

การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายผลของสัดส่วนปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิก
และความดันต่อการเตรียมไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิต



นายสุรจักร ชมบ้านแพ้ว

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

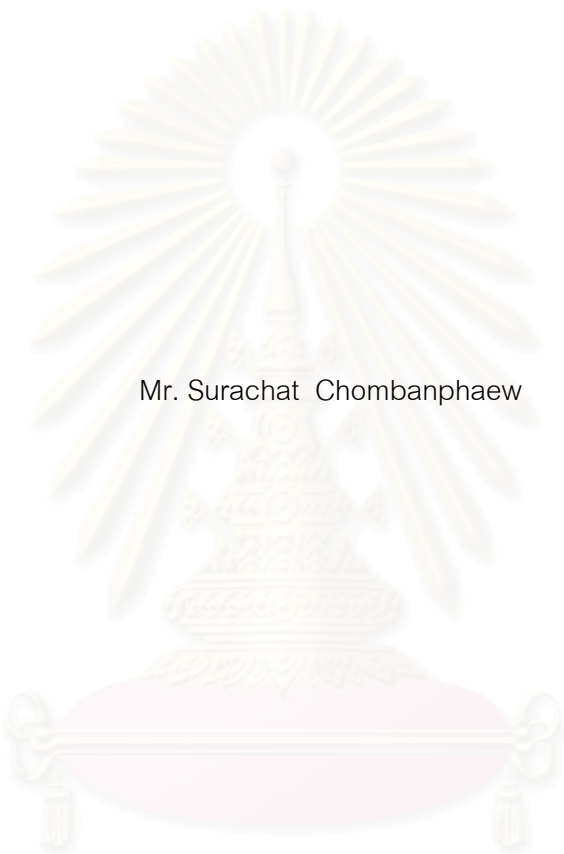
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1459-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODELING FOR PREDICTING EFFECTS OF ETHYLENE GLYCOL TO TEREPHTHALIC ACID RATIO
AND PRESSURE ON PREPARATION OF DIGLYCOLTEREPHTHALATE



Mr. Surachat Chombanphaew

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1459-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายผลของสัดส่วนปริมาณเอทิลีน
ไกลคอลลดอัตราการเหี่ยวของพืช และความต้านต่อการเตรียมได้ไกลคอลล
เทอร์เรพธาเลต

โดย นายสุรฉัตร ชมบ้านแพ้ว

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่ว
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม วาณิชเสนี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เจ็ดศักดิ์ ไชยคุนา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์)

สุรฉัตร ชมบ้านแพ้ว : การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายผลของสัดส่วนปริมาณเอทิลีน ไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิกและความดันต่อการเตรียมไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट.

(MODELING FOR PREDICTING EFFECTS OF ETHYLENEGLYCOL TO TEREPHTHALIC ACID RATIO AND PRESSURE ON PREPARATION OF DIGLYCOLTEREPHTHALATE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช, 55หน้า. ISBN 974-03-1459-7.

กระบวนการผลิตพอลิเอสเตอร์มอนอเมอร์ สามารถอธิบายโดยแบบจำลองที่เป็นอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์ที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและออลิโกเมอร์ไรเซชันตามลำดับ และพบว่าออลิโกเมอร์ที่เหมาะสมคือเตตระเมอร์ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิก ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจะเพิ่มถึง 99 เปอร์เซ็นต์ และที่ความดัน 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็น 96 เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือที่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2544..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4171513521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: POLYMER / ESTERIFICATION / OLIGOMERIZATION / PROPERTY ESTIMATION / SIMULATION

SURACHAT CHOMBANPHAEW : MODELING FOR PREDICTING EFFECTS OF ETHYLENEGLYCOL TO TEREPHTHALIC ACID RATIO AND PRESSURE ON PREPARATION OF DIGLYCOLTEREPHTHALATE. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. DEACHA CHATSIRIWECH Ph.D., 55 pp. ISBN 974-03-1459-7.

A process flow sheet for Polyester monomer synthesis was modeled with a series of equilibrium reactor for esterification and oligomerization respectively. It found that the most appropriate oligomer was tetramer. With an increase in Ethyleneglycol to Terephthalic acid ratio, conversion of Terephthalic acid was improved to 99%. And at operating pressure of 1.5 kilogram per square centimeter, conversion of Terephthalic acid was 96%.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical..engineering.....Student's signature.....

Field of study....Chemical..engineering....Advisor's signature.....

Academic year 2544

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณ นางสาวประภาศิริ กลางพอน ที่ได้ช่วยพิมพ์ต้นฉบับ ตลอดจนตรวจทานอักษรในวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

ทำยนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา - มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้าน การเงินและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



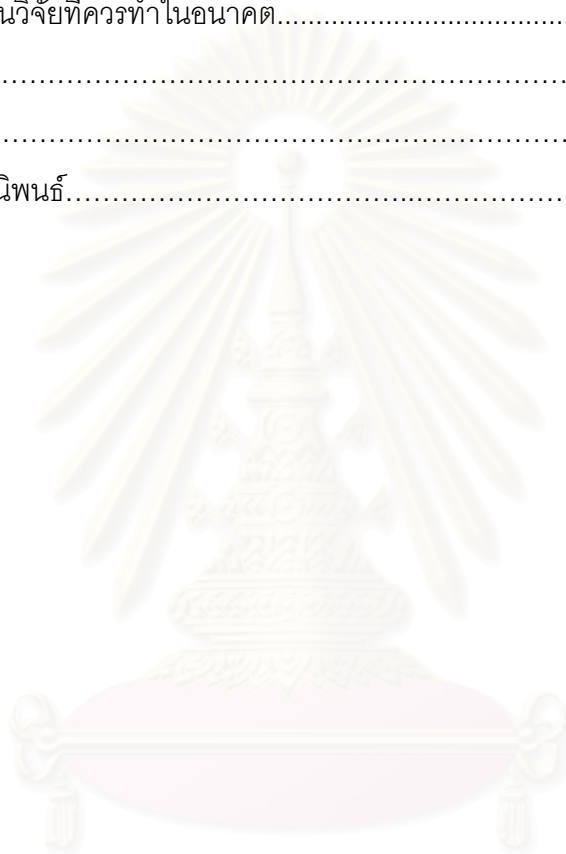
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
สัญลักษณ์และตัวย่อ.....	ฎ
1. บทนำ.....	1
1.1 มूलเหตุและที่มาของงานวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ของกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลเตตแบบต่อเนื่อง.....	3
2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างไดเมทิลเทอร์เรพธาลเตตและ เอทิลีนไกลคอล.....	3
2.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขั้นที่ 1 ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ กึ่งต่อเนื่องในกระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์ด้วยกรดเทอร์เรพธาลิก.....	4
3. แบบจำลองระบบปฏิกิริยาการสังเคราะห์มोनอเมอร์.....	5
3.1 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพอลิเอสเทอร์.....	6
3.2 กระบวนการผลิตเม็ดพอลิเอสเทอร์.....	9
3.3 แบบจำลองหน่วยสังเคราะห์มोनอเมอร์.....	10
3.4 สมดุลเคมี.....	12
3.5 สมดุลไอ-ของเหลว.....	14
3.6 การคำนวณหาค่าโดยประมาณของคุณสมบัติของออลิโกเมอร์.....	15
4. ขั้นตอนการวิจัยและผลการวิจัย.....	20
4.1 การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง.....	20
4.2 ผลของสภาวะดำเนินการต่อการสังเคราะห์มोनอเมอร์.....	33
4.3 ผลการวิจัย.....	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4 การวิจารณ์ผลที่ได้จากการวิจัย.....	48
5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 งานวิจัยที่ควรทำในอนาคต.....	50
รายการอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	52
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	55



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ รูปที่		หน้า
3.1	กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेटโดยสังเขปของ บริษัท เทยีน (ประเทศไทย) จำกัด.....	9
3.2	กระบวนการเตรียม พอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेटมอนอเมอร์.....	10
3.3	แบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट.....	12
4.1	จุดควบคุมในกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ของ บริษัท เทยีน (ประเทศไทย) จำกัด.....	20
4.2	ผังกระบวนการสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट.....	23
4.3	ผังกระบวนการสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेटและการรวมตัวเป็น ออลิโกเมอร์.....	24
4.4	ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอล เปลี่ยนแปลง.....	34
4.5	อัตราการไหลของมอนอเมอร์ในออลิโกเมอร์ เมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง.....	35
4.6	อัตราการไหลของเตตระเมอร์ในออลิโกเมอร์ เมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง.....	36
4.7	อัตราการไหลของน้ำที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอกกลับ เมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง.....	37
4.8	อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอกกลับ เมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง.....	38
4.9	อัตราการไหลของน้ำในสายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอล เมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง.....	39
4.10	อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลที่สายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอล เมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง.....	40
4.11	ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	41
4.12	อัตราการไหลของมอนอเมอร์ของในออลิโกเมอร์เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง....	42
4.13	อัตราการไหลของเตตระเมอร์ในออลิโกเมอร์เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	43
4.14	อัตราการไหลของน้ำที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอกกลับเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ รูปที่	หน้า
4.15 อัตราการไหลของ เอทิลีนไกลคอลที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอกกลับ เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	45
4.16 อัตราการไหลของน้ำในสายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอล เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	46
4.17 อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลที่สายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอล เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	47



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1	สารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองในงานวิจัย.....15
3.2	Atomic group contribution ที่จำเป็นในการคำนวณ ΔH_f^0 และ ΔG_f^016
3.3	ค่า ΔH_f^0 และ ΔG_f^0 ของสารเคมีในการสร้างแบบจำลอง.....16
3.4	Atomic group contribution ที่จำเป็นในการคำนวณค่าจุดเดือด (T_b).....17
3.5	จุดเดือดของสารเคมีในการสร้างแบบจำลอง.....17
3.6	Atomic group contribution ที่จำเป็นในการประมาณค่า T_c และ P_c18
3.7	ค่าอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตของสารเคมีในการสร้างแบบจำลอง.....19
4.1	จุดควบคุมและสถานะการสังเคราะห์หมอนอเมอร์ของ.....21
4.2	ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจากการคำนวณ โดยแบบจำลอง การสังเคราะห์หมอนอเมอร์.....25
4.3	อัตราการไหลของไอและของเหลวของผลิตภัณฑ์จาก หน่วยเอสเทอร์รีไฟเคชัน.....26
4.4	สัดส่วนโดยน้ำหนักจากการคำนวณ โดยแบบจำลองเปรียบเทียบ กับข้อมูลการผลิต27
4.5	สัดส่วนโดยโมลจากการคำนวณ โดยแบบจำลองเปรียบเทียบ กับข้อมูลการผลิต.....30

สัญลักษณ์และตัวย่อ

Latin Symbol

a, b, c_i	Empirical constants
c_p	Constant pressure heat capacity
f	Fugacity
f_i	Fugacity of component i
G	Gibbs free energy
ΔG_f	Gibbs free energy of formation
H	Enthalpy
ΔH_f	Heat of formation
K	Equilibrium constant
K_i	Equilibrium ratio
P	Pressure
R	Gas law constant
T	Absolute temperature
x_i	Liquid mol fraction of component i
y_i	Vapor mol fraction of component i

Greek symbol

ν	Stoichiometric coefficient
-------	----------------------------

Superscript

c	Critical property
---	-------------------

Superscript

L, S, ν , α , β	Phase identification
$^\circ$	Standard State- With operator $^\circ$ denotes a standard property

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มวลเหตุและที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (พอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेट) ในประเทศไทยนับเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ใช้เงินลงทุนสูงและเป็นการร่วมทุนจากต่างประเทศดั่งนั้นเทคโนโลยีที่ใช้จะมาพร้อมการลงทุนของบริษัทที่ร่วมทุนด้วย ปัจจุบันจำนวนโรงงานที่ผลิตพอลิเอสเตอร์มีมากกว่า 10 แห่ง ส่วนใหญ่ผลิต เส้นใยสั้น เส้นใยแบบกึ่งยัด (Partial oriented yam, POY) และเส้นด้ายใยยาวโดยข้อมูลในเอกสารสถิติสิ่งทอไทย 2540 ได้แสดงตัวเลขของกำลังการผลิตในปี พ.ศ. 2539 รวมทั้งสิ้น 366,700 ตัน แบ่งเป็นชนิดเส้นใยสั้น 174,700 เส้นใยยาว แบบกึ่งยัด 139,100 ตัน และเส้นด้ายใยยาว 52,900 ตัน ทั้งนี้มีการนำเข้าวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิต คือ เอทิลีนไกลคอล กรดเทอร์เรพธาลิก และ ไดเมทิลเทอร์เรพธาลेटจากต่างประเทศแต่ก็มีวัตถุดิบจำนวนหนึ่ง ซึ่งสามารถผลิตได้แล้วภายในประเทศ

กระบวนการผลิตเม็ดพอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेटสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ การสังเคราะห์ให้ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट(มอนอเมอร์) การรวมไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेटเป็นพอลิเอสเตอร์และการผลิตเม็ดพอลิเอสเตอร์ ขั้นตอนการเตรียมมอนอเมอร์จัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของพอลิเมอร์ จากข้อมูลของกระบวนการผลิต ทำให้ทราบได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ กล่าวคือยังพบปริมาณของหมู่คาร์บอกซิล(-COOH) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จึงต้องเติมเอทิลีนไกลคอลเพิ่มเติมในขั้นตอนการรวมมอนอเมอร์ นอกจากนี้อัตราส่วนของเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิกที่ป้อนเข้าสู่ขั้นตอนสังเคราะห์มอนอเมอร์เพียง 1.35 : 1 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับความต้องการเอทิลีนไกลคอลตามสมการการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันปฏิกิริยาอื่น ๆ เช่น การรวมมอนอเมอร์ หรือการรวมตัวของเอทิลีนไกลคอลเป็นต้น อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेट จึงเลือกศึกษาวิจัยระบบการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेटเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงการสังเคราะห์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ จึงเป็นการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการผลิตสำหรับหน่วยการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลेटที่สอดคล้องกับการผลิตเม็ดพอลิเอสเตอร์ของบริษัทเทยีน(ประเทศไทย) จำกัด

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 พัฒนาแบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิตของกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์สำหรับพอลิเอสเทอร์ในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่อปริมาณกรดเทอร์เรพธาลิกต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์สำหรับพอลิเอสเทอร์

1.2.3 ศึกษาผลกระทบของความดันที่ใช้ในปฏิกิริยาต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์สำหรับพอลิเอสเทอร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาความรู้พื้นฐานของการเตรียมมอนอเมอร์สำหรับผลิตพอลิเอสเทอร์ในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์

1.3.2 พัฒนาแบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิตของกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์สำหรับผลิตพอลิเอสเทอร์ในอุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์

1.3.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองระบบปฏิกิริยาข้างต้นกับข้อมูลการผลิต

1.3.4 ใช้แบบจำลองระบบปฏิกิริยาข้างต้นศึกษาผลกระทบของสัดส่วนปริมาณ เอทิลีนไกลคอลต่อปริมาณกรดเทอร์เรพธาลิกที่ใช้ในปฏิกิริยาต่อกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลจาก 60 เปอร์เซ็นต์ ถึง 170 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่ใช้งานจริง

1.3.5 ใช้แบบจำลองระบบปฏิกิริยาข้างต้นศึกษาผลกระทบของความดันที่ใช้ในปฏิกิริยาต่อกระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ ที่ช่วงความดันสัมบูรณ์ 75 เปอร์เซ็นต์ ถึง 210 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ใช้งานจริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของกระบวนการผลิต

พอลิเอทิลีนเทอร์เรพทาเลตแบบต่อเนื่อง (Optimal State Estimation in the Transesterification Stage of a Continuous Polyethylene Terphthalate Condensation Polymerization Process)

ชอย และ คุณ (Choi and Khun, 1986) แห่งมหาวิทยาลัยแมริแลนด์ ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการเตรียมพอลิเอทิลีนเทอร์เรพทาเลตมอนอเมอร์ของปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่าง ไดเมทิลเทอร์เรพทาเลต และเอทิลีนไกลคอลของกระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทอร์เรพทาเลตแบบต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยเน้นผลของการแยก เมทานอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมต่อความสมบูรณ์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา จากผลการวิจัยพบว่าทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและการแยกเมทานอลออกจากระบบปฏิกิริยาจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วและมีความสมบูรณ์ของปฏิกิริยามากขึ้น

2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องของปฏิกิริยา

ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างไดเมทิลเทอร์เรพทาเลตและเอทิลีนไกลคอล (A Modeling of Semi-Batch Reactors for Melt Transesterification of Dimethyl Terephthalate with Ethylene Glycol)

ชอย (Choi , 1987) แห่งมหาวิทยาลัยแมริแลนด์ ได้ทำงานวิจัยต่อจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในครั้งนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องของปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลเทอร์เรพทาเลตและเอทิลีนไกลคอลเพื่อพยากรณ์ถึงการเกิดปฏิกิริยา ออลิโกเมอร์ไรเซชัน (Oligomerization) การกระจายตัวของพอลิเมอร์สายโซ่สั้น ๆ ใน ออลิโกเมอร์ (Oligomer) และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา ในงานวิจัยได้ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการป้อนเข้าของ เอทิลีนไกลคอล ต่อ ไดเมทิลเทอร์เรพทาเลต การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ออลิโกเมอร์ที่เกิดขึ้น จากผลการวิจัยพบว่า ที่อัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลต่อไดเมทิลเทอร์เรพทาเลตเท่ากับ 2.0-2.5 จะได้ไดเมอร์ เป็นผลิตภัณฑ์หลักในออลิโกเมอร์และที่อัตราการป้อนเข้าน้อยกว่า

2.0 ออลิกอเมอร์สายโซ่ยาว จะเกิดได้มากขึ้น ในส่วนของความสมบูรณ์ของปฏิกริยานั้นการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิและสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกริยา จะมีน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลง อัตราการป้อนเข้า

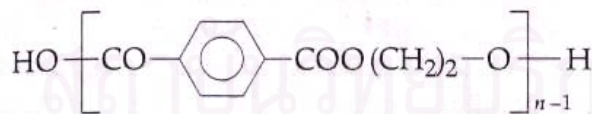
2.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการขั้นที่ 1 ของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องใน กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์ด้วยกรดเทอร์เรพทาลิก(Optimization of The first stage continuous reactor-sequence in polyester manufacture form purified terephthalic acid)

อิมมานูเอล และ กุปต้า (Immanuel and Gupta,1994) มหาวิทยาลัยแห่งสิงคโปร์ ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกริยาขั้นที่ 1 (เอสเทอร์ริฟิเคชัน) ในกระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์ด้วยกรดเทอร์เรพทาลิกโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง(CSTR) แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง 3 หน่วยต่อกันแบบอนุกรม โดยแต่ละ หน่วยจะมีการแยกเททิลีนไกลคองคอง ป้อนกับเข้าสู่กระบวนการที่หน่วยที่ 1 งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของเวลาในการเกิดปฏิกริยาในเครื่องปฏิกรณ์แต่ละตัว, อัตราส่วนการป้อนเข้าของวัตถุดิบ, อุณหภูมิ และอัตราป้อนกลับของผลิตภัณฑ์ จากเครื่องปฏิกรณ์หน่วยที่ 3 กลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์หน่วยที่ 1 เพื่อหา สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต

บทที่ 3

แบบจำลองระบบปฏิกิริยาการสังเคราะห์หมอนอเมอร์

การค้นพบพอลิเอสเตอร์เริ่มจากโครงการวิจัยพอลิเมอร์ของ คาโรเทอร์ (Dr. W.H. Carothers) ในช่วงปี ค.ศ. 1930 โดยค้นพบว่าพอลิเอสเตอร์เกิดจากการรวมตัวระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีหมู่คาร์บอกซิลสองหมู่ (Aliphatic dicarboxylic Acid) กับไกลคอล (Glycol) เนื่องจากพอลิเอสเตอร์ที่ได้มีจุดหลอมเหลวต่ำ ละลายได้ง่ายในตัวทำละลายอินทรีย์และเกิดไฮโดรไลซิสได้ง่าย ประกอบกับในระยะเวลาเดียวกันนี้เองงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาในล่อนกำลังเป็นที่สนใจอย่างยิ่ง ทำให้นักวิจัยเกี่ยวกับพอลิเอสเตอร์ได้หยุดชะงักลง ต่อมาในปี ค.ศ. 1941 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ วินฟิลด์ และ ดิกสัน (Whinfield and Dickson) ได้ศึกษาผลงานของคาโรเทอร์ และทั้งสองคนมองเห็นจุดอ่อนของ อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic Polyester) ที่คาร์โบเทอร์สังเคราะห์ขึ้น เนื่องจาก หมู่อะลิฟาติก เป็นหมู่ที่อ่อนตัว หักงอง่าย ทำให้พอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทั้งสองคิดว่าจะถ้าเปลี่ยนหมู่อะลิฟาติกให้เป็นหมู่อะโรมาติก (Aromatic Group) พอลิเมอร์ที่เตรียมได้น่าจะมีความทนทานต่อความร้อนได้ดีขึ้นและยอมละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ได้น้อยลง ต่อมาในปี ค.ศ. 1941 ทั้งสองคนก็ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ใยเทียมประเภทพอลิเอสเตอร์ จากปฏิกิริยาการรวมตัวระหว่างเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) และ กรดเทอรูเรพทาติก (Terephthalic acid, TPA) พอลิเมอร์นี้ถูกตั้งชื่อว่า เทอร์ไรลีน (Terylene) หรือมีชื่อทางเคมีว่าพอลิเอทิลีนเทอรูเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลดังแสดงข้างล่างนี้



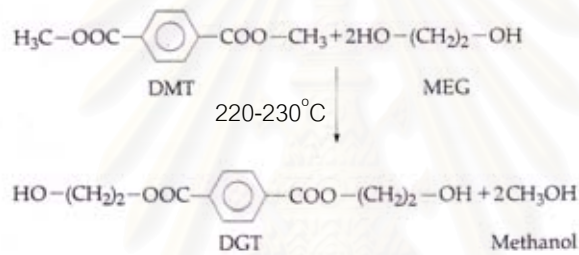
Polyethylene terephthalate , PET

3.1 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพอลิเอสเตอร์

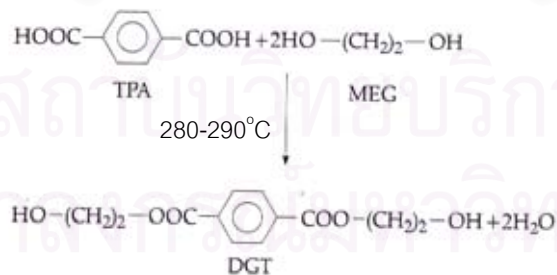
ปฏิกริยาเคมีในกระบวนการผลิตพอลิเอสเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้
(Gupta et al., 1983:554)

3.1.1 ปฏิกริยาการสังเคราะห์หมอนอเมอร์

ปฏิกริยาเคมีระหว่าง ไดเมทิลเทอร์เรพทาเลต (Dimethylterephthalate, DMT) กับเอทิลีนไกลคอล จะได้ไดโกลคอลเทอร์เรพทาเลต (Diglycolterephthalate, DGT) เป็นผลิตภัณฑ์ และเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ดังแสดงในสมการ



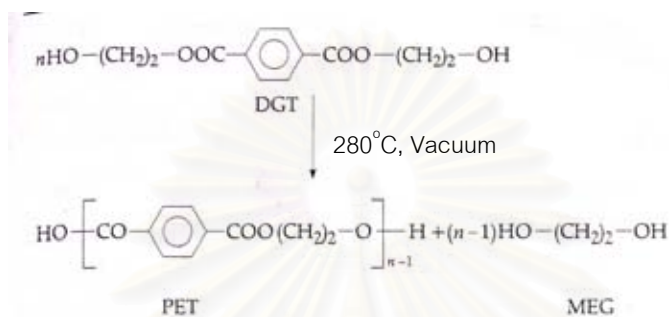
อีกทางเลือกหนึ่งคือ กรดเทอร์เรพทาลิกทำปฏิกริยากับเอทิลีนไกลคอล จะได้นำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมดังสมการ



ถูกลบ: <sp>

3.1.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์

มอนอเมอร์จากปฏิกิริยาข้างต้นสามารถรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้โดยกำจัดโมเลกุลของเอทิลีนไกลคอลออกจากโมเลกุลของมอนอเมอร์ดังสมการ



ถูกพบ: <sp>

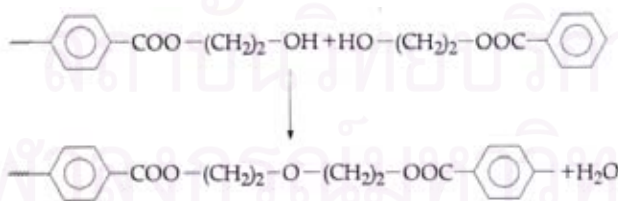
3.1.3 ปฏิกริยาข้างเคียงที่สำคัญ

ปฏิกิริยารวมตัวของเอทิลีนไกลคอล



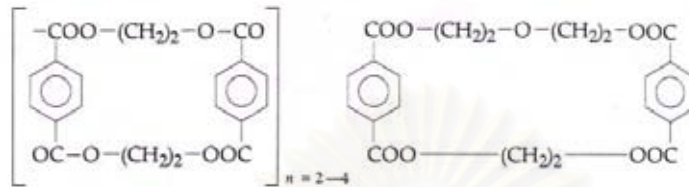
ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethyleneglycol, DEG) จะเกิดขึ้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ประมาณ 20% ของไดเอทิลีนไกลคอลที่เกิดขึ้นในการผลิต เนื่องจากไดเอทิลีนไกลคอลให้ผลต่อการติดสีของพอลิเอสเตอร์จึงต้องเพิ่มเติมลงไปในช่วงขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์

ปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์



อีเทอร์ที่เกิดขึ้นจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ทำงานได้ช้าลง

ปฏิกิริยาการเกิดวงออลิโกเมอร์ (Cyclic Oligomer)

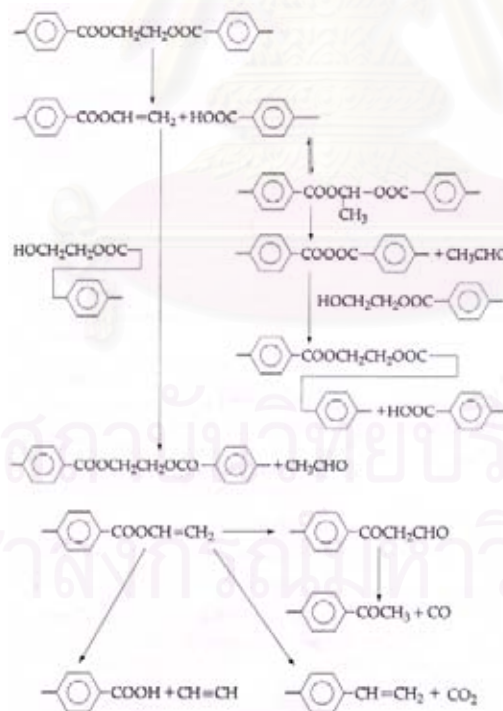


วงออลิโกเมอร์ จะเกิดขึ้นได้เองประมาณ 1.5% ของมอนอเมอร์ที่เกิด

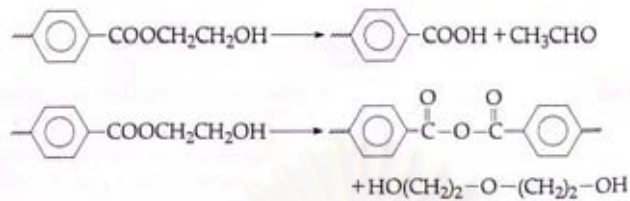
ปฏิกิริยาการเสถียรภาพของพอลิเมอร์ (Degradation)

พอลิเอทิลีนเทอร์เรพทาเลต ซึ่งอยู่ในรูปหลอมเหลวสามารถเกิดการไม่เสถียรทางโมเลกุล เมื่ออุณหภูมิที่สูงเกิน 280 องศาเซลเซียสในขั้นตอนการรวมมอนอเมอร์ซึ่งไม่สามารถคาดเดาการเกิดปฏิกิริยาได้ ความไม่เสถียรอาจเกิดขึ้นที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ หรือ เกิดขึ้นระหว่างกลางสายโซ่ก็ได้

ปฏิกิริยาแบ่งโมเลกุลพอลิเมอร์ (Chain scission)

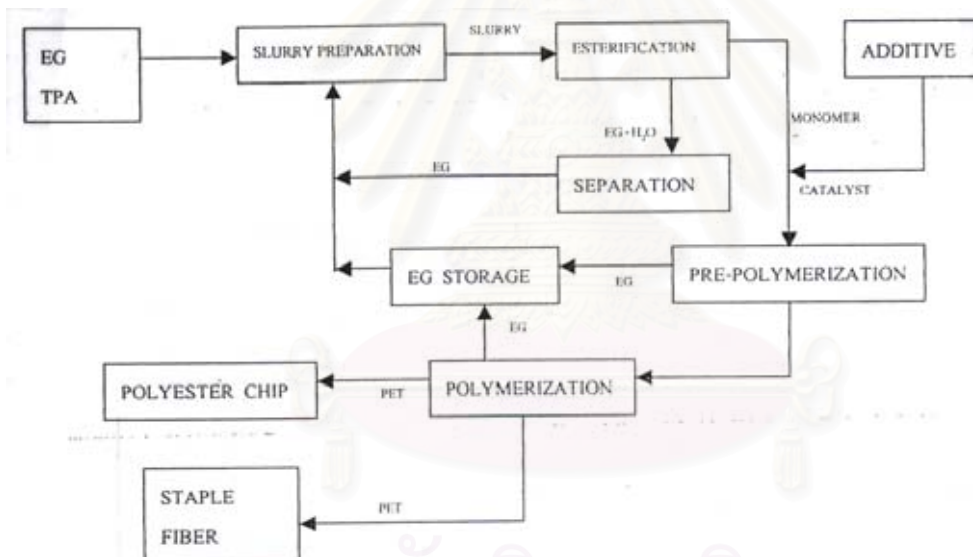


ปฏิกิริยาปลายสายไซโมเลกุล (Chain end reaction)



การเปลี่ยนรูปของสายไซโมเลกุลที่เกิดจะส่งผลให้พอลิเอสเตอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความขุ่นหรือมีสีเหลือง และไม่มีเสถียรภาพเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

3.2 กระบวนการผลิตเม็ดพอลิเอสเตอร์



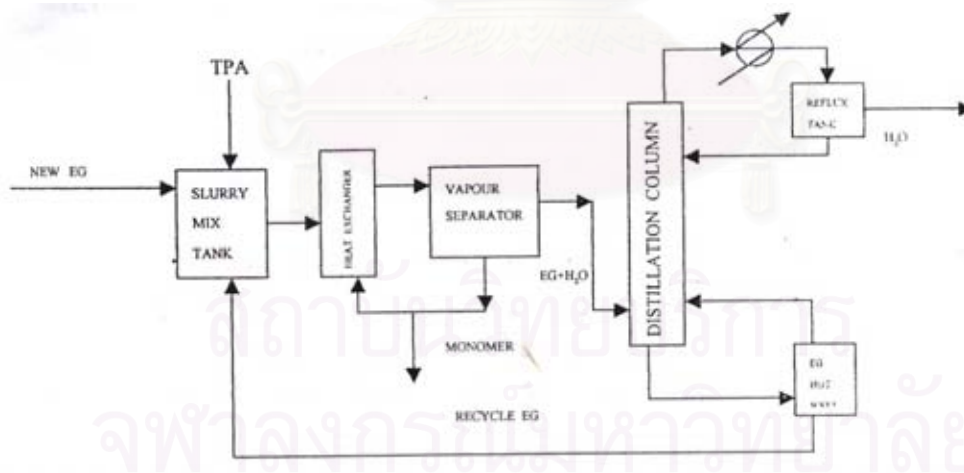
รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทีลีนเทอร์เรพธาลเต โดยสังเขปของบริษัท เทยีน (ประเทศไทย) จำกัด

สำหรับกระบวนการผลิตพอลิเอสเตอร์จากกรดเทอร์เรพธาลิก กรดเทอร์เรพธาลิกและเอทีลีนไกลคอลถูกผสมเข้าด้วยกันและเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะแก่ปฏิกิริยาสังเคราะห์มอนอเมอร์ในช่วงอุณหภูมิ 280-290 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 1.0 -1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะ

ของการสังเคราะห์มอนอเมอร์ดังรูปที่ 3.1 เอทิลีนไกลคอลและน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจะอยู่ในสภาพไอผสม ไอของเอทิลีนไกลคอลสามารถแยกกลับคืนได้ด้วยวิธีการกลั่นแยกน้ำออกจากไอผสมข้างต้น เอทิลีนไกลคอลที่แยกกลับคืนจะถูกนำไปผสมกับกรดเทอร์เรพธาลิกอีกครั้ง มอนอเมอร์ที่ได้จะถูกส่งไปยังหน่วยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ขั้นต้น ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ ณ อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส เอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจะอยู่ในสภาพไอ จึงแยกออกจากพอลิเอสเตอร์ได้ง่าย และนำกลับไปใช้ผสมกับ กรดเทอร์เรพธาลิกอีกครั้ง พอลิเอสเตอร์จะถูกส่งต่อไปยังหน่วยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ขั้นสุดท้าย และส่งผลต่อไปยังหน่วยผลิตเม็ดพอลิเอสเตอร์

3.3 แบบจำลองหน่วยสังเคราะห์มอนอเมอร์

ปฏิกิริยาสังเคราะห์มอนอเมอร์เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน กรดเทอร์เรพธาลิกจะเปลี่ยนเป็นมอนอเมอร์ได้มากขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 290 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะการดำเนินการที่ความดัน 1.0-1.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กรดเทอร์เรพธาลิกมีสถานะเป็นของเหลวในขณะที่เอทิลีนไกลคอลมีแนวโน้มที่จะมีสถานะไอ ดังนั้นปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นในสถานะของเหลว ซึ่งมีเอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่จำกัดจึงยังคงมีกรดเทอร์เรพธาลิกเหลืออยู่ กรดเทอร์เรพธาลิกถูกแยกออกจากไอผสมเพื่อนำเวียนกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เคมีอีกครั้ง



รูปที่ 3.2 กระบวนการเตรียม พอลิเอทิลีนเทอร์เรพธาลเตต มอนอเมอร์

การประเมินค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส จากค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจะมีค่าประมาณ 89 เปอร์เซนต์ จากข้อมูลการผลิตพบว่าค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาของหน่วยสังเคราะห์มอนอเมอร์มีค่าสูงถึง 90.5 เปอร์เซนต์เทียบกับปริมาณกรดเทอร์เรพธาลิก ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิกภายใต้เงื่อนไขของสมดุลเคมี

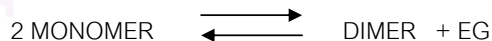
ณ สภาวะการสังเคราะห์มอนอเมอร์นั้น จะเกิดการรวมตัวของมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์สายสั้น ๆ ที่ความยาวของสายโซ่โมเลกุลตั้งแต่ 2-6 หน่วย เอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากการรวมตัวของมอนอเมอร์และกลับเข้าทำปฏิกิริยากับกรดเทอร์เรพธาลิกเพิ่มความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา แต่ในการผลิตจริงจะไม่มี การตรวจวัดปริมาณของออลิโกเมอร์และไม่สามารถคาดเดาถึงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้

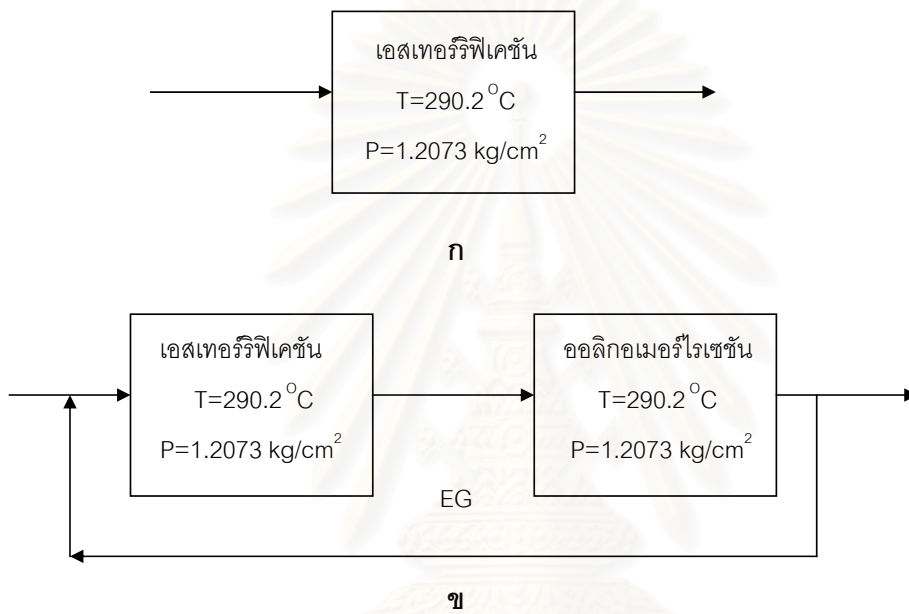
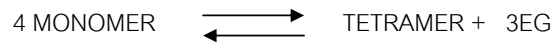
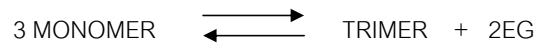
จากงานวิจัยของ ซอย (K.Y.Choi ,1987) แห่งมหาวิทยาลัยแมรี่แลนด์ พบว่า ที่อัตราส่วนการป้อนเข้าของ เอทิลีนไกลคอลต่อไดเมทิลเทอร์เรพธาลิก ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์มอนอเมอร์ที่ต่ำกว่า 2 จะให้ออลิโกเมอร์ที่ความยาวของสายโซ่ 3-5 หน่วย เป็นผลิตภัณฑ์หลัก เช่นเดียวกันกับการใช้กรดเทอร์เรพธาลิกเป็นวัตถุดิบ ออลิโกเมอร์ที่ได้จึงน่าจะมีความยาวของสายโซ่ประมาณ 4 หน่วยเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิกจึงรวมปฏิกิริยาการรวมตัวของมอนอเมอร์ที่ความยาวของสายโซ่ตั้งแต่ 2-4 หน่วย และเพื่อความสะดวก จึงสมมติให้ออลิโกเมอร์อาจเป็น ไดเมอร์ ไตรเมอร์ หรือ เตตระเมอร์ เพียงองค์ประกอบเดียว และปฏิกิริยาการรวมตัวเป็นออลิโกเมอร์เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขสมดุลเคมีเช่นเดียวกัน ดังนั้นระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิกจึงประกอบด้วย การสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิกเพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 3.3 ก และการรวมตัวเป็นออลิโกเมอร์ดังรูปที่ 3.3 ข

ปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิก



ปฏิกิริยาการรวมมอนอเมอร์เป็นออลิโกเมอร์





รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลเตต

3.4 สมดุลเคมี (Chemical equilibrium)

สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลเตต และการรวมตัวเป็นอลิโกเมอร์ข้างต้นคือ

$$K_{\text{Monomer}} = \frac{[\text{MONOMER}][\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{TPA}][\text{EG}]^2}$$

$$K_{\text{Dimer}} = \frac{[\text{DIMER}][\text{EG}]}{[\text{MONOMER}]^2}$$

$$K_{\text{Trimer}} = \frac{[\text{TRIMER}][\text{EG}]^2}{[\text{MONOMER}]^3}$$

$$K_{\text{Tetramer}} = \frac{[\text{TETRAMER}][\text{EG}]^3}{[\text{MONOMER}]^4}$$

ค่าคงที่สมดุลเคมี ณ สภาวะมาตรฐาน (1 บรรยากาศ, 25 องศาเซลเซียส) ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) สำหรับปฏิกิริยาแสดงในสมการ

$$\Delta G_{\text{rxn}}^0 / RT = -\ln K_0$$

$$\Delta G_{\text{rxn}}^0 = \sum v_i \Delta G_{f,i}^0$$

$$d \ln K / dT = \Delta H_{\text{rxn}} / RT^2 \quad 1)$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้จะเห็นว่า ค่า K มีความสัมพันธ์กับ ΔH_{rxn} เท่านั้น คือ เมื่อระบบเป็นระบบคายความร้อน ซึ่ง $\Delta H_{\text{rxn}} < 0$ ค่า K ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ค่า K จะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสำหรับระบบที่เป็นระบบดูดความร้อน (เกริกชัย สุภาณัจฉี, 2538:8-10)

ค่า ΔH_{rxn} สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta H_{\text{rxn}} = \Delta H_{\text{rxn}}^0 + \int_{298}^T (\sum v_i c_{p,i}^0) dt \quad 2)$$

เมื่อ $c_{p,i}^0$ คือค่า ความจุความร้อนจำเพาะของสาร i ในช่วงอุณหภูมิ 298 K ถึง T สำหรับกรณีพิเศษโดยทั่วไปความจุความร้อนของสารจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของอุณหภูมิ

$$c_{p,i}^0 = a_i + b_i T + c_i T^2$$

เมื่อ a_i , b_i และ c_i เป็นค่าคงที่ของสมการสำหรับสาร i

แทนค่า c_{pi} ลงในสมการที่ 2 และทำการอินทิเกรตจะได้

$$\Delta H_{rxn} = \Delta H_0 + (\sum v_i a_i)T + ((\sum v_i b_i)/2)T^2 + ((\sum v_i c_i)/3)T^3 \quad (3)$$

โดยที่ ΔH_0 เป็นค่าคงที่ซึ่งเกิดจากการอินทิเกรตสมการที่ 2
แทนค่าสมการที่ 3 ลงในสมการที่ 1 และทำการอินทิเกรตจะได้

$$\ln K = \Delta H_0 / RT + ((\sum v_i a_i)/R)\ln T + ((\sum v_i b_i)/2R)T + ((\sum v_i c_i)/6R)T^2 + I \quad (4)$$

โดยที่ I เป็นค่าคงที่ซึ่งเกิดจากการอินทิเกรตสมการที่ 1

3.5 สมดุลไอ-ของเหลว

พิจารณาระบบที่เป็นสารละลายอุดมคติ ทั้งใน เฟสก๊าซและเฟสของเหลว ในกรณีนี้ที่ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล จะได้ว่า

$$f_i^G = f_i^L$$

ประยุกต์ใช้สารละลายอุดมคติกับทั้ง 2 เฟส

$$y_i f_i^G = x_i f_i^L$$

ซึ่งค่า fugacity ของสารทุกตัวในระบบจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและความดันเท่านั้น

$$K_i = \frac{f_i^L}{f_i^G} \quad (5)$$

$$y_i = K_i x_i$$

K_i คือค่าอัตราส่วนที่ภาวะสมดุล (equilibrium ratio)

ในงานวิจัยสมการทางเทอร์โมไดนามิกที่ใช้ในการจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ ไดโกลคอลเทอร์เรพธาคือ Modified Panagiotopoulos – Reid Improve Peng - Robinson (PR-MODIFIED PANAG-REID.)

3.6. การคำนวณหาค่าโดยประมาณของคุณสมบัติของออลิโกเมอร์

สารประกอบในกลุ่มออลิโกเมอร์เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบชั่วคราวจึงไม่มีการวัดหรือคำนวณค่าคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ ดังนั้นจึงต้องคำนวณประมาณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่จำเป็นได้แก่ ΔH_f , ΔG_f , T_b , T_c , P_c สำหรับการพยากรณ์ระบบปฏิกิริยาข้างต้น

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองในงานวิจัย

ลำดับที่	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	คำย่อ
1	เอทิลีนไกลคอล	$C_2H_6O_2$	EG
2	น้ำ	H_2O	-
3	กรดเทอร์เรพธาลิก	$C_8H_6O_4$	TPA
4	ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิต(มอนอเมอร์)	$C_{12}H_{14}O_6$	MONOMER
5	ไดเมอร์	$C_{22}H_{22}O_{10}$	DIMER
6	ไตรเมอร์	$C_{32}H_{30}O_{14}$	TRIMER
7	เตตระเมอร์	$C_{42}H_{38}O_{18}$	TETRAMER

3.6.1 การประมาณค่า Heat of formation และ Gibbs energy of formation

ที่สภาวะมาตรฐาน วิธีการประมาณค่า Heat of formation และ Gibbs energy of formation ที่มีความถูกต้องสูงนั้นนิยมใช้วิธีการประมาณของ โจแบค (Joback) วิธีการประมาณจะใช้วิธีการรวมค่า ของแต่ละ atomic group เข้าด้วยกัน (Perry,1986 : 337-350)

$$\Delta H_f^0 = 68.29 + \sum N_i \Delta H_i$$

$$\Delta G_f^0 = 53.88 + \sum N_i \Delta G_i$$

- โดย ΔH_f^0 = Heat of formation ที่ 298.15 K มีหน่วยเป็น kJ/mol
 ΔG_i = ค่า Gibbs energy ของแต่ละ atomic group
 N_i = จำนวนของ atomic group ในสาร 1 โมเลกุล
 ΔH_i = ค่า Heat of formation ของ atomic group
 ΔG_i = ค่า Gibbs energy ของแต่ละ atomic group

ตารางที่ 3.2 Atomic group contribution ที่จำเป็นในการคำนวณ ΔH_f^0 และ ΔG_f^0

Group	ΔH_i (kJ/mol)	ΔG_i (kJ/mol)
=CH (aromatic)	2.09	11.3
=C- (aromatic)	46.43	54.05
-COO- (ester)	-337.92	-301.95
-CH2- (None ring)	20.64	8.42
-OH (alcohol)	208.04	-189.2

ตารางที่ 3.3 ค่า ΔH_f^0 และ ΔG_f^0 ของสารเคมีในการสร้างแบบจำลอง

สารเคมี	ΔH_f^0 (kJ/mol)			ΔG_f^0 (kJ/mol)		
	ค่าจริง	ค่าจากการคำนวณ	% ความคลาดเคลื่อน	ค่าจริง	ค่าจากการคำนวณ	% ความคลาดเคลื่อน
กรดเทอร์เรพธาลิก	-717.89	-683.93	-4.73%	-597.8	-568.56	-4.79%
ไดไกลคอลเทอร์เรพธาลेट	-	-1004.97	-	-	-741.44	-
ไดเมอร์	-	-1620.87	-	-	-1175.2	-
ไตรเมอร์	-	-2236.77	-	-	-1608.96	-
เตตระเมอร์	-	-2852.67	-	-	-2042.72	-

เปรียบเทียบค่า ΔH_f^0 และ ΔG_f^0 ของกรดเทอร์เรพธาลิกจากการคำนวณและค่าจริงจากการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนเพียง 4.73% ค่าจากการคำนวณที่เหลือจึงสามารถเชื่อถือได้

3.6.2 การประมาณค่าจุดเดือด

ด้วยวิธีการของ โจแบค (Joback) เราประมาณค่าจุดเดือดได้ (Reid,1989:25)

$$T_b = 198 + \sum \Delta_{Tb}$$

โดย T_b = จุดเดือดมีหน่วย K

Δ_{Tb} = ค่าจุดเดือดย่อยของแต่ละ atomic group

ตารางที่ 3.4 Atomic group contribution ที่จำเป็นในการคำนวณค่าจุดเดือด (T_b)

GROUP	Δ_{Tb}
= CH (aromatic)	21.78
= C- (aromatic)	21.32
-COO- (ester)	81.1
-CH2- (None ring)	22.88
-OH (alcohol)	92.88

ตารางที่ 3.5 จุดเดือดของสารเคมีในการสร้างแบบจำลอง

สารเคมี	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)		
	ค่าจริง	ค่าจากการคำนวณ	%ความคลาดเคลื่อน
กรดเทอร์พีนอลิก	479.85	412.79	13.97%
ไดโกลคอลลเทอร์พีนอลิก	409.85	454.09	10.79%
ไดเมอร์	-	831.81	-
ไตรเมอร์	-	1442.8	-
เตตระเมอร์	-	1507.25	-

ค่าจุดเดือดของกรดเทอร์เรพธาลิก และไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อน 13.97เปอร์เซ็นต์ และ 10.79เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

3.6.3 การประมาณค่า อุณหภูมิวิกฤต (T_c) และความดันวิกฤต (P_c)

วิธีการของ ไลเดอร์เซน (Lydersen) เป็นวิธีการที่ค่อนข้างสะดวกในการประมาณค่าอุณหภูมิและความดันวิกฤตของสาร โดยใช้สมการ (Reid,1989:12-15)

$$T_c = T_b / [0.567 + \sum \Delta_{T_c} - (\sum \Delta_{T_c})^2]$$

และ
$$P_c = 0.101325 M / [0.34 + \sum \Delta_{P_c}]^2$$

โดยที่ T_c = อุณหภูมิวิกฤต มีหน่วยเป็น K

P_c = ความดันวิกฤตมีหน่วยเป็น MPa

Δ_{T_c} = ค่าอุณหภูมิวิกฤตย่อยของแต่ละ Atomic group

Δ_{P_c} = ค่าความดันวิกฤตย่อยของแต่ละ Atomic group

T_b = จุดเดือด มีหน่วยเป็น K

ตารางที่ 3.6 Atomic group contribution ที่จำเป็นในการประมาณค่า T_c และ P_c

GROUP	Δ_{T_c}	Δ_{P_c}
= CH (aromatic)	0.011	0.154
= C- (aromatic)	0.011	0.154
= COO (ester)	0.047	0.47
- CH ₂ (None ring)	0.02	0.02
- OH alcohol	0.080	0.082

ตารางที่ 3.7 ค่าอุณหภูมิวิกฤต และ ความดันวิกฤต ของสารเคมีในการสร้างแบบจำลอง

สารเคมี	อุณหภูมิวิกฤต (T_c , $^{\circ}\text{C}$)			ความดันวิกฤต (P_c , kg/cm^2)		
	ค่าจริง	ค่าจากการคำนวณ	% ความคลาดเคลื่อน	ค่าจริง	ค่าจากการคำนวณ	% ความคลาดเคลื่อน
กรดเทอร์เรพธาลิก	733.85	653.48	10.95	40.278	40.288	0.02
ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट	572.85	522.24	8.83	25.187	28.029	11.28
ไดเมอร์	-	1097.46	-	-	14.96	-
ไตรเมอร์	-	1717.90	-	-	10.648	-
เตตระเมอร์	-	2889.28	-	-	8.2711	-

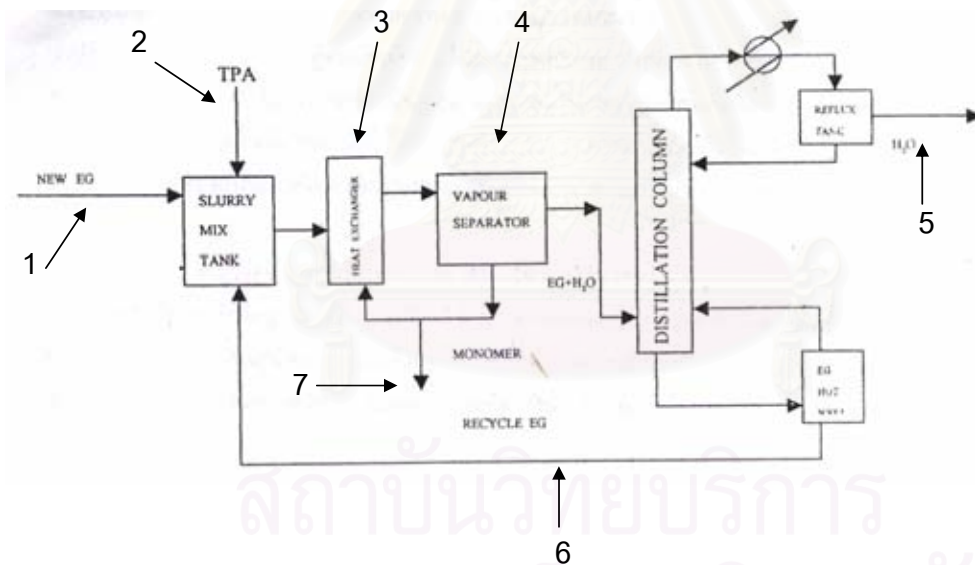
ค่าอุณหภูมิและความดันวิกฤตของกรดเทอร์เรพธาลิก และไดโกลคอลเทอร์เรพธาลेट จากการคำนวณมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดจึงเชื่อถือได้

บทที่ 4

ขั้นตอนการวิจัยและผลการวิจัย

4.1. การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ในกระบวนการสังเคราะห์มอนอเมอร์ข้อมูลสถานะการผลิตซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และข้อมูลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบได้ถูกบันทึกไว้เฉพาะส่วนที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบจะนำไปใช้สำหรับทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์มอนอเมอร์



รูปที่ 4.1 จุดควบคุมในกระบวนการสังเคราะห์มอนอเมอร์ของบริษัทเทยีน(ประเทศไทย)จำกัด

ตารางที่ 4.1 จุดควบคุมและสภาวะการสังเคราะห์พอลิเมอร์

จุดควบคุมที่	รายละเอียดกระบวนการผลิต	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (kg/cm ²)	อัตราการไหล		สัดส่วนสารประกอบ	
				kg/hr	k-mol/hr	โดยน้ำหนัก	โดยโมล
1.	การป้อนวัตถุดิบ(EG)	57	1.0332	3939.6	70.0	-	-
	- EG			3775.8	60.9	0.9584	0.87
	- H ₂ O			163.8	9.1	0.0416	0.13
2.	การป้อนวัตถุดิบ (TPA)	32	1.0332	7470	45	-	-
	- TPA			7470	45	1.0	1.0
3.	หน่วยสังเคราะห์พอลิเมอร์	290.3	1.2073	-	-	-	-
4.	หน่วยแยกไอ(Vapor Separator)	290.2	1.2073	-	-	-	-
5.	ผลิตภัณฑ์ยอดหอกกลับ	-	-	1850.2	100.1	-	-
	- EG			68.2	1.10	0.04	0.01
	- H ₂ O			1782	99.0	0.96	0.99
6.	เวียนกลับเอทิลีนไกลคอล	175	-	3063.4	-	-	-
	- EG			2511	40.5	0.82	-
	- H ₂ O			50.4	2.8	0.02	-
7.	อลิโกเมอร์(Oligomer)	290.2	1.2073	9415	-	-	-
	- TPA			531.5	0.75	0.005	-
	- EG			46.5	3.20	0.056	-

สภาวะการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์หมอนอเมอร์

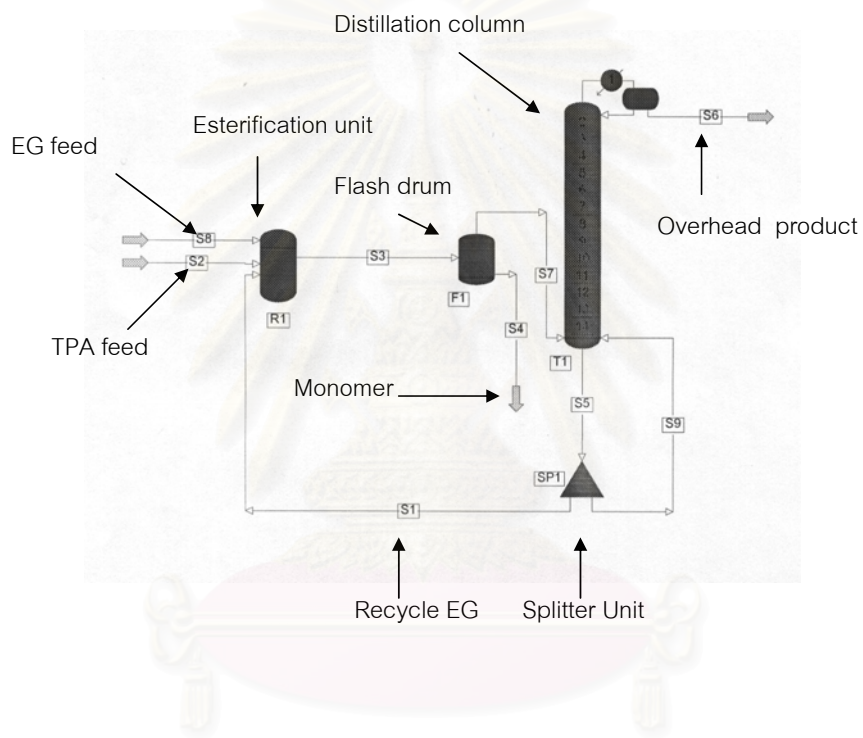
ในการวิจัยใช้โปรแกรมการคำนวณทางวิศวกรรมเคมี PROII PROVISION VERSION

4.13 สำหรับจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์หมอนอเมอร์ ข้อมูลของสภาวะการผลิตประกอบด้วย

- 1) อัตราการป้อนเข้าของวัตถุดิบ
 - กรดเทอร์เรพธาลิก 45 kg mol/hr
 - สารละลายของ เอทิลีนไกลคอล และน้ำ 70 kg mol/hr ที่ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล 87.0% โดยโมล
- 2) อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 290.2 °C
- 3) ความดันของการเกิดปฏิกิริยา 1.2073 kg/cm²

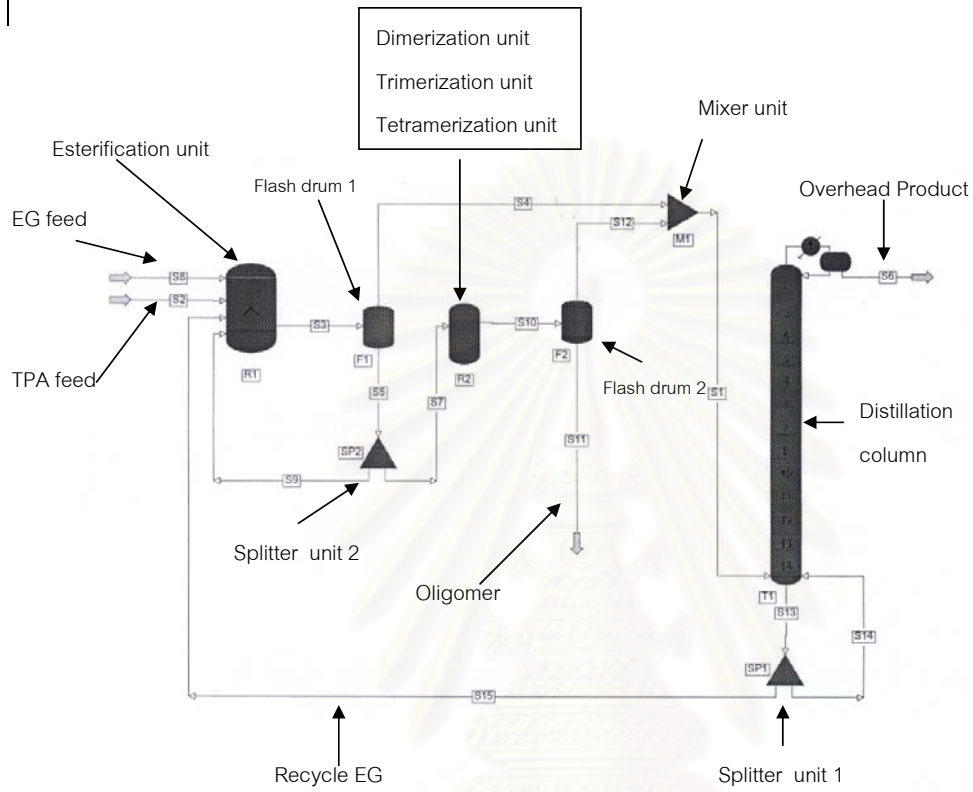
แผนผังของระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์หมอนอเมอร์ในการสร้างแบบจำลองข้างต้นจะแยกเป็นสองส่วนคือผังกระบวนการสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเพียงปฏิกิริยาเดียวดังรูปที่ 4.2 ผลิตภัณฑ์จากหน่วยเอสเทอร์ริฟิเคชันส่วนที่เป็นไอจะถูกนำไปแยกเอทิลีนไกลคอลป้อนกลับเข้ากระบวนการ

ส่วนผังกระบวนการสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพธาลิกและการรวมตัวเป็นออลิโกเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะเป็นอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์ 2 หน่วยคือ หน่วยเอสเทอร์ริฟิเคชันและหน่วยออลิโกเมอร์ไรเซชัน (ไดเมอร์ไรเซชัน, ไตรเมอร์ไรเซชัน หรือ เตตระเมอร์ไรเซชัน) ที่หน่วยเอสเทอร์ริฟิเคชันจะมีการแบ่งส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเวียนกลับเข้าหน่วยเอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อให้กรดเทอร์เรพธาลิกเกิดปฏิกิริยาได้สูงสุด ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นไอจะถูกนำไปแยกเอทิลีนไกลคอลป้อนกลับเข้ากระบวนการเช่นกัน



รูปที่ 4.2 ผังกระบวนการสังเคราะห์ไดเอทิลเทอริฟทาเลต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ผังกระบวนการสังเคราะห์ไดโกลคอลเทอร์เรพทาเลตและการรวมตัวเป็นออลิโกเมอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจากการคำนวณโดยแบบจำลองการสังเคราะห์มอนอเมอร์

ปฏิกิริยาเคมี	ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา (%)			
	มอนอเมอร์	มอนอเมอร์+ไดเมอร์	มอนอเมอร์+ไตรเมอร์	มอนอเมอร์+เตตระเมอร์
เอสเทอร์รีฟิเคชัน	67.14	51.36	58.65	84.60
ไดเมอร์ไรเซชัน	-	82.16	-	-
ไตรเมอร์ไรเซชัน	-	-	62.53	-
เตตระเมอร์ไรเซชัน	-	-	-	96.53
เอสเทอร์รีฟิเคชันรวม	67.14	78.29	82.02	95.07

ภายใต้สภาวะการดำเนินการข้างต้นการพิจารณาเพียงปฏิกิริยาสังเคราะห์มอนอเมอร์ ความสมบูรณ์รวมของปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เพียง 67.14 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้เป็นเพราะ ปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่อยู่ในสถานะไอมากกว่าในของเหลว และน้ำซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าเอทิลีนไกล คอลจะพบในสถานะไอเป็นส่วนใหญ่ซึ่งช่วยให้ปฏิกิริยาไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลเคมี ดังสรุปในตาราง ที่ 4.3 เห็นได้ว่าปริมาณเอทิลีนไกลคอลจะเพิ่มมากขึ้นในสถานะของเหลวเมื่อมีไดเมอร์ ไตรเมอร์ และ เตตระเมอร์เกิดขึ้นในแบบจำลองการสังเคราะห์มอนอเมอร์ตามลำดับ

เนื่องจากปฏิกิริยาเตตระเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นในตอนต้นที่ 2 จะให้ปริมาณ เอทิลีนไกล คอลต่อ 1 โมเลกุลของมอนอเมอร์ที่สูงมากกว่าในปฏิกิริยาไดเมอร์ไรเซชันและไตรเมอร์ไรเซชัน ดังนั้น ปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ทำปฏิกิริยากับกรดเทอโรพธาลิกจึงมีมากขึ้นด้วย จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 แบบจำลองที่ประกอบด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันและเตตระเมอร์ไรเซชัน (มอนอเมอร์ + เตตระเมอร์) ให้ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนัก โดยโมลและค่าความสมบูรณ์รวมของปฏิกิริยาใกล้เคียงกับสภาวะการ ผลิต ในงานวิจัยจะได้ทำการใช้แบบจำลองปฏิกิริยาสังเคราะห์มอนอเมอร์ที่ประกอบด้วยปฏิกิริยาเอส เทอร์รีฟิเคชันและเตตระเมอร์ไรเซชันในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของการป้อน กรดเทอโรพธาลิกต่อเอทิลีนไกลคอลและการเปลี่ยนแปลงความดันต่อการเตรียมมอนอเมอร์ต่อไป

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนโมลน้ำหนักรวมจากการคำนวณโดยแบ่งจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิต

จุด ควบคุม ที่	รายละเอียด กระบวนการผลิต	ข้อมูลการผลิต		แบบจำลอง								
		(อัตราการผลิต)		มอนอเมอร์-โตน		มอนอเมอร์-ไตรเมอร์		มอนอเมอร์-เตตระเมอร์				
		kg/hr	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก
3	โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต	-	-	12621.4639	-	38993.9304	-	36811.4058	-	29474.7404	-	-
	โพลีเอทิลีนไกลคอล	-	-	358.3472	0.0284	483.0273	-	509.4809	-	860.9675	-	0.0292
	น้ำ	-	-	1806.4440	0.1431	1856.0189	-	1749.1601	-	1762.8399	-	0.0598
	กรดเทอริฟราลิก	-	-	2460.9019	0.1950	5560.2955	-	4316.4605	-	1296.3270	-	0.0440
	มอนอเมอร์	-	-	7995.7708	0.6335	31094.5886	-	30236.3042	-	25554.6060	-	0.8670
	โตน	-	-	-	-	0.0001	-	0.0000	-	-	-	-
	ไตรเมอร์	-	-	-	-	-	-	0.0000	-	-	-	-
	เตตระเมอร์	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0000	-	0.0000
-	เข้าหลอด	4913.6000	-	2452.6696	-50.0841	3252.0780	-33.8148	3330.5281	-32.2182	5170.3669	-5.2256	-
	โพลีเอทิลีนไกลคอล	-	-	338.8203	0.1381	1077.8474	-58.2100	1228.8681	-52.3547	2703.7027	-4.8272	0.5229
	น้ำ	1832.4000	0.3729	1792.9097	-2.1551	1822.6496	-0.5321	1719.4499	-6.1641	1745.8603	4.7228	0.3377
	กรดเทอริฟราลิก	-	-	19.4531	0.0079	15.7654	-	19.9144	-	205.3420	-	0.0397
	มอนอเมอร์	-	-	307.4865	0.1229	335.8156	-	362.2941	-	515.4299	-	0.0997
	โตน	-	-	-	-	0.0000	-	-	-	-	-	-
	ไตรเมอร์	-	-	-	-	-	-	0.0016	-	-	-	-
	เตตระเมอร์	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0320	-	0.0000

จุด ควม คุม ที่	รายละเอียด กระบวนการผลิต	ข้อมูลการผลิต (อัตราการผลิต)		แบบจำลอง										
		kg/hr	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	มอนอเมอร์			มอนอเมอร์+ไดเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์				
				kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก		
5	ผลิตภัณฑ์ออกดอก เพล เอทิลีนไกลคอล น้ำ กรดเทอริพรทาลิก มอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ เตตระเมอร์	1850.2000 ของเหลว 68.2000 1782.0000	- 0.0369 0.9631	1240.7870 ของเหลว 0.0000 1240.7870	-32.9377 -100.0000 -30.3711	- 0.0000 1.0000	1480.4878 ของเหลว 0.0000 1480.4878	-19.9823 -100.0000 -16.9199	1466.0577 ของเหลว 0.0000 1466.0577	-20.7622 -100.0000 -17.7296	- 0.0000 1.0000	2052.9207 ของเหลว 345.1393 1707.7814	10.9567 406.0694 -4.1649	- 0.1681 0.8319
6	เวียกัลบีเอทีไลน์ไกลคอล เพล เอทิลีนไกลคอล น้ำ กรดเทอริพรทาลิก มอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ เตตระเมอร์	3063.4000 ของเหลว 2511.0000 50.4000	- 0.8197 0.0165	1211.8636 ของเหลว 338.8141 552.1148	60.4406 86.5068 -995.4659	- 0.2796 0.4556	1771.5902 ของเหลว 1040.2087 382.3137	-42.1692 -58.5739 658.5589	1864.4689 ของเหลว 1249.8942 230.5841	-39.1373 -50.2232 357.5081	- 0.6704 0.1237	3117.4142 ของเหลว 2350.4924 37.8679	1.7632 -6.3922 -24.8653	- 0.7540 0.0121
		- -	- -	19.4529 301.4817	- -	0.0161 0.2488	18.6069 330.4610	- -	22.8197 361.1709	- -	0.0122 0.1937	217.0736 511.9803	- -	0.0696 0.1642
		- -	- -	- -	- -	- -	0.0000 -	- -	0.0000 -	- -	0.0000 -	0.0000 -	- -	- -

จุด ควบคุม ที่	รายละเอียด กระบวนการผลิต	ข้อมูลการผลิต (อัตราการผลิต)		แบบจำลอง											
		kg/hr	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	มอนอเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์					
				kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก	kg/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยน้ำหนัก			
7	ซิลิโคนเมอร์	9415.0000	-	10168.7943	8.0063	-	9970.6584	5.9018	-	9926.7677	5.4357	-	9381.1352	-0.3597	3.9911
	เฟส	ของเหลว		ของเหลว			ของเหลว			ของเหลว			ของเหลว		
	เอทิลีนไกลคอล	46.5000	0.0049	19.5269	-58.0067	0.0019	252.6574	443.3492	0.0253	181.1165	289.4978	0.0182	53.3447	14.7198	0.0057
	น้ำ	-	-	13.5343	-	0.0013	0.6517	-	0.0001	0.4922	-	0.0000	0.1103	-	0.0000
	กรดเพอร์ฟอสฟอริก	531.2000	0.0564	2441.4488	359.6101	0.2401	1621.6118	205.2733	0.1626	1343.6222	152.9409	0.1354	366.3476	-31.0340	0.0391
	มอนอเมอร์	-	-	7694.2843	-	0.7567	1597.9730	-	0.1603	3481.2051	-	0.3507	251.3426	-	0.0268
	ไตรเมอร์	-	-	-	-	-	6497.7645	-	0.6517	-	-	-	-	-	-
	ไตรเมอร์	-	-	-	-	-	-	-	-	4920.3318	-	0.4957	-	-	-
	ไตรเมอร์	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8709.9899	-	0.9285

จุด ควม	รายละเอียด กระบวนการผลิต	ข้อมูลการผลิต (อัตราการผลิต)		แบบจำลอง											
		kg-mol/hr	สัดส่วน โดยโมล	มอนอเมอร์+ไดเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์			มอนอเมอร์+เตตระเมอร์					
				kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล			
5	ผลิตภัณฑ์ชุดพอลิเมอร์ เฟส เอทิลีนโกลคอลล น้ำ กรดเทอร์พธาลิก มอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ เตตระเมอร์	100.1000 ของเหลว 1.1000 99.0000 - - - -	- - 0.0110 0.9890 - - - -	68.9326 ของเหลว 0.0000 68.9396 0.0000 0.0000 - -	-31.1363 -100.0000 -30.3640 - - - -	- - 0.0000 1.0001 0.0000 0.0000 - -	82.2493 ของเหลว 0.0000 82.2493 0.0000 0.0000 0.0000 -	-17.8329 -100.0000 -16.9199 - - - -	- - 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000 - -	81.4476 ของเหลว 0.0000 81.4476 0.0000 0.0000 0.0000 -	-18.6338 -100.0000 -17.7297 - - - -	- - 0.0000 1.0000 0.0000 0.0000 - -	100.4435 ของเหลว 5.5668 94.8767 0.0000 0.0000 - -	0.3432 - 406.0727 -4.1649 - - - -	- - 0.0554 0.9446 0.0000 0.0000 - -
6	เวียนกลับเอทิลีนโกลคอลล เฟส เอทิลีนโกลคอลล น้ำ กรดเทอร์พธาลิก มอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ เตตระเมอร์	- ของเหลว 40.5000 2.8000 - - -	- - 0.1460 0.8192 0.0031 0.0317 - -	37.4419 ของเหลว 5.4647 30.6730 0.1172 1.1869 - -	- -86.5069 995.4643 - - - -	- - 0.1460 0.8192 0.0031 0.0317 - -	39.4303 ของเหลว 16.7776 21.2396 0.1121 1.3010 0.0000 -	- -58.5738 658.5571 - - - -	- - 0.4255 0.5387 0.0028 0.0330 0.0000 -	34.5292 ของเหลว 20.1596 12.8102 0.1375 1.4219 0.0000 -	- -50.2232 357.5071 - - - -	- - 0.5838 0.3710 0.0040 0.0412 0.0000 -	43.3383 ของเหลว 37.9112 2.1038 1.3077 2.0157 - -	- -6.3921 -24.8643 - - - -	- - 0.8748 0.0485 0.0302 0.0465 - -

จุด ควบคุม ที่	รายละเอียด กระบวนการผลิต	ข้อมูลการผลิต (อัตราการไหล)		มอนอเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์			มอนอเมอร์+ไตรเมอร์					
		kg-mol/hr	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล	kg-mol/hr	%ความ คลาดเคลื่อน	สัดส่วน โดยโมล
7	อลดีกอลเมอร์ เฟส เอทิลีนไกลคอล น้ำ กรดเพอร์เฟอราลิก มอนอเมอร์ ไตรเมอร์ ไตรเมอร์ ไตรเมอร์	- ของเหลว 0.7500 - 3.2000 - - - -	- - - - - - - -	46.0668 ของเหลว 0.3149 0.7519 14.7075 30.2925 - - -	- -58.0133 - 359.6094 - - - -	- 0.0068 0.0163 0.3193 0.6576 - - -	34.7403 ของเหลว 4.0751 0.0362 9.7667 6.2912 14.5690 -	- 443.3467 - 205.2719 - - - -	- 0.1173 0.0010 0.2812 0.1811 0.4194 - -	32.4603 ของเหลว 2.9212 0.0273 8.0941 13.7055 - 7.7121 -	- 289.4933 - 152.9406 - - - -	- 0.0900 0.0008 0.2494 0.4222 - 0.2376 -	14.5569 ของเหลว 0.8604 0.0061 2.2069 0.9895 - - -	- 14.7200 - -31.0344 - - - -	- 0.0591 0.0004 0.1516 0.0680 - - -	10.4940	-	0.7209

4.2 ผลของสภาวะดำเนินการต่อการสังเคราะห์ฮอร์โมนเมอร์

4.2.1 ผลของสัดส่วนปริมาณ เอทิลินไกลคอลลต่อการรเทศอรรถเรพธาลิกต่อการสังเคราะห์ฮอร์โมนเมอร์

ในการวิจัยกำหนดให้การป้อนกรตเทอรรเรพธาลิกเข้ากระบวนการสังเคราะห์ฮอร์โมนเมอร์คิงที่ 45 kg-mol/hr และจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณ เอทิลินไกลคอลลต่อการรเทศอรรถเรพธาลิก โดยการเพิ่มและลดการป้อนเอทิลินไกลคอลลเข้ากระบวนการ ทั้งนี้จะกำหนดให้ความเข้มข้นของเอทิลินไกลคอลลที่ป้อนเข้ากระบวนการมีค่าคิงที่ 87% โดยโมล อัตราการป้อนเข้าของเอทิลินไกลคอลลจะทำการเริ่มป้อนเข้ากระบวนการที่ 45 hg/mol/hr จากนั้นจะทำการเพิ่มอัตราการป้อนเข้าทีละ 5 kg-mol/hr จนถึง 120 kg-mol/hr

4.2.2 ผลของความดันต่อการสังเคราะห์ฮอร์โมนเมอร์

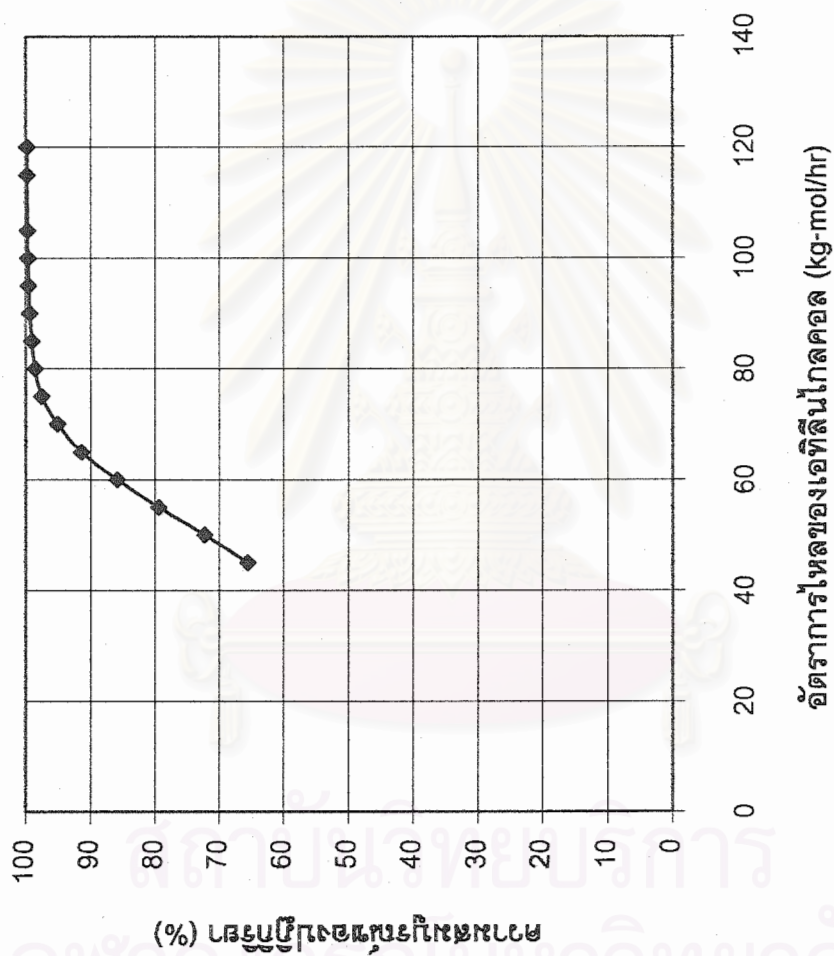
เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีหน่วยปฏิบัติการที่สำคัญ 3 หน่วยด้วยกันคือ เครื่องปฏิกรณ์ตัวที่ 1 (เอสเทอรรริฟิเคชัน), เครื่องปฏิกรณ์ตัวที่ 2 (เตตระเมอรรไรเซชัน) และหอกลั่น ในการเปลี่ยนแปลงความดันในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะทำการเปลี่ยนแปลงความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 หน่วย แต่ที่หอกลั่นนั้นจะกำหนดให้ความดันที่ลดหอนั้นคิงที่เท่ากับความดันบรรยากาศ ส่วนความดันที่กั้นหอจะกำหนดให้เท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 หน่วย ความดันที่เปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนแปลงทีละ 0.1 kg/cm² โดยเริ่มเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.9 - 2.5 kg/cm²

4.3 ผลการวิจัย

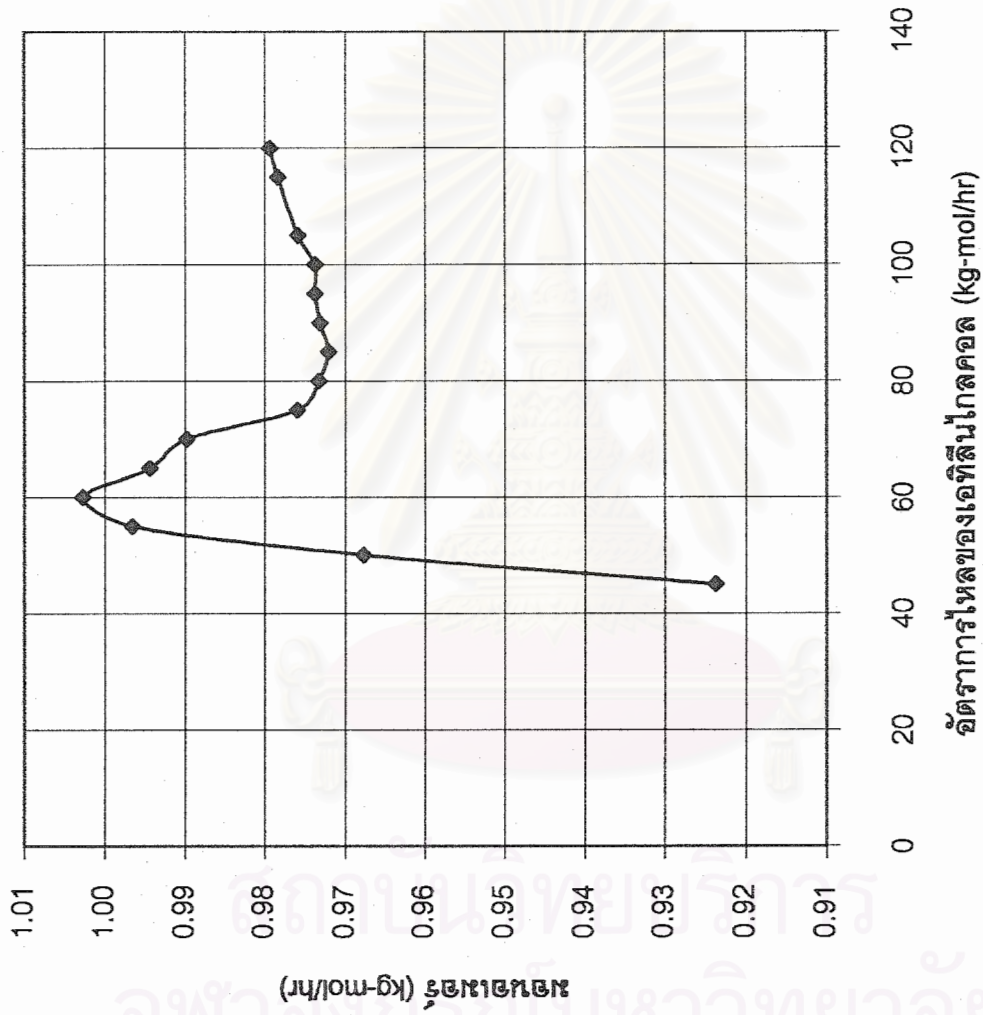
รูปที่ 4.4 - 4.10 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการสังเคราะห์ฮอร์โมนเมอร์จากแบบจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณเอทิลินไกลคอลลต่อการรเทศอรรถเรพธาลิก

รูปที่ 4.11 - 4.17 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการสังเคราะห์ฮอร์โมนเมอร์จากแบบจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน

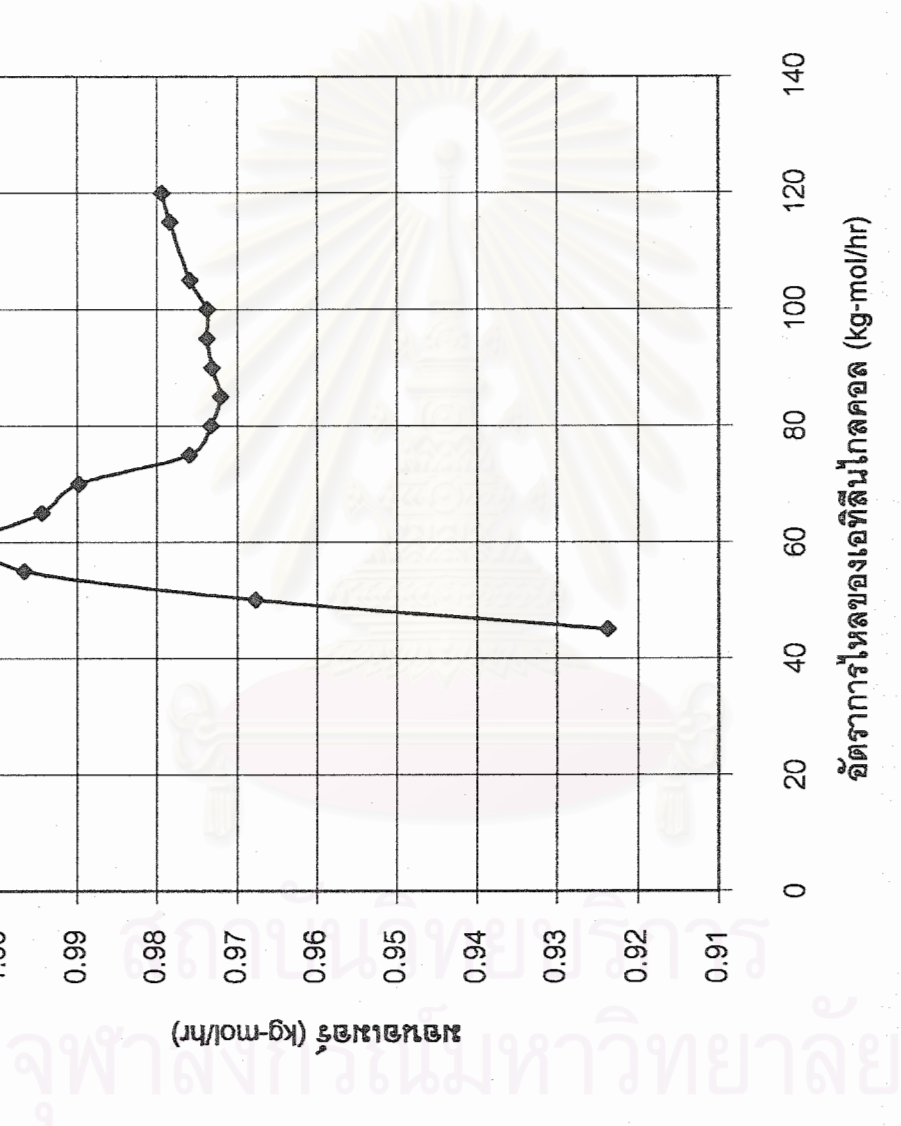
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

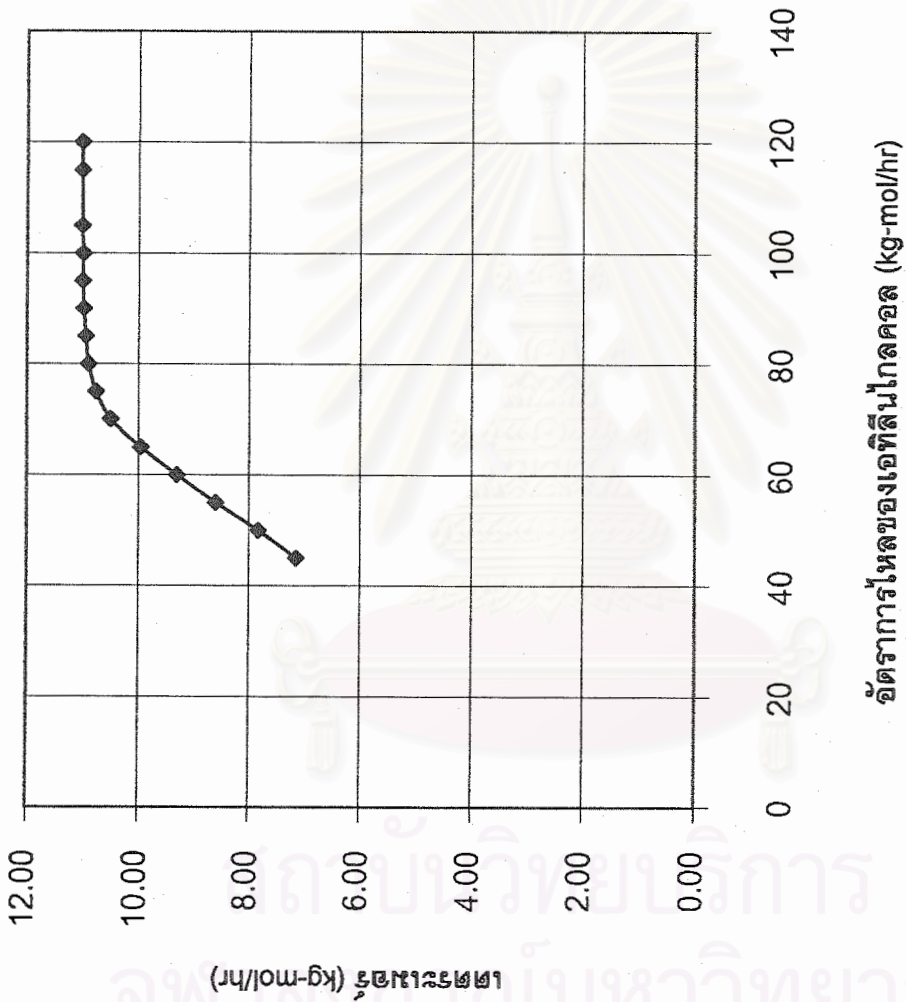


รูปที่ 4.4 ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง



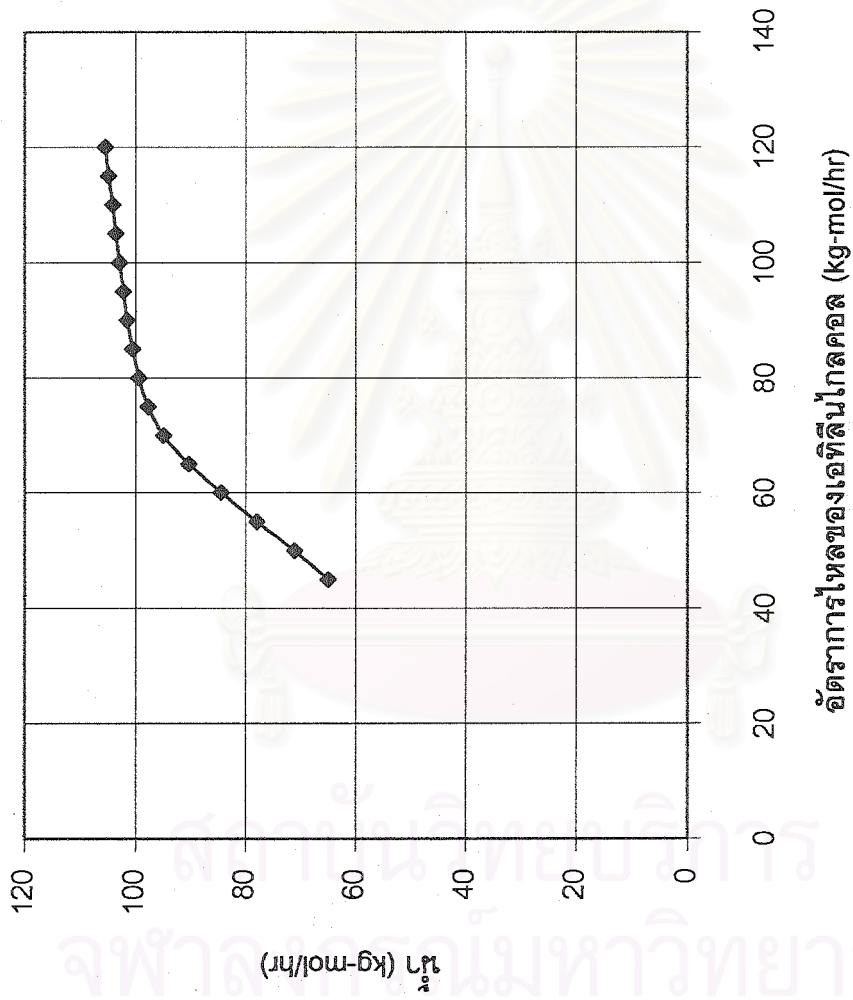
รูปที่ 4.5 อัตราการผลิตของเมทิลีนไดออกไซด์เมื่ออัตราการผลิตของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง



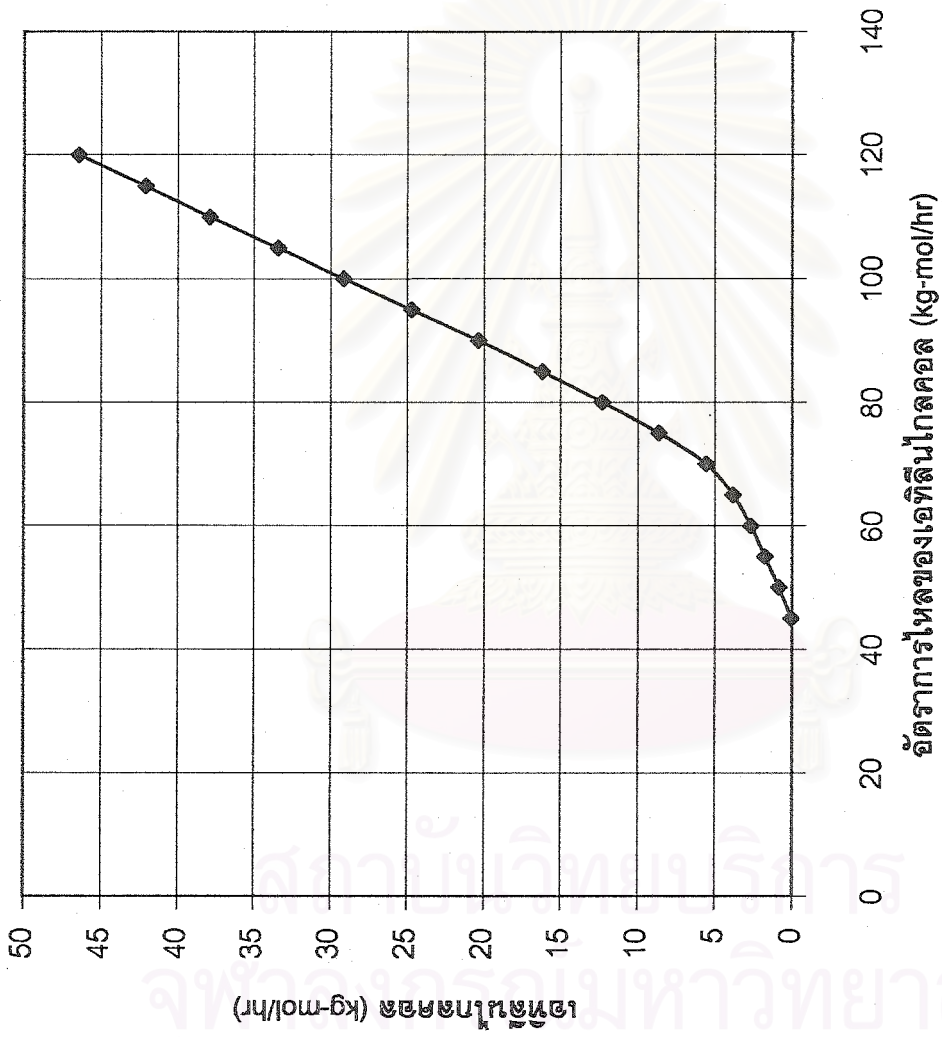


รูปที่ 4.6 อัตราการผลิตของเตตระเมออร์โนเอทิลไกลคอลเมื่ออัตราการผลิตเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง

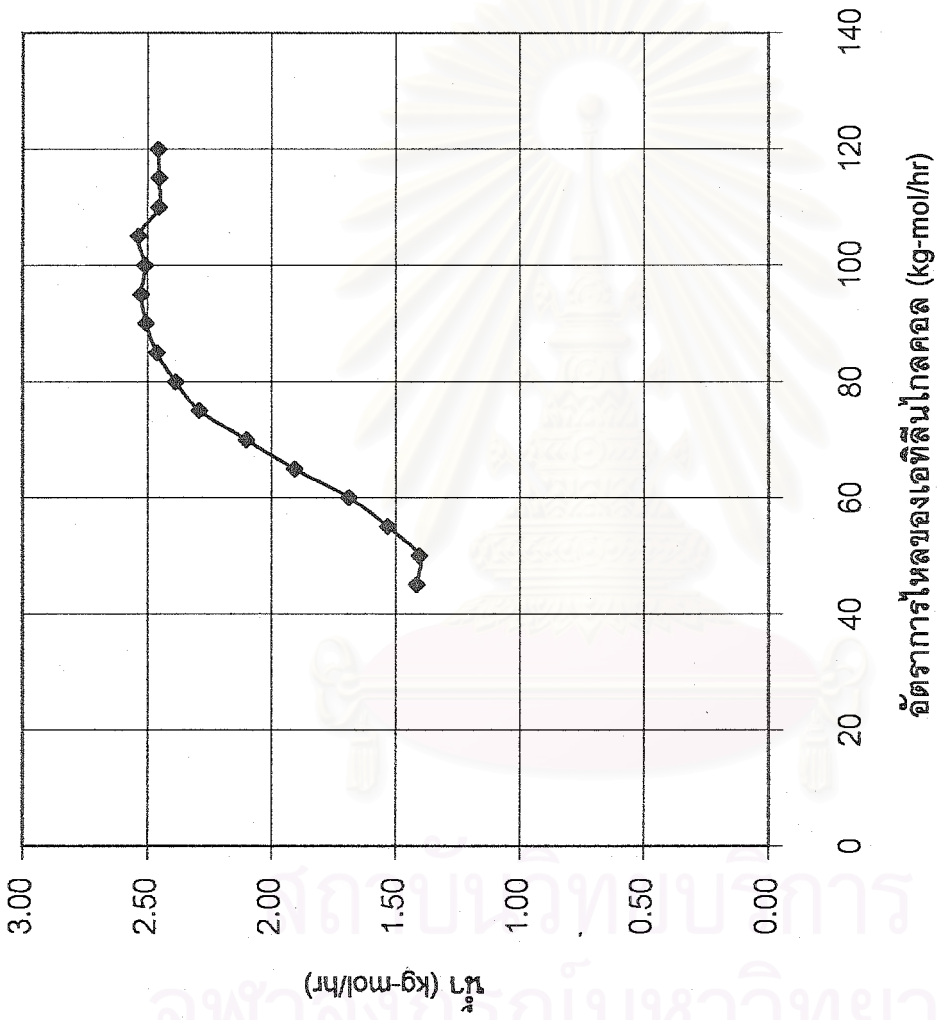
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



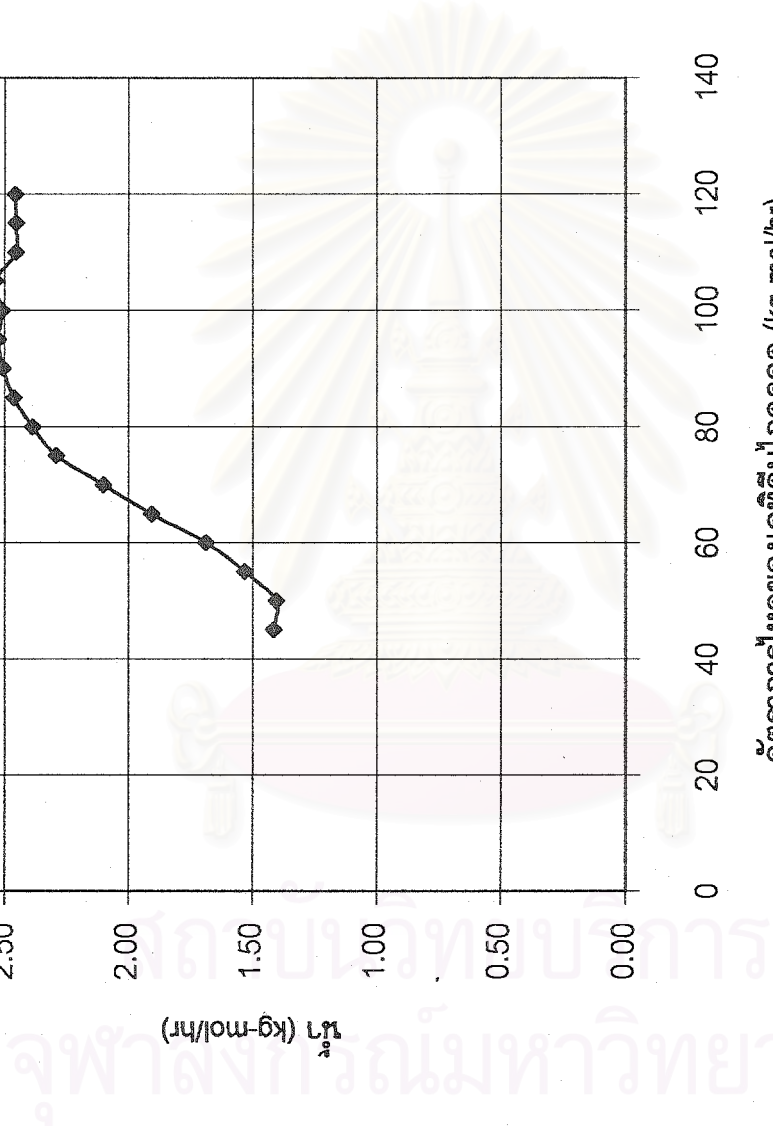
รูปที่ 4.7 อัตราการไหลของน้ำที่ผลิตกับชนิดของเอทานอลที่เติมเข้าของเอทานอลเปลี่ยนแปลง

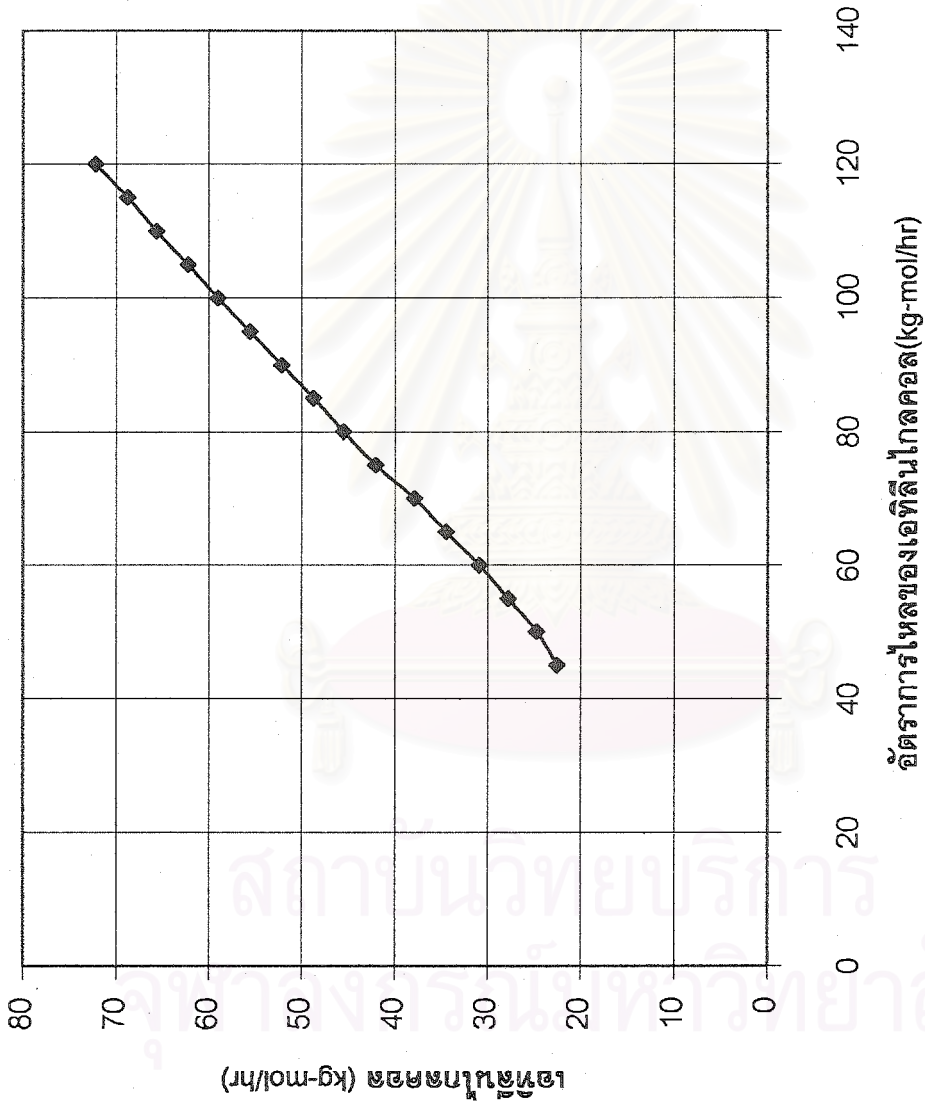


รูปที่ 4.8 อัตราการผลิตของเอทิลีนไกลคอลที่ผลิตกับที่แยกออกจากกันเมื่ออัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง

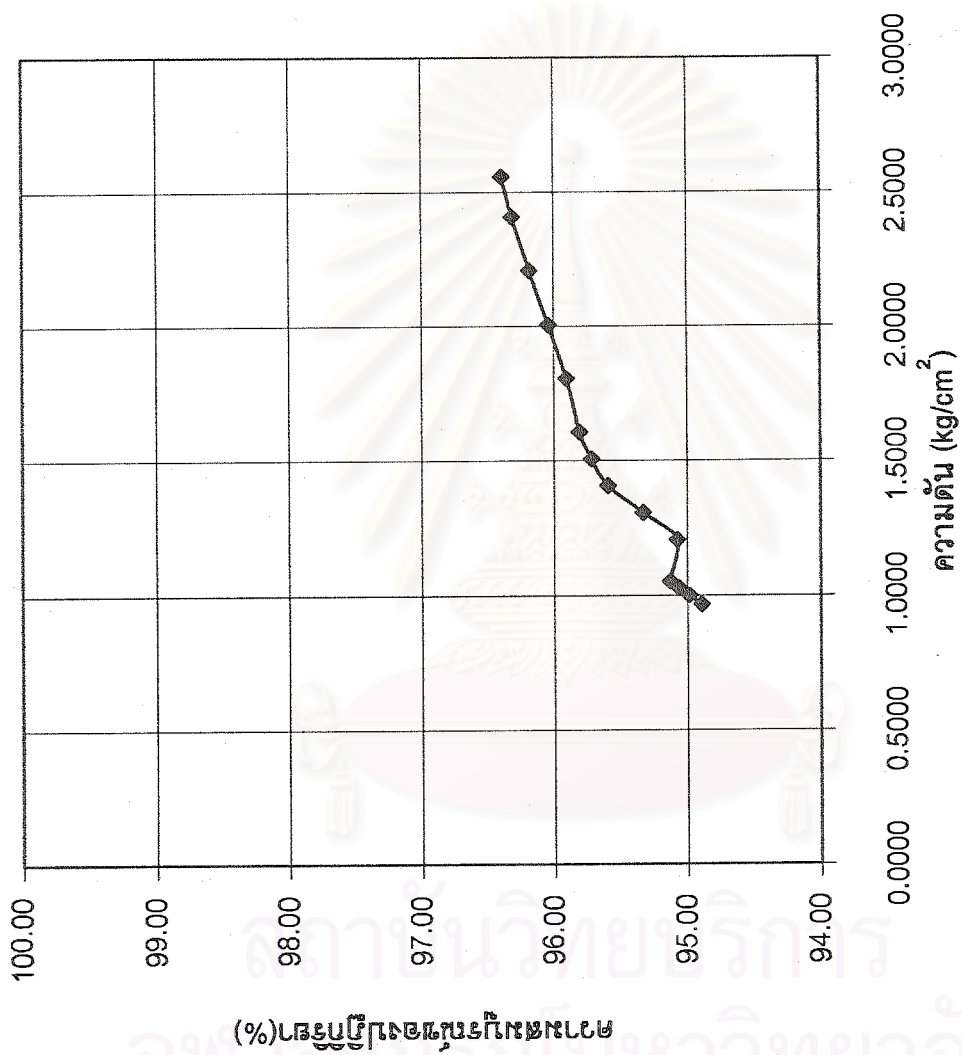


รูปที่ 4.9 อัตราการไหลของน้ำที่สายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอลเมื่ออัตราการป้อนน้ำของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง

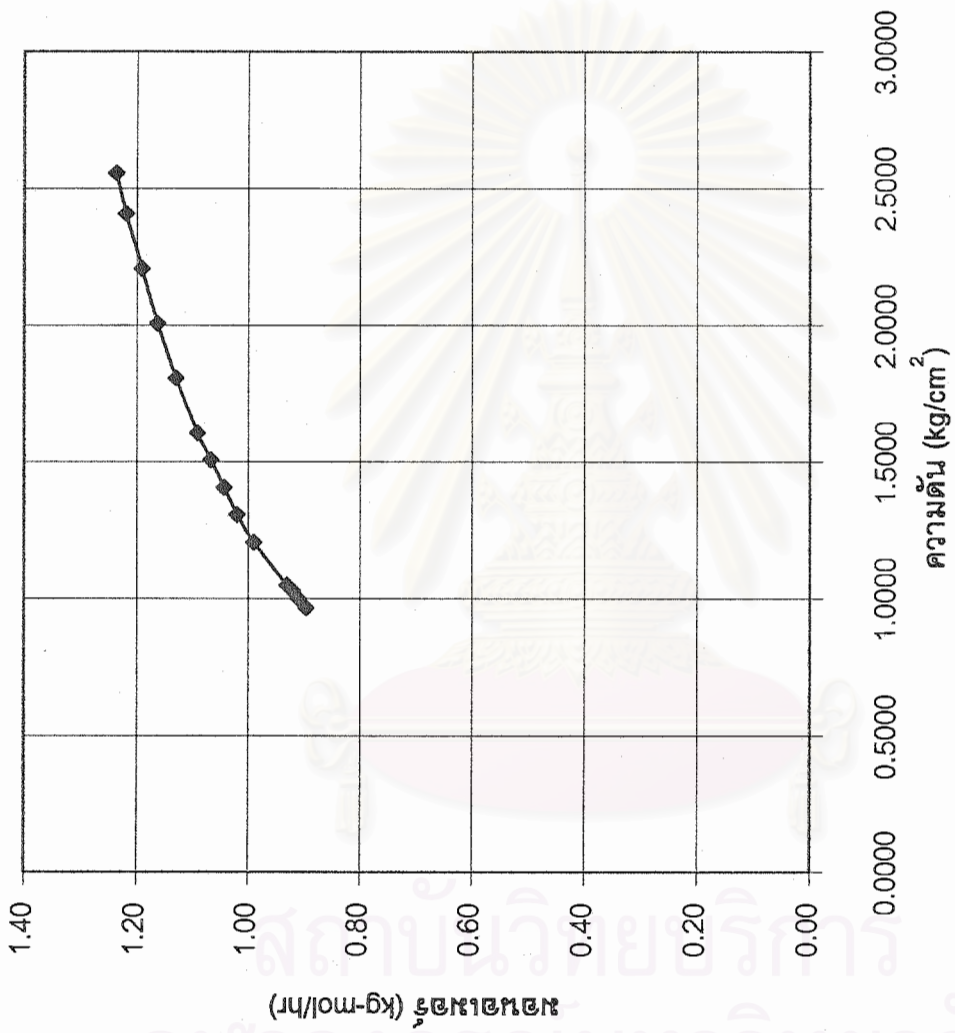




รูปที่ 4.10 อัตราการใช้ของเอทิลีนไกลคอลที่ตายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอลของเมื่ออัตราการใช้ของเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลง

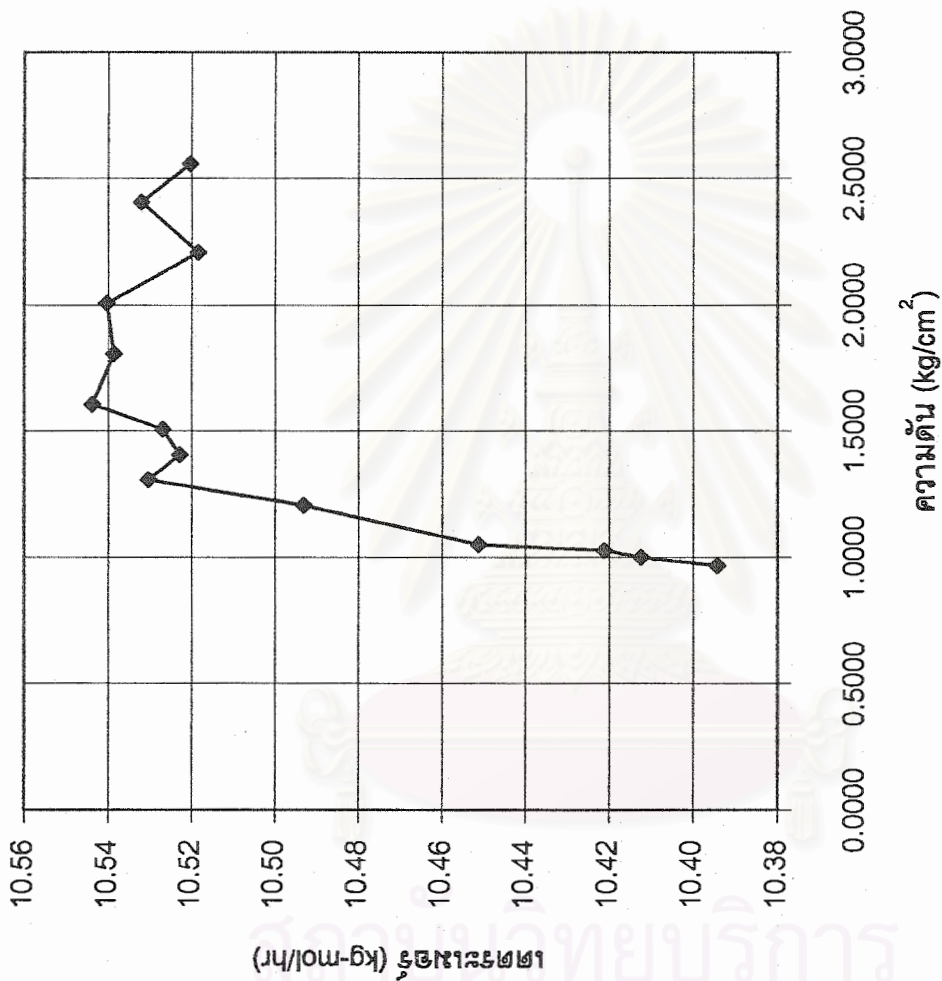


รูปที่ 4.11 ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง



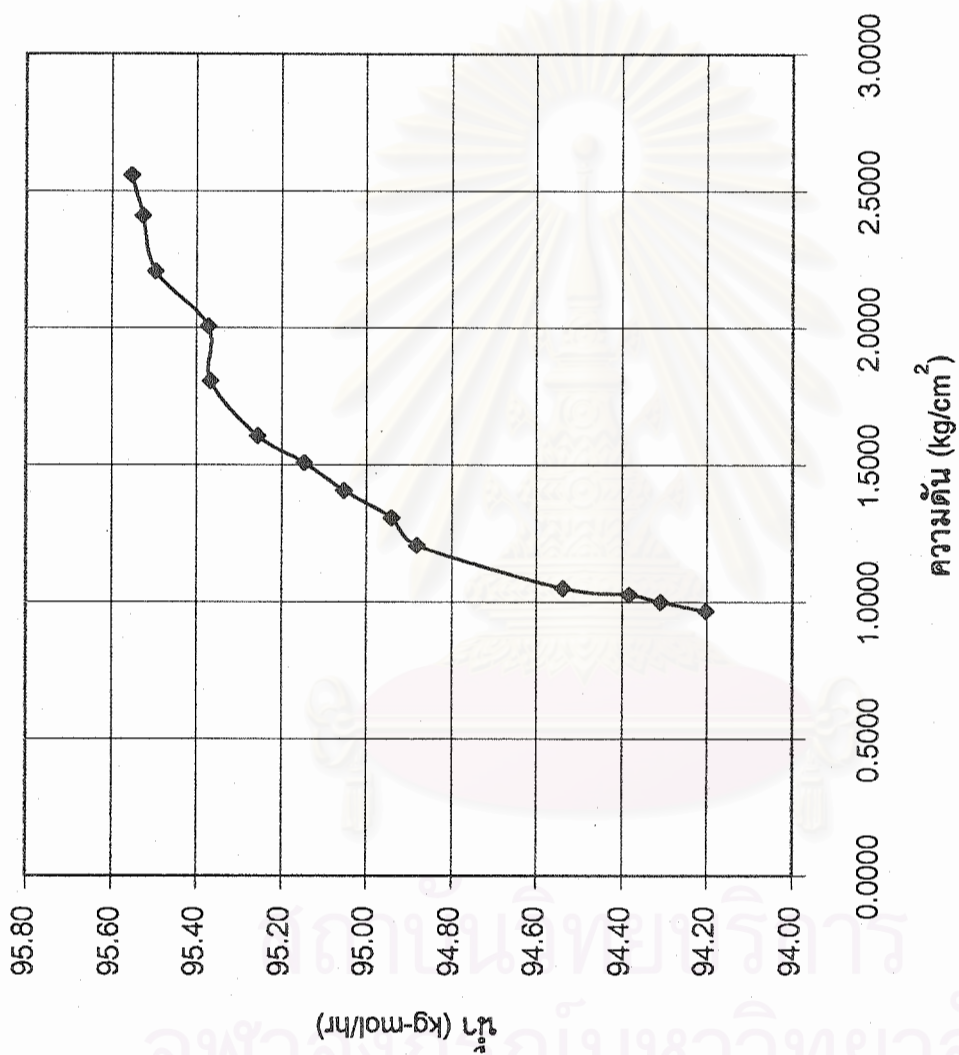
รูปที่ 4.12 อัตราการไหลของมอนอเมอร์ในคอลัมเมออร์เมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

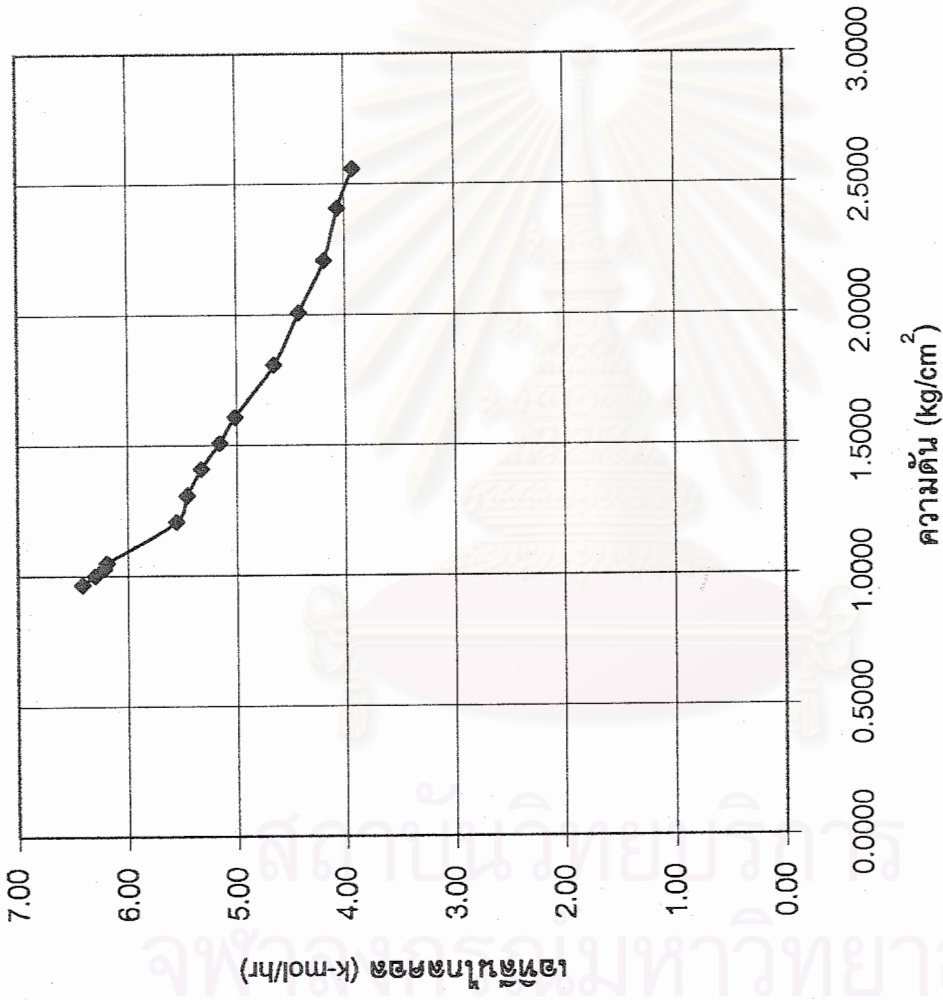


รูปที่ 4.13 อัตราการไหลของเตตระเมทรีนเอทิลออลิโกเมอร์เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

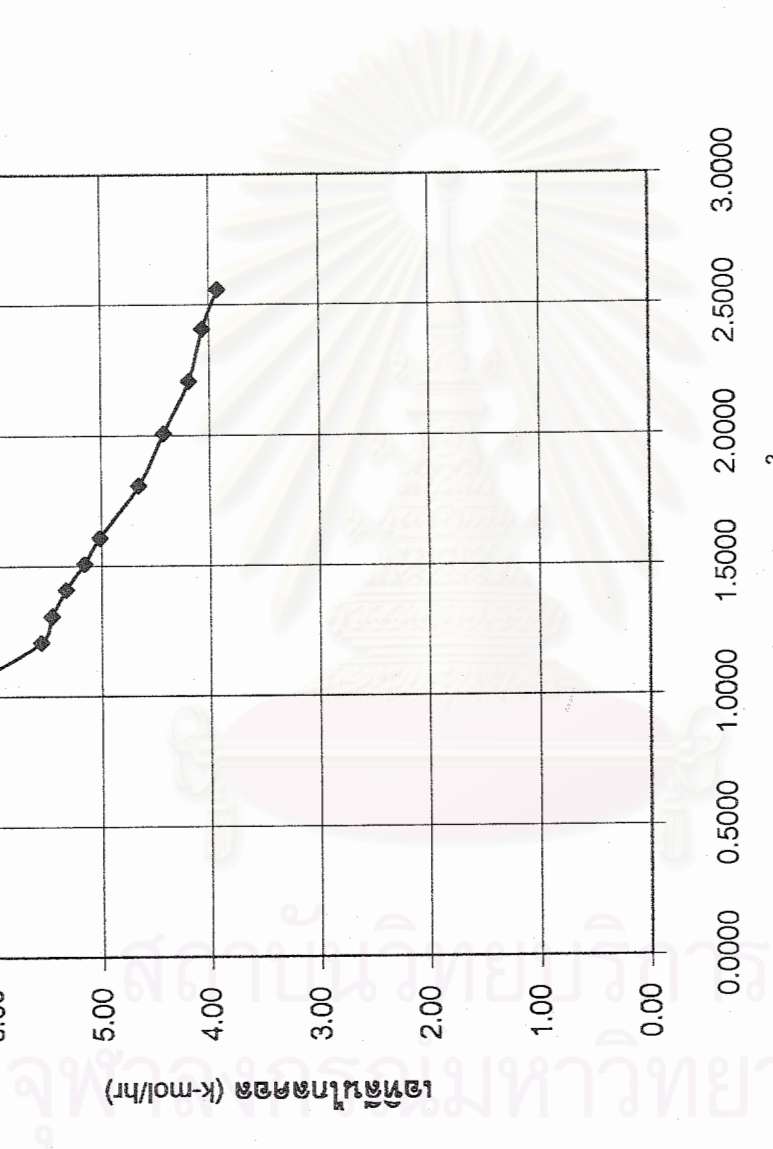
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

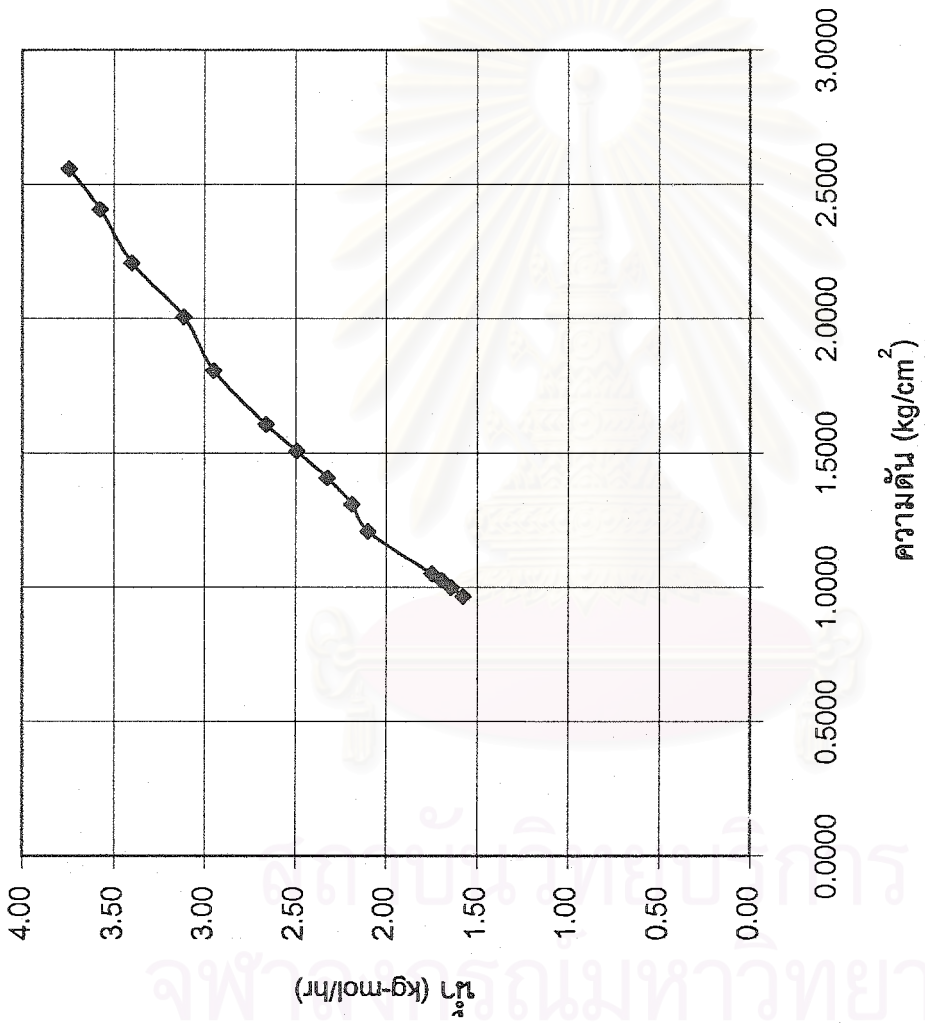


รูปที่ 4.14 อัตราการไหลของน้ำที่ผลิตจากถังที่แยกออกจากถังเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

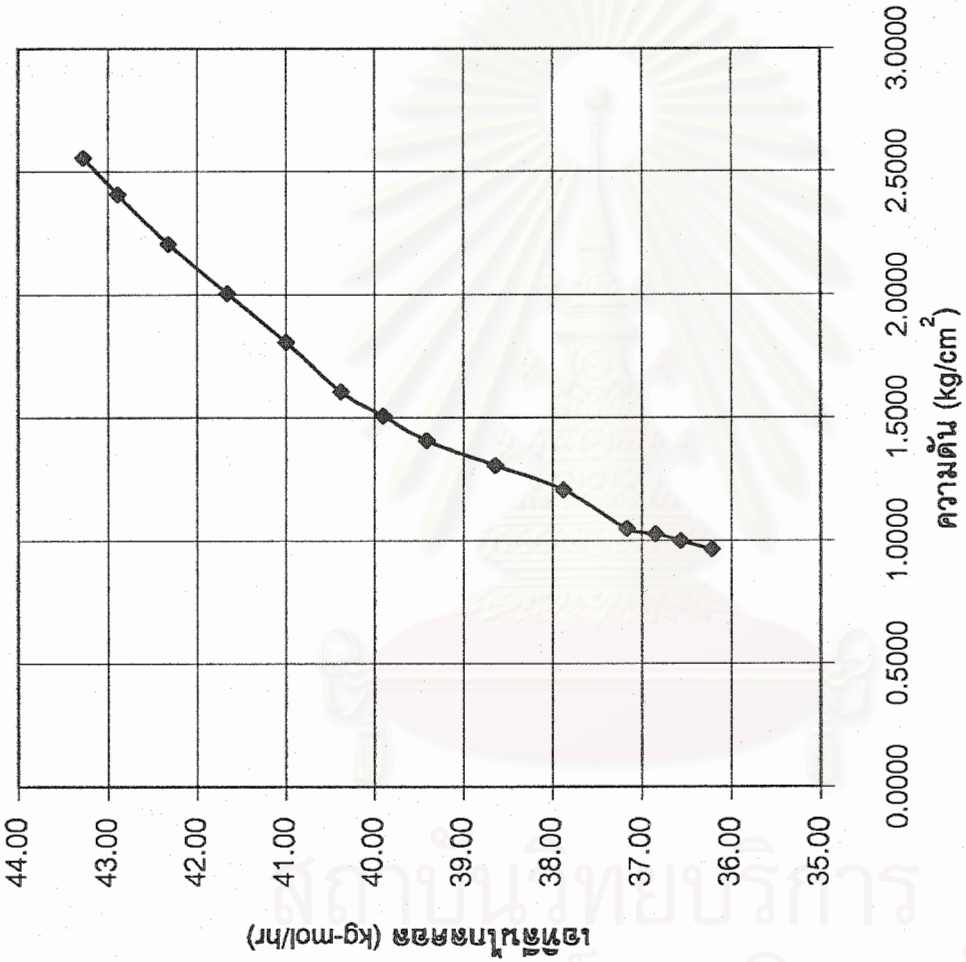


รูปที่ 4.15 อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลที่ผลิตกับพื้นที่ยอดหอกกลับเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง





รูปที่ 4.16 อัตราการไหลของน้ำที่สายการเรียงกลีบของเครื่องกลั่นกลั่นเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.17 อัตราการไหลของเข็สตันไกลคอลลที่สายการเรียงกลับของเข็สตันไกลคอลลเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

ศูนย์ปฏิบัติการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การวิจารณ์ผลที่ได้จากการวิจัย

4.4.1 ผลของสัดส่วนปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิกต่อกระบวนการสังเคราะห์มोनอเมอร์

- ที่อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลตั้งแต่ 115 เปอร์เซ็นต์ของสภาวะการผลิต (สัดส่วนปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิกเท่ากับ 1.55 : 1) ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่ที่ 99.0%(รูปที่ 4.4) ปริมาณน้ำที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอกล้นจะเริ่มคงที่ เช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.7)
- ความเข้มข้นของทั้งมोनอเมอร์จะเริ่มคงที่ในออลิโกเมอร์ก็จะเริ่มคงที่เช่นเดียวกันที่อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 115 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.5) เนื่องจากปริมาณกรดเทอร์เรพธาลิกเหลืออยู่น้อยมากในระบบ
- ที่อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 115 เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของเตตระเมอร์จะเริ่มคงที่(รูปที่ 4.6) ในสภาวะการผลิตจริงปริมาณเตตระเมอร์อาจเกิดขึ้นได้มากกว่าผลการพยากรณ์เพราะปฏิกิริยามีได้ถูกจำกัดด้วยสภาวะสมดุลเคมี
- ที่อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอล มากกว่า 115เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีจะส่งผลให้อัตราการไหลของเอทิลีนไกลคอล ในทั้งผลิตภัณฑ์ยอดหอกล้นและสายการเวียนกลับของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.8,4.10)

4.4.2 ผลกระทบของความดันต่อกระบวนการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์มोनอเมอร์

- ที่ความดันมากกว่า 125 เปอร์เซ็นต์ของสภาวะการผลิต(1.5 kg/cm²) ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยายังคงเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มในอัตราที่ลดลง (รูปที่ 4.11)
- เช่นเดียวกันปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ยอดหอกล้นก็ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่จะเพิ่มในอัตราที่ลดลงเมื่อความดันมากกว่า 125เปอร์เซ็นต์(รูปที่ 4.14)
- ที่ความดันสูงปริมาณน้ำจะถูกดึงออกจากระบบได้มากขึ้นในขณะที่เอทิลีนไกลคอลจะถูกดึงออกจากระบบได้น้อยลง โดยดูได้จากอัตราการไหลของทั้งน้ำ และเอทิลีนไกลคอลที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอกล้น (รูปที่ 4.14,4.15)

เนื่องจากการเตรียมมोनอเมอร์เป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ การที่จะเพิ่มความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทำได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของปริมาณเอทิลีนไกลคอลในสารตั้งต้นให้มากเกินไปจะส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า การดึงน้ำออกทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าและมีผลกระทบโดยตรงต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเช่นกัน แต่ในขณะเดียวกันเอทิลีนไกลคอลในของเหลวก็สามารถ

ที่จะระเหยกลายเป็นไอได้ ในขณะที่ดิ่งน้ำออกจากเครื่องปฏิกรณ์เอทิลีนไกลคอลจึงถูกดิ่งออกไปด้วย ดังนั้นที่ความดันสูงขึ้นความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นแต่มีผลกระทบไม่มากนัก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการสร้างแบบจำลองการสังเคราะห์ฮอร์โมนเออร์ทำให้พบว่าในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ฮอร์โมนเออร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเพียงปฏิกิริยาเดียวไม่สามารถทำให้กรดเทอร์เรพธาลิกเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ แบบจำลองระบบปฏิกิริยาสังเคราะห์ฮอร์โมนเออร์ที่เหมาะสมคือปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและเตตระเมอร์ไรเซชัน

2. การเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิกที่ 1.55 : 1 จะทำให้ปฏิกิริยามีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นถึง 99 เปอร์เซ็นต์ แต่การเพิ่มอัตราการป้อนเข้ามีมากเกินไปจนจำเป็นจะไม่ส่งผลให้เกิดความสมบูรณ์ของปฏิกิริยามากกว่าเดิม

4 การเพิ่มความดันให้กับกระบวนการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ฮอร์โมนเออร์จะทำให้สัดส่วนของน้ำในเฟสก๊าซเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้การดึงน้ำออกจากระบบทำได้มากขึ้น ค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแต่มีผลกระทบน้อยกว่าการเพิ่มอัตราการป้อนเข้าของเอทิลีนไกลคอลต่อกรดเทอร์เรพธาลิก

5.2 งานวิจัยที่ควรทำต่อในอนาคต

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลของปฏิกิริยาเคมี 2 ปฏิกิริยาที่เข้าสู่ภาวะสมดุลในการสร้างแบบจำลองซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในแบบจำลองจะเกิดที่ละขั้นตอน แต่ในกระบวนการผลิตจริงนั้นเครื่องปฏิกรณ์จะมีเพียงหน่วยเดียวดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตจริงมากขึ้น จึงควรที่จะสร้างแบบจำลองให้มีเครื่องปฏิกรณ์เพียงหน่วยเดียวและเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายปฏิกิริยา(เอสเทอร์ริฟิเคชัน และออลิโกเมอร์ไรเซชัน) เกิดขึ้นพร้อมกันในเครื่องปฏิกรณ์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกริกชัย สุภาบุญจันท์. คุณหมพลศาสตร์สำหรับอุตสาหกรรมซีพีไอ. กรุงเทพฯ :

โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

สมาคมอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ใยสังเคราะห์. ผลิตภัณฑ์เส้นใยสังเคราะห์. กรุงเทพฯ :

โรงพิมพ์สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2530.

ภาษาอังกฤษ

Alans Foust, Leonard A. Wenzel. Principle of unit operation. 2nd edition,(n.p):

John Willy and Sons,1993.

B.K.Kyle. Chemical and process thermodynamics. 2nd ed. New Jersey :

Prentice-Hall International, 1992.

Charles D. Immanuel and Santosh K. Gupta. Optimization of the stage continuous reactor – sequence in Polyester manufacture from purified Terephthalic acid . Singapore : (n.d.)

E.V. Gupta and co-workers. Manufactured fiber technology. India,1983.

Hendrick C. Van Ness and Michale M. abboth. Classical thermodynamics of nonelectrolyte solution. New York : McGraw-Hill book, 1982.

J.Bradrup, E.H. Immergut and E.V. Grulke. Polymer handbook. 4th edition, New York :

John Willy, 1999.

K. Y. Choi. A modeling of semi – batch reactor for melt transesterification of

Dimethylterephthalate with Ethyleneglycol. Maryland : 1987.

K. Y. Choi and A. A. Khan. Optimal state estimation in the transesterification stage of a

continuous Polyethyleneterephthalate condensation polymerization process . Maryland : 1986.

Robert C. Reid, John M. prausnitz, and Bruce E' Polign. The properties of Gas & Liquid.

2nd Singapore : Chong Moh offset, 1989.

Robert H. Perry. Perry ' s Chemical Engineering handbook. section2, 7th ed, Edition,

Singapore : McGraw-Hill book, p.337-350 n.d.

Warren L. McCabe, Julian C. Smith and Peter Harriott. Unit operations of Chemical

Engineering. 5th ed. New York : McGraw – Hill book, 1993.

ภาคผนวก

ภาคผนวกนี้แสดงรายละเอียดการคำนวณหาค่า Equilibrium constant, K ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อทำการประมาณค่า ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเมื่อเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



โดยสมมติให้กระบวนการผลิตทำการผลิตที่ $P = 1.2073 \text{ kg/cm}^2$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$$

ค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกที่จำเป็นในการประมาณค่าคงที่สมดุล K

สาร	Stoichiometric Coefficient	ΔH_f° (kJ/mol)	ΔG_f° (kJ/mol)	ΔC_p° (kJ/mol.K)
TPA	-1	-717.89	-597.18	0.1248
EG	-2	-389.92	-304.47	0.0971
น้ำ	+2	-241.82	-228.59	0.0336
monomer	+1	-1004.97	-741.44	0.2614
$\sum v_i(\text{properties})_i$		7.92	7.5	0.0096

ได้ว่า $\Delta H^\circ = 7.92 \text{ kJ/mol}$

$\Delta G^\circ = 7.5 \text{ kJ/mol}$

$\Delta C_p^\circ = 0.0096 \text{ kJ/mol.K}$

ที่สภาวะมาตรฐานได้ว่า

$$\Delta G^\circ/RT = -\ln K$$

$$K = \exp(-\Delta G^\circ/RT)$$

แทนค่า properties ที่ได้ลงในสมการได้

$$K = 0.04853 \text{ ที่ } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

สมมติให้ระบบเป็น Ideal solution และ ΔH° , ΔC_p° ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา

จากสมการที่ 28

$$d \ln K = (\Delta H^\circ / RT^2) dT$$

เมื่อ ΔH ไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

$$\ln(K/K_1) = -(\Delta H^\circ / RT^2)(1/T - 1/T_1)$$

ที่อุณหภูมิ 280°C

$$\Delta H_{280} = \Delta H^\circ + \Delta C_p^\circ \Delta T$$

แทนค่า ΔH° และ ΔC_p° ลงในสมการได้

$$\Delta H_{280} = 10.368$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\ln K_{280} - \ln K_{25} = (10.638/R)(1/553 - 1/273)$$

แก้สมการได้ค่า $K_{280} = 141.71$

กรณีระบบเป็น Ideal solution

$$K = \prod (x_i)^{v_i}$$

หาค่า X_i ที่สมดุลจากสมการปฏิกิริยาเคมี

สาร	Stoichiometric Coefficient	โมลเริ่ม	โมลที่สมดุล	X_i ที่สมดุล
TPA	-1	1	1-a	(1-a)/3
EG	-2	2	2-2a	(2-2a)/3
น้ำ	+2	0	2-2a	2a/3
MONOMER	+1	0	a	a/3
TOTAL		3	3	

$$\text{ดังนั้น } K_a = 141.71 = \frac{[(2a/3)^2 (a/3)]}{[(2-2a)/3]^2 ((1-a)/3)}$$

แก้สมการได้ $a = 0.84$

ดังนั้นค่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเมื่อถึงภาวะสมดุล คือ 84%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรฉัตร ชมบ้านแพ้ว เกิดเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2515 ที่ กรุงเทพมหานครสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2539 และเข้า ศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 ปัจจุบันทำงานที่ บริษัท เทยีน (ประเทศไทย) จำกัด นครมอุตสาหกรรมบางปะอิน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย