การสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

นางสาวธิรดา เงินรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SYNTHESIS OF REACTOR NETWORKS AND REACTOR-SEPARATOR-RECYCLE SYSTEMS BY USING DIFFERENTIAL EVOLUTIONARY ALGORITHM

Miss Thirada Ngernrat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineer Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์
โดย	นางสาวธิรดา เงินรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิดิศ หนูทอง)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกร รามกุล)

ธิรดา เงินรัตน์ : การสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์. (SYNTHESIS OF REACTOR NETWORKS AND REACTOR-SEPARATOR-RECYCLE SYSTEMS BY USING DIFFERENTIAL EVOLUTIONARY ALGORITHM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. สุรเทพ เขียวหอม, 107 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง, เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลและหอกลั่นที่ใช้เป็นอุปกรณ์ในการแยกสาร โดยในระบบเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนปฏิบัติงานภายใต้ระบบอุณหภูมิคงที่ มีการบรรยายสมการเงื่อนไขสภาวะการปฏิบัติงานทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยสมการจลนศาสตร์ สมการสมดุลมวลและสมการสมดุลองค์ประกอบสำหรับทุกหน่วยในระบบ เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการทำงานของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการ Repair algorithm ที่ใช้เพื่อแก้ไขผลลัพธ์ที่เป็นไปไม่ได้ให้ถูกต้องและหลักการ Dominance-based เพื่อใช้จัดการกับเงื่อนไขของปัญหา พร้อมกับใช้ร่วมกับการดัดแปลงใช้ Relaxation เพื่อช่วยลดจำนวนฟังก์ชันในการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ในการประมวลผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ ซึ่งผลของการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สามารถแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดในระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความซับซ้อนได้และแสดงถึงความมีประสิทธิภาพของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

5270851821: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ISOTHERMAL REACTOR SYSTEMS, OPTIMIZATION, DIFFERENTIAL EVOLUTION

THIRADA NGERNRAT : SYNTHESIS OF REACTOR NETWORKS AND REACTOR-SEPARATOR-RECYCLE SYSTEMS BY USING DIFFERENTIAL EVOLUTIONARY ALGORITHM. ADVISOR : ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 107 pp.

This paper presents the synthesis of reactor networks system and reactor-separator-recycle system. A reactor representation is proposed the continuous stirred tank reactor, the plug flow reactor and distillation columns as to separator substance that complex reaction schemes under isothermal operation. Mathematical model for the reactor superstructure including the kinetic equations, the mass balance equations and component balances for all system units. For optimizes the performance index in objective function. For this paper using differential evolutionary algorithm to solve this optimization problem that uses a repair algorithm to correct infeasible solutions and dominance-based selection to handle constraints of the problems and incorporates adaptive relaxation of constrains help to decrease number of function evaluations. By use MATLAB program to evaluate mathematical model of differential evolutionary algorithm. The results show that the differential evolutionary algorithm proposed could solve optimization problems of complex reactor systems and show efficiency of differential evolutionary algorithm.

Department : Chemical Engineering Student's Signature .....
Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year : 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยต้องขอขอบพระคุณความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการอบรมสั่งสอน การปฏิบัติงาน คำแนะนำแนวทางในการพัฒนา ปรับปรุง แก้ไขงานวิจัยและความช่วยเหลือในอีกหลายด้านจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิดิศ หนูทอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประกร รามกุล ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการ และได้เสียสละเวลาในการให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังแรงใจที่สำคัญที่สุดและเป็นแรงสนับสนุนให้ก้าวผ่านอุปสรรคทั้งหลายจนทำให้สำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน พี่และน้องทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในขั้นตอนต่างๆ ในการดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบสิ่งที่ดีและมีคุณค่าต่อการศึกษาเรียนรู้ในระดับมหาบัณฑิตอย่างดีเยี่ยม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญภาพ..... ญ
สารบัญตาราง..... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... 3
1.6 ตารางแผนการดำเนินการวิจัย..... 3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
บทที่ 3 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 12
3.1 การสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์..... 12
3.1.1 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์..... 12
3.1.2 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์..... 12
3.1.3 ประเภทของปฏิกิริยา..... 13
3.1.4 ชนิดของปฏิกิริยา..... 14
3.1.5 สมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์..... 14
3.1.6 ค่าคอนเวอร์ชัน..... 21
3.1.7 ตารางปริมาณสารสัมพันธ์..... 22
3.1.8 การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบขนาน..... 23
3.1.9 การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรม..... 25

หน้า

3.2 ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์..... 26
3.3 หลักการพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่สุด..... 28
3.3.1 ตัวแปรออกแบบ..... 28
3.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 30
3.3.3 ข้อจำกัดของปัญหา..... 30
3.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัด..... 30
บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย..... 33
4.1 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 33
4.1.1 ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์..... 33
4.1.2 ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ..... 34
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ..... 36
4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์..... 36
4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ..... 41
4.3 ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สำหรับงานวิจัย..... 46
4.4 การดำเนินการในโปรแกรมแมทแลป..... 48
4.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์..... 49
4.5.1 ปัญหาระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์..... 49
4.5.2 ปัญหาระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ..... 54
บทที่ 5 ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย..... 59
5.1 ผลการดำเนินงานวิจัยการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์..... 59
5.2 ผลการดำเนินงานวิจัยการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ..... 64
5.3 อภิปรายผลการวิจัย..... 68
5.3.1 อภิปรายผลการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์..... 68
5.3.2 อภิปรายผลการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ..... 70
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 72

หน้า

6.1 สรุปผลการวิจัย..... 72
6.2 ข้อเสนอแนะ 74
รายการอ้างอิง..... 75
ภาคผนวก คำสั่งการคำนวณค่าเหมาะสมที่สุดของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์
โดยโปรแกรม MATLAB 77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 107

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงระบบโครงสร้างของเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ Kokossis และ Floudas (1990) ….	5
2.2	รูปแบบโครงสร้างทางเลือกต่างๆที่ได้ถูกนำเสนอโดย Kokossis และ Floudas (1991)..	6
2.3	เครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ Kokossis และ Floudas (1991)	7
2.4	แผนผังขั้นตอนวิธีการจัดการสมการเงื่อนไข S.Kheawhom (2010)……..	10
3.1	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลที่มีการป้อนกลับกรณีความหนาแน่นคงที่……	19
3.2	แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลที่มีการป้อนกลับกรณีความหนาแน่นไม่คงที่……	20
3.3	แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องแบบขนาน…….	23
3.4	แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลแบบขนาน…….	24
3.5	แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องแบบอนุกรม……...	25
3.6	แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลแบบอนุกรม ……..	26
3.7	แผนผังขั้นตอนระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ ……..	29
4.1	แสดงระบบโครงสร้างของเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย……..	33
4.2	แสดงระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับที่ใช้ในงานวิจัย…	34
4.3	แผนผังระเบียบความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สำหรับงานวิจัย……	47
5.1	รูปแบบโครงสร้างระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์จากผลงานวิจัย……..	64
5.2	รูปแบบโครงสร้างระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับจากผลงานวิจัย	68
5.3	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์……..	69
5.4	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ……	70

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จาก G.P.Rangaiah(2012) และ S.Kheawhom(2010) …….	11
3.1	ตารางสรุปการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ ในรูปของค่าคอนเวอร์ชัน …….....	22
3.2	ปริมาณสารสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยา …….	22
5.1	ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ ……	59
5.2	ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ……..	64

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_i	ความเข้มข้นของสาร i (โมลต่อลิตร)
F	Weighing factor
F_A	อัตราการป้อนของสารบริสุทธิ์ A (โมลต่อเวลา)
F_i	อัตราการไหลโดยโมลของสาร i (โมลต่อเวลา)
F(x)	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
Gj	การเกิดของสาร j ในเครื่องปฏิกรณ์
$g_l(x)$	Inequality constraints
$H(X_i)$	เวกเตอร์ของสมการเงื่อนไข
$h_m(x)$	Equality constraints
$J(X_i)$	จาโคเบียนเมทริก
k	ค่าคงที่อัตราเฉพาะของการเกิดปฏิกิริยา(Specific rate constant)
M	จำนวนสมการเงื่อนไข (Equality constraint)
N	มิติ (Dimension)
n	จำนวนเครื่องปฏิกรณ์
Q	ค่าพลังงานความร้อน (กิโลจูล)
R	อัตราส่วนการป้อนกลับ
r_j	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร j
V	ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์
Xi	คอนเวอร์ชันของสาร i
$x_n^{(L)}$	ขอบเขตค่าต่ำสุด
$x_n^{(U)}$	ขอบเขตค่าสูงสุด
ϵ	ค่าที่ยอมรับได้ในการฝ่าฝืนเงื่อนไขในการคำนวณ (Tolerance)

ตัวอักษรย่อ

CR	Crossover factor
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor
DE	Differential evolutionary algorithm
GA	Genetic algorithm
GEN	Number of generation
IDE	Integrated differential evolution
MINLP	Mixed Integer Nonlinear Programming
NFE	Number of Function Evaluations
NP	Number of population
PFR	Plug Flow Reactor
SR	Success rate

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงบทนำของงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยความสำคัญและเหตุจูงใจในการทำงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ผลประโยชน์ที่ได้รับและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากระบบเครื่องปฏิกรณ์มีความสำคัญต่อกระบวนการวิศวกรรมเคมีอย่างมาก มีการใช้ในกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรมทั่วไปอย่างแพร่หลายโดยจะเป็นหน่วยที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสารตั้งต้นให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ แต่มีการนำเสนอผลงานการวิจัยเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีในการหาค่าที่เหมาะที่สุดของระบบเครื่องปฏิกรณ์เพียงเล็กน้อย สาเหตุหลักที่ทำให้ผลงานวิจัยทางด้านนี้ขาดแคลนมาจากความยากของปัญหา [1] โดยพื้นฐานของงานวิจัยนี้ได้จากการศึกษาการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบโครงสร้างพิเศษในระบบอุณหภูมิคงที่และมีความซับซ้อนในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) ในการหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์[2] โดยใช้รูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ 2 แบบด้วยกัน คือแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) และแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug Flow Reactor, PFR) โดยในการหาค่าเหมาะที่สุดในการแก้ปัญหานี้จะทำการหาค่าที่มากที่สุดของผลิตภัณฑ์ โดยจะพิจารณาการทำปฏิกิริยาเป็นแบบปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reaction) เท่านั้น และอีกหนึ่งปัญหาที่ศึกษาคือปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยก-การป้อนกลับ[3]

ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบเครื่องปฏิกรณ์นี้โดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ (Differential evolutionary algorithm, DE) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบ Stochastic ที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางวิธีหนึ่ง มีพื้นฐานจากการหาคำตอบของปัญหาด้วยวิธีการสุ่มเลือก ถูกคิดค้นโดย Price และ Storn โดยโครงสร้างของ DE พัฒนามาจาก Genetic algorithm (GA) ที่มีแนวคิดมาจากกระบวนการคัดสรรตามธรรมชาติ โดยการจำลองกลุ่มประชากรเลียนแบบโครโมโซมด้วยชุดของเลขฐานสอง และดำเนินการกับกลุ่มประชากรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์ เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่ดีของสมาชิกในกลุ่มประชากรให้อยู่รอดต่อไป และทำซ้ำกระบวนการดังกล่าวจนได้สมาชิกของกลุ่มประชากรที่ดีที่สุด ซึ่งก็คือคำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยข้อแตกต่างของ DE กับ GA คือDE มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสามารถประยุกต์ใช้หาคำตอบของปัญหาต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและมี

ประสิทธิภาพ[4] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและเสนอการออกแบบระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ S.Kheawhom,2010 ที่ได้เสนอระเบียบวิธีในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี ซึ่งได้เสนอการใช้หลักการ Repair algorithm เพื่อแก้ไขผลลัพธ์ที่เป็นไปไม่ได้ให้ถูกต้องและ Dominance-based เพื่อใช้จัดการกับเงื่อนไขของปัญหาซึ่งสามารถแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดทางกระบวนการเคมีได้อย่างถูกต้องแม่นยำ มีเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จ(success rate) 100% [5] และจากการศึกษาผลงานวิจัยของ G.P.Rangaiah,2012 ที่ได้ทำการเสนอการประยุกต์ระเบียบวิธี IDE ซึ่งมีการใช้ Adaptive relaxation ที่สามารถช่วยลดจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณได้ และสามารถแก้ไขปัญหากระบวนการทางวิศวกรรมเคมีได้[6]

สำหรับในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ ซึ่งใช้หลักการ Repair algorithm และหลักการ Dominance-based เพื่อใช้จัดการกับเงื่อนไขของปัญหาพร้อมกับใช้ร่วมกับการ Adaptive relaxation เพื่อช่วยลดจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณ และการ Reformulate สมการเงื่อนไข ซึ่งผลของการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สามารถแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมในระบบเครื่องปฏิกรณ์ได้และแสดงถึงความมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวอย่างการ สังเคราะห์ข่ายงานเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างปัญหาการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องจำนวน 5 เครื่อง ปฏิบัติงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่

1.3.2 ตัวอย่างปัญหาการ สังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องจำนวน 3 เครื่อง และใช้หอกลั่นเป็นอุปกรณ์ในการแยกสาร ปฏิบัติงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

1.3.3 ระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

1.3.4 การคำนวณทั้งหมดทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับได้

1.4.2 แสดงการนำระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์มาใช้ในการแก้ปัญหาที่เป็นระบบที่ซับซ้อนในทางกระบวนการวิศวกรรมเคมีได้

1.4.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาอื่นๆ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและค้นคว้าผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการทำงานของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

1.5.3 จำลองกระบวนการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลป (MATLAB R2012a)

1.5.4 สังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลป (MATLAB R2012a)

1.5.5 วิเคราะห์ สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

1.6 ตารางแผนการดำเนินการวิจัย

กิจกรรม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษางานวิจัยระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์	←	—	—	—	—	→						
2. ศึกษาระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ		←	—	—	—	—	→					
3. จำลองกระบวนการด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์					←	—	—	→				
4. สังเคราะห์ระบบข่ายงานเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์						←	—	—	—	—	→	
5. วิเคราะห์ สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์									←	—	—	→

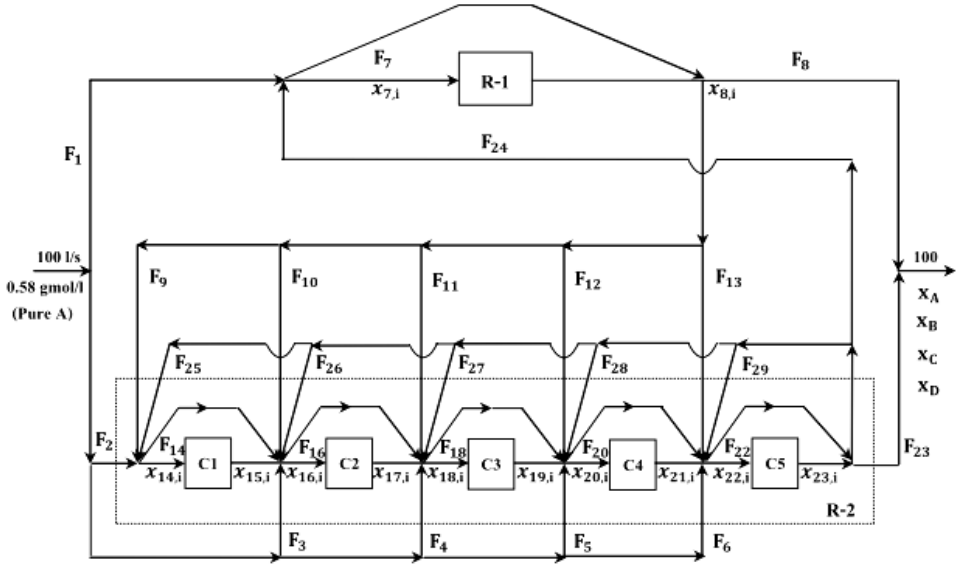
บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับการพัฒนาระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ และการแก้ปัญหาของการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยก-การป้อนกลับ

เนื่องจากระบบเครื่องปฏิกรณ์มีความสำคัญต่อกระบวนการวิศวกรรมเคมีอย่างมาก มีการใช้ในกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรมทั่วไปอย่างแพร่หลาย ดังนั้นการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเครื่องปฏิกรณ์จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาและแก้ไขปัญหาในระบบโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์นี้ได้รับความสนใจในการนำมาใช้หรือในการประยุกต์และพัฒนาเพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดกันมาอย่างต่อเนื่องและแพร่หลาย โดยปัจจุบันนี้การประยุกต์และปรับปรุงประสิทธิภาพและศักยภาพในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดมีมากขึ้นอย่างแพร่หลายในหลากหลายสาขาวิชาชีพทั้งทางด้านธุรกิจ,ด้านวิทยาศาสตร์และด้านวิศวกรรมศาสตร์[6] เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำถูกต้องโดยง่ายอย่างรวดเร็วและสอดคล้องกับปัญหาที่มีข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป

จากการนำเสนอผลงานวิจัยของ Kokossis และ Floudas (1990) ที่ได้ทำการเสนอแนวคิดเชิงระบบสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาที่ซับซ้อนภายใต้การปฏิบัติงานแบบอุณหภูมิคงที่ โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้ถูกนำเสนอคือเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) และเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแบบท่อไหล (Plug flow reactor, PFR) ที่เกิดจากการต่ออนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องเป็นโครงสร้างพิเศษ(superstructure) ของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเสนอในทุกๆ ความเป็นไปได้ของรูปแบบโครงสร้างของระบบการเชื่อมต่อภายในระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ โดยความแตกต่างกันของการป้อนกลับจะส่งผลให้เกิดการจัดการที่แตกต่างกันออกไป เช่น การป้อนเข้า, การป้อนกลับและกลยุทธ์ในการใช้ทางเลี่ยง โดยปัญหาการสังเคราะห์ที่สร้างจากระบบโครงสร้างพิเศษนี้เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ซึ่งจากการนำเสนอนี้ได้มีการใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้ Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะที่สุดสำหรับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่มากที่สุด (Max X_B) ดังแสดงโครงสร้างของระบบดังรูปที่ 2.1 ซึ่ง R-1 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องจำนวน 1 เครื่อง และ R-2 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจำนวน 1 เครื่อง โดยเครื่องปฏิกรณ์ R-2 นี้เกิดจากการต่ออนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจำนวน 5 เครื่องและบริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจะมีการป้อนกลับ

มายังอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องด้วย ซึ่งจะมีการป้อนกลับแบบกระจายให้กับเครื่องปฏิกรณ์ทุกเครื่องในอนุกรม[2]



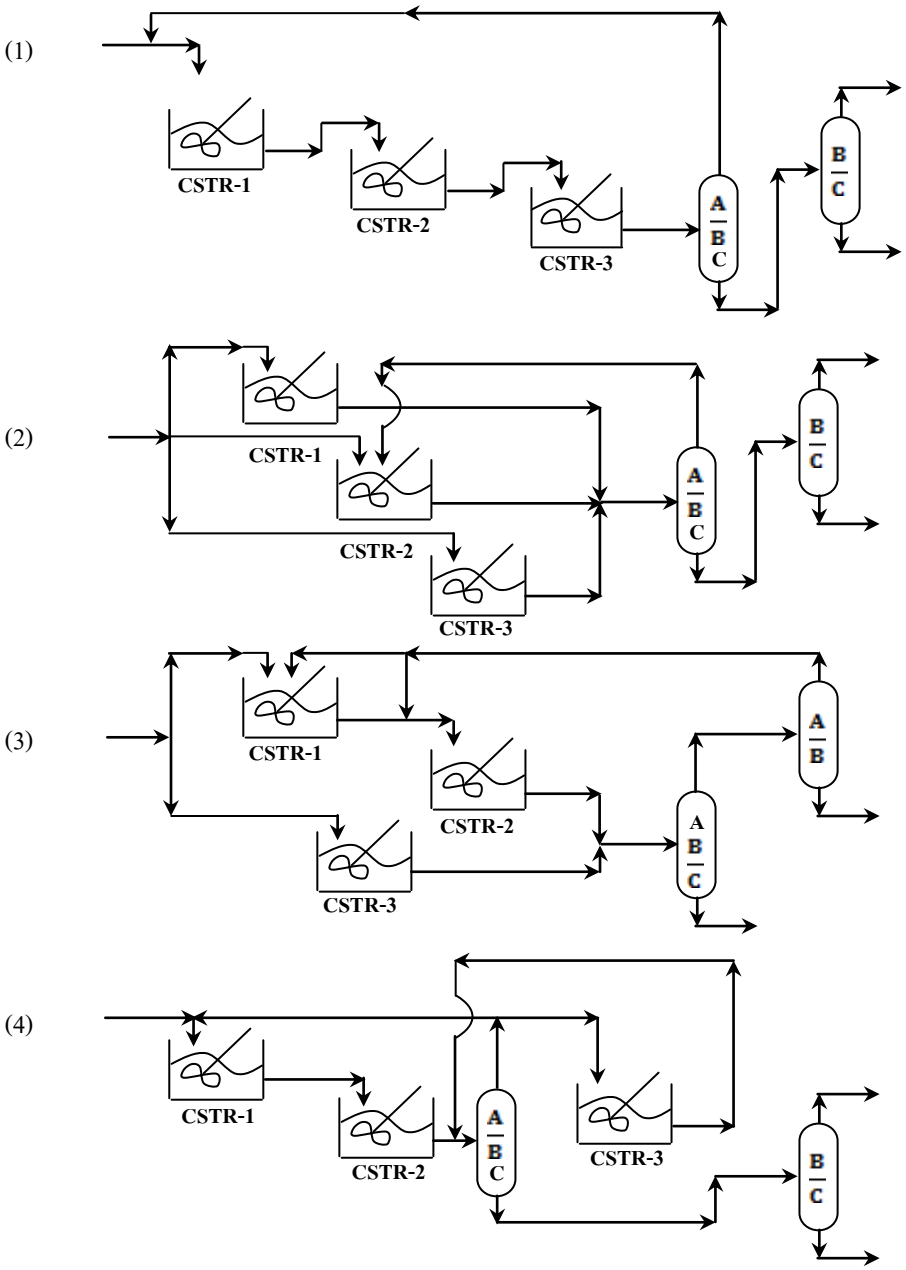
รูปที่ 2.1 แสดงระบบโครงสร้างของเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ Kokossis และ Floudas (1990)

และ Kokossis และ Floudas (1991) ได้ทำการเสนอแนวคิดทั่วไปที่มีการใช้พื้นฐานจากเทคนิคการคำนวณทางโปรแกรมคณิตศาสตร์สำหรับการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ โดยได้มีการอ้างถึงทางเลือกที่แตกต่างของเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์แยกสำหรับความเป็นไปได้ของการเชื่อมต่อภายในโครงสร้างของระบบ ซึ่งได้มีการพิจารณาในเรื่องของความแตกต่างของภารกิจการแยกสาร, ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน , รูปแบบโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันและความแตกต่างของการป้อนเข้า การป้อนกลับและการใช้ทางเลี่ยง(By pass) ซึ่งการสังเคราะห์ปัญหานี้ใช้วิธีคิดด้วย Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) โดยสำหรับรูปที่ 2.2 ได้แสดงรูปแบบโครงสร้างทางเลือกต่างๆกันที่ได้ถูกนำเสนอ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโครงสร้างที่เหมาะสมคือรูป (1) ที่มีการต่อแบบอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์และประกอบด้วยหน่วยของการแยกสาร 2 หน่วย โดยอุปกรณ์แยกหน่วยแรกคือการแยกสาร A ออกจาก B กับ C เพื่อทำการป้อนกลับสาร A ไปยังเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องเครื่องที่ 1 และอุปกรณ์แยกหน่วยที่สองคือการแยกสาร B ออกจาก C และได้มีการเสนอการแก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับซึ่งมีการทำปฏิกิริยา

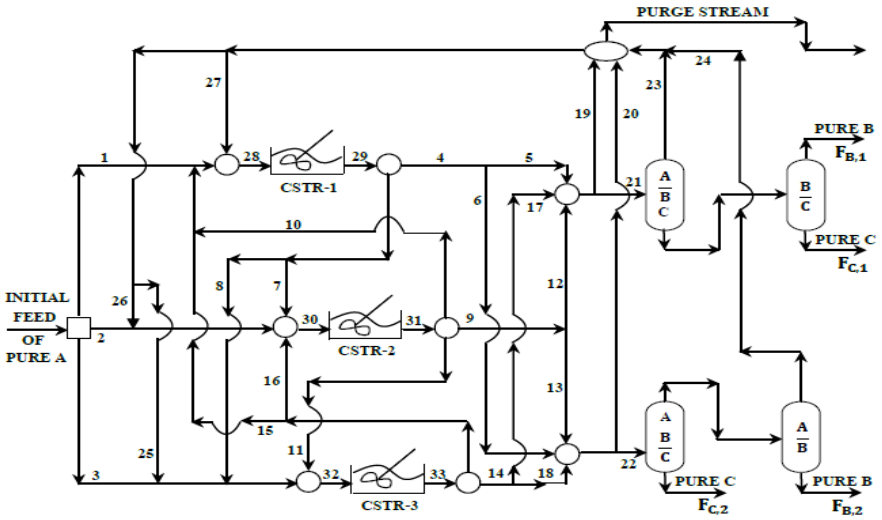
$$C_6H_6 + Cl_2 \xrightarrow{k_1} C_6H_5Cl + HCl$$

$$C_6H_6Cl + Cl_2 \xrightarrow{k_2} C_6H_4Cl_2 + HCl$$

โดยปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและเป็นปฏิกิริยาไม่ผันกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 รูปแบบโครงสร้างทางเลือกต่างๆที่ได้ถูกนำเสนอโดย Kokossis และ Floudas (1991)



รูปที่ 2.3 เครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ Kokossis และ Floudas (1991)

จากการสังเคราะห์ระบบดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทุกปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ซึ่งขดลวดภายใน (Internal coils) จะทำหน้าที่ในการนำความร้อนทั้งหมดออกจากเครื่องปฏิกรณ์และเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ ซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของผลกำไรที่มากที่สุดรายปี ซึ่งทาง Kokossis และ Floudas (1991) ได้ใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)[3]

ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) เป็นหนึ่งในเรื่องของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computation) ที่ใช้ฐานประชากรโดยทั่วไปของขั้นตอนวิธีแบบเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุด (Metaheuristic optimization algorithm) โดยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้น ใช้กระบวนการที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการวิวัฒนาการทางชีววิทยา[8] อันได้แก่ การสืบพันธุ์ (Reproduction) การกลายพันธุ์(Mutation) การแลกเปลี่ยนยีน(Recombination) และการคัดเลือก (Selection)โดยจะมีผลเฉลยที่สามารถเลือกได้(Candidate solution) แทนประชากร และฟังก์ชันคุณภาพ (Quality function) ในการคัดเลือกประชากรที่เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมที่กำหนดไว้[9][10] ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการนี้มักจะใช้ได้ดีสำหรับการหาผลเฉลยของปัญหาในทุกๆ ด้าน เนื่องจากสามารถพัฒนาผลเฉลยที่มีไปยังผลเฉลยที่ถูกต้องได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มันประสบความสำเร็จในหลายๆ ด้านของปัญหา เช่น วิศวกรรม ศิลปกรรม ชีวภาพ เศรษฐศาสตร์ การตลาด พันธุศาสตร์ การค้นคว้าวิจัย การออกแบบหุ่นยนต์ วิทยาศาสตร์ด้านสังคม ฟิสิกส์ รัฐศาสตร์และเคมี

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) นี้เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปในการหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดของปัญหาต่างๆ ในหลากหลายแขนง โดยวิธีการที่ใช้ในการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่นิยมกันอย่างแพร่หลายสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เช่น วิธีการซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) และโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Non-linear Programming) เช่น โปรแกรมควอดราติก (Quadratic Programming), วิธีการลดลงอย่างชันที่สุด (Method of Steepest Descent) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็สามารถเข้าถึงคำตอบของปัญหาที่ต้องการได้แตกต่างกัน รวมถึงความแม่นยำและความรวดเร็วในการหาคำตอบของปัญหาด้วย[7] โดยความยากของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ความยุ่งยากของการหาค่าของคำตอบที่เป็นไปได้ ซึ่งในปัญหาที่ต้องทำการแก้ไขอาจจะประกอบไปด้วยสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่พิจารณา และการเริ่มต้นขั้นตอนในการหาคำตอบนั้นจะเริ่มด้วยการเลือกกลุ่มคำตอบเริ่มต้นซึ่งจะมีกระบวนการที่เป็นแบบแผนในการเลือกกลุ่มของคำตอบจากขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้เพื่อให้มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง และหลังจากนั้นจะทำการคำนวณค่าความแข็งแรงของสมาชิกในกลุ่มนั้นตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ สำหรับกระบวนการที่นิยมใช้ในการเลือกกลุ่มคำตอบเริ่มต้น (Initial population) ของ Genetic algorithm หรือ GA ทั่วไปนั้นจะใช้วิธีการเลือกแบบสุ่มค่าตัวอย่าง (Random sampling)

เมื่อมีการพัฒนารูปแบบวิธีในการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดมาอย่างต่อเนื่องก็จะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะที่สุดแบบเฟ้นสุ่ม (Stochastic optimization) เป็นวิธีการที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ซึ่งการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเฟ้นสุ่มนี้คือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการสร้างและใช้ตัวแปรสุ่ม โดยจะใช้ตัวแปรสุ่มในขั้นตอนการคำนวณหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่ง DE หรือ Differential evolutionary algorithm เป็นรูปแบบวิธีการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดแบบเฟ้นสุ่มที่ได้รับความนิยมอย่างมากซึ่งได้รับการพัฒนามาจาก GA จึงได้มีผลงานที่นำเสนอเกี่ยวกับกลยุทธ์ใหม่ๆหรือการประยุกต์ปรับปรุงแก้ไขหรือเสนอขั้นตอนวิธีใหม่ๆของ DE เรื่อยมา ซึ่งจากผลงานวิจัยของ S.Kheawhom (2010) ที่ได้เสนอแบบแผนการจัดการเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพสำหรับระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ (Differential evolutionary algorithm) ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทางวิศวกรรมเคมี โดยหลักการที่ได้พัฒนาและนำเสนอคือการใช้วิธีการ Dominance-based selection schemes ในส่วนของขั้นตอน Selection ซึ่งเป็นกระบวนการคัดสรรคำตอบโดยเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีกว่าจะอยู่รอดไปสู่รุ่นการคำนวณถัดไป โดยทำการเปรียบเทียบเวกเตอร์ Parent vector (X_i) และ Trial vector (U_i) ถึงความเป็นไปได้ของคำตอบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งสถานการณ์ความเป็นไปได้ในการเลือกเวกเตอร์ทั้งสองนี้สามารถพิจารณาได้เป็น 3 กรณี กรณีแรกคือทั้งสองเวกเตอร์ทำให้พบคำตอบที่

เป็นไปได้ ถ้าเป็นเช่นนี้จะทำการเลือกเวกเตอร์ที่ให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่า กรณีที่สอง คือมีหนึ่งเวกเตอร์เท่านั้นที่ให้คำตอบที่เป็นไปได้ อีกหนึ่งเวกเตอร์ไม่สามารถให้คำตอบได้ ดังนั้น เวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่เป็นไปได้ก็จะถูกเลือกให้นำไปคำนวณต่อในรุ่นการคำนวณ (Generation) ต่อไป และกรณีสุดท้ายคือทั้งสองเวกเตอร์ไม่สามารถให้คำตอบได้ โดยกรณีนี้จะทำการเลือกเวกเตอร์ที่มีความฝ่าฝืนเงื่อนไขในระดับที่ต่ำกว่าให้อยู่รอดไปสู่รุ่นการคำนวณต่อไป ดังแสดงในสมการ 2.1

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i & \text{if} \quad X_i \prec U_i \\ U_i & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2.1}$$

$X_i \prec U_i$ หมายถึง การที่เวกเตอร์ X_i มีอิทธิพลเหนือเวกเตอร์ U_i ซึ่งก็คือเวกเตอร์ X_i มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าเวกเตอร์ U_i และ/หรือมีระดับความฝ่าฝืนเงื่อนไขที่ต่ำกว่า

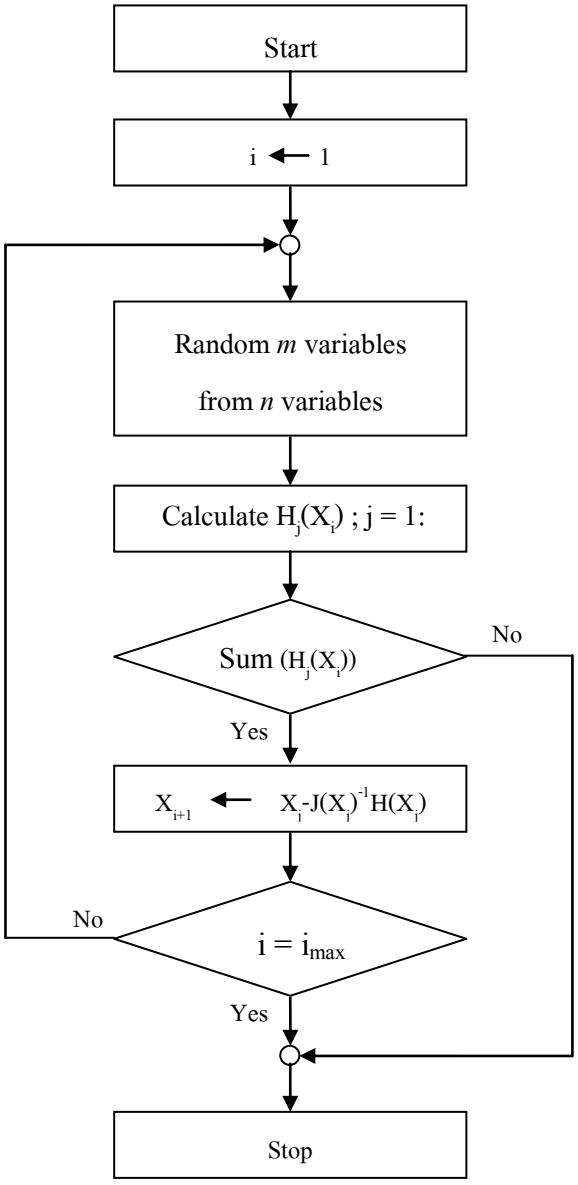
และอีกวิธีการหนึ่งที่ได้มีการนำเสนอคือขั้นตอนวิธี Repair algorithm ใช้ในการจัดการสมการเงื่อนไข โดยทำการยกตัวอย่างการพิจารณาปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมี N มิติ (Dimension) และมี M สมการเงื่อนไข(Equality constraint) เมื่อพิจารณาองศาเสรี(Degree of freedom) ก็จะได้เป็น N-M ตัวแปร ในขณะที่ M ตัวแปรนั้นคือสมการเงื่อนไข ดังนั้นทุกๆกลุ่มคำตอบที่เป็นไปไม่ได้เวกเตอร์(Infeasible vector) X ก็จะบรรจุไปด้วย N ตัวแปร ที่สามารถนำเข้าสู่การรีแพรโดยการแก้ปัญหาในระบบ M สมการโดยใช้ Newton's method ดังแสดงขั้นตอนของกระบวนการในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเริ่มจากการสุ่มเลือกตัวแปร M ตัวแปรจากตัวแปรทั้งหมด N ตัวแปร นำมาทำการรีแพรแล้วจึงทำการตรวจสอบค่าที่ยอมรับได้ในการฝ่าฝืนเงื่อนไขในการคำนวณ ϵ (Tolerance) โดยถ้าคำตอบที่เป็นไปไม่ได้แต่มีค่าการฝ่าฝืนเงื่อนไขที่น้อยกว่าก็จะอยู่รอดไปสู่ขั้นตอนการคำนวณในรุ่นต่อไปเพื่อเป็นการรักษาระดับความแตกต่างของประชากรกลุ่มคำตอบ แต่หากมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ก็จะกลับเข้าสู่การทำรีแพรในระบบสมการ M ใหม่

ซึ่งในการคำนวณหาเวกเตอร์ X ที่ถูกต้องนั้นทำได้ดังสมการ 2.2 เพื่อเป็นการย้ายสมการเงื่อนไขแต่ละสมการให้เข้าใกล้ช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้

$$X_{i+1} = X_i - J^{-1}(X_i)H(X_i) \tag{2.2}$$

โดยที่ $J(X_i)$ คือจาโคเบียนเมทริก และ $H(X_i)$ คือเวกเตอร์ของสมการเงื่อนไข (Equality constraints violation) ซึ่งการวนซ้ำของการคำนวณนี้จะหยุดก็ต่อเมื่อผลรวมของระดับการฝ่าฝืน

สมการเงื่อนไขน้อยกว่าค่า ∈ ที่กำหนดหรือจำนวนการกระทำวนซ้ำเท่ากับค่าสูงสุดของการวนซ้ำที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.4 แผนผังขั้นตอนวิธีการจัดการสมการเงื่อนไข S.Kheawhom (2010)

หรือเมื่อเท่ากับรุ่นในการคำนวณที่กำหนดไว้ ก็จะเข้าสู่ขั้นตอน Stopping criteria โดยจากผลงานการนำเสนอนี้แสดงให้เห็นถึงการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์(Differential Evolution Algorithm) หาค่าคำตอบในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาทางด้านวิศวกรรมเคมีได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากมีอัตราความสำเร็จ(Success rate, SR) 100 เปอร์เซ็นต์[5]

ต่อมา H.Zhang และ G.P.Rangaiah(2012) ได้ทำการเสนอผลงานวิจัยขั้นตอนวิธีการจัดการเงื่อนไขในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวิศวกรรมเช่นเดียวกัน โดยใช้ระเบียบวิธีการหาปริพันธ์ของผลต่างอนุพันธ์เชิงวิวัฒน์(Integrated Differential Evolution, IDE) ที่ได้มีการดัดแปลงนำการผ่อนปลน (Relaxation) เงื่อนไขการคำนวณมาใช้ในการหากลุ่มคำตอบ ซึ่งกลุ่มคำตอบที่ได้จากการใช้มาตรการการลดหย่อนทางด้านความเข้มงวดของเงื่อนไขในการคำนวณจะค่อนข้างกว้าง จึงมีการใช้ Local optimization ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งจากผลงานการนำเสนอครั้งนี้ทำให้เห็นได้ว่าการดัดแปลงนำการรีแลกซ์มาใช้ในระเบียบวิธีเชิงวิวัฒน์นี้สามารถช่วยให้การคำนวณหาคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นไปด้วยความกระชับรวดเร็วขึ้น สังเกตได้จากจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณ(Number of Function Evaluations, NFE) ของแต่ละปัญหามีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังตารางที่ 2.1[6]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จาก G.P.Rangaiah(2012) และ S.Kheawhom(2010)

ตัวอย่างปัญหา	Global optimum	S.Kheawhom (2010)		G.P.Rangaiah(2012)	
		SR	NFE	SR	NFE
ตัวอย่างที่ 1	7,049.248	100	380,000	100	15,632
ตัวอย่างที่ 2	-0.3888	100	10,500	100	11,604
ตัวอย่างที่ 3	36,162.989	100	864,000	95	11,524
ตัวอย่างที่ 4	1.864	100	954,500	100	16,338

โดยผลจากตารางแสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาทางด้านวิศวกรรมเคมีได้ แม้ว่าเงื่อนไขของปัญหาจะประกอบไปด้วยสมการเงื่อนไข(สมการที่มีเครื่องหมายเท่ากับ) หรือ/และอสมการเงื่อนไข(สมการที่มีเครื่องหมายน้อยกว่าเท่ากับ) ซึ่งล้วนแล้วแต่สร้างความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้ไขปัญหานั้นๆ ซึ่ง DE ที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาเหล่านี้กำลังได้ความนิยมและสนใจอย่างยิ่งในการประยุกต์และพัฒนาให้หาคำตอบได้ถูกต้องแม่นยำที่สุดและมีความรวดเร็วในการหาคำตอบที่มากขึ้น

บทที่ 3
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

3.1 การสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์

ในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมเคมีเป็นอุตสาหกรรมที่มีผลต่อสภาพสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมทางด้านปิโตรเลียม อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมยาและอาหาร เป็นต้น โดยในอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่ประกอบด้วยหน่วยที่มีการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ซึ่งจะมีส่วนประกอบของรายละเอียดเกี่ยวกับระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

3.1.1 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์

การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบ่งได้เป็น 3 แบบดังนี้คือ

(1) ในการทำงานแบบกะ (Batch operation) สารทำปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ทิ้งไว้ก่อน แล้วจึงเริ่มปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดจึงนำของผสม (สารทำปฏิกิริยาที่ยังเหลืออยู่และผลิตภัณฑ์) ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน

(2) การทำงานแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous operation) สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องและในส่วนของผลิตภัณฑ์ก็จะไหลออกมาที่ทางออก ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งรูปแบบถังกวนและแบบท่อไหล

(3) การทำงานแบบเฟดแบทช์ (fed-batch operation), เซมิแบทช์ (semi-batch operation) จะมีลักษณะการทำงานก้ำกึ่งระหว่างแบบกะกับแบบไหลต่อเนื่อง โดยสารทำปฏิกิริยาตัวหนึ่งถูกป้อนให้เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ก่อนและจึงป้อนสารที่ทำปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่งเข้าไปแบบต่อเนื่องหรือป้อนเป็นระยะๆ

3.1.2 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

(1) เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนในลักษณะการทำงานแบบกะเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) แต่ถ้าเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor) หรือ CSTR

(2) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล มีโครงสร้างคล้ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor) หรือ PFR

โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงทฤษฎีของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลที่มีการใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) มีลักษณะของการทำงานโดยสารทำปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าไปที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง โดยมีใบกวนช่วยกวนสารทำปฏิกิริยาให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด นอกจากใบกวนจะมีหน้าที่ทำให้สารทำปฏิกิริยามีเนื้อเดียวกันแล้วยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนอีกด้วย

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor, PFR) มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจะให้สารที่ทำปฏิกิริยาไหลผ่านท่อซึ่งท่อนั้นจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลนี้จะมีความเข้มข้นในแนวตั้งฉากกับการไหลที่เท่ากันตลอดท่อการไหล แต่ความเข้มข้นในแนวทิศทางเดียวกับการไหลจะไม่เท่ากันเนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องทำให้ในแนวการไหลมีความเข้มข้นที่เปลี่ยนไป

3.1.3 ประเภทของปฏิกิริยา

สามารถแบ่งตามวัฏภาคของปฏิกิริยาได้ดังนี้

ปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (Homogeneous reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในวัฏภาคเดียวกัน ตัวทำปฏิกิริยา, สารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารในวัฏภาคเดียวกัน มองด้วยตาเปล่าเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดในวัฏภาคของแก๊ส เช่น ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไฮโดรเจน, ปฏิกิริยาการแยกแนฟทาด้วยความร้อน เป็นต้น และจะเกิดได้ในอีกหนึ่งวัฏภาคคือของเหลว เช่น ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในหลายวัฏภาคเป็นปฏิกิริยาเนื้อผสม คือ ตัวทำปฏิกิริยา, สารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาคที่แตกต่างกัน มองด้วยตาเปล่าเห็นเป็นสารที่แยกวัฏภาคกัน เช่น ในวัฏภาคแก๊สกับของแข็งจะมีตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยารีดักชันเหล็ก, ปฏิกิริยาผลิตถ่านกัมมันต์และปฏิกิริยาแยกหินปูนด้วยความร้อนเป็นต้น ในส่วนของวัฏภาคแก๊สกับของเหลวเช่นปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนหรือปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของเรซิน เป็นต้น

3.1.4 ชนิดของปฏิกิริยา

ซึ่งแบ่งตามจำนวนสมการปริมาณสัมพันธ์ได้ดังนี้

(1) ปฏิกิริยาเดี่ยว (Single reaction) คือปฏิกิริยาที่สามารถเขียนด้วยสมการปริมาณสัมพันธ์เพียงสมการเดียวในการแสดงความสัมพันธ์ของสารที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา

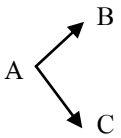
$$A + B \longrightarrow C$$

(2) พหุปฏิกิริยา (Multiple reaction) คือปฏิกิริยาที่ต้องใช้หลายสมการปริมาณสัมพันธ์ในการแสดงความสัมพันธ์ของสารที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโดยสามารถบ่งได้เป็น

- ปฏิกิริยาแบบอนุกรม (Series reaction) คือปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาแล้วเกิดผลิตภัณฑ์ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้จะเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาอื่นต่อเนื่องไปด้วยอัตราเร็วเท่ากัน

$$A \longrightarrow B \longrightarrow C$$

- ปฏิกิริยาแบบขนาน (Parallel reaction) คือปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาแล้วเกิดผลิตภัณฑ์ด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน



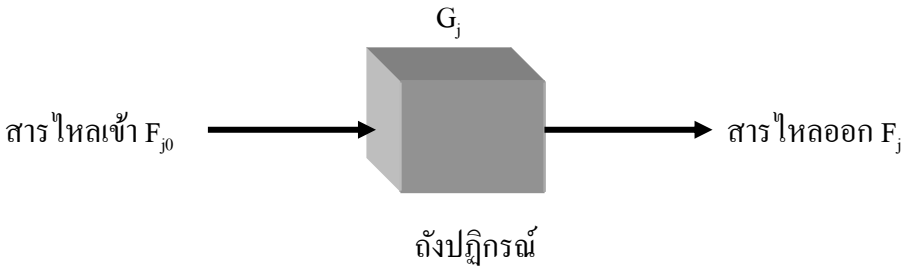
3.1.5 สมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

สมการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์คือสมการที่นำไปสู่การคำนวณว่าเครื่องปฏิกรณ์ควรมีปริมาตรเท่าไหร่ เพื่อให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของสารทำปฏิกิริยา และเพื่อกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นั้นๆ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดเบื้องต้นพอสังเขปดังต่อไปนี้

สมการสมดุลโมล

อัตราการสะสมของสาร j ในระบบ	=	อัตราการไหลของสาร j เข้าสู่ระบบ	-	อัตราการไหลของสาร j ออกจากระบบ	+	อัตราการเกิดของสาร j ในระบบ	-	อัตราการใช้ของสาร j เข้าสู่ระบบ

สมการสมดุลโมลสารและสมการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์



F_{j0} = อัตราการไหลเชิงโมลขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (โมลต่อเวลา)

F_j = อัตราการไหลเชิงโมลขาออกเครื่องปฏิกรณ์ (โมลต่อเวลา)

G_j = การเกิดของสาร j ในเครื่องปฏิกรณ์

r_j = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร j

V = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

$G_j = r_jV$

ดังนั้นในการที่จะหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เราจึงจำเป็นที่จะต้องอาศัยสมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์จากหลักการสมดุลโมลสารซึ่งเราสามารถเขียนได้ตามสมการ (3.1)

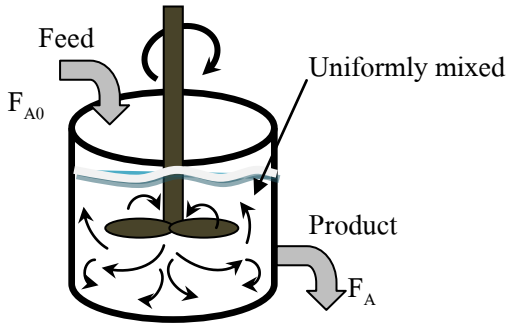
จากสมการสมดุลโมล

$$\text{Input} - \text{Output} + \text{Generation} - \text{Consumption} = \text{Accumulation} \qquad (3.1)$$

หรืออาจเขียนได้เป็น

$$F_{j0} - F_j + G_{j,gen} - G_{j,con} = dNj/dt \qquad (3.2)$$

สมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง



สำหรับปฏิกิริยา

$$A + B \rightarrow C + D$$

โดยเมื่อพิจารณาอัตราการสลายตัวของสาร A

Input = F_{A0} (โมลต่อเวลา)

Output = F_A (โมลต่อเวลา)

Generation = 0 (ไม่มีการเกิดของสาร A)

Consumption = $-r_A V$ (ให้อัตราการหายไปของสาร A คงที่ทั้งเครื่องปฏิกรณ์และคิดค่าความเข้มข้นของสารขาออกเท่านั้น)

Accumulation = 0 เนื่องจากเรามักจะออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR) เป็นแบบสภาวะคงที่ ดังนั้น $dN_A/dt = 0$

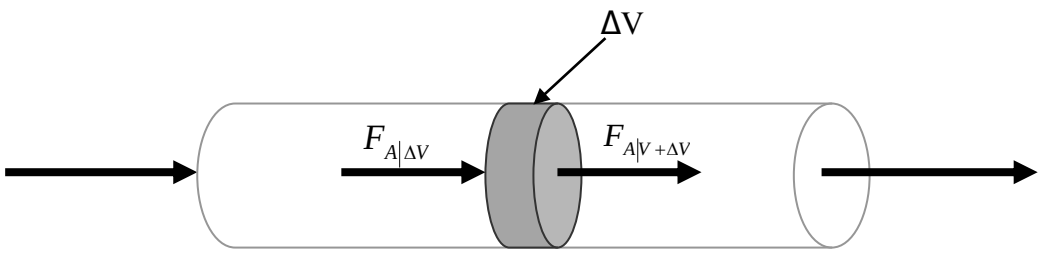
จะได้สมการการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบถังกวน (CSTR) ดังนี้

$$F_{A0} - F_A - (-r_A V) = 0 \qquad (3.3)$$

จะได้

$$V_{CSTR} = \frac{F_{A0} - F_A}{-r_{Aout}} \qquad (3.4)$$

สมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล



สำหรับปฏิกิริยา

$$A + B \rightarrow C + D$$

โดยเมื่อพิจารณาอัตราการสลายตัวของสาร A

Input = $F_{A|\Delta V}$ (โมลต่อเวลา) เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (PFR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นท่อดังนั้นในสมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์จึงคิดปริมาตรเล็กๆที่ ΔV

Output = $F_{A|V+\Delta V}$ (โมลต่อเวลา)

Generation = 0 (ไม่มีการเกิดของสาร A)

Consumption = $- r_A \Delta V$ (เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่สม่ำเสมอขึ้นกับระยะทางของท่อ)

Accumulation = 0 เนื่องจากเรามักจะออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (PFR) เป็นแบบสภาวะคงที่ ดังนั้น $dN_A/dt = 0$

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาเกิดแบบสภาวะคงที่

$$F_{A|V} + F_{A|V+\Delta V} + 0 - (-r_A \Delta V) = 0 \qquad (3.5)$$

หารด้วย ΔV

$$\frac{F_{A|V} - F_{A|V+\Delta V}}{\Delta V} + r_A = 0 \qquad (3.6)$$

ให้ $\lim \Delta V \rightarrow 0$;

$$-\frac{dF_A}{dV} + r_A = 0 \qquad (3.7)$$

$$\frac{dF_A}{dV} = -r_A \qquad (3.8)$$

ดังนั้นจะได้สมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล(PFR)

$$V_{PFR} = F_{A0} \int_{F_{A0}}^{F_A} \frac{dF_A}{r_A} \qquad (3.9)$$

สำหรับ F_{A0} หมายถึง อัตราการไหลโดยโมลของสาร A ขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์

F_A หมายถึง อัตราการไหลโดยโมลของสาร A ขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์

และสำหรับระบบไหลต่อเนื่อง (Flow System) สามารถคำนวณอัตราการไหลโดยโมลของสาร i ได้จาก

$$F_i = C_i V_i \tag{3.10}$$

โดยที่

F_i = อัตราการไหลโดยโมลของสาร i (โมลต่อเวลา)

C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร i (โมลต่อลิตร)

V_i = อัตราการไหลโดยปริมาตรของสาร i (ลิตรต่อเวลา)

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนกลับ

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนกลับ (Recycle) เป็นการนำสารขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ส่วนหนึ่งย้อนกลับมาเป็นสารป้อนที่บริเวณขาเข้าพร้อมกับสารทำปฏิกิริยาใหม่ที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อีกครั้งหนึ่งซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อ

(1) เพื่อให้ใช้สารทำปฏิกิริยาที่ยังเหลือในสารขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์กลับมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

(2) เพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบเร่งตัวเอง (Autocatalytic reaction) เครื่องปฏิกรณ์ที่ได้รับผลกระทบจากการทำการรีไซเคิลจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลเท่านั้น

(3) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนจะไม่ได้รับผลกระทบแต่ประการใดจากการรีไซเคิลการรีไซเคิลนั้นทำให้เกิดการผสมย้อนกลับของสารป้อนย้อนกลับสารทำปฏิกิริยาใหม่ มีผลทำให้เครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนพฤติกรรมจากแบบท่อไหลมาเป็นแบบถังกวนมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรีไซเคิล (R) ซึ่งนิยามไว้ดังนี้

$$R = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ในการป้อนกลับ}}{\text{อัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ในสายผลิตภัณฑ์}} \tag{3.11}$$

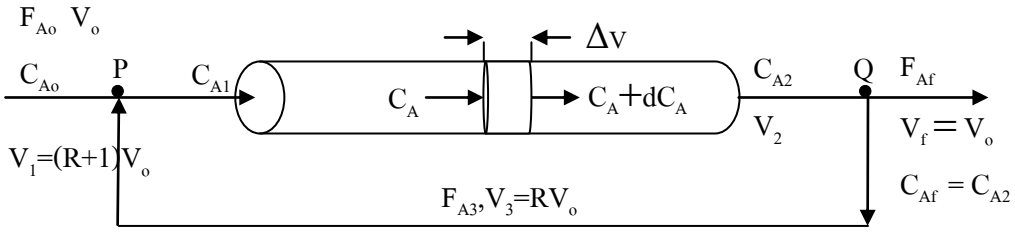
$$R = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสาร A ในการป้อนกลับ}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสาร A ในสายผลิตภัณฑ์}} \tag{3.12}$$

$$R = \frac{F_{A3}}{F_{Af}} = \frac{C_{A3}V_3}{C_{Af}V_f} = \frac{V_3}{V_f} \tag{3.13}$$

ซึ่งสามารถแยกการพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีระบบความหนาแน่นคงที่

กรณีระบบความหนาแน่นคงที่ หรือ $\varepsilon_A=0$ รูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนกลับแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลที่มีการป้อนกลับกรณีความหนาแน่นคงที่

จากรูปที่ 3.5 ในกรณีความหนาแน่นคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากเนื่องจากปฏิกิริยา อัตราการไหลเชิงปริมาตรจึงคงที่กล่าวคือ $V_o = V_f$ ดั้งนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรป้อนกลับที่จุด P สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$V_3 = RV_o \tag{3.14}$$

สมการสมดุลมวลที่จุด P คือ

$$V_oC_{Ao} + RV_oC_{Af} = (R+1)V_oC_{A1} \tag{3.15}$$

จะได้

$$C_{A1} = \frac{C_{Ao} + RC_{Af}}{R+1} \tag{3.16}$$

ดังนั้นแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนกลับหาได้โดยการทำสมดุลมวลที่ปริมาตรควบคุม ΔV

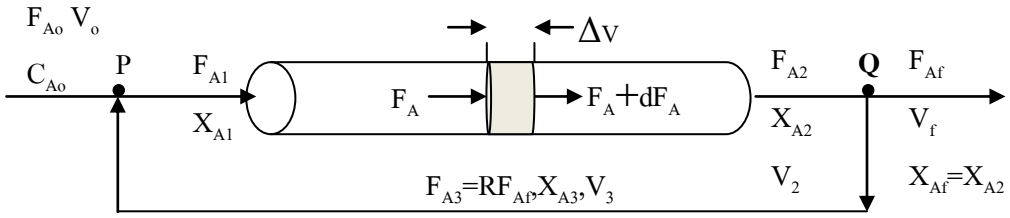
$$(R+1)V_oC_A - (R+1)V_o(C_A + dC_A) + r_A dV = 0 \tag{3.17}$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\frac{V}{V_o} = \tau = -(R+1)\int_{CA1}^{CAf} \frac{dX_A}{-r_A} = -(R+1)\int_{\frac{C_{Ao}+RC_{Af}}{R+1}}^{CAf} \frac{dC_A}{-r_A} \tag{3.18}$$

2. กรณีระบบความหนาแน่นไม่คงที่

ในกรณีความเข้มข้นของสารในระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปอัตราการไหลเชิงปริมาตรจึงเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นกรณีพิเศษ โดยในการยกตัวอย่างการพิจารณานี้จะแสดงการศึกษาในกรณีทั่วไปโดยใช้อัตราการไหลเชิงโมลและคอนเวอร์ชันดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลที่มีการป้อนกลับกรณีความหนาแน่นไม่คงที่

พิจารณาการสมดุลสารที่จุด P

$$F_{A1} = F_{Ao}+F_{A3} = F_{Ao}+ RF_{Af} \tag{3.19}$$

สมดุลมวลสารที่จุด Q

$$F_{A2} = F_{Af}(R+1) \tag{3.20}$$

คอนเวอร์ชันของสาร A หลังจุด P ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์คือ

$$X_{A1} = \frac{F_{Ao}(R+1) - F_{A1}}{F_{Ao}(R+1)} = \frac{F_{Ao}(R+1) - (F_{Ao} + RF_{Af})}{F_{Ao}(R+1)} = \frac{RX_{Af}}{R+1} \tag{3.21}$$

และคอนเวอร์ชันของสาร A ก่อนจุด Q หลังออกจากเครื่องปฏิกรณ์ คือ

$$X_{A2} = \frac{F_{Ao} - F_{Af}}{F_{Ao}} = \frac{F_{Ao}(R+1) - F_{Af}(R+1)}{F_{Ao}(R+1)} = \frac{F_{Ao}(R+1) - F_{A2}}{F_{Ao}(R+1)} \tag{3.22}$$

ดังนั้น ณ จุดใดๆ ของเครื่องปฏิกรณ์คอนเวอร์ชันของสาร A (X_A) สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$X_A = \frac{F_{Ao}(R+1) - F_A}{F_{Ao}(R+1)} \tag{3.23}$$

หรือ

$$F_A = F_{Ao}(R+1)(1-X_A) \tag{3.24}$$

โดยที่ F_A หมายถึงอัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ณ จุดใดๆในเครื่องปฏิกรณ์

$$F_A - (F_A + dF_A) = -r_A dV \tag{3.25}$$

เพราะฉะนั้น

$$dV = -\frac{dF_A}{-r_A} = F_{Ao}(R+1)\frac{dX_A}{-r_A} \tag{3.26}$$

เมื่อหาปริพันธ์ (Integrate) สมการ (3.26) จะได้

$$V = F_{Ao}(R+1)\int_{X_{A1}}^{X_{Af}} \frac{dX_A}{-r_A} = F_{Ao}(R+1)\int_{\frac{RX_{Af}}{r+1}}^{X_{Af}} \frac{dX_A}{-r_A} \tag{3.27}$$

ซึ่งในการหาค่าอัตราการป้อนกลับในระบบเครื่องปฏิกรณ์ยังสามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งจากการเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{-r_A}$ กับ X_A โดยระบบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทั้งสองข้างของสมการมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน

$$\frac{1}{-r_A}\Big|_{X_{Ai}}(X_{Af} - X_{Ai}) = \int_{X_{Ai}}^{X_{Af}} \frac{dX_A}{-r_A} \tag{3.28}$$

3.1.6 ค่าคอนเวอร์ชัน

ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ส่วนมากจะมีการเลือกสารตัวใดตัวหนึ่งเป็นหลักไว้เพื่อที่จะบอกว่าสารตัวใดเป็นสารกำหนดปฏิกิริยาโดยเลือกสารตั้งต้นที่มีปริมาณน้อยที่สุดตามปริมาณสารสัมพันธ์

สำหรับปฏิกิริยา $aA + bB \rightarrow cC + dD$

สามารถแสดงคอนเวอร์ชันของสาร A หรือ X_A ได้ดังนี้ ซึ่งจะมีค่า X_A อยู่ระหว่าง 0 - 1

$$X_A = \frac{\text{จำนวนโมลของสาร A ที่ทำปฏิกิริยา}}{\text{จำนวนโมลของสาร A ที่ป้อนเข้า}} \tag{3.29}$$

และสำหรับระบบที่มีการไหลต่อเนื่อง (Flow)

$$X_A = \frac{F_{A0} - F_A}{F_{A0}} \tag{3.30}$$

ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่างๆ ในรูปของค่าคอนเวอร์ชัน

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ค่าที่ต้องการทราบ	สมการการออกแบบ
กะ (Batch)	เวลาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์	$t = N_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A V}$
ถังกวน (CSTR)	ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์	$V_{CSTR} = \frac{F_{A0} X_A}{-r_{A,Out}}$
ท่อไหล (PFR)	ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ ความยาวของท่อ และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ	$V_{PFR} = F_{A0} \int_0^{X_A} dX_A$

จากค่าคอนเวอร์ชันของทั้งระบบกะ (Batch) และระบบไหลต่อเนื่องแล้ว (Flow) ทำให้สามารถสร้างสมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ในรูปของค่าคอนเวอร์ชันได้ดังสรุปในตารางที่ 3.1

3.1.7 ตารางปริมาณสารสัมพันธ์

ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีจะมีการเปลี่ยนแปลงของสารจากสารหนึ่งไปเป็นอีกสารหนึ่ง โดยในการทำสมดุลมวลสารจึงต้องอาศัยปริมาณสารสัมพันธ์มาช่วยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสารทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ โดยใช่ค่าคอนเวอร์ชันเป็นตัวแปร ซึ่งเมื่อพิจารณาในระบบของการไหลต่อเนื่อง จะสามารถแสดงปริมาณสารสัมพันธ์เพื่อบอกค่าความเข้มข้นของสารต่างๆ หลังจากการทำปฏิกิริยาได้ดังนี้

สำหรับปฏิกิริยา $aA + bB \rightarrow cC + dD$

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยา

สาร	จำนวนโมลขาเข้า	จำนวนโมลที่ใช้ไป	จำนวนโมลขาออก
A	F_{A0}	$-X_A F_{A0}$	$F_A = F_{A0}(1 - X_A)$
B	F_{B0}	$-(b/a)X_A F_{A0}$	$F_B = F_{A0}(\theta_B - (b/a)X_A)$
C	F_{C0}	$+(c/a)X_A F_{A0}$	$Fc = F_{A0}(\theta c + (c/a)X_A)$
D	F_{D0}	$+(d/a)X_A F_{A0}$	$F_D = F_{A0}(\theta_D + (d/a)X_A)$
I	F_{I0}	0	$F_0 = F_{I0}$

โดยที่

$$\theta_B = F_{B0}/F_{A0} \qquad \theta c = F_{C0}/F_{A0} \qquad \theta_D = F_{D0}/F_{A0} \qquad F_T = F_{T0} + \varepsilon_A X_A F_{A0}$$

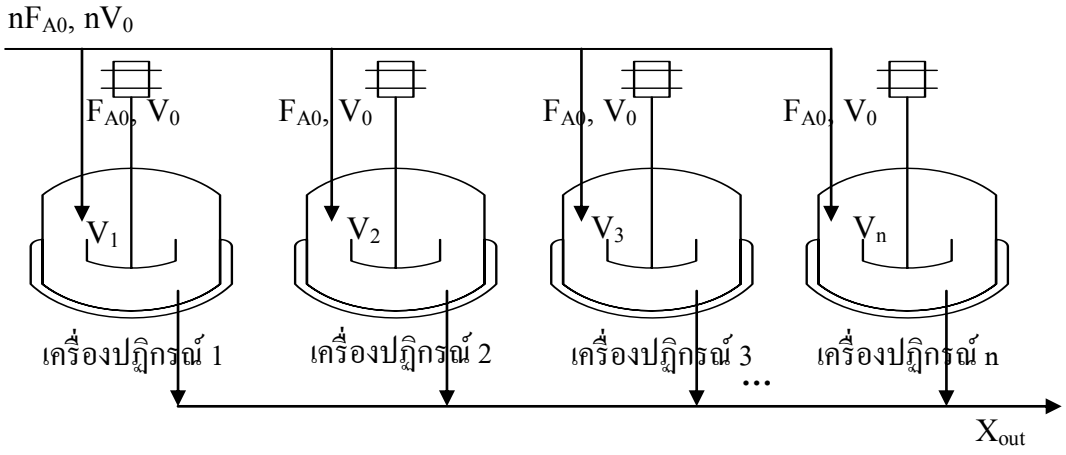
เมื่อ F_T คือ อัตราการไหลโดยโมลรวมของสารหลังเกิดปฏิกิริยา

N_{T0} คือ อัตราการไหลโดยโมลรวมของสารก่อนเกิดปฏิกิริยา

3.1.8 การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบขนาน

การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบขนานเป็นการแบ่งสายการป้อนสารเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แต่ละเครื่องโดยสายของสารที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์แต่ละถังจะมารวมกันอีกครั้ง ซึ่งจะแสดงลักษณะการต่อแบบขนานของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องดังรูปที่ 3.3 และการต่อแบบขนานของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลดังรูปที่ 3.4

การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR) แบบขนาน



รูปที่ 3.3 แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องแบบขนาน

ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องในการต่อแบบขนาน

$$\text{จาก} \quad V_{CSTR} = \frac{F_{A0} X_A}{-r_{A,\,out}}$$

$$\text{จะได้} \quad V_1 = \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}}, V_2 = \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}}, V_3 = \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}}, \ldots, V_n = \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}} \qquad (3.31)$$

โดยจะได้ปริมาตรรวมเป็น $V_T = V_1+V_2+V_3+...+ V_n$ (3.32)

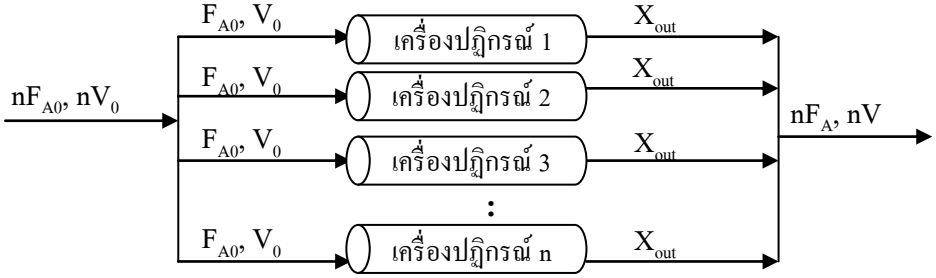
หรือ

$$V_T = \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}} + \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}} + \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}} + ... + \frac{F_{A0} X_{A\,out}}{-r_{A,\,out}} \quad (3.33)$$

จะได้ $$V_T = n\frac{F_{A0} X_A}{-r_{A,out}} \quad (3.34)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเครื่องปฏิกรณ์

การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (PFR) แบบขนาน



รูปที่ 3.4 แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลแบบขนาน

ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลในการต่อแบบขนาน

จาก $$V_{PFR} = F_{A0}\int_0^{X_A} dX_A$$

จะได้ $$V_1 = F_{A0}\int_{Xin}^{Xout}\frac{dX_A}{-r_A}\ ,V_2 = F_{A0}\int_{Xin}^{Xout}\frac{dX_A}{-r_A}\ ,V_3 = F_{A0}\int_{Xin}^{Xout}\frac{dX_A}{-r_A}\ ,V_n = F_{A0}\int_{Xin}^{Xout}\frac{dX_A}{-r_A} \quad (3.35)$$

จาก $V_T = V_1+V_2+V_3+...V_n$

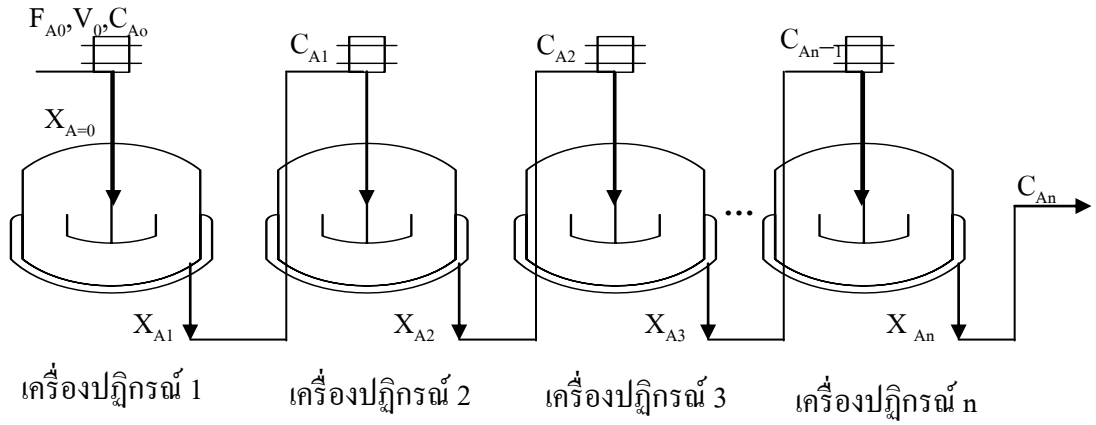
จะได้ $$V_T = nF_{A0}\int_{X_{in}}^{X_{out}}\frac{dX_A}{-r_A} \quad (3.36)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเครื่องปฏิกรณ์

3.1.9 การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรม

การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรมคือการนำสายที่เป็นขาออกออกจากเครื่องปฏิกรณ์หนึ่งมาเป็นสายที่ไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป โดยความเร็วของสายที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เครื่องหนึ่งจะมีค่าเท่ากับความเร็วของสายที่เป็นขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ก่อนหน้า ซึ่งจะแสดงลักษณะการต่อแบบอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องดังรูปที่ 3.5 และการต่อแบบอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลดังรูปที่ 3.6

การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องแบบอนุกรม



รูปที่ 3.5 แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องแบบอนุกรม

ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องในการต่อแบบขนาน

จากสมการ $$V_{CSTR} = \frac{F_{A_o}(X_{A_{out}} - X_{A_{in}})}{-r_{A,\,out}}$$

สามารถเขียนสมการแสดงปริมาตรแต่ละเครื่องปฏิกรณ์ได้ดังนี้

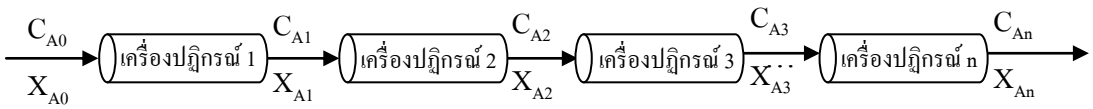
$$V_1 = \frac{F_{A0}(X_{A1} - 0)}{-r_{A1}} \qquad V_2 = \frac{F_{A0}(X_{A2} - X_{A1})}{-r_{A2}} \qquad (3.37)$$

$$V_3 = \frac{F_{A0}(X_{A3} - X_{A2})}{-r_{A3}} \qquad V_n = \frac{F_{A0}(X_{An} - X_{An-1})}{-r_{An}}$$

เมื่อ n แทนจำนวนเครื่องปฏิกรณ์ และจาก $V_T = V_1+V_2+V_3+...V_n$

จะได้ $$V_T = F_{A0}\left[\frac{X_1}{-r_{A1}} + \frac{(X_2 - X_1)}{-r_{A2}} + \frac{(X_3 - X_2)}{-r_{A3}} + \ldots + \frac{(X_n - X_{n-1})}{-r_{An}}\right] \quad (3.38)$$

การต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลแบบอนุกรม



รูปที่ 3.6 แสดงการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลแบบอนุกรม

ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลในการต่อแบบอนุกรม

จาก $V_{PFR} = F_{A0}\int_{Xin}^{Xout}\frac{dX_A}{-r_A}$

จะได้ $$V_1 = F_{A0}\int_0^{X1}\frac{dX_A}{-r_A},\quad V_2 = F_{Ao}\int_{X1}^{X2}\frac{dX_A}{-r_A},\quad V_3 = F_{Ao}\int_{X}^{X3}\frac{dX_A}{-r_{A3}},\quad V_n = F_{Ao}\int_{Xn-1}^{Xn}\frac{dX_A}{-r_A} \quad (3.39)$$

จาก $V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots V_n$

ดังนั้น $$V_T = F_{A0}\left[\int_0^{X1}\frac{dX_A}{-r_A} + \int_{X1}^{X2}\frac{dX_A}{-r_A} + \int_{X2}^{X3}\frac{dX_A}{-r_A} + \int_{Xn-1}^{Xn}\frac{dX_A}{-r_A}\right] \quad (3.40)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ $$V_T = F_{A0}\int_0^{X_n}\frac{dX_A}{-r_A} \quad (3.41)$$

3.2 ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ (Differential evolution algorithm)

ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบ Stochastic ที่ได้รับการพัฒนามาจาก Genetic Algorithm (GA) ที่มีแนวคิดจากกระบวนการคัดสรรตามธรรมชาติโดยจำลองกลุ่มประชากรเลียนแบบโครโมโซมด้วยเลขฐานสองและดำเนินการกับกลุ่มประชากรด้วยกระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่ดีของสมาชิกในกลุ่มประชากรให้อยู่รอดต่อไปและทำซ้ำกระบวนการดังกล่าวจนได้สมาชิกของกลุ่มประชากรที่ดีที่สุด ซึ่งก็คือคำตอบที่ดีที่สุดของสมการวัตถุประสงค์ โดยข้อแตกต่างที่สำคัญของ GA และ DE คือ GA จะแปลงตัวแปรการ

ตัดสินใจ (Decision variables) ให้เป็นรหัสเลขฐานสอง (Binary code) แต่ DE จะใช้ค่าจริง (Floating point number)แทน โดยข้อได้เปรียบของ DE คือความเร็วและประสิทธิภาพในการหาคำตอบ โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปใช้ ขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมด้วยระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สามารถแสดงกระบวนการพื้นฐานได้ดังนี้

Initialization คือการหาค่าคำตอบเริ่มต้นที่เป็นไปได้เพื่อนำมาใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการดำเนินการหาคำตอบถัดไป ซึ่งเริ่มจากการกำหนดขอบเขตบนและล่างของตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจแต่ละตัว โดยขอบเขตนี้จะครอบคลุมจุดที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด จากนั้นให้สุ่มหาคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้น (Initial population) โดยกำหนดให้โอกาสที่จะถูกเลือกของคำตอบมีค่าสม่ำเสมอ (Uniform probability distribution) โดยแต่ละคำตอบซึ่งเรียกว่า Decision vector มีมิติเท่ากับ D และจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้นเท่ากับ NP จากนั้นคำนวณหา Function value ของแต่ละคำตอบเริ่มต้นที่เป็นไปได้

Mutation หรือกระบวนการกลายพันธ์ซึ่งเป็นกระบวนการสุ่มค่าพารามิเตอร์ใหม่การกำหนดค่าให้พิจารณาจากโอกาสความค่าความน่าจะเป็น โดยเริ่มจากการกำหนด Perturbed vector (V_i) โดย i = 1,2,3,…,NP จากนั้นสุ่มเลือก 3 vector (X_{r1} , X_{r2} , X_{r3}) จากคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้น (Initial population) โดยที่ $r1 \neq r2 \neq r3 \neq i$ โดยคำนวณหา Perturbed vector จาก DE/rand/1/bin

$$V_i = X_{r3} + F(X_{r2} - X_{r1}) \tag{3.42}$$

เมื่อ F คือ Weighting factor มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1+ และอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการสร้างเวกเตอร์ Perturbed vector ได้คือการใช้ Trigonometric scheme ซึ่งเริ่มด้วยการสุ่มค่าเวกเตอร์ 3 ตัว (X_{r1} , X_{r2} , X_{r3}) เช่นเดียวกันโดยมีสมการในการหาค่าเวกเตอร์ Perturbed vector (V_i) ดังนี้

$$V_i = \frac{X_{r1} + X_{r2} + X_{r3}}{3} + (p_2 - p_1)(X_{r1} - X_{r2}) + (p_3 - p_2)(X_{r2} - X_{r3}) + (p_1 - p_3)(X_{r3} - X_{r1}) \tag{3.43}$$

โดยที่

$$p_1 = \frac{|F(X_{r1})|}{|F(X_{r1})| + |F(X_{r2})| + |F(X_3)|} \tag{3.44}$$

$$p_2 = \frac{|F(X_{r2})|}{|F(X_{r1})| + |F(X_{r2})| + |F(X_3)|} \tag{3.45}$$

$$p_3 = \frac{|F(X_3)|}{|F(X_{r1})| + |F(X_{r2})| + |F(X_3)|} \tag{3.46}$$

ซึ่งค่า $r1 \neq r2 \neq r3 \neq i$ และ $F(X_{r1})$, $F(X_{r2})$ และ $F(X_{r3})$ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เกิดจากเวกเตอร์ X_{r1}, X_{r2} และ X_{r3} ตามลำดับ

Crossover เป็นกระบวนการเพิ่มความหลากหลายของคำตอบ โดยจะได้เป็น Trial vector U_i ($u_{i,1}$, $u_{i,2}$,..., $u_{i,n}$) ซึ่งเกิดจาก Perturbed vector V_i ($v_{i,1}$, $v_{i,2}$,..., $v_{i,n}$) กับ Parent vector X_i ($x_{i,1}$, $x_{i,2}$,..., $x_{i,n}$) โดย

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & \text{if } \text{random}[0,1) \leq CR \vee j = \text{random}[1,n); \\ x_{i,j} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.47)$$

โดย CR เป็น Crossover factor ซึ่งมีค่าเป็นเลขจำนวนจริงระหว่าง 0 ถึง 1

Selection ซึ่งเป็นกระบวนการคัดสรรคำตอบ ซึ่งเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีกว่าจะอยู่รอดต่อไป โดยมีวิธีการคือเปรียบเทียบ Function value ของ Trial vector กับ Parent vector ในกรณีที่ Trial vector ให้ค่า Function value ที่ดีกว่าก็จะทำการแทนที่ Parent vector ในรุ่นการคำนวณ (Generation) ต่อไป จากนั้นจึงทำซ้ำขั้นตอน Mutation ถึง Selection จนครบทุกเวกเตอร์ใน Current generation จากนั้นแทนที่รุ่นการคำนวณปัจจุบัน(Current generation)ด้วยรุ่นการคำนวณต่อไป (Next generation) แล้วทำซ้ำกระบวนการทั้งหมดจนถึง Stopping criteria โดยสามารถแสดงแผนผังขั้นตอนของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์พื้นฐานได้ดังรูปที่ 3.7

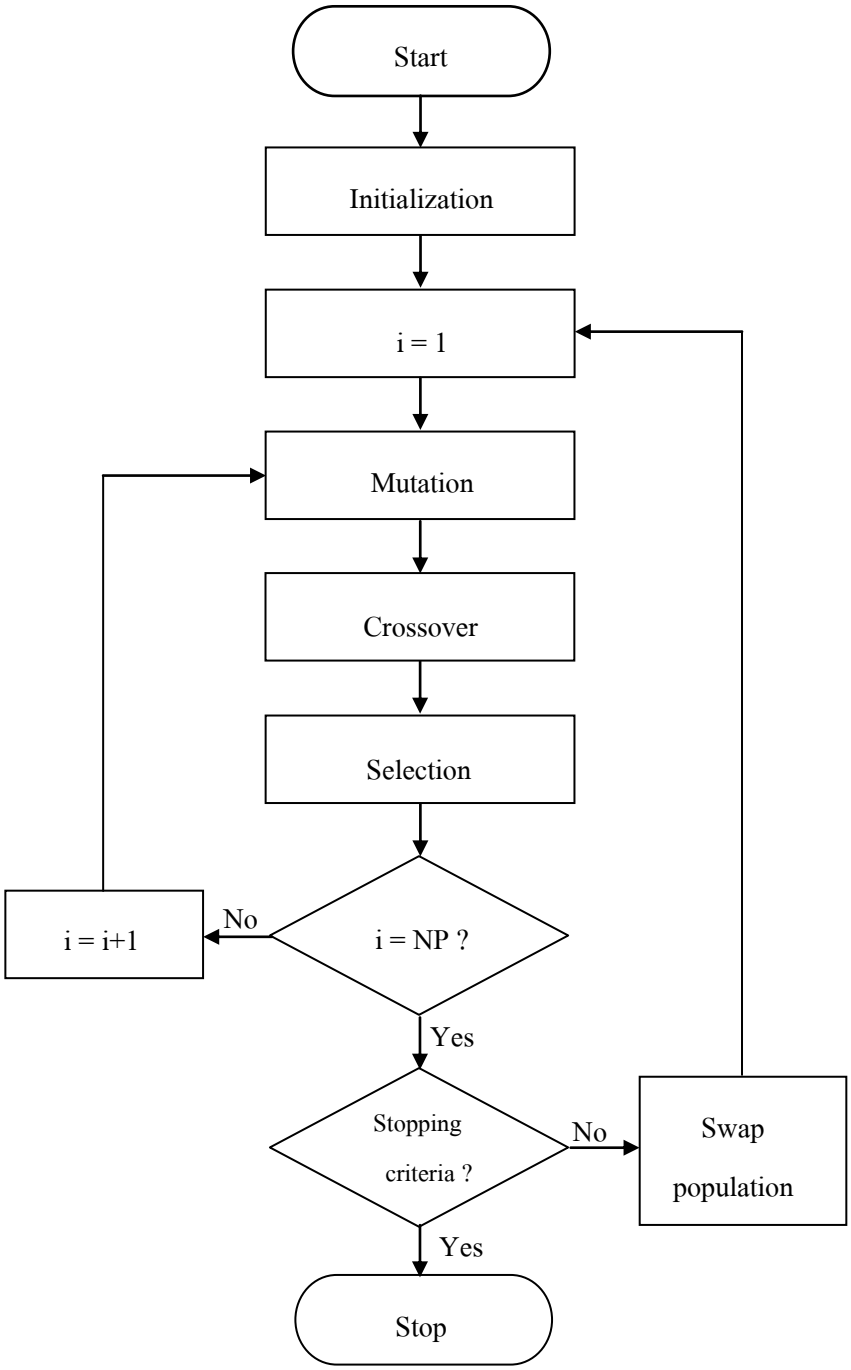
3.3 หลักการพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลายสาขาวิชาดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยหลักการแล้วการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นขบวนการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะให้ผลในเชิงปริมาณ(Quantity)เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำนวนหรือค่าของตัวเลขของปัญหาที่ทำการแก้ไขดังนั้นปัญหาที่นำมาเลือกใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ซึ่งจุดประสงค์ส่วนใหญ่ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือเพื่อต้องการหาค่าสูงที่สุด(Maximum) หรือค่าต่ำที่สุด(Minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกกำหนด(Objective function) ไว้ โดยในการหาค่าของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์อาจจะมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆร่วมในการคำนวณด้วยซึ่งเรียกว่า ข้อจำกัด(Constraints)

3.3.1 ตัวแปรออกแบบ

ตัวแปรออกแบบ(Design variable) คือตัวแปรที่เป็นคำตอบของการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบจะถูกกำหนดเพื่อใช้อธิบายลักษณะของระบบทางด้านวิศวกรรมอย่างชัดเจนเช่น ขนาด, น้ำหนัก, รูปทรงของวัสดุหรือจำนวนของท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดย

การกำหนดตัวแปรออกแบบนี้ต้องเลือกตัวแปรที่ใช้กำหนดในระบบให้ถูกต้องกับโจทย์แต่ละประเภท



รูปที่ 3.7 แผนผังขั้นตอนระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์(DE)

3.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือฟังก์ชันที่เราต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด โดยเราจะต้องทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ติดอยู่ในรูปของตัวแปรออกแบบ เพื่อที่จะทำการหาค่าของตัวแปรที่เป็นจุดที่สูงที่สุดหรือต่ำที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$J = F(x) \tag{3.48}$$

โดย $x = [x_1, x_2,..., x_m]^T$ หรือตัวแปรที่มีจำนวนมิติ (Dimension) เป็น m โดยทั่วไปแล้วปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดส่วนมากจะเป็นปัญหาในรูปของการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุด(Minimization problem)

3.3.3 ข้อจำกัดของปัญหา

ข้อจำกัด (Constraints) เป็นเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ External constraints และ Internal constraints ซึ่ง External constraints เป็นข้อจำกัดของระบบที่อยู่เหนือการควบคุม รูปแบบทั่วไปของข้อจำกัดนั้นแสดงได้ดังนี้

$$U_{min} \le u(t) \le U_{max} \tag{3.49}$$

โดยข้อจำกัดเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรที่เลือกไว้ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วย หมายความว่า ถ้าฟังก์ชันของข้อจำกัดมีการเปลี่ยนแปลงค่า จะทำให้คำตอบที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีการเปลี่ยนแปลงค่าด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นสิ่งที่สำคัญในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือค่าที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของข้อจำกัดที่กำหนดไว้

3.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัด

ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของปัญหาที่เงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear unconstrained) เป็นปัญหาที่พบบ่อยทางงานด้านวิศวกรรม เนื่องจากปกติแล้วปัญหาส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขที่มีองค์ประกอบหลายตัวในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถแบ่งเงื่อนไขที่พิจารณาออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ Equality constraints หรือเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับและ Inequality constraints หรือเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายน้อยกว่าหรือเท่ากับ หรือ

มากกว่าหรือเท่ากับ โดยสำหรับปัญหาที่เป็น Equality constraints จะใช้เทคนิควิธีการที่เรียกว่า Jacobian method และ Lagrange's method ในการแก้ปัญหาและสำหรับปัญหาที่เป็น Inequality constraints จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Karush Kuhn Tucker ในการแก้ปัญหา เป็นต้น

คุณสมบัติของการหาค่าความเหมาะสม ในการแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสมที่สุดนั้น โดยส่วนใหญ่จะพบเป็นปัญหาในการหาค่าต่ำสุด ซึ่งก็ยังมีปัญหาที่ต้องการหาค่าเหมาะสมที่สูงสุดเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากเทคนิคในการหาค่าความเหมาะสมที่ต่ำสุด (Minimization) และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สูงสุด (Maximization) มีความคล้ายคลึงกัน จึงสามารถเปลี่ยนปัญหาการหาค่าสูงสุดให้เป็นการหาค่าที่ต่ำสุดได้เพียงใส่เครื่องหมายลบ (-) ในสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ดังนั้นก็จะทำการแก้ปัญหาเป็นการหาค่าที่เหมาะสมต่ำสุดแทน โดยเมื่อได้ผลลัพธ์ของปัญหาเรียบร้อยแล้วต้องทำการใส่เครื่องหมายลบไปที่ผลลัพธ์อีกครั้งหนึ่งเพื่อเปลี่ยนกลับให้เป็นค่าเหมาะสมที่สูงสุด ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้คือ คุณสมบัติความเหมาะสม (Optimality) สามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{Maximize } F(x) = -\text{ Minimize } [-F(x)] \tag{3.48}$$

วิธีการหรือเทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบของฟังก์ชั่นที่มีข้อจำกัด (Constrained) คือการหาค่า x ที่ทำให้คำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดโดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} &\text{Min } F(x), \\ &\text{Subject to } g_l(x) \leq 0; l = 1,2,...,L, \\ &\qquad h_m(x) = 0; m = 1,2,...M, \\ &\qquad x_n^{(L)} \leq x_n \leq x_n^{(U)}; n = 1,2,...,N. \end{aligned} \tag{3.49}$$

ซึ่ง $F(x)$ คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์, $g_l(x)$ คือ Inequality constraints ของปัญหา, $h_m(x)$ คือ Equality constraints ของปัญหาและ x คือตัวแปรการตัดสินใจค่าที่เหมาะที่สุดซึ่งจะผันแปรอยู่ภายในช่วงของขอบเขตค่าต่ำสุดคือ $x_n^{(L)}$ และขอบเขตค่าสูงสุดคือ $x_n^{(U)}$

การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ Jacobian method ซึ่งมีหลักการโดยใช้อนุพันธ์ฟังก์ชันของเงื่อนไขต่างๆของปัญหา โดยทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F(x) ครั้งที่ 1 และอนุพันธ์ของสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ (Equality constraints) ซึ่งจะได้เป็น

(1) จาโคเบียนเมทริกของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Jacobian matrix objective function)

ตัวอย่างของจาโคเบียนเมทริกสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยจำนวนคอลัมน์ของเมทริกคือจำนวนของสมการวัตถุประสงค์ และจำนวนแถวของเมทริกคือจำนวนของตัวแปรทั้งหมดของปัญหา เช่น

$$F(x) = x_1^2 + 3x_2^2 + 5x_1x_3^2$$

J = jacobian F(x)

$$J = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^T = \begin{matrix}[2x_1 + 5x_3^2; \\ 6x_2; \\ 10x_1x_3];\end{matrix}$$

(2) จาโคเบียนเมทริกของสมการเงื่อนไข (Jacobian matrix equality constraints) ตัวอย่างของจาโคเบียนเมทริกสำหรับสมการเงื่อนไข โดยจำนวนคอลัมน์ของเมทริกคือจำนวนของตัวแปรทั้งหมดของปัญหา และจำนวนแถวของเมทริกคือจำนวนของสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ (Equality constraints) ทั้งหมดของปัญหาเช่น

$$h_1(x) = x_1x_3 + 2x_2 + x_2^2 - 11 = 0$$
$$h_2(x) = x_1^2 + 2x_1x_2 + x_3^2 - 14 = 0$$

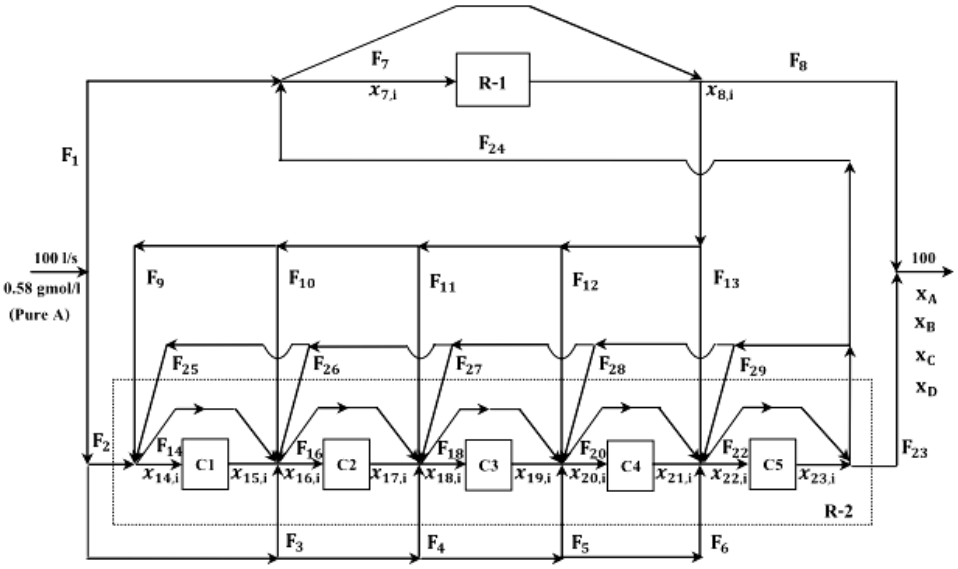
$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1}, \frac{\partial h_1}{\partial x_1}, \frac{\partial h_1}{\partial x_1} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1}, \frac{\partial h_2}{\partial x_1}, \frac{\partial h_2}{\partial x_1} \end{pmatrix} = \begin{matrix}[x_3, 2 + 2x_2, x_1; \\ 2x_1 + 2x_2, 2x_1, 2x_3];\end{matrix}$$

บทที่ 4
การดำเนินงานวิจัย

4.1 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

4.1.1 ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.1 แสดงระบบโครงสร้างของเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

$$A \xrightarrow{k_1} B \xrightarrow{k_2} C$$

$$2A \xrightarrow{k_3} D$$

ที่ซึ่ง อัตราการป้อนเข้าของสารบริสุทธิ์ A = 100 ลิตรต่อวินาที

ความเข้มข้นของการป้อนเข้า = 5.8 กรัมโมลต่อลิตร

ค่าคงที่อัตราเฉพาะของการเกิดปฏิกิริยา(Specific rate constant) k_1 = 10 วินาที$^{-1}$ (ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง)

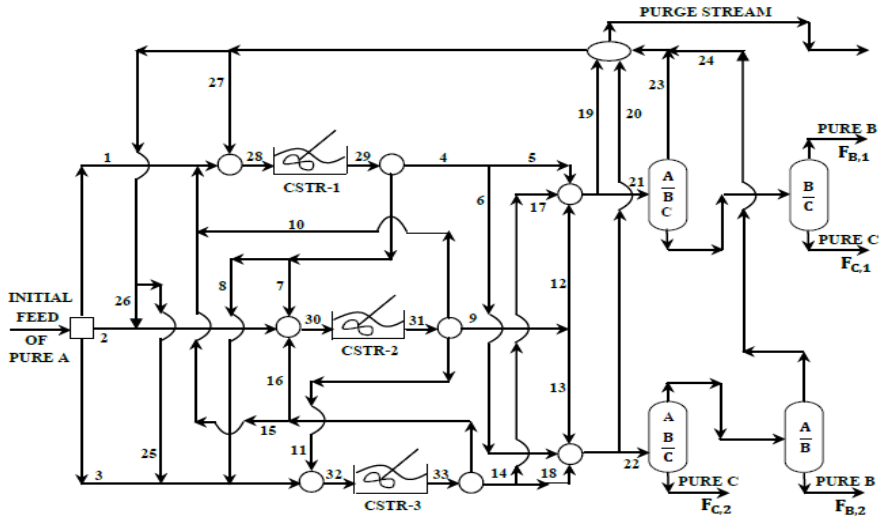
ค่าคงที่อัตราเฉพาะของการเกิดปฏิกิริยา(Specific rate constant) k_2 = 1 วินาที$^{-1}$ (ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง)

ค่าคงที่อัตราเฉพาะของการเกิดปฏิกิริยา(Specific rate constant) k_3 = 1 ลิตรต่อกรัมโมลวินาที (กลไกปฏิกิริยาเป็น Elementary reaction)
ภายใต้เงื่อนไขสมมติฐานของระบบดังนี้

- ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) และเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor, PFR) ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองเป็นเครื่องปฏิกรณ์อุดมคติ
- สมบัติทางกายภาพภาย(เช่นอุณหภูมิ, ความดัน) ในเครื่องปฏิกรณ์คงที่(Isothermal operation)
- การทำปฏิกิริยาของสารผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นสารละลายอุดมคติ(Ideal solutions)
- ประเภทของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาเอกพันธ์(Homogeneous reaction)
- ปฏิกิริยาเป็นชนิดผันกลับไม่ได้(Irreversible reaction)

ทำการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบไปด้วยเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องต่ออนุกรมกันทั้งหมด 5 เครื่อง(C1-C5) ซึ่งมีลักษณะโดยรวมเสมือนเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลจำนวน 1 เครื่อง(R-2) และเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องแบบเดี่ยวหนึ่งเครื่อง(R-1) ซึ่งปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดคือค่าที่มากที่สุดของสารผลิตภัณฑ์ B (Max X_B)

4.1.2 ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ



รูปที่ 4.2 เครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

$$C_6H_6 + Cl_2 \xrightarrow{k_1} C_6H_5Cl + HCl$$

$$C_6H_6Cl + Cl_2 \xrightarrow{k_2} C_6H_4Cl_2 + HCl$$

ที่ซึ่ง ค่าคงที่อัตราเฉพาะของการเกิดปฏิกิริยา(Specific rate constant) $k_1 = 0.412$ ชั่วโมง$^{-1}$

ค่าคงที่อัตราเฉพาะของการเกิดปฏิกิริยา(Specific rate constant) $k_2 = 0.055$ ชั่วโมง$^{-1}$

ภายใต้เงื่อนไขสมมติฐานของระบบดังนี้

- ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสำหรับทุกกรณีและเป็นประเภทปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้
- ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน(โดยขดลวดภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นตัวช่วยในการนำความร้อนทั้งหมดออกเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่)
- ควบคุมให้เป็นปฏิกิริยาที่ปฏิบัติการในอุณหภูมิคงที่(Isothermal operation)
- ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง(Continuous stirred tank reactor, CSTR), อุปกรณ์แยกสาร(Distillation column)
- ปฏิกิริยาเคมีนี้เกิดขึ้นภายในเฟสของเหลว
- ไม่พิจารณาการขจัดสาร(Purge stream)และกระแสการไหลในสายที่ 19 และ 20 ในการคำนวณเพื่อความไม่ซับซ้อนของการนำเสนอ

โดยทำการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องจำนวน 3 เครื่อง (CSTR1- CSTR3) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกสารทั้งหมด 4 เครื่อง ในการแยกสารหากพบสารคลอริเนชั่นของเบนซีน (A) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะทำการป้อนกลับไปยังระบบเพื่อทำปฏิกิริยาใหม่ สำหรับในการเกิดปฏิกิริยาระบบนี้สารโมโนคลอโรเบนซีน (B) คือสารที่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ส่วนสารไดคลอโรเบนซีน (C) และกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่จะถูกกำจัดออก ซึ่งจะทำการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดคือค่าที่มากที่สุดของผลกำไรที่ได้รายปี โดยมีรายละเอียดของตัวแปรราคาค่าใช้จ่ายต่างๆดังนี้

- ราคาของไอน้ำ = 21.67 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ 10^3 กิโลจูลปี
- ราคาของน้ำเย็น = 4.65 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ 10^3 กิโลจูลปี
- ราคาในการสั่งซื้อเบนซีน = 27.98 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลโมล
- ราคาในการสั่งซื้อคลอรีน = 19.88 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลโมล
- ราคาในการขายโมโนคลอโรเบนซีน = 92.67 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลโมล
- ระยะเวลาในการจ่ายเงิน = 2.5 ปี
- อัตราภาษีเงินได้ = 0.52
- จำนวนชั่วโมงในการปฏิบัติงาน = 8,000 ชั่วโมงต่อปี

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบ

ในการสร้างแบบจำลองการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้นสามารถทำได้โดยศึกษารูปแบบของระบบเครื่องปฏิกรณ์นั้นๆ เพื่อแสดงคุณลักษณะต่างๆในการเกิดปฏิกิริยาออกมาในรูปของสมการ เช่นสมการสมดุลมวลสาร สมการสมดุลองค์ประกอบและสมการเศษส่วนโมลเป็นต้น

4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

สำหรับระบบนี้จะทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดของสารผลิตภัณฑ์ B จากโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ในรูปที่ 4.1 ซึ่งนิยามของตัวแปรต่างๆ เป็นดังนี้

(1) อัตรากระแสการไหล ($F_1, F_2, \ldots, F_{29}$)

(2) เศษส่วนโมลที่บริเวณขาเข้าและออกของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วย ($x_{7,i}$, $x_{14,i}$, $x_{16,i}$, $x_{18,i}$, $x_{20,i}$, $x_{22,i}$ สำหรับบริเวณขาเข้าและ $x_{8,i}$, $x_{15,i}$, $x_{17,i}$, $x_{19,i}$, $x_{21,i}$, $x_{23,i}$ สำหรับบริเวณขาออก i = A,B,C)

(3) เศษส่วนโมลบริเวณจุดมุ่งหมายสุดท้าย (x_A, x_B, x_C, x_D)

(4) ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วย (V_1 สำหรับ R-1, V_2 สำหรับ R-2, และ V สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง C-1, C-2, C-3, C-4 และ C-5)

(5) บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วย (y_1= 0-1 สำหรับ R-1, y_2= 0-1 สำหรับ R-2, และ z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 สำหรับแต่ละหน่วยของ C-1ถึง C-5)

<u>1. สมดุลมวลสารบริเวณจุดแยกต่างๆ</u>

$$\begin{aligned} F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 &= 100 \\ F_7 - F_8 - F_9 - F_{10} - F_{11} - F_{12} - F_{13} &= 0 \\ F_{22} - F_{23} - F_{24} - F_{25} - F_{26} - F_{27} - F_{28} - F_{29} &= 0 \end{aligned}$$

<u>2. สมดุลองค์ประกอบสำหรับการผสมบริเวณขาเข้าของเครื่องปฏิกรณ์</u>

$$\left.\begin{aligned} F_1 \cdot 0.58 + F_{24} \cdot x_{23,A} - F_7 \cdot x_{7,A} &= 0 \\ F_{24} \cdot x_{23,B} - F_7 \cdot x_{7,B} &= 0 \\ F_{24} \cdot x_{23,C} - F_7 \cdot x_{7,C} &= 0 \\ F_{24} \cdot x_{23,D} - F_7 \cdot x_{7,D} &= 0 \end{aligned}\right\} \text{R-1}$$

$$
\begin{aligned}
F_2 \cdot 0.58 + F_9 \cdot x_{8,A} + F_{25} \cdot x_{23,A} - F_{14} \cdot x_{14,A} &= 0 \\
F_9 \cdot x_{8,B} + F_{25} \cdot x_{23,B} - F_{14} \cdot x_{14,B} &= 0 \\
F_9 \cdot x_{8,C} + F_{25} \cdot x_{23,C} - F_{14} \cdot x_{14,C} &= 0 \\
F_9 \cdot x_{8,D} + F_{25} \cdot x_{23,D} - F_{14} \cdot x_{14,D} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-1}
$$

$$
\begin{aligned}
F_3 \cdot 0.58 + F_{14} \cdot x_{15,A} + F_{10} \cdot x_{8,A} + F_{26} \cdot x_{23,A} - F_{16} \cdot x_{16,A} &= 0 \\
F_{14} \cdot x_{15,B} + F_{10} \cdot x_{8,B} + F_{26} \cdot x_{23,B} - F_{16} \cdot x_{16,B} &= 0 \\
F_{14} \cdot x_{15,C} + F_{10} \cdot x_{8,C} + F_{26} \cdot x_{23,C} - F_{16} \cdot x_{16,C} &= 0 \\
F_{14} \cdot x_{15,D} + F_{10} \cdot x_{8,D} + F_{26} \cdot x_{23,D} - F_{16} \cdot x_{16,D} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-2}
$$

$$
\begin{aligned}
F_4 \cdot 0.58 + F_{16} \cdot x_{17,A} + F_{11} \cdot x_{8,A} + F_{27} \cdot x_{23,A} - F_{18} \cdot x_{18,A} &= 0 \\
F_{16} \cdot x_{17,B} + F_{11} \cdot x_{8,B} + F_{27} \cdot x_{23,B} - F_{18} \cdot X_{18,B} &= 0 \\
F_{16} \cdot x_{17,C} + F_{11} \cdot x_{8,C} + F_{27} \cdot x_{23,C} - F_{18} \cdot x_{18,C} &= 0 \\
F_{16} \cdot x_{17,D} + F_{11} \cdot x_{8,D} + F_{27} \cdot x_{23,D} - F_{18} \cdot x_{18,D} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-3}
$$

$$
\begin{aligned}
F_5 \cdot 0.58 + F_{18} \cdot x_{19,A} + F_{12} \cdot x_{8,A} + F_{28} \cdot x_{23,A} - F_{20} \cdot x_{20,A} &= 0 \\
F_{18} \cdot x_{19,B} + F_{12} \cdot x_{8,B} + F_{28} \cdot x_{23,B} - F_{20} \cdot x_{20,B} &= 0 \\
F_{18} \cdot x_{19,C} + F_{12} \cdot x_{8,C} + F_{28} \cdot x_{23,C} - F_{20} \cdot x_{20,C} &= 0 \\
F_{18} \cdot x_{19,D} + F_{12} \cdot x_{8,D} + F_{28} \cdot x_{23,D} - F_{20} \cdot x_{20,D} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-4}
$$

$$
\begin{aligned}
F_6 \cdot 0.58 + F_{20} \cdot x_{21,A} + F_{13} \cdot x_{8,A} + F_{29} \cdot x_{23,A} - F_{22} \cdot x_{22,A} &= 0 \\
F_{20} \cdot x_{21,B} + F_{13} \cdot x_{8,B} + F_{29} \cdot x_{23,B} - F_{22} \cdot x_{22,B} &= 0 \\
F_{20} \cdot x_{21,C} + F_{13} \cdot x_{8,C} + F_{29} \cdot x_{23,C} - F_{22} \cdot x_{22,C} &= 0 \\
F_{20} \cdot x_{21,D} + F_{13} \cdot x_{8,D} + F_{29} \cdot x_{23,D} - F_{22} \cdot x_{22,D} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-5}
$$

3. สมดุลองค์ประกอบสำหรับจุดสุดท้ายของการผสม

$$
\begin{aligned}
F_8 \cdot x_{8,A} + F_{23} \cdot x_{23,A} - 100 \cdot x_A &= 0 \\
F_8 \cdot x_{8,B} + F_{23} \cdot x_{23,B} - 100 \cdot x_B &= 0 \\
F_8 \cdot x_{8,C} + F_{23} \cdot x_{23,C} - 100 \cdot x_C &= 0 \\
F_8 \cdot x_{8,D} + F_{23} \cdot x_{23,D} - 100 \cdot x_D &= 0
\end{aligned}
$$

4. สมดุลองค์ประกอบบริเวณโดยรอบเครื่องปฏิกรณ์

$$
\begin{aligned}
F_7 \cdot x_{7,A} - F_7 \cdot x_{8,A} + V_1 \cdot (-A_{R_1} - C_{R_1}) &= 0 \\
F_7 \cdot x_{7,B} - F_7 \cdot x_{8,B} + V_1 \cdot (A_{R_1} - B_{R_1}) &= 0 \\
F_7 \cdot x_{7,C} - F_7 \cdot x_{8,C} + V_1 \cdot (B_{R_1}) &= 0 \\
F_7 \cdot x_{7,D} - F_7 \cdot x_{8,D} + V_1 \cdot (C_{R_1}) &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{R-1}
$$

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้

$$
\begin{aligned}
A_{R_1} &= 10 \cdot x_{8,A} \\
B_{R_1} &= 1 \cdot x_{8,B} \\
C_{R_1} &= 1 \cdot (x_{8,A})^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
F_{14} \cdot x_{14,A} - F_{14} \cdot x_{15,A} + V_{C_1} \cdot (-A_{C_1} - C_{C_1}) &= 0 \\
F_{14} \cdot x_{14,B} - F_{14} \cdot x_{15,B} + V_{C_1} \cdot (A_{C_1} - B_{C_1}) &= 0 \\
F_{14} \cdot x_{14,C} - F_{14} \cdot x_{15,C} + V_{C_1} \cdot (B_{C_1}) &= 0 \\
F_{14} \cdot x_{14,D} - F_{14} \cdot x_{15,D} + V_{C_1} \cdot (C_{C_1}) &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-1}
$$

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้

$$
\begin{aligned}
A_{C_1} &= 10 \cdot x_{15,A} \\
B_{C_1} &= 1 \cdot x_{15,B} \\
C_{C_1} &= 1 \cdot (x_{15,A})^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
F_{16} \cdot x_{16,A} - F_{16} \cdot x_{17,A} + V_{C_2} \cdot (-A_{C_2} - C_{C_2}) &= 0 \\
F_{16} \cdot x_{16,B} - F_{16} \cdot x_{17,B} + V_{C_2} \cdot (A_{C_2} - B_{C_2}) &= 0 \\
F_{16} \cdot x_{16,C} - F_{16} \cdot x_{17,C} + V_{C_2} \cdot (B_{C_2}) &= 0 \\
F_{16} \cdot x_{16,D} - F_{16} \cdot x_{17,D} + V_{C_2} \cdot (C_{C_2}) &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-2}
$$

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้

$$
\begin{aligned}
A_{C_2} &= 10 \cdot x_{17,A} \\
B_{C_2} &= 1 \cdot x_{17,B} \\
C_{C_2} &= 1 \cdot (x_{17,A})^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
F_{18}\cdot x_{18,A} - F_{18}\cdot x_{19,A} + V_{C_3}\cdot(-A_{C_3} - C_{C_3}) &= 0 \\
F_{18}\cdot x_{18,B} - F_{18}\cdot x_{19,B} + V_{C_3}\cdot(A_{C_3} - B_{C_3}) &= 0 \\
F_{18}\cdot x_{18,C} - F_{18}\cdot x_{19,C} + V_{C_3}\cdot(B_{C_3}) &= 0 \\
F_{18}\cdot x_{18,D} - F_{18}\cdot x_{19,D} + V_{C_3}\cdot(C_{C_3}) &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-3}
$$

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้

$$
\begin{aligned}
A_{C_3} &= 10\cdot x_{19,A} \\
B_{C_3} &= 1\cdot x_{19,B} \\
C_{C_3} &= 1\cdot (x_{19,A})^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
F_{20}\cdot x_{20,A} - F_{20}\cdot x_{21,A} + V_{C_4}\cdot(-A_{C_4} - C_{C_4}) &= 0 \\
F_{20}\cdot x_{20,B} - F_{20}\cdot x_{21,B} + V_{C_4}\cdot(A_{C_4} - B_{C_4}) &= 0 \\
F_{20}\cdot x_{20,C} - F_{20}\cdot x_{21,C} + V_{C_4}\cdot(B_{C_4}) &= 0 \\
F_{20}\cdot x_{20,D} - F_{20}\cdot x_{21,D} + V_{C_4}\cdot(C_{C_4}) &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-4}
$$

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้

$$
\begin{aligned}
A_{C_4} &= 10\cdot x_{21,A} \\
B_{C_4} &= 1\cdot x_{21,B} \\
C_{C_4} &= 1\cdot (x_{21,A})^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
F_{22}\cdot x_{22,A} - F_{22}\cdot x_{23,A} + V_{C_5}\cdot(-A_{C_5} - C_{C_5}) &= 0 \\
F_{22}\cdot x_{22,B} - F_{22}\cdot x_{23,B} + V_{C_5}\cdot(A_{C_5} - B_{C_5}) &= 0 \\
F_{22}\cdot x_{22,C} - F_{22}\cdot x_{23,C} + V_{C_5}\cdot(B_{C_5}) &= 0 \\
F_{22}\cdot x_{22,D} - F_{22}\cdot x_{23,D} + V_{C_5}\cdot(C_{C_5}) &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{C-5}
$$

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้

$$
\begin{aligned}
A_{C_5} &= 10\cdot x_{23,A} \\
B_{C_5} &= 1\cdot x_{23,B} \\
C_{C_5} &= 1\cdot (x_{23,A})^2
\end{aligned}
$$

5. สมการเศษส่วนโมล

$$x_{7,A} + x_{7,B} + x_{7,C} + x_{7,D} = 1$$

$$
\begin{aligned}
x_{8,A} + x_{8,B} + x_{8,C} + x_{8,D} &= 1 \\
x_{14,A} + x_{14,B} + x_{14,C} + x_{14,D} &= 1 \\
x_{15,A} + x_{15,B} + x_{15,C} + x_{15,D} &= 1 \\
x_{16,A} + x_{16,B} + x_{16,C} + x_{16,D} &= 1 \\
x_{17,A} + x_{17,B} + x_{17,C} + x_{17,D} &= 1 \\
x_{18,A} + x_{18,B} + x_{18,C} + x_{18,D} &= 1 \\
x_{19,A} + x_{19,B} + x_{19,C} + x_{19,D} &= 1 \\
x_{20,A} + x_{20,B} + x_{20,C} + x_{20,D} &= 1 \\
x_{21,A} + x_{21,B} + x_{21,C} + x_{21,D} &= 1 \\
x_{22,A} + x_{22,B} + x_{22,C} + x_{22,D} &= 1 \\
x_{23,A} + x_{23,B} + x_{23,C} + x_{23,D} &= 1 \\
x_A + x_B + x_C + x_D &= 1
\end{aligned}
$$

6. เงื่อนไขปริมาตร หลักการและเหตุผล

$$
\begin{aligned}
V_2 - V_{C_1} - V_{C_2} - V_{C_3} - V_{C_4} - V_{C_5} &= 0 \\
V_{C_1} = V_{C_2} = V_{C_3} = V_{C_4} = V_{C_5} & \\
V_1 - U \cdot y_1 &\le 0 \\
V_2 - U \cdot y_2 &\le 0 \\
F_7 - U \cdot y_1 &\le 0 \\
F_{14} - U \cdot z_1 &\le 0 \\
F_{16} - U \cdot z_2 &\le 0 \\
F_{18} - U \cdot z_3 &\le 0 \\
F_{20} - U \cdot z_4 &\le 0 \\
F_{22} - U \cdot z_5 &\le 0 \\
y_1 + y_2 &\ge 1 \\
V_{C_1} - U \cdot z_1 &\le 0 \\
V_{C_2} - U \cdot z_2 &\le 0 \\
V_{C_3} - U \cdot z_3 &\le 0
\end{aligned}
$$

$$V_{C_4} - U \cdot z_4 \leq 0$$

$$V_{C_5} - U \cdot z_5 \leq 0$$

7. ข้อกำหนดเงื่อนไข

$$F_1, F_2, ..., F_{29} \geq 0$$

$$V_1, V_2, V_{C_1}, V_{C_2}, V_{C_3}, V_{C_4}, V_{C_5} \geq 0$$

$$x_{7,i}, x_{8,i}, x_{14,i}, x_{15,i}, x_{16,i} x_{17,i} x_{18,i},$$

$$x_{19,i}, x_{20,i}, x_{21,i}, x_{22,i}, x_{23,i} \geq 0 \quad ; \ i = A,B,C,D$$

$$x_A, x_B, x_C, x_D \geq 0$$

$$y_1, y_2, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 = 0 - 1$$

โดยมีสมการวัตถุประสงค์คือ Max x_B

4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

สำหรับระบบนี้จะทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดของผลกำไรที่มากที่สุดต่อปี จากโครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับดังรูปที่ 4.2 ซึ่งนิยามของตัวแปรต่างๆ เป็นดังนี้

(1) อัตรากระแสการไหล (F_1, F_2, …, F_{32})

(2) อัตราการป้อนเข้าของสารบริสุทธิ์ A (F_A) และอัตราการไหลของสารบริสุทธิ์ B,C ที่ออกจากกระบวนการ ($F_{B,1}$, $F_{B,2}$, $F_{C,1}$, $F_{C,2}$)

(3) เศษส่วนโมลบริเวณขาเข้าและออกของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วย ($x_{28,i}$, $x_{30,i}$, $x_{32,i}$, i = A,B,C สำหรับบริเวณขาเข้าและ $x_{29,i}$, $x_{31,i}$, $x_{33,i}$, i =A,B,C สำหรับบริเวณขาออก)

(4) เศษส่วนโมลบริเวณขาเข้าอุปกรณ์แยกสาร ($x_{21,i}$, $x_{22,i}$, i = A,B,C)

(5) ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วย (V_1 , V_2 และ V_3)

(6) บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละหน่วย (y_1, y_2, y_3 = 0-1 สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง)

(7) บริเวณทางออกของอุปกรณ์แยกสารแต่ละหน่วย (z_1= 0-1 สำหรับอุปกรณ์แยกสาร A/BC, z_2= 0-1 สำหรับอุปกรณ์แยกสาร AB/C และ z_3 = 0-1 สำหรับอุปกรณ์แยกสาร B/C)

(8) ค่าพลังงานความร้อนของเครื่องต้มซ้ำ(Reboilers) และเครื่องควบแน่น(Condensers) ในแต่ละหน่วย (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) และบริเวณขาเข้าหน่วยของการกลั่น B/C และ A/B ($x_{2,i}$, i = B,C และ $x_{4,i}$, i = A,B)

1. สมดุลมวลสารบริเวณจุดแยกต่างๆ

$$
\begin{aligned}
F_1 + F_2 + F_3 - F_A &= 0 \\
F_{28} - F_5 - F_6 - F_7 - F_8 &= 0 \\
F_{30} - F_{12} - F_{13} - F_{10} - F_{11} &= 0 \\
F_{32} - F_{17} - F_{18} - F_{15} - F_{16} &= 0
\end{aligned}
$$

2. สมดุลองค์ประกอบสำหรับการผสมบริเวณขาเข้าของเครื่องปฏิกรณ์

$$
\begin{aligned}
F_1 + F_{10}\cdot x_{31,A} + F_{15}\cdot x_{33,A} + F_{27} - F_{28}\cdot x_{28,A} &= 0 \\
F_{10}\cdot x_{31,B} + F_{15}\cdot x_{33,B} - F_{28}\cdot x_{28,B} &= 0 \\
F_{10}\cdot x_{31,C} + F_{15}\cdot x_{33,C} - F_{28}\cdot x_{28,C} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{CSTR-1}
$$

$$
\begin{aligned}
F_2 + F_7\cdot x_{29,A} + F_{16}\cdot x_{33,A} + F_{26} - F_{30}\cdot x_{30,A} &= 0 \\
F_7\cdot x_{29,B} + F_{16}\cdot x_{33,B} - F_{30}\cdot x_{30,B} &= 0 \\
F_7\cdot x_{29,C} + F_{16}\cdot x_{33,C} - F_{30}\cdot x_{30,C} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{CSTR-2}
$$

$$
\begin{aligned}
F_3 + F_8\cdot x_{29,A} + F_{11}\cdot x_{31,A} + F_{25} - F_{32}\cdot x_{32,A} &= 0 \\
F_8\cdot x_{29,B} + F_{11}\cdot x_{31,B} - F_{32}\cdot x_{32,B} &= 0 \\
F_8\cdot x_{29,C} + F_{11}\cdot x_{31,C} - F_{32}\cdot x_{32,C} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{CSTR-3}
$$

3. สมดุลองค์ประกอบสำหรับการผสมบริเวณขาเข้าอุปกรณ์แยกสาร(หอกลั่น)

$$
\begin{aligned}
F_5\cdot x_{29,A} + F_{12}\cdot x_{31,A} + F_{17}\cdot x_{33,A} - F_{21}\cdot x_{21,A} &= 0 \\
F_5\cdot x_{29,B} + F_{12}\cdot x_{31,B} + F_{17}\cdot x_{33,B} - F_{21}\cdot x_{21,B} &= 0 \\
F_5\cdot x_{29,C} + F_{12}\cdot x_{31,C} + F_{17}\cdot x_{33,C} - F_{21}\cdot x_{21,C} &= 0
\end{aligned}
\qquad \text{Column1}
$$

$$
\begin{aligned}
F_6 \cdot x_{29,A} + F_{13} \cdot x_{31,A} + F_{18} \cdot x_{33,A} - F_{22} \cdot x_{22,A} &= 0 \\
F_6 \cdot x_{29,B} + F_{13} \cdot x_{31,B} + F_{18} \cdot x_{33,B} - F_{22} \cdot x_{22,B} &= 0 \\
F_6 \cdot x_{29,C} + F_{13} \cdot x_{31,C} + F_{18} \cdot x_{33,C} - F_{22} \cdot x_{22,C} &= 0
\end{aligned}
$$

Column2

4. สมดุลองค์ประกอบของสารผสมก่อนการป้อนกลับ

$$F_{23} + F_{24} - F_{25} - F_{26} - F_{27} = 0$$

5. สมดุลองค์ประกอบบริเวณโดยรอบเครื่องปฏิกรณ์

$$
\begin{aligned}
F_{28} \cdot x_{28,A} - F_{28} \cdot x_{29,A} + V_1 \cdot (-A_1) &= 0 \\
F_{28} \cdot x_{28,B} - F_{28} \cdot x_{29,B} + V_1 \cdot (A_1 - B_1) &= 0 \\
F_{28} \cdot x_{28,C} - F_{28} \cdot x_{29,C} + V_1 \cdot (B_1) &= 0
\end{aligned}
$$

CSTR-1

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้ $A_1 = 0.412 \cdot x_{29,A}$

$B_1 = 0.055 \cdot x_{29,B}$

$$
\begin{aligned}
F_{30} \cdot x_{30,A} - F_{30} \cdot x_{31,A} + V_2 \cdot (-A_2) &= 0 \\
F_{30} \cdot x_{30,B} - F_{30} \cdot x_{31,B} + V_2 \cdot (A_2 - B_2) &= 0 \\
F_{30} \cdot x_{30,C} - F_{30} \cdot x_{31,C} + V_2 \cdot (B_2) &= 0
\end{aligned}
$$

CSTR-2

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้ $A_2 = 0.412 \cdot x_{31,A}$

$B_2 = 0.055 \cdot x_{31,B}$

$$
\begin{aligned}
F_{32} \cdot x_{32,A} - F_{32} \cdot x_{33,A} + V_3 \cdot (-A_3) &= 0 \\
F_{32} \cdot x_{32,B} - F_{32} \cdot x_{33,B} + V_3 \cdot (A_3 - B_3) &= 0 \\
F_{32} \cdot x_{32,C} - F_{32} \cdot x_{33,C} + V_3 \cdot (B_3) &= 0
\end{aligned}
$$

CSTR-3

ซึ่งมีอัตราการทำปฏิกิริยาดังนี้ $A_3 = 0.412 \cdot x_{33,A}$

$B_3 = 0.055 \cdot x_{33,B}$

6. สมดุลองค์ประกอบสำหรับหอกลั่นในแต่ละหน่วย

$$
\begin{aligned}
F_{23} - F_{21} \cdot x_{21,A} &= 0 \\
F_{B,1} - F_{21} \cdot x_{21,B} &= 0 \\
F_{C,1} - F_{21} \cdot x_{21,C} &= 0 \\
F_{24} - F_{22} \cdot x_{22,A} &= 0 \\
F_{B,2} - F_{22} \cdot x_{22,B} &= 0 \\
F_{C,2} - F_{22} \cdot x_{22,C} &= 0
\end{aligned}
$$

Columns 1, 3

Columns 2, 4

7. สมการเศษส่วนโมล

$$
\begin{aligned}
x_{28,A} + x_{28,B} + x_{28,C} &= 1 \\
x_{29,A} + x_{29,B} + x_{29,C} &= 1 \\
x_{30,A} + x_{30,B} + x_{30,C} &= 1 \\
x_{31,A} + x_{31,B} + x_{31,C} &= 1 \\
x_{32,A} + x_{32,B} + x_{32,C} &= 1 \\
x_{33,A} + x_{33,B} + x_{33,C} &= 1 \\
x_{21,A} + x_{21,B} + x_{21,C} &= 1 \\
x_{22,A} + x_{22,B} + x_{22,C} &= 1
\end{aligned}
$$

8. เงื่อนไขหลักการและเหตุผล

$$
\begin{aligned}
F_{28} - Uy_1 &\leq 0 \\
F_{30} - Uy_2 &\leq 0 \\
F_{32} - Uy_3 &\leq 0 \\
V_1 - Uy_1 &\leq 0 \\
V_2 - Uy_2 &\leq 0 \\
V_3 - Uy_3 &\leq 0 \\
F_{21} - Uz_1 &\leq 0 \\
F_{22} - Uz_2 &\leq 0 \\
z_3 - z_1 &\leq 0 \\
z_4 - z_2 &\leq 0
\end{aligned}
$$

9. ข้อกำหนดเงื่อนไข

$$
\begin{aligned}
F_1, F_2, ..., F_{32} &\geq 0 \\
V_1, V_2, V_3 &\geq 0 \\
x_{28,i}, x_{29,i}, x_{30,i}, x_{31,i}, x_{32,i}, x_{33,i} &\geq 0 \quad ; \ i = A, B, C \\
x_{21,i}, x_{22,i} &\geq 0 \quad ; \ i = A, B, C \\
F_A, F_{B,1}, F_{C,1}, F_{B,2}, F_{C,2} &\geq 0 \\
y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3, z_4 &= 0 - 1
\end{aligned}
$$

โดยมีสมการวัตถุประสงค์คือ

$$
\begin{aligned}
\text{Max} \quad & (92.67)\cdot(8000)\cdot(F_{B,1}+F_{B,2}) - (27.98)\cdot(8000)\cdot(F_A) - (19.88)\cdot(8000)\cdot(F_A) \\
& + \frac{1}{2.5}\left\{C_R^{cap} + C_{Column}^{cap}\right\} + 0.52\left\{C^{oper}\right\}
\end{aligned}
$$

ซึ่งมีรายละเอียดของตัวแปรดังนี้

$$
\begin{aligned}
C_R^{cap} &= C_{R1} + C_{R2} + C_{R3} \\
C_{Column}^{cap} &= C_{C1} + C_{C2} + C_{C3} + C_{C4} \\
C^{oper} &= 21.67(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) + 4.65(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \\
C_{R1} &= 25{,}795\cdot y_1 + 8{,}178\cdot V_1 \\
C_{R2} &= 25{,}795\cdot y_2 + 8{,}178\cdot V_2 \\
C_{R3} &= 25{,}795\cdot y_3 + 8{,}178\cdot V_3 \\
F_3 &= F_{21}(1 - x_{21,A}) \\
F_4 &= F_{22}(1 - x_{22,C}) \\
x_{3,B} &= \frac{x_{21,B}}{(x_{21,B} + x_{21,C})} \\
x_{4,A} &= \frac{x_{22,A}}{(x_{22,A} + x_{22,B})} \\
C_{C1} &= 132{,}718\cdot z_1 + F_{21}\cdot(369\cdot x_{21,A} - 1{,}114\cdot x_{21,B}) \\
C_{C2} &= 211{,}547\cdot z_2 + F_{22}\cdot(1{,}010\cdot x_{22,A} - 479\cdot x_{22,B}) \\
C_{C3} &= 25{,}000\cdot z_3 + F_3\cdot(6{,}985\cdot x_{3,B} - 3{,}870\cdot x_{3,B}^2)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C_{C4} &= 86{,}944 \cdot z_4 + F_4 \cdot (1{,}136 \cdot x_{4,A}) \\
Q_1 &= F_{21} \cdot (3 + 36.1 \cdot x_{21,A} + 7.7 \cdot x_{21,B}) \\
Q_2 &= F_{22} \cdot (16.18 + 16.83 \cdot x_{22,A} + 42.14 \cdot x_{22,B}) \\
Q_3 &= F_3 \cdot (26.212 + 29.45 \cdot x_{3,B}) \\
Q_4 &= F_4 \cdot (10.70 + 28.41 \cdot x_{4,A})
\end{aligned}
$$

ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการแก้ไขปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในการหาคำตอบของปัญหาต่างๆข้างต้นนั้นจะแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.3 ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สำหรับงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับโดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในแผนผังตามรูปที่ 4.3

(1) Initialization การเริ่มต้นค่า เริ่มจากการกำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจให้ครอบคลุมในส่วนของพื้นที่ที่จะนำมาซึ่งค่าคำตอบที่ดีที่สุด แล้วจึงเริ่มสุ่มหาคำตอบที่อาจจะเป็นไปได้เริ่มต้นโดยคำตอบที่เป็นไปได้เริ่มต้นเท่ากับ NP (Population sizes)

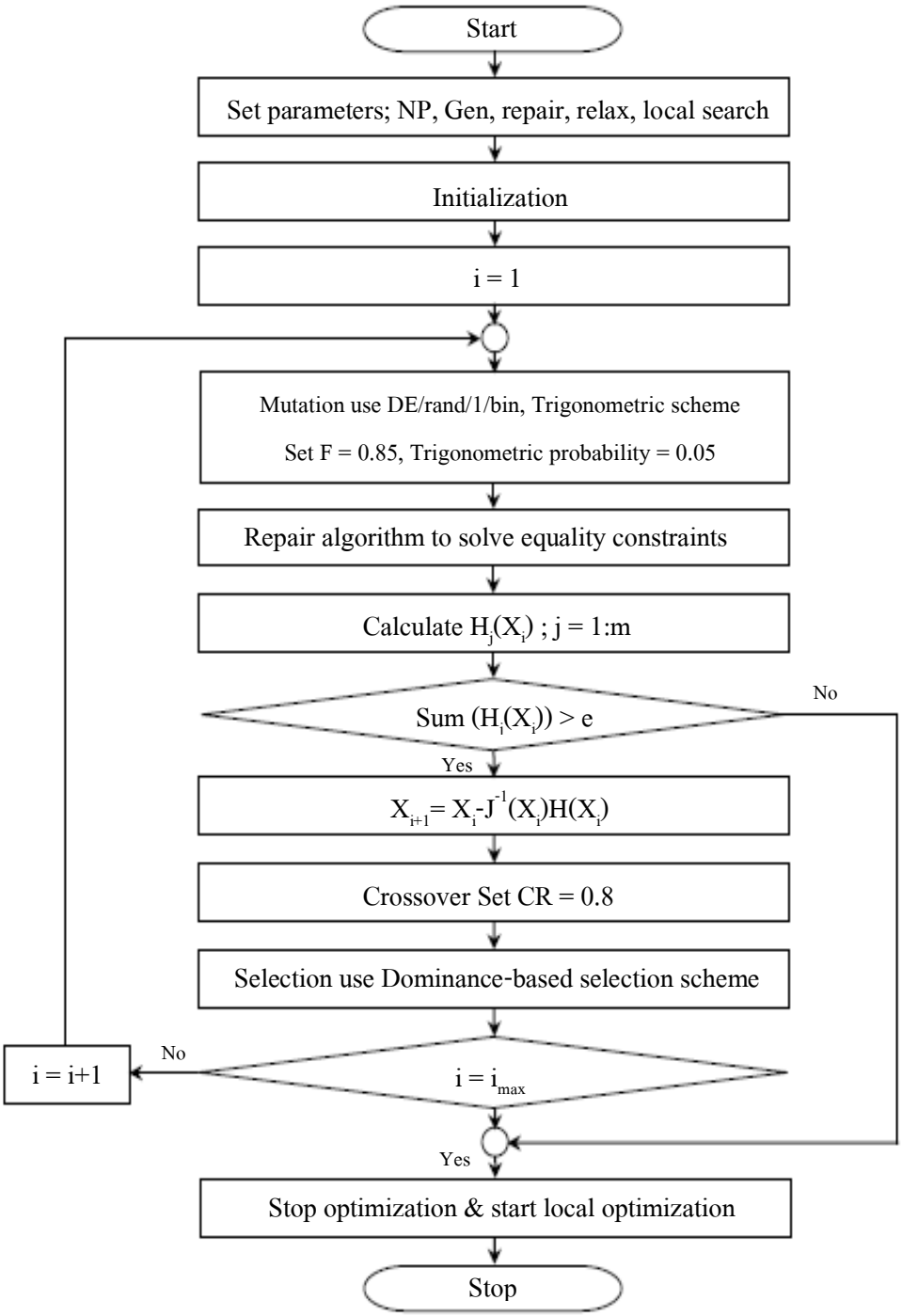
(2) Mutation โดยใช้แบบแผนพื้นฐานของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์คือ DE/rand/1/bin และหลักการ Trigonometric schemes ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ F = 0.85 และ Trigonometric mutation probability ที่กำหนดคือ 0.05

(3) Crossover ซึ่งเป็นกระบวนการเพื่อเพิ่มความหลากหลายของคำตอบ โดยในกระบวนการนี้เราจะได้ Trial vector, U_i จากเวกเตอร์ V_i และเวกเตอร์ X_i โดย CR เป็น Crossover factor ซึ่งมีค่าเป็นเลขจำนวนจริงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยในงานวิจัยนี้เราได้กำหนดค่าของ CR = 0.8 โดยการจัดการขอบเขตของเงื่อนไขเป็นอีกหนึ่งส่วนที่มีความสำคัญต่อการหาบริเวณที่จะมีคำตอบที่ดีที่สุดซึ่ง $X_{i,j}^{(L)}$ คือขอบเขตค่าต่ำสุดและ $X_{i,j}^{(U)}$ คือขอบเขตค่าสูงสุด สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

$$
x_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}^{(L)} & x_{i,j} < x_{i,j}^{(L)} \\ x_{i,j} & x_{i,j}^{(L)} \le x_{i,j} \le x_{i,j}^{(U)} \\ x_{i,j}^{(U)} & x_{i,j} > x_{i,j}^{(U)} \end{cases}
$$

(4) Selection กระบวนการคัดสรรคำตอบโดยเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีกว่าก็จะอยู่รอดต่อไป สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการ Dominance-based selection scheme เป็นวิธีในการ

เปรียบเทียบเวกเตอร์ Parent vector, X_i กับ Trial vector, U_i ซึ่งเวกเตอร์ที่ดีกว่าจะถูกนำไปใช้ในรุ่น (Generation) ต่อไป แล้วเมื่อเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีกว่าถูกคัดสรรเรียบร้อยแล้วก็จะได้ Generation ใหม่ที่จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน Mutation ลงมาจนกว่าจะครบทุกเวกเตอร์จึงทำการหยุดกระบวนการ



รูปที่ 4.3 แผนผังระเบียบความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สำหรับงานวิจัย

สำหรับในส่วนของงานวิจัยที่นำเสนอนี้ใช้การประยุกต์ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ ซึ่งได้จากการพัฒนากระบวนการในการจัดการสมการเงื่อนไขโดยใช้หลักการ Repair Algorithm [KHEAWHOM,2010] โดยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีของนิวตันในการแก้ปัญหาระบบของสมการเงื่อนไข ซึ่งเวกเตอร์ของ X ที่ถูกต้องเหมาะสมคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$X_{i+1} = X_i - J^{-1}(X_i)H(X_i)$$

โดยที่ $J(X_i)$ คือจาโคเบียนเมทริก และ $H(X_i)$ คือเวกเตอร์ของสมการเงื่อนไข (Equality constraints violation) ซึ่งการวนซ้ำของการคำนวณนี้จะหยุดก็ต่อเมื่อผลรวมของระดับการฝ่าฝืนสมการเงื่อนไขน้อยกว่าค่า ϵ ที่กำหนดหรือจำนวนการกระทำวนซ้ำเท่ากับค่าสูงสุดของการวนซ้ำที่ถูกกำหนดไว้ จนสิ้นสุดการหาค่าความเหมาะสมที่สุด(Stop optimization) แล้วทางงานวิจัยได้กำหนดให้มีการทำ Local search ทับเข้าไปอีกครั้งหนึ่ง เพื่อค่าความถูกต้องและความแม่นยำในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

4.4 การดำเนินการในโปรแกรม MATLAB

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการดำเนินการ ซึ่งขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้งานโปรแกรมนี้ในการแก้ปัญหาดำเนินการดังนี้

1. สร้างชุดรหัสคำสั่งลำดับการดำเนินการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดตามขั้นตอนของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ของงานวิจัย

2. นำสมการของระบบที่ศึกษามาระบุเป็นสมการวัตถุประสงค์และเงื่อนไขต่างๆ โดยหากมีความหลากหลายของตัวแปรจำนวนมากควรแปลงตัวแปรให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งในที่นี้ทำการแปลงตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน X

3. นำอนุพันธ์ของสมการที่มีเครื่องหมายเท่ากับ (Equality constrains) ทั้งหมดของแต่ละปัญหามาสร้างเมทริก โดยจำนวนคอลัมน์เท่ากับจำนวนของตัวแปรและจำนวนแถวเท่ากับจำนวนของสมการที่มีเครื่องหมายเท่ากับ บันทึกเป็น Jacobian matrix.m

4. นำอนุพันธ์ของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาสร้างเมทริก โดยจำนวนแถวเท่ากับจำนวนตัวแปรทั้งหมดของปัญหา บันทึกเป็น Jacobian objective function.m

5. รวบรวมสมการเงื่อนไขทั้งสมการที่มีเครื่องหมายเท่ากับ (Equality constrains) และสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายมากกว่าหรือน้อยกว่าเท่ากับ (Inequality constrains) ของปัญหามาบันทึกเป็นไฟล์ MYCON.m

6. นำสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหามาสร้างเป็นไฟล์ MYFUN.m

7. บันทึกสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหาในไฟล์ Objective function.m

8. ระบุจำนวนตัวแปร, จำนวนสมการที่มีเครื่องหมายเท่ากับ, จำนวนสมการที่มีเครื่องหมายมากกว่าหรือน้อยกว่าเท่ากับ, กำหนดขอบเขตค่าต่ำสุด-สูงสุดในไฟล์ Test Problem.m

9. นำสมการเงื่อนไขทั้งหมดมาบันทึกไว้ใน Violation matrix.m

ซึ่งรายละเอียดของรหัสการคำนวณและรูปแบบของการบันทึกของงานวิจัยนี้แสดงในภาคผนวก ก

4.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

4.5.1 ปัญหาระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

จากสมการเงื่อนไขของปัญหาระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมี 91 ตัวแปร 73 equality constraints และ 14 inequality constraints โดยเมื่อทำการแทนค่าตัวแปรบางตัวในบางสมการจะสามารถลดจำนวนตัวแปรและจำนวนเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ (Equality constraints) ในการนำมาพิจารณาในจาโคเบียนเมทริกได้ ซึ่งจะช่วยให้ขนาดมิติของเมทริกนั้นเล็กลงทำให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้น เร็วขึ้น โดยตัวแปรและสมการที่ทำการแทนค่าเพื่อลดจำนวนมิติของปัญหาระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์เป็นดังนี้

1) $F_6 = 100 - F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5$

2) $F_7 = F_8 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} + F_{13}$

3) $F_{22} = F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{27} + F_{28} + F_{29}$

4) $x_A = 0.01(F_8 \cdot x_{8,A} + F_{23} \cdot x_{23,A})$

5) $x_B = 0.01(F_8 \cdot x_{8,B} + F_{23} \cdot x_{23,B})$

6) $x_C = 0.01(F_8 \cdot x_{8,C} + F_{23} \cdot x_{23,C})$

7) $F_8 = 100 - F_{23}$

8) $x_{7,D} = 1 - x_{7,A} - x_{7,B} - x_{7,C}$

9) $x_{8,D} = 1 - x_{8,A} - x_{8,B} - x_{8,C}$

10) $x_{14,D} = 1 - x_{14,A} - x_{14,B} - x_{14,C}$

11) $x_{15,D} = 1 - x_{15,A} - x_{15,B} - x_{15,C}$

12) $x_{16,D} = 1 - x_{16,A} - x_{16,B} - x_{16,C}$

13) $x_{17,D} = 1 - x_{17,A} - x_{17,B} - x_{17,C}$

14) $x_{18,D} = 1 - x_{18,A} - x_{18,B} - x_{18,C}$

15) $x_{19,D} = 1 - x_{19,A} - x_{19,B} - x_{19,C}$

16) $x_{20,D} = 1 - x_{20,A} - x_{20,B} - x_{20,C}$

17) $x_{21,D} = 1 - x_{21,A} - x_{21,B} - x_{21,C}$

18) $x_{22,D} = 1 - x_{22,A} - x_{22,B} - x_{22,C}$

19) $x_{23D} = 1 - x_{23,A} - x_{23,B} - x_{23,C}$

20) $x_{D} = 1 - x_{A} - x_{B} - x_{C}$

21) $V_{C1} = V_{C2} = V_{C}$

22) $V_{C1} = V_{C3} = V_{C}$

23) $V_{C1} = V_{C4} = V_{C}$

24) $V_{C1} = V_{C5} = V_{C}$

25) $V_{2} = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4} + V_{C5} = 5V_{C}$

ดังนั้นสามารถลดจำนวนตัวแปรและสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับลงได้ 25 ตัวแปร 25 สมการตามลำดับ สมการเงื่อนไขและตัวแปรที่เหลือก็จะถูกนำมาคำนวณด้วยระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ต่อไปแล้วเมื่อได้ผลลัพธ์จากโปรแกรมแมทแลปแล้วจึงนำไปแทนค่าเพื่อหาค่าของตัวแปรข้างต้น และเพื่อความสะดวกในการพิจารณาปัญหาระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์จึงทำการเปลี่ยนรูปตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน X ได้ดังนี้

(1) เปลี่ยนตัวแปรให้อยู่ในฟังก์ชันเดียวกัน ในที่นี่ใช้ฟังก์ชัน X

F_{1} = X(1), F_{2} = X(2), F_{3} = X(3), F_{4} = X(4), F_{5} = X(5), F_{9} = X(6), F_{10} = X(7), F_{11} = X(8), F_{12} = X(9), F_{13} = X(10), F_{14} = X(11), F_{16} = X(12), F_{18} = X(13), F_{20} = X(14), F_{23} = X(15), F_{24} = X(16), F_{25} = X(17), F_{26} = X(18), F_{27} = X(19), F_{28} = X(20), F_{29} = X(21), V_{1} = X(22), V_{C} = X(23), $x_{7,A}$ = X(24), $x_{7,B}$ = X(25), $x_{7,C}$ = X(26), $x_{8,A}$ = X(27), $x_{8,B}$ = X(28), $x_{8,C}$ = X(29), $x_{14,A}$ = X(30), $x_{14,B}$ = X(31), $x_{14,C}$ = X(32), $x_{15,A}$ = X(33), $x_{15,B}$ = X(34), $x_{15,C}$ = X(35), $x_{16,A}$ = X(36), $x_{16,B}$ = X(37), $x_{16,C}$ = X(38), $x_{17,A}$ = X(39), $x_{17,B}$ = X(40), $x_{17,C}$ = X(41), $x_{18,A}$ = X(42), $x_{18,B}$ = X(43), $x_{18,C}$ = X(44), $x_{19,A}$ = X(45), $x_{19,B}$ = X(46), $x_{19,C}$ = X(47), $x_{20,A}$ = X(48), $x_{20,B}$ = X(49), $x_{20,C}$ = X(50), $x_{21,A}$ = X(51), $x_{21,B}$ = X(52), $x_{21,C}$ = X(53), $x_{22,A}$ = X(54), $x_{22,B}$ = X(55), $x_{22,C}$ = X(56), $x_{23,A}$ = X(57),

$x_{23,B} = X(58)$, $x_{23,C} = X(59)$, $y_1 = X(60)$, $y_2 = X(61)$, $z_1 = X(62)$, $z_2 = X(63)$, $z_3 = X(64)$, $z_4 = X(65)$, $z_5 = X(66)$

(2) สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากวัตถุประสงค์ของปัญหาเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์นั้นเป็นการหาเหมาะสมค่าที่มากที่สุดของสารผลิตภัณฑ์ B ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดได้ดังนี้

$$\text{Min } F(X) = -x_B = -0.01 \cdot (100 - X(15) \cdot X(28) + X(15) \cdot X(58)) ;$$

(3) สมการเงื่อนไข

Equality constraints ;

$$H1 \equiv X(1) \cdot 0.58 + X(16) \cdot X(57) - (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot X(24) = 0;$$

$$H2 \equiv X(16) \cdot X(58) - (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot X(25) = 0;$$

$$H3 \equiv X(16) \cdot X(59) - (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot X(26) = 0;$$

$$H4 \equiv X(16) \cdot (1 - X(57) - X(58) - X(59)) - (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot (1 - X(24) - X(25) - X(26)) = 0;$$

$$H5 \equiv X(2) \cdot 0.58 + X(6) \cdot X(27) + X(17) \cdot X(57) - X(11) \cdot X(30) = 0;$$

$$H6 \equiv X(6) \cdot X(28) + X(17) \cdot X(58) - X(11) \cdot X(31) = 0;$$

$$H7 \equiv X(6) \cdot X(29) + X(17) \cdot X(59) - X(11) \cdot X(32) = 0;$$

$$H8 \equiv X(6) \cdot (1 - X(27) - X(28) - X(29)) + X(17) \cdot (1 - X(57) - X(58) - X(59)) - X(11) \cdot (1 - X(30) - X(31) - X(32)) = 0;$$

$$H9 \equiv X(3) \cdot 0.58 + X(11) \cdot X(33) + X(7) \cdot X(27) + X(18) \cdot X(57) - X(12) \cdot X(36) = 0;$$

$$H10 \equiv X(11) \cdot X(34) + X(7) \cdot X(28) + X(18) \cdot X(58) - X(12) \cdot X(37) = 0;$$

$$H11 \equiv X(11) \cdot X(35) + X(7) \cdot X(29) + X(18) \cdot X(59) - X(12) \cdot X(38) = 0;$$

$$H12 \equiv X(11) \cdot (1 - X(33) - X(34) - X(35)) + X(7) \cdot (1 - X(27) - X(28) - X(29)) + X(18) \cdot (1 - X(57) - X(58) - X(59)) - X(12) \cdot (1 - X(36) - X(37) - X(38)) = 0;$$

$$H13 \equiv X(4) \cdot 0.58 + X(12) \cdot X(39) + X(8) \cdot X(27) + X(19) \cdot X(57) - X(13) \cdot X(42) = 0;$$

$$H14 \equiv X(12) \cdot X(40) + X(8) \cdot X(28) + X(19) \cdot X(58) - X(13) \cdot X(43) = 0;$$

$$H15 \equiv X(12) \cdot X(41) + X(8) \cdot X(29) + X(19) \cdot X(59) - X(13) \cdot X(44) = 0;$$

$$H16 \equiv X(12)\cdot(1 - X(39) - X(40) - X(41)) + X(8)\cdot(1 - X(27) - X(28) - X(29))$$
$$+ X(19)\cdot(1 - X(57) - X(58) - X(59)) - X(13)\cdot(1 - X(42) - X(43) - X(44)) = 0;$$

$$H17 \equiv X(5)\cdot 0.58 + X(13)\cdot X(45) + X(9)\cdot X(27) + X(20)\cdot X(57) - X(14)\cdot X(48) = 0;$$

$$H18 \equiv X(13)\cdot X(46) + X(9)\cdot X(28) + X(20)\cdot X(58) - X(14)\cdot X(49) = 0;$$

$$H19 \equiv X(13)\cdot X(47) + X(9)\cdot X(29) + X(20)\cdot X(59) - X(14)\cdot X(50) = 0;$$

$$H20 \equiv X(13)\cdot(1 - X(45) - X(46) - X(47)) + X(9)\cdot(1 - X(27) - X(28) - X(29))$$
$$+ X(20)\cdot(1 - X(57) - X(58) - X(59)) - X(14)\cdot(1 - X(48) - X(49) - X(50)) = 0;$$

$$H21 \equiv (100 - X(1) - X(2) - X(3) - X(4) - X(5))\cdot 0.58 + X(14)\cdot X(51) + X(10)\cdot X(27)$$
$$+ X(21)\cdot X(57) - (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot X(54) = 0;$$

$$H22 \equiv X(14)\cdot X(52) + X(10)\cdot X(28) + X(21)\cdot X(58)$$
$$- (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot X(55) = 0;$$

$$H23 \equiv X(14)\cdot X(53) + X(10)\cdot X(29) + X(21)\cdot X(59)$$
$$- (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot X(56) = 0;$$

$$H24 \equiv X(14)\cdot(1 - X(51) - X(52) - X(53)) + X(10)\cdot(1 - X(27) - X(28) - X(29))$$
$$+ X(21)\cdot(1 - X(57) - X(58) - X(59)) - (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) +$$
$$X(20) + X(21))\cdot(1 - X(54) - X(55) - X(56)) = 0;$$

$$H25 \equiv (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot(X(24) - X(27))$$
$$+ X(22)\cdot(-10\cdot X(27) - X(27)^2) = 0;$$

$$H26 \equiv (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot(X(25) - X(28))$$
$$+ X(22)\cdot(10\cdot X(27) - X(28)) = 0;$$

$$H27 \equiv (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot(X(26) - X(29))$$
$$+ X(22)\cdot X(28) = 0;$$

$$H28 \equiv (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot(X(27) + X(28) + X(29) - X(24) -$$
$$X(25) - X(26)) + X(22)\cdot(X(27)^2) = 0;$$

$$H29 \equiv X(11)\cdot(X(30) - X(33)) + X(23)\cdot(-10\cdot X(33) - X(33)^2) = 0;$$

$$H30 \equiv X(11)\cdot(X(31) - X(34)) + X(23)\cdot(10\cdot X(33) - X(34)) = 0;$$

$$H31 \equiv X(11)\cdot(X(32) - X(35)) + X(23)\cdot X(34) = 0;$$

$$H32 \equiv X(11)\cdot(X(33) + X(34) + X(35)) - X(30) - X(31) - X(32)) + X(23)\cdot X(33)^2 = 0;$$

$$H33 \equiv X(12)\cdot(X(36) - X(39)) + X(23)\cdot(-10\cdot X(39) - X(39)^2) = 0;$$

$$H34 \equiv X(12)\cdot(X(37) - X(40)) + X(23)\cdot(10\cdot X(39) - X(40)) = 0;$$

$$H35 \equiv X(12)\cdot(X(38) - X(41)) + X(23)\cdot X(40) = 0;$$

$$H36 \equiv X(12)\cdot(X(39) + X(40) + X(41) - X(36) - X(37) - X(38)) + X(23)\cdot X(39)^2 = 0;$$

$$H37 \equiv X(13)\cdot(X(42) - X(45)) + X(23)\cdot(-10\cdot X(45) - X(45)^2) = 0;$$

$$H38 \equiv X(13)\cdot(X(43) - X(46)) + X(23)\cdot(10\cdot X(45) - X(46)) = 0;$$

$$H39 \equiv X(13)\cdot(X(44) - X(47)) + X(23)\cdot X(46) = 0;$$

$$H40 \equiv X(13)\cdot(X(45) + X(46) + X(47) - X(42) - X(43) - X(44)) + X(23)\cdot X(45)^2 = 0;$$

$$H41 \equiv X(14)\cdot(X(48) - X(51)) + X(23)\cdot(-10\cdot X(51) - X(51)^2) = 0;$$

$$H42 \equiv X(14)\cdot(X(49) - X(52)) + X(23)\cdot(10\cdot X(51) - X(52)) = 0;$$

$$H43 \equiv X(14)\cdot(X(50) - X(53)) + X(23)\cdot X(52) = 0;$$

$$H44 \equiv X(14)\cdot(X(51) + X(52) + X(53) - X(48) - X(49) - X(50)) + X(23)\cdot X(51)^2 = 0;$$

$$H45 \equiv (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot(X(54) - X(57)) + X(23)\cdot(-10\cdot X(57) - X(57)^2) = 0;$$

$$H46 \equiv (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot(X(55) - X(58)) + X(23)\cdot(10\cdot X(57) - X(58)) = 0;$$

$$H47 \equiv (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot(X(56) - X(59)) + X(23)\cdot X(58) = 0;$$

$$H48 \equiv (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21))\cdot(X(57) + X(58) + X(59) - X(54) - X(55) - X(56)) + X(23)\cdot X(57)^2 = 0;$$

Inequality constraints ;

$$G1 \equiv X(22) - 200\cdot X(60) \le 0;$$

$$G2 \equiv 5\cdot X(23) - 1000\cdot X(61) \le 0;$$

$$G3 \equiv (100 - X(15) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) - 100\cdot X(60) \le 0;$$

$$G4 \equiv X(11) - 100\cdot X(62) \le 0;$$

$$G5 \equiv X(12) - 100\cdot X(63) \le 0;$$

$$G6 \equiv X(13) - 100\cdot X(64) \le 0;$$

$$G7 \equiv X(14) - 100\cdot X(65) \le 0;$$

$$G8 \equiv (X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21)) - 100\cdot X(66) \le 0;$$

$$G9 \equiv 1 - X(60) - X(61) \le 0;$$

$$G10 \equiv X(23) - 200\cdot X(62) \le 0;$$

$G11 \equiv X(23) - 200 \cdot X(63) \leq 0;$

$G12 \equiv X(23) - 200 \cdot X(64) \leq 0;$

$G13 \equiv X(23) - 200 \cdot X(65) \leq 0;$

$G14 \equiv X(23) - 200 \cdot X(66) \leq 0;$

(4) การตั้งค่าสำหรับชุดรหัสคำสั่ง มีการกำหนดค่าในการประมวลผลดังนี้

- Weighing factor (F) = 0.85
- Crossover factor (CR) = 0.8
- Trigonometric mutation probability = 0.05
- ค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น (NP) = 500
- จำนวนรุ่นในการคำนวณ (GEN) = 10000
- ความคลาดเคลื่อนยินยอม (ϵ) = 0.001
- ค่ารีแลกซ์คอนสเตรน (Relax) = 0.0001
- ค่าจำนวนรอบการรีแพร์ = 100
- จำนวนการวนซ้ำการคำนวณ local search = 10

4.5.2 ปัญหาระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

จากสมการเงื่อนไขของปัญหาระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ซึ่งในระบบปัญหาประกอบด้วย 67 ตัวแปร 47 equality constraints และ 10 inequality constraints โดยเมื่อทำการแทนค่าตัวแปรบางตัวในบางสมการจะสามารถลดจำนวนตัวแปรและจำนวนเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ (Equality constraints) ในการนำมาพิจารณาในจาโคเบียนเมทริกได้ ซึ่งจะช่วยให้ขนาดมิติของเมทริกนั้นเล็กลงทำให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้น เร็วขึ้น โดยตัวแปรและสมการที่ทำการแทนค่าเพื่อลดจำนวนมิติของปัญหาระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับเป็นดังนี้

1) $F_A = F_1 + F_2 + F_3$
2) $F_{28} = F_5 + F_6 + F_7 + F_8$
3) $F_{30} = F_{10} + F_{11} + F_{12} + F_{13}$
4) $F_{32} = F_{15} + F_{16} + F_{17} + F_{18}$
5) $F_{27} = F_{23} + F_{24} - F_{25} - F_{26}$

6) $F_{23} = F_{21} \cdot x_{21,A}$

7) $F_4 = F_{22} \cdot (1 - x_{22,C})$

8) $F_{24} = F_{22} \cdot x_{22,A}$

9) $F_{B,1} = F_{21} \cdot x_{21,B}$

10) $F_{C,1} = F_{21} \cdot x_{21,B}$

11) $F_{B,2} = F_{22} \cdot x_{22,B}$

12) $F_{C,2} = F_{22} \cdot x_{22,C}$

13) $x_{28,C} = 1 - x_{28,A} - x_{28,B}$

14) $x_{29,C} = 1 - x_{29,A} - x_{29,B}$

15) $x_{30,C} = 1 - x_{30,A} - x_{30,B}$

16) $x_{31,C} = 1 - x_{31,A} - x_{31,B}$

17) $x_{32,C} = 1 - x_{32,A} - x_{32,B\,C}$

18) $x_{33,C} = 1 - x_{33,A} - x_{33,B}$

19) $x_{21,C} = 1 - x_{21,A} - x_{21,B}$

20) $x_{22,C} = 1 - x_{22,A} - x_{22,B}$

21) $F_3 = F_{21} \cdot (1 - x_{21,A})$

ดังนั้นสามารถลดจำนวนตัวแปรและสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับลงได้ 21 ตัวแปร 21 สมการตามลำดับ สมการเงื่อนไขและตัวแปรที่เหลือก็จะถูกนำมาคำนวณด้วยระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ต่อไปแล้วเมื่อได้ผลลัพธ์จากโปรแกรมแมทแลปแล้วจึงนำไปแทนค่าเพื่อหาค่าของตัวแปรข้างต้น และเพื่อความสะดวกในการพิจารณาปัญหา จึงทำการเปลี่ยนรูปตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน X ได้ดังนี้

(1) เปลี่ยนตัวแปรให้อยู่ในฟังก์ชันเดียวกัน ในที่นี่ใช้ฟังก์ชัน X

$F_1 = X(1)$, $F_2 = X(2)$, $F_5 = X(3)$, $F_6 = X(4)$, $F_7 = X(5)$, $F_8 = X(6)$, $F_{10} = X(7)$, $F_{11} = X(8)$, $F_{12} = X(9)$, $F_{13} = X(10)$, $F_{15} = X(11)$, $F_{16} = X(12)$, $F_{17} = X(13)$, $F_{18} = X(14)$, $F_{21} = X(15)$, $F_{22} = X(16)$, $F_{25} = X(17)$, $F_{26} = X(18)$, $V_1 = X(19)$, $V_2 = X(20)$, $V_3 = X(21)$, $x_{28,A} = X(22)$, $x_{28,B} = X(23)$, $x_{29,A} = X(24)$, $x_{29,B} = X(25)$, $x_{30,A} = X(26)$, $x_{30,B} = X(27)$, $x_{31,A} = X(28)$, $x_{31,B} = X(29)$, $x_{32,A} = X(30)$, $x_{32,B} = X(31)$, $x_{33,A} = X(32)$, $x_{33,B} = X(33)$, $x_{21,A} = X(34)$, $x_{21,B} = X(35)$, $x_{22,A} = X(36)$, $x_{22,B} = X(37)$,

$y_1 = X(38)$, $y_2 = X(39)$, $y_3 = X(40)$, $z_1 = X(41)$, $z_2 = X(42)$, $z_3 = X(43)$, $z_4 = X(44)$, $x_{3,B} = X(45)$, $x_{4,A} = X(46)$

(2) สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากวัตถุประสงค์ของปัญหาระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับนั้นเป็นการหาเหมาะสมค่าที่มากที่สุดของสารกำไรที่ได้รายปี ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{Min } F(X) = & -92.67\cdot 8000\cdot (X(15)\cdot X(35) + X(16)\cdot X(37)) + (27.98 + 19.88)\cdot 8000\cdot (X(1) + \\ & X(2) + X(15)\ \cdot (1 - X(34))) - 0.4\cdot [25795\cdot (X(38) + X(39) + X(40)) + \\ & 8178\cdot (X(19) + X(20) + X(21)) + 132718\cdot X(41)\ + X(15)\cdot (369\cdot X(34) - \\ & 1114\cdot X(35)) + 211547\cdot X(42) - \ X(16)\cdot (1010\cdot X(36) - 479\cdot X(37)) + \\ & 25000\cdot X(43)\ + X(15)\cdot (1 - X(34))\ \cdot (6985\cdot X(45) - 3870\cdot X(45)^2\ ) + \\ & 86944\cdot X(44) + X(16)\ \cdot (X(36) + X(37))\ \cdot 1136\cdot X(46)] - \\ & 0.52\cdot (21.67 + 4.65)\ \cdot [X(15)\cdot (3 + 36.1\cdot X(34) + 7.7\cdot X(35)) + \\ & X(16)\cdot (16.18 + 16.83\cdot X(36) + 42.14\cdot X(37)) + \\ & X(15)\cdot (1 - X(34))\cdot (26.212 + 29.45\cdot X(45)) \\ & + X(16)\cdot (X(36 + X(37))\cdot (10.70 + 28.41\cdot X(46))]\end{aligned}$$

(3) สมการเงื่อนไข

Equality constraints ;

$$\begin{aligned}H1 \quad & \equiv X(1) + X(7)\cdot X(28) + X(11)\cdot X(32) + (X(15)\ \cdot X(34) + X(16)\ \cdot X(36) - X(17) - X(18)) - \\ & (X(3) + X(4) + X(5) + X(6))\cdot X(22) = 0;\end{aligned}$$

$$H2 \quad \equiv X(7)\cdot X(29) + X(11)\cdot X(33) - (X(3) + X(4) + X(5) + X(6))\cdot X(23) = 0;$$

$$\begin{aligned}H3 \quad & \equiv X(7)\cdot (1 - X(28) - X(29)) + X(11)\cdot (1 - X(32) - X(33)) \\ & - (X(3) + X(4) + X(5) + X(6))\cdot (1 - X(22) - X(23)) = 0;\end{aligned}$$

$$H4 \quad \equiv X(2) + X(5)\cdot X(24) + X(12)\cdot X(32) + X(18) - (X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot X(26) = 0;$$

$$H5 \quad \equiv X(5)\cdot X(25) + X(12)\cdot X(33) - (X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot X(27) = 0;$$

$$\begin{aligned}H6 \quad & \equiv X(5)\cdot (1 - X(24) - X(25)) + X(12)\cdot (1 - X(32) - X(33)) \\ & - (X(7) + X(8) + X(9) + X(10))\cdot (1 - X(26) - X(27)) = 0;\end{aligned}$$

$$H7 \quad \equiv X(15)\cdot (1\text{-}X(34)) + X(6)\cdot X(24) + X(8)\cdot X(28) + X(17)$$

$$- (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) \cdot X(30) = 0;$$

$$H8 \equiv X(6) \cdot X(25) + X(8) \cdot X(29) - (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) \cdot X(31) = 0;$$

$$H9 \equiv X(6) \cdot (1 - X(24) - X(25)) + X(8) \cdot (1 - X(28) - X(29))$$
$$- (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) \cdot (1 - X(30) - X(31)) = 0;$$

$$H10 \equiv X(3) \cdot X(24) + X(9) \cdot X(28) + X(13) \cdot X(32) - X(15) \cdot X(34) = 0;$$

$$H11 \equiv X(3) \cdot X(25) + X(9) \cdot X(29) + X(13) \cdot X(33) - X(15) \cdot X(35) = 0;$$

$$H12 \equiv X(3) \cdot (1 - X(24) - X(25)) + X(9) \cdot (1 - X(28) - X(29)) + X(13) \cdot (1 - X(32) - X(33))$$
$$- X(15) \cdot (1 - X(34) - X(35)) = 0;$$

$$H13 \equiv X(4) \cdot X(24) + X(10) \cdot X(28) + X(14) \cdot X(32) - X(16) \cdot X(36) = 0;$$

$$H14 \equiv X(4) \cdot X(25) + X(10) \cdot X(29) + X(14) \cdot X(33) - X(16) \cdot X(37) = 0;$$

$$H15 \equiv X(4) \cdot (1 - X(24) - X(25)) + X(10) \cdot (1 - X(28) - X(29)) + X(14) \cdot (1 - X(32) - X(33))$$
$$- X(16) \cdot (1 - X(36) - X(37)) = 0;$$

$$H16 \equiv (X(3) + X(4) + X(5) + X(6)) \cdot (X(22) - X(24)) + X(19) \cdot (- 0.412 \cdot X(24)) = 0;$$

$$H17 \equiv (X(3) + X(4) + X(5) + X(6)) \cdot (X(23) - X(25)) + X(19) \cdot (0.412 \cdot X(24) - 0.055 \cdot X(25)) = 0;$$

$$H18 \equiv (X(3) + X(4) + X(5) + X(6)) \cdot (X(24) + X(25)) - X(22) - X(23))$$
$$+ X(19) \cdot (0.055 \cdot X(25)) = 0;$$

$$H19 \equiv (X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot (X(26) - X(28)) + X(20) \cdot (- 0.412 \cdot X(28)) = 0;$$

$$H20 \equiv (X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot (X(27) - X(29)) + X(20) \cdot (0.412 \cdot X(28) - 0.055 \cdot X(29)) = 0;$$

$$H21 \equiv (X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) \cdot (X(28) + X(29) - X(26) - X(27))$$
$$+ X(20) \cdot (0.055 \cdot X(29)) = 0;$$

$$H22 \equiv (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) \cdot (X(30) - X(32)) + X(21) \cdot (- 0.412 \cdot X(32)) = 0;$$

$$H23 \equiv (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) \cdot (X(31) - X(33))$$
$$+ X(23) \cdot (0.412 \cdot X(32) - 0.055 \cdot X(33)) = 0;$$

$$H24 \equiv (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) \cdot (X(32) + X(33) - X(30) - X(31))$$
$$+ X(21) \cdot (0.055 \cdot X(33)) = 0;$$

$$H25 \equiv X(45) \cdot (1 - X(34)) - X(35) = 0;$$

$$H26 \equiv X(46) \cdot (X(36) + X(37)) - X(36) = 0;$$

Inequality constraints ;

$$G1 \equiv (X(3) + X(4) + X(5) + X(6)) - 2000 \cdot X(38) \leq 0;$$

$G2 \equiv (X(7) + X(8) + X(9) + X(10)) - 2000 \cdot X(39) \leq 0;$

$G3 \equiv (X(11) + X(12) + X(13) + X(14)) - 2000 \cdot X(40) \leq 0;$

$G4 \equiv X(19) - 2000 \cdot X(38) \leq 0;$

$G5 \equiv X(20) - 2000 \cdot X(39) \leq 0;$

$G6 \equiv X(21) - 2000 \cdot X(40) \leq 0;$

$G7 \equiv X(15) - 2000 \cdot X(41) \leq 0;$

$G8 \equiv X(16) - 2000 \cdot X(42) \leq 0;$

$G9 \equiv X(43) - X(41) \leq 0;$

$G10 \equiv X(44) - X(42) \leq 0;$

(4) การตั้งค่าสำหรับชุดรหัสคำสั่ง

- Weighing factor (F) = 0.85
- Crossover factor (CR) = 0.8
- Trigonometric mutation probability = 0.05
- ค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น (NP) = 500
- จำนวนรุ่นในการคำนวณ (GEN) = 10000
- ความคลาดเคลื่อนยินยอม (ϵ) = 0.001
- ค่ารีแลกซ์คอนสเตรน (Relax) = 0.0001
- ค่าจำนวนรอบการรีแพร์ = 100
- จำนวนการวนซ้ำการคำนวณ local search = 10

บทที่ 5
ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลิตภัณฑ์ที่มากที่สุด และสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับซึ่งหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลกำไรที่มากที่สุดต่อปี โดยประมวลผลผ่านโปรแกรมแมทแลปซึ่งผลที่ได้ของทั้งสองปัญหาเป็นดังนี้

5.1 ผลการดำเนินงานวิจัยการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

(1) ค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลป

การสังเคราะห์ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ประกอบไปด้วยตัวแปรและจำนวนสมการที่ได้ทำการพิจารณาในการคำนวณดังต่อไปนี้ ประกอบด้วยจำนวนตัวแปร 66 ตัวแปร 48 Equality constraints และ 14 Inequality constraints โดยผลที่ได้จากการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สำหรับงานวิจัยนี้ ที่รุ่นการคำนวณสูงสุดที่กำหนดไว้ (Generation) เท่ากับ 1000 และกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นในการคำนวณ(NP) เท่ากับ 500 ได้แสดงผลการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ออกมาในรูปของค่าการฝ่าฝืนเงื่อนไข (Total constraint violation) เท่ากับ 0.000089452 และจำนวนความต้องการฟังก์ชันในการคำนวณ (Total evaluate, NFE) เท่ากับ 501,912 ซึ่งค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้นแสดงในตารางที่ 5.1

(2) ค่าตัวแปรจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
F1	X(1)	0.027346040805809
F2	X(2)	99.969658880391847
F3	X(3)	0.000000000025692
F4	X(4)	0.000000000018446
F5	X(5)	0.000000000000035
F6	100 – X(1) – X(2) – X(3) – X(4) – X(5)	0.000000000000012

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์(ต่อ)

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
F7	100 – X(15) +X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)	0.022068601884590
F8	100 – X(15)	0.000060725158190
F9	X(6)	0.005944882964581
F_{10}	X(7)	0.002683868150233
F_{11}	X(8)	0.003327937706006
F_{12}	X(9)	0.004910948142359
F_{13}	X(10)	0.005140239763221
F_{14}	X(11)	57.990299665248095
F_{16}	X(12)	99.900048515559916
F_{18}	X(13)	99.956218745053476
F_{20}	X(14)	99.984955199201039
F_{22}	X(15) + X(16) + X(17) + X(18) + X(19) + X(20) + X(21)	58.021126606769397
F_{23}	X(15)	57.999939275017979
F_{24}	X(16)	0.004558520904869
F_{25}	X(17)	0.001952631576838
F_{26}	X(18)	0.001019839799907
F_{27}	X(19)	0.001315275861039
F_{28}	X(20)	0.002164802305121
F_{29}	X(21)	0.010176261294344
V_1	X(22)	3.289900951984235
V_2	$5 \cdot X(23)$	564.9225431173750
V_{C_1}	X(23)	112.9845086234750
V_{C_2}	X(23)	112.9845086234750
V_{C_3}	X(23)	112.9845086234750
V_{C_4}	X(23)	112.9845086234750

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์(ต่อ)

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
V_{C_5}	X(23)	112.9845086234750
$x_{7,A}$	X(24)	0.999921408585327
$x_{7,B}$	X(25)	0.000069172207851
$x_{7,C}$	X(26)	0.000004252925253
$x_{7,D}$	1 – X(24) – X(25) – X(26)	0.000005166281569
$x_{8,A}$	X(27)	0.623941766589808
$x_{8,B}$	X(28)	0.334968285932932
$x_{8,C}$	X(29)	0.019003579297696
$x_{8,D}$	1 – X(27) – X(28) – X(29)	0.022086368179564
$x_{14,A}$	X(30)	0.999927776695376
$x_{14,B}$	X(31)	0.000063975404575
$x_{14,C}$	X(32)	0.000003770275207
$x_{14,D}$	1 – X(30) – X(31) – X(32)	0.000004477624842
$x_{15,A}$	X(33)	0.825757392715932
$x_{15,B}$	X(34)	0.157873248219882
$x_{15,C}$	X(35)	0.003079669417070
$x_{15,D}$	1 – X(33) – X(34) – X(35)	0.013289689647116
$x_{16,A}$	X(36)	0.898834782462045
$x_{16,B}$	X(37)	0.091660752229364
$x_{16,C}$	X(38)	0.001788759325478
$x_{16,D}$	1 – X(36) – X(37) – X(38)	0.007715705983113
$x_{17,A}$	X(39)	0.800988767450034
$x_{17,B}$	X(40)	0.180212461734026
$x_{17,C}$	X(41)	0.003826918130523
$x_{17,D}$	1 – X(39) – X(40) – X(41)	0.014971852685417
$x_{18,A}$	X(42)	0.801074922514801
$x_{18,B}$	X(43)	0.180133925509790

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์(ต่อ)

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
$x_{18,C}$	X(44)	0.003826112368611
$x_{18,D}$	1 – X(42) – X(43) – X(44)	0.014965039606798
$x_{19,A}$	X(45)	0.714536867791284
$x_{19,B}$	X(46)	0.257984778284806
$x_{19,C}$	X(47)	0.006742217404884
$x_{19,D}$	1 – X(45) – X(46) – X(47)	0.020736136519026
$x_{20,A}$	X(48)	0.714578790063559
$x_{20,B}$	X(49)	0.257946140386246
$x_{20,C}$	X(50)	0.006742384679416
$x_{20,D}$	1 – X(48) – X(49) – X(50)	0.020732684870779
$x_{21,A}$	X(51)	0.637897259356230
$x_{21,B}$	X(52)	0.326341787315125
$x_{21,C}$	X(53)	0.010430091097239
$x_{21,D}$	1 – X(51) – X(52) – X(53)	0.025330862231406
$x_{22,A}$	X(54)	0.000001603861249
$x_{22,B}$	X(55)	0.894150153016371
$x_{22,C}$	X(56)	0.040112372921166
$x_{22,D}$	1 – X(54) – X(55) – X(56)	0.065735870201214
$x_{23,A}$	X(57)	0.000001383306194
$x_{23,B}$	X(58)	0.880148457835665
$x_{23,C}$	X(59)	0.054114288261108
$x_{23,D}$	1 – X(57) – X(58) – X(59)	0.065735870597033
x_A	$0.01 \cdot ((100 – X(15)) \cdot X(27)$ $+X(15) \cdot X(57))$	0.000001181206377
x_B	$0.01 \cdot ((100 – X(15)) \cdot X(28)$ $+X(15) \cdot X(58))$	0.510485774484714
y_1	X(60)	0.864141979534821

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์(ต่อ)

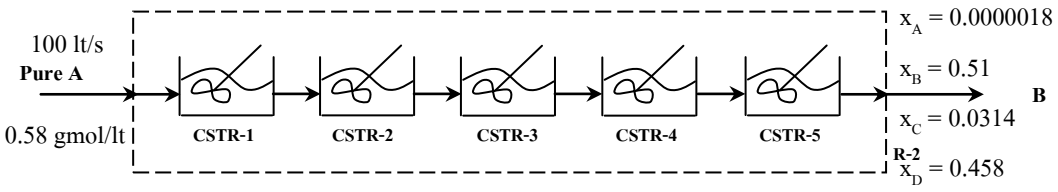
ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
x_C	$0.01 \cdot ((100 - X(15)) \cdot X(29) + X(15) \cdot X(59))$	0.031386265870504
x_D	$1 - (0.01 \cdot ((100 - X(15)) \cdot X(27) + X(15) \cdot X(57))) - (0.01 \cdot ((100 - X(15)) \cdot X(28) + X(15) \cdot X(58))) - (0.01 \cdot ((100 - X(15)) \cdot X(39) + X(15) \cdot X(59)))$	0.458126778438404
y_2	X(62)	0.763773976085629
z_1	X(63)	0.838874915899835
z_2	X(64)	0.999500480840118
z_3	X(65)	0.999781157093849
z_4	X(66)	0.999924779508566
z_5	X(67)	0.878156548878991

สำหรับค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าที่มากที่สุดของค่าคอนเวอร์ชันสาร B หรือ Max x_B ในกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์นี้ มีค่าการหาค่าเหมาะสมเท่ากับ Maximize F(X) = - Minimize (-0.510485774484714) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.510485774484714 หรือมีค่า Max x_B ประมาณ 0.51

ซึ่งเมื่อนำค่าของตัวแปรที่ได้จากการ หาค่าเหมาะสมที่สุดแล้วมาแทนในแบบโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์นั้น ทำให้รูปแบบของระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากมีค่าของตัวแปรบางค่าที่เป็นศูนย์ซึ่งแสดงว่าไม่มีการไหลของสารในการทำปฏิกิริยาในสายนั้นๆของระบบ โดยสามารถแสดงรูปแบบโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้ดำเนินการหาค่าเหมาะสมแล้วดังรูปที่ 5.1

(3) โครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์จากผลงานวิจัย

โดยจากค่าของตัวแปรต่างๆ ที่พิจารณาในระบบปัญหาเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ดังตารางที่ 5.1 แล้วนั้น สามารถเขียนรูปโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์จากค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 รูปแบบโครงสร้างระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์จากผลงานวิจัย

5.2 ผลการดำเนินงานวิจัยการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

(1) ค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลป

การสังเคราะห์ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ประกอบไปด้วยตัวแปรและจำนวนสมการที่ได้ทำการพิจารณาในการคำนวณดังต่อไปนี้ ประกอบด้วยจำนวนตัวแปร 46 ตัวแปร 26 Equality constraints และ 10 Inequality constraints โดยผลที่ได้จากการประมวลผลด้วยระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สำหรับงานวิจัยนี้ซึ่งรุ่นการคำนวณสูงสุดที่กำหนดไว้ (GEN) เท่ากับ 5000 และกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นในการคำนวณ(NP) เท่ากับ 500 ได้แสดงผลการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ออกมาในรูปของค่าการฝ่าฝืนเงื่อนไข (Total constraint violation) เท่ากับ 0.000099999 และจำนวนความต้องการฟังก์ชันในการคำนวณ (Total evaluate, NFE) เท่ากับ 2,949,209 ซึ่งค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้นแสดงในตารางที่ 5.2

(2) ค่าตัวแปรจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
F_1	X(1)	61.606630116447
F_2	X(2)	0.035021289702
F_3	$X(15) \cdot (1 - X(34))$	12.683855596346
F_4	$X(16) \cdot (X(36) + X(37))$	0.000000000000
F_5	X(3)	0.000000000038
F_6	X(4)	0.000000000010

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ(ต่อ)

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
F_7	X(5)	96.76850483531
F_8	X(6)	2.594494978009
F_9	X(9) + X(10)	1.740000000000
F_{10}	X(7)	0.000000000002
F_{11}	X(8)	99.99999999999
F_{12}	X(9)	0.000000000000
F_{13}	X(10)	0.000000000174
F_{15}	X(11)	2.5944949782754
F_{16}	X(12)	0.0000000001313
F_{17}	X(13)	95.6457834567837
F_{18}	X(14)	0.0000000000227
F_{19}	-	ละเว้นการพิจารณา
F_{20}	-	ละเว้นการพิจารณา
F_{21}	X(15)	99.999999998976
F_{22}	X(16)	0.000000000000
F_{23}	$X(15) \cdot X(34)$	87.316144403380
F_{24}	$X(16) \cdot X(36)$	0.000000000000
F_{25}	X(17)	0.000008400655
F_{26}	X(18)	0.000404015014
F_{27}	$X(15) \cdot X(34) + X(16) \cdot X(36) - X(17) - X(18)$	67.315731981469
F_{28}	X(3) + X(4) + X(5) + X(6)	99.362999813367
F_{30}	X(7) + X(8) + X(9) + X(10)	100.000000000000
F_{32}	X(11) + X(12) + X(13) + X(14)	98.240278436595
F_A	$X(1) + X(2) + X(15) \cdot (1 - X(34))$	148.957795809533
$F_{B,1}$	$X(15) \cdot X(35)$	37.3167443450264

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ(ต่อ)

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
$F_{C,1}$	X(15) · X(35)	37.3167443450264
$F_{B,2}$	X(16) · X(37)	0.0000000000000
$F_{C,2}$	X(16) · X(37)	0.0000000000000
V_1	X(19)	1999.9999997989
V_2	X(20)	390.04718460822
V_3	X(21)	1999.9999999999
$x_{28,A}$	X(22)	0.9999999997598
$x_{28,B}$	X(23)	0.0000000000128
$x_{28,C}$	1 – X(22) – X(23)	0.0000000002274
$x_{29,A}$	X(24)	0.0000000047658
$x_{29,B}$	X(25)	0.0000000000312
$x_{29,C}$	1 – X(24) – X(25)	0.9999999995203
$x_{30,A}$	X(26)	0.0000000000000
$x_{30,B}$	X(27)	0.8731614440336
$x_{30,C}$	1 – X(26) – X(27)	0.1268385559664
$x_{31,A}$	X(28)	0.0000000000141
$x_{31,B}$	X(29)	0.8731614440281
$x_{31,C}$	1 – X(28) – X(29)	0.1268385559578
$x_{32,A}$	X(30)	0.0000000000197
$x_{32,B}$	X(31)	0.5547919390774
$x_{32,C}$	1 – X(30) – X(31)	0.4452080609029
$x_{33,A}$	X(32)	0.4021292224758
$x_{33,B}$	X(33)	0.0000000000070
$x_{33,C}$	1 – X(32) – X(33)	0.5978707775172
$x_{21,A}$	X(34)	0.5547919390774
$x_{21,B}$	X(35)	0.3731614440362

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ(ต่อ)

ตัวแปร	ตัวแปรในฟังก์ชัน X	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม
$x_{21,C}$	1 – X(34) – X(35)	0.1268385559441
$x_{22,A}$	X(36)	0.8731614445454
$x_{22,B}$	X(37)	0.0000000000197
$x_{22,C}$	1 – X(36) – X(37)	0.0720466168864
y_1	X(38)	0.9999999999598
y_2	X(39)	0.9999999999598
y_3	X(40)	0.9999999999598
z_1	X(41)	0.9999999999929
z_2	X(42)	0.9999999999960
z_3	X(43)	0.9999999999133
z_4	X(44)	0.9999999999741
$x_{3,B}$	X(45)	0.8731614519615
$x_{4,A}$	X(46)	0.4024315019491

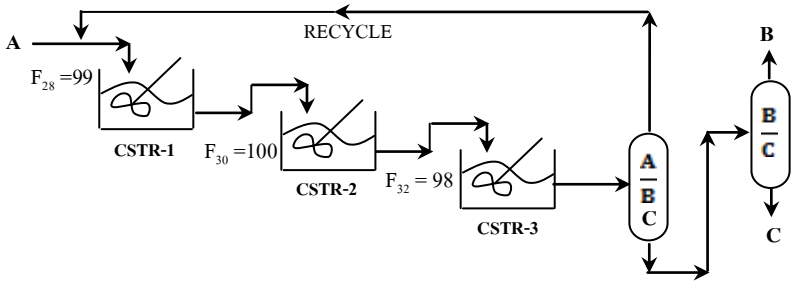
สำหรับค่าผลลัพธ์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของค่าที่มากที่สุดของผลกำไรต่อปีของกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับนี้ มีค่าเท่ากับ Maximize F(X) = - Minimize (-2.869942109225638e+07) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 28,699,421.029225638 หรือผลกำไรต่อปีประมาณ 28.7 ล้านเหรียญสหรัฐต่อปี

ซึ่งเมื่อนำค่าของตัวแปรที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดแล้วมาแทนในรูปแบบโครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับนั้น ทำให้รูปแบบของระบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากมีค่าของตัวแปรบางค่าที่เป็นศูนย์ ซึ่งแสดงว่าไม่มีการไหลของสารในการทำปฏิกิริยาในสายนั้นๆของระบบ โดยสามารถแสดงรูปแบบโครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับที่ได้ดำเนินการหาค่าเหมาะสมแล้วดังรูปที่ 5.2

(3) โครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับจากผลงานวิจัย

โดยจากค่าของตัวแปรต่างๆ ที่พิจารณาในระบบปัญหาเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ดังตารางที่

5.2 แล้วนั้น สามารถเขียนรูปโครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับจากค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมโดยย่อได้ดังนี้



รูปที่ 5.2 รูปแบบโครงสร้างระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับจากผลงานวิจัย

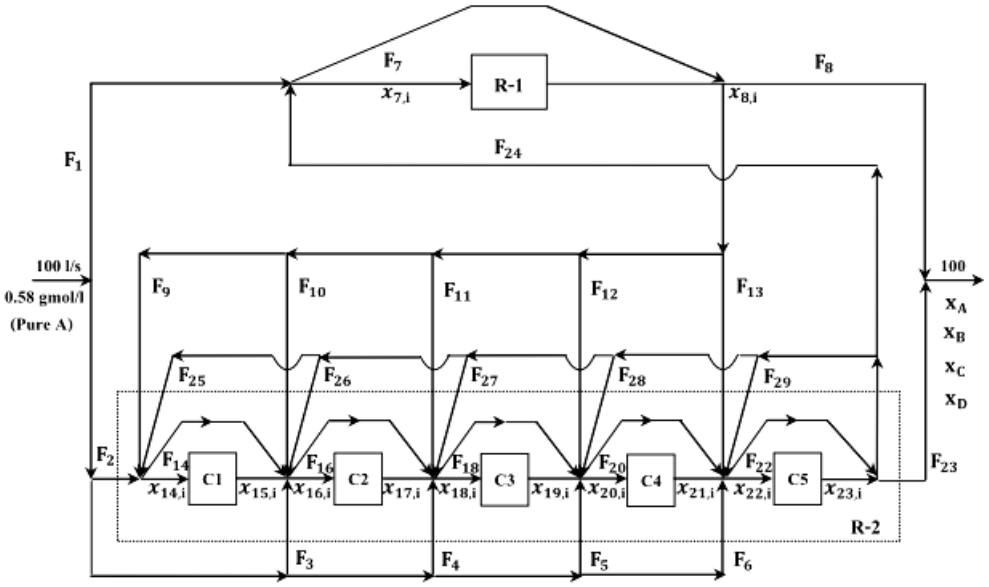
5.3 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลงานการวิจัยที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 5.1 และ 5.2 นั้น แสดงให้เห็นได้ว่าการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างนี้สามารถหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับได้ โดยการใช้การแทนค่าตัวแปรลงไปในสมการ เพื่อลดจำนวนตัวแปรและจำนวนสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับนั้นมีส่วนช่วยในให้ขนาดของมิติจาโคเบียนเมทริกลดลง ซึ่งจากผลของตัวแปรต่างๆ ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 นั้นเป็นค่าผลลัพธ์จากการหาค่าเหมาะสมส่งผลต่อโครงสร้างของระบบที่พิจารณาโดยตรง เป็นการแสดงให้เห็นถึงสายการไหลของการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของระบบนั้นๆ โดยในส่วนของโครงสร้างที่หายไปคือบริเวณที่ค่าของตัวแปรนั้นๆ เป็นศูนย์ สังเกตค่าของตัวแปรได้จากตารางแสดงค่าตัวแปร

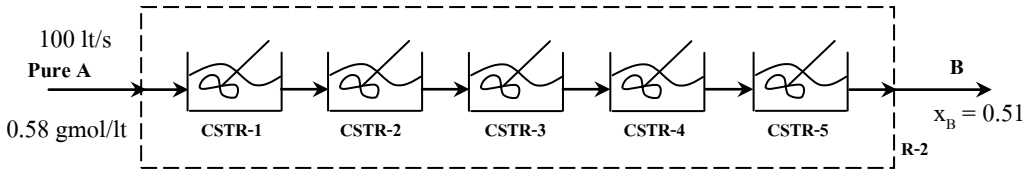
5.3.1 อภิปรายผลการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

จากระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์โครงสร้างของระบบเดิมตามรูปที่ 4.1 นั้น เมื่อทำการสังเคราะห์ระบบโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์แล้วนั้น ทำให้รูปแบบโครงสร้างของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ในรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าจากโครงสร้างระบบเดิมที่มีการแยกสายการไหลของสารตั้งต้นไปยังเครื่องปฏิกรณ์ R-1 กับ R-2 นั้น ได้หายไปเหลือเพียงการไหลเข้าของสารตั้งต้นไปยังเครื่องปฏิกรณ์ R-2 เท่านั้น โดยในส่วนนี้มีตัวแปรที่หายไปคือ F_1, F_3, F_4, F_5 และ F_6 จึงส่งผลให้ตัวแปร F_7,

F_8, F_9, F_{10}, F_{11}, F_{12} และ F_{13} หายไปจากโครงสร้างของระบบด้วย ซึ่งจากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรเหล่านี้เข้าใกล้ศูนย์มาก จนสามารถถือได้ว่าไม่มีการไหลผ่านบริเวณดังกล่าว และในสายของการกระจายการป้อนกลับไปยังอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องนั้นก็มีค่าของตัวแปรน้อยมากเช่นเดียวกัน จึงทำให้สายกระแสการไหลของตัวแปร F_{24}, F_{25}, F_{26}, F_{27}, F_{28} และ F_{29} หายไป ดังนั้นจึงได้โครงสร้างของการทำปฏิกิริยาของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมของระบบนี้ที่มีการทำปฏิกิริยาผ่านอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องจำนวน 5 เครื่อง และได้ผลการหาค่าเหมาะสมที่มากที่สุดของ x_B เท่ากับ 0.51



ก)

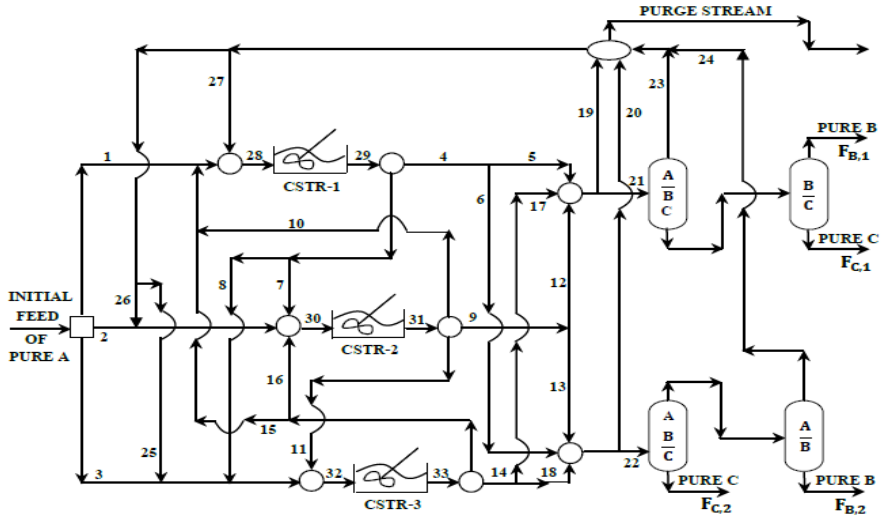


ข)

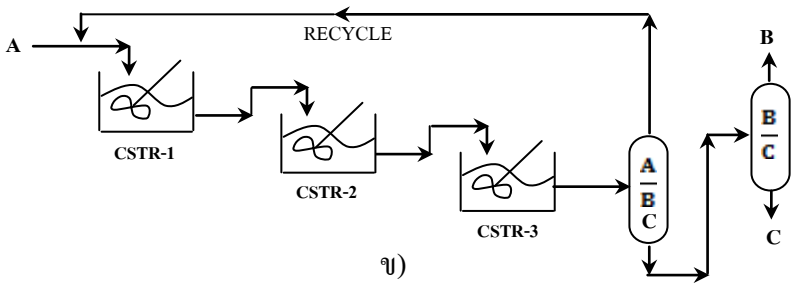
รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์
ก) แสดงระบบโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย, ข) รูปแบบโครงสร้างจากผลงานวิจัย

5.3.2 อภิปรายผลการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

จากระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ โครงสร้างของระบบเดิมตามรูปที่ 4.2 นั้น เมื่อทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลปเพื่อหาค่าความเหมาะสมที่สุดของปัญหาการสังเคราะห์ระบบโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์จากงานวิจัยนี้แล้วนั้น ทำให้รูปแบบโครงสร้างของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ในรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าจากโครงสร้างของระบบที่มีการแยกสายการไหลของสารตั้งต้นไปยังเครื่องปฏิกรณ์ CSTR-1, CSTR-2 กับ CSTR-3 นั้น เมื่อนำค่าของตัวแปรที่ได้จากผลการหาค่าเหมาะสมตามตารางที่ 5.2 นั้นทำให้การป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบมีเพียงการไหลเข้าของสารตั้งต้นไปยังเครื่องปฏิกรณ์ CSTR-1 เท่านั้น ดังนั้นการตัวแปรที่หายไปคือ F_2 และ F_3



ก)



ข)

รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ก) แสดงระบบโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย, ข) รูปแบบโครงสร้างจากผลงานวิจัย

ซึ่งจากตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรที่เข้าใกล้ศูนย์มาก สามารถถือได้ว่าไม่มีการไหลผ่านบริเวณดังกล่าว ระบบนี้มีเพียงสายการไหลต่อกันเป็นอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์ CSTR-1, CSTR-2 และ CSTR-3 และมีใช้อุปกรณ์การแยกสาร 2 เครื่อง คือ A/BC กับ B/C และมีการป้อนกลับสารตั้งต้นไปยังเครื่องปฏิกรณ์ CSTR-1 ดังนั้นจึงได้โครงสร้างของการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของระบบนี้ดังรูปที่ 5.2 และได้ผลการหาค่าเหมาะสมที่มากที่สุดของผลกำไรรายปีเท่ากับ 28.7 ล้านเหรียญสหรัฐต่อปี

โดยจากผลการหาค่าความเหมาะสมของระบบปัญหาเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองปัญหาข้างต้นนี้ สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองสอดคล้องกับความน่าจะเป็นในด้านของความเหมาะสมของระบบที่ควรจะเป็น ซึ่งจะเห็นว่าการต่อกันของเครื่องปฏิกรณ์แบบอนุกรมจะส่งผลให้ได้ค่าคอนเวอร์ชันของสารผลิตภัณฑ์ที่มากกว่าการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบขนาน และทางด้านของการเลือกสายการไหลไปยังหอกลั่นเพื่อทำการกลั่นแยกสารนั้นจะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการพิจารณาในเรื่องของค่าใช้จ่ายในกระบวนการแล้ว หอกลั่นที่ทำการกลั่นแยกสาร A ออกจากสาร B กับ C ทำได้ง่ายกว่าและประหยัดว่าการใช้หอกลั่นซึ่งกลั่นแยกสาร AB ออกจาก C เพราะต้องมีการกลั่นแยก A อีกหนึ่งครั้ง ถึงจะสามารถนำสาร A ป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการได้ จากผลการวิเคราะห์นี้ทำให้เห็นว่าทั้งการประมวลผลโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์และการพิจารณาตามหลักทางจลน์ศาสตร์มีความสอดคล้องซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถนำระเบียบวิธีนี้ไปใช้ในการสังเคราะห์ระบบอื่นๆ เพื่อหาค่าความเหมาะสมต่อไปได้

บทที่ 6
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวอย่างการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ซึ่งปฏิบัติงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่โดยมีการเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ปฏิกิริยาสำหรับตัวอย่างแรกเป็นปฏิกิริยา Elementary reaction และสำหรับตัวอย่างที่สองเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ภายในระบบประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง ในส่วนของอุปกรณ์แยกสารใช้หอกลั่นในการพิจารณากลั่นแยกสาร ซึ่งได้ทำการพิจารณาหาค่าความเหมาะสมที่สุดของระบบ ทั้งในด้านของรูปแบบโครงสร้างของกระแสการไหลทำปฏิกิริยาและหาค่าเหมาะสมที่สุดของประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เช่น ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่มากที่สุดและผลกำไรที่มากที่สุดต่อปีของการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับตามลำดับ

โดยระเบียบวิธีที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้คือการใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ ซึ่งอาศัยหลักการ Dominance-based selection ในขั้นตอนของการเลือกคำตอบหรือสายพันธุ์ที่ดีกว่าร่วมกับหลักการ Repaired algorithm ซึ่งใช้ในการจัดการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ และเพิ่มเติมหลักการ Relaxation เข้าไปเพื่อเป็นตัวช่วยลดจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณลง อีกทั้งเนื่องจากระบบปัญหาทั้งสองเป็นปัญหาขนาดใหญ่มีจำนวนตัวแปรและจำนวนสมการค่อนข้างมาก จึงทำให้การหาคำตอบจากการสุ่มเป็นไปได้ยากและช้า ทางงานวิจัยนี้จึงได้มีการ Reformulate สมการเงื่อนไขร่วมด้วยเพื่อช่วยให้การหาคำตอบเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น จากการนำหลักการเหล่านี้มาใช้ในระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อสังเคราะห์ปัญหาดังกล่าวข้างต้นนั้นได้อาศัยฟังก์ชันหลายฟังก์ชันของโปรแกรมแมทแลปเพื่อการประมวลผลรหัสชุดคำสั่งของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ที่ได้กำหนดไว้

ซึ่งจากการพิจารณาการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์นี้ทำให้เห็นว่าในระบบปัญหาทั้งสองล้วนมีความยุ่งยากซับซ้อนในด้านของสมการที่เกี่ยวข้องและเงื่อนไขต่างๆมากมาย โดยการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องและอนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องจำนวน 5 เครื่องซึ่งมีลักษณะเปรียบเสมือนเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล 1 เครื่อง โดยระบบนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 91 ตัวแปร 73 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints) และ14 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายน้อยกว่าเท่ากับ

(Inequality constraints) ซึ่งจำนวนตัวแปรและจำนวนสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับนั้นส่งผลให้เมทริกที่นำไปพิจารณาในระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ค่อนข้างมีขนาดใหญ่ จึงทำให้เวลาในการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลปมีความต้องการจำนวนฟังก์ชันในการคำนวณค่อนข้างมากและใช้เวลาพอสมควรในการหาผลลัพธ์ ดังนั้นในขั้นตอนของการจัดรูปสมการเพื่อสร้างเป็นจาโคเบียนเมทริกนั้น ทางงานวิจัยนี้ได้ทำการแทนค่าตัวแปรลงในสมการที่แสดงค่าเพื่อลดจำนวนตัวแปรและจำนวนสมการในการสร้างเมทริก เพื่อให้มิติของปัญหามีขนาดเล็กลง การแก้ไขปัญหาหรือการประมวลผลโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ซึ่งจากระบบปัญหาเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์นั้นสามารถลดจำนวนสมการได้ 25 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints) 25 ตัวแปร ดังนั้นจำนวนของตัวแปรและสมการที่เหลือคือ 66 ตัวแปร 48 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints) และ14 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายน้อยกว่าเท่ากับ (Inequality constraints) สำหรับการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องจำนวน 3 เครื่องที่ได้ทำการพิจารณาในทุกทุกความเป็นไปได้ของเส้นทางกระแสการไหลภายในระบบและทำการพิจารณาการแยกสารโดยใช้หอกลั่นทั้งหมด 4 หอกลั่นเพื่อทำการแยกสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและแยกสารตั้งต้นออกเพื่อป้อนกลับเข้าไปยังระบบเพื่อทำปฏิกิริยาใหม่ อีกทั้งยังพิจารณาค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่อหนึ่งปี โดยในระบบนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในระบบทั้งสิ้น 67 ตัวแปร 47 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints) และ10 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายน้อยกว่าเท่ากับ (Inequality constraints) เมื่อทำการปรับรูปสมการเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อสร้างจาโคเบียนเมทริกใหม่แล้วนั้น สามารถลดจำนวนตัวแปรและจำนวนสมการเงื่อนไข(Equality constraints) ได้ทั้งสิ้น 21 ตัวแปร 21 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints) ดังนั้นจึงมีสมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints) และตัวแปรที่ใช้ในการประมวลผลในระบบ 46 ตัวแปร 26 สมการเงื่อนไขที่มีเครื่องหมายเท่ากับ(Equality constraints)

ผลการวิจัยจากโปรแกรมแมทแลปโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของการสังเคราะห์ระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ แสดงออกมาในค่าของตัวแปร, ค่าของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าของจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณ สำหรับระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งผลการคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดของปริมาณที่มากที่สุดของ X_B ได้เท่ากับ 0.51 โดยจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณเท่ากับ 501,912 และสำหรับระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับซึ่งผลการคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดของผลกำไรที่มากที่สุดต่อปีเท่ากับ 28.7 ล้าน

เหรียญสหรัฐต่อปี โดยจำนวนฟังก์ชันที่ต้องการในการคำนวณของปัญหานี้เท่ากับ 2,949,209 ซึ่งผลการสังเคราะห์ปัญหานี้แสดงให้เห็นว่าระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์นี้สามารถจัดการแก้ไขปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาทั้งสองระบบนี้ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนของรูปแบบปัญหาได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ Fmincon หรือ GADs ในการประมวลผลหาค่าเหมาะสมที่สุดนี้ เนื่องจากความยุ่งยากซับซ้อนของปัญหา ตัวแปรในการคำนวณและสมการที่เกี่ยวข้องมีจำนวนมาก มิติของปัญหามีขนาดใหญ่จึงทำให้ไม่สามารถแก้ปัญหาของทั้งสองระบบนี้ได้

จากผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการประยุกต์ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์ในงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาการสังเคราะห์เครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์และการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ ที่มีความซับซ้อนและมีเงื่อนไขได้ และการ Reformulation สามารถช่วยลดขนาดของปัญหาได้ทำให้หาคำตอบได้ง่ายขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการแก้ปัญหาการสังเคราะห์ระบบเครื่องปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์นั้น เทคนิควิธีในการหาค่าพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ของงานวิจัยนี้ใช้วิธี Random sampling ซึ่งในการหาค่าคำตอบเริ่มต้นนี้ยังมีอีกหลายเทคนิคเช่น Latin hypercube sampling (LHS), Faure sequence sampling (FSS) และ Hammersley sequence sampling (HSS) เป็นต้น

2) ระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีที่ศึกษาการปฏิบัติงานภายใต้ระบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal operation) ซึ่งอาจจะทำการศึกษาการนำระเบียบวิธีนี้กับระบบปฏิบัติงานอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal operation) เพื่อศึกษาผลการหาค่าความเหมาะสมของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์เพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

[1] Floudas, C.A. Nonlinear and Mixed-Integer Optimization Fundamentals and Applications. Newyork : Oxford University Press, 1995.

[2] Kokossis, A.C., and Floudas, C.A. Opimization of complex reactor networks - I. Isothermal operation. Computer Engineering Science 45 (1990) : 595-624.

[3] Kokossis, A.C., and Floudas, C.A. Synthesis of isothermal reactor-separator-recycle systems. Computer Engineering Science 46 (1991) : 1361-1383.

[4] Supakit, N. Evolutionary computation between Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization. Journal of Information Science and Technology 2 (2011) : 13-22.

[5] Kheawhom, S. Efficient constraint handling scheme for differential evolutionary algorithm in solving chemical engineering optimization problem. Journal of Industrial and Engineering Chemistry Res.16 (2010) : 620-628.

[6] Zhang, H., and Rangaiah, G.P. An efficient constraint handling method with integrated differential evolution for numerical and engineering optimization. Computers and Chemical Engineering Res.37 (2012) : 74-88.

[7] อนุชา ทิพยวัลย์. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีชนิดปรับค่าเองได้ โดยใช้เจเนติกอัลกอริธึมประยุกต์ ในกระบวนการปรับค่าพีเอชให้เป็นกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[8] Clune, J., Ofria, C., and Pennock, R.T. How a generative encoding fares as problem-regularity decreases. Lecture Notes in Computer Science 5199 (2008) : 358–367.

[9] Hornby, G.S., and Pollack, J.B. Creating high-level components with a generative representation for body-brain evolution. Journal Artificial Life, 8 (2002) : 223–246.

[10] Clune, J., Beckmann, B.E., Ofria, C., and Pennock, R.T. Evolving coordinated quadruped gaits with the HyperNEAT generative encoding. IEEE conference publications (2009) : 2764-2771.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

คำสั่งการคำนวณค่าเหมาะสมที่สุดของระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์โดยโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 1 ชุดรหัสคำสั่งการคำนวณค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีความแตกต่างเชิงวิวัฒน์

```
function TDRDE(test, numberseed)

startseed = numberseed;
test = test - 1;
for file = 1:1

            %%%%%%%%% print parameter to excel %%%%%%%%

test = test + 1;
strtest = num2str(test);
filename = strcat('result',strtest,'.xlsx');
sheet = 0;
numberseed = startseed;
for runtime = 1:1
clc;

            %%%%%%%%%% Setup values of problem %%%%%%%%

[eq, ineq, v, upper, lower, intv] = testProblem(test);

            %%%%%%%% update test sheet and line %%%%%%%%

sheet = sheet + 1;
line = 1;

     %%%%% Setup population and Generation and repair loop%%%%
             %%%%%%%% and localsearh parameter %%%%%%%

np = 500;
Gen = 5000;
repair = 100;
e = 0.0001;
LR = 10;
locallearnrate = 0.00001;
printOk = 0;
stopGen = 10000;

              %%%%%%%%%%%%% Set random seed %%%%%%%%%%

fid = fopen('seed.txt');
seed = fscanf(fid,'%f',inf);
fclose(fid);
seed = seed(numberseed)*1.0e+008;
rand('seed',seed)
numberseed = numberseed + 1;

          %%%% Setup value5 of Differential Evolution %%%%

evaluate = 0;
evaluateEq = 0;
```

```
F = 0.85;
CR = 0.8;
triMu = 0.05;

                %%%%%%%%%%% Matrix Set %%%%%%%%%%

X = zeros(np,v);
V = zeros(np,v);
U = zeros(np,v);
H = zeros(eq,1);
IN = zeros(ineq,1);
sumX = zeros(np,1);
sumU = zeros(np,1);
Cnew = inf*ones(np,1);
Cold = inf*ones(np,1);

             %%%%%%%%%% Stop Criteria Value %%%%%%%%%

sameminC = zeros(np,1);
mainSameminC = 0;
stopCriteria = 0.01;

             %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

maxC = -inf;
minC = inf;
conBoolVector = zeros(np,1);
converge = 0;
roundToleranceFixed = 0;
boolround = 0;
format ('long');

            %%%%%%%% show status before start DE %%%%%%

test
sheet
           '------------------------------'

        %%%%%%%%%%%%%% Full Loop of DE algorithm %%%%%%%%%%%

for G = 1:Gen

       %%%%% initial p %opulation X & relaxConstraint %%%%%

if G == 1

[X, Cold, relaxConstraint, evaluate, evaluateEq, sumX] =
initialpopulation(X, Cold, H, IN, sumX, ineq, np, v, upper, lower,
intv, evaluate, evaluateEq, test);

Cnew = Cold;
minCold = min(Cold);
else
minCold = min(Cold);
end

                %%%%%%%% writing data to xls %%%%%%%
```

```
if printOk == 1
'OKOKOKOK'
A = [G;maxC;minC;relaxConstraint;evaluate;evaluateEq];
line = writetoxls(A,filename,sheet,line);
end

%%%mutation V&crossover U&repair U&chooseXnewgen&relaxconstraint%%%

V = mutation(X, V, Cold, triMu, F, np, v, intv, conBoolVector);
U = crossover(X, V, U, CR, np, v, upper, lower, conBoolVector);

[U, evaluateEq, sumU] = repairAlgorithm(U, H, IN, sumU, eq, ineq,
np, v, upper, lower, intv, relaxConstraint, repair, evaluateEq,
conBoolVector, test);

[X, Cnew, evaluate, sumX] = chooseXnewgen(X, U, Cnew, sumX, sumU,
np, evaluate, relaxConstraint, test);

[X, Cnew, conBoolVector, boolround, roundToleranceFixed, converge,
evaluate, evaluateEq, relaxConstraint, sameminC, mainSameminC,
minCold, maxC, minC] = stopcriteria(X, np, Cold, Cnew,
locallearnrate, H, IN, ineq, sumX, evaluate, evaluateEq, converge,
minCold, minC, maxC, stopCriteria, sameminC, mainSameminC,
relaxConstraint, e, stopGen, roundToleranceFixed, conBoolVector,
boolround, G, LR, test, lower, upper, v);

Cold = Cnew;

             %%%%%% show status while running DE %%%%%%

Generation = G
[minimumC, indexMatrix] = min(Cold)
totalConstraintViolation = sumX(indexMatrix)
totalevaluate = evaluate + evaluateEq

                '------------------------------'

             %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if converge == 1
      break;
   end
end

             %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if printOk == 1
[minCost,indexMatrix] = min(Cnew);
A = [roundToleranceFixed;evaluate;evaluateEq;minCost];
line = writetoxls(A,filename,sheet,line);

              %%%%%%% print the best vector X %%%%%%%

A = X(indexMatrix,:);
line = writetoxls(A,filename,sheet,line);
[H, IN, evaluateEq] = violationMatrix(X(indexMatrix,:), H, IN,
```

```
ineq, 1, evaluateEq, test);

%%%%% print equality constraint violation of the best vector X %%%%

A = H';
line = writetoxls(A,filename,sheet,line);

%%% print inequality constraint violation of the best vector X %%%%

 if isempty(IN) == 1
   A = ['_'];
 else A = IN';
end
line = writetoxls(A,filename,sheet,line);
end

[minCost,indexMatrix] = min(Cnew);
bestsolution=X(indexMatrix,:)
minCost

                  %%%%%%%%%%% End loop %%%%%%%%%%%%

    end
end

upperb=upper;
save upperb;
lowerb=lower;
save lowerb;
save bestsolution;
save v;
testp=test;
save testp;
clear all;
[X,F]=localsearchFmincon
end
```

ตารางที่ 2 ชุดคำสั่งขั้นตอน Initial population

```
function [X, C, relaxConstraint, evaluate, evaluateEq, sumX] =
initialpopulation(X, C, H, IN, sumX, ineq, np, v, upper, lower,
intv, evaluate, evaluateEq, test)
    for i = 1:np
        for j = 1:v
            X(i,j) = (upper(j)-lower(j)) * rand() + lower(j);
            if intv(j) == 1
                if X(j) <= 0.5
                    X(j) = 0;
                else X(j) = 1;
                end
            end
        end
        [C(i,1),evaluate] = objectivefunction(X(i,:), evaluate,
test);
        [sumX(i,1), evaluateEq] = sumviolation(X(i,:), H, IN, ineq,
evaluateEq, test);
```

```
    end
    relaxConstraint = 0.0001;

end
```

ตารางที่ 3 ชุดคำสั่งขั้นตอน Crossover

```
function U = crossover(X, V, U, CR, np, v, upper, lower,
conBoolVector)
    for i = 1:np
        if conBoolVector == 1
        else
            for j = 1:v
                if rand() < CR
                    U(i, j) = V(i, j);
                    if U(i, j) > upper(j)
                        U(i, j) = upper(j);
                    end
                    if U(i, j) < lower(j)
                        U(i, j) = lower(j);
                    end
                else
                    U(i, j) = X(i, j);
                end
            end
        end
    end
end
```

ตารางที่ 4 ชุดคำสั่งขั้นตอน Mutation

```
function V = mutation(X, V, C, triMu, F, np, v, intv, conBoolVector)
    for i = 1:np
        if conBoolVector(i) == 1
        else
            j = 1;
            while j < 2
                randX = sort(ceil(np*rand(1,3)));
                if randX(1) < randX(2) && randX(2) < randX(3)
                    j = j + 1 ;
                end
            end
            if rand() > triMu
                V(i,:) = X(randX(3),:) - F*(X(randX(2),:) -
X(randX(1),:));
            else
                costrandX(1) = C(randX(1),1);
                costrandX(2) = C(randX(2),1);
                costrandX(3) = C(randX(3),1);
                p(1) =
abs(costrandX(1))/(abs(costrandX(1))+abs(costrandX(2))+abs(costrandX
(3)));
                p(2) =
abs(costrandX(2))/(abs(costrandX(1))+abs(costrandX(2))+abs(costrandX
(3)));
                p(3) =
```

```
abs(costrandX(3))/(abs(costrandX(1))+abs(costrandX(2))+abs(costrandX
(3)));
                V(i,:) =
(X(randX(1),:)+X(randX(2),:)+X(randX(3),:))/3+(p(2)-
p(1))*(X(randX(1),:)-X(randX(2),:))+(p(3)-p(2))*(X(randX(2),:)-
X(randX(3),:))+(p(1)-p(3))*(X(randX(3),:)-X(randX(1),:));
            end
       %%% checking some test problem have binary variable? %%%
            for k = 1:v
                if intv(k) == 1
                    if V(i,k) <= 0.5
                        V(i,k) = 0;
                    else V(i,k) = 1;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

ตารางที่ 5 ชุดคำสั่ง Candidate variable

```
function [X, C, evaluate, sumX] = candidatevariable(X, U, C, sumX,
sumU, evaluate, relaxConstraint, test)
    if (sumX > relaxConstraint) || (sumU > relaxConstraint)
        if sumU <= relaxConstraint
            X = U;
            sumX = sumU;
            [C, evaluate] = objectivefunction(U, evaluate, test);
        elseif sumX <= relaxConstraint
%             [C, evaluate] = objectivefunction(X, evaluate, test);
        elseif sumU < sumX
            X = U;
            sumX = sumU;
        else
        end
    else
        [costU, evaluate] = objectivefunction(U, evaluate, test);
        if costX <= costU
            C = costX;
        else
            X = U;
            sumX = sumU;
            C = costU;
        end
    end
end
```

ตารางที่ 6 ชุดคำสั่งการเลือก x ในรุ่นการคำนวณใหม่

```
function [X, C, evaluate, sumX] = chooseXnewgen(X, U, C, sumX,
sumU, np, evaluate, relaxConstraint, test)
    for i = 1:np
        if sumU(i,1) > -inf                     %against case if
sumU = NaN
            if (sumX(i,1) > relaxConstraint) || (sumU(i,1) >
```

```
relaxConstraint)
                if sumU(i,1) <= relaxConstraint
                    sumX(i,1) = sumU(i,1);
                    X(i,:) = U(i,:);
                    [C(i,1), evaluate] = objectivefunction(U(i,:),
evaluate, test);
                elseif sumX(i,1) <= relaxConstraint
%                   [C(i,1), evaluate] = objectivefunction(X(i,:),
evaluate, test);
                else
                    if sumU(i,1) < sumX(i,1)
                        sumX(i,1) = sumU(i,1);
                        X(i,:) = U(i,:);
                        C(i,1) = max(C);
                    end
                end
            else
                costX = C(i,1);
                [costU, evaluate] = objectivefunction(U(i,:),
evaluate, test);
                if costX <= costU
                    C(i,1) = costX;
                else
                    sumX(i,1) = sumU(i,1);
                    X(i,:) = U(i,:);
                    C(i,1) = costU;
                end
            end
        end
    end
end
```

ตารางที่ 7 ชุดคำสั่ง Repair algorithm

```
function [X, evaluateEq, sumX] = repairAlgorithm(X, H, IN, sumX, eq,
ineq, np, v, upper, lower, intv, relaxConstraint, repair,
evaluateEq, conBoolVector, test)
    X = X';
    for i = 1:np
        r = 0;
        [H, IN, evaluateEq] = violationMatrix(X(:,i), H, IN, ineq,
1, evaluateEq, test);
        sumH = sum(abs(H));
        sumIN = sum(abs(IN));
        sumX(i,1) = sumH + sumIN;
        if sumX(i,1) > relaxConstraint
            for j = 1:(repair + r)
                if(sumH <= relaxConstraint)||(conBoolVector(np) ==
1)
                    break;
                end

         %%%%%%%%%% set degree of freedom to zero %%%%%%%%%%

                xc = zeros(eq,1);
                ix = zeros(v,1);
                k = 0;
```

```
                while k < eq
                    d = ceil(v*rand());
                    if ix(d)==0
                        xc(k+1) = d;
                        ix(d) = 1;
                        k = k + 1;
                    end
                end
                xc = sort(xc);
                J = jacobianMatrix(X(:,i), test);
                JJ = J(:,xc);
          %%%%%%% checking for against singular matrix %%%%%%%
                if det(JJ) == 0
                    r = r+1;
                    if r >= 100
                        break;
                    end
                    continue;
                end
                X(xc,i) = X(xc,i) - (inv(JJ)*H);
                for k = 1:v
                    if X(k,i) > upper(k)
                        X(k,i) = upper(k);
                    end
                    if X(k,i) < lower(k)
                        X(k,i) = lower(k);
                    end
                    if intv(k) == 1
                        if X(k,i) <= 0.5
                            X(k,i) = 0;
                        else X(k,i) = 1;
                        end
                    end
                end
[H, IN, evaluateEq] = violationMatrix(X(:,i), H, IN, ineq, 1,
evaluateEq, test);

                sumH = sum(abs(H));
                sumIN = sum(abs(IN));
                sumX(i,1) = sumH + sumIN;
            end
        end
    end
    X = X';
end
```

ตารางที่ 8 ชุดคำสั่ง Violation

```
function [sumVio, evaluateEq] = sumviolation(X, H, IN, ineq,
evaluateEq, test)
    [H, IN, evaluateEq] = violationMatrix(X, H, IN, ineq, 1,
evaluateEq, test);
    sumH = sum(abs(H));
    sumIN = sum(abs(IN));
    sumVio = sumH + sumIN;
end
```

ตารางที่ 9 จาโคเบียนเมทริกเงื่อนไขของปัญหา

```
function J = jacobianMatrix(X, test)

    %%%%%%%%%% test problem 1 %%%%%%%%%%
    if test == 1
%F1=X(1),F2=X(2),F3=X(3),F4=X(4),F5=X(5),F9=X(6),F10=X(7)
%F11=X(8),F12=X(9),F13=X(10),F14=X(11),F16=X(12),F18=X(13)
%F20=X(14),F23=X(15),F24=X(16),F25=X(17),F26=X(18),F27=X(19)
%F28=X(20),F29=X(21),V1=X(22),Vc=X(23),X7a=X(24),X7b=X(25)
%X7c=X(26),X8a=X(27),X8b=X(28),X8c=X(29),X14a=X(30),X14b=X(31)
%X14c=X(32),X15a=X(33),X15b=X(34),X15c=X(35),X16a=X(36)
%X16b=X(37),X16c=X(38),X17a=X(39),X17b=X(40),X17c=X(41)
%X18a=X(42),X18b=X(43),X18c=X(44),X19a=X(45),X19b=X(46)
%X19c=X(47),X20a=X(48),X20b=X(49),X20c=X(50),X21a=X(51)
%X21b=X(52),X21c=X(53),X22a=X(54),X22b=X(55),X22c=X(56)
%X23a=X(57),X23b=X(58),X23c=X(59),y1=X(60),y2=X(61)
%z1=X(62),z2=X(63),z3=X(64),z4=X(65),z5=X(66)

% M1=X(1)-X(25)
      M1 = [0.58,0,0,0,0,-X(24),-X(24),-X(24),-X(24),-X(24),0,0,0,
      0,X(24),X(57),0,0,0,0,0,0,0,-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+
      X(10)),0;%1
      0,0,0,0,0,-X(25),-X(25),-X(25),-X(25),-X(25),0,0,0,0,X(25),
      X(58),0,0,0,0,0,0,0,0,-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10));
      0,0,0,0,0,-X(26),-X(26),-X(26),-X(26),-X(26),0,0,0,0,X(26),
      X(59),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%3
      0,0,0,0,0,-(1-X(24)-X(25)-X(26)),-(1-X(24)-X(25)-X(26)),-(1-
      X(24)-X(25)-X(26)),-(1-X(24)-X(25)-X(26)),-(1-X(24)-X(25)-
      X(26)),0,0,0,0,(1-X(24)-X(25)-X(26)),(1-X(57)-X(58)-
      X(59)),0,0,0,0,0,0,0,(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),
      (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10));%4
      0,0.58,0,0,0,X(27),0,0,0,0,-X(30),0,0,0,0,0,X(57),0,0,0,0,0,
      0,0,0;%5
      0,0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,0,-X(31),0,0,0,0,0,X(58),0,0,0,0,0,0,0,
      0;%6
      0,0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,0,-X(32),0,0,0,0,0,X(59),0,0,0,0,0,0,0,
      0;%7
      0,0,0,0,0,0,1-X(27)-X(28)-X(29),0,0,0,0,-(1-X(30)-X(31)-X(32)),
      0,0,0,0,0,(1-X(57)-X(58)-X(59)),0,0,0,0,0,0,0,0;%8
      0,0,0.58,0,0,0,X(27),0,0,0,X(33),-X(36),0,0,0,0,0,X(57),0,0,
      0,0,0,0,0;%9
      0,0,0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,X(34),-X(37),0,0,0,0,0,X(58),0,0,0,0,
      0,0,0;%10
      0,0,0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,X(35),-X(38),0,0,0,0,0,X(59),0,0,0,0,
      0,0,0;%11
      0,0,0,0,0,0,0,(1-X(27)-X(28)-X(29)),0,0,0,(1-X(33)-X(34)-X(35))
      ,-(1-X(36)-X(37)-X(38)),0,0,0,0,0,(1-X(57)-X(58)-X(59)),0,0,
      0,0,0,0,0,0;%12
      0,0,0,0.58,0,0,0,X(27),0,0,0,X(39),-X(42),0,0,0,0,0,X(57),0,
      0,0,0,0,0,0;%13
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,X(40),-X(43),0,0,0,0,0,X(58),0,0,0,
      0,0,0;%14
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,X(41),-X(44),0,0,0,0,0,X(59),0,0,0,
      0,0,0;%15
      0,0,0,0,0,0,0,0,(1-X(27)-X(28)-X(29)),0,0,0,(1-X(39)-X(40)-
      X(41)),-(1-X(42)-X(43)-X(44)),0,0,0,0,0,(1-X(57)-X(58)-
      X(59)),0,0,0,0,0,0;%16
```

```
0,0,0,0,0.58,0,0,0,X(27),0,0,0,X(45),-X(48),0,0,0,0,0,X(57),
0,0,0,0,0;%17
0,0,0,0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,X(46),-X(49),0,0,0,0,0,X(58),0,0,
0,0,0;%18
0,0,0,0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,X(47),-X(50),0,0,0,0,0,X(59),0,0,
0,0,0;%19
0,0,0,0,0,0,0,0,(1-X(27)-X(28)-X(29)),0,0,0,(1-X(45)-X(46)-
X(47)),-(1-X(48)-X(49)-X(50)),0,0,0,0,0,(1-X(57)-X(58)-
X(59)),0,0,0,0,0;%20
-0.58,-0.58,-0.58,-0.58,-0.58,0,0,0,0,X(27),0,0,0,X(51),-
X(54),-X(54),-X(54),-X(54),-X(54),-X(54),X(57)-
X(54),0,0,0,0;%21
0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,X(52),-X(55),-X(55),-X(55),-
X(55),-X(55),-X(55),X(58)-X(55),0,0,0,0;%22
0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,X(53),-X(56),-X(56),-X(56),-
X(56),-X(56),-X(56),X(59)-X(56),0,0,0,0;%23
0,0,0,0,0,0,0,0,0,(1-X(27)-X(28)-X(29)),0,0,0,(1-X(51)-X(52)-
X(53)),-(1-X(54)-X(55)-X(56)),-(1-X(54)-X(55)-X(56)),-(1-
X(54)-X(55)-X(56)),-(1-X(54)-X(55)-X(56)),-(1-X(54)-X(55)-
X(56)),-(1-X(54)-X(55)-X(56)),X(54)+X(55)+X(56)-X(57)-X(58)-
X(59),0,0,0,0;%24
0,0,0,0,0,(X(24)-X(27)),(X(24)-X(27)),(X(24)-X(27)),(X(24)-
X(27)),(X(24)-X(27)),0,0,0,0,-(X(24)-X(27)),0,0,0,0,0,0,(-
10*X(27)-X(27)^2),0,(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),
0;%25
0,0,0,0,0,(X(25)-X(28)),(X(25)-X(28)),(X(25)-X(28)),(X(25)-
X(28)),(X(25)-X(28)),0,0,0,0,-(X(25)-X(28)),0,0,0,0,0,0,
(10*X(27)-X(28)),0,0,(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))
;%26
0,0,0,0,0,(X(26)-X(29)),(X(26)-X(29)),(X(26)-X(29)),(X(26)-
X(29)),(X(26)-X(29)),0,0,0,0,-(X(26)-X(29)),0,0,0,0,0,0,
X(28),0,0,0;%27
0,0,0,0,0,(X(27)+X(28)+X(29)-X(24)-X(25)-X(26)),(X(27)+X(28)+
X(29)-X(24)-X(25)-X(26)),(X(27)+X(28)+X(29)-X(24)-X(25)-
X(26)),(X(27)+X(28)+X(29)-X(24)-X(25)-X(26)),(X(27)+X(28)+
X(29)-X(24)-X(25)-X(26)),0,0,0,0,-(X(27)+X(28)+X(29)-X(24)-
X(25)-X(26)),0,0,0,0,0,0,X(27)^2,0,-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)
+X(9)+X(10)),-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10));%28
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(30)-X(33)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(-
10*X(33)-X(33)^2),0,0;%29
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(31)-X(34)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
(10*X(33)-X(34)),0,0;%30
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(32)-X(35)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
X(34),0,0;%31
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(33)+X(34)+X(35)-X(30)-X(31)-X(32)),
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(33)^2,0,0;%32
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(36)-X(39)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
(-10*X(39)-X(39)^2),0,0;%33
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(37)-X(40)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
(10*X(39)-X(40)),0,0;%34
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(38)-X(41)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
X(40),0,0;%35
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(39)+X(40)+X(41)-X(36)-X(37)-X(38)),
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(39)^2,0,0;%36
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(42)-X(45)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,
(-10*X(45)-X(45)^2),0,0;%37
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(43)-X(46)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,
(10*X(45)-X(46)),0,0;%38
```

```
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(44)-X(47)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       X(46),0,0;%39
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(45)+X(46)+X(47)-X(42)-X(43)-X(44))
       ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(45)^2,0,0;%40
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(48)-X(51)),0,0,0,0,0,0,0,0,(-
       10*X(51)-X(51)^2),0,0;%41
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(49)-X(52)),0,0,0,0,0,0,0,0,
       (10*X(51)-X(52)),0,0;%42
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(50)-X(53)),0,0,0,0,0,0,0,0,
       X(52),0,0;%43
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(51)+X(52)+X(53)-X(48)-X(49)-
       X(50)),0,0,0,0,0,0,0,0,X(51)^2,0,0;%44
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(54)-X(57)),(X(54)-X(57)),
       (X(54)-X(57)),(X(54)-X(57)),(X(54)-X(57)),(X(54)-X(57)),
       (X(54)-X(57)),0,(-10*X(57)-X(57)^2),0,0;%45
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(55)-X(58)),(X(55)-X(58)),
       (X(55)-X(58)),(X(55)-X(58)),(X(55)-X(58)),(X(55)-X(58)),
       (X(55)-X(58)),0,(10*X(57)-X(58)),0,0;%46
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(56)-X(59)),(X(56)-X(59)),
       (X(56)-X(59)),(X(56)-X(59)),(X(56)-X(59)),(X(56)-X(59)),
       (X(56)-X(59)),0,X(58),0,0;%47
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,(X(57)+X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-
       X(56)),(X(57)+X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-
       X(56)),(X(57)+X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-
       X(56)),(X(57)+X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-
       X(56)),(X(57)+X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-
       X(56)),(X(57)+X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-X(56)),0,X(57)^2,0,0];


%M2=X(26)-X(50)
M2 = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%1
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%2
       -(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%3
       (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%4
       0,X(6),0,0,-X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%5
       0,0,X(6),0,0,-X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%6
       0,0,0,X(6),0,0,-X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%7
       0,-X(6),-X(6),-X(6),X(11),X(11),X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,0;%8
       0,X(7),0,0,0,0,0,X(11),0,0,-X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0;%9
       0,0,X(7),0,0,0,0,0,X(11),0,0,-X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0;%10
       0,0,0,X(7),0,0,0,0,0,X(11),0,0,-X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0;%11
       0,-X(7),-X(7),-X(7),0,0,0,-X(11),-X(11),-X(11),X(12),X(12),
       X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%12
       0,X(8),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(12),0,0,-X(13),0,0,0,0,0,0,
       0;%13
       0,0,X(8),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(12),0,0,-X(13),0,0,0,0,0,
       0;%14
       0,0,0,X(8),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(12),0,0,-X(13),0,0,0,0,
       0;%15
       0,-X(8),-X(8),-X(8),0,0,0,0,0,0,0,0,0,-X(12),-X(12),-X(12),
       X(13),X(13),X(13),0,0,0,0,0,0;%16
```

```
0,X(9),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(13),0,0,-X(14),0,
0;%17
0,0,X(9),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(13),0,0,-X(14),
0;%18
0,0,0,X(9),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(13),0,0,-X(14)
;%19
0,-X(9),-X(9),-X(9),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-X(13),-
X(13),-X(13),X(14),X(14),X(14);%20
0,X(10),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%21
0,0,X(10),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%22
0,0,0,X(10),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%23
0,-X(10),-X(10),-X(10),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0;%24
0,-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))-10*X(22)-2*X(22)*
X(27),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%25
0,10*X(22),-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))-X(22),0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%26
(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),0,X(22),-(100-X(15)+
X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0;%27
-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),
(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))+2*X(22)*X(27),
(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),
(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10)),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%28
0,0,0,0,X(11),0,0,-X(11)-10*X(23)-2*X(23)*X(33),0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%29
0,0,0,0,0,X(11),0,10*X(23),-X(11)-X(23),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0;%30
0,0,0,0,0,0,X(11),0,X(23),-X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0;%31
0,0,0,0,-X(11),-X(11),-X(11),X(11)+2*X(23)*X(33),X(11),X(11),
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%32
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(12),0,0,-X(12)-10*X(23)-2*X(23)*X(39),
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%33
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(12),0,10*X(23),-X(12)-X(23),0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0;%34
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(12),0,X(23),-X(12),0,0,0,0,0,0,0,
0,0;%35
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-X(12),-X(12),-X(12),X(12)+2*X(23)*X(39),
X(12),X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%36
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(13),0,0,-X(13)-10*X(23)-
2*X(23)*X(45),0,0,0,0,0;%37
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(13),0,10*X(23),-X(13)-
X(23),0,0,0,0;%38
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(13),0,X(23),-X(13),0,
0,0;%39
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-X(13),-X(13),-X(13),
X(13)+2*X(23)*X(45),X(13),X(13),0,0,0;%40
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(14),0,0;%41
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(14),0;%42
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(14);%43
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-X(14),-X(14),
-X(14);%44
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%45
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%46
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%47
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];%48
```

```
%M3=X(51)-X(66)
M3 = [0,0,0,0,0,0,X(16),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%1
      0,0,0,0,0,0,0,X(16),0,0,0,0,0,0,0,0;%2
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(16),0,0,0,0,0,0,0;%3
      0,0,0,0,0,0,-X(16),-X(16),-X(16),0,0,0,0,0,0,0;%4
      0,0,0,0,0,0,X(17),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%5
      0,0,0,0,0,0,0,X(17),0,0,0,0,0,0,0,0;%6
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(17),0,0,0,0,0,0,0;%7
      0,0,0,0,0,0,-X(17),-X(17),-X(17),0,0,0,0,0,0,0;%8
      0,0,0,0,0,0,X(18),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%9
      0,0,0,0,0,0,0,X(18),0,0,0,0,0,0,0,0;%10
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(18),0,0,0,0,0,0,0;%11
      0,0,0,0,0,0,-X(18),-X(18),-X(18),0,0,0,0,0,0,0;%12
      0,0,0,0,0,0,X(19),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%13
      0,0,0,0,0,0,0,X(19),0,0,0,0,0,0,0,0;%14
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(19),0,0,0,0,0,0,0;%15
      0,0,0,0,0,0,-X(19),-X(19),-X(19),0,0,0,0,0,0,0;%16
      0,0,0,0,0,0,X(20),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%17
      0,0,0,0,0,0,0,X(20),0,0,0,0,0,0,0,0;%18
      0,0,0,0,0,0,0,0,X(20),0,0,0,0,0,0,0;%19
      0,0,0,0,0,0,-X(20),-X(20),-X(20),0,0,0,0,0,0,0;%20
      X(14),0,0,-(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))0,0,
      X(21),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%21
      0,X(14),0,0,-(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,
      0,X(21),0,0,0,0,0,0,0,0;%22
      0,0,X(14),0,0,-(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,
      0,X(21),0,0,0,0,0,0,0;%23
      -X(14),-X(14),-X(14),(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+
      X(21)),(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),(X(15)+X(1
      6)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),-X(21),-X(21),-X(21),0,0,0,
      0,0,0,0;%24
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%25
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%26
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%27
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%28
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%29
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%30
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%31
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%32
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%33
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%34
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%35
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%36
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%37
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%38
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%39
      0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%40
      -X(14)-10*X(23)-2*X(23)*X(51),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
      %41
      10*X(23),-X(14)-X(23),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%42
      0,X(23),-X(14),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%43
      X(14)+2*X(23)*X(51),X(14),X(14),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;%44
      0,0,0,(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,0,-(X(15)
      +X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))-10*X(23)-
      2*X(23)*X(57),0,0,0,0,0,0,0,0,0;%45
      0,0,0,0,(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,
      10*X(23),-(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))-X(23),
```

```
       0,0,0,0,0,0,0,0;%46
       0,0,0,0,0,(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,X(23)
       ,-(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,0,0,0,0,0;
       %47
       0,0,0,-(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),-(X(15)+
       X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),-(X(15)+X(16)+X(17)+
       X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)
       +X(21))+2*X(23)*X(57),(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+
       X(21)),(X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21)),0,0,0,0,0,
       0,0];%48


          J = horzcat(M1,M2,M3);
    end

  %%%%%%%%%%% test problem 2 reactor-separator-recycle %%%%%%%%%%
    if test == 2

%F1=X(1),F2=X(2),F5=X(3),F6=X(4),F7=X(5),F8=X(6),F10=X(7)
%F11=X(8),F12=X(9),F13=X(10),F15=X(11),F16=X(12),F17=X(13)
%F18=X(14),F21=X(15),F22=X(16),F25=X(17),F26=X(18)
%V1=X(19),V2=X(20),V3=X(21),X28a=X(22),X28b=X(23),X29a=X(24)
%X29b=X(25),X30a=X(26),X30b=X(27),X31a=X(28)
%X31b=X(29),X32a=X(30),X32b=X(31),X33a=X(32),X33b=X(33),X21a=X(34)
%X21b=X(35),X22a=X(36),X22b=X(37),y1=X(38),y2=X(39),y3=X(40)
%z1=X(41),z2=X(42),z3=X(43),z4=X(44),X3b=X(45),X4a=X(46)

%   M1=X1-X25

M1 = [1,0,-X(22),-X(22),-X(22),-X(22),X(28),0,0,0,X(32),0,0,0,
       X(34),X(36),-1,-1,0,0,0,-X(3)-X(4)-X(5)-X(6),0,0,0;
       0,0,-X(23),-X(23),-X(23),-X(23),X(29),0,0,0,X(33),0,0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,-X(3)-X(4)-X(5)-X(6),0,0;
       0,0,-1+X(22)+X(23),-1+X(22)+X(23),-1+X(22)+X(23),-
       1+X(22)+X(23),1-X(28)-X(29),0,0,0,1-X(32)-
       X(33),0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(3)+X(4)+X(5)+X(6),X(3)+X(4)+X(5)+
       X(6),0,0;
       0,1,0,0,X(24),0,-X(26),-X(26),-X(26),-
       X(26),0,X(32),0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,X(5),0;
       0,0,0,0,X(25),0,-X(27),-X(27),-X(27),-X(27),0,X(33),0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,X(5);
       0,0,0,0,1-X(24)-X(25),0,-1+X(26)+X(27),-1+X(26)+X(27),
       -1+X(26)+X(27),-1+X(26)+X(27),0,1-X(32)-X(33),0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0,-X(5),-X(5);
       0,0,0,0,0,X(24),0,X(28),0,0,-X(30),-X(30),-X(30),-X(30),
       1-X(34),0,1,0,0,0,0,0,0,X(6),0;
       0,0,0,0,0,X(25),0,X(29),0,0,-X(31),-X(31),-X(31),-X(31),0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(6);
       0,0,0,0,0,1-X(24)-X(25),0,1-X(28)-X(29),0,0,-1+X(30)+X(31),
       -1+X(30)+X(31),-1+X(30)+X(31),-1+X(30)+X(31),0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,-X(6),-X(6);
       0,0,X(24),0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,X(32),0,-X(34),0,0,0,0,0,0,0,
       0,X(3),0;
       0,0,X(25),0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,X(33),0,-X(35),0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,X(3);
       0,0,1-X(24)-X(25),0,0,0,0,0,1-X(28)-X(29),0,0,0,1-X(32)-X(33)
       ,0,-1+X(34)+X(35),0,0,0,0,0,0,0,0,-X(3),-X(3);
       0,0,0,X(24),0,0,0,0,0,X(28),0,0,0,X(32),0,-X(36),0,0,0,0,0,0,
```

```
       0,X(4),0;
       0,0,0,X(25),0,0,0,0,0,X(29),0,0,0,X(33),0,-X(37),0,0,0,0,0,0,
       0,0,X(4);
       0,0,0,1-X(24)-X(25),0,0,0,0,0,1-X(28)-X(29),0,0,0,1-X(32)-
       X(33),0,-1+X(36)+X(37),0,0,0,0,0,0,0,-X(4),-X(4);
       0,0,X(22)-X(24),X(22)-X(24),X(22)-X(24),X(22)-X(24),0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,-0.412*X(24),0,0,X(3)+X(4)+X(5)+X(6),0,-X(3)-
       X(4)-X(5)-X(6)-0.412*X(19),0;
       0,0,X(23)-X(25),X(23)-X(25),X(23)-X(25),X(23)-X(25),0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,0.412*X(24)-
       0.055*X(25),0,0,0,X(3)+X(4)+X(5)+X(6),0.412*X(19),-X(3)-X(4)-
       X(5)-X(6)-0.055*X(19);
       0,0,X(24)+X(25)-X(22)-X(23),X(24)+X(25)-X(22)-X(23),
       X(24)+X(25)-X(22)-X(23),X(24)+X(25)-X(22)-
       X(23),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0.055*X(25),0,0,-X(3)-X(4)-
       X(5)-X(6),-X(3)-X(4)-X(5)-X(6),X(3)+X(4)+X(5)+X(6),
       X(3)+X(4)+X(5)+X(6)+0.055*X(19);
       0,0,0,0,0,0,X(26)-X(28),X(26)-X(28),X(26)-X(28),X(26)-X(28),
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,-0.412*X(28),0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,X(27)-X(29),X(27)-X(29),X(27)-X(29),X(27)-X(29),
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0.412*X(28)-0.055*X(29),0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,X(28)+X(29)-X(26)-X(27),X(28)+X(29)-X(26)-X(27),
       X(28)+X(29)-X(26)-X(27),X(28)+X(29)-X(26)-X(27),0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0.055*X(29),0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(30)-X(32),X(30)-X(32),X(30)-X(32),
       X(30)-X(32),0,0,0,0,0,0,-0.412*X(32),0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(31)-X(33),X(31)-X(33),X(31)-X(33),
       X(31)-X(33),0,0,0,0,0,0,0.412*X(32)-0.055*X(33),0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(32)+X(33)-X(30)-X(31),X(32)+X(33)-
       X(30)-X(31),X(32)+X(33)-X(30)-X(31),X(32)+X(33)-X(30)-X(31),
       0,0,0,0,0,0,0.055*X(33),0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];

%   M2=X26-X46

M2 = [0,0,X(7),0,0,0,X(11),0,X(15),0,X(16),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,X(7),0,0,0,X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,-X(7),-X(7),0,0,-X(11),-X(11),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       -X(7)-X(8)-X(9)-X(10),0,0,0,0,0,X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0;
       0,-X(7)-X(8)-X(9)-X(10),0,0,0,0,0,X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0;
       X(7)+X(8)+X(9)+X(10),X(7)+X(8)+X(9)+X(10),0,0,0,0,-X(12),
       -X(12),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,X(8),0,-X(11)-X(12)-X(13)-X(14),0,0,0,-X(15),0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,X(8),0,-X(11)-X(12)-X(13)-X(14),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0;
       0,0,-X(8),-X(8),X(11)+X(12)+X(13)+X(14),X(11)+X(12)+X(13)
       +X(14),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,X(9),0,0,0,X(13),0,-X(15),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,X(9),0,0,0,X(13),0,-X(15),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,-X(9),-X(9),0,0,-X(13),-X(13),X(15),X(15),0,0,0,0,0,0,0,
       0,0,0,0;
       0,0,X(10),0,0,0,X(14),0,0,0,-X(16),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,X(10),0,0,0,X(14),0,0,0,-X(16),0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,-X(10),-X(10),0,0,-X(14),-X(14),0,0,X(16),X(16),0,0,0,0,
```

```
       0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       X(7)+X(8)+X(9)+X(10),0,-X(7)-X(8)-X(9)-X(10)-0.412*X(20),0,0,
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,X(7)+X(8)+X(9)+X(10),0.412*X(20),-X(7)-X(8)-X(9)-X(10)-
       0.055*X(20),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       -X(7)-X(8)-X(9)-X(10),-X(7)-X(8)-X(9)-X(10),
       X(7)+X(8)+X(9)+X(10),X(7)+X(8)+X(9)+X(10)+0.055*X(20),0,0,0,0
       ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,X(11)+X(12)+X(13)+X(14),0,-X(11)-X(12)-X(13)-X(14)-
       0.412*X(21),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,X(11)+X(12)+X(13)+X(14),0.412*X(21),-X(11)-X(12)-
       X(13)-X(14)-0.055*X(21),0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,-X(11)-X(12)-X(13)-X(14),-X(11)-X(12)-X(13)-X(14),
       X(11)+X(12)+X(13)+X(14),X(11)+X(12)+X(13)+X(14)+0.055*X(21),0
       ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,-X(45),-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1-X(34),0;
       0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,X(46)-1,X(46),0,0,0,0,0,0,0,0,
       X(36)+X(37)];

          J = horzcat(M1,M2);

    end,
end
```

ตารางที่ 10 จาโคเบียนเมทริกของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

```
    function J = jacobianobjectivefunction(X, test)
        X = X';
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%% test problem 1 $$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
        if test == 1
%             J = jacobian(-0.01*((100-X(15))*X(28)+X(15)*X(58)),X);
            J = [0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0.01*X(28)-0.01*X(58);
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
                 0;
```

```
                0;
                0;
                0;
                0;
                -0.01*(100-X(15));
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                -0.01*X(15);
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0;
                0];


        end
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%% test problem 2 $$$$$$$$$$$$$$$$$$$
        if test == 2
%             J = jacobian(-((92.67)*(8,000)*(X(61)+X(62))-
(27.98)*(8,000)*X(60)-
(19.88)*(8,000)*X(60)+(1/2.5)*(CR,cap+CC,cap)+0.52*Coper),X);

%  CR,cap = CR1+CR2+CR3
%  C column,cap = CC,cap = CC1+CC2+CC3+CC4
%  Coper = 21.67(Q1+Q2+Q3+Q4)+4.65(Q1+Q2+Q3+Q4)
%  CR1 = 25,795*y1+8,178*V1
%  CR2 = 25,795*y2+8,178*V2
%  CR3 = 25,795*y3+8,178*V3
```

```
%  CC1 = 132,718*z1+F21*((369*x21,A)-(1,114*x21,B))
%  CC2 = 211,547*z2-F22*((1,010*x22,A)-(479*x22,B))
%  CC3 = 25,000*z3+(F21*(1-x21,A))*((6,985*((x21,B)/(x21,B+x21,C)))-
(3,870*(x21,B)/(x21,B+x21,C)^2))
%  CC4 = 86,994*z4+(F22*(1-x22,C))*(1,136*((x22,A)/(x22,A+x22,B)))


%  CR,cap =
(25,795*y1+8,178*V1)+(25,795*y2+8,178*V2)+(25,795*y3+8,178*V3)
%  CC,cap = (132,718*z1+F21*((369*x21,A)-
(1,114*x21,B)))+(211,547*z2-F22*((1,010*x22,A)-
(479*x22,B)))+(25,000*z3+(F21*(1-
x21,A))*((6,985*((x21,B)/(x21,B+x21,C)))-
(3,870*((x21,B)/(x21,B+x21,C))^2)))+(86,994*z4+(F22*(1-
x22,C))*(1,136*((x22,A)/(x22,A+x22,B))))
%  Coper  =
26.32*((F21*(3+3.61*x21,A+7.7*x21,B))+(F22*(16.18+16.83*x22,A+42.14*
x22,B))+((F21*(1-
x21,A))*(26.212+29.45*((x21,B)/(x21,B+x21,C))))+((F22*(1-
x22,C))*(10.70+28.41*((x22,A)/(x22,A+x22,B)))))

            J = [(27.98+19.88)*8000;%1
                 (27.98+19.88)*8000;%2
                 0;%3
                 0;%4
                 0;%5
                 0;%6
                 0;%7
                 0;%8
                 0;%9
                 0;%10
                 0;%11
                 0;%12
                 0;%13
                 0;%14
                 -92.67*8000*X(35)+(27.98+19.88)*8000*(1-X(34))
                 -0.4*(369*X(34)-1114*X(35))
                 -0.4*(1-X(34))*(6985*X(45)-3870*X(45)^2)
                 -(0.52*(21.67+4.65)*(3+36.1*X(34)+7.7*X(35)))
                 -(0.52*(21.67+4.65)*(1-X(34))*(26.212+
                 29.45*X(45)));%15
                 -92.67*8000*X(37)+0.4*(1010*X(36)-479*X(37))-
                 (0.4*(X(36)+X(37))*1136*X(46))-
                 (0.52*(21.67+4.65)*(16.18+16.83*X(36)+42.14*X(37)))
                 -(0.52*(21.67+4.65)*(X(36)+X(37))*(10.70+
                 28.41*X(46)));%16
                 0;%17
                 0;%18
                 -0.4*8178;%19
                 -0.4*8178;%20
                 -0.4*8178;%21
                 0;%22
                 0;%23
                 0;%24
                 0;%25
                 0;%26
                 0;%27
                 0;%28
```

```
                0;%29
                0;%30
                0;%31
                0;%32
                0;%33
                -((27.98+19.88)*8000*X(15))
                -(0.4*X(15)*369)+(0.4*X(15)*(6985*X(45)
                -3870*X(45)^2))-(0.52*(21.67+4.65)*X(15)*36.1)
                +(0.52*(21.67+4.65)*X(15)*(26.212+29.45*X(45)));%34
                -92.67*8000*X(15)+(0.4*X(15)*1114)
                -(0.52*(21.67+4.65)*X(15)*7.7);%35
                (0.4*X(16)*1010)-(0.4*X(16)*1136*X(46))
                -(0.52*(21.67+4.65)*X(16)*16.83)
                -(0.52*(21.67+4.65)*X(16)*(10.70+28.41*X(46)));%36
                -(92.67*8000*X(16))-(0.4*X(16)*479)
                -(0.4*X(16)*1136*X(46)
                -(0.52*(21.67+4.65)*X(16)*42.14)
                -(0.52*(21.67+4.65)*X(16)*(10.70+28.41*X(46)));%37
                -0.4*25795;%38
                -0.4*25795;%39
                -0.4*25795;%40
                -0.4*132718;%41
                -0.4*211547;%42
                -0.4*25000;%43
                -0.4*86944;%44
                -(0.4*X(15)*(1-X(34))*(6985-2*3870*X(45)))-
                (0.52*(21.67+4.65)*X(15)*(1-X(34))*29.45);%45
                -(0.4*X(16)*(X(36)+X(37))*1136)-
                (0.52*(21.67+4.65)*X(16)*(X(36)+X(37))*28.41)];%46
        end
    end
```

ตารางที่ 11 เงื่อนไขของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

```
function [cineq, ceq] = mycon1(X)
    ceq(1) = 0.58*X(1)+X(16)*X(57)-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+
             X(9)+X(10))*X(24);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(R-1,4eq)
    ceq(2) = X(16)*X(58)-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*
             X(25);
    ceq(3) = X(16)*X(59)-(100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))
            *X(26);
    ceq(4) = X(16)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-(100-
            X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(1-X(24)-X(25)-X(26));
    ceq(5) = 0.58*X(2)+X(6)*X(27)+X(17)*X(57)-X(11)*X(30);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-1,4eq)
    ceq(6) = X(6)*X(28)+X(17)*X(58)-X(11)*X(31);
    ceq(7) = X(6)*X(29)+X(17)*X(59)-X(11)*X(32);
    ceq(8) = X(6)*(1-X(27)-X(28)-X(29))+X(17)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-
             X(11)*(1-X(30)-X(31)-X(32));
    ceq(9) = 0.58*X(3)+X(11)*X(33)+X(7)*X(27)+X(18)*X(57)-
             X(12)*X(36);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-2,4eq)
    ceq(10) = X(11)*X(34)+X(7)*X(28)+X(18)*X(58)-X(12)*X(37);
    ceq(11) = X(11)*X(35)+X(7)*X(29)+X(18)*X(59)-X(12)*X(38);
    ceq(12) = X(11)*(1-X(33)-X(34)-X(35))+X(7)*(1-X(27)-X(28)-
              X(29))+X(18)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-X(12)*(1-X(36)-
```

```
                X(37)-X(38));
    ceq(13) = 0.58*X(4)+X(12)*X(39)+X(8)*X(27)+X(19)*X(57)-
                X(13)*X(42);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-3,4eq)
    ceq(14) = X(12)*X(40)+X(8)*X(28)+X(19)*X(58)-X(13)*X(43);
    ceq(15) = X(12)*X(41)+X(8)*X(29)+X(19)*X(59)-X(13)*X(44);
    ceq(16) = X(12)*(1-X(39)-X(40)-X(41))+X(8)*(1-X(27)-X(28)-
                X(29))+X(19)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-X(13)*(1-X(42)-
                X(43)-X(44));
    ceq(17) = 0.58*X(5)+X(13)*X(45)+X(9)*X(27)+X(20)*X(57)-
                X(14)*X(48);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-4,4eq)
    ceq(18) = X(13)*X(46)+X(9)*X(28)+X(20)*X(58)-X(14)*X(49);
    ceq(19) = X(13)*X(47)+X(9)*X(29)+X(20)*X(59)-X(14)*X(50);
    ceq(20) = X(13)*(1-X(45)-X(46)-X(47))+X(9)*(1-X(27)-X(28)-
               X(29))+X(20)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-X(14)*(1-X(48)-
               X(49)-X(50));
    ceq(21) = 0.58*(100-X(1)-X(2)-X(3)-X(4)-X(5))+X(14)*
                X(51)+X(10)*X(27)+X(21)*X(57)-
                (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*X(54);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-5,4eq)
    ceq(22) = X(14)*X(52)+X(10)*X(28)+X(21)*X(58)-
               (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*X(55);
    ceq(23) = X(14)*X(53)+X(10)*X(29)+X(21)*X(59)-
               (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*X(56);
    ceq(24) = X(14)*(1-X(51)-X(52)-X(53))+X(10)*(1-X(27)-X(28)-
               X(29))+X(21)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-
               (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(1-X(54)-
               X(55)-X(56));
    ceq(25) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(24)-X(27))+
                X(22)*(-10*X(27)-X(27)^2);
%Component balances for final mixer(4eq)
    ceq(26) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(25)-X(28))+
                X(22)*(10*X(27)-X(28));
    ceq(27) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(26)-X(29))
                +X(22)*X(28);
    ceq(28) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(27)+X(28)+
                X(29)-X(24)-X(25)-X(26))+X(22)*X(27)^2;
    ceq(29) = X(11)*(X(30)-X(33))+X(23)*(-10*X(33)-X(33)^2);
%Component balances around each reactors(R-1,4eq)
    ceq(30) = X(11)*(X(31)-X(34))+X(23)*(10*X(33)-X(34));
    ceq(31) = X(11)*(X(32)-X(35))+X(23)*X(34);
    ceq(32) = X(11)*(X(33)+X(34)+X(35)-X(30)-X(31)-
                X(32))+X(23)*X(33)^2;
    ceq(33) = X(12)*(X(36)-X(39))+X(23)*(-10*X(39)-X(39)^2);
%Component balances around each reactors(C-1,4eq)
    ceq(34) = X(12)*(X(37)-X(40))+X(23)*(10*X(39)-X(40));
    ceq(35) = X(12)*(X(38)-X(41))+X(23)*X(40);
    ceq(36) = X(12)*(X(39)+X(40)+X(41)-X(36)-X(37)-
                X(38))+X(23)*X(39)^2;
    ceq(37) = X(13)*(X(42)-X(45))+X(23)*(-10*X(45)-X(45)^2);
%Component balances around each reactors(C-2,4eq)
    ceq(38) = X(13)*(X(43)-X(46))+X(23)*(10*X(45)-X(46));
    ceq(39) = X(13)*(X(44)-X(47))+X(23)*X(46);
    ceq(40) = X(13)*(X(45)+X(46)+X(47)-X(42)-X(43)-
                X(44))+X(23)*X(45)^2;
    ceq(41) = X(14)*(X(48)-X(51))+X(23)*(-10*X(51)-X(51)^2);
%Component balances around each reactors(C-3,4eq);
```

```
    ceq(42) = X(14)*(X(49)-X(52))+X(23)*(10*X(51)-X(52));
    ceq(43) = X(14)*(X(50)-X(53))+X(23)*X(52);
    ceq(44) = X(14)*(X(51)+X(52)+X(53)-X(48)-X(49)-
              X(50))+X(23)*X(51)^2;
    ceq(45) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(54)-
              X(57))+X(23)*(-10*X(57)-X(57)^2);
%Component balances around each reactors(C-4,4eq);
    ceq(46) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(55)-
              X(58))+X(23)*(10*X(57)-X(58));
    ceq(47) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(56)-
              X(59))+X(23)*X(58);
    ceq(48) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(57)+
              X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-X(56))+X(23)*X(57)^2;

    cineq(1) = X(22)-200*X(60);
    cineq(2) = 5*X(23)-1000*X(61);
    cineq(3) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))-100*X(60);
    cineq(4) = X(11)-100*X(62);
    cineq(5) = X(12)-100*X(63);
    cineq(6) = X(13)-100*X(64);
    cineq(7) = X(14)-100*X(65);
    cineq(8) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))-
               100*X(66);
    cineq(9) = 1-X(60)-X(61);
    cineq(10) = X(23)-200*X(62);
    cineq(11) = X(23)-200*X(63);
    cineq(12) = X(23)-200*X(64);
    cineq(13) = X(23)-200*X(65);
    cineq(14) = X(23)-200*X(66);
end
```

ตารางที่ 12 เงื่อนไขของระบบเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

```
function [cineq, ceq] = mycon2(X)
    ceq(1) = X(1)+X(7)*X(28)+X(11)*X(32)+(X(15)*X(34)+X(16)*X(36)-
             X(17)-X(18))-(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*X(22);
    ceq(2) = X(7)*X(29)+X(11)*X(33)-(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*X(23);
    ceq(3) = X(7)*(1-X(28)-X(29))+X(11)*(1-X(32)-X(33))-
             (X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(1-X(22)-X(23));
    ceq(4) = X(2)+X(5)*X(24)+X(12)*X(32)+X(18)-
             (X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(26);
    ceq(5) = X(5)*X(25)+X(12)*X(33)-(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(27);
    ceq(6) = X(5)*(1-X(24)-X(25))+X(12)*(1-X(32)-X(33))-
             (X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(1-X(26)-X(27));
    ceq(7) = (X(15)*(1-X(34)))+X(6)*X(24)+X(8)*X(28)+X(17)-
             (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*X(30);
    ceq(8) = X(6)*X(25)+X(8)*X(29)-(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*X(31);
    ceq(9) = X(6)*(1-X(24)-X(25))+X(8)*(1-X(28)-X(29))-
             (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(1-X(30)-X(31));
    ceq(10) = X(3)*X(24)+X(9)*X(28)+X(13)*X(32)-X(15)*X(34);
    ceq(11) = X(3)*X(25)+X(9)*X(29)+X(13)*X(33)-X(15)*X(35);
    ceq(12) = X(3)*(1-X(24)-X(25))+X(9)*(1-X(28)-X(29))+X(13)*(1-
              X(32)-X(33))-X(15)*(1-X(34)-X(35));
    ceq(13) = X(4)*X(24)+X(10)*X(28)+X(14)*X(32)-X(16)*X(36);
    ceq(14) = X(4)*X(25)+X(10)*X(29)+X(14)*X(33)-X(16)*X(37);
    ceq(15) = X(4)*(1-X(24)-X(25))+X(10)*(1-X(28)-X(29))+X(14)*(1-
              X(32)-X(33))-X(16)*(1-X(36)-X(37));
```

```
    ceq(16) =(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(X(22)-X(24))+X(19)*(-
             0.412*X(24));
    ceq(17) =(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(X(23)-X(25))+X(19)*(0.412*X(24)-
             0.055*X(25));
    ceq(18) =(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(X(24)+X(25)-X(22)-
             X(23))+X(19)*(0.055*X(25));
    ceq(19) =(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(26)-X(28))+X(20)*(-
             0.412*X(28));
    ceq(20) =(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(27)-
             X(29))+X(20)*(0.412*X(28)-0.055*X(29));
    ceq(21) =(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(28)+X(29)-X(26)-
             X(27))+X(20)*(0.055*X(29));
    ceq(22) =(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(X(30)-X(32))+X(21)*(-
             0.412*X(32));
    ceq(23) =(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(X(31)-
             X(33))+X(21)*(0.412*X(32)-0.055*X(33));
    ceq(24) =(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(X(32)+X(33)-X(30)-
             X(31))+X(21)*(0.055*X(33));
    ceq(25) = X(45)*(1-X(34))-X(35);
    ceq(26) = X(46)*(X(36)+X(37))-X(36);

        cineq(1) = (X(3)+X(4)+X(5)+X(6))-2000*X(38);
        cineq(2) = (X(7)+X(8)+X(9)+X(10))-2000*X(39);
        cineq(3) = (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))-2000*X(40);
        cineq(4) = X(19)-2000*X(38);
        cineq(5) = X(20)-2000*X(39);
        cineq(6) = X(21)-2000*X(40);
        cineq(7) = X(15)-2000*X(41);
        cineq(8) = X(16)-2000*X(42);
        cineq(9) = X(43)-X(41);
        cineq(10) = X(44)-X(42);
end
```

ตารางที่ 13 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบเครือข่ายเครื่องปฏิกรณ์

```
function f = myfun1(X)
     f = -0.01*((100-X(15))*X(28)+X(15)*X(58));
end
```

ตารางที่ 14 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบปัญหาเครื่องปฏิกรณ์-อุปกรณ์แยกสาร-การป้อนกลับ

```
function f = myfun2(X)
    f =  -92.67*8000*(X(15)*X(35)+X(16)*X(37))
         +(27.98+19.88)*8000*(X(1)+X(2)+(X(15)*(1-X(34))))
         -0.4*(25795*(X(38)+X(39)+X(40))+8178*(X(19)+X(20)+X(21)))
         -0.4*(132718*X(41)+X(15)*(369*X(34)-1114*X(35)))
         -0.4*(211547*X(42)-X(16)*(1010*X(36)-479*X(37)))
         -0.4*(25000*X(43)+X(15)*(1-X(34))*(6985*X(45)
         - 3870*X(45)^2))-0.4*(86944*X(44)+X(16)*(X(36)+X(37))
         *1136*X(46))0.52*(21.67+4.65)*(X(15)*(3+36.1*X(34)
         +7.7*X(35))+X(16)*(16.18+16.83*X(36)+42.14*X(37))
         +X(15)*(1-X(34))*(26.212+29.45*X(45))
         +X(16)*(X(36)+X(37))*(10.70+28.41*X(46)));
end
```

ตารางที่ 15 สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบปัญหา

```
    function [cost, evaluate] = objectivefunction(X, evaluate, test)
%evaluated objective function
    evaluate = evaluate +1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%% test problem 1 $$$$$$$$$$$$$$$$$$$
        if test == 1
            cost = -0.01*((100-X(15))*X(28)+X(15)*X(58));
        end
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%% test problem 2 $$$$$$$$$$$$$$$$$$$
        if test == 2
            cost = -92.67*8000*(X(15)*X(35)+X(16)*X(37))
         +(27.98+19.88)*8000*(X(1)+X(2)+(X(15)*(1-X(34))))
         -0.4*(25795*(X(38)+X(39)+X(40))+8178*(X(19)+X(20)+X(21)))
         -0.4*(132718*X(41)+X(15)*(369*X(34)-1114*X(35)))
         -0.4*(211547*X(42)-X(16)*(1010*X(36)-479*X(37)))
         -0.4*(25000*X(43)+X(15)*(1-X(34))*(6985*X(45)
         - 3870*X(45)^2))-0.4*(86944*X(44)+X(16)*(X(36)+X(37))
         *1136*X(46))0.52*(21.67+4.65)*(X(15)*(3+36.1*X(34)
         +7.7*X(35))+X(16)*(16.18+16.83*X(36)+42.14*X(37))
         +X(15)*(1-X(34))*(26.212+29.45*X(45))
         +X(16)*(X(36)+X(37))*(10.70+28.41*X(46)));
        end
    end
```

ตารางที่ 16 ค่าที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่ทำการทดสอบ

```
function [eq, ineq, v ,upper, lower, intv] = testProblem(test)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% test problem 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if test == 1
        eq = 48;%number of equality constraints
        ineq = 14;%number of inequality constraints
        v = 66;%number of variables
        intv = zeros(v,1);%boolean chekc integer variable
        upper =
[100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100
;100;100;100;200;200;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1
;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1];%upper bound
        lower =
[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0
;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
%lower bound

    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%% test problem 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if test == 2
        eq = 26;
        ineq = 10;
        v = 46;
        intv = zeros(v,1);
        upper =
[100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100;100
;100;2000;2000;2000;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;
1];
        lower =
[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0
;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
```

```
        %result = ;
    end
end
```

ตารางที่ 17 Equality constraints และ Inequality constraints ของปัญหา

```
function [H, IN, evaluateEq] = violationMatrix(X, H, IN, ineq, isIN,
evaluateEq, test)
    evaluateEq = evaluateEq + 1;
    %%%%%%%%%%%%%%% test problem 1 %%%%%%%%%%%%%%%
    if test == 1

        H(1) = 0.58*X(1)+X(16)*X(57)-(100-
               X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(24);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(R-1,4eq)
        H(2) = X(16)*X(58)-(100-
               X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(25);
        H(3) = X(16)*X(59)-(100-
               X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(26);
        H(4) = X(16)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-(100-
               X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(1-X(24)-X(25)-
               X(26));
        H(5) = 0.58*X(2)+X(6)*X(27)+X(17)*X(57)-X(11)*X(30)
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-1,4eq)
        H(6) = X(6)*X(28)+X(17)*X(58)-X(11)*X(31);
        H(7) = X(6)*X(29)+X(17)*X(59)-X(11)*X(32);
        H(8) = X(6)*(1-X(27)-X(28)-X(29))+X(17)*(1-X(57)-X(58)-
               X(59))-X(11)*(1-X(30)-X(31)-X(32));
        H(9) = 0.58*X(3)+X(11)*X(33)+X(7)*X(27)+X(18)*X(57)-
               X(12)*X(36);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-2,4eq)
        H(10) = X(11)*X(34)+X(7)*X(28)+X(18)*X(58)-X(12)*X(37);
        H(11) = X(11)*X(35)+X(7)*X(29)+X(18)*X(59)-X(12)*X(38);
        H(12) = X(11)*(1-X(33)-X(34)-X(35))+X(7)*(1-X(27)-X(28)-
               X(29))+X(18)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-X(12)*(1-X(36)-
               X(37)-X(38));
        H(13) = 0.58*X(4)+X(12)*X(39)+X(8)*X(27)+X(19)*X(57)-
               X(13)*X(42);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-3,4eq)
        H(14) = X(12)*X(40)+X(8)*X(28)+X(19)*X(58)-X(13)*X(43);
        H(15) = X(12)*X(41)+X(8)*X(29)+X(19)*X(59)-X(13)*X(44);
        H(16) = X(12)*(1-X(39)-X(40)-X(41))+X(8)*(1-X(27)-X(28)-
               X(29))+X(19)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-X(13)*(1-X(42)-
               X(43)-X(44));
        H(17) = 0.58*X(5)+X(13)*X(45)+X(9)*X(27)+X(20)*X(57)-
               X(14)*X(48);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-4,4eq)
        H(18) = X(13)*X(46)+X(9)*X(28)+X(20)*X(58)-X(14)*X(49);
        H(19) = X(13)*X(47)+X(9)*X(29)+X(20)*X(59)-X(14)*X(50);
        H(20) = X(13)*(1-X(45)-X(46)-X(47))+X(9)*(1-X(27)-X(28)-
               X(29))+X(20)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-X(14)*(1-X(48)-
               X(49)-X(50));
        H(21) = 0.58*(100-X(1)-X(2)-X(3)-X(4)-
               X(5))+X(14)*X(51)+X(10)*X(27)+X(21)*X(57)-
               (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*X(54);
%Component balances for mixers at inlets of reactors(C-5,4eq)
        H(22) = X(14)*X(52)+X(10)*X(28)+X(21)*X(58)-
```

```
                (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*X(55);
        H(23) = X(14)*X(53)+X(10)*X(29)+X(21)*X(59)-
                (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*X(56);
        H(24) = X(14)*(1-X(51)-X(52)-X(53))+X(10)*(1-X(27)-X(28)-
                X(29))+X(21)*(1-X(57)-X(58)-X(59))-
                (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(1-
                X(54)-X(55)-X(56));
        H(25) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(24)-
                X(27))+X(22)*(-10*X(27)-X(27)^2);
%Component balances for final mixer(4eq)
        H(26) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(25)-
                X(28))+X(22)*(10*X(27)-X(28));
        H(27) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(26)-
                X(29))+X(22)*X(28);
        H(28) = (100-
                X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(27)+X(28)+X(29)-
                X(24)-X(25)-X(26))+X(22)*X(27)^2;
        H(29) = X(11)*(X(30)-X(33))+X(23)*(-10*X(33)-X(33)^2);
%Component balances around each reactors(R-1,4eq)
        H(30) = X(11)*(X(31)-X(34))+X(23)*(10*X(33)-X(34));
        H(31) = X(11)*(X(32)-X(35))+X(23)*X(34);
        H(32) = X(11)*(X(33)+X(34)+X(35)-X(30)-X(31)-
                X(32))+X(23)*X(33)^2;
        H(33) = X(12)*(X(36)-X(39))+X(23)*(-10*X(39)-X(39)^2);
%Component balances around each reactors(C-1,4eq)
        H(34) = X(12)*(X(37)-X(40))+X(23)*(10*X(39)-X(40));
        H(35) = X(12)*(X(38)-X(41))+X(23)*X(40);
        H(36) = X(12)*(X(39)+X(40)+X(41)-X(36)-X(37)-
                X(38))+X(23)*X(39)^2;
        H(37) = X(13)*(X(42)-X(45))+X(23)*(-10*X(45)-X(45)^2);
%Component balances around each reactors(C-2,4eq)
        H(38) = X(13)*(X(43)-X(46))+X(23)*(10*X(45)-X(46));
        H(39) = X(13)*(X(44)-X(47))+X(23)*X(46);
        H(40) = X(13)*(X(45)+X(46)+X(47)-X(42)-X(43)-
                X(44))+X(23)*X(45)^2;
        H(41) = X(14)*(X(48)-X(51))+X(23)*(-10*X(51)-X(51)^2);
%Component balances around each reactors(C-3,4eq);
        H(42) = X(14)*(X(49)-X(52))+X(23)*(10*X(51)-X(52));
        H(43) = X(14)*(X(50)-X(53))+X(23)*X(52);
        H(44) = X(14)*(X(51)+X(52)+X(53)-X(48)-X(49)-
                X(50))+X(23)*X(51)^2;
        H(45) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(54)-
                X(57))+X(23)*(-10*X(57)-X(57)^2);
%Component balances around each reactors(C-4,4eq);
        H(46) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(55)-
                X(58))+X(23)*(10*X(57)-X(58));
        H(47) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(56)-
                X(59))+X(23)*X(58);
        H(48) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))*(X(57)+
                X(58)+X(59)-X(54)-X(55)-X(56))+X(23)*X(57)^2;


        if isIN == 1                %IN is column vector.
            IN(1) = X(22)-200*X(60);
            IN(2) = 5*X(23)-1000*X(61);
            IN(3) = (100-X(15)+X(6)+X(7)+X(8)+X(9)+X(10))-100*X(60);
            IN(4) = X(11)-100*X(62);
            IN(5) = X(12)-100*X(63);
```

```
            IN(6) = X(13)-100*X(64);
            IN(7) = X(14)-100*X(65);
            IN(8) = (X(15)+X(16)+X(17)+X(18)+X(19)+X(20)+X(21))-
                    100*X(66);
            IN(9) = 1-X(60)-X(61);
            IN(10) = X(23)-200*X(62);
            IN(11) = X(23)-200*X(63);
            IN(12) = X(23)-200*X(64);
            IN(13) = X(23)-200*X(65);
            IN(14) = X(23)-200*X(66);
        end
    end
   %%%%%%%%%%%%%%% test problem 2 %%%%%%%%%%%%%%%
    if test == 2
        H(1) = X(1)+X(7)*X(28)+X(11)*X(32)+(X(15)*X(34)+X(16)*X(36)
               -X(17)-X(18))-(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*X(22);
        H(2) = X(7)*X(29)+X(11)*X(33)-(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*X(23);
        H(3) = X(7)*(1-X(28)-X(29))+X(11)*(1-X(32)-X(33))-
               (X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(1-X(22)-X(23));
        H(4) = X(2)+X(5)*X(24)+X(12)*X(32)+X(18)-
               (X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(26);
        H(5) = X(5)*X(25)+X(12)*X(33)-(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*X(27);
        H(6) = X(5)*(1-X(24)-X(25))+X(12)*(1-X(32)-X(33))-
               (X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(1-X(26)-X(27));
        H(7) = (X(15)*(1-X(34)))+X(6)*X(24)+X(8)*X(28)+X(17)-
               (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*X(30);
        H(8) = X(6)*X(25)+X(8)*X(29)-
               (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*X(31);
        H(9) = X(6)*(1-X(24)-X(25))+X(8)*(1-X(28)-X(29))-
               (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(1-X(30)-X(31));
        H(10) = X(3)*X(24)+X(9)*X(28)+X(13)*X(32)-X(15)*X(34);
        H(11) = X(3)*X(25)+X(9)*X(29)+X(13)*X(33)-X(15)*X(35);
        H(12) = X(3)*(1-X(24)-X(25))+X(9)*(1-X(28)-X(29))+
                X(13)*(1-X(32)-X(33))-X(15)*(1-X(34)-X(35));
        H(13) = X(4)*X(24)+X(10)*X(28)+X(14)*X(32)-X(16)*X(36);
        H(14) = X(4)*X(25)+X(10)*X(29)+X(14)*X(33)-X(16)*X(37);
        H(15) = X(4)*(1-X(24)-X(25))+X(10)*(1-X(28)-X(29))+
                X(14)*(1-X(32)-X(33))-X(16)*(1-X(36)-X(37));
        H(16) =(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(X(22)-X(24))+
                X(19)*(-0.412*X(24));
        H(17) =(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(X(23)-
                X(25))+X(19)*(0.412*X(24)-0.055*X(25));
        H(18) =(X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*(X(24)+X(25)-X(22)-X(23))+
                X(19)*(0.055*X(25));
        H(19) =(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(26)-X(28))+
                X(20)*(-0.412*X(28));
        H(20) =(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(27)-
                X(29))+X(20)*(0.412*X(28)-0.055*X(29));
        H(21) =(X(7)+X(8)+X(9)+X(10))*(X(28)+X(29)-X(26)-X(27))+
                X(20)*(0.055*X(29));
        H(22) =(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(X(30)-X(32))+
                X(21)*(-0.412*X(32));
        H(23) =(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(X(31)-
                X(33))+X(21)*(0.412*X(32)-0.055*X(33));
        H(24) =(X(11)+X(12)+X(13)+X(14))*(X(32)+X(33)-X(30)-X(31))+
                X(21)*(0.055*X(33));
        H(25) = X(45)*(1-X(34))-X(35);
        H(26) = X(46)*(X(36)+X(37))-X(36);
```

```
         if isIN == 1
            IN(1) = (X(3)+X(4)+X(5)+X(6))-2000*X(38);
            IN(2) = (X(7)+X(8)+X(9)+X(10))-2000*X(39);
            IN(3) = (X(11)+X(12)+X(13)+X(14))-2000*X(40);
            IN(4) = X(19)-2000*X(38);
            IN(5) = X(20)-2000*X(39);
            IN(6) = X(21)-2000*X(40);
            IN(7) = X(15)-2000*X(41);
            IN(8) = X(16)-2000*X(42);
            IN(9) = X(43)-X(41);
            IN(10) = X(44)-X(42);
        end
    end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Setup IN(i) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    for i = 1:ineq
        if IN(i) <= 0
            IN(i) = 0;
        end
    end
end
```

ตารางที่ 18 ชุดคำสั่ง Stop criteria

```
function [X, Cnew, conBoolVector, boolround, roundToleranceFixed,
converge, evaluate, evaluateEq, relaxConstraint, sameminC,
mainSameminC, minCold, maxC, minC] = stopcriteria(X, np, Cold, Cnew,
locallearnrate, H, IN, ineq, sumX, evaluate, evaluateEq, converge,
minCold, minC, maxC, stopCriteria, sameminC, mainSameminC,
relaxConstraint, e, stopGen, roundToleranceFixed, conBoolVector,
boolround, G, LR, test, lower, upper, v)

%     %%%%%%%%%% show sameminC %%%%%%%%%%
%     mainSameminCbeforeUpdate = mainSameminC
%     sameminCbeforeUpdate = sameminC
%     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    for i = 1:np
        if sameminC(i) >= stopGen

            if conBoolVector(i) == 0

      %%%%%%%%%% show status before running local searh %%%%%%%
%                 atPopulationi = i
%show population which has a full stopgeneration
%                 conBoolvectorofpopulationi = conBoolVector(i)
%                 valueofsameminCofpopulationi = sameminC(i)
%show matrix number of objective fucntion converged
%                 Cbeforelocalsearch = Cnew(i)
%show objective value before running local search
%                 ConstrainviolationbeforelocalSearch = sumX(i)
%show constraint violation before running local search
                XbeforeFmincon = X(i,:)
                CbeforeFmincon = Cnew(i)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
                conBoolVector(i) = 1;
%                 [X(i,:),Cnew(i)] =
localsearchFmincon(X(i,:),Cnew(i),v,lower,upper,test);

                XafterFmincon = X(i,:)
                CafterFmincon = Cnew(i)
%                 [X(i,:), Cnew(i), sumX(i), evaluate, evaluateEq] =
localsearch(X(i,:), Cnew(i), locallearnrate, H, IN, sumX(i), ineq,
evaluate, evaluateEq, relaxConstraint, LR, test);
%%%%%%% show minimumC and constraint violation after running local
search %%%%%%%%%%
%                 Cafterlocalsearch = Cnew(i)
%show objective value after running local search
%                 ConstrainviolationafterlocalSearch = sumX(i)
%show constraint violation before running local search
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            Else
%%%%% show true boolean of population already use localsearch %%%%%%

 conBoolVectorStatus = strcat('Boolean of population ',num2str(i),'
is 1')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            end
        else
            if abs(Cnew(i)/Cold(i) - 1) <= stopCriteria
                sameminC(i) = sameminC(i) + 1;
            else sameminC(i) = 0;
            end
        end
    end

    if maxC < max(Cnew)
        maxC = max(Cnew);
    end
    if minC > min(Cnew)
        minC = min(Cnew);
    end
    [minCnew, index] = min(Cnew);

    %%%%%%%%%% show Tolerance before relaxation process %%%%%%%%%%

    Tolerancebeforerelax = relaxConstraint

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    if abs(minCnew/minCold - 1) <= stopCriteria
        mainSameminC = mainSameminC + 1;
        if (relaxConstraint > e) && (min(sumX) > e)
            relaxConstraint = e;
%             relaxConstraint = min(sumX);
            %%%%%%%%% show status relaxation %%%%%%%%%%
            TolerancerelaxStatus = 'relaxwithFamiliarScheme'
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        else relaxConstraint = e;
```

```
            %%%%%%%%% show status relaxation %%%%%%%%%%
            TolerancerelaxStatus = 'settominimumTolerance'
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        end
        if mainSameminC >= stopGen
            converge = 1;
%               [X(index,:),Cnew(index)] =
localsearchFmincon(X(index,:),Cnew(index),v,lower,upper,test);
%             [X(index,:), Cnew(index,1), sumX(index,1), evaluate,
evaluateEq] = localsearch(X(index,:), Cnew(index,1), locallearnrate,
H, IN, sumX(index,1), ineq, evaluate, evaluateEq, relaxConstraint,
LR, test);
        end
    else
        mainSameminC = 0;
        if (relaxConstraint > e) && min(sumX) > e
            relaxConstraint = e;
%             relaxConstraint = min(sumX);
%             relaxConstraint = relaxconstraint(relaxConstraint, e,
maxC, minC, minCold, minCnew);

            %%%%%%%%% show status relaxation %%%%%%%%%%

            TolerancerelaxStatus = 'relaxwithFamilairScheme'
%             TolerancerelaxStatus = 'relaxwithLogscale'
%             maxC
%             minC
%             minCold
%             minCnew

%             %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        else relaxConstraint = e;

            %%%%%%%%% show status relaxation %%%%%%%%%%

            TolerancerelaxStatus = 'settominimumTolerance'

            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

            if boolround == 0
                roundToleranceFixed = G;
                boolround = 1;
            end
        end
    end
    minCold = minCnew;

%%%%%%%%%% show mainsameminC and sameminC after updating %%%%%%%%%%

    Toleranceafterrelax = relaxConstraint
    mainSameminCafterUpdate = mainSameminC
%     sameminCaftereUpdate = sameminC
%     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
```

ตารางที่ 19 ชุดคำสั่งขั้นตอน Local search

```
function [X,C] = localsearchFmincon()
    load upperb;
    load lowerb;
    load bestsolution;
    load v;
    load testp;
    X=bestsolution;
    Aineq = zeros(1,v);
    Aeq = zeros(1,v);

    options = optimset('Algorithm','interior-
point','MaxFunEvals',10000);
    if     testp == 1
        [X,C] =
fmincon(@myfun1,X,Aineq,0,Aeq,0,lowerb,upperb,@mycon1,options);
    elseif testp == 2
        [X,C] =
fmincon(@myfun2,X,Aineq,0,Aeq,0,lowerb,upperb,@mycon2,options);
    else
    end
end
```

ตารางที่ 20 คำสั่งเขียนลงในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล

```
function line = writetoxls(Result,filename,sheet,line)
    strline = num2str(line);
    xlRange = strcat('A',strline);
    xlswrite(filename,Result,sheet,xlRange);
    rows = length(Result(:,1));
    line = line + rows + 1;
end
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธิรดา เงินรัตน์ เกิดวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2529 มีภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนปาโมกข์วิทยาภูมิ จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552