

การออกแบบระบบพลังงานโซลาร์เซลล์เทคโนโลยี  
และแนวคิด เอก เซอร์ยี



นาย ชัยยศ วรวิทย์อุคมสุข



ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคำหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2532

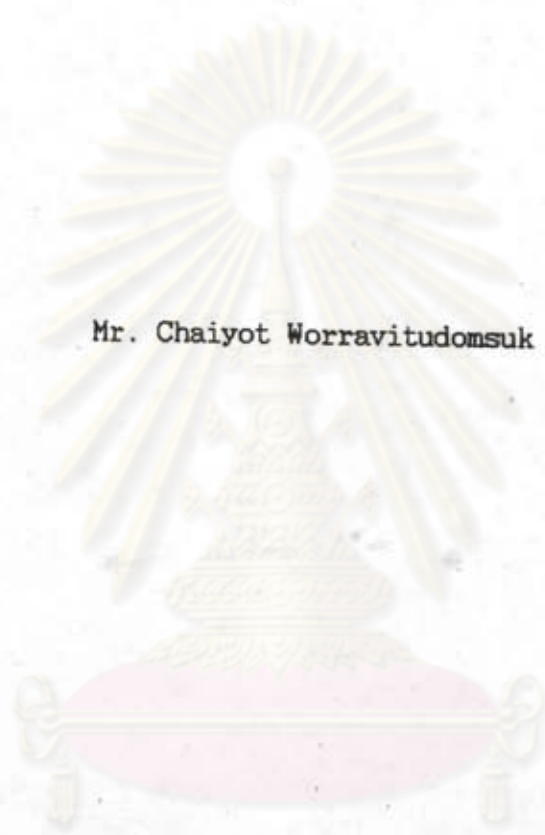
ISBN 974-577-017-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015984

I 17504934

ENERGY SYSTEM DESIGN USING PINCH TECHNOLOGY  
AND EXERGY CONCEPT



Mr. Chaiyot Worravitudomsuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
of the Degree of Master of Engineering  
Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1989

ISBN 974-577-017-5



Thesis Title : Energy System Design Using Pinch Technology And  
Exergy Concept  
By : Mr. Chaiyot Worravitudomsuk  
Department : Chemical Engineering  
Thesis Advisor : Associate Professor Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.

---

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in  
Partial Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree.

*Thavorn Vajarabhaya*..... Dean of Graduate School  
( Professor Thavorn Vajarabhaya, Ph.D.)

Thesis Committee

*Chairit Satayaprasert*  
..... Chairman

(Associate Professor Chairit Satayaprasert, Ph.D.)

*Wiwut Tanthapanichakoon*..... Thesis Advisor

(Associate Professor Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.)

*K. Sukanjanjtee*..... Member

(Associate Professor Kroekchai Sukanjanjtee, Ph.D.)

*Vichitra Chongvisal*..... Member

(Assistant Professor Vichitra Chongvisal, Ph.D.)



CHAIYOT WORRAVITUDOMSUK : ENERGY SYSTEM DESIGN USING PINCH TECHNOLOGY AND EXERGY CONCEPT. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D. 203 PP.

An optimal energy system design approach based on the first law (thermal efficiency) and the second law (effectiveness) of thermodynamics was applied to a selected large scale process, the refinery plant of Bangchak Petroleum Industry. In the pinch design method, a maximum energy recovery (MER) design was obtained after the pinch point and minimum energy targets had been identified with the aid of computer software. A suitable minimum approach temperature,  $\Delta T_{min}$ , of 20 °C was used as design condition. The present application results showed that the MER design could significantly reduce the utility consumption of the existing plant (base case) by 25 % and 22 % of hot and cold utility requirements, respectively. Furthermore, the corresponding exergy losses caused by the degradation of thermal energy in the process system were also reduced by 28.21 %. The payback period for MER design was estimated to be 1.58 years.

One practical design alternative that involves a trade-off between capital costs, operating costs, and energy saving was the "relaxed" design. The design approach was able to save 15.5 % and 13.4 % of hot and cold utility requirements, respectively, while the exergy losses were reduced by 16.73 % compared to the existing plant. The annual utility savings were in the tune of US\$ 0.63 million per year and the payback period was around 1.55 years.

The same approached were also applied to analyze the same plant after it had undergone revamp. The results indicated that the revamped plant was highly energy-efficient, consuming close to the predicted minimum utility requirements and exhibiting relatively small exergy losses despite expansion in capacity.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี .....  
ปีการศึกษา ..... 2532 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... ชัยยศ วรวิทย์อุดมสุข .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *Wiwut Tanthapanichakoon* .....



ชัยยศ วรวิทย์อุดมสุข : การออกแบบระบบพลังงานโดยอาศัยพินช์เทคโนโลยีและ  
แนวคิดเอกเซอร์ยี (ENERGY SYSTEM DESIGN USING PINCH  
TECHNOLOGY AND EXERGY CONCEPT) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิวัฒน์  
คัมพะพานิชกุล, 203 หน้า, ISBN 974-577-017-5.

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์และออกแบบระบบพลังงาน โดยการประยุกต์กฎข้อที่หนึ่ง (ประสิทธิภาพ) และกฎข้อที่สอง (ประสิทธิภาพ) ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อใช้ในการประเมิน และปรับปรุงการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการวิเคราะห์ และ เปรียบเทียบผลกับปริมาณการใช้พลังงานจริงของ โรงกลั่นน้ำมันบางจากปิโตรเลียม จากหลักการของพินช์ สามารถคำนวณหาจุดพินช์ และทราบค่าลวงหน้าของสมรรถนะการใช้ยูนิตที่ต่ำสุดที่เป็นไปได้ในภาคปฏิบัติ เพื่อใช้เป็นเป้าหมายในการออกแบบระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการพัฒนาแบบโปรแกรมไมโครคอมพิวเตอร์และจากการเลือกค่าผลต่างอุณหภูมิที่น้อยที่สุดระหว่างสายร้อนและสายเย็นที่เหมาะสมที่ 20 องศาเซลเซียส ปรากฏผลว่า ยูนิตที่ต่ำสุดความตฤณี น้อยกว่ายูนิตที่ปัจจุบันของโรงกลั่นคิดเป็น 25 % สำหรับยูนิตที่ร้อน และ 22 % สำหรับยูนิตที่เย็น นอกจากนี้ยังสามารถลดเอกเซอร์ยีที่สูญเสียไปเนื่องจากระบบพลังงานเดิมลงอีก 28.21 % โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.58 ปี

นอกจากนี้ยังได้เสนอ ระบบพลังงานที่มีการ "ออมซอม" ระหว่างเงินลงทุน และค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น กับพลังงานที่พึงประหยัคได้ ซึ่งปรากฏผลว่า สามารถลดยูนิตที่ปัจจุบันของโรงกลั่นลง 15.5 % สำหรับยูนิตที่ร้อน และ 13.4 % สำหรับยูนิตที่เย็น ตามลำดับ และลดการสูญเสียเอกเซอร์ยีลงได้ 16.7 % โดยสามารถประหยัคค่าใช้จ่ายได้ถึง ปีละประมาณ 15 ล้านบาท และมีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นลงคือ 1.55 ปี

อนึ่ง งานวิจัยนี้ยังได้มีการคำนวณเปรียบเทียบการใช้พลังงาน โดยหลักการเดียวกันนี้ กับโรงกลั่นใหม่ซึ่งได้ทำการปรับปรุง และขยายกำลังการผลิตขึ้นจากโรงกลั่นเดิม ผลคือ ค่ายูนิตที่ต่ำและ เอกเซอร์ยีที่สูญเสียไป มีค่าใกล้เคียงกับค่ายูนิตที่ต่ำสุดที่เป็นไปได้ความตฤณี

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา ..... 2532

ลายมือชื่อนิสิต ..... ชัยยศ วรวิทย์อุดมสุข  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... รศ.ดร. วิวัฒน์ คัมพะพานิชกุล

## ACKNOWLEDGEMENT



The author would like to express his sincere thanks to Assoc. Prof. Wiwut Tanthapanichakoon, thesis advisor, for his excellent guidance and extreme assistance toward the completion of the thesis.

Thanks are due to the thesis committee, Assoc. Prof. Chairit Satayaprasert, Assoc. Prof. Kroekchai Sukanjnajtee, and Assist. Prof. Vichitra Chongvisal for their constructive comments. Also, the valuable recommendations from Dr. Pom (Dr. Pornchai Piemsomboon), Engineering Director of Seagate Technology (Thailand) Co., Ltd., as well as Miss Patcharaporn Norranitchaiyakul are very much acknowledged.

Bangchak Petroleum Industry Co., Ltd. has provided a lot of useful data for plant evaluation. Thanks for Mr. Sophon Suphamong, Dr. Vutichai Neeranartvong, Mr. Dhanajit Makarananda, and all people in the company who have contributed to the accomplishment of the work. The assistant financial of the Graduate School, Chulalongkorn University is greatly appreciated as well.

Most of all, the author would like to express the highest gratitude to his parents, brother, and sister for their inspiration and encouragement.

## CONTENTS



	Page
ABSTRACT (in English) .....	iv
ABSTRACT (in Thai) .....	v
ACKNOWLEDGEMENT .....	vi
LIST OF TABLES .....	x
LIST OF FIGURES .....	xiii
NOMENCLATURE .....	xvii
CHAPTER	
I INTRODUCTION .....	1
1.1 Background .....	1
1.2 Objectives .....	2
1.3 Scopes of work .....	2
1.4 Benefits Expected .....	3
II PINCH TECHNOLOGY AND HEAT-EXCHANGER NETWORK DESIGN ...	4
2.1 Minimum Heating and Cooling Requirements .....	4
2.2 Simple Design of Minimum-Energy Heat-Exchanger Network .....	10
2.3 Trading off-Reducing the Number of Heat-Exchanger	19
2.4 A More Complete Design Algorithm	21
III EXERGY, ENERGY LEVEL AND ENERGY UTILIZATION DIAGRAM IN ENERGY INTEGRATION .....	23
3.1 Thermodynamics of a process and a Process System	23
3.2 Energy Utililization Diagram.....	28
3.3 Exergy Loss.....	31

## CONTENTS (Continued)

CHAPTER	Page
IV ENERGY TARGETING SOFTWARE AND EXAMPLES OF APPLICATION	33
4.1 Features and Limitations of Program .....	33
4.2 Simplified Flowchart of Program .....	35
4.3 Input Data and Procedure to Run the Program .....	36
4.4 Examples of Application of Energy Targeting Program .....	37
4.5 Additional Examples of Application.....	50
V APPLICATION TO AN OIL REFINERY PLANT .....	51
5.1 Plant Location .....	51
5.2 General Process Description .....	52
5.3 Evaluation Conditions .....	53
5.4 Description of Case (Old Plant).....	55
5.5 Pinch Design.....	69
5.6 Energy Utilization Diagram and Exergy Loss in Process Integration .....	95
5.7 Energy and Exergy Analysis of Modified Plant.....	110
VI ECONOMIC ANALYSIS .....	135
6.1 Investment Cost .....	135
6.2 Energy Saving and Payback Period .....	149
6.3 Design Finalization .....	151
VII CONCLUSION .....	153
REFERENCES .....	157



## CONTENTS (Continued)

	Page
APPENDIX .....	160
A. Flowchart of Energy Targeting Program .....	160
B. List of Computer Program .....	168
C. Calculation Data .....	176
D. Material and Energy Balance .....	184
E. Physical Properties and Constants .....	192
F. Cost Estimation Data .....	199
VITA .....	203



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LIST OF TABLES

	Page
Table 2.1 First-Law analysis .....	4
Table 4.1 Data for example 1 .....	37
Table 4.2 Data for example 3 .....	45
Table 4.3 Summary of ten additional examples and results ...	50
Table 5.1 Crude oil temperature at the inlet and outlet of each heat exchanger .....	55
Table 5.2 Data for material-energy balance .....	61
Table 5.3 Stream data .....	68
Table 5.4 First law calculation .....	70
Table 5.5 (a) Temperature - Enthalpy diagram (hot stream) ..	74
(b) Temperature - Enthalpy diagram (cold stream) .	75
Table 5.6 Summary of energy consumption .....	94
Table 5.7 (a) Energy level and exergy analysis of the hot streams in the base case .....	97
(b) Energy level and exergy analysis of the cold streams in the base case .....	97
Table 5.8 (a) Energy level and exergy analysis of the hot streams in the MER design .....	102
(b) Energy level and exergy analysis of the cold streams in the MER design .....	102
Table 5.9 (a) Energy level and exergy analysis of the hot streams in the relaxed design .....	106
(b) Energy level and exergy analysis of the cold streams in the relaxed design .....	106

## LIST OF TABLES (continued)

	Page
Table 5.10 Summary of exergy losses .....	109
Table 5.11 Stream data of the modified plant .....	116
Table 5.12 (a) Temperature-Enthalpy diagram (after modified plant : hot streams) .....	123
(b) Temperature-Enthalpy diagram (after modified plant : cold streams) .....	124
Table 5.13 (a) Energy level and exergy analysis of the hot streams in the base case (modified plant) ....	127
(b) Energy level and energy analysis of the cold streams in the base case (modified plant) ....	127
Table 5.14 (a) Energy level and exergy analysis of the hot streams in the MER design (modified plant) ...	131
(b) Energy level and energy analysis of the cold streams in the MER design (modified plant) ...	131
Table 5.15 Summary of the after-modified plant evaluation ...	134
Table 6.1 List of existing heat exchangers (base case) .....	136
Table 6.2 (a) List of reusable heat exchangers (MER design)	138
(b) List of newly installed heat exchangers (MER design) .....	138
Table 6.3 (a) List of reusable heat exchangers (relaxed design) .....	141
(b) List of newly installed heat exchangers (relaxed design) .....	141
Table 6.4 List of exchanger costs .....	145

## LIST OF TABLES (continued)

	Page
Table 6.5 Cost estimation of newly installed heat exchangers (MER design) .....	147
Table 6.6 Cost estimation of newly installed heat exchangers (relaxed design) .....	147
Table 7.1 Summary of the design evaluation .....	156
Table C.1 Direct fired heater data sheet (F-101) .....	176
Table C.2 Heat exchanger specification sheet .....	177
Table C.3 Phase compositions of E-403, E-106, E-107 .....	178
Table C.4 Material balance data .....	179
Table D.1 Calculated heat load VS design data for heat exchangers .....	191
Table E.1 Conversion table .....	193
Table F.1 Overall heat transfer coefficient .....	200

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LIST OF FIGURES

	Page
Figure 2.1 Construction of "Composite Curve" .....	6
Figure 2.2 Energy targets and "the Pinch" with composite curves .....	7
Figure 2.3 Shifted temperature scales and temperature intervals .....	8
Figure 2.4 Cascade diagram .....	9
Figure 2.5 The pinch decomposition .....	11
Figure 2.6 Heat exchanger network representation .....	12
Figure 2.7 Heat load for stream .....	13
Figure 2.8 Matches above the pinch .....	15
Figure 2.9 Matches below the pinch .....	16
Figure 2.10 Complete minimum energy design .....	18
Figure 2.11 Example loop existence .....	19
Figure 2.12 Break a loop in minimum energy design .....	20
Figure 2.13 Shift heat along a path .....	20
Figure 2.14 Final design - minimum exchangers .....	21
Figure 2.15 Design procedure algorithm	
(a) above the pinch .....	22
(b) below the pinch .....	22
Figure 3.1 Representation of a process .....	23
Figure 3.2 Flow of heat Q and work W .....	24
Figure 3.3 $\Delta H$ and $\Delta S$ for a heat source and heat sink ...	25
Figure 3.4 $\Delta H$ and $\Delta S$ for a work source and work sink ...	25
Figure 3.5 A process with material flow .....	26

## LIST OF FIGURES (continued)

	Page
Figure 3.6 Concept of a process system .....	26
Figure 3.7 Process scheme of heat exchange .....	27
Figure 3.8 Energy levels of an energy donor and acceptor ...	29
Figure 3.9 Scheme of energy level, A .....	31
Figure 3.10 Energy utilization diagram .....	32
Figure 4.1 Data for example 2 .....	41
Figure 5.1 Simplified process flow diagram .....	54
Figure 5.2 Process flowsheet of topping unit .....	59
Figure 5.3 Process flowsheet with balance boundary .....	62
Figure 5.4 (a) Simplified flowsheet at base case .....	66
(b) Grid representation diagram .....	67
Figure 5.5 Temperature intervals .....	71
Figure 5.6 Cascade diagram .....	73
Figure 5.7 Composite curves .....	76
Figure 5.8 (a) Stream set above the pinch .....	85
(b) Above-the-pinch design .....	85
Figure 5.9 (a) Stream set below the pinch .....	89
(b) Below-the-pinch design .....	89
Figure 5.10 MER design and first evaluation .....	91
Figure 5.11 Second design evaluation .....	93
Figure 5.12 (a) Temperature - Enthalpy diagram (base case) ..	98
(b) EUD for base case .....	99
Figure 5.13 (a) Temperature - Enthalpy diagram (MER design) .	103
(b) EUD for MER design .....	104

## List of Figures (continued)

	Page
Figure 5.14 (a) Temperature - Enthalpy diagram (relaxed design) .....	107
(b) EUD for relaxed design .....	108
Figure 5.15 (a) Simplified process flow diagram (subsystem 1)	112
(b) Simplified process flow diagram (subsystem 2)	113
(c) Simplified process flow diagram (subsystem 3)	114
(d) Grid diagram (subsystem 1, 2, 3) .....	115
Figure 5.16 Composite curve (new design) .....	125
Figure 5.17 (a) Temperature - Enthalpy diagram of the modified plant (new design) .....	128
(b) EUD of the modified plant (base case) .....	129
Figure 5.18 (a) Temperature - Enthalpy diagram of the modified plant (MER design) .....	132
(b) EUD of the modified plant (MER design) .....	133
Figure 6.1 (a) Grid diagram of the base case .....	139
(b) Grid diagram of the MER design .....	139
Figure 6.2 (a) Grid diagram of the base case .....	142
(b) Grid diagram of the relaxed design .....	142
Figure 6.3 Reference costs of heat exchanger .....	144
Figure 6.4 Correlation of exchanger costs .....	146
Figure 6.5 Process flow sheet of proposed retrofit .....	152
Figure D.1 Material balance of crude heater .....	184
Figure D.2 H.C. balance around F-101 .....	187
Figure D.3 Enthalpy calculation diagram for H.C. balance ...	187

## LIST OF FIGURES (continued)

	Page
Figure D.4 Steam balance around F-101 .....	188
Figure E.1 Gravity conversions .....	192
Figure E.2 Properties of petroleum fractions .....	194
Figure E.3 Specific heat of liquid hydrocarbon .....	195
Figure E.4 Specific heat of hydrocarbon vapor .....	196
Figure E.5 Heat of vaporization of hydrocarbon and petroleum fractions .....	197
Figure E.6 Heat capacity per mole of gas at constant pressure .....	198
Figure F.1 Temperature profiles for a counter current heat exchanger .....	199

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## NOMENCLATURES &amp; SUBSCRIPTS



## NOMENCLATURES :

A	heat-exchanger area ( $\text{ft}^2$ , $\text{m}^2$ )
A	availability factor
API	gravity of a liquid in degree API
$C_p$	heat capacity ( $\text{Btu/lb } ^\circ\text{F}$ , $\text{Cal/gm } ^\circ\text{C}$ )
DTLM	log mean temperature ( $^\circ\text{C}$ , $^\circ\text{F}$ )
$FC_p$	heat capacity flowrate ( $\text{Btu/hr } ^\circ\text{F}$ , $\text{kW}/^\circ\text{C}$ )
$F_i$	heat flow through heat recovery network at level i
H	flow enthalpy ( $\text{kW}$ , $\text{Btu/hr}$ )
m	mass flowrate ( $\text{kg/hr}$ , $\text{lb/hr}$ )
p	pressure (psi)
Q	heat flow ( $\text{kW}$ , $\text{Btu/hr}$ )
S	entropy and entropy rate ( $\text{J/K}$ and $\text{J/kmol K}$ )
T	temperature ( $^\circ\text{C}$ , $^\circ\text{F}$ , $\text{K}$ , $^\circ\text{R}$ )
U	heat transfer coefficient ( $\text{Btu/hr ft}^2 ^\circ\text{F}$ )
W	work and work rate ( $\text{J}$ and $\text{J/mol}$ )
$\Delta$	signifies a difference
E	exergy
$\propto$	heat flow ( $\text{kW}$ , $\text{Btu/hr}$ )
$^\circ$	signifies degree
$\wedge$	signifies exponential

## SUBSCRIPTS :

av	average
c,cold	relating to cold stream
ea	energy acceptor, energy acceptor process
ed	energy donator, energy donator process
h,hot	relating to hot stream
max	maximum
min	minimum
o	signifies reference condition
1,2,...A,B,...,i,n,	counter



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย