, recommendations for energy saving were made as follows :- preheating the boards could save energy (fuel) about 4.96 kg/h or equivalent to about 10,073.75 baht/month and its pay-back period would be about 7.05 years. Insulation of apparata could save about 14,076.0 baht/year, its pay-back period being about 4.6 years.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการแก้ปัญหาในขณะทำงานวิจัย และให้ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ยิ่ง ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มสมบูรณ์

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณ อริชัย ผู้จัดการโรงงาน บริษัทไทยผลิตภัณฑ์ยิบซั่มจำกัด ที่ให้โอกาสกับผู้วิจัยในการเลือกโรงงานตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจน คุณ พงษ์ศักดิ์ วิศวกรโรงงาน คุณ ชจิพันธ์ และคุณ รุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลและข้อคิดเห็นในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ศศิธร บุญ-หลง, รศ.ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที และ รศ.ดร. วรพัฒน์ อรรถยุกติ ที่ได้กรุณาสละเวลาในการพิจารณาผลการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เช่นกัน

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ให้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ญ
คำอธิบายสัญญลักษณ์ ..... ฏ
บทที่
1 บทนำ 1
2 ทฤษฎีในการวิเคราะห์พลังงาน 2
2.1 เอ็นธัลปี (enthalpy) 3
2.2 เอ็กเซอร์ยี (exergy) 5
2.3 สมการดุลของระบบพลังงานในแง่เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยี 6
2.3.1 สมการดุลเอ็นธัลปี 6
2.3.2 สมการดุลเอ็กเซอร์ยี 7
2.4 การวิเคราะห์ระบบพลังงานโดยใช้เอ็นธัลปีและใช้เอ็กเซอร์ยี 7
2.4.1 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้เอ็นธัลปี 7
2.4.2 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้เอ็กเซอร์ยี 8
2.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบพลังงานโดยใช้กฎข้อที่หนึ่งและ
กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ 9
2.6 เอ็กเซอร์ยีของระบบสองค์ประกอบ(Multicomponent system) ..11
2.6.1 ศักยภาพเชิงเคมี 11
2.6.2 สมดุลของเฟส 13
2.6.3 ก๊าซผสมเชิงอุดมคติ 13
2.6.4 เอ็กเซอร์ยีของก๊าซผสมเชิงอุดมคติ 14
2.7 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี(Chemical exergy) 15
2.8 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของเชื้อเพลิง 19

หน้า

2.9 เอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยา 22
2.9.1 วิธีคำนวนเอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยาหลัก 23
2.10 สรุปสมการสำหรับคำนวนเอ็กเซอร์ยีของระบบต่าง ๆ 26
2.10.1 สมการคำนวนเอ็กเซอร์ยีเชิงความร้อน 26
2.10.2 สมการคำนวนเอ็กเซอร์ยีเชิงเคมี 30
3 ตัวอย่างการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีร่วมกับเอ็นธัลปีในอุตสาหกรรม 33
4 การวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีของโรงงานยิบซั่มบอร์ด 66
4.1 กระบวนการผลิตแผ่นยิบซั่มบอร์ดของโรงงาน 66
4.2 การใช้พลังงานในอดีตของโรงงาน 67
4.3 การวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีของอุปกรณ์ต่าง ๆ
ในกระบวนการผลิต 81
4.3.1 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานรอบขอบเขตรวมของโรงงาน .. 81
4.3.2 การวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีรอบเตาอบแบบหมุน .. 87
4.3.3 การวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีรอบ Imp. mill ... 92
4.3.4 การวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีของหม้อไอน้ำ 96
4.3.5 การวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีของเตาอบบอร์ด ... 100
4.4 การประเมินหาพลังงานที่สูญเสียในเส้นทางเชื่อมระหว่างอุปกรณ์
ของกระบวนการผลิต 104
4.4.1 พลังงานความร้อนที่สูญเสียที่ระบบย่อย 1 104
4.4.2 พลังงานความร้อนที่สูญเสียที่ระบบย่อย 2 106
5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยีของอุปกรณ์
ในกระบวนการผลิตยิบซั่มบอร์ด 108
5.1 ผลสรุปของการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของเตาอบแบบหมุน.. 108
5.2 ผลสรุปของการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของ Imp. mill ...111
5.3 ผลสรุปของการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของหม้อไอน้ำ 115
5.4 ผลสรุปของการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีของเตาอบบอร์ด .. 118
5.5 วิจารณ์ผลการวิเคราะห์เอ็นธัลปี 122
5.6 วิจารณ์ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี 123
5.7 สรุปประเด็นที่ได้จากการวิเคราะห์เอ็นธัลปีและเอ็กเซอร์ยี 124

หน้า

6 มาตรการปรับปรุงประสิทธิผลของการใช้พลังงานและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ 127
6.1 แนวทางการประหยัดพลังงาน 127
6.1.1 การดูแลบำรุงรักษา 127
6.1.2 ข้อเสนอแนะในขั้นตอนการดูแลรักษา 134
6.2 การปรับปรุงและแก้ไขเพื่อให้มีประสิทธิผลโดยปรับปรุงเล็กน้อย 134
6.2.1 มาตรการโดยการหุ้มฉนวนที่อุปกรณ์ 134
6.3 การปรับปรุงกระบวนการผลิต 143
7 บทสรุป 145
บรรณานุกรม 147
ภาคผนวก 149
ประวัติผู้เขียน 164

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของธาตุต่าง ๆ 17

2.2 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของสารอนินทรีย์หลัก 18

2.3 เอ็กเซอร์ยีเชิงเคมีของสารอินทรีย์หลัก 18

2.4 เอ็กเซอร์ยีมาตรฐานของเชื้อเพลิงเดี่ยว 21

2.5 เอ็กเซอร์ยีของปฏิกิริยาหลัก 25

3.1 Process streams in ammonnia production 35

3.2 Process streams in nitric acid production 35

3.3 Exergy Losses by Plant Area 37

3.4 Reactor System Exergy Losses 38

3.5 Reactor System Exergy Losses with inevitable Reactor Loss Discounted 38

3.6 Refrigeration System Exchangers-Loads and Second Law Efficiencies 40

3.7 Exergy Losses 43

3.8 Energy Consumption of the Factory in 1983 46

3.9 Summary of Chillers Performances 59

3.10 Comparison of Steam Generation Performances 60

3.11 Losses of Available Power in the Refinery 62

4.1 Yearly Energy Consumption and Cost 74

4.2 Monthly Energy Consumption in 1987 75

4.3 Monthly Energy Consumption in 1986 76

4.4 Monthly Energy Consumption in 1985 77

4.5 Monthly Energy Consumption in 1984 78

4.6 Energy Equivalent of Electricity and Total Energy in 1986-1987 79

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

4.7 Energy Equivalent of Electricity and Total Energy in 1984-1985 80
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์พลังงานของเตาอบแบบหมุน 109
5.2 สรุปผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของเตาอบแบบหมุน 110
5.3 สรุปผลการวิเคราะห์พลังงานของ Imp. mill 113
5.4 สรุปผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของ Imp. mill 114
5.5 สรุปผลการวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำ 116
5.6 สรุปผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของหม้อไอน้ำ 117
5.7 สรุปผลการวิเคราะห์พลังงานของเตาอบบอร์ด 120
5.8 สรุปผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของเตาอบบอร์ด 121
5.9 เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจาก Irreversibility ในกระบวนการ 124
6.1 จุดเด่นที่สำคัญของกับดักไอน้ำแบบต่าง ๆ 139
6.2 แสดงปริมาณพลังงานความร้อนที่จะเก็บรักษาได้เมื่อดำเนินมาตรการปรับปรุงที่ระบบย่อย 1 (subprocess 1) 139
6.3 แสดงปริมาณการลงทุนและผลที่ได้รับเมื่อดำเนินมาตรการปรับปรุงที่ระบบย่อย 1 (subprocess 1) 140

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 ระบบปริมาตรควบคุม 7

3.1 Flow sheet ของกระบวนการผลิตแอมโมเนียจากก๊าซธรรมชาติ 34

3.2 Flow sheet ของกระบวนการผลิตกรดไนตริกจากแอมโมเนีย 34

3.3 Process Block Diagram 36

3.4 Process Reactor System Flow Diagram 37

3.5 Refrigeration System 39

3.6 Atmospheric Pressure Ammonia Converter 41

3.7 Best Practical Ammonai Converter 42

3.8 Simplified Nitric Acid Process 44

3.9 Simplified Bang Pa-In Paper Production Process Flow chart 45

3.10 Break-down of Bang Pa-In Paper Mill Factory's Demand .. 46

3.11 Historical yearly energy consumption 47

3.12 Monthly Energy Consumption 48

3.13 Simplified Piping Diagram in Boiler House 49

3.14 Closed Loop for Improving 55

3.15 Electricity Consumption of BH 57

3.16 Electricity Demand Two Hour Periods Characteristics ... 57

3.17 Electricity Consumption of Major Users 58

3.18 Energy Index and Cost Effectiveness 58

3.19 Flow-sheet of the Considered Refinery 61

4.1 Simplified Block Diagram of Board Production Process ... 68

4.2 Historical Yearly Energy Consumption 69

4.3 Historical Monthly Energy Consumption in 1987 70

4.4 Historical Monthly Energy Consumption in 1986 71

4.5 Historical Monthly Energy Consumption in 1985 72

4.6 Historical Monthly Energy Consumption in 1984 73

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.7 Mass Balance around Subprocesses 1 & 2 (kg/h) 83

4.8 Mass Balance around Whole Plant (kg/month) 84

4.9 Energy Balance around Subprocesses 1 & 2 (kJ/h) 85

4.10 Energy Balance around Whole Plant (kJ/month) 86

4.11 สมดุลมวลรอบขอบเขตเตาอบแบบหมุน (kg/h) 89

4.12 สมดุลมวลรอบขอบเขต Imp. mill (kg/h) 93

4.13 สมดุลมวลรอบขอบเขตหม้อไอน้ำ 97

4.14 สมดุลมวลรอบขอบเขตเตาอบบอร์ด 101

4.15 Detail Equipment in Subprocess 1 107

5.1 Sankey's Diagram of Energy Flow of Rotary Dryer 108

5.2 Sankey's Diagram of Exergy Flow of Rotary Dryer 111

5.3 Sankey's Diagram of Energy Flow of Imp. mill 112

5.4 Sankey's Diagram of Exergy Flow of Imp. mill 112

5.5 Sankey's Diagram of Energy Flow of Boiler 115

5.6 Sankey's Diagram of Exergy Flow of Boiler 118

5.7 Sankey's Diagram of Energy Flow of Board Dryer 119

5.8 Sankey's Diagram of Exergy Flow of Board Dryer 119

5.9 Grassman's Diagram of Gypsum Board Process 126

6.1 Inverted-bucket steam trap 130

6.2 Open-top bucket steam trap 131

6.3 Float and Thermostatic 132

6.4 Impulse trap 132

6.5 Bimetal steam trap 132

6.6 Thermodynamic trap operation 133

6.7 Proposed Model for Preheating Board 142

คำอธิบายสัญญลักษณ์

C_p : ค่าความร้อนจำเพาะกรณี p คงที่

C_v : ค่าความร้อนจำเพาะกรณี V คงที่

E : พลังงานรวม (Total Energy), kJ

E_k : พลังงานจลน์ (Kinetic Energy), kJ

E_p : พลังงานศักย์ (Potential Energy), kJ

Ex : เอ็กเซอร์ยี, kJ

ex : เอ็กเซอร์ยีจำเพาะ (Specific Exergy), kJ/kg

$\bar{ex}$: เอ็กเซอร์ยี/โมล, kJ/mol

g : แรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2

G : ค่า Gibbs free energy

$\bar{G}$: Gibbs free energy/โมล, kJ/mol

H : เอ็นธัลปี, kJ

h : เอ็นธัลปีจำเพาะ, kJ/kg

$\bar{h}$: เอ็นธัลปี/โมล, kJ/mol

I : ความย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility)

m : มวลไหลเข้า-ออกระบบ, kg/hr

N : จำนวนโมลของสาร

p : ความดันสมบูรณ์ของระบบ, N/m^2

P_o : ความดันที่สภาวะแวดล้อม, bar

P_k : ความดันย่อยขององค์ประกอบ k, N/m^2

R : Universal gas constant, $kJ/m^3{}_N.K$

S : เอ็นโทรปีของระบบ, kJ/kg K

S_o : เอ็นโทรปีของสิ่งแวดล้อม, kJ/kg K

$\bar{s}$: เอ็นโทรปี/โมล, kJ/K mol

T_o : อุณหภูมิที่สภาวะแวดล้อม, K

U : พลังงานภายใน (Internal Energy) ของระบบ, kJ

$\bar{u}$: พลังงานภายใน/โมล, kJ/mol

V : ปริมาตรของระบบ, m^3

v : ความเร็วของการไหลของมวลเข้า-ออกจากระบบ, m/s

W : งานกลหรืองานไฟฟ้าที่กระทำข้ามขอบเขต, W

x_k : Mole fraction ขององค์ประกอบ k

Z : ความสูงของระบบ, m

μ : ค่า chemical potential

φ : Fugacity coefficient

k : สภาพการนำความร้อนของวัสดุ, kJ/m.h.K

α_s : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิววัสดุหุ้มฉนวน และอากาศภายนอก โดยการพาและแผ่รังสีความร้อน, $kJ/m^2.h.K$

h : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $kJ/m^2.h.K$

G°_f : ค่าพลังงานกิบส์ในการฟอร์มตัวของสารประกอบที่สภาวะมาตรฐาน, kJ/kmol

H°_f : ค่าพลังงานความร้อนในการฟอร์มตัวของสารประกอบที่สภาวะมาตรฐาน, kJ/kmol

Q : ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในขอบเขต, kJ

U : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, $kJ/m^2.h.K$

Subscript

$\emptyset$: สภาวะสิ่งแวดล้อม

cv : ระบบปริมาตรควบคุม

1 : สภาวะเริ่มต้นของระบบ

2 : สภาวะสุดท้ายของระบบ

F : เชื้อเพลิง

Superscript

$^\circ$: ค่าต่อหน่วยเวลา

ch : เชิงเคมี (chemical)

th : เชิงความร้อน (thermal)

ph : เชิงกายภาพ (physical)