สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์และการจำลองของระบบพหุเชิงซ้อน

MATHEMATICAL MODELS AND SIMULATION FOR MULTIPLE COMPLEX SYSTEMS

T051650

สุธิตา มณีชัย

SUTITAR MANEECHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2547

ISBN 974-9708-26-1

QW
G785m
2547

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 51650/
วัน,เดือน,ปี 26 ก.ค. 2547

b. 11405740 /
i.....

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATHEMATICAL MODELS AND SIMULATION FOR MULTIPLE COMPLEX SYSTEMS

SUTITAR MANEECHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED MATHEMATICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

ISBN 974-9708-26-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวแบบทางคณิตศาสตร์และการจำลองของระบบพหุเชิงซ้อน
นักศึกษา	นางสาวสุธิตา มณีชัย
รหัสประจำตัว	45064103
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	คณิตศาสตร์ประยุกต์
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ฉัฐไชย์ ลีนาวงศ์

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับจำนวนสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันทั้งจากภายในและภายนอกของแต่ละระบบย่อย ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความรู้ทางด้านการหาค่าเหมาะสมเชิงการจัดเพื่อวิเคราะห์ลักษณะปัญหาของระบบพหุเชิงซ้อน อันจะเป็นแนวทางในการหาขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลย และใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลลัพธ์ที่เกี่ยวกับค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบในกรณีที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Mathematical Models and Simulation for Multiple Complex Systems
Student	Miss Sutitar Maneechai
Student ID.	45064103
Degree	Master of Science
Programme	Applied Mathematics
Year	2004
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Chartchai Leenawong

ABSTRACT

This thesis proposes mathematical models for studying multiple complex systems with a common goal. The performance of a multiple complex system is affected by internal and external factors such as interactions among the components both from inside and outside each subsystem. Combinatorial optimization methodology is used to study the behavior of these complex systems, which leads to a heuristic for finding relatively good solutions. Also, through computer simulation, results about the expected performances at optimality for various cases of the model are provided.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าต่องานวิจัยนี้จาก ผศ.ดร.ฉัฐไชย์ ลีนาวงศ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ นายพีระศักดิ์ อินทรไพบูลย์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการพิสูจน์ทฤษฎีบทและคำแนะนำเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นางสาวสิริรัตน์ ขันติดิลกวงษา ที่ช่วยตรวจทานและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิด ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือมาตลอด

ขอขอบคุณครู-อาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน ทั้งทางด้านวิชาการและการดำรงชีวิตแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกท่านที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ และ ให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้ทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท และทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุธิตา มณีชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการวิจัย 2

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ 3

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 บทนิยาม 4

2.2 ทฤษฎีบท 7

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9

บทที่ 3 ตัวแบบของระบบพหุเชิงซ้อนและการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ 13

3.1 ลักษณะของตัวแบบ NKC 13

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบ NKC 16

3.2.1 ตัวแบบ NKC เป็น COP 16

3.2.2 ตัวแบบ NKC $\in \mathcal{NP}$-complete 17

3.3 การวิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน 25

บทที่ 4 ขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลยและการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 28

4.1 ขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1 ขั้นตอนวิธีฮิวริสติค 28
4.1.2 ตัวอย่างการใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติค 29
4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับตัวแบบ NKC 34

บทที่ 5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ตัวแบบระบบพหุเชิงซ้อน 38

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 55
6.1 สรุปผลการวิจัย 55
6.2 ข้อเสนอแนะ 56

เอกสารอ้างอิง 58

ภาคผนวก 60

ประวัติผู้เขียน 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

5.1 แสดงตัวอย่างบุคคลที่สามารถทำงานได้ในแต่ละตำแหน่งของแต่ละแผนก ในองค์กรแบบสองแผนก 38

5.2 แสดงค่าประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละบุคคลในตารางที่ 5.1 39

5.3 แสดงลักษณะของระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ของระบบพหุเชิงซ้อน ในตัวแบบ NKC สำหรับองค์กรตามตาราง 5.1 43

5.4 ลักษณะการจัดหมู่ของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันและค่าประสิทธิผลของระบบใน ตัวแบบ NKC สำหรับองค์กรในตารางที่ 5.1 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงขั้นตอนวิธีการลดทอนปัญหา Y ไปยังปัญหา X 5

2.2 แสดงการจัดหมู่ของสมาชิกจำนวน K+1 ตัว ซึ่งสัมพันธ์กับค่าประสิทธิผลประกอบที่ i ของระบบเชิงซ้อนในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน.....10

2.3 แสดงตัวอย่างระบบเชิงซ้อนในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน กรณี N = 3 และ K = 2 และวิธีการคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบ.....10

2.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเต็ม K และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผล ของระบบเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NK กรณี N = 20 โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง 12

3.1 แสดงการจัดหมู่ของสมาชิกจำนวน K+C+1 ตัว ซึ่งสัมพันธ์กับ ค่าประสิทธิผลประกอบที่ i ของระบบย่อยที่ 1 15

3.2 แสดงตัวอย่างระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC กรณี N = 3, K = 2 และ C = 2 และวิธีการคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบ 16

3.3 แสดงตัวอย่างของตัวแบบ NKC ในรูปของกราฟสองส่วนแบบบริบูรณ์ G = (V,E) เมื่อ $V = V' \cup V''$ และ $|V'| = |V''| = 4$ 19

3.4 แสดงแผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีการตรวจสอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ของตัวแบบ NKC 20

3.5 แสดงขั้นตอนวิธีการลดทอนปัญหาจากตัวแบบ NK ไปยังตัวแบบ NKC 21

4.1 แสดงระบบพหุเชิงซ้อนและค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนทั้งหมด ในตัวแบบ NKC กรณี N = 2 30

4.2 แสดงแผนผังขั้นตอนวิธีฮิวริสติคสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC ในรูปที่ 4.1 ที่ระบบตั้งต้นแตกต่างกัน 33

4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม K และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผล ของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ C = 0 โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง 34

4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม C และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผล ของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ K = 0 โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม K และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผล ของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ C ∈ {0, 1, 2, 3, 10, 16, 19} โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง 36

4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม C และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผล ของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ K ∈ {0, 1, 3, 10, 14, 16, 19} โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง 36

5.1 แสดงการแปลงส่วนประกอบขององค์กรตามตาราง 5.1 ไปยังส่วนประกอบของระบบ พหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC 42

5.2 แสดงการแปลงค่าประสิทธิผลขององค์กรไปยังค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน 44

5.3 แสดงขั้นตอนวิธีฮิวริสติคเพื่อหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC สำหรับตัวอย่างองค์กรในตาราง 5.1 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในการศึกษาเรื่องระบบเชิงซ้อน (Complex System) มีนักวิจัยหลายท่านคิดค้นและพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายระบบดังกล่าว เพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงและแก้ไขจุดบกพร่องของระบบ อาทิเช่น ตัวแบบบล็อก [1], ตัวแบบ NK [2] และตัวแบบอื่น ๆ ที่พัฒนามาจากตัวแบบ NK [3] เช่น ตัวแบบ NK/W, ตัวแบบ NK/A และ ตัวแบบ NK/N(μ,σ) เป็นต้น จากการศึกษาค้นคว้า ผู้วิจัยพบว่ามีนักวิจัยหลายท่านนำตัวแบบ NK ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในหลายสาขาวิชา เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวกับวิวัฒนาการของโครโมโซมในสาขาวิชาชีววิทยา [2][4-6], งานวิจัยที่เกี่ยวกับสปินกลาสในสาขาวิชาฟิสิกส์ [7] และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างขององค์กรทางด้านธุรกิจ [8][9] เป็นต้น ซึ่งระบบที่อยู่ในงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นล้วนเป็นระบบเชิงซ้อนทั้งสิ้น แต่ระบบที่พบเห็นได้โดยทั่วไปมิได้มีเพียงระบบเชิงซ้อนเท่านั้น บางระบบมีลักษณะเป็นระบบพหุเชิงซ้อน (Multiple Complex Systems) อันเป็นระบบที่ประกอบขึ้นจากหลาย ๆ ระบบเชิงซ้อน ตัวอย่างของระบบพหุเชิงซ้อนที่เห็นได้ชัดเจน คือ ระบบความสัมพันธ์ระหว่างเหยื่อกับผู้ล่าในระบบนิเวศ ซึ่งเป็นระบบพหุเชิงซ้อนแบบต่างเป้าหมาย (Multiple Complex Systems with Different Goals) และระบบการทำงานขององค์กรแบบหลายแผนก ซึ่งเป็นระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม (Multiple Complex Systems with a Common Goal)

ในปี ค.ศ. 1991 นักวิจัยชื่อ คอฟฟ์แมน (Kauffman S.A.) และ จอห์นเซน (Johnsen S.) ได้เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจากตัวแบบ NK เพื่ออธิบายความสามารถในการดำรงพันธุ์ของเหยื่อและผู้ล่าในระบบนิเวศ [10] ตัวแบบดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า ในขณะที่เหยื่อมีจำนวนน้อย ผู้ล่าต้องมีจำนวนน้อยด้วย จึงจะทำให้สิ่งมีชีวิตทั้งสองสายพันธุ์มีความสามารถในการดำรงพันธุ์ดีที่สุด ในทางกลับกัน ถ้าผู้ล่ามีจำนวนมาก เหยื่อก็จะต้องมีจำนวนมากด้วยเช่นกัน สำหรับกรณีที่เหยื่อมีจำนวนมาก ในขณะที่ผู้ล่ามีจำนวนน้อย ภาวะเช่นนี้อาจก่อให้เกิดการเสียสมดุลของระบบนิเวศอันเนื่องมาจากเหยื่อมีจำนวนมากเกินไป แต่ถ้ามีผู้ล่าจำนวนมาก ในขณะที่เหยื่อมีจำนวนน้อย ก็อาจก่อให้เกิดภาวะการสูญพันธุ์ทั้งของเหยื่อและผู้ล่าได้ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นเหตุจูงใจให้ผู้วิจัยหันมาศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับตัวแบบดังกล่าว และคิดค้นสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจากตัวแบบ NK สำหรับศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม ซึ่งทั้งคอฟฟ์แมนและจอห์นเซนยังไม่ได้กล่าวถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม (Multiple Complex Systems with a Common Goal) ที่อยู่ในรูปแบบระบบพหุเชิงซ้อนอย่างง่าย (Simple Multiple Complex Systems) และสามารถนำไปใช้เป็นตัวแบบพื้นฐานสำหรับการศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนในรูปแบบที่ซับซ้อนและใกล้เคียงกับระบบพหุเชิงซ้อนที่พบเห็นได้ในความเป็นจริงมากขึ้นได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจากตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน (Kauffman's NK model) [5] สำหรับศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วมที่อยู่ในรูปแบบระบบพหุเชิงซ้อนอย่างง่าย โดยกำหนดให้ระบบเชิงซ้อนที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อนนั้นมีขนาด (Systems Size) เท่ากัน ลักษณะและเงื่อนไขของแต่ละระบบเชิงซ้อนในตัวแบบของในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบเชิงซ้อนในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ทางด้านการหาค่าเหมาะสมเชิงการจัด (Combinatorial Optimization) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบอันจะเป็นประโยชน์ต่อการหาขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลย พร้อมทั้งใช้ความรู้ทางด้านการวิเคราะห์ค่าคาดหวังเพื่อวิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยในกรณีสุดขีด (Extreme Case) ของตัวแบบอีกด้วย ในส่วนของการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามเงื่อนไขและขั้นตอนวิธีที่ใช้หาผลเฉลยของตัวแบบเพื่อศึกษาผลที่ได้จากขั้นตอนวิธีดังกล่าว

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นที่ 1 ค้นคว้าและศึกษาเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ขั้นที่ 2 กำหนดเงื่อนไขของระบบพหุเชิงซ้อน

ขั้นที่ 3 สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม

ขั้นที่ 4 วิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบ

ขั้นที่ 5 วิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน

ขั้นที่ 6 หาขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลย

ขั้นที่ 7 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองตัวแบบ

ขั้นที่ 8 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองตัวแบบ

ขั้นที่ 9 เรียบเรียงและเขียนวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

ระบบเชิงซ้อน (Complex System) หมายถึง ระบบที่สมาชิกภายในระบบที่ผลกระทบต่อกัน

ระบบพหุเชิงซ้อน (Multiple Complex Systems) หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนมากกว่า 1 ระบบ โดยสมาชิกภายในระบบเชิงซ้อนหนึ่งนอกจากจะมีความสัมพันธ์กับสมาชิกอื่น ๆ ภายในระบบเดียวกันแล้ว สมาชิกดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์กับสมาชิกในระบบเชิงซ้อนอื่น ๆ อีกด้วย

ระบบพหุเชิงซ้อนอย่างง่าย (Simple Multiple Complex Systems) หมายถึง ระบบพหุเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนเพียง 2 ระบบ และทุกตำแหน่งในแต่ละระบบเชิงซ้อนมีสมาชิก 1 ตัว ซึ่งมีลักษณะที่เป็นไปได้เพียง 2 ลักษณะเท่านั้น

ระบบพหุเชิงซ้อนแบบต่างเป้าหมาย (Multiple Complex Systems with Different Goals) หมายถึง ระบบพหุเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนมากกว่า 1 ระบบ โดยที่ระบบเชิงซ้อนแต่ละระบบมุ่งหวังในเป้าหมายที่แตกต่างกัน เช่น ระบบเชิงซ้อนหนึ่งมุ่งหวังทำลายอีกระบบเชิงซ้อนหนึ่ง ในขณะที่ระบบเชิงซ้อนหนึ่งมุ่งหวังสนับสนุนอีกระบบเชิงซ้อนหนึ่ง เป็นต้น

ระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม (Multiple Complex Systems with a Common Goal) หมายถึง ระบบพหุเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนมากกว่า 1 ระบบ โดยที่ระบบเชิงซ้อนแต่ละระบบมุ่งหวังในเป้าหมายเดียวกันคือการทำให้ประสิทธิผลโดยรวมของระบบทั้งหมดมีค่าสูงสุด

ค่าประสิทธิผลของระบบ (Performance of System) หมายถึง ค่าที่แสดงประสิทธิภาพของระบบ โดยทั่วไปกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง [0,1] ถ้าค่าประสิทธิผลของระบบมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าระบบนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ถ้าค่าประสิทธิผลของระบบมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าระบบนั้นมีประสิทธิภาพสูง

ค่าประสิทธิผลประกอบของระบบ (Contribution to System Performance) หมายถึง ค่าที่ประกอบขึ้นเป็นค่าประสิทธิผลของระบบ

ค่าประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละบุคคล (Individual Efficiency) หมายถึง ค่าที่แสดงความสามารถในการทำงานของบุคคลในแต่ละตำแหน่งงานขององค์กรการทำงาน ซึ่งก็คือค่าประสิทธิผลประกอบของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นตัวแทนขององค์กรการทำงานนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อันประกอบด้วยบทนิยามและทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับลักษณะของปัญหา เพื่อนำความรู้ดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบที่สร้างขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ต่อการหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมในการหาผลเฉลยต่อไป นอกจากนี้ยังมีบทนิยามและทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับตัวแปรสุ่ม (Random Variable) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบที่สร้างขึ้นอีกด้วย สำหรับส่วนท้ายของบทจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและมีความสำคัญต่องานวิจัยนี้

2.1 บทนิยาม

บทนิยาม 2.1 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมเชิงการจัด (Combinatorial Optimization Problem: COP) หมายถึง ปัญหาที่จำเป็นต้องเลือกหนทางเพื่อให้บรรลุจุดประสงค์โดยรวม (Overall Objective) ของปัญหา ซึ่งอาจจะเป็นการหาค่าสูงสุด (Maximize) หรือค่าต่ำสุด (Minimize) อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยหนทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวมีมากมายแต่เป็นจำนวนจำกัด (Finite)

ปัญหาใด ๆ จะมีลักษณะเป็น COP ก็ต่อเมื่อปัญหานั้น ๆ ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

(1) เซตของข้อมูล (Set of Data) หมายถึง เซตของข้อมูลทั้งหมดของปัญหา

(2) เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Set of Feasible Solution) หมายถึง เซตของสิ่งที่อาจจะเป็นผลเฉลยของปัญหาได้

(3) เซตของบล็อกโครงสร้าง (Set of Building Block) หมายถึง เซตขององค์ประกอบของผลเฉลยที่เป็นไปได้

(4) ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function Value) หมายถึง ค่าที่นำไปสู่การหาผลเฉลยของปัญหา โดยทั่วไปแล้วแทนด้วย Z(f) เมื่อ f เป็นสมาชิกในเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้

(5) จุดประสงค์โดยรวม (Overall Objective) หมายถึง เป้าหมายในการหาผลเฉลยของปัญหา

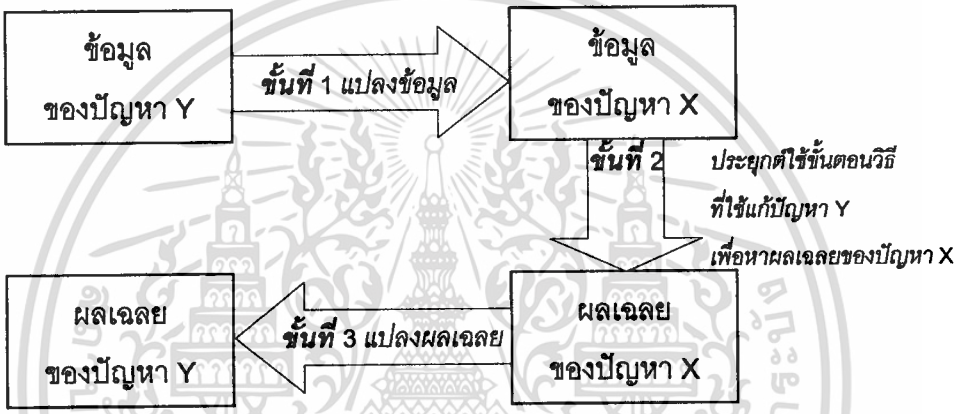
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนวิธีที่นิยมใช้สำหรับหาผลเฉลยของ COP คือ

1. ขั้นตอนวิธีกรีดี (Greedy Algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีในการเลือกบล็อกโครงสร้างเพื่อหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหา

2. ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงอย่างจำกัด (Finite Improvement Algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีที่มุ่งไปสู่ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimal Solution) ของปัญหาโดยเริ่มต้นจากผลเฉลยที่เป็นไปได้ตั้งต้น (Initial Feasible Solution) ซึ่งอาจจะหาได้จากขั้นตอนวิธีกรีดี

3. ขั้นตอนวิธีการลดทอน (Reduction Algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีการแปลงปัญหาจากปัญหาหนึ่งไปยังอีกปัญหาหนึ่ง แล้วประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีที่ใช้หาผลเฉลยของปัญหาตั้งต้นเพื่อหาผลเฉลยของอีกปัญหาหนึ่ง โดยขั้นตอนวิธีการลดทอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนวิธีการลดทอนปัญหา Y ไปยังปัญหา X

COP เป็นปัญหาในการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ที่สามารถแปลงเป็นปัญหาการตัดสินใจ (Decision Problem) ได้ การแปลงปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนจริง R เข้าไปในเซตของข้อมูล แล้วเปลี่ยนจุดประสงค์โดยรวมของปัญหาจากการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดเป็นการหาคำตอบเพื่อตอบคำถามที่ว่า *"มีผลเฉลยที่เป็นไปได้หรือไม่ ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ดีกว่าหรือเท่ากับจำนวนจริง R"*

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงบทนิยามที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการตัดสินใจซึ่งจะนำไปใช้ในการพิสูจน์ต่อไป

บทนิยาม 2.2 ฟังก์ชันความซับซ้อนเชิงเวลา (Time Complexity Function) ของขั้นตอนวิธี A สำหรับแก้ปัญหาการตัดสินใจ X แทนด้วย $T_A(n)$ ซึ่ง

$T_A(n)$ = จำนวนขั้นตอนการทำงานสูงสุดของขั้นตอนวิธี A สำหรับแก้ปัญหา X

เมื่อ n คือขนาดของปัญหา X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนิยาม 2.3 ขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนาม (Polynomial Time Algorithm) คือขั้นตอนวิธี A ที่มีพหุนาม p ซึ่ง $p(n) \geq T_A(n)$ สำหรับทุก $n = 1,2,...$

โดยทั่วไปการแสดงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหามักจะคำนวณออกมาในรูปอันดับของฟังก์ชันความซับซ้อนเชิงเวลา (Order of Time Complexity Function) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ O (O-notation หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า Big O) ซึ่งมีนิยามดังต่อไปนี้

บทนิยาม 2.4 สำหรับฟังก์ชัน f(n) และ g(n) ใด ๆ $f(n) = O(g(n))$ ก็ต่อเมื่อ มีค่าคงที่ $c \geq 0$ ซึ่ง $|f(n)| = c|g(n)|$ สำหรับทุกจำนวนเต็ม $n = 1,2,...$

บทนิยาม 2.5 $\mathcal{NP}$ เป็นคลาส (Class) ของปัญหาการตัดสินใจซึ่งมีขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามสำหรับใช้ในการตรวจสอบผลเฉลย (Test for Optimality) ของปัญหา

บทนิยาม 2.6 $\mathcal{P}$ เป็นคลาสของปัญหาใน $\mathcal{NP}$ ซึ่งมีขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามสำหรับหาผลเฉลยของปัญหา

บทนิยาม 2.6 $\mathcal{NP}$-complete เป็นคลาสของปัญหาใน $\mathcal{NP}$ ซึ่งไม่มีขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามสำหรับหาผลเฉลยของปัญหา

บทนิยาม 2.7 ปัญหา X เป็น $\mathcal{NP}$-hard ถ้าทุก ๆ ปัญหาใน $\mathcal{NP}$ สามารถลดทอนมายังปัญหา X ได้

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงบทนิยามที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรสุ่ม ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปพิสูจน์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบที่สร้างขึ้นในบทที่ 3 ต่อไป

บทนิยาม 2.8 ถ้า t เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่องที่มีการแจกแจงเอกรูปบนช่วง [a,b] แล้ว t จะมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) คือ

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & ;\text{ถ้า } t \in [a,b] \\ 0 & ;\text{ถ้า } t \in (-\infty,a) \cup (b,\infty) \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนิยาม 2.9 ค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง t คือ $E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t)\,dt$

บทนิยาม 2.10 ถ้า s และ t เป็นตัวแปรสุ่มที่มีความต่อเนื่อง และ f(s,t) เป็นค่าของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นร่วม (The Value of Joint Probability Density Function) ที่ (s,t) แล้ว ค่าคาดหวังของฟังก์ชัน g(s,t) คือ

$$E[g(s,t)] = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(s,t) f(s,t)\,ds\,dt$$

2.2 ทฤษฎีบท

ทฤษฎีบท 2.1 ถ้า X เป็นปัญหาการตัดสินใจ ซึ่งมีบางปัญหา Y $\in$ $\mathcal{NP}$-complete ที่สามารถลดทอนมายัง X ได้ แล้ว X จะเป็น $\mathcal{NP}$-hard ยิ่งกว่านั้น ถ้า X $\in$ $\mathcal{NP}$ แล้ว X $\in$ $\mathcal{NP}$-complete

พิสูจน์ ดูเอกสารอ้างอิง [11] และ [12]

จากทฤษฎีบทที่ 2.1 การพิสูจน์ว่าปัญหาใด ๆ เป็น $\mathcal{NP}$-complete นั้น สามารถแบ่งการพิสูจน์ออกได้เป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 พิสูจน์ว่าปัญหานั้นเป็นสมาชิกใน $\mathcal{NP}$

ตอนที่ 2 พิสูจน์ว่าปัญหานั้นเป็น $\mathcal{NP}$-hard

เนื่องจาก $\mathcal{NP}$-complete เป็นคลาสของปัญหาที่ไม่มีขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามสำหรับแก้ปัญหา ดังนั้นการหาผลเฉลยของปัญหาในลักษณะนี้สามารถทำได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่งใน 3 วิธีต่อไปนี้

วิธีที่ 1 หาขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาไม่เป็นพหุนาม (Non-polynomial Algorithm) ที่เหมาะสมสำหรับหาผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่เนื่องจากขั้นตอนวิธีในลักษณะนี้ต้องใช้เวลานานและมีความยุ่งยากในการแก้ปัญหา จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก

วิธีที่ 2 หาขั้นตอนวิธีฮิวริสติค (Heuristic Algorithm) ที่เหมาะสมสำหรับหาผลเฉลยเฉพาะที่ (Local Optimal Solution) ของปัญหา ผลเฉลยที่ได้จากวิธีการนี้อาจจะไม่ใช่ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่เป็นผลเฉลยที่เป็นไปได้ ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ดีที่สุดหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับผลเฉลยที่เป็นไปได้ตั้งต้น วิธีนี้มักจะใช้ขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามซึ่งอาจจะเป็นขั้นตอนวิธีกรีดี, การปรับปรุงอย่างจำกัด หรือการลดทอนก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 3 หาขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามที่ใช้แก้กรณีพิเศษ (Special Case) ของปัญหา วิธีการนี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อปัญหาที่มีขนาดใหญ่และยุ่งยากเกินกว่าที่จะหาขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาไม่เป็นพหุนามหรือขั้นตอนวิธีฮิวริสติคสำหรับแก้ปัญหาได้ หรือในบางปัญหาผู้ที่ศึกษาต้องการศึกษาเพียงกรณีพิเศษบางกรณีของปัญหาเท่านั้น โดยส่วนใหญ่แล้วกรณีพิเศษของปัญหาที่นำมาศึกษามักจะเป็นปัญหาที่ง่ายต่อการหาขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามสำหรับหาผลเฉลย

ต่อไปนี้เป็นจะแสดงทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องกับค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่ม [13] พร้อมทั้งแสดงการพิสูจน์ทฤษฎีบทในบางทฤษฎีเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำทฤษฎีนั้นไปวิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนในบทที่ 3 ต่อไป

ทฤษฎีบท 2.3 ถ้า f เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง t แล้ว

1. $f(t) \geq 0, \qquad -\infty < t < \infty$
2. $\int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt = 1$

ในงานวิจัยนี้จะขอละการพิสูจน์ทฤษฎีบท 2.3 ซึ่งเป็นทฤษฎีบทพื้นฐานของฟังก์ชันความหนาแน่นของตัวแปรสุ่ม ผู้สนใจสามารถค้นคว้าได้ในเอกสารอ้างอิง [13]

ทฤษฎีบท 2.4 ถ้า f เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นร่วมที่ (s,t) ของตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง s และ t, c_1 และ c_2 เป็นค่าคงที่ใด ๆ แล้ว $E(c_1s + c_2t) = c_1E(s) + c_2E(t)$ เมื่อ E แทนฟังก์ชันของค่าคาดหวัง

พิสูจน์ จากบทนิยาม 2.10 จะได้

$$
\begin{aligned}
E(c_1s + c_2t) &= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} (c_1s + c_2t) f(s,t)\,ds\,dt \\
&= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} (c_1s f(s,t) + c_2t f(s,t))\,ds\,dt \\
&= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} c_1s f(s,t)\,ds\,dt + \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} c_2t f(s,t)\,ds\,dt \\
&= c_1 \int_{-\infty}^{\infty} s \int_{-\infty}^{\infty} f(s,t)\,dt\,ds + c_2 \int_{-\infty}^{\infty} t \int_{-\infty}^{\infty} f(s,t)\,ds\,dt \\
&= c_1 \int_{-\infty}^{\infty} s f(s)\,ds + c_2 \int_{-\infty}^{\infty} t f(t)\,dt \qquad \text{(จากทฤษฎีบท 2.3)} \\
&= c_1E(s) + c_2E(t)
\end{aligned}
$$

□

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีบท 2.5 ถ้า t เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่องที่มีการแจกแจงเอกรูปบนช่วง [a,b] แล้ว ค่าคาดหวังของ t คือ $E(t)=\frac{a+b}{2}$

พิสูจน์ เนื่องจาก t เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่องที่มีการแจงเอกรูปบนช่วง [a, b] ดังนั้นค่าคาดหวังของ t จะมีลักษณะดังสมการ (2.1)

$$E(t)=\int_a^b t\,f(t)\,dt \tag{2.1}$$

เมื่อ f(t) คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม t จากบทนิยาม 2.9 และสมการ (2.1) จะได้

$$\begin{aligned}E(t)&=\int_a^b t\frac{1}{b-a}dt\\&=\frac{1}{b-a}\left[\frac{1}{2}t^2\right]_a^b\\&=\frac{1}{b-a}\left(\frac{1}{2}b^2-\frac{1}{2}a^2\right)\\&=\frac{(b-a)(b+a)}{2(b-a)}\\&=\frac{a+b}{2}\end{aligned}$$

□

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

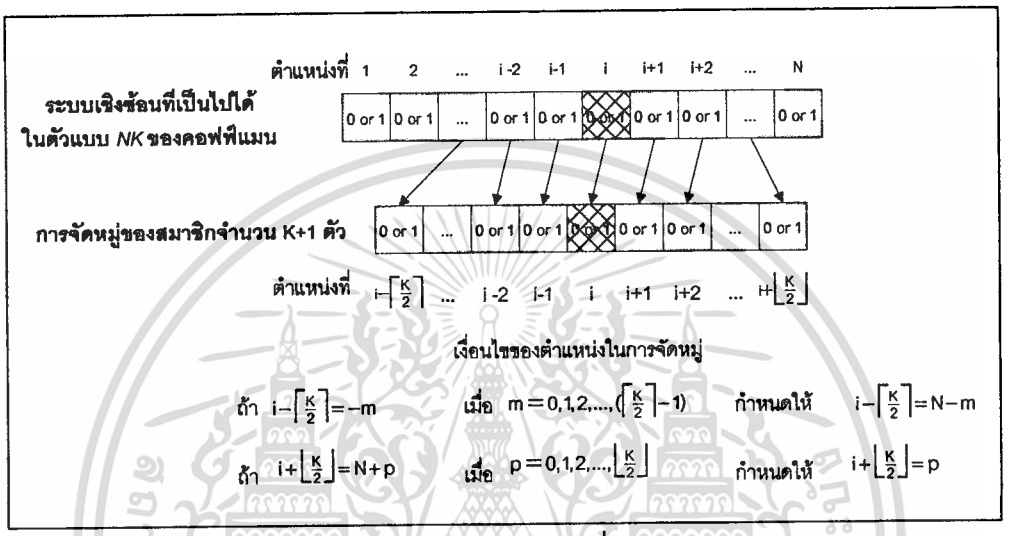
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน ซึ่งเป็นตัวแบบตั้งต้นของงานวิจัยนี้ พร้อมทั้งอธิบายลักษณะของตัวแบบดังกล่าวเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น

ในปี ค.ศ. 1989 นักวิจัยชื่อ คอฟฟ์แมน (Kauffman S.A.) และ เวนเบอร์เกอร์ (Weinberger E.W.) ได้เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายลักษณะการแสดงออกของสิ่งมีชีวิตอันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ของจีนภายในโครโมโซม และให้ชื่อตัวแบบดังกล่าวว่า "*ตัวแบบ* NK" [2]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1990 คอฟฟ์แมนได้ศึกษากรณีเฉพาะของตัวแบบ NK และใช้ชื่อว่า "*ตัวแบบ* NK *ของคอฟฟ์แมน*" [5] ซึ่งตัวแบบดังกล่าวเป็นตัวแบบที่มุ่งเน้นค้นหาระบบเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด โดยที่กำหนดให้ระบบเชิงซ้อนแต่ละระบบมี N ตำแหน่ง (แต่ละระบบมีขนาดเท่ากับ N) แต่ละตำแหน่งบรรจุสมาชิกได้เพียง 1 ตัว และสมาชิกที่เป็นไปได้มีเพียง 2 ลักษณะเท่านั้น คอฟฟ์แมนกำหนดให้จำนวนเต็ม 0 และ 1 แทนสมาชิกที่เป็นไปได้ในแต่ละตำแหน่งของระบบ เป็นผลให้ระบบเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมนสามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์ทวิภาค N-เวกเตอร์ (Binary N-vector) และมีจำนวนทั้งสิ้น 2^N ระบบ คอฟฟ์แมน

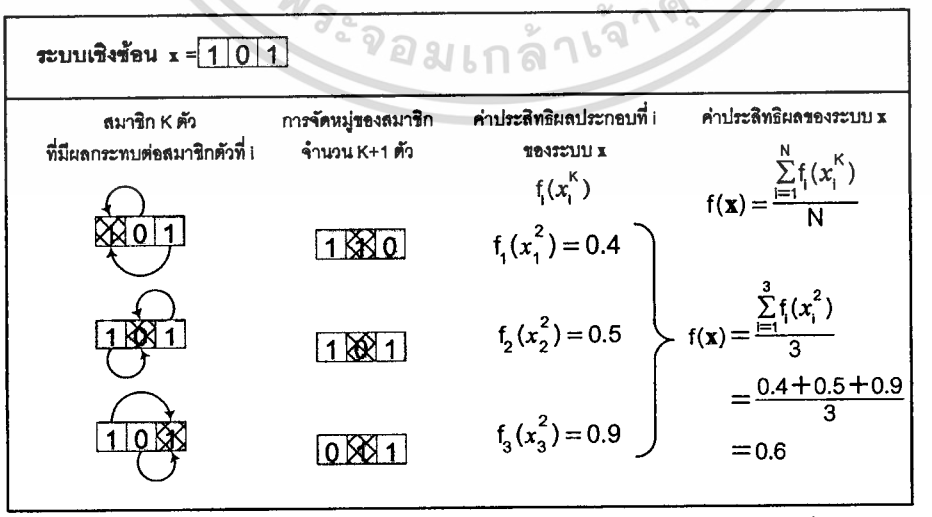
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ค่าประสิทธิผลของระบบเชิงซ้อนแต่ละระบบมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลประกอบของระบบนั้น ๆ โดยที่ค่าประสิทธิผลประกอบแต่ละค่าแทนด้วยเลขสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform Random Number) บนช่วง [0,1] ซึ่งเลขสุ่มดังกล่าวจะต้องสัมพันธ์กับการจัดหมู่ (Combination) ของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันจำนวน K+1 ตัว (1 คือจำนวนสมาชิก ณ ตำแหน่งที่พิจารณา, K คือจำนวนสมาชิกอื่น ๆ ที่มีผลกระทบกับสมาชิกที่พิจารณา โดยที่ $(0 \le K \le N-1)$ การจัดหมู่ของสมาชิกดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการจัดหมู่ของสมาชิกจำนวน K+1 ตัว ซึ่งสัมพันธ์กับค่าประสิทธิผลประกอบที่ i ของระบบเชิงซ้อนในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน

สำหรับตัวอย่างของระบบเชิงซ้อนในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมนและวิธีการคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างระบบเชิงซ้อนในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน กรณี N = 3 และ K = 2 และวิธีการคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

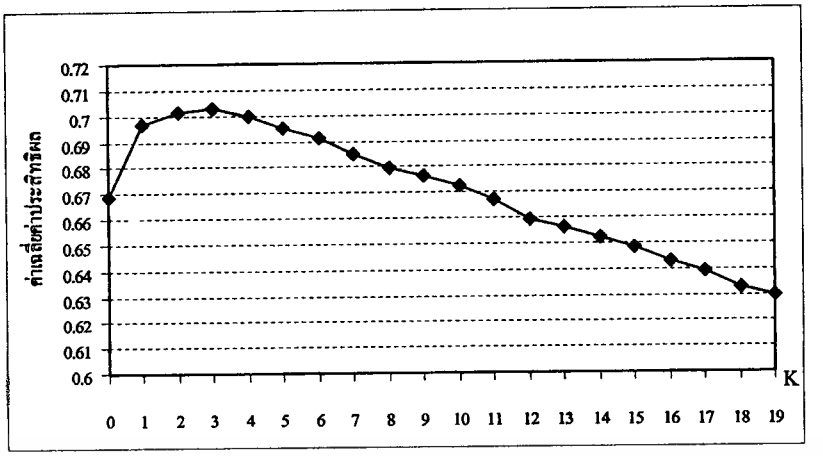
ในปี ค.ศ. 1989 นักวิจัยชื่อ แมคเคน (Macken C.A.) และ เพเรลสัน (Perelson A.S.) ได้นำตัวแบบ NK กรณี K = N – 1 ไปใช้อธิบายวิวัฒนาการของโปรตีน (Protein Evolution) และศึกษาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาของตัวแบบดังกล่าว [4] แมคเคนและเพเรลสันพบว่าโดยขั้นตอนวิธีฮิวริสติคซึ่งเรียกว่า กระบวนการแทนที่ 1 ตำแหน่ง (One-replacement Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เริ่มจากระบบที่เป็นไปได้ตั้งต้นแล้วไต่ไปตามระบบย่านใกล้เคียงที่มีสมาชิกแตกต่างจากระบบตั้งต้นเพียง 1 ตำแหน่ง (One-replacement Neighbor) และจะต้องเป็นระบบย่านใกล้เคียงที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าระบบตั้งต้นด้วย ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าคาดหวังของจำนวนระบบที่มีค่าประสิทธิผลสูงสุดเฉพาะที่ (Expected Number of Local Maximum) มีค่าเท่ากับ $2^N/(N+1)$ และค่าคาดหวังของจำนวนการแทนที่ (Expected Number of Replacement) มีค่าเท่ากับ ln (N–1)

ในปี ค.ศ. 1992 บาค (Bak P.) และคณะได้ศึกษาและวิเคราะห์ตัวแบบ NK กรณี K = N –1 [14] พบว่า เมื่อ N มีค่ามาก ค่าเฉลี่ยของจำนวนการแทนที่เพื่อมุ่งไปสู่ระบบที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเฉพาะที่ มีค่าเท่ากับ ln N

ปี ค.ศ. 1993 คอฟฟ์แมนได้ใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์กรณีสุดขีด (Extreme Case) ของตัวแบบ NK [6] พบว่า กรณี K = 0 ค่าคาดหวังของค่าประสิทธิผลสูงสุด (Expected of Global Maximum) มีค่าเท่ากับ 2/3 และค่าคาดหวังของจำนวนการแทนที่เพื่อมุ่งไปยังระบบที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดมีค่าเท่ากับ N/2 ส่วนกรณี K = N – 1 คอฟฟ์แมนพบว่า เมื่อกำหนดให้ N มีค่ามาก (N approaches infinity) ค่าคาดหวังของค่าประสิทธิผลสูงสุดเฉพาะที่ (Expected of Local Maximum) มีค่าเท่ากับ 1/2

นอกจากนี้คอฟฟ์แมนยังได้ใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลสูงสุดเฉพาะที่ของระบบเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NK ในกรณีที่ K แตกต่างกัน พบว่า เมื่อ N มีค่ามาก สำหรับ K ที่มีค่าน้อย ค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลสูงสุดเฉพาะที่ของระบบที่เป็นผลเฉลยจะมีค่ามากกว่า 2/3 ซึ่งเป็นค่าประสิทธิผลสูงสุดสำหรับกรณี K = 0 แล้วค่าดังกล่าวจะลดลงและเข้าสู่ 1/2 เมื่อ K มีค่าเพิ่มมากขึ้น (ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4) ปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เรียกว่า "*ความวิบัติเชิงซ้อน* (Complexity Catastrophe)" [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเต็ม K และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลของระบบเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NK กรณี N = 20 โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง

ปี ค.ศ. 1999 โซโลว (Solow D.) และคณะ ได้เสนอตัวแบบอื่น ๆ ที่พัฒนามาจากตัวแบบ NK เพื่อลดความวิบัติเชิงซ้อนอันเกิดจากจำนวน K ที่เพิ่มขึ้น เช่น ตัวแบบ NK/W ซึ่งเป็นตัวแบบที่กำหนดให้ค่าประสิทธิผลของระบบเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลประกอบที่มีการถ่วงน้ำหนักเพื่อระบุความสำคัญของสมาชิกแต่ละตำแหน่งของระบบ, ตัวแบบ NK/N(μ,σ) ซึ่งเป็นตัวแบบที่กำหนดให้ค่าประสิทธิผลประกอบของระบบเป็นเลขสุ่มที่มีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ด้วยค่ากลาง μ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ, ตัวแบบ NK/A ซึ่งเป็นตัวแบบที่กำหนดให้สมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบเชิงซ้อนมีลักษณะที่เป็นไปได้ A แบบ เป็นต้น [3]

นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 2002 โซโลว (Solow D.) และคณะ ยังได้วิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบ NK ซึ่งพบว่า ตัวแบบ NK เป็นปัญหาหนึ่งใน $\mathcal{NP}$-complete ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม่มีขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามเพื่อหาผลเฉลยนั่นเอง [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ตัวแบบของระบบพหุเชิงซ้อน และการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ผู้วิจัยคิดค้นขึ้นเพื่อศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม โดยตัวแบบที่สร้างขึ้นเป็นตัวแบบที่พัฒนามาจากตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน และกำหนดให้ชื่อว่า "*ตัวแบบ* NKC" ในตอนต้นของเนื้อหาจะอธิบายลักษณะของตัวแบบ พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ ส่วนท้ายของบทจะแสดงการวิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบเพื่อเป็นแนวทางในการหาขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลยของปัญหา นอกจากนี้ยังได้แสดงการวิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของปัญหาดังกล่าวอีกด้วย

3.1 ลักษณะของตัวแบบ NKC

ตัวแบบ NKC เป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มุ่งเน้นค้นหาระบบพหุเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ในตัวแบบเป็นระบบที่ประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนเพียง 2 ระบบเท่านั้น โดยจะเรียกระบบเชิงซ้อนดังกล่าวว่า "*ระบบย่อยที่* 1 และ *ระบบย่อยที่* 2" ดังนั้นจุดมุ่งหมายของตัวแบบ NKC จึงเป็นการค้นหาระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด

ต่อไปนี้จะแสดงเงื่อนไขของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC พร้อมทั้งข้อกำหนดต่าง ๆ ของตัวแบบที่สอดคล้องกับแต่ละเงื่อนไขของระบบ โดยแบ่งพิจารณาเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. กำหนดให้ระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 มีขนาดเท่ากับ N นั่นแสดงว่าระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ในตัวแบบ NKC จะต้องมีขนาดเท่ากับ 2N
2. กำหนดให้แต่ละตำแหน่งของระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 สามารถบรรจุสมาชิกได้เพียง 1 ตัวเท่านั้น โดยที่สมาชิกดังกล่าวมีลักษณะที่เป็นได้ 2 แบบ ซึ่งกำหนดให้แทนด้วยจำนวนเต็ม 0 และ 1 นั่นคือ ระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 จะแทนด้วยเวกเตอร์ทวิภาค N-เวกเตอร์ จำนวนของระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ที่เป็นไปได้ในตัวแบบมีค่าเท่ากับ 2^N ระบบ เป็นเหตุให้ระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ในตัวแบบ NKC มีจำนวนทั้งสิ้น 2^{2N} ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ถ้าให้ **x** คือระบบย่อยที่ 1 และ **y** คือระบบย่อยที่ 2 กำหนดให้ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน (**x**,**y**) มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยระหว่างค่าประสิทธิผลของระบบ **x** และระบบ **y** ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ (3.1)

$$f(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{f(\mathbf{x}^K,\mathbf{y}^C) + f(\mathbf{y}^K,\mathbf{x}^C)}{2} \qquad (3.1)$$

เมื่อ $f(\mathbf{x}^K,\mathbf{y}^C)$ คือ ค่าประสิทธิผลของระบบ **x** (ที่ถูกกระทบด้วยระบบ **y**)

$f(\mathbf{y}^K,\mathbf{x}^C)$ คือ ค่าประสิทธิผลของระบบ **y** (ที่ถูกกระทบด้วยระบบ **x**)

4. ค่าประสิทธิผลของระบบ **x** และ ค่าประสิทธิผลของระบบ **y** กำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิผลประกอบทั้งหมดของแต่ละระบบ ซึ่งจะมีลักษณะดังสมการ (3.2) และ สมการ (3.3) ตามลำดับ

$$f(\mathbf{x}^K,\mathbf{y}^C) = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i(x_i^K, y_i^C)}{N} \qquad (3.2)$$

$$f(\mathbf{y}^K,\mathbf{x}^C) = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i(y_i^K, x_i^C)}{N} \qquad (3.3)$$

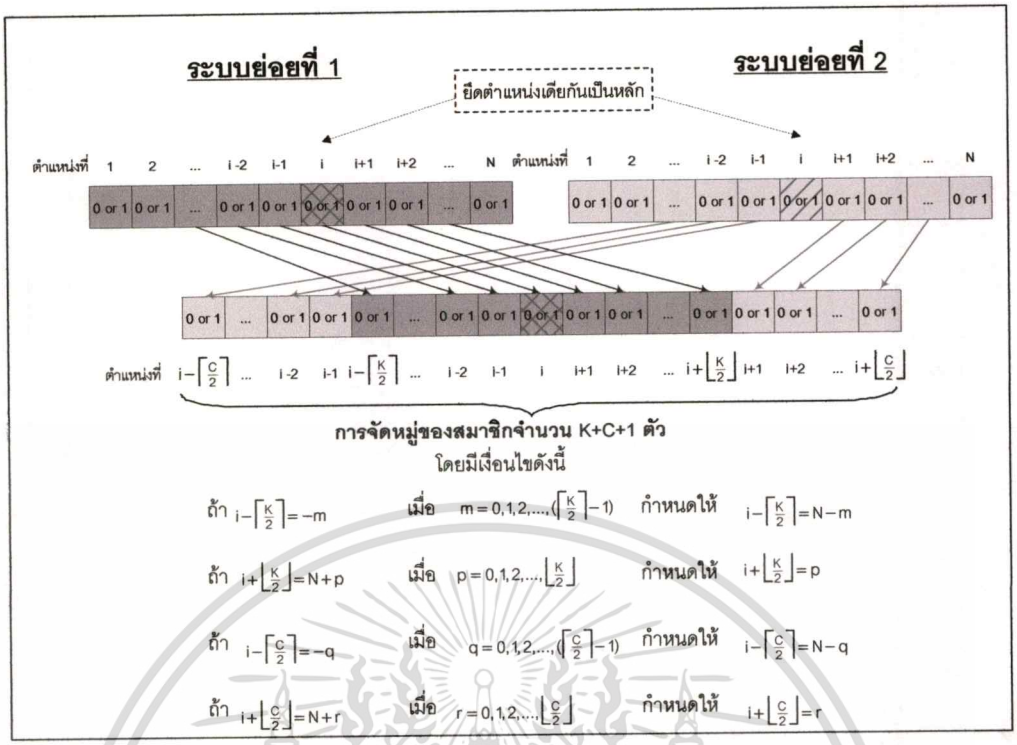
เมื่อ $f_i(x_i^K, y_i^C)$ คือ ค่าประสิทธิผลประกอบที่ i ของระบบ **x** ซึ่งหมายถึง ค่าประสิทธิผลของสมาชิกตัวที่ i ในระบบ **x** ที่ถูกกระทบด้วยสมาชิก K ตัวจากระบบ **x** และ C ตัวจากระบบ **y**

$f_i(y_i^K, x_i^C)$ คือ ค่าประสิทธิผลประกอบที่ i ของระบบ **y** ซึ่งหมายถึง ค่าประสิทธิผลของสมาชิกตัวที่ i ในระบบ **y** ที่ถูกกระทบด้วยสมาชิก K ตัวจากระบบ **y** และ C ตัวจากระบบ **x**

5. กำหนดให้ค่าประสิทธิผลประกอบทั้งหมดเป็นเลขสุ่มที่มีการแจกแจงเอกรูปบนช่วง [0,1] ซึ่งสัมพันธ์กับการจัดหมู่ของสมาชิกจำนวน K+C+1 ตัว

6. การจัดหมู่ของสมาชิกจำนวน K+C+1 ตัว มีลักษณะดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

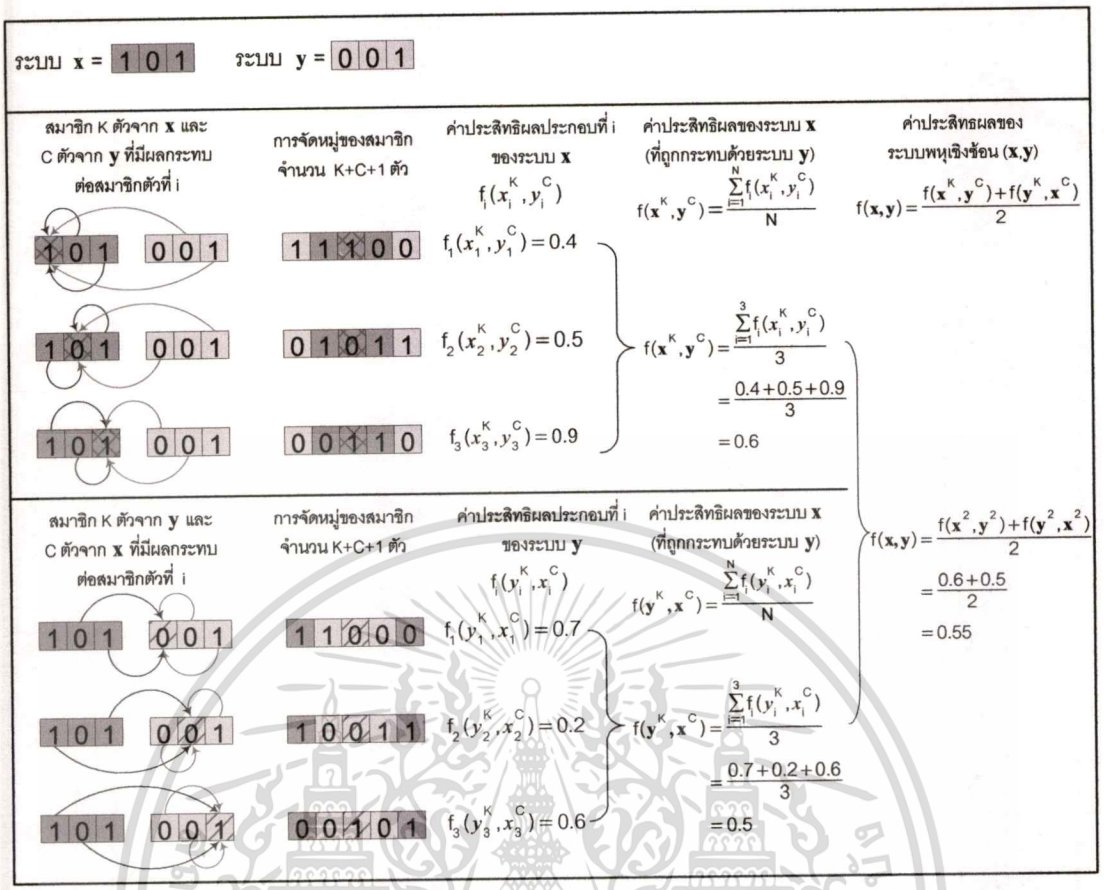


รูปที่ 3.1 แสดงการจัดหมู่ของสมาชิกจำนวน K+C+1 ตัว ซึ่งสัมพันธ์กับค่าประสิทธิผลประกอบที่ i ของระบบย่อยที่ 1

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าสมาชิกภายในระบบย่อยที่ 1 ที่มีผลกระทบต่อสมาชิกในตำแหน่งที่ i ของระบบเดียวกัน คือ สมาชิกจำนวน $\left\lceil \frac{K}{2} \right\rceil$ ตัวที่อยู่ทางด้านซ้ายของสมาชิกตัวที่ i และสมาชิกจำนวน $\left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor$ ตัวที่อยู่ทางด้านขวาของสมาชิกตัวที่ i การพิจารณาตำแหน่งของสมาชิกจะใช้หลักการเดียวกับแถวคอยแบบวงกลม (Circular Queue) [16] ส่วนสมาชิกภายนอก (สมาชิกจากระบบย่อยที่ 2) ที่มีผลกระทบต่อสมาชิกตัวที่ i ของระบบย่อยที่ 1 จะพิจารณาในทำนองเดียวกับสมาชิกภายในโดยยึดที่ตำแหน่ง i ของระบบย่อยที่ 2 เป็นหลัก ดังนั้นสมาชิกในระบบย่อยที่ 2 ที่มีผลกระทบต่อสมาชิกตัวที่ i ของระบบย่อยที่ 1 คือ สมาชิกจำนวน $\left\lceil \frac{C}{2} \right\rceil$ ตัวที่อยู่ทางด้านซ้าย และสมาชิกจำนวน $\left\lfloor \frac{C}{2} \right\rfloor$ ตัวที่อยู่ทางด้านขวาของสมาชิกตัวที่ i ในระบบย่อยที่ 2 การพิจารณาตำแหน่งของสมาชิกจะใช้หลักการของแถวคอยแบบวงกลมเช่นเดียวกัน จะสังเกตเห็นว่าการกำหนดตำแหน่งของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันในลักษณะนี้ สมาชิกตัวที่ i ของระบบหนึ่งจะไม่มีผลกระทบกับสมาชิกตัวที่ i ของอีกระบบหนึ่ง

รูปที่ 3.2 เป็นรูปแสดงตัวอย่างระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x},\mathbf{y})$ ในตัวแบบ NKC กรณี N = 3 , K = 2 และ C = 2 เมื่อกำหนดให้ ระบบ $\mathbf{x}$ = 101 และ ระบบ $\mathbf{y}$ = 001 พร้อมทั้งแสดงวิธีการคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x},\mathbf{y})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC กรณี N = 3, K = 2 และ C = 2 และวิธีการคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบ

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะปัญหาของตัวแบบ NKC

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่า ตัวแบบ NKC เป็น COP โดยแสดงส่วนประกอบของตัวแบบ NKC ทั้งหมด จากนั้นจะพิสูจน์ให้เห็นว่าตัวแบบ NKC เป็นปัญหาใน $\mathcal{NP}$-complete

3.2.1 ตัวแบบ NKC เป็น COP

เนื่องจากตัวแบบ NKC เป็นตัวแบบที่มุ่งเน้นค้นหาระบบพหุเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด และทุกส่วนประกอบในตัวแบบ NKC มีจำนวนจำกัด จากบทนิยามของ COP ในหัวข้อ 2.1 พบว่า ตัวแบบ NKC เป็น COP ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบ 5 ส่วน คือ

(1) เซตของข้อมูล

$D = \{2N, K, C, \mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_N), \mathbf{y} = (y_1, y_2, \ldots, y_N)$

เมื่อ $x_i, y_j = 0$ หรือ 1 และ $i, j = 1, 2, \ldots, N\}$

(2) เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้

$F = \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mid \mathbf{x}, \mathbf{y}$ คือระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ตามลำดับ$\}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) เซตของบล็อกโครงสร้าง

$B = \{x_i , y_j \mid i, j = 1, 2, \ldots, N\}$

(4) ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์

$Z(\mathbf{x},\mathbf{y}) = f(\mathbf{x},\mathbf{y})$

(5) จุดประสงค์โดยรวม

"หา $\mathbf{x}^*$ และ $\mathbf{y}^*$ ที่ทำให้ $Z(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*)$ มีค่ามากที่สุด"

3.2.2 ตัวแบบ NKC $\in$ $\mathcal{NP}$-complete

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แสดงการพิสูจน์บทตั้ง 3.1 และ บทตั้ง 3.2 เพื่อนำบทตั้งทั้งสองไปช่วยในการพิสูจน์ว่าตัวแบบ NKC $\in$ $\mathcal{NP}$-complete ซึ่งได้แสดงการพิสูจน์ไว้ในทฤษฎีบท 3.1

บทตั้ง 3.1 กำหนดให้ $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ โดยที่ $a_i \geq 0$ สำหรับทุก $i = 1, 2, \ldots, n$ สำหรับจำนวนจริง $d \geq 0$ แล้ว $\max(dA) = d(\max A)$

พิสูจน์ ให้ $a_j \in A$ และ $a_j = \max A$ สำหรับบาง $j = 1, 2, \ldots, n$ (3.4)

ดังนั้น $da_j = d(\max A)$ (3.5)

จากข้อกำหนด (3.4) จะได้

$a_j \geq a_i$ สำหรับทุก $i \neq j$ (3.6)

จาก $d \geq 0$ และอสมการ (3.6) จะได้

$da_j \geq da_i$ สำหรับทุก $i \neq j$ (3.7)

เนื่องจาก $a_j \in A$

ดังนั้น $da_j \in dA = \{da_1, da_2, \ldots, da_n\}$ (3.8)

จากอสมการ (3.7) และคุณสมบัติ (3.8) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$da_j = \max(dA) \qquad \text{สำหรับบาง } j = 1, 2, \ldots, n \qquad (3.9)$$

จากสมการ (3.5) และสมการ (3.9) ทำให้สรุปได้ว่า $\max(dA) = d(\max A)$ □

บทตั้ง3.2 กำหนดให้ $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ โดยที่ $a_i \geq 0$ สำหรับทุก $i = 1, 2, \ldots, n$

และ $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_m\}$ โดยที่ $b_j \geq 0$ สำหรับทุก $j = 1, 2, \ldots, m$

ถ้า $A+B = \{a_i + b_j\}$ สำหรับทุก $i = 1, 2, \ldots, n$ และ ทุก $j = 1, 2, \ldots, m$

แล้ว $\max(A+B) = \max A + \max B$

พิสูจน์ ให้ $a_p \in A$ และ $a_p = \max A$ สำหรับบาง $p = 1, 2, \ldots, n$ (3.10)

และ $b_q \in B$ และ $b_q = \max B$ สำหรับบาง $q = 1, 2, \ldots, m$ (3.11)

ดังนั้น $a_p + b_q = \max A + \max B$ (3.12)

จากข้อกำหนด (3.10) และ (3.11) จะได้

$$\left.\begin{array}{ll} a_p \geq a_i & \text{สำหรับทุก } i \neq p \\ \text{และ} \quad b_q \geq b_j & \text{สำหรับทุก } j \neq q \end{array}\right\} \quad (3.13)$$

จาก $a_i \geq 0$ (สำหรับทุก $i = 1, 2, \ldots, n$), $b_j \geq 0$ (สำหรับทุก $j = 1, 2, \ldots, m$) และ อสมการ (3.13) จะได้

$$a_p + b_q \geq a_i + b_j \qquad \text{สำหรับทุก } i \neq p \text{ และ } j \neq q \qquad (3.14)$$

เนื่องจาก $a_p \in A$ และ $b_q \in B$

ดังนั้น $a_p + b_q \in A+B$ (3.15)

จากอสมการ (3.14) และคุณสมบัติ (3.15) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_p + b_q = \max (A+B) \tag{3.16}$$

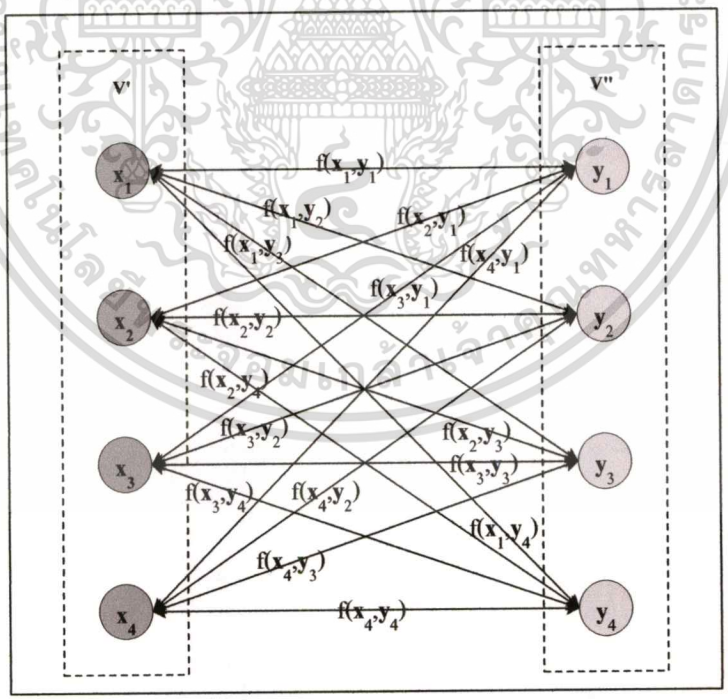
จากสมการ (3.12) และสมการ (3.16) ทำให้สรุปได้ว่า max (A+B) = max A + max B □

ทฤษฎีบท 3.1 ตัวแบบ NKC $\in \mathcal{NP}$-complete

พิสูจน์ การพิสูจน์ทฤษฎีนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 ต้องการแสดงว่าตัวแบบ NKC $\in \mathcal{NP}$

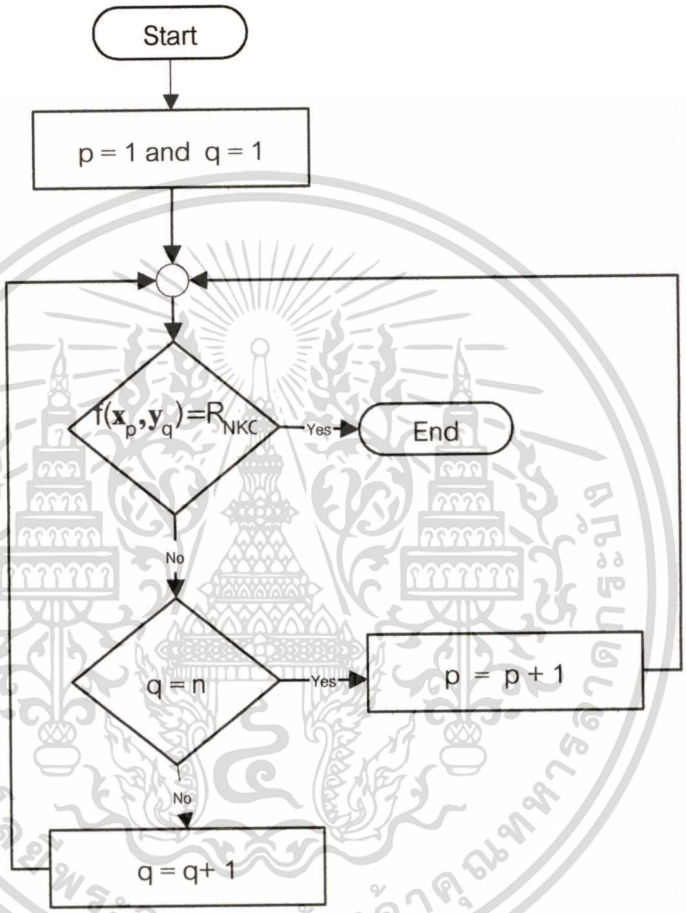
ตัวแบบ NKC สามารถแทนได้ด้วยกราฟสองส่วนแบบบริบูรณ์ (Complete Bipartite Graph) G = (V,E) ซึ่ง V = V′∪V″ เมื่อสมาชิกใน V′ คือ ระบบย่อยที่ 1 ที่เป็นไปได้ในตัวแบบ ($|V'| = 2^N$) และสมาชิกใน V″ คือ ระบบย่อยที่ 2 ที่เป็นไปได้ในตัวแบบ ($|V''| = 2^N$) ส่วนสมาชิกใน E คือเส้นเชื่อมระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ทั้งหมด ($|E| = 2^{2N}$) โดยมีค่ากำกับ (Cost) ในแต่ละเส้นเป็นค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่สัมพันธ์กับเส้นเชื่อมนั้น ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของตัวแบบ NKC ในรูปของกราฟสองส่วนแบบบริบูรณ์ G = (V,E) เมื่อ V = V′∪V″ และ |V′| = | V″| = 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้จำนวนจริง $R_{NKC} = \max_{\text{all } \mathbf{x},\ \text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{x},\mathbf{y})$ เป็นสมาชิกที่เพิ่มเข้าไปในเซตข้อมูลของตัวแบบ NKC เพื่อทำให้ ตัวแบบ NKC เป็น COP ที่อยู่ในรูปปัญหาการตัดสินใจ จากนั้นพิจารณาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบเฉลยของปัญหาดังกล่าวซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับค้นหาระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x},\mathbf{y})$ โดยที่ $f(\mathbf{x},\mathbf{y}) = R_{NKC}$ สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.4



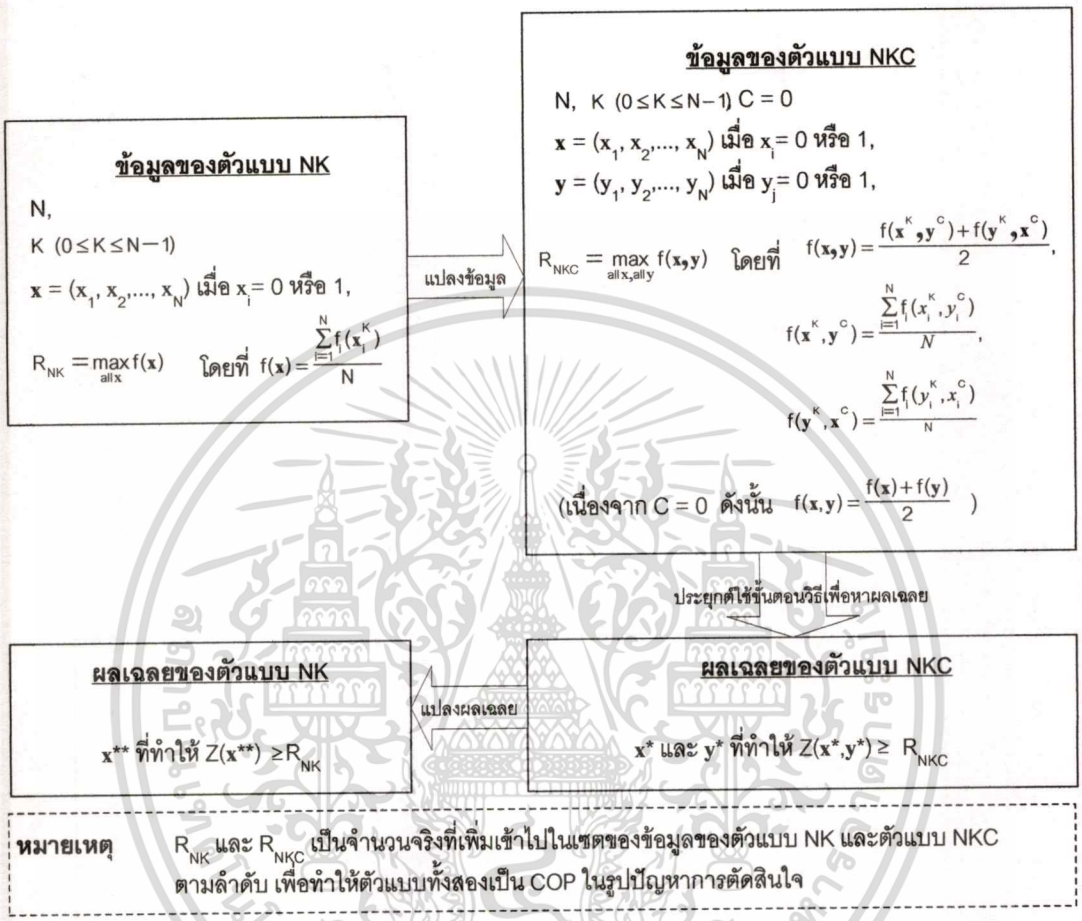
รูปที่ 3.4 แสดงแผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนวิธีการตรวจสอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของตัวแบบ NKC

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าจำนวนการทำงานสูงสุดของขั้นตอนวิธีการตรวจสอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของตัวแบบ NKC มีค่าเท่ากับ n^2 เมื่อ n คือจำนวนระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ในตัวแบบ NKC กล่าวคือ ขั้นตอนวิธีดังกล่าวมีอันดับของฟังก์ชันความซับซ้อนเชิงเวลาเป็น $O(n^2)$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความซับซ้อนเชิงเวลาของขั้นตอนวิธีดังกล่าวอยู่ในรูปพหุนาม n^2 ดังนั้นตัวแบบ NKC $\in \mathcal{NP}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตอนที่</u> 2 ต้องการแสดงว่าตัวแบบ NKC เป็น $\mathcal{NP}$-hard

การแสดงว่า ตัวแบบ NKC เป็น $\mathcal{NP}$-hard สามารถแสดงได้โดยอาศัยขั้นตอนวิธีการลดทอนจากตัวแบบ NK ไปยังตัวแบบ NKC ซึ่งมีลักษณะการลดทอนดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนวิธีการลดทอนปัญหาจากตัวแบบ NK ไปยังตัวแบบ NKC

ต่อไปนี้จะแสดงการพิสูจน์เพื่อยืนยันว่า ตัวแบบ NKC ดังรูปที่ 3.5 มีผลเฉลยก็ต่อเมื่อตัวแบบ NK มีผลเฉลย นั่นคือ ต้องการแสดงว่า "*มี* $\mathbf{x}^*$ *และ* $\mathbf{y}^*$ *ที่ทำให้* $Z(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) \geq R_{NKC}$ *ก็ต่อเมื่อมี* $\mathbf{x}^{**}$ *ที่ทำให้* $Z(\mathbf{x}^{**}) \geq R_{NK}$" โดยแบ่งการพิสูจน์ออกเป็น 2 ตอน คือ

(1) ต้องการพิสูจน์ว่า

"*ถ้ามี* $\mathbf{x}^*$ *และ* $\mathbf{y}^*$ *ที่ทำให้* $Z(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) \geq R_{NKC}$ *แล้ว จะมี* $\mathbf{x}^{**}$ *ที่ทำให้* $Z(\mathbf{x}^{**}) \geq R_{NK}$"

(2) ต้องการพิสูจน์ว่า

"*ถ้ามี* $\mathbf{x}^{**}$ *ที่ทำให้* $Z(\mathbf{x}^{**}) \geq R_{NK}$ *แล้ว จะมี* $\mathbf{x}^*$ *และ* $\mathbf{y}^*$ *ที่ทำให้* $Z(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) \geq R_{NKC}$"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>พิสูจน์</u> (1) สมมุติให้ มี $\mathbf{x}^*$ และ $\mathbf{y}^*$ ที่ทำให้ $Z(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) \geq R_{NKC}$

นั่นคือ มี $\mathbf{x}^*$ และ $\mathbf{y}^*$ ที่ทำให้ $f(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x},\ \text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{x},\mathbf{y})$

จากสมมุติฐานและสมการ (3.1) จะได้

$$\frac{f(\mathbf{x}^{*K},\mathbf{y}^{*C}) + f(\mathbf{y}^{*K},\mathbf{x}^{*C})}{2} \geq \max_{\text{all } \mathbf{x},\ \text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{x},\mathbf{y}) \tag{3.17}$$

จากรูปที่ 3.5 $f(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \dfrac{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})}{2}$

ดังนั้นอสมการ (3.17) จึงสมนัยกับอสมการ

$$\frac{f(\mathbf{x}^{*K},\mathbf{y}^{*C}) + f(\mathbf{y}^{*K},\mathbf{x}^{*C})}{2} \geq \max_{\text{all } \mathbf{x},\ \text{all } \mathbf{y}} \frac{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})}{2} \tag{3.18}$$

จากอสมการ (3.18) และ ข้อมูล $C = 0$ (ดูรูปที่ 3.5) จะได้

$$\frac{f(\mathbf{x}^*) + f(\mathbf{y}^*)}{2} \geq \max_{\text{all } \mathbf{x},\ \text{all } \mathbf{y}} \frac{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})}{2} \tag{3.19}$$

จากตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมนกำหนดให้ $f(\mathbf{x}) = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} f_i(x_i^K)}{N}$ และ $f(\mathbf{y}) = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} f_i(y_i^K)}{N}$ โดยที่ $f_i(x_i^K)$, $f_i(y_i^K)$ เป็นเลขสุ่มเอกรูปที่อยู่บนช่วง [0,1] นั่นคือ $0 \leq f_i(x_i^K) \leq 1$ และ $0 \leq f_i(y_i^K) \leq 1$

ดังนั้น $0 \leq f(\mathbf{x}) \leq 1$ และ $0 \leq f(\mathbf{y}) \leq 1$ (3.20)

จากคุณสมบัติ (3.20), บทตั้ง 3.1 และอสมการ (3.19) จะได้

$$\frac{f(\mathbf{x}^*) + f(\mathbf{y}^*)}{2} \geq \frac{\max_{\text{all } \mathbf{x},\ \text{all } \mathbf{y}} \{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})\}}{2} \tag{3.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ 2 คูณตลอดอสมการ (3.21) จะได้

$$f(\mathbf{x}^*) + f(\mathbf{y}^*) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x},\, \text{all } \mathbf{y}} \{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})\} \tag{3.22}$$

จากคุณสมบัติ (3.20), บทตั้ง 3.2 และอสมการ (3.22) จะได้

$$f(\mathbf{x}^*) + f(\mathbf{y}^*) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y}) \tag{3.23}$$

นำ $-f(\mathbf{y}^*)$ บวกตลอดอสมการ (3.23) จะได้

$$f(\mathbf{x}^*) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y}) - f(\mathbf{y}^*) \tag{3.24}$$

เนื่องจาก $f(\mathbf{y}) \leq \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y})$ ดังนั้นจากอสมการ (3.24) จะได้

$$f(\mathbf{x}^*) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y}) - \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y})$$

นั่นคือ

$$f(\mathbf{x}^*) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \tag{3.25}$$

ให้ $\mathbf{x}^{**} = \mathbf{x}^*$

จากอสมการ (3.25) จะได้

$$f(\mathbf{x}^{**}) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x})$$

เนื่องจาก $Z(\mathbf{x}^{**})$ เป็นค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของตัวแบบ NK ซึ่ง $Z(\mathbf{x}^{**}) = f(\mathbf{x}^{**})$ และ $R_{NK} = \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x})$ ดังรูปที่ 3.5

ดังนั้น จากการพิสูจน์จึงสามารถสรุปได้ว่า มี $\mathbf{x}^{**}$ ที่ทำให้ $Z(\mathbf{x}^{**}) \geq R_{NK}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>พิสูจน์</u> (2) สมมุติให้มี $\mathbf{x}^{**}$ ที่ทำให้ $Z(\mathbf{x}^{**}) \geq R_{NK}$

นั่นคือ มี $\mathbf{x}^{**}$ ที่ทำให้ $f(\mathbf{x}^{**}) \geq \max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x})$

ให้ $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^{**}$ และมี $\mathbf{y}^*$ ซึ่ง $f(\mathbf{y}^*) = \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y})$ (3.26)

ดังนั้น

$$Z(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) = f(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*) = \frac{f(\mathbf{x}^{*K},\mathbf{y}^{*C}) + f(\mathbf{y}^{*K},\mathbf{x}^{*C})}{2}$$

(จากคุณสมบัติของ $Z(\mathbf{x},\mathbf{y})$ และ $f(\mathbf{x},\mathbf{y})$)

$$= \frac{f(\mathbf{x}^*) + f(\mathbf{y}^*)}{2} \quad \text{(จาก } C = 0\text{)}$$

$$= \frac{f(\mathbf{x}^{**}) + f(\mathbf{y}^*)}{2} \quad \text{(จากข้อกำหนด 3.26)}$$

$$\geq \frac{\max_{\text{all } \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \max_{\text{all } \mathbf{y}} f(\mathbf{y})}{2}$$

(จากสมมติฐานและข้อกำหนด 3.26)

$$= \frac{\max_{\text{all } \mathbf{x},\text{ all } \mathbf{y}} \{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})\}}{2} \quad \text{(จากบทตั้ง 3.2)}$$

$$= \max_{\text{all } \mathbf{x},\text{ all } \mathbf{y}} \frac{f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y})}{2} \quad \text{(จากบทตั้ง 3.1)}$$

$$= R_{NKC} \quad \text{(จากคุณสมบัติของ } R_{NKC} \text{ ดังรูปที่ 3.5)}$$

จากการพิสูจน์ (1) และ (2) ยืนยันได้ว่าตัวแบบ NKC มีผลเฉลยก็ต่อเมื่อตัวแบบ NK มีผลเฉลย นั่นคือตัวแบบ NK สามารถลดทอนมายังตัวแบบ NKC ได้ แต่เนื่องจากตัวแบบ NK $\in \mathcal{NP}$-complete จึงเป็นเหตุให้ตัวแบบ NKC เป็น $\mathcal{NP}$-hard ตามทฤษฎีบท 2.1

จากการพิสูจน์ตอนที่ 1 (ตัวแบบ NKC $\in \mathcal{NP}$), ตอนที่ 2 (ตัวแบบ NKC เป็น $\mathcal{NP}$-hard) และทฤษฎีบท 2.1 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ตัวแบบ NKC $\in \mathcal{NP}$-complete □

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC

เนื่องจากความซับซ้อนของระบบในตัวแบบ NKC ทำให้ไม่สามารถหาค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบในทุก ๆ กรณีได้ กรณีของตัวแบบ NKC ที่สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลดังกล่าวได้นั้นจะเป็นเฉพาะกรณีสุดขีด (Extreme Case) เท่านั้น อันได้แก่

กรณีที่ 1. $K = 0$ และ $C = 0$

กรณีที่ 2. $K = N - 1$ และ $C = 0$ เมื่อ N มีค่ามาก (N approaches infinity)

กรณีที่ 3. $K = 0$ และ $C = N - 1$ เมื่อ N มีค่ามาก

กรณีที่ 4. $K = N - 1$ และ $C = N - 1$ เมื่อ N มีค่ามาก

ในการวิเคราะห์หาค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC ในกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 นั้น จะต้องอาศัยค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน (ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3) ซึ่งกล่าวไว้ว่า

ก. เมื่อ $K = 0$ ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลสูงสุด (Expected of Global Maximum) มีค่าเท่ากับ 2/3

ข. เมื่อ $K = N - 1$ เมื่อ N มีค่ามาก ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลสูงสุดเฉพาะที่ (Expected of Local Maximum) มีค่าเท่ากับ 1/2

ถ้ากำหนดให้ $E[f(\mathbf{x}^{**})]$ แทนค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบ $\mathbf{x}^{**}$ ซึ่งเป็นระบบเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NK ดังนั้น ในกรณีที่ $K = 0$ จะได้ $E[f(\mathbf{x}^{**})] = 2/3$ และในกรณีที่ $K = N - 1$ และ N มีค่ามาก จะได้ $E[f(\mathbf{x}^{**})] = 1/2$

ถ้ากำหนดให้ระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*)$ เป็นผลเฉลยของกรณีสุดขีดของตัวแบบ NKC ทั้ง 4 กรณีดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นการคำนวณค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*)$ ซึ่งแทนด้วย $E[f(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*)]$ สามารถแสดงได้ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1. $K = 0$ **และ** $C = 0$

$$E[f(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*)] = E[\frac{f(\mathbf{x}^{*K},\mathbf{y}^{*C}) + f(\mathbf{y}^{*K},\mathbf{x}^{*C})}{2}]$$ (จากการกำหนดค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC)

$$= \frac{1}{2}\{E[f(\mathbf{x}^*)] + E[f(\mathbf{y}^*)]\}$$ (จากทฤษฎีบท 2.4 และ $C = 0$)

$$= \frac{1}{2}\{\frac{2}{3} + \frac{2}{3}\}$$ (จาก ก.)

$$= \frac{2}{3}$$

กรณีที่ 2. $K = N - 1$ **และ** $C = 0$ **เมื่อ** N **มีค่ามาก**

$$E[f(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}^*)] = E[\frac{f(\mathbf{x}^{*K},\mathbf{y}^{*C}) + f(\mathbf{y}^{*K},\mathbf{x}^{*C})}{2}]$$ (จากการกำหนดค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC)

$$= \frac{1}{2}\{E[f(\mathbf{x}^*) + E[f(\mathbf{y}^*)]\}$$ (จากทฤษฎีบท 2.4 และ $C = 0$)

$$= \frac{1}{2}\{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\}$$ (จาก ข.)

$$= \frac{1}{2}$$

กรณีที่ 3. $K = 0$ **และ** $C = N - 1$ **เมื่อ** N **มีค่ามาก**

$$E[f(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*)] = E[\frac{f(\mathbf{x}^{*0},\mathbf{y}^{*N-1}) + f(\mathbf{y}^{*0},\mathbf{x}^{*N-1})}{2}]$$

(จากการกำหนดค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC)

$$= \frac{1}{2}\{E[f(\mathbf{x}^{*0},\mathbf{y}^{*N-1})] + E[f(\mathbf{y}^{*0},\mathbf{x}^{*N-1})]\}$$ (จากทฤษฎีบท 2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{2}\{E[\frac{\sum_{i=1}^{N} f_i(x_i^0, y_i^{N-1})}{N}] + E[\frac{\sum_{i=1}^{N} f_i(y_i^0, x_i^{N-1})}{N}]\}$$

(จากการกำหนดค่าประสิทธิผลของระบบย่อย ของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC)

$$= \frac{1}{2N}\{\sum_{i=1}^{N} E[f_i(x_i^0, y_i^{N-1})] + \sum_{i=1}^{N} E[f_i(y_i^0, x_i^{N-1})]\}$$ (จากทฤษฎีบท 2.4)

$$= \frac{1}{2N}\{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2}\}$$ (จากทฤษฎีบท 2.5 และการกำหนดให้ N มีค่ามาก)

$$= \frac{N}{2N}$$

$$= \frac{1}{2}$$

กรณีที่ 4. $K = N - 1$ และ $C = N - 1$ เมื่อ N มีค่ามาก

ใช้การพิสูจน์ในทำนองเดียวกับกรณี $K = 0$ และ $C = N - 1$ ซึ่งจะได้ว่า $E[f(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*)] = 1/2$ เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลย และการจำลองทางคอมพิวเตอร์

จากบทที่ 3 ได้แสดงให้เห็นว่า "ตัวแบบ NKC $\in$ $\mathcal{NP}$-complete" ซึ่งวิธีการที่ใช้หาผลเฉลยของปัญหาในลักษณะนี้มี 3 วิธี (ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2) คือ วิธีที่ 1 หาขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเวลาไม่เป็นพหุนามที่เหมาะสมสำหรับหาผลเฉลยที่ดีที่สุด, วิธีที่ 2 หาขั้นตอนวิธีฮิวริสติคที่เหมาะสมสำหรับหาผลเฉลยเฉพาะที่ และวิธีที่ 3 หาขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนเชิงเวลาเป็นพหุนามสำหรับแก้กรณีพิเศษของปัญหา แต่เนื่องจากวิธีที่ 1 เป็นวิธีที่ยุ่งยากและมีความซับซ้อนเชิงเวลาของขั้นตอนวิธีมาก และวิธีที่ 3 เป็นวิธีการแก้ปัญหาตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน ซึ่งเป็นกรณีพิเศษของตัวแบบ NKC (ตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน = ตัวแบบ NKC กรณี C = 0) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอขั้นตอนวิธีฮิวริสติคที่ใช้สำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลของระบบ

4.1 ขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC

ในหัวข้อนี้จะแสดงขั้นตอนของขั้นตอนวิธีฮิวริสติคซึ่งเกิดจากการผสมผสานระหว่างกระบวนการไต่เขา (Hill Climbing Process) และกระบวนการแทนที่ 1 ตำแหน่ง (One-replacement Process) เพื่อใช้สำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC โดยกระบวนการไต่เขาจะใช้สำหรับค้นหาระบบที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าระบบตั้งต้น (Initial System) และกระบวนการแทนที่ 1 ตำแหน่งใช้สำหรับหาระบบย่านใกล้เคียง (Neighbor) ของระบบตั้งต้น พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการนำขั้นตอนวิธีดังกล่าวไปใช้หาผลเฉลยในบางกรณีของตัวแบบ NKC

4.1.1 ขั้นตอนวิธีฮิวริสติค

ขั้นที่ 1 เลือกระบบ $\mathbf{x}$ เป็นระบบตั้งต้นของระบบย่อยที่ 1 และระบบ $\mathbf{y}$ เป็นระบบตั้งต้นของระบบย่อยที่ 2 พร้อมทั้งคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x},\mathbf{y})$: $f(\mathbf{x},\mathbf{y})$

ขั้นที่ 2 หาระบบย่านใกล้เคียง $\mathbf{x}'$ ทั้งหมดของระบบ $\mathbf{x}$ พร้อมทั้งคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}',\mathbf{y})$: $f(\mathbf{x}',\mathbf{y})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 3 พิจารณาว่า มีระบบ $(\mathbf{x}',\mathbf{y})$ ซึ่ง $f(\mathbf{x}',\mathbf{y}) > f(\mathbf{x},\mathbf{y})$ หรือไม่ แต่ถ้ามีให้ทำต่อไปในขั้นที่ 4 แต่ถ้าไม่มีให้ไปทำขั้นที่ 6

ขั้นที่ 4 ให้ $f(\mathbf{x}^*,\mathbf{y}) = \max_{\text{all } \mathbf{x}'} f(\mathbf{x}',\mathbf{y})$

ขั้นที่ 5 กำหนดให้ $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ แล้วทำต่อไปในขั้นที่ 6

ขั้นที่ 6 หาระบบย่านใกล้เคียง $\mathbf{y}'$ ทั้งหมดของระบบ $\mathbf{y}$ พร้อมทั้งคำนวณค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x},\mathbf{y}')$: $f(\mathbf{x},\mathbf{y}')$

ขั้นที่ 7 พิจารณาว่า มีระบบ $(\mathbf{x},\mathbf{y}')$ ซึ่ง $f(\mathbf{x},\mathbf{y}') > f(\mathbf{x},\mathbf{y})$ หรือไม่ ถ้ามีให้ทำต่อไปในขั้นที่ 8 แต่ถ้าไม่มีให้ไปทำขั้นที่ 10

ขั้นที่ 8 ให้ $f(\mathbf{x},\mathbf{y}^*) = \max_{\text{all } \mathbf{y}'} f(\mathbf{x},\mathbf{y}')$

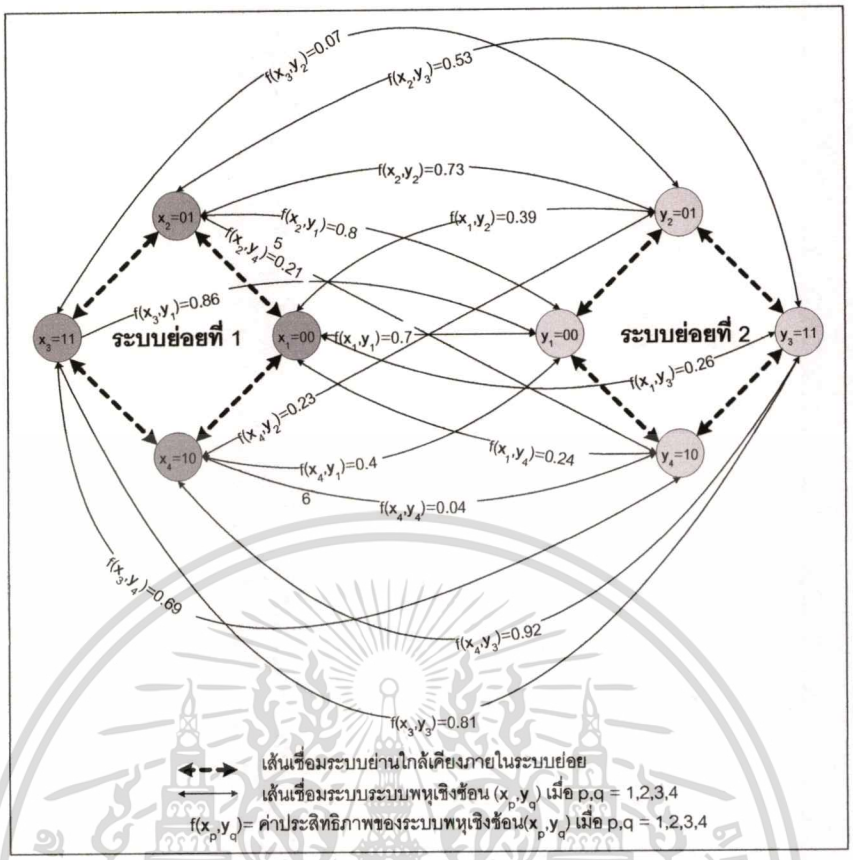
ขั้นที่ 9 กำหนดให้ $\mathbf{y} = \mathbf{y}^*$ และกลับไปทำขั้นที่ 2

ขั้นที่ 10 พิจารณาว่า มีระบบ $(\mathbf{x}',\mathbf{y})$ ซึ่ง $f(\mathbf{x}',\mathbf{y}) > f(\mathbf{x},\mathbf{y})$ หรือไม่ แต่ถ้ามีให้กลับไปทำขั้นที่ 2 แต่ถ้าไม่มีให้หยุดขั้นตอนวิธี แสดงว่าผลเฉลยของตัวแบบ NKC คือ ระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x},\mathbf{y})$

4.1.2 ตัวอย่างการใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติค

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการนำขั้นตอนวิธีฮิวริสติคตามหัวข้อ 4.1.1 ไปใช้สำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี $N = 2$ ซึ่งตัวแบบ NKC ในกรณีนี้จะประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ทั้งหมด 8 ระบบ โดยแบ่งเป็นระบบย่อยที่ 1 ที่เป็นไปได้ 4 ระบบ และระบบย่อยที่ 2 ที่เป็นไปได้ 4 ระบบ อันจะส่งผลให้เกิดระบบพหุเชิงซ้อนจำนวน 16 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงระบบพหุเชิงซ้อนและค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนทั้งหมดในตัวแบบ NKC กรณี N = 2

ต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างผลที่ได้ในแต่ละขั้นของขั้นตอนฮิวริสติคที่ใช้หรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC ในรูปที่ 4.1 โดยกำหนดให้ระบบพหุเชิงซ้อนตั้งต้นคือ ระบบ $(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1)$

<u>การทำซ้ำรอบที่ 1</u>

ขั้นที่ 1 เลือกระบบ $\mathbf{x}_1 = 00$ เป็นระบบตั้งต้นของระบบย่อยที่ 1 และระบบ $\mathbf{y}_1 = 00$ เป็นระบบตั้งต้นของระบบย่อยที่ 2

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1) = 0.7$

ขั้นที่ 2 ระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมดของระบบ $\mathbf{x}_1$ คือ $\mathbf{x}_2 = 01$ และ $\mathbf{x}_4 = 10$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) = 0.85$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1) = 0.46$

ขั้นที่ 3 มีระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1)$ ซึ่ง $f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) > f(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1)$

ขั้นที่ 4 $f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) = \max\{f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1), f(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1)\}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 5 ให้ระบบ $\mathbf{x}_2$ เป็นระบบตั้งต้นใหม่

ขั้นที่ 6 ระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมดของระบบ $\mathbf{y}_1$ คือ $\mathbf{y}_2 = 01$ และ $\mathbf{y}_4 = 10$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_2) = f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_2) = 0.73$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_4) = f(\mathbf{x}_{24},\mathbf{y}_4) = 0.21$

ขั้นที่ 7 ไม่มีระบบพหุเชิงซ้อนใดระหว่างระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_2)$ และ $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_4)$ ที่มีค่าประสิทธิผลมากกว่าระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1)$

ขั้นที่ 10 มีระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1)$ ซึ่ง $f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) > f(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1)$

<u>การทำซ้ำรอบที่ 2</u>

ขั้นที่ 2 ระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมดของระบบ $\mathbf{x}_2$ คือ $\mathbf{x}_1 = 00$ และ $\mathbf{x}_3 = 11$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1) = 0.7$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1) = 0.86$

ขั้นที่ 3 มีระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$ ซึ่ง $f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1) > f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1)$

ขั้นที่ 4 $f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1) = \max\{ f(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_1), f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)\}$

ขั้นที่ 5 ให้ระบบ $\mathbf{x}_3$ เป็นระบบตั้งต้นใหม่

ขั้นที่ 6 ระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมดของระบบ $\mathbf{y}_1$ คือ $\mathbf{y}_2 = 01$ และ $\mathbf{y}_4 = 10$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_2) = f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_2) = 0.07$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_4) = f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_4) = 0.69$

ขั้นที่ 7 ไม่มีระบบพหุเชิงซ้อนใดระหว่างระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_2)$ และ $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_4)$ ที่มีค่าประสิทธิผลมากกว่าระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$

ขั้นที่ 10 มีระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$ ซึ่ง $f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1) > f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1)$

<u>การทำซ้ำรอบที่ 3</u>

ขั้นที่ 2 ระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมดของระบบ $\mathbf{x}_3$ คือ $\mathbf{x}_2 = 01$ และ $\mathbf{x}_4 = 10$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1) = 0.85$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1) = f(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1) = 0.46$

ขั้นที่ 3 ไม่มีระบบพหุเชิงซ้อนใดระหว่างระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_1)$ และ $(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1)$ ที่มีค่าประสิทธิผลมากกว่าระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 6 ระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมดของระบบ $\mathbf{y}_1$ คือ $\mathbf{y}_2 = 01$ และ $\mathbf{y}_4 = 10$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_2) = f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_2) = 0.07$

ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_4) = f(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_4) = 0.69$

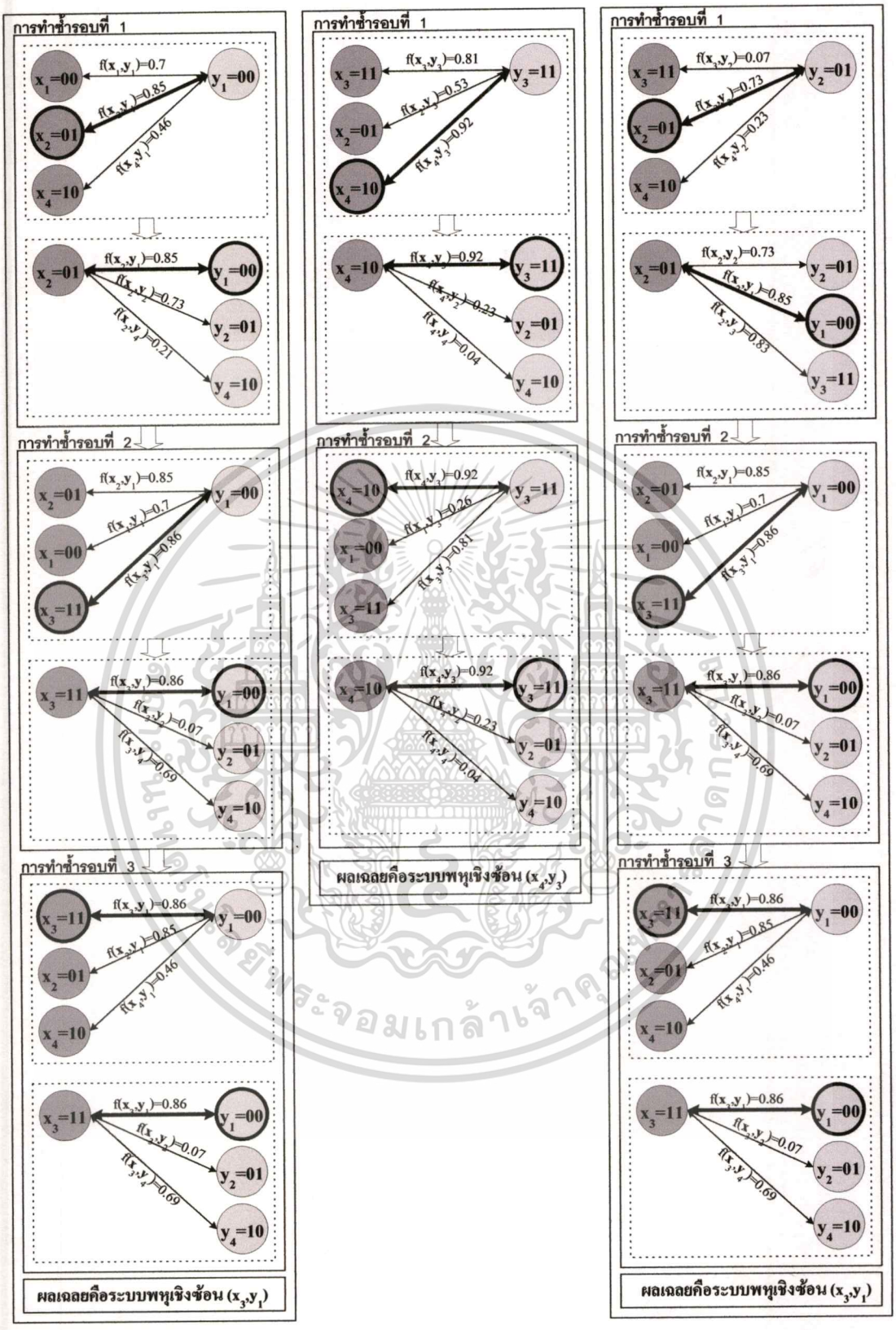
ขั้นที่ 7 ไม่มีระบบพหุเชิงซ้อนใดระหว่างระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_2)$ และ $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_4)$ ที่มีค่าประสิทธิผลมากกว่าระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$

ขั้นที่ 10 ไม่มีระบบพหุเชิงซ้อนใดระหว่างระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_2,\mathbf{y}_2)$ และ $(\mathbf{x}_4,\mathbf{y}_1)$ ที่มีค่าประสิทธิผลมากกว่าระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$

ดังนั้นได้ผลเฉลยของตัวแบบ NKC คือระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_3,\mathbf{y}_1)$

อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนวิธีฮิวริสติคไม่ได้มีเพียงผลเฉลยเดียว ผลเฉลยที่ได้จะขึ้นอยู่กับระบบเชิงซ้อนที่เลือกเป็นระบบตั้งต้น ระบบตั้งต้นที่แตกต่างกันอาจจะให้ผลเฉลยเหมือนหรือต่างกันก็ได้ (พิจารณาตัวอย่างในรูปที่ 4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



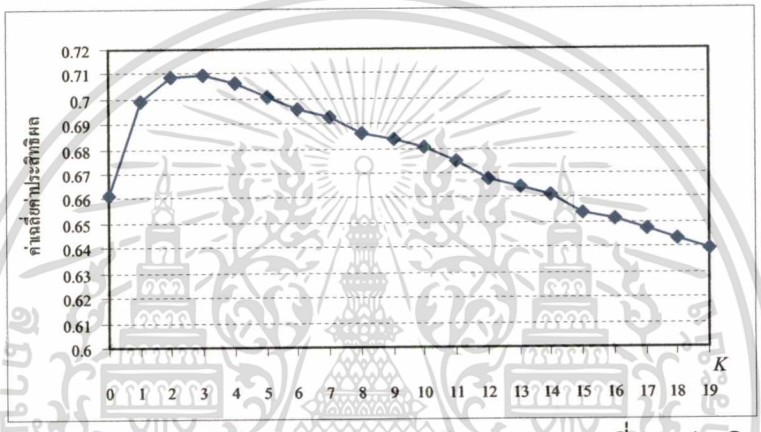
รูปที่ 4.2 แสดงแผนผังขั้นตอนวิธีฮิวริสติคสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC ในรูปที่ 4.1 ที่ระบบตั้งต้นแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

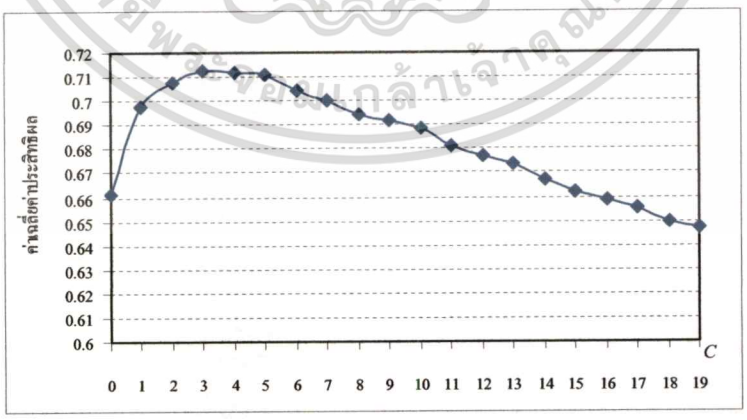
4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับตัวแบบ NKC

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC จากโปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นด้วยภาษา C++ ซึ่งได้ขนายมาจากโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ของตัวแบบ NK ที่ Ming-Chi Tsai เป็นผู้เขียนไว้ (ซอสโค้ดของโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก)

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าจำนวน K และ C ซึ่งเป็นจำนวนเต็มในช่วง [0, N – 1] มีผลต่อค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม K และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ C = 0 โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม C และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ K = 0 โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

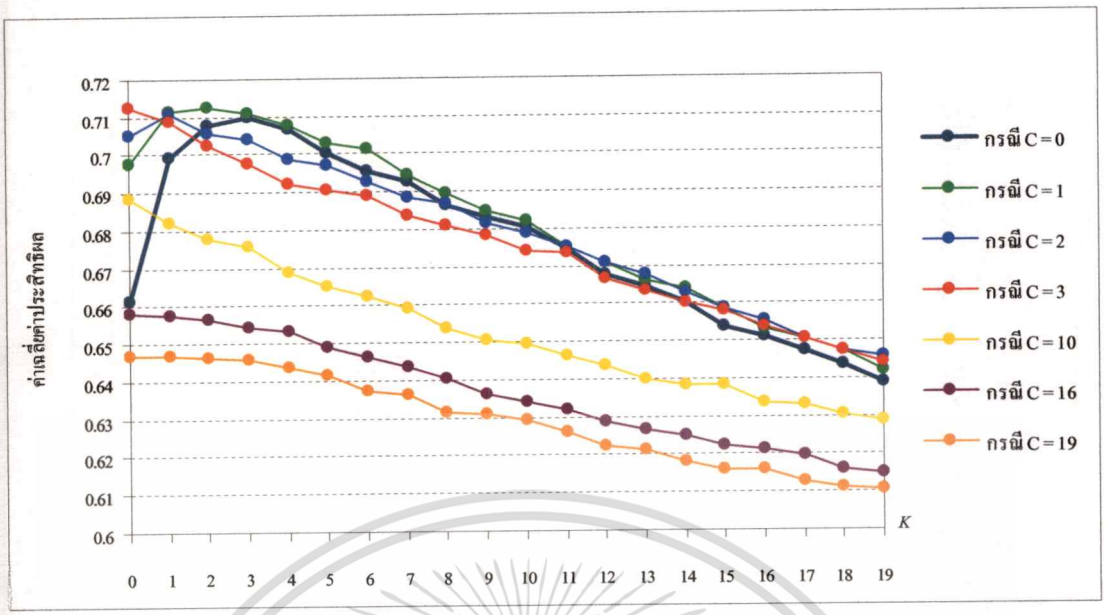
จากรูปที่ 4.3 สามารถยืนยันได้ว่า ตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน เป็นกรณีเฉพาะของตัวแบบ NKC โดยพบว่า เมื่อกำหนดให้ C = 0 ผลการจำลองของตัวแบบ NKC ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบกับจำนวนเต็ม K จะให้ผลเช่นเดียวกับผลการจำลองของตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน (รูปที่ 2.4)

ถ้ากำหนดให้ค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลเป็นตัวแทนของค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC, K คือ จำนวนปัจจัยภายในที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลของระบบ และ C คือ จำนวนปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลของระบบ จะพบว่าในกรณีที่ไม่มีทั้งปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกมากระทบต่อสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบเป็นอิสระต่อกัน (C = 0 และ K = 0) ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 2/3 ส่วนในกรณีที่มีเฉพาะปัจจัยภายในเป็นจำนวนน้อยกว่าขนาดของระบบอยู่ 1 จำนวนมากระทบสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบ หรือกล่าวว่าสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบถูกกระทบด้วยสมาชิกที่อยู่ภายในระบบทั้งหมด (C = 0 และ K = N – 1) เมื่อขนาดของระบบมีค่ามาก (N approaches infinity) ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 1/2 ซึ่งการคำนวณค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลดังกล่าวได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3

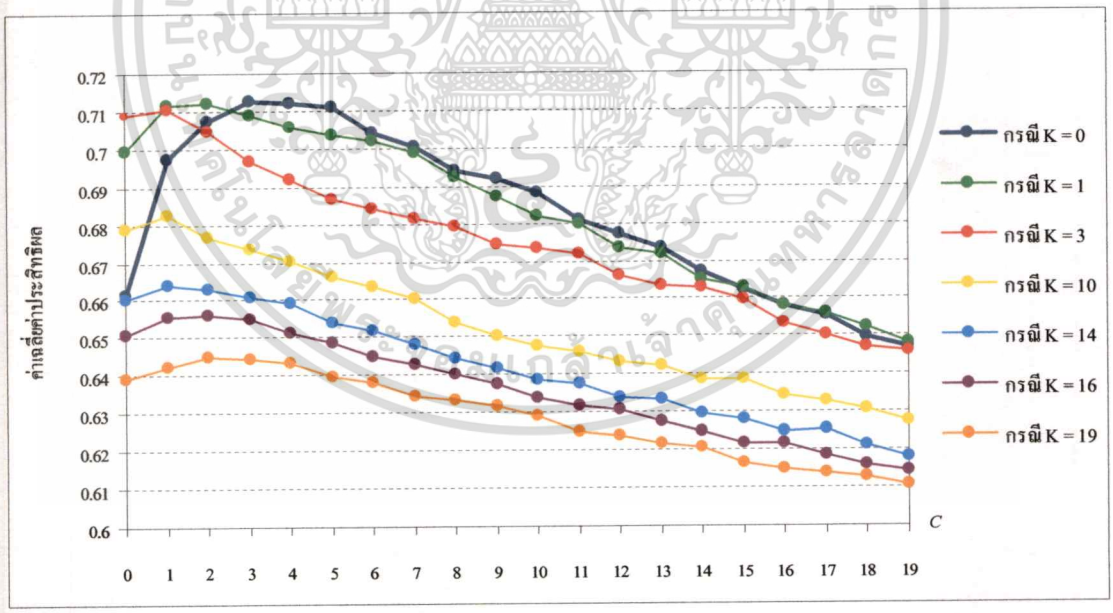
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า จำนวนเต็ม C ทำหน้าที่เช่นเดียวกับจำนวนเต็ม K ในตัวแบบ NK ของคอฟฟ์แมน (สังเกตและเปรียบเทียบรูปที่ 4.4 กับรูปที่ 2.1) นั่นคือ ในกรณี K = 0 ค่าประสิทธิผลของระบบขึ้นอยู่กับจำนวน C ซึ่งเป็นจำนวนปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบ กล่าวคือ ในขณะที่ไม่มีจำนวนปัจจัยภายนอกมากระทบ (C = 0) ค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC มีค่าประมาณ 2/3 (ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลเท่ากับ 2/3) ค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าน้อย(C = 1, 2, 3) และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าสูงขึ้น (C ≥ 4) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าประสิทธิผลดังกล่าวจะมีค่าเข้าใกล้ 1/2 เมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าเข้าใกล้ขนาดของระบบในขณะที่ขนาดของระบบมีค่ามาก (ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลในกรณี K = 0 และ C = N – 1 เท่ากับ 1/2)

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กับจำนวนปัจจัยภายในและจำนวนปัจจัยภายนอกแตกต่างกัน จะพบว่าในกรณีที่ทั้งจำนวนปัจจัยภายในและจำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าน้อยค่าประสิทธิผลของระบบจะมีค่าสูง จากนั้นค่าประสิทธิผลดังกล่าวจะลดลงเมื่อจำนวนปัจจัยทั้งสองเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม K และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ C∈{0,1,2,3,10,16,19} โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนเต็ม C และค่าเฉลี่ยค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กรณี N = 20 และ K∈{0,1,3,10,14,16,19} โดยใช้การจำลอง 500 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า ในขณะที่จำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าน้อย (C = 0, 1, 2) ลักษณะของกราฟซึ่งแทนความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กับจำนวนปัจจัยภายใน จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของความวิบัติเชิงซ้อน และจุดเริ่มต้นของกราฟ (K = 0) จะมีค่าประสิทธิผลของระบบสูงขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกสูงขึ้น แต่เมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกเพิ่มขึ้น (C ≥ 3) ความวิบัติเชิงซ้อนจะหายไป ลักษณะของกราฟจะลดลงทางเดียว (Monotonic Decreasing) และจุดเริ่มต้นของกราฟจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าสูงขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.6 จะพบว่าลักษณะของกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC กับจำนวนปัจจัยภายนอกจะมีความวิบัติเชิงซ้อนเกิดขึ้นในทุก ๆ ค่าของจำนวนปัจจัยภายใน นอกจากนี้ยังพบว่าจุดเริ่มต้นของกราฟ (C = 0) จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยภายในมีค่าน้อย (K = 0, 1, 2, 3) จากนั้นจุดเริ่มต้นของกราฟจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อจำนวนปัจจัยภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น (K ≥ 4)

นอกจากนี้ถ้าพิจารณากรณีสุดขีด (Extreme Case) ของจำนวนปัจจัยภายในและจำนวนปัจจัยภายนอก (K = N – 1 และ C = N – 1) จะพบว่าเมื่อขนาดของระบบมีค่ามาก (N approaches infinity) ค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC จะมีค่าเท่ากับ 1/2 (การคำนวณค่าคาดหวังสำหรับค่าประสิทธิผลของระบบได้แสดงไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3)

จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นผลเฉลยของตัวแบบ NKC มีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยภายในและจำนวนปัจจัยภายนอก โดยถ้าทั้งปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกมีจำนวนน้อย จะส่งผลให้ค่าประสิทธิผลของระบบดังกล่าวมีค่ามาก แต่ในทางกลับกันถ้าทั้งปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าประสิทธิผลของระบบดังกล่าวก็จะมีค่าน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ตัวแบบระบบพหุเชิงซ้อน

ในบทนี้จะแสดงตัวอย่างการนำตัวแบบ NKC ไปประยุกต์ใช้สำหรับอธิบายการเลือกบุคคลเข้าทำงานในองค์แบบหลายแผนก ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม โดยการเลือกบุคคลเข้าทำงานในแต่ละตำแหน่งจะต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพการทำงานของบุคคลนั้นอันจะขึ้นอยู่กับความสามารถเฉพาะตัวและความสัมพันธ์กับผู้ร่วมงาน ในตอนต้นของเนื้อหาจะแสดงลักษณะตัวอย่างองค์กรที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบ NKC พร้อมทั้งแปลงส่วนประกอบในองค์กรไปยังส่วนประกอบของระบบในตัวแบบ และในตอนท้ายจะแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยของตัวแบบเพื่อให้บรรลุจุดมุ่งหมายขององค์กร

จากลักษณะของตัวแบบ NKC ในงานวิจัยนี้พบว่า องค์กรที่สามารถนำตัวแบบ NKC ไปประยุกต์ใช้ได้นั้นจะต้องเป็นองค์กรแบบสองแผนก โดยที่ทั้งสองแผนกจะต้องประกอบด้วยตำแหน่งงานที่เท่ากัน อีกทั้งบุคคลที่จะมาทำงานในแต่ละตำแหน่งของแต่ละแผนก คือ 1 ใน 2 คนที่ได้รับการคัดเลือกเท่านั้น เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นจะขอยกตัวอย่างองค์กรแบบสองแผนก ซึ่งแต่ละแผนกประกอบด้วย 3 ตำแหน่งงาน และกำหนดให้บุคคลในแต่ละตำแหน่งต้องทำงานร่วมกับบุคคลอื่น 2 คนที่อยู่ในแผนกเดียวกันและอีก 2 คนจากในต่างแผนก โดยที่ผู้ร่วมงานจากต่างแผนกจะต้องไม่ใช่บุคคลที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับบุคคลนั้น ตัวอย่างบุคคลที่สามารถทำงานได้ในแต่ละตำแหน่งงานของทั้งสองแผนก และประสิทธิภาพการทำงานของบุคคลนั้นแสดงดังตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แสดงตัวอย่างบุคคลที่สามารถทำงานได้ในแต่ละตำแหน่งของแต่ละแผนกในองค์กรแบบสองแผนก

ตำแหน่ง / แผนก	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
แผนกที่ 1	A11 หรือ B11	A12 หรือ B12	A13 หรือ B13
แผนกที่ 2	A21 หรือ B21	A22 หรือ B22	A23 หรือ B23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละบุคคลในตารางที่ 5.1

ประสิทธิภาพการทำงานของ "A11" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A12 & A13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.987	0.33	0.443	0.262
A12 & B13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.471	0.535	0.548	0.345
B12 & A13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.644	0.954	0.644	0.029
B12 & B13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.947	0.672	0.556	0.28

ประสิทธิภาพการทำงานของ "B11" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A12 & A13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.81	0.407	0.563	0.613
A12 & B13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.805	0.098	0.258	0.946
B12 & A13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.829	0.091	0.007	0.537
B12 & B13 &			
A22 &		B22 &	
A23	B23	A23	B23
0.684	0.017	0.928	0.48

ประสิทธิภาพการทำงานของ "A12" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A11 & A13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.271	0.084	0.17	0.024
A11 & B13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.163	**0.086**	**0.028**	**0.632**
B11 & A13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.772	0.15	0.059	0.029
B11 & B13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.848	0.799	0.914	0.143

ประสิทธิภาพการทำงานของ "B12" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A11 & A13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.629	0.731	0.703	0.191
A11 & B13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.576	**0.448**	**0.302**	**0.062**
B11 & A13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.361	0.737	0.555	0.184
B11 & B13 &			
A21 &		B21 &	
A23	B23	A23	B23
0.822	0.087	0.282	0.603

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ประสิทธิภาพการทำงานของ "A13" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A11 & A12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.976	0.909	0.289	0.173
A11 & B12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.798	0.007	0.355	0.134
B11 & A12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.821	0.842	0.195	0.813
B11 & B12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.679	0.894	0.046	0.547

ประสิทธิภาพการทำงานของ "B13" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A11 & A12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.096	0.104	0.521	0.209
A11 & B12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.167	0.04	0.242	0.387
B11 & A12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.831	0.173	0.595	0.705
B11 & B12 &			
A21 &		B21 &	
A22	B22	A22	B22
0.005	0.145	0.247	0.883

ประสิทธิภาพการทำงานของ "A21" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A22 & A23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.51	0.041	0.344	0.103
A22 & B23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.395	0.855	0.622	0.42
B22 & A23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.161	0.408	0.756	0.033
B22 & B23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.487	0.756	0.023	0.608

ประสิทธิภาพการทำงานของ "B21" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A22 & A23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.963	0.628	0.224	0.797
A22 & B23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.666	0.042	0.151	0.669
B22 & A23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.533	0.223	0.624	0.907
B22 & B23 &			
A12 &		B12 &	
A13	B13	A13	B13
0.803	0.248	0.581	0.702

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ประสิทธิภาพการทำงานของ "A22" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A21 & A23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.269	0.464	0.865	0.711
A21 & B23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.534	0.731	0.144	0.167
B21 & A23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.42	0.126	0.437	0.094
B21 & B23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.641	0.963	0.225	0.217

ประสิทธิภาพการทำงานของ "B22" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A21 & A23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.324	0.107	0.344	0.521
A21 & B23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.971	0.751	0.437	0.928
B21 & A23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.054	0.171	0.973	0.71
B21 & B23 &			
A11 &		B11 &	
A13	B13	A13	B13
0.853	0.427	0.344	0.25

ประสิทธิภาพการทำงานของ "A23" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

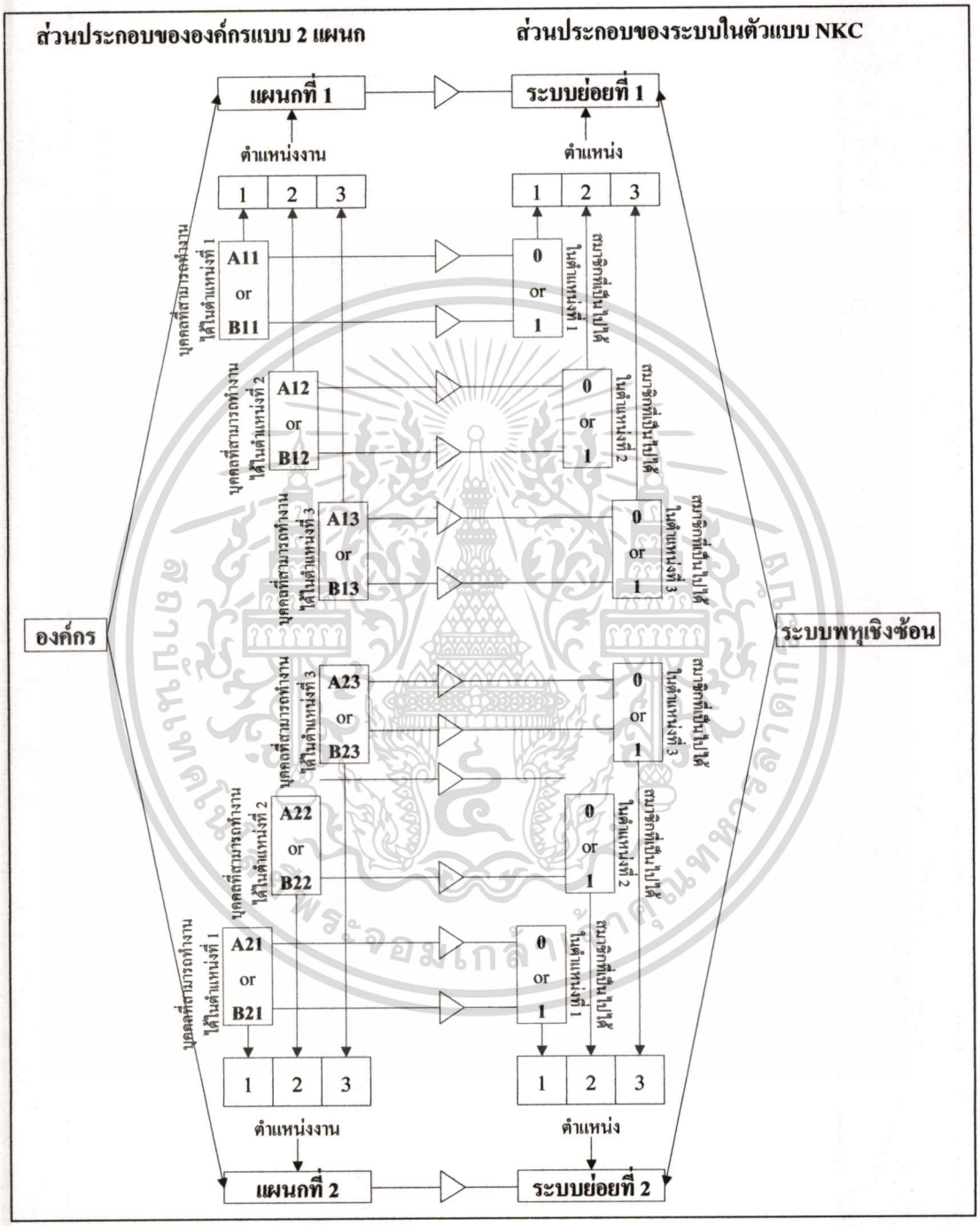
ในแผนก		ต่างแผนก	
A21 & A22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.146	0.987	0.774	0.478
A21 & B22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.219	0.454	0.586	0.023
B21 & A22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.124	0.504	0.63	0.162
B21 & B22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.965	0.352	0.842	0.947

ประสิทธิภาพการทำงานของ "B23" เมื่อทำงานร่วมกับบุคคลอื่น

ในแผนก		ต่างแผนก	
A21 & A22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.383	0.066	0.153	0.893
A21 & B22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.121	0.648	0.421	0.431
B21 & A22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.545	0.574	0.318	0.491
B21 & B22 &			
A11 &		B11 &	
A12	B12	A12	B12
0.518	0.69	0.652	0.742

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงส่วนประกอบของตัวอย่างองค์กรแบบสองแผนกตามตารางที่ 5.1 ไปยังส่วนประกอบของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการแปลงส่วนประกอบขององค์กรตามตาราง 5.1 ไปยังส่วนประกอบของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

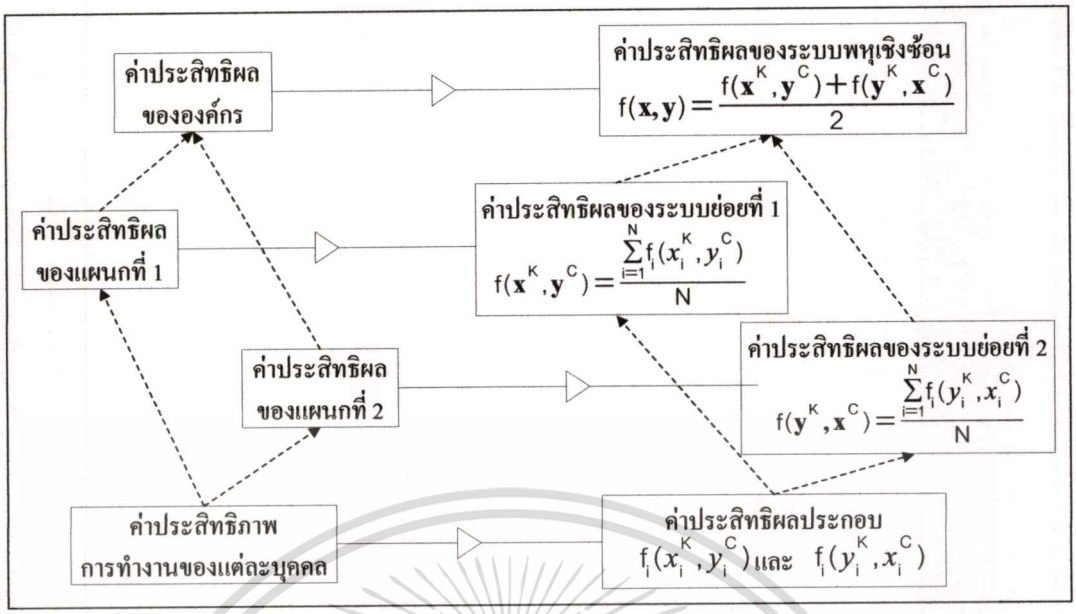
จากการแปลงส่วนประกอบในองค์กรไปยังส่วนประกอบของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC ดังรูปที่ 5.1 ทำให้สามารถแสดงลักษณะของระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ซึ่งสัมพันธ์กับบุคคลที่สามารถทำงานได้ในแต่ละตำแหน่งของทั้งสองแผนก

ตารางที่ 5.3 แสดงลักษณะของระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC สำหรับองค์กรตามตาราง 5.1

แผนกที่ 1			**ระบบย่อยที่ 1**	**แผนกที่ 2**			**ระบบย่อยที่ 2**
บุคคลที่เป็นไปได้ในตำแหน่งที่			**ที่เป็นไปได้ในตัวแบบ NKC**	**บุคคลที่เป็นไปได้ในตำแหน่งที่**			**ที่เป็นไปได้ในตัวแบบ NKC**
1	**2**	**3**		**1**	**2**	**3**	
A11	A12	A13	**000**	A21	A22	A23	**000**
A11	A12	B13	**001**	A21	A22	B23	**001**
A11	B12	A13	**010**	A21	B22	A23	**010**
B11	A12	A13	**100**	B21	A22	A23	**100**
A11	B12	B13	**011**	A21	B22	B23	**011**
B11	A12	B13	**101**	B21	A22	B23	**101**
B11	B12	A13	**110**	B21	B22	A23	**110**
B11	B12	B13	**111**	B21	B22	B23	**111**

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับการแปลงส่วนประกอบในองค์กรไปยังส่วนประกอบของระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC คือ การแปลงประสิทธิผลขององค์กรไปยังประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงการแปลงค่าประสิทธิผลขององค์กรไปยังค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน

จากรูปที่ 5.2 จะพบว่า ค่าประสิทธิผลขององค์กรขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิผลของแผนกที่ 1 และแผนกที่ 2 เพื่อให้สอดคล้องกับตัวแบบ NKC ในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดให้ค่าประสิทธิผลขององค์กรเป็นค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิผลของทั้งสองแผนก สำหรับค่าประสิทธิผลของแต่ละแผนกจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละบุคคลในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ค่าประสิทธิผลของทั้งสองแผนกเกิดจากค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละบุคคลในทุกตำแหน่ง ค่าประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละบุคคลจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานของบุคคลนั้นเมื่อต้องทำงานร่วมกับบุคคลอื่นทั้งในแผนกเดียวกันและต่างแผนก

จากการแปลงส่วนประกอบขององค์กรในรูป 5.1, ค่าประสิทธิภาพการทำงานของบุคคลในแต่ละตำแหน่งงานในตาราง 5.2, ระบบย่อยที่ 1 และระบบย่อยที่ 2 ที่เป็นไปได้ของตัวแบบ NKC ในตารางที่ 5.3 ทำให้สามารถระบุลักษณะการจัดหมู่ของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันจำนวน K+C+1 ตัว (ในที่นี้ K = 2 และ C = 2) ซึ่งสัมพันธ์กับความร่วมมือในการทำงานของบุคคลในแต่ละตำแหน่ง ได้ดังตารางที่ 5.4 และในตารางนี้ยังแสดงค่าประสิทธิผลประกอบที่สัมพันธ์กับการจัดหมู่ดังกล่าว, ค่าประสิทธิผลของแต่ละระบบย่อย และค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนที่เป็นไปได้ทั้งหมดอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ลักษณะการจัดหมู่ของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันและค่าประสิทธิผลของระบบในตัวแบบ NKC สำหรับองค์กรในตารางที่ 5.1

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	0	0	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.987	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.745	0.527
		2	0	0	0	0	0		0.271			
		3	0	0	0	0	0		0.976			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_1 = 000$	1	0	0	0	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.510	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.308	
		2	0	0	0	0	0		0.269			
		3	0	0	0	0	0		0.146			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	1	0	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.330	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.463	0.450
		2	0	0	0	0	1		0.084			
		3	0	0	0	0	0		0.976			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_2 = 001$	1	0	1	0	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.395	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.437	
		2	0	0	0	1	0		0.534			
		3	0	0	1	0	0		0.383			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	0	0	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.443	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.541	0.388
		2	0	0	0	0	0		0.271			
		3	1	0	0	0	0		0.909			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_3 = 010$	1	0	0	0	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.161	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.235	
		2	0	0	1	0	0		0.324			
		3	0	1	0	0	0		0.219			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	0	0	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.987	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.482	0.492
		2	1	0	0	0	0		0.170			
		3	0	0	0	0	1		0.289			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_4 = 100$	1	0	0	1	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.963	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.502	
		2	0	1	0	0	0		0.420			
		3	0	0	0	1	0		0.124			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	1	0	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.262	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.418	0.472
		2	0	0	0	0	1		0.084			
		3	1	0	0	0	0		0.909			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_5 = 011$	1	0	1	0	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.487	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.526	
		2	0	0	1	1	0		0.971			
		3	0	1	1	0	0		0.121			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	1	0	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.330	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.214	0.416
		2	1	0	0	0	1		0.024			
		3	0	0	0	0	1		0.289			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_6 = 101$	1	0	1	1	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.666	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.617	
		2	0	1	0	1	0		0.641			
		3	0	0	1	1	0		0.545			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	0	0	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.443	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.262	0.390
		2	1	0	0	0	0		0.170			
		3	1	0	0	0	1		0.173			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_7 = 110$	1	0	0	1	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.533	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.517	
		2	0	1	1	0	0		0.054			
		3	0	1	0	1	0		0.965			
ระบบแบบเรียงร้อย	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_1 = 000$	1	1	0	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.262	$f(\mathbf{x}_1^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.153	0.439
		2	1	0	0	0	1		0.024			
		3	1	0	0	0	1		0.173			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_8 = 111$	1	0	1	1	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.803	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_1^C)$	0.725	
		2	0	1	1	1	0		0.853			
		3	0	1	1	1	0		0.518			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.471	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.243	0.230
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	0	0	0	1	0		0.163			
		3	0	0	1	0	0		0.096			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	0	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.041	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.217	
	$\mathbf{y}_1 = 000$	2	0	0	0	0	1		0.464			
		3	0	0	0	0	0		0.146			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.535	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.239	0.448
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	0	0	0	1	1		0.086			
		3	0	0	1	0	0		0.096			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	0	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.855	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.656	
	$\mathbf{y}_2 = 001$	2	0	0	0	1	1		0.731			
		3	0	0	1	0	0		0.383			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.548	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.272	0.258
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	0	0	0	1	0		0.163			
		3	1	0	1	0	0		0.104			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	0	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.408	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.245	
	$\mathbf{y}_3 = 010$	2	0	0	1	0	1		0.107			
		3	0	1	0	0	0		0.219			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.471	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.340	0.316
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	1	0	0	1	0		0.028			
		3	0	0	1	0	1		0.521			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	1	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.628	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.293	
	$\mathbf{y}_4 = 100$	2	0	1	0	0	1		0.126			
		3	0	0	0	1	0		0.124			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.345	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.178	0.361
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	0	0	0	1	1		0.086			
		3	1	0	1	0	0		0.104			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	0	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.756	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.543	
	$\mathbf{y}_5 = 011$	2	0	0	1	1	1		0.751			
		3	0	1	1	0	0		0.121			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	0	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.535	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.563	0.540
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	1	0	0	1	1		0.632			
		3	0	0	1	0	1		0.521			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	1	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.042	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.517	
	$\mathbf{y}_6 = 101$	2	0	1	0	1	1		0.963			
		3	0	0	1	1	0		0.545			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.548	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.262	0.357
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	1	0	0	1	0		0.028			
		3	1	0	1	0	1		0.209			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	1	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.223	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.453	
	$\mathbf{y}_7 = 110$	2	0	1	1	0	1		0.171			
		3	0	1	0	1	0		0.965			
ระบบหุ่นเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	0	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.345	$f(\mathbf{x}_2^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.395	0.397
	$\mathbf{x}_2 = 001$	2	1	0	0	1	1		0.632			
		3	1	0	1	0	1		0.209			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	1	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.248	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_2^C)$	0.398	
	$\mathbf{y}_8 = 111$	2	0	1	1	1	1		0.427			
		3	0	1	1	1	0		0.518			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.644	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.690	0.612
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	0	0	1	0	0	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.629			
		3	0	1	0	0	0	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.798			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	0	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.344	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.533	
	$\mathbf{y}_1 = 000$	2	0	0	0	0	0	$f_2(y_2^K, x_1^C)$	0.269			
		3	1	0	0	0	0	$f_3(y_3^K, x_1^C)$	0.987			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.954	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.828	0.618
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	0	0	1	0	1	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.731			
		3	0	1	0	0	0	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.798			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	0	0	1	$f_1(y_1^K, x_2^C)$	0.622	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.407	
	$\mathbf{y}_2 = 001$	2	0	0	0	1	0	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.534			
		3	1	0	1	0	0	$f_3(y_3^K, x_2^C)$	0.066			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.644	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.427	0.469
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	0	0	1	0	0	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.629			
		3	1	1	0	0	0	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.007			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	0	1	1	$f_1(y_1^K, x_3^C)$	0.756	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.511	
	$\mathbf{y}_3 = 010$	2	0	0	1	0	0	$f_2(y_2^K, x_3^C)$	0.324			
		3	1	1	0	0	0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.454			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.644	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.567	0.412
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	1	0	1	0	0	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.703			
		3	0	1	0	0	1	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.355			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	1	0	1	$f_1(y_1^K, x_4^C)$	0.224	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.256	
	$\mathbf{y}_4 = 100$	2	0	1	0	0	0	$f_2(y_2^K, x_4^C)$	0.420			
		3	1	0	0	1	0	$f_3(y_3^K, x_4^C)$	0.124			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.029	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.256	0.402
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	0	0	1	0	1	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.731			
		3	1	1	0	0	0	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.007			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	0	1	1	$f_1(y_1^K, x_5^C)$	0.023	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.547	
	$\mathbf{y}_5 = 011$	2	0	0	1	1	0	$f_2(y_2^K, x_5^C)$	0.971			
		3	1	1	1	0	0	$f_3(y_3^K, x_5^C)$	0.648			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.954	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.500	0.478
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	1	0	1	0	1	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.191			
		3	0	1	0	0	1	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.355			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	1	0	1	$f_1(y_1^K, x_6^C)$	0.151	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.455	
	$\mathbf{y}_6 = 101$	2	0	1	0	1	0	$f_2(y_2^K, x_6^C)$	0.641			
		3	1	0	1	1	0	$f_3(y_3^K, x_6^C)$	0.574			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.644	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.494	0.419
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	1	0	1	0	0	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.703			
		3	1	1	0	0	1	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.134			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	1	1	1	$f_1(y_1^K, x_7^C)$	0.624	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.343	
	$\mathbf{y}_7 = 110$	2	0	1	1	0	0	$f_2(y_2^K, x_7^C)$	0.054			
		3	1	1	0	1	0	$f_3(y_3^K, x_7^C)$	0.352			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.029	$f(\mathbf{x}_3^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.118	0.413
	$\mathbf{x}_3 = 010$	2	1	0	1	0	1	$f_2(x_2^K, y_1^C)$	0.191			
		3	1	1	0	0	1	$f_3(x_3^K, y_1^C)$	0.134			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	1	1	1	$f_1(y_1^K, x_8^C)$	0.581	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_3^C)$	0.708	
	$\mathbf{y}_8 = 111$	2	0	1	1	1	0	$f_2(y_2^K, x_8^C)$	0.853			
		3	1	1	1	1	0	$f_3(y_3^K, x_8^C)$	0.690			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.810	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.801	0.759
	x_4=100	2	0	1	0	0	0		0.772			
		3	0	0	0	1	0		0.821			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	0	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.510	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.716	
	y_1= 000	2	1	0	0	0	0		0.865			
		3	0	0	0	0	1		0.774			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.407	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.459	0.345
	x_4=100	2	0	1	0	0	1		0.150			
		3	0	0	0	1	0		0.821			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	0	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.395	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.231	
	y_2= 001	2	1	0	0	1	0		0.144			
		3	0	0	1	0	1		0.153			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.563	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.726	0.545
	x_4=100	2	0	1	0	0	0		0.772			
		3	1	0	0	1	0		0.842			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	0	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.161	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.364	
	y_3= 010	2	1	0	1	0	0		0.344			
		3	0	1	0	0	1		0.586			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.810	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.355	0.516
	x_4=100	2	1	1	0	0	0		0.059			
		3	0	0	0	1	1		0.195			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	1	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.963	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.677	
	y_4= 100	2	1	1	0	0	0		0.437			
		3	0	0	0	1	1		0.630			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.613	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.535	0.492
	x_4=100	2	0	1	0	0	1		0.150			
		3	1	0	0	1	0		0.842			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	0	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.487	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.448	
	y_5= 011	2	1	0	1	1	0		0.437			
		3	0	1	1	0	1		0.421			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	0	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.407	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.210	0.307
	x_4=100	2	1	1	0	0	1		0.029			
		3	0	0	0	1	1		0.195			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	1	0	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.666	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.403	
	y_6= 101	2	1	1	0	1	0		0.225			
		3	0	0	1	1	1		0.318			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.563	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.478	0.631
	x_4=100	2	1	1	0	0	0		0.059			
		3	1	0	0	1	1		0.813			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	1	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.533	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.783	
	y_7= 110	2	1	1	1	0	0		0.973			
		3	0	1	0	1	1		0.842			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	0	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.613	$f(\mathbf{x}_4^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.485	0.542
	x_4=100	2	1	1	0	0	1		0.029			
		3	1	0	0	1	1		0.813			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	1	1	0	$f_i(y_i^K, x_i^C)$	0.803	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_4^C)$	0.600	
	y_8= 111	2	1	1	1	1	0		0.344			
		3	0	1	1	1	1		0.652			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่	$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0 1 0 1 0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.947	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.563	0.387
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	0 0 1 1 0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.576			
		3	0 1 1 0 0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.167			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 0 0 0 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.103	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.211	
	$\mathbf{y}_1 = 000$	2	0 0 0 0 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.464			
		3	1 0 0 0 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.066			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1 1 0 1 0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.672	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.429	0.417
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	0 0 1 1 1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.448			
		3	0 1 1 0 0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.167			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 1 0 0 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.420	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.406	
	$\mathbf{y}_2 = 001$	2	0 0 0 1 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.731			
		3	1 0 1 0 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.066			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0 1 0 1 1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.556	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.391	0.294
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	0 0 1 1 0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.576			
		3	1 1 1 0 0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.040			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 0 0 1 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.033	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.198	
	$\mathbf{y}_3 = 010$	2	0 0 1 0 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.107			
		3	1 1 0 0 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.454			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0 1 0 1 0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.947	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.497	0.486
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	1 0 1 1 0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.302			
		3	0 1 1 0 1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.242			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 0 1 0 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.797	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.476	
	$\mathbf{y}_4 = 100$	2	0 1 0 0 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.126			
		3	1 0 0 1 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.504			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1 1 0 1 1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.280	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.256	0.463
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	0 0 1 1 1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.448			
		3	1 1 1 0 0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.040			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 1 0 1 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.608	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.669	
	$\mathbf{y}_5 = 011$	2	0 0 1 1 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.751			
		3	1 1 1 0 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.648			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1 1 0 1 0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.672	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.325	0.530
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	1 0 1 1 1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.062			
		3	0 1 1 0 1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.242			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 1 1 0 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.669	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.735	
	$\mathbf{y}_6 = 101$	2	0 1 0 1 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.963			
		3	1 0 1 1 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.574			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0 1 0 1 1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.556	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.415	0.446
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	1 0 1 1 0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.302			
		3	1 1 1 0 1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.387			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 0 1 1 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.907	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.477	
	$\mathbf{y}_7 = 110$	2	0 1 1 0 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.171			
		3	1 1 0 1 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.352			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1 1 0 1 1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.280	$f(\mathbf{x}_5^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.243	0.425
	$\mathbf{x}_5 = 011$	2	1 0 1 1 1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.062			
		3	1 1 1 0 1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.387			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1 1 1 1 1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.702	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_5^C)$	0.606	
	$\mathbf{y}_8 = 111$	2	0 1 1 1 1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.427			
		3	1 1 1 1 0	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.690			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	0	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.805	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.828	0.668
		2	0	1	0	1	0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.848			
		3	0	0	1	1	0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.831			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_1$= 000	1	1	0	0	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.041	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.509	
		2	1	0	0	0	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.711			
		3	0	0	0	0	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.774			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	1	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.098	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.576	0.484
		2	0	1	0	1	1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.799			
		3	0	0	1	1	0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.831			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_2$= 001	1	1	1	0	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.855	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.392	
		2	1	0	0	1	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.167			
		3	0	0	1	0	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.153			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	0	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.258	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.426	0.466
		2	0	1	0	1	0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.848			
		3	1	0	1	1	0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.173			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_3$= 010	1	1	0	0	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.408	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.505	
		2	1	0	1	0	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.521			
		3	0	1	0	0	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.586			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	0	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.805	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.771	0.611
		2	1	1	0	1	0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.914			
		3	0	0	1	1	1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.595			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_4$= 100	1	1	0	1	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.628	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.451	
		2	1	1	0	0	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.094			
		3	0	0	0	1	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.630			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	1	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.946	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.639	0.671
		2	0	1	0	1	1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.799			
		3	1	0	1	1	0	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.173			
	ระบบย่อยที่ 3 $\mathbf{y}_5$= 011	1	1	1	0	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.756	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.702	
		2	1	0	1	1	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.928			
		3	0	1	1	0	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.421			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	1	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.946	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.639	0.671
		2	1	1	0	1	1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.799			
		3	0	0	1	1	1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.173			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_6$= 101	1	1	1	1	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.756	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.702	
		2	1	1	0	1	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.928			
		3	0	0	1	1	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.421			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	0	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.258	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.626	0.609
		2	1	1	0	1	0	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.914			
		3	1	0	1	1	1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.705			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_7$= 110	1	1	0	1	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.223	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.592	
		2	1	1	1	0	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.710			
		3	0	1	0	1	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.842			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1 $\mathbf{x}_6$=101	1	1	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.946	$f(\mathbf{x}_6^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.598	0.491
		2	1	1	0	1	1	$f_2(x_2^K, y_2^C)$	0.143			
		3	1	0	1	1	1	$f_3(x_3^K, y_3^C)$	0.705			
	ระบบย่อยที่ 2 $\mathbf{y}_8$= 111	1	1	1	1	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.248	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_6^C)$	0.383	
		2	1	1	1	1	1	$f_2(y_2^K, x_2^C)$	0.250			
		3	0	1	1	1	1	$f_3(y_3^K, x_3^C)$	0.652			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.829	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.623	0.639
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	0	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.361			
		3	0	1	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.679			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	0	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.622	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.655	
	$\mathbf{y}_1 = 000$	2	1	0	0	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.865			
		3	1	0	0	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.478			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.091	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.502	0.459
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	0	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.737			
		3	0	1	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.679			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	0	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.622	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.415	
	$\mathbf{y}_2 = 001$	2	1	0	0	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.144			
		3	1	0	1	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.478			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.258	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.504	0.439
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	0	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.361			
		3	1	1	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.894			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	0	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.756	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.374	
	$\mathbf{y}_3 = 010$	2	1	0	1	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.344			
		3	1	1	0	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.023			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.829	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.477	0.506
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	1	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.555			
		3	0	1	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.046			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	1	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.224	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.536	
	$\mathbf{y}_4 = 100$	2	1	1	0	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.437			
		3	1	0	0	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.947			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.537	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.723	0.510
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	0	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.737			
		3	1	1	0	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.894			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	0	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.023	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.297	
	$\mathbf{y}_5 = 011$	2	1	0	1	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.437			
		3	1	1	1	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.431			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	1	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.091	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.107	0.198
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	1	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.184			
		3	0	1	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.046			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	1	0	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.151	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.289	
	$\mathbf{y}_6 = 101$	2	1	1	0	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.225			
		3	1	0	1	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.491			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	0	1	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.007	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.370	0.609
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	1	1	1	0	0	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.555			
		3	1	1	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.547			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	0	1	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.624	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.848	
	$\mathbf{y}_7 = 110$	2	1	1	1	0	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.973			
		3	1	1	0	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.947			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	0	1	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.029	$f(\mathbf{x}_7^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.253	0.405
	$\mathbf{x}_7 = 110$	2	1	1	1	0	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.184			
		3	1	1	0	1	1	$f_1(x_1^K, y_1^C)$	0.547			
	ระบบย่อยที่ 2	1	0	1	1	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.581	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_7^C)$	0.556	
	$\mathbf{y}_8 = 111$	2	1	1	1	1	0	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.344			
		3	1	1	1	1	1	$f_1(y_1^K, x_1^C)$	0.742			

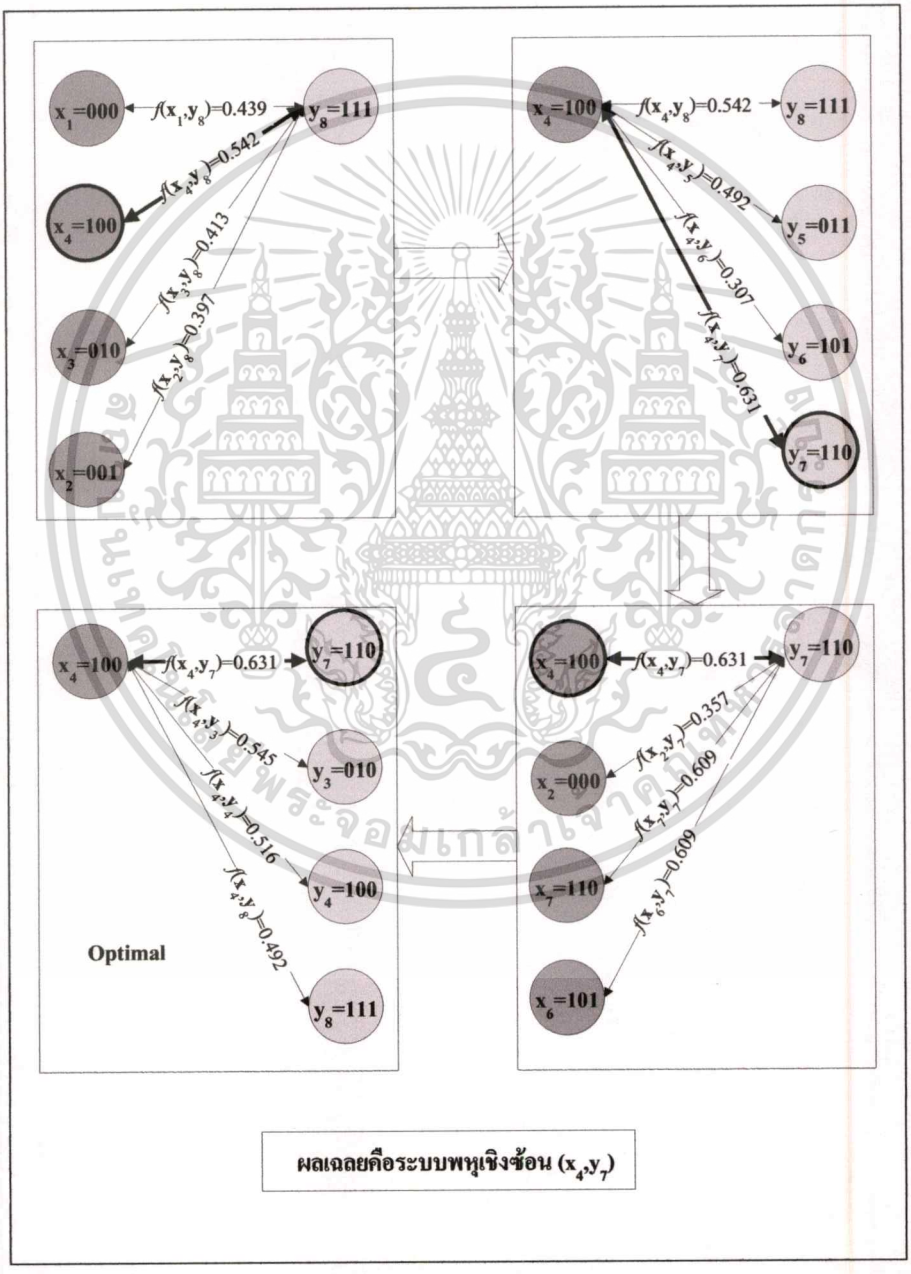
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลักษณะของระบบ		ตำแหน่งที่พิจารณา (i)	การจัดหมู่					$f_i(x_i^K, y_i^C)$ และ $f_i(y_i^K, x_i^C)$		$f(\mathbf{x}_p^K, \mathbf{y}_q^C)$ และ $f(\mathbf{y}_q^K, \mathbf{x}_p^C)$		$f(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_q)$
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	1	1	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.684	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_1^C)$	0.504	0.467
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	0	1	1	1	0		0.822			
		3	0	1	1	1	0		0.005			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	0	0	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.103	$f(\mathbf{y}_1^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.431	
	$\mathbf{y}_1 = 000$	2	1	0	0	0	1		0.711			
		3	1	0	0	0	1		0.478			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	1	1	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.017	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_2^C)$	0.036	0.196
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	0	1	1	1	1		0.087			
		3	0	1	1	1	0		0.005			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	0	0	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.420	$f(\mathbf{y}_2^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.355	
	$\mathbf{y}_2 = 001$	2	1	0	0	1	1		0.167			
		3	1	0	1	0	1		0.478			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	1	1	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.928	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_3^C)$	0.632	0.412
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	0	1	1	1	0		0.822			
		3	1	1	1	1	0		0.145			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	0	1	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.033	$f(\mathbf{y}_3^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.192	
	$\mathbf{y}_3 = 010$	2	1	0	1	0	1		0.521			
		3	1	1	0	0	1		0.023			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	1	1	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.684	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_4^C)$	0.404	0.509
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	1	1	1	1	0		0.282			
		3	0	1	1	1	1		0.247			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	1	0	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.797	$f(\mathbf{y}_4^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.613	
	$\mathbf{y}_4 = 100$	2	1	1	0	0	1		0.094			
		3	1	0	0	1	1		0.947			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	1	1	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.480	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_5^C)$	0.237	0.447
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	0	1	1	1	1		0.087			
		3	1	1	1	1	0		0.145			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	0	1	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.608	$f(\mathbf{y}_5^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.656	
	$\mathbf{y}_5 = 011$	2	1	0	1	1	1		0.928			
		3	1	1	1	0	1		0.431			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	1	1	0	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.017	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_6^C)$	0.289	0.493
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	1	1	1	1	1		0.603			
		3	0	1	1	1	1		0.247			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	1	0	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.669	$f(\mathbf{y}_6^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.696	
	$\mathbf{y}_6 = 101$	2	1	1	0	1	1		0.928			
		3	1	0	1	1	1		0.491			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	0	1	1	1	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.928	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_7^C)$	0.698	0.776
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	1	1	1	1	0		0.282			
		3	1	1	1	1	1		0.883			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	0	1	1	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.907	$f(\mathbf{y}_7^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.855	
	$\mathbf{y}_7 = 110$	2	1	1	1	0	1		0.710			
		3	1	1	0	1	1		0.947			
ระบบพหุเชิงซ้อน	ระบบย่อยที่ 1	1	1	1	1	1	1	$f_i(x_i^K, y_i^C)$	0.480	$f(\mathbf{x}_8^K, \mathbf{y}_8^C)$	0.655	0.610
	$\mathbf{x}_8 = 111$	2	1	1	1	1	1		0.603			
		3	1	1	1	1	1		0.883			
	ระบบย่อยที่ 2	1	1	1	1	1	1	$f(y_i^K, x_i^C)$	0.702	$f(\mathbf{y}_8^K, \mathbf{x}_8^C)$	0.565	
	$\mathbf{y}_8 = 111$	2	1	1	1	1	1		0.250			
		3	1	1	1	1	1		0.742			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะแสดงขั้นตอนสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC สำหรับองค์กรตามตารางที่ 5.1 ซึ่งจะใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติคดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งในรูปดังกล่าวจะเริ่มพิจารณาจากองค์กรที่มี A11, A12, และ A13 ทำงานในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของแผนกที่ 1 ตามลำดับ ส่วนในแผนกที่ 2 มี B21, B22, และ B23 ทำงานในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับเช่นกัน (องค์กรในลักษณะดังกล่าวสัมพันธ์กับระบบพหุเชิงซ้อน $(\mathbf{x}_1,\mathbf{y}_8)$ ในตารางที่ 5.4)



รูปที่ 5.3 แสดงขั้นตอนวิธีฮิวริสติคเพื่อหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC สำหรับตัวอย่างองค์กรในตาราง 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 จะพบว่าเมื่อกำหนดให้ระบบพหุเชิงซ้อน (x_1, y_8) เป็นระบบตั้งต้น โดยขั้นตอนวิธีฮิวริสติคซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการไต่เขาและกระบวนการแทนที่ 1 ตำแหน่ง ระบบพหุเชิงซ้อนที่ได้ในขั้นถัดมา คือ ระบบพหุเชิงซ้อน (x_4, y_8) และสุดท้ายจะได้ผลเฉลย คือ ระบบพหุเชิงซ้อน (x_4, y_7) นั่นคือ ถ้าผู้บริหารในองค์กรตัดสินใจเลือกบุคคลเข้ามาทำงานโดยเริ่มพิจารณาจากค่าประสิทธิผลขององค์กรที่มี A11, A12, และ A13 ทำงานในแผนกที่ 1 และ B21, B22, และ B23 ทำงานในแผนกที่ 2 เขาจะพบว่าองค์กรที่ประกอบด้วยผู้ร่วมงานดังกล่าวจะมีค่าประสิทธิผล 0.439 ต่อมาเมื่อเปลี่ยนบุคคลที่ทำงานในแผนกที่ 1 เพียง 1 ตำแหน่ง และพิจารณาจากทุก ๆ ลักษณะองค์กรที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่า องค์กรที่มี B11, A12 และ A13 ทำงานในแผนกที่ 1 และ B21, B22, และ B23 ทำงานในแผนกที่ 2 จะให้ค่าประสิทธิผลสูงที่สุด คือ 0.542 จากนั้นเมื่อเปลี่ยนบุคคลที่ทำงานในแผนกที่ 2 เพียง 1 ตำแหน่ง และพิจารณาจากทุก ๆ ลักษณะองค์กรที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่า องค์กรที่มี B11, A12 และ A13 ทำงานในแผนกที่ 1 และ B21, B22 และ A13 ทำงานในแผนกที่ 2 ให้ค่าประสิทธิผลสูงที่สุด คือ 0.631 ในขั้นต่อมาจะพิจารณาค่าประสิทธิผลขององค์กรที่เปลี่ยนแปลงคนทำงานในแผนกที่ 1 และแผนกที่ 2 อีกครั้ง พบว่า องค์กรที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดยังคงเป็นองค์ที่มี B11, A12 และ A13 ทำงานในแผนกที่ 1 และ B21, B22 และ A13 ทำงานในแผนกที่ 2

อย่างไรก็ตามหากผู้บริหารเริ่มต้นพิจาณาจากองค์กรที่มีลักษณะแตกต่างไป ผลเฉลยที่ได้อาจจะเหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ ดังนั้นลักษณะขององค์กรตามความต้องการของผู้บริหารจึงขึ้นอยู่กับลักษณะขององค์กรที่ตั้งต้นพิจารณาของผู้บริหารเอง

สำหรับในกรณีที่องค์กรประกอบด้วยหลายตำแหน่งงานการพิจารณาหาบุคคลมาทำงานในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้องค์กรที่ได้มีประสิทธิผลสูงสุดไม่ใช่เรื่องง่ายนัก ทั้งอาจจะต้องใช้เวลานานและเสียค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย โดยกระบวนการฮิวริสติคดังกล่าวข้างต้นแม้ว่าองค์กรที่ได้จะไม่ใช่องค์กรที่มีค่าประสิทธิผลสูงสุด แต่ก็ถือว่าเป็นองค์กรที่มีค่าประสิทธิผลสูงในระดับหนึ่ง (จากตัวอย่างข้างต้นค่าประสิทธิผลสูงสุดของลักษณะขององค์กรที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือ 0.776 และลักษณะขององค์กรที่เป็นผลเฉลยของตัวอย่างข้างต้นมีค่าประสิทธิผล 0.631 และพบว่าองค์กรในลักษรณะดังกล่าวเป็นองค์กรที่มีค่าประสิทธิผลสูงเป็นอันดับที่ 7 จากทั้งหมด 64 ลักษณะ) อีกทั้งกระบวนการดังกล่าวยังช่วยร่นระยะเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการคัดเลือกบุคคลที่เหมาะสมมาทำงานในองค์กรอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอตัวแบบ NKC ซึ่งเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษาระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วม ซึ่งเป็นตัวแบบที่มุ่งเน้นค้นหาระบบพหุเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงที่สุด โดยมีสมมติฐานของตัวแบบดังต่อไปนี้

(1) ระบบพหุเชิงซ้อนในตัวแบบ NKC เกิดจากระบบเชิงซ้อนเพียง 2 ระบบเท่านั้น

(2) ระบบเชิงซ้อนทั้งสองระบบมีขนาดเท่ากับ N

(3) สมาชิกที่เป็นไปได้ในแต่ละตำแหน่งของระบบเชิงซ้อนมีรูปแบบที่เป็นไปได้เพียง 2 ลักษณะ

(4) ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนเกิดจากค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิผลของระบบย่อยทั้งหมด

(5) ค่าประสิทธิผลของแต่ละระบบย่อยเกิดจากค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิผลประกอบทั้งหมดของระบบ

(6) ค่าประสิทธิผลประกอบของระบบแทนด้วยเลขสุ่มที่มีการแจกแจงเอกรูปบนช่วง [0,1] ซึ่งสัมพันธ์กับการจัดหมู่ของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันจำนวน K+C+1 ตัว

(7) การจัดหมู่ของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกัน เป็นการแสดงสมาชิกที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ที่มีผลกระทบกับสมาชิกที่พิจารณา สำหรับในงานวิจัยนี้ กำหนดให้สมาชิกที่พิจารณาอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของการจัดหมู่ ทางด้านซ้ายคือสมาชิกครึ่งหนึ่งของจำนวนสมาชิกภายในที่มีผลกระทบและอีกครึ่งหนึ่งของสมาชิกภายนอกที่มีผลกระทบส่วนด้านขวาคือสมาชิกที่มีผลกระทบอีกครึ่งหนึ่งที่เหลือของสมาชิกที่อยู่ภายในและภายนอกระบบที่มีผลกระทบต่อสมาชิกที่พิจารณา โดยการกำหนดตำแหน่งของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อกันยึดหลักการของแถวคอยแบบวงกลม

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบ NKC ที่สร้างขึ้นเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมเชิงการจัด ยิ่งกว่านั้นยังสามารถแสดงได้อีกว่า ตัวแบบ NKC เป็นปัญหาหนึ่งใน $\mathcal{NP}$-complete ทำให้ทราบแนวทางในการหาขั้นตอนวิธีสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอขั้นตอนวิธีฮิวริสติคสำหรับหาผลเฉลยของตัวแบบ NKC ซึ่งขั้นตอนวิธีดังกล่าวเป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการไต่เขาและกระบวนการแทนที่ 1 ตำแหน่ง โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการดังกล่าวแม้ผลเฉลยที่ได้อาจจะไม่ใช่ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ก็เป็นผลเฉลยที่พอรับได้ในระดับหนึ่ง กล่าวคือ ผลเฉลยที่ได้จะเป็นระบบพหุเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าค่าประสิทธิผลของระบบย่านใกล้เคียงทั้งหมด

ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถสรุปได้ว่าจำนวนความสัมพันธ์ของสมาชิกทั้งภายในและภายนอกของระบบเชิงซ้อนที่ประกอบขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อน มีผลต่อประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนนั้น ๆ กล่าวคือ ในขณะที่จำนวนความสัมพันธ์ทั้งภายในและภายนอกมีค่าน้อย ค่าประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนจะมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนความสัมพันธ์ไม่ว่าจะเป็นภายในหรือภายนอกระบบจะเป็นผลทำให้ประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อนมีค่าลดลงตามลักษณะของความวิบัติเชิงซ้อน

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายระบบพหุเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยระบบเชิงซ้อนเพียง 2 ระบบเท่านั้น ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นอย่างง่าย แต่ระบบพหุเชิงซ้อนที่พบได้ในปัญหาจริงส่วนใหญ่แล้วมักจะสามารถแทนได้ด้วยระบบพหุเชิงซ้อนที่เกิดจากหลาย ๆ ระบบเชิงซ้อน อันจะสามารถนำตัวแบบในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อไป

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางในการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแบบของระบบพหุเชิงซ้อนอันจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป ซึ่งผู้วิจัยได้แยกแนวทางในการศึกษาต่อออกเป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. เพิ่มจำนวนของระบบเชิงซ้อนที่ประกอบขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อน
2. กำหนดให้ระบบเชิงซ้อนที่ประกอบขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อนมีขนาดแตกต่างกัน
3. เพิ่มลักษณะของสมาชิกที่เป็นไปได้ในแต่ละตำแหน่งของระบบเชิงซ้อน
4. เพิ่มการถ่วงน้ำหนักเพื่อระบุความสำคัญของสมาชิกในแต่ละตำแหน่งของระบบเชิงซ้อน
5. เปลี่ยนแปลงลักษณะของเลขสุ่มที่สัมพันธ์กับการจัดหมู่ของสมาชิก โดยอาจจะใช้เลขสุ่มที่มีการแจกแจงปกติแทนเลขสุ่มที่มีการแจกแจงเอกรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้
6. เปลี่ยนแปลงลักษณะการจัดหมู่ของสมาชิกที่มีผลกระทบตัวกันโดยอาจจะใช้การสุ่มตำแหน่งของสมาชิกที่มีผลกระทบต่อสมาชิกในตำแหน่งที่พิจารณา
7. เปลี่ยนแปลงการเลือกระบบย่านใกล้เคียงของแต่ละระบบย่อยในขั้นตอนวิธีฮิวริสติคเป็นแบบมาก่อนเลือกก่อน (First Come First Serve) ซึ่งหมายถึงการเลือกระบบย่านใกล้เคียงของระบบย่อยที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อนระบบแรกที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าระบบพหุเชิงซ้อนตั้งต้น หรือใช้การสุ่มเลือกระบบย่านใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบย่อยที่ประกอบกันขึ้นเป็นระบบพหุเชิงซ้อนที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าระบบพหุเชิงซ้อนตั้งต้นก็ได้

8. เพิ่มจำนวนการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการหาระบบย่านใกล้เคียงของขั้นตอนวิธีฮิวริสติคเพื่อหาระบบย่านใกล้เคียงที่แตกแต่งไป

อย่างไรก็ตามตัวแบบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นเพียงตัวแบบเริ่มต้นสำหรับระบบพหุเชิงซ้อนแบบเป้าหมายร่วมเท่านั้น ผู้วิจัยหวังว่าตัวแบบดังกล่าวจะเป็นตัวแบบเริ่มต้นที่สามารถพัฒนาไปสู่ตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Perelson A.S. and Macken C.A. "Protein Evolution on Partially Correlated Landscapes" **Proc. Natl. Acad. Sci.**, vol. 92, 1995. pp. 9657-9661.

[2] Kauffman S.A., Weinberger E.W. "The NK Model of Rugged Fitness Landscapes and Its Application to Maturation of the Immune Response" **J. theor. Biol.**, vol. 141, 1989. pp. 211-245.

[3] Solow D., Burnetas A., Tsai M. and Greenspon N.S. "Understanding and Attenuating the Complexity Catastrophe in Kauffman's NK Model of Genome Evolution" **Complexity**, vol. 5, no. 1, 1999. pp. 1-21.

[4] Macken C.A., Perelson A.S. "Protein Evolution on Rugged Landscapes" **Proc. Natl. Acad. Sci.**, vol. 86, 1989. pp. 6491-6195.

[5] Kauffman S.A. **The Origins of Order : Self Organization and Selection in Evolution.** Oxford : Oxford University Press. 1990.

[6] Kauffman S.A. **The Origins of Order.** Oxford : Oxford University Press. 1993.

[7] Derrida B. "Random-Energy Model: an Exactly Solvable Model of Disordered Systems" **Phys. Rev. B**, vol. 24, 1981. pp. 2613-2620.

[8] Westhoff F.H., Yarbrough B.V. and Yarbrough R.M. "Complexity, Organization, and Stuart Kauffman's The Origins of Order" **J. of Economic Behavior & Org.** vol. 29, 1996. pp. 1-25.

[9] Levinthal D.A. "Adaptation on Rugged Lan dscapes" **Mgmt Sci.** vol. 43, 1997. pp. 934-950.

[10] Kauffman S.A., Johnsen S. "Coevolution to the Edge of Chaos: Coupled Fitness Landscapes, Poised States, and Coebolutionary Avalanches" **J. theor. Biol.** vol. 149, 1991. pp. 467-505.

[11] Brassard G., Bratley P. **Algorithmics Theory and Practice.** New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1987.

[12] Thomas H.C., Charles E. L., Ronald L.R. and Clifford S. **Introduction to Algorithm.** 2nd Ed. London : The MIT Cambridge Press. 2001.

[13] Ghahramani S. **Fundamentals of Probability.** 2nd Ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

[14] Bak P., Flyvgjerg H. and Lautrup B. "Coevolution in Rugged Fitness Landscape" **Phy. Rev. A**, vol. 46, 1992. pp. 6724-6730.

[15] Solow D., Vairaktarakis G., Piderit K.S. and Tsai M.C. "Managerial Insights into the Effects of Interactions among Members of a Team" **Mgmt. Sci.** 2002.

[16] Kruse R.L. **Data Structures and Program Design.** 3rd Ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ในส่วนนี้จะแสดงซอสโค้ด (Source Code) ของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยเขียนด้วยภาษา C ++ สำหรับจำลองตัวแบบ NKC เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิผลของระบบพหุเชิงซ้อน ภายตัวโปรแกรมผู้วิจัยได้สอดแทรกการอธิบายขั้นตอนการทำงานไว้โดยละเอียด

```
/*
   My original NKC version     : Program to simulate multiple complex systems

   In the NKC model, a system consists of 2 subsytems which both complex systems.
   Eeah subsytem consist of N parts, where each part can contains one of 2
   components, denoted by 0 and 1. The contribution to performance of part i in 1st
   subsystem (x) that is affected by the other (y), namely fi(xi/K,yi/C), denote on the
   components in part i,on the components in K (0<=K<=N-1) other parts in the
   subsystem and on the components in C (0<=C<=N-1) parts in the other subsystem,
   for example, the K components in K/2 parts on either side of part i, wrapping around
   when necessary and the C components that same parts of the K components from
   the other subsystem.

   Assumption
      Contribution to Performance of Complex System x : fi(xi/K,yi/C)
      Contribution to Performance of Complex system y : fi(yi/K,xi/C)
         fi(xi/K,yi/C),fi(yi/C,xi/K) = Uniform Random Number between [0,1]
      Performance of Systems x that is affected by System y : f(x/K,y/C)
         f(x/K,y/C) = Average of fi(xi/K,yi/C) for all i
      Performance of Systems y that is affected by System x : f(y/K,x/C)
         f(y/K,x/C) = Average of fi(yi/C,xi/K) for all i
      Overall Performance or Performance of multiple complex systems (x,y) : f(x,y)
         f(x,y) = [f(x/K,y/C) + f(y/K,x/C)]/2
*/
//************************* PROGRAM START *******************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <iostream.h>

// Define the value of N, K and C in the NKC model.
#define N 20
#define K 19
#define C 19

// Define the simulation times
#define Rtm 25

// Define structure for node in the binary tree used to strore the contribution of
// each combination of component
struct Tnode
   {
      double BV;
      struct Tnode *Left,*Right;
   };

// Define the structure for first subsystem.
// This link-list will used to store the system from the starting first subsystem
struct Xlist
   {
      // A system is represented as a binary N-vector, each element is denoted
      // by 0 or 1.
      char FX[N];
      // The performance of system that effected by the other is a real value.
      double OptVX;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    // A pointer to the next system whose performance is better than current system.
    struct Xlist *Next;
};

// Define the structure for second subsystem.
// This link-list will used to store the system from the starting second subsystem
struct Ylist
{
    // A system is represented as a binary N-vector, each element is denoted
    // by 0 or 1.
    char FY[N];
    // The performance of system is a real value.
    double OptVY;
    // A pointer to the next system whose performance is better than current system.
    struct Ylist *Next;
};

// Define the structure for multiple system.
// This link-list will used to store the multiple system from the starting both
// subsystems to the local maxinum.
struct CheckMax
{
    // A system from first subsystem.
    char X[N];
    // The performance of the system that effect by the other.
    double OptX;
    // A system from second subsystem.
    char Y[N];
    // The performance of the system that effect by the other.
    double OptY;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        // Overall performance of the multiple systems
        double avg_Opt;
        // A pointer to the next multiple systems whose team performance is better than
        // current system.
        struct CheckMax *Next;
    };

// Generate a random number between 0 and 1
double uniform01()
    {
        double U;
        U= (double) (rand()%1000*0.001);
        return U;
    }

// This program generate the initial system.
// Input : no.
// Output : system x (a system in first subsystem) = binary N-vector,
//          system y (a system in second subsystem) = binary N-vector.
void InitS(char S[N])
    {
        int i;
        double U;
        for(i=0;i<N;i++)
            {
                // Generate component, 0 or 1, for each part randomly
                U=uniform01();
                if(U<=0.5)
                    S[i]='1';
                else
                    S[i]='0';
            }
    }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// This program find the K parts in x and C part in y that affect the contribution of
// part i.
// Input : x,y and index i
// Output: K+C+1 parts
void KCblock(char InX[N],char InY[N],char OutKC[K+C+1],int ind)
   {
      // If K is a odd number, then (K+1)/2 - 1 distributed in the right and (K+1)/2
      // distributed in the left.
      // If C is a odd number, then (C+1)/2 - 1 distributed in the right and (C+1)/2
      // distributed in the left,both from the other system.
      int j,RightX,LeftX,RightY,LeftY;
      RightX=K/2;
      LeftX= (int)ceil((double)K/2);
      RightY=C/2;
      LeftY= (int)ceil((double)C/2);
      for (j=0;j<LeftY;j++)
         OutKC[j] =InY[(ind-LeftY+j+N)%N];
      for (j=0;j<LeftX;j++)
         OutKC[j+LeftY] =InX[(ind-LeftX+j+N)%N];
      OutKC[LeftX+LeftY] =InX[ind];
      for (j=0;j<RightX;j++)
         OutKC[j+LeftX+LeftY+1] =InX[(ind+j+1+N)%N];
      for (j=0;j<RightY;j++)
         OutKC[j+LeftY+LeftX+1+RightX] =InY[(ind+j+1+N)%N];
   }

// This program find the contribution for each component i.
// Input : the value of K+C+1 parts that affect the contribution of part i
//         and a binary tree that store the contribution of all components.
// Output      : the contribution of component i if found or -1 if not found.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
double Search(struct Tnode *BT, char Kz[],int Id)
  {
     int i;
     for(i=0;i<Id;i++)
        {
           if((Kz[i] =='1')&&(BT->Right! =NULL))
              BT=BT->Right;
           else
              {
                 if((Kz[i] =='0')&&(BT->Left! =NULL))
                    BT=BT->Left;
                 else
                    return -1;
              }
        } //end of for.
     return BT->BV;
  }

// This program generate the neighbors for current system x or system y.
// Input : Current system x or Current system y.
// Output : the ith neigbor of x or y.
void Neighb(char S[N],char Outnbi[N],int ind)
   {
      int i;
      for(i=0;i<N;i++)
         Outnbi[i] =S[i];
      if(S[ind] = = '0')
         Outnbi[ind] ='1';
      else
         Outnbi[ind] ='0';
   }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// This program create a binary tree to store the contribution of each component.
// Input : the combination of K+C+1 parts that decide the contribution of part i.
// Output : a binary tree that store contribution of each component.
Tnode *Btree(struct Tnode *Rt,char Ky[])
  {
    struct Tnode *Temp,*Crnt;
    int i;
    double U;
    // First, call 'Search' to check if the contribution already exist.
    U=Search(Rt,Ky,K+C+1);
    // If the contribution does not exist, then generate as a random value
    // between 0 and 1
    if(U<0)
      {
        Crnt=Rt;
        for(i=0;i<K+C+1;i++)
          {
            if(Ky[i] == '1')
              {
                if(Crnt->Right == NULL)
                  {
                    Temp=new Tnode;
                    Temp->BV=0;
                    Temp->Left=NULL;
                    Temp->Right=NULL;
                    Crnt->Right=Temp;
                  }
                Crnt=Crnt->Right;
              }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                if(Ky[i] =='0')
                  {
                    if(Crnt->Left==NULL)
                      {
                        Temp=new Tnode;
                        Temp->BV=0;
                        Temp->Left=NULL;
                        Temp->Right=NULL;
                        Crnt->Left=Temp;
                      }
                    Crnt=Crnt->Left;
                  }
              }
            Crnt->BV=uniform01();
        }
    return Rt;
}

// This program generate the performance of starting system that affected by the other.
double FirstT(struct Tnode *BT[],char In1[N],char In2[N])
  {
    int i;
    char KB0[K+C+1];
    double U,Int_V;
    Int_V=0;
    for(i=0;i<N;i++)
      {
        KCblock(In1,In2,KB0,i);
        BT[i] =new Tnode;
        BT[i]->BV=0;
        BT[i]->Left=NULL;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            BT[i]->Right=NULL;
            BT[i] =Btree(BT[i],KB0);
            U=Search(BT[i],KB0,K+C+1);
            // The performance of starting system that affected by the other is
            // the average of the contribution to performance.
            Int_V+=U/N;
        }
    return Int_V;
}

// This program generate the performance of multiple complex systems.
void IntP_current (struct CheckMax * check[],struct Xlist *hstX_p, struct Ylist *hstY_p,
                   double avg[])
{
    int i;
    check[0] =new CheckMax;
    check[0]->OptX=0;
    check[0]->OptY=0;
    check[0]->avg_Opt=0;
    check[0]->Next=NULL;
    for(i=0;i<N;i++)
        {
            check[0]->X[i] =hstX_p->FX[i];
            check[0]->Y[i] =hstY_p->FY[i];
        }
    check[0]->OptX=hstX_p->OptVX;
    check[0]->OptY=hstY_p->OptVY;
    // The performance of multimple complex systems (overall performance) is
    // average of the performace from affectation of 2 subsystems.
    avg[0] = (hstX_p->OptVX+hstY_p->OptVY)/2;
    check[0]->avg_Opt=avg[0];
    check[0]->Next=NULL;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// This program generate the performance  of current system that
// affected by the other.
double P_neig (char int1[N],char int2[N],struct Tnode *Bt[N],double perf)
   {
      int j;
      char KB0[K+C+1];
      double U,lperf;
      for(j=0;j<N;j++)
         {
            KCblock(int1,int2,KB0,j);
            Bt[j] =Btree(Bt[j],KB0);
            U=Search(Bt[j],KB0,K+C+1);
            perf+=U/N;
            lperf=perf;
         }
      return lperf;
   }

// This program find index of system that has maximum overall performance.
int IndexMaxP (struct CheckMax *check[N+1])
   {
      double MaxP;
      int i,Ind;
      MaxP = check[0]->avg_Opt;
      Ind=0;
      for(i=0;i<N+1;i++)
         {
            if (check[i]->avg_Opt > MaxP)
               {
                  MaxP=check[i]->avg_Opt;
                  Ind=i;
               }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            else
                MaxP=MaxP;
        }
    return Ind;
}

// This program check the optimality of the current system.
void Opt(struct Xlist *hstX,struct Ylist *hstY,struct Tnode *Bt0[],struct Tnode *Bt1[])
{
    struct Xlist *p_nbX[N];
    struct Ylist *p_nbY[N];
    struct CheckMax *p_check[N+1];
    int i,k,l,Index;
    char z;
    double avgP[N+1],MaxCheck1,MaxCheck2,MaxCheck3;
    MaxCheck1 = 0;
    MaxCheck2 = 1;
    MaxCheck3 = 2;
    while (MaxCheck1 != MaxCheck2 && MaxCheck2 != MaxCheck3)
        {
            MaxCheck1 = MaxCheck2;
            IntP_current(p_check,hstX,hstY,avgP);
            // For fixed current 2nd subsystem and find all neighbor of current
            // 1st subsystem.
            for(i=0;i<N;i++)
                {
                    p_nbX[i] = new Xlist;
                    p_nbY[i] = new Ylist;
                    p_check[i+1] = new CheckMax;
                    p_check[i+1]->OptX = 0;
                    p_check[i+1]->OptY = 0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        p_check[i+1]->avg_Opt = 0;
        Neighb(hstX->FX,p_nbX[i]->FX,i);
        // Keep current neighbor of current 1st subsystem in
        // link-list 'Checkmax'
        for(l=0;l<N;l++)
            p_check[i+1]->X[l] = p_nbX[i]->FX[l];
        p_nbX[i]->OptVX = 0;
        p_nbY[i] = hstY;
        // Keep current 2n subsystem in link-list 'Checkmax'
        for(l=0;l<N;l++)
            p_check[i+1]->Y[l] = p_nbY[i]->FY[l];
        p_check[i+1]->OptX = P_neig(p_nbX[i]->FX,p_nbY[i]->FY,Bt0,
                                    p_nbX[i]->OptVX);
        // Keep performane of current neighbor of current 1st subsystem
        // that affected by current 2nd subsystem in link-list 'Checkmax'
        p_nbX[i]->OptVX = p_check[i+1]->OptX;
        p_nbX[i]->Next = NULL;
        p_nbY[i]->OptVY = 0;
        p_check[i+1]->OptY = P_neig(p_nbY[i]->FY,p_nbX[i]->FX,Bt1,
                                    p_nbY[i]->OptVY);
        // Keep performane of current 2nd subsystem that affected by
        // current neignbor of current 1st subsystem in link-list 'Checkmax'
        p_nbY[i]->OptVY = p_check[i+1]->OptY;
        p_nbY[i]->Next = NULL;
        // Find the overall performance of multiple complex systems
        // (current neignbor of current 1st subsystem,current 2nd subsystem).
        avgP[i+1] = (p_nbY[i]->OptVY+p_nbX[i]->OptVX)/2;
        // Keep the overall performance in link-list 'Checkmax'.
        p_check[i+1]->avg_Opt=avgP[i+1];
        p_check[i+1]->Next=NULL;
    }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Index = IndexMaxP(p_check);
MaxCheck2 = p_check[Index]->avg_Opt;
if (MaxCheck2! =MaxCheck3)
   {
      // Change current subsystems.
      for(i=0;i<N;i++)
         {
            hstX->FX[i] =p_check[Index]->X[i];
            hstX->OptVX=p_check[Index]->OptX;
            hstY->FY[i] =p_check[Index]->Y[i];
            hstY->OptVY=p_check[Index]->OptY;
         }
         IntP_current(p_check,hstX,hstY,avgP);
         // For fixed current 1st subsystem and find all neighbor of current
         // 2nd subsystem.
         for(i=0;i<N;i++)
            {
               p_nbX[i] = new Xlist;
               p_nbY[i] = new Ylist;
               p_check[i+1] = new CheckMax;
               p_check[i+1]->OptX = 0;
               p_check[i+1]->OptY = 0;
               p_check[i+1]->avg_Opt = 0;
               Neighb(hstY->FY,p_nbY[i]->FY,i);
               // Keep current neighbor of current 2nd subsystem in
               // link-list 'Checkmax'
               for(I=0;I<N;I++)
                  p_check[i+1]->Y[I] = p_nbY[i]->FY[I];
               p_nbY[i]->OptVY = 0;
               p_nbX[i] =hstX;
               // Keep current 1st subsystem in link-list 'Checkmax'
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            for(l=0;l<N;l++)
                p_check[i+1]->X[l] =p_nbX[i]->FX[l];
            p_check[i+1]->OptY = P_neig(p_nbY[i]->FY,
                                       p_nbX[i]->FX,Bt1,
                                       p_nbY[i]->OptVY);
            // Keep performane of current neighbor of current 2nd
                                       subsystem
            // that affected by current 1st subsystem in link-list
                                       'Checkmax'
            p_nbY[i]->OptVY = p_check[i+1]->OptY;
            p_nbY[i]->Next = NULL;
            p_nbX[i]->OptVX = 0;
            p_check[i+1]->OptX = P_neig(p_nbX[i]->FX,
                                       p_nbY[i]->FY,Bt0,
                                       p_nbX[i]->OptVX);
            // Keep performane of current 1st subsystem that affected by
            // current neignbor of current 2nd subsystem in link-list
                                       'Checkmax'
            p_nbX[i]->OptVX = p_check[i+1]->OptX;
            p_nbX[i]->Next = NULL;
            // Find the overall performance of multiple complex systems
            // ( current 1st subsystem,current neignbor ofcurrent 2nd
               subsystem).
            avgP[i+1] = (p_nbY[i]->OptVY+p_nbX[i]->OptVX)/2;
            // Keep the overall performance in link-list 'Checkmax'.
            p_check[i+1]->avg_Opt = avgP[i+1];
            p_check[i+1]->Next = NULL;
        }
    Index = IndexMaxP(p_check);
    MaxCheck2 = p_check[Index]->avg_Opt;
    MaxCheck3 = MaxCheck1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    // Change current subsystems.
                    for(i=0;i<N;i++)
                        {
                            hstX->FX[i] = p_check[Index]->X[i];
                            hstX->OptVX = p_check[Index]->OptX;
                            hstY->FY[i] = p_check[Index]->Y[i];
                            hstY->OptVY = p_check[Index]->OptY;
                        }
                }
            }
        // Store overall performance of solution to a file.
        FILE *output;
        output=fopen("NKC.dat","a");
        fprintf(output,"\n%f",MaxCheck3);
        fclose(output);
    }

// Main function
void NKC (void)
    {
        struct Xlist *p_hstX;
        struct Ylist *p_hstY;
        struct Tnode *BT_0[N],*BT_1[N];
        char z;
        int i;
        p_hstX = new Xlist;
        p_hstY = new Ylist;
        p_hstX->OptVX = 0;
        p_hstX->Next = NULL;
        p_hstY->OptVY = 0;
        p_hstY->Next = NULL;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        // Generate the starting 1st subsystem randomly.
        InitS(p_hstX->FX);
        // Generate the starting 2nd subsystem randomly.
        InitS(p_hstY->FY);
        // Generate first binary tree and compute the performance of starting 1st
        subsystem
        // that affected by starting 2nd subsystem.
        p_hstX->OptVX = FirstT(BT_0,p_hstX->FX,p_hstY->FY);
        // Generate second binary tree and compute the performance of starting 1st
        subsystem
        // that affected by starting 2nd subsystem.
        p_hstY->OptVY = FirstT(BT_1,p_hstY->FY,p_hstX->FX);
        // Find neigbor of the subsystem and overall performance. Check optimal.
        Opt(p_hstX,p_hstY,BT_0,BT_1);
    }

// This is a program for simulated NKC model
void main (void)
    {
        int j;
        char z;
        float V;
        float TV = 0;
        FILE *Ipt,*output;
        system("del NKC.dat");
        for(j=0;j<Rtm;j++)
            {
                // This is just let you know that the program is still running.
                cout<<"run "<<j<<endl;
                // This line is necessary when using random number in Visual C++.
                srand(time(NULL)+j);
                NKC();
            }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุธิตา มณีชัย
วัน เดือน ปีเกิด	24 สิงหาคม 2521 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่อยู่	170 หมู่ 8 ตำบลพรหมโลก อำเภอพรหมคีรี จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	2544 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
	2545 ประกาศนียบัตรวิชาชีพครู มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2544-2545	ตำแหน่งอาจารย์ ระดับ 3 ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้