



PASSIVE CONTROLLER DESIGN OF MASS EXCHANGER NETWORK

MR. THANAWAT UPIENPONG

A SPECIAL RESEARCH PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

2011

Passive Controller Design of Mass Exchanger Network

Mr. Thanawat Upienpong B.Eng. (Chemical Engineering)

A Special Research Project Submitted in Partial Fulfillment  
of the Requirements for

The Degree of Master of Engineering (Chemical Engineering)

Faculty of Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi

2011

Special Research Project Committee

..... Chairman of Special Research  
(Asst. Prof. Veara Loha, Ph.D.) Project Committee

..... Member and Special  
(Assoc. Prof. Thongchai Srinophakun, Ph.D.) Research Project Advisor

..... Member  
(Asst. Prof. Asawin Meechai, Ph.D.)

Copyright reserved

Special Research Project Title	Passive Controller Design of Mass Exchanger Network
Special Research Project Credits	6
Candidate	Mr. Thanawat Upienpong
Special Research Project Advisor	Assoc.Prof. Dr.Thongchai Srinophakun
Program	Master of Engineering
Field of Study	Chemical Engineering
Department	Chemical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

### Abstract

This work mainly focuses on applying the passivity concept on a mass exchanger network. The development of state space model of mass exchanger and a new approach of controller design are proposed. The state space equations of mass exchanger model have been developed based on assumptions of lumped parameter system, including well mixing of rich and lean streams, linear equilibrium relation over the operating range and isothermal and isobaric conditions. The mass exchanger model is characterized as a non-passive system due to its positive passivity index. The passivity concept is implemented to shift the system to passive region along with the controller tuning. The case study of the five streams mass exchanger network with 4 control loops is used for demonstration. As the non-passive characteristic of the mass exchanger network, therefore, the weighting function is introduced. Multi-loop passive PI controllers of mass exchanger network are developed. This passive control configuration is tested by both disturbance rejection and set point tracking. For disturbance rejection, the composition of lean stream 1, rich stream 1, lean stream 2 and rich stream 2 is stepped at the deviation of 0.0025, 0.0080, 0.0040 and 0.0060, respectively. The designed passive controllers are capable of completely eliminating the impact of a disturbance. The control loops 1, 2, 3 and 4 also show the good performance to track 4, 15, 3 and 1.5% change of the set points.

Keywords: Mass Exchanger Network/ State Space Model/ Passivity Concept/ Multi-Loop Controller

หัวข้อ โครงการศึกษาวิจัย	การออกแบบตัวควบคุมแบบพาสซีฟของเครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสาร
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายธณวัฒน์ อุทัยพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ชงไชย ศรีนพคุณ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แนวคิดพาสซีฟิตึบนเครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสาร การพัฒนาสมการแลกเปลี่ยนมวลสาร และแนวทางใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยที่สมการขั้นพื้นฐานของการแลกเปลี่ยนมวลสารได้ถูกสร้างขึ้นบนสมมติฐานของพารามิเตอร์รวม, ไม่มีแกรเดียนของความเข้มข้น, มีความสัมพันธ์ที่สมดุลเชิงเส้นตลอดช่วงปฏิบัติการ และ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความดันคงที่ ระบบแลกเปลี่ยนมวลสารมีลักษณะเป็นระบบไม่แพชซีฟเนื่องจาก คำนีพาสซีฟดีของระบบอยู่ในแดนบวก หลังจากนั้นแนวคิดพาสซีฟิตึได้ขยายไปสู่เครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสาร โดยที่โครงสร้างการควบคุมของเครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสารที่ประกอบด้วย 5 สาย และ 4 ลูปการควบคุม ถูกใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อสาธิตการประยุกต์ใช้แนวคิดพาสซีฟิตึ เนื่องจากเครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสารเป็นระบบที่มีลักษณะไม่แพชซีฟ ดังนั้นเวดดิ้งฟังก์ชัน จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อผลักดันให้ระบบโดยรวมเข้าสู่บริเวณแพชซีฟ ซึ่งตัวควบคุมแบบพาสซีฟของเครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสารถูกออกแบบและถูกทดสอบด้วยการรบกวนระบบด้วยตัวแปรรบกวน และการเปลี่ยนค่าเป้าหมายสำหรับการรบกวนระบบ ตัวแปรรบกวนได้แก่ องค์ประกอบขาเข้าของสายเจือจาง 1, สายเข้มข้น 1, สายเจือจาง 2 และสายเข้มข้น 2 ถูกเบี่ยงเบนไปจากค่าปกติ 0.0025, 0.0080, 0.0040 และ 0.0060 ตามลำดับ พบว่าตัวควบคุมแบบพาสซีฟทั้งสี่มีความสามารถที่จะขจัดผลการรบกวนได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ วงจรควบคุมที่ 1, 2, 3 และ 4 ยังมีความสามารถในติดตามการเปลี่ยน 4%, 15%, 3% และ 1.5% ของค่าเป้าหมายของตัวควบคุมแต่ละลูปตามลำดับ

คำสำคัญ: เครือข่ายแลกเปลี่ยนมวลสาร/ สมการขั้นพื้นฐาน/ แนวคิดพาสซีฟิตึ/ ตัวควบคุมแบบหลายลูป

## ACKNOWLEDGEMENTS

It is my pleasure to acknowledge those who have supported lead to the success of this thesis. Firstly, I would like to express my gratitude to my advisor, Associate Professor Thongchai Srinophakun for encouragement, continuous guidance, great support and also useful recommendation throughout this work. Secondly, I would like to express my sincere thank to Prof. Sigurd Skogestad for an opportunity to visit his research group at Norwegian University of Science and Technology (NTNU) and value suggestions. Next, I would like to express profound gratitude to Chemical Engineering Practice School, King Mongkut's University of Technology Thonburi where gives me a lot of good experiences and opportunity. Not forget to Asst. Prof. Veara Loha and Asst. Prof. Asawin Meechai who is my committee for their comments and suggestions.

My sincere thank is also given to my friends, colleagues, and teams in Centre of Process Control and Operation (CPCO), Kasetsart University, Thailand, especially Ms. Nichaporn Kanajabat and Mr. Nitipat Chaiwattanapong for their suggestions on the previous thesis about the passivity concept. Lastly, I would like to express my deepest gratitude to my family for their loves and continuing encouragements.

# CONTENTS

	<b>PAGE</b>
ENGLISH ABSTRACT	ii
THAI ABSTRACT	iii
ACKNOWLEDGEMENTS	iv
CONTENTS	v
LIST OF TABLES	vii
LIST OF FIGURES	viii
NOMENCLATURES	x
<b>CHAPTER</b>	
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 Background	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scope of work	2
<b>2. LITERATURE REVIEWS AND THEORIES</b>	<b>3</b>
2.1 Literature reviews	3
2.1.1 Mass exchanger network	3
2.1.2 Passivity theorem	3
2.2 Theories	4
2.2.1 Overall mass balance equation	4
2.2.2 State space equation	5
2.2.3 Passivity theorem and related properties	5
<b>3. METHODOLOGY</b>	<b>9</b>
3.1 Application of the mass exchanger network and passivity concept	9
3.2 Development of the dynamic model of mass exchanger network based on the controlled and the manipulated variables	9
3.3 Process transfer function based on the passivity concept	9
3.4 Passivity index of the system	9
3.5 Passive controller design	9
<b>4. RESULTS AND DISCUSSION</b>	<b>11</b>
4.1 Generic state space equations of a single mass exchanger with recycle	11
4.2 Example of a single mass exchanger unit	14
4.3 State space equations of a mass exchanger network	16
4.4 Passive controller design of mass exchanger network	18
4.5 Dynamic study of mass exchanger network	20

<b>5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS</b>	<b>42</b>
5.1 Conclusions	42
5.2 Recommendations	43
<b>REFERENCES</b>	<b>44</b>
<b>APPENDIX</b>	<b>46</b>
A. Mathematical model	46
B. Source code	54
<b>CURRICULUM VITAE</b>	<b>70</b>

## LIST OF TABLES

<b>TABLE</b>		<b>PAGE</b>
4.1	Steady state information of mass exchanger in copper recovery unit	14
4.2	Stream data of five streams mass exchanger network	17
4.3	The results of the $k_{c,i}^+$ and $\tau_{I,i}$ for each loop control	19
4.4	The results of the $k_{c,i}^+$ and $\tau_{I,i}$ of auto tuning controller	39

## LIST OF FIGURES

<b>FIGURE</b>	<b>PAGE</b>
1.1 Schematic of a single mass exchanger	1
1.2 Schematic of a mass exchanger network (MEN)	1
2.1 Multi-loop control system	6
3.1 Methodology of passivity analysis and controller design for mass exchanger network	10
4.1 A general schematic of mass exchanger unit with recycles	11
4.2 Dynamic behavior of copper recovery unit	15
4.3 Passivity index of copper recovery unit	15
4.4 Grid diagram of five streams mass exchanger network problem	16
4.5 Open loop response of five streams mass exchanger network	17
4.6 Passivity index of five streams mass exchanger network	18
4.7 Passivity index of five streams mass exchanger network after introduction of the weighting function	19
4.8 Open loop model of five streams mass exchanger network	21
4.9 Closed loop model of five streams mass exchanger network	22
4.10a Open loop response after step input composition of lean stream 1	23
4.10b Open loop response after step input composition of lean stream 2	24
4.10c Open loop response after step input composition of rich stream 1	25
4.10d Open loop response after step input composition of rich stream 2	26
4.11a Closed loop outlet composition response after step input composition of lean stream 1	27
4.11b Closed loop recycle valve position response after step input composition of lean stream 1	28
4.11c Closed loop outlet composition response after step input composition of lean stream 2	29
4.11d Closed loop recycle valve position response after step input composition of lean stream 2	30
4.11e Closed loop outlet composition response after step input composition of rich stream 1	31
4.11f Closed loop recycle valve position response after step input composition of rich stream 1	32
4.11g Closed loop outlet composition response after step input composition of rich stream 2	33
4.11h Closed loop recycle valve position response after step input composition of rich stream 2	34
4.12 Open loop response after step all input composition simultaneously	35
4.13 Closed loop response after step all input composition simultaneously	36

4.14	Closed loop recycle valve position after step all input compositions	37
4.15	Set point tracking of controller; a)loop1, b)loop2, c)loop3 and d)loop4	38
4.16	Comparison of output composition between passive controller and PI autotuning for a) control loop1, b) control loop2, c) control loop3 and d) control loop4	40
4.17	Set point tracking performance comparison of output composition	

## NOMENCLATURES

<i>A</i>	=	constant matrix of state vector in state equation
<i>a</i>	=	slop of a mass transfer equilibrium line
<i>B</i>	=	constant matrix of manipulate vector in state equation
<i>b</i>	=	equilibrium constant
<i>C</i>	=	constant matrix of state vector in control equation
<i>D</i>	=	constant matrix of manipulate vector in state equation
<i>E</i>	=	constant matrix of disturbance vector
<i>f</i>	=	Recycle fraction
<i>G</i>	=	Rich stream mass rate (kg/s)
<i>I</i>	=	identity matrix
<i>k</i>	=	controller gain
<i>KA</i>	=	mass transfer coefficient
<i>L</i>	=	Lean stream mass rate (kg/s)
<i>M</i>	=	mass accumulate (kg)
MEX	=	mass exchanger
MEN	=	mass exchanger network
<i>Mp</i>	=	mass load of a key component of a MEX (kg/s)
MSA	=	mass separation agent
<i>w</i>	=	weighting function
<i>x</i>	=	lean stream composition
<i>y</i>	=	rich stream composition
$\tau$	=	integral time constant (s)

### Subscripts

<i>d</i>	=	disturbance
<i>G</i>	=	rich stream
<i>in</i>	=	input
<i>L</i>	=	lean stream
<i>l</i>	=	lean stream
<i>out</i>	=	output
<i>p</i>	=	process
<i>r</i>	=	rich stream

### Superscript

‘	=	inside recycle
-	=	steady state