หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก
นักศึกษา	นายอนันต์ วิริยะกิจชัย
รหัสนักศึกษา	47061304
ปริญญา	วิศวกรรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมก่อสร้างและการจัดการ
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

บทคัดย่อ

การพยากรณ์ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แม่นยำมีความสำคัญ เนื่องจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดต้องทดสอบที่อายุ 28 วัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงการก่อสร้างในกรณีที่กำลังไม่เป็นไปตามเกณฑ์ ทั้งทางด้านระยะเวลาและต้นทุนก่อสร้างที่เพิ่มขึ้น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนจึงถูกใช้ในการพยากรณ์ค่ากำลังรับแรงอัด จากการทบทวนวรรณกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นมาในอดีตนั้นใช้ข้อมูลที่ไม่มีความหลากหลายจึงทำให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ต่ำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกพัฒนาร่วมกับระบบฐานข้อมูลคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลคอนกรีตจากห้องทดลอง 67 สัดส่วนผสม ซึ่งครอบคลุมมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตในกรณีที่ไม่มีสารผสมเพิ่มของ ACI 211.1 คือ มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.4-0.8, อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) 0.4-0.6 และอัตราส่วนเพสต์ต่อมวลรวม 0.25-0.45 และข้อมูลจาก 3 โรงผสมคอนกรีตต่างผู้ผลิต จำนวน 1,781 ข้อมูล โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอยู่ในช่วง 150-550 กก/ซม^2 ANN แบบไปข้างหน้าชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ โดยมีการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ซึ่งพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB ถูกใช้ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัด จากผลการทดสอบพบว่าโครงข่าย 5-4-1 และ 6-5-2 Feedforward Network เป็นโครงข่ายที่มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลจากห้องทดลองและโรงผสมคอนกรีตตามลำดับ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 4.78% สำหรับข้อมูลจากห้องทดลอง และ 6.57%, 6.47% และ 9.79% สำหรับข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีตนครหลวงคอนกรีต, คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค และทีพีไอคอนกรีตตามลำดับ

Thesis Title	An Application of Artificial Neural Networks for Predicting Cylindrical Compressive Strength of Concrete
Student	Mr.Anan Wiriyakitchai
Student ID.	47061304
Degree	Master of Engineering
Program	Construction Engineering and Management
Year	2006
Thesis Advisor	Asst.Prof.Laemthong Laokhongthavorn
Thesis Co-Advisor	Asst.Prof.Dr.Suchatchavee Suwansawas

ABSTRACT

Accuracy in concrete compressive strength prediction is important because construction time and cost usually are effected if the test result of 28 days age concrete does not satisfy the required strength. Artificial Neural Network (ANN) as an effective tool for solving the sophisticated problem was selected to predict the concrete compressive strength. However, by reviewing literature, it indicates that many historical developed ANNs for concrete strength prediction use various and discrete data so performance of the prediction is not so excellent, especially for the data that much differ from the training data. Hence, concrete database of 150-550 ksc concrete compressive strength are developed to enhance prediction the concrete compressive strength by ANN. This database consists of 67 mix proportions-1435 specimens data from the laboratory, designed to dominate the concrete mix design standard (ACI 211.1 code) by using 0.4-0.8 w/c, 0.4-0.6 S/A, and 0.25-0.45 paste/aggregate range and excluding admixture, and 1,781 data from three brand batching plants. Feedforward networks with back propagation algorithm trained by Levenberg-Marquardt Algorithm on MATLAB program were developed for this function. The result shown that 5-4-1 and 6-5-2 feedforward network were appropriated for the laboratory and the batching plant data respectively. The Mean absolute percentage error (MAPE) of compressive strength prediction was 4.78% for laboratory data and 6.57%, 6.47%, and 9.79% for Siam City Concrete, CPAC Concrete, and TPI Concrete data respectively.

กิตติกรรมประกาศ

คงไม่มีคำกล่าวใดที่จะบ่งบอกถึงความกรุณา, ความอนุเคราะห์, คำชี้แนะ และการดูแลเป็นอย่างดียิ่งของ ผศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้จุดประกายความคิดแก่ข้าพเจ้าในหลายด้านตลอดเวลาตั้งแต่ศึกษาในระดับปริญญาตรี นอกจากนั้นผู้ที่มีความสำคัญยิ่งอีกท่านคือ ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งทำให้รู้ว่าไม่มีอะไรที่เป็นไปไม่ได้ถ้าตั้งใจแน่วแน่

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ผู้ร่วมให้ทุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัย สกว.-บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ประจำปี 2548

สำนักประสานงานชุดโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ ผู้ชี้ชวนและให้ข้อมูลที่สำคัญยิ่งเกี่ยวกับทุนการวิจัย

และโครงการวิจัยนี้คงไม่สมบูรณ์ถ้าไม่ได้ความอนุเคราะห์จากคุณศิวะ มหาสันทนะ, คุณบรรพต นิโครวนจำรัส และคุณวิทวัส ภัทรนาวิก บริษัท นครหลวงคอนกรีต จำกัด ที่ให้ความร่วมมืออย่างดียิ่งในการจัดเก็บข้อมูลคอนกรีตจากโรงผสมคอนกรีต

ขอขอบคุณอย่างยิ่งสำหรับ ดร.คมสัน มาลีสี ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเกี่ยวกับงานคอนกรีต, ดร.อุมา สีบุญเรือง ผู้สอบถามความก้าวหน้าของการวิจัยอย่างห่วงใยเป็นประจำ นอกจากนั้นขอขอบคุณบรรดาอาจารย์, ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ข้อคิดที่ดีทั้งการทำวิจัย, การทำงานและการใช้ชีวิตประจำวัน

ขอบคุณนายส่งศักดิ์ วัฒนศักดิ์, นายอรรณพ ชัยชนะ และนายอรรษนุพงษ์ พรมงาม รุ่นน้องภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล. ซึ่งช่วยเหลือในกระบวนการผสม และทดสอบคอนกรีตในห้องทดลองอย่างเต็มที่ตลอดการวิจัย

ขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ, ความรัก, ความห่วงใย, กำลังใจ, ที่ปรึกษายามทุกข์และสุขทำให้รู้จักและซาบซึ้งถึงคำว่า “เพื่อน” ชัดเจนเสมอมา

นอกจากนั้นขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นที่บ่มเพาะและประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่ระดับปริญญาตรีจนถึงระดับบัณฑิตศึกษา, ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในการทำงานและศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการทดสอบวัสดุอย่างลึกซึ้ง รวมทั้งสำนักหอสมุดกลาง สจล. ที่ได้จัดหาหนังสือและวารสารอันทรงคุณค่ายิ่งสำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายแต่ความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนสำหรับความห่วงใยของบุพการี และพี่ชาย ที่สั่งสอนและดูแลข้าพเจ้าอยู่ตลอดเวลา ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจตลอดเวลาที่พบปัญหา

อนันต์ วิริยะกิจชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญตาราง.....IX
สารบัญรูป.....XI
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....2

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....4
2.1 บทนำ.....4
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....4
2.2.1 วัสดุผสม.....6
2.2.2 สัดส่วนผสม.....7
2.2.3 คุณภาพเนื้อคอนกรีต.....9
2.2.4 การพัฒนากำลังรับแรงอัด.....10
2.2.5 การทดสอบ.....13
2.3 การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....16
2.3.1 การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดด้วยวิธีทางสถิติ.....16
2.3.1.1 การพยากรณ์โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอย.....16
2.3.1.2 การพยากรณ์โดยใช้ระบบแผนผังควบคุมผลรวมสะสม (Cusum System).....19
2.3.2 การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม.....19
2.4 บทวิเคราะห์.....22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม 24

3.1 บทนำ 24

3.2 การจำลองเซลล์ประสาท 24

3.2.1 เซลล์ประสาทชีวภาพ 24

3.2.2 เซลล์ประสาทเทียม 25

3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า 26

3.4 การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ 28

3.5 อภิปราย 30

บทที่ 4 การเก็บข้อมูลและระบบฐานข้อมูลคอนกรีต 32

4.1 บทนำ 32

4.2 การเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง 32

4.2.1 การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต 32

4.2.2 การทดสอบวัสดุผสม 35

4.2.3 การผสมคอนกรีต 35

4.2.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต 36

4.2.4.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสด 36

4.2.4.2 คุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวแล้ว 36

4.3 การเก็บข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีต 37

4.4 ระบบฐานข้อมูลคอนกรีต 37

4.5 สรุปการเก็บรวบรวมข้อมูลและระบบฐานข้อมูลคอนกรีต 38

บทที่ 5 กระบวนการออกแบบและหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม 40

5.1 บทนำ 40

5.2 การเตรียมข้อมูล 40

5.2.1 การกำหนดผลลัพธ์ และปัจจัยนำเข้า 41

5.2.2 การ Normalization ข้อมูล 43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 การหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม....46
5.3.1 เงื่อนไขในกระบวนการเรียนรู้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ... 48
5.3.1.1 ค่า Gradient Factor....48
5.3.1.2 ค่า Mu Factor…….. 48
5.3.2 การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม..... 48
5.3.3 การหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม
โดยใช้ข้อมูลจากห้องทดลอง....49
5.3.4 การหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม
โดยใช้ข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีต..... 60
5.3.5 ผลของจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในชั้นซ่อน....70
5.3.6 ผลของจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน....72
5.4 สรุปกระบวนการออกแบบและหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม
ที่เหมาะสม....73

บทที่ 6 การทดสอบประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.... 75
6.1 บทนำ....75
6.2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม....75
6.2.1 แบบจำลองที่ 1: ปัจจัยนำเข้าอยู่ในรูปอัตราส่วนผสม
(เรียนรู้และทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากห้องทดลอง)..... 76
6.2.2 แบบจำลองที่ 2: เรียนรู้และทดสอบโดยใช้ข้อมูลจาก
โรงผสมคอนกรีตเดียวกัน....77
6.2.2.1 เรียนรู้และทดสอบโดยใช้ข้อมูลคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค..... 77
6.2.2.2 เรียนรู้และทดสอบโดยใช้ข้อมูลทีพีไอคอนกรีต..... 78
6.2.3 แบบจำลองที่ 3: เรียนรู้และทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากต่าง
โรงผสมคอนกรีต….....80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.3.1 เรียนรู้ข้อมูลนครหลวงคอนกรีต และทดสอบโดยใช้ข้อมูลคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค....80

6.2.3.2 เรียนรู้ข้อมูลนครหลวงคอนกรีต และทดสอบโดยใช้ข้อมูลทีพีไอคอนกรีต....82

6.2.4 แบบจำลองที่ 4: เรียนรู้โดยใช้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต....84

6.2.4.1 เรียนรู้ข้อมูลทุกโรงผสมคอนกรีต และทดสอบโดยใช้ข้อมูลนครหลวงคอนกรีต....84

6.2.4.2 เรียนรู้ข้อมูลทุกโรงผสมคอนกรีต และทดสอบโดยใช้ข้อมูลคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค....85

6.2.4.3 เรียนรู้ข้อมูลทุกโรงผสมคอนกรีต และทดสอบโดยใช้ข้อมูลทีพีไอคอนกรีต....87

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....91

7.1 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต....91

7.2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม....92

7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม....92

7.4 ข้อเสนอแนะ....93

เอกสารอ้างอิง....94

ภาคผนวก ก สัดส่วนผสมคอนกรีต....98

ภาคผนวก ข ผลทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต....104

ข1 ผลการทดสอบหิน....105

ข2 ผลการทดสอบทราย....106

ข3 ผลการทดสอบน้ำ....108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค ข้อมูลคอนกรีตจากห้องทดลอง..... 109

ค1 แบบฟอร์มในการจัดเก็บข้อมูลคอนกรีตของห้องทดลอง.....110

ค2 ข้อมูลคอนกรีตจากห้องทดลอง..... 111

ค3 ข้อมูลคอนกรีตจากโรงผสมคอนกรีต..... 148

ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์..... 182

ประวัติผู้เขียน.....185

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงค่าปรับแก้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต..... 14
2.2 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัด..... 20
3.1 ชนิดของฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function)..... 28
4.1 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตสดและมาตรฐานทดสอบ..... 36
4.2 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวแล้วและมาตรฐานทดสอบ..... 37
4.3 จำนวนข้อมูลคอนกรีตจากโรงผสมคอนกรีต..... 37
4.4 รายละเอียดข้อมูลที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูลคอนกรีต..... 38
5.1 ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของปัจจัยจากห้องทดลอง..... 44
5.2 ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของปัจจัยจากโรงผสมคอนกรีต..... 45
5.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละโครงสร้าง ในกรณีใช้ชุดข้อมูลจากห้องทดลอง..... 50
5.4 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลจากห้องทดลอง..... 59
5.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละโครงสร้าง ในกรณีใช้ชุดข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีตนครหลวงคอนกรีต..... 61
5.6 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีตนครหลวงคอนกรีต..... 70
6.1 สรุปแบบจำลองที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ทั้งหมด..... 75
6.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายที่พัฒนาจากข้อมูลห้องทดลอง..... 76
6.3 สรุปประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของแบบจำลองที่ 2..... 80
6.4 สรุปประสิทธิภาพในการพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลจากนครหลวงคอนกรีตในการเรียนรู้..... 83
6.5 สรุปประสิทธิภาพในการพยากรณ์โดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต..... 88
7.1 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต..... 91
ผ.ก.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ทำการออกแบบ..... 100
ผ.ข.1 ผลการทดสอบหินที่ใช้ในการผสมคอนกรีต..... 105
ผ.ข.2 ผลการทดสอบทรายที่ใช้ในการผสมคอนกรีต..... 106
ผ.ข.3 ผลการทดสอบน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต..... 108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ผ.ง.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r) ของข้อมูลจากห้องทดลอง……...183
ผ.ง.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r) ของข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีต……..……... 184

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการศึกษา..... 3
2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....5
2.2 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ..... 6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมต่างชนิดกัน โดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50..... 7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์.....8
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับ อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ใดๆ.....8
2.6 ช่องว่างในเนื้อคอนกรีต..... 9
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับ ความพรุน..... 10
2.8 การพัฒนากำลังรับแรงอัด (ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150 mm.).....11
2.9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเนื่องจากการบ่มชื้นที่ระยะเวลาต่างกัน (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50)..... 12
2.10 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต..... 12
2.11 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม กับการพัฒนากำลังของคอนกรีตในช่วงต้น..... 13
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กับ อัตราส่วนระหว่าง ความสูง/เส้นผ่านศูนย์กลาง ของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก..... 14
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกกับ ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์..... 15
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกดตัวอย่างคอนกรีต กับ กำลังของคอนกรีต โดยเทียบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่กดด้วยอัตรา 0.2 MPa/s (30 psi/s).....16
2.15 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต..... 17
3.1 โครงสร้างเซลล์ประสาทชีวภาพ..... 25
3.2 โครงสร้างเซลล์ประสาทเทียม..... 26
3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า (Feedforward Network)..... 27
4.1 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง..... 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.2 ปริมาณสัดส่วนผสมในคอนกรีตปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรที่กำลังรับแรงอัดต่างๆ ตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 211.1 (ความข้นเหลวคงที่ 8-10 เซนติเมตร)..... 34

4.3 ปริมาณสัดส่วนผสมในคอนกรีตปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความข้นเหลวต่างๆ ตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 211.1 (กำลังรับแรงอัดคงที่ 280 กก./ตร.ซม.)..... 34

5.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล..... 41

5.2 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน โดยใช้ข้อมูลจากห้องทดลอง..... 43

5.3 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน และ ความข้นเหลวของคอนกรีต โดยใช้ข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีต..... 43

5.4 ขั้นตอนการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม..... 47

5.5 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน 3 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs..... 51

5.6 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน 4 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs..... 52

5.7 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน 5 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs..... 53

5.8 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน 6 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs..... 54

5.9 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 3 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs.....55

5.10 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 4 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs.....56

5.11 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 5 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs.....57

5.12 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 6 หน่วย (a) 50 epochs, (b) 100 epochs และ (c) 150 epochs.....58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.13 เปรียบเทียบความผิดพลาดของการพยากรณ์ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบ..... 59

5.14 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 4 หน่วย: กำลังรับแรงอัด (a) 15 epochs, (b) 25 epochs, (c) 50 epochs และความข้นเหลว (d) 15 epochs, (e) 25 epochs, (f) 50 epochs..... 62

5.15 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 5 หน่วย: กำลังรับแรงอัด (a) 15 epochs, (b) 25 epochs, (c) 50 epochs และความข้นเหลว (d) 15 epochs, (e) 25 epochs, (f) 50 epochs..... 63

5.16 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม 1 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 6 หน่วย: กำลังรับแรงอัด (a) 15 epochs, (b) 25 epochs, (c) 50 epochs และความข้นเหลว (d) 15 epochs, (e) 25 epochs, (f) 50 epochs..... 64

5.17 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 4 หน่วย: กำลังรับแรงอัด (a) 15 epochs, (b) 25 epochs, (c) 50 epochs และความข้นเหลว (d) 15 epochs, (e) 25 epochs, (f) 50 epochs..... 65

5.18 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 5 หน่วย: กำลังรับแรงอัด (a) 15 epochs, (b) 25 epochs, (c) 50 epochs และความข้นเหลว (d) 15 epochs, (e) 25 epochs, (f) 50 epochs..... 66

5.19 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชั้นซ่อน หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 6 หน่วย: กำลังรับแรงอัด (a) 15 epochs, (b) 25 epochs, (c) 50 epochs และความข้นเหลว (d) 15 epochs, (e) 25 epochs, (f) 50 epochs..... 67

5.20 เปรียบเทียบความผิดพลาดในการพยากรณ์ค่ากำลังรับแรงอัด และความข้นเหลวของคอนกรีตในกระบวนการทดสอบ..... 68

5.21 เปรียบเทียบความผิดพลาดของค่ากำลังรับแรงอัดในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบ..... 69

5.22 เปรียบเทียบความผิดพลาดของค่าความข้นเหลวในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบ..... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.23 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกระบวนการเรียนรู้เนื่องจากจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในชั้นซ่อน.....71

5.24 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกระบวนการทดสอบเนื่องจากจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในชั้นซ่อน..... 72

5.25 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบเนื่องจากจำนวนรอบในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน..... 73

6.1 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม โดยปัจจัยนำเข้าอยู่ในรูปอัตราส่วนผสม..... 76

6.2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.....77

6.3 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.....78

6.4 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของทีพีไอคอนกรีต.....79

6.5 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของทีพีไอคอนกรีต..... 79

6.6 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพคโดยใช้ข้อมูลจากนครหลวงคอนกรีตในกระบวนการเรียนรู้.....81

6.7 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพคโดยใช้ข้อมูลจากนครหลวงคอนกรีตในกระบวนการเรียนรู้.....81

6.8 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของทีพีไอคอนกรีตโดยใช้ข้อมูลจากนครหลวงคอนกรีตในกระบวนการเรียนรู้.....82

6.9 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของทีพีไอคอนกรีตโดยใช้ข้อมูลจากนครหลวงคอนกรีตในกระบวนการเรียนรู้.....83

6.10 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของนครหลวงคอนกรีตโดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต.....84

6.11 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของนครหลวงคอนกรีตโดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต.....85

6.12 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพคโดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต.....86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.13 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพคโดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต……...……86
6.14 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของทีพีไอคอนกรีตโดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต……..…… 87
6.15 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความข้นเหลวของทีพีไอคอนกรีตโดยโครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลจากทุกโรงผสมคอนกรีต……...……88
6.16 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดและความข้นเหลวของนครหลวงคอนกรีต.... 89
6.17 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดและความข้นเหลวของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค..... 89
6.18 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดและความข้นเหลวของทีพีไอคอนกรีต..... 90
ผ.ก.1 ผังแสดงการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต.....99
ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบขนาดคละของหิน
(เส้นทึบคือค่าที่ทดสอบได้ ส่วนเส้นประคือค่าที่มาตรฐาน ASTM C33-03 กำหนด).....105
ผ.ข.2 แสดงผลการทดสอบขนาดคละของทราย
(เส้นทึบคือค่าที่ทดสอบได้ ส่วนเส้นประคือค่าที่มาตรฐาน ASTM C33-03 กำหนด).....107
ผ.ค.1 แบบฟอร์มที่ใช้เก็บข้อมูลคอนกรีตในห้องทดลอง.....110