

HEAT INTEGRATION OF CRUDE DISTILLATION UNIT

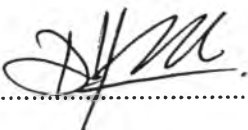
Pitak Jongsuwat

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University
in Academic Partnership with
The University of Michigan, The University of Oklahoma,
Case Western Reserve University, and Institut Français du Pétrole
2014

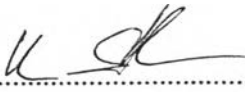
128370387

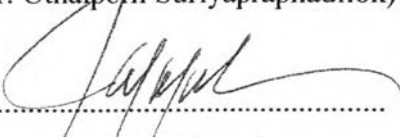
Thesis Title: Heat Integration of Crude Distillation Unit
By: Pitak Jongsuwat
Program: Petrochemical Technology
Thesis Advisors: Dr. Uthaiporn Suriyaphadilok
Prof. Miguel Bagajewicz

Accepted by The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Science.

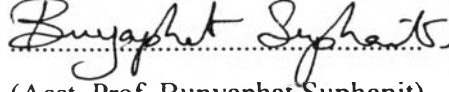

..... College Dean
(Asst. Prof. Pomthong Malakul)

Thesis Committee:


.....
(Dr. Uthaiporn Suriyaphadilok)


.....
(Prof. Miguel Bagajewicz)


.....
(Asst. Prof. Kitipat Siemanond)


.....
(Asst. Prof. Bunyaphat Suphanit)

ABSTRACT

5571016063: Petrochemical Technology Program

Pitak Jongsuwat: Heat Integration of Crude Distillation Unit.

Thesis Advisors: Dr.Uthaiporn Suriyaphadilok, and
Prof. Miguel Bagajewicz, 129 pp.

Keywords: Superstructure/ Heat exchanger network synthesis/ Non-isothermal
mixing/ Optimization methods/ Heat integration

Heat integration and HEN synthesis, which is a heuristic approach to utilize energy efficiently and economically, has been widely used either in the petroleum or petrochemical industries. Therefore, there are many innovations, and a lot of research effort to develop the models to optimize the energy usage with the cost reduction. In this work, we present a new heat exchanger network model consisting of an extension of the stage-wise superstructure approach that was first proposed by Yee and Grossmann (1990). Motivated by systems where splitting of large FCP stream is needed to match with several smaller FCP streams (like crude fraction units), we add several matches per branch. Given the non-convex nature of the resulting MINLP and the associated difficulties to solve it without good initial points especially in the General Algebraic Modelling System (GAMS) and the DICOPT solver, we propose a new initialization strategy for generating feasible starting points using sequential technique to solve the MINLP problem and develop bounding condition to obtain the best solution. The successful application of our approach using examples from literature and real industrial process presented here showed that our new stage-wise superstructure model and initialization strategy can be applied to the complex MINLP problem which provides a more profitable network than others in literature.

บทคัดย่อ

พิทักษ์ จงสุวัฒน์ : การบูรณาการเครือข่ายพลังงานความร้อนของหอกลั่นน้ำมันดิบ (Heat Integration of Crude Distillation Unit) อ. ที่ปรึกษา : ดร. อุทัยพร สุริยประภาดิลก และ ศ. ดร. มิเกล บากาเจวิช จำนวน 129 หน้า

การบูรณาการพลังงานความร้อนและการสังเคราะห์เครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นวิธีการที่ช่วยจัดการบริหารพลังงานให้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ นั้นเป็นกระบวนการที่จัดได้ว่าได้มีการใช้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของอุตสาหกรรมด้านปิโตรเลียม หรือปิโตรเคมี ด้วยเหตุนี้จึงมีนวัตกรรมและงานวิจัยต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถจำลองเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในการหาจุดที่ทำให้ใช้พลังงานได้ ประโยชน์สูงสุดด้วยต้นทุนที่น้อยลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองเครือข่ายแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใหม่ ซึ่งได้พัฒนามาจาก stage-wise superstructure ซึ่งนำเสนอโดย Yee และ Grossmann ในปี ค.ศ.1990 โดยมีแรงบันดาลใจนั้นมาจากการที่ในระบบที่ประกอบไปด้วยสาย FCP ขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีการจับคู่ระหว่างสายร้อนและสายเย็นมากกว่าหนึ่งคู่สายต่อสแตจดังที่พบเห็นได้ในหน่วยกระบวนการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ โมเดลที่ได้รับการพัฒนานี้จึงได้มีการเพิ่มความสามารถในการที่จะมีการจับคู่ได้มากกว่าหนึ่งคู่ต่อสายต่อสแตจ โดยธรรมชาติแล้วการแก้ปัญหาโจทย์ที่มี non-convexities สูงจะส่งผลทำให้การแก้ปัญหา MINLP นั้นมีความยุ่งยากหากปราศจากค่าเริ่มต้นที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหา MINLP ด้วยโปรแกรม the General Algebraic Modeling System (GAMS) โดยมี DICOPT เป็นตัวแก้ปัญหา ดังนั้นจึงได้นำเสนอยุทธวิธีแบบใหม่ในการตั้งค่าเริ่มต้น เพื่อสร้างค่าเริ่มต้นที่เป็นไปได้โดยใช้ระเบียบวิธีการแบบลำดับขั้นตอน (Sequential Technique) เพื่อให้ได้ค่าเริ่มต้นที่ดีสำหรับการแก้ปัญหา MINLP และยังสามารถพัฒนาการตั้งเงื่อนไขขอบเขตเพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด งานวิจัยนี้ได้แสดงถึงผลสำเร็จของโปรแกรมโดยการใช้ตัวอย่างจากงานวิจัยอื่นๆ และกรณีศึกษาจากหอกลั่นน้ำมันดิบ ดังที่ได้แสดงให้เห็นจากงานวิจัยนี้แล้วว่าแบบจำลอง stage-wise superstructure แบบใหม่และยุทธวิธีการตั้งค่าเริ่มต้นสามารถใช้ในการแก้ปัญหา MINLP ที่มีความซับซ้อน และได้ผลลัพธ์ระบบเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดียิ่งกว่าจากงานวิจัยอื่นๆ

ACKNOWLEDGEMENTS

This work would not have been successful without the assistance of the following individuals and organization.

This thesis work was funded by The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University and The National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials, Thailand and is greatly appreciated.

I would like to thank Dr. Uthaiporn Suriyaphadilok and Prof. Miguel Bagajewicz, my advisor, for several enlightened suggestions, discussions, and encouragement throughout the course of my thesis. This thesis would never have been completed without their consistence help.

I am also grateful to thank Asst. Prof. Kitipat Siemanond, and Asst. Prof. Bunyaphat Suphanit, my thesis committee, for their well-intentioned suggestions and comments.

I would like to take this opportunity to thank all of The Petroleum and Petrochemical College staff who supported me throughout my thesis project; and finally I forward my special thanks to my parents, friends and all senior students for their friendly help, cheerfulness and good suggestions.

TABLE OF CONTENTS

	PAGE
Title Page	i
Abstract (in English)	iii
Abstract (in Thai)	iv
Acknowledgements	v
Table of Contents	vi
List of Tables	viii
List of Figures	x
Abbreviations	xiii
 CHAPTER	
I INTRODUCTION	1
 II BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW	 3
2.1 Crude Oil	3
2.2 Heat Integration	5
2.3 Stage of the Atrs for Heat Exchanger Network Synthesis	5
2.3.1 HEN Configuration Design	5
2.3.2 Designed and Modified Mathematical Algorithm	17
2.3.3 Development of Heuristic Approach in Objective Function and Variables	 23
 III OBJECTIVES AND SCOPE OF RESEARCH	 27
3.1 Objective of this Research	27
3.2 Scope of Research	27
 IV METHODOLOGY	 28
4.1 Materials and Equipment	28
4.1.1 Equipment	28

CHAPTER	PAGE
4.1.2 Software	28
4.2 Methodology	28
4.1.1 Grass-root Design for Heat Exchanger Network	28
4.1.2 Determining the Best Solution of the New Model	28
V THE MODIFIED STAGE-WISE SUPERSTRUCTURE	29
5.1 Modified Stage-wise Superstructure Based on MINLP Model	29
5.2 Solution Strategy	40
VI RESULT AND DISCUSSION	45
6.1 Examples from Literature	45
6.1.1 Example 1	45
6.1.2 Example 2	51
6.1.3 Example 3	60
6.1.4 Example 4	68
6.2 Examples from Real Industrial Process	73
VII CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	75
REFERENCES	76
APPENDICES	81
Appendix A Composite Curve Analysis Data	81
Appendix B Programming Model for Grass-Roots Design	98
CURRICULUM VITAE	129

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
2.1 Composition ranges of crude oil	3
6.1 Example 1 data	45
6.2 Comparison of example 1 result of our model with literature	50
6.3 Example 2 data	51
6.4 Comparison of example 2 result of our model with literature	59
6.5 Example 3 data	61
6.6 Comparison of example 2 result of our model with literature	68
6.7 Example 4 data	72
6.8 Comparison of example 4 result of our model with literature	73
6.9 Example from real industrial process	74
A1 Data for example 1	81
A2 Composite curve analysis for example 1	82
A3 Analysis cost for example 1	83
A4 Data for example 2	84
A5 Composite curve analysis for example 2	85
A6 Analysis cost for example 2	86
A7 Data for example 3	87
A8 Composite curve analysis for example 2	88
A9 Analysis cost for example 3	89
A10 Data for example 4	90
A11 Composite curve analysis for example 4	91
A12 Analysis cost for example 4	92
A13 Data for example 5	93
A14 Composite curve analysis of hot stream for example 5	94
A15 Composite curve analysis of hot stream for example 5 (continue)	94

TABLE	PAGE
A16 Composite curve analysis of cold stream for example 5	96
A17 Analysis cost for example 5	96

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE	
2.1	Classical HEN approaches over the last decades	6
2.2	The two-stage superstructure	7
2.3	Limitations of superstructure	14
2.4	A piece-wise linear approximation of the relationship $Q = \ln(q)$ in three steps	20
2.5	Additional variables for non-isothermal mixing at stage k	21
2.6	Interval exclusion for bound contraction	26
5.1	Innovation of stage-wise superstructure model.	30
5.2	Step of decomposition based on HEN synthesis approach by sequential technique.	44
6.1	First Heat Exchanger Configuration result from First MILP, First NLP, and Second MILP of Example 1.	46
6.2	First Heat Exchanger Configuration result from Second NLP of Example 1.	47
6.3	Best Heat Exchanger Configuration result from MINLP of Example 1.	48
6.4	Best Heat Exchanger Configuration result from Huang and Karimi (2012) of Example 1.	49
6.5	One of Heat Exchanger Configuration result from First MILP and First NLP of Example 2.	52
6.6	One of Heat Exchanger Configuration result from Second MILP of Example 2.	53

FIGURE	PAGE
6.7 One of Heat Exchanger Configuration result from Second NLP of Example 2.	54
6.8 One of Heat Exchanger Configuration result from MINLP after solving each iteration of Example 2.	55
6.9 Final Heat Exchanger Configuration result of Example 2 after second iteration by applying a TAC^U constraint.	56
6.10 The best Heat Exchanger Configuration result from MINLP of Example 2 after third iteration by applying a TAC^U constraint of previous iteration (\$95,743).	57
6.11 Best Heat Exchanger Configuration result from Huang and Karimi (2012) of Example 2.	58
6.12 Final Heat Exchange Configuration result from First MILP of Example 2.	62
6.13 Final Heat Exchange Configuration result from First NLP of Example 2.	63
6.14 Final Heat Exchange Configuration result from Second MILP of Example 2.	64
6.15 Final Heat Exchange Configuration result from Second NLP of Example 2.	65
6.16 Final Heat Exchange Configuration result from MINLP of Example 3.	66
6.17 Best Heat Exchange Configuration result from Huang and Karimi (2012) for Example 3.	67
6.18 Final Heat Exchange Configuration result from MINLP of Example 4.	69
6.19 Best Heat Exchange Configuration result from Huang and Karimi (2012) for Example 4.	70

FIGURE	PAGE
6.20 Best Heat Exchange Configuration result from Khorasany and Fesanghary (2009) for Example 4.	71
6.21 Final Heat Exchanger configuration from MINLP of Example from real industrial process.	75
A1 Composite curve of example 1.	81
A2 Trend of heat exchanger cost per area of example 1.	83
A3 Composite curve of example 2.	84
A4 Trend of heat exchanger cost per area of example 2.	86
A5 Composite curve of example 3.	87
A6 Trend of heat exchanger cost per area of example 3.	89
A7 Composite curve of example 4.	90
A8 Trend of heat exchanger cost per area of example 4.	92
A9 Composite curve of example 5.	97

ABBREVIATIONS

HE	= Heat Exchanger
HENs	= Heat Exchanger network synthesis
LMTD	= Log mean temperature difference
TAC	= Total annual cost
HEXC	= Heat Exchange Constraint
MILP	= Mixed-integer linear programming
NLP	= Non-linear programming
MINLP	= Mixed-integer nonlinear programming

Set of Parameter

CP	Set of cold stream
HP	Set of hot stream
MK	Set of location
K	Set of sub-stage
FB	Set of flow branch stream

Parameter Definition

TIN	Inlet temperature of stream
TOUT	Outlet temperature of stream
U	Overall heat transfer coefficient
CCU	Unit cost for cold utility
CHU	Unit cost of hot utility

CF	Fixed charge for exchangers
CA	Area cost coefficient
Ω	Upper bound for heat exchange
NOK	Total number of stages
β	Exponent for area cost
Γ	Upper bound for temperature different
EMAT	Exchanger minimum approach temperature
LMTD	Logarithmic mean temperature difference

Variable Definition

dT_{ijMKBK}	Temperature approach for matching (i,j) at temperature sub-stage K of location MK
dT_{cu_i}	Temperature approach for the match of hot stream i with cold utility
dT_{hu_j}	Temperature approach for the match of cold stream j with hot utility
$dT_{i,j,MK,Bh,Bc,K}^{HS}$	Hot side temperature of matching (i,j)
$dT_{i,j,MK,Bh,Bc,K}^{CS}$	Cold side temperature of matching (i,j)
CF	Heat capacity flow rate
CFb	Heat capacity branch flow rate
$q_{i,j,MK,Bh,Bc,K}$	Exchanged heat for (i,j) match in stage Mk on sub-stage K
q_{cu_i}	Cold utility demand for stream i
q_{hu_j}	Hot utility demand for stream j
H_{aMK}	Total heat of hot stream at main-stage MK

$QHM_{MK,i}$	Total heat of hot stream i at main-stage MK
$QH_{MK,i,Bh}$	Heat of hot stream i on branch Bh at main-stage MK
$qHK_{MK,i,Bh,K}$	Heat of sub-stage on hot stream i at main-stage MK
Ca_{MK}	Total heat of cold stream at main-stage MK
$QCM_{MK,i}$	Total heat of hot stream j at main-stage MK
$QC_{MK,i,Bc}$	Heat of hot stream j on branch Bh at main-stage MK
$qCK_{MK,i,Bc,K}$	Heat of sub-stage on hot stream j at main-stage MK
$AH_{i,MK,Bh,K}$	Bilinear term of heat capacity branch flow i and temperature of hot stream i
$AC_{j,MK,Bc,K}$	Bilinear term of heat capacity branch flow j and temperature of cold stream j
$T_{i,MK}^H$	Temperature of hot stream i on the hot side of main stage MK
$T_{j,MK}^C$	Temperature of cold stream j on the hot side of main stage MK
$Tb_{i,MK,Bh,K}^H$	Temperature of branch hot stream i on the hot side of stage MK
$Tb_{j,MK,Bc,K}^C$	Temperature of branch cold stream j on the hot side of stage MK
$Z_{i,j,MK,Bh,Bc,K}$	Binary variable associated with partitioning interval match (i, j, k)
Zhu_j	Binary variable associated with partitioning interval match (i, CU)
Zcu_j	Binary variable associated with partitioning interval match (j, HU)
A_{ijMKBK}	Heat transfer area of stream match (i,j)
AC_{ui}	Heat transfer area of stream match i with cold utility
A_{Huj}	Heat transfer area of stream match j with hot utility