



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอนในแบบจำลองแบคทีเรียโดยการใช้ขั้นตอน
วิธีเชิงพันธุกรรม

โดย นางสาวศราวดี ทรัพย์อุดมโชค

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

กณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ วิชาญ

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณชล ไชยรัตน์)

ศาสตราจารย์ ดร. จันทพร ผลากรกุล

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทพร ผลากรกุล)

กรรมการ

(ดร.ศุภฤกษ์ ทองสีมา)

การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอนในแบบจำลองแบบที่เรียบง่ายโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิง
พันธุกรรม

นางสาวศราวดี ทรัพย์อุดมโชค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นางสาวศราวดี ทรัพย์อุดมโชค
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอนในแบบจำลองแบคทีเรียโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.ณชล ไชยรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทพร ผลาภกรกุล
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสนอการใช้แบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ในการวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อค้นหาความเป็นไปได้ของการเพิ่มผลิตภัณธ์ของแบคทีเรียโดยการเพิ่มอิน ปัญหาที่สนใจจัดเป็นการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับที่ภาวะเท่ากันซึ่งได้มาจากโครงข่ายเมตาบอลิซึม และมีการใช้ทั้งฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้นและฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้น สำหรับปัญหาที่ใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้นจะพิจารณาถึง พลังงานสูงสุด ฟลักซ์ของกรดโพลีติกสูงสุด ฟลักซ์ของไรโบฟลาวินสูงสุด และอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ส่วนการใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้นจะเป็นการหาค่าอัตราการผลิตผลิตภัณธ์หรือพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมดสูงสุด งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการแก้ปัญหาแบบเชิงเส้นเป็นขั้นตอนวิธีการป้อนเข้าและใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มอินจากภายนอกไม่ช่วยเพิ่มค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้น เนื่องจากคาร์บอนเสียไปในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าในรูปของผลิตภัณธ์ ในทางตรงกันข้ามการใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้นให้ผลที่ดีขึ้นจากการเพิ่มชีสเตอีน

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 119 หน้า)

คำสำคัญ : การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์ การหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ณชล ไชยรัตน์ :

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Miss Sarawadee Supudomchok
Thesis Title : Carbon Flux Balance Analysis in a Bacteria Model Using a Genetic Algorithm
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Associate Professor Dr.Nachol Chaiyaratana
Assistant Professor Dr.Chantaraporn Phalakornkule
Academic Year : 2006

Abstract

In this thesis, a bacterial model for *Bacillus subtilis* is presented for carbon flux balance analysis. The aim is to investigate the possibility of increasing bacterial products by adding foreign genes to the bacterial host. The interested problem is treated as a constrained optimization problem. The problem consists of a set of linear equality constraints derived from a metabolic flux network and either a linear or a non-linear objective function. For linear problems, considered objectives include ATP maximization, folic acid maximization, riboflavin maximization and growth rate maximization. In contrast, the maximization of a ratio between ATP and the sum of network flux is studied in the non-linear problem. A standard hill-climbing technique and a genetic algorithm have been used as solvers in linear and non-linear problems, respectively. The results indicate that no improvement in terms of the proposed linear objectives can be observed when the bacterial model is modified by adding foreign genes. The failure in the investigation with linear objective functions is the result of an increase in the carbon dioxide production after the overall flux has been balanced. On the other hand, an improvement in the non-linear objective is detectable in an attempt to increase the cysteine production.

(Total 119 pages)

Keywords : Flux Balance Analysis, Constraint Optimization, Genetic Algorithm

Nachol Chaiyaratana

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.ณชลไชยรัตน์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์พร ผลวกรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ข้อคิดเห็น และแนวทางแก้ไขต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการจำลองขนาดใหญ่ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อระบบคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง สำหรับประมวลผลการวิจัยนี้ และสุดท้ายขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัจฉริยะที่ทำให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือสิ่งต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆ น้องๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆ และให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศราวดี ทรัพย์อุดมโชค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์	3
บทที่ 3 เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด	7
3.1 การแยกค่าเอกฐาน (Singular Value Decomposition) หรือ SVD	7
3.2 เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Technique)	9
3.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm)	10
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดกับโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์	23
4.1 การแปลงแบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย <i>B.subtilis</i> ให้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์	23
4.2 การหาคำตอบของเมตริกซ์เงื่อนไข	28
4.3 ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการป้อนเข้าในการหาผลเฉลยของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์	29
4.4 ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาผลเฉลยของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์	31
บทที่ 5 ผลการวิจัย	35
5.1 ผลจำลองการหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุด	37
5.2 ผลจำลองการหาค่า Folic Acid Flux มากที่สุด	38
5.3 ผลจำลองการหาค่า Riboflavin Flux มากที่สุด	42
5.4 ผลจำลองการหาค่า Growth Rate (D) มากที่สุด	45
5.5 ผลจำลองการหาค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมดที่มากที่สุด	47
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก ก	59
ผลจำลองการหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุด	60
ภาคผนวก ข	71
ผลจำลองการหาค่า Folic Acid Flux มากที่สุด	72
ภาคผนวก ค	83
ผลจำลองการหาค่า Riboflavin Flux มากที่สุด	84
ภาคผนวก ง	95
ผลจำลองการหาค่า Growth Rate (D) มากที่สุด	96
ภาคผนวก จ	107
ผลจำลองการหาค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมด	108
ประวัติผู้วิจัย	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ความหมายของคำศัพท์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	11
4-1 ค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการสร้าง Biomass ของ <i>B.subtilis 1012</i>	27
4-2 พารามิเตอร์ต่างๆของขั้นตอนวิธีการป็นเขา	29
4-3 ตัวดำเนินการและค่าต่างๆของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	31
5-1 ผลการจำลองค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	37
5-2 ผลการจำลองแต่ละฟลักซ์จากการจำลองค่า Folic Acid Flux (V_{fa}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	38
5-3 เปอร์เซนต์ฟลักซ์คาร์บอนขาเข้าและขาออก จากการจำลองค่า Folic Acid Flux (V_{fa}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	40
5-4 ผลการจำลองแต่ละฟลักซ์จากการจำลองค่า Riboflavin flux (V_{rb}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	42
5-5 เปอร์เซนต์ฟลักซ์คาร์บอนขาเข้าและขาออก จากการจำลองค่า Riboflavin Flux (V_{rb}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	44
5-6 ผลการจำลองค่าอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	46
5-7 ผลจำลองค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมดที่มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ	47

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การทำสมดุลของเมตาบอลิซึมภายในโครงข่าย	3
2-2 ระบบโครงข่ายสมมติ	5
2-3 ฟลักซ์ภายในและฟลักซ์ที่ถ่ายเทได้	5
3-1 ขั้นตอนวิธีการป้อนเข้า	9
3-2 กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย	12
3-3 การเข้ารหัสฐานสอง	13
3-4 การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต	14
3-5 การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเฟ้นสุ่ม	15
3-6 การครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด และ การครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด	16
3-7 การครอสโอเวอร์แบบเอกรูป	16
3-8 การกลายพันธุ์โดยกลับค่าบิต	17
3-9 การปรับมาตราความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นแรกๆ	18
3-10 การปรับมาตราความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นหลังๆ	19
3-11 ขั้นตอนวิธีสำหรับการหาค่า a และ b สำหรับการปรับมาตราความแข็งแรง	19
3-12 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม	20
3-13 การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการสุ่ม	20
3-14 การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการเลือกจากสมาชิกที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์	21
4-1 แบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย <i>B.subtilis</i>	24
5-1 แบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย <i>B.subtilis</i> เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงยีน	36
5-2 การแจกแจงฟลักซ์ต่อสารตั้งต้นของแบบจำลองการหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงยีนทั้งสิ้น	49
5-3 การแจกแจงฟลักซ์ต่อสารตั้งต้นของแบบจำลองการหาค่า Folic Acid Flux มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงยีนทั้งสิ้น	50
5-4 การแจกแจงฟลักซ์ต่อสารตั้งต้นของแบบจำลองการหาค่า Riboflavin Flux มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงยีนทั้งสิ้น	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-5 การแจกแจงฟลักซ์ต่อสารตั้งต้นของแบบจำลองการหาอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุดของ โครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงขึ้นทั้งสี่	52
5-6 การแจกแจงฟลักซ์ต่อสารตั้งต้นของแบบจำลองการหาสัดส่วนที่มากที่สุดของ พลังงานต่อผลรวมฟลักซ์ทั้งหมดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและ โครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงขึ้นทั้งสี่	53
5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพพลังงาน ATP และอัตราการเจริญเติบโต	54
5-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_2/V_{glc} , V_{15}/V_{glc} และ Growth Rate (h^{-1})	54

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย
ACA	: Acetyl coenzyme A
APD	: 5-amino-6-(ribitylamino)-2,4(1H, 3H)- pyrimidinedione
ATP	: Adenosine 5'-triphosphate
Asx	: Asparagine
C ₁	: Methyl group bound to tetrahydrofolate
CCGA	: ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน
Cys	: Cysteine
DBP	: 3,4-dihydroxy-2-butanone
DRL	: 6,7-dimethyl-8-ribityllumazine
E4P	: Erythrose-4-phosphate
F6P	: Fructose-6-phosphate
FUM	: Fumarate
G6P	: Glucose-6-phosphate
GA	: ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
GDP	: Guanosine diphosphate
GLC	: Glucose
GLU	: Glutamate
GLY	: Glycine
GMP	: Guanosine monophosphate
GTP	: Guanosine triphosphate
IMP	: Inosine monophosphate
MAL	: Malate
Add Ser	: การเพิ่ม Serine
Add Cys	: การเพิ่ม Cysteine
Add Asx	: การเพิ่ม Asparagine
Add Thr	: การเพิ่ม Threonine

คำอธิบายคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	คำอธิบาย
NADH	: Nicotinamide adenine dinucleotide
NADPH	: Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate
OAA	: Oxaloacetate
OGA	: Oxoglutarate
PAB	: P-amino benzoic acid
PEP	: Phosphoenolpyruvate
PGA	: 3-phosphoglyceric acid
PRPP	: Phosphoribosyl diphosphate
PYR	: Pyruvate
R5P	: Ribose-5-phosphate
Ru5P	: Ribulose-5-phosphate
S7P	: Seduheptulose-7-phosphate
SER	: Serine
SUC	: Succinate
T3P	: Glyceraldehyyde-3-phosphate
Thr	: Threonine
X5P	: Xylulose-5-phosphate

บทที่ 1

บทนำ

การพัฒนาการทางเทคโนโลยีชีวภาพอย่างต่อเนื่อง ทำให้แบคทีเรียได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมายในภาคอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตยา แบคทีเรีย *Escherichia coli* ได้ถูกใช้ในการผลิตอินซูลิน ในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมีเฉพาะทาง แบคทีเรียได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตเอ็นไซม์ กรดอะมิโนและวิตามิน เป็นต้น ในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมีทั่วไป แบคทีเรียได้ถูกนำมาใช้ในการผลิต กรดแลกติกและกรดอะซิติก เป็นต้น นอกจากนี้แบคทีเรียยังถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนนั้นสามารถนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าหรือนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงแทนน้ำมันได้

ในการใช้แบคทีเรียในระดับอุตสาหกรรม ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้คาร์บอนของเซลล์แบคทีเรียมีความสำคัญ เนื่องจากปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจากเซลล์จะมีค่าสูงสุด เมื่อเซลล์ใช้คาร์บอนจากสารตั้งต้นไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด ในขณะที่การผลิตสารอื่นๆ หรือพลังงานเป็นไปเพียงเพื่อการดำรงชีวิตของเซลล์ จึงมีคณะวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์การใช้คาร์บอนของเซลล์ และผลของการตัดต่อหรือเพิ่มยีนต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้คาร์บอนของเซลล์ อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตพลังงาน ภายในโครงข่ายเมตาบอลิกของแบคทีเรีย ตัวอย่างเช่น Sauer et al. [1] ได้พัฒนาแบบจำลองของ *B. subtilis* เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของอัตราการผลิตเจรีนเดบิโตหรืออัตราสูงสุดของการผลิตผลิตภัณฑ์ของเซลล์ แบบจำลองได้ถูกสร้างขึ้นในรูปโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ประกอบด้วยระบบสมการซึ่งแทนโครงข่ายปฏิกิริยาเมตาบอลิกฟลักซ์ ค่าสูงสุดของอัตราการผลิตเจรีนเดบิโตหรืออัตราสูงสุดของการผลิตผลิตภัณฑ์ของเซลล์ หาได้โดยการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นการหาค่าสูงสุด (Maximization) ของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น (Substrate) เป็นมวลเซลล์ (Biomass) หรือการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ (Product) ตามลำดับ Schilling et al. [2] ได้พัฒนาแบบจำลองของ *E. coli* เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบเมตาบอลิกโดยการรวมการวิเคราะห์เชิงเส้นทาง (Pathway Analysis) และการวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอนเข้าด้วยกัน Burgard และ Maranas [3] ได้พัฒนาแบบจำลองของ *E. coli* เพื่อวิเคราะห์หาค่าที่มากที่สุดในการผลิตมวลเซลล์

ของโครงข่ายเมตาบอลิกหลังการตัดต่อหรือเพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองแรกเป็นแบบจำลองก่อนการตัดต่อ และอีกแบบจำลองสำหรับการตัดต่อหรือเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่มีมาก่อนส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นแบบเชิงเส้น ในการวิเคราะห์เพราะง่ายต่อการคำนวณ แต่ในความเป็นจริงนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือ Non-linear Optimization Problem จะช่วยให้การวิเคราะห์ระบบใกล้เคียงกับระบบจริงมากขึ้น แต่การคำนวณจะยากกว่า อย่างเช่นในงานวิจัยของ Michael และ Sauer [4] ใช้เทคนิค SQP (Sequential Quadratic Programming) ในการแก้ปัญหาฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้นและต้องเริ่มที่จุดเริ่มต้นต่างกัน ซึ่งในการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นนั้น จุดสูงสุดเฉพาะที่ (Local Maximum) หรือจุดต่ำสุดเฉพาะที่ (Local Minimum) จะมีมากกว่าหนึ่งจุด ค่าที่ได้จากการคำนวณในแต่ละครั้งจากจุดเริ่มต้นที่ต่างกัน อาจต่างกันและอาจไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดก็ได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้ในการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้งปัญหาได้ มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกพลั๊กซ์ของแบคทีเรีย และแบบจำลองนี้ยังนำไปใช้ในการเพิ่มภายในปฏิกิริยาเมตาบอลิกได้ด้วย

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การประยุกต์ใช้งาน ผลการทดลอง และสรุปผล โดยบทที่ 2 และ 3 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องคือ การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอน และขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด บทที่ 4 เป็นการประยุกต์ใช้งานขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill Climbing) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm) บทที่ 5 เป็นผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง และบทที่ 6 จะเป็นการสรุปวิทยานิพนธ์และแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไป

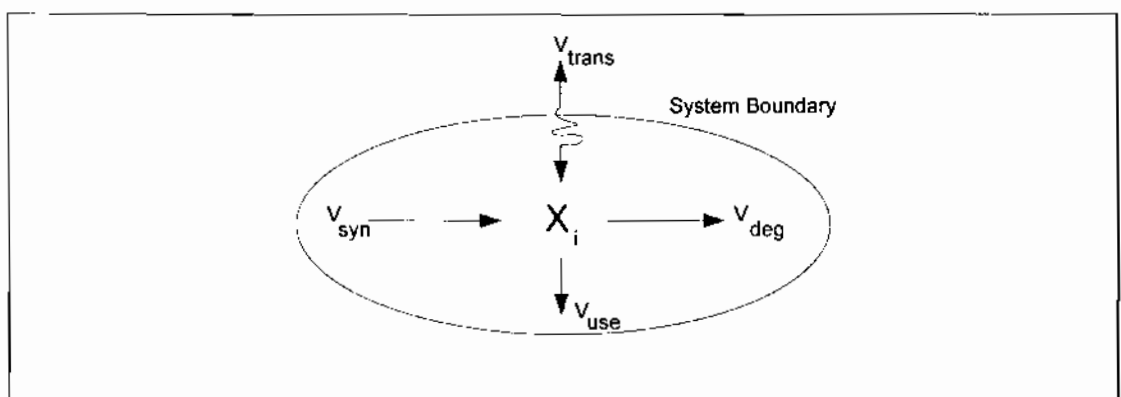
บทที่ 2

การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์

ในการวิเคราะห์เชิงคำนวณเกี่ยวกับความรู้ในเรื่องของ การจัดเรียงกลุ่มยีนในเซลล์สิ่งมีชีวิต ซึ่งมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงถูกพัฒนาขึ้นจากหลายรูปแบบ อย่างเช่นการวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์ เป็นการวิเคราะห์ที่ต้องใช้เส้นทางหรือปฏิกิริยาของชีวเคมี (Biochemical Pathway) ในการอธิบาย โดยมีแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการทำสมดุลทางมวลของเมตาบอไลต์ (Metabolite) ที่เราสนใจ

การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์สามารถเทียบเคียงกับ การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า กระแสตรงได้ ซึ่งสามารถใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law) ในการอธิบาย ความสมดุลของฟลักซ์ได้เช่นกัน เช่นกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ได้กล่าวไว้ว่า ผลรวมทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโหนดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุก ๆ เวลา หรือกล่าวได้ว่าผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าโหนดจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากโหนดนั่นเอง

เช่นเดียวกัน การทำสมดุลฟลักซ์ [5,6,7,8] ถูกเขียนขึ้นสำหรับแต่ละเมตาบอไลต์ภายใน โครงข่าย เมตาบอลิก ดังภาพที่ 2-1 อธิบายตัวอย่างระบบของฟลักซ์ (V_{syn} , V_{deg} , V_{trans} , V_{use}) ซึ่งส่งผล กระทบต่อเมตาบอไลต์ (X_i) อัตราการสังสมของ X_i ถูกแทนด้วยสมการ (2-1)



ภาพที่ 2-1 การทำสมดุลของเมตาบอไลต์ภายใน โครงข่าย

$$\frac{dX_i}{dt} = V_{syn} - V_{deg} - V_{use} \pm V_{trans} \quad (2-1)$$

โดยที่ V_{syn} คือ ปฏิริยาการสังเคราะห์ของเมตาบอไลต์ X , หรือฟลักซ์เข้า X ,
 V_{deg} คือ ปฏิริยาการสลายตัวของเมตาบอไลต์ X , หรือฟลักซ์ออก X ,
 V_{use} คือ ฟลักซ์ที่ต้องใช้ในการเจริญเติบโตและการบำรุงรักษา
 V_{trans} คือ ฟลักซ์ที่ถ่ายเทกับระบบภายนอกขอบเขตที่กำหนด

ไม่ทั้งหมดของเมตาบอไลต์ในโครงข่ายที่จะประกอบด้วยฟลักซ์ทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่น V_{trans} จะเกิดเฉพาะกับเมตาบอไลต์ตัวนอก และ V_{use} จะเกิดเฉพาะเมตาบอไลต์ด้านใน เขียนเป็นสมการอีกครั้ง

$$\frac{dX}{dt} = V_{syn} - V_{deg} - V_{use} + b_i \quad (2-2)$$

โดยที่ b_i คือผลรวมทั้งหมดของการลำเลียงของเมตาบอไลต์ตัวนอกเข้าไปในระบบเมตาบอลิก ค่าการเจริญเติบโตและการบำรุงรักษาที่ต้องใช้ถูกแสดงด้วยฟลักซ์ในโครงข่ายเมตาบอลิกและมีค่าเท่ากับปฏิริยาการสลายตัว สโตชิโอเมตริกซ์และขนาดของฟลักซ์ ส่วนประกอบชั่วขณะทั้งหมดในการทำสมดุลสามารถแสดงด้วยสมการเมตริกซ์

$$\frac{dX}{dt} = S \cdot v + b \quad (2-3)$$

โดยที่ X เป็นเวกเตอร์ขนาด m ซึ่งเป็นค่าจำนวนเมตาบอไลต์ภายในเซลล์

S เป็นสโตชิโอเมตริกซ์ ขนาด $m \times n$

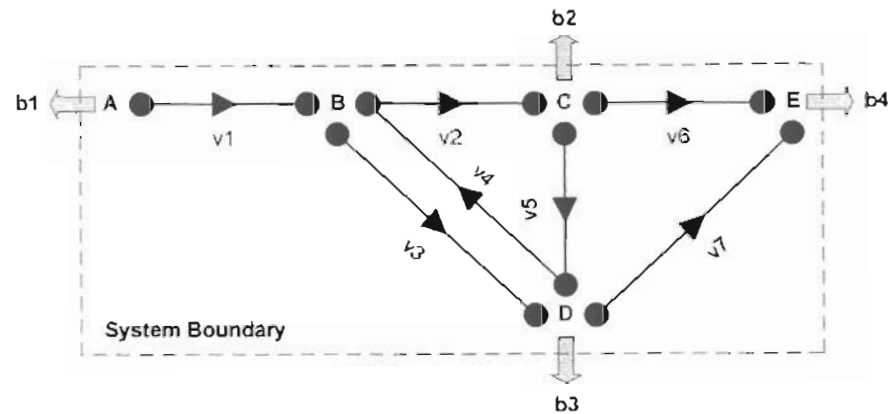
v เป็นเวกเตอร์ของเมตาบอลิกฟลักซ์ ขนาด n

และ b คือเวกเตอร์ของฟลักซ์ถ่ายเทได้

อย่างไรก็ดีในการทำสมดุลทางมวลชั่วขณะ ค่าผลต่าง dX ถูเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสมดุลทางมวลจะถูกอธิบายที่สภาวะคงตัว เขียนเป็นสมการได้คือ

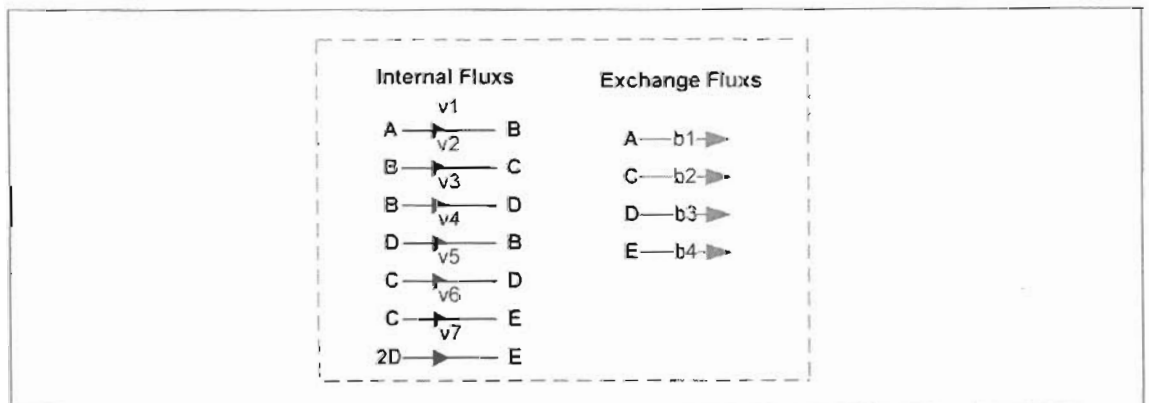
$$S \cdot v + b = 0 \quad (2-4)$$

ดังโครงข่ายสมมติภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ระบบโครงข่ายสมมติ

ระบบนี้จะประกอบด้วย เมตาบอไลต์ (Metabolite) จำนวน 5 ตัวคือ A, B, C, D และ E ฟลักซ์ภายใน (Internal Flux) จำนวน 7 ตัวคือ v_1 ถึง v_7 และฟลักซ์ที่ถ่ายเทได้ (Exchange flux) อีก 4 ตัวนั่นคือ b_1 , b_2 , b_3 และ b_4 ดังภาพที่ 2-2 โดยที่ฟลักซ์ภายใน v_1 จะเกิดจาก A ไป B, v_2 เกิดจาก B ไป C ดังภาพที่ 2-3 ซึ่งระหว่าง B และ D นั้นปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับ (Reversible) ได้ และ v_7 จะเกิดจาก 2 โมลของ D เปลี่ยนไปเป็น E ด้วย



ภาพที่ 2-3 ฟลักซ์ภายในและฟลักซ์ที่ถ่ายเทได้

ฟลักซ์ที่ถ่ายเทได้ถูกนิยามให้เป็นฟลักซ์จากภายนอก ซึ่งค่าของฟลักซ์จะเป็นลบเมื่อถูกใส่เข้าระบบ และจะมีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นผลผลิตออกจากระบบ

การทำสมดุลทางมวลที่สภาวะคงตัวถูกแสดงไว้ดังสมการ (2-5) โดยทั่วไปสมการเงื่อนไขจะประกอบไปด้วยฟลักซ์ภายในและฟลักซ์ที่ถ่ายเทได้ แต่ละสมดุลทางมวลที่สภาวะคงตัวก็คือแต่ละแถวของสโตชิโอเมตริก S ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้น และเงื่อนไขบังคับของแต่ละฟลักซ์จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned}
A : -v_1 - b_1 &= 0 \\
B : v_1 - v_2 - v_3 + v_4 &= 0 \\
C : v_2 - v_5 - v_6 - b_2 &= 0 \\
D : v_3 - v_4 + v_5 - v_7 - b_3 &= 0 \\
E : v_6 + v_7 - b_4 &= 0
\end{aligned}
\tag{2-5}$$

โดยที่ $0 \leq v_1, \dots, v_7 \leq +\infty$

บทที่ 3

เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด

เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Technique) ในงานวิจัยเกี่ยวกับเกมชีวภาพมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน มีทั้งการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นตามลักษณะปัญหา งานวิจัยหลายชิ้นพยายามวิเคราะห์หาฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) เพื่อใช้ในการจำลองโครงข่าย เมตาบอลิฟล็กซ์ มีการค้นคว้าหาเทคนิคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมการ เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการแยกค่าเอกลักษณะ (Singular Value Decomposition , SVD) ในการช่วยลดขนาดเมตริกซ์ เทคนิคการปีนเขา (Hill Climbing) ในการหาค่ามากที่สุด (Maximization) ของฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้น (Linear Function) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm) ในการหาค่ามากที่สุดของฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

3.1 การแยกค่าเอกฐาน (Singular Value Decomposition) หรือ SVD

SVD [9,10] มีรากฐานมาจากทฤษฎีพีชคณิตเชิงเส้น (Linear Algebra) ซึ่งกล่าวไว้ว่า เมตริกซ์ A ใดๆ ขนาด $M \times N$ โดยที่จำนวนแถว (Row) M มากกว่าหรือเท่ากับจำนวนหลัก (Column) N แล้วสามารถเขียนแทนได้ด้วยผลคูณของเมตริกซ์เชิงตั้งฉากแนวตั้ง (Column-orthogonal Matrix) U ขนาด $M \times M$ เมตริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) W ขนาด $N \times N$ และทรานสโพสของเมตริกซ์เชิงตั้งฉาก (Orthogonal Matrix) V ขนาด $N \times N$ อธิบายเป็น Tableau ดังสมการ (3-1)

$$\begin{pmatrix} A \end{pmatrix}_{M \times N} = \begin{pmatrix} U \end{pmatrix}_{M \times M} \cdot \begin{pmatrix} w_1 & & & \\ & w_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & w_n \end{pmatrix}_{N \times N} \cdot \begin{pmatrix} V^T \end{pmatrix}_{N \times N} \quad (3-1)$$

ซึ่งเมตริกซ์ U และ V เป็นเมตริกซ์เชิงตั้งฉากทั้งหมด หรือกล่าวได้ว่าคอลัมน์เป็นเชิงตั้งฉากปกติ (Orthonormal) ดังสมการ

$$\sum_{i=1}^M U_{ik} U_{in} = \delta_{kn} \quad \text{เมื่อ } 1 \leq k \leq N, 1 \leq n \leq N \quad (3-2)$$

$$\sum_{j=1}^N V_{jk} V_{jn} = \delta_{kn} \quad \text{เมื่อ } 1 \leq k \leq N, 1 \leq n \leq N \quad (3-3)$$

หรือเขียนเป็น Tableau ได้คือ

$$\begin{pmatrix} U^T \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V^T \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

SVD ยังสามารถใช้กับกรณีที่มีขนาด $M < N$ ได้ แต่ในกรณีนี้ค่าเอกฐาน (Singular Value) w_j ที่ $j = M+1, \dots, N$ จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่งผลให้คอลัมน์ของเมทริกซ์ U เป็นศูนย์ด้วย ทำให้สมการ (3-2) ไม่เป็นจริง ดังนั้นในสมการที่ (3-2) จะใช้ได้เฉพาะเมื่อ k และ n น้อยกว่าหรือเท่ากับ M

การแยก (Decomposition) ของเมทริกซ์ A ดังสมการที่ (3-1) สามารถใช้ในการแก้ปัญหาเมทริกซ์เอกฐานได้เกือบทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเมทริกซ์ A เป็นเมทริกซ์จัตุรัสขนาด $N \times N$ กล่าวได้ว่าเมทริกซ์ U, V และ W ก็เป็นเมทริกซ์จัตุรัสที่มีขนาดเดียวกัน ดังนั้นการอินเวอร์สเมทริกซ์เหล่านี้สามารถทำได้ง่าย โดย U และ V เป็นเมทริกซ์เชิงตั้งฉาก ดังนั้นการอินเวอร์สเมทริกซ์ก็คือการทรานสโพส และ W ซึ่งเป็นเมทริกซ์ทแยงมุม การอินเวอร์สเมทริกซ์ก็คือการสลับเศษเป็นส่วนของสมาชิกตัวนั้นๆ เขียนสมการอินเวอร์สเมทริกซ์ของ A ได้คือ

$$A^{-1} = V \cdot [\text{diag}(1/w_j)] \cdot U^T \quad (3-5)$$

ซึ่งถ้า A เป็นเมทริกซ์เอกฐานแล้ว ในส่วนของเมทริกซ์ทแยงมุม W จะมีบางค่าของ w_j เป็นศูนย์ ทำให้ไม่สามารถอินเวอร์สเมทริกซ์ได้ ในการแก้ปัญหของ SVD จึงแทนที่ $1/w_j$ ด้วย “ศูนย์” สำหรับกรณีที่ w_j เท่ากับศูนย์ ดังนั้นในการส่งผ่านเชิงเส้นของเมทริกซ์เอกฐานหรือ Singular Matrix ดังสมการ (3-6) การส่งผ่านเชิงเส้นจากปริภูมิเวกเตอร์ (Vector Space) x ไปปริภูมิเวกเตอร์ b โดยที่ A คือเมทริกซ์จัตุรัส และ x, b คือเวกเตอร์

$$A \cdot x = b \quad (3-6)$$

ผลจากค่าเอกฐาน (Singular value) บางค่าที่เป็นศูนย์ ทำให้ปริภูมิย่อย (subspace) บางส่วนของ x ถูกส่งผ่านไปเป็นปริภูมิย่อยเพียงบางส่วนของ b และมีบางส่วนของ x ที่ถูกส่งผ่านไปเป็นศูนย์ ($A \cdot x = 0$) ปริภูมิส่วนนี้เรียกว่า ปริภูมิศูนย์ (Null Space) มิติของปริภูมิศูนย์เรียกว่า ศูนย์ภาพ (nullity) ของ A สำหรับบางส่วนของ b ที่ถูกส่งผ่านมาจะเรียกว่าพิสัยของ A ขนาดพิสัยเรียกว่า ค่าลำดับที่ (rank) ของ A ดังนั้นถ้าเมตริกซ์ A ไม่เป็นเอกฐาน พิสัยของ A ก็คือปริภูมิเวกเตอร์ b ซึ่งมีค่าลำดับที่เท่ากับ N แต่ถ้าเมตริกซ์ A เป็นเอกฐาน ค่าลำดับที่จะน้อยกว่า N หรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าลำดับที่บวกกับศูนย์ภาพมีค่าเท่ากับ N ดังนั้นชุดคำตอบของสมการที่ (3-6) แสดงได้ดังสมการที่ (3-7) คือ

$$x = V \cdot [diag(1/w_j)] \cdot (U^T \cdot b) \quad (3-7)$$

3.2 เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Technique)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเทคนิคที่เลือกใช้กับงานวิจัยนี้ คือขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill Climbing Algorithm) [11] ซึ่งมีลักษณะการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันสูงสุดหรือต่ำสุด สำหรับฟังก์ชัน $f(x)$ ที่มีค่า x เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete State) โดยการค้นหาคำตอบจะมีลักษณะคล้ายการไต่เส้นกราฟจากจุดสูงสุด (Vertex) หนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง ทำให้ผลของฟังก์ชันมีค่าขึ้นๆลงๆ จนกระทั่งถึงจุดสูงสุด $x_{\max}$ หรือต่ำสุด $x_{\min}$ เทคนิคนี้ มีขั้นตอนวิธีแสดงดังภาพที่ 3-1

```

/* Hill Climbing Algorithm */
Initialize a starting node;
L = Maximum Step;
α = Factor;
Δxmin = Minimum Step size;
Δx = L / α;
While(Δx > Δxmin){
    for all x{
        /*By Adding*/
        Eval(x+Δx);
        /*By Subtracting*/
        Eval(x-Δx);
        Compare Eval(x, (x+Δx), (x-Δx));{
            X = Good Evaluate;}}
        Δx = Δx / α;
    }
Return (currentNode);

```

ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนวิธีการปีนเขา

หลักการทำงานคือ

1. เริ่มต้นด้วยการสร้างตัวแปรตัดสินใจเริ่มต้น (Initialize a starting point), กำหนดค่าขนาดความกว้างในการค้นหา (Maximum Step, L), กำหนดค่าปัจจัยความกว้างของขั้น (Factor, α), กำหนดความกว้างของขั้นต่ำสุด (Minimum Step size, $\Delta x_{\min}$)
2. คำนวณค่าจุดประสงค์ของตัวแปรตัดสินใจเริ่มต้น
3. คำนวณค่าจุดประสงค์ของตัวแปรตัดสินใจข้างเคียงโดยการบวกด้วยความกว้างของขั้น
4. คำนวณค่าจุดประสงค์ของตัวแปรตัดสินใจข้างเคียงโดยการลบด้วยความกว้างของขั้น
5. เปรียบเทียบผลค่าจุดประสงค์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจกับตัวแปรตัดสินใจข้างเคียงโดยการบวกและการลบ
6. เก็บค่าตัวแปรตัดสินใจที่ให้ค่าจุดประสงค์ที่ดีกว่า
7. ทำซ้ำขั้นนี้จนครบทุกตัวในสมาชิกของตัวแปรตัดสินใจ
8. ลดขนาดของความกว้างของขั้นลง วนการทำงานซ้ำตั้งแต่ข้อ 3
9. การคำนวณจะจบลงเมื่อขนาดความกว้างของขั้นน้อยกว่าความกว้างของขั้นต่ำสุด

3.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm) มีหลักการเบื้องต้นมาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ซึ่งเป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) อีกเทคนิคหนึ่ง โดยจะกล่าวถึงแนวคิดคุณสมบัติ ขั้นตอนการทำงาน และตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรม (Genetic Operator) ต่างๆ ซึ่งได้แก่ การเข้ารหัส (Encoding) การคำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness Evaluation) การคัดเลือก (Selection) การครอสโอเวอร์ (Crossover) การกลายพันธุ์ (Mutation) กลยุทธ์คัดแยกส่วนที่ดีที่สุด (Elitist Strategy) และการปรับมาตราความแข็งแรง (Fitness Scaling) ตามลำดับ

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพัฒนาขึ้นโดย Holland [12] เป็นกระบวนการหาคำตอบที่ใช้แนวความคิดของ ชาร์ลส์ ดาร์วิน (Charles Darwin) คือ สิ่งมีชีวิตใดที่แข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสอยู่รอดได้มากกว่า หมายความว่า สิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงกว่ามีโอกาสถ่ายทอดพันธุกรรมไปให้ลูกหลานได้มากกว่า โดยที่ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น จะอิงมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการ (Theory of Evolution)

ข้อแตกต่างระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมาตรฐาน มี 4 ประการคือ

1. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการค้นหาคำตอบในพื้นที่การค้นหา (Search Space) ของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหาโดยที่ตัวแปรตัดสินใจนี้จะถูกเข้ารหัสเป็นสายรหัส
 2. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการหาคำตอบจากหลายๆ จุดในพื้นที่ที่เป็นไปได้ในการหาคำตอบไปพร้อมๆ กันนั้น ซึ่งจะทำให้โอกาสที่คำตอบที่หาพบเป็นค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) นั้นลดลง
 3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้ข้อมูลที่เป็นผลที่เกิดจากค่าจุดประสงค์ (Objective Value) ในการกำหนดทิศทางในการหาคำตอบในพื้นที่การค้นหา ในขณะที่เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบมาตรฐานนั้นมักจะใช้ข้อมูลที่ได้มาจากอนุพันธ์ (Derivative) ของฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) ในการกำหนดทิศทางของการหาคำตอบ
 4. ในกระบวนการหาคำตอบของเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบมาตรฐาน จะใช้กฎการส่งผ่านเชิงกำหนด (Deterministic Transmission Rule) ส่วนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้กฎการส่งผ่านเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Transmission Rule) ในกระบวนการหาคำตอบ
- ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นมีรากฐานมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการ ดังนั้นคำศัพท์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะเป็นคำศัพท์ทางชีววิทยา โดยจะสามารถแปลความหมายได้ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ความหมายของคำศัพท์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

คำศัพท์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	ความหมาย
โครโมโซม (Chromosome)	สายรหัส
ยีน (Gene)	รหัส หรือ อักษร
อัลลีล (Allele)	ค่าของรหัส
โลคัส (Locus)	ตำแหน่งของรหัสบนสายรหัส
จีโนไทป์ (Genotype)	ลักษณะสายรหัส
ฟีโนไทป์ (Phenotype)	สิ่งที่ได้จากการถอดรหัสลักษณะสายรหัส

การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการหาคำตอบแบบขนาน (Parallel Search) คำตอบที่ได้ในรอบ (Generation) หนึ่ง จะผ่านการแปลง (Transformation) เพื่อทำให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้นในรอบถัดไป กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่ายสามารถแสดงดังภาพที่ 3-2

```

/*Genetic Algorithm*/
Initialise a set of random individuals;

for (i=0;i< Max generation; i++){
    decision variable = decode(individual);
    fitness = fitness function(decision variable);
    selected individual = selection(individual, fitness);
    crossover individual = crossover(selected individual, pc);
    mutation individual = mutation(crossover individual, pm);
    individual = mutate individual;
}

```

ภาพที่ 3-2 กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย

จากภาพที่ 3-2 ขั้นตอนวิธีเริ่มจากการสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population) นำประชากรเริ่มต้นไปคำนวณค่าความแข็งแรง แล้วคัดเลือกประชากรที่แข็งแรง ไปทำการครอสโอเวอร์และการกลายพันธุ์ จบหนึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า 1 รุ่น ในแต่ละลำดับขั้นตอนสามารถอธิบายเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

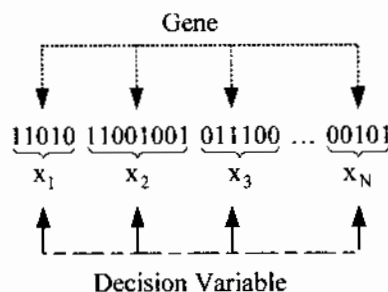
3.3.1 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

การสร้างประชากรเริ่มต้น เกิดจากสายรหัส (Chromosome) ของอักษรที่มาจากการสุ่ม ซึ่งรูปแบบที่ง่ายที่สุดในการเข้ารหัสคือเลขฐานสอง ดังนั้นอักษรที่ได้จากการสุ่มคือเลข 0 และ 1 การกำหนดจำนวนประชากรขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้เขียนโปรแกรมเอง การกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นมากจะทำให้โอกาสในการพบคำตอบมาก แต่ก็ทำให้การคำนวณในแต่ละรุ่นช้าลง เพราะจำนวนประชากรในรุ่นมีมาก

3.3.2 การเข้ารหัส (Encoding)

การเข้ารหัส เป็นการนำสายรหัสมาแปลงค่าหรือคำนวณเป็นตัวเลขที่สนใจ รูปแบบของสายรหัสมีหลายแบบเช่น สายรหัสฐานสอง (Binary Chromosome) สายรหัสจัดอันดับ (Sequence Chromosome) และสายรหัสจำนวนเต็ม (Integer Chromosome) เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของสายรหัสขึ้นอยู่กับตัวปัญหา ในที่นี้จะยกตัวอย่างวิธีการเข้ารหัสที่ง่ายที่สุดคือ รหัสฐานสอง (Binary Code) ผลที่ได้จากการเข้ารหัสวิธีนี้คือ สายรหัสจะประกอบขึ้นจากกลุ่มของยีน (Gene) หลายกลุ่ม โดยที่แต่ละกลุ่มของยีนจะแทนค่าตัวเลขที่สนใจ 1 ตัว และแต่ละยีนจะมีอัลลิลเป็น 0 หรือ 1

ภาพที่ 3-3 คำตอบของปัญหาคือสายรหัสหรือโครโมโซม 1101011001001011100 ... 00101 กลุ่มของยีนคือ 11010, 11001001, 011100, ..., 00101 และตัวเลขที่สนใจคือ $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ ถ้าในปัญหานี้ความยาวของสายรหัสมีค่า L ดังนั้นจำนวนแบบที่เป็นไปได้ของสายรหัสคือ 2^L แบบ โดยเริ่มจาก 000000000000000000 ... 00000 ไปจนถึง 1111111111111111 ... 11111



ภาพที่ 3-3 การเข้ารหัสฐานสอง

3.3.3 การคำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness Evaluation)

ค่าความแข็งแรงของสมาชิกแต่ละตัวในประชากร มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าจุดประสงค์ที่เกิดจากการแทนค่าโดยสมาชิกของประชากรนั้นๆ ค่าความแข็งแรงเกิดจากการคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์ของตัวแปรตัดสินใจที่ได้จากการถอดรหัส โดยฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการหาค่าสูงสุด (Maximization Problem) เหมาะที่สุดคือฟังก์ชันกำไร และปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization Problem) คือฟังก์ชันค่าใช้จ่าย ดังนั้นค่าความแข็งแรงของปัญหาการหาค่าสูงสุดคือ

$$f_i = Z, \quad (3-9)$$

และค่าความแข็งแรงของปัญหาการหาค่าต่ำสุดคือ

$$f_i = C_{\max} - J_i \quad (3-10)$$

โดยที่ f_i คือ ค่าความแข็งแรงของประชากรตัวที่ i

Z , คือ ค่าจุดประสงค์ซึ่งเป็นผลจากฟังก์ชันกำไรของประชากรตัวที่ i

J_i คือ ค่าจุดประสงค์ซึ่งเป็นผลจากฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของประชากรตัวที่ i

$C_{\max}$ คือ ค่าบวกค่าหนึ่งซึ่งมีค่ามากกว่าค่าจุดประสงค์ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ หาได้โดยอาศัยข้อมูลของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่สนใจเป็นหลัก

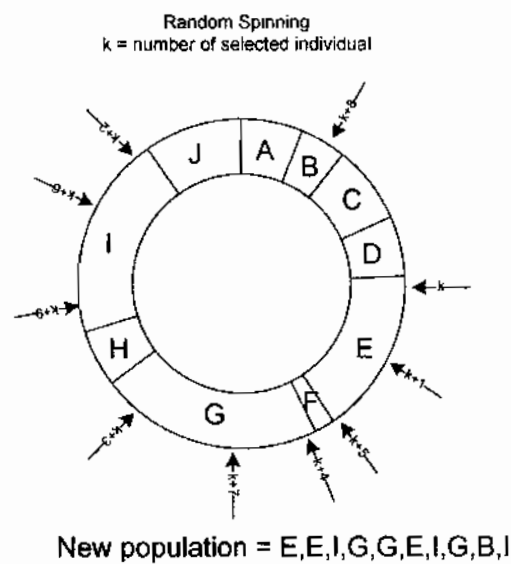
3.3.4 การคัดเลือก (Selection)

เป็นตัวดำเนินการที่มีความสำคัญมากในการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ทำหน้าที่คัดเลือกประชากรภายในกลุ่มจากค่าความแข็งแรง ประชากรรุ่นใหม่จะถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่พันธุ์ (Reproduction) จากประชากรที่แข็งแรงในรุ่นปัจจุบัน โดยใช้ค่าความแข็งแรงเป็นตัวกำหนด

อัตราการแพร่พันธุ์ อัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงของประชากรแต่ละตัวกับผลรวมของค่าความแข็งแรงจากประชากรทุกตัวในรุ่นปัจจุบันจะเป็นตัวกำหนดสัดส่วน ของจำนวนประชากรนั้นๆ ในประชากรรุ่นใหม่ กล่าวคือประชากรในรุ่นปัจจุบันที่มีค่าความแข็งแรงมากมีโอกาสแพร่พันธุ์ไปในประชากรรุ่นใหม่สูง ในขณะที่ประชากรที่มีค่าความแข็งแรงน้อยจะมีโอกาสแพร่พันธุ์ไปในประชากรรุ่นใหม่ต่ำ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการคัดเลือกนี้มีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน ในที่นี้เทคนิคที่จะกล่าวถึงคือ การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ตต์ (Roulette Wheel Selection) และการคัดเลือกโดยการชักตัวอย่างทุกตัวแบบสุ่ม (Stochastic Universal Sampling Selection)

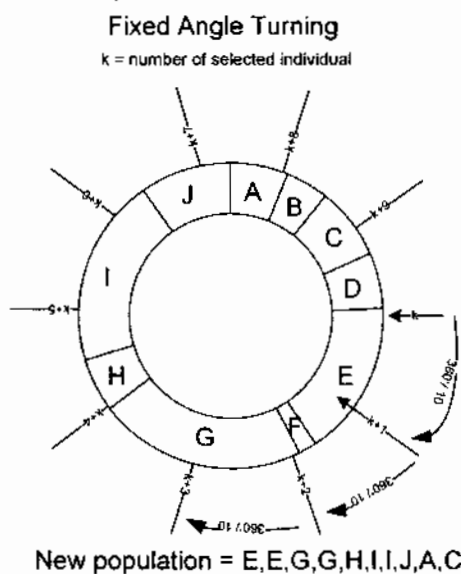
3.3.4.1 การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ตต์ (Roulette Wheel Selection) เป็นวิธีการเลือกที่เลียนแบบการเล่นวงล้อรูเล็ตต์ โดยที่ความกว้างแต่ละช่องของวงล้อรูเล็ตต์ถูกกำหนดด้วยค่าความแข็งแรงของประชากรแต่ละตัว องศาความกว้างแปรผันตรงกับค่าความแข็งแรงของประชากรตัวนั้นๆ ทำการกำหนดตัวชี้ตำแหน่ง (Fixed Point) แล้วหมุนวงล้อรูเล็ตต์แบบสุ่ม เมื่อวงล้อหยุดหมุนประชากรตัวที่ตกอยู่ในตำแหน่งของตัวชี้ จะถูกเลือกและส่งผ่านเป็นประชากรรุ่นถัดไป

สังเกตได้ว่า ถ้าขั้นตอนในการหมุนวงล้อรูเล็ตต์นั้นเป็นกระบวนการแบบสุ่มที่แท้จริงแล้ว การสุ่มเป็นจำนวนอนันต์ (Infinite Number) ครั้ง จะได้ประชากรที่ถูกเลือกมีจำนวนใกล้เคียงกับสัดส่วนเป้าหมาย อย่างไรก็ตาม จากจำนวนครั้งของการหมุนวงล้อรูเล็ตต์ถูกกำหนดโดยจำนวนของประชากรซึ่งไม่เป็นจำนวนอนันต์ ทำให้สัดส่วนของประชากรในรุ่นถัดไปจะแตกต่างจากสัดส่วนที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ ปัญหานี้จะสามารถแก้ไขได้บางส่วนโดยใช้การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบสุ่ม แสดงลักษณะการเลือกได้ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ตต์

3.3.4.2 การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเฟ้นสุ่ม (Stochastic Universal Sampling Selection) จะมีการสร้างวงล้อสุ่มที่มีความลำเอียงตามค่าความแข็งแรงของประชากรเหมือนกัน แต่ต่างกันที่การหมุนวงล้อสุ่ม เริ่มต้นที่การสุ่มจุดชี้ตำแหน่งจุดแรก ค่อยๆ หมุนวนวงล้อเป็นมุม $360^\circ/n$ โดยที่ n คือจำนวนประชากร วงล้อจะหมุนด้วยมุมที่คงที่จนครบตามจำนวนประชากร 1 รอบ จากหลักการนี้จำนวนของสมาชิกที่ถูกเลือกจะใกล้เคียงกับสัดส่วนที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยลดความลำเอียงในการคัดเลือกได้ เนื่องจากโอกาสที่ประชากรจะถูกเลือกซ้ำกันหลายๆ ครั้งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อประชากรตัวนั้นๆ มีค่าความแข็งแรงสูงมากๆ ลักษณะการเลือกแสดงได้ดังภาพที่ 3-5

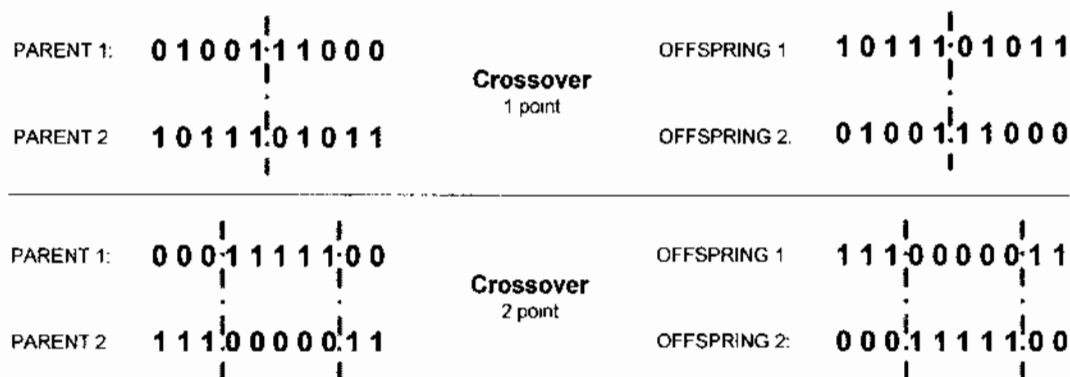


ภาพที่ 3-5 การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเฟ้นสุ่ม

3.3.5 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

การครอสโอเวอร์ทำหน้าที่ ถ่ายทอดลักษณะของประชากรจากรุ่นหนึ่งไปยังอีกรุ่นหนึ่ง โดยมีการสับเปลี่ยนโครงสร้างทางพันธุกรรมจากประชากรที่ถูกคัดเลือกมา โดยการสุ่มเลือกสมาชิกของ ประชากรรุ่นพ่อแม่ (Parent Individual) มาจำนวน 2 ตัว ส่งผ่านไปยังสมาชิกของประชากรรุ่นลูก (Offspring Individual) ซึ่งจะมีจำนวน 2 ตัวเช่นกัน โอกาสที่จะมีการครอสโอเวอร์เกิดขึ้นจะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (Crossover Probability) โดยปกติความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 - 0.9 ซึ่งหมายความว่าถ้าไม่มีการครอสโอเวอร์เกิดขึ้นแล้ว สมาชิกของประชากรรุ่นลูกก็จะเหมือนกับสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ทุกประการ เทคนิคการครอสโอเวอร์ที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ การครอสโอเวอร์แบบ N จุด (N-Point Crossover) และการครอสโอเวอร์แบบเอกรูป (Uniform Crossover)

3.3.5.1 การครอสโอเวอร์แบบ N จุด (N-Point Crossover) เทคนิคนี้การแลกเปลี่ยนยีนระหว่างสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่เพื่อให้เกิดการสร้างสมาชิกของประชากรรุ่นลูกนั้น จะเกิดขึ้น ณ ข้างใดข้างหนึ่งของตำแหน่งการครอสโอเวอร์ (Crossover Site) หรือเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งการครอสโอเวอร์ 2 ตำแหน่งบนโครโมโซม ค่า N จะเป็นส่วนที่กำหนดจำนวนของตำแหน่งการครอสโอเวอร์โดยที่ $N \geq 1$ ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 การครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด และ การครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด

3.3.5.2 การครอสโอเวอร์แบบเอกรูป (Uniform Crossover) เป็นการแลกเปลี่ยนยีนที่แต่ละโลตัสของโครโมโซมในประชากรรุ่นลูก 1 ตัว จะถูกเลือกอย่างสุ่มจากคู่ยีนที่มาจากสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ทั้งสองตัว ดังนั้น โอกาสที่ยีนจะถูกเลือกจากสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ตัวหนึ่งจะเท่ากับ โอกาสที่ยีนจะถูกเลือกจากสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่อีกตัวหนึ่ง ซึ่งหลังจากที่ยีนสำหรับสมาชิกของประชากรรุ่นลูกที่สนใจได้ถูกกำหนดแล้ว ยีนจากคู่ยีนที่ไม่ได้ถูกเลือกก็จะถูกส่งผ่านไปยังสมาชิกของประชากรรุ่นลูกอีกตัวที่เหลือ ดังภาพที่ 3-7

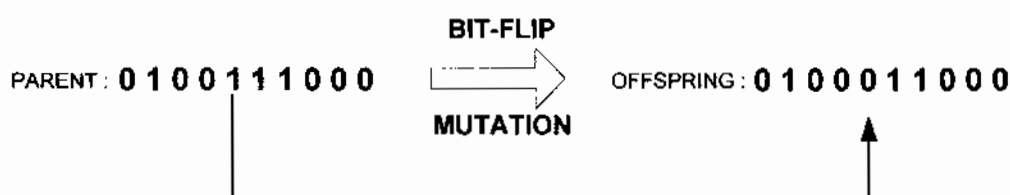


ภาพที่ 3-7 การครอสโอเวอร์แบบเอกรูป

3.3.6 การกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างประชากรใหม่ จากประชากรที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะส่งผลให้สมาชิกของประชากรรุ่นใหม่หรือรุ่นลูกที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ดีกว่า สมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ปัจจุบัน โดยค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.1 การกลายพันธุ์เป็น

วิธีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของยีนเพียงเล็กน้อย ในโครโมโซมของสมาชิกของประชากร การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดการค้นหาคำตอบ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับคำตอบซึ่งแทนโดยสมาชิกของประชากรตัวเดิมในพื้นที่การค้นหา ในกรณีที่โครโมโซมฐานสองถูกใช้ในการแทนค่าผลเฉลย การกลายพันธุ์จะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าบิตจาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0 การกลายพันธุ์ในลักษณะนี้เรียกว่า การกลายพันธุ์โดยกลับค่าบิต (Bit-Flip Mutation) ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 การกลายพันธุ์โดยกลับค่าบิต

ขั้นตอนวิธีวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่ายก็มีขั้นตอนหลักๆดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ในบางส่วนของขั้นตอนมีกระบวนการคิดที่ทำให้การค้นหาคำตอบเป็นเพียงการค้นหาคำตอบแบบเฉพาะที่ (Local solution) ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบในแต่ละส่วนของขั้นตอนจึงนำเอาการปรับมาตราความแข็งแรง (Fitness Scaling) มาช่วยในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังจะอธิบายต่อไป

3.3.7 การปรับมาตราความแข็งแรง (Fitness Scaling)

ในบางครั้งค่าความแข็งแรงของประชากรอาจมีค่าที่ต่ำ หรือสูงเกินกว่าที่ควรจะเป็นเช่น การทำงานในรุ่นแรกๆ อาจมีสมาชิกของประชากรซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าตัวอื่นๆ มาก เป็นผลทำให้ถูกคัดเลือกไปยังรุ่นถัดไปเป็นจำนวนมาก ซึ่งนั่นก็หมายความว่าในรุ่นถัดไปของการทำงานจะมีสมาชิกของประชากรหลายตัวที่มีโครงสร้างคล้ายคลึง กับสมาชิกของประชากรในรุ่นก่อนหน้าทำให้ค่าความแข็งแรงสูงที่ถูกคัดเลือกมา ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเข้าสู่คำตอบก่อนที่ควรจะเป็น (Premature Convergence) ทำให้คำตอบที่หาได้นั้นอาจเป็นค่าเหมาะที่สุดแบบเฉพาะที่

ในการปรับมาตราความแข็งแรงสามารถใช้รูปแบบของสมการเชิงเส้น (Linear Equation) ตามสมการที่ (3-11) และโดยปกติค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อน และหลังการปรับมาตราความแข็งแรงนั้นควรกำหนดให้มีค่าเท่าเดิม เพื่อให้แน่ใจว่าสมาชิกของประชากรตัวที่มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยในรุ่น จึงมีโอกาที่จะถูกคัดเลือกเป็นสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป และสมาชิกของประชากรตัวที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดหลังจากมีการปรับมาตราความแข็งแรงแล้วนั้น โดยจะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนปรับมาตราความแข็งแรง ดังนี้

$$f'_{\max} = C_{\text{mult}} \cdot f_{\text{avg}}$$

โดยที่ C_{mult} เป็นอัตราการถูกเลือกที่ต้องการสำหรับสมาชิกของประชากรที่

แข็งแรงที่สุด สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีจำนวนสมาชิกของประชากรในช่วง 50-100 ค่าของ C_{mult} ที่เหมาะสมคือ 1.2-2.0 โดยการปรับมาตราความเหมาะสมนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

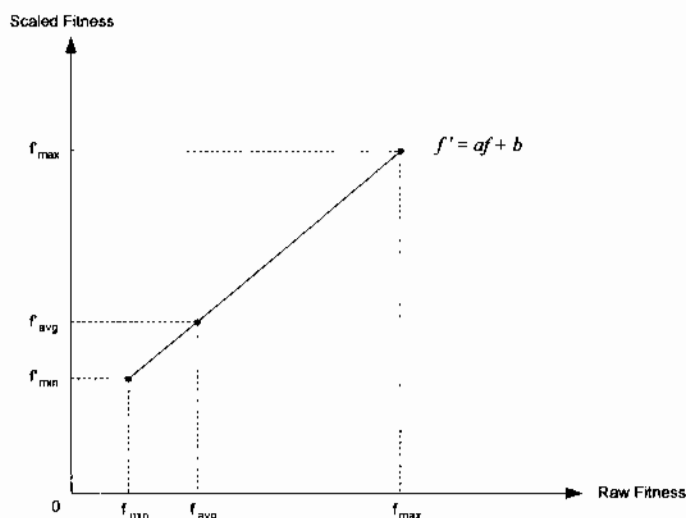
การหาคำตอบในรุ่นแรกๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น อาจมีประชากรบางตัวที่มีความแข็งแรงสูงๆ ทำให้เกิดความลำเอียงอย่างมากในการคัดเลือก และอาจทำให้เกิดการลู่สู่คำตอบก่อนที่ควรจะเป็น ดังนั้นการทำงานของ การปรับมาตราความแข็งแรงในรุ่นแรกๆ จะมีการปรับมาตราความแข็งแรงลักษณะตามภาพที่ 3-9 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า หลังจากมีการปรับมาตราความแข็งแรงแล้ว ทำให้ผลต่างระหว่างค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุด และค่าความแข็งแรงที่ต่ำที่สุดนั้นลดลง ดังนั้นกล่าวได้ว่าการปรับมาตราความแข็งแรงในรุ่นแรกๆ นั้นจะช่วยลดความลำเอียงในการคัดเลือกสมาชิกของประชากร และป้องกันการลู่สู่คำตอบก่อนที่ควรจะเป็น

$$f' = af + b \quad (3-11)$$

โดยที่ f' คือ ค่าความแข็งแรงหลังปรับมาตราความแข็งแรง

f คือ ค่าความแข็งแรงก่อนปรับมาตราความแข็งแรง

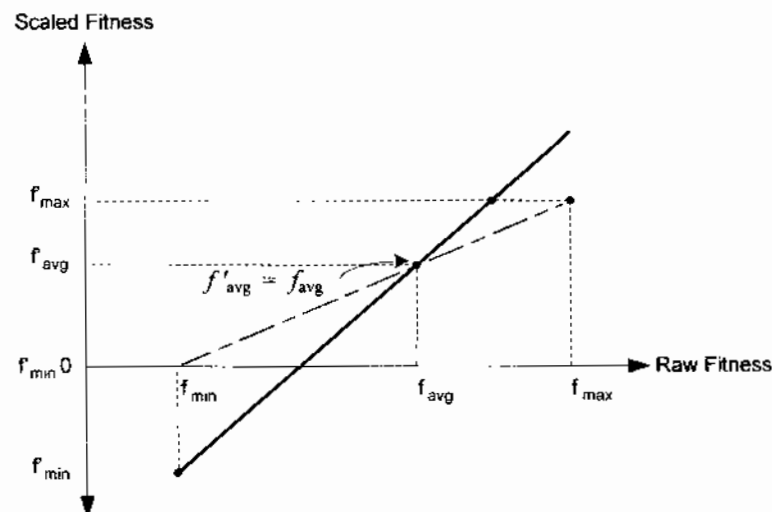
a และ b คือ ค่าคงที่ โดยที่ค่าของ a และ b สามารถหาได้จากภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-9 การปรับมาตราความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นแรกๆ

การหาคำตอบในรุ่นหลังๆ สมาชิกของประชากรส่วนใหญ่จะมีค่าความแข็งแรงสูงใกล้เคียงกัน อาจทำให้แนวทางในการหาคำตอบไม่มีความแน่นอน (Random Walk) การปรับมาตราความ

แข็งแรงในรุ่นหลังจะทำให้ค่าความแข็งแรงของสมาชิกของประชากรที่มีค่าน้อยที่สุดเป็น 0 ซึ่งจะไม่มีโอกาสในการถูกคัดเลือกเลย และเพิ่มความแตกต่างของค่าความแข็งแรงสมาชิกของประชากร จากภาพที่ 3-10 การปรับมাত্রาค่าความแข็งแรงในช่วงหลังจะทำการเลื่อนกราฟเชิงเส้นของค่าความแข็งแรงขึ้น จนกระทั่งค่าความแข็งแรงของสมาชิกของประชากรตัวที่มีค่าต่ำสุดกลายเป็น 0



ภาพที่ 3-10 การปรับมাত্রาค่าความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นหลังๆ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สำหรับการปรับมাত্রาเชิงเส้น (Linear Scaling) ที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปเป็นขั้นตอนวิธี ได้ดังภาพที่ 3-11

```
/* Linear Scaling */
```

```

If (f_min > (C_mult * f_avg - f_max) / (C_mult - 1.0)) {
    delta = f_max - f_avg;
    a = (C_mult - 1.0) * f_avg / delta;
    b = (f_avg * (f_max - C_mult * f_avg)) / delta;
} else {
    delta = f_avg - f_min;
    a = f_avg / delta;
    b = -f_min * f_avg / delta;
}

```

ภาพที่ 3-11 ขั้นตอนวิธีสำหรับการหาค่า a และ b สำหรับการปรับมাত্রาค่าความแข็งแรง

สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมถูกพัฒนาขึ้นโดย Potter และ De Jong [13] เป็นการสำรวจพื้นที่การค้นหาโดยใช้ประชากรให้เป็นประโยชน์ ซึ่งประกอบด้วยสมาชิกของสปีชีส์หรือสมาชิกของประชากร (Subpopulation) สมาชิกจากสปีชีส์เดียวกันจะเป็นตัวแทนของตัวแปรตัดสินใจ 1 ตัวแปรหรือตัวแปรตัดสินใจจาก 1 ส่วนของปัญหา

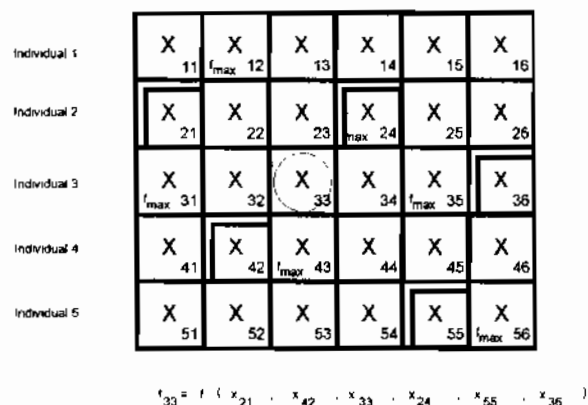
สมาชิกที่มาจากสปีชีส์ที่ต่างกันจะเป็นตัวแทนของตัวแปรตัดสินใจคนละตัวแปร ดังนั้นในการหาค่าความแข็งแรงของสมาชิก 1 ตัวทำได้โดย การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจ เพื่อให้เกิดคำตอบที่มีตัวแปรตัดสินใจครบตามลักษณะปัญหา ในการดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมนั้นอาจมาจากการสุ่มภายในสปีชีส์ ดังภาพที่ 3-13 หรือการเลือกจากสมาชิกที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์ก็ได้ ดังภาพที่ 3-14 และในส่วนอื่นๆกระบวนการทำงานจะใช้หลักการเดียวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังภาพที่ 3-12

```

/* Cooperative Coevolutionary Algorithm */
gen = 0;
for (each species){
    pops(gen) = randomly initialised population
    evaluate fitness of each individual in pops(gen);
}
termination condition = false;
while (termination condition == false){
    gen = gen+1;
    for (each species){
        select pops(gen) from pops(gen-1) based on fitness;
        apply genetic operator to pops(gen);
        evaluate fitness of each individual in pops(gen);
    }
    if ( gen == maximum number of generations || the solution has converged ) {
        termination condition = true;
    }
}

```

ภาพที่ 3-12 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม



ภาพที่ 3-13 การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการสุ่ม

Individual 1	$\textcircled{X_{11}}$	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
Individual 2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}
Individual 3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}
Individual 4	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}	X_{46}
Individual 5	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{54}	X_{55}	X_{56}

$$f_{11} = f(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16})$$

ภาพที่ 3-14 การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการเลือกจากสมาชิกที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์

บทที่ 4

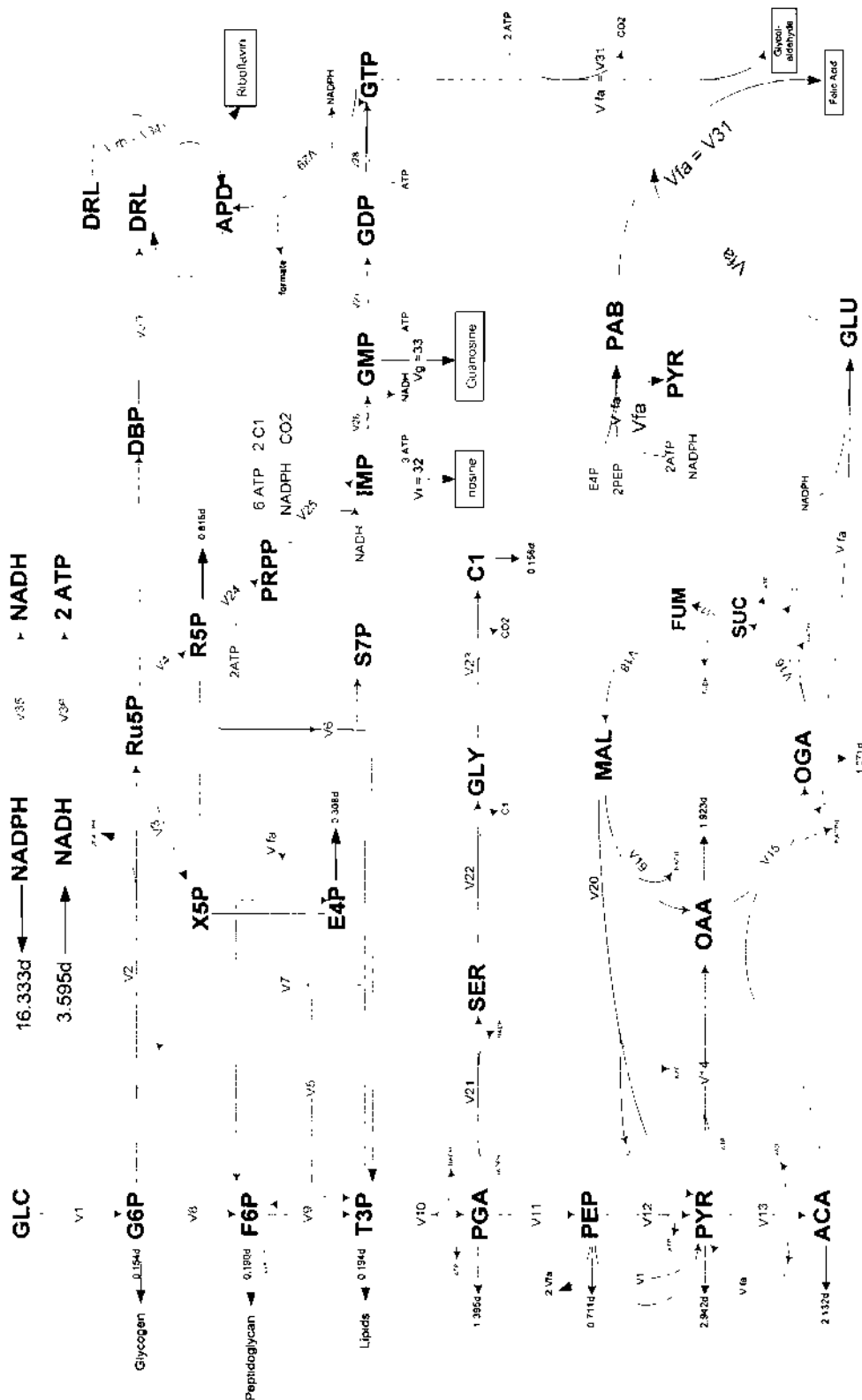
การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดกับโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์

ในบทนี้กล่าวถึง การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill Climbing Algorithm) ในการแก้ปัญหาฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้น และใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและทำงานร่วมในการหาค่าสัดส่วนของพลังงานต่อฟลักซ์ทั้งหมดและค่าฟลักซ์ที่เป็นไปได้ ภายในโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ การแปลงแบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* ให้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ การหาคำตอบของเมตริกซ์เงื่อนไข การนำสมการเข้าเทคนิคการปีนเขาและการคำนวณเชิงพันธุกรรม

4.1 การแปลงแบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* ให้เป็นสมการคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าสัดส่วนของพลังงานต่อฟลักซ์ทั้งหมดภายใน โครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* โดยใช้โครงข่ายปฏิกิริยาเคมีชีวภาพดังภาพที่ 4-1 ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดย Sauer et al. [1] และเป็นที่นิยมใช้อ้างอิงในหลายๆงานวิจัยต่อมา โดยที่ตัวย่อของแต่ละเมตาบอไลต์ (Metabolite) ได้แสดงชื่อไว้ดังสารบัญช้าย่อ

จากภาพที่ 4-1 แบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* สามารถนำมาแปลงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้หลักการทำสมดุลทางมวลดังที่ได้กล่าว ในบทที่ 2 โดยทิศทางการไหลของฟลักซ์ที่ไหลเข้าเมตาบอไลต์จะมีค่าเป็นบวก และเมื่อไหลออกจากเมตาบอไลต์จะมีค่าเป็นลบ แสดงสมการทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละเมตาบอไลต์ได้ดังสมการที่ (4-1) ถึง (4-29)



ภาพที่ 4-1 แบบจำลองโครงข่ายเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย *B. subtilis*

$$\text{G6P: } v_1 - v_2 - v_8 = b_{G6P} \quad (4-1)$$

$$\text{F6P: } v_8 + v_5 + v_7 - v_9 = b_{F6P} \quad (4-2)$$

$$\text{T3P: } v_5 + v_6 - v_7 + 2v_9 - v_{10} = b_{T3P} \quad (4-3)$$

$$\text{PGA: } v_{10} - v_{11} - v_{21} = b_{PGA} \quad (4-4)$$

$$\text{PEP: } -v_1 + v_{11} - v_{12} - 2v_{31} = b_{PEP} \quad (4-5)$$

$$\text{PYR: } v_1 + v_{12} - v_{13} - v_{14} + v_{20} + v_{31} = b_{PYR} \quad (4-6)$$

$$\text{ACA: } v_{13} - v_{15} = b_{ACA} \quad (4-7)$$

$$\text{Ru5P: } v_2 - v_3 - v_4 - v_{30} = 0 \quad (4-8)$$

$$\text{X5P: } v_3 - v_5 - v_6 = 0 \quad (4-9)$$

$$\text{R5P: } v_4 - v_6 - v_{24} = b_{R5P} \quad (4-10)$$

$$\text{S7P: } v_6 - v_7 = 0 \quad (4-11)$$

$$\text{E4P: } -v_5 + v_7 - v_{31} = b_{E4P} \quad (4-12)$$

$$\text{SER: } v_{21} - v_{22} = 0 \quad (4-13)$$

$$\text{GLY: } v_{22} - v_{23} = 0 \quad (4-14)$$

$$\text{MAL: } v_{18} - v_{19} - v_{20} = 0 \quad (4-15)$$

$$\text{OAA: } v_{14} - v_{15} + v_{19} = b_{OAA} \quad (4-16)$$

$$\text{OGA: } v_{15} - v_{16} - v_{31} = b_{OGA} \quad (4-17)$$

$$\text{SUC: } v_{16} - v_{17} = 0 \quad (4-18)$$

$$\text{FUM: } v_{17} - v_{18} = 0 \quad (4-19)$$

$$\text{PRPP: } v_{24} - v_{25} = 0 \quad (4-20)$$

$$\text{IMP: } v_{25} - v_{26} - v_{32} = 0 \quad (4-21)$$

$$\text{GMP: } v_{26} - v_{27} - v_{33} = 0 \quad (4-22)$$

$$\text{GDP: } v_{27} - v_{28} = 0 \quad (4-23)$$

$$\text{GTP: } v_{28} - v_{29} - v_{31} = 0 \quad (4-24)$$

$$\text{APD: } v_{29} - v_{30} + v_{34} = 0 \quad (4-25)$$

$$\text{DRL: } v_{30} - 2v_{34} = 0 \quad (4-26)$$

$$\text{NADPH: } 2v_2 + v_{15} - v_{21} - v_{25} + v_{29} - 2v_{31} - v_{35} = b_{NADPH} \quad (4-27)$$

$$\text{NADH: } v_{10} + v_{13} + v_{16} + v_{17} + v_{19} + v_{20} + v_{21} + v_{25} + v_{26} + v_{35} - v_{36} = b_{NADH} \quad (4-28)$$

$$\text{ATP: } -v_9 + v_{10} + v_{12} - v_{14} + v_{16} - 2v_{24} - 6v_{25} - 3v_{26} - v_{27} - v_{28} - 4v_{31} + 2v_{36} = b_{ATP} \quad (4-29)$$

โดยที่ค่า b คือ พลังงานที่ต้องใช้ในการสร้าง Biomass ของ *B.subtilis* 1012 มีหน่วยเป็น ($\mu\text{mol} / \text{g dry weight}$) แสดงค่าพลังงานดังตาราง 4-1

จากโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* ซึ่งประกอบด้วยเมตาบอลิท์ 28 ตัว ฟลักซ์ภายใน 36 ตัวและฟลักซ์ภายนอก 13 ตัว จัดเข้าสู่สมการเงื่อนไขการหาสมดุลทางมวลที่สภาวะคงตัว ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 สมการที่ (2-4) จัดรูปเมตริก S เวกเตอร์ v และ b ได้ดังสมการที่ (4-31)

$$S \cdot v = b \quad (4-31)$$

โดยที่ S คือ เมตริกสัมประสิทธิ์ของฟลักซ์ที่ไหลผ่านเมตาบอลิท์

v คือ ฟลักซ์ (mmol/g dry weight)

b คือ ค่าพลังงานภายนอก หรือฟลักซ์ที่ถ่ายเทได้ (mmol/g dry weight)

4.2 การหาคำตอบของเมตริกซ์เงื่อนไข

จากหลักการของ SVD ทำให้ได้ผลคำตอบของเวกเตอร์ v แต่ค่าเหล่านี้ยังไม่ผ่านเงื่อนไขที่ว่า “ทุกฟลักซ์ (v) ต้องมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์” ดังนั้นในงานวิจัยจึงนำผลของเมตริกซ์ศูนย์ (Null Matrix) ไปเข้าเทคนิคการหาเหมาะสมที่สุดต่อไป

เมตริกซ์ศูนย์ (NULL) ขนาด 36×8 ถูกนำไปเป็นเมตริกซ์เงื่อนไขบังคับแทนเมตริกซ์ S ซึ่งมีขนาด 28×36 ดังนั้นเงื่อนไขใหม่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาคือ

$$\begin{bmatrix} v \end{bmatrix}_{36 \times 1} + \begin{bmatrix} NULL \end{bmatrix}_{36 \times 8} \cdot \begin{bmatrix} x' \end{bmatrix}_{8 \times 1} \geq 0 \quad (4-32)$$

โดยที่ เวกเตอร์ v คือคำตอบของสมการ $S \cdot v = b$

NULL คือเมตริกซ์ศูนย์ ขนาด 36×8

x' คือตัวแปรตัดสินใจ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ฟังก์ชันจุดประสงค์เชิงเส้น 4 ฟังก์ชันด้วยกันคือ 1). พลังงาน ATP เหลือมากที่สุด, 2). Folic Acid Flux (V_{fa}) มากที่สุด, 3). Riboflavin Flux (V_{rb}) มากที่สุดและ 4). Growth Rate (D) มากที่สุด ดังสมการที่ (4-33) ถึง (4-36)

$$\max(v_{ATP_excess}) \quad (4-33)$$

$$\max(v_{fa}) \quad (4-34)$$

$$\max(v_{rb}) \quad (4-35)$$

$$\max D \quad (4-36)$$

โดยที่ v_{ATP_excess} คือ พลังงาน ATP ที่เกิดขึ้นและถูกใช้ภายในโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของ

B.subtilis หน่วยเป็น $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$

v_{fa} คือ ฟลักซ์ที่เกิดผลผลิตเป็น Folic Acid หรือ v_{31} ในโครงข่ายเมตาบอลิกดังภาพที่ 4-1 หน่วยเป็น $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$

v_{rb} คือ ฟลักซ์ที่เกิดผลผลิตเป็น Riboflavin หรือ v_{34} ในโครงข่ายเมตาบอลิกดังภาพที่ 4-1 หน่วยเป็น $mmol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$

D คือ อัตราการถูกทำลาย หน่วยเป็น h^{-1}

4.3 ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการป็นเขาในการหาผลเฉลยของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์

สมการทางคณิตศาสตร์ (4-32) ของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ถูกนำมาเป็นสมการเงื่อนไขบังคับของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ต่างๆของขั้นตอนวิธีการป็นเขา

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนดใช้
ความกว้างสูงสุดของลำดับขั้น (Maximum Step Size)	15
ความกว้างต่ำสุดของลำดับขั้น (Minimum Step Size)	0.000001
α (Factor for reduce step size)	2

สำหรับฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ 1 ค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

Objective:

$$\max(-V_9 + V_{10} + V_{12} - V_{13} + V_{16} + 2V_{25} - 2V_{26} - 6V_{27} - 3V_{28} - V_{29} - V_{30} - 4V_{33} - 38.608D)$$

Constraint:

$$S \cdot V = b * d$$

$$V \geq 0$$

(4-37)

โดยที่

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{36} \end{bmatrix}_{36 \times 1} + \begin{bmatrix} \text{NULL} \end{bmatrix}_{36 \times 8} \cdot \begin{bmatrix} x' \end{bmatrix}_{8 \times 1}$$

และ d คือ อัตราการถูกทำลายกำหนดให้เป็น $0.1 \ h^{-1}$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ 2 Folic Acid Flux (V_{31}) มากที่สุด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

Objective:

$$\text{Max}(V_{31})$$

Constraint:

$$S \cdot V = b \times d$$

$$V \geq 0 \quad (4-38)$$

โดยที่

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{36} \end{bmatrix}_{36 \times 1} + \begin{bmatrix} \text{NULL} \end{bmatrix}_{36 \times 8} \cdot \begin{bmatrix} x' \end{bmatrix}_{8 \times 1}$$

และ d คือ อัตราการถูกทำลายกำหนดให้เป็น 0.1 h^{-1}

ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ 3 Riboflavin Flux (V_{34}) มากที่สุด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

Objective:

$$\max(V_{34})$$

Constraint:

$$S \cdot V = b \times d$$

$$V \geq 0 \quad (4-39)$$

โดยที่

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{36} \end{bmatrix}_{36 \times 1} + \begin{bmatrix} \text{NULL} \end{bmatrix}_{36 \times 8} \cdot \begin{bmatrix} x' \end{bmatrix}_{8 \times 1}$$

และ d คือ อัตราการถูกทำลายกำหนดให้เป็น 0.1 h^{-1}

ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ 4 Dilution Rate (D) มากที่สุด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

Objective:

$$\max(D)$$

Constraint:

$$S \cdot V - b \times D = 0$$

$$V \geq 0$$

$$V_1 = 5(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (4-40)$$

โดยที่

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{36} \end{bmatrix}_{36 \times 1} + \begin{bmatrix} \text{NULL} \end{bmatrix}_{36 \times 8} \cdot \begin{bmatrix} x' \end{bmatrix}_{8 \times 1}$$

4.4 ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาผลเฉลยของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์

ฟังก์ชันจุดประสงค์และสมการเงื่อนไขบังคับจะถูกนำมาสร้างเป็นฟังก์ชันความแข็งแรงเพื่อใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ภายใต้ตัวดำเนินการและค่าต่างๆของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แสดงไว้ในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-4 ตัวดำเนินการและค่าต่างๆของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนดให้
ลักษณะการเข้ารหัส	เลขฐานสอง
จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	8
ความยาวสายรหัส ต่อ หนึ่งตัวแปรตัดสินใจ	20 Bit
จำนวนประชากร	100
จำนวนเจนเนอเรชัน	200
จำนวนครั้งที่ทำการจำลอง	30
วิธีที่เลือกใช้ในฟังก์ชัน	
- Fitness Scaling	- Linear scaling
- Selection	- Stochastic universal sampling
- Crossover	- 2-point crossover ($p_c = 0.9$)
- Mutation	- Bit-flip mutation ($p_m = 0.1$)

และใช้ฟังก์ชันความแข็งแรงคือ

$$F = \max \left(\frac{v_{ATP_excess}}{\sum_{i=1}^{36} v_i} \right) - f_{error} \quad (4-41)$$

$$f_{error} = \sum_{j=1}^8 (vv_j < 0) \quad (4-42)$$

โดยที่

$$vv_j = v_j + \sum_{k=1}^{k=8} N_{jk} \cdot x_k$$

ในการดำเนินงานของขั้นตอนวิธี จะเริ่มจากการสมมติคำตอบแบบสุ่ม ด้วยจำนวนประชากรหรือสายรหัสจำนวน 100 ตัว โดยลักษณะของยีนเป็นเลขฐานสอง ความยาว 20 บิต การสมมติของ

คำตอบจะกำหนดขอบเขตให้แต่ละค่าของฟลักซ์ที่เป็นไปได้ไม่เกิน 30 mmol/g dry weight และไม่ต่ำกว่า 0 mmol/g dry weight

$$\begin{array}{ccccccc}
 V_{11} & & V_{12} & & \dots & & V_{136} \\
 \cdot & & & & & & \\
 \cdot & & & & & & \\
 \cdot & & & & & & \\
 V_{1001} & & V_{1002} & & \dots & & V_{10036}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccccc}
 01000110010101001011 & 10111001100101010010 & \dots & 00101001010001101110 \\
 \cdot & & & \\
 \cdot & & & \\
 \cdot & & & \\
 01110101101100111111 & 11111111000000001111 & \dots & 00000111011000000000
 \end{array}$$

ชุดคำตอบที่สมมติขึ้นถูกนำเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสเป็นเลขฐานสิบ โดยที่ขอบเขตไม่ต่ำกว่าศูนย์และไม่เกิน 30

เลขฐานสอง		เลขฐานสิบ
00000000000000000000	=	0 - Value _{min}
11111111111111111111	=	30 - Value _{max}

ดังนั้นการคำนวณค่าของ 01000110010101001011 คือ

$$Value_{min} + \frac{Value_x \times (Value_{max} - Value_{min})}{2^n - 1} \quad (4-43)$$

$$0 + \frac{(2^0 + 2^1 + 2^3 + 2^6 + 2^8 + 2^{10} + 2^{13} + 2^{14} + 2^{18}) \times (30 - 0)}{2^{20} - 1} = \frac{288075}{1048575} = 0.2747 \quad (4-44)$$

คำตอบสมมติถูกถอดรหัส และแบ่งประชากรเป็นสปีชีส์ โดยในการจำลองกำหนดให้มี 36 สปีชีส์ ส่งเข้าสู่ฟังก์ชันความแข็งแรง(4-41) การคำนวณค่าความแข็งแรงในรอบแรกประชากรที่ใช้ในการคำนวณจะเกิดจากคำตอบสมมติที่สปีชีส์นั้นกับคำตอบสมมติที่สปีชีส์อื่นๆ ที่ได้จากการสุ่มค่าความแข็งแรงที่ได้ในครั้งแรกเป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการคัดเลือกในรอบต่อไป การคัดเลือกเป็นการคัดเลือกแบบเฟ้นสุ่ม ซึ่งคำตอบสมมติที่มีค่าความแข็งแรงมาก จะมีโอกาสถูกคัดเลือกเป็นคำตอบสมมติในรอบถัดไป แต่ในการจำลองจะทำการสเกลค่าความแข็งแรงเพื่อลดค่าความแข็งแรงที่สูงเกินไปและต่ำเกินไป ประชากรหรือชุดคำตอบที่ได้จะเข้าสู่การสลับสายพันธุ์ ซึ่ง

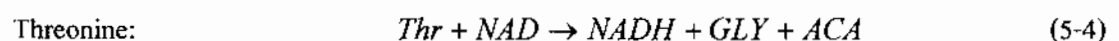
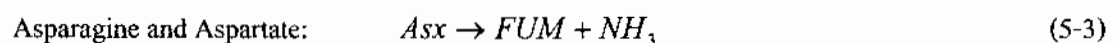
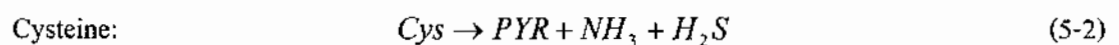
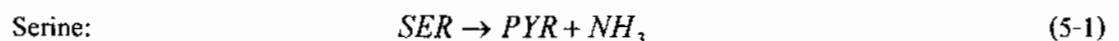
ใช้ความน่าจะเป็น 0.9 ในการเกิดการสลับสายพันธุ์แบบ 2 ตำแหน่ง และการกลายพันธุ์ที่ความน่าจะเป็น 0.1 ในการเกิดการกลายพันธุ์แบบบิตต่อบิต ในขั้นตอนวิธีในรุ่นที่ต่อๆมา ในการคำนวณค่าความแข็งแรงจะเกิดจากคำตอบที่สปีชีส์นั้นกับคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์อื่นๆ เป็นเช่นนี้ จนจบ 200 เจนเนอเรชัน แสดงผลการจำลองในบทถัดไป

บทที่ 5

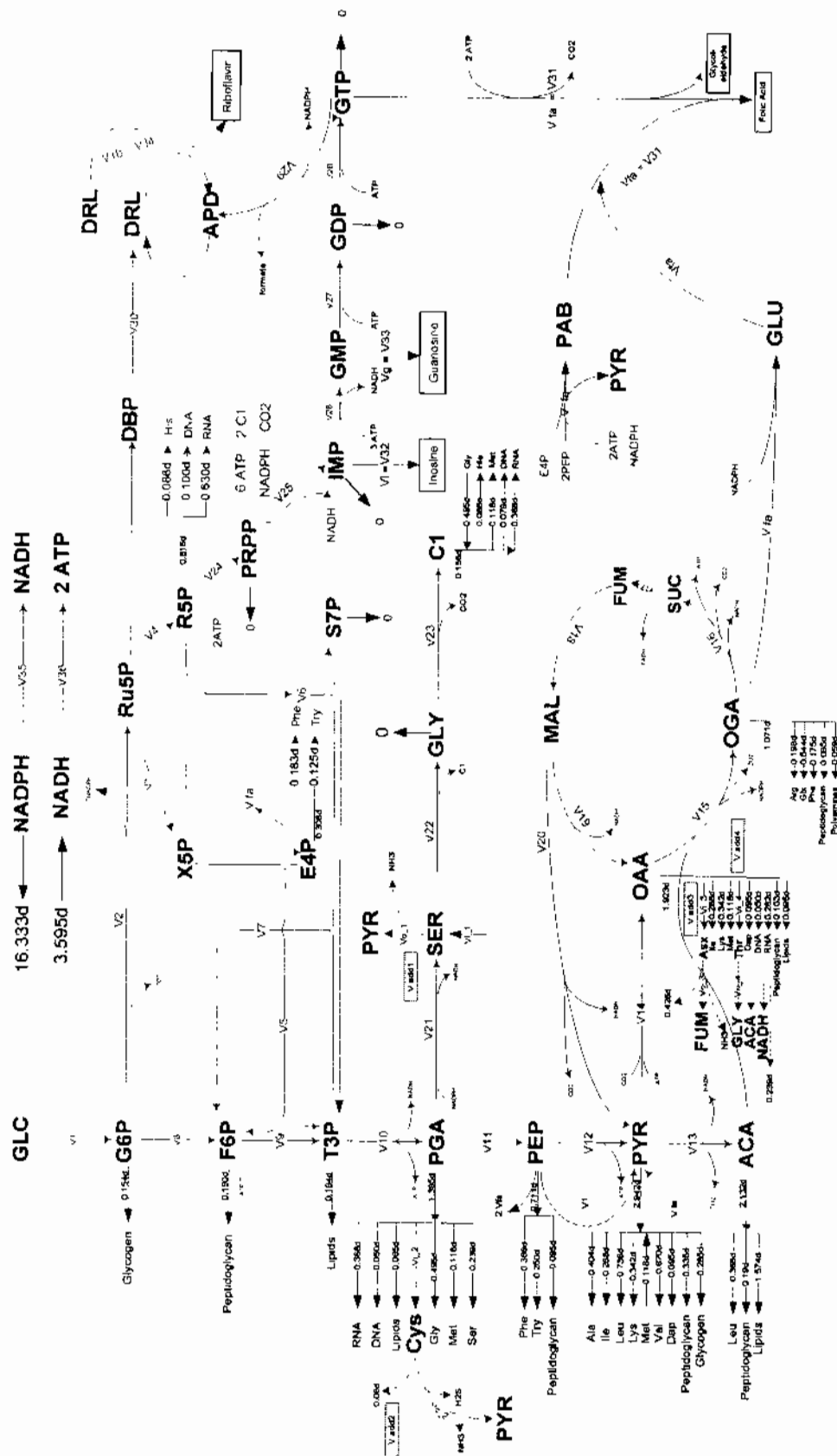
ผลการวิจัย

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 กรณีศึกษาการวิเคราะห์ความสมดุลของ ฟลักซ์คาร์บอน สำหรับการหาค่าตอบเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้น และฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้น ภายใต้ระบบสมการเงื่อนไขแบบเชิงเส้นในการจำลอง โครงข่าย เมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis* โดยฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้นประกอบด้วย 4 ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ พลังงาน ATP เหลือมากที่สุด, Folic Acid Flux (V_{FA}) มากที่สุด, Riboflavin Flux (V_{RF}) มากที่สุดและ Growth Rate (D) มากที่สุด สำหรับฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้นคือสัดส่วนของพลังงานต่อฟลักซ์ทั้งหมด ภายในโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย รวมไปถึงการจำลองการเพิ่มขึ้นที่มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมนั้นคือ Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของฟลักซ์ในโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์ของแบคทีเรีย *B.subtilis*

ในงานวิจัยนี้ ฟังก์ชันจุดประสงค์ทุกฟังก์ชันได้ทำการจำลองเป็นจำนวน 30 ครั้ง เพื่อทดสอบนัยสำคัญของความแตกต่างที่ได้ การแสดงผลจะนำเสนอในรูปแบบของภาพและตาราง แสดงผลค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective value) ผลเปรียบเทียบสัดส่วนค่าจุดประสงค์กับสารตั้งต้น (Objective / Glucose) ผลประสิทธิภาพพลังงานต่อสารตั้งต้น (ATP / Glucose) รวมไปถึงการเปรียบเทียบค่าจุดประสงค์และค่าประสิทธิภาพพลังงานต่อผลรวม โมลคาร์บอนของสารตั้งต้น และผลการเพิ่มขึ้นแต่ละชนิดดังสมการ (5-1) ถึง (5-4)



แสดงภาพแบบจำลองการเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 5-1 และแสดงผลระหว่างสภาวะก่อนและหลังเพิ่มขึ้น แยกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5-1 แบบจำลองโครงสร้างของแบคทีเรีย *B. subtilis* เมื่อทำการเพิ่มด่าง (5-1) ถึง (5-4)

5.1 ผลจำลองการหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุด

ผลการจำลองโดยสรุปดังตารางที่ 5-1 แสดงผลการจำลองของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐาน (Base) ดังโครงสร้างในภาพที่ 4-1 และผลการจำลองโครงข่ายที่ทำการเพิ่มคั่งสมการ (5-1) ถึง (5-4) รวมไปถึงการแสดงค่าประสิทธิภาพพลังงาน ATP เทียบกับผลรวมโมลคาร์บอน ฟลักซ์ขาเข้า ($\text{mol Carbon}_{\text{input}}$)

ตารางที่ 5-1 ผลการจำลองค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐาน และโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Metabolic Addel	ผลการจำลอง $Max(ATP_{\text{excess}})$ (mmol/g/h)	Energy Efficiency ($ATP/\text{mol Carbon}_{\text{input}}$)
Base	58.466	2.122
Add Serine	38.594	1.731
Add Cysteine	52.824	2.282
Add Asx	40.901	1.972
Add Threonine	44.600	2.386

จากตารางพบว่าในแบบจำลองพื้นฐานให้ค่าพลังงาน ATP สูงสุดคือ 58.466 mmol/g/h แต่ไม่ได้ให้ค่าประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) ที่สูงสุด เนื่องจากการใช้สารตั้งต้นจำนวนมากเพื่อให้เกิดผลผลิตจำนวนมาก เมื่อนำค่าผลผลิตที่ได้มาเปรียบเทียบกับสัดส่วนผลิตภัณฑ์แล้วจึงไม่ดีเท่าที่ควร แต่จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่เพิ่ม Threonine ให้ค่าพลังงาน ATP เท่ากับ 44.60 mmol/g/h ซึ่งถือว่าไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น แต่ให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า และเมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาแสดงในรูปแบบของภาพการแจกแจงฟลักซ์ โดยใช้สารตั้งต้นเป็นบรรทัดฐาน ดังภาพที่ 5-2

พบว่าในช่วง V_3 ถึง V_7 ซึ่งเป็นฟลักซ์ใน Pentose Phosphate Pathway (PPP) ค่าฟลักซ์ของแบบจำลองที่เพิ่ม Threonine สูงกว่า Serine, Asparagine, Cysteine และแบบจำลองพื้นฐานตามลำดับ ช่วง V_{15} ถึง V_{18} ซึ่งเป็นฟลักซ์ใน Tricarboxylic acid (TCA) cycle ค่าฟลักซ์จากแบบจำลองที่เพิ่ม Threonine มีค่าสูงกว่าแบบจำลองที่เพิ่ม Cysteine ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองพื้นฐาน และมากกว่าแบบจำลองที่เพิ่ม Serine กับ Asparagine ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปใน

แนวโน้มเดียวกับค่าประสิทธิภาพพลังงาน ATP และในช่วง V_{24} ถึง V_{34} พบว่าฟลักซ์ในช่วงนี้มีค่าน้อยมากเนื่องจากในช่วงนี้มีการใช้ ATP ค่อนข้างสูง ซึ่งสมเหตุสมผลกับการหาค่าพลังงาน ATP ที่เหลือมากที่สุด แสดงผลจำลองโดยละเอียดของแต่ละ ฟลักซ์ในภาคผนวก ก

5.2 ผลจำลองการหาค่า Folic Acid Flux (V_{f9}) มากที่สุด

ผลการจำลองที่ดีที่สุดของ โครงข่ายเมตาบอลิซึมพื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่มทั้ง 4 แบบแสดงในตารางที่ 5-2 ผลจำลองโดยละเอียดของแต่ละฟลักซ์แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5-2 ผลการจำลองแต่ละฟลักซ์จากการจำลองค่า Folic Acid Flux (V_{f9}) มากที่สุดของ โครงข่ายเมตาบอลิซึมพื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Flux Number	Flux value (mmol/g cell/h)					
	Addel					
	Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr	
1	4.942	3.615	3.678	3.456	3.390	Glucose uptake rate
2	2.211	1.751	1.663	1.865	1.952	
3	0.681	0.575	0.572	0.749	0.771	
4	1.530	1.176	1.091	1.116	1.181	
5	0	0.025	0.034	0.145	0.165	Flux in PP Pathway
6	0.681	0.550	0.537	0.605	0.606	
7	0.681	0.550	0.537	0.605	0.606	
8	2.715	1.849	2.000	1.575	1.422	
9	3.378	2.405	2.553	2.306	2.174	
10	6.736	4.815	5.120	4.736	4.495	
11	6.555	4.676	4.694	4.386	4.280	Flux in Upper Glycolysis
12	0.241	0	0	0	0	
13	4.589	3.425	3.944	3.245	2.796	
14	1.776	2.819	1.397	2.144	0.928	
15	4.376	3.212	3.731	3.031	3.151	Flux in Lower Glycolysis
16	3.619	2.610	3.151	2.495	2.634	
17	3.619	2.610	3.151	2.495	2.634	
18	3.619	2.610	3.151	2.877	2.634	

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

Flux Number	Flux value (mmol/g cell/h)					
	Addel					
	Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr	
19	2.793	0.585	2.526	1.080	2.416	Flux in Lower Glycolysis
20	0.826	2.025	0.625	1.797	0.218	
21	0.042	0	0.287	0.210	0.075	Flux for Biosynthesis
22	0.042	1.483	0.287	0.210	0.075	
23	0.042	1.483	0.287	0.210	0.643	
24	0.767	0.544	0.472	0.430	0.493	Flux for Metabolite Production
25	0.767	0.544	0.472	0.430	0.493	
26	0.767	0.495	0.472	0.430	0.493	
27	0.650	0.495	0.472	0.430	0.410	
28	0.650	0.495	0.472	0.430	0.410	
29	0	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	0	
31	0.650	0.495	0.472	0.430	0.410	
32	0	0.050	0	0	0	
33	0.117	0	0	0	0.083	
34	0	0	0	0	0	ATP Flux
35	5.056	3.548	3.720	3.630	4.034	
36	29.172	21.017	23.828	20.906	21.216	
V_{in}	0	1.886	0.865	0.425	0.592	
V_{out}	0	0.403	0.859	0.382	0.568	
Objective Value	0.650	0.495	0.472	0.430	0.410	
V_{fa} / V_i	0.132	0.137	0.128	0.124	0.121	
$V_{fa} / (V_i + V_{in})$	0.132	0.090	0.104	0.111	0.103	
Energy Efficiency (ATP/mol Carbon _{input})	1.605	1.154	1.625	1.490	1.153	

จากตารางที่ 5-2 พบว่าในโครงข่ายพื้นฐานให้ Folic Acid Flux สูงสุด เนื่องจากแบบจำลองไม่ได้จำกัดการใช้สารตั้งต้นที่ V_i ดังนั้นการใช้สารตั้งต้นมากย่อมทำให้เกิดผลผลิตมากเช่นกัน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ V_i ที่เท่ากันแล้ว แสดงผลดังภาพที่ 5-3 ลักษณะของฟลักซ์แต่ละ

แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในการเพิ่ม Serine ให้ค่า Folic Acid Flux สูงสุด เนื่องจากการเพิ่ม Serine มีการเพิ่มเข้าไปอีก เสมือนการเพิ่มสารตั้งต้นทำให้ผลผลิตสูงขึ้นตาม เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ต่อการเพิ่มขึ้น (V_{add}) แล้ว พบว่าการเพิ่มขึ้น V_{add} หนึ่งร้อยละ จะให้ Folic Acid Flux เพิ่มขึ้นหนึ่งส่วน จากภาพผลในช่วง V_3 ถึง V_7 ฟลักซ์ในแบบจำลองที่เพิ่ม Threonine จะมีค่าค่อนข้างสูงกว่าในแบบจำลองอื่นซึ่งส่งผลให้เกิด Folic Acid Flux ที่น้อย ในช่วง V_{15} ถึง V_{18} ฟลักซ์จากแบบจำลองที่เพิ่ม Cysteine จะสูงกว่าแบบจำลองอื่น ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพพลังงาน ATP คือแบบจำลองที่เพิ่ม Cysteine มีประสิทธิภาพพลังงาน ATP มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบ Folic Acid Flux ต่อสารตั้งต้นทั้งหมด

นั่นคือเมื่อมีการเพิ่มขึ้น สารตั้งต้นจะประกอบด้วย V_1 และ V_m พบว่า การเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้เกิด Folic Acid Flux ที่สูงขึ้นเลย ซึ่งจะใช้การพิจารณาในระดับคาร์บอนอธิบายดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 เปอร์เซ็นต์ฟลักซ์คาร์บอนเข้าและขาออก จากการจำลองค่า Folic Acid Flux (V_m) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิซึมพื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Flux Input (V_i)	Substance	Number of Carbon	Percentage of Carbon in Flux Input				
			((mol _{carbon} x V_i) x 100 / sum of Flux Input)				
			Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr
V_1	Glucose	6	84.085	65.949	77.648	77.582	77.923
V_{14}	CO ₂	1	5.035	8.572	4.914	8.022	3.554
V_{25}	CO ₂	1	2.176	1.655	1.662	1.607	1.890
V_{25}	C ₁	2	4.352	3.310	3.323	3.215	3.779
V_{25}	Glycine	2	4.352	3.310	3.323	3.215	3.779
V_i	Flux add		0.000	17.205	9.131	6.359	9.075

Flux Output (V_o)	Substance	Number of Carbon	Percentage of Carbon in Flux Output				
			((mol _{carbon} x V_o) x 100 / sum of Flux Output)				
			Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr
V_2	CO ₂	1	6.271	5.324	5.851	6.980	7.479
V_{13}	CO ₂	1	13.014	10.413	13.875	12.140	10.713
V_{15}	CO ₂	1	12.409	9.765	13.125	11.342	12.073
V_{16}	CO ₂	1	10.261	7.936	11.087	9.334	10.093
V_{20}	CO ₂	1	2.342	6.158	2.199	6.725	0.837

ตารางที่ 5-3 (ต่อ)

Flux Output (V _o)	Substance	Number of Carbon	Percentage of Carbon in Flux Output				
			((mol _{carbon} x V _o) x 100 / sum of Flux Output)				
			Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr
V ₂₂	C ₁	1	0.118	4.509	1.009	0.787	0.288
V ₂₃	C ₁	1	0.118	4.509	1.009	0.787	2.465
V ₂₃	CO ₂	1	0.118	4.509	1.009	0.787	2.465
V ₂₉	Formate	1	0	0	0	0	0
V ₃₀	Formate	1	0	0	0	0	0
V ₃₁	Folic Acid	19	35.041	28.567	31.569	30.538	29.832
V ₃₁	CO ₂	1	1.844	1.504	1.662	1.607	1.570
V ₃₁	Glycolaldehyde	2	3.689	3.007	3.323	3.215	3.140
V ₃₂	Inosine	10	0	1.514	0	0	0
V ₃₃	Guanosine	10	3.317	0	0	0	3.194
V ₃₄	Riboflavin	17	0	0	0	0	0
Sum b	Sum of Biosynthesis		11.459	12.286	14.281	15.757	15.850

จากผลที่ว่า การเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้เกิด Folic Acid ที่สูงขึ้นเลยนั้น เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ฟลักซ์คาร์บอนขาออก ของโครงข่ายที่เพิ่ม Serine จะเห็นได้ว่า เกิดการไหลออกที่ V₂₀ , V₂₂ และ V₂₃ ค่อนข้างสูง จึงทำให้ Folic Acid มีค่าน้อย ในโครงข่ายที่เพิ่ม Cysteine พบว่านอกจากเกิดการสูญเสียที่ V₂₂ และ V₂₃ แล้ว ยังมีการสูญเสียที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นเข้าไปแล้วเกิดการไหลออกที่จุดนั้นด้วย ทำให้การเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลที่เป็นประโยชน์ให้กับ Folic Acid ประกอบกับเปอร์เซ็นต์ฟลักซ์คาร์บอนของสารตั้งต้นกลูโคสที่มีปริมาณน้อยกว่าจึงทำให้เกิดผลผลิตที่น้อยกว่า สำหรับโครงข่ายที่เพิ่ม Asparagine พบว่าเกิดการสูญเสียจำนวนมากที่ V₂₀ ในรูปแบบของคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งการสูญเสียที่จุดที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นเข้าไป จึงส่งผลให้เกิด Folic Acid ที่น้อยกว่า และในโครงข่ายที่เพิ่ม Threonine ก็เช่นเดียวกันคือเกิดการสูญเสียที่ V₂₃ แล้วยังมีที่ V₂ ด้วย ซึ่งการสูญเสียที่ V₂ นั้นจะมาจากการใส่สารตั้งต้น คือการใส่สารตั้งต้นมากก็จะเกิดการสูญเสียในรูปแบบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ V₂ มากเช่นกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบการเพิ่ม Cysteine, Asparagine และ Threonine จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์สารตั้งต้น V₁ ที่ใกล้เคียงกันแต่ปริมาณการเพิ่ม V_{in} ที่ต่างกัน การเพิ่มขึ้นจำนวนที่มากกว่าใน

Cysteine ก็ให้ Folic Acid ที่สูงกว่า Threonine แต่การเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าใน Asparagine กลับให้ Folic Acid ที่สูงกว่า Threonine จึงกล่าวได้ว่า การเพิ่ม Threonine ทำให้ Folic Acid ลดลง

5.3 ผลจำลองการหาค่า Riboflavin flux มากที่สุด

ผลการจำลองแต่ละฟลักซ์ของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่มขึ้นทั้ง 4 แบบแสดงในตารางที่ 5-4 แสดงผลการจำลองทั้งหมดในภาคผนวก ก

ตารางที่ 5-4 ผลการจำลองแต่ละฟลักซ์จากการจำลองค่า Riboflavin flux (V_{Rb}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Flux Number	Flux value (mmol/g cell/h)					
	Addel					
	Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr	
1	4.382	3.314	3.494	3.356	3.411	Glucose uptake rate
2	1.788	1.683	3.070	1.377	1.562	
3	0.039	0.195	1.203	0.031	0.031	
4	0.669	0.626	1.092	0.528	0.594	
5	0	0.082	0.584	0	0	Flux in PP Pathway
6	0.039	0.113	0.619	0.031	0.031	
7	0.039	0.113	0.619	0.031	0.031	
8	2.579	1.616	0.408	1.963	1.833	
9	2.599	1.792	1.592	1.975	1.845	
10	5.179	3.647	3.749	3.930	3.671	
11	4.667	3.491	3.586	3.557	3.504	Flux in Upper Glycolysis
12	0.197	0.105	0.012	0.131	0.023	
13	3.985	3.090	3.095	3.120	2.840	
14	3.695	2.997	0.454	1.239	1.981	
15	3.772	2.877	2.882	2.907	2.687	
16	3.657	2.770	2.770	2.800	2.580	
17	3.657	2.770	2.770	2.800	2.580	Flux in Lower Glycolysis
18	3.657	2.770	2.770	3.027	2.580	

ตารางที่ 5-4 (ต่อ)

Flux Number	Flux value (mmol/g cell/h)					
	Addel					
	Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr	
19	0.269	0.073	2.620	1.860	0.898	Flux in Lower Glycolysis
20	3.387	2.697	0.150	1.167	1.682	
21	0.373	0.017	0.024	0.233	0.027	Flux for Biosynthesis
22	0.373	0.127	0.024	0.233	0.027	
23	0.373	0.127	0.024	0.233	0.088	
24	0.548	0.431	0.392	0.416	0.482	Flux for Metabolite Production
25	0.548	0.431	0.392	0.416	0.482	
26	0.548	0.431	0.392	0.416	0.472	
27	0.548	0.431	0.392	0.409	0.469	
28	0.548	0.431	0.392	0.409	0.469	
29	0.540	0.431	0.387	0.409	0.469	
30	1.080	0.862	0.775	0.818	0.937	
31	0.008	0	0.004	0	0	
32	0	0	0	0	0.010	
33	0	0	0	0.007	0.003	
34	0.540	0.431	0.387	0.409	0.469	ATP Flux
35	5.317	4.592	7.353	3.787	4.137	
36	27.280	20.879	23.675	20.888	19.788	
V_{in}	0	0.3742	0.1887	0.2698	0.0842	
V_{out}	0	0.2643	0.1827	0.2272	0.0603	
Objective Value	0.540	0.431	0.387	0.409	0.469	
V_{Rb} / V_I	0.123	0.130	0.111	0.122	0.137	
$V_{Rb} / (V_I + V_{in})$	0.123	0.117	0.105	0.113	0.134	
Energy Efficiency (ATP/mol Carbon _{input})	1.760	1.620	1.991	1.705	1.721	

จากตารางที่ 5-4 พบว่าในโครงข่ายพื้นฐานให้ Riboflavin Flux สูงสุด เช่นเดียวกับผลของการกำจัด Folic Acid แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการผลิตผลิตภัณฑ์คือ Riboflavin Flux ต่อสารตั้งต้น (V_I) ที่เท่ากันแล้ว พบว่าการใส่สารตั้งต้นกลูโคส 1 mmol/g cell/h ในโครงข่ายการเพิ่ม

Threonine ให้ค่า Riboflavin Flux สูงสุดคือ 0.137 mmol/g cell/h และโครงข่ายการเพิ่ม Serine ให้ค่า Riboflavin Flux รองลงมาคือ 0.130 mmol/g cell/h ซึ่งสูงกว่าโครงข่ายพื้นฐานที่ให้ผล Riboflavin Flux สูงสุดจากการไม่กำหนดขอบเขตการใส่สารตั้งต้น แสดงผลดังภาพที่ 5-4 ในช่วง V_2 ถึง V_7 ในแบบจำลองที่เพิ่ม Cysteine ซึ่งเป็นฟลักซ์ใน PP Pathway จะมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่น และ V_{35} ถึง V_{36} ซึ่งเป็น ATP Flux ก็มีค่าสูงเช่นกัน จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพพลังงานมีค่าสูงสุดคือ 1.991 และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ต่อการเพิ่มขึ้น (V_{add}) แล้วพบว่า การเพิ่ม V_{add} ในการเพิ่ม Threonine จะให้ Riboflavin Flux เพิ่มขึ้น 16.88 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในการเพิ่ม Serine ให้ Riboflavin Flux ที่เพิ่มขึ้น 1.84 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาผลการจำลองในระดับคาร์บอน แสดงผลได้ดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 เปอร์เซ็นต์ฟลักซ์คาร์บอนขาเข้าและขาออก จากการจำลองค่า Riboflavin Flux (V_{Rb}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิซึมพื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Flux Input	Substance	Number of Carbon	Percentage of Carbon in Flux Input				
			((mol _{carbon} x V_p) x 100 / sum of Flux Input)				
			Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr
V_1	Glucose	6	80.336	76.016	87.559	82.073	81.239
V_{14}	CO ₂	1	11.290	11.455	1.897	5.049	7.866
V_{25}	CO ₂	1	1.675	1.648	1.636	1.696	1.911
V_{25}	C ₁	2	3.350	3.295	3.272	3.391	3.823
V_{25}	Glycine	2	3.350	3.295	3.272	3.391	3.823
V_1	Flux add		0.000	4.291	2.364	4.399	1.337

Flux Output	Substance	Number of Carbon	Percentage of Carbon in Flux Output				
			((mol _{carbon} x V_o) x 100 / sum of Flux Output)				
			Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr
V_2	CO ₂	1	5.463	6.432	12.825	5.614	6.201
V_{13}	CO ₂	1	12.176	11.813	12.927	12.718	11.273
V_{15}	CO ₂	1	11.525	10.998	12.037	11.848	10.666
V_{16}	CO ₂	1	11.172	10.589	11.572	11.412	10.241
V_{20}	CO ₂	1	10.349	10.310	0.628	4.755	6.677

ตารางที่ 5-5 (ต่อ)

Flux Output	Substance	Number of Carbon	Percentage of Flux Output				
			Base	Add Ser	Add Cys	Add Asx	Add Thr
V ₂₂	C ₁	1	1.139	0.486	0.099	0.952	0.108
V ₂₃	C ₁	1	1.139	0.486	0.099	0.952	0.348
V ₂₃	CO ₂	1	1.139	0.486	0.099	0.952	0.348
V ₂₉	Formate	1	1.649	1.648	1.618	1.667	1.860
V ₃₀	Formate	1	3.298	3.295	3.236	3.335	3.721
V ₃₁	Folic Acid	19	0.490	0.000	0.341	0.000	0.000
V ₃₁	CO ₂	1	0.026	0.000	0.018	0.000	0.000
V ₃₁	Glycolaldehyde	2	0.052	0.000	0.036	0.000	0.000
V ₃₂	Inosine	10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.391
V ₃₃	Guanosine	10	0.000	0.000	0.000	0.283	0.121
V ₃₄	Riboflavin	17	28.035	28.010	27.509	28.345	31.625
Sum b	Sum of Biosynthesis		12.347	15.447	16.954	17.167	16.421

จากตารางที่ 5-5 จะพบว่าการเพิ่ม Threonine ให้ผลเปอร์เซ็นต์ Riboflavin flux ที่สูงกว่าโครงข่ายอื่นๆ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ฟลักซ์คาร์บอนของสารตั้งต้นที่สูงกว่า แต่ในโครงข่ายการเพิ่ม Cysteine มีการใช้เปอร์เซ็นต์ฟลักซ์คาร์บอนของสารตั้งต้นที่ค่อนข้างสูงแต่กลับให้ผลเปอร์เซ็นต์ Riboflavin flux ที่ต่ำกว่าโครงข่ายอื่น เนื่องจากโครงข่ายการเพิ่ม Cysteine เกิดการไหลออกจำนวนมากที่ V₂ ในรูปแบบคาร์บอนไดออกไซด์

5.4 ผลจำลองการหาอัตราการผลิตเบิโตมากที่สุด

สรุปค่าอัตราการผลิตเบิโตสูงสุดของแบบจำลองพื้นฐาน และแบบจำลองที่เพิ่มทั้งสี่ในตารางที่ 5-6 โดยจะประกอบไปด้วยค่าอัตราการผลิตเบิโตสูงสุดของแต่ละแบบจำลอง ค่าพลังงาน ATP ที่เกิดขึ้น และแสดงค่าของแต่ละฟลักซ์ในภาพที่ 5-5 แสดงผลการจำลองทั้งหมดในภาคผนวก ง

ตารางที่ 5-6 ผลการจำลองค่าอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิซึมพื้นฐาน และโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Metabolic Addel	ผลการจำลอง <i>Max (D)</i> <i>h⁻¹</i>	ATP Flux (mmol/g/h)	Energy Efficiency (ATP/Glucose)
Base	0.41	20.663	4.133
Add Serine	0.74	22.269	4.454
Add Cysteine	0.54	10.439	2.088
Add Asparagine	0.66	46.212	9.242
Add Threonine	0.68	30.740	6.148

จากตารางที่ 5-6 เมื่อการจำลองทดสอบการเจริญเติบโตของทุกฟลักซ์ที่เป็นไปได้ ซึ่งค่าอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดคือ 0.7395 h^{-1} ในแบบจำลองที่เพิ่ม Serine แต่พบว่ากลับให้ผลพลังงานเพียง $22.269 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ซึ่งในแบบจำลองที่เพิ่ม Asparagine ให้ผลพลังงานสูงถึง $46.212 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ แต่มีอัตราการเจริญเติบโตเพียง 0.658 h^{-1} เมื่อพิจารณาผลของแต่ละฟลักซ์ในภาพที่ 5-5

พบว่าอัตราการเจริญเติบโตจะแปรผกผันกับฟลักซ์ที่ 35 คือในแบบจำลองพื้นฐานจะมีค่าฟลักซ์ที่ค่อนข้างสูงแต่มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น และในแบบจำลองที่ทำการเพิ่ม Serine มีค่าอัตราการเจริญเติบโตสูงแต่มีค่าฟลักซ์เพียงเล็กน้อย

วิเคราะห์การเพิ่มในแบบจำลองอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด พบว่าในการเพิ่ม Serine ให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตสูงถึง 0.739 ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองพื้นฐานถึง 82.143% เมื่อนำผลทั้ง 30 การจำลองในแบบจำลองพื้นฐาน มาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ATP / Glucose และอัตราการเจริญเติบโต แสดงได้ดังภาพ 5-7 พบว่าอัตราการเจริญเติบโตยิ่งเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพพลังงาน ATP จะลดลง

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง V_2/V_{glc} , V_{15}/V_{glc} และ Growth Rate (h^{-1}) แสดงดังภาพ 5-8 พบว่าเมื่อใช้เส้นนำลักษณะของกราฟในช่วง Dilution rate (Growth Rate) เป็น 0.2 – 0.4 ความสัมพันธ์ของ V_1/V_{glc} จะเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 0.7 และ V_{15}/V_{glc} จะลดลงจาก 0.7 ถึง 0.4 ซึ่งเป็นไปในแนวโน้มนี้อยู่กับงานวิจัยของ Sauer et al. [14] คือความสัมพันธ์ของ V_1/V_{glc} และ V_{15}/V_{glc} จะผกผันกัน แต่ค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ ซึ่ง V_1/V_{glc} จะสูงกว่า และ V_{15}/V_{glc} ค่อนข้างต่ำกว่า เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้มีโครงสร้างคล้ายกันเท่านั้น ไม่ได้เหมือนกันทั้งหมด

5.5 ผลจำลองการหาสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมดที่มากที่สุด

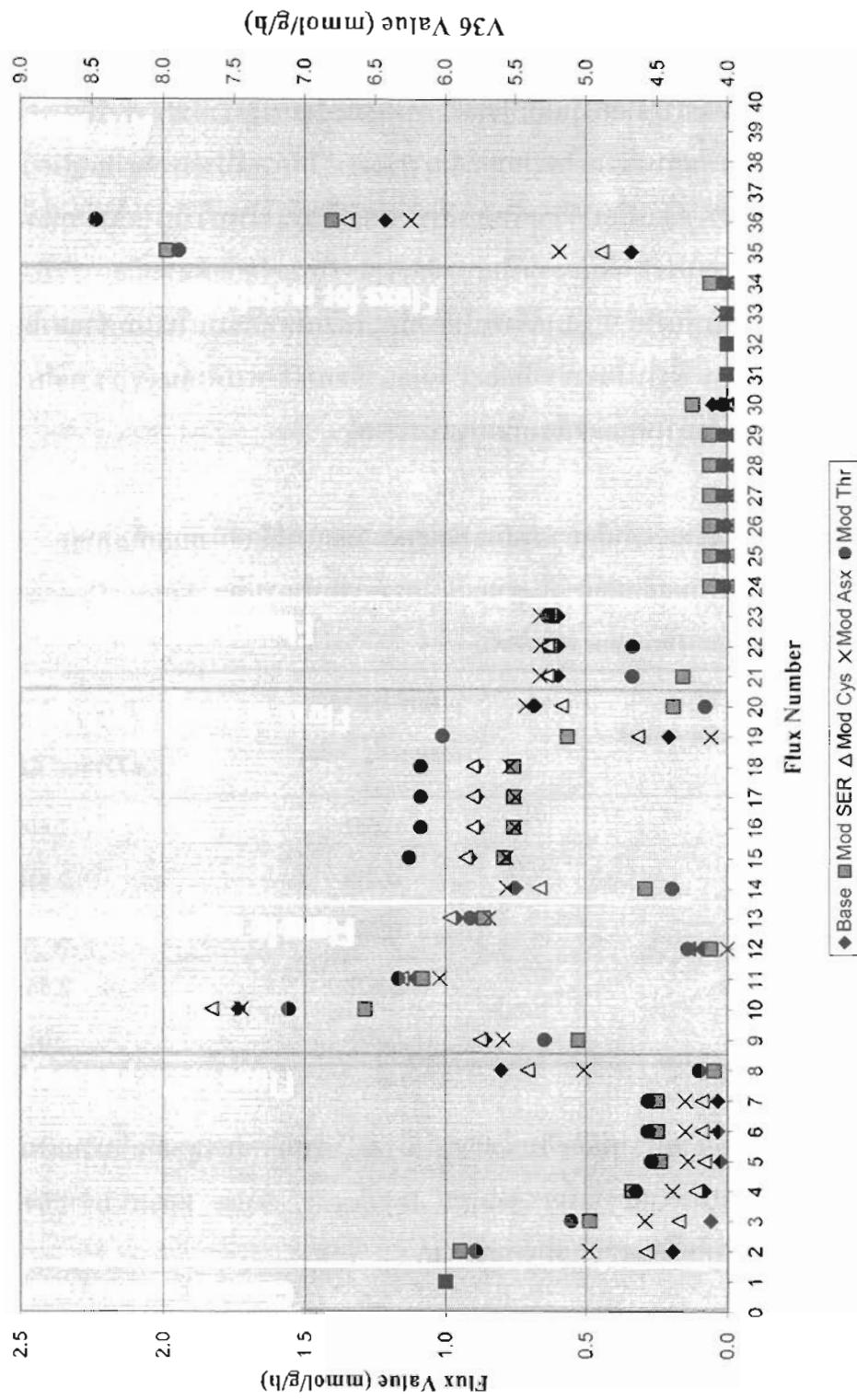
สรุปผลของแบบจำลองพื้นฐานและแบบจำลองที่เพิ่มได้ดังตารางที่ 5-7 แสดงค่าแต่ละฟลักซ์ดังภาพที่ 5-6 และผลทั้งหมดในภาคผนวก จ

จากตารางผลการจำลองในแบบจำลองต่างๆ การจำลองโครงข่ายที่เพิ่มให้ค่าจุดประสงค์ที่ดีกว่าแบบจำลองพื้นฐานซึ่งในโครงข่ายที่เพิ่ม Cysteine ให้ค่าจุดประสงค์สูงสุดสูงกว่าแบบจำลองพื้นฐานถึง 4.608% เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพพลังงานจะพบว่าในโครงข่ายที่เพิ่มไม่สอดคล้องกับค่าจุดประสงค์เนื่องจากการจำลองของโครงข่ายที่เพิ่มจะเกิดการใช้สารตั้งต้น (V_i) เพียงเล็กน้อยแต่จะต้องใส่ V_{add} มากจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพพลังงานในแบบจำลองที่เพิ่มไม่ดีกว่าแบบจำลองพื้นฐาน ซึ่งในโครงข่ายที่เพิ่ม Cysteine เกิดการใช้สารตั้งต้น (V_i) รวมกับ V_{add} เท่ากับ 3.979 mmol/g/h จึงทำให้สอดคล้องกับค่าจุดประสงค์

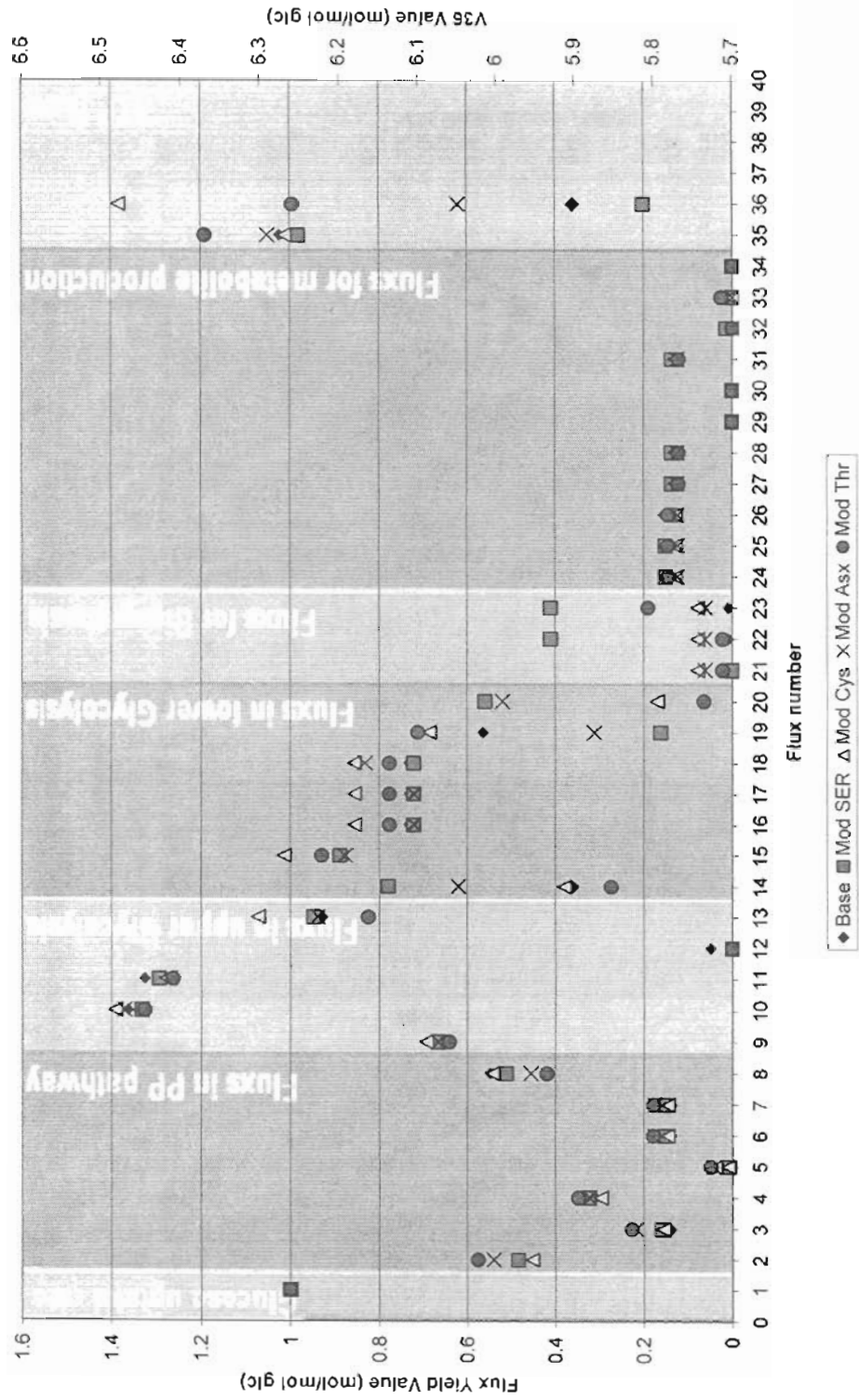
ตารางที่ 5-7 ผลจำลองค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมดที่มากที่สุด ของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่ทำการเพิ่ม Serine, Cysteine, Asparagine และ Threonine ตามลำดับ

Metabolic Addel	ผลการจำลอง $Max(\frac{ATP_{excess}}{\sum V})$	Energy Efficiency ($ATP/mol Carbon_{input}$)
Base	0.651	2.601
Add Serine	0.658	2.514
Add Cysteine	0.681	2.682
Add Asparagine	0.678	2.568
Add Threonine	0.679	2.012

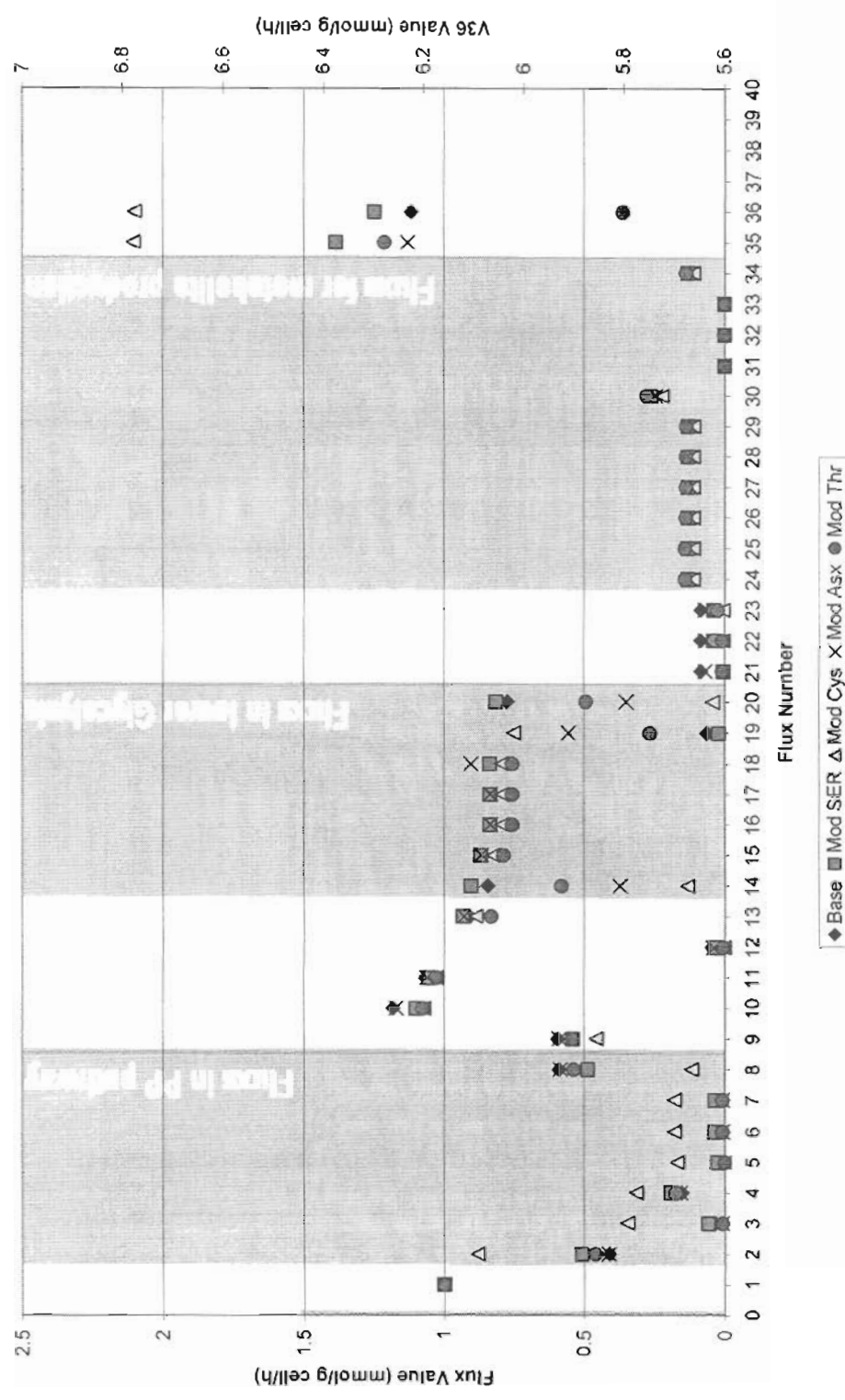
ในภาพที่ 5-6 พบว่าฟลักซ์ในช่วง V_{15} ถึง V_{19} ค่าฟลักซ์สูงสุดเกิดขึ้นในแบบจำลองที่เพิ่ม Threonine และแบบจำลองที่เพิ่ม Cysteine, Asparagine, Serine และแบบจำลองพื้นฐานลดลงตามลำดับ ซึ่งแปรผันโดยตรงกับค่าจุดประสงค์



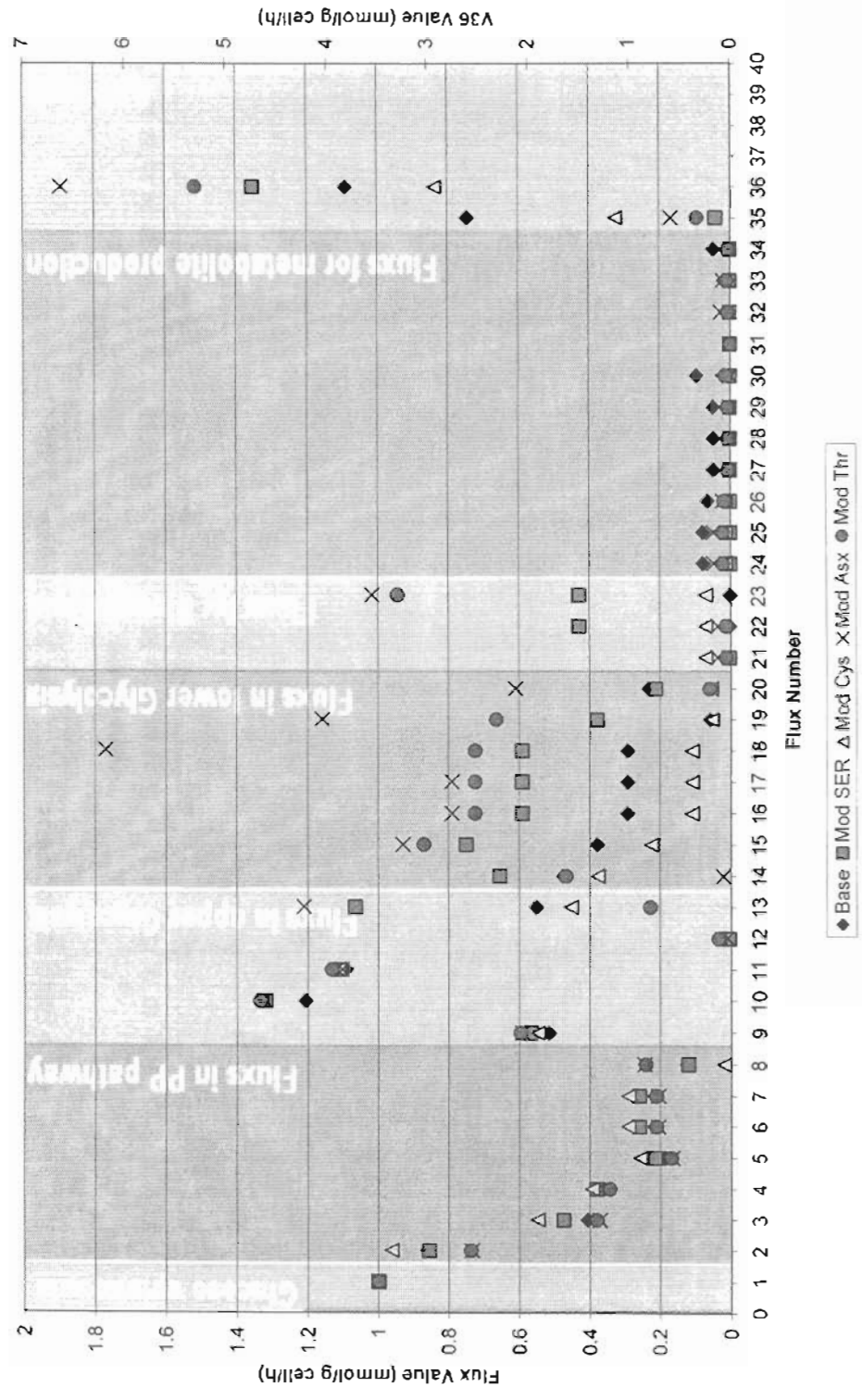
ภาพที่ 5-2 การแจกแจงฟลักซ์ต่อสารตั้งต้นของการหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุดในของโครงข่ายเมตาบอลิกพื้นฐานและโครงข่ายที่เพิ่มขึ้นทั้งสี่



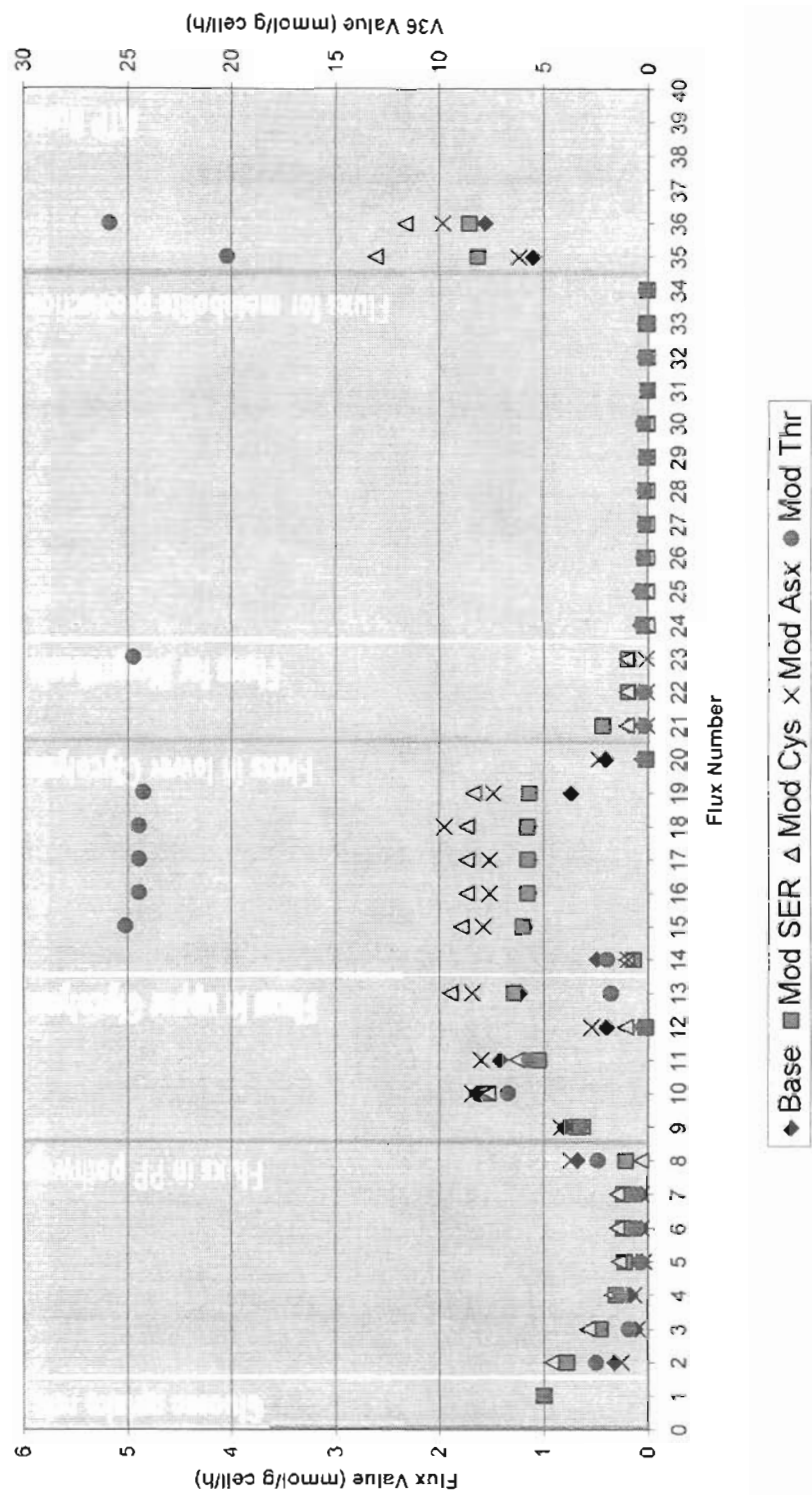
ภาพที่ 5-3 แสดงการแจกแจงฟลักซ์ของสารตั้งต้นของแบบจำลองการหาค่า Folic acid Flux มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่เพิ่มเติม



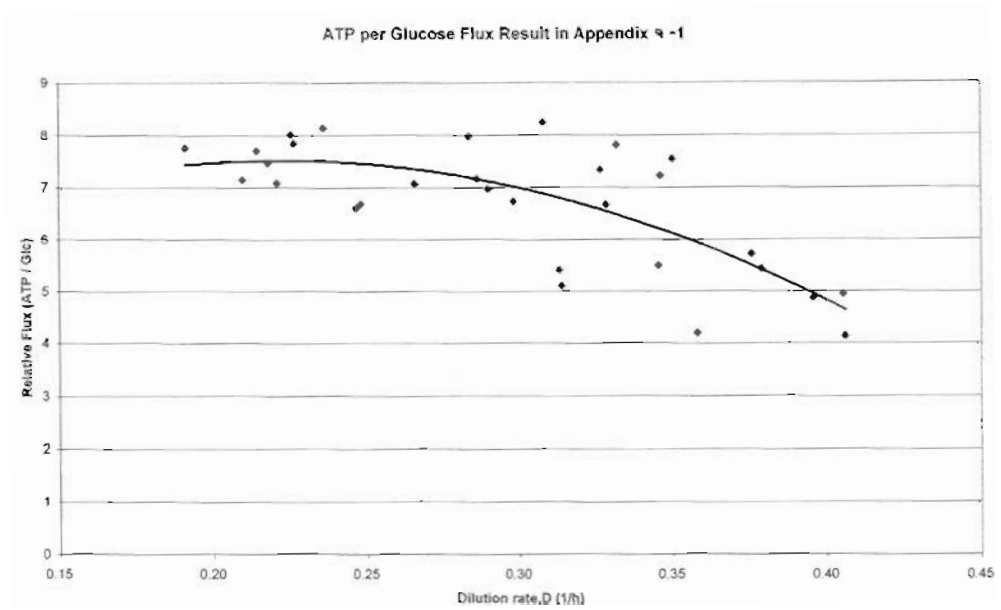
ภาพที่ 5-4 ผลเทียบค่าบรรทัดฐานของแต่ละฟลักซ์ จากการจำลองค่า Riboflavin Flux สูงสุด ของ โคเริงช่วยตามอภิปฏิกษพื้นฐาน และโคเริงช่วยที่เพิ่มทั้งสี่



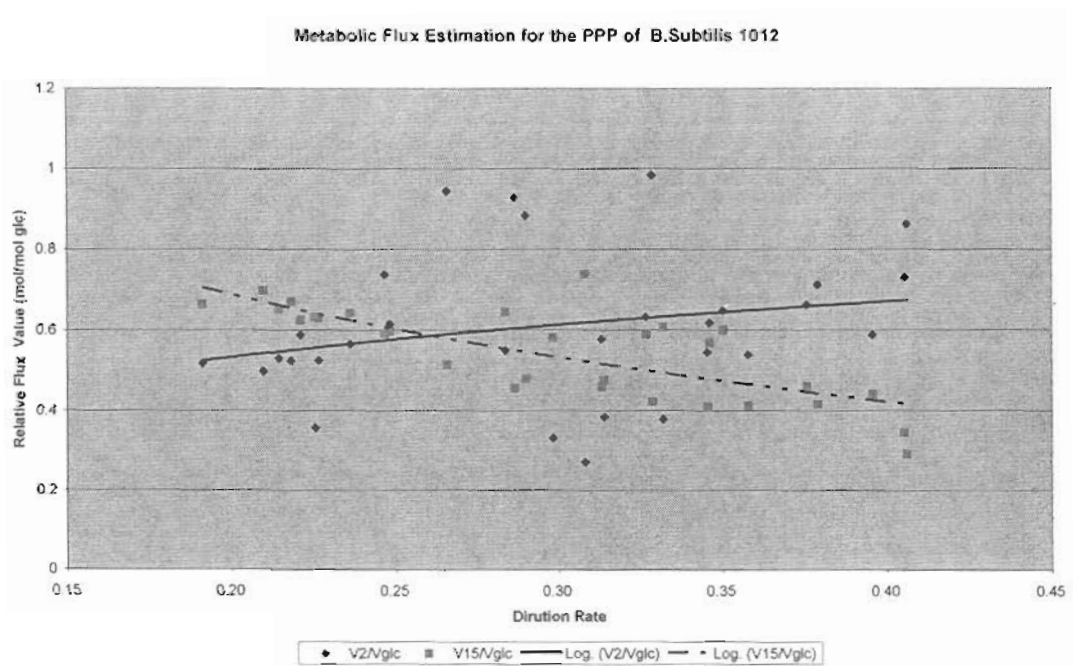
ภาพที่ 5-5 ผลเปรียบเทียบของแต่ละฟลักซ์ต่ออัตราการเพิ่มขึ้น $5 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ จากการจำลองหาอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ของโครงข่ายเมตาบอลิกลีซีสพื้นฐาน และ โครงข่ายที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5-6 ผลเปรียบเทียบของแต่ละฟลักซ์ต่อสารตั้งต้น จากการจำลองหาสัดส่วนที่มากที่สุดของพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมด ในโครงข่ายเมตาบอลิกฟลักซ์พื้นฐานและโครงข่ายที่เพิ่มทั้งสี่



ภาพที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพพลังงาน ATP และอัตราการเจริญเติบโต (D)



ภาพที่ 5-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_2/V_{glc} , V_{15}/V_{glc} และ Growth Rate (h^{-1})

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การหาฟลักซ์คาร์บอนภายในโครงข่ายเมตาบอลิกของแบคทีเรีย *B.Subtilis* โดยใช้การวิเคราะห์สมดุลของฟลักซ์เป็นเงื่อนไขบังคับในการหาค่าจุดประสงค์ที่มากที่สุด ใช้หลักการแยกค่าเอกฐาน (Singular Value Decomposition) แก้ปัญหาการทำสมดุลของฟลักซ์และนำผลจากเมตริกซ์ศูนย์ (Null Matrix) เข้าเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) โดยระบุฟังก์ชันจุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้น เป็นค่าสัดส่วนของพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมด ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm) แก้ปัญหา เปรียบเทียบผลกับการใช้เทคนิคการปีนเขา (Hill Climbing) ในฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 จุดประสงค์คือ พลังงาน ATP ที่เหลือมากที่สุด, Folic Acid Flux ที่มากที่สุด, Riboflavin Flux ที่มากที่สุด และอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ผลจากการจำลองชี้ให้เห็นว่า

1. การวิเคราะห์ค่าพลังงาน ATP เมื่อกำหนดสารตั้งต้นเป็น 1 mmol/g/h ด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้นที่ต่างกัน พบว่าการใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นการหาค่าพลังงาน ATP ที่เหลือมากที่สุดยอมให้ค่าพลังงาน ATP สูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาในแต่ละค่าฟลักซ์จะพบว่าฟลักซ์ใน Tricarboxylic Acid (TCA) Cycle เป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์พลังงาน ATP คือผลรวมพลังงานจะมีค่าสูงเมื่อฟลักซ์ใน TCA มีค่าสูง

2. การวิเคราะห์ค่าพลังงาน ATP เมื่อกำหนดสารตั้งต้นเป็น 1 mmol/g/h ด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น พบว่าผลจากการจำลองโดยใช้จุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้นให้ค่าพลังงาน ATP ที่สูงกว่า เนื่องจากการใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์แบบเชิงเส้นจะเป็นการวิเคราะห์ผลจากฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องกับ ATP เท่านั้น แต่การใช้จุดประสงค์แบบไม่เชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์ผลจากฟลักซ์ทุกตัวในแบบจำลอง ทำให้สารตั้งต้นที่ใส่ไปถูกนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

3. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงยีนในแบบจำลองการหาค่าพลังงาน ATP พบว่าโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงยีน Threonine ให้ค่าพลังงาน ATP ที่สูงสุด ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองพื้นฐานถึง 11.321%

4. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงยีนในแบบจำลองค่า Folic Acid Flux ที่มากที่สุด พบว่าโครงข่ายที่เปลี่ยนแปลงยีน Cysteine, Asparagine และ Threonine ไม่ทำให้ผลผลิตสูงขึ้น แต่ผลจาก

การเปลี่ยนแปลงยีน Serine ให้ผลผลิตสูงสุด เพิ่มขึ้น 3.788% จากแบบจำลองพื้นฐาน ซึ่งผลผลิตที่สูงขึ้นนี้มาจากการใช้พลังงาน ATP ที่สูงขึ้นด้วย

5. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงยีนในแบบจำลองค่า Riboflavin Flux ที่มากที่สุด พบว่า โครง่ายที่เปลี่ยนแปลงยีน Serine และ Threonine ให้ผลผลิต Riboflavin Flux ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้น 5.671% และ 11.382% ตามลำดับ แต่การเปลี่ยนแปลงยีน Cysteine และ Asparagine ให้ผลผลิตลดลง และเมื่อพิจารณาผลของค่าพลังงานจะสามารถสรุปได้เช่นเดียวกับ Folic Acid Flux คือ ATP จะถูกนำไปใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์

6. เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองหาค่า Riboflavin Flux และ Folic Acid Flux พบว่าทั้งสองแบบจำลองนี้มีการใช้พลังงาน ATP เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ทั้งสอง ดังจะเห็นได้ว่าผลประสิทธิภาพทั้งสองแบบจำลองจะน้อยกว่าแบบจำลองอื่น และในแบบจำลองการผลิต Folic Acid จะมีค่าประสิทธิภาพพลังงานที่น้อยสุดเนื่องจากพลังงาน ATP ถูกนำไปใช้ในการสร้าง Folic Acid Flux ให้มากที่สุด จึงเหลือน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

1. Sauer, U., Cameron, D. C. and Bailey, J. E. "Metabolic Capacity of *Bacillus subtilis* for the Production of Purine Nucleosides, Riboflavin, and Folic Acid." Biotechnology and Bioengineering. 59 (1998) : 227-238.
2. Schilling, C. H., Edward, J. S., Letscher, D. and Palsson, B. "Combining Pathway Analysis with Flux Balance Analysis for the Comprehensive Study of Metabolic Systems." Biotechnology and Bioengineering. 71 (2000) : 286-306.
3. Burgard, A. P. and Maranas, C. D. "Probing the Performance Limits of the *Escherichia coli* Metabolic Network Subject to Gene Additions or Deletions." Biotechnology and Bioengineering. 74 (2001) : 364-375.
4. Dauner, M. and Sauer, U. "Stoichiometric Growth Model for Riboflavin-Producing *Bacillus subtilis*." Biotechnology and Bioengineering. 76 (2001) : 132-143.
5. Kauffman K. J., Prakash P. and Edwards J. S. "Advances in flux balance analysis." Biochemical Engineering. 14 (2003) : 491-496.
6. Palsson, B. O., et al. 2007. Appendix 1 : Flux Balance Analysis Primer. [cited 2004, July 12]. Available online at http://www.nature.com/nbt/web_extras/supp_info/nbt0201_125/info_frame.html.
7. Brakoulis, A. 2000. Metabolic Flux Analysis I. [cited 2004, July 13]. Available online at <http://www.biochem.ucl.ac.uk/bsm/subgroup/pathways/andreas/sld001.html>.
8. Ferry, V. D. L., Duy, N., Ruud, V. S. and Marita, P. Stoichiometric Modeling : Understanding of Metabolic Networks. Project Report, Department of Electrical Engineering and Department of Biomedical Engineering, Eindhoven University of Technology, 2002.
9. Press W. H., et al. Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing. Cambridge, UK : Cambridge University Press, c1992.

10. Wall, M. E., Rechtsteiner, A., Rocha, L. M. 2002. Singular Value Decomposition and Principal Component Analysis. [cited 2005,February 16]. Available online at <http://public.lanl.gov/~mewall/kluwer2002.html>.
11. Wikipedia. 2007. Hill Climbing. [cited 2005,March 17]. Available on line at http://en.wikipedia.org/wiki/Hill_climbing.
12. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI : University of Michigan Press, c1975.
13. Potter, M. A. and De Jong, K. A. "Cooperative Coevolution : An Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents." Evolutionary Computation. 8 (2000) : 1-29.
14. Sauer U., Hatzimanikatis V., Hohmann H., Manneberg M., Loon A.V. and Bailey J.E. "Physiology and Metabolic Fluxes of Wide-Type and Riboflavin-Producing *Bacillus subtilis*." Applied and Environmental Microbiology. 62 (1996) : 3687-3696.

ภาคผนวก ก

ผลจำลองการหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุด

ตารางที่ ก-1 ผลการจำลองหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุดของโครงข่ายแบบถาวรลิขพัชพณู

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
411	4.499	4.429	4.490	3.698	4.207	3.766	3.407	4.855	3.672	3.985	2.584	3.324	4.396	4.521	3.320
412	1.665	1.344	2.158	3.310	2.114	3.897	3.214	2.294	1.916	1.489	2.256	1.657	2.676	2.072	2.934
413	0.240	0.353	0.862	1.746	0.606	1.232	1.863	0.736	0.733	0.443	0.981	0.904	1.035	0.651	1.351
414	0.621	0.530	0.880	1.235	0.781	1.391	1.231	1.275	0.703	0.595	0.903	0.717	1.189	0.966	1.252
415	0.104	0.136	0.367	0.853	0.282	0.586	0.869	0.125	0.351	0.475	0.506	0.337	0.386	0.305	0.769
416	0.136	0.217	0.464	0.884	0.323	0.827	0.994	0.601	0.382	0.264	0.506	0.246	0.649	0.446	0.791
417	0.136	0.217	0.464	0.884	0.323	0.827	0.994	0.601	0.382	0.264	0.506	0.246	0.649	0.446	0.791
418	2.918	3.170	2.316	5.179	2.077	0.751	0.177	2.545	1.941	2.481	0.518	1.451	1.704	2.433	0.371
419	3.140	3.504	3.159	1.899	2.644	1.946	2.021	3.232	2.455	2.926	1.860	2.136	2.720	3.065	1.903
420	6.364	7.124	6.667	4.813	3.591	4.898	4.890	6.699	5.241	6.031	3.416	4.490	5.807	6.315	4.547
421	4.894	5.182	4.834	4.087	4.811	4.037	4.553	5.926	4.584	5.219	3.142	3.928	5.150	5.349	3.881
422	0.221	0.381	0.061	0.318	0.511	0.702	0.886	0.108	0.841	1.044	0.282	0.353	0.218	0.336	0.400
423	4.276	4.416	3.978	3.422	4.124	3.732	3.699	4.370	3.519	4.486	2.477	3.263	4.020	4.263	3.216
424	3.348	3.085	2.189	3.390	4.038	1.032	3.535	3.708	3.888	2.749	2.457	2.153	1.094	3.476	3.020
425	4.013	4.209	3.764	3.209	3.911	3.159	3.486	4.156	3.766	4.272	2.544	3.050	3.807	4.050	3.003
426	3.809	4.045	3.561	3.102	3.792	3.052	3.284	3.604	3.969	4.131	2.157	2.943	3.466	3.733	2.896
427	3.905	4.045	3.561	3.102	3.792	3.052	3.284	3.604	3.969	4.131	2.157	2.943	3.466	3.733	2.896
428	0.837	1.310	1.767	0.011	0.045	2.159	0.143	0.480	0.000	1.716	0.000	1.089	2.905	0.766	0.176
429	3.066	2.735	1.794	3.091	3.747	0.733	1.141	2.963	3.399	2.415	2.157	1.453	0.563	2.966	2.731
430	1.331	1.803	1.693	0.387	0.646	0.312	0.198	0.544	0.518	0.672	0.134	0.423	0.518	0.827	0.326
431	1.331	1.803	1.693	0.387	0.646	0.312	0.198	0.544	0.518	0.672	0.134	0.423	0.518	0.827	0.326
432	1.331	1.803	1.693	0.387	0.646	0.312	0.198	0.544	0.518	0.672	0.134	0.423	0.518	0.827	0.326
433	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
434	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
435	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
436	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
437	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
438	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
439	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
440	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
441	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
442	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
443	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
444	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
445	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
446	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
447	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
448	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
449	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
450	0.405	0.231	0.304	0.269	0.375	0.463	0.155	0.392	0.340	0.249	0.316	0.367	0.438	0.438	0.380
451	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
453	0.402	0.180	0.209	0.269	0.364	0.191	0.064	0.147	0.340	0.215	0.186	0.218	0.226	0.228	0.085
454	4.376	3.102	4.447	8.268	5.831	6.716	7.799	5.231	5.387	4.841	4.878	4.159	6.311	5.104	6.398
455	29.178	29.401	28.456	26.635	28.673	25.766	27.108	29.108	26.702	29.281	18.367	22.258	28.337	28.944	24.494
Total															
Σ ATP	53.226	56.897	53.672	49.059	51.726	44.218	51.468	46.233	49.753	56.903	30.646	39.853	51.403	51.332	43.831

ตารางที่ ก-3 ผลการจำลองหาค่าพลังงาน ATP เหลือมากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกที่เปลี่ยนแปลงขึ้น Cysteine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	2.560	3.593	2.475	1.452	3.010	1.397	3.192	2.883	1.905	3.268	2.776	2.238	2.936	3.979	1.700
v[2]	0.901	3.072	1.763	0.936	2.942	1.031	3.789	2.868	0.977	1.779	1.328	1.854	1.316	1.656	0.699
v[3]	0.490	1.883	1.094	0.483	1.370	0.627	1.884	1.481	0.493	0.917	0.491	1.010	0.608	0.784	0.383
v[4]	0.345	1.089	0.632	0.377	1.045	0.415	0.861	1.203	0.390	0.638	0.307	0.483	0.510	0.617	0.295
v[5]	0.236	0.956	0.532	0.226	0.670	0.298	0.526	0.725	0.211	0.243	0.185	0.490	0.280	0.377	0.127
v[6]	0.265	0.957	0.562	0.257	0.700	0.329	0.557	0.756	0.262	0.274	0.216	0.521	0.319	0.408	0.158
v[7]	0.260	0.957	0.562	0.257	0.700	0.329	0.557	0.756	0.262	0.274	0.216	0.521	0.319	0.408	0.158
v[8]	1.644	3.506	0.896	0.500	0.053	0.331	1.386	0.000	0.911	1.674	1.432	0.349	1.605	2.308	0.997
v[9]	2.115	2.170	1.171	0.965	1.494	0.939	2.453	1.462	1.385	1.071	1.814	1.361	1.194	3.033	1.244
v[10]	4.446	5.646	4.064	2.136	3.638	2.157	5.412	3.629	2.952	4.166	3.794	3.192	4.657	6.514	2.639
v[11]	3.918	3.782	2.603	1.920	3.271	2.015	4.239	3.341	2.329	3.442	3.071	2.866	3.786	4.282	2.289
v[12]	1.327	0.114	0.055	0.398	0.169	0.547	0.976	0.867	-0.355	0.123	0.224	0.577	0.759	0.231	0.505
v[13]	3.417	3.373	4.887	1.733	3.110	2.184	3.669	2.677	2.326	2.798	3.629	2.866	3.180	3.656	4.416
v[14]	3.109	2.698	4.042	0.422	1.001	2.145	2.439	1.850	0.437	1.678	3.388	0.357	2.625	3.069	4.243
v[15]	3.204	3.159	3.873	1.520	2.897	1.971	3.305	2.463	2.113	2.565	3.443	2.052	3.947	3.442	4.203
v[16]	3.097	3.052	3.766	1.413	2.790	1.864	3.248	2.356	2.066	2.478	3.306	1.945	2.840	3.335	4.096
v[17]	3.097	3.052	3.766	1.413	2.790	1.864	3.248	2.356	2.066	2.478	3.306	1.945	2.840	3.335	4.096
v[18]	0.188	0.242	0.074	1.290	2.089	0.019	1.148	1.006	1.868	1.799	0.219	1.688	1.114	0.565	0.152
v[19]	2.999	2.310	3.763	0.123	0.701	1.443	2.140	1.551	0.138	1.379	3.087	0.258	1.725	2.770	3.944
v[20]	0.343	1.724	1.314	0.076	0.048	0.002	1.034	0.148	0.513	0.565	0.584	0.166	0.731	2.083	0.217
v[21]	0.343	1.724	1.314	0.076	0.048	0.002	1.034	0.148	0.513	0.565	0.584	0.166	0.731	2.083	0.217
v[22]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[23]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[24]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[25]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[26]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[27]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[28]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[29]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.366	0.047	0.302	0.210	0.060	0.109	0.127	0.055
v[30]	0.046	0.100	0.017	0.076	0.327	0.009	0.044	0.184	0.093	0.604	0.420	0.161	0.218	0.235	0.110
v[31]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[32]	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.274	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[34]	0.023	0.050	0.006	0.038	0.263	0.004	-0.022	0.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[35]	3.629	5.945	4.433	1.483	7.099	2.417	4.365	6.143	1.920	3.943	3.852	3.960	0.109	0.127	0.055
v[36]	20.925	28.304	15.583	10.302	25.973	12.740	24.628	20.483	14.212	19.870	23.552	15.940	20.889	25.901	23.760
w[1]	0.130	0.261	2.156	0.484	0.511	0.519	0.640	0.916	0.648	0.007	1.126	0.030	0.045	0.045	2.807
v[42]	0.124	0.255	2.150	0.478	0.505	0.533	0.634	0.909	0.642	0.001	1.120	0.044	0.039	0.039	2.801
Trans	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Σ ATP	41.232	51.935	40.238	18.909	42.684	23.045	40.844	36.780	27.476	35.688	46.637	30.771	40.538	50.212	44.574

ภาคผนวก ข

ผลจำลองการจำลองหาค่า V_{max} มากที่สุด

ตารางที่ ข-1 ผลการจำลองค่า V_{fa} มากที่สุดของโครงข่ายตามอิลลิปติกพหุนาม

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	4.759	1.705	4.342	4.419	4.982	5.087	4.145	4.923	4.033	4.112	4.571	4.851	4.340	4.964	4.944
v[2]	1.455	0.816	2.065	3.329	2.027	1.035	2.039	1.823	1.906	1.334	1.895	2.191	1.652	2.359	1.865
v[3]	0.332	0.247	0.262	1.583	0.855	0.319	0.315	0.481	0.315	0.144	0.423	0.609	0.573	0.668	0.598
v[4]	1.114	0.569	1.802	1.746	1.348	0.766	1.244	1.342	1.393	1.210	1.470	1.382	1.119	1.691	1.389
v[5]	0.000	0.003	0.001	0.495	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[6]	0.332	0.214	0.261	1.088	0.855	0.319	0.315	0.481	0.315	0.144	0.423	0.609	0.573	0.668	0.598
v[7]	0.332	0.214	0.261	1.088	0.855	0.319	0.315	0.481	0.315	0.144	0.423	0.609	0.573	0.668	0.598
v[8]	3.098	0.874	2.283	1.075	2.943	3.997	2.771	3.084	2.142	2.743	2.661	3.445	2.673	3.589	3.064
v[9]	3.811	1.102	2.326	2.640	3.579	4.287	2.746	3.546	2.638	2.857	3.067	3.335	3.187	3.238	3.441
v[10]	7.202	2.217	5.033	5.755	7.139	8.555	5.518	7.072	5.256	5.715	6.125	6.451	6.335	6.457	7.260
v[11]	5.800	2.079	4.893	5.615	6.302	5.736	3.376	6.022	5.117	5.323	5.940	6.085	5.416	6.317	6.157
v[12]	4.411	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.128	0.014	0.514	0.510	0.007	0.000	0.009	0.010
v[13]	4.134	1.111	3.769	3.826	4.389	4.494	3.751	4.457	3.484	4.403	4.487	4.384	3.746	4.379	4.361
v[14]	3.281	0.496	3.323	1.680	2.017	2.839	1.649	1.844	2.477	1.961	1.243	2.708	2.669	2.047	2.847
v[15]	3.921	0.898	3.555	3.613	4.176	4.241	3.338	4.344	3.270	4.230	4.274	4.081	3.333	4.166	4.148
v[16]	3.313	0.640	3.219	2.943	3.465	3.840	2.951	3.687	2.679	4.000	3.773	3.345	2.924	3.475	3.475
v[17]	3.313	0.640	3.219	2.943	3.465	3.840	2.951	3.687	2.679	4.000	3.773	3.345	2.924	3.475	3.475
v[18]	3.313	0.640	3.219	2.943	3.465	3.840	2.951	3.687	2.679	4.000	3.773	3.345	2.924	3.475	3.475
v[19]	0.832	0.394	0.425	2.125	2.352	1.833	2.672	2.752	0.935	2.451	0.559	1.861	1.867	1.111	2.102
v[20]	2.881	0.046	2.794	0.818	1.063	2.257	0.276	0.935	1.493	0.351	0.035	0.226	0.799	0.000	0.866
v[21]	1.282	0.000	0.000	0.000	0.697	2.680	0.000	0.911	0.000	0.253	0.035	0.226	0.799	0.000	0.866
v[22]	1.282	0.000	0.000	0.000	0.697	2.680	0.000	0.911	0.000	0.253	0.035	0.226	0.799	0.000	0.866
v[23]	1.282	0.000	0.000	0.000	0.697	2.680	0.000	0.911	0.000	0.253	0.035	0.226	0.799	0.000	0.866
v[24]	0.201	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[25]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[26]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[27]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[28]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[29]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[30]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[31]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[32]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[33]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[34]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[35]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
v[36]	0.361	0.273	1.459	4.574	0.452	0.345	0.949	0.780	2.795	0.903	0.943	0.891	0.504	0.942	0.591
Sum	26.712	6.477	25.867	26.457	28.196	29.688	24.490	29.086	22.413	28.561	28.846	27.702	23.534	28.379	28.114
Σ ATP	-	6.467	32.846	44.525	44.824	55.047	36.437	48.690	32.152	47.548	47.036	42.123	38.873	43.316	46.815

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ข1	5,104	4,142	4,335	4,553	4,731	1,872	3,984	4,594	3,942	5,023	4,942	4,016	4,343	6,183	3,832
ข2	1,256	3,801	2,009	2,455	2,688	1,628	1,113	0,575	3,059	0,650	2,211	3,231	1,163	0,641	2,138
ข3	0,395	2,980	0,609	1,072	0,987	0,822	0,198	0,164	1,467	0,197	0,481	1,564	0,339	0,000	0,931
ข4	0,861	1,130	1,400	1,603	1,701	0,786	0,915	0,411	1,812	0,453	1,530	1,464	0,824	0,641	1,207
ข5	0,000	0,778	0,000	0,207	0,177	0,336	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,337	0,000	-0,566	0,249
ข6	0,395	1,241	0,509	0,865	0,810	0,536	0,198	0,164	2,964	0,197	2,481	1,627	0,339	0,488	0,702
ข7	0,395	1,241	0,609	0,865	0,810	0,536	0,198	0,164	-964	0,197	0,681	1,007	0,339	0,488	0,702
ข8	3,833	0,326	2,310	1,883	2,027	2,238	2,856	4,004	6,868	4,358	2,715	0,769	3,165	5,508	1,659
ข9	4,209	2,268	2,805	2,916	2,895	1,071	1,634	4,149	2,286	4,536	3,778	2,315	3,483	5,409	2,591
ข10	8,399	5,595	5,782	6,019	6,148	2,656	6,049	8,278	5,053	9,052	6,738	5,146	8,550	10,470	5,411
ข11	5,903	5,156	5,642	5,879	6,008	2,319	4,389	5,522	4,918	5,522	6,353	5,007	8,028	8,128	5,271
ข12	0,000	0,000	0,079	0,002	0,000	0,058	-0,001	0,662	0,002	0,095	0,241	0,000	0,995	0,000	0,522
ข13	4,511	3,549	3,821	3,559	4,138	1,336	3,391	4,661	3,349	4,525	4,389	3,422	4,744	5,571	3,769
ข14	2,900	0,878	0,878	1,041	3,408	1,243	2,122	3,858	1,592	2,808	1,776	0,992	0,608	5,545	1,412
ข15	4,297	3,328	3,659	3,746	3,924	1,128	3,177	4,448	3,136	4,312	4,378	3,209	4,331	5,358	3,347
ข16	3,826	2,557	2,922	3,012	3,214	0,857	2,803	4,208	2,578	4,038	3,619	2,642	4,116	4,305	3,017
ข17	3,826	2,557	2,922	3,012	3,214	0,857	2,803	4,208	2,578	4,038	3,619	2,642	4,116	4,305	3,017
ข18	3,826	2,557	2,922	3,012	3,214	0,857	2,803	4,208	2,578	4,038	3,619	2,642	4,116	4,305	3,017
ข19	2,379	0,538	2,922	2,897	2,709	0,075	1,244	0,712	-736	1,606	2,793	2,469	4,116	0,000	2,336
ข20	1,447	2,219	0,000	0,114	2,505	0,782	1,635	3,425	0,842	2,432	0,826	0,231	0,000	4,299	0,691
ข21	2,356	0,000	0,000	0,000	0,000	0,609	1,520	2,546	0,000	3,390	0,042	-0,000	0,785	2,203	0,000
ข22	2,356	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,520	2,546	0,000	3,390	0,042	-0,000	0,785	2,203	0,000
ข23	2,356	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,520	2,546	0,000	3,390	0,042	-0,000	0,785	2,203	0,000
ข24	0,498	0,498	0,709	0,656	0,809	0,159	0,626	0,165	0,566	0,174	0,767	0,558	0,403	0,071	0,423
ข25	0,384	0,498	0,709	0,656	0,809	0,159	0,626	0,165	0,566	0,174	0,767	0,558	0,403	0,071	0,423
ข26	0,498	0,471	0,709	0,656	0,809	0,159	0,626	0,165	0,566	0,174	0,767	0,558	0,403	0,071	0,423
ข27	0,384	0,471	0,709	0,656	0,809	0,159	0,626	0,165	0,566	0,174	0,767	0,558	0,403	0,071	0,423
ข28	0,384	0,471	0,709	0,656	0,809	0,159	0,626	0,165	0,566	0,174	0,767	0,558	0,403	0,071	0,423
ข29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ข30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Objective 4.011	0,364	0,471	0,578	0,628	0,603	0,159	0,167	0,133	0,451	2,186	0,650	0,460	0,308	0,946	0,423
ข32	0,000	0,000	0,000	0,028	0,603	-1,158	0,167	0,133	0,451	0,186	0,650	0,460	0,308	0,946	0,423
ข33	0,020	0,027	0,131	0,028	0,206	0,000	0,469	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ข34	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ข35	1,707	7,864	4,127	5,553	5,652	2,269	1,180	0,986	6,152	0,882	5,056	6,560	3,419	0,940	4,981
ข36	29,579	26,335	34,274	26,236	27,556	9,311	22,842	29,785	23,781	29,872	29,172	29,531	29,412	32,501	24,388
Total	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Σ A7P	54,792	63,384	38,419	42,703	41,694	13,120	37,802	58,236	38,511	58,719	47,583	40,783	56,648	-	42,645

ตารางที่ ข-2 ผลการจำลองหาค่า Folic acid Flux (V_f) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิฟลิกซ์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้น Serine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	3.367	2.227	2.681	1.214	2.937	3.068	1.670	2.026	1.918	3.837	3.228	2.531	3.356	2.904	3.105
v[2]	2.733	1.695	2.478	1.803	2.723	1.438	1.342	1.463	1.412	1.487	1.133	1.578	1.129	2.807	1.450
v[3]	1.063	0.771	1.305	0.944	1.375	0.476	0.686	0.695	0.683	0.364	0.460	0.671	0.844	1.350	0.462
v[4]	1.290	0.925	1.173	0.509	1.344	0.968	0.764	0.750	0.730	0.664	0.693	0.908	1.244	1.257	0.889
v[5]	0.303	0.260	0.308	0.246	0.244	0.069	0.280	0.227	0.229	0.000	0.079	0.172	0.228	0.509	0.007
v[6]	0.730	0.460	0.803	0.348	0.830	0.461	0.400	0.468	0.454	0.366	0.361	0.499	0.657	0.841	0.455
v[7]	0.750	0.490	0.903	0.348	0.830	0.461	0.400	0.468	0.454	0.366	0.361	0.499	0.657	0.841	0.455
v[8]	1.029	0.516	0.887	0.094	1.099	1.415	0.306	0.549	0.499	0.356	0.267	0.539	1.212	0.282	1.639
v[9]	1.267	1.473	0.671	0.671	1.259	2.066	0.887	1.236	1.154	3.701	2.499	1.591	2.078	1.613	2.882
v[10]	4.370	2.796	3.429	1.567	3.448	4.121	1.994	2.639	2.516	5.383	5.037	3.334	4.364	3.716	4.150
v[11]	4.231	2.656	3.390	1.428	3.308	3.982	1.834	2.520	2.377	4.398	3.798	3.193	4.224	3.577	4.011
v[12]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[13]	3.239	2.955	2.816	3.976	2.778	3.587	2.920	3.434	1.476	3.370	3.066	3.117	3.298	2.623	3.428
v[14]	0.769	1.914	2.682	3.664	0.817	0.664	1.915	3.005	1.074	1.316	0.550	1.353	2.235	0.816	1.434
v[15]	3.046	2.741	2.603	3.763	2.565	3.174	2.407	3.211	1.243	3.137	2.793	2.904	3.675	2.410	3.214
v[16]	2.343	2.455	2.226	3.884	2.208	2.646	2.440	2.893	0.942	2.715	2.435	2.501	2.569	2.002	2.690
v[17]	2.343	2.455	2.226	3.884	2.208	2.646	2.440	2.893	0.942	2.715	2.435	2.501	2.569	2.002	2.690
v[18]	2.343	2.455	2.226	3.884	2.208	2.646	2.440	2.893	0.942	2.715	2.435	2.501	2.569	2.002	2.690
v[19]	2.330	1.009	0.233	0.289	1.940	2.500	0.884	0.398	0.382	2.014	2.435	1.743	1.072	1.786	1.973
v[20]	0.013	1.435	1.893	3.295	0.268	0.145	1.336	2.495	0.580	0.701	0.000	0.757	1.557	0.216	0.717
v[21]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.646	1.120	0.000	0.000	0.000	0.000
v[22]	0.498	5.073	0.828	0.747	5.677	1.807	8.913	0.000	2.994	1.058	5.997	7.043	0.484	8.020	1.508
v[23]	0.698	5.673	0.828	0.747	5.677	1.807	8.913	0.000	2.994	1.058	5.997	7.043	0.484	8.020	1.508
v[24]	0.478	0.353	0.289	0.079	0.432	0.425	0.221	0.214	0.194	0.674	0.251	0.326	0.506	0.335	0.452
v[25]	0.478	0.353	0.289	0.079	0.432	0.425	0.221	0.214	0.194	0.674	0.251	0.326	0.506	0.335	0.452
v[26]	0.394	0.179	0.289	0.079	0.250	0.431	0.203	0.213	0.184	0.335	0.251	0.296	0.398	0.301	0.418
v[27]	0.394	0.179	0.289	0.079	0.250	0.431	0.203	0.213	0.184	0.335	0.251	0.296	0.398	0.301	0.418
v[28]	0.394	0.179	0.289	0.079	0.250	0.431	0.203	0.213	0.184	0.335	0.251	0.296	0.398	0.301	0.418
v[29]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[30]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Objective-v[31]	0.394	0.179	0.289	0.079	0.250	0.431	0.203	0.213	0.184	0.335	0.251	0.296	0.398	0.301	0.418
v[32]	0.082	0.173	0.030	0.008	0.182	0.421	0.018	0.001	0.194	0.335	0.251	0.296	0.398	0.301	0.418
v[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[34]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[35]	4.789	3.798	5.995	4.113	5.445	3.148	3.337	3.870	1.871	2.508	1.554	3.508	4.396	5.054	3.195
v[36]	21.281	17.794	18.941	26.919	19.536	19.799	16.165	19.419	9.406	21.423	18.803	18.443	21.019	18.365	20.071
v[37]	0.944	6.395	1.457	4.103	6.941	7.799	10.724	1.990	3.146	0.519	5.251	8.222	1.019	8.332	2.434
v[38]	0.464	1.322	0.719	3.336	0.435	0.914	1.810	1.990	0.152	0.107	0.374	1.179	0.335	0.312	0.918
Total	35.473	29.341	31.008	37.514	32.993	32.380	27.178	32.845	43.061	34.437	34.130	30.644	33.140	30.835	37.211

ตารางที่ ข-3 ผลการจำลองหาค่า Folic acid Flux (V_a) มากที่สุดของโครงการแยกตามผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงขึ้น Cysteine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	3.131	5.582	3.186	3.802	3.450	3.757	3.409	3.617	3.424	3.147	4.027	3.463	4.323	4.444	4.369
v[2]	2.791	5.546	2.900	2.838	2.838	3.697	3.506	2.203	2.378	1.816	2.285	2.257	1.251	4.279	2.226
v[3]	1.686	3.614	1.681	2.156	1.627	2.045	1.869	1.042	1.089	0.902	1.393	1.496	0.474	2.788	1.419
v[4]	1.125	1.932	1.220	1.529	1.212	1.632	1.537	1.261	1.288	0.914	0.899	1.071	0.278	1.491	0.807
v[5]	0.733	1.782	0.731	0.945	0.697	0.930	0.817	0.291	0.314	0.314	0.646	0.437	0.073	1.379	0.694
v[6]	0.903	1.832	0.850	1.211	0.929	1.215	1.152	0.751	0.756	0.888	0.744	0.839	0.400	1.409	0.722
v[7]	0.603	1.832	0.590	1.211	0.929	1.215	1.152	0.751	0.756	0.888	0.744	0.839	0.400	1.409	0.722
v[8]	0.354	0.900	0.360	0.102	0.997	0.045	0.089	1.298	1.031	1.316	1.729	1.079	3.085	0.159	2.068
v[9]	1.971	3.395	1.942	2.239	2.204	2.071	2.038	2.321	2.101	2.199	3.133	2.255	3.510	2.916	3.468
v[10]	4.656	8.951	4.593	5.400	5.766	4.933	4.973	4.913	4.497	4.493	6.896	5.748	1.074	7.197	7.611
v[11]	3.481	3.463	3.443	4.345	3.493	4.338	4.288	4.422	4.357	3.766	4.256	4.034	4.987	3.684	4.124
v[12]	0.000	-2.776	0.000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.076	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.631	-0.226
v[13]	3.604	2.761	3.697	3.245	3.299	3.279	3.204	3.777	3.795	3.990	3.484	3.437	3.949	3.000	3.460
v[14]	2.200	0.595	3.671	1.690	1.066	0.847	1.899	1.583	1.549	2.131	0.647	0.792	3.179	1.005	0.832
v[15]	3.392	2.347	3.464	3.032	3.085	3.064	2.991	3.363	3.362	3.777	3.251	3.244	3.734	2.806	2.246
v[16]	3.145	2.421	3.189	2.689	2.777	2.674	2.582	3.027	3.044	3.426	3.080	2.966	3.333	2.899	3.139
v[17]	3.145	2.421	3.189	2.689	2.777	2.674	2.580	3.027	3.044	3.426	3.080	2.966	3.333	2.699	3.139
v[18]	1.865	2.145	0.066	1.534	2.191	2.391	1.884	0.173	2.275	1.138	2.777	2.845	0.720	1.994	2.607
v[20]	1.790	0.276	3.183	1.155	0.386	0.213	1.396	2.854	0.819	2.298	0.303	0.341	2.583	0.709	0.332
v[21]	1.035	5.350	0.812	0.918	1.024	0.275	0.445	0.152	0.000	0.448	2.500	1.375	1.946	5.374	3.348
v[22]	1.005	5.350	0.812	0.918	1.024	0.275	0.445	0.152	0.000	0.448	2.500	1.375	1.946	3.374	3.348
v[23]	1.035	5.350	0.812	0.918	1.024	0.275	0.445	0.152	0.000	0.448	2.500	1.375	1.946	3.374	3.348
v[24]	0.140	0.019	0.188	0.236	0.201	0.335	0.304	0.429	0.431	0.244	0.064	0.151	0.296	0.000	0.000
v[25]	0.140	0.019	0.188	0.236	0.201	0.335	0.304	0.429	0.431	0.244	0.064	0.151	0.296	0.000	0.000
v[26]	0.140	0.019	0.188	0.236	0.201	0.335	0.304	0.429	0.431	0.244	0.064	0.151	0.296	0.000	0.000
v[27]	0.140	0.019	0.188	0.236	0.201	0.335	0.304	0.429	0.431	0.244	0.064	0.151	0.296	0.000	0.000
v[28]	0.140	0.019	0.188	0.236	0.201	0.335	0.304	0.429	0.431	0.244	0.064	0.151	0.296	0.000	0.000
v[29]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[30]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Chapters v[31]															
v[32]	0.140	0.019	0.188	0.236	0.201	0.335	0.304	0.429	0.431	0.244	0.064	0.151	0.296	0.000	0.000
v[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[34]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[35]	5.818	6.660	6.275	7.142	5.502	7.464	7.612	5.097	5.418	4.197	3.491	4.717	1.770	6.357	2.717
v[36]	23.198	31.324	25.381	25.604	24.054	24.877	24.241	24.239	24.056	24.652	26.079	25.117	25.692	26.405	26.913
v[37]	1.075	0.006	1.001	0.042	0.448	0.122	0.194	0.483	0.971	1.442	0.907	0.394	0.226	0.006	0.006
v[42]	0.000	0.000	1.095	0.036	0.442	0.116	0.188	0.677	0.965	1.426	0.901	0.390	0.220	0.000	0.000
Trunc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Σ ATP	51.640	-	50.333	51.358	49.146	48.341	46.732	43.500	44.673	48.631	57.245	53.026	50.063	-	-

ตารางที่ ๓-3 (ต่อ)

v[1]	3.811	3.678	3.472	3.185	4.310	4.040	4.050	3.255	3.382	3.639	4.753	3.837	2.482	4.223	3.623
v[2]	1.833	1.833	2.255	3.065	4.235	3.986	1.984	2.533	3.207	2.778	2.297	3.098	0.763	2.710	3.351
v[3]	0.926	0.472	1.382	1.724	2.258	1.209	0.990	1.341	1.799	1.466	1.446	1.507	0.260	1.742	2.206
v[4]	0.637	1.091	0.873	1.331	1.476	0.732	0.994	1.191	1.408	1.374	0.830	1.551	0.503	0.848	1.342
v[5]	0.415	0.234	0.648	0.722	1.364	0.579	0.545	0.514	1.247	0.495	0.718	0.505	0.022	0.856	1.042
v[6]	0.511	0.537	0.735	1.001	1.395	0.630	0.644	0.827	1.052	0.909	0.749	1.002	0.237	0.886	1.167
v[7]	0.511	0.537	0.735	1.001	1.395	0.630	0.644	0.827	1.052	0.909	0.749	1.002	0.237	0.886	1.167
v[8]	2.223	2.000	1.565	1.820	0.960	2.084	2.050	0.707	4.259	0.845	2.441	0.763	1.703	1.498	0.637
v[9]	3.130	2.553	1.565	1.820	0.960	2.084	2.050	0.707	4.259	0.845	2.441	0.763	1.703	1.498	0.637
v[10]	6.637	5.126	3.728	4.342	4.942	7.107	4.367	4.552	4.307	4.936	8.476	4.988	3.892	7.278	5.317
v[11]	4.021	4.664	2.656	3.754	3.749	4.151	4.658	3.891	4.102	4.476	3.853	4.842	2.922	4.001	3.882
v[12]	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.172	0.000	0.000	-0.291	0.000
v[13]	3.815	3.944	3.930	3.644	3.065	3.670	3.749	3.772	3.523	3.796	3.777	3.660	3.336	3.170	3.170
v[14]	2.560	1.397	3.111	3.013	2.168	2.082	3.583	3.466	2.455	3.292	3.756	3.587	3.840	0.606	0.606
v[15]	3.602	3.731	3.717	3.431	2.871	3.407	3.536	3.559	3.319	3.493	3.563	3.387	4.246	3.123	2.057
v[16]	3.430	3.151	3.554	3.076	2.764	3.280	3.160	3.169	2.929	3.003	3.456	2.813	3.955	3.046	2.556
v[17]	3.430	3.151	3.554	3.076	2.764	3.280	3.160	3.169	2.929	3.003	3.456	2.813	3.955	3.046	2.556
v[18]	3.430	3.151	3.554	3.076	2.764	3.280	3.160	3.169	2.929	3.003	3.456	2.813	3.955	3.046	2.556
v[19]	2.526	0.799	0.799	0.610	0.516	1.517	0.145	0.285	1.068	0.293	0.000	0.992	0.559	2.866	2.549
v[20]	0.625	0.237	0.962	2.466	1.848	1.763	3.015	2.884	1.861	2.699	3.456	1.821	3.396	0.170	0.308
v[21]	0.237	0.962	0.962	0.449	3.054	2.816	1.570	0.521	0.365	0.320	4.493	0.006	0.830	3.137	1.495
v[22]	0.237	0.962	0.962	0.449	3.054	2.816	1.570	0.521	0.365	0.320	4.493	0.006	0.830	3.137	1.495
v[23]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[24]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[25]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[26]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[27]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[28]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[29]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
v[30]	0.664	0.472	0.056	0.248	0.000	0.000	0.268	0.383	0.274	0.383	0.000	0.467	0.184	0.000	0.094
Negative v[1]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[32]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[34]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[35]	2.445	3.720	5.462	6.713	8.654	2.777	3.495	5.621	6.704	5.945	1.840	6.463	2.756	3.772	4.620
v[36]	26.897	23.835	25.546	25.233	28.337	24.559	25.558	24.899	25.293	25.581	29.504	24.768	24.532	26.920	25.648
v[37]	0.593	0.865	2.658	1.056	0.066	0.180	0.799	1.117	0.941	0.467	0.795	0.563	2.577	0.006	0.147
v[38]	0.597	0.859	2.652	1.052	0.000	0.174	0.793	1.111	0.935	0.461	0.789	0.537	2.571	0.000	0.141
Totals	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Σ v[1]	55.685	43.590	51.170	68.827	-	57.806	49.472	47.221	49.181	45.982	-	44.508	47.953	-	55.130

ตารางที่ ข-5 ผลการจำลองหา Riboflavin Flux (V_b) มากที่สุดของ โครงข่ายเมตาบอลิกลัพธ์ที่เปลี่ยนเป็น Threonine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	2.937	3.592	3.056	2.725	3.407	3.212	3.114	3.051	3.230	2.644	1.576	3.325	1.677	3.379	1.818
v[2]	2.273	0.735	2.075	2.1667	0.715	1.797	1.681	0.883	0.693	1.465	0.597	1.187	0.676	1.504	0.402
v[3]	0.991	0.440	0.726	0.9233	0.631	0.596	-1.494	0.031	0.031	0.359	0.031	0.031	0.074	0.301	0.031
v[4]	0.807	0.402	0.756	0.785	2.330	0.654	0.626	0.559	0.261	0.553	0.261	0.401	0.290	0.611	0.206
v[5]	0.807	0.402	0.756	0.452	0.600	0.323	0.362	0.000	0.000	0.364	0.000	0.000	0.222	0.119	0.000
v[6]	0.506	0.132	0.378	0.403	0.031	0.314	0.113	0.031	0.031	0.267	0.031	0.031	0.002	0.188	0.031
v[7]	0.506	0.132	0.378	0.403	0.031	0.314	0.113	0.031	0.031	0.267	0.031	0.031	0.002	0.188	0.031
v[8]	0.506	0.132	0.378	0.403	0.031	0.314	0.113	0.031	0.031	0.267	0.031	0.031	0.002	0.188	0.031
v[9]	0.506	0.132	0.378	0.403	0.031	0.314	0.113	0.031	0.031	0.267	0.031	0.031	0.002	0.188	0.031
v[10]	3.472	5.915	3.471	3.384	5.317	4.218	3.847	5.592	2.353	2.411	1.842	4.257	2.083	4.376	2.148
v[11]	3.069	3.848	3.215	2.867	3.709	3.294	3.491	3.763	3.691	2.425	1.714	3.402	1.872	3.540	1.999
v[12]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[13]	2.346	2.999	2.351	2.201	3.165	2.419	3.001	3.006	3.028	1.337	1.565	2.893	1.656	2.785	1.608
v[14]	1.884	1.407	1.335	1.270	2.099	0.935	2.092	2.092	2.246	0.943	1.337	1.388	1.006	0.976	0.711
v[15]	2.033	2.586	2.230	1.988	2.952	2.404	2.877	2.887	2.815	1.314	1.334	2.080	1.403	2.572	1.395
v[16]	2.033	2.586	2.230	1.988	2.952	2.404	2.877	2.887	2.815	1.314	1.334	2.080	1.403	2.572	1.395
v[17]	2.033	2.586	2.230	1.988	2.952	2.404	2.877	2.887	2.815	1.314	1.334	2.080	1.403	2.572	1.395
v[18]	2.033	2.586	2.230	1.988	2.952	2.404	2.877	2.887	2.815	1.314	1.334	2.080	1.403	2.572	1.395
v[19]	0.835	1.511	1.345	0.911	1.045	1.643	0.023	0.993	0.787	0.583	0.308	1.468	0.399	1.796	2.075
v[20]	1.184	1.075	0.905	0.900	1.800	0.635	2.497	1.782	1.941	0.644	0.597	1.484	0.707	0.632	0.412
v[21]	0.124	1.927	0.318	0.318	1.475	0.797	0.018	1.690	1.522	0.167	0.088	0.635	0.072	0.697	0.617
v[22]	10.772	7.368	8.335	13.219	3.313	8.894	0.177	2.642	6.896	1.518	1.475	6.799	7.227	7.306	7.502
v[23]	10.772	7.368	8.335	13.219	3.313	8.894	0.177	2.642	6.896	1.518	1.475	6.799	7.227	7.306	7.502
v[24]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[25]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[26]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[27]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[28]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[29]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[30]	0.369	0.297	0.297	0.220	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[31]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[32]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Objective v[34]	0.259	0.006	0.006	0.225	0.197	0.268	0.431	0.346	0.153	0.177	0.149	0.348	0.158	0.341	0.096
v[35]	4.923	0.417	4.535	4.295	1.315	1.972	4.592	1.326	0.861	2.450	2.812	2.785	1.060	3.115	2.008
v[36]	18.030	19.732	18.721	16.701	20.547	18.946	20.374	20.491	19.550	10.361	18.808	19.344	9.428	19.274	19.335
v[40]	0.448	5.441	8.017	12.801	1.865	7.399	0.374	0.374	5.296	1.759	3.994	6.239	7.574	6.609	9.168
v[41]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.127	0.000	0.284	0.000	0.002	0.004	2.518	0.015	0.419	0.000	2.284
Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Σ ATP	11.701	36.889	32.761	29.253	38.115	34.244	34.027	38.204	36.720	17.455	32.868	33.690	14.432	33.264	37.118

ภาคผนวก ค

ผลจำลองการหาค่า v_{rb} มากที่สุด

ตารางที่ ก-1 ผลการจำลองค่า V_{pk} มากที่สุดของโครงข่ายแบบถักพลิซพื้นฐาน

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	4.605	4.435	3.889	5.753	4.343	4.598	4.894	6.388	4.830	5.027	3.317	4.748	4.423	4.358	4.615
v[2]	0.370	0.630	3.300	0.544	2.307	2.896	1.485	0.449	1.953	1.693	2.282	1.767	0.883	2.871	1.247
v[3]	0.333	0.114	1.359	0.060	0.876	0.397	0.116	0.116	0.306	0.340	0.219	0.215	0.298	0.870	0.205
v[4]	0.378	0.365	1.172	0.544	0.846	0.830	0.631	0.565	0.829	0.938	0.936	0.710	0.380	1.045	0.638
v[5]	0.139	0.026	0.427	-0.325	0.466	0.150	0.037	-0.000	0.031	0.200	0.388	0.114	0.123	0.408	0.008
v[6]	0.194	0.087	0.792	0.325	0.510	0.247	0.109	0.484	0.175	0.340	0.250	0.201	0.175	0.463	0.196
v[7]	0.194	0.087	0.792	0.325	0.510	0.247	0.109	0.484	0.174	0.340	0.250	0.201	0.175	0.463	0.196
v[8]	3.170	3.789	6.774	5.194	2.022	2.486	3.394	3.923	2.660	3.319	1.239	2.866	3.525	1.472	3.353
v[9]	3.484	3.884	2.113	5.175	2.979	2.865	3.931	5.789	2.846	3.640	1.838	3.262	3.804	2.234	3.338
v[10]	7.388	7.775	4.834	10.005	6.404	5.867	6.969	10.937	5.704	7.241	4.145	6.618	7.712	5.096	7.065
v[11]	4.174	5.370	4.104	7.062	4.439	4.805	5.108	8.564	4.924	5.718	3.810	4.923	4.622	4.481	5.001
v[12]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[13]	3.462	4.645	3.796	5.159	3.730	4.007	4.100	5.794	1.788	1.817	2.102	4.154	3.916	3.769	4.071
v[14]	1.289	4.454	1.111	5.686	3.032	1.418	2.329	5.771	3.823	4.722	2.491	3.967	0.859	1.219	4.001
v[15]	3.249	4.432	3.083	4.946	3.337	3.793	4.087	5.581	3.844	3.805	2.491	3.777	3.375	3.425	3.544
v[16]	3.118	4.295	2.902	4.220	3.417	3.620	3.909	4.421	3.604	3.805	2.491	3.777	3.375	3.425	3.544
v[17]	3.118	4.295	2.902	4.220	3.417	3.620	3.909	4.421	3.604	3.805	2.491	3.777	3.375	3.425	3.544
v[18]	2.152	0.170	2.163	0.052	0.677	2.548	1.659	0.002	2.227	2.597	0.710	0.167	3.086	2.529	0.000
v[19]	0.965	4.174	0.738	4.168	2.741	1.002	1.949	4.419	1.376	1.309	1.781	3.611	0.339	0.896	3.544
v[20]	2.774	2.246	0.587	2.804	1.825	0.915	1.722	2.253	0.638	1.403	0.146	1.546	2.560	0.415	1.925
v[21]	2.774	2.246	0.587	2.804	1.825	0.915	1.722	2.253	0.638	1.403	0.146	1.546	2.560	0.415	1.925
v[22]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[23]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[24]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[25]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[26]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[27]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[28]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[29]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[30]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[31]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[32]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[33]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[34]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[35]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
v[36]	0.103	0.136	0.359	0.137	0.235	0.501	0.440	0.000	0.573	0.516	0.418	0.428	0.123	0.301	0.360
Dispersive v[34]	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[37]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[38]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[39]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[40]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[41]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[42]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[43]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[44]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[45]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[46]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sum	23.753	29.903	25.342	31.463	27.754	28.239	29.544	33.114	27.819	29.551	21.696	29.689	26.732	28.603	24.995
Σ ATP	47.642	58.595	46.375	52.076	51.023	54.086	54.086	54.086	48.554	52.903	34.776	51.498	54.930	50.515	47.894

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

v[1]	5.713	3.743	4.798	4.574	4.245	4.158	5.127	5.022	4.658	5.496	5.000	2.988	5.691	4.382	5.229
v[2]	0.746	2.460	1.619	0.046	1.743	1.176	0.688	0.773	1.855	0.533	0.731	1.138	1.200	1.788	0.652
v[3]	0.000	0.444	0.377	0.304	0.278	0.233	0.187	0.193	0.076	0.009	0.223	0.132	0.221	0.029	0.103
v[4]	0.746	0.887	0.652	0.426	0.716	0.381	0.500	0.470	0.612	0.533	0.497	0.445	0.155	0.666	0.449
v[5]	-0.334	0.307	0.140	0.113	0.088	0.039	0.225	0.009	0.000	-0.246	0.002	0.000	0.026	0.000	-0.156*
v[6]	0.578	0.341	0.218	0.190	0.189	0.194	0.212	0.185	0.036	0.230	0.321	0.062	0.321	0.039	0.200
v[7]	0.338	0.341	0.218	0.190	0.189	0.194	0.212	0.185	0.036	0.230	0.321	0.062	0.321	0.039	0.200
v[8]	4.952	1.387	3.074	3.713	2.868	2.967	4.434	4.244	2.988	4.948	4.254	1.835	3.876	2.579	4.562
v[9]	4.913	1.894	3.612	3.998	3.245	3.180	4.593	4.417	3.005	4.929	4.457	1.947	4.178	2.599	4.646
v[10]	9.509	4.980	6.945	8.089	6.559	6.380	9.141	8.422	5.990	9.608	8.997	3.926	8.306	5.179	9.176
v[11]	7.074	3.819	4.874	5.147	4.956	4.952	5.613	5.428	4.839	6.426	5.447	3.156	5.742	4.667	5.984
v[12]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.002	0.009	0.119	0.000	0.000	0.005	0.000	0.197	0.000
v[13]	3.149	3.128	4.094	4.115	4.390	3.578	4.536	4.469	4.184	4.900	4.408	2.490	4.498	3.985	4.636
v[14]	3.493	3.128	4.094	4.115	4.390	3.578	4.536	4.469	4.184	4.900	4.408	2.490	4.498	3.985	4.636
v[15]	4.907	2.936	3.902	4.177	3.938	3.365	4.323	4.256	3.970	4.890	4.193	2.276	4.384	3.695	2.779
v[16]	4.155	2.828	3.747	4.023	3.761	3.133	4.009	4.001	3.858	4.154	3.898	2.169	3.887	3.657	4.049
v[17]	4.155	2.828	3.747	4.023	3.761	3.133	4.009	4.001	3.858	4.154	3.898	2.169	3.887	3.657	4.049
v[18]	4.155	2.828	3.747	4.023	3.761	3.133	4.009	4.001	3.858	4.154	3.898	2.169	3.887	3.657	4.049
v[19]	1.806	0.000	0.000	1.574	1.768	0.000	0.902	0.636	3.488	0.446	1.180	1.498	2.422	0.769	1.836
v[20]	2.549	2.826	3.747	2.449	1.992	3.133	3.107	3.365	0.370	3.713	2.718	0.671	1.265	3.347	2.213
v[21]	2.396	0.121	1.931	2.802	1.464	1.746	3.189	3.255	0.991	3.043	3.310	0.630	2.464	0.373	3.202
v[22]	2.396	0.121	1.931	2.802	1.464	1.746	3.189	3.255	0.991	3.043	3.310	0.630	2.464	0.373	3.202
v[23]	2.296	0.122	1.931	2.802	1.464	1.746	3.189	3.255	0.991	3.043	3.310	0.630	2.464	0.373	3.202
v[24]	0.327	0.465	0.352	0.154	0.445	0.305	0.206	0.203	0.504	0.222	0.194	0.281	0.353	0.548	0.267
v[25]	0.327	0.465	0.352	0.154	0.445	0.305	0.206	0.203	0.504	0.222	0.194	0.281	0.353	0.548	0.267
v[26]	0.327	0.465	0.352	0.154	0.445	0.305	0.206	0.203	0.504	0.222	0.194	0.281	0.353	0.548	0.267
v[27]	0.327	0.465	0.352	0.154	0.445	0.305	0.206	0.203	0.504	0.222	0.194	0.281	0.353	0.548	0.267
v[28]	0.327	0.465	0.352	0.154	0.445	0.305	0.206	0.203	0.504	0.222	0.194	0.281	0.353	0.548	0.267
v[29]	0.327	0.465	0.352	0.154	0.445	0.305	0.206	0.203	0.504	0.222	0.194	0.281	0.353	0.548	0.267
v[30]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[31]	0.645	0.003	0.047	0.046	0.070	0.124	0.206	0.149	0.005	-0.429	0.48	0.001	0.290	0.000	0.000
v[32]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Objective v[24]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[35]	0.853	6.063	3.432	1.493	4.116	1.941	0.057	0.472	4.839	0.000	0.146	2.286	1.727	5.317	0.091
v[36]	31.255	23.211	28.759	29.512	28.822	24.038	29.923	29.786	28.742	30.818	29.199	16.760	29.741	27.280	46.144
Sum	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Σ ATP	-	38.384	22.614	58.400	57.434	42.536	-	57.112	53.345	-	56.393	25.249	56.073	46.276	-

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ว[1]	3.451	3.629	2.967	3.148	3.048	3.070	3.437	3.274	3.351	2.930	2.815	2.806	1.046	3.155	2.802
ว[2]	2.176	1.672	2.152	1.442	2.403	1.188	2.218	2.427	2.202	2.741	1.386	1.692	0.948	1.034	2.903
ว[3]	0.709	0.094	0.984	0.090	0.853	0.031	0.727	1.329	0.273	1.271	0.173	0.031	0.469	0.335	0.031
ว[4]	0.841	0.627	0.782	0.545	0.866	0.461	0.952	0.874	0.199	0.087	0.217	0.479	0.381	0.410	0.346
ว[5]	0.314	0.029	0.477	0.030	0.411	0.000	0.274	0.949	0.271	0.566	0.071	0.000	0.319	0.152	0.000
ว[6]	0.098	0.065	0.508	0.061	0.442	0.031	0.453	0.680	0.302	0.705	0.102	0.250	0.183	0.183	0.031
ว[7]	0.395	0.065	0.308	0.061	0.442	0.031	0.453	0.680	0.302	0.705	0.102	0.250	0.183	0.183	0.031
ว[8]	1.240	1.942	0.799	1.691	0.531	1.867	1.244	0.832	1.134	0.174	1.414	1.699	0.083	2.105	1.351
ว[9]	1.949	2.017	1.764	1.782	1.465	1.876	1.652	2.142	1.868	1.479	1.368	1.711	0.532	2.421	1.399
ว[10]	4.193	4.043	3.986	3.335	3.321	3.737	4.158	4.914	3.629	3.398	3.188	3.402	1.384	4.974	3.168
ว[11]	3.644	3.730	3.038	3.381	3.182	3.358	3.845	3.346	3.423	3.219	2.962	2.999	1.125	3.365	2.615
ว[12]	0.019	0.000	0.000	0.162	0.063	0.217	0.000	0.004	0.000	0.000	0.076	0.122	0.007	0.138	0.000
ว[13]	2.877	3.036	2.372	2.868	2.869	2.715	2.863	2.884	2.758	2.337	2.997	2.666	2.897	2.699	3.032
ว[14]	1.284	0.854	0.846	2.837	1.717	1.502	2.902	0.495	2.597	1.111	1.699	2.086	2.746	1.471	2.518
ว[15]	2.664	2.832	2.160	2.655	2.655	2.502	2.670	2.471	2.545	2.124	2.064	2.393	2.493	2.466	2.819
ว[16]	2.905	2.710	2.053	2.547	2.548	2.395	2.414	2.364	2.436	1.908	1.977	2.266	2.566	2.378	2.712
ว[17]	2.905	2.710	2.053	2.547	2.548	2.395	2.414	2.364	2.436	1.908	1.977	2.266	2.566	2.378	2.712
ว[18]	1.572	1.260	1.507	0.009	1.110	0.192	0.360	2.169	0.440	1.205	0.578	0.499	0.118	1.207	0.693
ว[19]	0.994	0.550	0.547	2.538	1.438	2.503	2.054	0.195	1.938	0.703	1.399	1.789	2.469	1.171	2.219
ว[20]	0.410	0.153	0.909	0.014	0.000	0.240	0.174	1.426	0.066	0.040	0.066	0.263	0.000	1.470	0.302
ว[21]	0.852	0.212	1.134	4.776	0.873	1.023	2.036	1.804	2.566	10.608	0.628	7.011	1.035	5.923	10.442
ว[22]	0.832	0.212	1.134	4.776	0.873	1.023	2.036	1.804	2.566	10.608	0.628	7.011	1.035	5.923	10.442
ว[23]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[24]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[25]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[26]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[27]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[28]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[29]	0.364	0.481	0.193	0.403	0.342	0.348	0.417	0.112	0.415	0.300	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[30]	0.626	0.951	0.396	0.806	0.684	0.697	0.538	0.274	0.830	0.383	0.686	0.632	0.099	0.289	0.507
ว[31]	0.001	0.003	0.009	0.000	0.009	0.000	0.148	0.000	0.000	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ว[32]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ว[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ว[34]	0.313	0.475	0.193	0.403	0.342	0.348	0.269	0.112	0.415	0.191	0.343	0.316	0.049	0.145	0.253
ว[35]	4.920	4.023	4.023	3.890	5.826	3.003	4.266	4.266	3.003	5.607	3.137	2.680	2.936	1.449	2.790
ว[36]	20.904	21.048	18.095	19.115	20.702	17.708	20.506	20.965	20.300	18.065	15.845	16.800	15.244	18.376	18.191
ว[1]	0.442	0.019	10.535	4.914	1.224	10.705	1.847	0.379	2.506	10.568	0.242	7.019	3.462	4.453	11.112
ว[1]	0.000	0.000	0.000	0.155	0.350	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.272	3.427	0.000	0.372
รวม	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Σ AT	36.461	35.849	33.249	30.374	35.428	29.455	33.249	41.257	33.225	36.701	35.024	27.646	26.543	34.601	31.250

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ว[1]	4.168	5.117	3.922	3.661	2.860	3.647	4.131	3.453	4.411	4.306	3.983	4.025	3.261	3.736	3.929
ว[2]	1.558	4.514	1.266	3.688	0.890	3.012	1.544	2.244	4.395	4.338	-0.313	2.437	3.212	2.902	3.116
ว[3]	0.517	2.845	0.857	1.393	0.313	1.808	0.188	0.592	2.656	2.761	0.084	1.011	0.835	0.990	1.444
ว[4]	0.587	1.569	0.508	1.147	0.311	1.069	0.111	0.815	1.759	1.477	0.502	0.979	0.871	1.000	1.390
ว[5]	0.240	1.437	0.692	0.751	0.141	0.739	0.033	2.260	-0.208	1.345	0.002	0.459	0.384	0.471	0.624
ว[6]	0.275	1.888	0.055	0.841	0.172	0.770	0.176	0.231	-0.448	1.396	0.033	0.572	0.451	0.520	0.821
ว[7]	0.275	1.486	0.585	0.841	0.172	0.770	0.176	0.231	1.448	1.396	0.033	0.572	0.451	0.520	0.821
ว[8]	2.585	0.588	2.841	0.777	1.990	0.692	2.582	4.353	0.000	5.032	2.655	1.573	0.932	0.819	0.937
ว[9]	3.092	3.313	3.679	2.351	2.284	2.110	2.721	1.928	2.637	2.794	2.670	2.564	1.749	1.790	2.163
ว[10]	6.406	8.465	5.340	5.434	4.690	4.940	5.416	4.113	6.453	6.934	5.323	5.446	3.862	4.032	4.930
ว[11]	4.311	3.714	4.055	4.058	2.901	3.819	4.469	3.880	4.225	3.756	4.239	4.299	3.638	3.844	4.332
ว[12]	0.667	-1.374	0.615	0.607	0.025	0.101	0.013	0.155	0.625	0.625	0.175	0.000	0.215	0.000	0.000
ว[13]	3.641	3.050	3.652	3.275	3.640	3.330	3.530	3.315	3.142	3.091	3.564	3.431	2.903	3.143	3.335
ว[14]	3.199	2.110	2.079	1.996	1.596	3.189	0.902	0.315	2.303	2.290	2.175	2.313	0.457	1.362	3.237
ว[15]	3.478	2.806	3.438	3.061	3.437	3.116	3.317	3.001	2.929	2.878	3.351	3.218	2.690	2.929	3.122
ว[16]	3.318	2.729	3.309	2.895	3.320	3.099	3.098	2.894	2.613	2.771	3.244	3.009	2.547	2.804	3.848
ว[17]	3.318	2.729	3.309	2.895	3.320	3.099	3.098	2.894	2.613	2.771	3.244	3.009	2.547	2.804	2.444
ว[18]	3.318	2.729	3.309	2.895	3.320	3.099	3.098	2.894	2.613	2.771	3.244	3.009	2.547	2.804	2.648
ว[19]	0.421	0.919	1.572	1.258	2.024	0.720	2.608	2.879	0.818	0.780	1.388	1.097	2.425	1.730	0.277
ว[20]	2.897	1.810	1.737	1.837	1.796	2.380	0.470	0.015	1.794	1.991	1.876	1.912	0.123	1.074	2.272
ว[21]	2.956	4.611	1.148	1.148	1.649	0.982	0.837	0.093	2.099	1.019	0.954	1.110	0.084	0.049	0.458
ว[22]	1.856	4.811	1.148	1.236	1.649	0.982	0.837	0.093	2.099	3.039	0.954	1.110	0.084	0.049	0.458
ว[23]	1.954	4.611	1.148	1.236	1.649	0.982	0.837	0.093	2.099	10.000	0.388	0.325	0.339	0.449	0.387
ว[24]	0.230	0.000	0.372	0.124	0.078	0.217	0.454	0.434	0.209	0.000	0.388	0.325	0.339	0.449	0.387
ว[25]	0.330	0.000	0.372	0.124	0.078	0.217	0.454	0.434	0.209	0.000	0.388	0.325	0.339	0.449	0.387
ว[26]	0.330	0.000	0.372	0.124	0.078	0.217	0.454	0.434	0.209	0.000	0.388	0.325	0.339	0.449	0.387
ว[27]	0.230	0.000	0.372	0.124	0.078	0.217	0.454	0.434	0.209	0.000	0.388	0.325	0.339	0.449	0.387
ว[28]	0.330	0.000	0.372	0.124	0.078	0.217	0.454	0.434	0.209	0.000	0.388	0.325	0.339	0.449	0.387
ว[29]	0.227	0.000	0.350	0.104	0.078	0.217	0.454	0.433	0.000	0.000	0.388	0.224	0.303	0.431	0.221
ว[30]	0.451	0.000	0.700	0.249	0.155	0.444	0.644	0.846	0.600	0.000	0.716	0.447	0.607	0.841	0.442
ว[31]	0.000	0.000	0.022	0.009	0.000	0.000	0.132	0.000	2.209	0.000	0.000	0.102	0.035	0.018	0.166
ว[32]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ว[33]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ว[34]	0.227	-0.024	0.350	0.164	0.078	0.217	0.722	0.433	-0.000	0.000	0.388	0.224	0.303	0.431	0.221
ว[35]	2.947	5.621	3.121	6.151	1.745	6.325	3.539	5.843	7.360	6.883	3.389	5.043	5.492	6.997	8.823
ว[36]	25.723	30.284	24.292	25.587	22.199	25.596	23.844	23.171	27.679	28.419	24.977	25.168	21.020	22.889	25.285
ว[37]	0.006	0.006	0.314	0.006	1.410	0.181	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
ว[38]	0.000	0.000	0.008	0.000	1.404	3.175	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
รวม	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A7P	48.068	-	43.722	48.155	43.643	47.263	42.301	41.765	-	-	43.187	45.518	38.072	41.863	42.389

ตารางที่ ก-4 ผลการจำลองหาค่า Riboflavin Flux (V_p) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิฟลิกซ์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้น Asparagine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v(1)	3.665	3.448	3.673	2.225	3.638	0.857	3.617	2.742	3.498	3.435	3.518	2.896	3.089	3.806	3.223
v(2)	1.476	1.518	1.522	1.411	1.828	0.276	0.743	1.049	2.728	1.238	1.300	1.339	0.620	1.322	1.911
v(3)	0.147	0.928	0.067	0.439	0.293	0.045	0.031	0.031	1.662	0.031	0.374	0.111	0.049	0.175	0.458
v(4)	0.716	0.955	0.960	0.751	0.149	0.359	0.359	0.099	1.383	0.478	0.324	0.511	0.285	2.060	0.702
v(5)	0.000	0.420	0.000	0.204	0.068	0.007	0.000	0.000	0.461	0.000	0.000	0.040	0.001	0.000	0.214
v(6)	0.147	0.568	0.067	0.235	0.195	0.038	0.031	0.031	0.401	0.031	0.274	0.071	0.045	0.175	0.345
v(7)	0.147	0.508	0.067	0.235	0.195	0.038	0.031	0.031	0.401	0.031	0.274	0.071	0.045	0.175	0.345
v(8)	2.174	0.814	2.116	0.798	1.794	0.446	2.859	1.678	2.501	2.203	2.538	1.542	2.453	2.470	1.797
v(9)	2.352	1.722	2.164	1.216	2.058	0.473	1.871	1.696	1.797	2.213	2.438	1.634	2.483	2.626	1.736
v(10)	4.836	3.845	4.349	2.620	4.164	0.933	3.722	3.360	4.037	4.407	4.896	3.289	4.949	5.233	3.666
v(11)	4.052	3.646	3.884	2.346	3.881	0.789	3.731	2.879	3.766	3.723	4.468	3.109	3.663	4.166	3.116
v(12)	0.082	0.012	0.064	0.073	0.018	0.030	0.043	0.042	0.000	0.197	0.292	0.141	0.470	0.001	0.222
v(13)	3.154	2.466	3.144	3.078	3.062	2.414	3.150	3.194	2.954	3.127	3.316	2.638	3.165	3.215	3.017
v(14)	0.939	0.939	1.543	1.746	0.787	1.597	1.112	3.173	1.379	1.905	3.195	1.844	3.141	1.580	1.221
v(15)	2.941	2.653	2.952	2.885	2.849	2.200	2.956	2.960	2.691	2.914	3.005	2.674	2.952	3.002	2.804
v(16)	2.717	2.488	2.789	2.777	2.665	2.093	2.829	2.873	2.475	2.867	2.253	2.517	2.829	2.751	2.697
v(17)	2.717	2.488	2.789	2.777	2.665	2.093	2.829	2.873	2.475	2.867	2.253	2.517	2.829	2.751	2.697
v(18)	2.717	2.488	2.789	2.777	2.665	2.093	2.829	2.873	2.475	2.867	2.253	2.517	2.829	2.751	2.697
v(19)	1.270	1.906	1.781	1.279	2.274	0.495	2.016	3.000	1.504	1.291	0.104	0.973	0.005	1.694	1.775
v(20)	1.447	0.982	1.007	2.862	0.391	3.888	0.876	3.654	0.971	1.674	2.652	1.938	2.825	1.147	1.088
v(21)	0.394	0.060	0.325	0.112	0.164	0.005	1.831	0.343	0.111	0.544	0.289	0.040	0.946	0.925	0.011
v(22)	0.394	0.060	0.325	0.112	0.164	0.005	1.831	0.343	0.111	0.544	0.289	0.040	0.946	0.925	0.011
v(23)	0.394	0.060	0.325	0.112	0.164	0.005	1.831	0.343	0.111	0.544	0.289	0.040	0.946	0.925	0.011
v(24)	0.307	0.406	0.811	0.219	0.474	0.025	0.247	0.586	0.702	0.365	0.284	0.359	0.158	0.823	0.376
v(25)	0.307	0.406	0.811	0.219	0.474	0.025	0.247	0.586	0.702	0.365	0.284	0.359	0.158	0.823	0.376
v(26)	0.307	0.406	0.811	0.219	0.474	0.025	0.247	0.586	0.702	0.365	0.284	0.359	0.158	0.823	0.376
v(27)	0.413	0.405	0.284	0.219	0.474	0.020	0.176	0.162	0.349	0.365	0.284	0.359	0.158	0.823	0.376
v(28)	0.413	0.405	0.284	0.219	0.474	0.020	0.176	0.162	0.349	0.365	0.284	0.359	0.158	0.823	0.376
v(29)	0.296	0.348	0.247	0.219	0.397	0.020	0.176	0.160	0.141	0.365	0.051	0.359	0.142	0.034	0.376
v(30)	0.395	0.496	0.405	0.437	0.794	0.040	0.353	0.319	0.281	0.720	0.022	0.717	0.283	0.066	0.751
v(31)	0.116	0.058	0.037	0.000	0.097	0.000	0.000	0.000	0.109	0.000	0.343	0.000	0.016	0.144	0.000
v(32)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.182	0.000	0.000	0.000	0.000
v(33)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v(34)	0.294	0.348	0.247	0.219	0.397	0.020	0.176	0.160	0.141	0.365	0.051	0.359	0.142	0.034	0.376
v(35)	3.421	6.024	3.381	4.478	4.478	1.073	0.887	2.678	5.625	3.212	2.777	3.628	1.564	2.010	4.992
v(36)	21.079	21.431	21.548	20.915	21.191	13.335	20.994	20.704	21.865	20.849	20.852	18.817	19.786	21.642	21.642
v(1)	0.043	0.043	0.043	1.437	0.043	2.332	0.106	1.023	0.043	0.111	0.043	0.456	0.043	0.043	0.308
v(3)	0.300	0.300	0.300	1.364	0.300	2.289	0.963	0.986	0.300	0.968	0.300	0.394	0.300	0.300	0.166
Target	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Objective $\sum$ ATP	34.852	37.183	33.275	36.380	36.893	22.233	39.694	32.216	38.579	34.431	33.963	31.541	36.412	33.204	36.869

ตารางที่ ค-5 ผลการจำลองหาค่า Riboflavin Flux (V_{R}^{R}) มากที่สุดของโครงข่ายเมตาบอลิกลักษณะที่เปลี่ยนแปลงขึ้น Threonine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	2.4308	3.5533	3.1077	2.5531	2.4723	2.1574	3.3993	3.1294	3.3648	3.2645	3.3394	3.1848	3.3205	2.5461	1.2693
v[2]	1.3444	1.5466	1.0636	0.9784	1.2972	0.9039	0.9061	0.8925	1.2891	1.2079	1.9198	0.9219	0.4882	0.7072	0.4367
v[3]	0.2289	0.0571	0.0046	0.0008	0.2305	0.0008	0.0008	0.0018	0.0005	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
v[4]	0.5128	0.8554	0.4449	0.4825	0.5603	0.3732	0.3838	0.5544	0.6018	0.8193	1.2742	0.5864	0.2864	0.3317	0.3114
v[5]	0.0981	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
v[6]	0.1259	0.0071	0.0008	0.0008	0.1307	0.0008	0.0008	0.0018	0.0005	0.0008	0.1183	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
v[7]	0.1259	0.0071	0.0008	0.0008	0.1307	0.0008	0.0008	0.0018	0.0005	0.0008	0.1183	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
v[8]	1.0710	1.9883	2.0887	1.5593	1.8897	1.2811	2.3778	2.2117	2.0603	1.9172	1.7942	2.2473	2.8169	2.2235	0.8232
v[9]	1.3259	2.0264	2.0405	1.5711	1.5012	1.2499	2.3868	2.2145	2.0118	1.9970	1.8919	2.2593	2.8287	2.2333	0.8350
v[10]	2.8414	4.0333	4.0817	3.1228	2.8829	2.4803	4.3588	4.4496	4.1643	3.9646	3.8300	4.4992	5.6380	4.4512	1.6507
v[11]	2.5019	3.8865	3.2992	2.6956	2.5434	2.1122	3.3960	3.9313	3.8284	3.5935	3.7105	3.8982	3.8336	3.7182	1.4275
v[12]	0.0000	0.1296	0.1204	0.0005	0.0000	0.0007	0.2256	0.7266	0.2531	0.2630	0.0000	0.4423	0.2920	0.7010	0.0871
v[13]	1.8372	3.6892	2.6345	2.0289	1.8787	1.6475	2.9313	3.2646	3.1242	2.8738	3.0459	3.0335	3.0189	3.0535	0.7428
v[14]	0.3994	1.1572	2.2365	2.4337	0.3994	1.2323	1.4725	0.9235	1.2361	1.2102	0.2994	0.2994	0.6034	1.7864	2.0967
v[15]	3.4364	2.8760	2.6721	3.3269	3.4141	1.7575	2.9208	3.0514	2.9110	3.6946	2.9857	3.0725	2.9098	3.0257	4.0687
v[16]	3.2593	2.7427	2.5450	3.2198	3.3070	1.6504	2.8137	2.9433	2.7842	2.8875	2.9436	2.9634	2.8077	2.9186	3.9616
v[17]	3.3293	2.7427	2.5450	3.2198	3.3070	1.6504	2.8137	2.9433	2.7842	2.8875	2.9436	2.9634	2.8077	2.9186	3.9616
v[18]	3.2593	2.7427	2.5450	3.2198	3.3070	1.6504	2.8137	2.9433	2.7842	2.8875	2.9436	2.9634	2.8077	2.9186	3.9616
v[19]	3.3293	1.9112	0.6279	1.0953	3.3070	0.7175	1.6406	2.7201	1.8672	2.9677	2.8386	2.9634	2.8077	1.4317	2.1643
v[20]	0.0000	0.8315	1.8371	2.1143	0.0000	0.0000	1.1731	0.2231	0.9170	0.9198	0.0000	0.0000	0.3040	1.4870	1.7973
v[21]	0.0000	0.9673	0.6229	0.2896	0.0000	0.0268	1.0343	0.3788	0.3788	0.2885	0.0000	0.6615	0.2885	0.5924	0.0837
v[22]	0.0000	0.0873	0.8737	0.2896	0.0000	0.0268	1.0343	0.3788	0.3788	0.2885	0.0000	0.6615	0.2885	0.5924	0.0837
v[23]	1.8124	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[24]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[25]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[26]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[27]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[28]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[29]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[30]	0.3014	0.8167	0.3725	0.3701	0.3460	0.2608	0.2614	0.4410	0.6606	0.7069	1.0744	0.4306	0.1740	0.2193	0.1890
v[31]	0.0000	0.0253	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
v[32]	0.0000	0.1987	0.0000	0.1776	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
v[33]	0.0000	0.3212	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
v[34]	0.3014	0.2645	0.2740	0.3235	0.2852	0.2500	0.2408	0.1531	0.2184	0.1789	0.2189	0.1741	0.0855	0.1723	0.0442
v[35]	4.4919	3.6318	2.4445	3.7231	4.4555	1.8976	2.0349	2.5344	3.1687	3.0605	4.3175	2.3651	0.2496	2.1664	3.0383
v[36]	2.7329	20.8860	18.7203	20.7971	21.7423	12.2023	20.2768	20.4133	20.6173	20.8403	21.6101	20.6722	19.9803	19.9570	21.5622
v[40]	1.8363	0.0238	0.7746	1.5551	1.7736	0.3471	0.2246	0.0939	6.0739	0.4579	0.1570	0.2782	2.1279	0.2093	2.3490
v[41]	1.8124	0.0000	0.2507	1.5112	1.5467	0.2312	0.2027	0.0660	0.0000	0.4340	0.1331	0.2523	0.1040	0.1824	3.5191
Time															
$\sum \text{ATP}$	49.539	36.611	35.546	39.588	43.470	22.774	41.023	41.881	37.590	39.101	37.942	42.377	43.358	41.347	44.078

ภาคผนวก ง

ผลจำลองการหาอัตราดอกเบี้ยโตมากที่สุด

ตารางที่ 3-2 ผลการจำลองหาค่า Growth Rate มากที่สุดของโครงการตามอัตรากำลังที่เปลี่ยนแปลงขึ้น Setine

	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
<1>	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
<2>	5.327	5.317	3.792	4.534	3.823	4.872	4.499	3.941	3.934	4.748	4.748	3.934	3.934	4.748	4.748	3.934	3.934	4.748
<3>	1.209	1.239	1.868	2.472	1.356	2.423	1.749	1.976	1.748	2.386	1.149	2.386	1.149	2.386	1.149	2.386	1.149	2.386
<4>	1.672	1.652	1.456	1.994	1.556	1.953	1.764	1.668	1.764	2.080	1.861	2.080	1.861	2.080	1.861	2.080	1.861	2.080
<5>	0.800	0.554	0.864	1.144	0.564	1.351	0.874	0.855	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828
<6>	0.729	0.675	1.605	1.326	0.591	1.472	0.876	0.876	0.876	0.920	1.220	0.920	1.220	0.920	1.220	0.920	1.220	0.920
<7>	0.729	0.675	1.605	1.326	0.591	1.472	0.876	0.876	0.876	0.920	1.220	0.920	1.220	0.920	1.220	0.920	1.220	0.920
<8>	2.024	1.623	1.158	0.395	2.183	0.687	3.641	0.687	3.641	1.018	0.228	1.018	0.228	1.018	0.228	1.018	0.228	1.018
<9>	3.172	2.777	2.964	2.779	3.300	2.815	2.248	2.860	2.709	2.579	2.579	2.579	2.579	2.579	2.579	2.579	2.579	2.579
<10>	6.761	6.031	6.728	6.612	7.152	6.904	8.478	5.369	6.188	6.188	6.188	6.188	6.188	6.188	6.188	6.188	6.188	6.188
<11>	6.168	5.370	4.272	5.912	5.571	5.872	4.959	5.173	5.514	5.747	5.385	5.792	5.358	5.358	5.358	5.358	5.358	5.358
<12>	0.578	0.090	0.559	0.502	0.592	0.952	1.802	0.186	-0.055	0.534	0.263	0.534	0.263	0.534	0.263	0.534	0.263	0.534
<13>	4.986	3.070	5.975	3.560	5.849	4.889	3.977	5.340	7.797	4.147	5.319	7.702	4.862	6.614	4.477	6.614	4.477	6.614
<14>	3.518	2.350	3.977	1.811	3.793	3.793	4.151	2.125	4.661	2.414	1.002	3.721	3.692	2.845	1.294	2.845	1.294	2.845
<15>	4.303	2.231	3.279	2.272	5.662	3.546	3.560	5.129	5.990	3.508	4.951	5.850	3.548	5.828	3.385	5.828	3.385	5.828
<16>	3.809	1.809	4.889	1.735	5.568	3.177	5.569	5.122	4.733	3.187	4.767	5.221	3.089	5.433	3.136	5.433	3.136	5.433
<17>	3.809	1.809	4.889	1.735	5.568	3.177	5.569	5.122	4.733	3.187	4.767	5.221	3.089	5.433	3.136	5.433	3.136	5.433
<18>	3.809	1.809	4.889	1.735	5.568	3.177	5.569	5.122	4.733	3.187	4.767	5.221	3.089	5.433	3.136	5.433	3.136	5.433
<19>	1.601	0.888	2.603	1.337	5.200	0.314	1.788	3.017	2.468	1.670	4.220	3.258	0.680	3.702	3.085	3.702	3.085	3.702
<20>	2.408	1.121	2.859	0.383	2.468	2.813	1.581	2.106	2.265	1.517	0.346	1.963	2.409	1.751	0.041	1.751	0.041	1.751
<21>	0.209	0.112	0.000	0.023	1.459	0.482	1.260	0.197	0.000	0.023	0.466	0.137	0.001	0.200	0.306	0.200	0.306	0.200
<22>	8.197	10.453	11.934	15.485	12.334	12.755	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652
<23>	8.197	10.453	11.934	15.485	12.334	12.755	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652	12.652
<24>	0.682	0.655	0.285	0.288	0.655	0.160	0.378	1.787	0.000	0.915	0.501	0.429	1.016	0.173	0.600	0.173	0.600	0.173
<25>	0.682	0.655	0.285	0.288	0.655	0.160	0.378	1.787	0.000	0.915	0.501	0.429	1.016	0.173	0.600	0.173	0.600	0.173
<26>	0.682	0.655	0.285	0.288	0.655	0.160	0.378	1.787	0.000	0.915	0.501	0.429	1.016	0.173	0.600	0.173	0.600	0.173
<27>	0.175	0.218	0.175	0.074	0.655	0.048	0.024	0.041	0.000	0.000	0.497	0.136	0.271	0.137	0.071	0.136	0.071	0.136
<28>	0.175	0.218	0.175	0.074	0.655	0.048	0.024	0.041	0.000	0.000	0.497	0.136	0.271	0.137	0.071	0.136	0.071	0.136
<29>	0.023	0.218	0.134	0.004	0.005	0.048	0.024	0.041	0.000	0.000	0.250	0.018	0.124	0.071	0.071	0.124	0.071	0.124
<30>	0.046	0.436	0.268	0.668	0.111	0.094	0.024	0.041	0.000	0.000	0.250	0.018	0.124	0.071	0.071	0.124	0.071	0.124
<31>	0.190	0.000	0.040	0.040	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<32>	0.040	0.350	0.118	0.000	0.387	0.020	0.000	1.967	0.000	0.000	0.000	0.292	0.746	0.037	0.246	0.037	0.246	0.037
<33>	0.040	0.350	0.118	0.000	0.387	0.020	0.000	1.967	0.000	0.000	0.000	0.292	0.746	0.037	0.246	0.037	0.246	0.037
<34>	0.023	0.218	0.134	0.004	0.005	0.048	0.024	0.041	0.000	0.000	0.250	0.018	0.124	0.071	0.071	0.124	0.071	0.124
<35>	3.252	1.882	7.200	3.281	7.577	6.262	2.949	15.087	0.000	5.602	10.716	1.228	6.444	4.874	4.874	4.874	4.874	4.874
<36>	29.653	18.900	34.395	20.754	40.257	29.109	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684	40.684
<37>	0.049	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
<38>	0.137	0.168	0.136	0.197	0.027	0.168	0.079	0.003	0.241	0.128	0.073	0.250	0.183	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159
Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Objective D	0.321	0.394	0.326	0.463	0.869	0.394	0.186	0.007	0.800	0.300	0.173	0.387	0.429	0.369	0.418	0.369	0.418	0.369

ตารางที่ ๖-๕ (ต่อ)

[illegible]

ภาคผนวก จ

ผลจำลองการหาสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมของฟลักซ์ทั้งหมด

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Objective Value	0.827425	0.60974	0.609832	0.604183	0.609832	0.604183	0.609832	0.604183	0.609832	0.604183	0.609832	0.604183	0.609832	0.604183	0.609832
ATP	55.839	55.838	55.848	55.877	54.311	52.017	-	54.356	55.518	56.130	-	45.004	54.271	-	49.587
ATP	1.108	1.108	0.856	1.263	1.485	1.016	2.188	4.654	4.786	4.023	3.917	5.222	4.156	4.086	4.789
ATP	0.803	0.667	0.251	0.286	0.832	0.234	1.42	0.339	1.238	2.032	1.218	2.442	2.633	2.633	1.683
ATP	0.619	0.566	0.555	0.883	0.742	0.588	1.646	0.043	0.043	0.915	0.382	0.471	0.407	-0.077	0.627
ATP	0.183	0.010	0.125	0.408	0.156	0.064	0.008	0.111	0.063	0.434	0.111	0.125	0.433	0.129	0.1047
ATP	0.620	0.057	0.466	0.153	0.260	0.172	0.123	0.129	0.129	0.47	0.181	0.359	0.364	0.392	0.230
ATP	0.620	0.057	0.189	0.153	0.260	0.170	0.124	0.129	0.129	0.47	0.181	0.359	0.364	0.392	0.230
ATP	2.344	3.182	2.546	3.477	2.689	2.718	2.651	3.333	3.878	3.878	3.884	3.889	4.108	4.108	2.046
ATP	3.128	3.210	2.818	3.714	3.038	2.954	2.773	3.873	3.873	3.873	3.873	4.029	3.873	3.873	3.873
ATP	6.619	6.411	5.742	7.314	6.219	5.592	5.327	7.390	7.390	6.142	6.005	6.829	5.384	5.077	5.087
ATP	4.592	4.984	5.572	4.881	4.951	5.102	4.792	5.436	5.436	4.723	5.183	4.215	4.462	4.462	4.462
ATP	0.079	0.076	2.062	0.022	0.863	1.387	-	0.173	0.173	0.618	1.115	1.115	0.276	1.115	0.863
ATP	3.914	4.236	4.886	4.185	4.279	4.268	3.506	4.365	4.365	4.047	4.459	3.334	3.397	3.789	4.003
ATP	1.161	0.841	3.192	1.161	1.671	0.971	3.792	1.437	1.437	1.822	2.03	2.111	1.311	1.642	1.526
ATP	3.701	4.041	4.673	3.971	4.066	4.073	3.953	4.152	4.152	3.834	4.226	3.121	3.384	3.555	3.790
ATP	3.587	3.919	4.555	3.848	3.956	3.890	3.479	3.642	3.642	3.721	4.079	2.905	3.177	3.448	3.692
ATP	3.587	3.919	4.555	3.848	3.956	3.890	3.479	3.642	3.642	3.721	4.079	2.905	3.177	3.448	3.692
ATP	3.452	3.673	3.802	3.002	2.987	3.295	0.093	3.842	3.842	3.721	4.079	2.905	3.177	3.448	3.692
ATP	0.135	0.845	0.846	0.846	1.368	0.596	3.842	0.935	0.935	1.517	0.854	1.954	0.812	1.225	2.467
ATP	1.888	1.318	0.030	2.493	3.129	0.711	0.995	1.815	1.815	1.279	0.682	4.125	0.763	0.504	0.765
ATP	1.888	1.318	0.030	2.493	3.129	0.711	0.995	1.815	1.815	1.279	0.682	4.125	0.763	0.504	0.765
ATP	0.326	0.429	0.367	0.650	0.463	0.336	1.423	0.465	0.465	0.261	0.320	0.331	0.761	0.524	0.689
ATP	0.326	0.429	0.367	0.650	0.463	0.336	1.423	0.465	0.465	0.261	0.320	0.331	0.761	0.524	0.689
ATP	0.259	0.311	0.175	0.246	0.297	0.301	0.122	0.398	0.						

ตารางที่ จ-1 (ต่อ)

	v[1]	4.296	4.443	4.353	3.558	3.977	4.213	4.098	4.548	4.694	4.306	4.239	4.785	3.588	4.176	4.133
v[2]	0.976	2.182	2.690	0.667	1.845	1.845	0.900	2.770	1.439	1.966	1.938	1.447	1.966	1.358	2.444	2.444
v[3]	0.270	1.144	0.845	0.212	1.244	0.103	0.051	0.842	0.518	0.374	0.704	1.046	0.342	0.446	0.591	1.070
v[4]	0.827	1.030	1.030	0.246	0.704	0.704	0.413	1.062	0.850	0.869	1.131	0.945	1.415	0.603	0.650	1.268
v[5]	0.114	0.449	0.368	0.062	0.072	0.072	0.002	0.451	0.113	0.077	0.159	0.463	0.030	0.205	0.259	0.492
v[6]	0.156	0.695	0.476	0.150	0.172	0.172	0.050	0.492	0.405	0.296	0.545	0.450	0.492	0.241	0.332	0.528
v[7]	0.156	0.695	0.476	0.150	0.172	0.172	0.050	0.492	0.405	0.296	0.545	0.450	0.492	0.241	0.332	0.528
v[8]	3.145	2.246	2.889	2.075	2.916	2.916	3.293	1.352	3.103	3.193	2.353	1.925	2.806	2.423	2.604	1.674
v[9]	3.596	3.372	3.114	2.869	3.141	3.141	3.328	2.278	3.603	3.548	3.039	2.954	3.330	2.851	3.177	2.675
v[10]	7.286	7.174	6.377	5.781	6.336	6.336	6.636	4.985	7.299	7.153	6.218	6.386	6.690	5.961	6.923	5.823
v[11]	5.201	5.023	4.761	5.382	5.216	5.216	4.520	5.726	5.546	5.546	5.952	4.354	5.875	5.064	4.821	4.370
v[12]	0.811	1.077	0.143	1.738	1.330	1.330	0.912	0.332	0.584	0.604	0.865	0.182	0.192	1.415	0.488	0.158
v[13]	4.513	3.928	3.942	4.532	4.714	4.714	3.836	4.539	4.506	4.506	4.578	3.827	4.386	4.409	4.072	3.694
v[14]	0.791	0.843	0.608	2.354	1.338	1.338	0.906	1.539	0.631	1.596	2.123	0.659	0.932	1.762	1.639	1.574
v[15]	4.360	3.715	3.729	4.290	4.502	4.502	4.325	4.325	4.325	4.325	4.365	3.614	4.173	4.196	3.838	3.403
v[16]	4.182	3.393	3.545	4.126	4.324	4.324	4.104	3.507	3.937	3.998	3.903	3.486	3.654	4.064	3.709	3.371
v[17]	4.182	3.393	3.545	4.126	4.324	4.324	4.104	3.507	3.937	3.998	3.903	3.486	3.654	4.064	3.709	3.371
v[18]	3.712	2.954	3.313	1.928	3.435	3.435	3.605	2.277	3.887	2.889	3.432	3.148	3.432	2.624	2.412	2.101
v[19]	0.470	0.429	0.032	2.197	0.889	0.889	0.398	0.070	0.070	1.109	1.471	0.338	0.222	1.457	1.297	1.269
v[20]	1.946	2.013	1.677	0.159	0.659	0.659	1.265	0.326	1.434	1.467	0.126	1.712	0.677	0.667	1.633	1.313
v[21]	1.946	2.012	1.677	0.159	0.659	0.659	1.265	0.326	1.434	1.467	0.126	1.712	0.677	0.667	1.633	1.313
v[22]	1.946	2.012	1.677	0.159	0.659	0.659	1.265	0.326	1.434	1.467	0.126	1.712	0.677	0.667	1.633	1.313
v[23]	0.389	0.455	0.472	0.012	0.451	0.451	0.391	0.689	0.363	0.491	0.507	0.314	0.841	0.380	0.236	0.659
v[24]	0.389	0.455	0.472	0.012	0.451	0.451	0.391	0.689	0.363	0.491	0.507	0.314	0.841	0.380	0.236	0.659
v[25]	0.003	0.252	0.469	1.182	0.209	0.209	0.280	0.437	0.329	0.395	0.419	0.344	0.238	0.158	0.223	0.187
v[26]	0.031	0.219	0.165	0.162	0.117	0.117	0.232	0.372	0.292	0.211	0.405	0.174	0.416	0.054	0.201	0.082
v[27]	0.031	0.219	0.165	0.162	0.117	0.117	0.232	0.372	0.292	0.211	0.405	0.174	0.416	0.054	0.201	0.082
v[28]	0.020	0.004	0.106	0.103	0.048	0.048	0.215	0.383	0.623	0.023	0.030	0.153	0.004	0.049	0.156	0.078
v[29]	0.040	0.059	0.215	0.211	0.097	0.097	0.430	0.725	0.041	0.045	0.109	0.306	0.009	0.098	0.317	0.153
v[30]	0.011	0.215	0.077	0.057	0.069	0.069	0.017	0.009	0.261	0.188	0.355	0.031	0.413	0.005	0.040	0.005
v[31]	0.356	3.002	0.693	1.174	0.241	0.241	0.011	0.056	0.094	0.096	0.088	0.070	0.103	0.123	0.013	0.472
v[32]	0.002	0.002	0.215	1.020	0.092	0.092	0.048	0.060	0.087	0.185	0.014	0.070	0.423	0.104	0.023	0.154
v[33]	0.002	0.004	0.108	0.105	0.048	0.048	0.215	0.383	0.623	0.023	0.030	0.153	0.004	0.049	0.156	0.078
v[34]	0.070	0.004	0.108	0.105	0.048	0.048	0.215	0.383	0.623	0.023	0.030	0.153	0.004	0.049	0.156	0.078
v[35]	2.202	3.755	4.090	3.411	3.738	3.738	3.120	2.923	3.515	4.653	3.919	3.546	4.135	3.546	4.835	4.835
v[36]	29.274	27.913	28.152	28.184	28.460	28.460	29.066	27.927	29.456	29.288	29.230	27.964	28.891	27.964	27.789	26.943
Objective Value	0.6403143	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877	0.6038877
Tmax	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	30
Σ AEP	59.773	59.213	55.504	-	57.905	58.083	51.013	57.142	55.039	48.472	53.884	54.835	48.472	53.884	54.835	48.192

ตารางที่ จ-2 แสดงรายละเอียดแต่ละฟลักซ์ จากการจำลองหาค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมฟลักซ์ทั้งหมดของโครงข่ายแบบไดนามิกฟลักซ์เพิ่มขึ้น Serime

	2.993	2.313	2.142	2.795	3.150	2.715	2.682	2.304	2.342	2.542	5.691	2.918	2.341	2.626	2.703
ว[1]	2.993	2.313	2.142	2.795	3.150	2.715	2.682	2.304	2.342	2.542	5.691	2.918	2.341	2.626	2.703
ว[2]	0.555	1.070	1.077	1.805	2.246	2.578	1.566	1.466	2.340	1.407	3.559	1.223	2.172	0.910	2.676
ว[3]	0.127	0.546	0.497	0.908	1.226	1.070	1.167	0.838	1.348	0.474	1.880	0.304	1.136	0.411	1.469
ว[4]	0.412	0.482	0.752	0.938	1.135	0.938	0.789	0.590	0.889	0.571	1.923	0.930	0.930	0.483	1.033
ว[5]	0.044	0.287	0.230	0.421	0.590	0.569	0.541	0.403	0.611	0.216	0.830	0.136	0.551	0.183	0.717
ว[6]	0.083	0.298	0.267	0.487	0.636	0.561	0.606	0.435	0.657	0.257	1.060	0.168	0.585	0.228	0.753
ว[7]	0.083	0.298	0.267	0.487	0.636	0.561	0.606	0.435	0.657	0.257	1.060	0.168	0.585	0.228	0.753
ว[8]	2.392	1.227	1.020	0.974	0.557	0.453	0.681	0.802	0.086	1.120	1.679	1.679	0.333	1.701	0.011
ว[9]	2.550	1.774	1.528	1.863	1.764	1.504	1.229	1.421	1.336	1.574	2.848	1.964	1.270	2.093	1.461
ว[10]	5.024	3.796	3.268	4.127	4.099	3.698	2.999	3.626	3.263	3.343	6.697	4.045	3.072	4.349	3.430
ว[11]	3.626	3.592	2.692	3.628	3.233	3.018	2.487	2.220	2.586	2.762	0.393	3.464	2.770	4.007	3.324
ว[12]	0.545	1.210	0.467	0.102	0.000	0.190	0.337	0.843	0.142	0.129	-0.792	0.462	6.353	1.283	0.540
ว[13]	3.488	3.405	3.199	3.221	2.805	3.000	3.289	3.176	3.146	3.420	2.392	2.390	3.183	3.398	2.720
ว[14]	3.134	2.764	0.468	0.938	1.174	0.337	0.517	2.236	0.315	2.729	1.167	2.185	0.442	2.544	2.462
ว[15]	3.273	3.192	2.985	3.007	2.591	2.806	3.076	2.963	2.953	3.207	2.179	3.076	2.970	3.185	2.596
ว[16]	3.158	3.084	2.972	2.865	2.469	2.678	2.955	2.853	2.811	3.089	1.863	2.968	2.860	3.064	2.394
ว[17]	3.158	3.084	2.972	2.865	2.469	2.678	2.955	2.853	2.811	3.089	1.863	2.968	2.860	3.064	2.394
ว[18]	3.158	3.084	2.972	2.865	2.469	2.678	2.955	2.853	2.811	3.089	1.863	2.968	2.860	3.064	2.394
ว[19]	0.331	0.598	2.709	2.582	1.610	2.661	2.751	0.919	2.810	0.670	1.304	1.086	2.720	0.834	0.217
ว[20]	2.827	2.466	0.153	0.603	0.859	0.011	0.304	1.935	0.001	2.419	0.659	1.882	0.140	2.231	2.177
ว[21]	1.255	0.962	0.438	0.949	0.707	0.341	0.213	0.538	0.444	0.444	5.797	0.422	0.160	0.203	0.157
ว[22]	0.834	0.068	5.431	0.228	0.973	1.467	1.442	0.583	0.217	0.476	4.728	0.635	0.083	0.456	0.465
ว[23]	0.839	0.068	5.431	0.228	0.973	1.467	1.442	0.583	0.217	0.476	4.728	0.635	0.083	0.456	0.465
ว[24]	0.247	0.052	0.133	0.183	0.417	0.296	0.102	0.074	0.150	0.232	0.782	0.281	0.264	9.176	0.219
ว[25]	0.147	0.037	0.133	0.183	0.417	0.296	0.102	0.074	0.150	0.232	0.782	0.281	0.264	9.176	0.219
ว[26]	0.106	0.039	0.099	0.149	0.235	0.277	0.083	0.048	0.146	0.212	0.228	0.277	0.187	0.070	0.086
ว[27]	0.103	0.037	0.099	0.149	0.235	0.277	0.083	0.048	0.146	0.212	0.228	0.277	0.187	0.070	0.086
ว[28]	0.103	0.037	0.099	0.149	0.235	0.277	0.083	0.048	0.146	0.212	0.228	0.277	0.187	0.070	0.086
ว[29]	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
ว[30]	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
ว[31]	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
ว[32]	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
ว[33]	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
ว[34]	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
ว[35]	1.312	3.412	2.974	3.855	5.066	5.105	4.877	3.989	5.369	3.871	1.648	3.379	5.302	2.971	5.917
ว[36]	21.460	21.460	19.943	21.234	20.931	20.931	20.946	35.123	21.138	21.132	23.965	30.657	21.110	30.671	20.259
ว[37]	0.123	0.471	6.178	0.296	0.514	1.835	2.344	0.920	0.925	1.375	1.644	3.666	1.005	0.337	0.380
ว[38]	0.542	0.475	1.883	0.817	0.248	0.709	1.494	0.423	1.256	1.243	2.684	0.473	1.083	0.084	0.071
Time															
Difference	0.578	0.626	0.509	0.623	0.551	0.574	0.616	0.610	0.643	0.581	-	0.587	0.626	0.608	0.586

ตารางที่ ๑-๒ (ต่อ)

v[1]	2.462	1.726	3.456	2.760	2.670	2.060	3.311	1.721	2.332	2.214	2.319	2.893	2.985	2.676	1.997
v[2]	1.921	1.443	1.995	2.431	3.319	1.917	1.449	1.653	1.875	1.801	2.069	2.617	0.931	2.210	1.978
v[3]	1.128	0.839	1.139	1.395	0.915	1.030	0.949	0.949	0.985	0.990	1.091	1.302	2.408	1.422	1.052
v[4]	0.257	0.394	0.746	0.898	0.275	0.743	0.659	0.944	0.667	0.768	0.859	1.219	0.495	0.944	0.888
v[5]	0.548	0.390	0.548	0.679	0.338	0.488	0.297	0.458	0.477	0.458	0.508	0.630	0.183	0.694	0.511
v[6]	0.379	0.429	0.591	0.715	0.377	0.548	0.350	0.491	0.559	0.518	0.385	0.672	0.245	0.728	0.540
v[7]	0.579	0.429	0.591	0.715	0.377	0.548	0.350	0.491	0.559	0.518	0.385	0.672	0.245	0.728	0.540
v[8]	0.526	0.429	0.591	0.715	0.377	0.548	0.350	0.491	0.559	0.518	0.385	0.672	0.245	0.728	0.540
v[9]	1.635	1.680	1.536	1.689	1.831	1.139	2.675	0.983	1.605	1.548	1.807	1.504	2.427	1.555	1.038
v[10]	3.798	2.441	4.038	3.660	3.960	2.747	5.828	2.906	3.664	3.186	3.800	3.618	4.997	3.781	2.594
v[11]	2.590	2.556	3.411	3.270	3.196	2.420	3.683	2.150	2.477	2.888	3.357	3.165	3.272	3.145	2.404
v[12]	0.057	0.537	0.887	0.348	0.440	0.244	0.055	0.354	0.281	0.570	0.362	0.417	0.113	0.390	0.340
v[13]	3.155	3.366	3.071	2.866	3.370	3.352	2.853	3.318	3.380	3.274	3.163	2.802	3.480	2.893	2.717
v[14]	0.347	2.112	2.112	0.421	1.790	1.813	2.265	1.977	2.582	0.937	1.381	0.437	1.912	1.669	1.386
v[15]	2.942	3.052	2.818	2.653	3.157	3.139	2.769	3.354	3.166	3.061	2.590	3.388	3.217	2.679	2.504
v[16]	2.835	2.946	2.737	2.541	3.043	3.010	2.660	3.196	3.028	2.977	2.796	2.469	3.059	2.570	2.398
v[17]	2.835	2.946	2.737	2.541	3.043	3.010	2.660	3.196	3.028	2.977	2.796	2.469	3.059	2.570	2.398
v[18]	2.835	2.946	2.737	2.541	3.043	3.010	2.660	3.196	3.028	2.977	2.796	2.469	3.059	2.570	2.398
v[19]	2.835	2.946	2.737	2.541	3.043	3.010	2.660	3.196	3.028	2.977	2.796	2.469	3.059	2.570	2.398
v[20]	0.048	1.069	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[21]	0.476	4.277	0.613	0.613	0.274	1.462	1.943	0.116	2.282	0.621	0.354	0.126	1.466	0.469	0.061
v[22]	0.476	4.277	0.613	0.613	0.274	1.462	1.943	0.116	2.282	0.621	0.354	0.126	1.466	0.469	0.061
v[23]	0.476	4.277	0.613	0.613	0.274	1.462	1.943	0.116	2.282	0.621	0.354	0.126	1.466	0.469	0.061
v[24]	0.094	0.083	0.073	0.101	0.117	0.120	0.227	0.072	0.077	0.168	0.192	0.265	0.169	0.135	0.268
v[25]	0.094	0.083	0.073	0.101	0.117	0.120	0.227	0.072	0.077	0.168	0.192	0.265	0.169	0.135	0.268
v[26]	0.059	0.018	0.009	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
v[27]	0.018	0.009	0.009	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
v[28]	0.018	0.009	0.009	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
v[29]	0.018	0.009	0.009	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
v[30]	0.036	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
v[31]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
v[32]	0.036	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
v[33]	0.036	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
v[34]	0.036	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
v[35]	4.003	4.188	5.121	3.481	5.059	0.072	0.071	4.815	3.755	4.689	5.139	5.235	1.603	5.519	4.551
v[36]	21.045	19.330	20.251	20.917	20.951	21.691	20.943	20.943	21.478	20.753	20.944	20.168	21.386	20.997	17.837
v[37]	0.437	0.804	0.914	0.544	0.783	1.602	0.395	2.431	0.704	1.373	0.707	0.211	0.758	0.195	1.068
ว[1]	1.230	1.473	0.351	0.312	0.854	1.441	0.010	2.035	1.570	1.064	0.656	0.225	0.926	0.420	0.974
Totals:	18	117	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Chi-square D	0.658	-	-	0.634	0.625	0.609	0.553	0.413	0.619	0.624	0.511	0.618	-	0.613	0.275

ตารางที่ ๑-3 (ต่อ)

๔[1]	2.695	2.587	2.666	1.976	2.199	2.196	2.308	0.899	1.477	1.573	2.274	2.275	2.202	2.390	2.474124
๔[2]	1.816	2.506	2.037	1.803	1.284	0.431	0.888	0.615	0.891	1.175	1.228	1.228	1.986	0.680	1.182236
๔[3]	0.987	1.517	1.205	1.060	0.670	0.148	0.516	0.350	0.461	0.649	0.947	0.947	1.058	0.218	0.627451
๔[4]	0.699	0.758	0.758	0.704	0.537	0.094	0.454	0.260	0.360	0.488	0.802	0.802	0.748	0.124	0.333236
๔[5]	0.477	0.739	0.587	0.501	0.317	0.054	0.228	0.149	0.215	0.314	0.579	0.579	0.531	0.091	0.291277
๔[6]	0.510	0.718	0.618	0.569	0.353	0.093	0.288	0.181	0.246	0.354	0.615	0.615	0.548	0.127	0.334183
๔[7]	0.510	0.718	0.618	0.569	0.353	0.093	0.288	0.181	0.246	0.354	0.615	0.615	0.548	0.127	0.334183
๔[8]	0.862	0.265	0.033	0.158	0.890	1.750	1.305	0.246	0.341	0.383	0.221	0.221	0.199	1.295	1.276484
๔[9]	1.830	1.763	1.219	1.300	1.541	1.879	1.802	0.579	0.793	1.032	1.396	1.396	1.238	1.794	1.846039
๔[10]	4.118	4.246	3.007	2.881	3.380	3.795	3.813	1.288	1.762	2.360	3.856	3.856	2.998	3.860	4.041747
๔[11]	3.793	3.648	2.880	2.571	2.471	2.939	3.094	1.079	1.471	1.930	2.946	2.946	2.560	3.284	3.126509
๔[12]	1.013	0.774	0.527	0.467	0.192	0.857	0.659	0.106	0.152	0.288	0.609	0.609	0.275	0.916	0.559857
๔[13]	3.997	3.445	3.714	3.126	4.066	4.041	3.526	4.477	4.305	4.146	3.658	3.658	3.746	3.836	3.451155
๔[14]	1.896	1.141	0.374	0.513	0.726	0.458	1.297	0.506	0.562	0.578	0.313	0.313	0.381	0.2732	0.346946
๔[15]	3.384	3.332	3.501	3.615	3.792	3.828	3.714	4.264	4.092	3.933	3.461	3.461	3.533	3.623	3.241958
๔[16]	3.275	3.116	3.395	3.477	3.681	3.713	3.579	4.155	3.985	3.816	3.332	3.332	3.420	3.511	3.12075
๔[17]	3.275	3.116	3.395	3.477	3.681	3.713	3.579	4.155	3.985	3.816	3.332	3.332	3.420	3.511	3.12075
๔[18]	3.275	3.116	3.395	3.477	3.681	3.713	3.579	4.155	3.985	3.816	3.332	3.332	3.420	3.511	3.12075
๔[19]	3.275	3.116	3.395	3.477	3.681	3.713	3.579	4.155	3.985	3.816	3.332	3.332	3.420	3.511	3.12075
๔[20]	1.635	0.834	0.076	0.025	0.432	0.151	0.869	0.261	0.298	0.270	0.006	0.006	0.075	0.627	0.605454
๔[21]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[22]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[23]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[24]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[25]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[26]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[27]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[28]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[29]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[30]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[31]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[32]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[33]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[34]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[35]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[36]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[37]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[38]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[39]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[40]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[41]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[42]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[43]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[44]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[45]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[46]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[47]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[48]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[49]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[50]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[51]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[52]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[53]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[54]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[55]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[56]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[57]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[58]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[59]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[60]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[61]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[62]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[63]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[64]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[65]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[66]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[67]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[68]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[69]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[70]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[71]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[72]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.270	0.245	0.245	0.268	0.239	0.738146
๔[73]	0.195	0.458	0.184	0.170	0.769	0.717	0.278	0.070	0.152	0.					

ตารางที่ จ-4 แสดงรายละเอียดแต่ละฟังก์ชัน จากการจำลองหาค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมฟังก์ชันทั้งหมดของโครงข่ายแบบตามหลักที่เพิ่มขึ้น Asx

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v[1]	2.332	2.386	2.450	2.584	2.797	2.145	1.874	2.001	2.138	2.142	2.585	2.182	2.048	2.559	2.393
v[2]	0.800	1.374	0.859	0.286	1.042	1.208	1.406	1.478	1.446	1.539	1.481	1.448	0.574	0.574	0.644
v[3]	0.466	0.760	0.455	0.048	0.382	0.208	0.569	0.811	1.123	0.882	0.641	0.732	0.201	0.252	0.306
v[4]	0.408	0.611	0.380	0.190	0.462	0.490	0.473	0.473	0.445	0.423	0.506	0.387	0.273	0.380	0.301
v[5]	0.187	0.356	0.294	0.002	0.275	0.338	0.234	0.334	0.445	0.624	0.302	0.449	0.075	0.108	0.137
v[6]	0.219	0.404	0.252	0.046	0.307	0.369	0.311	0.428	0.378	0.458	0.337	0.126	0.144	0.168	0.168
v[7]	0.219	0.404	0.252	0.046	0.307	0.369	0.311	0.428	0.378	0.458	0.337	0.126	0.144	0.168	0.168
v[8]	1.417	0.996	1.575	1.962	1.157	1.962	0.811	0.538	0.922	0.508	1.397	0.719	1.509	1.724	1.724
v[9]	1.804	1.738	2.012	2.012	1.760	1.610	1.560	1.305	1.381	1.451	2.014	1.433	1.691	2.003	2.010
v[10]	3.715	3.812	4.207	4.007	3.656	3.539	2.960	3.023	2.387	2.307	4.312	3.185	3.437	4.095	4.138
v[11]	3.521	3.842	3.676	3.676	3.364	3.245	2.770	2.647	2.955	2.666	3.918	3.902	3.266	3.822	3.807
v[12]	1.115	1.060	1.287	1.295	0.974	1.028	0.781	0.718	1.251	0.478	1.275	0.782	1.106	1.383	1.352
v[13]	3.330	3.235	3.349	3.466	3.272	3.232	3.278	3.135	3.075	2.099	3.275	3.180	3.441	3.429	3.401
v[14]	1.403	0.906	1.647	2.181	1.240	1.979	1.220	0.765	0.204	0.713	1.043	0.927	0.399	1.357	1.517
v[15]	3.117	3.136	3.253	3.253	3.059	3.019	3.064	2.922	2.882	2.886	3.082	2.867	3.228	3.216	3.187
v[16]	3.008	2.897	3.012	3.134	2.951	2.912	2.936	2.801	2.732	2.776	2.953	2.857	3.110	3.105	3.080
v[17]	3.008	2.897	3.012	3.134	2.951	2.912	2.936	2.801	2.732	2.776	2.953	2.857	3.110	3.105	3.080
v[18]	3.885	3.279	3.218	3.614	3.645	3.564	4.152	3.900	3.342	3.850	2.594	3.666	3.982	3.356	3.339
v[19]	1.846	2.308	1.681	1.265	2.011	1.283	2.036	2.349	2.756	2.366	2.191	2.332	3.021	2.521	1.862
v[20]	1.639	0.971	1.537	2.150	1.634	2.282	2.115	1.631	0.792	1.464	0.786	1.434	0.861	1.315	1.477
v[21]	0.114	0.120	0.225	0.192	0.272	0.155	0.060	0.238	0.193	0.472	0.235	0.314	0.032	0.114	0.192
v[22]	0.114	0.120	0.225	0.192	0.272	0.155	0.060	0.238	0.193	0.472	0.235	0.314	0.032	0.114	0.192
v[23]	0.114	0.120	0.225	0.192	0.272	0.155	0.060	0.238	0.193	0.472	0.235	0.314	0.032	0.114	0.192
v[24]	0.107	0.125	0.047	0.063	0.073	0.079	0.080	0.074	0.058	0.385	0.087	0.122	0.065	0.055	0.031
v[25]	0.107	0.125	0.047	0.063	0.073	0.079	0.080	0.074	0.058	0.385	0.087	0.122	0.065	0.055	0.031
v[26]	0.049	0.030	0.036	0.038	0.022	0.033	0.036	0.036	0.033	0.035	0.063	0.119	0.050	0.036	0.046
v[27]	0.044	0.019	0.029	0.026	0.001	0.005	0.025	0.055	0.003	0.019	0.019	0.067	0.345	0.006	0.019
v[28]	0.044	0.019	0.029	0.026	0.001	0.005	0.025	0.055	0.003	0.019	0.019	0.067	0.345	0.006	0.019
v[29]	0.044	0.019	0.029	0.026	0.001	0.005	0.025	0.055	0.003	0.019	0.019	0.067	0.345	0.006	0.019
v[30]	0.044	0.019	0.029	0.026	0.001	0.005	0.025	0.055	0.003	0.019	0.019	0.067	0.345	0.006	0.019
v[31]	0.086	0.003	0.023	0.048	0.001	0.010	0.007	0.084	0.006	0.022	0.034	0.128	0.049	0.042	0.038
v[32]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[33]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[34]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[35]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[36]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[37]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[38]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[39]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[40]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[41]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[42]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[43]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[44]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[45]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[46]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[47]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[48]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[49]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[50]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[51]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[52]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[53]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[54]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[55]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[56]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[57]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[58]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[59]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[60]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[61]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[62]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[63]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[64]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[65]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[66]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[67]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[68]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[69]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[70]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[71]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[72]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[73]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[74]	0.001	0.017	0.017	0.013	0.001	0.000	0.022	0.018	0.004	0.003	0.002	0.003	0.021	0.004	0.000
v[75]	0.001														

ตารางที่ จ-4 (ต่อ)

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Time	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Observed	6.443	6.653	6.443	6.646	6.654	6.649	6.647	6.649	6.643	6.674	6.638	-	6.639	6.666	-
v[1]	2.493	2.465	2.511	1.891	2.225	2.127	2.547	1.978	2.351	1.927	1.957	2.695	2.897	2.117	2.232
v[2]	2.313	0.869	0.846	1.660	0.585	0.446	0.798	1.512	1.333	0.760	1.330	1.634	1.333	0.403	1.201
v[3]	1.243	0.458	0.362	0.920	0.260	0.417	0.417	0.699	0.575	0.315	0.756	0.815	0.942	0.148	0.653
v[4]	0.848	0.406	0.608	0.679	0.274	0.395	0.366	0.699	0.471	0.238	0.559	0.519	0.671	0.299	0.489
v[5]	0.603	0.210	0.165	0.444	0.112	0.182	0.184	0.427	0.252	0.138	0.361	0.389	0.426	0.054	0.308
v[6]	0.641	0.246	0.197	0.462	0.168	0.258	0.233	0.670	0.325	0.178	0.394	0.426	0.316	0.094	0.345
v[7]	0.641	0.248	0.197	0.462	0.169	0.258	0.233	0.670	0.325	0.178	0.394	0.426	0.316	0.094	0.345
v[8]	0.164	1.523	1.647	0.215	1.624	1.264	1.734	0.450	1.248	1.152	0.592	0.746	0.448	1.696	1.109
v[9]	1.386	1.960	1.591	1.126	1.866	1.693	2.132	1.328	1.804	1.448	1.329	1.542	1.371	1.828	1.743
v[10]	3.358	4.110	4.127	2.680	3.824	3.354	4.428	3.964	3.841	3.015	3.000	3.423	3.146	3.690	3.775
v[11]	3.093	3.776	3.784	2.485	3.571	3.409	3.868	2.540	3.356	2.830	2.793	3.225	2.714	3.266	3.490
v[12]	0.511	1.266	1.207	0.515	1.244	1.132	1.213	0.465	0.855	0.814	0.762	1.086	0.429	1.001	1.082
v[13]	2.853	3.349	3.347	3.108	3.411	3.343	3.343	3.114	3.243	3.352	3.191	3.225	3.113	3.426	3.351
v[14]	0.302	1.556	1.523	0.594	1.676	1.467	1.672	0.644	1.119	0.906	1.481	1.278	0.580	0.753	1.462
v[15]	2.760	3.136	3.134	2.895	3.198	3.152	3.130	2.900	3.030	3.139	2.978	3.011	2.960	3.213	3.038
v[16]	2.623	3.022	3.025	2.784	3.085	3.005	3.005	2.780	2.904	3.023	2.868	3.898	2.735	3.098	2.574
v[17]	2.623	3.022	3.025	2.784	3.085	3.005	3.005	2.780	2.904	3.023	2.868	3.898	2.735	3.098	2.574
v[18]	3.166	3.273	3.256	4.860	3.601	3.705	3.181	4.045	3.655	4.227	3.953	3.575	3.916	4.000	3.362
v[19]	2.630	1.772	1.803	2.494	1.712	1.877	1.850	2.448	2.123	3.335	1.759	1.976	2.512	2.653	1.769
v[20]	6.537	1.501	1.453	1.587	1.889	1.828	1.331	1.596	1.432	0.992	2.175	1.609	1.403	1.317	1.394
v[21]	0.125	0.194	0.204	0.056	0.114	0.005	0.421	0.385	0.346	0.046	0.066	0.048	0.295	0.345	0.145
v[22]	0.125	0.194	0.204	0.056	0.114	0.005	0.421	0.385	0.346	0.046	0.066	0.048	0.295	0.345	0.145
v[23]	0.125	0.194	0.204	0.056	0.114	0.005	0.421	0.385	0.346	0.046	0.066	0.048	0.295	0.345	0.145
v[24]	0.125	0.194	0.204	0.056	0.114	0.005	0.421	0.385	0.346	0.046	0.066	0.048	0.295	0.345	0.145
v[25]	0.075	0.075	0.130	0.115	0.044	0.055	0.052	0.037	0.067	0.079	0.083	0.011	0.073	0.035	0.062
v[26]	0.075	0.075	0.130	0.115	0.044	0.055	0.052	0.037	0.067	0.079	0.083	0.011	0.073	0.035	0.062
v[27]	0.047	0.047	0.061	0.046	0.031	0.045	0.047	0.025	0.062	0.074	0.060	0.011	0.073	0.035	0.062
v[28]	0.010	0.010	0.040	0.030	0.031	0.042	0.025	0.016	0.060	0.062	0.020	0.009	0.069	0.021	0.038
v[29]	0.003	0.003	0.036	0.026	0.025	0.007	0.007	0.003	0.021	0.033	0.018	-0.001	0.011	0.012	0.039
v[30]	0.006	0.006	0.077	0.032	0.050	0.065	0.015	0.006	0.041	0.107	0.035	-0.001	0.021	0.004	0.039
v[31]	0.009	0.007	0.001	0.094	0.006	0.040	0.018	0.031	0.039	0.009	0.002	0.006	0.009	0.009	0.006
v[32]	0.029	0.029	0.069	0.066	0.013	0.010	0.005	0.031	0.005	0.064	0.033	0.000	0.003	0.020	0.027
v[33]	0.037	0.037	0.021	0.019	0.000	0.003	0.022	0.009	0.002	0.012	0.030	0.005	0.001	0.014	-0.359
v[34]	0.003	0.003	0.039	0.025	0.025	0.003	0.007	0.003	0.021	0.033	0.017	0.002	0.011	0.012	0.039
v[35]	2.101	0.003	0.039	0.025	0.025	0.003	0.007	0.003	0.021	0.033	0.017	0.002	0.011	0.012	0.039
v[36]	5.545	2.699	2.869	4.430	2.560	3.073	2.592	3.877	3.121	2.936	3.908	3.972	4.960	3.960	3.816
v[37]	21.034	20.412	20.433	20.447	20.146	20.172	20.434	20.456	20.421	20.135	20.238	20.411	20.505	20.087	20.455
v[38]	0.236	0.234	0.213	1.339	0.359	0.743	1.219	1.207	0.664	1.347	1.168	5.680	1.224	0.945	0.480
v[39]	0.543	0.251	0.231	1.294	0.516	0.700	1.176	1.264	0.651	1.204	1.165	0.637	1.181	0.903	0.038

ตารางที่ จ-5 ผลการจำลองหาค่าสัดส่วนพลังงานต่อผลรวมฟลักซ์ทั้งหมดของโครงข่ายเมตามอริกฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้น Threonine

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
จ[1]	0.844	0.076	0.861	2.599	2.585	1.145	0.864	0.864	1.105	1.446	0.864	0.895	3.367	1.051	1.607
จ[2]	0.296	0.242	0.886	1.465	0.886	0.538	0.462	0.286	1.183	0.598	0.211	0.276	1.242	0.585	0.401
จ[3]	0.085	0.056	0.196	0.789	0.992	0.229	0.185	0.093	0.582	0.245	0.029	0.026	0.916	0.575	0.177
จ[4]	0.187	0.168	0.267	0.658	0.410	0.270	0.243	0.176	0.241	0.330	0.189	0.204	0.608	0.401	0.253
จ[5]	0.023	0.001	0.079	0.377	0.181	0.084	0.072	0.022	0.275	0.115	0.001	0.000	0.439	0.272	0.073
จ[6]	0.044	0.036	0.117	0.412	0.212	0.135	0.123	0.064	0.307	0.150	0.038	0.035	0.479	0.301	0.104
จ[7]	0.064	0.056	0.117	0.412	0.212	0.135	0.123	0.064	0.307	0.150	0.038	0.035	0.479	0.301	0.104
จ[8]	0.053	0.041	0.139	1.118	1.463	0.591	0.388	0.564	0.107	0.833	0.628	0.694	1.790	0.050	1.190
จ[9]	0.622	0.028	0.536	1.838	1.837	0.801	0.563	0.638	0.871	1.080	0.648	0.710	2.882	0.603	1.348
จ[10]	1.240	1.258	1.132	4.134	3.835	1.877	1.879	1.284	1.297	2.255	1.297	1.401	5.796	1.482	2.749
จ[11]	1.007	0.999	0.999	3.870	3.836	1.374	1.001	0.997	1.360	1.603	1.059	1.233	3.378	1.302	2.576
จ[12]	0.081	0.081	0.043	1.201	1.199	0.137	0.025	0.036	0.001	0.017	0.112	0.159	0.141	0.084	0.897
จ[13]	0.322	0.226	0.310	3.207	2.971	0.889	0.296	0.207	0.712	0.930	0.382	0.561	2.894	0.541	1.910
จ[14]	0.628	0.283	0.352	0.440	2.597	1.976	1.598	0.408	1.755	3.325	1.791	1.990	0.658	3.227	3.093
จ[15]	4.352	4.152	4.115	3.105	3.105	3.877	3.367	4.137	3.899	3.377	3.855	4.086	2.690	3.940	3.457
จ[16]	4.245	4.041	3.998	2.899	2.998	3.719	3.240	4.022	3.790	3.866	3.722	3.975	2.374	3.834	3.349
จ[17]	4.245	4.041	3.998	2.899	2.998	3.719	3.240	4.022	3.790	3.866	3.722	3.975	2.374	3.834	3.349
จ[18]	4.245	4.041	3.998	2.899	2.998	3.719	3.240	4.022	3.790	3.866	3.722	3.975	2.374	3.834	3.349
จ[19]	4.126	3.961	3.943	2.762	2.760	2.093	1.961	3.921	2.386	3.365	2.237	2.288	2.225	1.905	0.556
จ[20]	0.118	0.080	0.085	0.137	2.296	1.666	1.279	0.202	1.404	0.021	0.486	1.887	0.350	1.929	2.793
จ[21]	0.102	0.119	0.003	0.116	0.059	0.163	0.099	0.158	0.078	0.512	0.299	0.028	2.081	0.120	0.033
จ[22]	4.236	4.138	4.019	0.132	0.059	0.163	0.099	0.158	0.078	0.512	0.299	0.028	2.081	0.120	0.033
จ[23]	0.041	0.051	0.068	0.165	0.117	0.053	0.099	0.031	0.153	0.099	0.050	0.087	2.096	3.732	1.793
จ[24]	0.041	0.051	0.068	0.165	0.117	0.053	0.099	0.031	0.153	0.099	0.050	0.087	2.096	3.732	1.793
จ[25]	0.025	0.051	0.035	0.034	0.097	0.035	0.037	0.021	0.262	0.025	0.007	0.087	0.046	0.018	0.017
จ[26]	0.025	0.051	0.035	0.034	0.097	0.035	0.037	0.021	0.262	0.025	0.007	0.087	0.046	0.018	0.017
จ[27]	0.024	0.023	0.019	0.013	0.042	0.030	0.002	0.015	0.031	0.001	0.007	0.022	0.018	0.004	0.012
จ[28]	0.024	0.023	0.019	0.013	0.042	0.030	0.002	0.015	0.031	0.001	0.007	0.022	0.018	0.004	0.012
จ[29]	0.024	0.023	0.019	0.013	0.042	0.030	0.002	0.015	0.031	0.001	0.007	0.022	0.018	0.004	0.012
จ[30]	0.021	0.021	0.023	0.018	0.084	0.040	0.024	0.024	0.039	0.002	0.003	0.037	0.018	0.011	0.022
จ[31]	0.010	0.004	0.007	0.004	0.009	0.010	0.008	0.008	0.004	0.004	0.006	0.004	0.009	0.001	0.001
จ[32]	0.016	0.006	0.003	0.013	0.009	0.010	0.008	0.010	0.084	0.004	0.006	0.004	0.009	0.001	0.001
จ[33]	0.004	0.008	0.016	0.021	0.035	0.003	0.003	0.006	0.038	0.009	0.008	0.005	0.020	0.014	0.001
จ[34]	0.010	0.019	0.012	0.009	0.042	0.020	0.012	0.007	0.029	0.001	0.008	0.018	0.009	0.005	0.001
จ[35]	3.166	2.963	2.378	4.028	3.110	3.102	2.551	2.878	4.437	2.921	2.466	2.900	2.605	4.146	2.585
จ[36]	22.352	21.188	21.256	20.754	18.890	20.754	17.504	21.148	22.165	22.029	19.504	21.088	20.652	21.280	19.472
จ[37]	4.278	4.063	4.040	0.040	0.371	3.425	3.308	4.085	3.424	3.285	3.690	3.743	0.093	3.636	1.784
จ[38]	4.254	4.099	4.016	0.016	0.347	3.401	3.284	4.044	3.400	3.281	3.646	3.739	0.099	3.612	1.760
Total	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

ตารางที่ ข-5 (ต่อ)

	ว[1]	2.34	0.864	1.118	1.139	1.169	1.166	0.556	0.506	1.097	0.854	3.106	0.363	1.251	0.820
v[2]	1.555	0.460	0.453	0.334	0.458	0.464	0.429	0.514	0.370	0.466	0.241	0.866	0.482	0.681	0.244
v[3]	0.901	0.152	0.070	0.422	0.171	0.110	0.147	0.171	0.136	0.135	0.052	0.643	0.129	0.255	0.038
v[4]	0.434	0.263	0.236	0.316	0.417	0.220	0.268	0.265	0.202	0.126	0.157	0.419	0.233	0.258	0.166
v[5]	0.077	0.060	0.017	0.182	0.017	0.043	0.040	0.070	0.048	0.043	0.007	0.181	0.061	0.125	0.203
v[6]	0.449	0.114	0.092	0.032	0.220	0.077	0.104	0.101	0.079	0.089	0.045	0.352	0.098	0.160	0.036
v[7]	0.698	0.114	0.092	0.042	0.230	0.077	0.104	0.101	0.079	0.089	0.045	0.352	0.098	0.160	0.036
v[8]	0.614	0.386	0.782	0.649	0.788	0.690	0.721	0.477	0.521	0.606	0.666	2.055	0.418	0.554	0.540
v[9]	1.696	0.561	0.782	0.840	0.929	0.760	0.849	0.828	0.628	0.729	0.644	2.298	0.538	0.821	0.559
v[10]	3.805	1.379	1.604	1.678	2.075	1.575	1.722	1.208	1.385	1.485	1.270	4.937	1.157	1.746	1.102
v[11]	3.452	0.978	1.265	1.470	1.431	1.431	1.654	1.054	1.131	1.269	1.199	2.377	0.987	1.432	0.957
v[12]	0.288	0.029	0.072	0.080	0.185	0.166	0.144	0.025	0.154	0.070	0.149	0.696	0.038	0.100	0.081
v[13]	2.776	0.300	0.596	0.635	0.990	0.741	0.716	0.388	0.467	0.574	0.420	5.032	0.310	0.757	0.237
v[14]	2.479	0.339	1.086	0.978	0.471	2.007	2.059	0.464	1.824	0.683	1.790	0.884	0.340	2.076	0.445
v[15]	2.911	4.335	3.978	4.006	3.084	3.909	4.088	4.273	3.771	4.154	3.777	2.868	4.344	3.984	3.952
v[16]	2.578	4.220	3.869	3.894	2.866	3.769	3.950	4.166	3.664	4.031	3.663	2.751	4.231	3.872	3.883
v[17]	2.678	4.230	3.869	3.894	2.866	3.769	3.950	4.166	3.664	4.031	3.663	2.751	4.231	3.872	3.883
v[18]	2.678	4.230	3.869	3.894	2.866	3.769	3.950	4.166	3.664	4.031	3.663	2.751	4.231	3.872	3.883
v[19]	2.678	4.230	3.869	3.894	2.866	3.769	3.950	4.166	3.664	4.031	3.663	2.751	4.231	3.872	3.883
v[20]	2.125	0.933	1.685	0.675	1.805	1.695	1.759	0.164	1.525	0.768	1.483	0.274	0.035	1.771	0.143
v[21]	0.214	0.062	0.199	0.232	0.122	0.094	0.140	0.015	0.014	0.074	0.032	1.040	0.031	0.375	0.006
v[22]	0.441	4.308	1.794	3.813	2.229	3.385	3.716	4.114	3.532	3.867	3.601	1.090	4.279	3.613	3.924
v[23]	0.066	0.068	0.068	0.102	0.105	0.092	0.082	0.082	0.042	0.085	0.040	0.155	0.054	0.116	0.051
v[24]	0.066	0.068	0.068	0.102	0.105	0.092	0.082	0.082	0.042	0.085	0.040	0.155	0.054	0.116	0.051
v[25]	0.037	0.062	0.061	0.083	0.083	0.089	0.064	0.076	0.033	0.079	0.029	0.147	0.031	0.054	0.047
v[26]	0.024	0.069	0.072	0.019	0.017	0.064	0.038	0.040	0.021	0.054	0.018	0.093	0.029	0.024	0.021
v[27]	0.024	0.069	0.072	0.019	0.017	0.064	0.038	0.040	0.021	0.054	0.018	0.093	0.029	0.024	0.021
v[28]	0.015	0.003	0.020	0.015	0.009	0.042	0.007	0.039	0.021	0.039	0.01	0.093	0.029	0.019	0.019
v[29]	0.037	0.006	0.039	0.018	0.018	0.104	0.014	0.078	0.041	0.077	0.022	0.186	0.039	0.038	0.038
v[30]	0.005	0.007	0.007	0.004	0.008	0.012	0.031	0.001	0.000	0.006	0.007	0.010	0.006	0.005	0.000
v[31]	0.029	0.006	0.007	0.014	0.051	0.003	0.019	0.006	0.008	0.006	0.002	0.008	0.023	0.042	0.004
v[32]	0.013	0.022	0.036	0.069	0.087	0.024	0.026	0.016	0.012	0.025	0.021	0.054	0.006	0.020	0.025
v[33]	0.013	0.022	0.036	0.069	0.087	0.024	0.026	0.016	0.012	0.025	0.021	0.054	0.006	0.020	0.025
v[34]	0.019	0.003	0.020	0.015	0.009	0.042	0.007	0.039	0.021	0.039	0.01	0.093	0.029	0.019	0.019
v[35]	3.993	2.890	2.716	2.424	3.134	3.036	3.629	3.843	3.302	3.302	2.531	2.014	3.496	3.431	2.805
v[36]	19.516	22.146	21.111	21.075	17.839	20.742	21.556	22.334	19.532	21.843	19.270	20.006	22.378	21.693	20.225
v[37]	0.251	4.230	3.619	3.607	3.331	3.404	3.629	4.123	3.542	3.817	3.594	0.004	4.271	3.464	3.940
v[38]	0.251	4.230	3.619	3.607	3.331	3.404	3.629	4.123	3.542	3.817	3.594	0.004	4.271	3.464	3.940
Time	16	117	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Overall	0.614	0.878	0.621	0.645	0.638	0.619	0.623	0.609	0.629	0.638	0.627	0.628	0.679	0.620	0.668

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นางสาวศราวดี ทรัพย์อุดมโชค
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์ความสมดุลของฟลักซ์คาร์บอนในแบบจำลองแบบที่เรียโดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

เกิดวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2523 ที่อยู่ปัจจุบัน เลขที่ 46/8 หมู่ที่ 1 แขวงบางไผ่ เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160 เป็นคนที่สามของนายสุนทร ทรัพย์อุดมโชค และนางศรีสุวรรณ ทรัพย์อุดมโชค
 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนสตรีวัดอัมพวันสวรรค์ ปี 2538 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ปี 2541 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปี พ.ศ.2545