การสร้างแบบจำลองกระบวนการไม่เชิงเส้นโดยการใช้ข่ายงานนิวรัล

นาย สุรพล คำสุภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ. ศ. 2538

ISBN 974-632-453-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16759473

NONLINEAR PROCESS MODELING USING A NEURAL NETWORK

Mr. Suraphol Khamsupha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-453-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองกระบวนการไม่เชิงเส้นโดยการใช้ข่ายงานนิวรัล
โดย	นาย สุรพล คำสุภา
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. วิทูร ซื่อวัฒนากุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. วิทูร ซื่อวัฒนากุล)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุรพล คำสุภา : การสร้างแบบจำลองกระบวนการไม่เชิงเส้นโดยการใช้ข่ายงานนิวรัล (NONLINEAR PROCESS MODELING USING A NEURAL NETWORK) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. มนตรี วงศ์ศรี, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. วิฑูร ชื่อวัฒนากุล, 129 หน้า, ISBN 974-632-453-5

การวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาซอฟแวร์คอมพิวเตอร์ที่เขียนด้วยภาษาซี เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองของกระบวนการต่างๆ ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น โดยการใช้ข่ายงานนิวรัล ในการศึกษาวิธีการเรียนรู้กระบวนการของข่ายงานนิวรัลใช้เทคนิค การกระจายความผิดพลาดย้อนกลับ จากการทดลองพบว่า แบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป ให้วิธีการเรียนรู้ได้ดีกว่า แบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ ความสามารถในการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัลขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ อัตราการเรียนรู้ และ แฟคเตอร์โมเมนตัม ซึ่งค่าที่เหมาะสมต้องเลือกใช้ ตามกรณีของปัญหาไม่มีค่าที่กำหนดได้แน่นอน ในการทดลอง ใช้โครงสร้างข่ายงานนิวรัลที่มีชั้นฮิดเดน 2 ชั้น (6-5-5-1) เรียนรู้กระบวนการไหลของของเหลวโดยแรงโน้มถ่วง ที่ใช้แบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไปเปรียบเทียบกับ โครงสร้างข่ายงานนิวรัลที่มีชั้นฮิดเดนชั้นเดียว (6-5-1) พบว่า ผลการทดลองที่ได้ มีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยโครงสร้างข่ายงานนิวรัลที่มีชั้นฮิดเดนชั้นเดียว สามารถเรียนรู้กระบวนการได้รวดเร็วกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C316652 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: NEURAL NETWORK / NONLINEAR PROCESS MODELING
SURAPHOL KHAMSUPHA : NONLINEAR PROCESS MODELING USING A NEURAL NETWORK , THESIS ADVISOR : DR. MONTREE WONGSRI, THESIS CO-ADVISOR : DR. WITOON SUEWATANAKUL , 129 pp. ISBN 974-632-453-5

The computer program of back propagation neural network is written in C. The program can be used for process modeling. It is found that, the general series-parallel model solves the problems better than the nonrecurrent parallel model. The effectiveness and convergence of the error backpropagation learning algorithm depend significantly on the value of the learning constant and momentum term. In general, however, the optimum value of learning constant and momentum depend on the problem being solved, and there is no single value suitable for different cases. In gravity flow tank process training using general series-parallel model, it has been shown that the single hidden layer network (6-5-1) is more rapid than the two hidden layers (6-5-5-1) .

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อ.ดร. มนตรี วงศ์ศรี และ ดร.วิทูร ชื่อวัฒนากุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการทำงานวิจัย แนวทางการแก้ปัญหา และให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ กลุ่มวิจัยการควบคุมกระบวนการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ ทำให้การวิจัยของข้าพเจ้า สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย

รศ.ดร. จิรกานต์	เมืองนาโพธิ์	ประธานกรรมการ
อ.ดร. มนตรี	วงศ์ศรี	กรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ดร. วิทูร	ชื่อวัฒนากุล	กรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)
ศ.ดร. วิวัฒน์	ตัณฑะพานิชกุล	กรรมการ
อ. ดร. ธวัชชัย	ชรินพาณิชกุล	กรรมการ

ซึ่งได้ให้ความสนใจ และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพิ่มเติม ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ กลุ่มบริษัท สยามราชธานี จำกัด ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัย ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ฆ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ค

บทที่ 1. บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1

1.2 แนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล 3

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

1.4 ความสำคัญหรือประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ 4

1.5 ขอบเขตของการวิจัย 5

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย 5

1.6.1 ขั้นตอนการออกแบบละสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 5

1.6.2 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูลจากการทดลอง 6

1.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลและจัดทำรายงาน 6

บทที่ 2. ทฤษฎีเกี่ยวกับข่ายงานนิวรัล 7

2.1 ชีววิทยาของนิวรอนและแบบจำลองดิษฐ์ 7

2.2 แบบจำลองข่ายงานนิวรัลในปัจจุบัน 10

2.3 การจำแนกข่ายงานนิวรัล (Taxonomy of neural networks) 14

2.3.1 แบบจำลองที่มีการชี้นำ 14

2.3.2 ฟังก์ชันมูลฐาน 15

2.3.3 ฟังก์ชันกระตุ้น 16

2.4 โครงสร้างของข่ายงานนิวรัล 17
2.4.1 การเชื่อมโยงแบบป้อนหน้า 17
2.4.2 การเชื่อมโยงแบบป้อนกลับ 17
2.4.3 การเชื่อมโยงภายในชั้น 17
2.4.4 การเชื่อมโยงแบบหน่วงเวลา 18
2.5 การฝึกข่ายงานนิวรัลแบบสัมพันธ์ร่วมกันและแบบอิสระ 18
2.5.1 กลวิธีในการฝึกข่ายงานนิวรัลแบบสัมพันธ์ร่วมกัน 18
2.5.2 กลวิธีในการฝึกข่ายงานนิวรัลแบบอิสระ 19
2.6 ข่ายงานเชิงเส้นบนพื้นฐานการประมาณค่า 21
2.6.1 ข่ายงานเปอร์เซปตรอนเชิงเส้น 22
2.6.2 การเรียนรู้แบบเดลตา 24
2.7 ข่ายงานหลายชั้นไม่เชิงเส้น 25
2.7.1 อัลกอริธึมการเรียนรู้ของข่ายงานจากการกระจายความแตกต่างย้อนกลับ 26
2.7.2 กฎการกระจายย้อนกลับ 27
2.8 อัลกอริธมการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัลแบบการกระจายความแตกต่างย้อนกลับ 29
2.8.1 ขั้นตอนการเรียนรู้ 29
2.8.2 การเรียนรู้โดยวิธีโมเมนตัม 31

บทที่ 3. การออกแบบข้อมูลและแบบจำลองกระบวนการของข่ายงานนิวรัล 33
3.1 การกำหนดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล 33
3.1.1 การโอปะเรเตอร์ XOR สำหรับ 2 ตัวแปร 33
3.1.2 การโอปะเรเตอร์ XOR สำหรับ 3 ตัวแปร 34
3.1.3 ระบบถังกวนต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิไม่คงที่ 35
3.1.4 การไหลของของเหลวจากถังตามแรงโน้มถ่วง 38
3.2 แบบจำลองกระบวนการของข่ายงานนิวรัล 42
3.2.1 แบบจำลองการระบุหาเชิงขนานแบบไม่วกกลับ 42

3.2.2 แบบจำลองการระบุหาเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป 42
บทที่ 4. การทดลองและการวิเคราะห์ผล 47
4.1 ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล 47
4.1.1 จำนวนหน่วยฮิดเดน 47
4.1.2 ผลของอัตราการเรียนรู้ 48
4.1.3 ผลของแฟคเตอร์โมเมนตัม 50
4.2 ศึกษาผลของฟังก์ชันกระตุ้นและโครงสร้างแบบจำลองข่ายงานนิวรัล 52
4.2.1 ระบบถังกวนต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิไม่คงที่ 52
4.2.2 กระบวนการไหลของของเหลวโดยแรงโน้มถ่วง 67
4.3 ศึกษาผลของจำนวนชั้นฮิดเดนในข่ายงานนิวรัล 74

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 100
5.1 สรุปผลการวิจัย 100
5.2 วิจารณ์การทดลอง 103
เอกสารอ้างอิง 104
ภาคผนวก ก โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับศึกษาการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล 105
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการ RUN โปรแกรม NEURAL NETWARE 118
ประวัติผู้เขียน 129

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนผังการหาแบบจำลองกระบวนการโดยข่ายงานนิวรัล 3
2.1 โครงสร้างของเซลประสาทมนุษย์ 9
2.2 แบบจำลองการทำงานของนิวรอนโดย McCulloch-Pitts 9
2.3 ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้เป็นฟังก์ชันการแปลง (transfer function) 11
2.4 หน้าที่และการทำงานของนิวรอน 12
2.5 โครงสร้างของข่ายงานนิวรัล 13
2.6 การเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัลในการปรับค่าน้ำหนัก(synaptic weights) 15
2.7 ฟังก์ชันมูลฐาน (a) linear (hyperplane) (b) radial (hyperspere) 16
2.8 โครงสร้างพื้นฐานของข่ายงานนิวรัลที่แสดงการเชื่อมโยงของน้ำหนัก 18
2.9 การเชื่อมโยงของนิวรอนในข่ายงานนิวรัลป้อนกลับชั้นเดียว 19
2.10 กลวิธีในการฝึกข่ายงาน (Traning strategies) 20
2.11 กลไกข่ายงานย่อยที่เป็นอิสระต่อกัน 21
2.12 การเรียนรู้แบบเปอร์เซปตรอน 23
2.13 การปรับหาขอบเขตแยกข้อมูล 2 คลาส โดยข่ายงานเปอร์เซปตรอนเชิงเส้น 23
2.14 การเรียนรู้แบบเดลตา (delta learning rule) 24
2.15 ข่ายงานนิวรัลที่มีชั้นน้ำหนักสามชั้น 26
2.16 การเรียนรู้แบบการกระจายความผิดพลาดย้อนกลับที่มีการรวมค่าแฟคเตอร์โมเมนตัมมาใช้ในการปรับค่าน้ำหนัก 32
3.1 เวคเตอร์ของเลขฐานสองสำหรับระบบ 2 มิติ และ 3 มิติ 35
3.2 ระบบถังกวนต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิไม่คงที่ 36
3.3 การตอบสนองของระบบถังกวนต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิไม่คงที่ (open loop) 39
3.4 การไหลของของเหลวจากถังตามแรงโน้มถ่วง (gravity flow tank) 39
3.5 การตอบสนองของระบบการไหลของของเหลวจากถังตามแรงโน้มถ่วง 41
3.6 การหาแบบจำลองข่ายงานนิวรัลโดยวิธีแบบเชิงขนานแบบไม่วกกลับ 43
3.7 แบบจำลองข่ายงานนิวรัลโดยวิธีการเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป 44
4.1 ผลของหน่วยฮิดเดนในชั้นฮิดเดน ที่มีต่อการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล 49

4.2 ผลของแฟคเตอร์อัตราการเรียนรู้ที่มีต่อการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล.....49
4.3 ผลการเรียนรู้โอปะเรเตอร์ XOR 3 ตัวแปรที่มีค่าโมเมนตัมแตกต่างกัน 51
4.5 อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ ข้อมูล
ในการฝึกข่ายงานนิวรัล 54
4.6 ความเข้มข้นของสาร A ที่แปรผันตามค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ข้อมูล
ในการฝึกข่ายงานนิวรัล 54
4.7 อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ ข้อมูล
ในการทดสอบข่ายงานนิวรัล 55
4.8 ความเข้มข้นของสาร A ที่แปรผันตามค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ข้อมูล
ในการทดสอบข่ายงานนิวรัล 55
4.9 การเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัล โดยแบบจำลอง
เชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-6, ฟังก์ชันกระตุ้น :
ซิกมอยด์ , iteration 27520, RMS 0.9799) 57
4.10 การทดสอบการเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัลโดย
แบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-6, ฟังก์ชัน
กระตุ้น : ซิกมอยด์ , iteration 25000, RMS 13.6991).....58
4.11 การเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัล โดยแบบจำลอง
เชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-6, ฟังก์ชันกระตุ้น : ไบ
โพลาร์, iteration 25000, RMS 6.9491) 59
4.12 การทดสอบการเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัลโดย
แบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-6, ฟังก์ชัน
กระตุ้น : ไบโพลาร์ , iteration 25000, RMS 15.2543).....60
4.13 การเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัล โดยแบบจำลอง
เชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-1, ฟังก์ชันกระตุ้น :
ซิกมอยด์, iteration 4720, RMS 0.1529) 62
4.14 การทดสอบการเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัลโดย
แบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-1, ฟังก์ชัน
กระตุ้น : ซิกมอยด์ , iteration 4720, RMS 0.3303) 63

4.15 การเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัล โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-1, ฟังก์ชันกระตุ้น : ไบโพลาร์, iteration 7ถถ2, RMS 0.1955)..... 64
4.16 การทดสอบการเรียนรู้ระบบถังกวนอุณหภูมิไม่คงที่ของข่ายงานนิวรัลโดยแบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้างข่ายงานนิวรัล 6-9-1, ฟังก์ชันกระตุ้น : ไบโพลาร์ , iteration 7552, RMS 0.3106)..... 65
4.17 อัตราการไหลของของเหลวขาเข้า ใช้เป็นสัญญาณอินพุทให้กับข่ายงานนิวรัลเรียนรู้ 68
4.18 ระดับความสูงของของเหลวในถัง ข้อมูลเป้าหมายสำหรับการเรียนรู้ 68
4.19 อัตราการไหลของของเหลวขาเข้า ใช้เป็นสัญญาณอินพุทในการทดสอบข่ายงานนิวรัล 69
4.20 ระดับความสูงของของเหลวในถัง ข้อมูลเป้าหมายสำหรับทดสอบการเรียนรู้ 69
4.21 การเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้าง 6-9-6, iteration 25000, RMS 1.05615).....71
4.22 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วงโดยแบบจำลองเชิงขนานแบบไม่วกกลับ (โครงสร้าง 6-9-6, iteration 25000, RMS 6.3137)..... 72
4.23 การเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม - ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-9-1, ชิกมอยด์ ; iteration 25016, RMS 0.7577) 75
4.24 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-9-1, ชิกมอยด์, iteration 25016 RMS 1.9175) 76
4.25 การเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม - ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-7-1, ชิกมอยด์ ; iteration 25016, RMS 0.8695) ...77
4.26 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-7-1 iteration 25016 , RMS 2.1801) 78
4.27 การเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม - ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1, ชิกมอยด์ ; iteration 25016, RMS 0.8031) 79

4.28 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 2.3375) 80
4.29 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-3-1 iteration 12508 , RMS 2.0298) 81
4.30 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-3-1 iteration 12508 , RMS 5.520) 82
4.31 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.2948)..... 83
4.32 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.8213) 84
4.33 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.2058) 85
4.34 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.4908) 86
4.35 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 1.2706) 87
4.36 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 2.1548) 88

4.37 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.1494) 89
4.38 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.3721) 90
4.39 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 0.8205) 91
4.40 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-1 iteration 25016 , RMS 2.1548) 92
4.41 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-5-1 iteration 25016 , RMS 1.7568) 94
4.42 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-5-5-1 iteration 25016 , RMS 4.9951) 95
4.43 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-7-7-1 iteration 25016 , RMS 0.666) 96
4.44 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-7-7-1 iteration 25016 , RMS 2.2049) 97
4.45 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-3-3-1 iteration 25016 , RMS 1.2994) 98

4.46 การทดสอบการเรียนรู้ระบบการไหลของของไหลด้วยแรงโน้มถ่วง โดยแบบจำลองเชิงอนุกรม-ขนานแบบทั่วไป (โครงสร้าง 6-3-3-1 iteration 25016 , RMS 3.2527) 99

ภาคผนวก ข.

รูปที่ 1 เมนูหลักของ Model Netware.....119
2 เมนูย่อยในการกำหนดโครงสร้างของข่ายงานนิวรัล.....120
3 ตัวอย่างของโครงสร้างข่ายงานนิรัลที่มีการเชื่อมโยงบางส่วน.....120
4 เมนูย่อยการกำหนดข้อมูลให้ข่ายงานนิวรัล.....122
5 การเลือกป้อนข้อมูลโดยตรงให้กับข่ายงานนิวรัลจากเมนูย่อย User Data.....122
6 เมนูการกำหนดค่าน้ำหนักเริ่มต้น.....123
7 เมนูย่อยในการกำหนดวิธีการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล.....124
8 แบบจำลองสำหรับการเรียนรู้เลือกจากคำสั่ง EBPT Algorithm.....125
9 เมนูย่อยในการกำหนดวิธีการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล.....126
10 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล.....127
11 การเปลี่ยนแปลงค่า RMS error ในระหว่างการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัล.....127
12 การทดสอบการเรียนรู้ของข่ายงานนิวรัลจาก Cross validdation.....128

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 รูปแบบข้อมูลของโอปะเรเตอร์ XOR ชนิดสองตัวแปร....34
3.2 การโอปะเรเตอร์ XOR สำหรับสามตัวแปร....34
3.3 สภาวะในการปฏิบัติการของระบบ Nonisothermal CSTR ที่สภาวะคงตัว....38
3.4 ข้อมูลสำหรับ Gravity-flow tank....41
4.1 โครงสร้างข่ายงานนิวรัลมาตราฐานสำหรับการเรียนรู้โอปะเรเตอร์ XOR.... 46
4.2 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นสำหรับการเรียนรู้ตัวแปรสองตัวแปร....46
4.3 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นสำหรับการเรียนรู้ตัวแปรสามตัวแปร....47
4.4 แสดงค่าน้ำหนักที่ได้จากแบบจำลองของข่ายงานนิวรัลหลังจากการเรียนรู้....50
4.5 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นสำหรับการเรียนรู้ระบบถังกวนต่อเนื่องอุณหภูมิไม่คงที่....66
4.6 ค่าน้ำหนักหลังการเรียนรู้สำหรับระบบถังกวนต่อเนื่องอุณหภูมิไม่คงที่.... 66

คำอธิบายสัญลักษณ์

F_O	อัตราการไหลของสายป้อน (l/min.)
C_{AO}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A (mol/l)
T_O	อุณหภูมิของสายป้อน (K)
F	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ (l/min)
C_A	ความเข้มข้นของสาร A (mol/l)
T	อุณหภูมิของระบบ (K)
F_C	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (l/min)
T_{CO}	อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า (K)
T_C	อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาออก (K)
V	ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (l)
ρ	ความหนาแน่นของสารในถังปฏิกรณ์ (g/l)
ρ_c	ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น (g/l)
hA	ส.ป.ส การถ่ายเทความร้อน (cal/min. K)
k_O	Arrhenius constant (min.)
E/R	พลังงานกระตุ้น/ ค่าคงที่ของก๊าซ (K)
$-\Delta H$	ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา (cal/mol)