



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบกทาน
สูงสุดของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ

AN APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR
PREDICTION LOAD BEARING CAPACITY FOR DRIVEN PILES IN
BANGKOK IS SUBSOIL

กมลวรรณ แก้วมณี

KAMONWAN KEOMANEE

กันยายน พ.ศ. 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักเบกทาน
สูงสุดของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ

AN APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR
PREDICTION LOAD BEARING CAPACITY FOR DRIVEN PILES IN
BANGKOK IS SUBSOIL

กมลวรรณ แก้วมณี

KAMONWAN KEOMANEE

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนสนับสนุนการวิจัยสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
(ทุน สกว.- บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ปี 2550)
สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด
(มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ
นักศึกษา	นางสาวกมลวรรณ แก้วมณี
รหัสนักศึกษา	49061606
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมก่อสร้างและการจัดการ
พ.ศ.	2551
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

บทคัดย่อ

การคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มถือเป็นหัวใจหลักของกระบวนการออกแบบฐานรากให้มีความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มโดยการใช้สูตรยังมีค่าความผิดพลาดจากความเป็นจริงอยู่มากเพื่อลดความผิดพลาดให้ลดน้อยลงจึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) มาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลผลทดสอบแบบ Dynamic Load Test ในชั้นดินกรุงเทพฯ จำนวน 162 ข้อมูล ซึ่งมีค่ากำลังรับน้ำหนักอยู่ในช่วง 25-339 ตัน/ต้น มีตัวแปรนำเข้า 6 ตัวแปร ซึ่งถูกเลือกมาจากสูตรที่ใช้ประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม โดยใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm (Trainlm) พัฒนาบนโปรแกรม MATLAB จากผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายที่ดีที่สุดมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดสมบูรณ์ (MAPE) ในการพยากรณ์เท่ากับ 12.07% ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดต่ำกว่าค่าประมาณกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม ซึ่งจะช่วยให้วิศวกรและผู้สนใจเกิดความมั่นใจในค่า Ultimate Bearing Capacity ของเสาเข็มที่ใช้ออกแบบสิ่งก่อสร้างได้อย่างปลอดภัยต่อไป

Thesis Title	An Application of Artificial Neural Network For Prediction Load Bearing Capacity for Driven Piles In Bangkok is subsoil
Student	Miss. Kamonwan Keomanee
Student ID.	49061606
Degree	Master of Engineering
Programme	Construction Engineering and Management
Year	2008
Thesis Advisor	Asst. Prof. Laemthong Laokhongthavorn
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Suchatvee Suwansawas

ABSTRACT

Calculation for pile load bearing capacity is the most importance process of safety and cost effective foundation design. Pile load bearing capacity by daily used empirical formula is still having high errors. So the artificial neural network (ANN) is considered as the effective tool to predict pile load bearing capacity in Bangkok clay, to reduce this error value. This research was done by gathering 162 data of dynamic load test results on Bangkok clay, which covers pile load capacity of 25-339 tons/pile. By considering pile driving formula, 6 variable, that are pile length, cross section area, pile weight, hammer weight, drop length and settlement, was selected as input variable. Then, trained and tested data were computed through MATLAB with feed-forward, back-propagation process and Levenberg-Marquardt Algorithm Trainlm, learning function. Research results show that the most effective ANN model allowing MAPE value equals 12.07% which is lower than calculated value by using pile driving formula. So it must be useful for engineers to ensure ultimate bearing capacity of designed pile.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร. สุวัชรวิรุฬห์ สุวรรณสวัสดิ์ และ ผศ. แหลมทอง เหล่าคงถาวร ผู้จุดประกายความคิดและข้อคิดดีแก่ข้าพเจ้าในหลายๆด้านพร้อมทั้งคอยให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ผู้ร่วมให้ทุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัย สกว. –บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ประจำปี 2550 และสำนักงานประสานงานชุดโครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณธนบัตร เอื้อวรกุลชัยและพี่ๆพนักงานบริษัท เอส ที เอส อินสตรูमेंท์ จำกัดที่ได้อำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลและตอบข้อสงสัยของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณสำหรับความรัก, ความห่วงใย, กำลังใจในยามที่ท้อแท้ปละบ่โยนยามผิดหวัง เป็นที่ปรึกษาในยามทุกข์และคอยให้ความช่วยเหลือในยามที่ต้องการสิ่งเหล่านี้ข้าพเจ้าได้รับจากเพื่อนๆ พี่ๆน้องๆทั้งในและนอกสถาบันเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กมลวรรณ แก้วมณี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม.....	5
2.2 พฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดิน.....	5
2.3 สูตรที่ใช้ในการควบคุมการตอกเสาเข็ม.....	7
2.4 การกำหนดค่า Safety of Factor ที่เหมาะสมของเสาเข็ม.....	13
2.5 ค่า Factor ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานต่อการทรุดของเสาเข็ม.....	14
2.5.1 น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม และน้ำหนักของเสาเข็ม.....	14
2.5.2 อัตราเร็วของลูกตุ้มตอก.....	15
2.5.3 มีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม.....	15
2.5.4 ที่รองหัวเสาเข็ม.....	16
2.5.5 เสาส่ง.....	16
2.6 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธีพลศาสตร์.....	
(Dynamic Load Test on Drive Pile).....	16
2.6.1 ขั้นตอนการทดสอบ.....	17
2.6.2 วิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2.1 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ.....	17
2.6.2.2 ชนิดของการทดสอบ.....	20
2.6.2.3 การเตรียมการก่อนการทดสอบ.....	21
2.6.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณสะท้อนกลับ.....	23
2.6.3 โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมปฐพี.....	29
บทที่ 3 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม.....	32
3.1 วิวัฒนาการโครงข่ายประสาท.....	32
3.2 หลักการพื้นฐานของทฤษฎีโครงข่าย.....	33
3.2.1 เซลล์ประสาทชีวภาพ.....	33
3.2.2 เซลล์ประสาทเทียม.....	34
3.3 ฟังก์ชันแอคติเวชัน (Activation Function).....	35
3.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในโครงข่ายประสาทเทียม.....	36
3.4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า (Feed-forward Network).....	36
3.4.2 ทิศทางการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าและย้อนกลับ (Recurrent Network).....	37
3.5 รูปแบบการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	38
3.5.1 การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised Learning).....	38
3.5.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised Learning).....	38
3.6 การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Algorithm).....	39
3.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม.....	41
บทที่ 4 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	43
4.1 บทนำ.....	43
4.2 ลักษณะชั้นดินในกรุงเทพฯ.....	43
4.3 แหล่งที่มาข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม.....	43
4.4 ขอบเขตของข้อมูล.....	44
4.5 การจัดการข้อมูลและฐานข้อมูล.....	45
4.6 การแบ่งข้อมูลที่ใช้วิจัย.....	46
บทที่ 5 การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 บทนำ.....	48
5.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	48
5.3 วิธีการดำเนินการวิจัยส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม.....	49
5.3.1 การเตรียมข้อมูล.....	49
5.3.2 วิธีการกำหนดผลลัพธ์และป้อนข้อมูล.....	51
5.3.3 การ Normalization ข้อมูล.....	53
5.4 การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	54
5.4.1 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Training).....	54
5.4.2 การทดสอบและประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Tested & Application).....	55
5.4.3 การวัดประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม.....	55
5.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
5.5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยสูตรการตอกเสาเข็ม.....	58
5.5.2 ผลการทดสอบการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	62
5.5.2.1 ผลของจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนในชั้นซ่อน.....	67
5.5.2.2 ผลของจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน.....	69
5.5.2.3 สรุปกระบวนการออกแบบและหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาท เทียมที่เหมาะสม.....	70
บทที่ 6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม.....	72
6.1 บทนำ.....	72
6.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบก ทานของเสาเข็มตอก.....	72
6.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนัก.....	73
6.3.1 ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการควบคุม.....	73
6.3.2 ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม.....	74
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test.....	80
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	92
ภาคผนวก ค. ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูล.....	93
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	103
ภาคผนวก จ. คู่มือการติดตั้งและใช้งานโปรแกรม.....	110
ภาคผนวก ฉ. แผนที่ของแหล่งข้อมูลที่ใช้วิจัย.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	154

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สูตรการคำนวณหาค่าการรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก (Dynamic Pile Driving Formula) ที่นิยมใช้กัน.....	10
2.2 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety of Factor) ที่สัมพันธ์กับความยาวเสาเข็ม.....	14
2.3 แสดงค่าน้ำหนักน้อยสุดของลูกตุ้มตอก (Humes).....	15
2.4 แสดงค่า Case Damping factor จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม (Rausche และ Goble, 1975).....	24
3.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทชีวภาพกับเซลล์ประสาทเทียม.....	35
3.2 แสดงชนิดของฟังก์ชันแอคติเวชัน (Activation Function).....	36
4.1 แสดงจำนวนข้อมูลของเสาเข็มแต่ละชนิด.....	45
4.2 แสดงขอบเขตเกี่ยวกับคุณสมบัติของเสาเข็ม.....	45
4.3 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่จัดเก็บในโปรแกรม Microsoft Office Access.....	46
4.4 แสดงการแบ่งข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์หาลำกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก.....	47
5.1 แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรนำเข้า.....	54
5.2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Q_u).....	58
5.3 การวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Q_u) ที่ได้จากสูตรตอกเสาเข็ม.....	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละแบบจำลอง.....	62
5.5 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก.....	66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบและทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	4
2.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม.....	6
2.2 แสดงลักษณะการสูญเสียพลังงานในขณะทำการตอกเสาเข็ม.....	8
2.3 แสดงข้อสมมุติสำหรับ Load Deformation ในองค์ประกอบต่างๆ.....	9
2.4 แสดงขั้นตอนการทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Testphrp	17
2.5 แสดงอุปกรณ์ Strain Transducer / Accelerometer	18
2.6 แสดงอุปกรณ์ Pile Driving Analyzer (PDA).....	19
2.7 แสดงอุปกรณ์ Hammer Strike.....	19
2.8 แสดงรูปแบบการทดสอบแบบ Initial Driving Monitoringและแบบ Restrike Test	20
2.9 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณ โดย PDA	22
2.10 แสดงผลการทดสอบบนหน้าจอ PDA	22
2.11 แสดงลักษณะตามทฤษฎีของสัญญาณสะท้อนกลับที่หัวเสาเข็มเมื่อเสาเข็มมีรอยขาด.....	23
2.12 แสดงแบบจำลองใน CAPWAPC.....	25
2.13 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ CAPWAPC.....	26
2.14 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการทดสอบCAPWAP Capacity กับ Static Load Test	27
2.15 แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบผลการทดสอบDynamic Load Test กับ Static Load Test.....	27
2.16 แสดงลักษณะค่าที่วัดได้ในสนามของสัญญาณสะท้อนกลับที่หัวเสาเข็มเมื่อเสาเข็มมีรอยร้าว.....	28
3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ประสาทชีวภาพ	34
3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ประสาทเทียม	34
3.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทชีวภาพกับเซลล์ประสาทเทียม.....	35
3.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า (Feed-forward Network)	37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 โครงข่ายแบบฮอปฟิลด์ (Hopfield Network)	38
3.6 สัญญาณในกระบวนการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน	39
3.7 โครงสร้างการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียม	40
4.1 แสดงการกระจายข้อมูลที่ใช้วิจัย	44
5.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมข้อมูล	50
5.2 แสดงปัจจัยผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอกที่พิจารณาจากสูตร	51
5.3 แสดงสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของ เสาเข็ม ตอก	53
5.4 แสดงขั้นตอนการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม	57
5.5 เปอร์เซนต์เฉลี่ยค่าความผิดพลาดของค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรต่างๆ	60
5.6 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักจากผลทดสอบ Dynamic Load Test กับค่ากำลังรับน้ำหนัก ที่หาได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม	61
5.7 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ข้อมูล 6 ข้อมูลเข้าโดยใช้ฟังก์ชัน ถ่ายโอน แบบ Log-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Hidden และ Tan-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Output ใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation Algorithm) และปรับค่าน้ำหนักโดยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm	63
5.8 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซนต์เฉลี่ยค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ของแต่ละกระบวนการ	66
5.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนหน่วยเซลล์ประสาทและจำนวนชั้น ในกระบวนการสร้างแบบจำลอง (Training Set)	68
5.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนหน่วยเซลล์ประสาทและจำนวนชั้น ในกระบวนการทดสอบแบบจำลอง (Testing Set)	68
5.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนหน่วยเซลล์ประสาทและจำนวนชั้น ในกระบวนการประยุกต์ใช้แบบจำลอง(Application Set)	69
5.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่า เบี่ยงเบนของแต่ละกระบวนการหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม	70
6.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากกระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้ โครงข่าย	73
6.2 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรควบคุมการตอกเสาเข็มแต่ละสูตร	74
6.3 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากจากกระบวนการต่างๆ	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรุงเทพฯ เป็นเมืองหลวงที่เป็นศูนย์กลางในทุกด้านของประเทศไทย ซึ่งการก่อสร้างจะมีมากกว่าส่วนอื่นๆ ของประเทศ การออกแบบระบบฐานรากเสาเข็มมีการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะหาจากวิธีการทางปฐพีกลศาสตร์โดยใช้ข้อมูลดินจากการเจาะสำรวจเพื่อใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของเสาเข็มที่สามารถรองรับน้ำหนักได้ตามที่ออกแบบ ซึ่งการควบคุมการตอกเสาเข็มก็มีสูตรที่ใช้ควบคุมการตอกด้วยระบบ Drop Hammer มีหลายสูตรการจะนำสูตรไหนมาใช้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน ส่วนความสามารถในการรับน้ำหนักที่แท้จริงของเสาเข็มสามารถทำได้โดยการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักในสนามด้วยวิธี Static Load Test และ Dynamic Load Test ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมของการทดสอบขึ้นอยู่กับโครงการแต่ละโครงการ ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาที่ทางโครงการยอมเสียไปกับการทดสอบ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นสัดส่วนการทดสอบที่เหมาะสมจึงขึ้นกับผู้บริหารโครงการ และเจ้าของโครงการ โดยส่วนใหญ่ในโครงการหนึ่งจะกำหนดการทดสอบแบบ Static load test มีจำนวนน้อยกว่าทดสอบแบบ Dynamic Load Test เนื่องจากการทดสอบแบบ Static Load Test ต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน, ค่าใช้จ่ายสูง จึงทำให้ปัจจุบันมีการใช้วิธีหาค่าความสามารถการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Load Test เพื่อความรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายของโครงการได้ นอกจากนี้ในบางโครงการมีเพียงการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธี Dynamic Load Test เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักแบบ Static Load Test เพื่อยืนยันผลการทดสอบที่ได้จากวิธี Dynamic Load Test อีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงได้นำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยวิธี Dynamic Load Test ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ต่ำที่สุด เพื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในสนามด้วยวิธี Dynamic Load Test เพื่อให้ค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมใกล้เคียงกับค่าที่ทำการทดสอบในสนามจริงมากที่สุด จากงานวิจัยของ [1] แบบจำลองโครงข่ายที่ใช้ข้อมูลผลทดสอบจากวิธี Static Load Test มาพยากรณ์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกมีค่าความผิดพลาดสูง จึงทำให้ค่าการพยากรณ์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Dynamic Load Test มีความแตกต่างจากผลการทดสอบจริงๆ ไปมาก

ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้น เพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับพยากรณ์ผลการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธี Dynamic Load Test โดยเฉพาะ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANN) ที่เหมาะสมที่ในการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก
2. เพื่อเปรียบเทียบผลประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่ได้โครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Networks, ANN) กับสูตรควบคุมการตอก
3. เพื่อรวบรวมพารามิเตอร์และพัฒนาระบบฐานข้อมูลสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธี Dynamic Load Test

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้แบบจำลองโครงข่าย (Artificial Neural Networks, ANN) คาดว่าทำการวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วและให้ค่าการวิเคราะห์ค่ากำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มมีความผิดพลาดต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากสูตรควบคุมการตอกเสาเข็ม

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANN) สำหรับวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯโดยใช้โปรแกรม MATLAB
2. สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ตัวแปรนำเข้าที่อ้างอิงจากสูตรควบคุมการตอกในกรุงเทพฯได้แก่ Hiley's Formula, Engineer New, Modified Engineer New , Junbu's Formula , Gates's Formula, Danish's Formula ข้อมูลเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์จะมีขอบเขตของข้อมูลดังนี้
 - ข้อมูลเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์ได้จากการตอกด้วยวิธีระบบของ Drop Hammer
 - ข้อมูลเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาเข็ม รูปสี่เหลี่ยมและรูปตัวโอ
 - ข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Load Test ที่ทดสอบในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรม, ตำรา, วารสาร ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก, ปัจจัยที่มีผลต่อการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก, สูตรที่ใช้ตอกเสาเข็ม, ทฤษฎีโครงข่าย ประสาทเทียมและระบบฐานข้อมูล
2. การพัฒนาระบบฐานข้อมูลกำลังการรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก
3. ออกแบบและทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม เพื่อใช้วิเคราะห์หาลำกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก ตามรูปที่ 1.1
4. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
5. เรียบเรียง, พิมพ์, ตรวจสอบ, แก้ไข และจัดทำรูปเล่ม

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. สามารถนำปัจจัยและตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มตอก จะถูกรวบรวมและสามารถนำไปใช้กำหนดเสาเข็มโครงการก่อสร้างทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. สามารถพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มตอก ขณะทำการตอกเสาเข็มหรือหลังตอกเสาเข็มเสร็จ เพื่อให้เจ้าของอาคารเกิดความมั่นใจในอาคารที่จะก่อสร้าง
3. นำไปสู่การพัฒนาฐานข้อมูลต้นแบบ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการตอกเสาเข็มที่ตอกไม่ถึง Design Load โดยใช้สูตรในการควบคุมการตอกเสาเข็มที่ใช้ในพื้นที่กรุงเทพฯ
4. สามารถใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนให้นักศึกษาและวิศวกรเข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อการตอกเสาเข็ม ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในการรองรับน้ำหนักของตัวอาคาร
5. เผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมโยธา

รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบและทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

บทนี้จะกล่าวสรุปถึงการทบทวนวรรณกรรม, ตำรา, เอกสาร, วารสารและงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก

2.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

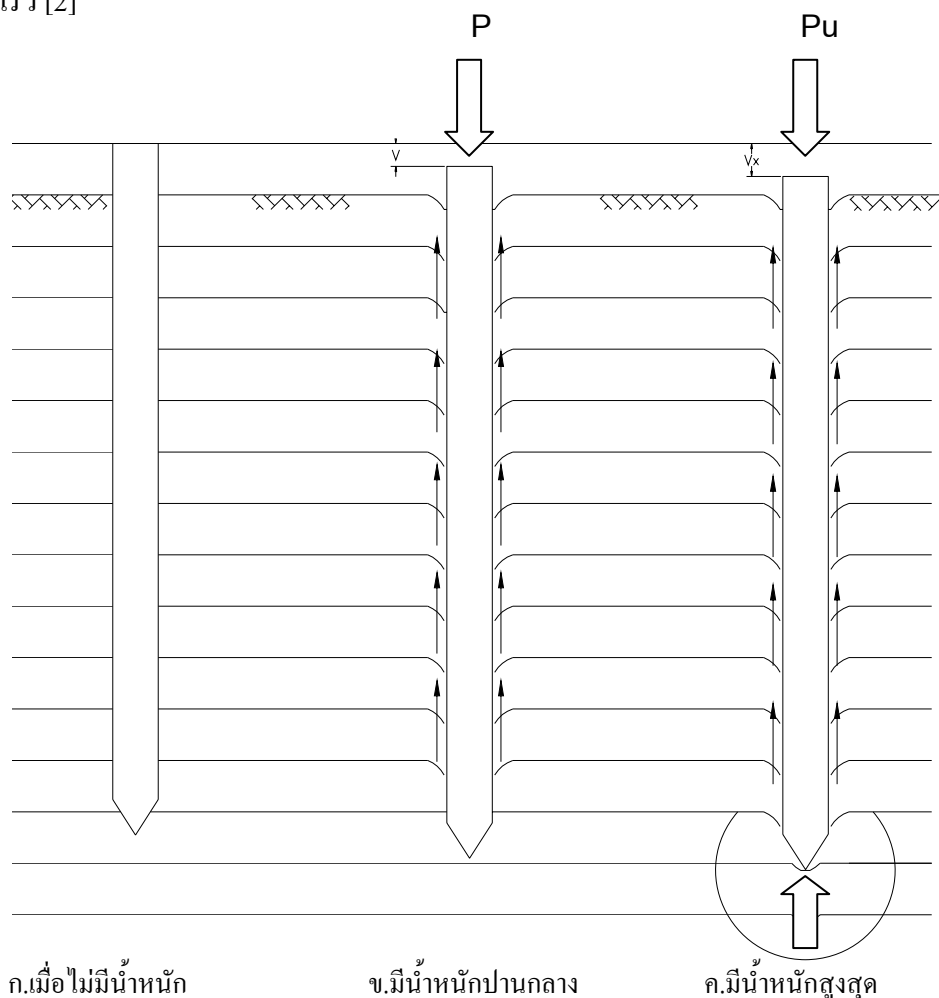
ฐานรากเสาเข็มเป็นโครงสร้างที่ใช้ถ่ายน้ำหนักจากอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ ลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่าเบื้องล่าง ทั้งยังทำให้การทรุดตัวลดลงจนไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างเมื่อเสาเข็มเริ่มบรรทุกน้ำหนักก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดินและเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นดินตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่นี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นดินไม่สามารถจะต้านทานได้ ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) เช่นเดียวกับวัสดุทางวิศวกรรม เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำไปทั่ววัสดุ วัสดุก็จะเกิดความเครียดขึ้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งความเครียดนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงที่มากขึ้น จนกระทั่งวัสดุนั้นไม่สามารถต้านทานได้ ก็จะเกิดการพิบัติ เสาเข็มจะเกิดการพิบัติในชั้นดินบริเวณโดยรอบผิวเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม การที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเมื่อได้รับแรงกระทำ มีรูปแบบพฤติกรรมคล้ายกับความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุทางวิศวกรรมอื่น ๆ [2]

2.2 พฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดิน

เสาเข็มเมื่อตอกหรือติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใด ๆ แล้วก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดิน เนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้ว ชั้นดินและเสาเข็มก็จะยังไม่มีเคลื่อนที่ ต่อเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนเสาเข็ม เสาเข็มก็จะเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรง ในขณะที่เดียวกันดินที่เกาะอยู่ข้าง ๆ ผิวเสาเข็มก็พยายามต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนที่ตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่นี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น และในช่วงหลังจะเกิดการต้านทานที่ปลายเสาเข็มมาร่วมด้วยในลักษณะเดียวกับฐานแผ่ที่มีพื้นที่ที่ปลายเสาเข็ม จนในที่สุดเมื่อชั้นดินไม่สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้ ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพังโดยรอบเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม ทำให้มีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Pile Capacity) โดยทั่วไปแล้ว การเคลื่อนที่ที่มีสาเหตุจากคุณสมบัติทางด้านอีลา

สถิติ มีค่าเพียงพอที่จะทำให้การพัฒนากำลังของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ส่วนแรงต้านทานที่ปลาย (End Bearing) จะถูกพิจารณาเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ลงมากกว่า 10 % ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตอกและอาจถึง 30 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ เนื่องจากเสาเข็มตอก สภาพดินที่ปลายเข็มจะถูกอัดตัวให้แน่นในกระบวนการตอกมากกว่ากระบวนการเจาะเสาเข็ม เพราะฉะนั้นเสาเข็มตอกจะเคลื่อนตัวน้อยกว่าเสาเข็มเจาะในการเคลื่อนตัวจนถึงจุดพิบัติ การที่เสาเข็มมี Skin Friction จนเต็มกำลัง จำเป็นที่จะต้องเกิดการเคลื่อนที่ลงระยะหนึ่ง ซึ่งมีค่าน้อยเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ลงที่จะต้องใช้ในการพัฒนาจนถึงแรงต้านทานสูงสุดของ End Bearing หรือกล่าวได้ว่า Skin Friction จะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของ End Bearing และกำลังต้านทานของ Skin Friction เมื่อพัฒนาถึงค่าสูงสุดแล้วจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะยังมีการเคลื่อนที่ลงของเสาเข็มอยู่อีก ยกเว้นในชั้น Stiff Clay อาจเกิดค่า Skin Friction ลดลงหลังจากที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลังไปจนถึงจุดสูงสุดแล้ว เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานการถ่วงน้ำหนักจากเสาเข็มได้แล้วก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) โดยรอบผิวเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม โดยมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่าง

รวดเร็ว [2]



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม[2]

2.3 สูตรที่ใช้ในการควบคุมการตอกเสาเข็ม

สูตรการตอกเสาเข็มที่ใช้คำนวณเพื่อคาดคะเนค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate bearing load) ของเสาเข็มมีอยู่ด้วยกันหลายสูตร สูตรเหล่านี้ส่วนใหญ่อาศัยหลักการเคลื่อนตัวของมวล (ในวิชาพลศาสตร์) โดยพยายามรวมส่วนประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น กำลังของเครื่องตอก, น้ำหนักตุ้ม, ระยะยกตุ้ม, ที่รองหัวเสาเข็ม, ชนิดและขนาดของเสาเข็มและรวมถึงสภาพชั้นดินเข้าด้วยกันให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ และใช้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้จำนวนมากมาเปรียบเทียบและปรับปรุงสมการนั้นๆให้เข้ากับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด หลักการใหญ่ที่ใช้เป็นพื้นฐานของสมการทางคณิตศาสตร์เหล่านั้นก็คือ

- สมมติให้แรงต้านทานของเสาเข็มต่อการตอกมีค่าเท่ากับความสามารถในการรับน้ำหนัก (Static Load) ของเสาเข็มนั้น
- จากหลักทางพลังงานดังนี้

$$E_n = E_{n_1} - E_{n_2} - E_{n_3} \quad (2.1)$$

เมื่อ; E_n = พลังงานที่ทำให้เสาเข็มเคลื่อนที่

E_{n_1} = พลังงานของลูกตุ้มขณะกระทบหัวเสาเข็ม

E_{n_2} = พลังงานที่สูญเสียไปให้กับความเฉื่อยของลูกตุ้มและเสาเข็มขณะกระทบ

E_{n_3} = พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจาก elastic deformation ของที่รองหัวเสาเข็มและดิน

พลังงานต่างๆในสมการสามารถหาได้จากขบวนการตอกเสาเข็มซึ่งมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องอยู่ 4 อย่างคือ กำลังของเครื่องตอก, เครื่องตอก, ที่รองหัวเสาเข็มหรือเสาส่ง, ตัวเสาเข็ม, และดินที่เสาเข็มฝังอยู่ ตามรูป 2.2

เริ่มตั้งแต่จะปล่อยตุ้ม (รูปที่ 2.2 ก) ลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็มและดันเสาเข็มเคลื่อนที่ไปมากที่สุด (รูปที่ 2.2 ข) และเมื่อยกลูกตุ้มออก (รูปที่ 2.2 ค) จะเห็นได้ว่าก่อนที่ลูกตุ้มจะกระทบหัวเสาเข็มปลายบนของเสาเข็มอยู่ระดับ A-A เมื่อกระทบหัวเสาเข็มและดันเสาเข็มเคลื่อนตัวไปมากที่สุดไปอยู่ที่ระดับ B-B ระยะทางที่ลูกตุ้มเคลื่อนที่ตั้งแต่เริ่มกระทบหัวเสาเข็มจนกระทั่งหยุดเคลื่อนที่คือ S_t ซึ่งเท่ากับผลรวมของการยุบตัวของ C_1, C_2, C_3 [3]

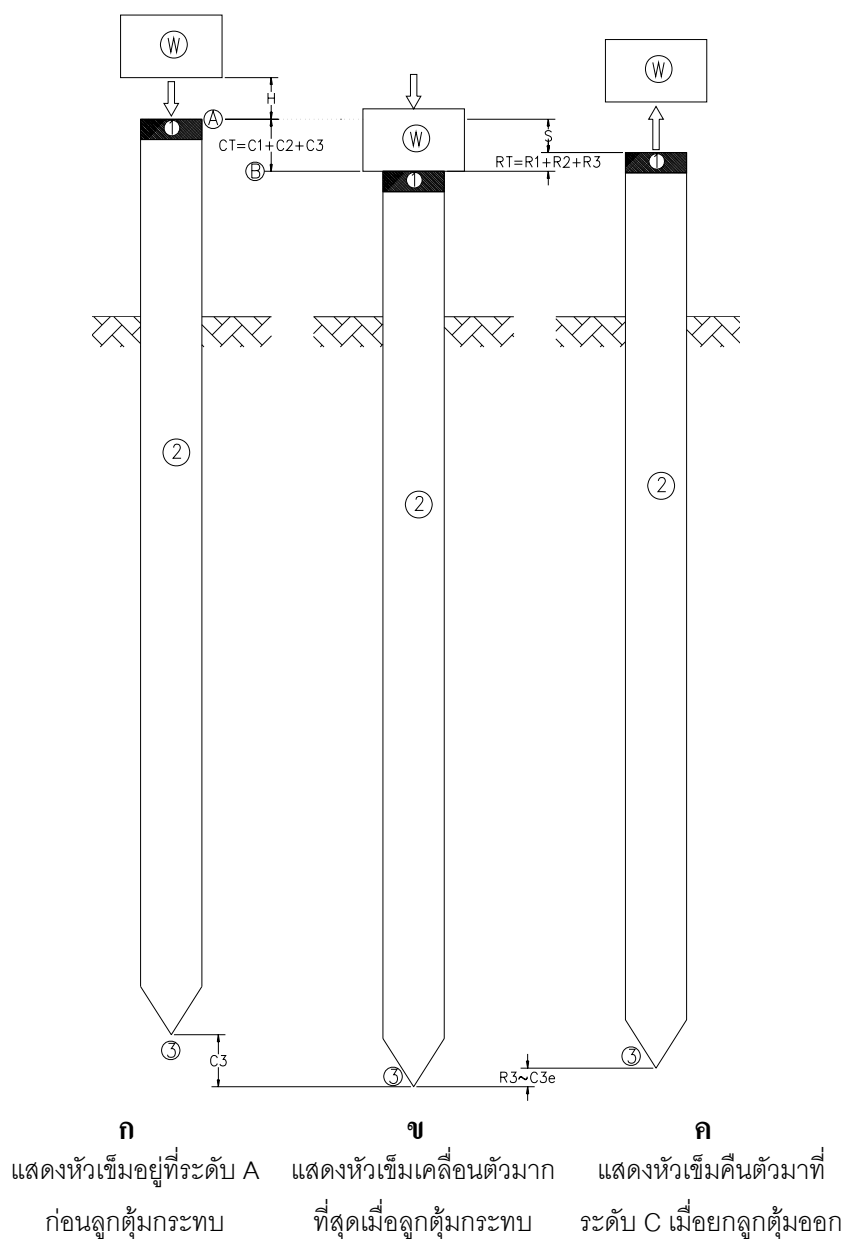
เมื่อ C_1 = Elastic deformation ของที่รองหัวเสาเข็ม

C_2 = Elastic deformation ของเสาเข็ม

C_3 = Elastic + Plastic deformation ของดิน

$$= C_{3e} + C_{3p}$$

$$= C_{3e} + S; (C_{3p} = C_t - R_t = S)$$



เมื่อ; 1 ส่วนที่รองหัวเสาเข็ม 2 ตัวเสาเข็ม 3 ดิน S=Settlement R=Rebound

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการสูญเสียพลังงานในขณะทำการตอกเสาเข็ม[3]

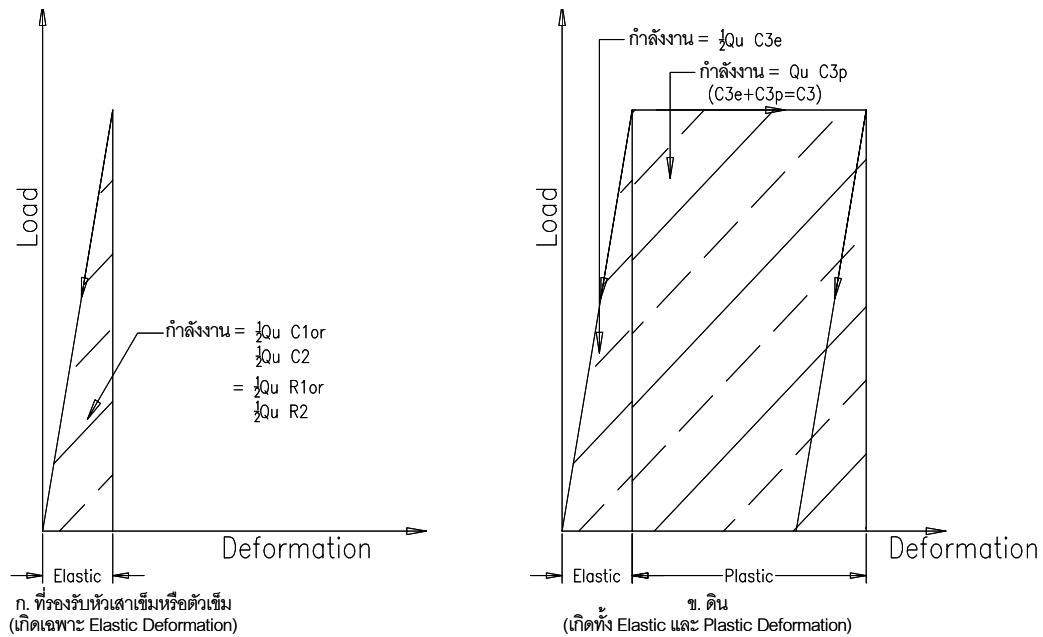
เมื่อยกลูกตุ้มออกจะเกิดการคืนตัว (Rebound) เป็นระยะเท่ากับ R_t ซึ่งเป็นผลรวมของการคืนตัวในช่วง elastic ของทั้ง 3 องค์ประกอบคือที่รองหัวเสาเข็ม (R_1) เสาเข็ม (R_2) และดิน (R_3) โดยที่

$$R_1 = C_1$$

$$R_2 = C_2$$

$$C_3 = C_{3e}$$

กำลังงานที่เกิดขึ้นและที่สูญเสียไปในสมการที่ 2.1 สามารถเขียนโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงข้อสมมุติสำหรับ Load Deformation ในองค์ประกอบต่างๆ[3]

ดังนั้น; พลังงานที่ทำให้เสาเข็มเคลื่อนที่ = พลังงานที่เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม

$$En = Qu \cdot S \quad (2.2)$$

$$En_1 = eWh$$

$$En_2 = \frac{eWh(1-r^2)}{W+P}$$

$$En_3 = \frac{Qu}{2}(C1+C2+C3e)$$

แทนค่าในสมการที่ 2.1 ได้เป็น

$$Qu \cdot S = eWh - \frac{eWh(1-r^2)}{W+P} - \frac{Qu}{2}(C1+C2+C3e) \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ } P = -\frac{eWh}{S + \frac{1}{2}(C1+C2+C3e)} - \frac{eWh(1-r^2)}{S + \frac{1}{2}(C1+C2+C3e)(W+P)} \quad (2.4)$$

เมื่อ; e = ประสิทธิภาพของเครื่องตอก

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม

P = น้ำหนักของเสาเข็ม

r = สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution)

Qu = แรงต้านสูงสุดของเสาเข็มที่เกิดการเคลื่อนที่เป็นระยะ S เนื่องจากการตอก

ค่า $S, C1, C2, C3$ พิจารณาจากรูปที่ 2.2 [3]

ตารางที่ 2.1 สูตรการคำนวณหาค่าการรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก (Dynamic Pile Driving Formula) ที่เหมาะสมในชั้นดินกรุงเทพฯ

ชื่อสูตร	สูตร	หมายเหตุ
Hiley 's Formula (1930)	$Qu = \frac{W_r h Z}{S + C/2} * \frac{W_r + r^2 W_p}{W_r + W_p}$	Qu = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (ตัน) W_r = น้ำหนักค้อน (ตัน) W_p = น้ำหนักเสาเข็ม (ตัน) r = Coefficient of restitution = 0.25 เสาเข็มคอนกรีตตอกด้วยลูกตุ้มปล่อย รองด้วยกระสอบ h = ระยะยกค้อนสูงจากหัวเสาเข็ม (ชม.) Z = Equipment Loss Factor (1 สำหรับ Falling hammer, 0.80 สำหรับ Drop hammer with Friction winch) C = Temporary Com press ion = $C1 + C2 + C3$ $C1$ = การยุบตัวของกระสอบรองหัว เสาเข็มหนา $L2$ (ม.) $= 1.8 * \frac{Qu.L2}{A}$ $C2$ = การยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีต เสริมเหล็กที่ยาว L (ม.) $= 0.72 * \frac{Qu.L}{A}$ $C3$ = การยุบตัวของดินใต้และรอบ เสาเข็ม $= 1.8 * \frac{Qu.L2}{A}$ A = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (ตร.ชม.) S = ระยะจมของเสาเข็ม (ชม./ ครั้ง) คิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย [3]

ตารางที่ (ต่อ) 2.1 สูตรการคำนวณหาค่าการรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก (Dynamic Pile Driving Formula) ที่เหมาะสมในชั้นดินกรุงเทพฯ

Engineering News Formula (1965)	$Qu = \frac{W_r h}{S + 2.54C}$	Qu = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (ตัน) W_r = น้ำหนักลูกตุ้ม (ตัน) h = ระยะยกตุ้ม (ชม.) S = ระยะจมของเสาเข็ม (ชม./ครั้ง) $C = 0.90$ สำหรับตอกด้วยตุ้มปล่อย (Drop Hammer) [3]
Modified Engineer New Formula (Eng 1965)	$Qu = \frac{W_r h Z}{S + C/2} * \frac{W_r + r^2 W_p}{W_r + W_p}$	Qu = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (ตัน) C = ประสิทธิภาพของการใช้ลูกตุ้มตอกชนิดต่างๆ (สำหรับ Drop Hammer อยู่ในช่วง 0.75- 1.00) W_r = น้ำหนักลูกตุ้ม (ตัน) h = ระยะยกตุ้ม (ชม.) $n = 0.25$ W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน) E_h = พลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม (สำหรับ Drop Hammer $E_h = W_r h$) [4]
Junbu 's Formula (Alson and late 1967)	$Qu = \frac{W_r h}{Ku.S}$ $Ku = Cd \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{Cd}} \right]$ $Cd = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_r}$	Qu = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (ตัน) W_r = น้ำหนักลูกตุ้ม (ตัน) W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน) h = ระยะยกตุ้ม (ชม.) A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (ตร. ชม.)

ตารางที่ (ต่อ) 2.1 สูตรการคำนวณหาค่าการรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก (Dynamic Pile Driving Formula) ที่เหมาะสมในชั้นดินกรุงเทพฯ

	$\lambda = \frac{W_r h L}{AES^2}$	S = ระยะจมของเสาเข็ม (ซม./ครั้ง) คิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย E = ค่า Elastic Modulus ของเสาเข็ม (ตัน/ ซม.².) L = ความยาวของเสาเข็ม (ม.) [3]
Gates's Formula (1957)	$Qu = 4.0\sqrt{e_h W_r h} * \log(25/S)$	Q_u = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (ตัน) $e_h = 0.75$ for drop and 0.85 for all other hammers h = ระยะยกตุ้ม (ซม.) S = ระยะจมของเสาเข็ม (ซม./ครั้ง) [4]
Load Bearing Capacity	$Qu = \frac{a}{S + 1/2\sqrt{2ab}}$	Q_u = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (ตัน) a = กำลังงานจากการตอกที่หัวเสาเข็ม $eWrh$ $e = 1$ สำหรับ Falling hammer, 0.80 สำหรับ Drop hammer with Friction winch $b = \frac{L}{AE}$ พลังงานที่สูญเสียไปในตัวเสาเข็ม W_r = น้ำหนักลูกตุ้ม (ตัน) W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน) L = ความยาวของเสาเข็ม (ม.) A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (ตร. ซม.)

ตารางที่ (ต่อ) 2.1 สูตรการคำนวณหาค่าการรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก (Dynamic Pile Driving Formula) ที่นิยมใช้กัน

		E = ค่า Elastic Modulus ของ เสาเข็ม (ตัน/ ซม. ²) h = ระยะยกตุ้ม (ซม.) S = ระยะจมของเสาเข็ม (ซม./ ครั้ง) [3]
Danish 's Formula (Alson and late 1967)	$Q_u = \frac{e_h E_h}{S + C_1}$ $C_1 = \sqrt{\frac{e_h E_h L}{2AE}}$	Q_u = ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก ปลอดภัยของเสาเข็ม (ตัน) e_h = ประสิทธิภาพของการใช้ตุ้ม ตอกชนิดต่างๆ (สำหรับ Drop Hammer อยู่ในช่วง 0.75- 1.00) E_h = พลังงานที่ใช้ในการตอก เสาเข็ม (สำหรับ Drop Hammer $E_h = W_r h$) W_r = น้ำหนักตุ้มตอก (ตัน) L = ความยาวของเสาเข็ม (ตัน) A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (ตร. ซม.) E = ค่า Elastic Modulus ของ เสาเข็ม (ตัน/ ซม. ²) h = ระยะยกตุ้ม (ซม.) S = ระยะจมของเสาเข็ม (ซม./ ครั้ง) [5]

2.4 การกำหนดค่า Safety of Factor ที่เหมาะสมของเสาเข็ม

สำหรับชั้นดินบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety of Factor) ที่เหมาะสมประมาณ 2 เท่า ส่วนในบริเวณอื่นที่ชั้นดินตอกเสาเข็มความลึกไม่เกิน 15.00 ม. จะต้องเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยขึ้นเป็น 3.0- 4.0 เท่า เนื่องจากความยาวของเสาเข็มลดลง ทำให้พื้นที่รับแรงเสียดทานของเสาเข็ม (Skin Friction) ลดน้อยลงด้วย ส่งผลให้เสาเข็มรับน้ำหนัก

บรรทุกด้วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ต้องเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยมากขึ้น เนื่องจากการแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะให้ค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มเคลื่อนตัวจมลงด้วยค่าหนึ่ง แต่ค่าแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวเสาเข็มพบได้ ก่อนที่ปลายเสาเข็มถึงจุดที่แบกทานสูงสุดและอีกสาเหตุหนึ่งคือ ค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มค่อนข้างจะมีค่าผันแปร เมื่อเทียบกับค่า Blow Count ส่วนค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มค่อนข้างคำนวณได้แน่นอน ทำให้เมื่อใช้เสาเข็มที่มีความยาวน้อยกว่า 15.00 ม.จึงควรเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยขึ้นอีก

จากสาเหตุดังกล่าว จึงได้มีการแนะนำค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสม สำหรับความยาวเสาเข็มต่างๆ[8]

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety of Factor) ที่สัมพันธ์กับความยาวเสาเข็ม

ความยาวเสาเข็ม (เมตร)	อัตราส่วนความปลอดภัย (เท่า)
1.00-7.00	4.0
8.00-11.00	3.5
12.00-15.00	3.0
16.00 ขึ้นไป	2.5

2.5 ค่า Factor ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานต่อการทรุดของเสาเข็ม

2.5.1 น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม และน้ำหนักของเสาเข็ม

ในการตอกเสาเข็ม โดยใช้ลูกตุ้มตอกแบบ Drop Hammer มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับน้ำหนักของลูกตุ้ม เพราะถ้าใช้น้ำหนักของลูกตุ้มไม่เหมาะสมจะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่างกัน ปรมาณ และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเสาเข็มได้ คือ ถ้าน้ำหนักของลูกตุ้มตอกมากเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม อาจทำให้เสาเข็มในช่วงกลางเสาและปลายล่างเสาเกิดความเสียหาย และค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (S) จะมีค่ามากทำให้การคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มจากสูตรการตอกเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ลูกตุ้มตอกเสาเข็มเบาเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม จะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มจะมากกว่าที่เป็นจริง และถ้าใช้ลูกตุ้มตอกเสาเข็มเบาเกินไปแล้ว พยายามยกลูกตุ้มให้สูงเพื่อให้เสาเข็มจมลงไปถึงระดับที่ต้องการ อาจทำให้หัวเสาเข็มที่ลูกตุ้มกระทบเกิดความเสียหายได้

การเลือกใช้น้ำหนักของลูกตุ้มที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มมาก

- น้ำหนักมากที่สุดของลูกตุ้มตอก (Milligan)

$$W_{\max} = \frac{0.0764 A \sqrt{B}}{h} \quad (2.5)$$

เมื่อ $W_{\max} =$ น้ำหนักมากที่สุดของลูกตุ้มตอก

$A =$ เนื้อที่ด้านกว้างของเสาเข็ม

$B =$ หน้ากว้างของเสาเข็ม

$H =$ ระยะตกของลูกตุ้มตอก

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าน้ำหนักน้อยสุดของลูกตุ้มตอก (Humes)

ความยาวของเสาเข็ม (เมตร)	$W_{\min}$ (tons.)	หมายเหตุ
15.00	W_p	$W_p =$ น้ำหนักของเสาเข็ม
15.00-18.00	$0.75 W_p$	
มากกว่า 18.00	$0.5 W_p$	

● เกณฑ์กำหนดของ ระยะตกกระทบของลูกตุ้ม

เสาเข็มขนาดเล็ก จะใช้ระยะยก = 30 - 50 ซม.

เสาเข็มขนาดกลาง จะใช้ระยะยก = 50 - 80 ซม.

เสาเข็มขนาดใหญ่ จะใช้ระยะยก = 80 - 120 ซม.

2.5.2 อัตราเร็วของลูกตุ้มตอก

พลังงานของตุ้มตอกเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วที่ใช้ในการตอก โดยทั่วไปแล้ว ถ้าใช้อัตราส่วนในการตอกเสาเข็มมากจะทำให้พลังงานที่ถ่ายไปสู่เสาเข็มมาก และจะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มมีค่ามากตามไปด้วย อันอาจจะทำให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากสูตรการตอกเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติ

2.5.3 มีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม

สำหรับเสาเข็มที่ตอกในดินเหนียว (Cohesive Soil) ถ้ามีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม ทำให้การตอกเสาเข็มไม่ต่อเนื่องมีการหยุดพัก ทั้งๆที่การตอกเสาเข็มลงไปยังไม่ถึงระดับที่ต้องการเช่น ขณะที่ทำการตอกเสาเข็มแล้วเครื่องมือที่ใช้เกิดขัดข้อง การหยุดพักชั่วขณะนี้จะทำให้แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบๆเสาเข็มเพิ่มขึ้น เมื่อเริ่มตอกเสาเข็มใหม่จะทำให้ระยะทรุดของเสาเข็ม (S) ลดลงจากเดิมก่อนการหยุดตอกมาก ในกรณีนี้จะต้องทำการตอกเสาเข็มให้ลึกลงไปในดินสักระยะหนึ่งก่อนเพื่อทำลายแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบๆ เสาเข็มที่เกิดขึ้นในระหว่างหยุดการตอกเสาเข็มให้หมดไปเสียก่อน จึงจะเริ่มจกระยะทรุดตัวของเสาเข็ม (S) ใหม่ได้ระยะที่ต้องตอกเสาเข็มลงไปใหม่นี้อาจอยู่ระหว่าง 2-3 นิ้ว จนถึงหลายๆ เมตร แต่โดยทั่วไปแล้วเราจะกำหนดให้ตอกเสาเข็มต่อลงไปอีกประมาณ 1.50 ม. แล้วจึงทำการจกระยะทรุดตัวของเสาเข็มใหม่

2.5.4. ที่รองหัวเสาเข็ม

ในระหว่างการตอกเสาเข็ม ลูกตุ้มที่ใช้ตอกจะต้องกระทบที่รองหัวเสาเข็มก่อนทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญหายไปก่อนถึงตัวเสาเข็ม ดังนั้นในระหว่างการตอกเสาเข็มที่รองหัวเสาเข็มต้องอยู่ในสภาพดี และการจดค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็มไม่ควรทำทันทีหลังจากการเปลี่ยนที่รองหัวเสาเข็มใหม่ควรจะรอจนกระทั่งวัสดุที่ใช้รองหัวเสาเข็มอยู่ในสภาพเหมือนก่อนเปลี่ยนที่รองหัวเสาเข็มเสียก่อน

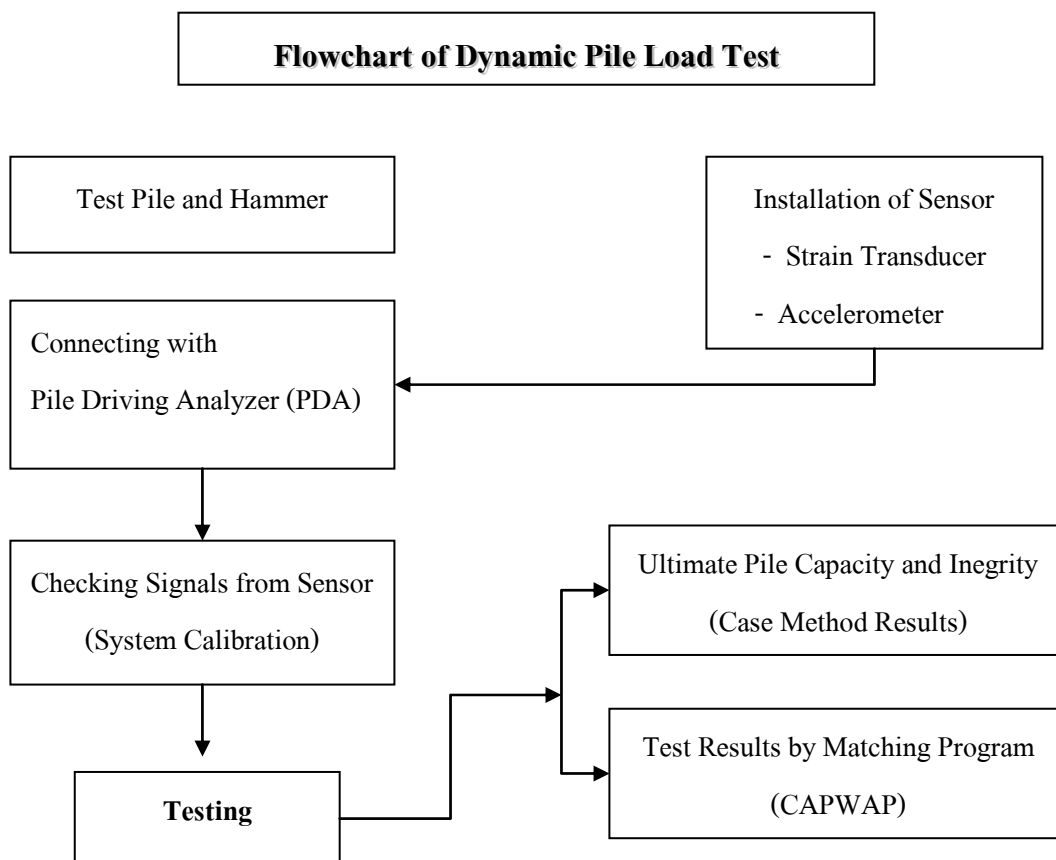
2.5.5. เสาส่ง

เสาส่ง คือ เสาที่ใช้สำหรับสวมหัวเสาเข็มแล้วตอกให้เสาเข็มจมลึกกลงไปในดิน ในกรณีที่ต้องการให้ระดับหัวเสาเข็มอยู่ลึกกลงไปจากระดับผิวดิน เสาส่งจะมีผลต่อระยะการทรุดตัวของเสาเข็มคือ ทำน้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ทำให้เสาเข็มตอกลงไปได้ยากกว่าเดิมระยะทรุดตัวของเสาเข็มจะลดน้อยลงมาจากเดิม และถ้าเสาส่งสวมไม่พอดีกับหัวเสาเข็มจะทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไป และทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มลดน้อยลง ดังนั้นเสาส่งที่ใช้ควรเป็นเสาท่อนเดียว และมีความแข็งแรงพอ การสวมเสาส่งกับหัวเสาเข็มต้องทำอย่างแน่นหนา เสาส่งควรทำด้วยเหล็กไม้เนื้อแข็งหรือวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ทำให้พลังงานสูญเสียไปขณะตอก [4],[8]

2.6 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test on Drive Pile)

ในปัจจุบันการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ลักษณะการทดสอบจะใช้ตุ้มน้ำหนักปล่อยกระแทกที่หัวเสาเข็มให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวแรงกระแทกจากตุ้มน้ำหนัก จะทำให้เกิดคลื่นความเค้นอัดเคลื่อนที่ลงในเสาเข็ม ด้วยความเร็วคลื่นที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเสาเข็ม โดยคลื่นความเค้นดังกล่าวจะสะท้อนกลับเมื่อแรงต้านทานจากแรงเสียดทาน, แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม, คุณสมบัติของเสาเข็มและพื้นที่หน้าตัดเกิดการเปลี่ยนแปลง คลื่นความเค้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบจะถูกบันทึกโดย Strain transducers และ Accelerometers ที่ถูกติดตั้งบริเวณหัวเสาเข็ม สัญญาณจากการทดสอบจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของแรงและความเร็ว เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักทางสถิตศาสตร์ (แรงเสียดทานผิวและแรงต้านทานปลายเข็ม) ด้วยโปรแกรม CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)

2.6.1. ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Testphrp

ข้อดีของการทดสอบแบบพลศาสตร์

- ใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีการทดสอบด้วยวิธี Static Pile Load Test หากมีจำนวนเสาเข็มหลายต้นสามารถทดสอบได้ภายในวันเดียว
- ใช้พื้นที่ในการทดสอบน้อย จึงเหมาะกับพื้นที่แคบๆที่ต้องการทดสอบการรับน้ำหนัก ซึ่งวิธีการทดสอบแบบ Static Pile Load Test ไม่สามารถเข้าไปทดสอบได้
- ผลการทดสอบเป็นข้อมูลเพียงพอสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักและความสมบูรณ์ของเสาเข็ม
- เป็นการทดสอบที่ประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการทดสอบแบบ Static Pile Load Test [13]

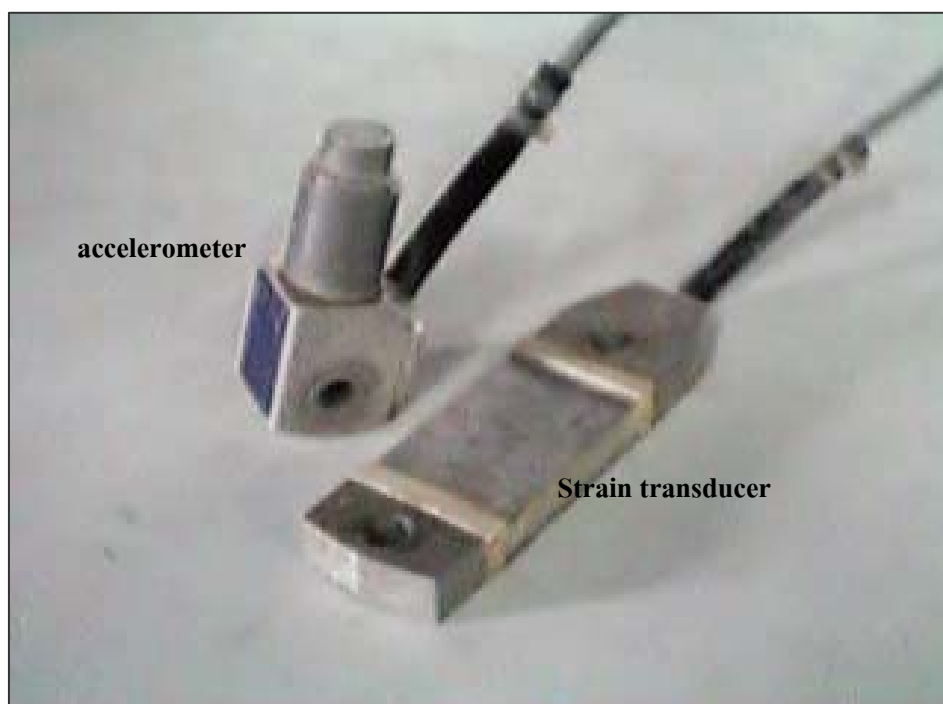
2.6.2. วิธีการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

2.6.2.1 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการตอกเสาเข็มและอุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณของแรงและความเร็วขณะทำการทดสอบในสนาม ได้แก่

- **Accelerometer and Strain Transducer**

Strain Transducer มีจำนวน 2 ตัว เพื่อวัดแนวทางการเคลื่อนที่ของเสาเข็มประกอบด้วย foil gauge 4 ตัว ติดอยู่ที่จุดรวมหน่วยแรงบน flexible aluminum transducer frame ซึ่งมีการเชื่อมกันมีสายเคเบิลหุ้มสายอยู่ข้างในเพื่อความแม่นยำในการรองรับข้อมูลจะติดไว้ด้านข้างอยู่ตรงข้ามกัน 2 ด้านติดที่ระดับเดียวกับ Accelerometer สำหรับ Accelerometer มีจำนวน 2 ตัว เป็นเครื่องมือ Piezoelectric ที่มีการรวบรวม amplifier ไว้ภายในตามรูปที่ 2.5 เพื่อลดเสียงรบกวนและจะห่อหุ้มกับชั้นพลาสติก ที่ออกแบบพิเศษป้องกันไฟฟ้ารั่ว ชั้นพลาสติกยังมีคุณสมบัติจำกัดความถี่เพื่อป้องกันการเกิด resonance ตำแหน่งที่ติดตั้งจะอยู่ใต้หัวเสาเข็มลงมาอย่างน้อย 1-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มโดยจะติดไว้ด้านตรงข้ามอย่างหนาแน่นโดยใช้ Concrete anchor-bolt และไม่ถูกกระทบกระเทือนจากการเกิด bending ถ้าเป็นเสาเข็มคอนกรีตสายเคเบิลที่ต่อจาก Accelerometer และ Strain Transducer จะมารวมกันที่ Connection Box และต่อไปยัง PDA



รูปที่ 2.5 แสดงอุปกรณ์ Strain Transducer / Accelerometer

- **PDA Machine (Pile Driving Analyzer)**

เป็น Microcomputer ใช้ในการรับสัญญาณของ Strain และความเร่งในสนามจาก Strain Transducer และ Accelerometer และทำการขยาย กรองและปรับสัญญาณจาก transducer แต่ละตัว ซึ่งสัญญาณจาก accelerometer จะถูกส่งไปที่ integrator ทั้งสัญญาณจาก Strain Transducer และ accelerometer จะต้องผ่านการกลั่นกรองเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับ Frequency response ที่ 1600Hz เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการเปลี่ยนสัญญาณ ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงอุปกรณ์ Pile Driving Analyzer (PDA)

- **Hammer Strike**

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตอกเสาเข็มโดยทั่วไปซึ่งควรมีการประเมินอย่างคร่าวๆมาก่อน โดยพิจารณาถึงลักษณะชั้นดิน ระบบปั่นจั่นและองค์ประกอบต่างๆในการตอกเสาเข็ม เช่นขนาด ตั้ม, ระยะยก โดยอาจใช้โปรแกรม WEAP ทำการวิเคราะห์หาค่า Blow Count ที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้เสาเข็มเกิดความเสียหายและเป็นที่แน่ใจว่าก่อให้เกิดพลังงานที่เพียงพอที่จะทำให้ดินรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวจนได้ Fully mobilized load ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงอุปกรณ์ Hammer Strike

2.6.2.2 ชนิดของการทดสอบ

การทดสอบแบบพลศาสตร์เป็นการทดสอบที่มีจุดประสงค์ที่ต้องการประเมินถึงในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกการทรุดตัว (Load Settlement Curve), การกระจายหน่วยแรงเสียดทานผิว (Skin friction resistance distribution), แรงต้านทานที่ปลายเข็ม (Top resistance), ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (Pile integrity) สำหรับเสาเข็มตอกสามารถทำได้ใน 2 ลักษณะ คือ Initial Driving Monitoring และ Restrike Test ตามรูปที่ 2.8

- **Initial Driving Monitoring** เป็นการทดสอบขณะที่ทำการตอกเสาเข็ม หน่วยแรงคั้นสูงสุด (แรงอัดและแรงดึง), Blow Count, สภาพสมบูรณ์ของเสาเข็ม, ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธี Case Method สามารถตรวจสอบและบันทึกได้ในแต่ละครั้งของการตอกเสาเข็ม สำหรับการทดสอบแบบนี้จะทำให้ทราบข้อมูลต่างๆ ได้อย่างชัดเจน รวมถึงป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเสาเข็มในระหว่างการตอก ทำให้สามารถควบคุมงานตอกเสาเข็มให้ได้ตามข้อกำหนด วิธีการติดตั้งตามรูปที่ 2.8
- **Restrike Test** เป็นการทดสอบที่ได้หลังการตอกเสาเข็มไปแล้วระยะเวลาหนึ่ง เพื่อทำนายถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยปกติกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นตาม Soil set-up หรือระยะเวลาหลังการตอกเสาเข็ม ระยะเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของดิน วิธีการติดตั้งตามรูปที่ 2.8



Initial Driving Test



Restrike Test

รูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบการทดสอบแบบ Initial Driving Monitoring และแบบ Restrike Test

2.6.2.3 การเตรียมการก่อนการทดสอบ

ในการทดสอบแบบพลศาสตร์กับเสาเข็มตอก หัวเสาเข็มจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรับแรงกระแทกได้ ถ้าหัวเสาเข็มมีความบกพร่องอยู่ก่อนแล้ว การทดสอบโดยปล่อยค้อนน้ำหนักกระแทกหัวเสาเข็ม อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายกับหัวเสาเข็มได้จึงต้องมีการตรวจสอบสภาพหัวเสาเข็มก่อน บางกรณีสำหรับเสาเข็มตอกขนาดใหญ่ อาจจะใช้ค้อนขนาดใหญ่ การป้องกันไม่ไห้เสาเข็มเกิดความเสียหายระหว่างการทดสอบอาจทำได้โดยการจัดเตรียม Pile Cap ที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ สามารถต้านทานความเค้นสูงได้ ผิวบนของหัวเข็ม (Pile Cap) ควรจะเรียบและได้ระดับอยู่ในแนวราบ เพื่อให้หน่วยแรงที่เกิดจากการกระแทกของค้อนน้ำหนักกระจายอย่างสม่ำเสมอ

- การติดตั้ง Strain transducer และ Accelerometer

- Strain transducer และ Accelerometer อย่างละ 2 ชุด จะถูกติดตั้งไว้ตำแหน่งบริเวณหัวเสาเข็มบนด้านตรงข้ามซึ่งกันและกัน ตำแหน่งที่ติดตั้งจะต้องต่ำกว่าหัวเข็มประมาณ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม บางครั้งขั้นตอนการติดตั้งอาจจำเป็นต้องขุดดินบริเวณรอบเสาเข็ม ซึ่งจุดดังกล่าวควรสะอาดและปราศจากน้ำท่วมขังตามรูปที่ 2.9

- ค้อนน้ำหนักและระยะยก

ค้อนน้ำหนักควรมีน้ำหนักอย่างน้อย 1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักออกแบบบรรทุกประลัยของเสาเข็มหรือมากกว่านั้น ค้อนน้ำหนักที่นิยมใช้ในการทดสอบจะมีขนาด 4, 8 และ 20 ตันตามความเหมาะสมของขนาดเสาเข็มและกำลังรับน้ำหนัก ระยะยกเพื่อปล่อยค้อน จะถูกกำหนดจากประสบการณ์ของวิศวกรผู้ชำนาญการในการทดสอบหรืออาจจะคำนวณได้โดยใช้โปรแกรม GRLWEAP (Wave Equation Analysis Program) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่จะใช้ในการพิจารณาจะประกอบไปด้วย

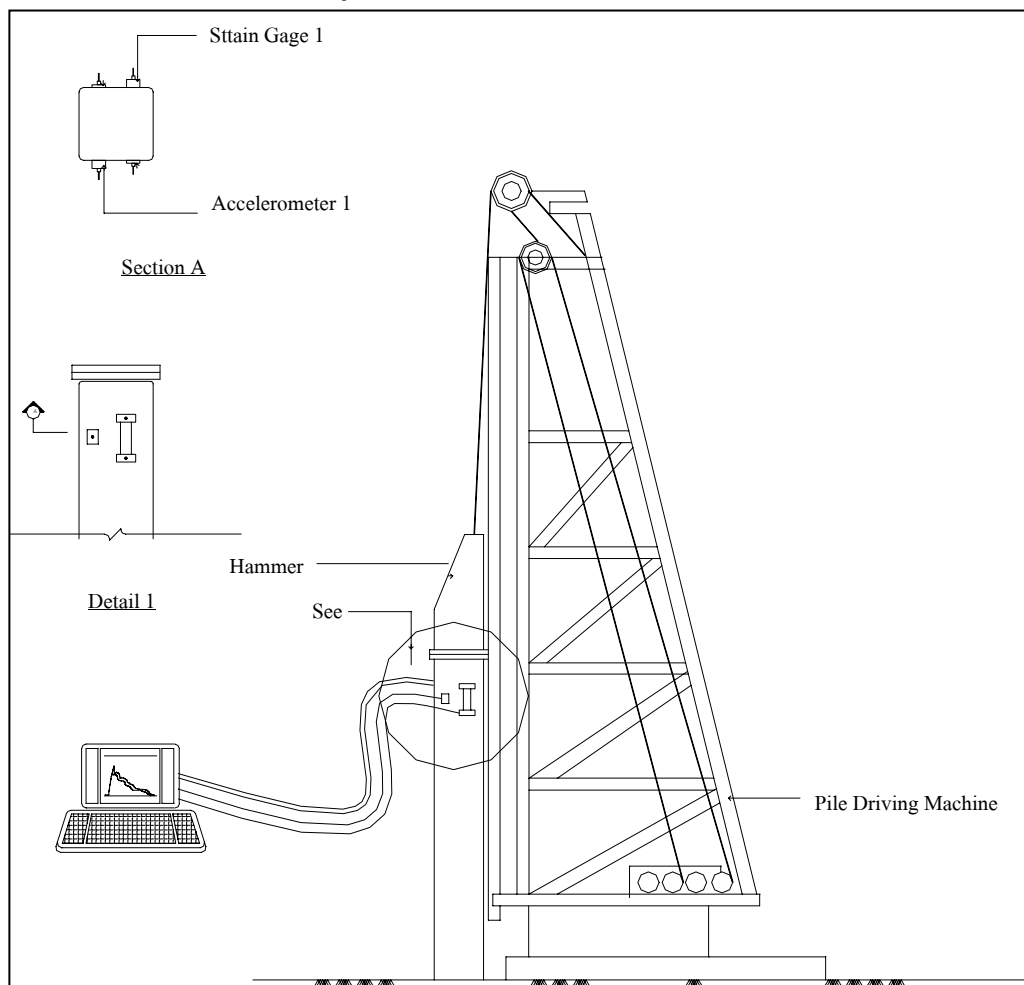
- หน่วยแรงเค้นสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในเสาเข็ม
- น้ำหนักค้อน
- ประสิทธิภาพของระบบปล่อยค้อนน้ำหนัก
- น้ำหนักออกแบบของเสาเข็ม

ก่อนการทดสอบควรจะมีการทดสอบปล่อยค้อนกระแทกหัวเสาเข็มด้วยระยะสั้นๆ เพื่อตรวจสอบสัญญาณและให้ไม้รองหัวเสาเข็ม (Wooden cushion) เข้าที่ แผ่นที่ดังกล่าวติดตั้งไว้บนหัวเสาเข็มเพื่อช่วยให้หน่วยแรงเค้นที่เกิดจากการกระแทกค้อนน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอลงบนหัวเสาเข็มและป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหัวเสาเข็ม

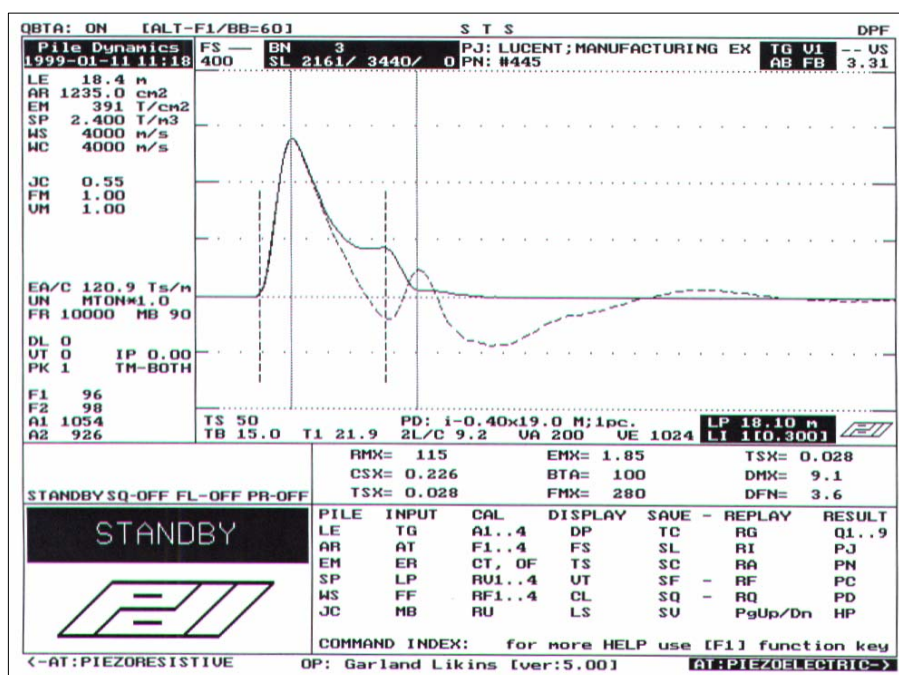
- การบันทึกสัญญาณ

หลังการทดลองปล่อยค้อนด้วยระยะยกสั้นๆพร้อมตรวจสอบสัญญาณเสร็จก็เริ่มทำการทดสอบได้โดยปล่อยค้อนด้วยระยะยกที่เหมาะสมให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวถาวรประมาณ 3 มม. ค่าการ

ทรุดตัวถาวรที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งในการปล่อยตุ้มกระแทกสามารถวัดได้โดยใช้กล้อง Theodolite วิธีการติดตั้งตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณ โดย PDA [7]



รูปที่ 2.10 แสดงผลการทดสอบบนหน้าจอ PDA [7]

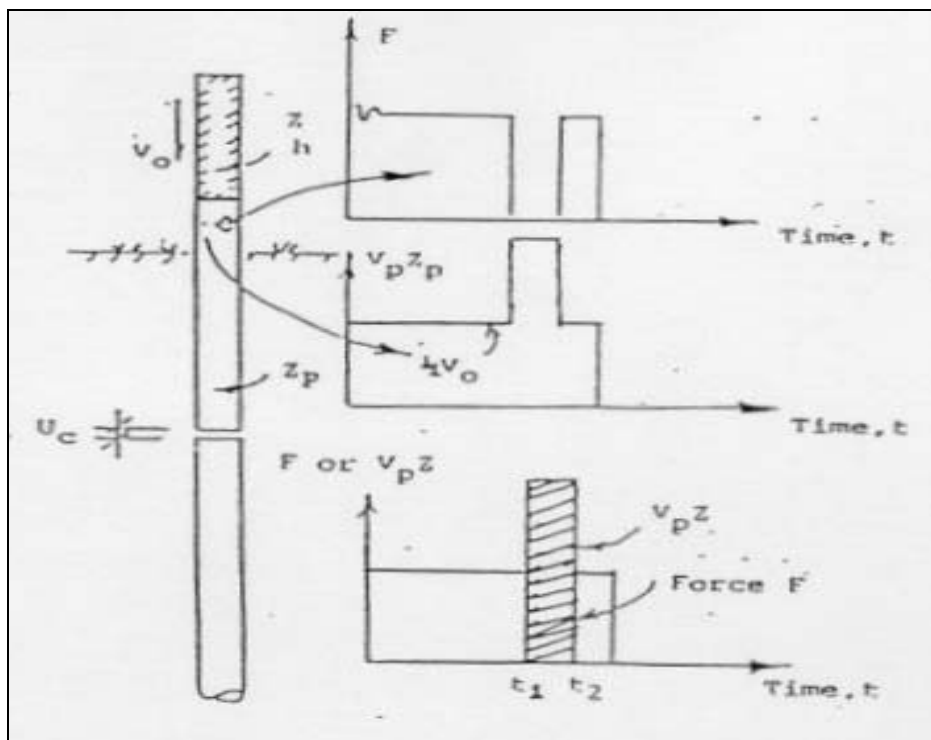
2.6.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณสะท้อนกลับ

- รอยขาดของเสาเข็ม

ค่าแรงและความเร็วที่ได้จากสัญญาณสะท้อนในเสาเข็มที่มีรอยต่อหรือรอยขาด เมื่อคลื่นกระทบรอยขาดจะสะท้อนกลับในรูปของแรงดึง มีผลให้ความเร็วของสัญญาณสะท้อนเพิ่มขึ้น และสัญญาณแรงเปลี่ยนจากแรงอัดเป็นแรงดึงช่วงหนึ่ง ดังรูปที่ 2.11 ความกว้างของรอยขาดสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.5 (Broms & Choo, 1987)

$$U_c = \frac{2}{t_1} t_2 F_i dt \quad (2.5)$$

โดยค่า t_1 และ t_2 เป็นช่วงเวลาที่คลื่นความเค้นพบรอยขาด



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะตามทฤษฎีของสัญญาณสะท้อนกลับที่หัวเสาเข็มเมื่อเสาเข็มมีรอยขาด[6]

- กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Capacity)

จากผลการทดสอบสามารถวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้ 2 วิธีดังนี้

1. **Case Method** วิธีการนี้เป็นวิธีการง่ายและทำได้รวดเร็วในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ อาศัยหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ ทันทีหลังการทดสอบ Pile Driving Analyzer (PDA) จะคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วย Case Method สำหรับค่า damping (Jc) ที่กำหนดตามสมการ 2.6 และ 2.7

$$R_T = \frac{F(t_1) + F(t_2)}{2} + \frac{Z_{pv}(t_1) - Z_{pv}(t_2)}{2} \quad (2.6)$$

เมื่อ, $(t_1) =$ เวลาที่เกิดความเร็วมากที่สุด

$$(t_2) = t_1 + 2L/c$$

$Z_p =$ Pile Impedance (EA/C)

$$R_T = R_s + R_d \quad (2.7)$$

แรงต้านทานทั้งหมด (R_T) จะมีค่าเท่ากับแรงต้านทานสถิตยศาสตร์ (R_s) กับแรงต้านทานพลศาสตร์ (R_d) ดังสมการ

$$R_d = J_c Z_p V_{top}$$

แรงต้านทานพลศาสตร์ R_d สมมติให้มีค่าเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเสาเข็ม

โดยค่า $J_c =$ Dimensionless Case Damping Factor ซึ่งขึ้นกับชนิดของดิน ตามตารางที่ 2.4

$$V_{toe} = 2V_{top} - R_T/Z_p \text{ (เมื่อเสาเข็มถูกสมมติเป็นวัตถุเกร็ง)}$$

$$R_s = R_T - R_d$$

$$R_s = R_T - J_c (2Z_p V_{top} - R_T)$$

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า Case Damping factor จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม (Rausche และ Goble, 1975)

ชนิดดินที่ปลายเสาเข็ม	J_c	Correlation Value
Sand	0.05-0.20	0.05
Silty Sand or Sandy Silt	0.15-0.30	0.15
Silt	0.20-0.45	0.30
Silty Clay and Clayey Silt	0.40-0.70	0.55
Clay	0.60-1.10	1.10

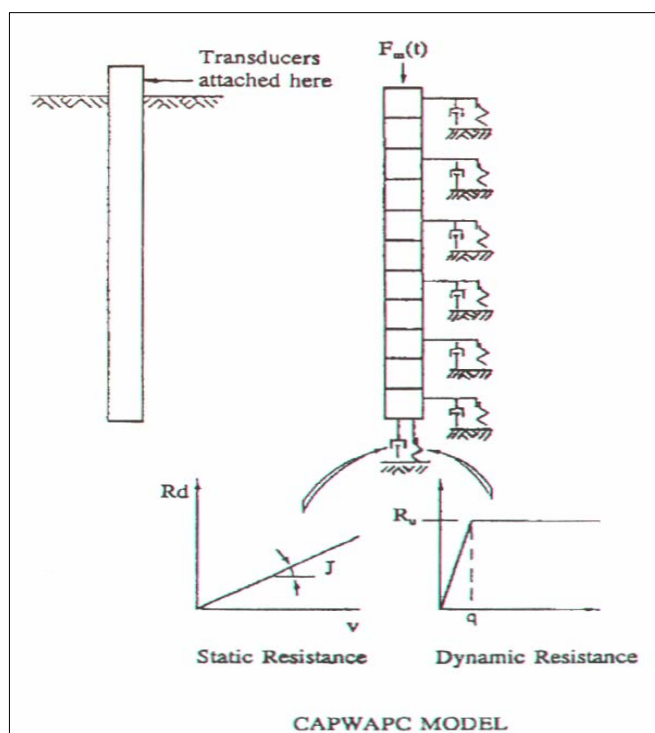
จะเห็นว่าการคำนวณตาม Case Method ดังกล่าวข้างต้นมาจากสมมติฐานหลายอย่างที่สำคัญ คือ เสาเข็มเป็นวัตถุเกร็ง และ ค่าแรงต้านทานของดินทางพลศาสตร์ ถูกสมมติฐานให้อยู่ที่ปลายเข็ม การคำนวณด้วยวิธีนี้จึงควรทำขณะที่เสาเข็มมีปลายเข็มอยู่บนชั้นดินแน่น

2. การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CAPWAP เป็นขั้นตอนในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธีอื่นๆ จากสัญญาณของแรงและความเร็วสามารถคำนวณคลื่นความเค้นหรือแรงที่วิ่งขึ้นได้ดังนี้

$$F_{um,j} = \frac{F_{m,j-F} - ZU_{m,j}}{2} \quad (2.8)$$

$$F_{dm,j} = \frac{F_{m,j-F} + ZU_{m,j}}{2} \quad (2.9)$$

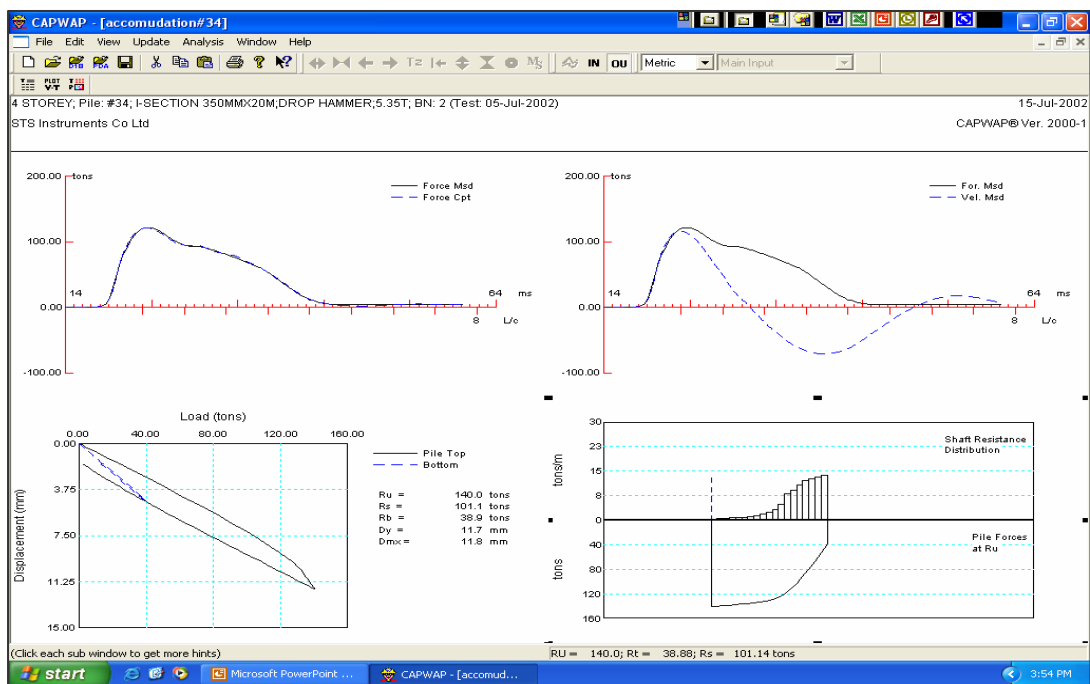
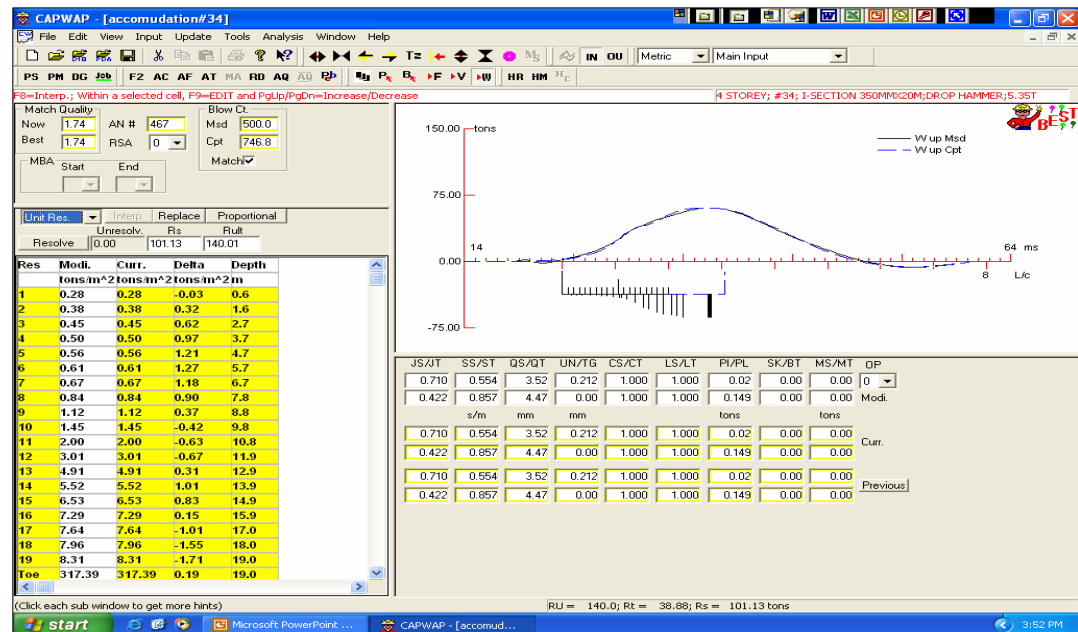
ที่เวลา j กำหนดให้ แรง; ความเร็วและแรงที่เคลื่อนที่ลงเท่ากับ F_{mj} , U_{mj} และ F_{dmj} ตามลำดับ (m คือตัวแปรที่ได้จากการวัดในสนาม) จาก Pile – Soil model ดังแสดงในรูป 2.12 ประกอบกับการสมมุติค่าตัวแปรต่างๆ เช่น แรงต้านทานของดิน (แรงต้านทานผิวและแรงต้านทานปลายเสาเข็ม), Quake, Soil Damping และอื่นๆสามารถที่จะคำนวณค่าความเร็ว (U_{cj}), และแรง (F_{cj}) และแรงในทิศทางเคลื่อนที่ขึ้น(F_{umj})



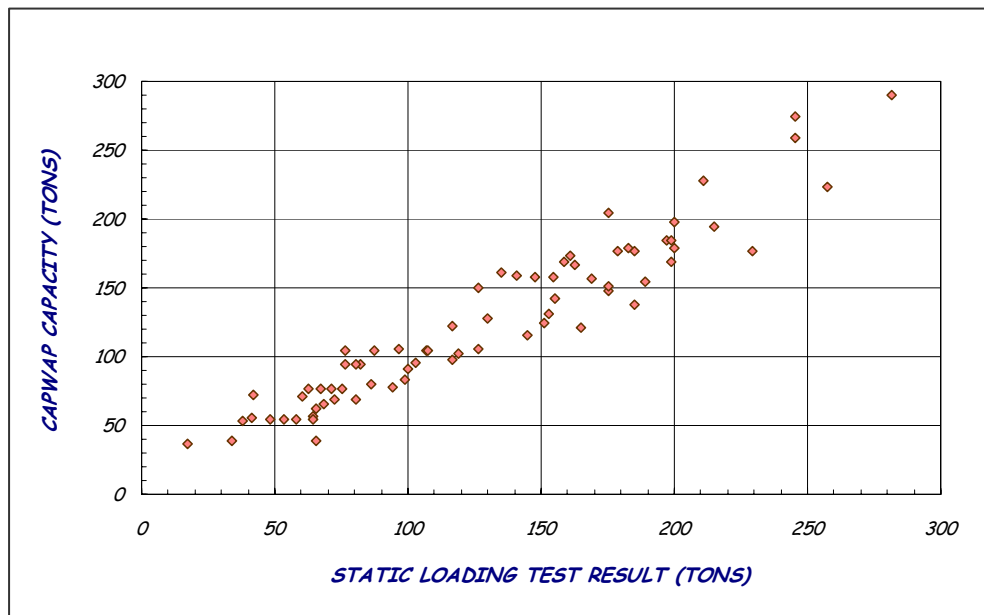
รูปที่ 2.12 แสดงแบบจำลองใน CAPWAPC[6]

ณ เวลา j ได้ ค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ในสนาม ตัวแปรต่างๆ ที่สมมุติขึ้นจะถูกปรับเปลี่ยนจนกระทั่งผลลัพธ์จากการคำนวณสอดคล้องกับผลที่วัดได้ในสนาม เมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์ก็จะทราบถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม อย่างเช่น แรงเสียดทานผิว, แรงต้านทานที่ปลายเข็ม, ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว, หน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการตอกเสาเข็ม จากการวิเคราะห์

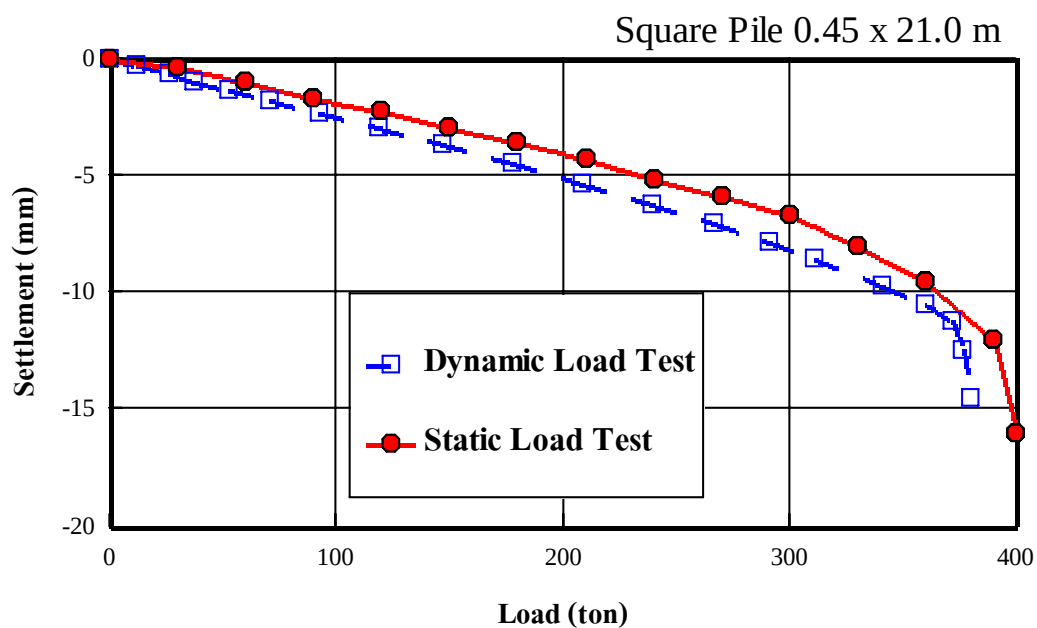
ด้วยโปรแกรม CAPWAP ก็สามารให้ข้อมูลเกี่ยวกับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วย Case Method แสดงได้ตามรูปที่ 2.13, 2.14, 2.15



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ CAPWAP[7]



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบผลการทดสอบCAPWAP Capacity กับ Static Load Test[7]



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการทดสอบDynamic Load Test กับ Static Load Test [7]

- ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (Pile Integrity)

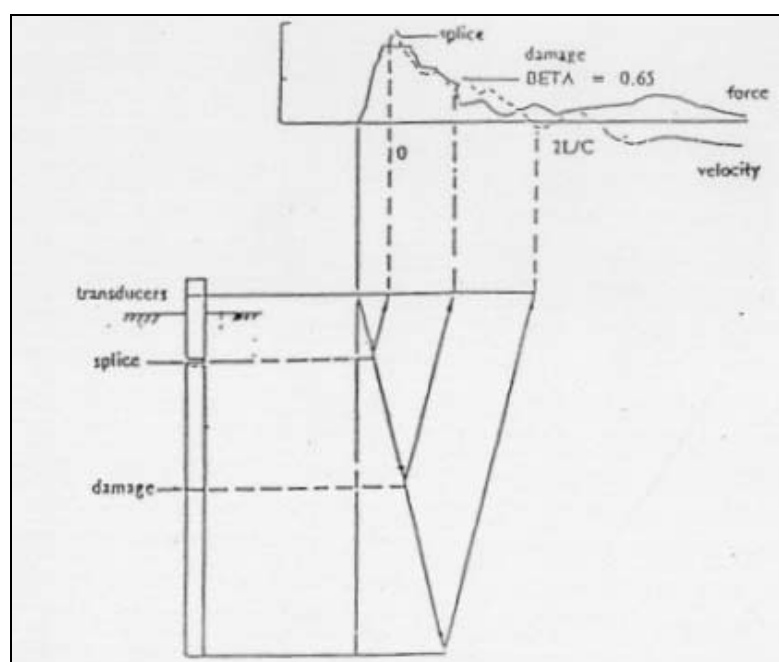
สำหรับเสาเข็มที่มีหน้าตัดและคุณสมบัติสม่ำเสมอตลอดความยาว คลื่นความเค้นดึงที่เคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากการสะท้อนที่ปลายเสาเข็มควรจะแสดงสัญญาณอย่างชัดเจนที่เวลาเท่ากับ $2L/C$ หลังจากการกระแทกของตุ้มน้ำหนัก หากพบคลื่นความเค้นดึงแสดงสะท้อนกลับเวลา $2L/C$ แสดงถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า impedance (ค่าคงที่เปลี่ยนแปลงเมื่อพื้นที่และคุณสมบัติของ

วัตถุเปลี่ยนแปลง) ในกรณีที่พิจารณาว่าคุณสมบัติของวัตถุคงที่ การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด ($\beta = Z_2 / Z_1$) สามารถหาจากสมการ

$$\beta = \frac{F_{jm1} - R_x + F_{um4}}{F_{jm1} - F_{um4}} \quad (2.10)$$

ณ เวลา t_4 คือ เวลาที่คลื่นความเค้นดึงแสดงสะท้อนกลับก่อนเวลา $2L/C$ R_x คือ ผลรวมของแรงต้านทานเหนือระยะ $X = Ct_{4/2}$ ที่มีขนาดหน้าตัดเปลี่ยนแปลงเมื่อ C คือความเร็วคลื่นในวัตถุ

ในการประกอบด้วย CAPWAP สามารถที่จะวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดหรือความไม่ต่อเนื่องได้ เช่น ในเสาเข็มตอกที่บางครั้งเสาเข็มมีความบกพร่อง เนื่องจากการตอกเสาเข็มด้วยระยะยกที่สูงเกินไปพิจารณาได้จากตัวอย่างที่ 2.16 [5-7],[20]



รูปที่ 2.16 ลักษณะค่าที่วัดจากสนามของสัญญาณสะท้อนกลับที่หัวเสาเข็มเมื่อเสาเข็มมีรอยร้าว[6]

ซึ่งปัจจุบันการทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Test เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก อยู่ในมาตรฐาน ASTM D 4945 การประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีนี้ทำได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าวิธี Static Load Test มาก ทั้งยังสามารถตรวจสอบสภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็มในดิน, กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม, การกระจายหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวด้านข้างเสาเข็ม, แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม, ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว, แรงเค้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการตอกเสาเข็ม ซึ่งทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของป็นจั่นที่ใช้ตอก

เสาเข็มในโครงการก่อสร้างด้วยความรวดเร็วและคล่องตัวนับว่าเป็นสิ่งที่ต้องการในวงการก่อสร้างของไทยในปัจจุบันเพราะนั่นหมายถึงระยะเวลาในการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายรวมสำหรับโครงการขนาดใหญ่จะลดลงอย่างมากเลยทีเดียว

2.6.3. โครงการประชาสัมพันธ์ในงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมปฐพี

การพัฒนากระบวนการข้อมูลทางด้านวิศวกรรมได้มีการนำโครงการประชาสัมพันธ์มาประยุกต์ใช้กับปัญหาในด้านวิศวกรรมปฐพีหลายๆทาง ซึ่งช่วยให้ประหยัดทรัพยากรที่ใช้ไปให้เกิดคุณค่ามากที่สุดและสามารถนำเอาข้อมูลเดิมที่มีการทดสอบในบริเวณที่ใกล้เคียง ซึ่งช่วยให้สามารถลดระยะเวลาในการพิจารณาออกแบบสิ่งก่อสร้างที่จะเกิดขึ้นและตรวจสอบลักษณะของชั้นดิน สำหรับงานวิจัยนี้สนใจนำโครงการประชาสัมพันธ์มาประยุกต์ใช้โครงการประชาสัมพันธ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Yi-Cherng Yeh, Yau-Hwaug Kuo and Deh-Shiu Hsu (1993) : ศึกษาการประยุกต์ใช้ ANN มาวิเคราะห์หาสาเหตุความเสียหายของเสาเข็มที่เกิดขึ้นระหว่างการตอกทั้งนี้ระบบดังกล่าวยังไม่ได้รวมเอาวิธีการของ Expert System มาช่วยในการทำเป็นฐานข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายบางส่วนหรือกล่าวได้ว่าเป็นการประยุกต์ Expert System กับ ANN เข้าด้วยกัน โดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับจากข้อมูลสาเหตุความเสียหายของเสาเข็มมี 12 สาเหตุใช้เป็น Input สำหรับระบุสาเหตุความเสียหายที่ใช้ตรวจสอบและได้เพิ่มสาเหตุความเสียหายเป็น 18 สาเหตุเพื่อใช้พิจารณาสาเหตุความเสียหายที่ใช้วิจัยปัญหาหรือเป็นข้อมูลนำเข้า ซึ่งมีข้อมูลสนับสนุนจากผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 240 ตัวอย่างโดยใช้ครึ่งหนึ่งสำหรับการ Training (120 ตัวอย่าง) และอีกครึ่ง(120 ตัวอย่าง)ใช้สำหรับการ Tested โครงข่าย ผลการเรียนรู้มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 0.00-0.50 ประมาณ 120 รอบใช้เวลา 30 นาที ซึ่งการนำเอา ANN ไปใช้ในการพัฒนาฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการคำนวณว่าสามารถนำมาจากแหล่งใดบ้าง และแบบจำลองโครงข่ายสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นเครื่องมือที่ได้มาจากการเข้าใจปัญหาจริงๆ

C. I. Teh, K.S. Wong, A. T.C.Goh, and S. Jaritngam (1996): ศึกษาการพยากรณ์ความสามารถการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้ ANN ซึ่งนำผลทดสอบเสาเข็มแบบ Dynamic Load Test ที่ตรวจสอบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักที่ผิวด้านข้างและที่ปลายเสาเข็มมาใช้เป็นฐานข้อมูลมีข้อมูลทั้งหมด 37 ข้อมูลได้มาจาก 21 หน่วยงานในประเทศสิงคโปร์ เป็นข้อมูลของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้ในการ Training โครงข่าย จำนวน 27 ข้อมูล มีค่า Qu ของผลทดสอบ CAPWAP ที่ใกล้เคียงกันมีค่าอยู่ในช่วง 590-3420 kn. ส่วนอีก 10 ข้อมูลที่เหลือใช้ในการ Tested มีค่าผลทดสอบ CAPWAP อยู่ในช่วง 710-2751 kn. ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของ ANN ได้นำข้อมูลเสาเข็มที่ไม่ใช่เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่นเสาเข็มตัว H , เสาเข็มไม้, เสาเข็มเหล็กและเสาเข็มกลวงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก จำนวน 4 ข้อมูลมาใช้วิเคราะห์ ซึ่งมีผลทดสอบ

CAPWAP อยู่ในช่วง 440-3045 kn. จากผลการทดสอบ ANN เมื่อทำนายค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบ Dynamic Load Test จริงมาก ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวเลขที่ได้จากการทำนายเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทั่วไปส่วนใหญ่ต่ำกว่าร้อยละ 10 ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการ Training โดยข้อมูลที่มีค่าเพียงพอและเป็นข้อมูลดิบที่มีค่าความน่าเชื่อถือสูง จะทำให้ได้ Network ที่สามารถใช้ในการทำนายค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้องรวดเร็วและใช้งานได้ง่ายเหมาะสมสำหรับเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณจริงเพื่อเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอื่นๆเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการประมาณค่ารับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทั้งค่า Skin Friction หรือ Toe resistance ข้อควรระวัง Neural Network เรียนรู้และหาค่าความสัมพันธ์จากชุดข้อมูลดิบที่ใช้ในการ Training ถ้าข้อมูลที่ใช้ไม่มีความน่าเชื่อถือหรือเป็นข้อมูลที่ความผิดพลาดสูงจะทำให้ Network ที่ได้มีความผิดพลาดสูงไปด้วยตัวโปรแกรม Neural Networks เปรียบเทียบได้กับนักเรียนที่มีความจำดีมากและความสามารถในการเรียนรู้ค่าความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลสูง

Anthony T.C. Goh (1996) : ศึกษาข้อมูลที่ได้จากการจดบันทึกการตอกเสาเข็มจริงโดยใช้การประมาณค่าจากสูตรตอกเสาเข็มซึ่งสูตรที่ใช้จะอาศัยการกระจายแรงจากการกระทำภายนอกแล้วทำให้เกิดการเคลื่อนตัวสูตรที่นำมาใช้มี 3 สูตรได้แก่ Engineering New (Wellington 1892), Hiley Formula (Hiley 1922) และสูตร Junbu Formula (Janbu 1953) ซึ่งสูตรเหล่านี้จะแตกย่อยมาจากสูตรของ Whitaker (1970) ซึ่งเป็นสูตรที่น่าเชื่อถือเป็นพื้นฐานของสูตรต่างๆที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางโดยใช้ข้อมูลในการศึกษา 116 ข้อมูลของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงและเสาเข็มเหล็ก 94 ข้อมูลเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก โดยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วนโดยใช้ 59 ข้อมูลสำหรับ Training โคจรเข้า 35 ข้อมูลสำหรับ Tested โคจรเข้าตามลำดับ แล้วทำการแปลงค่าข้อมูลให้อยู่ในช่วง 0-1 โดยใช้ ฟังก์ชัน Sigmoid ในการแปลงค่าจากการศึกษาจะกำหนด Input ไว้ 9 ตัวแปรซึ่งพิจารณาตัวแปรจากตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ได้แก่ โมดูลัสของเสาเข็ม, ความยาวของเสาเข็ม, พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม, น้ำหนักเสาเข็ม, ระยะยกค้ำคอก, ระยะทรุดตัวของเสาเข็มและชนิดของค้ำคอกที่แยกออกเป็น 2 ชนิด โดยใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบ Back-Propagation ใช้เวลาทดสอบ 10 นาทีจำนวนรอบ 20,000 รอบในชุดของการ Training ใช้คอมพิวเตอร์รุ่น 80486-3MHZ ให้ค่า Average sum squared error ในชุด Training มีค่า 34.5 kn. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรตอกเสาเข็มทั้ง 3 สูตร สูตร Junbu Formula มีค่า 58.3 kn. ในข้อมูลชุด Training และ 61.3 kn. ในชุด Tested ตามลำดับ

สนิท พิพิธสมบัติ (2543) : ศึกษาเกี่ยวข้องการนำข้อมูลสูตรการตอกเสาเข็มตอกมาวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อคำนวณหาสูตรที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในพื้นที่กรุงเทพฯโดยนำสูตรที่ใช้กับเสาเข็มตอกทั้งหมด ซึ่งมีข้อมูลของเสาเข็มหน้าตัด DH, เสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดรูปตัว I ที่ความยาวแตกต่างกัน 12 สูตร ได้แก่ สูตร Engineering New, Modified Engineering New, Hiley Formula, Dutch, So, Junbu Formula, Gate Formula, Eytewein, Navy McKay,

Rankine, Redtenbacher และ Pacific Coast Uniform Building Code โดยการนำผลการทดสอบแบบ Pile Load Test มาหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มทั้ง 12 สูตรและผลการทดสอบ Static Load Test ที่ได้จากสนามโดยใช้หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ นำข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมด แทนค่าในสูตรทั้ง 12 สูตร ซึ่งผลทดสอบจะเห็นว่าสูตรที่เหมาะสมกับเสาเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้แก่ Junbu, Hiley, So และ Modified Engineering New เสาเข็มรูปตัว DH ได้แก่สูตร Engineering New, So, Junbu Formula และ Gate และเสาเข็มรูปตัว I ใช้สูตรเดียวกับเสาเข็มแบบ HD เพราะปริมาณเสาเข็มรูปตัว I มีน้อยแต่หน้าตัดของเสาเข็มจะมีลักษณะคล้ายกับเสาเข็ม HD

อาชว์ นิยมไทย (2546) : ศึกษาเกี่ยวกับการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มแบบ Static Load Test ในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีข้อมูลทั้งหมด 173 ข้อมูล แบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ในชุด Training มีข้อมูล 40 ข้อมูล ชุด Tested มีข้อมูล 39 ข้อมูลและ Validation มีข้อมูล 97 ข้อมูล มี Input 8 ตัวแปร ซึ่งก่อนจะนำข้อมูลเข้าโครงข่ายจะทำการแปลงค่าข้อมูลให้อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ของทุกชุดข้อมูล โดยใช้ฟังก์ชัน Tangent Sigmoid ในการแปลงค่าข้อมูลทั้ง 3 ส่วน โดยมีแบบจำลองโครงข่ายทั้งหมด 18 แบบจำลองโดยใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Error Back Propagation โดยมีแอคติเวชันแบบ Hyperbolic Tangent Function และใช้วิธีการทางสถิติ RMSE มาใช้หาแบบจำลองที่ดีที่สุด จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ 10 มีชั้นซ่อน 2 ชั้น ประกอบด้วย 10 หน่วย รอบการคำนวณ 2000 รอบมีค่า RMSE 91.66 tons. และนำค่า RMSE ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเปรียบเทียบกับค่า RMSE ที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม ได้แก่สูตร Engineering New มีค่า RMSE 251.73 tons. สูตร Janbu Formula มีค่า RMSE 163.31 tons. และสูตร Hiley Formula มีค่า RMSE 315.25 tons. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบแบบ Static Load Test มากกว่าที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มแต่จะเห็นได้ว่ายังมีค่าความผิดพลาดที่มากอยู่

จากงานวิจัยที่กล่าวมาจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนางานทางด้านโครงข่ายประสาทเทียมและสูตรที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ เพื่อให้ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ประมาณใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด

บทที่ 3

ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม

3.1 วิวัฒนาการโครงข่ายประสาทเทียม

วิวัฒนาการโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มต้นขึ้นในปี พ.ศ. 2486 อาจถือได้ว่าเป็นปีแห่งการกำเนิดของสาขาโครงข่ายประสาทเทียมในวงการวิทยาศาสตร์ โดย แม็คคัลลอค (Mc Culloch) และ พิตส์ (Pitts) ได้เสนอแบบจำลองของเซลล์ประสาทและได้แสดงให้เห็นว่า ในทางทฤษฎีแล้ว โครงข่ายของแบบจำลองเซลล์ประสาทดังกล่าวสามารถทำงานเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใดๆ ก็ได้

ปี พ.ศ. 2492 โดแนลด์ เฮบบ์ (Donald Hebb) ได้เสนอผลงานวิจัยว่า การเรียนรู้ของสมองสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบของการประกอบเซลล์ประสาทเข้าด้วยกันเป็นโครงข่าย และได้เสนอกฎการเรียนรู้ของเฮบบ์ (Hebb's rule) ที่ทำให้โครงข่ายของเซลล์ประสาทเทียมที่แม็คคัลลอค และ พิตส์ ได้เสนอไว้ สามารถเรียนรู้ปัญหาต่างๆ ได้สำเร็จ การเรียนรู้ในแบบของเฮบบ์บนเซลล์ประสาทเทียมของแม็คคัลลอคและพิตส์เป็นการเรียนรู้แบบ "ไม่มีผู้สอน" ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการเรียนรู้จะพยายามทำการจัดกลุ่มข้อมูลที่โครงข่ายมองว่าคล้ายคลึงกัน นำไปไว้ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งไม่เหมาะสมกับปัญหาประเภทที่ต้องมีการควบคุมกระบวนการเรียนรู้

ในช่วงปี พ.ศ. 2490 คอมพิวเตอร์ที่ทำงานเลียนแบบสมองเครื่องแรกของโลกถูกสร้างและทดสอบโดยมินสกี (Minsky) ซึ่งได้เสนอผลงานดังกล่าวในปี พ.ศ. 2511 เมื่อคอมพิวเตอร์ได้รับการป้อนตัวอย่างสำหรับการเรียนรู้เข้าไป ก็จะสามารถปรับอัตราการขยายสัญญาณในการเชื่อมโยง หรือ "ความแข็งแกร่งของการเชื่อมโยง" ระหว่างเซลล์ประสาทเทียมได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการแสดงการเรียนรู้ตัวอย่างที่ถูกป้อนเข้าไป

ในปี พ.ศ. 2501 แฟรงค์ โรเซนแบลทท์ (Frank Rosenblatt) ได้พัฒนาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมขึ้น โดยใช้แบบจำลองของแม็คคัลลอคและพิตส์เป็นแนวทาง รวมทั้งเสนอวิธีการเรียนรู้แบบใหม่สำหรับสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมเรียกว่า เพอร์เซพตรอน (Perceptron) ซึ่งมีการเรียนรู้แบบ "มีผู้สอน" (supervised learning) โดยการปรับความแข็งแกร่งของการเชื่อมโยง ซึ่งจะพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบความรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับความรู้ของ "ผู้สอน" (teacher) เพอร์เซพตรอนมีความเหมาะสมกับงานประเภท "การระบุชนิด" ซึ่งในระหว่างการเรียนรู้ เพอร์เซพตรอนจะถูกสอนว่าข้อมูลตัวอย่างที่สอนเข้าไปแต่ละแบบจัดเป็นชนิดใดบ้าง หากปัญหาและข้อมูลตัวอย่างมีความเหมาะสม เพอร์เซพตรอนจะสามารถระบุชนิดของข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อนได้ถูกต้อง

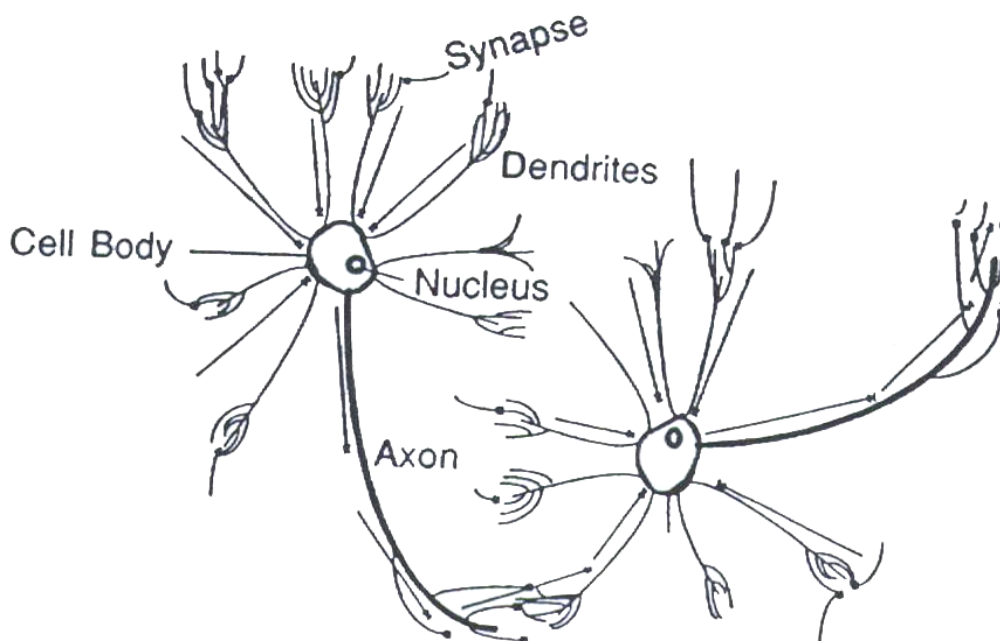
ในช่วงต้น พศ. 2500 เบอ์นาร์ด วิโดรว (Bernard Widrow) และมาร์เซียน ฮอฟฟ์ (Marcian Hoff) ได้พัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า อดาไลน์ (ADALINE; Adaptive Linear combiner) และกฎการเรียนรู้แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงเรียกว่า กฎการเรียนรู้ของวิโดรว-ฮอฟฟ์ (Windrow-Hoff learning rule) ที่เป็นการเรียนรู้แบบ "มีผู้สอน" ซึ่งในเวลาต่อมาอุปกรณ์ดังกล่าวได้รับการขยายแนวคิดไปเป็นมาดาคาไลน์ (MADALINE; Many ADALINEs) และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการรู้จำรูปแบบ (pattern recognition) การพยากรณ์อากาศ และระบบควบคุมที่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบไปตามสภาพแวดล้อมต่างๆ [10]

3.2 หลักการพื้นฐานของทฤษฎีโครงข่าย

3.2.1. เซลล์ประสาทชีวภาพ

การพัฒนาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเลียนแบบตามแนวทางการประมวลผลของสมองของสิ่งมีชีวิต ความเข้าใจในคุณลักษณะเชิงกายภาพ และเชิงพฤติกรรมขององค์ประกอบต่างๆ ในสมองของสิ่งมีชีวิต ระบบพื้นฐานของสมองคือ เซลล์ประสาท (neuron) สมองของมนุษย์ประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทจำนวนมากในระดับแสนๆ ล้านเซลล์ในแง่ของการทำงาน เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์คือ หน่วยประมวลผล ซึ่งรับสัญญาณและรวมสัญญาณที่ถูกส่งมาจากเซลล์ประสาทอื่นๆ แต่ละเซลล์ประสาทจะมีส่วนประกอบ คือ

- ตัวเซลล์ เรียกว่า โซมา (Cell Body or Soma) มีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิด หรือ ทรงกระบอก
- เดนไดรต์ (Dendrite) เดนไดรต์ คือ เส้นใยบางๆ ที่เซลล์ประสาทใช้รับสัญญาณ ไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์ แต่ละเซลล์ประสาทจะมีเดนไดรต์จำนวนมากจัดตัวเป็นลักษณะเหมือนกิ่งไม้
- แอกซอน (Axon) คือ สายส่งผ่านสัญญาณทรงกระบอกขนาดยาวและใหญ่ ตามรูปที่ 3.1 เซลล์ประสาทใช้เป็นทางส่งสัญญาณไปยังเซลล์ประสาทอื่นๆ ส่วนปลายของแอกซอน (Axon) จะแตกออกเป็นกิ่งก้านย่อยๆ โดยที่ส่วนปลายของแต่ละกิ่งก้านมีลักษณะเป็นปม และจะไปจ่ออยู่จนเกือบสัมผัสกับปลายของเดนไดรต์ (Dendrite) ซึ่งบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างปลายของแอกซอน (Axon) กับปลายของเดนไดรต์ (Dendrite) เรียกว่า ไซแนปส์ (Synapse) สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกส่งมาถึงปลายของแอกซอน (Axon) จะกระตุ้นให้เกิดการส่งผ่านสัญญาณในเชิงเคมีผ่านไซแนปส์ (Synapse) สัญญาณเชิงเคมีดังกล่าวจะถูกเดนไดรต์ (Dendrite) ตีความเป็นสัญญาณไฟฟ้าวิ่งเข้าสู่เซลล์ประสาทต่อไป คุณลักษณะสำคัญของไซแนปส์ (Synapse) คือ ความแรงของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านจะขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการเชื่อมต่อ และสัญญาณที่ถูกส่งผ่านไซแนปส์ (Synapse) อาจถูกทำให้มีสภาพเป็นสัญญาณกระตุ้น (Excitatory) หรือสัญญาณกด (Inhibitory) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณเชิงเคมีที่ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนผ่านรอยต่อ ซึ่งแต่ละประสาทรับสัญญาณมาจากไซแนปส์ (Synapse) [10], [12]

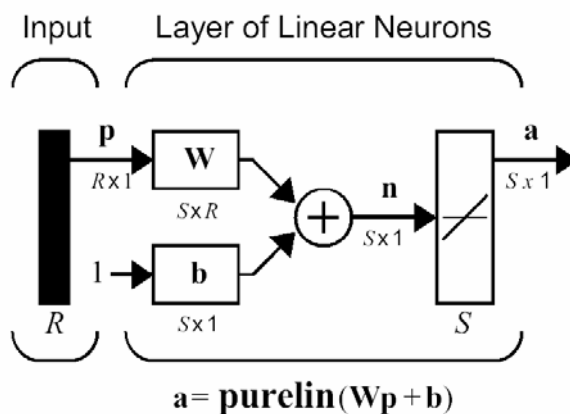


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ประสาทชีวภาพ[10]

3.2.2. เซลล์ประสาทเทียม

แบบจำลองเซลล์ประสาทชีวภาพหรือที่เรียกว่าเซลล์ประสาทเทียม (Artificial Neuron) ตามรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานสำคัญ คือ

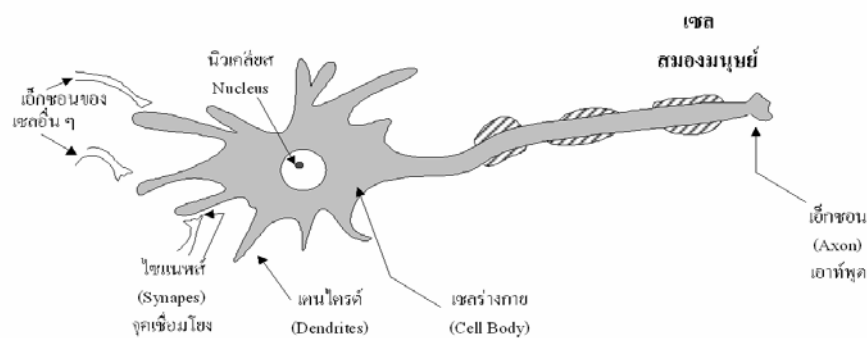
- หน่วย (Node or Unit) ทำหน้าที่ประมวลผลจะเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อย
- ตัวแปรเข้า (Input) ตัวแปรออก (Output) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณระหว่างหน่วยด้วยส่วนที่เชื่อมติดกัน
- ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลหรือเปรียบเสมือนความรู้ที่ถูกรวบรวมไว้ใช้แก้ปัญหา ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาททางชีววิทยาและเซลล์ประสาทเทียมได้ ตามตาราง 3.1 และรูปที่ 3.3 [10], [13]



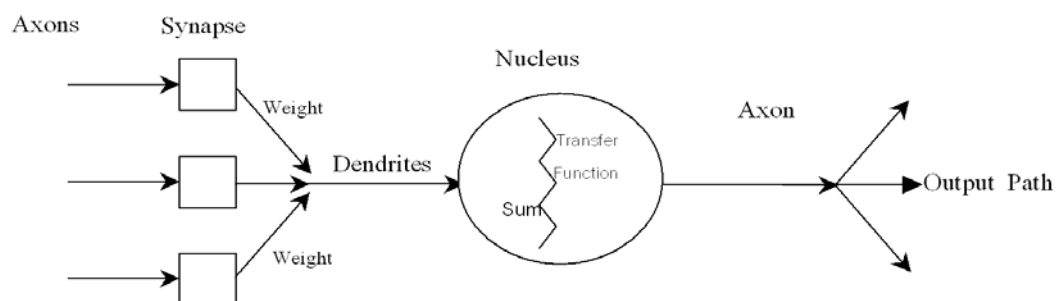
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ประสาทเทียม[13]

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทชีวภาพกับเซลล์ประสาทเทียม

เซลล์ประสาทชีวภาพ	เซลล์ประสาทเทียม
ตัวเซลล์ (Cell Body or Soma)	ยูนิต (Unit or Node)
เดนไดรต์ (Dendrites)	ตัวแปรด้านเข้า (Input)
แอกซอน (Axon)	ตัวแปรด้านออก (Output)
ไซแนปส์ (Synapse)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight)
ความเร็วช้ากว่า	ความเร็วสูงกว่า
มีเซลล์จำนวนมาก (ประมาณ 10^{11} ถึง 10^{13} ยูนิต)	มีเซลล์จำนวนน้อย (ประมาณ 100 ยูนิต)



Biological processing element



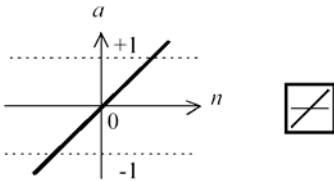
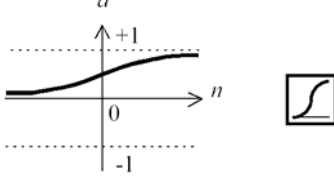
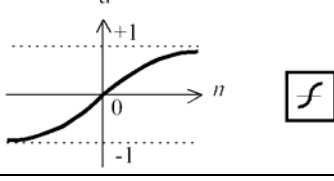
A Neural network processing element

รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทชีวภาพกับเซลล์ประสาทเทียม[10]

3.3 ฟังก์ชันแอคติเวชัน (Activation Function)

ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) หรือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) มีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งการจะนำฟังก์ชันชนิดไหนมาใช้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาและขอบเขตของผลลัพธ์ว่ามีค่าที่ต่อเนื่องหรือไม่ โดยทั่วไปจะแบ่งฟังก์ชันออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ ฟังก์ชันเชิงเส้นตรงและสองฟังก์ชันไม่เชิงเส้นตรง ตัวอย่างของฟังก์ชันที่นิยมใช้สรุปได้ตามตารางที่ 3.2 [13]

ตารางที่ 3.2 แสดงชนิดของฟังก์ชันแอคทีเวชัน(Activation Function)

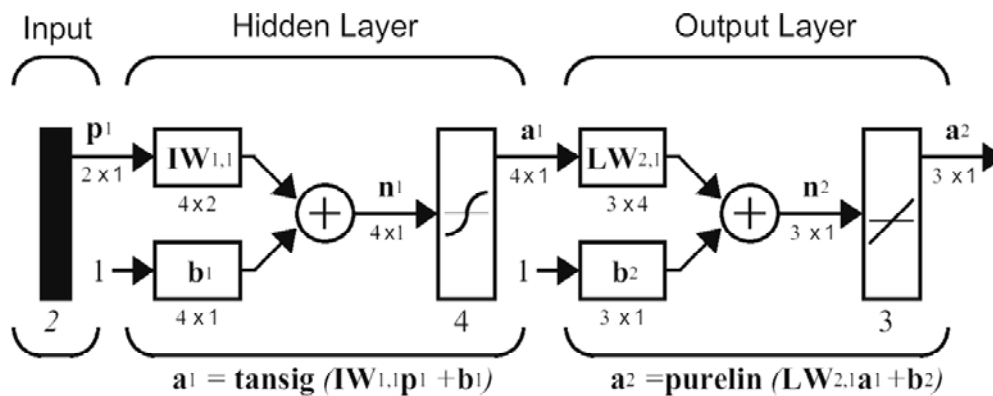
ชนิดของ ฟังก์ชัน	รูปแบบ	สมการฟังก์ชันถ่าย โอน	ขอบเขตของ $a(n)$
Linear Transfer Function		$a(n) = n$	$[-\infty, \infty]$
Log-Sigmoid Transfer Function		$a(n) = \frac{1}{1 + e^{(-n)}}$	$[0,1]$
Tan-Sigmoid Transfer Function		$a(n) = \frac{1 - e^{(-n)}}{1 + e^{(-n)}}$	$[-1,1]$

3.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในโครงข่ายประสาทเทียม

ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสัญญาณแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

3.4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า (Feed-forward Network)

การเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าจะประกอบด้วยชั้นตัวแปรด้านเข้า (Input Layer), ชั้นซ่อน หรือชั้นแอบแฝง (Hidden Layer), ซึ่งในโครงข่ายชั้นซ่อนจะมีหรือไม่มีชั้นซ่อนก็ได้ถ้าไม่มีชั้นซ่อนเรียกว่าโครงข่าย Single-Layer Feed-forward Network ส่วนโครงข่ายที่มีชั้นซ่อนเรียกว่า Multilayer Feed-forward Network ซึ่งจำนวนชั้นซ่อนอาจมีจำนวน 1 ชั้นหรือมากกว่าและชั้นตัวแปรด้านออก (Output Layer) โดยแต่ละชั้นจะประกอบด้วยหน่วย (Node) ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลและเชื่อมต่อผลลัพธ์ไปยังชั้นถัดไป การเชื่อมต่อของแต่ละชั้นจะเป็นแบบถึงกันหมด จึงทำให้สัญญาณข้อมูลเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวคือเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า จากชั้นรับข้อมูลไปยังชั้นแสดงผล โดยจำนวนชั้นซ่อนและหน่วยในแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา ส่วนจำนวนหน่วยในชั้นรับข้อมูลจะขึ้นกับจำนวนตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าพยากรณ์และจำนวนหน่วยในชั้นแสดงผลคือผลลัพธ์ที่ต้องการจากโครงข่าย[16] โครงสร้างเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Feed-Forward แสดงตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า (Feed-forward Network)[13]

ค่าผลลัพธ์จากแต่ละหน่วยจะสามารถหาได้ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$a1_j = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{j,i} \cdot p_i) + b_j\right) \quad (3.1)$$

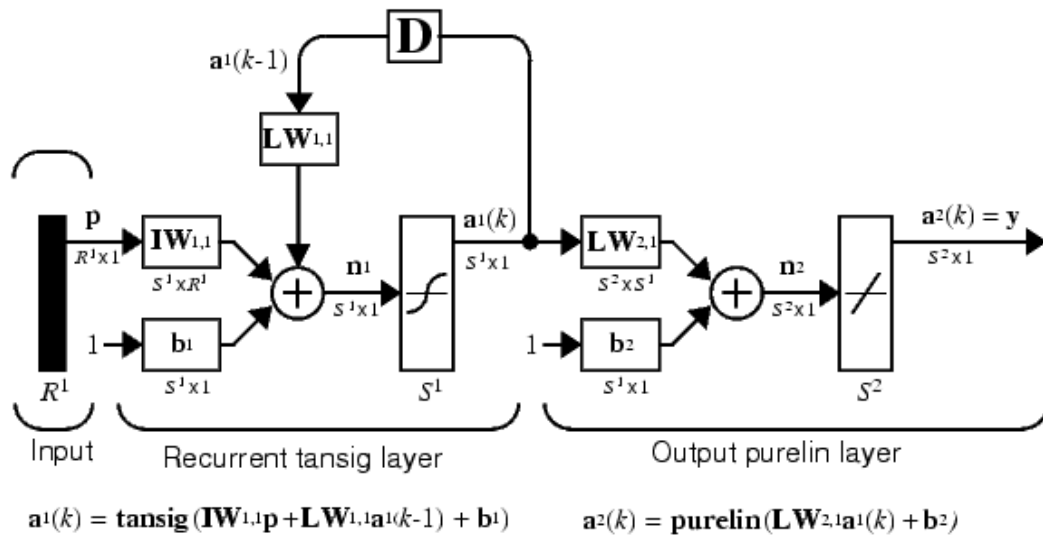
$$a2_k = f\left(\sum_{j=1}^n (w_{k,j} \cdot a_j) + b_k\right) \quad (3.2)$$

โดยที่

- p_i คือ ปัจจัยนำเข้า (Input)
- $a1_j$ คือ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของชั้นซ่อน (Hidden Layer)
- $a2_k$ คือ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการแสดงผล
- w คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight)
- b คือ ค่าเบี่ยงเบน (Bias)
- $f(c)$ คือ ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) หรือฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function)

3.4.2 ทิศทางการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าและย้อนกลับ (Recurrent Network)

ทิศทางการเคลื่อนที่ของข้อมูลจะแบ่งเป็น 2 ทิศทาง คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Feed Forward) จากชั้นตัวแปรด้านเข้า (Input Layer) ผ่านชั้นซ่อนหรือชั้นซ่อนหรือชั้นแอบแฝง (Hidden Layer) ไปสู่ตัวแปรด้านออก (Output Layer) และทิศทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับ (Feedback) จากชั้นแสดงผลไปยังชั้นรับข้อมูลเข้า (Input Layer) หรือจากชั้นแสดงผล (Output Layer) ผ่านชั้นซ่อนหรือชั้นแอบแฝง (Hidden Layer) ไปยังชั้นรับข้อมูลเข้า (Input Layer) ตัวอย่างของโครงข่ายประเภทนี้ได้แก่ โครงข่ายแบบฮอปฟีว (Hopfield Network) ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงข่ายแบบฮอปฟีว (Hopfield Network)[13]

3.5 รูปแบบการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Learning) มีกระบวนการเรียนรู้อยู่หลายรูปแบบ กฎการเรียนรู้ (Learning Rule) ของโครงข่ายใช้เพื่อสอนให้โครงข่ายทำการคำนวณหาผลลัพธ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่าย ซึ่งที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 รูปแบบคือ

3.5.1 การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised Learning)

การเรียนรู้แบบมีการควบคุมจะต้องมีชุดข้อมูลในการปรับสอน (Training Set) เพื่อเป็นการกำหนดเซตของการสอนให้กับโครงข่าย ซึ่งเซตนี้จะประกอบด้วย ข้อมูลเข้า (Input) และ ข้อมูลออก (Output) ให้กับโครงข่าย โดยโครงข่ายจะทำการประมวลผลจนได้คำตอบและค่าถ่วงน้ำหนักออกมาชุดหนึ่ง สำหรับคำตอบที่ได้จากโครงข่ายจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าข้อมูลออก (Target Output) ที่ต้องการโดยคำนึงถึงค่าความผิดพลาด หากค่าความผิดพลาดยังมีค่าสูงก็จะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและทำการสอนโครงข่ายใหม่ทำซ้ำต่อไปจนกว่าจะได้ค่าความผิดพลาดที่น้อยพอที่จะยอมรับได้ตามที่ต้องการถึงจะหยุดทำการสอนโครงข่าย ซึ่งค่าน้ำหนักที่ได้ก็เปรียบเสมือนเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงข้อมูลที่จะนำไปใช้ในชุดของการทดสอบโครงข่ายต่อไป ตัวอย่างของการเรียนรู้แบบมีการควบคุมชนิดนี้ได้แก่ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation Algorithm) ซึ่งในงานวิจัยใช้รูปแบบการเรียนรู้

3.5.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised Learning)

การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม คล้ายกับการเรียนรู้แบบมีการควบคุมแต่จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้สอดคล้องกับข้อมูลนำเข้าไม่ต้องใช้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยจะใช้ตัวประเมินผล (Critic) เป็นตัวปรับค่าความผิดพลาด การปรับค่าแบบนี้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้

ในงานระบบควบคุมและในงานการคัดแยกออกเป็นส่วนย่อยๆ ตัวอย่างของการเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุมชนิดนี้ได้แก่ ART (Adaptive Resonance Theory) และโคโฮเนน (Kohonen self organizing map) [10-14]

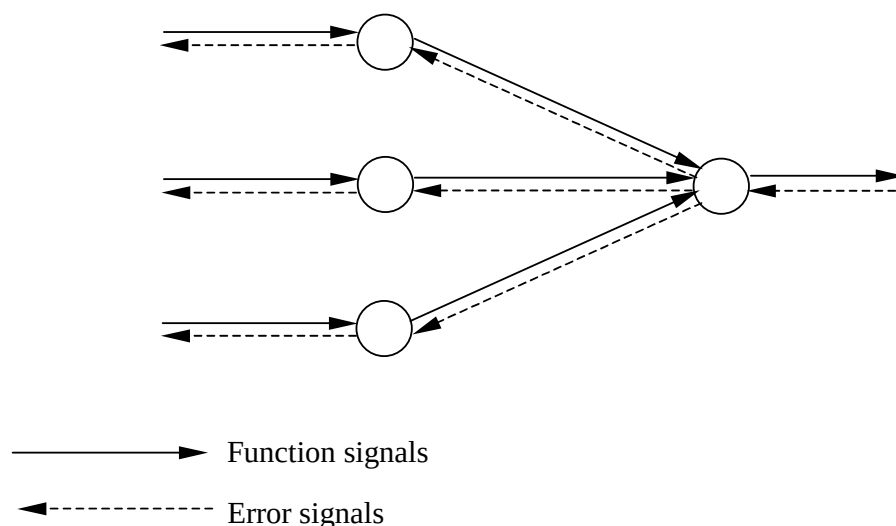
3.6 การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Algorithm)

คุณสมบัติสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม คือ ความสามารถในการเรียนรู้จากตัวอย่าง โดยพยายามคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (Input) และผลลัพธ์ (Output) การเรียนรู้จะเริ่มจากการสุ่มค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบนเริ่มต้น (Bias) ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากค่าเริ่มต้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริง ค่าที่แตกต่างจะถูกนำมาปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนโดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงหรือตรงกับผลลัพธ์จริง ค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนสุดท้ายจะถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากข้อมูล (Input) ใหม่

กระบวนการในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่นิยมใช้ คือ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation) ซึ่งจะประกอบด้วยสัญญาณ 2 ส่วน ตามรูปที่ 3.6 ดังนี้

(1) สัญญาณส่ง (Function Signals) คือ ข้อมูลหรือผลลัพธ์ของแต่ละหน่วยที่ถูกส่งเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

(2) สัญญาณแก้ไข (Error Signals) คือ ค่าที่แตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและผลลัพธ์จริงที่ถูกส่งกลับสู่โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนจนได้ค่าผลลัพธ์ที่ตรงกันหรือใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.6 สัญญาณในกระบวนการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน[15]

โครงสร้างเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 หน่วย j จะทำหน้าที่คำนวณค่าผลลัพธ์จากสัญญาณ ส่งจากหน่วย i ผลลัพธ์ที่ได้ คือ $y_j(n)$ ซึ่งจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าแตกต่างจากผลลัพธ์จริง คือ $d_j(n)$ ค่าความต่างนี้ คือ $e_j(n)$ ดังสมการที่ 3.3

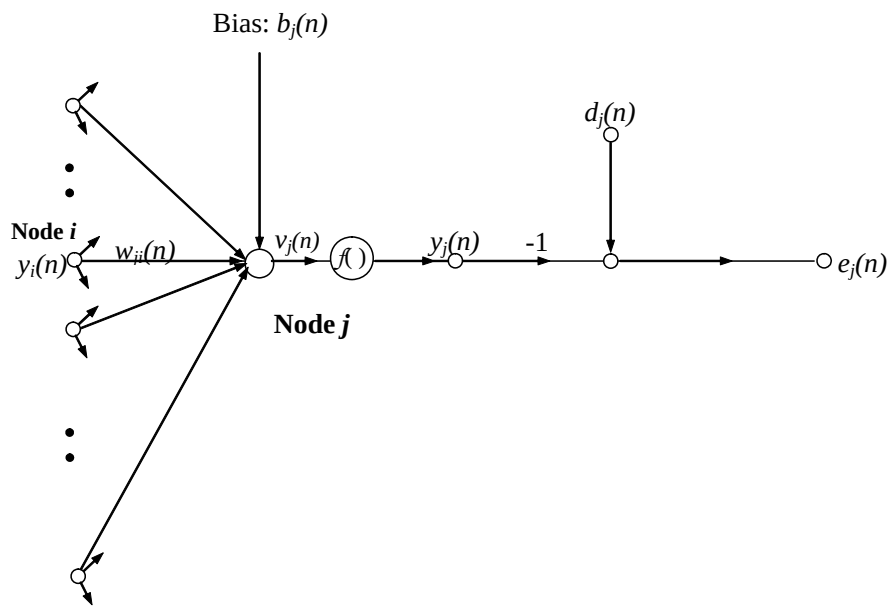
$$e_j(n) = d_j - y_j(n) \quad (3.3)$$

$e_j(n)$ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแก้ไข $E(n)$ ดังสมการที่ 3.4

$$E(n) = \frac{1}{2} e_j^2(n) \quad (3.4)$$

ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ค่า $v_j(n)$ จะเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณจากสมการที่ 3.5

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^m w_{ji}(n) y_i(n) + b_j(n) \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.7 โครงสร้างการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียม[15]

สัญลักษณ์ w คือ ค่าน้ำหนัก และ สัญลักษณ์ m คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด สัญลักษณ์ $b_j(n)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนที่ใช้ในหน่วย j ดังนั้น ผลลัพธ์ของหน่วย j คือ

$$y_j(n) = f_j(v_j(n)) \quad (3.6)$$

Back-Propagation จะปรับค่าน้ำหนักจากสัญญาณแก้ไข $E(n)$ ด้วยวิธี *Chain Rule* ดังนี้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \cdot \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.7)$$

โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าน้ำหนัก $\Delta w_{ji}(n)$ ตามอัตราการเรียนรู้ η

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.8)$$

โดยค่า η คือ Learning- rate parameter ของ Back- propagation เป็นไปตามกฎของความต่อเนื่องของค่าถ่วงน้ำหนักของเครือข่ายที่ลดลงตามค่าความแตกต่าง (Delta) ระหว่างตัวแปรด้านออกกับค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยมีกฎการเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการลดลงของ Mean Square Error, $E(n)$ ของโครงข่ายพร้อมกับค่าความผิดพลาดจะถูกส่งกลับไปในชั้นก่อนของเครือข่าย จนกระทั่งย้อนกลับไปยังชั้นแรกสุดของโครงข่าย

ในงานวิจัยการปรับค่าน้ำหนัก จะใช้วิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ในการปรับค่าน้ำหนัก จนได้สัญญาณแก้ไขมีค่าน้อยสุดหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าผลลัพธ์จริง ซึ่งวิธีการปรับค่าน้ำหนักแบบ Levenberg-Marquardt Algorithm เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหานี้ และสามารถปรับค่าน้ำหนักได้รวดเร็วกว่า Algorithm อื่นๆ [16]

3.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

- การเลือกปัจจัยนำเข้า (Input) การเลือกปัจจัยนำเข้าที่มีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพทั้งในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบ การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับผลลัพธ์สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)
- จำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยแต่ละชั้นซ่อน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยต้องมีความเหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไป ถ้ามากเกินไปก็จะเกิดปัญหา Overfitting แต่ถ้าน้อยเกินไปก็จะเกิด Underfitting ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายน้อยลง
- จำนวนข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมได้รับข้อมูลในกระบวนการเรียนรู้ที่มาก โครงข่ายจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ภายในขอบเขตเรียนรู้ละเอียดขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายสูงขึ้นตามไปด้วย
- การกระจายของข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมจะมีประสิทธิภาพในการหาผลลัพธ์ภายในขอบเขตที่ได้รับการฝึกสอน ถ้าข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนมีการกระจายตัวดีภายในขอบเขตที่ศึกษา ประสิทธิภาพในการหาผลลัพธ์ก็จะดีขึ้นด้วย
- การ Normalization ข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน การจัดระเบียบข้อมูลก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะทำให้กระบวนการฝึกสอนเร็วขึ้นกว่าการนำข้อมูลดิบมาทำการฝึกสอน
- วิธีการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน ซึ่งมีหลายวิธีแต่ละวิธีก็จะมีความเหมาะสมกับปัญหาต่างรูปแบบกัน

- ค่าเริ่มต้นของค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน จะมีผลต่อการเข้าใกล้จุด Local Minimum หรือ Global Minimum ของผลลัพธ์ที่นิยมใช้ในกระบวนการฝึกสอน ดังนั้นในกระบวนการฝึกสอนจึงควรสุ่มเลือกค่าเริ่มต้นและค่าเบี่ยงเบนในแต่ละโครงข่ายหลายๆครั้ง
- จำนวนรอบการฝึกสอน ที่เหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการหาผลลัพธ์ของโครงข่ายดีขึ้น
- ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน จะมีผลต่อกระบวนการเรียนรู้ และผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม [10-20]

บทที่ 4

การเก็บรวบรวมข้อมูลและฐานข้อมูล

4.1 บทนำ

จากการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในโครงการจะนิยมทำการทดสอบก่อนการก่อสร้างโดยส่วนใหญ่จะนิยมทำการทดสอบโดยวิธี Static Load Test และ Dynamic Load Test งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในส่วนของ Dynamic Load Test เพราะแต่ละโครงการจะมีการทดสอบแบบ Dynamic Load Test มากกว่า Static Load Test การเก็บรวบรวมข้อมูลที่จะนำมาใช้ต้องมีความถูกต้องและเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงๆตามสภาพหน้างาน เนื่องจากการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Dynamic Load Test ซึ่งโครงข่ายจะต้องนำข้อมูลการทดสอบเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) ถ้าข้อมูลที่ป้อนเข้าโครงข่ายไม่ได้จากการทำงานจริงๆความสัมพันธ์ของปัจจัยก็จะเกิดความผิดพลาดตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบจริงๆ

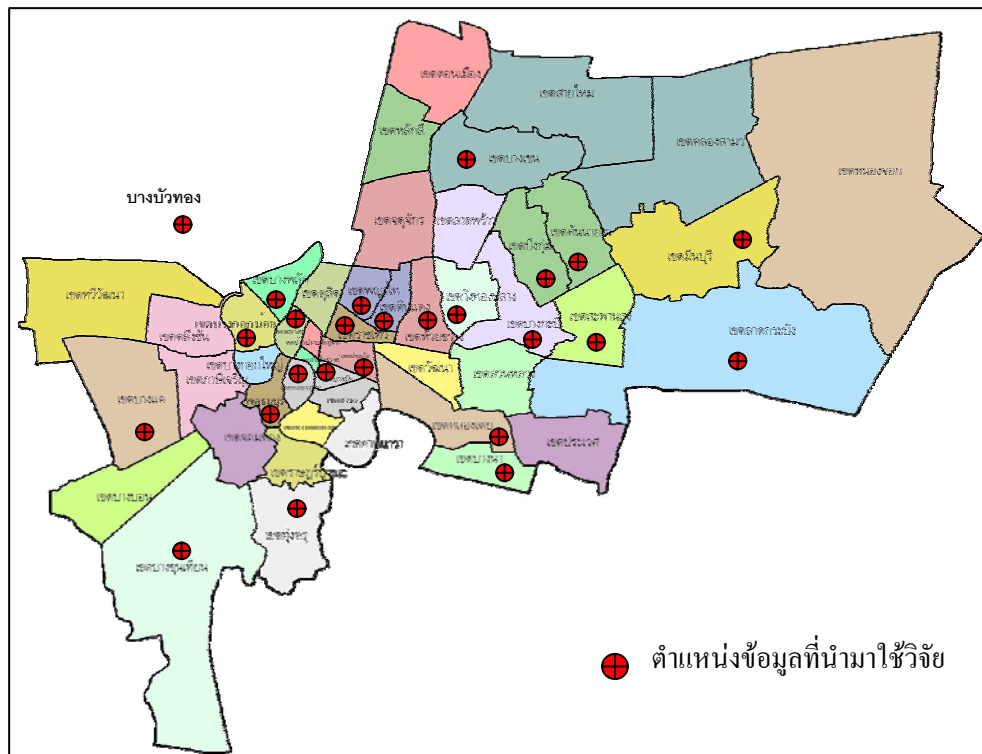
4.2 ลักษณะชั้นดินในกรุงเทพฯ

จากงานวิจัยของ [9] ชั้นดินโดยทั่วไปของกรุงเทพฯ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินต่าง ๆ กัน คือ ชั้นดินด้านบนสุดจะเป็นชั้นดินเปลือกโลก (Weathered Crust) หนาประมาณ 2-3 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12 เมตร และค่อยๆเปลี่ยนเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) ถึงระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินแข็งจนถึงระดับชั้นทรายชั้นแรก ที่ระดับความลึกประมาณ 25-30 เมตร ถัดจากชั้นทรายแรกจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทรายจนถึงระดับชั้นทรายชั้นที่ 2 ที่ระดับความลึกประมาณ 45-60 เมตร ซึ่งฐานรากส่วนใหญ่ของอาคารที่มีน้ำหนักสูงมากมักจะกำหนดให้ปลายเสาเข็มฝังอยู่ในทรายชั้นนี้

4.3 แหล่งที่มาข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม

การรวบรวมข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส ที เอส อินสตรูเมนต์ จำกัด งานวิจัยนี้มีข้อมูลผลการทดสอบการตอกเสาเข็มทั้งหมด 162 ข้อมูล โดยมีข้อมูลเสาเข็มรูปตัวไอจำนวน 64 และเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 98 ข้อมูล ซึ่งได้ทำการทดสอบในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ลักษณะของข้อมูลที่จะนำมาใช้ได้กระจายอยู่ตามเขตต่างๆตามรูปที่ 4.1 และมีรายละเอียดแนบท้ายตามภาคผนวก ก และข้อมูลทั้งหมดนี้เป็นข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Test ซึ่งผลการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกยังไม่ได้ทดสอบ

ถึงจุดวิบัติแต่จะทดสอบที่ค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัย (Safety of Factor) ที่ 2.5 เท่าของ Load Design



รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายข้อมูลที่ใช้วิจัย

4.4 ขอบเขตของข้อมูล

ข้อมูลเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์จะมีขอบเขตของข้อมูลดังนี้

- ข้อมูลเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์ได้จากการตอกด้วยวิธีระบบของ Drop Hammer
- ข้อมูลเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาเข็ม รูปสี่เหลี่ยมและรูปตัวไอ
- ข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Load Test ที่ทดสอบในเขตพื้นที่ กรุงเทพฯ

รายละเอียดของข้อมูลแยกออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆดังนี้

1. ข้อมูลเสาเข็ม (Pile Description) เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่แสดงรายละเอียดของเสาเข็ม เช่น ชื่อโครงการ, สถานที่ตอกเสาเข็ม, วันที่ทดสอบ, จำนวนข้อมูลและคุณสมบัติของเสาเข็ม รายละเอียดตามตารางที่ 4.1 และตารางผนวก ก

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนข้อมูลของเสาเข็มแต่ละชนิด

เสาเข็มรูปตัวไอ	จำนวน	เสาเข็มสี่เหลี่ยม	จำนวน
I-0.22	14	S-0.18	4
I-0.26	9	S-0.22	3
I-0.30	10	S-0.26	11
I-0.35	17	S-0.30	10
I-0.40	14	S-0.35	16
รวมทั้งหมด	64	S-0.40	44
		S-0.45	9
		S-0.525	1
		รวมทั้งหมด	98

2. ข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม (Test Data) เป็นข้อมูลการตรวจวัดค่าน้ำหนักที่สัมพันธ์กับการทรุดตัว รายละเอียดตามตารางที่ 4.2 และตารางผนวก ก

ตารางที่ 4.2 แสดงขอบเขตเกี่ยวกับคุณสมบัติของเสาเข็ม

รายการ	เสาเข็มรูปตัวไอ	เสาเข็มรูปสี่เหลี่ยม
พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	332.00-1240.00	324.00-2756.25
ความยาว (ม./ต้น)	17.00-28.00	16.00-43.00
น้ำหนักเสาเข็ม (ตัน/ต้น)	1.48-16.51	1.49-7.74
น้ำหนักตุ้ม (ตัน)	2.00-6.80	3.08-9.50
ระยะยกตุ้ม (ซม.)	30-180	20-150
Last ten Blow (cm.)	0.50-15.00	0.5-15

4.5 การจัดการข้อมูลและฐานข้อมูล

การจัดการข้อมูล (Data management) ข้อมูล คือข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นของกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่ง โดยการสังเกต การจดบันทึก การสัมภาษณ์และการออกแบบสอบถาม ข้อมูลที่ได้มานั้นยังคงเป็นข้อมูลดิบ ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจในการกระทำในเชิงการจัดการและข้อมูลที่รวบรวมมามีจะไม่มีการจัดระเบียบอาจจะมีการซ้ำซ้อนของข้อมูลหรือข้อมูลชนิดเดียวกันอาจจะขัดแย้งกันก็ได้ ดังนั้นองค์กรจะต้องมีการวางแผนในการจัดการบริหารฐาน ข้อมูลที่ดีจึงจะได้ประโยชน์จากข้อมูลที่จัดเรียบเรียงไว้ การเรียบเรียงให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการนำเสนอต่อองค์กร จะถูกเรียกว่า สารสนเทศ (Information)

ข้อมูล (Stored Data) เป็นข้อมูลที่เก็บรวบรวมไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อจะถูกนำมาเรียกใช้เพื่อการประมวลผล โดยโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมไว้นี้ อาจแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แฟ้มข้อมูล (File) และฐานข้อมูล (Database)

ซึ่งฐานข้อมูล (Database) เป็นการจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ สามารถใช้ข้อมูลในระบบงานต่าง ๆ ร่วมกันได้ ไม่เกิดความซ้ำซ้อนและขัดแย้งของข้อมูล ระบบข้อมูลเป็นมาตรฐานเดียวกัน รวมทั้งเพิ่มระบบความปลอดภัยของข้อมูลมากขึ้น ระบบฐานข้อมูลของค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มตอกพัฒนาขึ้นมาเพื่อจัดเก็บข้อมูลให้เป็นระบบ, สะดวกในการค้นหาและนำข้อมูลไปใช้งานโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลของการทดสอบ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกโดยใช้โปรแกรม Microsoft Office Access 2003 ซึ่งเป็นโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database Management System) ที่เป็นเครื่องมือช่วยในการทำงานเกี่ยวกับฐานข้อมูล รวมถึงการรักษาความปลอดภัยที่ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง [22,23] เป็นโปรแกรมที่ใช้กันแพร่หลาย โดยข้อมูลที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูลเสาเข็มตอกประกอบด้วย 9 หมวดหมู่ 6 พารามิเตอร์รายละเอียดตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่จัดเก็บในโปรแกรม Microsoft Office Access

ชื่อขอบเขตข้อมูล	ชนิดข้อมูล	คำอธิบาย
ID	AutoNumber	ลำดับที่
Item	Text	ชนิดเสาเข็ม
Pile Length (L)*	Number (ค่าทศนิยม)	ความยาวเสาเข็มหน่วยเป็นเมตร
Cross-Section Area (Ac)*	Number (ค่าทศนิยม)	พื้นที่หน้าตัดเสาเข็มหน่วยเป็นตารางเมตร
Pile Weight (Wp)*	Number (ค่าทศนิยม)	น้ำหนักเสาเข็มหน่วยเป็นตัน
Hammer Weight (Wr)*	Number (ค่าทศนิยม)	น้ำหนักค้อนหน่วยเป็นตัน
Hammer Drop (h)*	Number (ค่าทศนิยม)	ระยะยกค้อนตอกหน่วยเป็นเซนติเมตร
Pile Settlement (S)*	Number (ค่าทศนิยม)	ระยะทรุดตัวเสาเข็มหน่วยเป็นมิลลิเมตร
Ultimate Load (Qu)	Number (ค่าทศนิยม)	ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกหน่วยเป็นตัน/ตัน

โดยข้อมูลเก็บบันทึกเป็นชื่อ Ultimate Load และข้อมูล* เป็นข้อมูลนำเข้าโครงข่าย (Input)

4.6 การแบ่งข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนแรกใช้สำหรับการเรียนรู้ (Training Set), ส่วนที่สองทดสอบแบบจำลอง (Testing Set) ใช้ในการตรวจสอบหาจุดเสถียรของโครงข่ายเพื่อป้องกันกรณี Overfitting Data ของโครงข่าย ซึ่งทั้งสองส่วนใช้สำหรับคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดและส่วนสุดท้ายการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ (Application Set) ใช้สำหรับประเมินหาประสิทธิภาพโครงข่ายกับข้อมูลที่โครงข่ายไม่เคยเจอเพื่อที่จะนำโครงข่ายไปใช้งานต่อไป

ตารางที่ 4.4 แสดงการแบ่งข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก

ชนิดการวิเคราะห์	Training Set	Testing Set	Application Set
วิเคราะห์โดยสูตรควบคุมการตอกเสาเข็ม	98	32	32
วิเคราะห์โดยโครงข่ายประสาทเทียม	98	32	32

บทที่ 5

การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

5.1 บทนำ

การก่อสร้างอาคารในประเทศไทยโดยเฉพาะบริเวณกรุงเทพฯ จำเป็นต้องใช้ฐานรากที่มีเสาเข็มช่วยรับถ่ายน้ำหนักลงสู่ระดับลึกเป็นจำนวนมาก การออกแบบฐานรากที่ต้องใช้เสาเข็มผู้ออกแบบมักจะพิจารณาการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยทำการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุก (Load Test) ประกอบกับผลการสำรวจชั้นดิน การทดสอบเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบมักจะกระทำที่จุดใดจุดหนึ่งบริเวณก่อสร้างซึ่งก็ไม่แน่ว่าถ้าทำการทดสอบในที่แห่งอื่นของบริเวณก่อสร้างแล้ว เสาเข็มชนิดเดียวกันนี้จะสามารถรับน้ำหนักได้เท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ เมื่อเกิดปัญหาเช่นนี้ จึงได้กำหนดวิธีการทดสอบเสาเข็มที่ตอก ณ แห่งอื่น ในบริเวณก่อสร้างเดียวกัน โดยวัดการทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากการตอกครั้งสุดท้าย (ที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันมักวัดผลจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย) และเรียกวิธีนี้ว่าวิธี Blow count ซึ่งปัจจุบันมีสูตรสำหรับคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จากผลของการวัดการทรุดตัวมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่เนื่องจากสูตรเหล่านี้จะใช้ได้เหมาะสมในที่เฉพาะแห่งตามสภาพของชั้นดินในบริเวณนั้นๆ ซึ่งสภาพชั้นดินในกรุงเทพฯ ประกอบไปด้วยชั้นดินที่ต่างกันไป ด้วยสภาพพื้นดินกรุงเทพฯ อาจจะทำให้เกิดปัญหากับการรองรับอาคารขนาดใหญ่

5.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์

ส่วนที่หนึ่ง คำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากสูตรการตอกเสาเข็มที่มีอยู่ด้วยกันหลายสูตรแต่ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะสูตรที่ได้ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติมาแล้วว่าเหมาะสมกับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่ตอกในพื้นที่กรุงเทพฯ ได้แก่สูตร Hiley's Formula, Engineer New, Modified Engineer New, Janbu's Formula, Gates's Formula, และ Danish's Formula [4] โดยนำตัวแปรที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มมาแทนค่าในสูตรตามสมการในตารางที่ 2.1 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Dynamic Load Test แล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดต่ำสุดตามสมการที่ 5.4

ส่วนที่สอง คำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจากโครงข่ายประสาทเทียมแล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดต่ำสุดตามสมการที่ 5.4 เพื่อเลือกโครงข่ายที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มตอก

จุดประสงค์เพื่อที่จะนำค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากสูตรตอกเสาเข็มและค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาเปรียบเทียบถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ซึ่งผลการทดสอบค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มยังไม่ได้ทดสอบถึงจุดวิกฤติแต่จะทดสอบที่กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ 2.5 เท่าของ Load Design โดยมีรายละเอียดของข้อมูลดังนี้

5.3 วิธีการดำเนินการวิจัยส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม

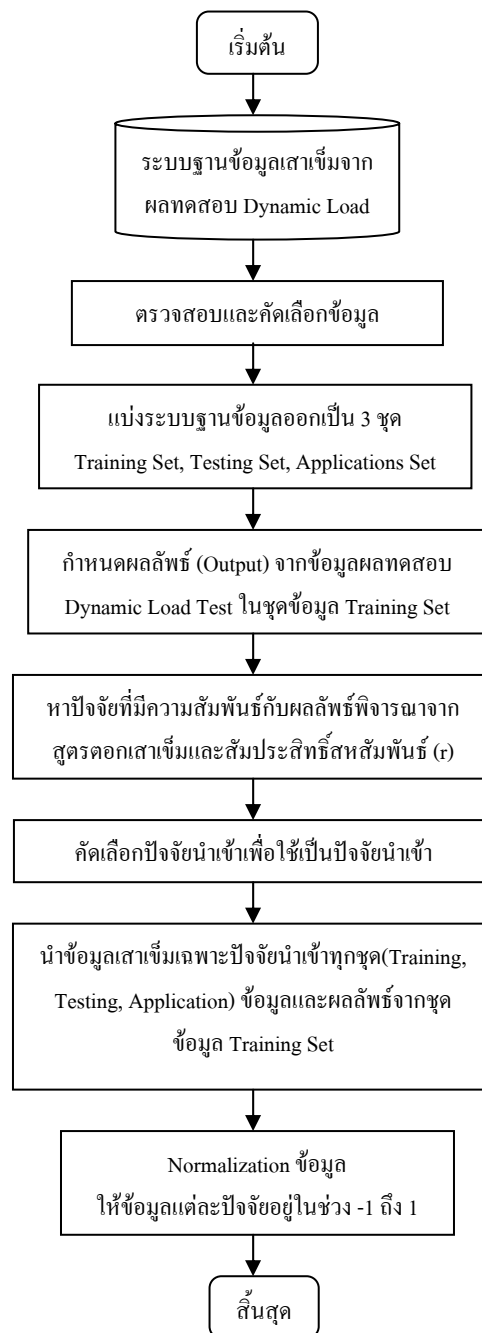
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) สามารถใช้ในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดี จึงนำมาศึกษาเพื่อพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอกโดยการเรียนรู้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) จากข้อมูลการทดสอบจริง จากความสัมพันธ์ของดินที่อยู่รอบๆเสาเข็มและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากทฤษฎีการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอกหาได้อย่างคร่าวๆ เท่านั้นซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำมากนักอาจเป็นเพราะสมการเหล่านั้นไม่สามารถเข้าถึงลักษณะที่ซับซ้อนของพฤติกรรมของชั้นดินได้

ซึ่งวิธีการดำเนินการวิจัยนี้จะกล่าวถึงตั้งแต่ขั้นตอนกระบวนการเตรียมข้อมูลก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเรียนรู้ (Training Set), กระบวนการทดสอบโครงข่าย (Testing Set) และกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่าย (Applications Set) และการเลือกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก

5.3.1 การเตรียมข้อมูล

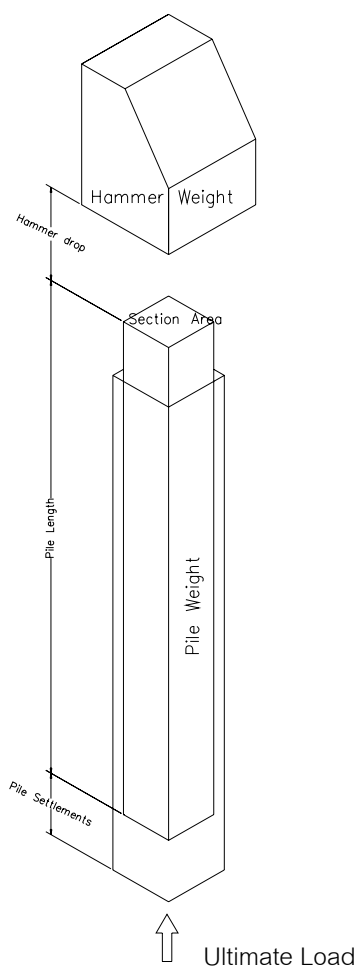
กระบวนการเตรียมข้อมูลเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความจำเป็นและมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ระบบฐานข้อมูลจะถูกตรวจสอบความถูกต้องและคัดเลือกเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการคัดเลือกปัจจัยนำเข้า (Input), ผลลัพธ์ (Output), และทำการ Normalization ข้อมูลก่อนเข้าสู่กระบวนการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ ซึ่งมีขั้นตอนตามรูปที่ 5.1

ข้อมูลจากระบบฐานข้อมูลจะถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลอันเนื่องมาจากปัจจัยการทดสอบจากทฤษฎีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกโดยอาศัยข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องในระหว่างที่มีการตอกเสาเข็ม เช่น น้ำหนักค้ำตอก, น้ำหนักของเสาเข็ม, ระยะยกค้ำตอก, ชนิด, ขนาดและความยาวของเสาเข็ม ซึ่งไม่ต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ลึกลงไปเลย



รูปที่ 5.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

จากตัวแปรที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มคอกที่พิจารณาจากสูตรการควบคุมการคอกเสาเข็มที่เหมาะสมในเขตชั้นดินกรุงเทพฯ ประกอบไปด้วยตัวแปรด้านเข้าทั้งหมด 6 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วย พื้นที่หน้าตัด (A_c), ความยาวเสาเข็ม (L), น้ำหนักเสาเข็ม (W_p), น้ำหนักค้ำ (W_c), ระยะยกค้ำ (h), ระยะทรุดตัว (S) ตามรูปที่ 5.2 [1, 4, 5, 18]



รูปที่ 5.2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอกที่พิจารณาจากสูตร

5.3.2 วิธีการกำหนดผลลัพธ์และปัจจัยนำเข้า

การพยากรณ์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก (Q_u) คัดเลือกปัจจัยนำเข้า (Input) จะใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) หาความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์กับปัจจัยนำเข้า โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r) ซึ่งคำนวณตามสมการที่ 5.1 และผลสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตามภาคผนวก ข

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.1)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 จะเป็นตัวบอกลถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันซึ่งถ้า

$r = +1$ หมายถึง ตัวแปร 2 ตัวมีความสัมพันธ์กันมากในแนวเส้นตรงในทางเดียวกัน

$r = -1$ หมายถึง ตัวแปร 2 ตัวมีความสัมพันธ์กันมากในแนวเส้นตรงในทางตรงข้ามกัน

$r = 0$ หมายถึง ตัวแปร 2 ตัวไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

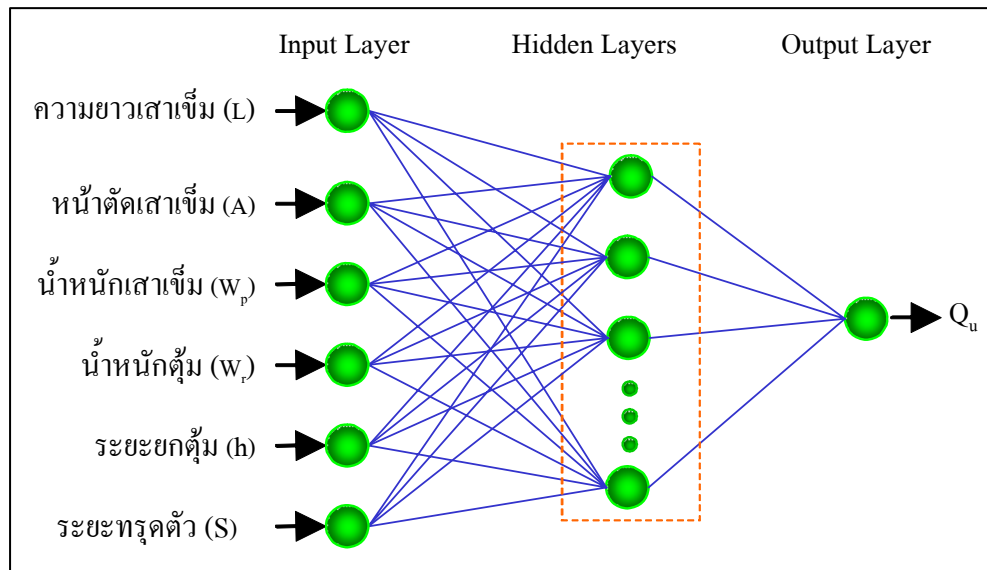
$r = 0.5$ หมายถึง ตัวแปร 2 ตัวมีความสัมพันธ์กันปานกลาง

กระบวนการเลือกปัจจัยนำเข้า (Input) มีปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาคัดเลือกดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยจะต้องมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็ม
2. มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าด้วยกันน้อย หากปัจจัยใดมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าด้วยกันต้องมีการพิจารณาคัดเลือกปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพื่อไม่ให้โครงข่ายใหญ่เกินความจำเป็น
3. การหาค่าปัจจัยต้องสะดวกในการจัดเก็บ
4. ค่าของปัจจัยควรคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา

การวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้า (Input) ที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) จากการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่คำนวณด้วยสูตรการตอกเสาเข็มตัวแปรที่มีผลต่อค่ากำลังจะประกอบด้วย ความยาวของเสาเข็ม, พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, น้ำหนักของเสาเข็ม, น้ำหนักลูกตุ้มตอก, ระยะยกตุ้ม, พลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม, ค่า Elastic Modulus ของเสาเข็ม, ระยะทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งจากการวิเคราะห์ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าตัวแปร ความยาวของเสาเข็ม, พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, น้ำหนักของเสาเข็ม, น้ำหนักลูกตุ้มตอก, ระยะยกตุ้ม, พลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม, ระยะทรุดตัวของเสาเข็มมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม แต่ค่า Elastic Modulus ของเสาเข็มไม่มีความสัมพันธ์กัน

จากการทดลองประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมเบื้องต้นโดยใช้ตัวแปรนำเข้าต่างๆทั้งหมดและเปรียบเทียบกับ การตัดตัวนำเข้าบ้างตัวออกพบว่า โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดประกอบด้วยตัวแปร ความยาวของเสาเข็ม, พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, น้ำหนักของเสาเข็ม, น้ำหนักลูกตุ้มตอก, ระยะยกตุ้ม, ระยะทรุดตัวของเสาเข็มซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสามารถเขียนแบบจำลองได้ตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มคอก

5.3.3 การ Normalization ข้อมูล

การ Normalization หรือการจัดระเบียบข้อมูลเป็นวิธีการที่นำมาใช้เพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ (Output) ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมและลดเวลาในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การ Normalization ข้อมูลทั้ง 3 ชุดข้อมูลในชุด Training, Testing, และ Application ของตัวแปรนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) ในชุดข้อมูลชุด Training ต้องทำก่อนเริ่มกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม [17] การ Normalization ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอนของผลลัพธ์ ในงานวิจัยนี้จะทำการ Normalization ข้อมูลให้อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นผลลัพธ์ (Output) เป็นประเภท Tangent Sigmoid เป็น Transfer Function ซึ่งมีขอบเขตอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ตามสมการที่ 5.2 ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนในโครงข่ายประสาทเทียม เมื่อได้ผลลัพธ์จากโครงข่ายก็จะทำการ Un normalization ตามสมการที่ 5.3 เพื่อแปลงค่ากลับให้เป็นค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$$P_n = \frac{2x(P - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}} - 1 \quad (5.2)$$

$$p = 0.5(P_n + 1) \times (P_{\max} - P_{\min}) + P_{\min} \quad (5.3)$$

โดยที่ P คือ ค่าของตัวแปรที่จะทำการ Normalization

$P_{\min}$ คือ ค่าน้อยสุดของตัวแปร

$P_{\max}$ คือ ค่ามากที่สุดของตัวแปร

P_n คือ ค่าของตัวแปรที่ผ่านการ Normalization โดยมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1
ขอบเขตของข้อมูลที่ผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูล โดยแยกตามแต่ละตัวแปร ได้ตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรนำเข้า

ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
<u>ตัวแปรนำเข้า (Input)</u>		
1. ความยาวเสาเข็ม (m.)	16	43
2. พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (cm ² .)	324	2,756.25
3. น้ำหนักเสาเข็ม (tons.)	1.48	16.50
4. น้ำหนักตุ้ม (tons.)	2.00	9.50
5. ระยะยกตุ้ม (cm.)	20	180
6. ระยะทรุดตัวของเสาเข็ม (mm./blow)	0.5	1.50
<u>ผลลัพธ์ (Output)</u>		
1. ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก (tons.)	25.00	339.9

5.4 การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมใช้แบบไปข้างหน้าชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Feed forward Network with Back Propagation Algorithm) โดยใช้การปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm ซึ่งมีขั้นตอนในการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมได้ดังนี้

5.4.1. การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Training)

นำ ปัจจัยในชุดการสอนโครงข่าย (Training Set) ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูลจำนวน 98 ข้อมูลใช้เพื่อสร้างโครงข่ายที่จะนำโครงข่ายไปใช้ในขั้นตอนการ ทดสอบโครงข่าย (Testing) และ ประยุกต์ใช้โครงข่าย (Application) ทำการสร้างโครงข่ายโดยทำการเปลี่ยนแปลง (Trial and Error) โครงสร้างของ จำนวนชั้นซ่อน (Number Hidden Layer) , จำนวนหน่วยในแต่ละชั้นซ่อน (Node Hidden Layer), จำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน (Epochs), ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ในชั้นซ่อน (Hidden Layer)และชั้นผลลัพธ์ (Output Layer) ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้และตามรูปที่ 5.4

1. กำหนดข้อมูลปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการเตรียมข้อมูล
2. กำหนดจำนวนชั้นซ่อน 1, 2 ชั้นและชั้นผลลัพธ์
3. กำหนดหน่วยประสาทในชั้นซ่อน 4, 5, 6 หน่วยและชั้นผลลัพธ์
4. กำหนดรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน (Epochs) 20, 40, 50 รอบ

5. กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอน Log- Sigmoid ในชั้นซ่อนและ Tan- Sigmoid ชั้นผลลัพธ์
สมการตามตารางที่ 3.2
6. กำหนดรูปแบบการเรียนรู้ในการปรับค่าน้ำหนักแบบ Levenberg-Marquardt
Algorithm
7. เข้าสู่กระบวนการเรียนรู้จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนในการปรับโครงข่าย
8. Un normalization ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายในทุกรอบการคำนวณตามสมการที่ 5.3
ในกระบวนการเรียนรู้
9. คำนวณและบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด (MAPE) ทุกรอบการคำนวณตาม
สมการที่ 5.4 ในกระบวนการเรียนรู้
10. สุ่มค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนอย่างน้อย 5 รอบต่อ 1 แบบจำลอง

แม้ว่าการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยวิธี Trail and Error จะทำให้เสียเวลาและ
ยุ่งยาก แต่ก็ถือเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่า
ทดสอบจริงๆ ซึ่งลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้วิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม
ตอกได้รูปแบบตามรูปที่ 5.3

5.4.2. การทดสอบและประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Tested & Application)

นำโครงข่ายที่ได้จากขั้นตอนการสร้างโครงข่ายมาใช้ในการทดสอบ โดยนำข้อมูลชุดทดสอบ
(Tested Set) และชุดการประยุกต์ใช้โครงข่าย (Application Set) ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนการเตรียม
ข้อมูล จำนวน 32 และ 32 ข้อมูลตามลำดับ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพโครงข่ายที่จะนำโครงข่ายไป
ใช้งานจริง ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้และตามรูปที่ 5.4

1. นำข้อมูลชุดทดสอบ (Tested Set) และชุดประยุกต์ใช้แบบจำลองเข้าโครงข่ายที่ได้จาก
การสร้างแบบจำลอง
2. Un normalization ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายในทุกรอบการคำนวณตามสมการที่ 5.3 ทั้ง
สองกระบวนการ
3. คำนวณและบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด (MAPE) ทุกรอบการคำนวณตาม
สมการที่ 5.4 ทั้งสองกระบวนการ
4. คัดเลือกโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่า MAPE ในกระบวนการ
ทดสอบต่ำที่สุด

5.4.3. การวัดประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม

การวัดประสิทธิภาพโครงข่ายเป็นตัววัดความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของค่าที่
ได้จากโครงข่าย ค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage
Error, MAPE) ที่แสดงค่าผิดพลาดในรูปแบบของหน่วยน้ำหนัก ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความ

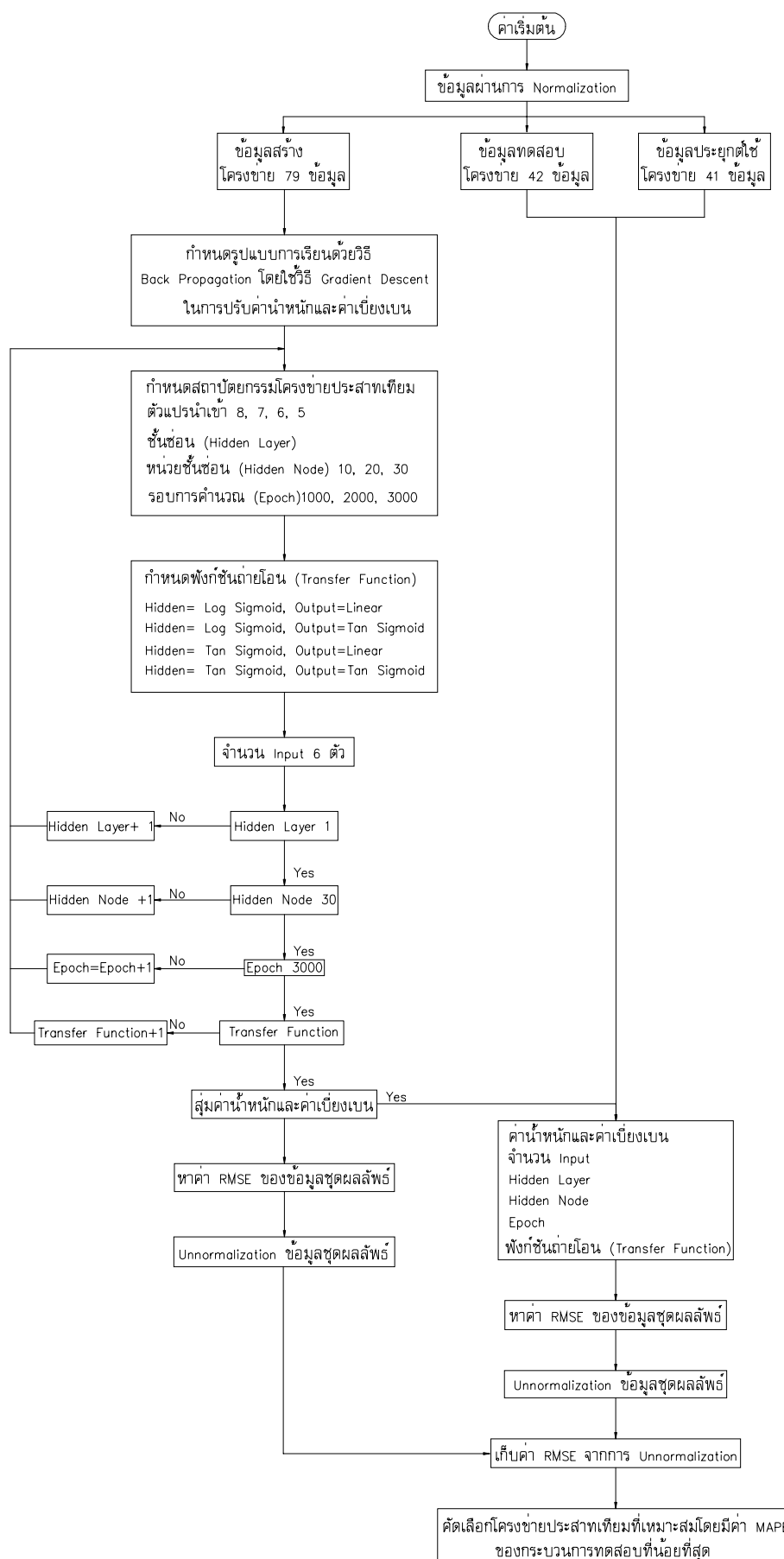
ผิดพลาดได้ชัดเจนและเข้าใจง่ายจึงเหมาะสมกับการวัดประสิทธิภาพโครงข่ายในงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดการคำนวณตามสมการที่ 5.4

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T \arg et - F o r e c a s t}{T \arg et} \right| \times 100 \quad (5.4)$$

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูล

Target คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักรถบรรทุกจากผลทดสอบ Dynamic Load Test

Forecast คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 5.4 แสดงขั้นตอนการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

5.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

5.5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยสูตรการตอกเสาเข็ม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการนำข้อมูลของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนาม โดยวิธี Dynamic Load Test แทนค่าในสูตรตอกเสาเข็มที่เหมาะสมในเขตกรุงเทพฯ เพื่อหาตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก แล้วนำค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก (Q_u) แต่ละสูตรมาหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ตามสมการที่ 5.4 และหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Determination, r) ตามสมการที่ 5.1 เพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ ของค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรตอกเสาเข็ม กับค่ากำลังรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจากผลการทดสอบในสนาม

หลังจากทดสอบพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่ได้จากสูตรแต่ละสูตรจะมีปัจจัยที่แตกต่างกันตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Q_u)

ชื่อสูตร	L	W_r	A	h	W_p	S	Q_u $Design$
Hiley's Formula (1930)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Engineer New (1965)	-	✓	-	✓	-	✓	-
Modified Engineer New (Eng 1965)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Junbu's Formula (alson and Flaate 1967)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Gates's Formula (1957)	-	✓	-	✓	-	✓	-
Danish's Formula (alson and Flaate 1967)	✓	✓	✓	✓	-	✓	-

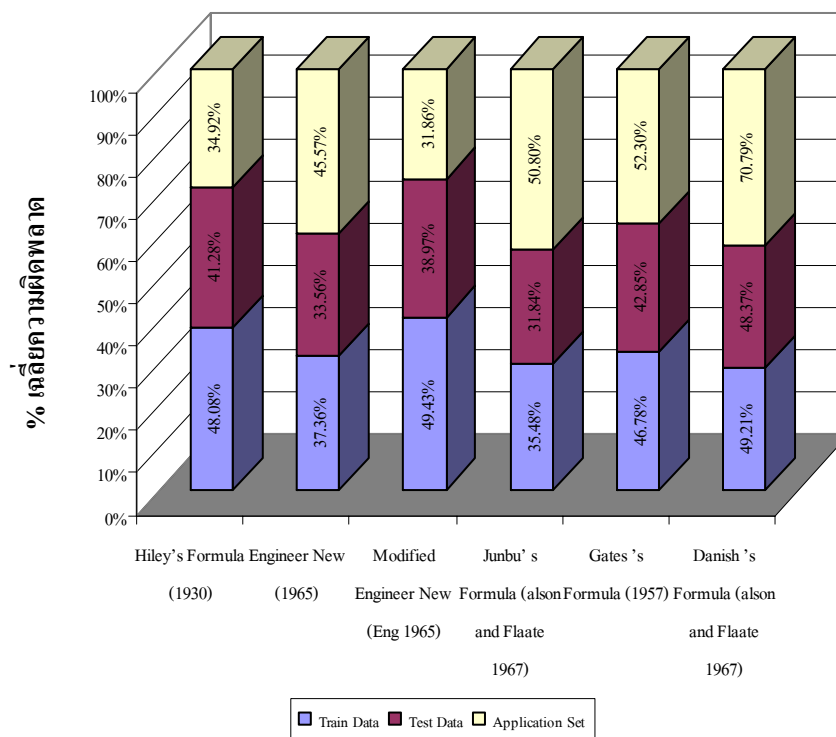
หมายเหตุ : L = ความยาวเสาเข็ม W_r = น้ำหนักค้ำ A = หน้าตัดเสาเข็ม
 h = ระยะขยกลูกค้ำ W_p = น้ำหนักเสาเข็ม S = ค่าทรุดตัวของเสาเข็ม
 $Q_u Design$ = ค่า Safe load ที่ใช้ออกแบบ

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Q_u) ที่ได้จากสูตรดอกลเสาเข็ม

Formula Name	Trained Set		Tested Set		Application Set		Total Set	
	r	MAPE (%)	r	MAPE (%)	r	MAPE (%)	r	MAPE (%)
Hiley's Formula (1930)	0.49	48.08	0.69	41.28	0.58	34.92	0.53	44.13
Engineer New (1965)	0.72	37.36	0.76	33.56	0.75	45.57	0.72	38.23
Modified Engineer New (Eng 1965)	0.46	49.43	0.72	38.97	0.69	31.86	0.51	43.90
Junbu's Formula (alson and Flaate 1967)	0.71	35.48	0.71	31.84	0.61	50.80	0.68	37.79
Gates's Formula (1957)	0.81	46.78	0.86	42.85	0.82	52.30	0.81	47.09
Danish's Formula (alson and Flaate 1967)	0.76	49.21	0.71	48.37	0.60	70.79	0.72	53.31

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยใช้สูตรควบคุมการดอกลเสาเข็มจำนวน 6 สูตร ผลการทดสอบได้ตามตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.5 พบว่าข้อมูลในแต่ละชุดการทดสอบจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด (MAPE) ต่ำสุดของแต่ละชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน ในข้อมูลชุดสร้างแบบจำลอง (Training Set) และชุดทดสอบแบบจำลอง (Testing Set) สูตร Junbu's Formula (alson and Flaate 1967) ให้ค่า MAPE ต่ำสุด = 35.48% และ 31.84% ตามลำดับ ส่วนข้อมูลชุดการประยุกต์ใช้แบบจำลอง (Application Set) สูตร Modified Engineer New (Eng 1965) จะให้ค่า MAPE ต่ำสุด = 31.86% เมื่อนำทั้งสามชุดข้อมูลมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าในสูตรของ Junbu's Formula (alson and Flaate 1967) ในข้อมูลชุดทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด (MAPE) ต่ำที่สุดและค่อนข้างจะมีความสัมพันธ์กับผลทดสอบ Dynamic Load Test มาก คือมีค่า $r = 0.71$ ส่วนสูตรของ Gates's Formula (1957) จะมีความสัมพันธ์กับผลทดสอบ แบบ Dynamic Load Test มากกว่าสูตรอื่นๆ $r = 0.86$ ส่วนสูตรที่มีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดมากที่สุดได้แก่สูตร Modified Engineer New (Eng 1965) ให้ค่า MAPE = 49.43% ในชุด Training Set ส่วนข้อมูล Test และ Application Set สูตรของ Danish's Formula (Alson and Flaate 1967) จะให้ค่า MAPE สูงสุด = 48.37%, 70.79% ตามลำดับ

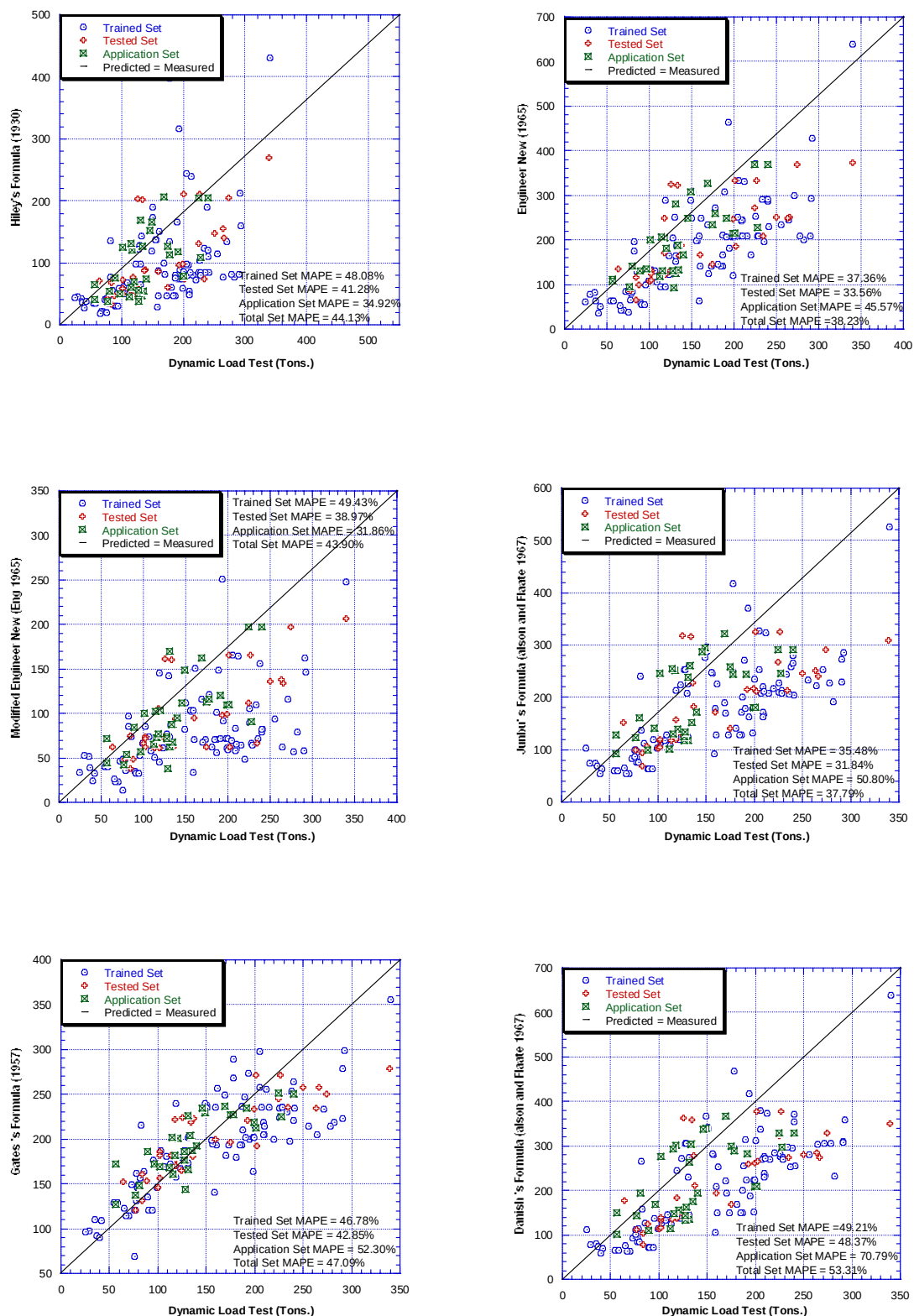
เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละกระบวนการ



รูปที่ 5.5 เปอร์เซนต์เฉลี่ยความผิดพลาดของค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรต่างๆ

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมด (Total Set) มาวิเคราะห์ได้ผลตามตาราง ที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 พบว่า สูตรของ Junbu's Formula (alson and Flaate 1967) ให้ค่า MAPE ต่ำสุด = 37.79% แต่มีความสัมพันธ์กับผลทดสอบ Dynamic Load Test อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ แต่สูตรของ Danish's Formula (alson and Flaate 1967) จะให้ค่าเปอร์เซนต์เฉลี่ยความผิดพลาดสูงสุด (MAPE) = 53.31% และมีค่า $R = 0.72$

ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาด (MAPE) สามารถสรุปสูตรที่เหมาะสมสำหรับชุดข้อมูลนี้ คือสูตร Junbu's Formula (alson and Flaate 1967)



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักจากผลทดสอบ Dynamic Load Test กับค่ากำลังรับน้ำหนักที่หาได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม

5.5.2 ผลการทดสอบการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

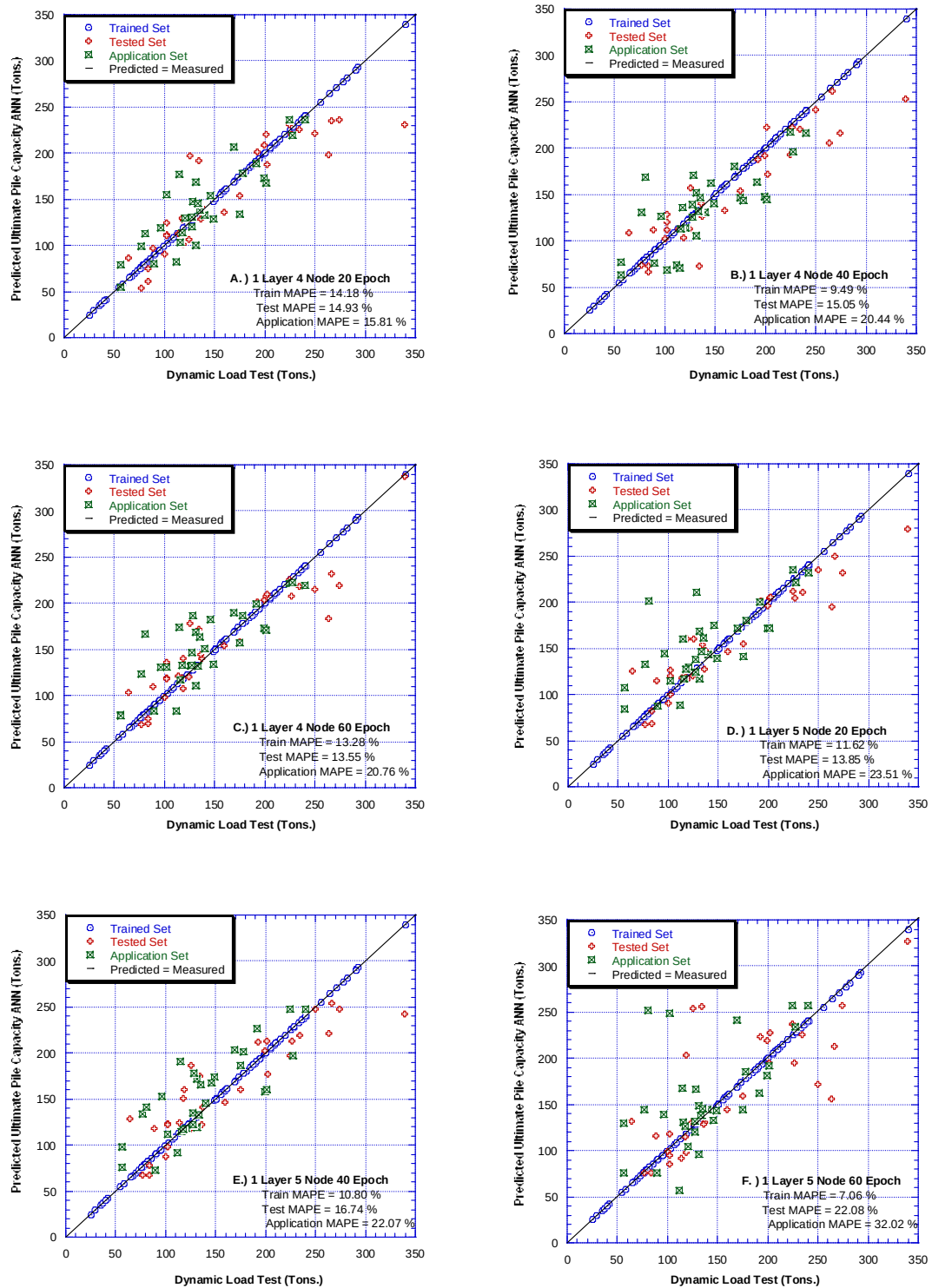
โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมตามรูปที่ 5.3 ซึ่งมีปัจจัยนำเข้า 6 ปัจจัย และข้อมูลที่ผ่านการ Normalization ถูกนำเข้าสู่กระบวนการหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมโดยการลองถูกลองผิดเพื่อหาจำนวนชั้นซ่อน, จำนวนหน่วยในแต่ละชั้นซ่อน, จำนวนรอบในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนและรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนและชั้นผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯโดยมีการออกแบบโครงสร้างทั้งหมดไว้ 18 รูปแบบ ซึ่งมีรูปแบบการปรับโครงสร้างอยู่ในช่วง

- จำนวนชั้นซ่อน 1,2
- จำนวนหน่วยในแต่ละชั้นซ่อน 4, 5, 6
- จำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน 20, 40, 60

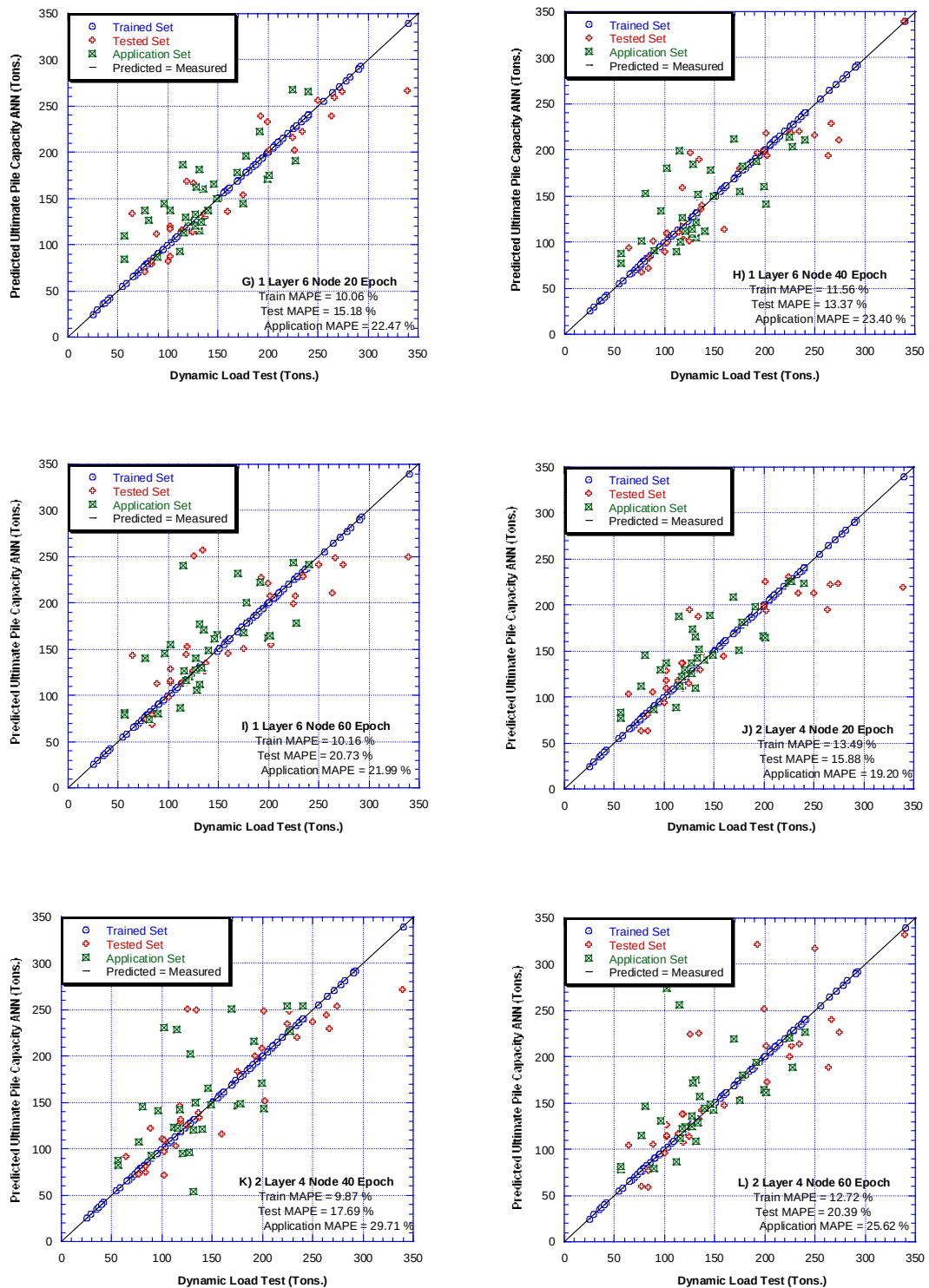
จากนั้นเข้าสู่กระบวนการสร้างโครงข่าย, กระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้งานจริงของโครงข่ายและทำการบันทึกค่า MAPE ในแต่ละกระบวนการตามตารางที่ 5.4 และแสดงได้ตามรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละแบบจำลอง

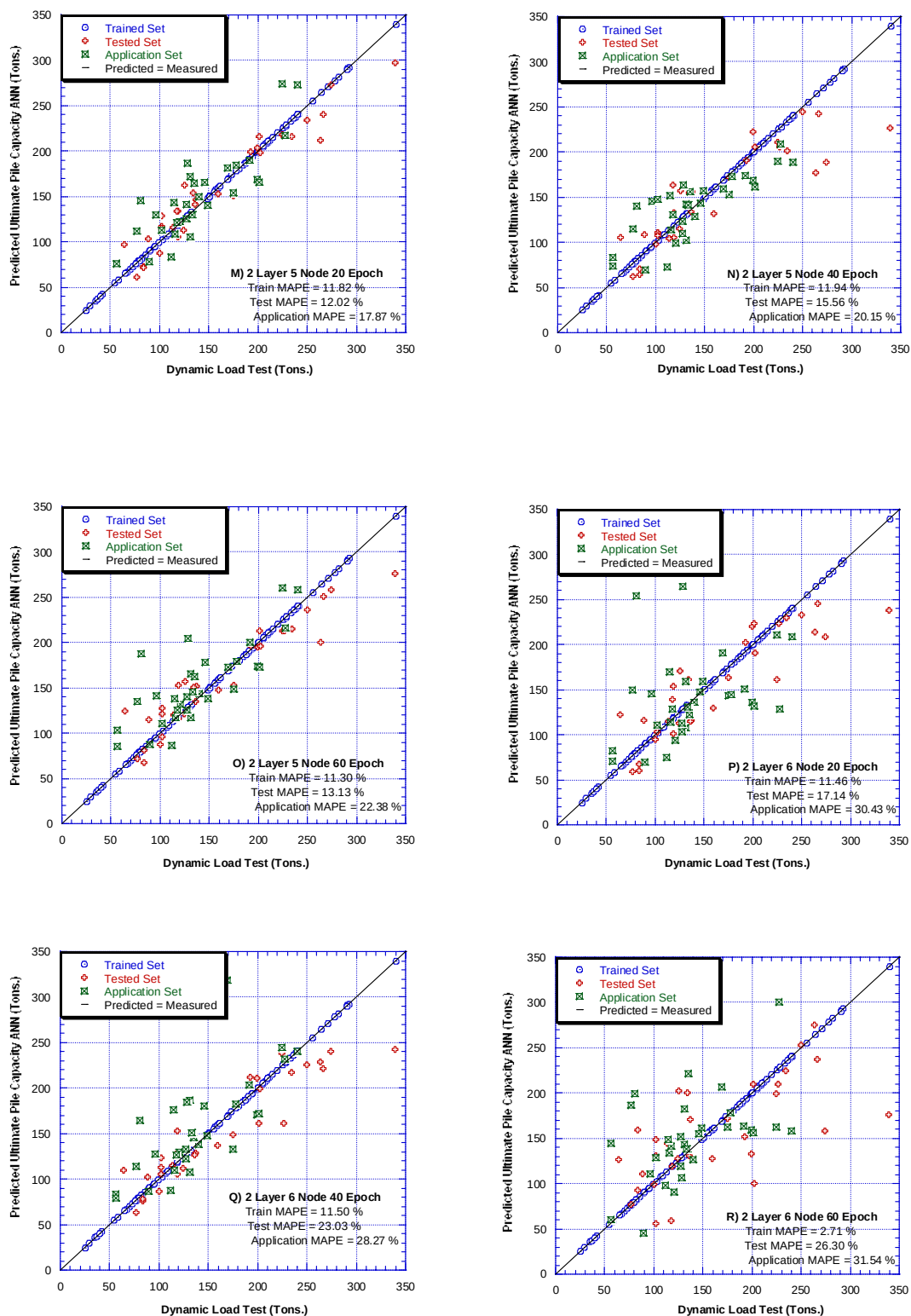
Model No.	No. of Hidden Layer	No. of Hidden Nodes	Epochs	MAPE (%)		
				Trained Set	Tested Set	Application Set
1	1	4	20	14.18	14.93	15.81
2	1	4	40	9.49	15.05	20.44
3	1	4	60	13.28	13.55	20.76
4	1	5	20	11.62	13.85	23.51
5	1	5	40	10.80	16.74	22.07
6	1	5	60	7.06	22.08	32.02
7	1	6	20	10.06	15.18	22.47
8	1	6	40	11.56	13.37	23.40
9	1	6	60	10.16	20.73	21.99
10	2	4	20	13.49	15.88	19.20
11	2	4	40	9.87	17.69	29.71
12	2	4	60	12.72	20.39	25.62
13	2	5	20	11.82	12.07	17.87
14	2	5	40	11.94	15.56	20.15
15	2	5	60	11.30	13.13	22.38
16	2	6	20	11.46	17.14	30.43
17	2	6	40	11.50	23.03	28.27
18	2	6	60	2.71	26.30	31.54



รูปที่ 5.7 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ข้อมูลเข้า 6 ข้อมูล โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Log-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Hidden และ Tan-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Output ใช้รูปแบบ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อน กลับ และปรับค่าน้ำหนัก โดย วิธี Levenberg-Marquardt Algorithm

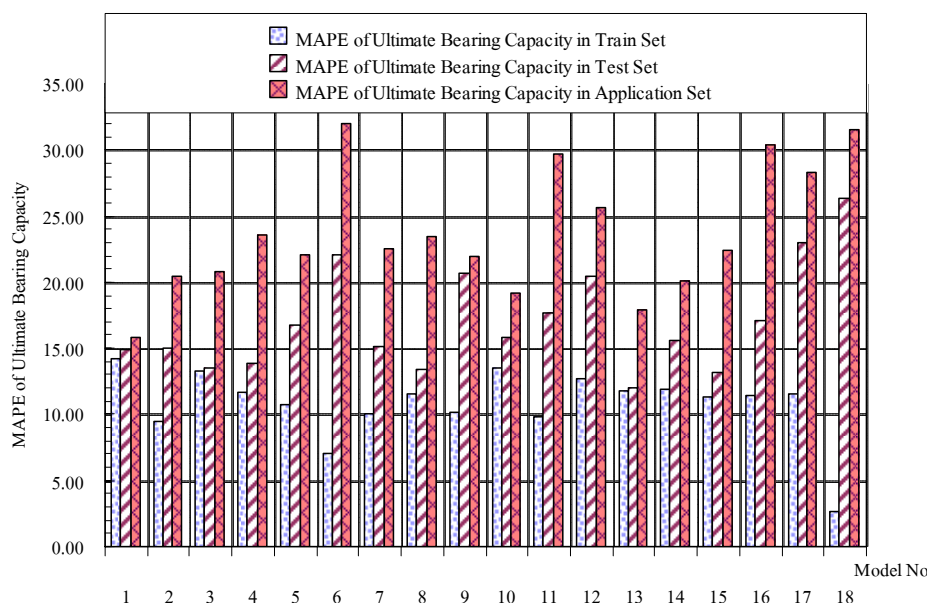


รูปที่ 5.7(ต่อ) ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ข้อมูลเข้า 6 ข้อมูล โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Log-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Hidden และ Tan-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Output ใช้รูปแบบ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อน กลับ และปรับค่าน้ำหนัก โดย วิธี Levenberg-Marquardt Algorithm



รูปที่ 5.7(ต่อ) ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ข้อมูลเข้า 6 ข้อมูล โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Log-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Hidden และ Tan-Sigmoid Transfer Function ในชั้น Output ใช้รูปแบบ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อน กลับ และปรับค่าน้ำหนัก โดย วิธี Levenberg-Marquardt Algorithm

จากผลทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายด้วยวิธีการวิเคราะห์ ด้วย MAPE ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบ แสดงได้ตามรูปที่ 5.8 พบว่าโครงสร้างที่ 13 เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์สูงสุด โดยมีค่า MAPE ในกระบวนการทดสอบเท่ากับ 12.07% ซึ่งสรุปสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ได้ตามผลตามตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดของการพยากรณ์ของแต่ละกระบวนการ

ตารางที่ 5.5 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก

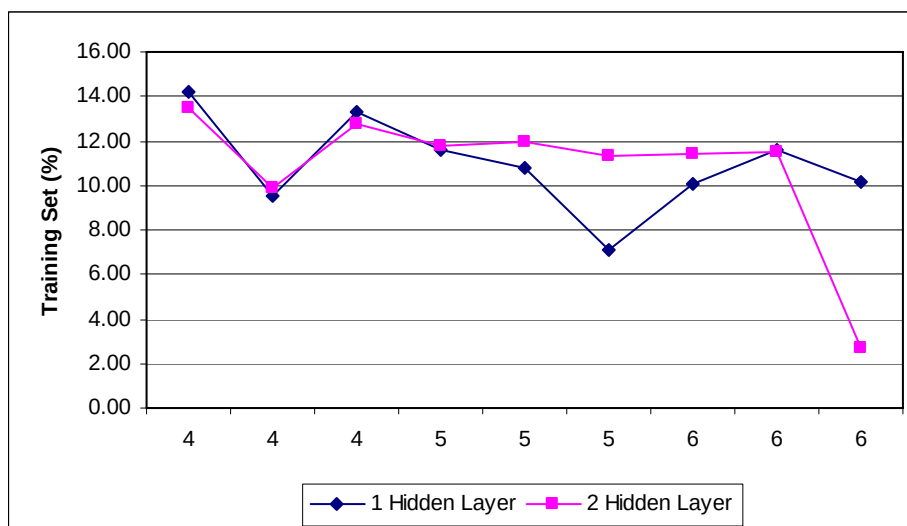
โครงข่ายประสาทเทียม	Feed-forward with Back-propagation
ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อน	Log-Sigmoid Transfer Function
ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นผลลัพธ์	Tan-Sigmoid Transfer Function
การปรับค่าน้ำหนักโดย วิธี	Levenberg-Marquardt Algorithm
จำนวนหน่วยในชั้นรับข้อมูล	6 หน่วย
จำนวนชั้นซ่อน	2 ชั้น
จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน	5 หน่วย
จำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน	20 รอบ
MAPE ในกระบวนการสร้างโครงข่าย	11.82%
MAPE ในกระบวนการทดสอบโครงข่าย	12.07%
MAPE ในกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่าย	17.87%

5.5.2.1 ผลของจำนวนชั้นซ่อนและหน่วยของชั้นซ่อน

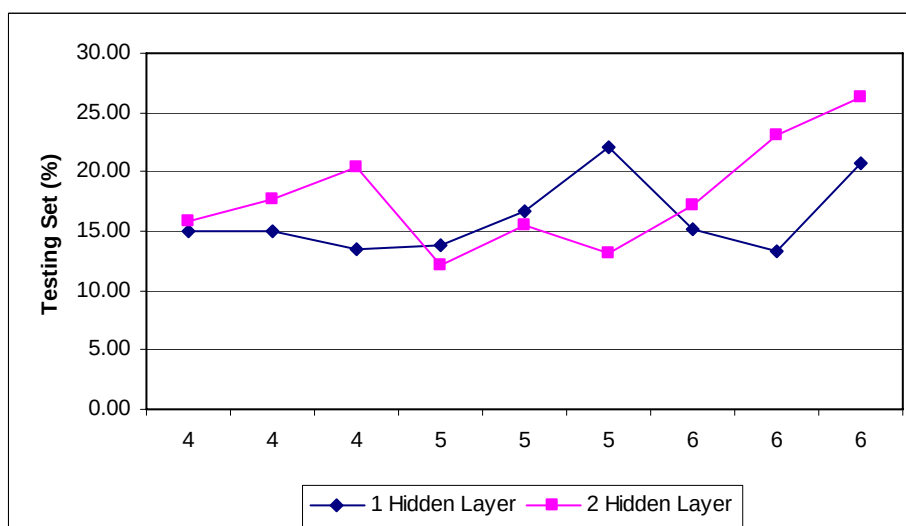
ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของโครงข่ายในกระบวนการสร้างแบบจำลองและกระบวนการทดสอบในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดต่ำสุด (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) กับจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในแต่ละชั้นซ่อนแสดงผลได้ตามรูปที่ 5.7 และ 5.8 สำหรับกระบวนการสร้างแบบจำลองและกระบวนการทดสอบตามลำดับ โดยกำหนดรอบในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 20 รอบ ที่ 2 ชั้นซ่อนโดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้

1. ค่า MAPE ของกระบวนการสร้างแบบจำลองมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในชั้นซ่อนมีมากขึ้น ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่า MAPE น้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมพยายามที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้ากับข้อมูลด้านออก ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ตามรูปที่ 5.9
2. ค่า MAPE ของกระบวนการทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนหน่วยในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้น และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนซึ่ง ณ จุดหนึ่งเมื่อเพิ่มจำนวน Node หรือ Layer เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่า MAPA เพิ่มขึ้นไปด้วย แสดงให้เห็นว่าจำนวนหน่วยในชั้นซ่อนและจำนวนชั้นซ่อนจะมีความสัมพันธ์ต่อค่า MAPE ของกระบวนการทดสอบ ซึ่งค่า MAPE ที่ต่ำที่สุดในกระบวนการทดสอบจะเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ตามรูปที่ 5.10
3. ค่า MAPE ของกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม เมื่อจำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้นจะมีค่า MAPE เพิ่มขึ้นแต่เมื่อเพิ่มจำนวนในชั้นซ่อนค่า MAPE ก็จะค่อยๆ ลดลงตามรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่ากระบวนการนี้จะมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับกระบวนการทดสอบโครงข่าย แต่ค่า MAPE ในกระบวนการนี้มากกว่าค่าในกระบวนการทดสอบแบบจำลองเปรียบเทียบได้ตามรูปที่ 6.1

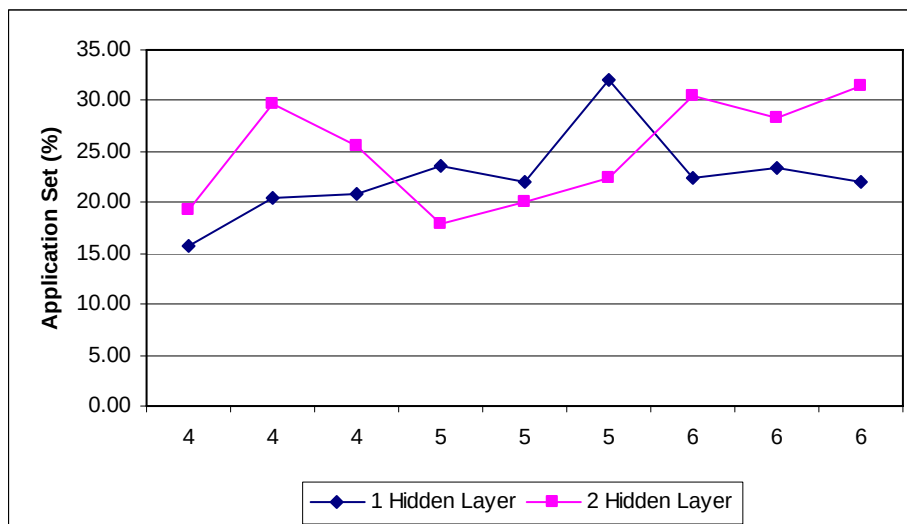
ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในชั้นซ่อนแต่ละชั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้พยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก โครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนหน่วยในชั้นซ่อนมากส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกระบวนการสร้างแบบจำลองมีมากกว่าในกระบวนการทดสอบแบบจำลอง ส่วนประสิทธิภาพในกระบวนการทดสอบแบบจำลองจะดีขึ้น เมื่อมีจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยในชั้นซ่อนที่เหมาะสมกับปัญหาก่อน จึงจะมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด (MAPE) ในการพยากรณ์สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสมค่า MAPE ของกระบวนการทดสอบก็จะลดน้อยลงจนได้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนหน่วยเซลล์ประสาทและจำนวนชั้นในกระบวนการสร้างแบบจำลอง (Training Set)



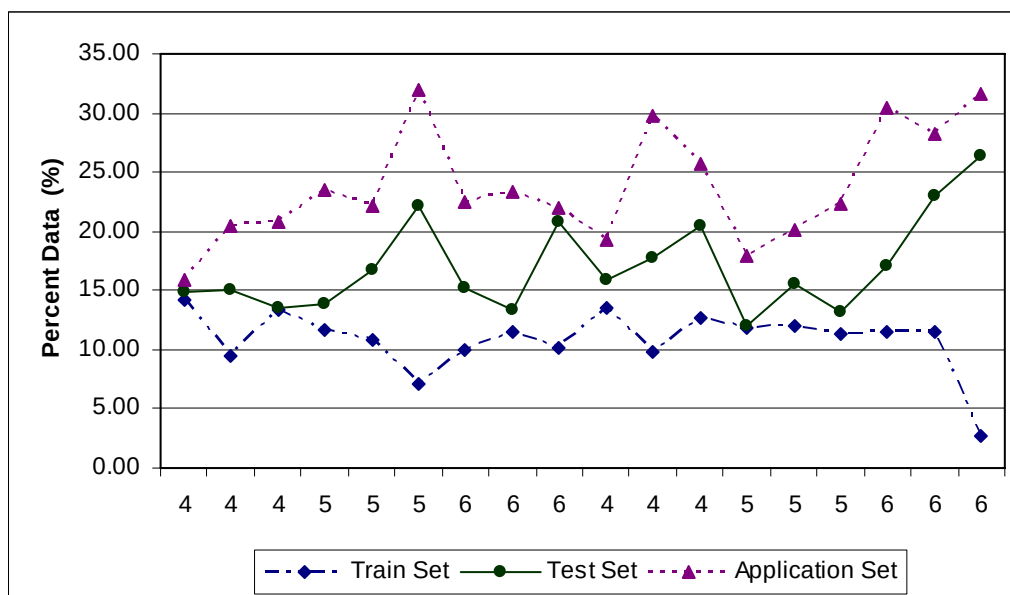
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนหน่วยเซลล์ประสาทและจำนวนชั้นในกระบวนการทดสอบแบบจำลอง (Testing Set)



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนหน่วยเซลล์ประสาทและจำนวนชั้นในกระบวนการประยุกต์ใช้แบบจำลอง (Application Set)

5.5.2.2 ผลของจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน

การปรับจำนวนรอบและการปรับค่าน้ำหนักเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ช่วยลดค่า MAPE ของแบบจำลอง ซึ่งในกระบวนการสร้างแบบจำลองจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า MAPE ในกระบวนการสร้างแบบจำลองลดลง แต่ค่า MAPE ในกระบวนการทดสอบจะลดลงจนถึงจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนค่าหนึ่งก่อนที่ค่า MAPE จะเพิ่มขึ้นเมื่อรอบการปรับค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าเกิด Over fitting คือโครงข่ายที่มีความแม่นยำสำหรับกระบวนการสร้างแบบจำลอง แต่ความแม่นยำของการพยากรณ์ในกระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่ายที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเห็นข้อมูลมาก่อนต่ำอาจเป็นเพราะโครงข่ายปรับตัวตามรูปแบบของกระบวนการสร้างแบบจำลองมากเกินไปหรืออาจเป็นเพราะการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่ให้ค่า MAPE ในกระบวนการทดสอบที่ต่ำที่สุด อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้างเล็กน้อย เนื่องจากการสุ่มค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนในแต่ละครั้งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่แตกต่างกัน ซึ่งก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงผลได้ตามรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับจำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนของแต่ละกระบวนการหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

5.5.2.3 สรุปกระบวนการออกแบบและหาสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

จากขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวในบทนี้เป็นขั้นตอนการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้พยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบบกทานของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด (MAPE) กระบวนการทดสอบของโครงข่ายเป็นตัววัดประสิทธิภาพโครงข่ายที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านเข้ากับผลลัพธ์ที่ต้องการ เพื่อนำผลจากการวิจัยไปใช้งานจริงต่อไป

การออกแบบพบว่ารูปแบบของโครงข่ายที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกมีรูปแบบการเรียนรู้แบบไปข้างหน้าชนิดการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Feed-forward Network with Back Propagation Algorithm) โดยมีการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm (lm) ซึ่งพัฒนามาบน Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้พยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบบกทานของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยมีรูปแบบโครงข่ายที่เหมาะสมตาม ตารางที่ 5.6 จากผลการวิเคราะห์พบว่าจำนวนหน่วยของชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยประสาทในชั้นซ่อนเป็นส่วนประกอบสำคัญของการวิเคราะห์จำนวนชั้นซ่อนและจำนวนหน่วยประสาทในชั้นซ่อนมากอาจจะสร้างความสัมพันธ์ได้ดีกับข้อมูลในชุดสร้างแบบจำลอง (Training Set) แต่อาจจะนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ที่ไม่ถูกต้อง (Over fitting) กับชุดข้อมูลสำหรับทดสอบแบบจำลอง (Testing Set) และข้อมูลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง (Application Set) ซึ่งพบว่ากระบวนการทดสอบแบบจำลองที่มีจำนวนชั้นซ่อนและหน่วยประสาทในชั้นซ่อนมากอาจจะมีค่า MAPE ที่ไม่ดีขึ้นเลยแสดงให้เห็นว่าโครงข่าย

ไม่ได้สร้างความสัมพันธ์ต่อกันจึงพอสรุปได้ว่าค่าMAPE ที่น้อยที่สุดในกระบวนการสร้างแบบจำลองแทบไม่มีความสำคัญกับกระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่ายเลย เพราะค่าความผิดพลาดจากการทดสอบแบบจำลองกับชุดข้อมูลทดสอบที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการสร้างความสัมพันธ์มีความสำคัญมากกว่า ซึ่งแบบจำลองที่ดีที่สุดคือแบบจำลองที่มีค่า MAPE น้อยที่สุดในกระบวนการทดสอบแบบจำลอง

บทที่ 6

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

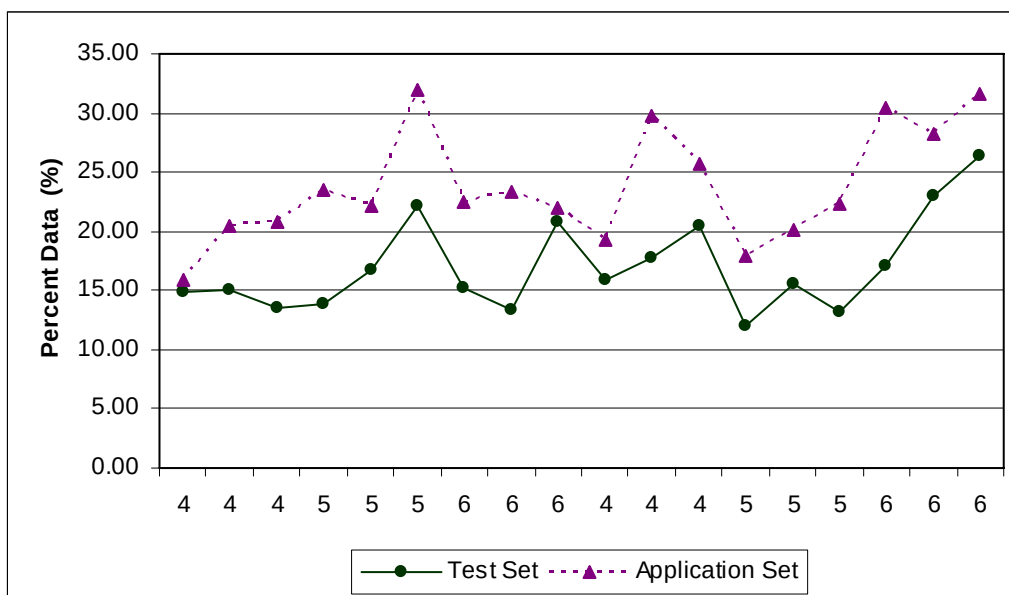
6.1 บทนำ

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถที่จะเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจำนวนมากได้โดยไม่ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นอีกวิธีหนึ่งในหลายๆวิธีที่คล้ายกับสมการถดถอยทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยทั่วไป สมการถดถอยทางสถิติต้องใช้ข้อมูลเป็นพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือและไม่ง่ายที่จะเลือกใช้วิธีการทางสถิติที่เหมาะสมมาวิเคราะห์กับแต่ละชุดข้อมูลหรือแต่ละกลุ่มความสัมพันธ์ ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีกว่า สมการถดถอยทางสถิติคือสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลเข้าจะสัมพันธ์กับข้อมูลออก โดยจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่มีความซับซ้อนมาก ทำให้แบบจำลองโครงข่ายค่อนข้างยืดหยุ่นและเหมาะกับการนำไปใช้งานจริงๆได้

6.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบก

ทานของเสาเข็มตอก

จากการทดสอบประสิทธิภาพและข้อจำกัดของแบบจำลองจากข้อมูลกระบวนการทดสอบแบบจำลองที่ผ่านมา เพื่อให้เกิดความมั่นใจและเชื่อมั่นในประสิทธิภาพของแบบจำลองที่จะนำไปใช้งานจริงๆจึงได้นำข้อมูลจำนวน 32 ข้อมูลในชุดประยุกต์ใช้แบบจำลองซึ่งเป็นข้อมูลที่แบบจำลองไม่เคยเห็นหรือรับรู้ข้อมูลเหล่านั้นมาก่อน ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่ 13 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตอก เช่นเดียวกับแบบจำลองในชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลอง มีค่า $MAPE = 17.87\%$ เป็นค่า $MAPE$ ที่เพิ่มขึ้นกว่าค่าที่ได้จากกระบวนการทดสอบแบบจำลอง ซึ่งผลต่างของ $MAPE$ ระหว่างกระบวนการทดสอบกับกระบวนการประยุกต์ใช้แบบจำลองมีค่าประมาณ 5.80% จากกระบวนการทั้งสองจะสังเกตได้ว่าแบบจำลองมีลักษณะการพยากรณ์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดไปในทิศทางเดียวกัน คือมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดที่ลดต่ำลงและค่อยๆเพิ่มขึ้น จนคุณสมบัติของโครงข่ายมีความเหมาะสมกับปัญหาค่า $MAPE$ ก็จะมากขึ้นหรือลดต่ำลงขึ้นอยู่กับปัญหาและสมการที่ใช้ตามรูปที่ 6.1

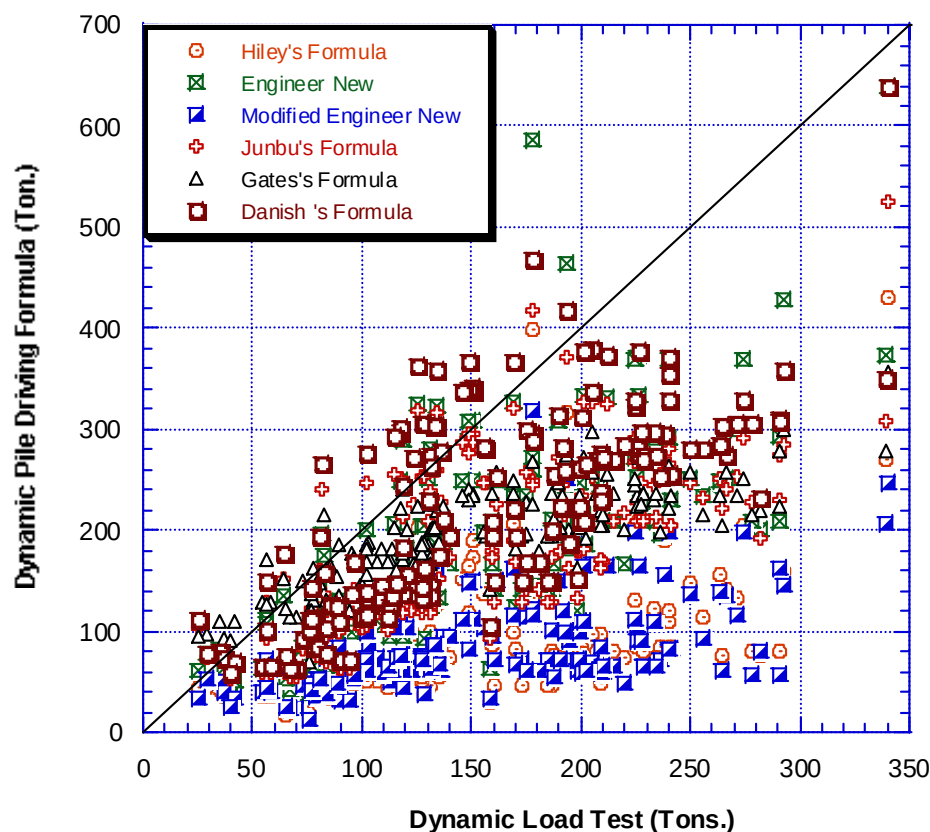


รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่าย

6.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนัก

6.3.1 ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบของเสาเข็มตอกใช้ข้อมูลทั้งหมด 162 ข้อมูลแทนค่าในสูตรการควบคุมการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ซึ่งได้แก่สูตร Hiley's Formula, Engineer New, Modified Engineer New, Junbu's Formula, Gates's Formula, Danish's Formula จากผลสรุปงานวิจัยของสนธิ พิพิธสมบัติ [4] สูตรเหล่านี้ถูกพัฒนามาจากความสัมพันธ์ของแรงต้านทานจากการตอกเสาเข็มกับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ซึ่งแต่ละสูตรจะมีตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่แตกต่างกันไป จากการวิจัยพบว่าสูตรควบคุมการตอกเสาเข็มที่ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับผลทดสอบ Dynamic Load Test มากที่สุดได้แก่สูตรของ Engineer New (1965) และสูตร Junbu's Formula (alson and Flaate 1967) ซึ่งมีค่า MAPE น้อยที่สุดเท่ากับ 33.76% และ 37.78% ตามลำดับ ส่วนผลของการคำนวณโดยใช้สูตรอื่นๆยังมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดที่ค่อนข้างสูงอยู่ตามรายละเอียดในตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับน้ำหนักที่คำนวณได้จากสูตรยังมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาดที่ไม่ใกล้เคียงกับผลทดสอบจริงในสนาม



รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรควบคุมการตอกเสาเข็มแต่ละสูตร

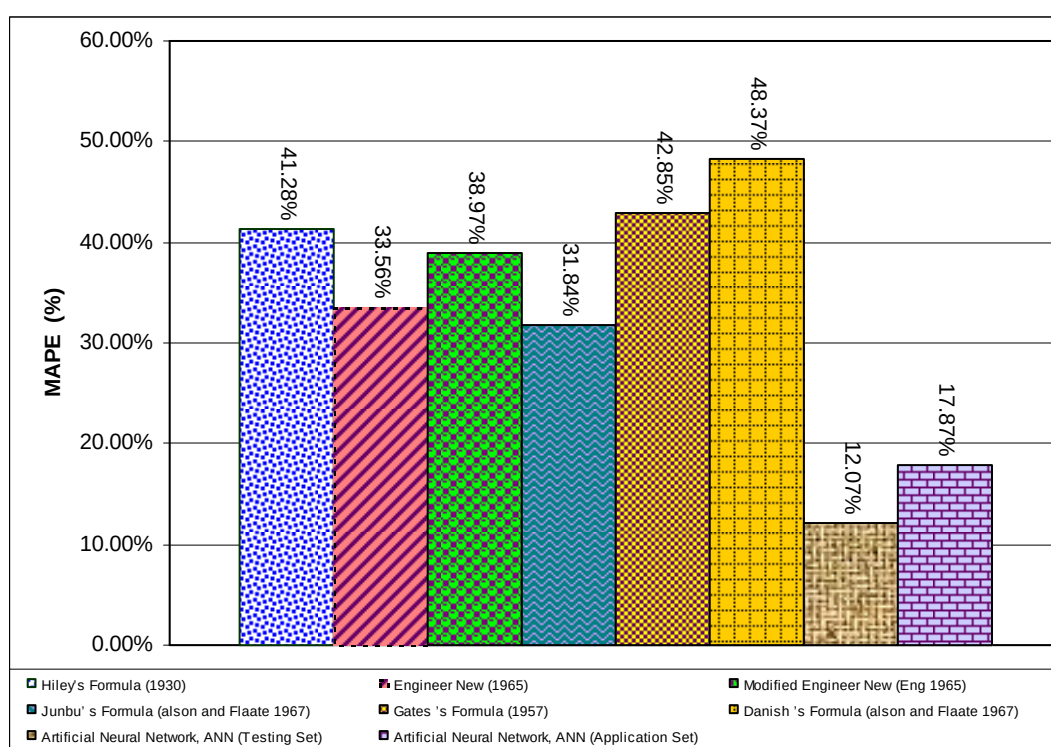
6.3.2 ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

จากการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีตัวแปรนำเข้าทั้งหมด 6 ตัวแปรโดยอ้างอิงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยการทดลองสุ่มตัวแปรแต่ละตัวเข้าไปในโครงข่ายเพื่อหาความสัมพันธ์ของโครงข่ายที่มีผลกับค่าตัวแปรที่ป้อนเข้าไปอ้างอิงตัวแปรจากสูตรควบคุมการตอกเสาเข็มที่กล่าวมาข้างต้น จากการวิจัยได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก คือแบบจำลองที่ 13 ประกอบด้วย ข้อมูลนำเข้า (Input) โครงข่าย 6 ตัวแปร 2 ชั้นซ่อน (Hidden Layer) 5 หน่วยประสาทในชั้นซ่อน (Hidden Node) และคำนวณที่ 20 รอบการคำนวณ มีค่า $MAPE = 12.07\%$ แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากโครงข่ายมีความสัมพันธ์กับผลทดสอบ Dynamic Load Test สามารถสรุปผลการทดสอบได้ตามตารางที่ 5.5

ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกแสดงผลลัพธ์ได้ดีในกระบวนการทดสอบแบบจำลองสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านเข้าไปสู่ตัวแปรด้านออก จากการออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายให้มีคุณภาพ จำเป็นต้องกำหนด ข้อมูลนำเข้า, จำนวนชั้นซ่อน, จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน, จำนวนรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนและปริมาณข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมกับปัญหา หรืออาจจะ

กล่าวได้ว่ารูปแบบการเรียนรู้ในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนจะมีผลต่อค่า MAPE เพราะแต่ละรูปแบบของการเรียนรู้จะมีผลต่อจำนวนชั้นซ่อน, หน่วยในแต่ละชั้นซ่อน, จำนวนข้อมูลและรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน หากจะนำรูปแบบไหนมาใช้ควรเลือกพิจารณาให้เหมาะสมกับปัญหานั้น

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาสามารถเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากแต่ละวิธีการได้ตามรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองกระบวนการทดสอบมีค่า MAPE ที่น้อยกว่าที่ได้จากสูตรควบคุมการตอกเสาเข็ม แสดงให้เห็นว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบ Dynamic Load Test มากที่สุด



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากจากกระบวนการต่างๆ

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในภาคสนามจริงๆ เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการรองรับน้ำหนักขององค์อาคาร ในแต่ละหน่วยงานก่อสร้างจะต้องทำการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มก่อนที่จะทำการก่อสร้างในชั้นอื่นๆต่อไป จากการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักในภาคสนามจริงจะค่อนข้างมีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายในการทดสอบค่อนข้างมาก ส่วนการใช้สูตรสำเร็จในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่มาก งานวิจัยจึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ประสิทธิภาพในการพยากรณ์มาใช้ในการพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลผลทดสอบ Dynamic Load Test ที่ค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัย (Safety of Factor) ที่ 2.5 เท่าของ Load Design ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่สามารถรับน้ำหนักได้จริงๆก่อนที่จะทำการก่อสร้างอาคารในชั้นตอนต่อไป

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกที่ได้จากสูตรสำเร็จที่เหมาะสมในพื้นที่กรุงเทพฯทั้งหมด 6 สูตรที่นำมาวิเคราะห์เสาเข็มทั้งหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเสาเข็มรูปตัวไอพบว่าสูตรของ Engineer New (1965) มีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความผิดพลาด MAPE น้อยที่สุดเท่ากับ 33.76% และ Junbu's Formula (alson and Flaate 1967) มีค่าความผิดพลาดน้อย MAPE เท่ากับ 37.78% เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลผลทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Test ที่ค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ 2.5 เท่าของ Load Design ยังถือว่าค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรสำเร็จมีความคลาดเคลื่อนจากทดสอบ Dynamic Load Test อยู่มาก

จากการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลอง (Training Set) และนำไปทดสอบหาความถูกต้องของความสัมพันธ์จากชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลอง (Testing Set) และข้อมูลชุดประยุกต์ใช้แบบจำลอง (Application Set) พบว่าประสิทธิภาพของแบบจำลองขึ้นอยู่กับรูปแบบของข้อมูลนำเข้า (Input) ต้องเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องและครอบคลุมข้อมูลจริงๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อผลลัพธ์ (Output), กระบวนการเรียนรู้ในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนของแบบจำลอง, จำนวนชั้นซ่อน, จำนวนหน่วยเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนและรอบการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน (Epoch) จะลดลงเมื่อจำนวนผลลัพธ์ลดลง โดยที่โครงสร้างของโครงข่ายและประสิทธิภาพในการพยากรณ์ยังเหมือนเดิม สำหรับข้อมูลชุดเดียวกัน

จากผลการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับผลทดสอบ Dynamic Load Test ที่ค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยที่ 2.5 เท่าของ Load Design แบบจำลองสามารถทำการวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็วและให้ค่าผลการวิเคราะห์มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรสำเร็จ ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ได้แก่แบบจำลองที่ 13 ประกอบด้วยจำนวนข้อมูลเข้า (Input) จำนวน 6 ตัว 2 ชั้นซ่อนมีหน่วยเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนจำนวน 20 หน่วย และมีรอบการปรับค่าน้ำหนักที่ 20 รอบการคำนวณ มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (MAPE) เท่ากับ 12.07% และ RMSE = 17.87% ในกระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่ายตามลำดับ

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้พยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงแม้ว่าในการวิเคราะห์นั้นยังมีความผิดพลาดอยู่บ้างพอสมควรแต่ก็ยังให้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากสูตรสำเร็จ

จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้จริงแต่เพื่อให้ค่าการพยากรณ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีความน่าเชื่อถือต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงควรมีการหาค่าความผิดพลาดในการพยากรณ์เท่ากับค่า RMSE ในการพยากรณ์แต่ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้งาน

ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้นี้ยังมีขอบเขตที่สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมให้มีการใช้งานในด้านปฐพีได้มากขึ้นซึ่งมีข้อเสนอแนะสำหรับศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ขอบเขตในการเก็บรวบรวมข้อมูลในการทดสอบต่อไปควรมีการเก็บข้อมูลจากหลายๆบริษัท ที่ทำการทดสอบเสาเข็มในพื้นที่กรุงเทพฯ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้ทำวิจัยไปนี้เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการนำโครงข่ายไปใช้ในการทำงานได้จริงๆต่อไป
2. ข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มที่จะนำมาทดสอบต่อไปควรเป็นข้อมูลจากพื้นที่จังหวัดอื่นๆในประเทศไทย เพื่อที่จะพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้พยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในพื้นที่อื่นๆในประเทศไทยได้หลากหลายมากขึ้น
3. ศึกษาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้พยากรณ์ความสามารถของเสาเข็มโดยเก็บรวบรวมข้อมูลของสัญญาณสะท้อนคลื่นความเค้น ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Dynamic Load Test ในภาคสนามมาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองและเป็นข้อมูลเปรียบเทียบ

บรรณานุกรม

- [1] อาชว์ นิยมไทย, การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.
- [2] <http://www.bbc.go.th/>
- [3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม. กรุงเทพฯ: ตุลาคม 2521
- [4] สนิท พิพิชสมบัติ, สูตรที่ใช้ในการคำนวณหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในดิน กรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [5] บุญเทพ นานกรังสรรค์, **Foundation Engineering and Tunnelling**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: รุ่งแสงการพิมพ์. 2539.
- [6] พิทยา ทวีเลิศ, การประเมินการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ในชั้นดิน กรุงเทพฯและระยอง. วิทยานิพนธ์สำหรับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2523
- [7] บริษัท เอส.ที.เอส อินสตรูमेंท จำกัด, การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธีพลศาสตร์. รายงานประกอบผลการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ (เอกสารไม่ตีพิมพ์เผยแพร่)
- [8] สมาคมอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์คอนกรีตไทย, การบริหารงานและควบคุมการตอกเสาเข็ม. กรุงเทพฯ. 2540
- [9] กมล สิงโตแก้ว, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์และพรพจน์ ต้นเส็ง, น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เสาเข็มทดสอบกับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7. 17-18 พฤษภาคม 2544.
- [10] <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK25/chapter5/chap5.htm>
- [11] Flood, I. and Kartam, N. (1994). “**Neural Networks in Civil Engineering I. Principles and Understanding**.” Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 8, No. 2.
- [12] Flood, I. and Kartam, N. (1994). “**Neural Networks in Civil Engineering II. Systems Application**.” Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 8, No. 2. April,
- [13] Haykin, M.T., Demuth, H.B., and Beale, M. **Neural Network Design**. PWS Publishing Company. 1995.
- [14] Smith, M. **Neural Network for Statistical Modeling**. Newyork. Van Nostrand Reinhold. 1993

- [15] S. Suwansawat, H.H. Einstein, **Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling.** Tunnelling and Underground Space Technology 21 (2006) pp.133–150
- [16] Demuth, H., Beale, M., and Hagan, M. **Neural network Toolbox for Use with MATLAB.9 ED.** The Math Works, Inc.2005
- [17] Zhang, G., Patuwo, B.E., and Hu, M.Y **Forecasting with Artificial Neural Networks.** The State of the Art. Internationnal Journal of Forecasting. Vol. 14 1998. pp. 35-62
- [18] Yi-Cherng Yeh (1993) **Building KBES for Diagnosing PC Pile with Artificial Neural Network** Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 7, No. 1, January, 1993.
- [19] Anthony T.C. Goh , **Pile Driving Records Reanalyzed Using Neural Networks.** Journal of Geotechnical Engineering , ASCE, Vol. 122, No. 6, June, 1996.
- [20] C. I. The, **Prediction of Pile Capacity Using Neural Networks.** Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 11, No. 2, April, 1997.
- [21] ASTM D 4945 -96 Standard Test Method for High- Strain Dynamic Testing of Pile¹
- [22] ทิพวรรณ หล่อสุวรรณรัตน์. ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพมหานคร: แชนโพร่ พรินติ้ง. 2546
- [23] นันทนี แขวงโสกา. อินไซด์ Access 2003. กรุงเทพมหานคร: โปรวิชั่น. 2548

ตารางผนวก ก1

ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ตารางผนวก ก1 ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
1	S-0.26x0.26	26.5	4.18	676	0.80	4.30	1	0.4	82.8	30	SAINOI PIPELINE PROJECT	ไทรน้อย
2	S-0.30x0.30	25.00	4.18	900	0.80	5.40	4.00	1.15	118.20	25		
3	S-0.26x0.26	24.50	3.79	676	0.50	3.97	1.50	0.54	88.10	30		
4	S-0.30x0.30	21.00	3.79	900	0.70	4.54	5.00	0.87	63.80	25		
5	S-0.30x0.30	22.50	3.70	900	0.50	4.86	3.00	0.46	77.10	25		
6	S-0.26x0.26	27.50	4.18	676	0.70	4.46	1.00	0.87	131.20	30		
7	S-0.26x0.26	16.00	3.08	676	0.40	2.60	8.00	0.89	25.00	10		
8	S-0.26x0.26	24.00	3.08	676	0.50	3.89	1.00	0.53	79.20	30		
9	S-0.30x0.30	24.00	3.70	900	0.70	5.18	2.00	0.58	96.70	35		
10	S-0.30x0.30	22.00	3.08	900	0.70	4.75	8.00	1.04	56.30	25		
11	S-0.26x0.26	20.50	3.80	676	0.50	3.33	0.50	0.46	95.20	30		
12	S-0.26x0.26	23.50	4.50	676	0.40	3.81	0.50	0.66	113.10	30		
13	S-0.30x0.30	22.50	4.50	900	0.40	4.86	1.00	0.62	118.80	30		
14	I-0.35x0.35	21.00	4.00	780	1.40	3.93	3.00	1.45	118.70	45	โรงงานยูริโคร-ไทย ลาดกระบัง	ถ.ลาดกระบัง

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
15	I-0.35x0.35	24.00	5.20	860	0.80	4.95	2.50	2.15	201.00	50	บ้านคุณมณฑาทิพย์ โกวิทเจริญกุล	ถ.รามคำแหง 21
16	I-0.35x0.35	24.00	5.20	860	0.80	4.95	2.00	1.69	199.10	50		
17	S-0.26x0.26	24.50	5.00	676	0.50	3.97	1.00	1.16	127.50	30	โซว์รูมและสำนักงาน UR-1 MOTOR SPORT	ถ.พระราม 2
18	S-0.40x0.40	23.00	5.80	1,571	0.90	8.67	2.00	1.55	224.60	80	อาคารหอพักนิสิตหญิง 14 ชั้นจุฬาลงกรณ์ วิทยาลัย	ถ.พญาไท
19	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1,225	0.60	6.76	1.00	2.09	266.10	60	BANGKOK WATER TREATMENT PLANT AND RELATED WORKS PROJECT	บางเขน (Bangkhen)
20	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1,225	0.90	6.76	5.00	3.22	274.30	60		
21	S-0.35x0.35	22.00	8.00	1,225	0.60	6.47	1.00	2.19	250.20	60		
22	S-0.35x0.35	21.00	8.00	1,225	0.60	6.17	2.00	2.13	263.90	60		
23	S-0.35x0.35	21.00	8.00	1,225	0.70	6.17	1.00	2.56	291.10	60		
24	S-0.35x0.35	21.00	8.00	1,225	0.90	6.17	2.50	3.86	339.50	60		
25	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1,225	0.70	6.76	2.00	2.56	237.90	60		
26	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1,225	0.90	6.76	4.90	2.98	224.90	60		
27	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1,225	0.30	6.76	1.00	0.94	170.20	60		
28	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1,225	0.90	6.76	5.00	3.28	240.10	60		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อโครงการ	ที่ตั้งโครงการ
29	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1,600	0.80	7.10	3.00	2.15	136.10	45	หจม. อัมรินทร์ พรินด์ิง&พับลิชชิ่ง	ถ. บรรณราช ชนนี
30	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1,600	1.00	7.10	5.00	1.67	127.40	45		
31	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1,600	0.80	7.10	5.00	0.96	123.20	45		
32	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1,600	1.00	7.10	5.00	1.73	128.20	45		
33	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1,600	1.00	7.10	6.00	1.56	117.50	45		
34	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1,600	0.80	7.10	4.00	1.61	131.30	45		
35	S-0.35x0.35	24.00	4.50	1,225	0.40	7.06	2.00	0.85	128.40	40	JONSON&JONSON (SPORT COMPLEX)	นิคมฯ ลาดกระบัง
36	S-0.35x0.35	24.00	4.00	1,225	0.70	7.06	7.00	2.04	80.40	40	บ้านไทยสมบูรณ์	ประจวบฯ 90
37	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	2.00	2.55	226.40	80	ม.เกษมบัณฑิต วิทยาเขตร่มเกล้า	ถ. ร่มเกล้า
38	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	3.00	2.57	212.40	80		
39	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.50	8.06	14.00	1.87	81.90	80		
40	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	8.00	1.81	133.90	80		
41	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	7.00	1.86	125.50	80		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
42	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.50	8.06	9.00	1.18	101.70	80	ม.เกษมบัณฑิต วิทยาเขตร่มเกล้า	ร.ร.ร่มเกล้า
43	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	1.00	1.56	205.50	80		
44	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	2.00	1.98	201.00	80		
45	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.50	8.06	3.00	0.70	114.90	80		
46	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1,600	0.80	8.06	5.00	1.12	169.30	80		
47	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2,025	1.00	12.15	1.50	1.84	290.50	120	เขื่อนทวลิตสาขาพระราม 2	พระราม 2
48	S-0.45x0.45	29.00	4.00	2,025	1.20	14.09	5.00	2.24	264.80	120		
49	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2,025	1.00	12.15	2.00	1.30	278.00	120		
50	S-0.40x0.40	29.00	6.30	1,600	0.90	11.14	4.00	1.68	233.50	80	โรงงานฟุตบอลไทย 2	ถ.คลองกรู้ง
51	S-0.40x0.40	27.00	5.45	1,600	0.70	10.37	3.00	2.05	235.90	80		
52	S-0.40x0.40	38.25	4.00	1,600	1.20	14.69	5.00	1.88	209.30	80		
53	S-0.40x0.40	39.25	4.00	1,600	1.20	15.07	5.00	1.88	210.00	80		
54	S-0.40x0.40	32.00	6.30	1,600	0.70	12.29	1.50	1.40	240.90	80		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
55	S-0.40x0.40	28.00	5.45	1,600	0.90	10.75	3.00	1.73	225.90	80	โรงงานฟุตบอลไทย 2	ถ.หนองกรุง
56	S-0.40x0.40	28.00	6.45	1,600	0.90	10.75	4.00	2.82	271.10	80		
57	S-0.40x0.40	43.00	5.68	1,600	1.30	16.51	8.00	3.27	225.40	80		
58	S-0.40x0.40	28.00	5.20	1,600	0.90	10.75	3.00	1.20	208.70	80		
59	S-0.40x0.40	26.25	6.45	1,600	0.70	10.08	3.00	2.39	255.60	80		
60	S-0.40x0.40	41.00	4.00	1,600	1.20	15.74	5.00	2.35	209.20	80		
61	S-0.40x0.40	30.00	5.50	1,600	1.50	11.52	2.50	2.57	292.80	80	ศุภวรรณ รีเวอร์เพลส	ลาดกระบัง
62	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2,025	1.40	12.15	5.00	2.47	240.50	80		
63	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2,025	1.20	12.15	1.00	1.96	204.90	80		
64	S-0.45x0.45	24.00	4.00	2,025	1.40	11.66	1.50	1.03	240.60	80		
65	S-0.45x0.45	24.00	4.00	2,025	1.40	11.66	3.00	0.69	148.50	80		
66	S-0.40x0.40	23.00	4.00	1,600	0.90	8.83	3.00	1.87	202.60	65		
67	S-0.45x0.45	24.00	4.00	2,025	1.00	11.66	2.00	1.89	200.50	80		
68	S-0.40x0.40	23.00	4.00	1,600	0.80	8.83	1.00	1.42	187.20	65		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อโครงการ	ที่ตั้งโครงการ
69	S-0.45x0.45	23.00	4.00	2,025	0.80	11.18	1.50	1.81	220.00	80	สุวรรณภูมิ รีเวอร์เพลส	ลาดกระบัง
70	S-.525x0.525	24.00	9.50	2,756	1.30	15.88	3.00	4.48	339.90	90	โครงการ ปรับปรุงถนนคูบอน	ถ.รามอินทรา กม.8
71	S-0.26x0.26	19.00	4.00	676	0.50	3.08	0.50	0.48	109.10	30	อาคารสำนักงานและคลังสินค้า	ถ.วิภาวดี-รังสิต
72	S-0.35x0.35	19.00	4.00	1,225	1.20	5.59	3.00	1.34	117.80	45		
73	S-0.35x0.35	28.00	4.00	1,225	1.00	8.23	3.00	1.78	191.00	75	เอส.พี.การ์เด็น แมนชั่น	ถ.ก้านันแมน
74	S-0.35x0.35	28.00	4.00	1,225	1.00	8.23	3.00	1.91	199.50	75		
75	S-0.35x0.35	28.00	4.00	1,225	1.00	8.23	3.00	1.80	198.00	75		
76	S-0.30x0.30	26.00	5.80	900	0.40	5.62	2.00	1.46	198.70	40	ศูนย์ฝึกและอบรมเด็กและเยาวชน บ้าน กรุณา	บางนา
77	S-0.30x0.30	26.00	5.80	900	0.60	5.62	2.00	1.50	194.30	40		
78	S-0.22x0.22	26.00	4.00	484	0.40	3.02	1.00	0.58	72.70	20		
79	S-0.22x0.22	25.00	4.00	484	0.40	2.90	0.50	0.40	77.90	20		
80	S-0.40x0.40	25.00	4.00	1,600	1.00	9.60	1.00	1.54	228.20	60		
81	S-0.40x0.40	26.00	4.00	1,600	1.00	9.98	1.00	1.19	215.20	60		
82	S-0.40x0.40	25.00	4.00	1,600	1.00	9.60	2.00	1.40	210.50	60		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_{u, design}$ (ton/ตัน)	ชื่อโครงการ	ที่ตั้งโครงการ
83	S-0.40x0.40	25.00	4.00	1,600	1.00	9.60	1.00	1.80	234.50	60	ศูนย์ฝึกและอบรมเด็กและเยาวชน บ้าน กรุณา	บางนา
84	S-0.18x0.18	26.00	4.00	324	0.30	2.02	1.00	0.31	54.90	15		
85	S-0.18x0.18	26.00	4.00	324	0.30	2.02	1.00	0.37	58.30	15		
86	S-0.26x0.26	25.00	4.00	676	0.60	4.06	1.00	0.53	102.20	25		
87	S-0.26x0.26	26.00	4.00	676	0.60	4.22	1.00	0.69	113.80	25		
88	S-0.40x0.40	26.00	4.00	1,600	1.00	9.98	1.00	1.19	207.40	60		
89	S-0.30x0.30	26.00	4.00	900	0.70	5.62	2.00	1.02	180.90	40		
90	S-0.40x0.40	26.00	4.00	1,600	1.00	9.98	1.00	1.43	228.40	60		
91	S-0.30x0.30	26.00	4.00	900	0.70	5.62	1.00	0.87	175.00	40	โรงพยาบาลศิริราช	ซอย เพชร เกษม 104
92	S-0.18x0.18	19.00	3.20	324	0.30	1.48	1.50	0.18	42.00	10		
93	S-0.18x0.18	19.00	3.50	324	0.20	1.48	2.00	0.26	40.00	10	อาคารหอพักสตรีสูง 14 ชั้น จุฬาลงกรณ์เฟส 2	จ.พญาไท
94	S-0.40x0.40	23.00	5.50	1,600	0.80	8.83	2.00	1.86	227.80	80	โรงงานเคอะควอลิตี้ไวร์	จ.ประจวบคีรีขันธ์
95	S-0.22x0.22	22.00	5.30	484	0.40	2.56	2.00	1.22	102.20	30		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
96	S-0.40x0.40	19.50	6.00	1,600	0.80	7.49	2.00	1.78	145.90	80	โครงการ พฤษภลดา	ถ.วงแหวน-รัตนธิเบศร์
97	S-0.40x0.40	19.50	6.00	1,600	0.80	7.49	2.00	1.54	150.40	80		
98	S-0.40x0.40	18.00	6.00	1,600	0.60	6.91	2.00	1.42	132.40	80		
99	S-0.40x0.40	18.00	6.00	1,600	0.60	6.91	2.00	1.32	134.00	80		
100	S-0.40x0.40	18.00	6.00	1,600	0.60	6.91	2.00	1.39	133.30	80		
101	S-0.40x0.40	21.00	4.00	1,600	0.20	8.06	15.00	1.16	75.60	65	การสำนักงานทหารพัฒนาหน่วยบัญชาการทหาร พัฒนากองทหารสูงสุด	ดอนเมือง
102	I-0.35x0.35	24.00	5.00	880	0.80	5.07	1.00	1.38	159.40	50	LYCEE FRANCAIS INTERNATIONAL DE BANG KOK PROJECT	ประชาอุทิศ
103	I-0.35x0.35	24.00	5.00	880	0.90	5.07	1.00	1.11	168.90	50		
104	I-0.35x0.35	26.00	5.04	880	0.80	5.49	1.00	1.18	186.80	50	RCA SUITES	ถ.รอยัล ซิดีอเวนิว
105	I-0.40x0.40	26.00	4.82	1,240	0.80	7.74	1.50	2.33	282.40	65		
106	I-0.22x0.22	22.00	3.23	332	0.50	1.75	8.00	0.71	35.40	20	โนเบิล พาวัน	ถ.รามอินทรา
107	I-0.22x0.22	22.00	3.23	332	0.50	1.75	1.00	0.37	79.60	20		
108	I-0.22x0.22	21.00	3.55	345	0.60	1.74	1.00	0.73	56.80	22	หมู่บ้านศุภวรรณ	บางแค

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
109	I-0.22x0.22	21.00	3.55	345	0.70	1.74	1.00	0.66	89.40	22	หมู่บ้านสุกวรรณ	บางแค
110	I-0.26x0.26	18.00	2.80	487	0.60	2.10	5.00	1.03	75.60	30	หมู่บ้านปริญสิริ	ถ.นวลจันทร์
111	I-0.26x0.26	18.00	2.80	487	0.60	2.10	5.00	0.95	76.40	30		
112	I-0.26x0.26	18.00	2.80	487	0.60	2.10	5.00	0.95	77.30	30		
113	I-0.35x0.35	20.00	5.35	808	0.60	3.88	1.50	1.43	159.80	50	บ้านพักอาศัย 4 ชั้น	ช.เอกชัย 131
114	I-0.35x0.35	20.00	5.35	808	0.60	3.88	2.00	1.06	140.00	50		
115	I-0.30x0.30	24.00	3.90	660	0.60	3.80	1.50	0.71	118.60	40	BITEC EXHIBION HALL ANNEX PROJECT	บางนา-ตราด
116	I-0.30x0.30	24.00	3.90	660	0.60	3.80	1.00	0.70	122.90	40		
117	I-0.30x0.30	21.00	4.00	660	0.30	3.33	0.50	1.16	158.80	35	อาคารบุคลากรและกิจกรรมเพื่อการศึกษา รร. อัสสัมชัญ	ธนบุรี
118	I-0.22x0.22	23.50	3.50	393	0.30	2.22	1.00	0.56	90.90	25	บ้านรามคำแหง ช.รามคำแหง 100	ถ.สุขาภิบาล 3
119	I-0.22x0.22	23.50	3.50	393	0.30	2.22	1.00	0.64	94.40	25		
120	I-0.40x0.40	17.00	5.50	1,240	0.70	5.06	3.50	3.02	156.90	60	ก่อสร้างอาคารคณะประมง ม. เกษตรศาสตร์	บางเขน
121	I-0.40x0.40	17.00	5.50	1,240	0.70	5.06	3.00	2.22	155.60	60		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
122	I-0.26x0.26	23.00	2.50	451	0.40	2.49	0.70	0.36	65.20	18	บ้านวรรมย์ ประชาอุทิศ	ประชาอุทิศ พุทธร
123	I-0.22x0.22	21.00	4.00	332	0.40	1.67	15.00	0.90	29.60	25	บ้านไทยสมบูรณ์	ประชาอุทิศ 90
124	I-0.26x0.26	22.00	4.60	485	0.45	2.56	3.00	1.05	99.00	35	สนามฝึกซ้อมกอล์ฟ	ถนนตก
125	I-0.26x0.26	22.00	4.60	485	0.45	2.56	3.00	0.94	100.20	35		
126	I-0.30x0.30	22.00	4.60	660	0.55	3.48	3.00	1.35	115.80	40		
127	I-0.30x0.30	22.00	4.60	660	0.55	3.48	2.50	1.25	124.40	40		
128	I-0.26x0.26	22.00	3.57	485	0.70	2.56	2.50	0.75	85.30	30	โครงการ THE RIVER	ถ.เจริญนคร
129	I-0.22x0.22	22.00	3.75	363	0.60	1.92	2.00	0.76	84.10	20		
130	I-0.35x0.35	22.00	6.30	880	0.80	4.65	10.00	3.48	129.90	50	ตลาดสามย่านใหม่	ถ.พระราม 4
131	I-0.35x0.35	19.50	6.80	880	0.80	4.12	4.00	1.83	131.10	45	โรงงานกุลธร เคอร์บี้	ลาดกระบัง
132	I-0.35x0.35	19.50	6.80	880	0.70	4.12	1.00	2.29	161.10	45		
133	I-0.40x0.40	21.50	5.97	1,240	1.00	6.40	3.00	2.10	189.30	70	PG RAMA9 CONDOMINIUM	ถ.พระราม 9
134	I-0.40x0.40	21.50	5.97	1,240	0.80	6.40	2.00	1.66	191.20	70		

ตารางผนวก ก1(ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
135	I-0.40x0.40	21.50	5.02	1,240	1.00	6.40	3.00	2.23	178.00	70	PG RAMA9 CONDOMINIUM	ถ.พระราม 9
136	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602	0.50	3.61	2.00	1.03	107.10	35	UTI WAREHOUSE PROJECT	ถ.บางนา-ตราด
137	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602	0.50	3.61	1.00	0.74	101.90	35		
138	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602	0.50	3.61	1.50	1.13	127.40	35		
139	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602	0.70	3.61	2.00	1.19	120.20	35		
140	I-0.22x0.22	21.00	3.20	363	0.40	1.83	11.00	0.88	37.00	14	บ้านพฤกษา โครงการ 27	ลาดกระบัง
141	I-0.40x0.40	25.00	4.75	1,240	1.00	7.44	3.00	2.00	193.00	75	เอเชีย โกลดেন্ট ไรซ์	ถ.เจริญราษฎร์
142	I-0.40x0.40	25.00	4.75	1,240	1.00	7.44	2.00	2.17	199.00	75		
143	I-0.40x0.40	18.00	6.50	1,240	1.80	5.36	9.00	4.59	178.40	70	อาคารพักอาศัย 8 ชั้น	ช. เพชรเกษม 101
144	I-0.40x0.40	18.00	6.50	1,240	1.40	5.36	6.00	3.37	193.50	70		
145	I-0.40x0.40	18.00	5.00	1,240	0.90	5.36	2.00	1.88	174.60	75		
146	I-0.40x0.40	18.00	5.00	1,240	1.20	5.36	5.00	2.06	149.20	75		
147	I-0.40x0.40	18.00	5.00	1,240	1.20	5.36	4.00	2.69	151.10	75		
148	I-0.40x0.40	22.00	5.20	1,240	1.00	6.55	1.00	1.96	178.00	50	อาคาร สนง.ผู้บริหารบริษัท ไทยรุ่งยูเนี่ยนคาร์ จำกัด	ช. เพชรเกษม 81

ตารางผนวก ก1 (ต่อ) ข้อมูลผลการทดสอบของ Dynamic Load Test

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	B (ton-m.)	Q_u (tons/ตัน)	$Q_u design$ (ton/ตัน)	ชื่อ โครงการ	ที่ตั้งโครงการ
149	I-0.35x0.35	21.00	4.50	880	0.80	4.44	1.00	0.61	137.60	50	อาคารบริการและบริหาร 5 ชั้น มหาวิทยาลัยรามคำแหง	ถ.รามคำแหง
150	I-0.22x0.22	25.00	3.70	386	0.30	2.32	0.50	0.55	89.70	25	โชว์รูมและศูนย์บริการมาตรฐานโตโยต้า ธนบุรี (โชว์รูมร่วมเกล้า)	ถ.ร่วมเกล้า- ลาดกระบัง
151	I-0.26x0.26	25.00	3.80	489	0.60	2.93	1.50	0.77	112.00	30		
152	I-0.30x0.30	25.00	4.00	660	0.60	3.96	2.00	0.92	131.70	35		
153	I-0.22x0.22	21.00	2.50	345	0.50	1.74	1.00	0.75	84.10	22	KRISADA GRAND CASTLE LAKE & PARK โครงการ 39	ถ.ปิ่นเกล้า-นคร ชัยศรี
154	I-0.22x0.22	18.00	2.50	345	0.50	1.49	1.00	0.77	77.60	18		
155	I-0.22x0.22	20.00	2.00	332	0.40	1.59	0.50	0.40	67.00	25	โครงการ GRAND CANAL DONMUANG	ถ.วิภาวดี- รังสิต
156	I-0.22x0.22	20.00	2.00	332	0.40	1.59	0.50	0.42	70.00	25		
157	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781	0.50	5.25	1.00	1.49	186.60	55	AUCTION HALL /WAREHOUSE	บางนา-ตราด กม. 34
158	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781	0.50	5.25	1.00	1.76	173.50	55		
159	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781	0.50	5.25	1.00	1.44	184.30	55		
160	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781	0.50	5.25	1.00	1.27	160.30	55		
161	I-0.35x0.35	22.00	5.06	906	0.50	4.78	1.00	0.84	134.80	50	ก่อสร้างอาคารหน่วยบริการอาคาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	จุฬาซอย 9
162	I-0.26x0.26	22.00	5.06	469	0.50	2.48	1.00	0.84	102.70	30		

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

(Pearson's Correlation Coefficient, r)

ตารางผนวก ข1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r)

	ความยาว (L)	หน้าตัด (A)	น้ำหนักเสาเข็ม (Wp)	น้ำหนักตุ้ม (Wr)	ระยะยกตุ้ม (h)	ระยะทรุดตัวของ เสาเข็ม (S)	ค่ากำลังรับน้ำหนัก (Qu)
ความยาว (L)	1.00	0.16	0.54	-0.05	0.23	-0.09	0.37
หน้าตัด (A)	0.17	1.00	0.91	0.43	0.66	0.18	0.70
น้ำหนักเสาเข็ม (Wp)	0.54	0.92	1.00	0.32	0.67	0.14	0.74
น้ำหนักตุ้ม (Wr)	-0.05	0.43	0.32	1.00	0.16	0.13	0.54
ระยะยกตุ้ม (h)	0.23	0.66	0.67	0.16	1.00	0.15	0.59
ระยะทรุดตัวของเสาเข็ม (S)	-0.09	0.18	0.14	0.13	0.15	1.00	-0.17
ค่ากำลังรับน้ำหนัก (Qu)	0.37	0.70	0.74	0.54	0.59	-0.17	1.00

ตารางผนวก ค

ตารางผนวก ค 1 ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูลสอนโครงข่ายประสาทเทียม (Training Set)

ตารางผนวก ค 2 ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูลทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม (Testing Set)

ตารางผนวก ค 3 ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูลประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Application Set)

ตารางผนวก ก 1. ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูลสอนโครงข่ายประสาทเทียม (Training Set)

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W _r (tons)	A _c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
1	I-0.22x0.22	22.00	3.23	332.00	0.50	1.75	0.80	42.13	81.36	51.25	74.19	109.83	80.94
2	I-0.22x0.22	21.00	3.20	363.00	0.40	1.83	1.10	36.42	63.52	39.38	69.06	92.36	74.52
3	I-0.22x0.22	25.00	3.70	386.00	0.30	2.32	0.05	30.09	58.12	34.83	63.58	135.00	71.40
4	I-0.22x0.22	20.00	2.00	332.00	0.40	1.59	0.05	20.43	41.88	22.95	55.10	114.61	62.79
5	I-0.22x0.22	21.00	4.00	332.00	0.40	1.67	1.50	45.01	77.86	53.05	74.30	97.36	78.56
6	I-0.22x0.22	18.00	2.50	345.00	0.50	1.49	0.10	39.92	65.27	39.78	75.17	131.60	84.02
7	I-0.22x0.22	20.00	2.00	332.00	0.40	1.59	0.05	20.43	41.88	22.95	55.10	114.61	62.79
8	I-0.22x0.22	23.50	3.50	393.00	0.30	2.22	0.10	30.27	54.83	32.73	64.13	120.61	71.92
9	I-0.22x0.22	23.50	3.50	393.00	0.30	2.22	0.10	30.27	54.83	32.73	64.13	120.61	71.92
10	I-0.26x0.26	18.00	2.80	487.00	0.60	2.10	0.50	42.59	85.93	48.24	99.98	121.18	111.60
11	I-0.26x0.26	22.00	5.06	469.00	0.50	2.48	0.10	62.47	132.11	85.73	114.03	187.23	126.36
12	I-0.26x0.26	22.00	4.60	485.00	0.45	2.56	0.30	50.28	106.98	66.73	103.33	145.57	114.42
13	I-0.26x0.26	23.00	2.50	451.00	0.40	2.49	0.07	17.65	52.30	26.10	65.76	123.07	76.15
14	I-0.26x0.26	22.00	3.57	485.00	0.70	2.56	0.25	55.69	129.48	73.91	112.25	164.28	126.39
15	I-0.30x0.30	21.00	4.00	660.00	0.30	3.33	0.05	28.80	62.83	33.83	92.55	140.37	105.74

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
16	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602.00	0.50	3.61	0.20	49.87	129.87	73.93	117.48	169.62	132.49
17	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781.00	0.50	5.25	0.10	47.18	140.99	71.13	129.11	193.41	149.20
18	I-0.35x0.35	26.00	5.04	880.00	0.80	5.49	0.10	80.19	210.55	100.93	172.18	236.36	200.99
19	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781.00	0.50	5.25	0.10	47.18	140.99	71.13	129.11	193.41	149.20
20	I-0.35x0.35	22.00	6.30	880.00	0.80	4.65	1.00	128.42	251.37	142.33	208.60	186.49	230.90
21	I-0.35x0.35	21.00	4.00	780.00	1.40	3.93	0.30	121.71	289.41	145.38	213.09	239.44	245.42
22	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781.00	0.50	5.25	0.10	47.18	140.99	71.13	129.11	193.41	149.20
23	I-0.35x0.35	28.00	5.40	781.00	0.50	5.25	0.10	47.18	140.99	71.13	129.11	193.41	149.20
24	S-0.35x0.35	21.00	8.00	1225.00	0.70	6.17	0.10	212.90	292.43	162.25	273.54	278.55	310.73
25	I-0.40x0.40	26.00	4.82	1240.00	0.80	7.74	0.15	76.21	200.83	79.56	191.25	219.16	232.06
26	I-0.40x0.40	17.00	5.50	1240.00	0.70	5.06	0.35	136.47	198.45	102.60	246.44	193.98	280.39
27	I-0.40x0.40	21.50	5.97	1240.00	1.00	6.40	0.30	166.01	308.53	149.11	271.53	247.22	314.62
28	I-0.40x0.40	18.00	6.50	1240.00	1.80	5.36	0.90	397.90	586.47	317.83	417.34	289.55	468.12
29	I-0.40x0.40	17.00	5.50	1240.00	0.70	5.06	0.30	137.06	198.97	102.84	247.16	198.53	281.76
30	I-0.40x0.40	18.00	5.00	1240.00	1.20	5.36	0.40	189.80	308.48	149.16	295.82	237.24	341.45
31	I-0.40x0.40	18.00	6.50	1240.00	1.40	5.36	0.60	316.96	463.10	250.75	370.66	273.76	417.74

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
32	S-0.18x0.18	26.00	4.00	324.00	0.30	2.02	0.10	35.32	62.66	40.27	59.93	128.94	66.48
33	S-0.18x0.18	26.00	4.00	324.00	0.30	2.02	0.10	35.32	62.66	40.27	59.93	128.94	66.48
34	S-0.18x0.18	19.00	3.20	324.00	0.30	1.48	0.15	37.20	50.00	33.01	62.71	109.35	69.07
35	S-0.18x0.18	19.00	3.50	324.00	0.20	1.48	0.20	27.71	36.36	24.62	53.50	89.76	58.51
36	S-0.22x0.22	26.00	4.00	484.00	0.40	3.02	0.10	40.84	83.55	46.75	82.70	148.89	93.79
37	S-0.22x0.22	25.00	4.00	484.00	0.40	2.90	0.05	42.94	83.77	47.57	84.74	162.08	96.01
38	S-0.26x0.26	26.50	4.18	676.00	0.80	4.30	0.10	77.36	174.62	85.92	136.85	215.25	158.96
39	S-0.26x0.26	23.50	4.50	676.00	0.40	3.81	0.05	50.10	94.24	50.37	108.37	171.91	124.06
40	S-0.26x0.26	27.50	4.18	676.00	0.70	4.46	0.10	64.55	152.79	73.93	125.23	201.35	145.92
41	S-0.26x0.26	19.00	4.00	676.00	0.50	3.08	0.05	68.49	104.71	58.12	127.87	181.21	145.40
42	S-0.26x0.26	24.00	3.08	676.00	0.50	3.89	0.10	35.11	80.42	35.94	95.53	146.07	112.96
43	S-0.26x0.26	20.50	3.80	676.00	0.50	3.33	0.05	58.23	99.48	52.46	118.91	176.62	136.44
44	S-0.26x0.26	16.00	3.08	676.00	0.40	2.60	0.80	43.56	62.07	33.32	102.44	95.93	112.76
45	S-0.30x0.30	26.00	5.80	900.00	0.60	5.62	0.20	88.86	180.78	91.38	162.67	200.13	187.37
46	S-0.30x0.30	26.00	4.00	900.00	0.70	5.62	0.20	60.04	145.45	61.74	140.68	179.51	167.79
47	S-0.35x0.35	28.00	4.00	1225.00	1.00	8.23	0.30	74.03	206.72	71.60	179.22	202.36	224.00
48	S-.30x0.30	26.00	5.80	900.00	0.40	5.62	0.20	59.24	120.52	60.92	132.57	163.40	152.50

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W _r (tons)	A _c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
49	S-.35x0.35	28.00	4.00	1225.00	1.00	8.23	0.30	74.03	206.72	71.60	179.22	202.36	224.00
50	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1225.00	0.70	6.76	0.20	189.39	290.91	155.71	258.71	253.87	294.93
51	S-0.35x0.35	28.00	4.00	1225.00	1.00	8.23	0.30	74.03	206.72	71.60	179.22	202.36	224.00
52	S-0.40x0.40	26.25	6.45	1600.00	0.70	10.08	0.30	114.17	233.33	93.78	232.83	214.99	280.20
53	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1600.00	0.80	7.10	0.40	98.50	164.52	61.81	226.55	173.25	274.94
54	S-0.40x0.40	39.25	4.00	1600.00	1.20	15.07	0.50	51.76	245.52	59.74	168.47	204.84	234.39
55	S-0.40x0.40	28.00	6.45	1600.00	0.90	10.75	0.40	133.60	298.46	115.99	253.03	233.35	306.57
56	S-0.40x0.40	43.00	5.68	1600.00	1.30	16.51	0.80	84.58	371.92	105.71	209.35	234.82	275.64
57	S-0.40x0.40	32.00	6.30	1600.00	0.70	12.29	0.15	84.88	229.69	81.92	204.17	234.38	254.23
58	S-0.40x0.40	29.00	6.30	1600.00	0.90	11.14	0.40	122.88	291.52	109.80	243.88	230.62	297.77
59	S-0.40x0.40	28.00	5.45	1600.00	0.90	10.75	0.30	103.79	253.49	89.88	228.10	224.09	283.28
60	S-0.40x0.40	27.00	5.45	1600.00	0.70	10.37	0.30	84.86	197.16	71.32	205.45	197.63	253.50
61	S-0.40x0.40	21.00	4.00	1600.00	0.20	8.06	1.50	18.93	38.93	13.69	87.17	68.84	101.06
62	S-0.40x0.40	30.00	5.50	1600.00	1.50	11.52	0.25	160.03	427.46	146.57	284.91	298.50	358.06
63	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.30	238.91	330.75	164.31	324.42	255.97	373.54
64	S-0.40x0.40	28.00	5.20	1600.00	0.90	10.75	0.30	96.48	241.86	83.55	221.21	218.89	276.55
65	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2025.00	1.00	12.15	0.15	81.07	208.33	57.59	229.42	223.22	306.98

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W _r (tons)	A _c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
66	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2025.00	1.40	12.15	0.50	109.97	286.45	79.27	266.33	221.25	353.37
67	S-0.40x0.40	26.00	4.00	1600.00	1.00	9.98	0.10	79.97	208.88	64.77	208.02	235.42	269.31
68	S-0.40x0.40	25.00	4.00	1600.00	1.00	9.60	0.10	84.48	208.88	66.26	213.49	235.42	274.59
69	S-0.40x0.40	38.25	4.00	1600.00	1.20	14.69	0.50	53.74	245.52	60.67	171.57	204.84	237.34
70	S-0.40x0.40	41.00	4.00	1600.00	1.20	15.74	0.50	48.57	245.52	58.20	163.32	204.84	229.50
71	S-0.40x0.40	18.00	6.00	1600.00	0.60	6.91	0.20	143.78	187.01	87.39	259.82	203.55	302.89
72	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1600.00	0.80	7.10	0.50	97.50	163.68	61.51	224.87	167.25	271.83
73	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2025.00	1.00	12.15	0.20	80.70	207.79	57.45	228.62	214.56	305.42
74	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.50	8.06	1.40	135.32	195.60	97.49	239.61	156.01	264.98
75	S-0.45x0.45	24.00	4.00	2025.00	1.00	11.66	0.20	85.44	207.79	58.85	235.07	214.56	311.59
76	S-0.45x0.45	29.00	4.00	2025.00	1.20	14.09	0.50	76.60	245.52	62.19	222.10	204.84	303.72
77	S-0.45x0.45	24.00	4.00	2025.00	1.40	11.66	0.15	120.19	291.67	82.59	279.59	264.11	371.50
78	S-0.45x0.45	24.00	4.00	2025.00	1.40	11.66	0.30	118.50	289.41	81.99	277.09	239.44	366.64
79	I-0.22x0.22	22.00	3.23	332.00	0.50	1.75	0.10	43.72	84.33	53.01	76.27	149.59	84.91
80	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1600.00	1.00	7.10	0.50	121.87	204.60	76.89	252.40	186.99	305.74
81	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1600.00	1.00	7.10	0.50	121.87	204.60	76.89	252.40	186.99	305.74
82	S-0.45x0.45	23.00	4.00	2025.00	0.80	11.18	0.15	72.88	166.67	48.39	216.91	199.65	285.54

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
83	I-0.26x0.26	18.00	2.80	487.00	0.60	2.10	0.50	42.59	85.93	48.24	99.98	121.18	111.60
84	S-0.40x0.40	26.00	4.00	1600.00	1.00	9.98	0.10	79.97	208.88	64.77	208.02	235.42	269.31
85	I-0.30x0.30	24.00	3.90	660.00	0.60	3.80	0.10	58.73	122.19	61.56	119.29	180.06	137.85
86	S-0.40x0.40	23.00	4.00	1600.00	0.80	8.83	0.10	75.86	167.10	55.59	201.54	210.56	255.67
87	S-0.40x0.40	19.50	6.00	1600.00	0.80	7.49	0.20	173.58	249.35	112.17	286.65	235.04	337.29
88	S-0.40x0.40	26.00	4.00	1600.00	1.00	9.98	0.10	79.97	208.88	64.77	208.02	235.42	269.31
89	S-0.45x0.45	25.00	4.00	2025.00	1.20	12.15	0.10	97.73	250.65	69.27	252.35	257.89	338.32
90	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1225.00	0.30	6.76	0.10	81.81	125.33	67.06	169.69	182.35	193.72
91	S-0.40x0.40	25.00	4.00	1600.00	1.00	9.60	0.20	83.78	207.79	65.93	212.23	214.56	272.10
92	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.10	243.49	334.20	165.92	327.44	297.78	379.45
93	S-0.30x0.30	22.50	4.50	900.00	0.40	4.86	0.10	61.86	93.99	45.24	124.86	157.92	145.39
94	I-0.40x0.40	22.00	5.20	1240.00	1.00	6.55	0.10	133.54	271.54	121.59	248.75	268.42	294.29
95	I-0.35x0.35	24.00	5.00	880.00	0.80	5.07	0.10	87.77	208.88	103.44	179.60	235.42	208.31
96	I-0.35x0.35	19.50	6.80	880.00	0.70	4.12	0.10	150.94	248.56	150.67	225.14	256.81	252.06
97	I-0.35x0.35	24.00	5.00	880.00	0.90	5.07	0.10	98.74	234.99	116.37	190.53	249.70	221.03
98	S-.525x0.525	24.00	9.50	2756.25	1.30	15.88	0.30	430.51	638.24	247.64	525.58	355.57	638.80

ตารางผนวก ก 2. ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูลทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม (Testing Set)

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W _r (tons)	A _c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
1	I-0.22x0.22	21.00	2.50	345.00	0.50	1.74	0.10	33.51	65.27	37.67	69.01	131.60	77.84
2	I-0.22x0.22	22.00	3.75	363.00	0.60	1.92	0.20	67.43	116.88	74.88	94.12	160.92	104.23
3	I-0.26x0.26	22.00	4.60	485.00	0.45	2.56	0.30	50.28	106.98	66.73	103.33	145.57	114.42
4	I-0.26x0.26	18.00	2.80	487.00	0.60	2.10	0.50	42.59	85.93	48.24	99.98	121.18	111.60
5	I-0.30x0.30	22.00	4.60	660.00	0.55	3.48	0.25	60.05	131.09	73.29	131.09	165.30	147.96
6	I-0.30x0.30	24.00	3.90	660.00	0.60	3.80	0.15	46.92	121.88	61.41	119.01	170.73	137.31
7	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602.00	0.50	3.61	0.10	50.09	130.55	74.29	117.95	186.11	133.43
8	I-0.35x0.35	21.00	4.50	880.00	0.80	4.44	0.10	89.06	187.99	94.26	182.48	223.34	211.07
9	S-0.35x0.35	22.00	8.00	1225.00	0.60	6.47	0.10	148.16	250.65	136.55	246.58	257.89	280.95
10	I-0.35x0.35	20.00	5.35	808.00	0.60	3.88	0.15	85.69	167.19	95.03	172.58	199.96	194.85
11	I-0.40x0.40	25.00	4.75	1240.00	1.00	7.44	0.30	97.20	245.37	98.49	215.71	220.47	259.98
12	I-0.40x0.40	25.00	4.75	1240.00	1.00	7.44	0.20	97.83	246.65	98.97	216.69	233.76	261.89
13	S-0.22x0.22	22.00	5.30	484.00	0.40	2.56	0.20	71.75	110.13	71.80	105.63	156.20	116.55
14	S-0.26x0.26	25.00	4.00	676.00	0.60	4.06	0.10	58.63	125.33	62.06	119.41	182.35	138.46
15	S-0.26x0.26	26.00	4.00	676.00	0.60	4.22	0.10	55.78	125.33	60.98	116.71	182.35	135.79
16	S-0.26x0.26	24.50	3.79	676.00	0.50	3.97	0.15	46.22	98.70	48.15	106.53	153.64	123.61

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W_r (tons)	A_c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
17	S-0.30x0.30	26.00	4.00	900.00	0.70	5.62	0.10	60.43	146.21	62.04	141.36	196.96	169.15
18	S-0.30x0.30	25.00	4.18	900.00	0.80	5.40	0.40	76.18	171.93	76.10	156.87	177.11	184.45
19	S-0.30x0.30	21.00	3.79	900.00	0.70	4.54	0.50	71.45	135.70	62.34	152.18	152.29	176.50
20	S-0.35x0.35	21.00	8.00	1225.00	0.90	6.17	0.25	270.26	373.06	207.09	308.58	278.85	349.23
21	S-0.35x0.35	19.00	4.00	1225.00	1.20	5.59	0.30	127.89	248.06	105.61	250.15	221.67	297.15
22	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1225.00	0.90	6.76	0.50	205.01	368.29	197.31	290.48	250.87	328.85
23	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1225.00	0.60	6.76	0.10	140.41	250.65	134.12	240.42	257.89	274.83
24	S-0.35x0.35	21.00	8.00	1225.00	0.60	6.17	0.20	155.47	249.35	138.39	252.01	235.04	285.23
25	S-0.40x0.40	23.00	5.80	1571.00	0.90	8.67	0.20	130.50	271.17	111.48	267.82	245.11	321.68
26	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1600.00	0.80	7.10	0.30	87.42	165.37	62.11	228.23	181.00	278.13
27	S-0.40x0.40	25.00	4.00	1600.00	1.00	9.60	0.10	74.00	208.88	66.26	213.49	235.42	274.59
28	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.20	211.53	332.47	165.11	325.93	271.40	376.47
29	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.70	203.08	324.05	161.18	318.47	223.72	362.27
30	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.80	201.47	322.42	160.42	317.00	218.64	359.55
31	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.20	211.53	332.47	165.11	325.93	271.40	376.47
32	S-0.40x0.40	23.00	4.00	1600.00	0.90	8.83	0.30	73.61	186.05	61.93	211.10	191.98	266.00

ตารางผนวก ก 3. ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ได้จากสูตรต่างๆในชุดข้อมูลประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Application Set)

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W _r (tons)	A _c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
1	I-0.22x0.22	21.00	3.55	345.00	0.70	1.74	0.10	74.93	129.84	84.25	99.28	185.61	110.05
2	I-0.22x0.22	21.00	3.55	345.00	0.60	1.74	0.10	64.22	111.29	72.21	91.89	171.84	101.83
3	I-0.26x0.26	25.00	3.80	489.00	0.60	2.93	0.15	45.12	118.75	65.89	100.91	168.52	114.51
4	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602.00	0.70	3.61	0.20	69.82	181.82	103.50	139.17	200.70	157.11
5	I-0.30x0.30	25.00	4.00	660.00	0.60	3.96	0.20	46.12	124.68	62.41	117.71	166.20	135.79
6	I-0.30x0.30	22.00	4.60	660.00	0.55	3.48	0.30	59.89	130.75	73.12	130.79	160.94	147.38
7	I-0.30x0.30	25.00	5.00	602.00	0.50	3.61	0.15	49.98	130.21	74.11	117.71	176.47	132.96
8	I-0.35x0.35	19.50	6.80	880.00	0.80	4.12	0.40	169.19	279.69	169.71	238.06	225.90	264.35
9	I-0.35x0.35	24.00	5.20	860.00	0.80	4.95	0.20	78.28	216.10	110.01	181.30	218.81	208.64
10	I-0.35x0.35	20.00	5.35	808.00	0.60	3.88	0.20	73.36	166.75	94.80	172.18	192.21	194.06
11	I-0.35x0.35	24.00	5.20	860.00	0.80	4.95	0.25	78.10	215.54	109.74	180.95	211.96	207.95
12	I-0.35x0.35	22.00	5.06	906.00	0.50	4.78	0.10	54.23	132.11	67.45	152.04	187.23	175.16
13	I-0.40x0.40	18.00	5.00	1240.00	0.90	5.36	0.20	126.90	233.77	112.96	258.18	227.58	299.55
14	I-0.40x0.40	21.50	5.97	1240.00	0.80	6.40	0.20	117.26	248.10	119.87	243.65	234.45	282.92
15	I-0.40x0.40	21.50	5.02	1240.00	1.00	6.40	0.30	112.84	259.38	115.52	244.57	226.68	287.92
16	I-0.40x0.40	18.00	5.00	1240.00	1.20	5.36	0.50	165.57	306.91	148.44	294.47	229.02	338.88

ลำดับที่	ขนาดเสาเข็ม (m.xm.)	L (m.)	W _r (tons)	A _c (cm. ²)	h (m.)	P (tons)	S (mm./blow)	Ultimate Load (Qu) ตัน/ตัน					
								Hiley	Engineer New	Modified Engineer New	Junbu	Gates	Danish
17	S-0.26x0.26	24.50	5.00	676.00	0.50	3.97	0.10	55.09	130.55	71.60	125.43	186.11	142.76
18	S-0.30x0.30	22.50	3.70	900.00	0.50	4.86	0.30	38.29	95.61	41.96	122.63	137.62	144.35
19	S-0.40x0.40	18.50	4.00	1600.00	1.00	7.10	0.60	120.65	203.56	76.52	250.74	181.50	302.65
20	S-0.30x0.30	24.00	3.70	900.00	0.70	5.18	0.20	49.57	134.55	57.17	140.74	172.65	167.75
21	S-0.30x0.30	22.00	3.08	900.00	0.70	4.75	0.80	40.65	108.61	44.02	127.68	126.90	150.55
22	S-0.35x0.35	24.00	4.50	1225.00	0.40	7.06	0.20	37.87	93.51	37.51	134.54	143.93	162.03
23	S-0.35x0.35	24.00	4.00	1225.00	0.70	7.06	0.70	53.58	141.77	53.51	160.85	147.98	193.69
24	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1225.00	0.90	6.76	0.49	205.15	368.47	197.41	290.59	251.69	329.05
25	S-0.35x0.35	23.00	8.00	1225.00	0.90	6.76	0.50	205.01	368.29	197.31	290.48	250.87	328.85
26	S-0.40x0.40	23.00	5.50	1600.00	0.80	8.83	0.20	107.92	228.57	90.55	245.79	225.03	297.56
27	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.50	8.06	0.90	124.93	200.50	99.79	246.71	169.30	277.22
28	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.50	8.06	0.30	131.12	206.72	102.69	255.54	202.36	293.50
29	S-0.40x0.40	21.00	8.00	1600.00	0.80	8.06	0.50	206.38	327.37	162.73	321.43	236.53	367.82
30	S-0.40x0.40	19.50	6.00	1600.00	0.80	7.49	0.20	152.27	249.35	112.17	286.65	235.04	337.29
31	S-0.40x0.40	18.00	6.00	1600.00	0.60	6.91	0.20	126.14	187.01	87.39	259.82	203.55	302.89
32	S-0.40x0.40	18.00	6.00	1600.00	0.60	6.91	0.20	126.14	187.01	87.39	259.82	203.55	302.89

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. กมลวรรณ แก้วมณี , สุัชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์,แหลมทอง เหล่าคงถาวร “การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบกทานสูงสุดของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ”การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่13, หน้า. 315-320, ณ. โรงแรมจอมเทียนปาล์ม บีช พัทยา, ประเทศไทย, พฤษภาคม 14-16, 2551.





การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบบกานสูงสุดของ
เสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ

An Application of Artificial Neural Network For Prediction Load Bearing Capacity for
Driven Piles In Bangkok is subsoil

กมลวรรณ แก้วมณี (Kamonwan Keomane)¹

สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ (Suchatvee Suwansawas)²

แหลมทอง เท้าคงถาวร (Laemthong Laokhongthavorn)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมก่อสร้างและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email address: watlove_2006@hotmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email address: kssuchat@kmitl.ac.th

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email address: leemook2000@yahoo.com

บทคัดย่อ : การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มถือเป็นหัวใจหลักของกระบวนการออกแบบฐานรากให้มีความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักแบบกานของเสาเข็มโดยการใช้สูตรยังมีค่าความผิดพลาดจากความเป็นจริงอยู่มาก เพื่อลดความผิดพลาดให้ลดน้อยลงจึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) มาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแบบกานของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลผลทดสอบแบบ Dynamic Load Test ในชั้นดินกรุงเทพฯ จำนวน 162 ข้อมูล ซึ่งมีค่ากำลังรับน้ำหนักอยู่ในช่วง 25-339 ตันตัน มีตัวแปรนำเข้า 6 ตัวแปร ซึ่งถูกเลือกมาจากสูตรที่ใช้ประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักแบบกาน โดยได้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับปรับค่าน้ำหนักและค่าเชิงเอนด้วยวิธี Gradient Descent (Trainingd) พัฒนาโปรแกรม MATLAB จากผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายที่ดีที่สุดมีความผิดพลาด (RMSE) ในการพยากรณ์เท่ากับ 20.58 ตัน ซึ่งมีค่าความผิดพลาดลดลงกว่าค่าประมาณกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม ซึ่งจะช่วยให้วิศวกรและผู้สนใจเกิดความมั่นใจในค่า Ultimate Bearing Capacity ของเสาเข็มที่ใช้ออกแบบสิ่งก่อสร้างได้อย่างปลอดภัยต่อไป

ABSTRACT : Calculation for pile load bearing capacity is the most importance process of safety and cost effective foundation design. Pile load bearing capacity by daily used empirical formula is still having high errors. So the artificial neural network (ANN) is considered as the effective tool to predict pile load bearing capacity in Bangkok clay, to reduce this error value. This research was done by gathering 162 data of dynamic load test results on Bangkok clay, which covers pile load capacity of 25-339 tons/pile. By considering pile driving formula, 6 variable, that are pile length, cross section area, pile weight, hammer weight, drop length and settlement, was selected as input variable. Then, trained and tested data were computed through MATLAB with feed-forward, back-propagation process and gradient descent, Trainingd, learning function. Research results show that the most effective ANN model allowing RMSE value equals 20.58 tons which is lower than calculated value by using pile driving formula. So it must be useful for engineers to ensure ultimate bearing capacity of designed pile.

KEYWORDS : Pile Driving, Load Bearing Capacity, Dynamic Load Test, Artificial Neural Network (ANN)



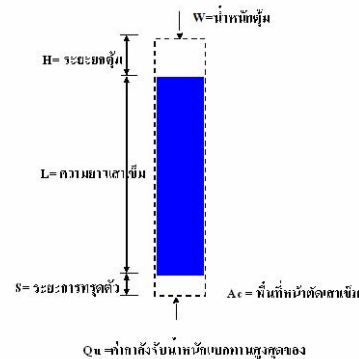
1. บทนำ

การก่อสร้างในกรุงเทพฯ จะมีมากกว่าส่วนอื่นๆ ของประเทศ สภาพชั้นดินด้านบนสุดจะเป็นชั้นดินเปลือกโลก (Weathered Crust) หนาประมาณ 2-3 เมตร ถัดมาเป็นชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12 เมตร และค่อยๆ เปลี่ยนเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) ถึงระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินแข็งจนถึงระดับชั้นทรายชั้นแรก ที่ระดับความลึกประมาณ 25-30 เมตร ถัดจากนั้นจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทรายจนถึงระดับชั้นทรายชั้นที่ 2 ที่ระดับความลึกประมาณ 45-60 เมตร [1] ฐานรากเสาเข็มเป็นโครงสร้างที่ใช้ถ่ายน้ำหนักจากอาคาร ลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่าเบื้องล่าง ทั้งยังทำให้การทรุดตัวของดินไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้าง เมื่อเสาเข็มเริ่มบรรจุทุกน้ำหนักก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรง มีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดินและเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นดินตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่ลงจะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นผลสุดท้ายเมื่อเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นเรื่อยๆ ไม่สามารถจะต้านทานได้ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนที่ทั้ง [2] สูตรที่ใช้ในการควบคุมการดักเสาเข็มปักลงใช้การประมาณค่าการรับน้ำหนักของเสาเข็มดัก มีปัจจัยสำคัญที่ได้มาจากหลักการของแรงกระทำภายนอกเนื่องจากการกระจายแรงจากวัสดุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว จากการสมมุติฐานสูตรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันระหว่างการต้านทานการดักและการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม (Q_u) [3] แต่การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดักก็ยังมีคลาดเคลื่อนจากผลทดสอบจริงเพื่อลดความผิดพลาดนั้นให้ลดน้อยลง งานวิจัยนี้จึงได้นำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดักในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากผลทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Test ตามมาตรฐาน ASTM D 4945 เปรียบเทียบกับค่าประมาณที่ได้จากสูตรการดักเสาเข็ม

2. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดัก

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักแกนของเสาเข็มดักจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของดินชั้น, คุณสมบัติของเสาเข็มและสภาพของชั้น

ดินแสดงตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักแกนของเสาเข็มดัก

3. สูตรการดักเสาเข็ม

สูตรที่ใช้ในการควบคุมการดักเสาเข็มเพื่อให้ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มเป็นไปตามที่ออกแบบ สูตรที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพฯ ได้แก่ Hiley's Formula, Engineer New, Modified Engineer New, Junbu's Formula, Gates's Formula, Danish's Formula จากผลสรุปงานวิจัยของสมิท พิทธิสมบัติ [4] จากสูตรการคำนวณเพื่อประมาณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดัก จะอาศัยข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดักเสาเข็ม เช่น น้ำหนักดิน, น้ำหนักเสาเข็ม, ระยะขุดดิน, ความยาวเสาเข็ม, หน้าตัดเสาเข็ม, ระยะทรุดตัวไปแทนค่าในสูตร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมทางชั้นดินที่ลึกลงไปเลย จึงสามารถทำได้ง่ายและสะดวก [3] จากการเก็บข้อมูลแล้วนำมาวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติได้ผลตามตารางที่ 1

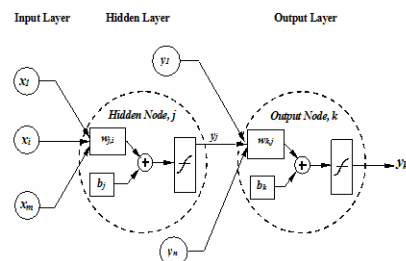
ตารางที่ 1 แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากสูตรการดักเสาเข็ม

ชื่อสูตร	R^2	RMSE (ton.)
Hiley's Formula (1930)	0.502	85.374
Engineer New (1965)	0.771	50.865
Modified Engineer New (Eng 1965)	0.563	95.307
Junbu's Formula (alson and Flaate 1967)	0.755	67.446
Gates's Formula (1957)	0.793	49.173
Danish's Formula (alson and Flaate 1967)	0.800	92.620



4. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural networks: ANN)

โครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Networks, ANN) เป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ซึ่งมีโครงสร้างเชิงสถาปัตยกรรมและการทำงานคล้ายคลึงกับเซลล์สมอง หรือระบบประสาทของมนุษย์ [5] สามารถเรียนรู้จากประสบการณ์ และให้คำตอบในปัญหาที่ซับซ้อนได้มาเชื่อถือ โครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้ที่สุดคือ แบบ Feed-Forward รูปแบบโครงข่ายประกอบด้วย 1. ชั้นรับข้อมูล (Input Layer) 2. ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และ 3. ชั้นแสดงผล (Output Layer) แต่ละชั้นจะประกอบด้วยหน่วย (Node) เชื่อมต่อกันจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่งโดยไม่มีการเชื่อมระหว่างหน่วยภายในชั้นเดียวกัน ลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและผลลัพธ์จากชุดข้อมูลการเรียนรู้ (Training Set) โดยเก็บค่าในรูปของค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบน ที่ใช้เป็นการปรับค่าโครงข่ายในกระบวนการสร้างโครงข่ายร่วมกับฟังก์ชันถ่ายโอนค่าผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละชั้นจะหาได้ตามสมการที่ (1) และ (2) จำนวนของหน่วย (Neuron) แต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและความซับซ้อนของปัญหา โครงสร้างเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียม แบบ Feed-Forward แสดงในภาพที่ 2 [5]



ภาพที่ 2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Feed-Forward

ค่าผลลัพธ์จากแต่ละหน่วย จะสามารถหาได้ดังนี้

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{ji} \cdot x_i) + b_j\right) \quad (1)$$

$$z_k = f\left(\sum_{j=1}^n (w_{kj} \cdot y_j) + b_k\right) \quad (2)$$

โดยที่ x_i คือ ข้อมูลนำเข้า (Input), y_j คือ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของ ชั้นซ่อน (Hidden Layer), z_k คือ ค่าผลลัพธ์จากชั้นแสดงผล, w คือ ค่าน้ำหนัก (Weight), b คือ ค่าเบี่ยงเบน (Bias), $f(c)$ คือ ฟังก์ชันแปลงค่าความเข้มพันธ์หรือฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) เช่น Linear Function, Sigmoid Function และ Step Function ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ Sigmoid Function มาใช้เป็นฟังก์ชันกระตุ้น

5. กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น Back-Propagation, Powell-Beale conjugate, Fletcher-Powell conjugate, RPROP, Scaled conjugate gradient, และ Polak-Ribiere conjugate ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเรียนรู้แบบ Back-Propagation มาใช้ในงานวิจัย ซึ่งจากผลสรุปงานวิจัยของ อารักษ์ นิยมไทย [6] ชุดข้อมูลการทดสอบโครงข่ายแบบนี้ให้ค่าความผิดพลาดต่ำสุดเมื่อเทียบกับกระบวนการเรียนรู้แบบอื่นๆ โดยกระบวนการเรียนรู้แบบ Back-Propagation ประกอบด้วย 2 สัญญาณ คือ

1. สัญญาณส่ง (Function signals) คือข้อมูลหรือผลลัพธ์ของแต่ละหน่วยที่ถูกส่งเข้าสู่โครงข่าย และ
2. สัญญาณแก้ไข (Error signals) คือค่าที่แตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าผลลัพธ์จริงที่ถูกส่งเข้าสู่โครงข่าย เพื่อรับค่าน้ำหนักในแต่ละรอบ (Epoch) ซึ่งปรับค่าแก้ไขให้ตรงกับค่าจริงมากที่สุด ซึ่งจำนวนรอบการรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแต่ละปัญหา สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้การปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนโดยวิธี Gradient Descent (Training)

6. การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม

6.1 ระบบฐานข้อมูลเสริมข้อมูล

ข้อมูลการทดสอบเสริมโดยวิธี Dynamic Load Test จำนวน 162 ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ส่วนของการเรียนรู้ของแบบจำลองจำนวน 79 ข้อมูล, ส่วนของการทดสอบแบบจำลองจำนวน 42 ข้อมูลและส่วนของการประยุกต์ใช้



ข้อมูลชุดการประยุกต์ใช้โครงข่ายเข้าไปในโครงข่ายเพื่อตรวจสอบค่าความผิดพลาดในโครงข่ายเพื่อให้เกิดความมั่นใจมากยิ่งขึ้น กระบวนการเลือกโครงข่ายที่ดีที่สุดของแต่ละสถาปัตยกรรมจะวัดค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นตัวเปรียบเทียบได้ตามสมการ (5)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_n - t_n)^2}{N}} \quad (5)$$

โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูล

O_n คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจากแบบจำลอง

t_n คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มจากผลทดสอบ

Dynamic Load Test

7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

7.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากวิธีสถิติ

จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าสูตรที่ให้ค่าใกล้เคียงกับการทดสอบโดยวิธี Dynamic Load Test มากที่สุดได้แก่สูตร Danish 's Formula มีค่า $R^2 = 0.800$ แต่ก็ยังมีความผิดพลาด (RMSE) ที่มากอยู่ถึง 92.620 ตัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า Coefficient of Determination (R^2) ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดแสดงว่าค่านี้มีค่าความสัมพันธ์กัน รองลงมาได้แก่สูตร Gates 's Formula, Engineer New, Jumbur 's Formula, Modified Engineer New ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกันแต่มีความผิดพลาดของกำลังรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 1

ส่วนสูตร Hiley 's Formula มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) = 0.502 มีความผิดพลาด (RMSE) = 85.374 ton จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบเสาเข็มแบบ Dynamic Load Test ค่อนข้างน้อย

7.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จาก โครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมได้ผลตามตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่า RMSE ในกระบวนการเรียนรู้ กระบวนการทดสอบและกระบวนการประยุกต์ใช้โครงข่าย การพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแกนของเสาเข็มคอกได้ตามภาพที่ 4 พบว่าโครงข่ายประสาทเทียม

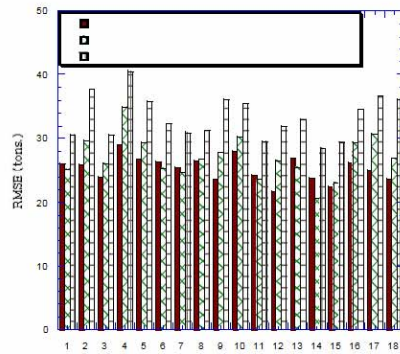
รูปแบบที่ 4 (6-20-1) ที่การคำนวณ 3000 รอบ มีค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบต่ำที่สุด คือมีค่า 20.58 ตัน และ $R^2 = 0.943$ หรือมีความผิดพลาดประมาณ 6.038 % ถือว่าในรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักแกนของเสาเข็มคอกในชั้นดินกรุงเทพมหานครโครงสร้างได้ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม

Model No.	No. of Hidden Layer	No. of Hidden Nodes	Epochs	Predicted Ultimate bearing Capacity RMSE (Tons.)		
				Trained Set	Test Set	Application Set
1	1	10	1000	26.03	25.22	30.61
2	1	20	1000	25.91	26.92	37.67
3	1	30	1000	23.96	26.00	30.51
4	2	10	1000	28.99	34.95	40.48
5	2	20	1000	26.59	29.40	35.91
6	2	30	1000	26.39	25.34	32.22
7	1	10	2000	25.50	25.34	30.92
8	1	20	2000	26.44	26.65	31.11
9	1	30	2000	23.57	27.78	36.21
10	2	10	2000	27.99	30.28	35.38
11	2	20	2000	24.26	23.42	29.60
12	2	30	2000	21.67	26.46	31.91
13	1	10	3000	26.83	25.44	32.92
14	1	20	3000	23.86	20.57	28.46
15	1	30	3000	22.43	23.00	29.38
16	2	10	3000	26.27	29.35	34.52
17	2	20	3000	25.02	30.66	36.61
18	2	30	3000	23.65	26.85	36.10

8. สรุปผลการวิจัย

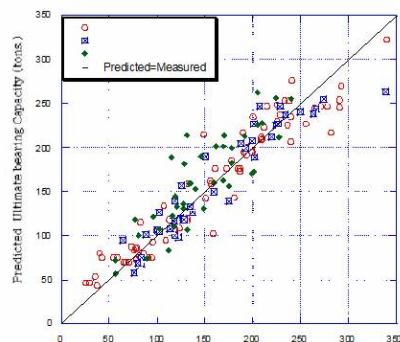
จากงานวิจัยพบว่าผลการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักแกนของเสาเข็มคอกในพื้นที่กรุงเทพฯ จากการเปรียบเทียบภาพที่ 5 กับภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยโครงข่ายประสาทเทียม, ANN (ภาพที่ 5) จะมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณค่าด้วยสูตรเสาเข็มที่มีใช้กันอยู่ในชั้นดินกรุงเทพฯ



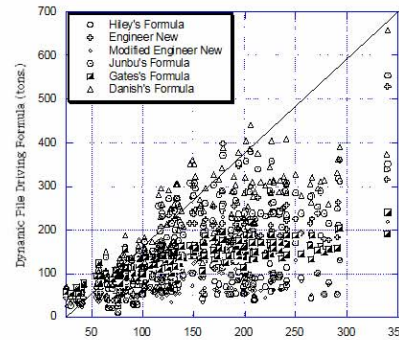
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละกระบวนการ

ตารางที่ 5 ผลการฝึกโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตลอด

ฟังก์ชันแปลงค่าความสลับกัน	Tangent Sigmoid
จำนวนหน่วยในชั้นรับข้อมูล	6
จำนวนชั้นซ่อน	1
จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน	20
จำนวนรอบ	3000



ภาพที่ 5 แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (6-20-1) Epochs=3000 รอบ



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มกับที่ได้จากการทดสอบจริง

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและบริษัท ปูนนครหลวง จำกัด (มหาชน)

10. รายการอ้างอิง

- [1] กมล สิงโตแก้ว, ชาญชัย ทริพย์มั่งงิมวงศ์และพรพนันต์ ต้นสิง, 17-18 พฤษภาคม 2544. น้ำหนักบรรทุกสูงที่สุดเท่าที่ทดสอบกับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] www.ttc.co.th
- [3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ตุลาคม 2521. น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม. กรุงเทพฯ
- [4] ศิวะ พิชิตสมบัติ, 2543. สูตรที่ใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Zhanig, G., Panwo, B.E., Hu, M.Y. 1998. Forecasting with Artificial Neural Networks. The State of the Art. International Journal of Forecasting, Vol. 14, pp.35-62.
- [6] ฮาร์วิน ยิมไย, 2546. การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

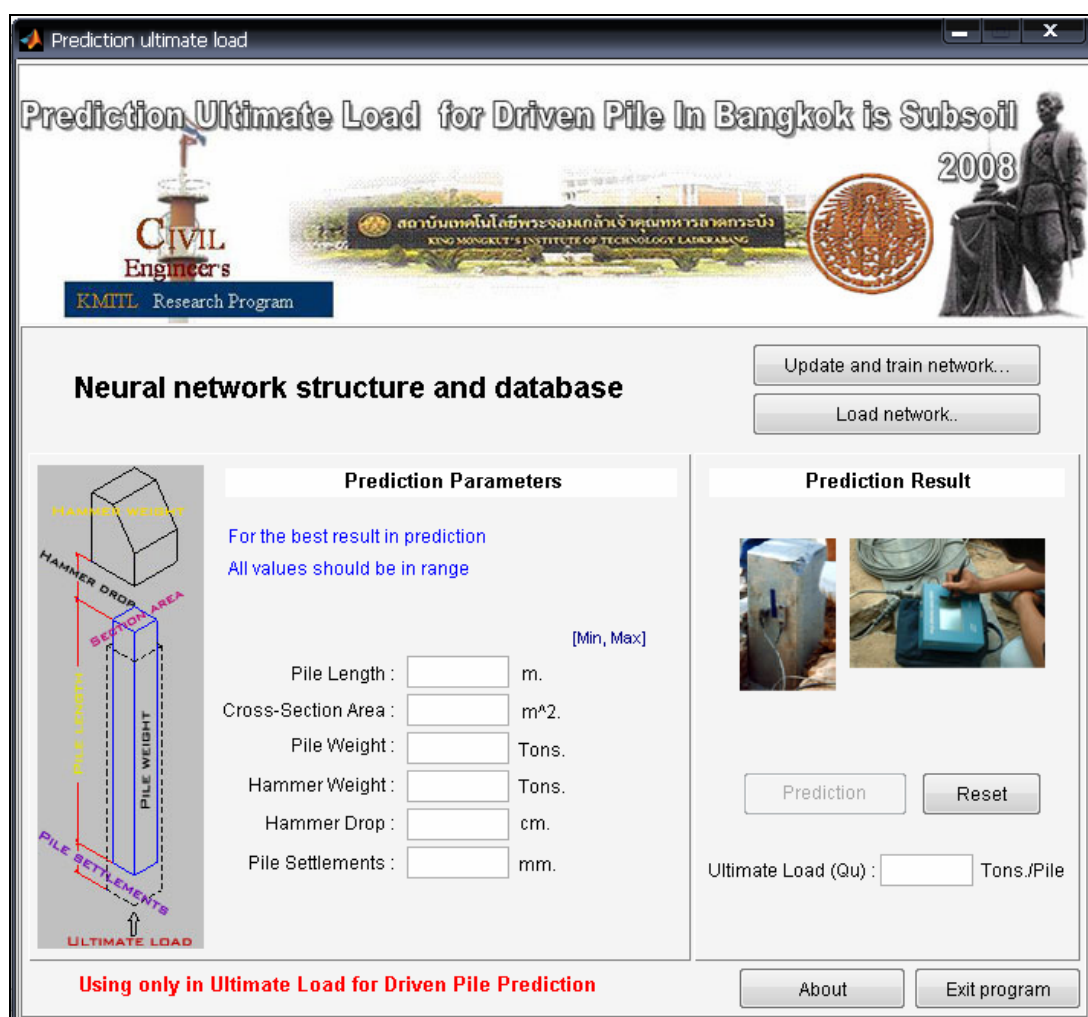
ภาคผนวก จ.

คู่มือการติดตั้งและใช้งานโปรแกรม

Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008

รายละเอียดของโปรแกรม

โปรแกรม Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการพยากรณ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งใช้ผลทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบ Dynamic Load Test มาใช้เป็นฐานข้อมูล โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks; ANN) ที่ประยุกต์บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งประกอบด้วย Input 6 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวเสาเข็ม (L), พื้นที่หน้าตัด (A_c), น้ำหนักเสาเข็ม (W_p), น้ำหนักตุ้ม (W_r), ระยะยกตุ้ม (h) และระยะทรุดตัว (S) ซึ่งโปรแกรมมีลักษณะตามรูปที่ 1



รูปที่ 1

คู่มือการติดตั้งและใช้งานประกอบด้วย

1. อุปกรณ์การติดตั้งก่อนใช้โปรแกรม Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008

1.1 CPU: Pentium III หรือ Athlon

- 1.2 Windows 2000 หรือ Windows XP
- 1.3 Hard disk space: 3.0GB (สำหรับการติดตั้งโปรแกรม MATLAB)
- 1.4 Ram: 512 MB
- 1.5 โปรแกรม Microsoft Office Access 2003
- 1.6 โปรแกรม MATLAB 7.1 พร้อม Neural Toolbox

2. ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008

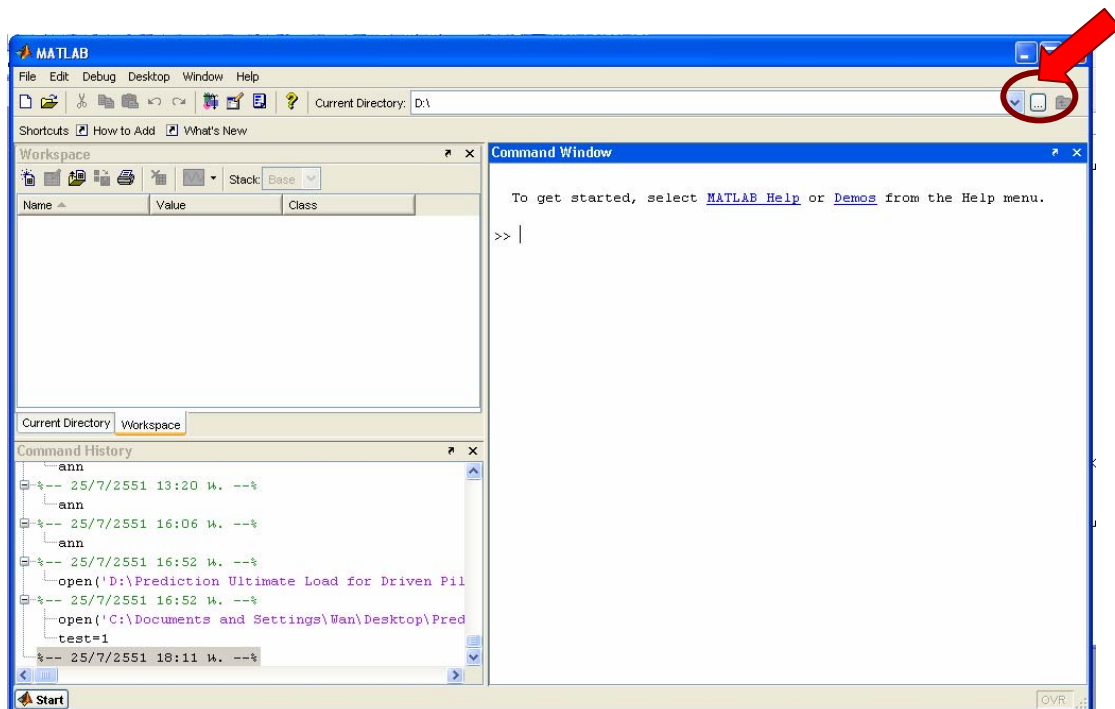
- 2.1 ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 7.1 ลงเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะใช้งาน



- 2.2 นำ Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008 เก็บใน Disk :D หรือ Disk อื่นๆตามต้องการ

3. ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008

- 3.1 เริ่มต้นเข้าโปรแกรม MATLAB
- 3.2 เข้าไปที่ Command Windows แล้วเข้าไปยัง directory ที่เก็บไฟล์ใน Disk ที่เก็บไว้ตามข้อ 2.2 แสดงได้ตามรูปที่ 2



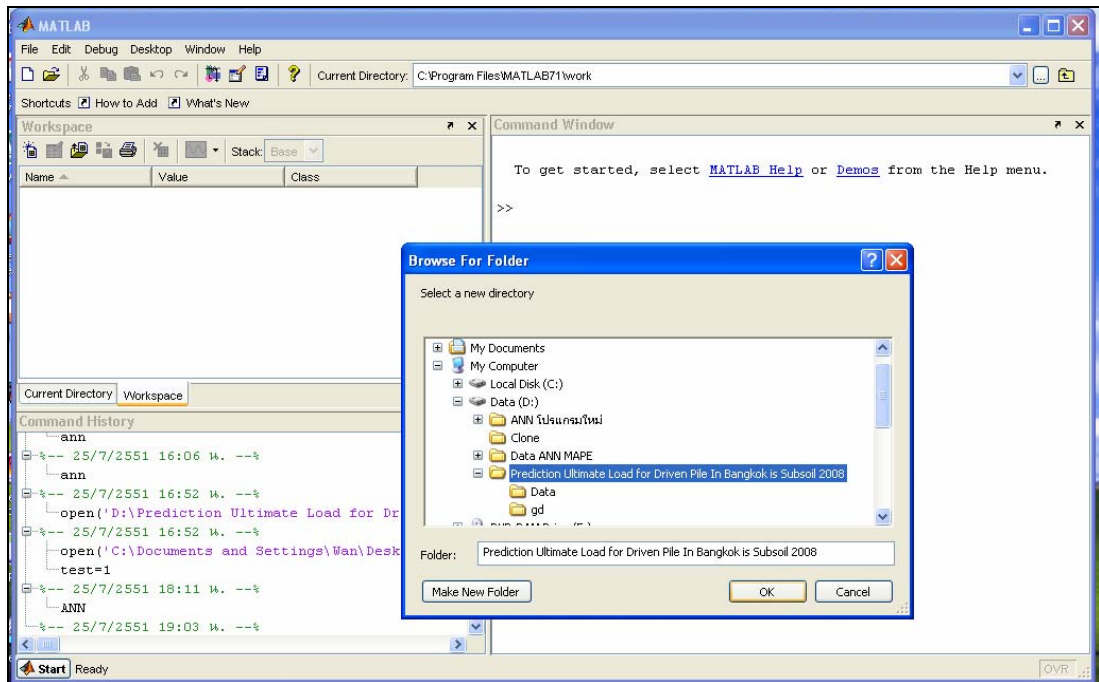
รูปที่ 2

3.3 เลือก My Computer => Disk:D หรือ Disk อื่นๆ=>



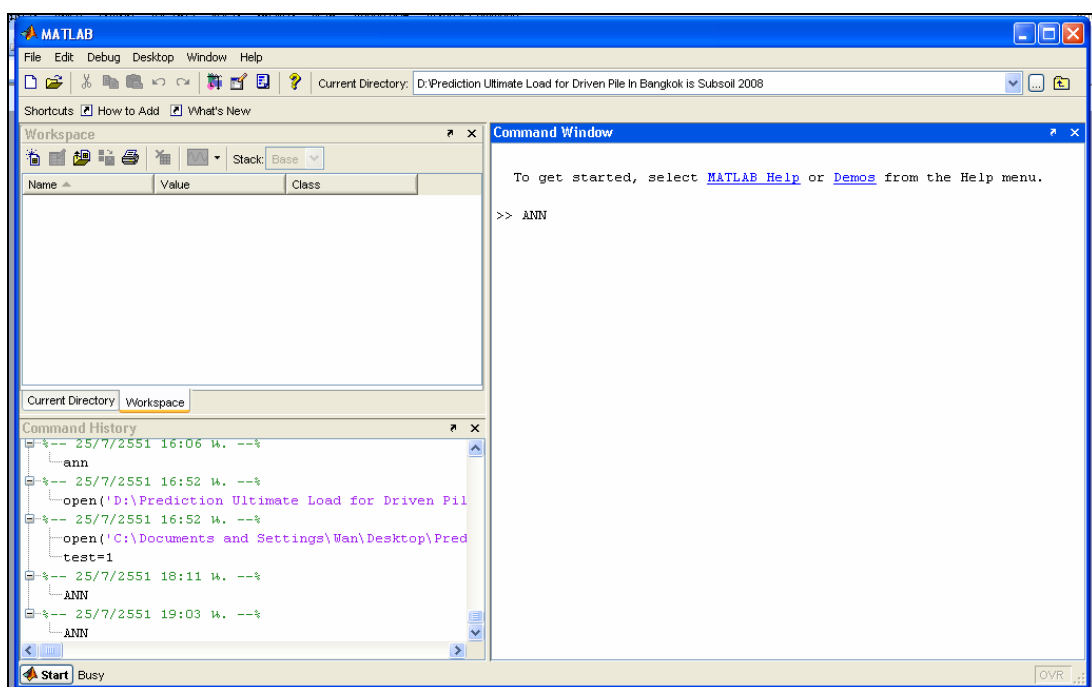
Prediction

Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008 แล้วคลิก OK ตามรูปที่ 3 เพื่อเลือกฐานข้อมูลมาใช้งาน



รูปที่ 3

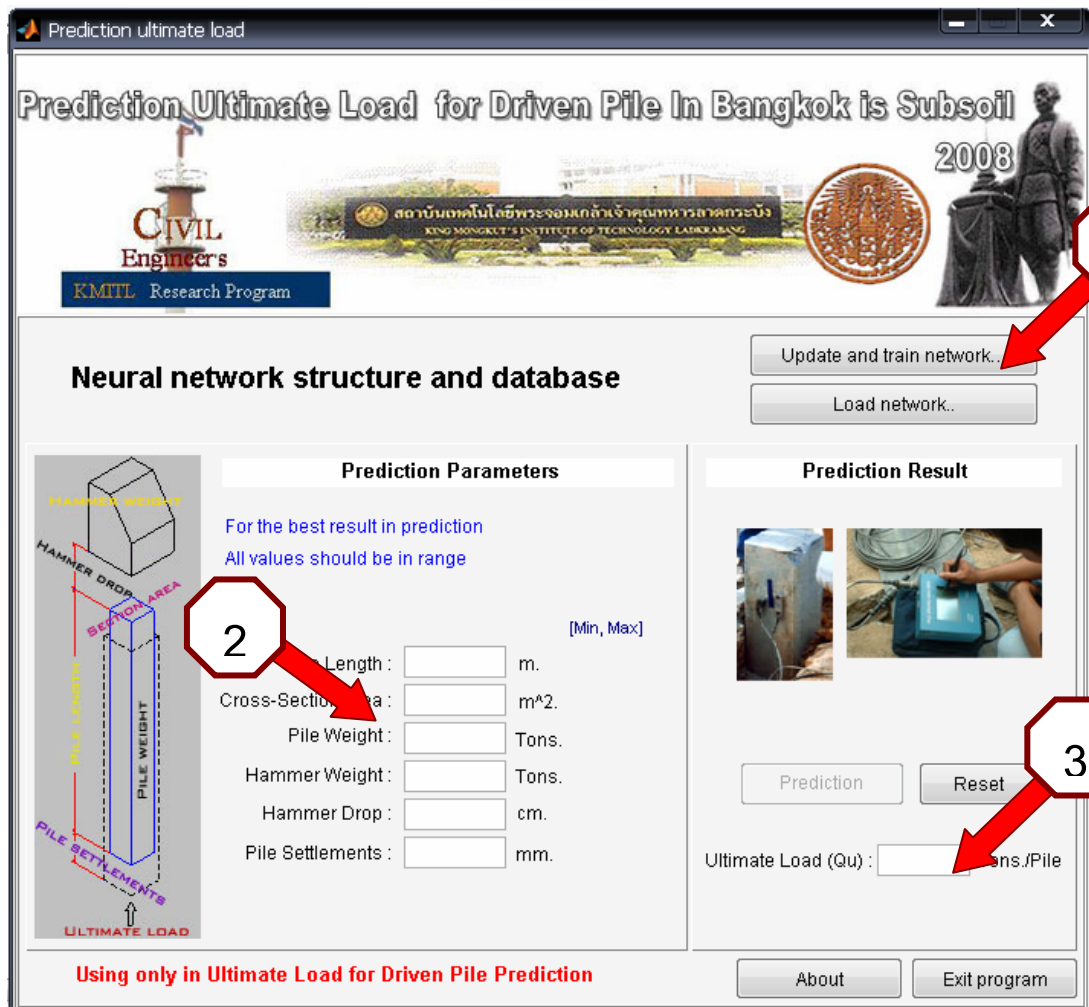
3.4 พิมพ์ ANN แล้วกด Enter เพื่อเรียกโปรแกรมขึ้นมาใช้งาน แสดงได้ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4

3.5 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม โครงข่ายประสาทเทียมจะแบ่งการใช้งานออกได้เป็น 3 ส่วน มีลักษณะตามรูป

1. ส่วนของการ Training โครงข่ายประสาทเทียม (Update and Train Network)
2. ส่วนการป้อนข้อมูลนำเข้าโครงข่ายประสาทเทียม (Prediction Parameters)
3. ส่วนการแสดงผลจากโครงข่ายประสาทเทียม (Prediction Result) ซึ่งทั้ง 3 ส่วนได้ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5

รายละเอียดของการใช้งานโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

1. ส่วนของการ Training โครงข่ายประสาทเทียม (Update and Train Network)

โปรแกรมจะต้องมีการ Training ข้อมูลก่อน เพื่อสอนให้โปรแกรมเรียนรู้ด้วย Neural Network หลังจาก Train เสร็จแล้ว ก็จะสามารถทำการ Testing หรือ Simulate ค่าที่จะ Prediction ได้ โดยเมื่อเปิดโปรแกรมมาครั้งแรก ถ้ายังไม่มี การ Training โปรแกรม ต้องไปทำการ Training ก่อนโดย

ไปคลิกที่ปุ่ม

Update and train network...

แล้วจะได้หน้าต่างโปรแกรมในส่วนของการ Training ตามรูปที่ 6

Prediction Ultimate Load for Driven Pile In Bangkok is Subsoil 2008

Update and train network

Training neural networks

Select database *.mdb:

Hidden Layer and node:

Transfer function of hidden Layer: 1 = tansig

Transfer function of output Layer: tansig

Training function: traingd

Epoch:

Goal:

Learning rate:

Neural network Performance

Ultimate Load (Qu): MAPE: %
 RMSE: Tons.

รูปที่ 6

หน้าต่างของการ Training จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1 ส่วนของ Training Neural Network อธิบายปุ่มการใช้งานได้ดังนี้

1.1 การเรียกข้อมูลชุด Train มาใช้ใน โครงข่ายประสาทเทียม

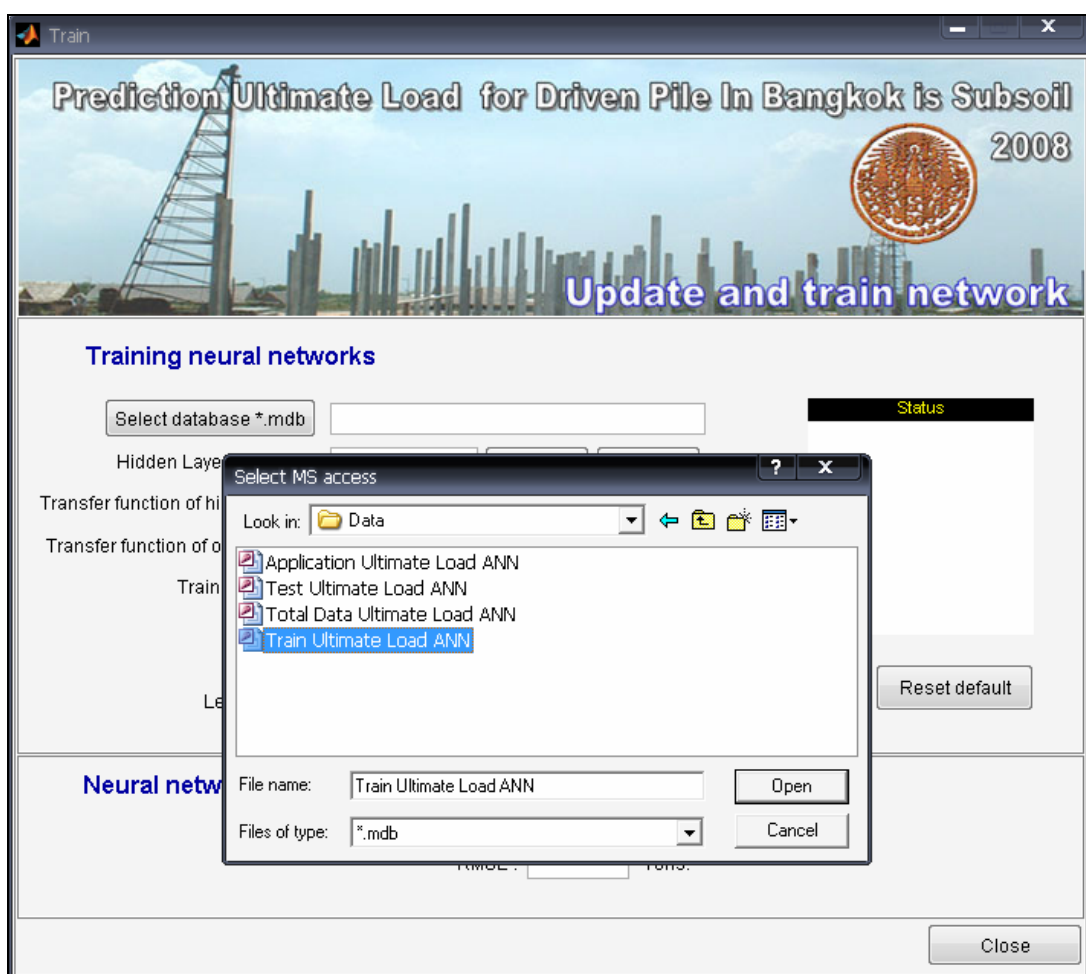
Select database *.mdb

เป็นส่วนของการ

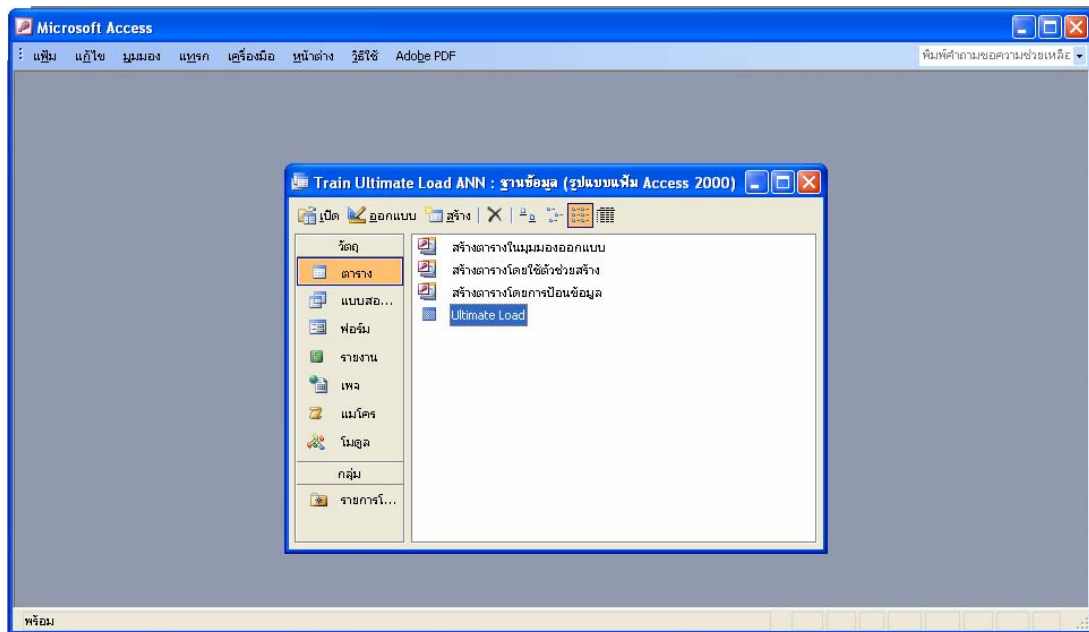
การเลือกใช้ฐานข้อมูลที่จะนำมา Training โครงข่ายประสาทเทียม โดยเรียกข้อมูลที่เก็บไว้ใน File ของ Microsoft Access ที่เก็บไว้ใน Folder Data => Open => Train Ultimate Load ANN.mdb => Open => ตาราง Ultimate Load ก็จะเข้าสู่กระบวนการ Training ตามรูปที่ 7 แต่ถ้าหากผู้ใช้มีข้อมูลชุดใหม่ที่จะนำมาใช้งานก็สามารถทำการคัดลอก File ของ Microsoft Access แล้วตั้งชื่อ File ใหม่

โดยให้จัดการกำหนดรูปแบบของตารางตาม File เดิมก็สามารถเปลี่ยนชุดข้อมูลในการ Train โครงข่ายประสาทเทียมได้ รูปแบบของตารางตามรูปที่ 8, 9 เมื่อเลือกแล้วโปรแกรมจะทำการติดต่อฐานข้อมูลให้โดยใช้ OLEDB ในการติดต่อ

เมื่อการ Train แต่ละโครงสร้างเสร็จสิ้น จะมีหน้าต่างถามว่าผู้ใช้จะทำการบันทึกค่า Weight และค่า Bias โดยผู้ใช้สามารถกำหนดชื่อของโครงสร้างที่ได้ทำการ Train นี้เก็บไว้ เพราะฉะนั้นการ Train แต่ละครั้งเราสามารถเก็บผลของโครงสร้างนั้นๆไว้ใช้งานได้ โดยจะถูกเรียกที่หน้า ANN ที่ป้อน Load network... ต่อไป



รูปที่ 7



รูปที่ 8

ID	Item	Pile Length (L)	Cross-Section Area (Ac)	Pile Weight (Wp)	Hammer Weight (Wr)	Hammer Drop (h)	Pile Settlement (S)	Ultimate Load (Qu)
1	I-O 22x0.22	22.00	332.00	1.75	3.23	50.00	8.00	35.40
2	I-O 22x0.22	21.00	363.00	1.83	3.20	40.00	11.00	37.00
3	I-O 22x0.22	25.00	386.00	2.32	3.70	30.00	.50	89.70
4	I-O 22x0.22	20.00	332.00	1.59	2.00	40.00	.50	70.00
5	I-O 22x0.22	21.00	332.00	1.67	4.00	40.00	15.00	29.60
6	I-O 22x0.22	18.00	345.00	1.49	2.50	50.00	1.00	77.60
7	I-O 22x0.22	20.00	332.00	1.59	2.00	40.00	.50	67.00
8	I-O 22x0.22	23.50	393.00	2.22	3.50	30.00	1.00	90.90
9	I-O 22x0.22	23.50	393.00	2.22	3.50	30.00	1.00	94.40
10	I-O 26x0.26	18.00	487.00	2.10	2.80	60.00	5.00	76.40
11	I-O 26x0.26	22.00	469.00	2.48	5.06	50.00	1.00	102.70
12	I-O 26x0.26	22.00	485.00	2.56	4.60	45.00	3.00	99.00
13	I-O 26x0.26	23.00	451.00	2.49	2.50	40.00	.70	65.20
14	I-O 26x0.26	22.00	485.00	2.56	3.57	70.00	2.50	85.30
15	I-O 30x0.30	21.00	660.00	3.33	4.00	30.00	.50	158.80
16	I-O 30x0.30	25.00	602.00	3.61	5.00	50.00	2.00	107.10
17	I-O 35x0.35	28.00	781.00	5.25	5.40	50.00	1.00	173.50
18	I-O 35x0.35	26.00	880.00	5.49	5.04	80.00	1.00	186.80
19	I-O 35x0.35	28.00	781.00	5.25	5.40	50.00	1.00	186.60
20	I-O 35x0.35	22.00	880.00	4.65	6.30	80.00	10.00	129.90
21	I-O 35x0.35	21.00	780.00	3.93	4.00	140.00	3.00	118.70
22	I-O 35x0.35	28.00	781.00	5.25	5.40	50.00	1.00	184.30
23	I-O 35x0.35	28.00	781.00	5.25	5.40	50.00	1.00	184.30

รูปที่ 9

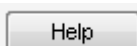
1.2 การกำหนดจำนวน Layer และ Node ในชั้น Hidden

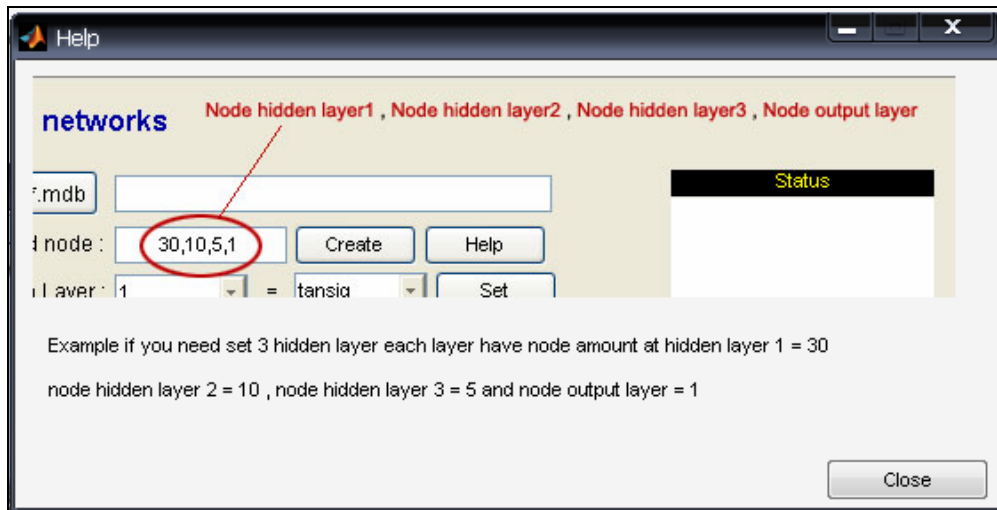
Hidden Layer and node :

เป็นส่วนของการกำหนดจำนวน Hidden layer และ จำนวน Node ของ Hidden layer และ จำนวน Node ของ Output layer โดยมีรูปแบบการป้อนข้อมูลดังนี้

- Node Hidden layer, Node Hidden layer , , Node Output layer :

ยกตัวอย่างเช่นต้องการสร้าง 2 Hidden layer โดยให้ Hidden layer 1 มีจำนวน Node เป็น 5 และ Hidden layer 2 มีจำนวน Node เป็น 5 และ Output layer มีจำนวน Node เป็น 1

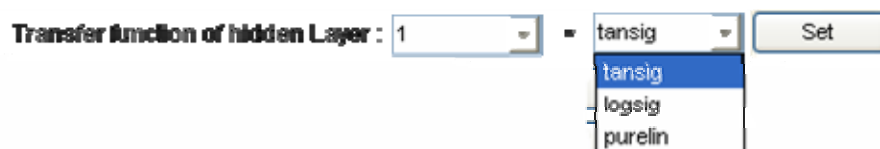
จะต้องใส่ดังนี้คือ 5, 5, 1 จากนั้นต้องทำการกดปุ่ม  เพื่อสร้าง Layer และ Node ขึ้นมาแล้วถ้าหากมีปัญหาในการกรอกข้อมูลระหว่างใช้งานสามารถเรียกดูได้จากปุ่ม  โปรแกรมที่เรียกใช้มีลักษณะตามรูป



การกำหนดคุณสมบัติของข้อมูลแต่ละชั้น

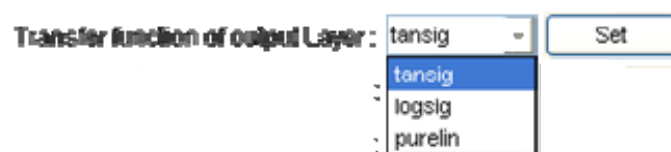


1.3 การกำหนด Transfer Function ในชั้น Hidden



เป็นส่วนของการให้กำหนด Transfer function ของแต่ละ Hidden layer โดยมีรูปแบบของ Transfer Function 3 รูปแบบ ตามรูปด้านบน เมื่อเลือกได้ตามต้องการต้องกดปุ่ม Set ทุกครั้ง ถ้าหากมีมากกว่า 1 ชั้นชั้นอื่นๆก็ต้องทำการกำหนด Transfer Function แล้วกดปุ่ม Set ด้วยเช่นกัน

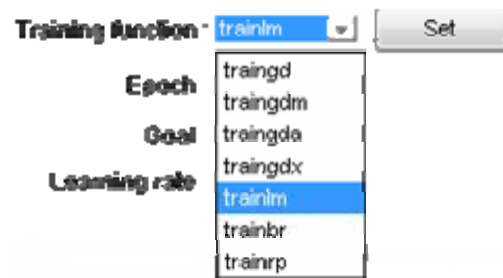
1.4 การกำหนด Transfer Function ในชั้น Output



เป็นส่วนของการให้กำหนด Transfer function ของ Output layer เมื่อเลือกแล้วต้องการกำหนดต้องกดปุ่ม Set ทุกครั้ง

1.5 การกำหนด Transfer Function ในระบบโครงข่ายประสาทเทียม

เป็นส่วนของการให้กำหนด Training function ของระบบทั้งหมดเพื่อเลือกรูปแบบการเรียนรู้ในการปรับค่า Weight และ Bias เมื่อเลือกแล้วต้องการกำหนดต้องกดปุ่ม Set ทุกครั้ง

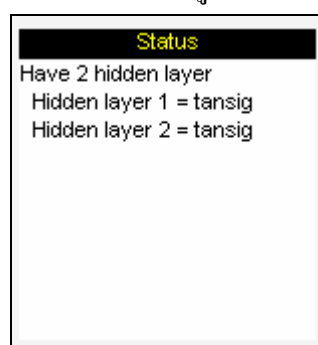


1.6 การกำหนด Epoch, Goal, Learning rate ในระบบโครงข่ายประสาทเทียมเป็นส่วนของการให้กำหนด

Epoch :	20
Goal :	0.001
Learning rate :	0.005

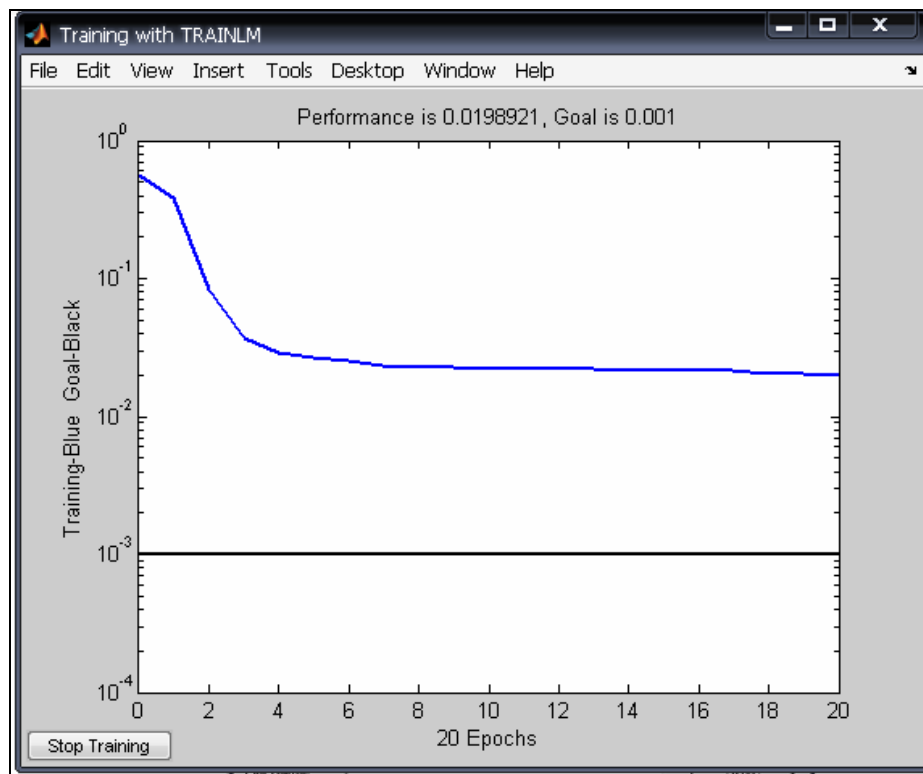
- Epoch คือจำนวนรอบสูงสุดในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่ใช้ในการ training
- Goal คือค่า Error ที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้
- Learning rate คือ ค่าอัตราการเรียนรู้ จะช่วยเพิ่มการปรับ weight และ Bias ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
-

1.7 แสดงผลของการกำหนดรูปแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม



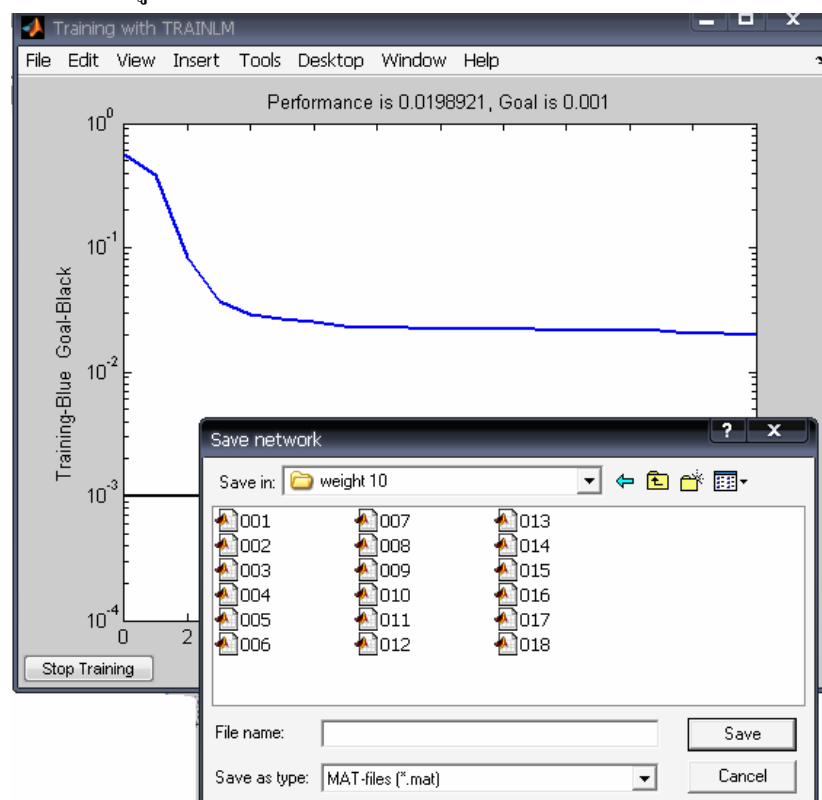
1.8 เข้าสู่กระบวนการ Training โครงข่ายประสาทเทียม

- กดปุ่ม  เมื่อได้กำหนด Parameter ครบแล้ว เพื่อ Training โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งระบบจะทำการเรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลเข้าและผลลัพธ์จากข้อมูลการเรียนรู้ แสดงได้ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10

จากนั้นโปรแกรมก็จะถามว่าต้องการบันทึกโครงสร้างหรือบันทึกค่า Weight และ Bias ของแต่ละโครงข่ายนี้หรือไม่ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11

- กดปุ่ม **Reset default** เมื่อต้องการ Train โครงข่ายใหม่ก็ป้อนข้อมูลใหม่ทั้งหมดโดยเริ่มต้นทำตามส่วนที่ 1 ใหม่ทั้งหมด

2 ส่วนของ Neural Network Performanceอธิบายปฏิกิริยาการใช้งานได้ดังนี้

จะเป็นส่วนของการแสดงค่า Error จากสูตร MAPE และ RMSE โดยเมื่อทำการ Train เสร็จแล้วค่านี้จะถูกคำนวณ และแสดงผลออกมา

Neural network Performance

Ultimate Load (Qu)	MAPE:	%
	RMSE:	Tons

สิ้นสุดกระบวนการ Train แล้วกดปุ่ม Close เพื่อออกจากกระบวนการ Train โค้งข่าย
ประสาทเทียม

2. ส่วนการป้อนข้อมูลนำเข้าโครงการประชาสัมพันธ์ (Prediction Parameters)

การกรอกข้อมูลเข้าเพื่อใช้ในการทดสอบโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม ก็คือหน้าตาโปรแกรมตัว ANN หน้าแรกที่เราเปิดขึ้นมานั่นเอง ดังที่ได้กล่าวไว้ว่าต้องทำการ Train ก่อน เมื่อได้ผลโครงข่ายจากการ Train แล้ว ถ้าจะทำการ Testing ก็ต้องทำการ Load โครงข่ายเข้ามาบอกให้โปรแกรมใช้งานโครงข่ายนั้นๆ โดยเริ่มจะต้องไปกดปุ่ม Load network.. เพื่อโหลดเอาโครงข่ายที่ได้ Train ไว้ที่ได้บันทึกไว้ในกระบวนการ Train แล้วมาใช้งานในการทดสอบ



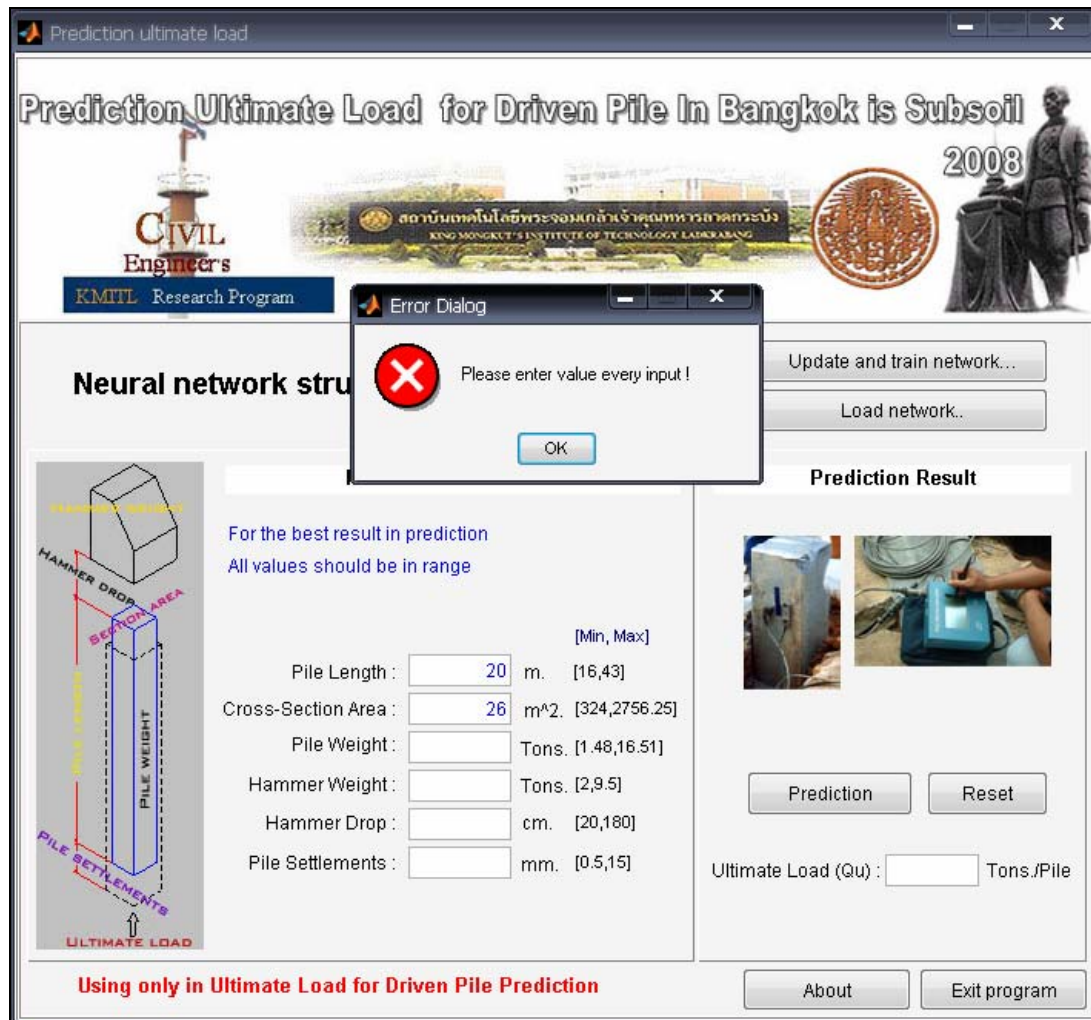
The diagram illustrates a pile foundation system. At the top, a hammer is shown with a downward arrow labeled 'HAMMER DROP'. The hammer's weight is labeled 'HAMMER WEIGHT'. The pile is shown with a dashed line indicating its 'SECTION AREA' and a solid line for its 'PILE LENGTH'. The pile's weight is labeled 'PILE WEIGHT'. At the bottom, the pile is shown with 'PILE SETTLEMENTS' and an upward arrow labeled 'ULTIMATE LOAD'.

Prediction Parameters

For the best result in prediction
All values should be in range

			[Min, Max]
Pile Length :	16	m.	[16.00, 43.00]
Cross-Section Area :	345	m ² .	[324,2756]
Pile Weight :	2	Tons.	[1.477,12.512]
Hammer Weight :	2	Tons.	[2.00,9.50]
Hammer Drop :	100	cm.	[20,180]
Pile Settlements :	8	mm.	[0.50,15.00]

แล้วกรอกข้อมูลคุณสมบัติของเสาเข็มและคุณสมบัติของดินชั้นที่นำมาใช้งานต้องใส่ค่าต่างๆที่จะทดสอบให้ครบทั้ง 6 ค่าและแต่ละค่าต้องอยู่ในช่วงที่ข้อมูลกำหนดคิฉะนั้นโปรแกรมจะฟ้องเตือนว่าให้ใส่ให้ครบหรือไม่ถูกต้องในแต่ละข้อมูล และจะไม่คำนวณให้ถ้าใส่ไม่ครบตามรูปที่ 12



รูปที่ 12

3. ส่วนการแสดงผลจากโครงข่ายประสาทเทียม (Prediction Result)

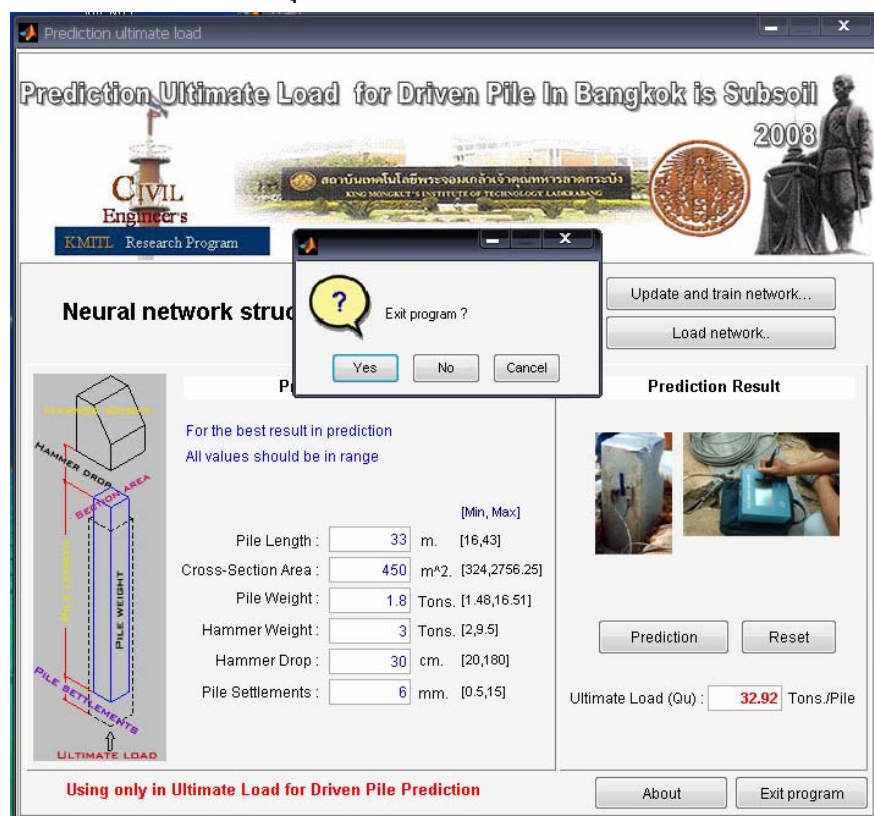
เมื่อใส่ข้อมูลครบแล้ว ก็ทำการทดสอบโดยกดปุ่ม Prediction แล้วโปรแกรมจะทำการ Simulate กับโครงข่าย Neural Network ที่เราได้ Load Network เข้ามา แล้วโครงข่ายจะแสดงผลค่ากำลังรับน้ำหนักในช่อง Ultimate Load (Qu) เมื่อต้องการใส่ค่าใหม่ก็ให้กดปุ่ม Reset แล้วทำการเริ่มต้นทำตามส่วนที่ 2 ใหม่ทั้งหมด

Prediction Result



Ultimate Load (Qu) : **123.13** Tons./Pile

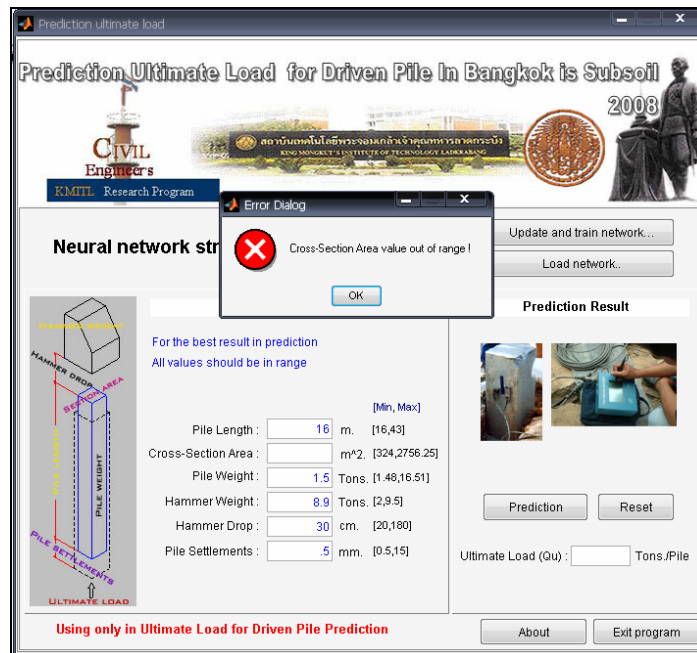
เมื่อต้องการออกจากโปรแกรมกดปุ่ม โปรแกรมก็จะเลิกทำงาน



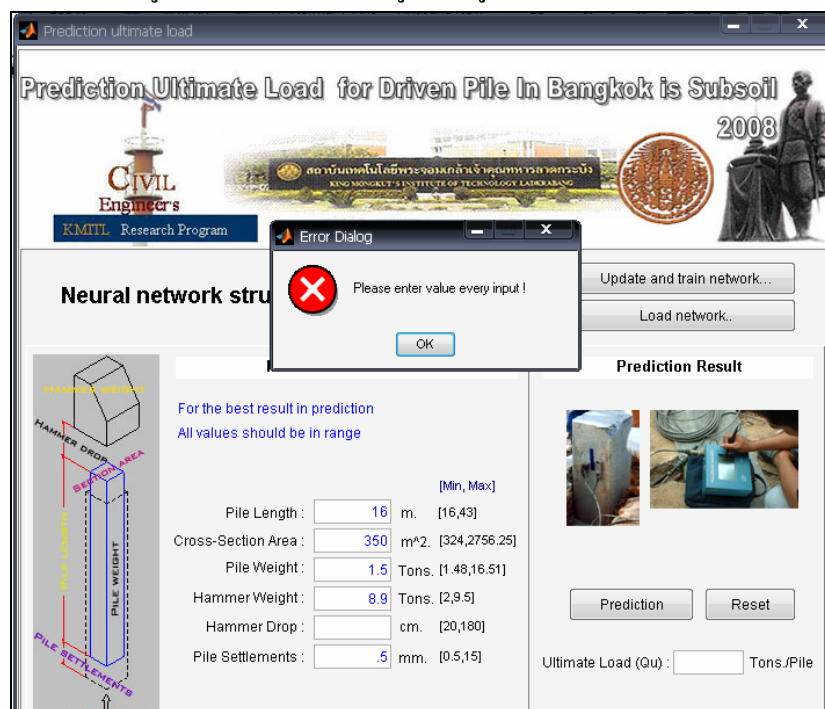
3. เงื่อนไขในการพยากรณ์ของระบบ

1. โปรแกรมจะต้องทำการ Load Network ก่อนที่จะทำการป้อนข้อมูลหากไม่มีการ Load คำนวณนักโปรแกรมก็จะไม่สามารถกำหนดค่า Min, Max ขึ้นมาใช้งาน
2. ข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์ต้องอยู่ในช่วงที่ระบบเรียนรู้ จะมีสองกรณีคือ

กรณีที่ใส่ข้อมูลไม่อยู่ในช่วง [Min, Max] หรือหรือป้อนข้อมูลไม่ครบทั้ง 6 ปัจจัยระบบจะทำการเตือนว่าข้อมูลส่วนไหนที่ขาดหายไปตัวอย่างตามรูป



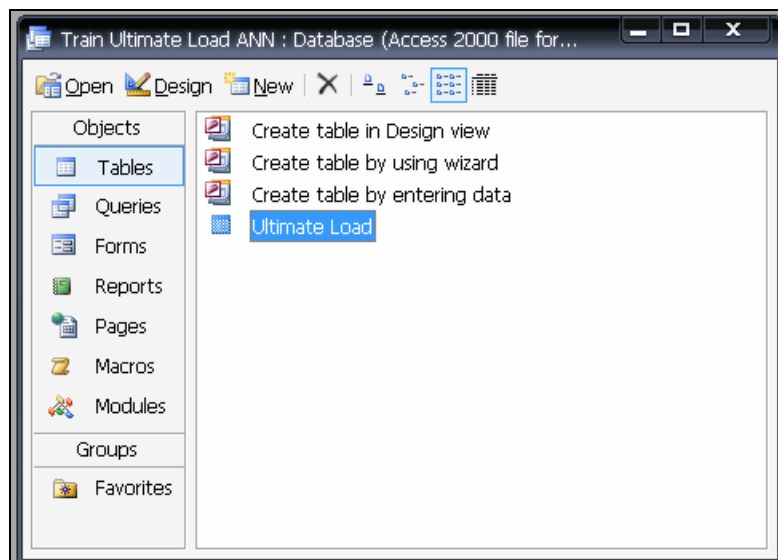
รูปแสดงกรณีป้อนข้อมูลไม่อยู่ในช่วง [Min, Max]



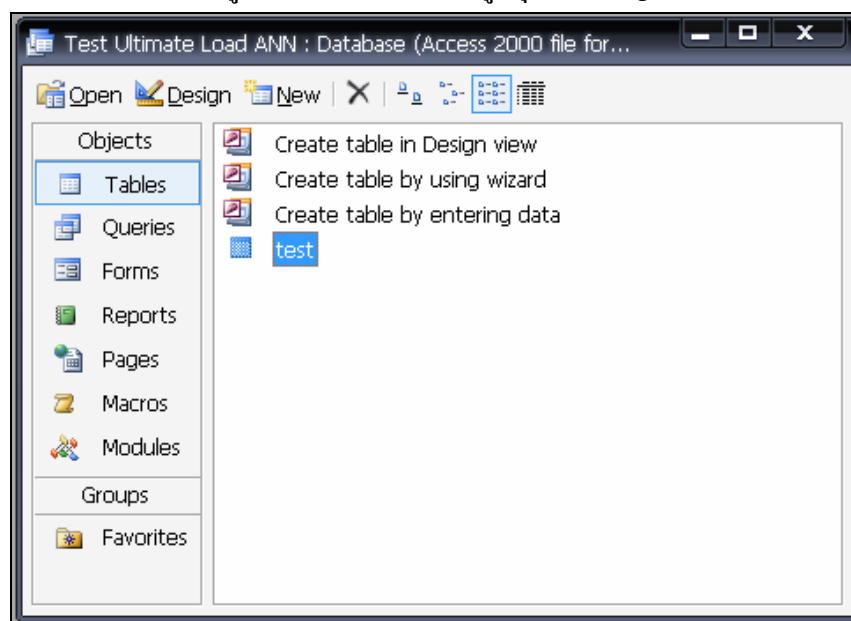
รูปแสดงกรณีป้อนข้อมูลไม่ครบทั้ง 6 ปัจจัย

3. การเลือกใช้ฐานข้อมูลที่จะนำมา Training ข้อมูลที่เก็บไว้ใน File ของ Microsoft Access จะต้องบันทึกไว้ในชื่อ Ultimate Load เท่านั้น ส่วนกระบวนการ Testing หรือ Application จะต้องเก็บไว้ใน File ของ Microsoft Access จะต้องบันทึกไว้ในชื่อ Test

4. เพื่อรองรับกับข้อมูลแบบ Static Load Test ผู้ใช้โปรแกรมสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลแบบ Static Load Test ได้ เพียงแต่กรอกข้อมูลให้ตรงกับหัวข้อของตารางที่จัดทำแล้วบันทึกข้อมูลกระบวนการ Training ด้วยชื่อ Ultimate Load ก็สามารถที่จะเรียกข้อมูลไปใช้ในการพยากรณ์ผลทดสอบนั้นได้ ส่วนกระบวนการ Test และ Application จะต้องบันทึกด้วยชื่อ Test เท่านั้น



รูปแสดงการบันทึกข้อมูลชุด Training



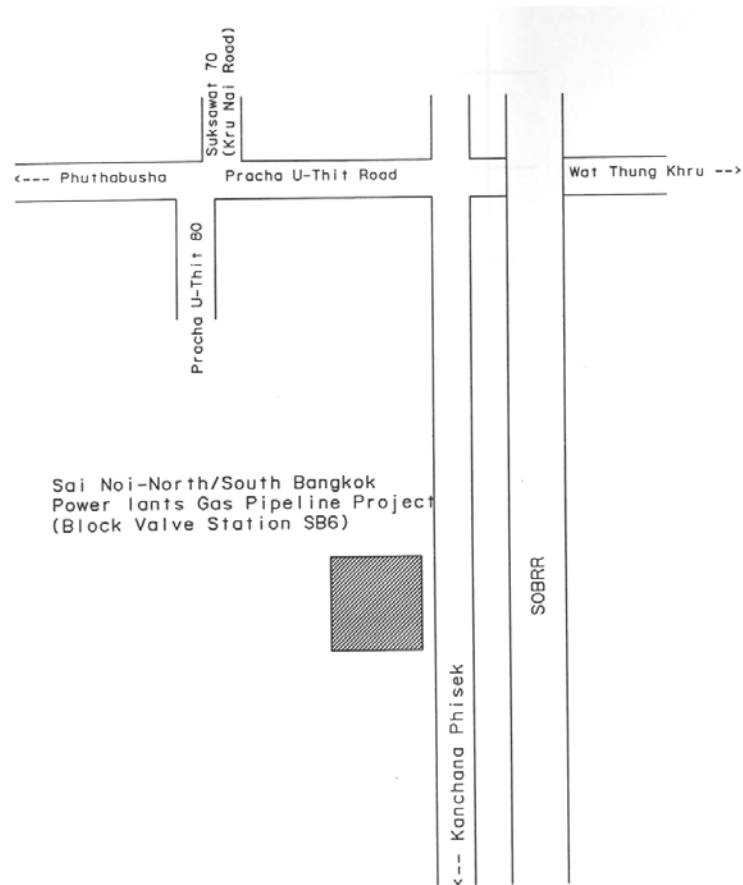
รูปแสดงการบันทึกข้อมูลชุด Testing และ Application

	ID	Item	Pile Length (L)	Cross-Section Area (Ac)	Pile Weight (Wp)	Hammer Weight (Wr)	Hammer Drop (h)	Pile Settlement (S)	Ultimate Load (Qu)
▶ 1		I-0.22x0.22	22.00	332.00	1.75	3.23	50.00	8.00	35.40
2		I-0.22x0.22	21.00	363.00	1.83	3.20	40.00	11.00	37.00
3		I-0.22x0.22	25.00	386.00	2.32	3.70	30.00	.50	89.70
4		I-0.22x0.22	20.00	332.00	1.59	2.00	40.00	.50	70.00
5		I-0.22x0.22	21.00	332.00	1.67	4.00	40.00	15.00	29.60
6		I-0.22x0.22	18.00	345.00	1.49	2.50	50.00	1.00	77.60
7		I-0.22x0.22	20.00	332.00	1.59	2.00	40.00	.50	67.00
8		I-0.22x0.22	23.50	393.00	2.22	3.50	30.00	1.00	90.90
9		I-0.22x0.22	23.50	393.00	2.22	3.50	30.00	1.00	94.40
10		I-0.26x0.26	18.00	487.00	2.10	2.80	60.00	5.00	76.40

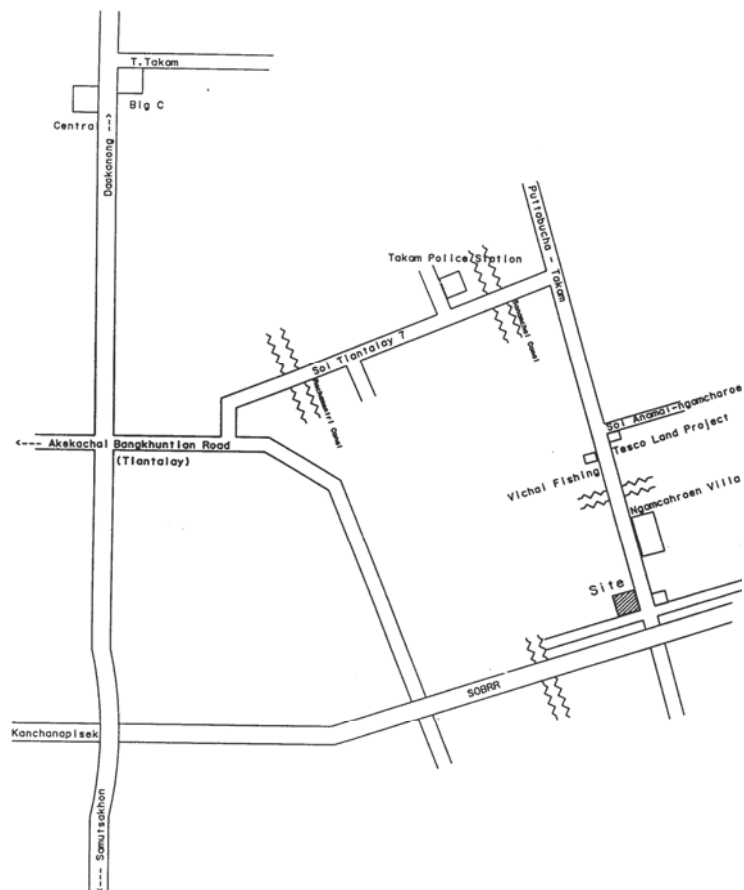
รูปแสดงหัวข้อตารางที่จะทำการกรอกข้อมูล

ภาคผนวก จ.

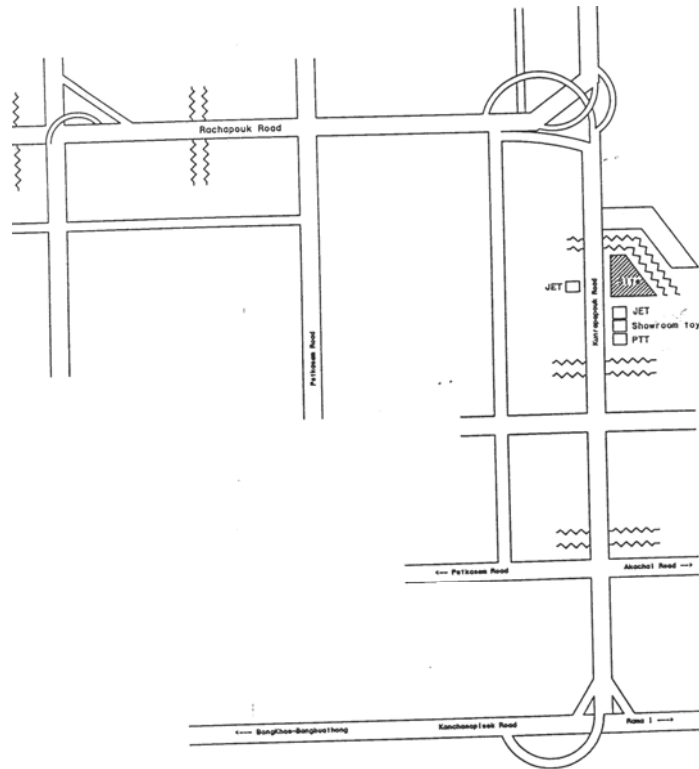
แผนที่ของแหล่งข้อมูลที่ใช้วิจัย



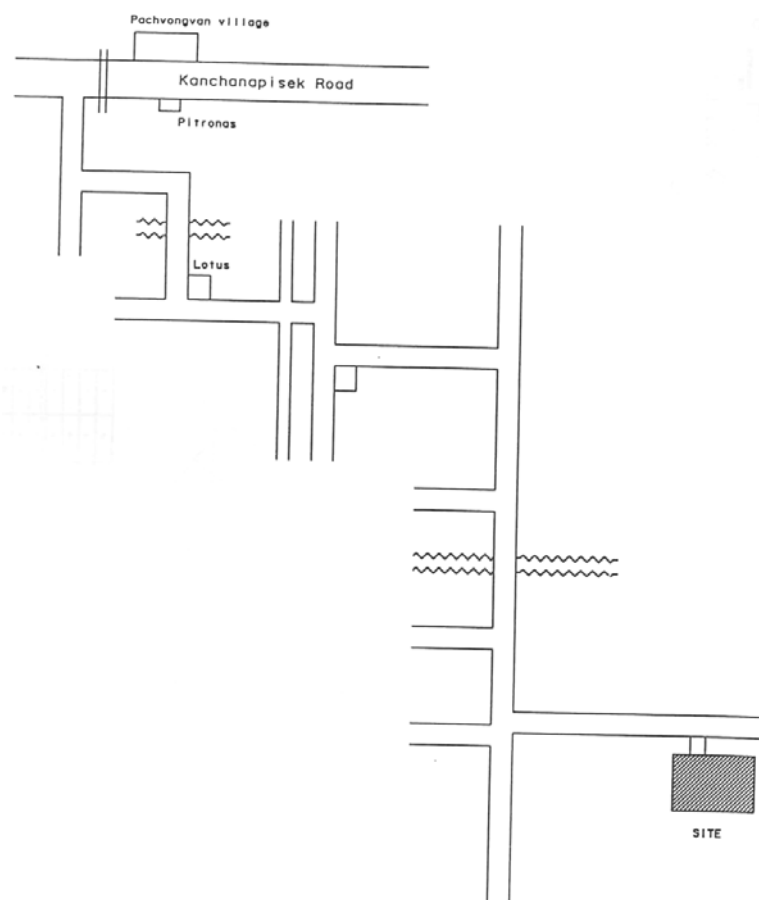
รูปที่ ๑1 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (BVS 6)



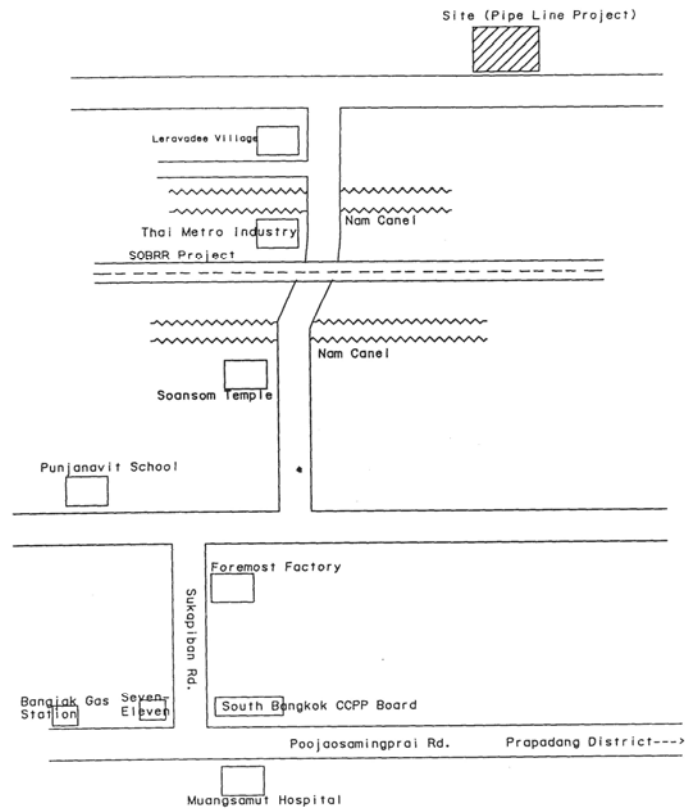
รูปที่ ๑2 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (BVS 5)



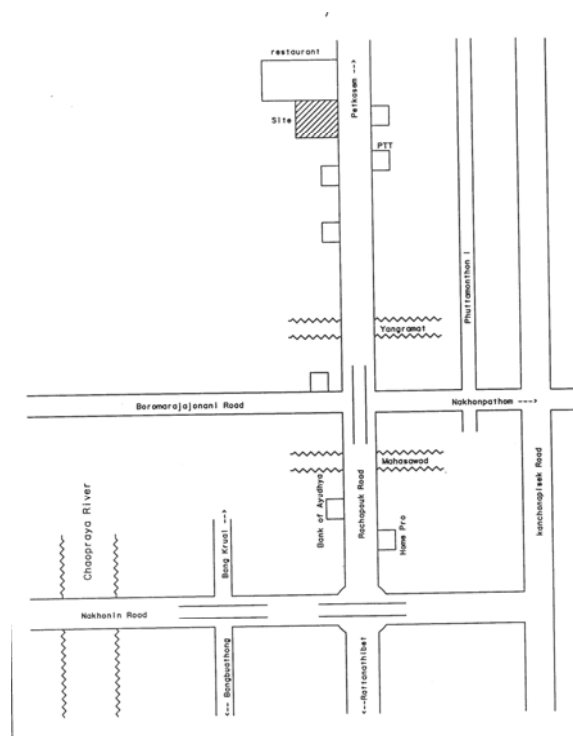
รูปที่ ๓3 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (BVS 3)



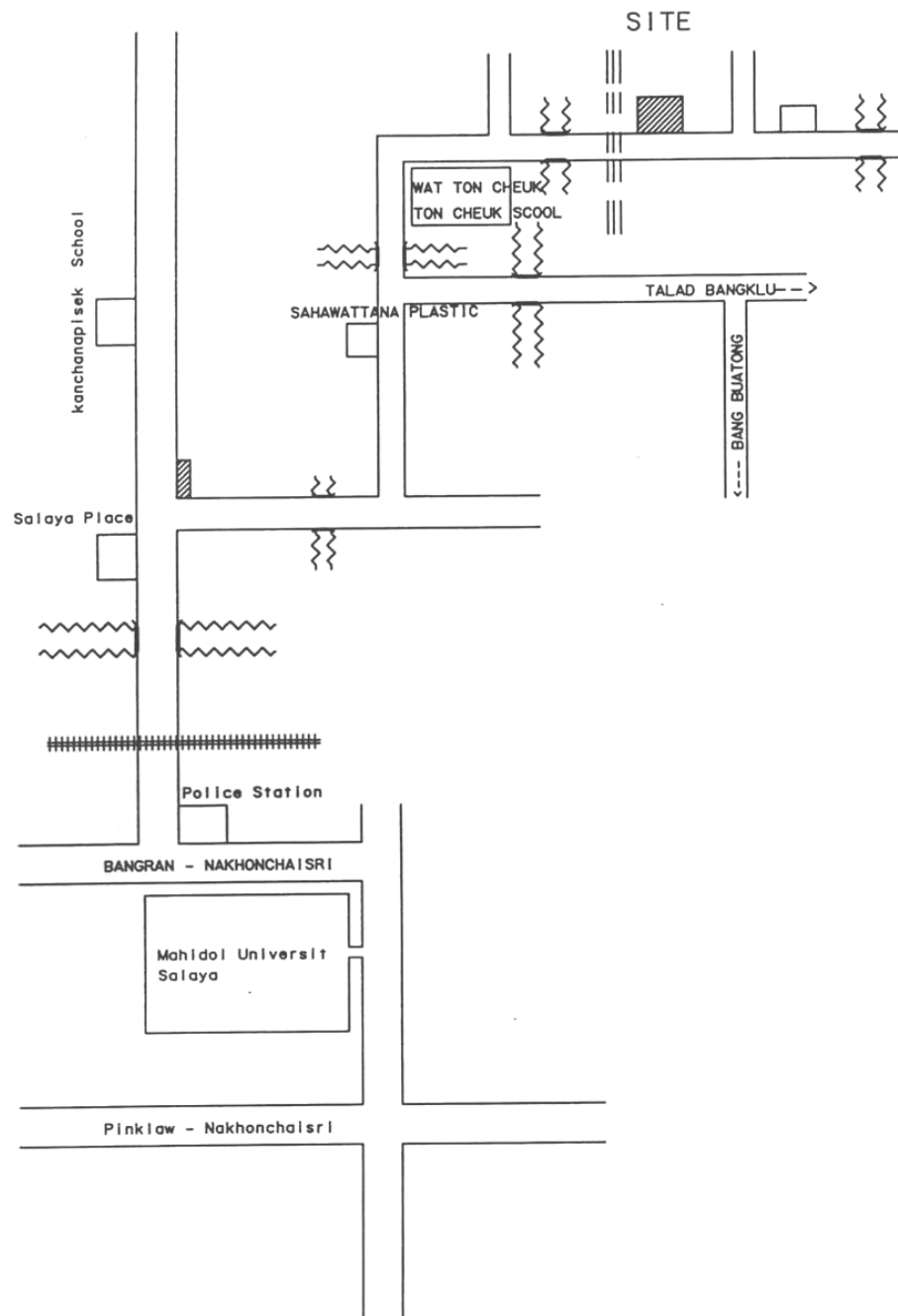
รูปที่ ๓4 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (BVS 4)



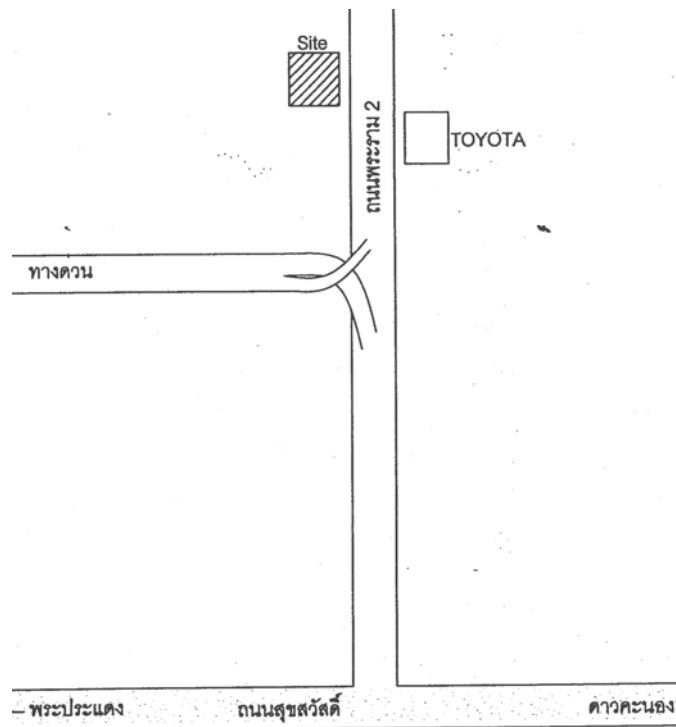
รูปที่ ๑5 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (SBMR)



รูปที่ ๑6 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (BVS 2)

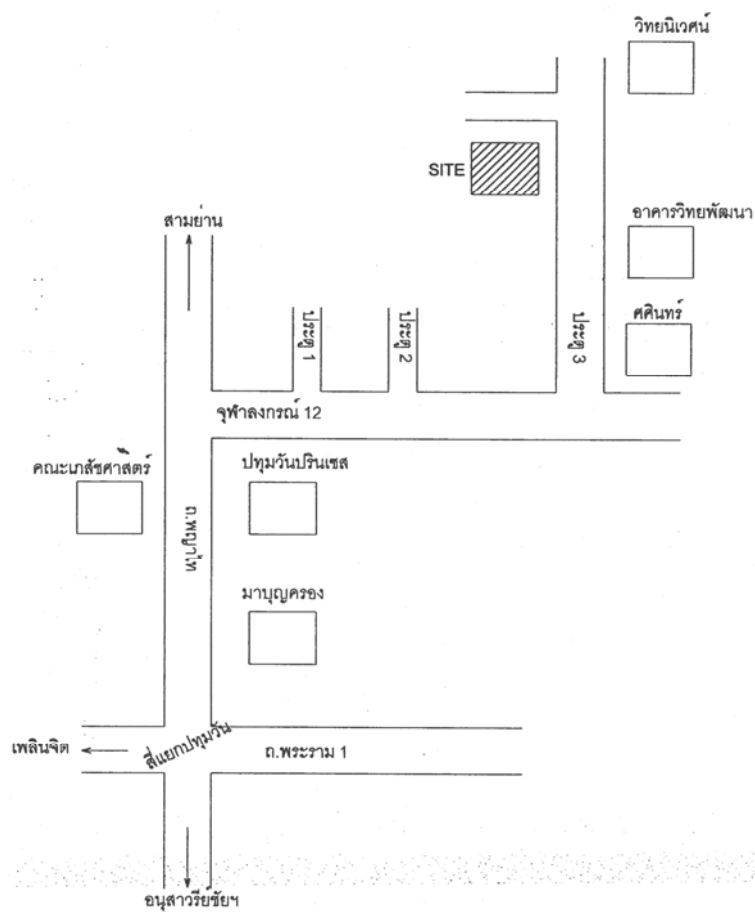


รูปที่ ๗7 แผนที่ หน่วยงาน SAINOI PIPELINE PROJECT (BVS 1)



รูปที่ จ10 แผนที่ หน่วยงานโซว์รูมและสำนักงาน UR-1 MOTOR SPORT

ถ.พระราม 2

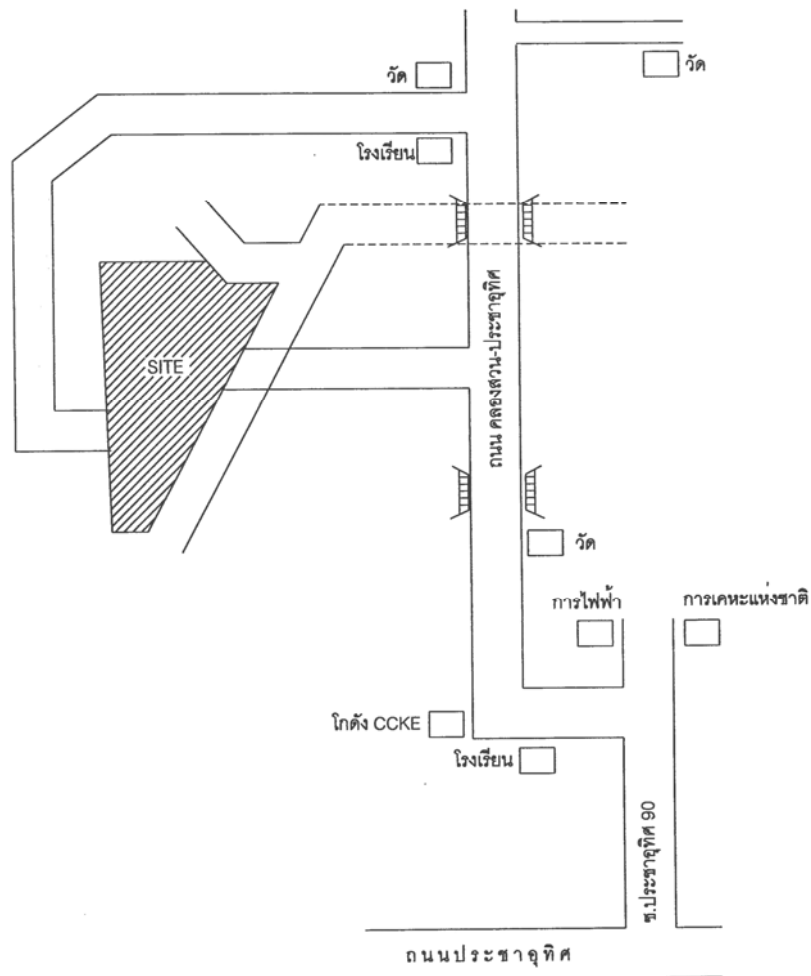


รูปที่ จ11 แผนที่ หน่วยงาน อาคารหอพักนิสิตหญิง 14 ชั้นจุฬาลงกรณ์วิทยาลัย

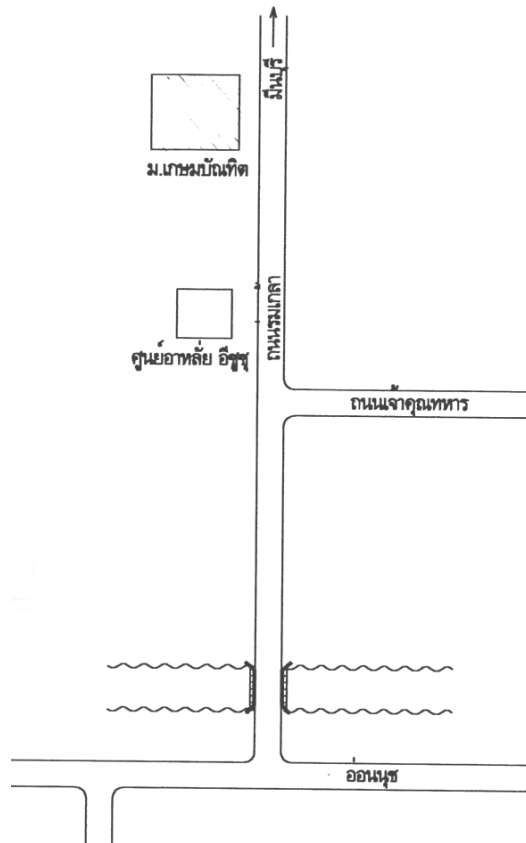
ถ.พญาไท



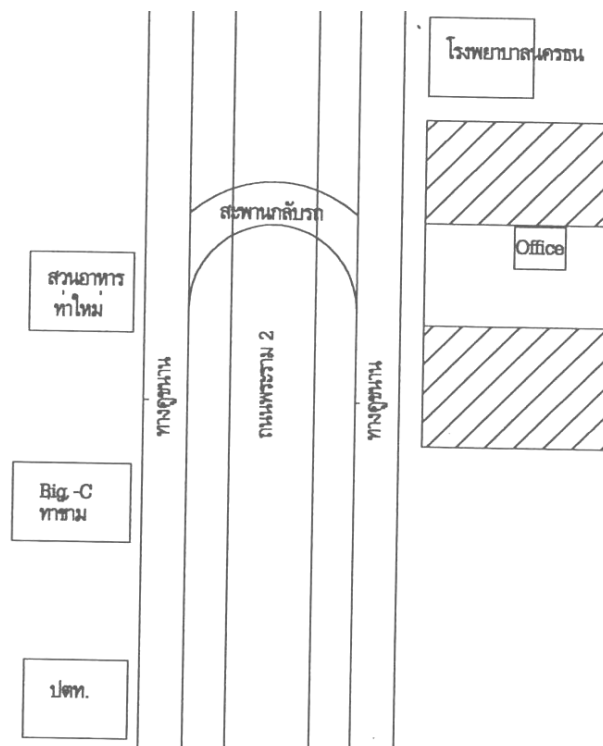
รูปที่ ๑๑๔ แผนที่ หน่วยงาน JONSON&JONSON (SPORT COMPLEX)
นิคมฯลาดกระบัง



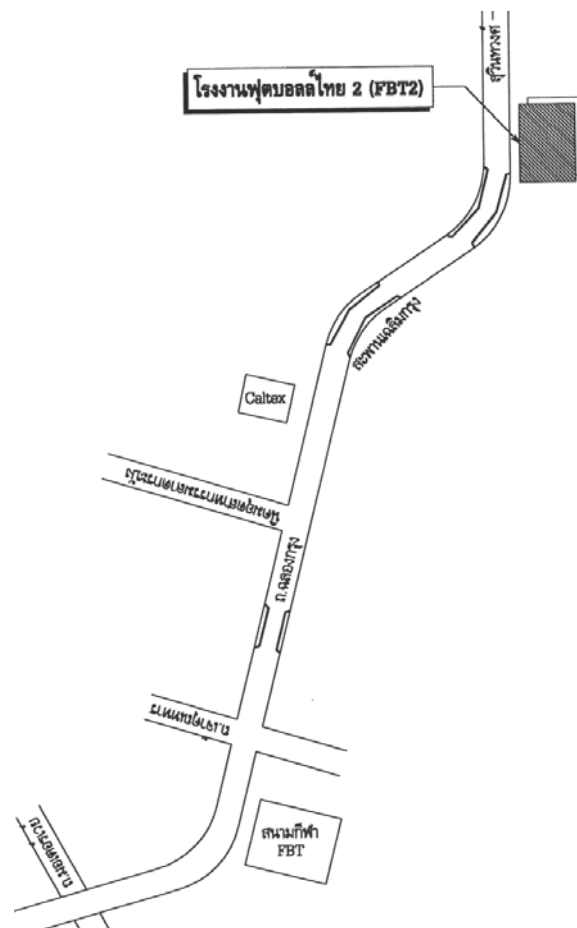
รูปที่ ๑๑๕ แผนที่ หน่วยงาน บ้านไทยสมบูรณ์ ประชาอุทิศ 90



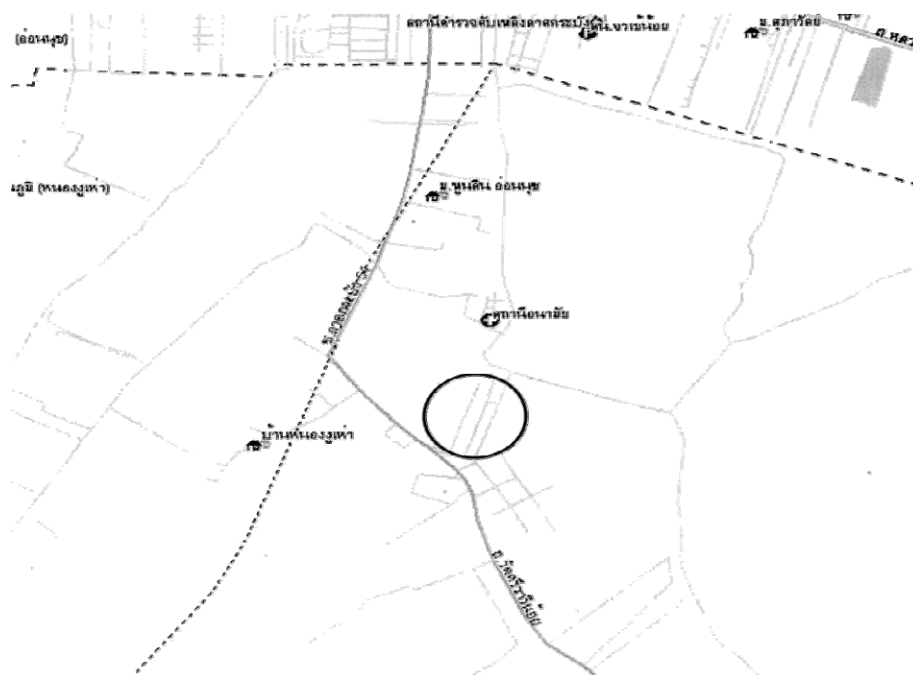
รูปที่ ๑๖ แผนที่ หน่วยงาน ม.เกษมบัณฑิต วิทยาเขตร่มเกล้า ถ.ร่มเกล้า



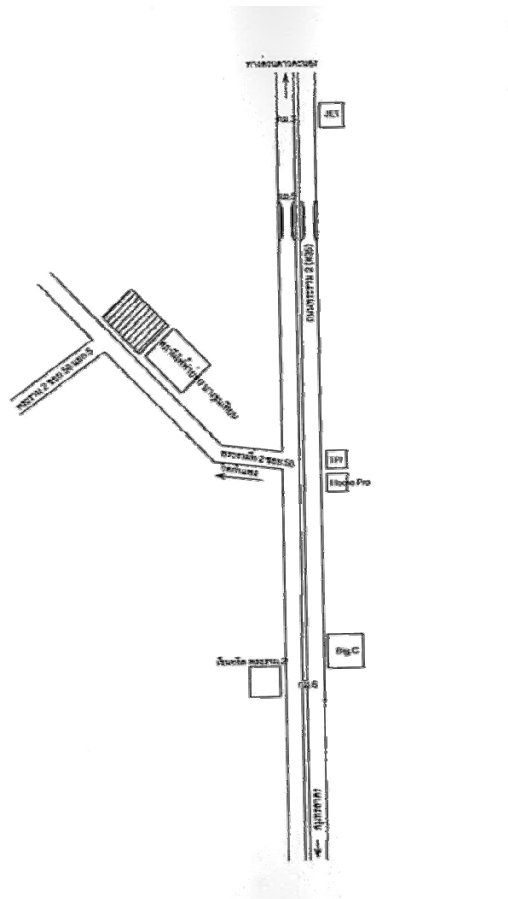
รูปที่ ๑๗ แผนที่ หน่วยงาน เซ็นทรัลพลาซ่า สาขาพระราม 2 พระราม 2



รูปที่ ๑๑๘ แผนที่ หน่วยงาน โรงงานฟุตบอลไทย ๒ ถ.คลองกรง



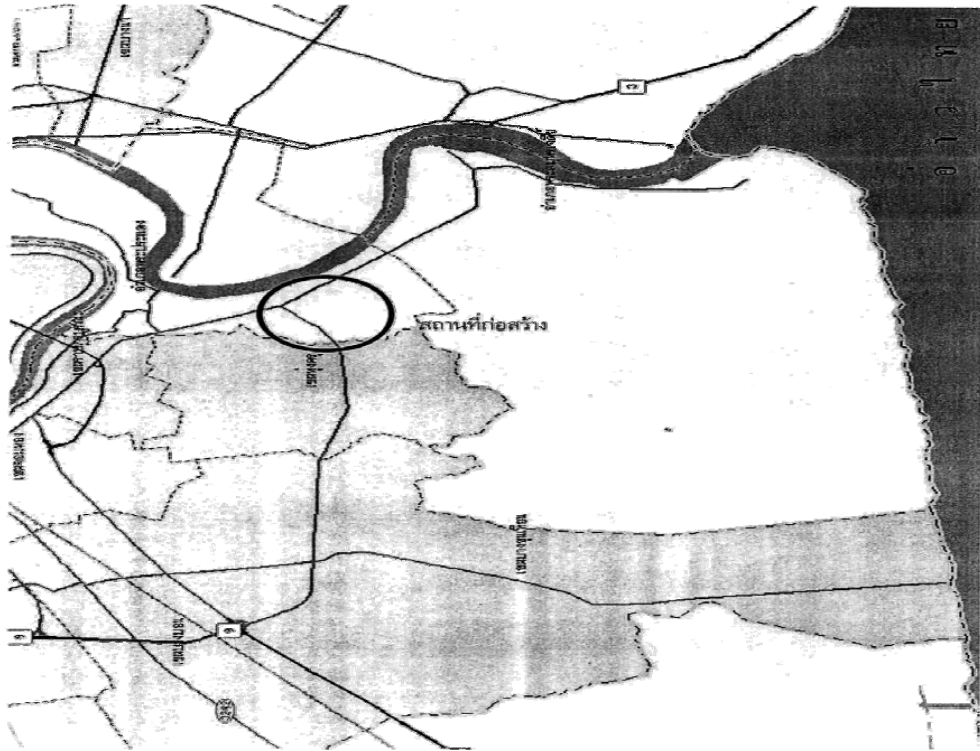
รูปที่ ๑๑๙ แผนที่ หน่วยงาน สุวรรณ รีเวอร์เฟลส ลาดกระบัง



รูปที่ จ22 แผนที่ หน่วยงาน เอส.พี.การ์เด็น แมนชั่น อ.ก้านน้มน้มน



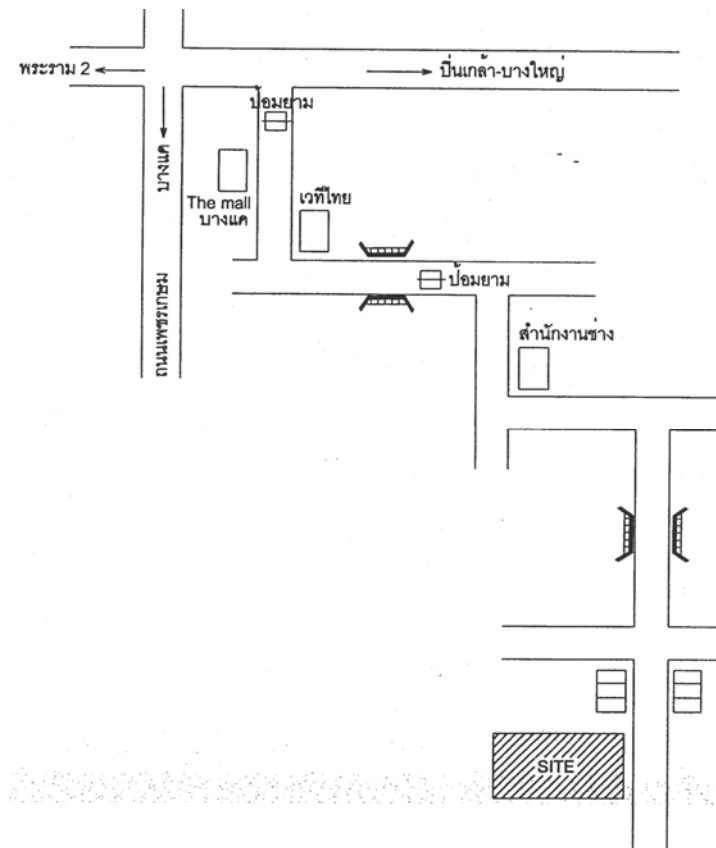
รูปที่ จ23 แผนที่ หน่วยงาน ศูนย์ฝึกและอบรมเด็กและเยาวชน บ้านกรูด บางนา



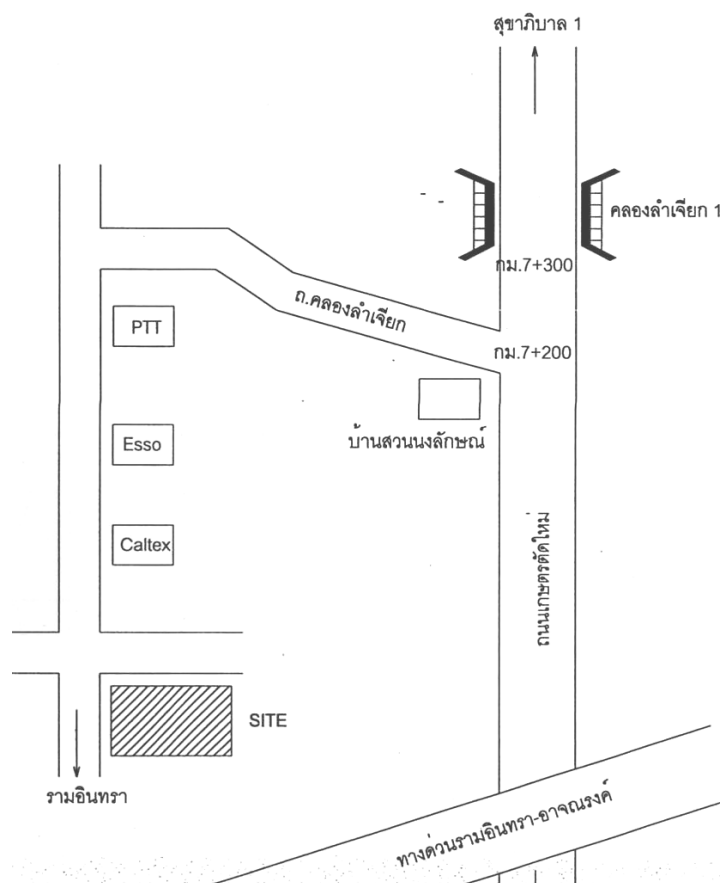
รูปที่ ๓26 แผนที่ หน่วยงาน โรงงานเคอะควอติตี้ไวย์ ธ.ประชาอุทิศ



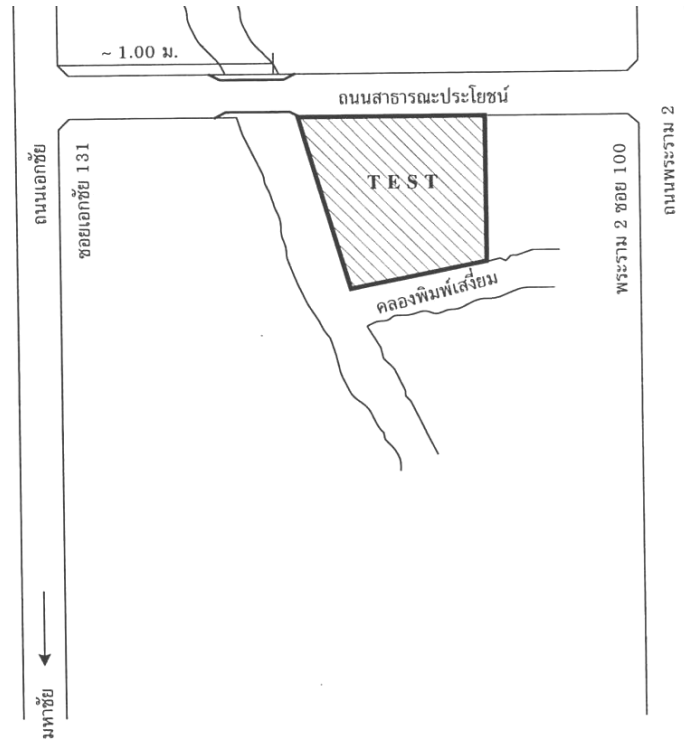
รูปที่ ๓27 แผนที่ หน่วยงาน โครงการ พกษัลดา ธ.วงแหวน-รัตนธิเบศร์



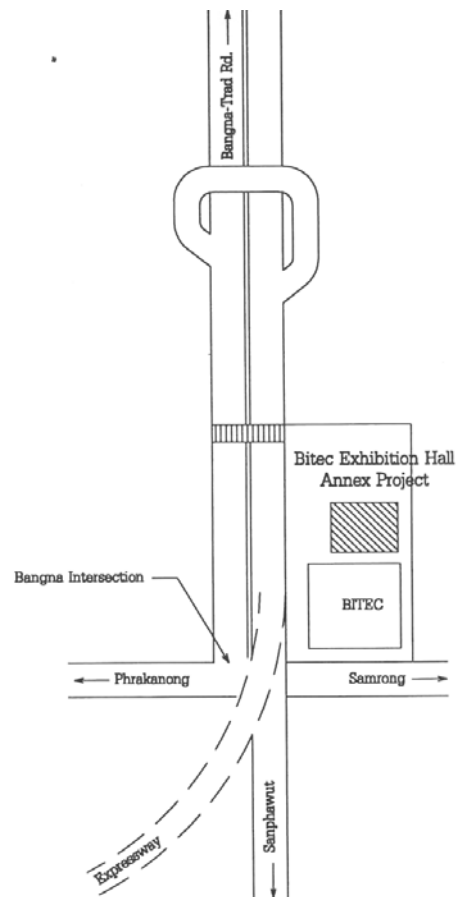
รูปที่ จ32 แผนที่ หน่วยงาน หมู่บ้านศุภวรรณ บางแค



รูปที่ จ33 แผนที่ หน่วยงาน หมู่บ้านปรีณศิริ ถ.นวลจันทร์

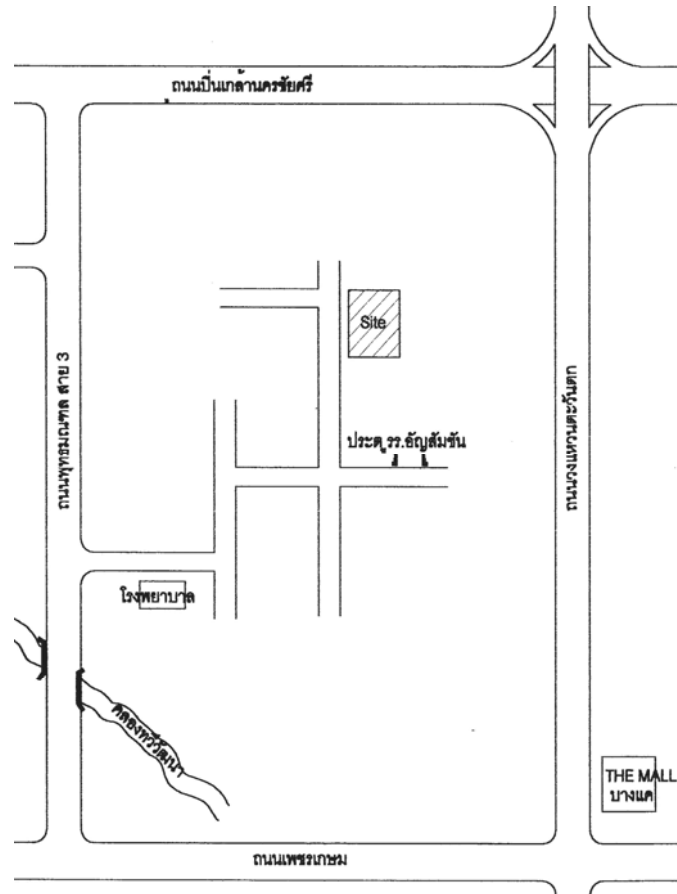


รูปที่ ๓34 แผนที่ หน่วยงาน บ้านพักอาศัย 4 ชั้น ซ.เอกชัย 131

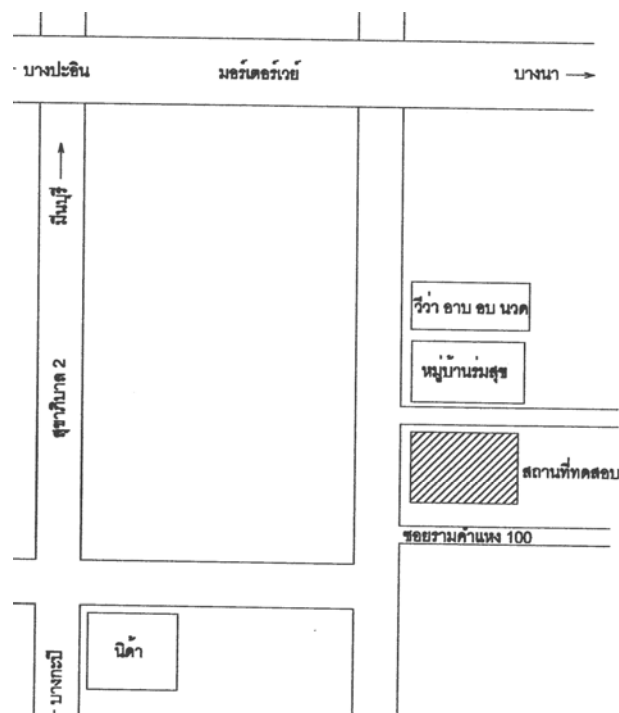


รูปที่ ๓35 แผนที่ หน่วยงาน BITEC EXHIBITION HALL ANNEX PROJECT

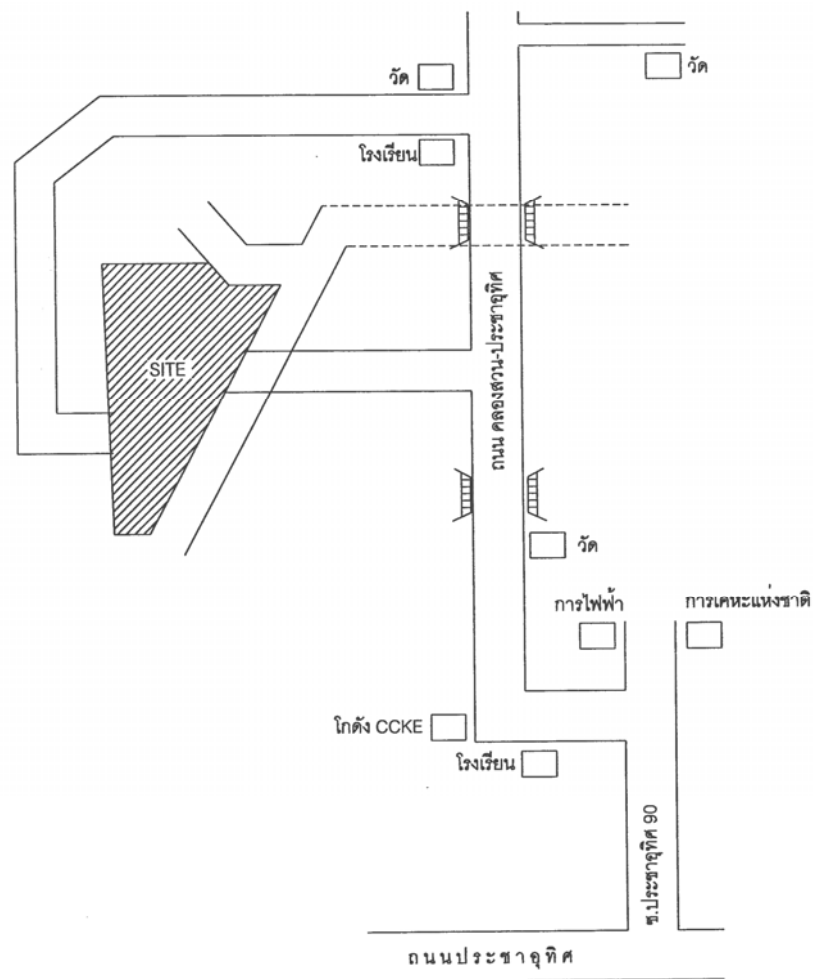
บางนา-ตราด



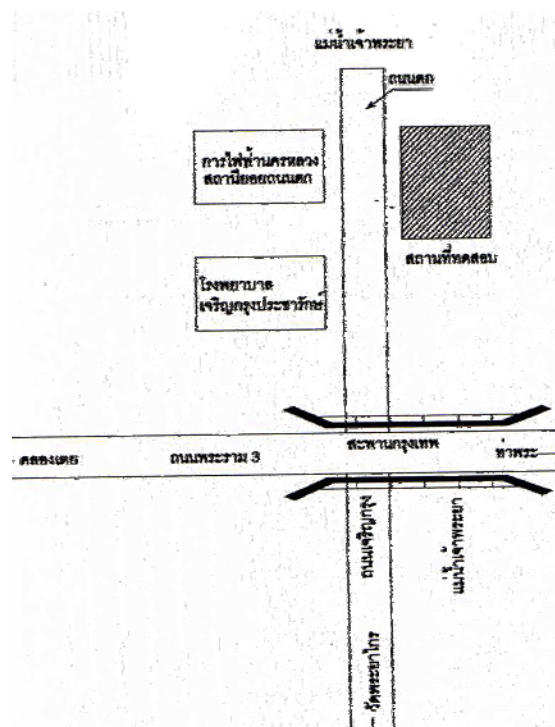
รูปที่ ๓36 แผนที่ หน่วยงาน อาคารบุคลากรและกิจกรรมเพื่อการศึกษา
รร. อัสสัมชัญ ธนบุรี



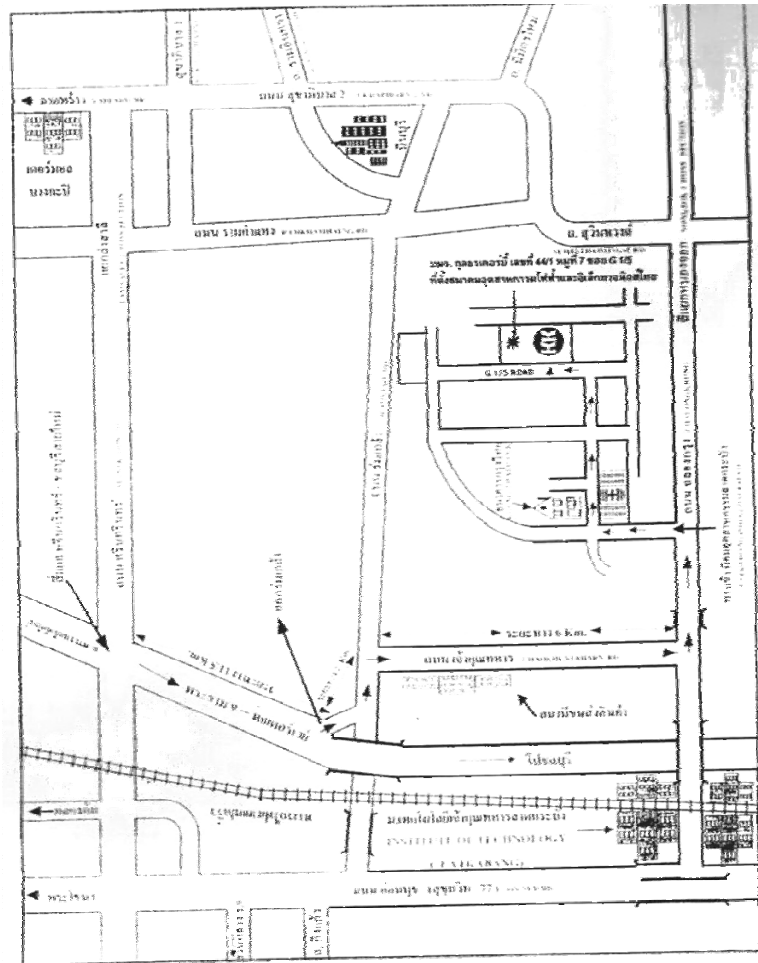
รูปที่ ๓37 แผนที่ หน่วยงาน บ้านรามคำแหง ซ.รามคำแหง 100 ถ.สุขาภิบาล 3



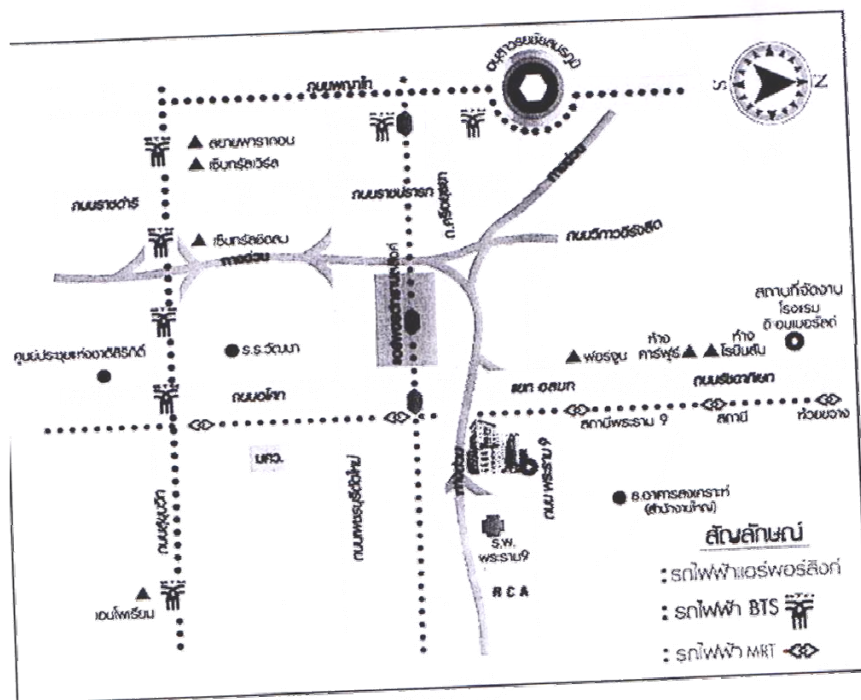
รูปที่ จ40 แผนที่ หน่วยงาน บ้านไทยสมบูรณ์ ประจักษ์ 90



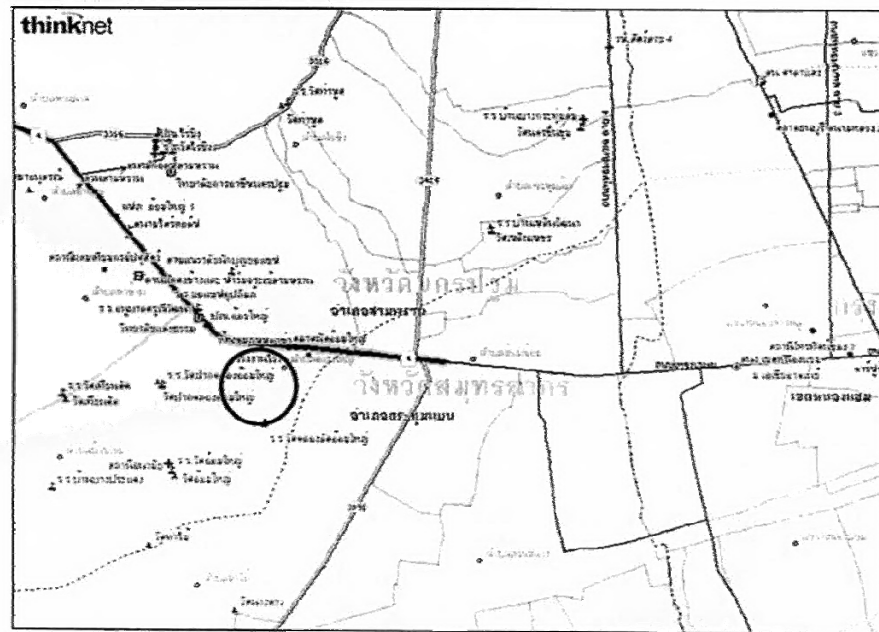
รูปที่ จ41 แผนที่ หน่วยงาน สนามฝึกซ้อมกอล์ฟ ถนนตก



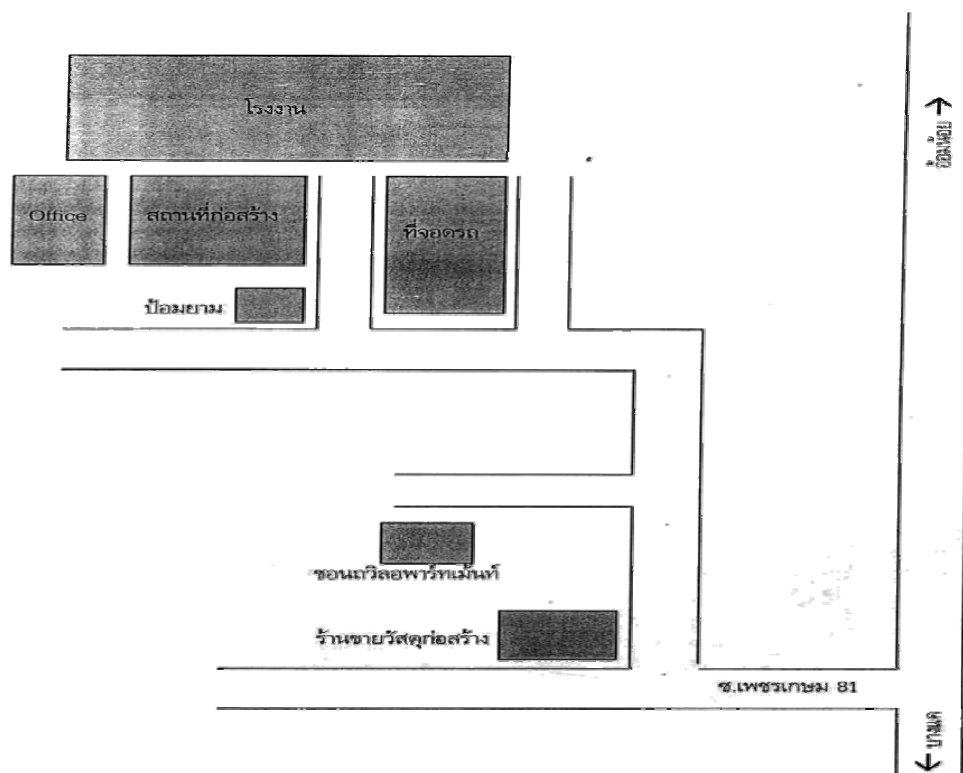
รูปที่ ๓4 แผนที่ หน่วยงาน โรงงานกุลธร เคอร์รี่ ลาดกระบัง



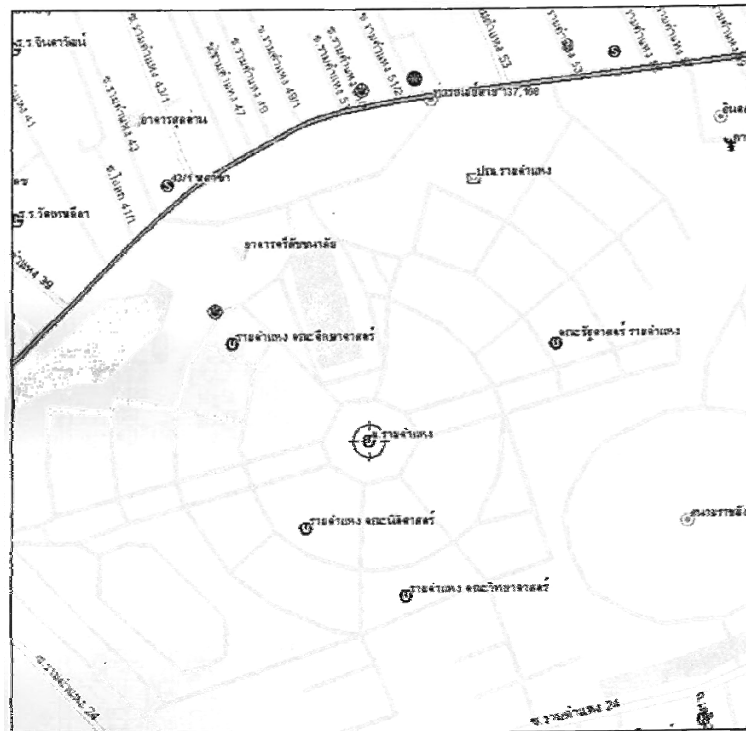
รูปที่ ๓5 แผนที่ หน่วยงาน PG RAMA9 CONDOMINIUM ถ.พระราม 9



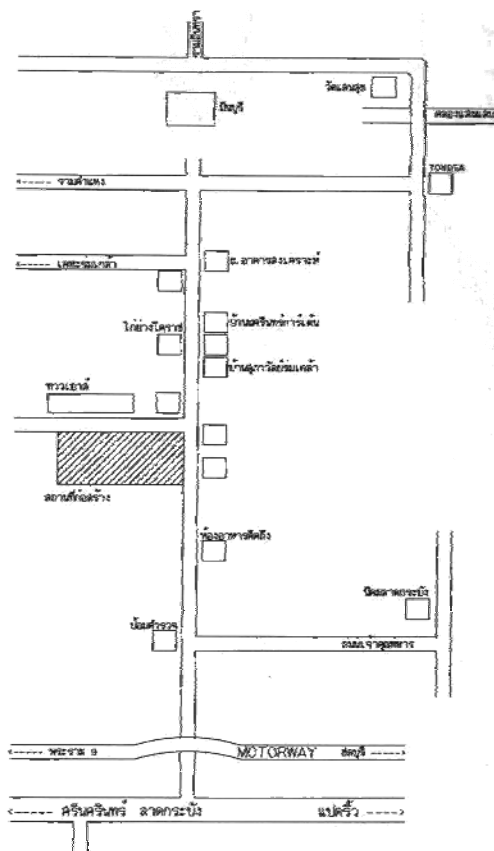
รูปที่ ๓48 แผนที่ หน่วยงาน อาคารพักอาศัย 8 ชั้น ซ. เพชรเกษม 101



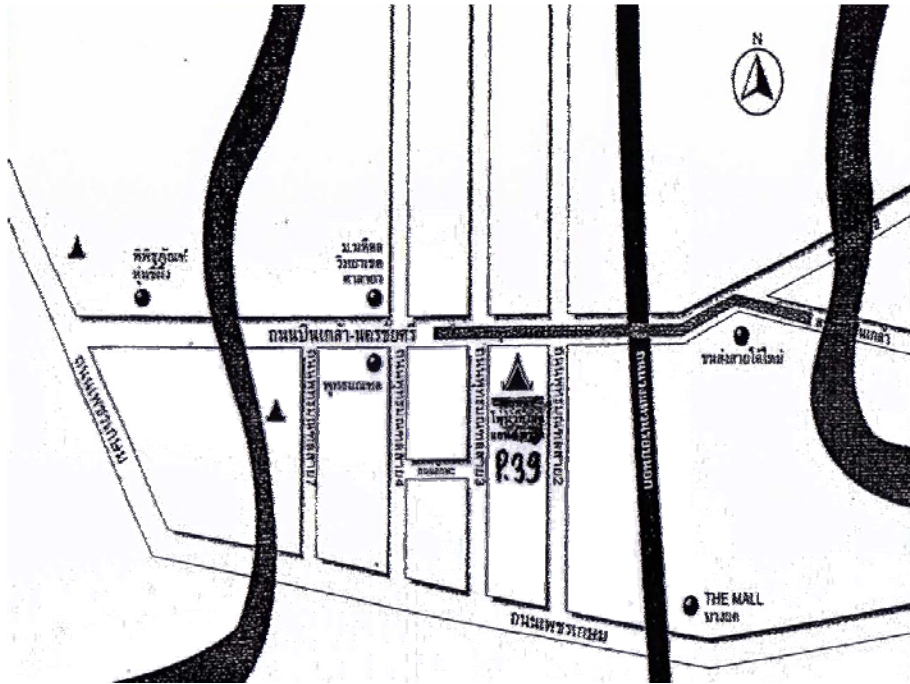
รูปที่ ๓49 แผนที่ หน่วยงาน อาคาร สนง.ผู้บริหารบริษัท ไทยรุ่งยูเนี่ยนคาร์ จำกัด
ซ. เพชรเกษม 81



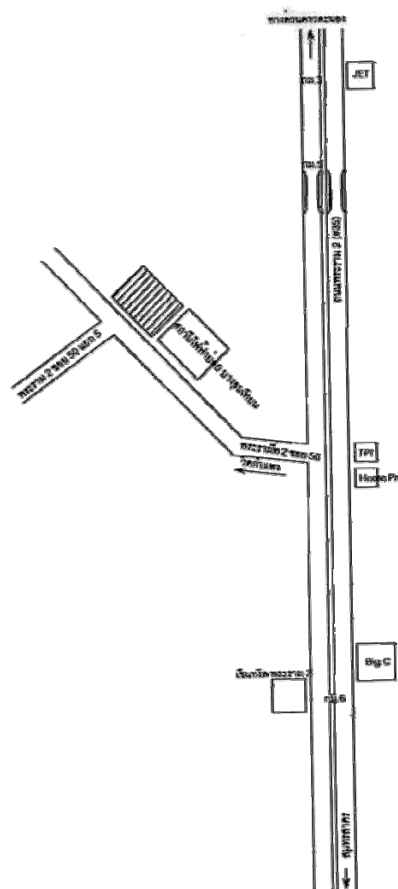
รูปที่ ๑50 แผนที่ หน่วยงาน อาคารบริการและบริหาร 5 ชั้น มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.รามคำแหง



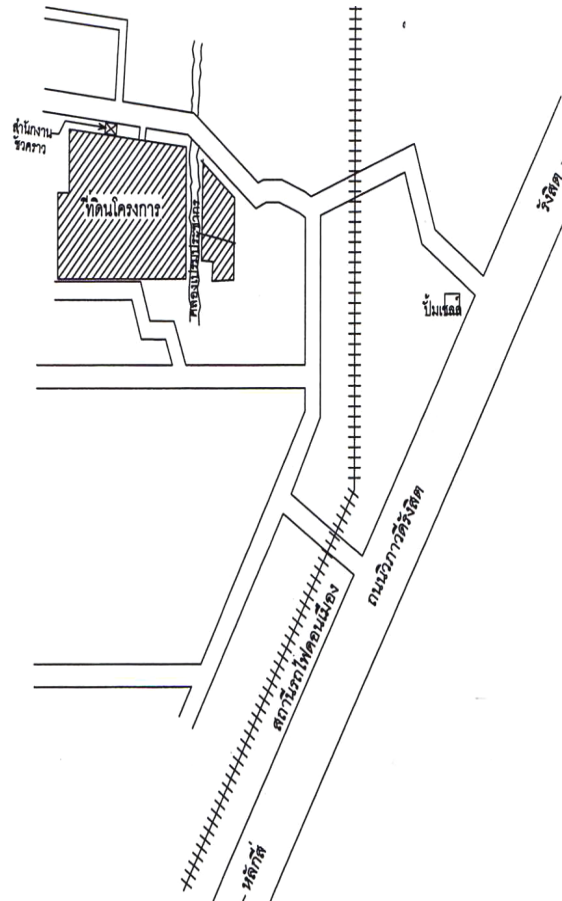
รูปที่ ๑51 แผนที่ หน่วยงาน ไชว์รูมและศูนย์บริการมาตรฐานโตโยต้าธนบุรี
(ไชว์รูมร่มเกล้า) อ.ร่มเกล้า-ลาดกระบัง



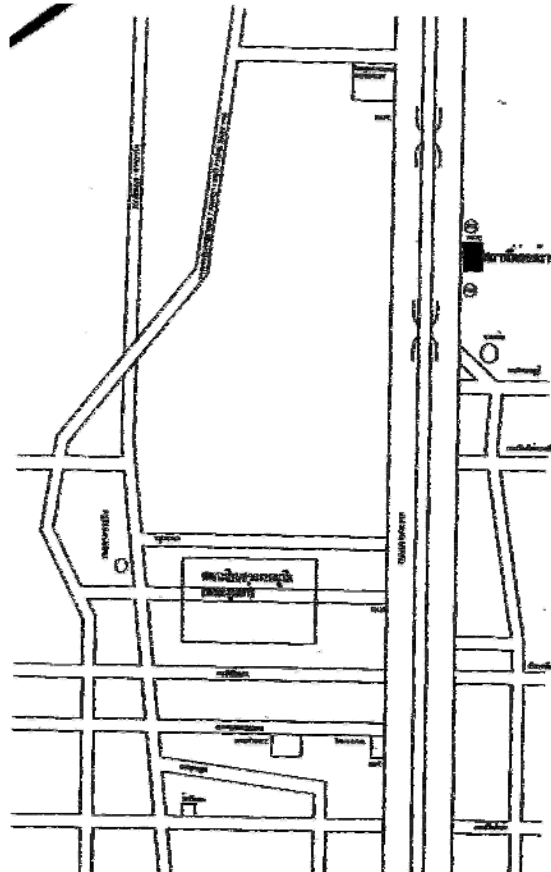
รูปที่ ๓52 แผนที่ หน่วยงาน KRISADA GRAND CASTLE LAKE & PARK
โครงการ 39 ถ.ปิ่นเกล้า-นครชัยศรี



รูปที่ ๓53 เอส.พี.การ์ดเดิน แมนชั่น ถ. กำนันมน



รูปที่ จ54 แผนที่ โครงการ GRAND CANAL DONMUANGถ.วิภาวดี-รังสิต



รูปที่ จ55 แผนที่ หน่วยงาน AUCTION HALL /WAREHOUSE บางนา-ตราด กม. 34



รูปที่ ๓56 แผนที่ หน่วยงาน ก่อสร้างอาคารหน่วยบริการอาคารจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยจุฬาซอย 9

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	กมลวรรณ แก้วมณี
วัน/เดือน/ปี	22 พฤษภาคม 2521
ที่อยู่	39 ม.6 ต.แม่ทอม อ.บางกล่ำ จ.สงขลา 90110
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2545-2546	บริษัท UPN Industrial Tech Co., LTD.
พ.ศ. 2546-2548	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548- 2551	บริษัท สีนอุดมคอนกรีต จำกัด
พ.ศ. 2551- ปัจจุบัน	บริษัท เพอร์เวอร์ อินจิเนียริง จำกัด (มหาชน)
ผลงานทางวิชาการ	
พ.ศ. 2551	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์กำลังรับน้ำหนักเบกทานสูงสุดของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ”การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่13
ทุนการศึกษา	
พ.ศ. 2550-2551	โครงการทุนวิจัย สกว.- บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ปี 2550