การพัฒนากรรมวิธีพันธุกรรมร่วมกับโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้า ในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี

นาย วงศ์วัฒนา สมบุญยิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4306-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A GENETIC ALGORITHM ALONG WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR DAILY RUNOFF FORECASTING IN PRACHINBURI WATERSHED

Mr.Wongwatana Sombunying

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4306-8

481818

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากรรมวิธีพันธุกรรมร่วมกับโครงข่ายใยประสาทเทียม สำหรับพยากรณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้าในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี
โดย	นาย วงศ์วัฒนา สมบุญยิ่ง
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ทวนทัน กิจไพศาลสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ชัยยุทธ สุขศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุจริต คูณธนกุลวงศ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิต ธงทอง)

วงศ์วัฒนา สมบุญยิ่ง : การพัฒนากรรมวิธีพันธุกรรมร่วมกับโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้าในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี. (DEVELOPMENT OF A GENETIC ALGORITHM ALONG WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR DAILY RUNOFF FORECASTING IN PRACHINBURI WATERSHED) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล, 273 หน้า. ISBN 974-17-4306-8.

แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม มีค่าถ่วงน้ำหนักเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้มีความเหมาะสมขึ้นอยู่กับค่าสุ่มเริ่มต้นและวิธีการเรียนรู้แบบต่างๆ เช่น วิธีการเรียนรู้แบบย้อนกลับ (BPNN) ทำให้มีข้อจำกัด คือ อาจได้คำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (local optimum) ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมโดยรวม (global optimum)

กรรมวิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) เป็นวิธีหาคำตอบที่เหมาะสมโดยรวมจากชุดคำตอบจำนวนมาก ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการประยุกต์ใช้ GA เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมของ ANN ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวน 3 โปรแกรม ได้แก่ BPNN GA+ANN และ GA+BPNN ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมทั้งสามพยากรณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้าจำนวน 53 กรณี สำหรับ 6 สถานีวัดน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี

จากผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนที่กำหนด คือ วิธี Real value coding วิธี Tournament selection และ Gaussian mutation ขั้นตอนและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมผ่านการคัดเลือกของ GA คือ สำหรับแบบจำลองขนาดใหญ่ที่มีจำนวนค่าถ่วงน้ำหนักมากกว่า 25 ค่า ใช้วิธี 2-point crossover ค่า Probability of crossover (Pc) = 0.1 ค่า Probability of mutation (Pm) = 0.1 และ Population size อยู่ในช่วงระหว่าง 80-100 ส่วนแบบจำลองขนาดเล็กที่มีค่าถ่วงน้ำหนักน้อยกว่า 25 ค่า ใช้วิธี Heuristic crossover ค่า Pc = 0.3 ค่า Pm = 0.1 และ Population size อยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 จากการเปรียบเทียบความถูกต้องพบว่า โปรแกรมทั้งสามให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยแตกต่างกันน้อย แต่ BPNN ให้ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงพิสัยค่อนข้างกว้างขึ้นอยู่กับค่าสุ่มเริ่มต้น ส่วน GA+ANN และ GA+BPNN ให้ค่าผิดพลาดอยู่ในช่วงพิสัยค่อนข้างแคบขึ้นอยู่กับค่าสุ่มเริ่มต้นน้อย

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่อนิสิต.....วงศ์วัฒนา สมบุญยิ่ง.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา .....2548.....

4570510821 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: GENETIC ALGORITHM / NEURAL NETWORK / RUNOFF FORECASTING

WONGWATANA SOMBUNYING: DEVELOPMENT OF A GENETIC ALGORITHM ALONG WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR DAILY RUNOFF FORECASTING IN PRACHINBURI WATERSHED. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. TUANTAN KITPAISALSAKUL, D.ENG, 273 pp.

ISBN 974-17-4306-8.

An Artificial Neural Network (ANN) has the weights as an important parameter. Adjustment of the weights to be appropriate depends on the random initial weights and the learning method to be use such as Back Propagation Neural Network (BPNN) leads to a limitation that the obtained weights might be local optimum, not global optimum.

A Genetic Algorithm (GA) is a search algorithm to find the global optimum solution from many solutions. In this study, GA was applied to determine the optimum weights of ANNs. Three computer programs were developed namely, BPNN, GA+ANN and GA+BPNN. The three programs were applied for daily runoff forecasting in 53 cases for the 6 runoff gauging stations in the Prachinburi watershed.

From the study results, it is found that the specified operators of GA were Real value coding, Tournament selection and Gaussian mutation. The selected operators and parameters for large ANNs with more than 25 weights were 2-point crossover, Probability of crossover (Pc) = 0.1, Probability of mutation (Pm) = 0.1 and Population size ranging from 80-100 while those of small ANNs with less than 25 weights were Heuristic crossover, Pc = 0.3, Pm = 0.1 and Population size ranging from 10-20. From the comparison of computation accuracy, it is found that the three programs yielded average errors with negligible. However, BPNN yielded rather wide range of errors depending on the random initial weights. Nevertheless, GA+ANN and GA+BPNN yielded rather narrow range of the errors, similarly, almost regardless of the random initial weights.

Department....Water Resources Engineering... Student's signature W. Sombunying

Field of study..Water Resources Engineering... Advisor's signature Tuantan Kitpaisalsakul

Academic year....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าครั้งนี้ ข้าพเจ้าได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ เหล่านี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำอย่างใกล้ชิดมาตลอด ทั้งยังให้การช่วยสนับสนุน ผลักดันในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ชัยยุทธ สุขศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำชี้แนะและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ นางสาว วรรณวลี วงษ์เกษมสันต์ ที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและคนในครอบครัวของข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่งที่คอยให้โอกาสและกำลังใจที่ดีต่อข้าพเจ้ามาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญรูป..... ญ

สารบัญตาราง..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 ผลการศึกษาที่ผ่านมา..... 5

2.1 การพัฒนาและประยุกต์ใช้ BPNN ในงานอุทกวิทยา..... 5

2.2 การพัฒนาวิธีการเรียนรู้ในแบบจำลอง ANN..... 8

2.3 การประยุกต์ใช้ GA ในด้านแหล่งน้ำ..... 10

2.4 การประยุกต์ใช้ GA ร่วมกับ ANN..... 12

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 14

3.1 การหาค่าความเหมาะสม..... 14

3.2 ทฤษฎีกรรมวิธีพันธุกรรม..... 17

3.3 โครงข่ายใยประสาทเทียม..... 31

3.4 ค่าสถิติที่ใช้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง..... 40

หน้า

บทที่ 4 สภาพทั่วไปของพื้นที่ 42
4.1 ภูมิประเทศและระบบลุ่มน้ำ 42
4.2 อุตุ-อุทกวิทยา 45
4.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา 48
4.4 การแบ่งช่วงข้อมูลปรับเทียบ ปรับทาน และรับรองผลแบบจำลอง 53
4.5 การแบ่งข้อมูลในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง 53

บทที่ 5 วิธีการดำเนินการศึกษา 54
5.1 การพัฒนาโปรแกรม BPNN 54
5.2 การพัฒนาโปรแกรม GA+ANN 54
5.3 การพัฒนาโปรแกรม GA+BPNN 61
5.4 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม BPNN 61
5.5 การคัดเลือกขั้นตอนและพารามิเตอร์ของ GA เหมาะสม 61
5.6 การประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ 61
5.7 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ระหว่างโปรแกรมทั้งสาม 63

บทที่ 6 ผลการศึกษา 64
6.1 ผลการพัฒนาและพยากรณ์น้ำท่ารายวันของโปรแกรม BPNN 64
6.1.1 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของโปรแกรม BPNN 64
6.1.2 ความถูกต้องของโปรแกรม BPNN เทียบกับ Qnet2000 67
6.2 ผลการพัฒนาและพยากรณ์น้ำท่ารายวันของแบบจำลอง GA+ANN 67
6.2.1 การคัดเลือกขั้นตอนและพารามิเตอร์ของ GA ที่เหมาะสม 75
6.3 ผลการพัฒนาโปรแกรม GA+BPNN 105
6.4 ผลการพยากรณ์น้ำท่ารายวันในฤดูฝน 105
6.4.1 อิทธิพลของค่าสุ่มน้ำหนักเริ่มต้น 107
6.4.2 ค่าถ่วงน้ำหนักสุดท้ายที่เหมาะสม 110
6.4.3 ค่าสถิติความถูกต้องของผลการพยากรณ์ 114
6.4.4 ชลภาพน้ำท่ารายวัน 120
6.4.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN 122

หน้า

6.5 ผลการพยากรณ์น้ำท่ารายวันในฤดูแล้ง 139
6.5.1 อิทธิพลของค่าสุ่มน้ำหนักเริ่มต้น 139
6.5.2 ค่าถ่วงน้ำหนักสุดท้ายที่เหมาะสม 139
6.5.3 ค่าสถิติความถูกต้องของผลการพยากรณ์ 146
6.5.4 ชลภาพน้ำท่ารายวัน 146
6.5.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN 146

บทที่ 7 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 167
7.1 สรุปผลการศึกษา 167
7.2 ข้อเสนอแนะ 173

รายการอ้างอิง 174

ภาคผนวก 180
ภาคผนวก ก. กราฟเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ระหว่างโปรแกรม BPNN และ Qnet2000 181
ภาคผนวก ข. ค่าถ่วงน้ำหนักสุดท้ายของแบบจำลอง 203
ภาคผนวก ค. ค่าสถิติความถูกต้องจากการสุ่ม 10 ครั้งและกราฟช่วงพิสัยการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของโปรแกรม BPNN และ GA+ANN 212
ภาคผนวก ง. การแบ่งข้อมูลน้ำท่าออกเป็น 3 ช่วงขนาด น้ำท่าน้อย (low flow) น้ำท่าปานกลาง (medium flow) และน้ำท่าสูง (high flow) และการวิเคราะห์ค่าสถิติความถูกต้องของผลการพยากรณ์ของน้ำท่าแยกตามขนาด 221
ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์น้ำท่าสูงสุดในแต่ละปี 229
ภาคผนวก ฉ. ชลภาพน้ำท่า 251

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 273

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3-1	แผนผังลำดับขั้นของการหาค่าความเหมาะสม	15
3-2	วิธีการหาค่าความเหมาะสม	18
3-3	โครโมโซม 1 ตัวประกอบด้วยยีน 4 ตัว	21
3-4	ขั้นตอนการใช้ GA ในการแก้ปัญหาการหาค่าความเหมาะสม	23
3-5	Roulette wheel selection	27
3-6	Rank selection	27
3-7	วิธีการ Crossover	30
3-8	รูปเปรียบเทียบระห่างเซลล์ประสาทกับโครงข่ายใยประสาทเทียม	32
3-9	ลักษณะโครงสร้างของแบบจำลอง BPNN และหลักการทำงานในหน่วยย่อย	34
3-10	ผังการไหลแสดงการทำงานของการเรียนรู้ของแบบจำลอง	38
4-1	แผนที่ภูมิประเทศในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี	43
4-2	แผนที่แสดงระบบลุ่มน้ำ-ลำน้ำของลุ่มน้ำปราจีนบุรี	44
4-3	ตำแหน่งและที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝน-น้ำท่าในลุ่มน้ำปราจีนบุรี	46
4-4	แผนที่แสดงเส้นชั้นปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่มน้ำปราจีนบุรี	47
4-5	แผนที่แสดงเส้นชั้นปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่รับน้ำฝน ในลุ่มน้ำปราจีนบุรี	49
4-6	ขอบเขตพื้นที่รับน้ำและสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้	50
4-7	แผนผังระบบลุ่มน้ำที่ทำการศึกษา	51
5-1	ขั้นตอนโปรแกรม GA+ANN	55
5-2	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมย่อย Selection	57
5-3	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมย่อย Crossover	59
5-4	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมย่อย Mutation	60
5-5	ขั้นตอนโปรแกรม GA+BPNN	62
6-1	ผลการพยากรณ์น้ำท่ากับข้อมูลที่วัดจริง ณ สถานี 150401 ในช่วงข้อมูลทดสอบ	69
6-2	ผลการพยากรณ์น้ำท่ากับข้อมูลที่วัดจริง ณ สถานี Kgt.14 ในช่วงข้อมูลทดสอบ	70
6-3	ผลการพยากรณ์น้ำท่ากับข้อมูลที่วัดจริง ณ สถานี Kgt.15A ในช่วงข้อมูลทดสอบ	71
6-4	ผลการพยากรณ์น้ำท่ากับข้อมูลที่วัดจริง ณ สถานี Kgt.10 ในช่วงข้อมูลทดสอบ	72

รูปที่ **หน้า**

6-5 ผลการพยากรณ์น้ำท่ากับข้อมูลที่วัดจริง ณ สถานี Kgt.12 ในช่วงข้อมูลทดสอบ..... 73

6-6 ผลการพยากรณ์น้ำท่ากับข้อมูลที่วัดจริง ณ สถานี Kgt.3 ในช่วงข้อมูลทดสอบ..... 74

6-7 แผนภูมิการคัดเลือกวิธีผสมข้ามพันธุ์ในฤดูฝน..... 78

6-8 แผนภูมิการคัดเลือกค่า Pc ในฤดูฝน..... 79

6-9 ช่วงพิสัยค่า Pc ที่เหมาะสมของวิธีผสมข้ามพันธุ์..... 82

6-10 แผนภูมิการคัดเลือกค่า Pm ที่เหมาะสมในฤดูฝน..... 83

6-11 แผนภูมิการคัดเลือกจำนวนประชากรในฤดูฝน..... 90

6-12 แผนภูมิการคัดเลือกวิธีผสมข้ามพันธุ์ในฤดูแล้ง..... 91

6-13 แผนภูมิการคัดเลือกค่า Pc ในฤดูแล้ง..... 93

6-14 แผนภูมิการคัดเลือกค่า Pm ในฤดูแล้ง..... 96

6-15 เปรียบเทียบจำนวนครั้งของการคำนวณที่ลู่ออกระหว่าง BPNN และ GA+ANN..... 110

6-16 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของค่า RMSE ของผลการพยากรณ์ในฤดูฝน..... 113

6-17 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี 150401 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 125

6-18 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี 150401 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 126

6-19 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.14 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 127

6-20 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.14 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 128

6-21 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.15A ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 129

6-22 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.15A ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 130

6-23 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.10 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 131

รูปที่ **หน้า**

6-24 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.10 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 132

6-25 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.12 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 133

6-26 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.12 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 134

6-27 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.3 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 135

6-28 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูฝน ณ สถานี Kgt.3 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 136

6-29 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี 150401 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 151

6-30 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี 150401 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 152

6-31 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.14 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 153

6-32 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.14 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 154

6-33 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.15A ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 155

6-34 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.15A ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 156

6-35 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.10 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 157

6-36 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.10 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 158

รูปที่ **หน้า**

6-37 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.12 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 159

6-38 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.12 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 160

6-39 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.3 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงเรียนรู้)..... 161

6-40 ชลภาพน้ำท่าระหว่างข้อมูลจริงกับผลการพยากรณ์ในฤดูแล้ง ณ สถานี Kgt.3 ล่วงหน้า 1 วัน (ช่วงทดสอบ)..... 162

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับโครงข่ายใยประสาทเทียม	32
4-1	ช่วงข้อมูลและแหล่งที่มาของสถานีวัดน้ำฝนที่ใช้ในการศึกษา	52
4-2	ช่วงข้อมูลและแหล่งที่มาของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	52
6-1	โครงสร้างและข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง ANN ในฤดูฝน	65
6-2	โครงสร้างและข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง ANN ในฤดูแล้ง	66
6-3	ผลเปรียบเทียบค่าสถิติความถูกต้องระหว่างโปรแกรม Qnet2000 และ BPNN ในการพยากรณ์น้ำท่าล่วงหน้า 1 วัน	68
6-4	ขั้นตอนและช่วงพิสัยของค่าพารามิเตอร์ของ GA ที่ใช้ศึกษา	75
6-5	ค่า RMSE ในการคัดเลือกวิธีผสมข้ามพันธุ์ในฤดูฝน	77
6-6	ค่า RMSE ในการคัดเลือกค่า Pc ในฤดูฝน (ชุดข้อมูลเรียนรู้)	80
6-7	ค่า RMSE ในการคัดเลือกค่า Pc ในฤดูฝน (ชุดข้อมูลทดสอบ)	81
6-8	ค่า RMSE จากการคัดเลือกค่า Pm ในฤดูฝน (ชุดข้อมูลเรียนรู้)	84
6-9	ค่า RMSE จากการคัดเลือกค่า Pm ในฤดูฝน (ชุดข้อมูลทดสอบ)	85
6-10	ค่า RMSE จากการคัดเลือกจำนวนประชากรในฤดูฝน	87
6-11	ค่า RMSE จากการคัดเลือกวิธีผสมข้ามพันธุ์ในฤดูแล้ง	92
6-12	ค่า RMSE ของค่า Pc ในฤดูแล้ง (ชุดข้อมูลเรียนรู้)	94
6-13	ค่า RMSE ของค่า Pc ในฤดูแล้ง (ชุดข้อมูลทดสอบ)	95
6-14	ค่า RMSE ในการคัดเลือกค่า Pm ในฤดูแล้ง (ชุดข้อมูลการเรียนรู้)	97
6-15	ค่า RMSE ในการคัดเลือกค่า Pm ในฤดูแล้ง (ชุดข้อมูลทดสอบ)	98
6-16	ค่า RMSE ในการคัดเลือกจำนวนประชากรในฤดูแล้ง	100
6-17	โครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง GA+BPNN	106
6-18	ค่า RMSE จากการสุ่ม 10 ครั้งของโปรแกรม BPNN ในฤดูฝน	108
6-19	ค่า RMSE จากการสุ่ม 10 ครั้งของโปรแกรม GA+ANN ในฤดูฝน	111
6-20	ค่าถ่วงน้ำหนักสุดท้าย ณ สถานี Kgt.14 จากโปรแกรม BPNN	116
6-21	ค่าสถิติความถูกต้องของผลการคำนวณในฤดูฝนจากโปรแกรมทั้งสาม	117
6-22	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการพยากรณ์น้ำท่าสูงสุด (Qpeak) ในแต่ละสถานีจากทั้งสามโปรแกรม	123

ตารางที่ **หน้า**

6-23 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการพยากรณ์ช่วงเวลาในการเกิดน้ำท่าสูงสุด (Tpeak) ในแต่ละสถานีจากทั้งสามโปรแกรม..... 124
6-24 ค่าสถิติความถูกต้องในฤดูฝนจากทั้งสามโปรแกรมในช่วงข้อมูลรับรองผล..... 137
6-25 ค่า RMSE จากการสุ่ม 10 ครั้งของโปรแกรม BPNN ในฤดูแล้ง..... 140
6-26 ค่า RMSE จากการสุ่ม 10 ครั้งของโปรแกรม GA+ANN ในฤดูแล้ง..... 143
6-27 ค่าสถิติความถูกต้องของผลการคำนวณในฤดูแล้งจากโปรแกรมทั้งสาม..... 147
6-28 ค่าสถิติความถูกต้องในฤดูแล้งจากทั้งสามโปรแกรมในช่วงข้อมูลรับรองผล..... 163
7-1 ขั้นตอนและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม..... 168