

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

ระบบประเมินการทรุดตัวของดินจากการสร้างอุโมงค์ใต้ดิน  
SUBSIDENCE ASSESSMENT DUE TO TUNNEL CONSTRUCTION



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SUBSIDENCE ASSESSMENT DUE TO TUNNEL CONSTRUCTION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อปริญญาบัตร** ระบบประเมินการหลุดตัวของดินจากการสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

**ชื่อนักศึกษา** นายชลิต บรรเจิดศิริกุล รหัสนักศึกษา 47010152  
นางสาวกิตติยา ศรีวัฒนาปิติกุล รหัสนักศึกษา 47010047

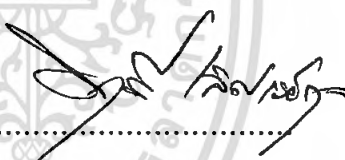
**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ. มยุรี เลิศเวชกุล  
ผศ.ดร.สุ��วีร์ สุวรรณสวัสดิ์

**ระดับการศึกษา** ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

**ภาควิชา** วิศวกรรมสารสนเทศ

**ปีการศึกษา** 2550

ปริญญาบัตรฉบับนี้ ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง



(ผศ.มยุรี เลิศเวชกุล)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร

**หัวข้อปริญญานิพนธ์** ระบบประเมินการทรุดตัวของดินจากการสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

**ชื่อนักศึกษา** นายชลิต บรรเจิดศิริกุล รหัสนักศึกษา 47010152

นางสาวกิตติยา ศรีวัฒนาปิติกุล รหัสนักศึกษา 47010047

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ. มยุรี เลิศเวชกุล

ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

**ระดับการศึกษา** ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

**ภาควิชา** วิศวกรรมสารสนเทศ

**ปีการศึกษา** 2550

### บทคัดย่อ

โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวของดิน ซึ่งนำไปสู่การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลและโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ในทั้งสองโครงการนี้ มีการเก็บข้อมูลค่าการทรุดตัว พารามิเตอร์การควบคุมหัวเจาะ สภาพชั้นดิน และปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการเรียนรู้และทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทยูทิลิตี้ โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และข้อจำกัดในการใช้โครงข่ายประสาทยูทิลิตี้และวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดิน โดยจำลองใช้ในกรณีศึกษาหลายกรณีด้วยกัน

**Thesis Title**      **SUBSIDENCE ASSESSMENT DUE TO TUNNEL CONSTRUCTION**  
**Student**            **Mr.Chalit Banjerdsirikul      ID. 47010152**  
                             **Ms. Kittiya Sriwuttanapitikul    ID. 47010047**  
**Advisor**            **Asst. Prof. Mayuree Lertwatechakul**  
                             **Asst. Prof. Suchatvee Suwansawat**  
**Graduate Level** **Bachelor Degree of Information Engineering**  
**Department**      **Information Engineering**  
**Academic Year** **2007**

## **ABSTRACT**

An approach based on an Artificial Neural Networks (ANN) was used to find a relationship between the many factors that effected the surface settlement. The Chaloen Ratchamongkhon Line (Bangkok MRTA project) and water tunnel from Saen Saep canal and Lat Phroa canal to Chao Phraya River were applied from ANN model to predicted surface settlements induced by Earth Pressure Balance (EPB) shield. The collected data on ground deformation, shield operation, condition of soil layer and other parameter that have effective were use to learn and test the efficient of ANN model. In this paper we reproduced with many case to study the probably and restriction of ANN to analysis surface settlement.

**KEYWORD :** Artificial neural networks, EPB shield tunneling, Bangkok MRTA, Settlement

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเรียบร้อยได้ก็ด้วยความเสียสละ ความอนุเคราะห์ และน้ำใจจากบุคคลหลายท่าน ขอขอบคุณ ผศ. มยุรี เติศเวชกุล และ ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยตรวจแก้ไขในส่วนที่บกพร่องต่าง ๆ รวมไปถึงพี่ต๋ม ที่คอยให้คำปรึกษาและตอบข้อซักถามต่าง ๆ เพื่อน ๆ ที่คอยแนะนำแหล่งความรู้ดีๆให้อยู่เสมอ นอกจากนี้ยังต้องขอขอบพระคุณคุณแม่ที่คอยสนับสนุนในทุกๆด้าน และสุดท้ายคือทางสถาบันที่ให้โอกาสในการแสดงออกถึงความรู้ที่ได้ศึกษามาตลอด 4 ปีที่ได้ศึกษาภายใต้รั้วสถาบันแห่งนี้



นายชลิต บรรเจิดศิริกุล

นางสาวกิตติยา ศรีวัฒนาปิติกุล

## สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการงาน	2
1.4 สถาปัตยกรรมของระบบ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ทฤษฎีการทรุดตัวของผิวดิน	3
2.1.1 สภาพชั้นดิน	3
2.1.2 วิธีการวัดการทรุดตัวของผิวดินและฐานข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์	3
2.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดิน	4
2.1.3.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์	5
2.1.3.2 สภาพทางธรณีวิทยา	5
2.1.3.3 การควบคุมหัวขุดเจาะ	6
ความดันหน้าหัวขุดเจาะ (Face Pressure)	6
ความเร็วขุดเจาะ (Penetration Rate)	6
มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching Angle)	6
การฉีดอัดน้ำปูนเพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (Tail Void Grouting)	7
2.2 ทฤษฎีนิวรอลเน็ตเวิร์ก (Neural Network Theory)	7
2.2.1 ความรู้พื้นฐานทางกายภาพของระบบเซลล์ประสาท	7
2.2.2 แบบจำลองเครือข่ายเซลล์ประสาท	12
2.2.3 การเรียนรู้ของโครงข่าย	15
2.2.3.1 การสอนแบบชี้แนะหรือดูแล (Supervised Learning)	15
2.2.3.2 การสอนแบบไม่มีการชี้แนะหรือไม่มีการดูแล (Unsupervised Learning)	15
2.2.3.3 รีอินฟอร์ซเมนต์เลิร์นนิง (Reinforcement Learning)	16

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.4 แบบจำลองของ ANNs	17
2.2.4.1 โครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้า (Feedforword Networks)	17
2.2.4.2 โครงข่ายที่มีการป้อนกลับ (Feedback Netorks)	18
2.2.5 การแพร่กระจายกลับ	19
2.2.6 กฎเดลต้าเอนกประสงค์ (Generalized Delta Rule : GDR)	20
2.2.7 ปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการสอน โครงข่ายด้วยวิธีแบ็คพร็อพกาเกชัน (Back- propagation) เพิ่มขึ้น	22
2.2.7.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก	22
2.2.7.2 อัตราเร็วในการเรียนรู้ (Learning rate)	22
2.2.7.3 โมเมนตัม (Momentum : $\alpha$ )	22
2.2.7.4 ไบแอส (Bias)	22
2.3 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของดิน	
2.3.1 หลักการในการทำระดับ (Principles of Leveling)	24
2.3.2 อินคลิโนมิเตอร์ ( Inclinometer )	26
2.3.3 เอ็กเทนโซมิเตอร์ ( Extensometer )	27
<b>บทที่ 3 การออกแบบโครงการ</b>	<b>28</b>
3.1 หลักการการทำงานของ โครงข่ายประสาทเทียมรูปแบบทั่วไป	28
3.2 การออกแบบ โครงข่ายประสาทเทียม ให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน	31
3.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพในการประมาณค่าการทรุดตัวในชั้นทราย	34
3.4 การแยกรูปแบบ โครงข่ายประสาทเทียมตามกลุ่มข้อมูล	36
3.5 การออกแบบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด ในขั้นตอนการฝึกสอน	39
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>43</b>
4.1 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป	43
4.2 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม ให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน	53
4.3 ผลการทดสอบการปรับปรุงประสิทธิภาพในการประมาณค่าการทรุดตัวในชั้นทราย	62
4.4 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการแบ่งกลุ่มข้อมูลตามความสัมพันธ์ของตัวแปร	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาดในการฝึกสอน	90
<b>บทที่ 5 สรุป</b>	<b>97</b>
5.1 สรุปผล	97
5.1.1 สรุปผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป	97
5.1.2 สรุปผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน	99
5.1.3 สรุปการทดสอบการปรับปรุงประสิทธิภาพในการ ประมาณค่าการทรุดตัวในชั้นทราย	100
5.1.4 สรุปการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการแยกกลุ่มข้อมูลตาม ความสัมพันธ์ของตัวแปร	100
5.1.5 สรุปการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด ในการฝึกสอน	100
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา	101
5.3 แนวทางการพัฒนา	102
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>103</b>

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพมหานครลวดแนวการขุดเจาะอุโมงค์	3
รูปที่ 2.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวของดิน	4
รูปที่ 2.3 มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching Angle)	6
รูปที่ 2.4 การสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสประสาท	9
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน	11
รูปที่ 2.7 แสดงสภาวะต่างๆของเซลล์ประสาท (ก) ขณะพัก (2) ขณะกระตุ้นและ (3) ขณะถูกยับยั้ง	11
รูปที่ 2.8 แสดงศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดจากการรวมกันของซินแนปส์	12
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์ก	13
รูปที่ 2.10 Activate Function แบบชนิดต่างๆ	14
รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของ Supervised Learning	15
รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของ Unsupervised Learning	16
รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของรีอินฟอร์ชमेंท์เลิร์นนิง	16
รูปที่ 2.14 โครงข่าย Feedforward แบบชั้นเดียว (ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อกไดอะแกรม	18
รูปที่ 2.15 โครงข่ายป้อนกลับแบบไม่ต่อเนื่องชั้นเดียว (ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อกไดอะแกรม	18
รูปที่ 2.16 โครงข่าย Multilayer Perception ที่มี 3 ชั้น	19
รูปที่ 2.17 แผนภูมิการสอนแบบ Error Back-propagation ที่มี I ชั้น	23
รูปที่ 2.18 การถ่วงระดับแบบต่อเนื่อง	24
รูปที่ 2.19 อินคลิโนมิเตอร์	26
รูปที่ 2.20 เอ็กเทนโซมิเตอร์	27
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม การทำงานในการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมเดิม	30
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรม การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน	32
รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรม ทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีการแบ่งโครงข่ายให้ เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 บล็อกโคอะแกรมขั้นตอนการแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอน	35
รูปที่ 3.5 บล็อกโคอะแกรมขั้นตอนการแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอน	35
รูปที่ 3.6 บล็อกโคอะแกรม การทำงาน ในการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมในชั้นทราย	36
รูปที่ 3.7 บล็อกโคอะแกรมการแยกกลุ่มข้อมูลชุดฝึกสอน	37
รูปที่ 3.8 บล็อกโคอะแกรมการแยกกลุ่มข้อมูลชุดทดสอบ	38
รูปที่ 3.9 แสดงเวกเตอร์ค่าน้ำหนักที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์สำหรับทุก ๆ สองบรรทัดข้อมูล	40
รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์การปรับค่าน้ำหนักและเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์สำหรับทุก ๆ สองบรรทัดข้อมูล	40
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งจุดของค่าน้ำหนักใน โครงข่ายประสาทเทียมที่ทำให้ความผิดพลาด มีค่าน้อยกว่าครึ่งค่าน้ำหนัก	41
รูปที่ 3.12 บล็อกโคอะแกรมการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเพิ่มส่วนที่ใช้พิจารณา ค่าความผิดพลาด	42
รูปที่ 4.1 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน A	43
รูปที่ 4.2 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน A	44
รูปที่ 4.3 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B	45
รูปที่ 4.4 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B	46
รูปที่ 4.5 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน C	47
รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน C	48
รูปที่ 4.7 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน D	50
รูปที่ 4.8 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน D	51
รูปที่ 4.9 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นคิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน A	54
รูปที่ 4.10 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นคิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B	56
รูปที่ 4.11 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นคิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน C	58
รูปที่ 4.12 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นคิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน D	60
รูปที่ 4.13 กราฟทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดใน โครงการแรก	62
รูปที่ 4.14 กราฟทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทรายใน โครงการแรก	63

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 กราฟทดสอบขั้นทราย โดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดใน โครงการแรกและ โครงการ BMA	64
รูปที่ 4.16 กราฟทดสอบขั้นทราย โดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นขั้นทราย-ขั้นทรายใน โครงการแรกและ โครงการ BMA	65
รูปที่ 4.17 กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยแบ่งรูปแบบ โครงข่ายตามกลุ่มข้อมูล	89
รูปที่ 4.18 กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน A	91
รูปที่ 4.19 กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน B	92
รูปที่ 4.20 กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน C	93
รูปที่ 4.21 กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน D	94

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทรุดตัวของดินขณะขุดเจาะอุโมงค์	5
ตารางที่ 2.2 แสดงการปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกฎการสอนแบบต่างๆ	17
ตารางที่ 3.1 สถาปัตยกรรม โครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 แบบ	29
ตารางที่ 3.2 รูปแบบชนิดชั้นดินที่หัวเจาะฝังตัวอยู่	31
ตารางที่ 3.3 รูปแบบชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบที่ใช้ทดสอบการประมาณค่าในชั้นทราย	34
ตารางที่ 4.1 ค่า RMSE ของผลการทดสอบ โครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ โซน A	51
ตารางที่ 4.2 ค่า RMSE ของผลการทดสอบ โครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ โซน B	51
ตารางที่ 4.3 ค่า RMSE ของผลการทดสอบ โครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ โซน C	52
ตารางที่ 4.4 ค่า RMSE ของผลการทดสอบ โครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ โซน D	52
ตารางที่ 4.5 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน A	55
ตารางที่ 4.6 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B	57
ตารางที่ 4.7 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน C	59
ตารางที่ 4.8 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน D	61
ตารางที่ 4.9 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดใน โครงการแรก	66
ตารางที่ 4.10 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทรายใน โครงการแรก	66
ตารางที่ 4.11 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดในโครงการแรกและ โครงการ BMA	66
ตารางที่ 4.12 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทรายใน โครงการแรกและ โครงการ BMA	67
ตารางที่ 4.13 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)	69
ตารางที่ 4.14 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)	70

## สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.15 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)	71
ตารางที่ 4.16 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)	72
ตารางที่ 4.17 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)	73
ตารางที่ 4.18 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)	77
ตารางที่ 4.19 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)	78
ตารางที่ 4.20 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)	79
ตารางที่ 4.21 กลุ่มข้อมูลที่ 3 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)	80
ตารางที่ 4.22 กลุ่มข้อมูลที่ 3 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)	81
ตารางที่ 4.23 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นทราย (ชุดฝึกสอน)	82
ตารางที่ 4.24 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นทราย (ชุดทดสอบ)	86
ตารางที่ 4.25 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นทราย (ชุดฝึกสอน)	87
ตารางที่ 4.26 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นทราย (ชุดทดสอบ)	88
ตารางที่ 4.27 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยแบ่งรูปแบบ โครงข่ายตามกลุ่มข้อมูล	90
ตารางที่ 4.28 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โซน A	95
ตารางที่ 4.29 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โซน B	95
ตารางที่ 4.30 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โซน C	95
ตารางที่ 4.31 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โซน D	96
ตารางที่ 5.1 ค่า Mean ของ RMSE ในการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป	97
ตารางที่ 5.2 ผลของงานวิจัยที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเดียวกัน	98
ตารางที่ 5.3 ค่าความแปรปรวนของ RMSE ในการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป	99

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

ในสังคมยุคปัจจุบันประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างเช่นประเทศไทยนั้นการก่อสร้างสาธารณูปโภคเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนา และการคมนาคมกลายเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งของระบบเศรษฐกิจ ประเทศไทยพยายามที่จะพัฒนาระบบคมนาคมเพื่อความสะดวกรวดเร็วโดยการเพิ่มระบบรถไฟฟ้าใต้ดินและในอนาคตอาจกลายเป็นการคมนาคมหลักดังเช่นประเทศที่พัฒนาแล้วทั่วๆไป การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในปัจจุบันนิยมใช้เทคโนโลยีการขุดเจาะโดยใช้หัวขุดเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shields) ซึ่งเป็นวิธีที่ทันสมัยและเหมาะสำหรับการขุดอุโมงค์ในดินอ่อน อย่างไรก็ตามการขุดเจาะดังกล่าวยังคงมีผลกระทบที่เกิดขึ้นต่ออาคารบ้านเรือนและพื้นถนนในบริเวณใกล้เคียง บ่อยครั้งส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินแต่ในปัจจุบันยังคงไม่มีวิธีใดที่สามารถพยากรณ์ผลกระทบจากการขุดอุโมงค์โดยวิธีแรงดันดินสมดุลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งถ้าไม่สามารถคาดการณ์ถึงการทรุดตัวของชั้นดินได้ล่วงหน้าอาจจะส่งผลร้ายแรงต่ออาคารบ้านเรือน ไม่สามารถแก้ไขได้ทันเวลาที่ทางผู้จัดทำโครงการได้สังเกตเห็นความสำคัญในเรื่องนี้จึงได้นำเทคโนโลยีด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิศวกรรมอุโมงค์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์สภาพการทรุดตัวของดินได้ล่วงหน้าเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

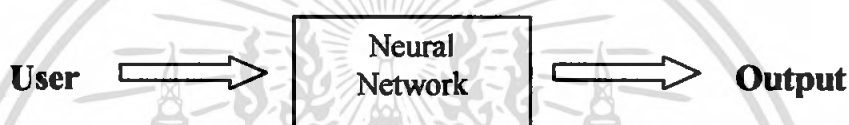
### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- ศึกษาและวิเคราะห์ระบบ AI โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อประมวลผลให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
- พัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- พัฒนาระบบการขุดเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ลดอัตราความเสี่ยงในการก่อสร้างให้มากขึ้น
- ช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- ระบบต้องสามารถพยากรณ์การทรุดตัวของพื้นดินในบริเวณที่มีการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินได้
- ระบบต้องสามารถรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโอกาสในการทรุดตัวของพื้นดินและสามารถประมวลผลได้ทันทีทั้งในขณะที่ทำการขุดเจาะและภายหลังการขุดเจาะ
- ระบบปฏิบัติการนี้จะต้องสามารถเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันอื่น ๆ ซึ่งจะต้องสามารถเรียกใช้งานเซอร์วิสในส่วนนี้ได้โดยง่าย

### 1.4 สถาปัตยกรรมของระบบ



### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

- ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีเครือข่ายประสาทเทียม การเขียนโปรแกรมด้วยแมทแล็บ
- ศึกษาเครือข่ายประสาทเทียมรูปแบบที่มีใช้แล้วและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ (13 ตัว) พร้อมทั้งทดสอบเพื่อให้ได้ค่าการประมวลผลใกล้เคียงข้อมูลเดิม
- วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีอยู่โดยเลือกตัดพารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องบางตัวทิ้งไปแล้วลองทำการทดสอบการทำงาน
- เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับค่าเดิมที่เคยใช้เป็นหลักทำการทดสอบซ้ำ โดยคิดแนวทางใหม่ เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ จนสามารถได้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด สรุปผลการทดสอบ และยึดแนวทางนั้นในการใช้งาน

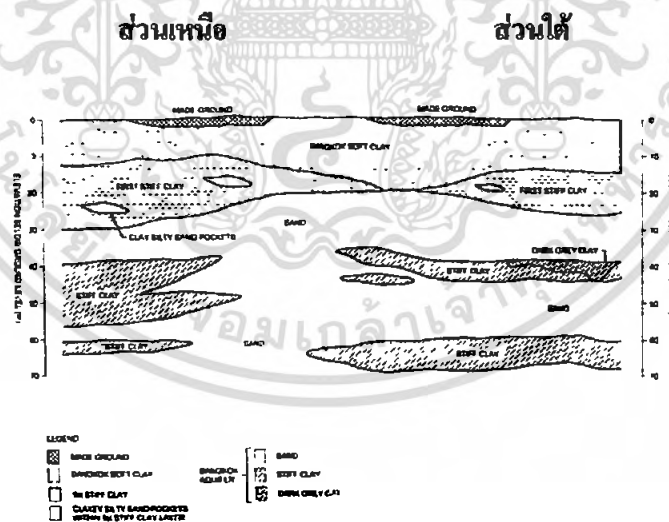
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีการทรุดตัวของผิวดิน [4]

#### 2.1.1 สภาพชั้นดิน

ชั้นดิน ในกรุงเทพฯ เป็นชั้นดินที่เกิดจากการทับถมในปากลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งระดับผิวดินจะสูงประมาณ 0.5 – 1 เมตร จากระดับน้ำทะเล โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ได้ทำการสำรวจสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของดินทั้งจากอุปกรณ์ภาคสนามและการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยชั้นดินของกรุงเทพฯ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งสังเกตได้ว่าส่วนเหนือจะมีชั้นดินที่เป็นชั้นแยกกันชัดเจน (Uniform Layer) โดยเริ่มต้นจากชั้นดินเหนียวอ่อนลงมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทราย ซึ่งอุโมงค์จะถูกขุดเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามในส่วนใต้ชั้นดินจะแตกต่างจากส่วนเหนือ โดยจะไม่พบชั้นดินเหนียวแข็งในบางตำแหน่งและอุโมงค์ในบางช่วงยังถูกขุดในระดับที่ลึกกว่าส่วนเหนือทำให้อุโมงค์ลงไปอยู่ในชั้นทราย ระดับน้ำใต้ดินจะพบที่ระดับลึก 22 – 24 เมตร



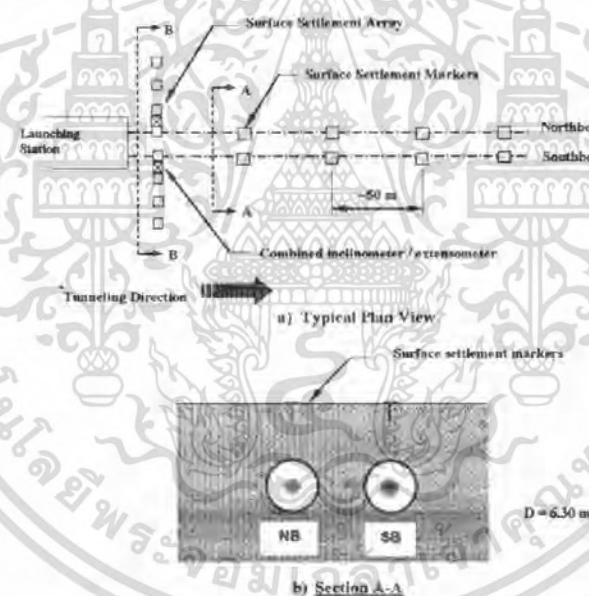
รูปที่ 2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพตลอดแนวการขุดเจาะอุโมงค์

#### 2.1.2 วิธีการวัดการทรุดตัวของผิวดินและฐานข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์

เนื่องจากอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินต้องขุดผ่านบริเวณพื้นที่เมืองที่มีสิ่งปลูกสร้างอยู่อย่างหนาแน่น (รูปที่ 2.1) ปัญหาการทรุดตัวของดินจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นเพื่อตรวจสอบค่าการทรุดตัวจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดทางธรณีเทคนิคเป็นจำนวนมากตลอดแนวเส้นทางอุโมงค์ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเอกสารนี้หรือมีข้อสงสัย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในรูปที่ 2.2 โดยเฉพาะหมุดวัดการทรุดตัวของดิน (Surface Settlement Marker) จะถูกติดตั้งเป็นระยะห่างประมาณ 50 เมตร ตลอดแนวกลางอุโมงค์ทั้งสองอุโมงค์ตลอดแนวเส้นทาง ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลจากการวัดการทรุดตัวของดินจากอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นจำนวนมากและได้จัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งได้สร้างขึ้นมาเพื่อรวบรวมปัจจัยและข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินทั้งหมดโดยประกอบด้วย (1) ข้อมูลสภาพชั้นดิน (2) ข้อมูลพิกัดและตำแหน่งของหัวเจาะ (3) ข้อมูลพารามิเตอร์การควบคุมหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล และ (4) ข้อมูลจากการวัดการเคลื่อนตัวของดินจากเครื่องมือทางธรณีเทคนิคที่ติดตั้งทั้งหมด ดังนั้นฐานข้อมูลนี้จึงสามารถรวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวของดิน ได้ทั้งหมดอีกทั้งยังจัดเป็นรูปแบบพร้อมที่จะป้อนเข้าสู่การคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการเรียนรู้หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดกับการทรุดตัวของดิน และนำไปใช้ในการพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวของดิน

### 2.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดิน

จากการศึกษาโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะอุโมงค์ที่ผ่านมาและข้อมูลวิเคราะห์ที่ได้จากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการเจาะอุโมงค์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักดังนี้ (ตารางที่ 2.1)

1. ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel Geometry)
2. สภาพทางธรณีวิทยา (Geological Condition)
3. การควบคุมหัวเจาะ (Shield Operation Factors)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลสำคัญ เพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการคำนวณ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าการทรุดตัวของผิวดินขณะขุดเจาะอุโมงค์

**ตารางที่ 2.1** ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของดินขณะขุดเจาะอุโมงค์

กลุ่มปัจจัย	ปัจจัย
1. ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel Geometry)	1.1 ความลึกของอุโมงค์ (เมตร) 1.2 ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (เมตร)
2. สภาพทางธรณีวิทยา (Geological Condition)	2.1 ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ 2.2 ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ 2.3 ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (เมตร)
3. การควบคุมหัวขุดเจาะ (Shield Operation Factors)	3.1 ความดันหน้าหัวขุดเจาะ (Face Pressure, kPa) 3.2 ความเร็วขุดเจาะ (Penetration Rate, mm/min) 3.3 มุมก้มหรือมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching Angle, degree) 3.4 ความดันของการฉีดน้ำปูน เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (Grouting Pressure, bar) 3.5 เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent Grout Filling, %)

### 2.1.3.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะทั่วไปของอุโมงค์จะประกอบด้วย (1) ความลึกของอุโมงค์ และ (2) ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ทั้งสองปัจจัยนี้จะส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของดินแม้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ก็มีผลต่อการทรุดตัวของดินด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากหากอุโมงค์ยังมีขนาดใหญ่ปริมาตรการขุดเจาะยิ่งมากก็มักก่อให้เกิดการสูญเสียมวลดิน หรือ Ground Loss เป็นปริมาณที่มากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กเป็นธรรมดา อย่างไรก็ตามฐานข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณถูกนำมาจากการขุดอุโมงค์ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่คือ 6.3 เมตร ตลอดแนวเส้นทาง ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์จึงไม่มีผลกระทบใด ๆ ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์สำหรับโครงการนี้

### 2.1.3.2 สภาพทางธรณีวิทยา

ปัจจัยที่เกิดจากสภาพของดินขณะที่หัวเจาะอุโมงค์ผ่าน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ปัจจัย คือ (1) ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ (Tunnel Crown) และ (2) ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

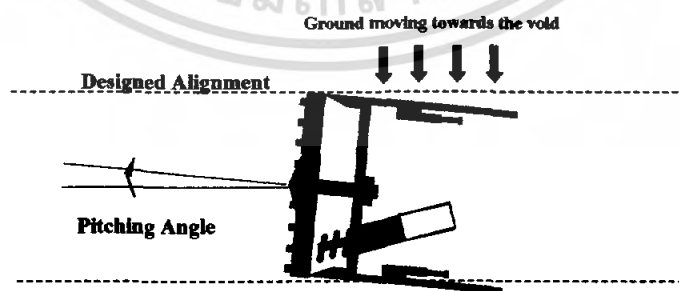
อุโมงค์ (Tunnel Invert) และ (3) ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนต่ำสุด (Invert) ของอุโมงค์ ในกรณีของการขุดเจาะอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ ดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์มักจะเป็นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) หรือดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของอุโมงค์ ส่วนดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์มักพบเป็นดินเหนียวแข็งหรือชั้นทรายแน่น (Dense Sand) ในกรณีของระดับน้ำใต้ดินในบริเวณกรุงเทพฯ มักจะอยู่ที่ระดับลึก 22 – 24 เมตร จากผิวดิน

### 2.1.3.3 การควบคุมหัวขุดเจาะ

**ความดันหน้าหัวขุดเจาะ (Face Pressure)** หัวขุดเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล จะทำงานโดยการควบคุมปริมาณการขุดดินออกให้เหมาะสมขณะที่ยังรักษาความดันหน้าหัวขุดให้ใกล้เคียงกับแรงดันดินด้านนอก ทั้งนี้เพื่อสร้างความสมดุลระหว่างแรงดันดินภายในห้องรับดิน (Earth Chamber) ด้านหน้าของหัวขุดกับแรงภายนอกเพื่อป้องกันการพังทลายของดินขณะทำการขุด ซึ่งแรงดันดินที่วัดได้ภายในห้องรับดินนี้เองมักจะนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญเพื่อควบคุมการทำงานของหัวขุดเจาะเพื่อลดปัญหาการทรุดตัวของดินขณะการขุดเจาะ

**ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration Rate)** ความเร็วขณะขุดเจาะเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญขณะขุดเจาะอุโมงค์ ทั้งนี้เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการลำเลียงดินออกจากห้องรับดินหน้าหัวขุด และการถีบตัวไปข้างหน้าของหัวขุดเจาะ

**มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching Angle)** ในทางทฤษฎีหัวขุดเจาะจะต้องรักษาระดับให้ตรงกับแนวอุโมงค์ที่ได้ออกแบบไว้ แต่ในทางปฏิบัตินั้นเป็นการยากยิ่งที่จะรักษาระดับตลอดเวลา ซึ่งค่าเบี่ยงเบนในแนวตั้งจะถูกวัดเป็นมุมก้มหรือมุมเงย (รูปที่ 2.3) จะส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียดินขณะขุดเจาะ



รูปที่ 2.3 มุมก้มมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching Angle)

การฉีดอัดน้ำปูนเพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (Tail Void Grouting) มีความสัมพันธ์ต่อปริมาณการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) และการทรุดตัวของผิวดิน ช่องว่างหลังผนังอุโมงค์นี้เกิดขึ้นขณะที่หัวขุดเคลื่อนตัวออกไปข้างหน้าเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขุดจะใหญ่กว่าอุโมงค์ โดยปกติแรงดันของการฉีดอัดน้ำปูน (Grouting Pressure) จะต้องสูงเพียงพอที่จะต้านทานแรงดันดินที่เคลื่อนตัวเข้าปิดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์และสามารถดันน้ำปูนให้กระจายตัวอุดช่องว่างได้เร็วที่สุด นอกจากนี้แล้วเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent Grout Filling) จะต้องมากกว่าปริมาณของช่องว่างที่คำนวณได้อย่างน้อย 120 -150 เปอร์เซ็นต์

## 2.2 ทฤษฎีระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Theory)

หลายศตวรรษมาแล้วที่มนุษย์ได้ประดิษฐ์และพัฒนาเครื่องจักรขึ้นมาเราจะเห็นว่าเครื่องจักรเหล่านี้จะถูกใช้สำหรับงานที่มีความยุ่งยากซับซ้อนและเป็นงานที่ซ้ำ ๆ ซาก ๆ ซึ่งถ้าใช้คนทำอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย ในสมัยแรกๆอาจจะเริ่มจากเครื่องจักรที่มีการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น คาน , รอก เป็นต้น และต่อมาได้ประดิษฐ์สิ่งที่มีความซับซ้อนขึ้นมาเรื่อย ๆ เช่น เครื่องจักรกล , หุ่นยนต์ และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น จนกระทั่งปัจจุบันนี้วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์แขนงต่าง ๆ ได้พยายามที่จะพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีความฉลาดยิ่งขึ้น โดยพยายามให้เครื่องคอมพิวเตอร์มีการเรียนรู้และสามารถตัดสินใจเองได้หรือเป็นส่วนช่วยในการตัดสินใจขั้นต้นได้ ระบบแบบจำลองระบบโครงข่ายประสาทเทียมหรือระบบแบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์ค (Artificial Neural Network System: ANNs) เป็นตัวอย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ มีศักยภาพมากขึ้น

ระบบโครงข่ายประสาทเทียม คือระบบคอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบโครงสร้างการทำงานของสมองมนุษย์ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ คุณลักษณะของสมองที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานของระบบโครงข่ายประสาทเทียม คือ สถาปัตยกรรมแบบกระจาย (Distribute) และขนาน (Parallel) ของเซลล์ต่าง ๆ และความสามารถในการเรียนรู้และการปรับตัวตามข้อมูลที่ได้รับจากสภาพแวดล้อมภายนอก

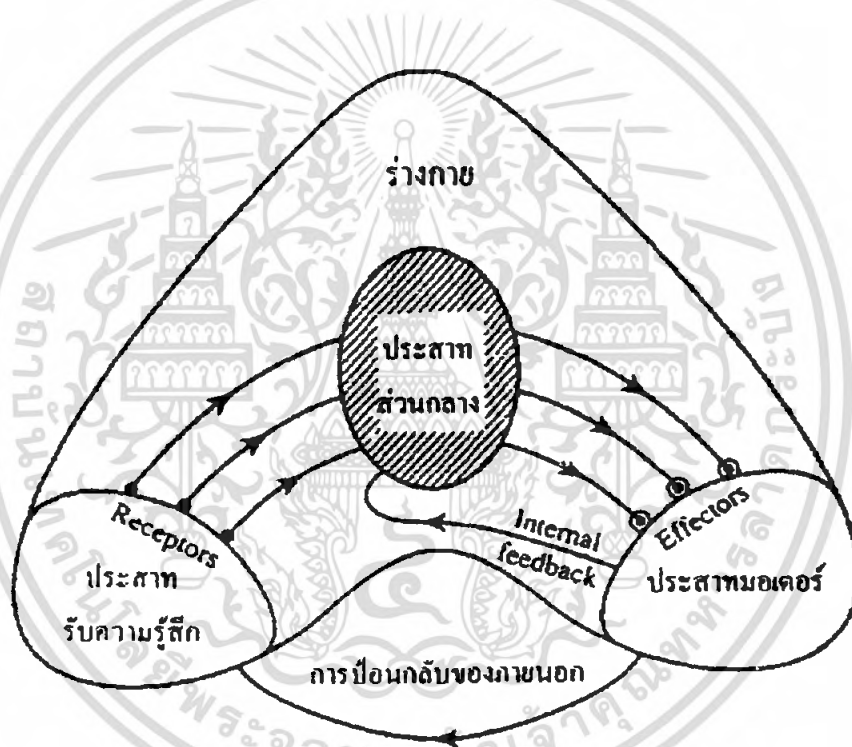
### 2.2.1 ความรู้พื้นฐานทางกายภาพของระบบเซลล์ประสาท

ระบบประสาทมีหน้าที่ควบคุมรักษาสมดุลภายในร่างกายให้คงที่ ระบบประสาทของมนุษย์เป็นระบบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งจะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neurons) ประมาณ  $10^{11}$  เซลล์ และเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทตัวอื่นอีกประมาณ  $10^4$  เซลล์ ระบบประสาทมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ

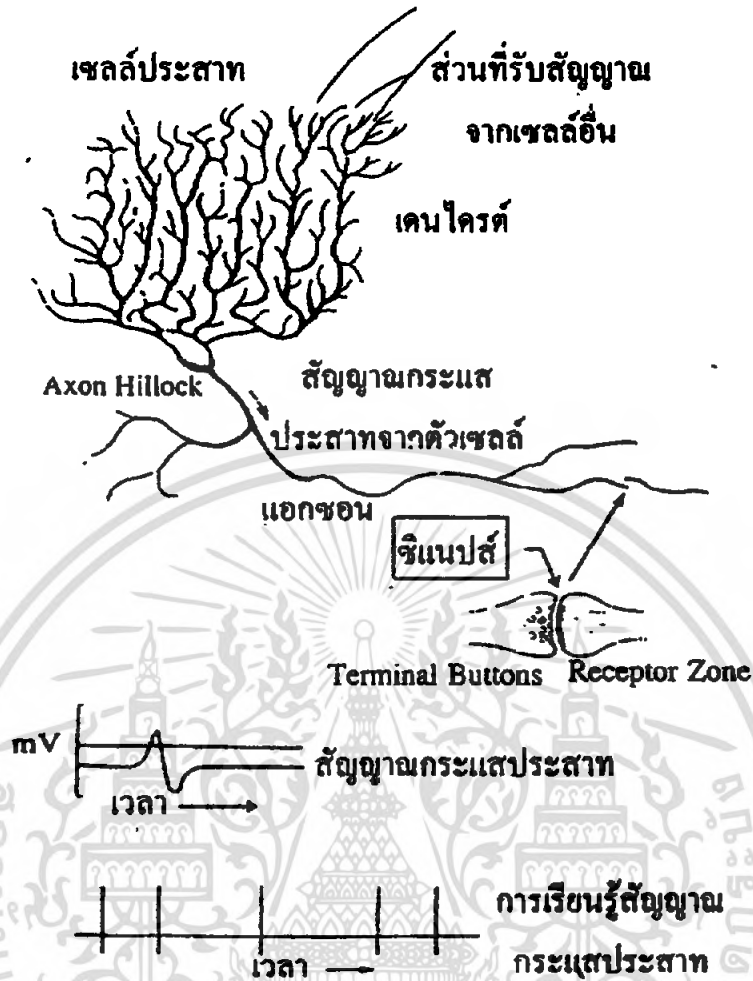
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบประสาทส่วนกลาง (Central Nervous System)
2. ระบบประสาทรับความรู้สึก (Sensory Systems)
3. ระบบประสาทมอเตอร์ (Motor Systems)

จากรูปที่ 2.4 ระบบประสาทส่วนกลางจะทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่รับมาจากระบบประสาทรับความรู้สึก ซึ่งจะรับรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมรอบตัวและจะส่งข่าวสารไปยังระบบประสาทส่วนกลางและเมื่อประสาทส่วนกลางประมวลผลแล้วก็จะส่งสัญญาณไปควบคุมสั่งการระบบประสาทมอเตอร์ของอวัยวะแสดงผล (Effector) ให้ทำงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งภายในและภายนอกร่างกาย



รูปที่ 2.4 การสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท

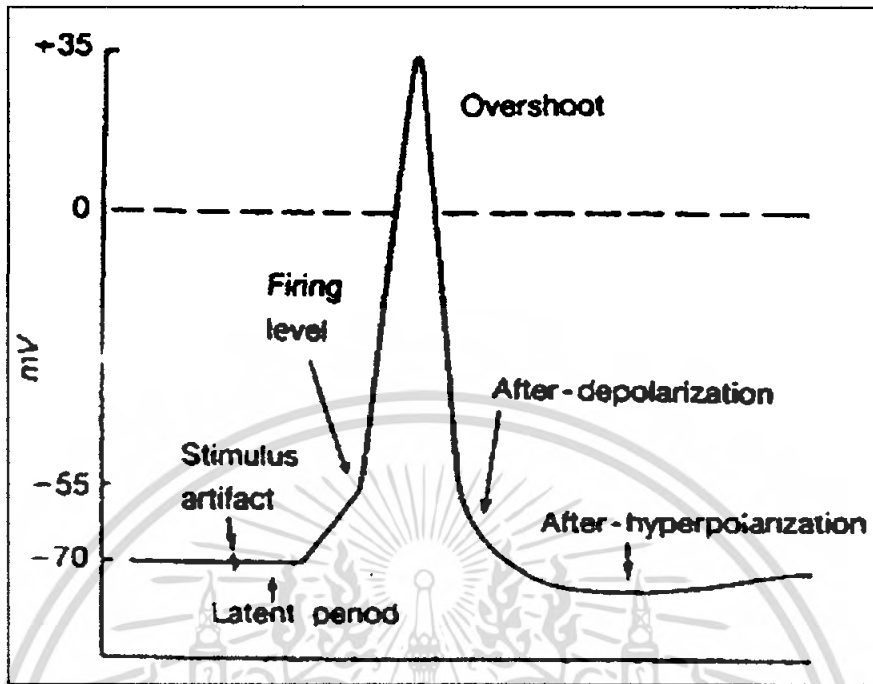


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสประสาท

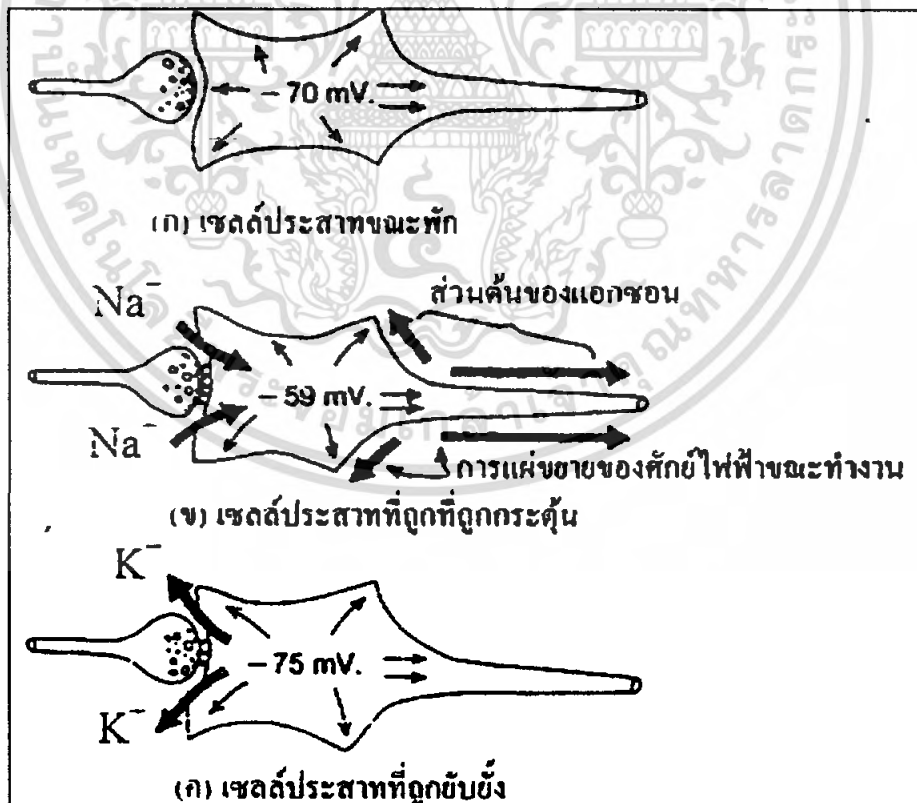
เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะประกอบด้วยตัวเซลล์ (Cell Body) และแขนงที่แยกออกจากตัวเซลล์ซึ่งได้แก่ แอกซอน (Axon) และเดนไดรต์ (Dendrite) แอกซอนมีจุดเริ่มต้นจากบริเวณส่วนที่หนาที่สุดของเซลล์ประสาทที่เรียกว่า แอกซอนฮิลล็อก (Axon Hillock) เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีแอกซอนเพียงหนึ่งอันปลายของแอกซอนจะแยกเป็นแขนงหลายเส้นและไปสิ้นสุดที่เทอร์มินอลบัททอม (Terminal Buttons) และที่จุดสิ้นสุดนี้จะมีตัวรับกระแสประสาท (Nerve Impulse) ที่เรียกว่า รีเซพชันโซน (Reception Zone) ซึ่งค่ออยู่กับเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทตัวอื่น กระแสประสาทหรือข้อมูลที่อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีจะไปกระตุ้นให้ตัวเซลล์ส่งสัญญาณไปตามแอกซอน ดังนั้นแอกซอนจะทำหน้าที่นำสัญญาณกระแสประสาทออกจากตัวเซลล์ไปสู่เซลล์ประสาทตัวอื่นและเดนไดรต์จะทำหน้าที่รับกระแสประสาทจากเซลล์อื่นเข้าสู่ตัวเซลล์

คุณสมบัติของเซลล์ประสาทโดยทั่วไปคือ จะมีความไวต่อการกระตุ้นเมื่อเซลล์ประสาทถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมมูลของไอออนบริเวณรีเซพชันโซน ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นและเมื่อความต่างศักย์ของจุดนี้สูงกว่าค่าเทรชโฮลด์ก็จะทำให้เกิดการส่งสัญญาณกระแสประสาทไปยังเซลล์อื่น

ความต่างศักย์ของเยื่อหุ้มเซลล์ประสาทขณะพักประมาณ  $-60$  ถึง  $-90$  mV ถ้ามีการกระตุ้นเซลล์ประสาทจะมีการแก้โพลาไรซ์ (Depolarization) ของเยื่อหุ้มเซลล์และหลังจากเกิดการแก้โพลาไรซ์จนความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น  $15$  mV แล้ว จะทำให้อัตราการแก้โพลาไรซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกจุดนี้ว่า ไฟริงเรเวล (Firing Level) (รูปที่ 2.6) เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ( $\approx 35$  mV) จะทำให้อัตราการแก้โพลาไรซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ( $\approx 70\%$ ) และจะค่อยๆลดลงกลับเข้าสู่สภาวะปกติ หลังจากเข้าสู่สภาวะปกติแล้วความต่างศักย์จะลดลงต่ำกว่าระดับปกติซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า ออฟเทอร์ ไฮเปอร์โพลาไรท์เซชัน (After Hyperpolarization) ลำดับของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ทั้งหมดนี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (Action Potential) กระแสประสาทที่ส่งผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งจะต้องผ่านรอยต่อระหว่างเทอมินอลบัทท่อม และ รีเซพชัน โซน ซึ่งจะเรียกรอยต่อนี้ว่า ซิแนปส์ (Synapse) การส่งผ่านกระแสประสาทกันระหว่างเซลล์ (Neurotransmission) ซิแนปส์จะปล่อยสารเคมีเพื่อไปกระตุ้น (Excitatory) สำหรับบางกรณีก็ปล่อยสารเคมีเพื่อยับยั้ง (Inhibitory) และในขณะที่ขณะหนึ่งซิแนปส์จะยอมให้เกิดขึ้นเพียงกรณีเดียวเท่านั้นคือถ้าไม่กระตุ้นก็จะปล่อยสารเพื่อยับยั้งการส่งผ่านกระแสประสาทในรูปที่ 2.7 แสดงสถานะต่างๆของเซลล์ประสาทในกรณีที่ซิแนปส์เกิดสถานะกระตุ้นความต่างศักย์ระหว่างผนังเซลล์จะลดลงเป็น  $-58$  mV จะทำให้เกิดการแก้โพลาไรซ์ขึ้นซึ่งถ้าสูงพอถึงภาวะไฟริงเรเวลก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานขึ้นและการที่จะเกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้จะต้องอาศัยซิแนปส์ 10 ถึงหลายร้อยตัวในเวลาเดียวกันโดยขบวนการซัมเมชัน (Summation) ซึ่งซิแนปส์เพียงตัวเดียวจะไม่สามารถกระตุ้นเซลล์ประสาทให้ถึงภาวะไฟริงเรเวลได้ ในรูปที่ 2.8 แสดงศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของซิแนปส์จำนวนต่างๆกัน

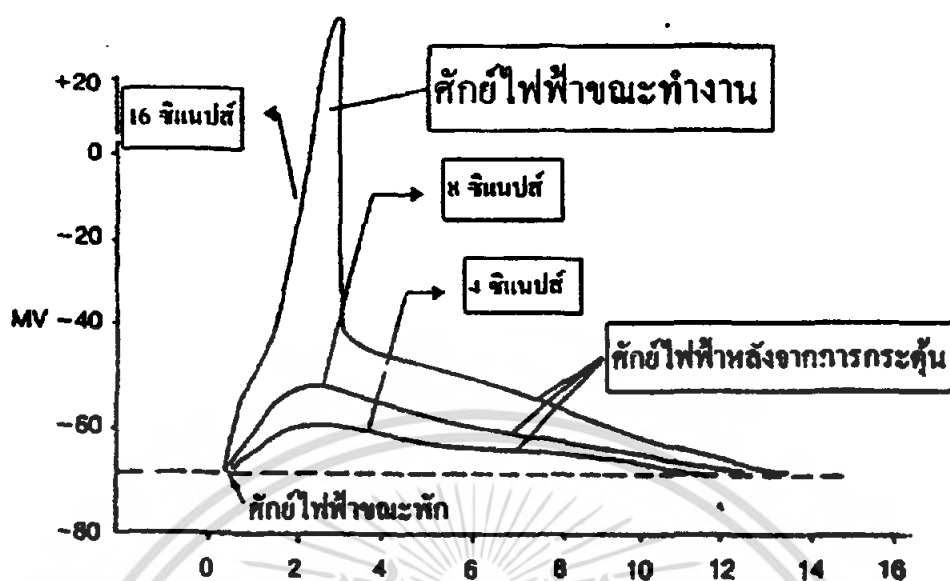


รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน



รูปที่ 2.7 แสดงสถานะต่างๆของเซลล์ประสาท (ก) ขณะพัก (ข) ขณะกระตุ้นและ (ค) ขณะถูกยับยั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

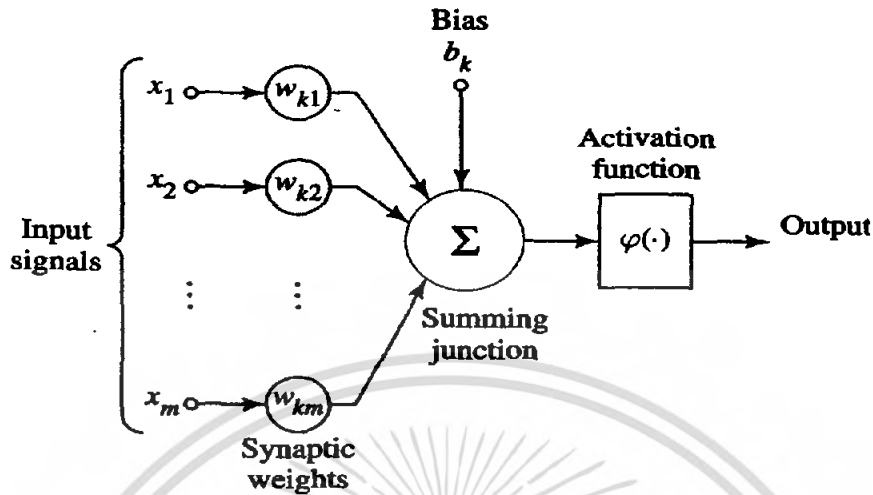


รูปที่ 2.8 แสดงศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดจากการรวมกันของซินแนปส์

ในสภาวะกระตุ้นจะทำให้เกิดการส่งผ่านสัญญาณกระแสประสาท ไอออนของ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ), โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) และ คลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) จะซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้มากขึ้น ส่วนในสภาวะยับยั้ง โพแทสเซียมและคลอไรด์จะไหลออกมาจากเซลล์และ โซเดียม ไม่มีการไหลเข้าเซลล์ซึ่งเป็นเหตุให้ประจุบวกภายในเซลล์ลดลงทำให้เกิดความต่างศักย์ภายในเซลล์เป็นลบมากขึ้น (ประมาณ  $-75\text{mV}$ ) ซึ่งจะส่งผลให้เซลล์ประสาทถูกกระตุ้นยากขึ้นกว่าปกติคือต้องใช้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น  $16\text{mV}$  จึงจะสามารถกระตุ้นเซลล์ประสาทให้ถึงไฟริงแวลได้ ระยะเวลานี้จะเรียกว่าระยะการคือ (Refractory Period)

### 2.2.2 แบบจำลองระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราได้กล่าวถึงการทำงานของระบบประสาทโดยทั่ว ๆ ไปของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในหัวข้อนี้จะมาพิจารณากันถึงระบบการทำงานของแบบจำลองระบบประสาทที่จะใช้ในการประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ควบคุมระบบต่าง ๆ โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 2.9 อินพุต  $x_i$  (สำหรับ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) จะมีค่าเป็น  $\{0, 1\}$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตสัญญาณจากเซลล์อื่นขณะนั้นว่าจะมีหรือไม่มีสัญญาณ ส่วนสัญญาณที่จะส่งต่อไปยังเซลล์ถัดไปซึ่งเป็นเซลล์สำแดงผล(เซลล์ของผลลัพธ์จะแทนด้วย  $o$ ) และ ไฟริงแวล  $k = 1, 2, 3, \dots$  เป็นช่วงเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง  $w$ , เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อกับอินพุตที่  $i$



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างของนิวรอนเน็ตเวิร์ก

ซึ่งบางครั้งหน่วยประมวลผลพื้นฐาน (Process Element Unit) ที่มีซิแนปส์ซึ่งจะเชื่อมต่อ โหนดเพื่อใช้ในการส่งผ่านสัญญาณการยับยั้งหรือกระตุ้นสัญญาณจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก  $w$ , และสำหรับสัญญาณเอาต์พุตสามารถคำนวณได้ดังนี้

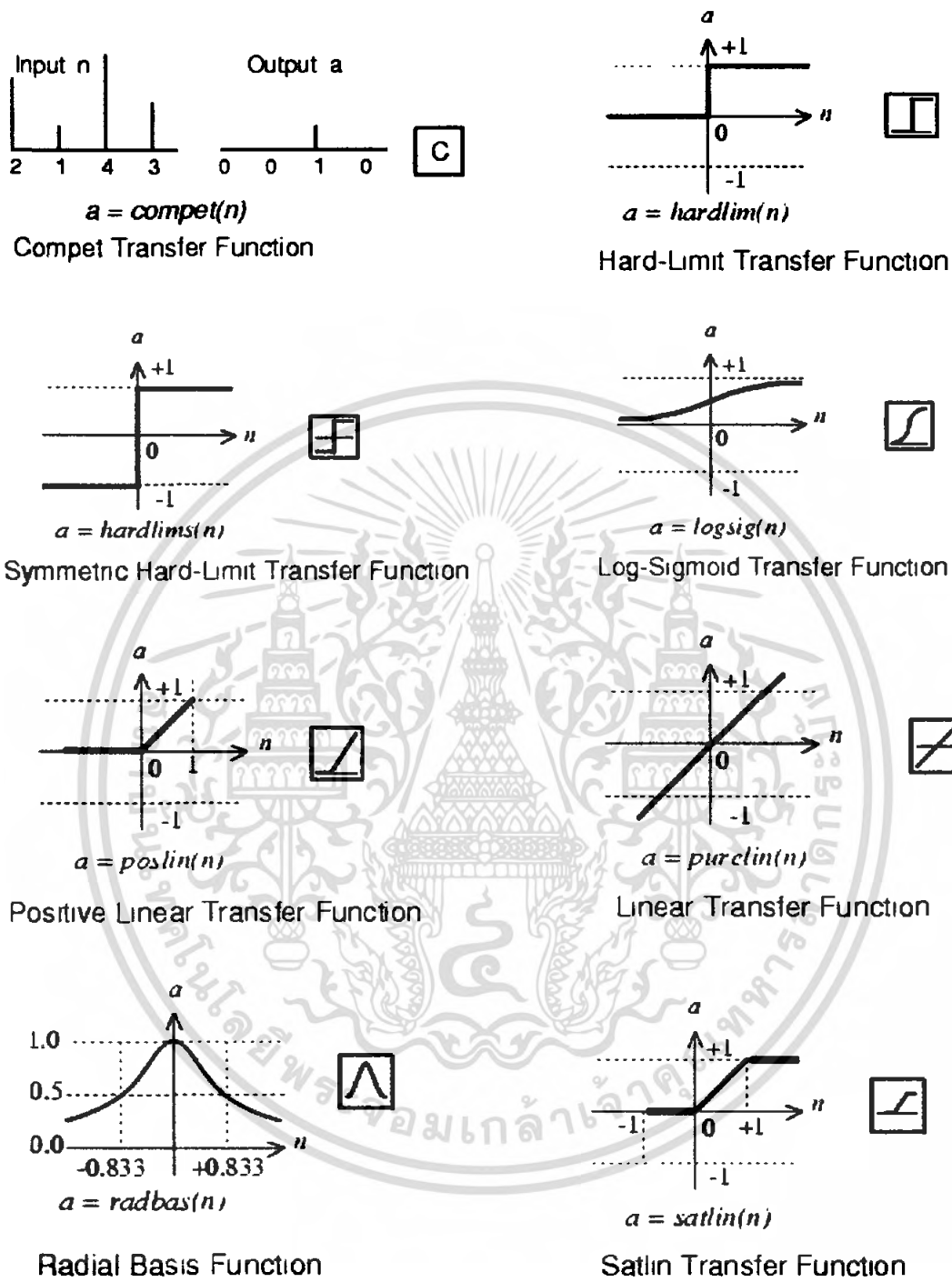
$$o = f(w'x) \quad (2.1)$$

โดยที่  $w$  เป็นเวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$w = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]' \quad (2.2)$$

และ  $x$  เป็นเวกเตอร์อินพุต  $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]'$  เมื่อ  $t$  เป็นตัวดำเนินการทรานสโพสค์ของเมทริกซ์ ฟังก์ชันกำหนดสัญญาณเอาต์พุตในสมการที่ (2.1) ถูกเรียกว่าฟังก์ชันการเร่งเร้าหรือแอกติเวชัน ฟังก์ชัน (Activation Function) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับกราฟของศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานในรูปที่ 2.6 Activation Function มีด้วยกันสองชนิดคือ ชนิดที่เป็นเชิงเส้นและชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงใน รูปที่ 2.10

$$\text{กำหนดให้ } \text{net} = w'x = \sum_{i=1}^n w_i x_i \text{ และ } T_1, T_2 \text{ เป็นค่าเทรชโฮลด์}$$



รูปที่ 2.10 Activate Function แบบชนิดต่างๆ

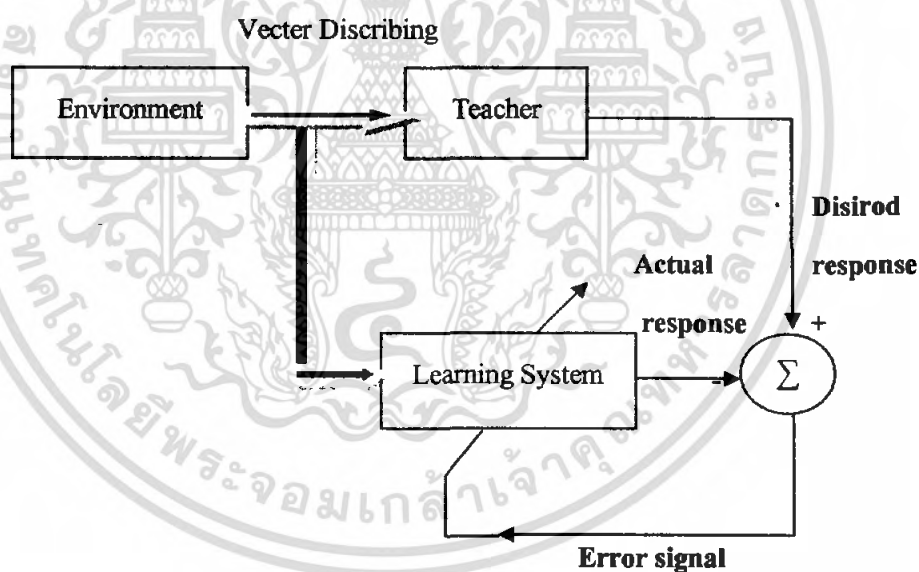
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 การเรียนรู้ของโครงข่าย

การเรียนรู้ของ ANNs จะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่าย ซึ่งการสอน (Training) โครงข่ายคือการหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่ายนั้น ๆ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

#### 2.2.3.1 การสอนแบบมีผู้นำหรือดูแล (Supervised Learning)

อัลกอริทึมชนิดนี้ต้องมีครูที่ช่วยกำหนดเอาต์พุตเป้าหมาย (Output Target) ให้กับเน็ตเวิร์ก ดังนั้นชุดข้อมูลในการปรับสอนเน็ตเวิร์กจะประกอบไปด้วยชุดข้อมูลอินพุตและชุดข้อมูลเอาต์พุตเป้าหมาย เอาต์พุตที่ได้จากเน็ตเวิร์กจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมายเพื่อที่จะทำการปรับค่าน้ำหนักให้ได้เอาต์พุตใกล้เคียงกับเป้าหมายดังรูป 2.11 ตัวอย่างของอัลกอริทึมชนิดนี้คือ เบ็คพร็อพกาเกชันอัลกอริทึม (Back propagation algorithm)

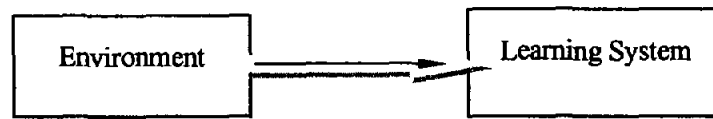


รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของ Supervised Learning

#### 2.2.3.2 การสอนแบบไม่มีการชี้แนะหรือไม่มีการดูแล (Unsupervised Learning)

อัลกอริทึมชนิดนี้ไม่ต้องการเอาต์พุตเป้าหมายในการปรับสอนเน็ตเวิร์ก ซึ่งจะมีการปรับค่าน้ำหนักโดยอัตโนมัติเพื่อที่จะทำการจัดกลุ่มอินพุตที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันลงในกลุ่มเดียวกัน ดังรูป 2.12

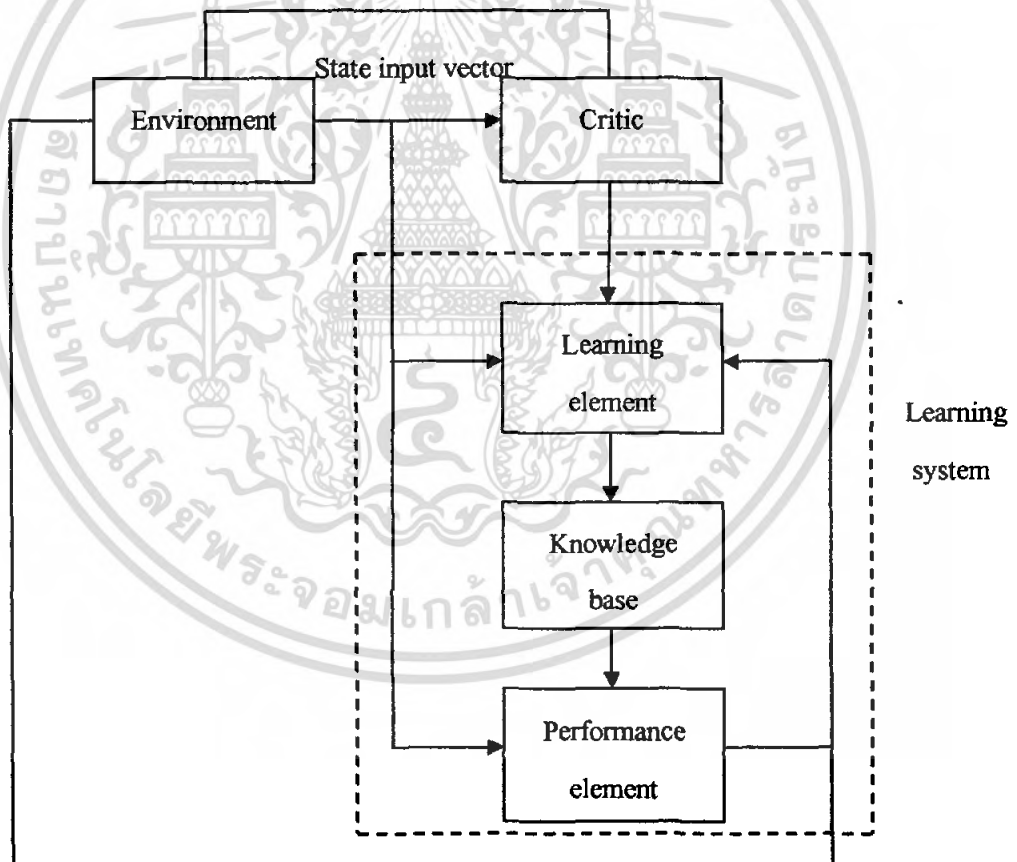
## Vector Describing



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของ Unsupervised Learning

## 2.2.3.3 รีอินฟอร์ซเมนต์เลิร์นนิง (Reinforcement Learning)

รีอินฟอร์ซเมนต์เลิร์นนิงคือ ซุปเปอร์ไวส์เลิร์นนิงชนิดพิเศษ ซึ่งแทนที่จะกำหนดเอาต์พุตเป้าหมายให้กับเน็ตเวิร์ก แต่อัลกอริทึมชนิดนี้ใช้คริติก (critic) เป็นตัวประเมินค่าให้กับเอาต์พุตที่ได้แทนดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของรีอินฟอร์ซเมนต์เลิร์นนิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงการปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกฎการสอนแบบต่างๆ

กฎการสอน	การปรับค่าถ่วงน้ำหนัก	ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนัก	การสอน	Activation Function
Hebb	$\Delta W_{ij} = cf(W'_{ij})x_j$	0	U	Any
Preceptron	$\Delta W_{ij} = c(d_i - f(W'_{ij}))x_j$	จำนวนจริงใดๆ	S	Binary Bipolar or Binary Unipolar
Delta	$\Delta W_{ij} = c(d_i - o_j)f'(W'_{ij})X$	จำนวนจริงใดๆ	S	ฟังก์ชันต่อเนื่อง
Widrow-Hoff	$\Delta W_{ij} = c(d_i - W'_{ij})x_j$	จำนวนจริงใดๆ	S	Any
Correlation	$\Delta W_{ij} = cd_j x_j$	0	S	Any
Winner-Take-All	$\Delta W_{ij} = c(x_i - w_{mj})$ m : โหนดที่เป็น Winner	Random Normalized	U	ฟังก์ชันต่อเนื่อง
Outstar	$\Delta W_{ij} = c(d_i - w_{ij})$	0	U	ฟังก์ชันต่อเนื่อง

c : ค่าคงที่ของอัตราการเรียนรู้

S : การสอนแบบชี้หน้า

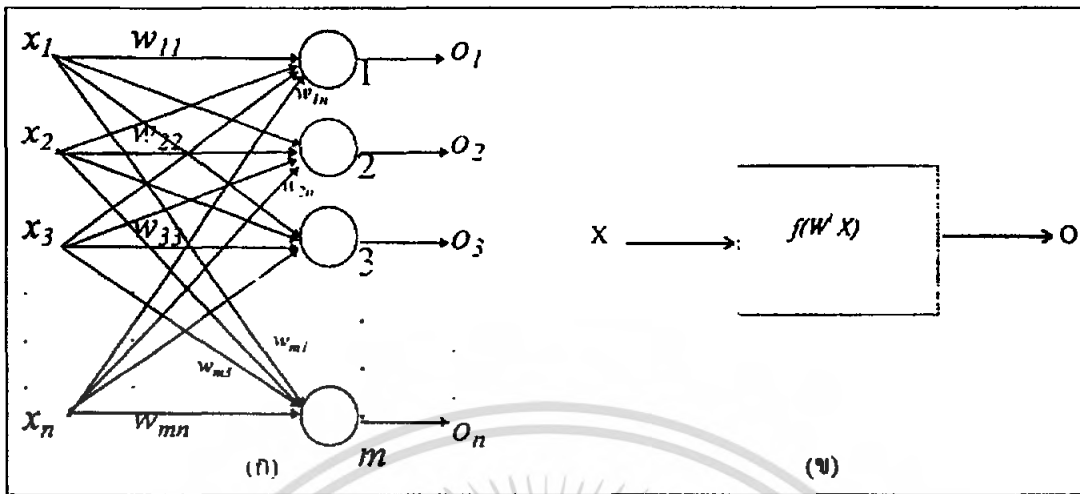
U : การสอนแบบไม่มีการชี้หน้า

### 2.2.4 แบบจำลองของ ANNs

จากที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับเซลล์ประสาททั้งที่เป็นแบบจำลองและเป็นโครงข่ายของเซลล์ประสาทจริงของมนุษย์จะมีการเชื่อมต่อกันของโหนดในลักษณะของโครงข่ายอย่างหนาแน่นเพื่อให้โครงข่ายสามารถเรียนรู้และสามารถจดจำสิ่งที่เรียนรู้มาแล้วได้ในการเชื่อมโยงของเครือข่ายจะมีสองลักษณะด้วยกันคือ

#### 2.2.4.1 โครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้า (Feedforward Networks)

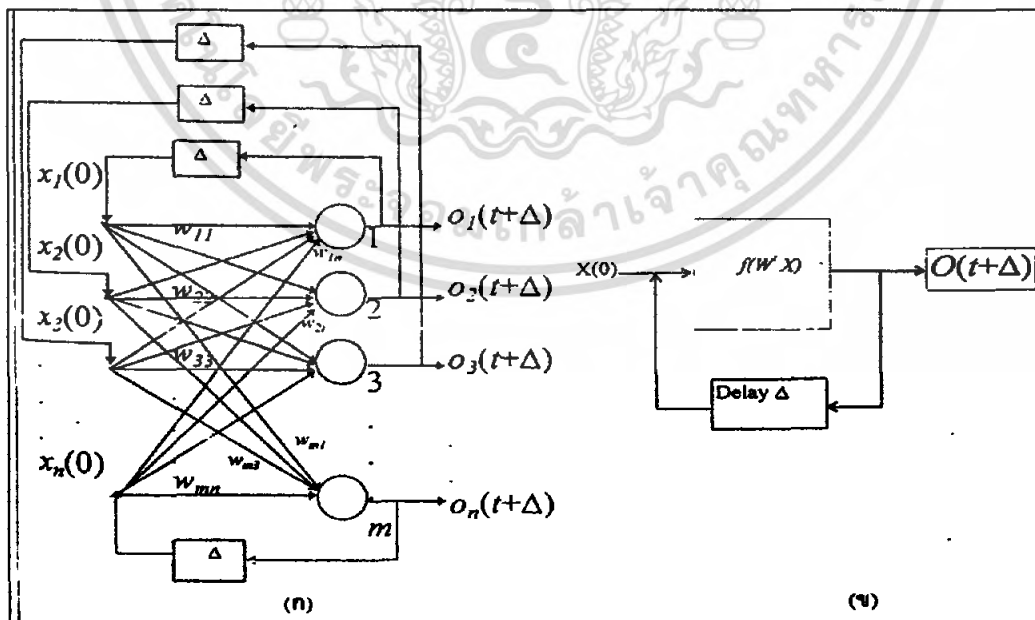
โครงข่ายชนิดนี้จะประกอบด้วยชั้นต่างๆของโครงข่ายโดยชั้นแรกจะเป็นอินพุตและชั้นสุดท้ายจะเป็นเอาต์พุต ส่วนระหว่างชั้นอินพุตกับเอาต์พุตอาจจะมีหรือไม่มีชั้นที่แทรกอยู่ภายในอีกก็ได้จะขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ในการสอน โครงข่ายเช่น ถ้าเป็นโครงข่ายเพอเซพตรอนแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron) ก็จะมีชั้นที่อยู่ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตอีกซึ่งอาจจะมีมากกว่าหนึ่งชั้นก็ได้ ส่วนโครงข่ายเซลลอลแกในซิงแมพ (Self-Organizing Map) ของ โคโฮเคน (Kohonen) จะมีเพียงชั้นของอินพุตกับเอาต์พุตเท่านั้น การเชื่อมต่อระหว่างชั้นของโครงข่ายแบบโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้า จะมีค่าน้ำหนักเป็นตัวแทนเชื่อมและสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจะถูกส่งไปตามทิศทางของถูกตรึงถึงชั้นเอาต์พุตโดยไม่มีการป้อนกลับ ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 โครงข่าย Feedforward แบบชั้นเดียว (ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อกโคอะแกรม

2.2.4.2 โครงข่ายที่มีการป้อนกลับ (Feedback Networks)

ในส่วนแรกของโครงข่ายนี้จะเป็นโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้าเหมือนกับแบบแรก และส่วนที่เพิ่มเข้ามาคือส่วนของการป้อนกลับดังแสดงในรูป 2.15 และการป้อนกลับจะมีค่าหนึ่งเวลาไปจากเวลาเดิมเท่ากับ  $\Delta$  ซึ่งโครงข่ายในรูปที่ 2.15 จะเรียกว่า รีเคอร์เรนซ์ (Recurrent Networks)



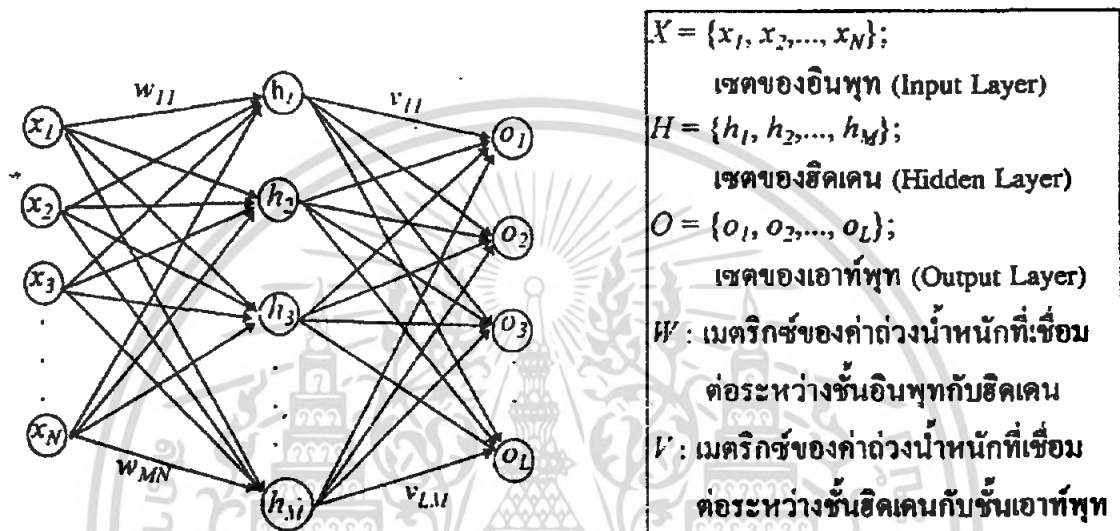
รูปที่ 2.15 โครงข่ายป้อนกลับแบบไม่ต่อเนื่องชั้นเดียว (ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข)

บล็อกโคอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 การแพร่กระจายกลับ

การแพร่กระจายกลับหรือแบ็คพร็อพาคชัน (Back-propagation) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสอนโครงข่ายแบบเพอเซพตรอนแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายแบบเป็นชั้นๆ ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 โครงข่าย Multilayer Perception ที่มี 3 ชั้น

ซึ่งโครงข่ายนี้มีการเชื่อมโยงกัน 3 ชั้น จะประกอบไปด้วยชั้นอินพุตซึ่งมีเซลล์ประสาทอยู่  $N$  โหนด ถัดมาเป็นชั้นของฮิดเดนหรือชั้นภายใน (Hidden Layer) ซึ่งประกอบด้วยโหนดต่างๆ จำนวน  $M$  โหนด และชั้นสุดท้ายคือชั้นของเอาต์พุตซึ่งมีโหนดต่างๆ อยู่  $L$  โหนด โครงข่ายแบบ Multilayer Perception ในรูปที่ 2.16 แต่ละโหนดในชั้นเดียวกันจะ ไม่มีการเชื่อมต่อกัน การเชื่อมโยงกันจะมีเฉพาะระหว่างชั้นเท่านั้น และการเชื่อมโยงนี้จะต่อถึงกันทุกโหนด โครงข่ายแบบ Multilayer Perception ไม่จำเป็นต้องมี 3 ชั้น อาจจะมี 4 ชั้น โดยการเพิ่มฮิดเดนเลเยอร์เข้าอีกชั้นก็ได้ หรือถ้าต้องการมากกว่านั้นก็ทำได้โดยการเพิ่มฮิดเดน

ชั้นฮิดเดนเป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่ายเซลล์ประสาท โครงข่ายแบบเพอเซพตรอนแบบหลายชั้น ถ้าไม่มีชั้นฮิดเดนก็จะกลายเป็นโครงข่ายแบบเพอเซพตรอน

## 2.2.6 กฎเดลต้าเอนกประสงค์ (Generalized Delta Rule : GDR)

กฎเดลต้า (Delta Rule) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สอนโครงข่ายเซลล์ประสาทจำลอง เพอเซพตรอนซึ่งเป็นกฎการสอนเพอเซพตรอนแบบต่อเนื่องและต่อมาได้พัฒนากฎการสอนเดลต้า รูล์ให้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อกันหลายชั้นอย่างโครงข่ายแบบเพอเซพตรอนแบบหลายชั้น จึงเรียกกฎเดลต้าที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่นี้ว่า กฎเดลต้าเอนกประสงค์ (Generalized Delta Rule : GDR)

ขั้นตอนการสอนโครงข่ายแบบเพอเซพตรอนแบบหลายชั้น จะเรียกว่าขั้นตอนการสอนแบบค่าความผิดพลาดแพร่กระจายกลับหรือเออโรร์แบ็กพร็อพกาเกชัน(Error Back-propagation) ซึ่งเป็นการแพร่กระจายกลับของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในชั้นเอาต์พุตที่ต้องการกับเอาต์พุตที่คำนวณได้โดยคำนวณจากชั้นเอาต์พุตผ่านชั้นฮิดเดนตลอดมาจนถึงชั้นอินพุตเพื่อทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก เมื่อทำการสอนโครงข่ายซึ่งมีการสอนแบบชี้นำในการสอนจะต้องป้อนเซตของข้อมูลที่จะใช้สอนซึ่งประกอบด้วยเซตของอินพุตและเซตของเอาต์พุตที่ต้องการซึ่งจะสอดคล้องกับเซตของอินพุต กำหนดให้  $P$  เป็นจำนวนเซตทั้งหมดที่ใช้ในการสอนโครงข่าย ดังนั้นเซตของอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการทั้งหมดจะมี  $P$  เซต

ถ้าให้  $D$  เป็นเซตของเอาต์พุตที่ต้องการ จะได้ว่า  $D_p = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_p\}$ , เมื่อ  $P = 1, 2, 3, \dots, P$

กำหนด  $W$  เป็นเมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นของอินพุตกับชั้นฮิดเดน ซึ่ง  $W$  มีขนาด  $M$  แถว และ  $N$  คอลัมน์

กำหนด  $V$  เป็นเมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นฮิดเดนไปยังชั้นเอาต์พุต ซึ่งมีขนาด  $L$  แถว และ  $M$  คอลัมน์

และกำหนด  $f(net)$  เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นใดๆ (Activation function)

เมื่อทำการป้อนเซตของข้อมูลที่ใช้สอนเข้าสู่โครงข่ายจะสามารถคำนวณโหนดของฮิดเดนที่  $m$  ได้ดังนี้

$$net_m = \sum_{n=1}^N W_{mn} X_n \quad (2.3)$$

$$h_m = f(net_m) \quad (2.4)$$

และสามารถคำนวณเอาต์พุตที่โหนด  $l$  ได้ดังนี้

$$net_l = \sum_{m=1}^M V_{lm} X_m \quad (2.5)$$

$$O_l = f(net_l) \quad (2.6)$$

เมื่อคำนวณชั้นของเอาต์พุตครบทุกโหนดแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายโดยใช้ค่าผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองระหว่างค่าของผลลัพธ์ที่ได้จาก

โครงข่ายกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการของแพทเทิร์นที่  $p$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L (o_{pl} - d_{pl})^2 \quad (2.7)$$

ดังนั้นเมื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นฮิดเดนสำหรับแพทเทิร์นที่  $p$  ( $H_p$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta V = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial v} \quad (2.8)$$

$$= \alpha V + \eta \delta_p^* H_p \quad (2.9)$$

โดยที่  $\delta_p^* = (D_p - O_p) O_p (1 - O_p)$  ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนภายในชั้นของเอาต์พุต

$\alpha$  เป็นค่าโมเมนตัม

$\eta$  เป็นค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ซึ่งเป็นค่าคงที่และการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อนำหนักสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta W = \alpha W - \eta \delta_p^* X_p \quad (2.10)$$

โดยที่  $\delta_p^* = H_p (1 - H_p) (\delta_p^* V)$  ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนภายในชั้นฮิดเดน สำหรับ  $\alpha$  และ  $\eta$  จะมีคุณสมบัติเหมือนกันสมการที่ (2.9)

ในกรณีที่มีโครงข่ายมี  $I$  ชั้นสามารถปรับค่าถ่วงน้ำหนักโดยวิธีค่าความผิดพลาดแพร่กระจายกลับได้ดังนี้

$$\Delta W = \alpha W - \eta \delta_p^* X_p^{i-1} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $W$  เป็นเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ระหว่างชั้นที่  $i$  กับ  $i-1$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, I$ ),  $X_p^{i-1}$  เป็นเซตของอินพุตแพทเทิร์นที่  $p$  จากชั้นที่  $i-1$  และ  $\delta_p^*$  เป็นเวกเตอร์ของความคลาดเคลื่อนสำหรับชั้นที่  $i$  สำหรับชั้นเอาต์พุตหรือชั้นที่  $I$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta_p^i = (D_p - O_p) O_p^i (1 - O_p^i) \quad (2.12)$$

โดยที่  $O_p^i$  คือชั้นของเอาต์พุต และสำหรับความคลาดเคลื่อนของชั้นที่  $i$  ใดๆ โดยที่  $i \neq I$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta_p^i = O_p^i (1 - O_p^i) (\delta_p^{i+1} W^{i+1}) \quad (2.13)$$

โดยที่  $O_p^i$  คือชั้นเอาต์พุตที่  $i$  แพทเทิร์นที่  $p$  และสำหรับ  $\delta_p^{i+1}$  และ  $W^{i+1}$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนและเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นถัดไป

## 2.2.7 ปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการสอนโครงข่ายด้วยวิธีแบ็คพรีโวกชัน (Back-propagation) เพิ่มขึ้น

### 2.2.7.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก

ก่อนที่จะทำการสอนโครงข่ายมัลติเลเยอร์เพอเซปตรอน (Multilayer Perception) โดยวิธีเออเรอร์พรีโวกชัน (Error-propagation) จำเป็นต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นทุกชั้น โดยค่านี้จะเป็นเลขจำนวนจริงที่มีค่าน้อยๆที่ได้มาจากการสุ่ม ค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์เชื่อมโยงจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสอนและอาจจะส่งผลถึงค่าถ่วงน้ำหนักหลังจากที่ได้สอนโครงข่ายไปแล้วว่าจะมีศักยภาพมากน้อยเพียงใดในการแปลงข้อมูลอินพุตไปสู่เอาต์พุต

### 2.2.7.2 อัตราเร็วในการเรียนรู้ (Learning rate)

โดยทั่วไปแล้วค่านี้จะเป็นค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.25 แต่มีงานวิจัยบางส่วนที่ค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้มีการปรับค่าได้เช่นกำหนดให้อัตราเร็วในการเรียนรู้ผันแปรตามจำนวนรอบที่สอน, อัตราเร็วในการเรียนรู้ผันแปรตามค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระบบและอัตราเร็วในการเรียนรู้ผันแปรตามค่าความแปรปรวนของแต่ละแพทเทิร์น

### 2.2.7.3 โมเมนตัม (Momentum : $\alpha$ )

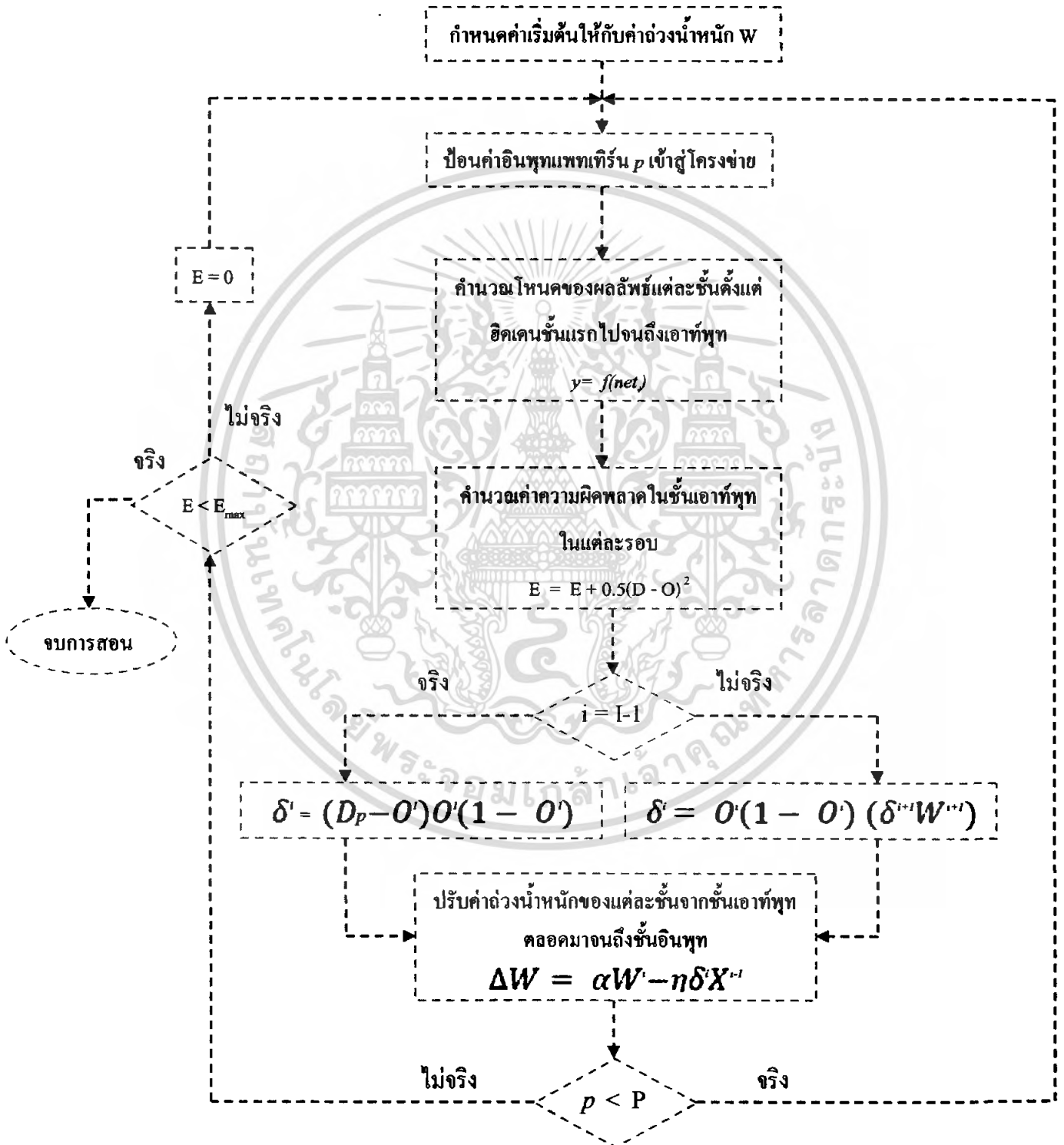
สำหรับกฎการสอนแบบเจเนอรัลไลซ์เซลล์ด้าโดยทั่วไปค่าโมเมนตัมอาจจะใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ แต่ค่านี้จะมีคุณสมบัติช่วยป้องกันการแกว่ง (Oscillate) ของระบบ โดยค่านี้จะสัมพันธ์กับค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้คือ ถ้าอัตราเร็วในการเรียนรู้มีค่ามากแต่ค่าโมเมนตัมมีค่าน้อยจะทำให้ระบบโครงข่ายเกิดการแกว่ง ส่วนกรณีอื่นๆโครงข่ายจะไม่เกิดการแกว่งแต่จะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสอน

### 2.2.7.4 ไบแอส (Bias)

โหนดไบแอสสำหรับโครงข่ายโดยทั่วไปอาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ ในกรณีของโครงข่ายที่ใช้ในระบบที่เป็นเรียลไทม์ (Real-Time) แล้วจะไม่ค่อยมีการใช้โหนดไบแอสเนื่องจากจะเสียเวลาในการคำนวณและถ้ามีการออกแบบโครงข่ายอย่างเหมาะสมแล้วเทอมไบแอสไม่จำเป็นต้องมี แต่ถ้าโครงข่ายมีจำนวนโหนดไม่เหมาะสมคือมีจำนวนโหนดน้อยไปการเพิ่มโหนดไบแอสเข้าไปจะทำให้โครงข่ายสามารถจดจำได้ดีขึ้น โหนดไบแอสจะถูกเพิ่มเข้าไปเป็นโหนดๆหนึ่งในแต่ละชั้น ยกเว้นในชั้นของผลลัพธ์และโหนดไบแอสที่เพิ่มเข้าไปมักจะมีค่าคงที่ ผลของการเพิ่มโหนดไบแอสเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้ประสิทธิภาพการสอนดีขึ้น

ขั้นตอนการสอน

2.6 การสอนโครงข่ายมีลติเลเยอร์เพอเซปตรอนด้วยวิธี แม็คพรีอพาเกชั่นมีขั้นตอนการสอน ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภูมิการสอนแบบ Error Back-propagation ที่มี I ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $E_{max}$  เป็นค่าความผิดพลาดต่ำสุดที่พอจะรับได้ ซึ่งในการสอนโครงข่ายในรอบหนึ่ง ๆ (Epoch) ก็คือการสอนชุดของแพทเทิร์นทั้งหมด  $P$  แพทเทิร์น ถ้าค่าความผิดพลาดของระบบ  $E$  ยังมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดที่ตั้งไว้  $E_{max}$  ก็จะนำชุดข้อมูลชุดเดิมมาทำการสอนใหม่จนกว่าค่าความผิดพลาด  $E$  จะน้อยกว่าค่า  $E_{max}$

## 2.3 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของดิน

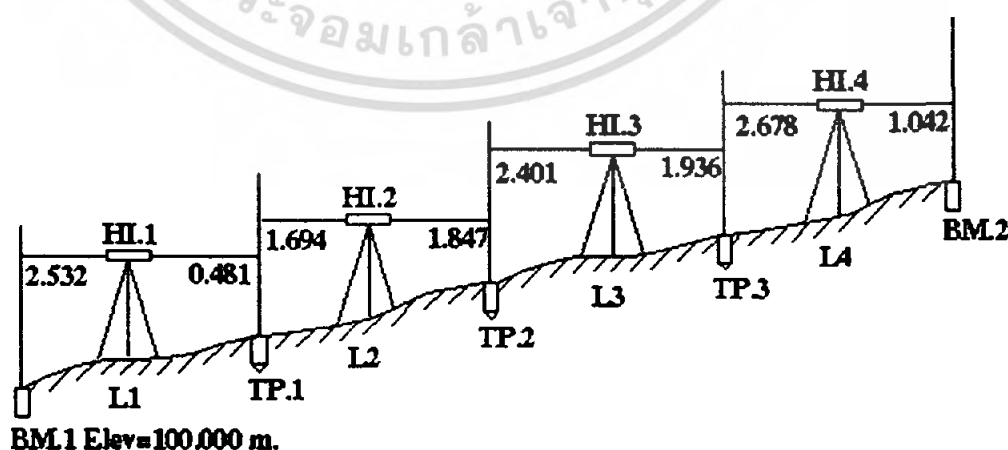
### 2.3.1 หลักการในการทำระดับ (Principles of Leveling)

หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องมือคือ เมื่อตั้งกล้องและตั้งระดับของกล้องแล้ว แนวเล็งกล้อง (Collimation line หรือ Line of sight) จะเป็นแนวเดียวกันกับแนวราบ (Horizontal line)

สำหรับไม้วัดระดับ (Staff) เมื่อตั้งฟองกลมของไม้วัดระดับเราจะถือว่าไม้วัดระดับนั้นอยู่ในแนวตั้งและไม้วัดระดับหน้า-หลัง (FS/BS) จะขนานกันในแนวตั้งบางทีเรียกว่า Leveling rod

พื้นหลักฐานการระดับ (Datum) จะอ้างอิงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level = MSI หรือ รทก.) ที่ระดับ รทก. จะถือว่ามีค่าระดับเท่ากับศูนย์เสมอ ระดับน้ำทะเลปานกลางจะทำการวัดประมาณ 18.6 ปี (Mutation period) จึงจะให้ค่าที่ดี ทั้งนี้เพราะขั้วโลกจะหมุนมาอยู่ตำแหน่งเดิมพอดี

ในประเทศไทยสถานีวัดระดับน้ำทะเลจะอยู่ที่เกาะหลัก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในแต่ละประเทศก็จะมีจุดระดับเป็นของตัวเองเพราะฉะนั้นค่าระดับจะเปรียบเทียบกันไม่ได้ ถ้าทำการก่อสร้างสะพานหรืออุโมงค์ข้ามประเทศ จึงต้องให้ค่าระดับมาจากจุดจุดเดียวแล้วใช้การถ่ายระดับแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.18 การถ่ายระดับแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของคำต่างๆที่ใช้ในการถ่ายระดับ มีดังนี้

1. ความสูงของแกนกล้อง (Collimation line) ความสูงนี้จะนับจากระดับน้ำทะเลปานกลาง จนถึงแกนกล้อง ทุกครั้งที่มีการทำระดับจะคำนวณหาค่าระดับของจุดตั้งไม้วัดระดับ ต่อเนื่องกันไป บางที่เรียกว่า วิธีความสูงแกนกล้อง (Height of Instrument) HI หรือ HPC (Height of Plane of Collimation)

2. หมุดหลักฐานการระดับ (มฐ.) หรือ Bench Mark (BM) จะเป็นหมุดอ้างอิงค่าระดับจริงที่นับเนื่องจากระดับน้ำทะเลปานกลาง กรมแผนที่ทหารจะทำการถ่ายระดับและสร้างหมุดหลักฐานกระจายไปทั่วประเทศ

3. หมุดถ่ายระดับ (Turning Point : TP) หรือหมุดเปลี่ยนระดับ หรือหมุดตั้งไม้วัดระดับ (Change Point : CP) หมายถึง จุดตั้งไม้วัดระดับเพื่อทำการถ่ายระดับ ซึ่งจะต้องวาง TP หรือ Ground Plate เพื่อตั้งไม้วัดระดับ หัวหมุดจะต้องเป็นทรงกลมเสมอ เพราะจะต้องมีจุดสูงสุดเพียงจุดเดียว เราจะใช้ถ่ายระดับต่อเนื่องกันไป โดยการส่องค่าไม้หลัง (Back Sight : BS) และส่องค่าไม้หน้า (Fore Sight : FS)

4. ค่าไม้หลัง หมายถึงค่าที่อ่านได้ครั้งแรกหลังจากตั้งกล้องตั้งระดับแล้วส่องอ่านค่าระดับ

5. ค่าไม้หน้า หมายถึงค่าที่อ่านได้ครั้งสุดท้ายก่อนการถ่ายระดับในจุดนั้น

6. ค่าไม้กลาง (Intermediate Fore Sight : IFS) หรือบางที่เรียกว่า Intermediate Sight (IS) หมายถึงค่าที่อ่านได้หลังจากการส่องค่าไม้หลังแล้ว จะส่องก็ค่าก็ได้ ใช้ในการทำระดับเพื่อหาระดับดินเดิมของพื้นดิน (NGL = Natural Ground Level) ซึ่งเราเรียกว่า การทำระดับพื้นที่ (Area leveling) และการทำระดับตามแนวศูนย์กลาง (Profile leveling) เพื่อหาระดับดินเดิม

7. ตอนการระดับ (Section) หมายถึงการถ่ายระดับระหว่างหมุดระดับ (Bench Mark) สองหมุดปกติความยาวจะประมาณ 2 ถึง 3 กิโลเมตร

8. ช่วงการระดับ (Subsection) ถ้าตอนการระดับยาว 2 กิโลเมตร เราอาจจะแบ่งย่อยลงอีกเป็นระยะ 1 กิโลเมตรเพราะถ้าถ่ายระดับไป 2 กิโลเมตร และกลับอีก 2 กิโลเมตร ถ้าทำผิดจะต้องถ่ายระดับใหม่อีก 2 กิโลเมตร ถ้าแบ่งย่อย 1 กิโลเมตร จะทำให้ทราบช่วงไหนทำผิด สามารถแก้ไขได้โดยถ่ายเพียง 1 กิโลเมตร

9. สายการระดับ (Leveling line) คือระยะทางรวมของการถ่ายระดับแต่ละตอนต่อเนื่องกันไป เช่น สมมติถ่ายระดับจากกรุงเทพมหานคร ไปสระบุรี เราจะเรียกว่าสายการระดับ ถ้าถ่ายไปกลับทีละสองกิโลเมตร เราเรียกว่าตอนการระดับ ดังกล่าวแล้ว

10. หมุดหลักฐานการระดับชั่วคราว (Temporary Bench Mark : TBM) เป็นหมุดหลักฐานการระดับ ชั่วคราวจะทำโดยใช้ตะปูตอกบนรากต้นไม้ และจะกำหนดหมุดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานแต่ละวัน

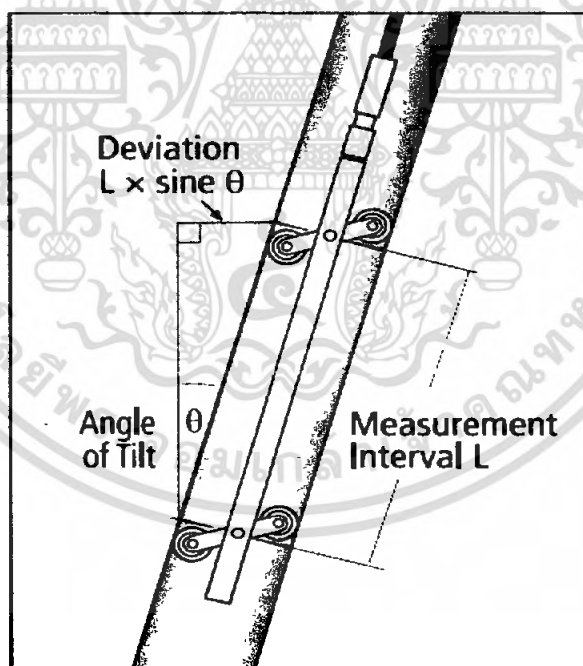
### 2.3.2 อินคลิโนมิเตอร์ (Inclinometer)

อินคลิโนมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินได้ผิวดิน รวมถึงความเสียหายในโครงสร้างของเขื่อนหรือฝาย

#### หลักการทํางาน

โดยทั่วไป จะมีการติดตั้งท่อสำรวจไว้ในบริเวณที่คาดว่าจะมีการเคลื่อนตัวของดิน หรือ ในบริเวณที่ต้องการตรวจวัดไว้ได้ดินในแนวตั้ง จากนั้นจะมีการหย่อนเครื่องมือที่ใช้อ่านค่าการตรวจวัดลงไปตามแนวท่อ ข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกเป็นครั้งแรกจะถูกเก็บเป็นค่าเริ่มต้น (initial profile) และจะสามารถทราบถึงการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้น ได้จากค่าเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในครั้งต่อๆ มา

ในระหว่างการวัด อุปกรณ์ที่ใช้อ่านข้อมูลจะถูกหย่อนลงไปทีละ 0.5 เมตร และทำการบันทึกข้อมูล การเอียงตัวของ probe body ถูกวัด โดย servo-accelerometer สองตัว โดยทั้งสองจะอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกัน และจะทำการวัดอีกครั้งในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่ทำการวัดในครั้งแรก



รูปที่ 2.19 อินคลิโนมิเตอร์

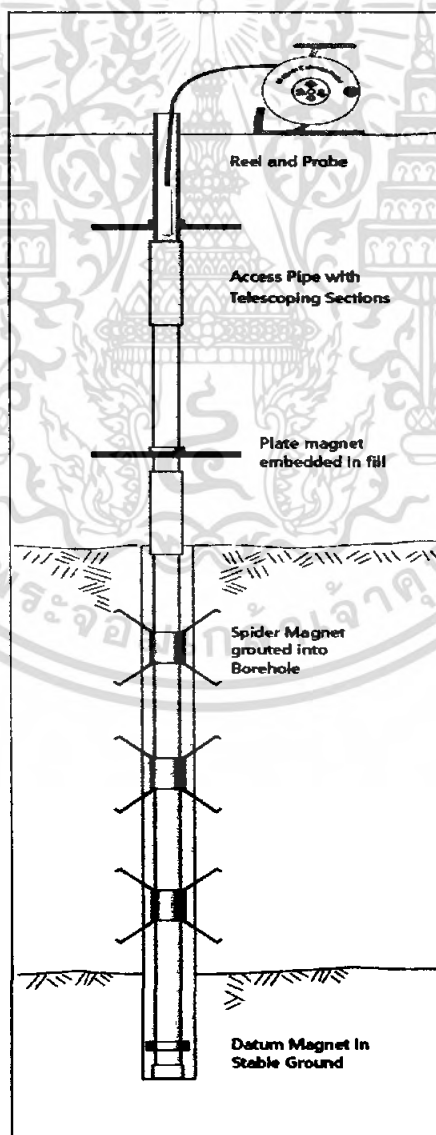
ข้อมูลที่อ่านได้จากการวัดทั้งสองครั้งจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย และคูณด้วยตัวแปรค่าหนึ่ง ซึ่งค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับรุ่นของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าการเคลื่อนตัวของดิน

### 2.3.3 เอ็กเทนโซมิเตอร์ ( Extensometer )

ใช้ในการตรวจวัดการทรุด และการยกตัว ในเขื่อน ฝาย หรือ ในระหว่างจุดเจาะอุโมงค์ ข้อมูลที่อ่านได้จากเอ็กเทนโซมิเตอร์จะบอกถึงระดับความลึกของอุปกรณ์แต่ละตัวที่ถูกฝังไว้ใต้ดิน ซึ่งทำให้ทราบถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน

#### หลักการทำงาน

เอ็กเทนโซมิเตอร์ประกอบไปด้วยวงแหวนแม่เหล็กสำหรับติดตั้งไว้ใต้ดิน และสายสำหรับอ่านข้อมูล ข้อมูลจะถูกวัดโดยการค่อยๆ หย่อนสายอ่านข้อมูลลงไปตามแนวท่อที่ทำการติดตั้งวงแหวนแม่เหล็กไว้แล้ว เมื่อสายอ่านข้อมูลเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก จะมีสัญญาณเสียง ผู้ทำการวัดทำการจดบันทึกค่าระดับความลึกของวงแหวนแม่เหล็ก จากค่าระดับที่อ่านได้จากสายอ่านข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2.20 เอ็กเทนโซมิเตอร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

#### 3.1 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมรูปแบบทั่วไป

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

จากการศึกษาโครงข่ายประสาทเทียมเดิม ซึ่งได้ทดสอบความสัมพันธ์ด้านจำนวนหน่วย (Node) ของชั้นรับข้อมูล (Layer) ชั้นแฝง (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output Layer) รวมถึงจำนวนรอบของการคำนวณ (epoch) ซึ่งทั้งหมดนี้จะประกอบขึ้นเป็นสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม ทั้งนี้สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN) จะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ โดยต้องตรวจสอบด้วยวิธีลองผิดลองถูก (trial and error) เท่านั้น ในกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมนี้ ฐานข้อมูลการจุดเจาะอุโมงค์ทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- (1) ฐานข้อมูลส่วนที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ (Training Set)
- (2) ฐานข้อมูลส่วนที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ (Testing Set)

กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบนี้ จะลองใช้สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมจำนวน 18 แบบ โดยแต่ละแบบจะมีจำนวนหน่วย (Node) ในชั้นแฝง (Hidden Layer), จำนวนชั้นแฝง (Hidden layer) และจำนวนรอบการคำนวณ (epoch) ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 แบบ

แบบที่	สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม	จำนวนรอบการคำนวณ (epoch)
1	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วย	1,000
2	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 หน่วย	1,000
3	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วย	1,000
4	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วย	2,000
5	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 หน่วย	2,000
6	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วย	2,000
7	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วย	3,000
8	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 หน่วย	3,000
9	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วย	3,000
10	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 10 หน่วย	1,000
11	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 15 หน่วย	1,000
12	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 20 หน่วย	1,000
13	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 10 หน่วย	2,000
14	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 15 หน่วย	2,000
15	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 20 หน่วย	2,000
16	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 10 หน่วย	3,000
17	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 15 หน่วย	3,000
18	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 20 หน่วย	3,000

- (1) จำนวนชั้นแฝงมี 1 และ 2 ชั้น
- (2) จำนวนโหนดมี 10 หน่วย 15 หน่วย และ 20 หน่วย
- (3) จำนวนรอบการคำนวณ (Epoch) มี 1,000 รอบ 2,000 และ 3,000 รอบ

ฐานข้อมูลส่วนที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ จะถูกนำมาป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 แบบ เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ ปริมาณการทุจริต โดยค่าความสัมพันธ์นี้จะอยู่ในค่าน้ำหนัก  $w$  (weight) และค่าเบี่ยงเบน  $b$  (bias) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะเก็บและนำมาใช้ในกระบวนการทดสอบด้วยชุดข้อมูลส่วนที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อพยากรณ์การเอ็กซอร์นเป็นเอ็กซอร์นที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของคิวดิน หากสถาปัตยกรรมแบบใดสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องแม่นยำที่สุดในกระบวนการทดสอบจะถือว่าเป็นรูปแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมที่สุด กระบวนการทั้งหมดนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน โดยการตัดสินความแม่นยำของแต่ละแบบของสถาปัตยกรรมจะใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย หรือ *Root Mean Square Error (RMSE)* เป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถหาได้ด้วยสมการที่ 3.1

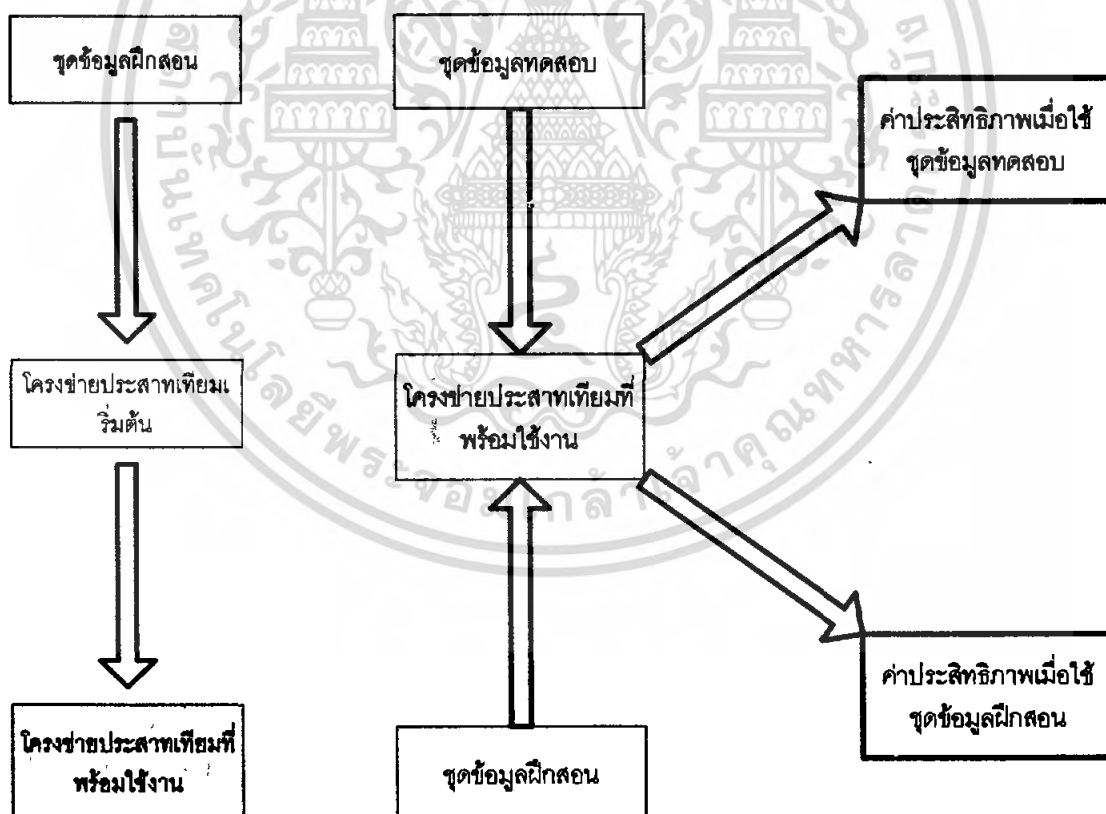
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2}{N}} \quad (3.1)$$

โดย  $N$  คือ จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในกระบวนการคำนวณ

$O$  คือ ค่าการทวดตัวที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

$t$  คือ ค่าการทวดตัวที่ได้จากการวัดค่าจริง

ซึ่งสามารถเขียนขั้นตอนการทำงานเป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม การทำงานในการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบโครงสร้างประสาทเทียมให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน

จากพารามิเตอร์ที่บอกชนิดชั้นดินที่หัวเจาะฝังตัวอยู่ จะสามารถแบ่งเป็นชั้นดินได้ 3 ชั้นคือ ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft-Clay), ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff-Clay) และชั้นทราย (Sand) ซึ่งตามลักษณะความเหนียวของชั้นดินทั้งสามชั้นนั้นจะมีความเหนียวที่แตกต่างกัน ซึ่งชั้นที่มีความเหนียวน้อยกว่าย่อมที่จะมีการทรุดตัวที่รวดเร็วและง่ายกว่าชั้นดินที่มีความเหนียวมากกว่า รวมถึงความลึกของชั้นดินแต่ละชั้นจะมีความลึกที่แตกต่าง ซึ่งในชั้นดินที่อยู่ลึกกว่าจะมีแรงกดทับหรือแรงดันจากดินที่อยู่เหนือขึ้นมามากกว่าชั้นดินที่มีความลึกน้อยกว่า จากสมการ

$$P = \rho gh \quad (3.2)$$

โดยที่  $h$  คือความลึก

$\rho$  คือความหนาแน่นของดิน

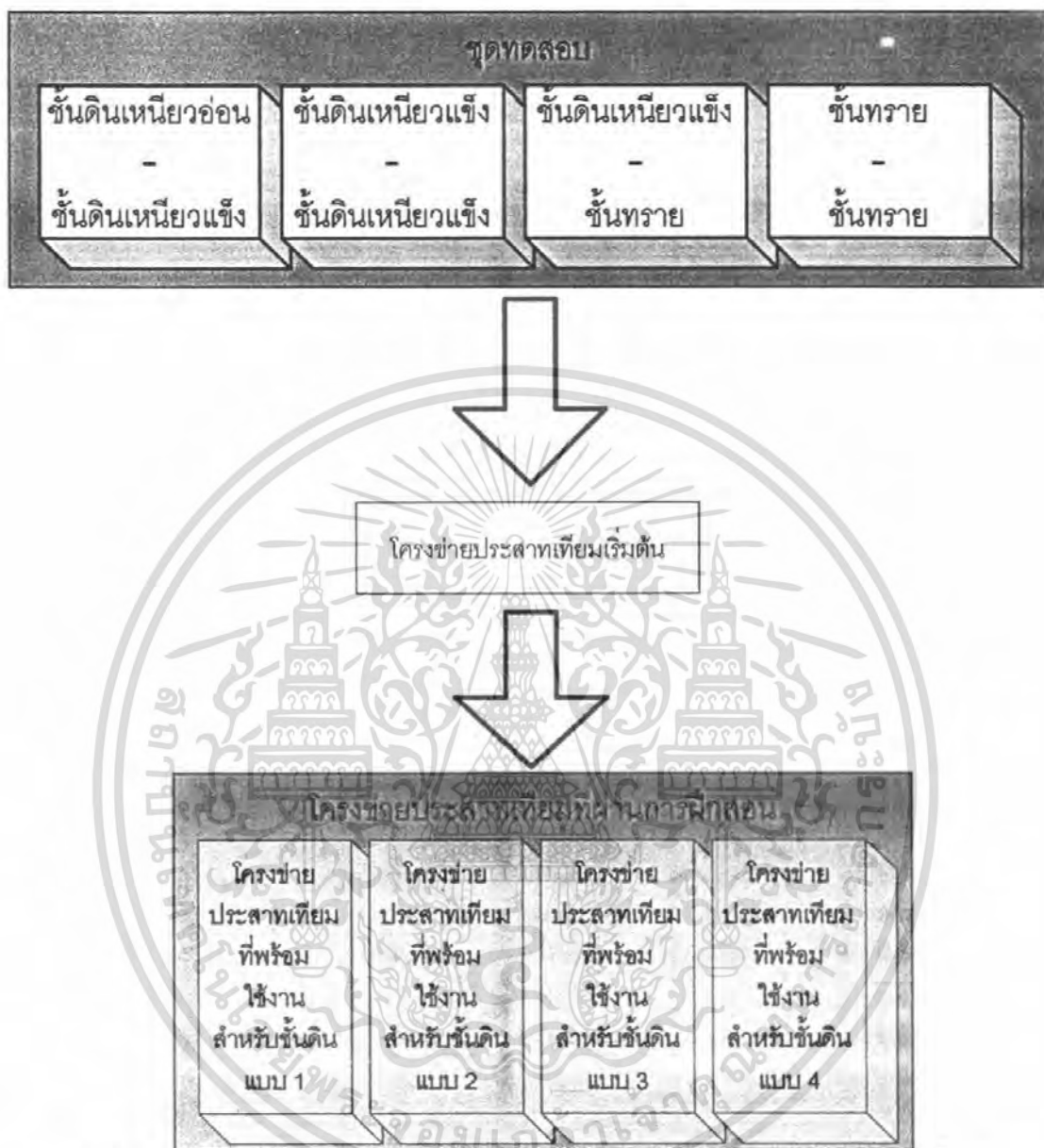
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความลึกมีผลต่อแรงดันในแต่ละชั้นดิน

โดยเริ่มจากการแบ่งชุดข้อมูลออกจากกันตามชนิดของชั้นดินที่หัวเจาะฝังตัวอยู่ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะคือ

ตารางที่ 3.2 รูปแบบชนิดชั้นดินที่หัวเจาะฝังตัวอยู่

ส่วนบนของหัวเจาะ	ส่วนล่างของหัวเจาะ
ชั้นดินเหนียวอ่อน	ชั้นดินเหนียวแข็ง
ชั้นดินเหนียวแข็ง	ชั้นดินเหนียวแข็ง
ชั้นดินเหนียวแข็ง	ชั้นทราย
ชั้นทราย	ชั้นทราย

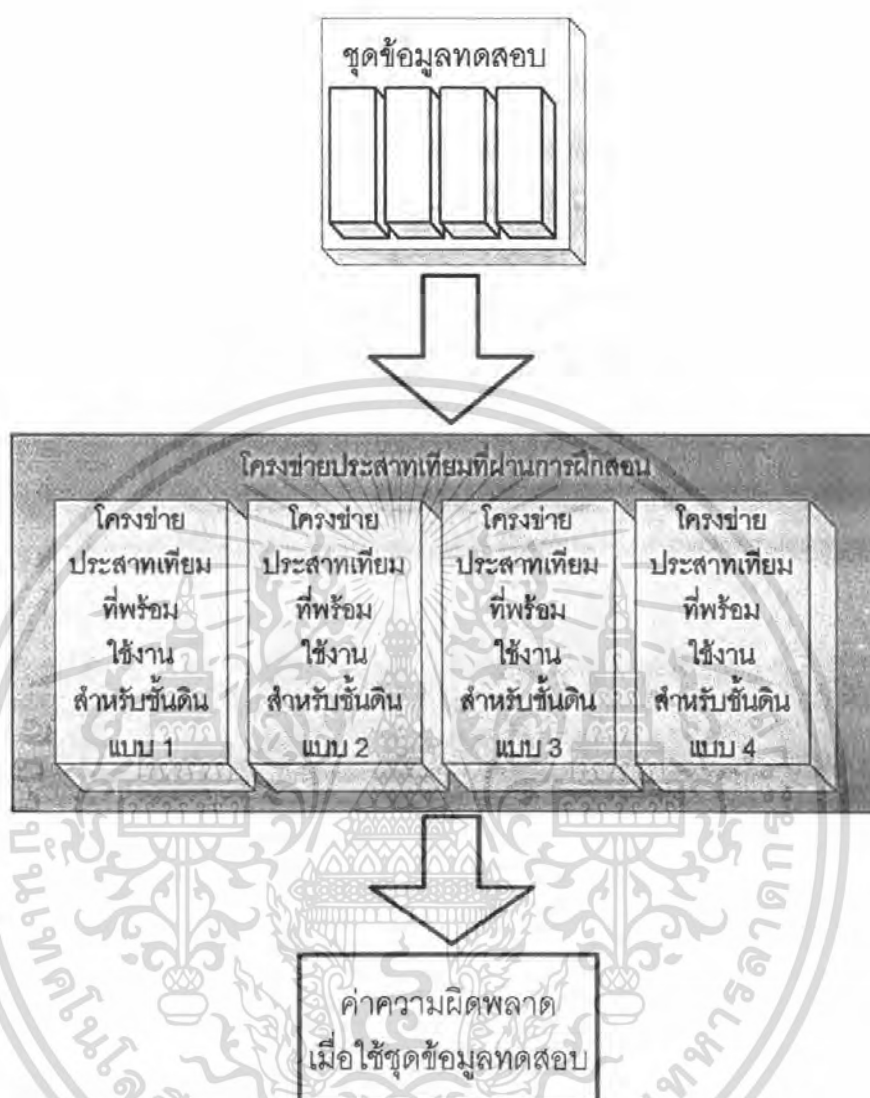
สามารถแยกชุดข้อมูลออกจากกัน โดยการ ตรวจสอบที่พารามิเตอร์ตัวที่ 3-7 ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.2 หลังจากทำการแบ่งชุดข้อมูลเป็นกลุ่มย่อยตามชนิดชั้นดินแล้ว ต่อไปจะนำข้อมูลในชุดฝึกสอน ไปฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรม การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน

จากนั้นนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกด้วยชุดข้อมูลฝึกสอนของแต่ละรูปแบบชั้นดินซึ่งจะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึก 4 โครงข่าย และนำโครงข่ายประสาทเทียมเหล่านี้มาทำการทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 บล็อกโคอะแกรม ทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม ที่มีการแบ่งโครงข่ายให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน

จากนั้นจะทำเช่นเดียวกันกับชุดข้อมูลฝึกสอน เพื่อหาค่าความผิดพลาดสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

เนื่องจากการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไปที่ได้มีการศึกษาแล้ว ได้ผลว่าการใช้รูปแบบสถาปัตยกรรมที่มีจำนวนชั้นแฝง 1 ชั้น จำนวนหน่วยในชั้นแฝง 20 หน่วย และจำนวนรอบของการคำนวณ 2000 epoch จะให้ผลการพยากรณ์ค่าที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ดังนั้นการทดสอบอื่นจึงเน้นไปที่การใช้จำนวนชั้นแฝง 1 ชั้น เนื่องจากการใช้จำนวนชั้นแฝงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดของกลุ่มข้อมูลฝึกสอนน้อยมากและ ในทางตรงข้ามจะทำให้ค่าพยากรณ์ค่าการ

ร่ำคั่วตัวในกลุ่มข้อมูลทดสอบมีค่าสูงขึ้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวในชั้นทราย

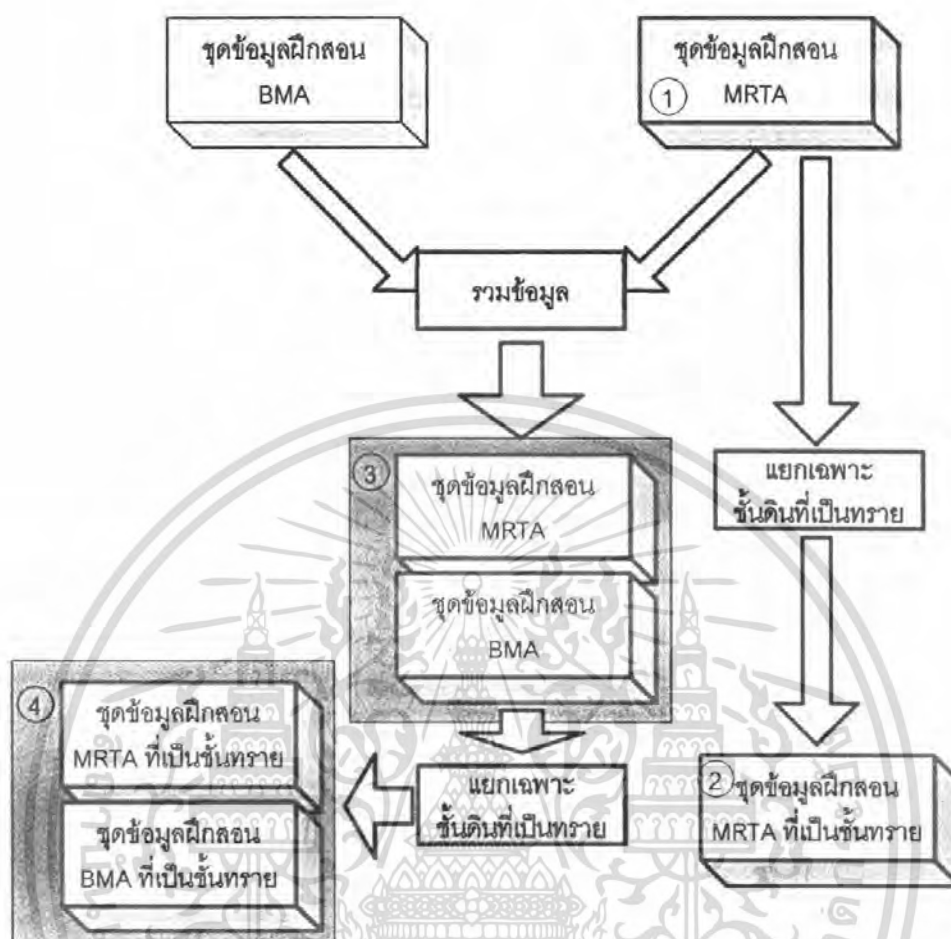
จากการทดสอบความสามารถในการพยากรณ์ค่าของโครงข่ายประสาทเทียม โดยการแยกโครงข่ายตามชนิดชั้นดินที่หัวเจาะฝังตัวอยู่ สำหรับในชั้นดินที่เป็นชั้นทรายทั้งส่วนบนและล่างของหัวเจาะมีผลการพยากรณ์ค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับการพยากรณ์ค่าในชั้นดินเดียวกัน โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้นการใช้โครงข่ายที่ได้รับการฝึกจากชุดข้อมูลมาก ๆ อาจมีผลให้การพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของชั้นดินชนิดนี้ได้ดีขึ้นกว่าเดิม

จากข้อมูลของหัวเจาะอุโมงค์ใต้ดินที่มีอยู่เดิมนั้นมีข้อมูลที่เป็นการเจาะเจาะในชั้นทรายน้อยมาก จึงจำเป็นต้องมีการใช้ข้อมูลจากหัวเจาะอื่นในการทดสอบด้วย สำหรับการทดสอบเพื่อหาว่าการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยชุดข้อมูลฝึกสอนแบบใดจึงจะมีการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวที่ผิดพลาดได้ตรงมากที่สุด การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะใช้ชุดข้อมูลในการฝึกสอนและทดสอบดังตารางนี้

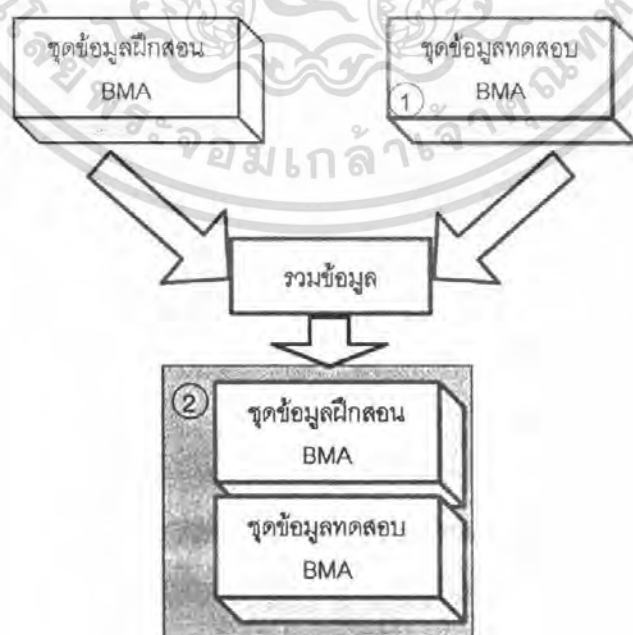
ตารางที่ 3.3 รูปแบบชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบที่ใช้ทดสอบการพยากรณ์ค่าในชั้นทราย

ชุดข้อมูลฝึกสอน	ชุดข้อมูลทดสอบ
(1) ข้อมูลทั้งหมดใน 4 โชน	(1) ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายของโครงการ BMA ทั้งหมด
(2) ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายทั้งหมดใน 4 โชน	(1) ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายของโครงการ BMA ทั้งหมด
(3) ข้อมูลทั้งหมดใน 4 โชน + ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายของโครงการ BMA	(2) ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายของโครงการ BMA
(4) ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายทั้งหมดใน 4 โชน+ ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายของโครงการ BMA	(2) ข้อมูลที่เป็นชั้นทรายของโครงการ BMA

ซึ่งสามารถแยกชุดข้อมูลออกจากกันได้โดยแสดงบล็อกไดอะแกรมในการแยกข้อมูลดังนี้



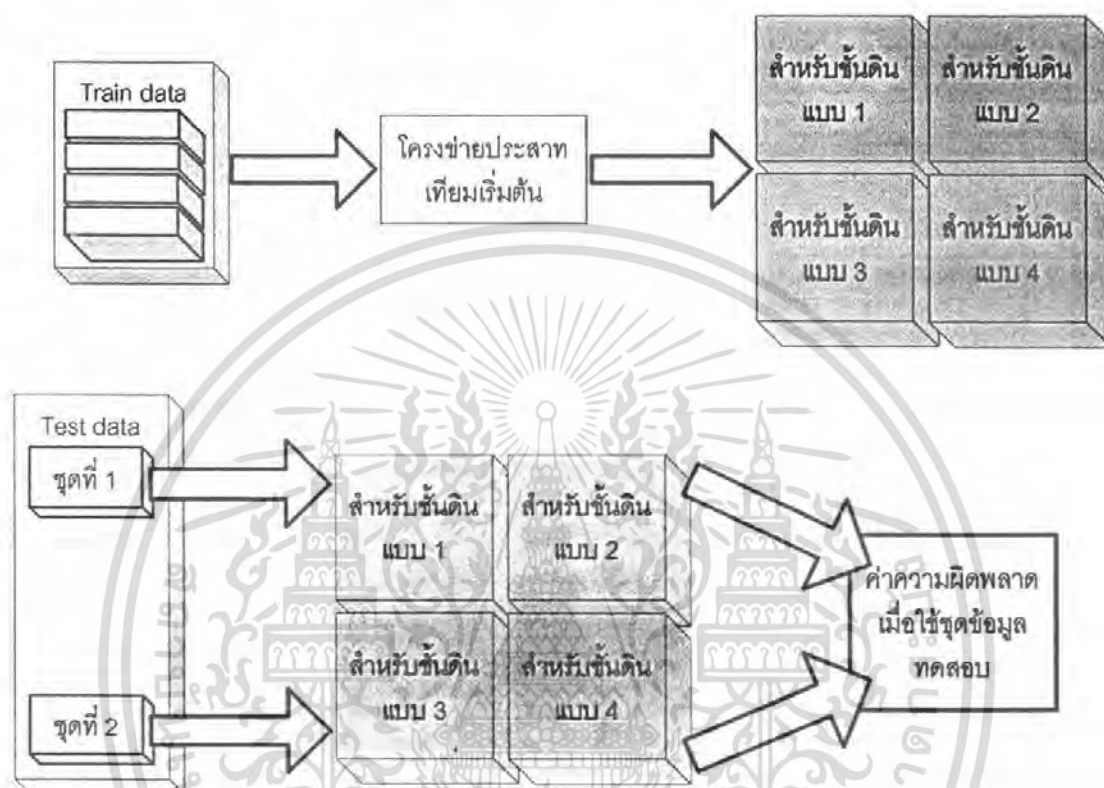
รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอน



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแยกชุดข้อมูลออกแล้ว ชุดข้อมูลแต่ละชุดจะจับกลุ่มเป็นคู่ข้อมูลคือชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบตามตารางที่ 3.3 และทำการทดสอบตามบล็อกไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรม การทำงาน ในการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมในชั้นทราย

### 3.4 การแยกรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมตามกลุ่มข้อมูล

เมื่อคุณผลการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของดินที่ผ่านมาจะเห็นว่า สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลออกได้ตามค่าความผิดพลาดแต่ละบรรทัดข้อมูล ซึ่งค่าความผิดพลาดในกลุ่มที่มีค่าความผิดพลาดต่ำและกลุ่มที่มีค่าความผิดพลาดสูงจะมีค่าที่แตกต่างกันมาก

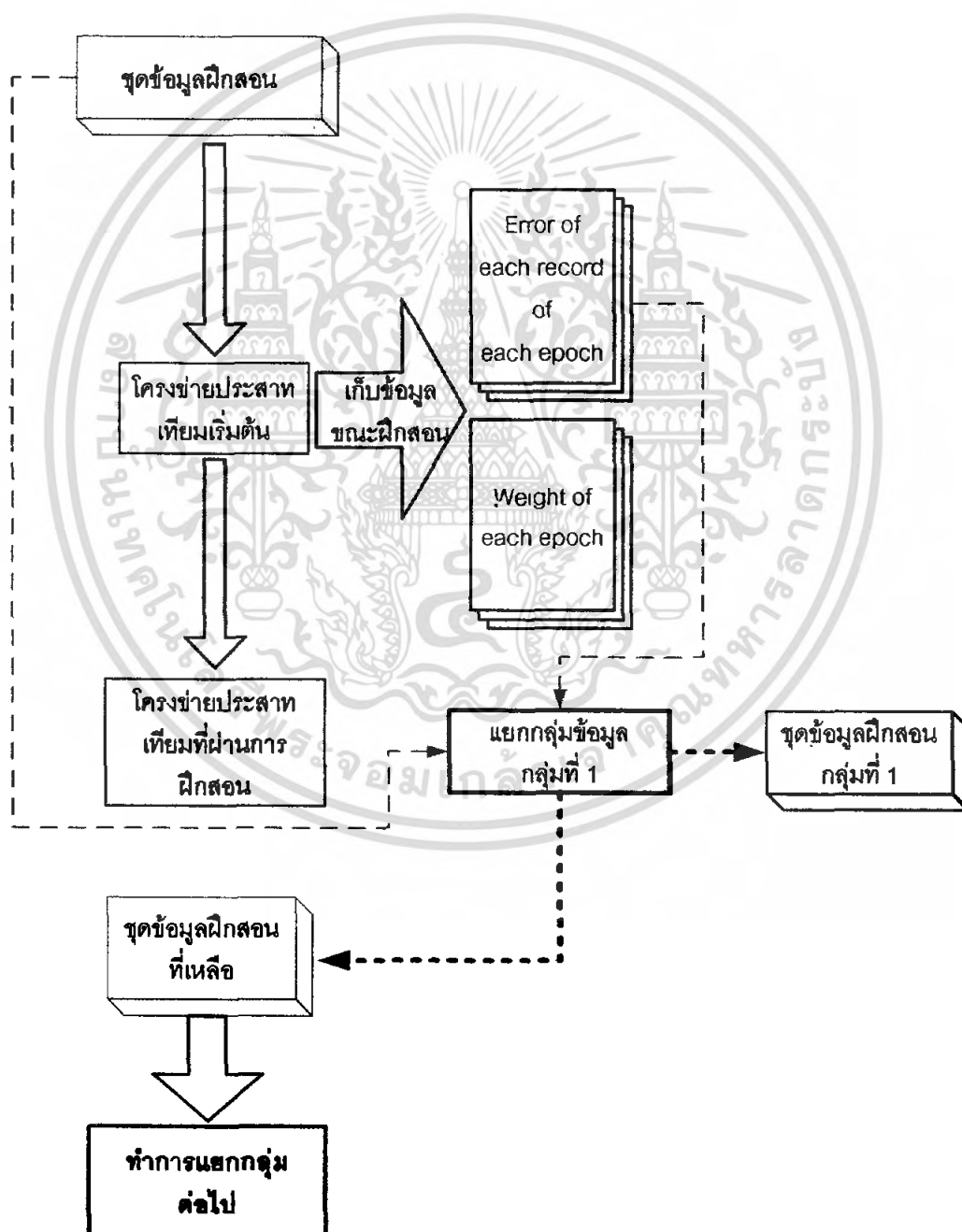
สำหรับวิธีการแยกกลุ่มข้อมูลฝึกสอนนั้น จะใช้วิธีการกรองกลุ่มข้อมูลออกมาทีละกลุ่ม โดยเริ่มจาก

- แยกชุดข้อมูลฝึกสอนตามชนิดชั้นดิน
- ฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนแต่ละแบบชั้นดิน ซึ่งในขณะที่ทำการฝึกสอนนั้นจะเก็บค่าน้ำหนักและค่าความผิดพลาดในแต่ละรอบการฝึกสอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการแยกกลุ่ม โดยการกำหนดค่าคงที่ขึ้นมาค่าหนึ่ง เพื่อใช้ตรวจสอบว่าการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของข้อมูลในบรรทัดใดมีค่าน้อยกว่าบ้าง
  - บรรทัดใดมีค่าน้อยกว่า ค่าที่ค่ากำหนดจะจัดให้เป็นกลุ่มเดียวกัน
  - บรรทัดที่มีค่ามากกว่า จะนำไปใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมใหม่เพื่อจัดกลุ่มต่อไป

ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

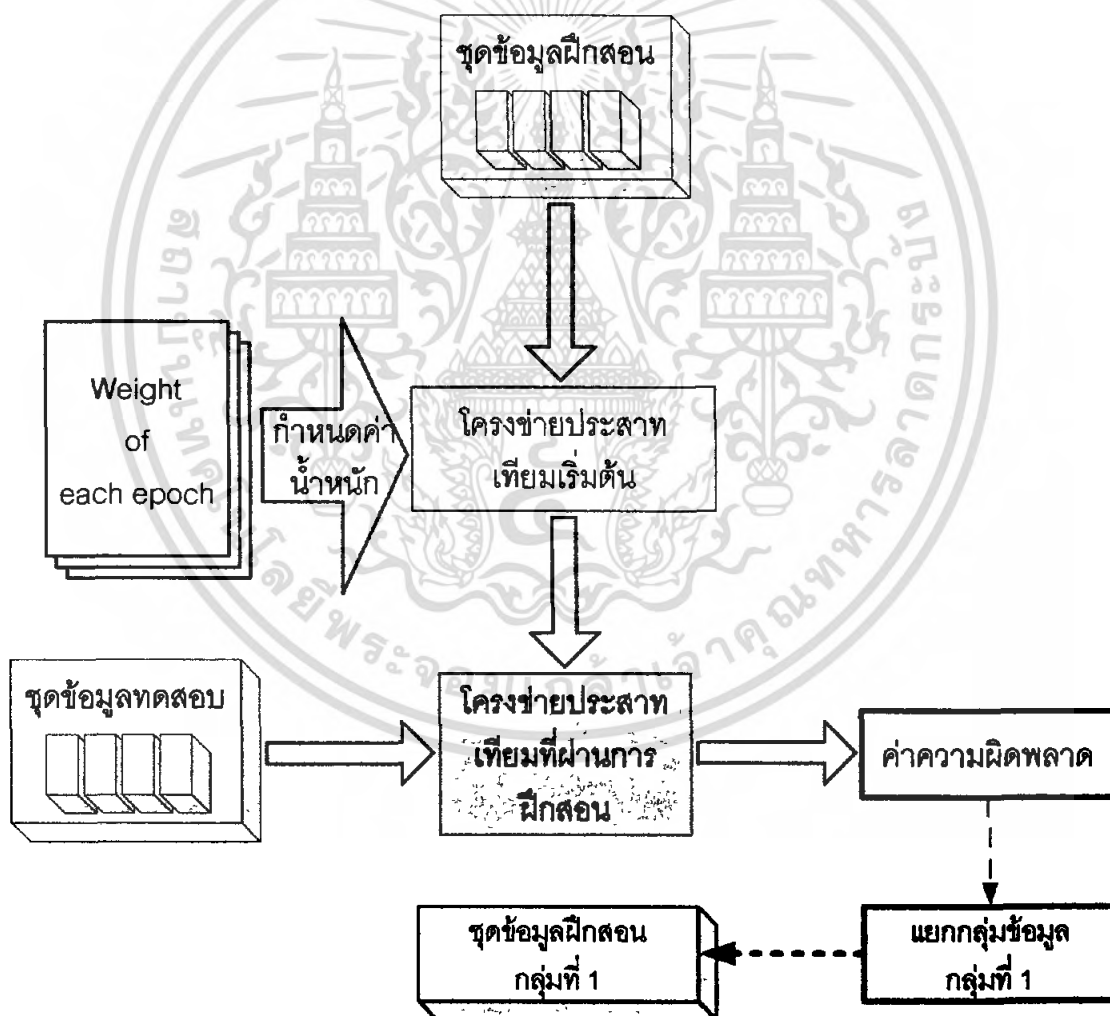


รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมการแยกกลุ่มข้อมูลชุดฝึกสอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ก่อนการแบ่งกลุ่มข้อมูลในหัวข้อนี้จะต้องแยกชุดข้อมูลตามชั้นดินก่อนและเมื่อได้กลุ่มข้อมูลในชุดฝึกสอนในแต่ละแบบชั้นดินแล้วจะทำการแยกข้อมูลชุดทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- นำชุดข้อมูลฝึกสอนแต่ละกลุ่มในแต่ละแบบชั้นดิน ไปใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่กำหนดค่าน้ำหนักเริ่มต้นตามค่าที่เก็บไว้ในไฟล์ ในช่วงแยกกลุ่มข้อมูลฝึกสอน
- นำโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมดที่ได้รับการฝึกสอนแล้วไปทำการพยากรณ์การทรุดด้วยชุดข้อมูลทดสอบทั้งหมดของแต่ละแบบชั้นดิน
- ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความผิดพลาดในการพยากรณ์
- นำค่าความผิดพลาดที่ได้มาใช้จำแนกกลุ่มของข้อมูลทดสอบ



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมการแยกกลุ่มข้อมูลชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหาประสิทธิภาพในการพยากรณ์ทำได้โดยการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยชุดข้อมูลฝึกสอนแต่ละกลุ่มและนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้สำหรับแต่ละกลุ่มไปทดสอบโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะได้เป็นค่าความผิดพลาดและหาค่าราคาที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดได้

### 3.5 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมโดยวิธีครีความผิดพลาดในขั้นตอนการ

#### ฝึกสอน

เนื่องจากข้อมูลฝึกสอนที่ได้มาไม่สามารถรับรองได้ว่าจะมีความถูกต้องแน่นอนดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลที่มีข้อผิดพลาดอาจจะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง หรือแม้กระทั่งการที่กลุ่มข้อมูลใดกลุ่มหนึ่งมีจำนวนสมาชิกมาก ๆ ก็จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถพยากรณ์กลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะตามกลุ่มดังกล่าวได้อย่างแม่นยำและในขณะเดียวกันกลุ่มข้อมูลที่เหลือจะมีความแม่นยำในการพยากรณ์ค่าการทรุดต่ำกว่า ซึ่งถ้าหากพิจารณากรณีที่มีตัวป้อนเข้าในโครงข่าย 2 ตัวแปร จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าน้ำหนัก 2 ตัวในหนึ่งหน่วยประสาทเทียม และสมการของค่าที่ได้จากหน่วยประสาทเทียมดังนี้

$$y = x_1 w_1 + x_2 w_2 + b \quad (3.2)$$

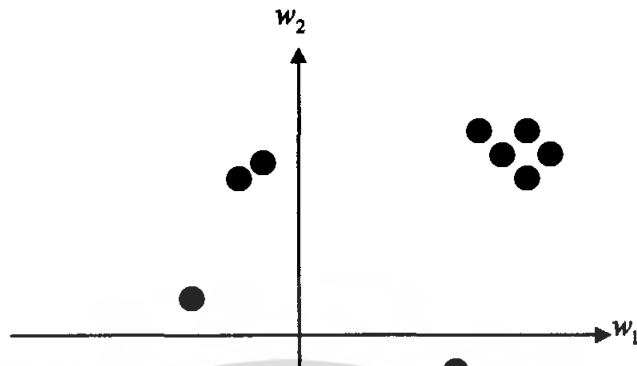
หรือ

$$y - b = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \text{เวกเตอร์ของค่าน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียม}$$

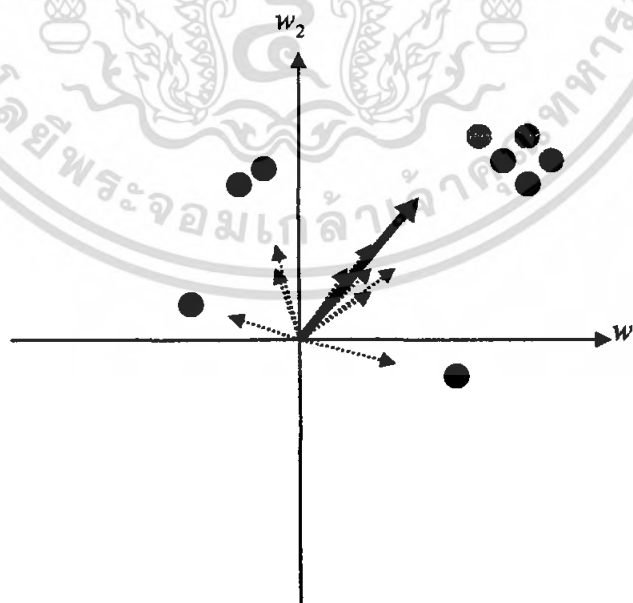
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \text{เวกเตอร์ของตัวแปรป้อนเข้าในโครงข่ายประสาทเทียม}$$

จะเห็นได้ว่าการหาค่าน้ำหนักที่ทำให้สมการนี้เป็นจริงได้จะต้องประกอบไปด้วย 2 บรรทัดข้อมูล เมื่อมีการจับคู่ระหว่าง 2 บรรทัดข้อมูลใด ๆ จะทำให้หาเวกเตอร์ของค่าน้ำหนักได้ 1 เวกเตอร์ ดังนั้นการที่มีข้อมูลอยู่หลาย ๆ บรรทัดข้อมูลก็จะทำให้เกิดเวกเตอร์ขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งหากสมมุติให้มีเวกเตอร์ของค่าน้ำหนักดังรูป



รูปที่ 3.9 แสดงเวกเตอร์ค่าน้ำหนักที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์สำหรับทุก ๆ สองบรรทัดข้อมูล

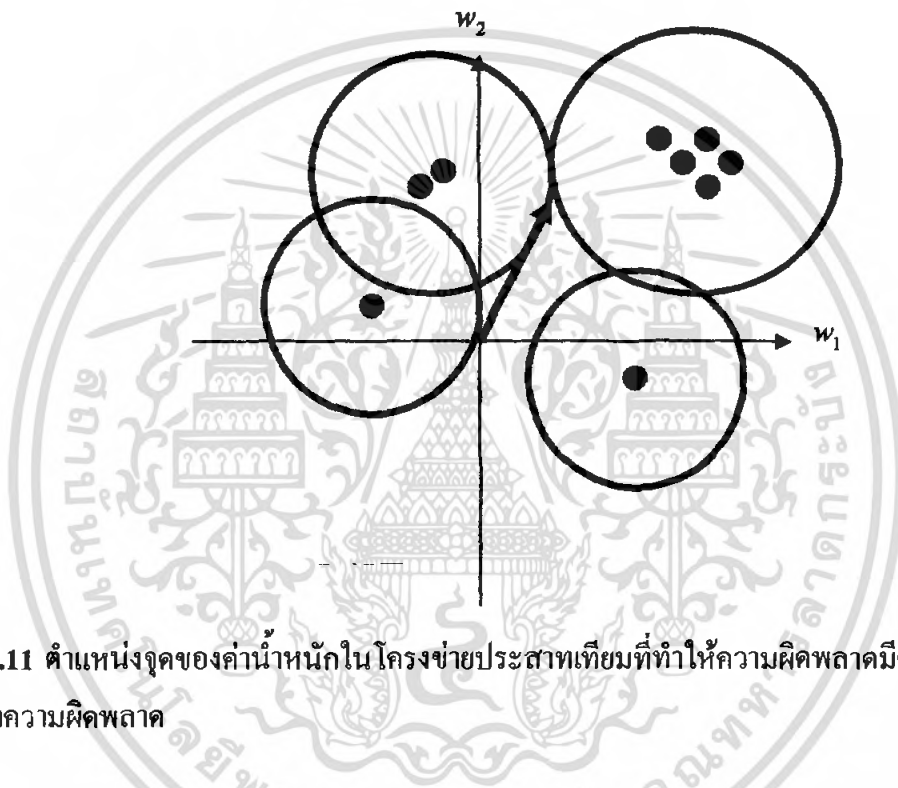
จากรูปของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์สำหรับทุก ๆ สองบรรทัดข้อมูล เมื่อมีการคำนวณค่าที่จะปรับค่าน้ำหนัก ( $\Delta X$ ) ต่าง ๆ ตามเวกเตอร์เส้นประสีแดงและจะได้ผลรวมของเวกเตอร์ตามเส้นสีน้ำเงิน



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์การปรับค่าน้ำหนักและเวกเตอร์ค่าน้ำหนักที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์สำหรับทุก ๆ สองบรรทัดข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

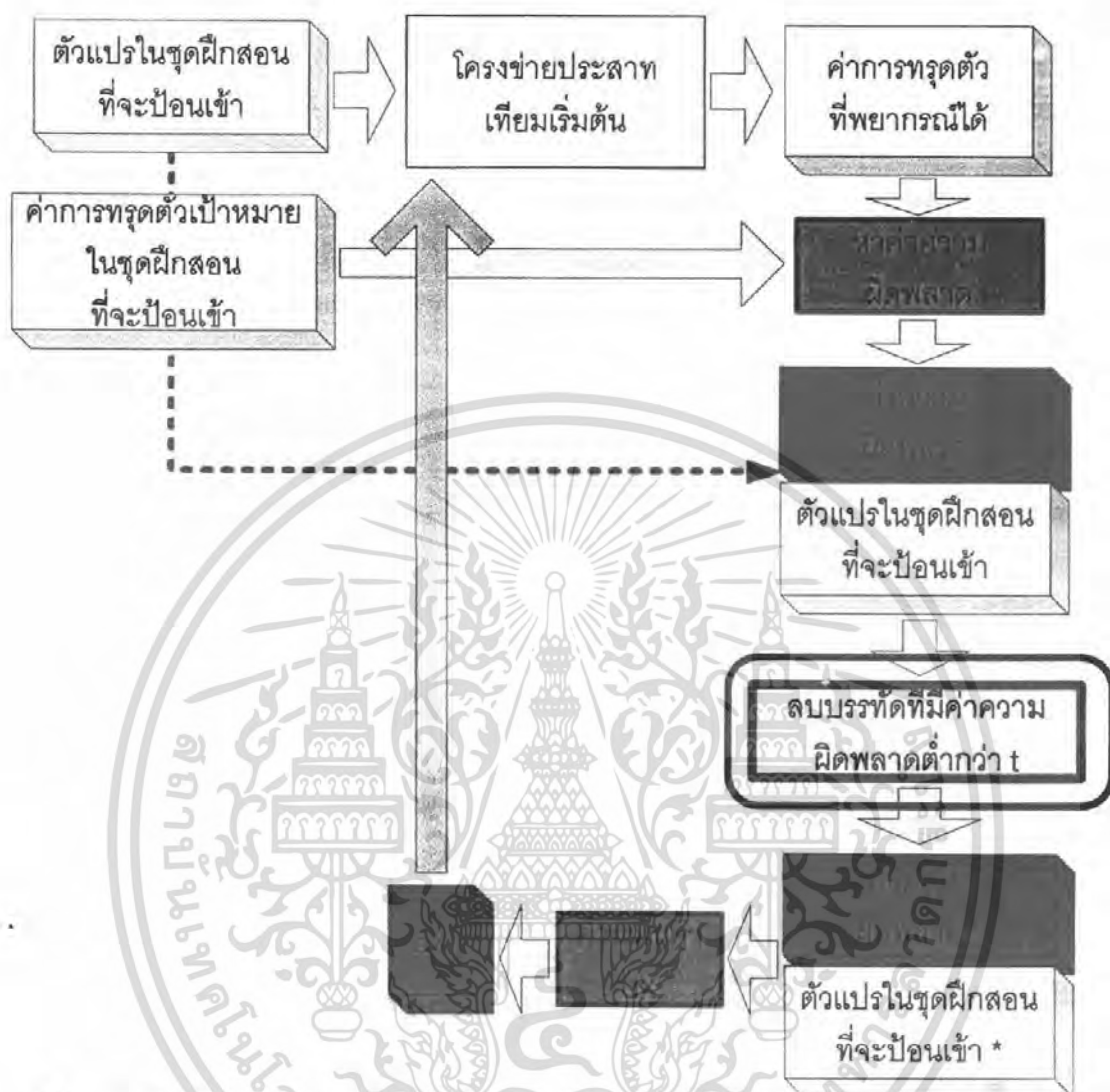
จากรูปจะเห็นได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมจะมีการปรับค่าน้ำหนักตามเส้นสีน้ำเงินซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการปรับค่าน้ำหนักไปตามกลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนสมาชิกในกลุ่มมาก ๆ ทำให้ความสำคัญของกลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนสมาชิกในกลุ่มน้อย ๆ หมดความสำคัญไป ซึ่งหากเราเว้นรัศมีของความผิดพลาดไว้ จะทำให้ค่าน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียมมีการปรับค่าเข้าหากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ มากขึ้น ดังรูป



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งจุดของค่าน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำให้ความผิดพลาดมีค่าน้อยกับรัศมีค่าความผิดพลาด

จะเห็นได้ว่าค่าน้ำหนักนั้นมีการปรับค่าไปทางกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ มากขึ้นทำให้ผลในการพยากรณ์โดยรวมดีขึ้นคือ จะมีค่าความผิดพลาดสูงที่สุดน้อยลง

จากแนวความคิดดังกล่าวจะต้องมีการปรับปรุงวิธีการปรับค่าน้ำหนักในช่วงของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งจะต้องเพิ่มส่วนที่ใช้ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของแต่ละบรรทัดข้อมูลว่ามีความผิดพลาดในรอบการฝึกสอนต่ำกว่าค่าที่เรากำหนดหรือไม่ ถ้าต่ำกว่าจะตัดเวกเตอร์ที่ใช้ปรับค่าน้ำหนักที่คิดได้จากความผิดพลาดของบรรทัดนั้นออกไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามบล็อกไดอะแกรมนี้



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเพิ่มส่วนที่ใช้พิจารณาค่าความผิดพลาด

สำหรับการทดสอบเพื่อดูประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าการหลุดตัวของระบบจะทำการทดสอบโดยการแยกรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมตามข้อมูลแต่ละชั้นคืน

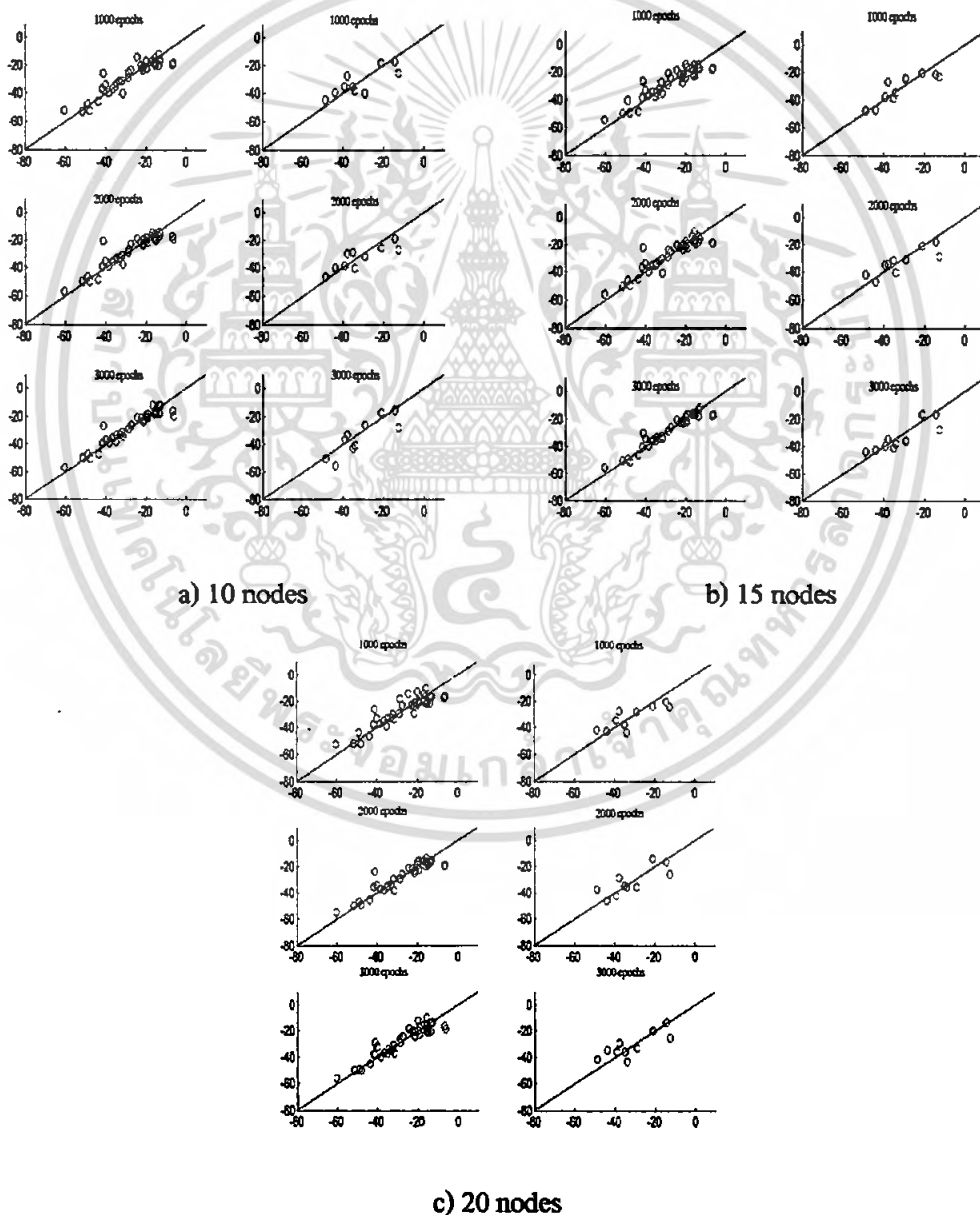
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### 4.1 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป

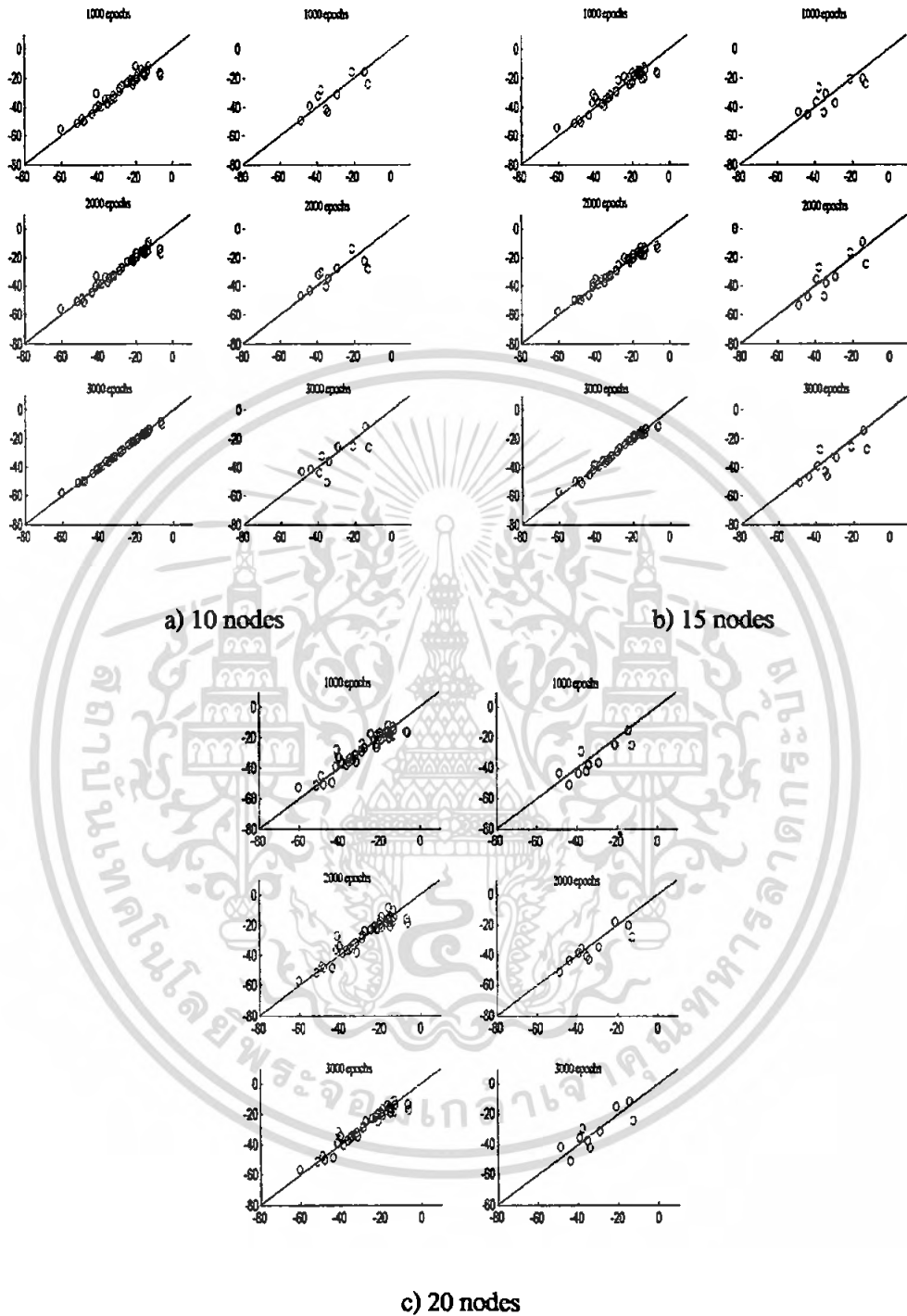
จากการทดสอบ โดยสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่มีสถาปัตยกรรม 1 และ 2 ชั้นแฝง โดยในแต่ละชั้นแฝงจะมีจำนวน 10 15 20 หน่วยประสาทเทียมและทำการฝึกสอนเป็นจำนวน 1,000 2,000 3,000 รอบตามลำดับ เพื่อดูความสามารถในการพยากรณ์ของแต่ละสถาปัตยกรรม

เมื่อทำการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไปตามสคริปต์สามารถวาดกราฟได้ดังนี้



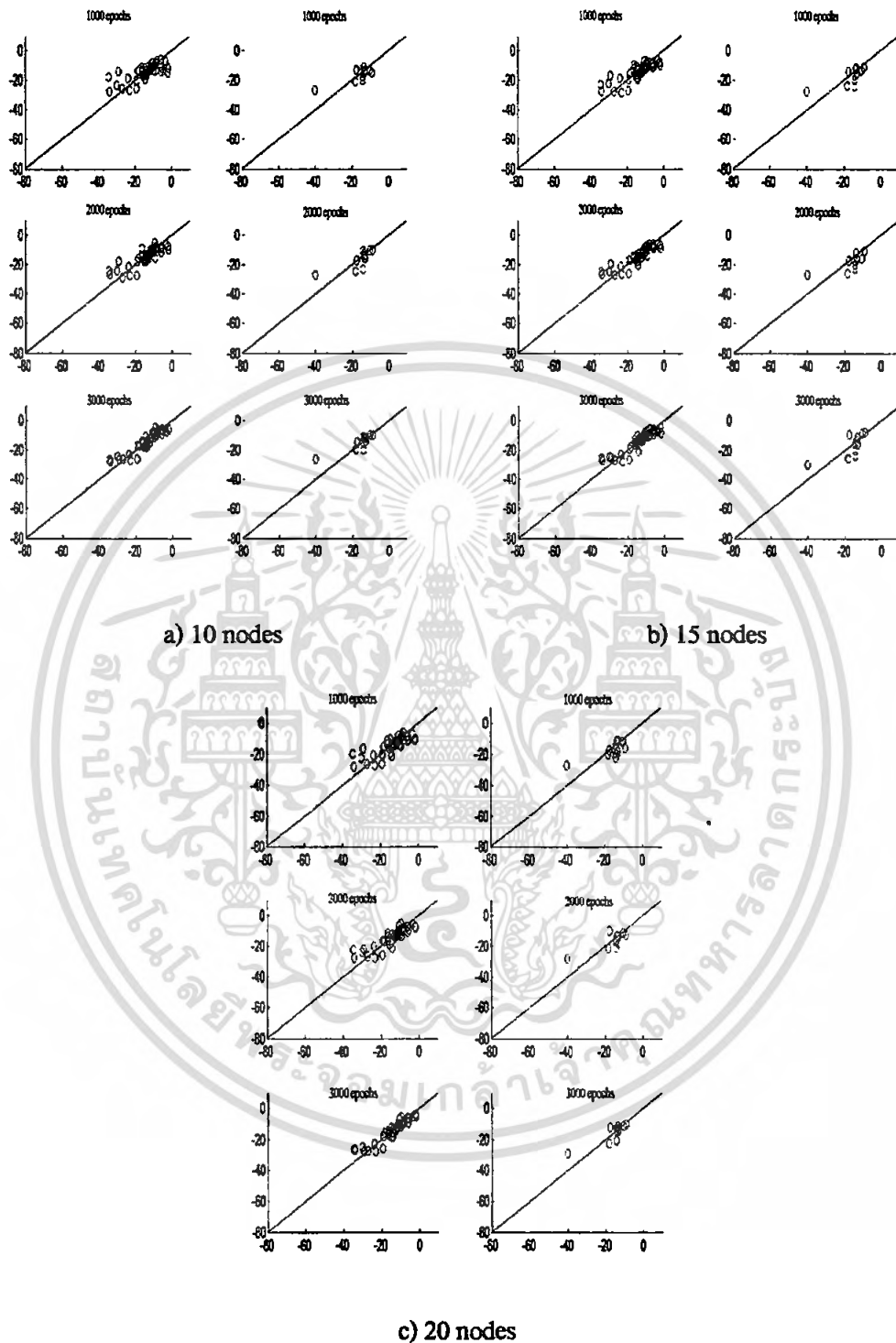
รูปที่ 4.1 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



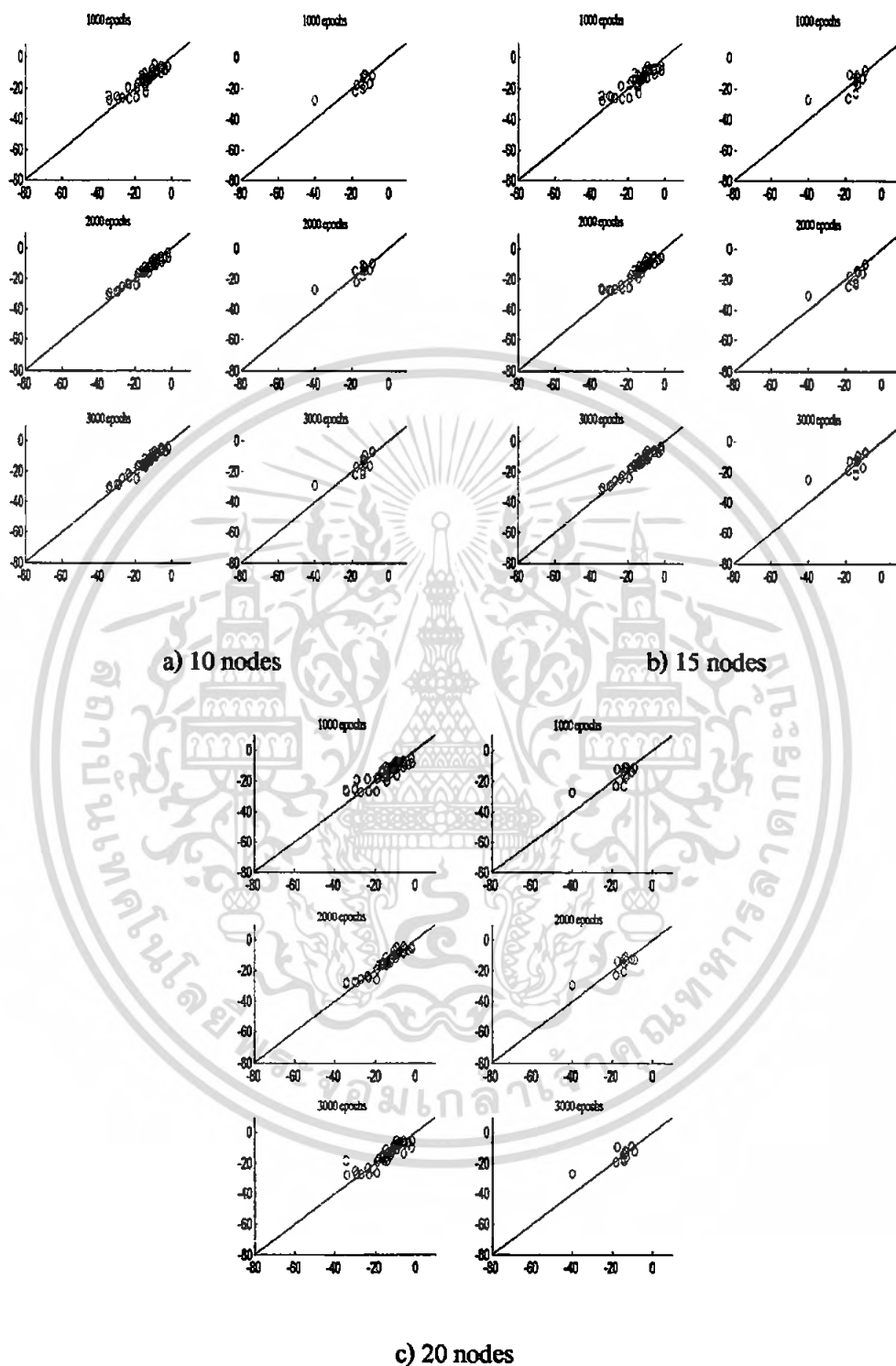
รูปที่ 4.2 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝงโดยใช้ชุดข้อมูล โซน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



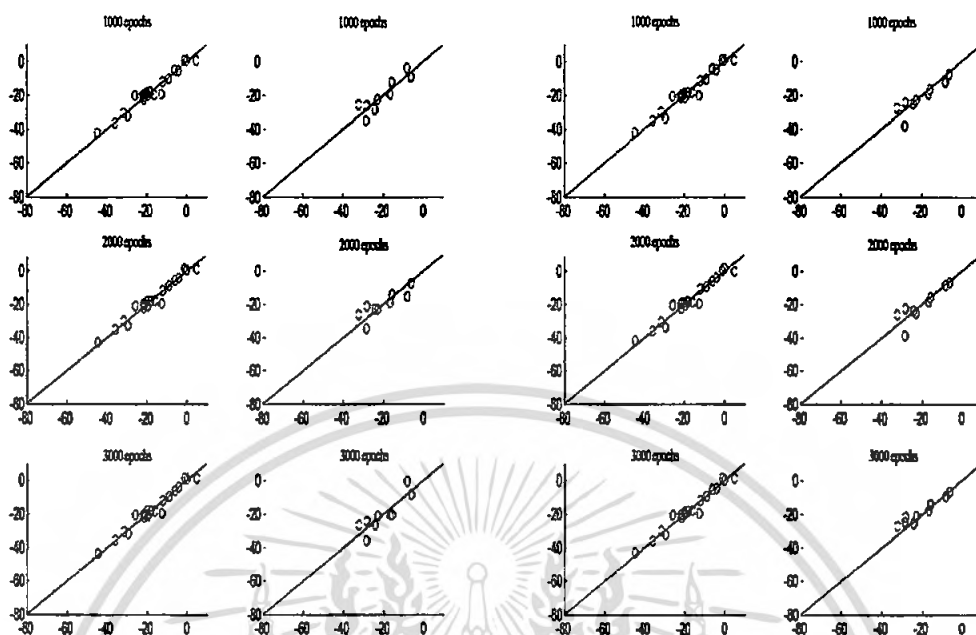
รูปที่ 4.3 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



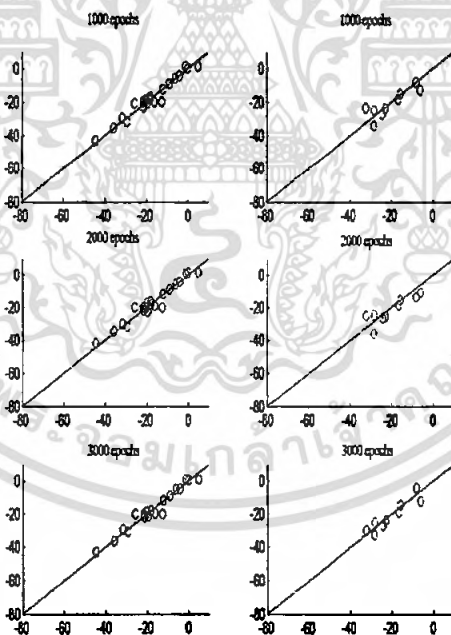
รูปที่ 4.4 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) 10 nodes

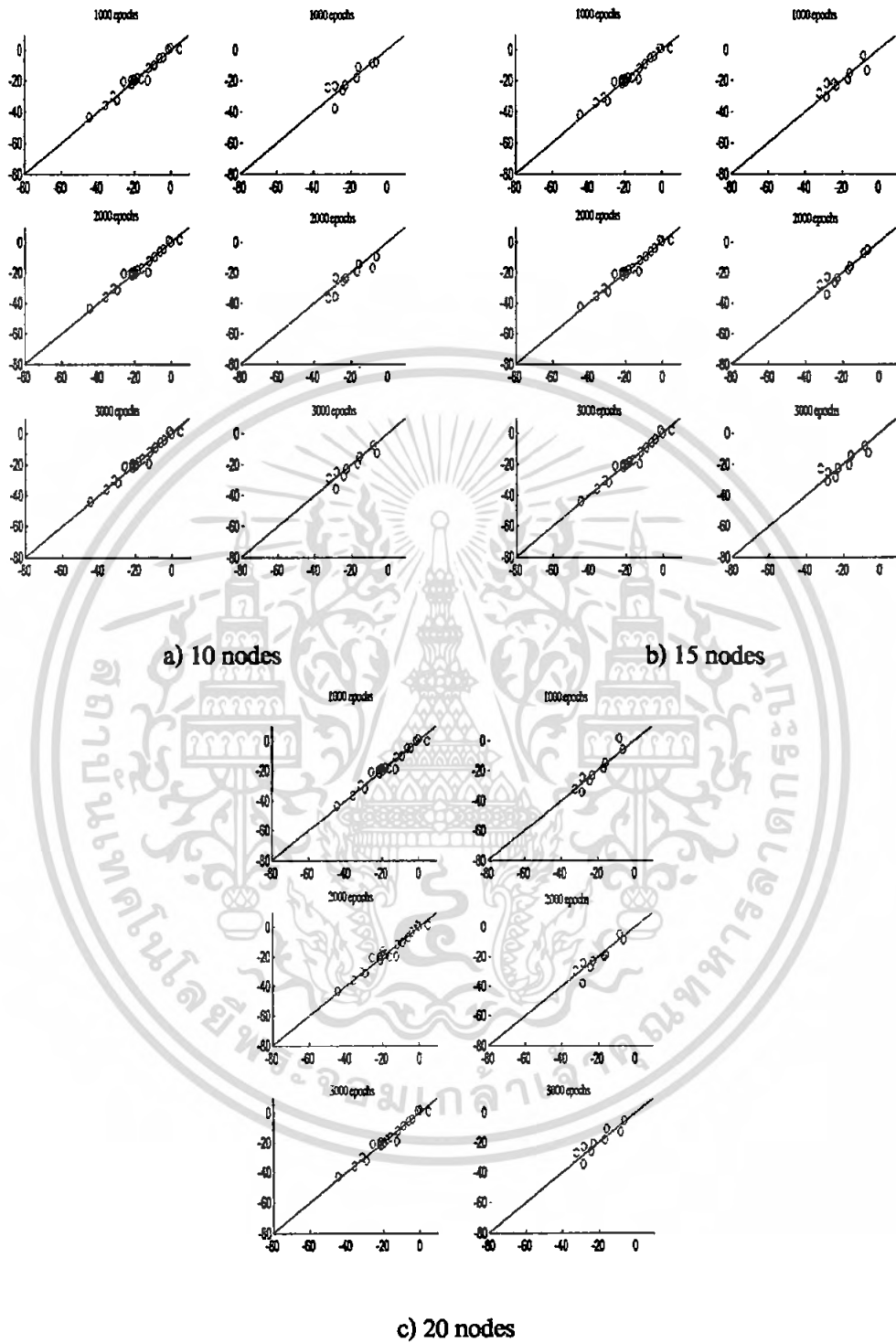
b) 15 nodes



c) 20 nodes

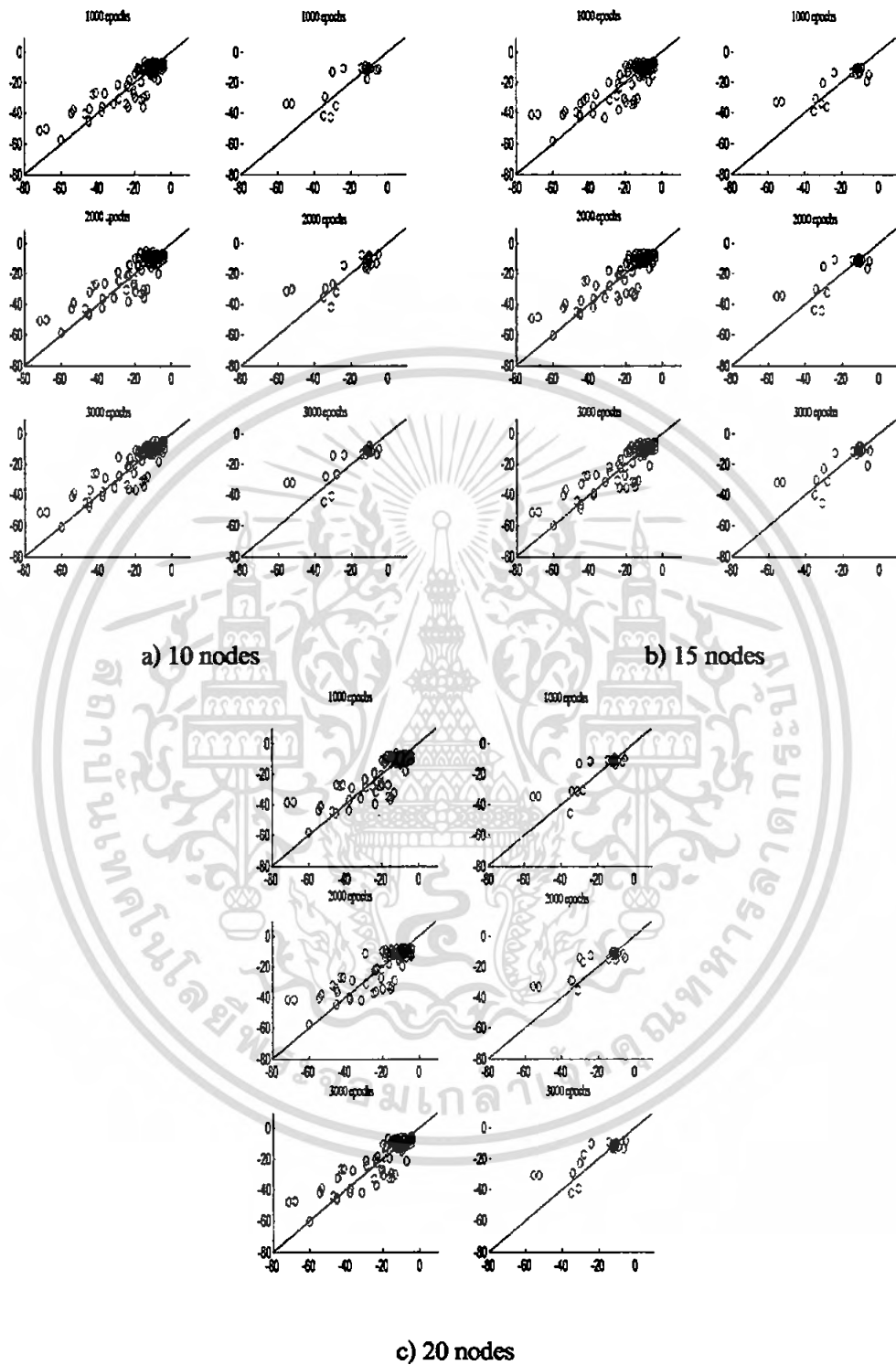
รูปที่ 4.5 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูลโซน C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



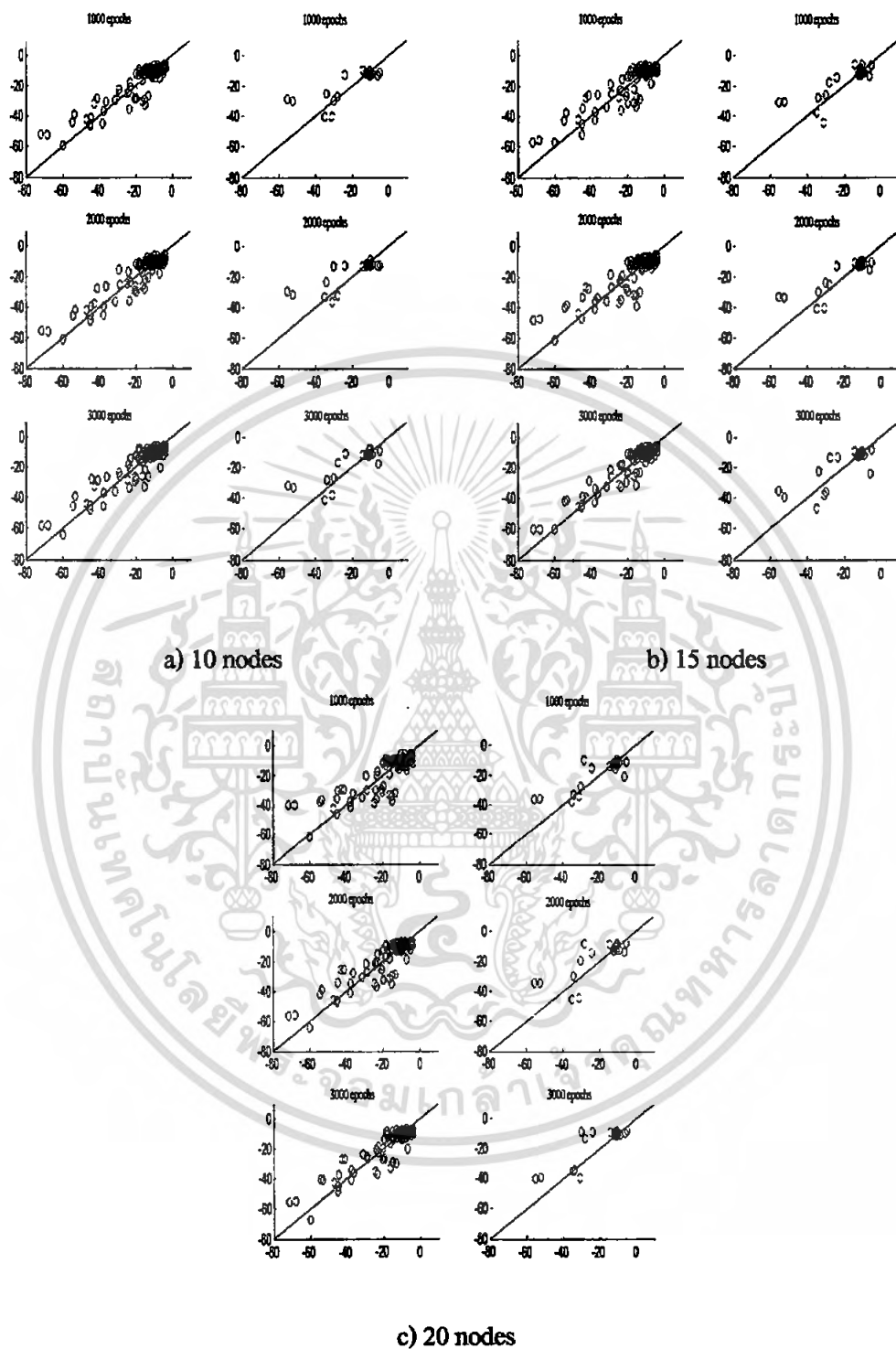
รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบ โครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โชน C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 1 ชั้นแฝง โดยใช้ชุดข้อมูล โชน D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปที่มี 2 ชั้นแฝงโดยใช้ชุดข้อมูล โซน D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบสามารถแสดงตารางของค่าประสิทธิภาพซึ่งวัดจากค่า RMSE ได้ดังนี้  
 ตารางที่ 4.1 ค่า RMSE ของผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบโซน A

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย						
training						
10 หน่วย	5.63	4.91	4.76	4.50	4.46	3.44
15 หน่วย	5.28	5.11	3.53	4.05	2.50	1.75
20 หน่วย	5.22	5.03	4.09	3.58	2.88	0.88
testing						
10 หน่วย	6.82	7.08	7.12	6.70	6.40	6.60
15 หน่วย	5.84	6.44	6.16	6.92	7.32	7.52
20 หน่วย	6.93	6.50	7.24	6.78	7.04	7.44

ตารางที่ 4.2 ค่า RMSE ของผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบโซน B

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย						
training						
10 หน่วย	5.30	4.12	2.94	3.84	2.36	3.83
15 หน่วย	4.76	3.91	2.76	3.69	2.82	1.74
20 หน่วย	4.54	3.61	3.23	3.44	1.84	1.84
testing						
10 หน่วย	5.30	5.49	4.90	5.65	4.51	5.24
15 หน่วย	5.53	5.36	4.78	5.92	5.49	5.95
20 หน่วย	5.80	6.14	5.84	5.19	4.82	5.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หน้าที่ใช้ประโยชน์จากเอกสารค่า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า RMSE ของผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบโซน C

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย						
training						
10 หน่วย	2.45	2.70	2.56	2.39	2.59	2.22
15 หน่วย	2.66	2.68	2.33	2.42	2.33	2.19
20 หน่วย	2.54	2.35	2.40	2.40	2.24	2.12
testing						
10 หน่วย	4.51	4.56	3.37	4.15	4.17	4.11
15 หน่วย	4.13	4.60	3.39	4.11	3.31	4.51
20 หน่วย	4.12	4.69	4.90	4.83	4.57	3.93

ตารางที่ 4.4 ค่า RMSE ของผลการทดสอบโครงข่ายแบบทั่วไปโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบโซน D

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย						
training						
10 หน่วย	8.00	7.98	6.99	7.88	6.42	6.19
15 หน่วย	7.74	6.95	6.88	6.36	6.97	4.97
20 หน่วย	6.76	7.15	6.64	5.93	5.42	5.77
Testing						
10 หน่วย	8.22	8.85	9.01	8.26	9.45	8.43
15 หน่วย	8.48	8.75	9.02	8.89	7.99	8.80
20 หน่วย	8.91	8.51	8.85	8.90	9.41	8.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

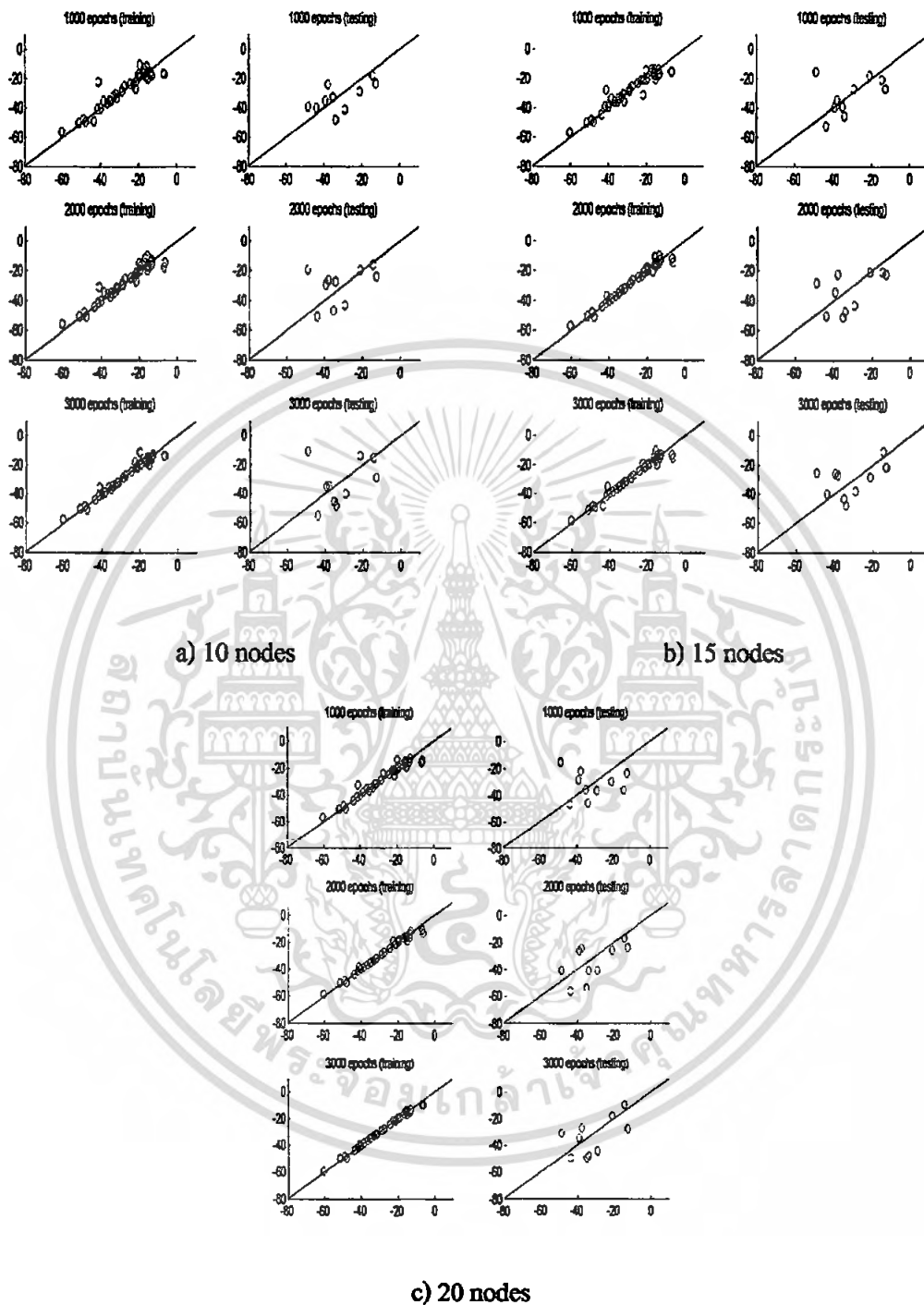
จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดจะมีค่าที่ไม่เท่ากันในแต่ละครั้งที่มีการทดสอบในแต่ละสถาปัตยกรรม ดังนั้นจึงสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัว โดยดูจากค่าเฉลี่ยของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดในทุก ๆ ครั้งที่ทดสอบแต่ละสถาปัตยกรรมซึ่งจะได้ค่าตามตารางที่ 4.1 - 4.4

จากข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าจากการทดสอบในชุดการทดสอบแรกไม่สามารถระบุสถาปัตยกรรมที่จะพยากรณ์การทรุดตัวได้ เนื่องจากไม่สามารถดูแนวโน้มประสิทธิภาพในการพยากรณ์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม แต่สิ่งที่สังเกตได้อย่างหนึ่งคือรูปแบบสถาปัตยกรรมที่มีจำนวน 2 ชั้นแฝง มีแนวโน้มที่จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของชุดข้อมูลฝึกสอนได้ใกล้เคียงมากกว่า แต่สำหรับในชุดทดสอบกลับมีการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวที่มีความผิดพลาดสูงขึ้น

#### 4.2 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน

จากชุดการทดสอบที่ผ่านมาจะเป็นการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวที่ไม่มีการแบ่งกลุ่มของข้อมูล จึงสังเกตเห็นว่าหากมีการแบ่งกลุ่มของข้อมูลอาจจะทำให้การพยากรณ์ค่าการทรุดตัวมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งการแบ่งข้อมูลที่น่าจะมีผลกระทบต่อพยากรณ์ค่าการทรุดตัวมากที่สุดนั่นคือ การแบ่งข้อมูลตามชั้นดิน

จากชุดข้อมูลใน โชน A จะเห็นว่าไม่มีข้อมูลในชั้นดินที่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อน-ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นทราย-ชั้นทราย ทำให้ไม่มีผลการทดสอบของชั้นดินทั้งสองแบบนี้ ซึ่งจากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูลโซน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

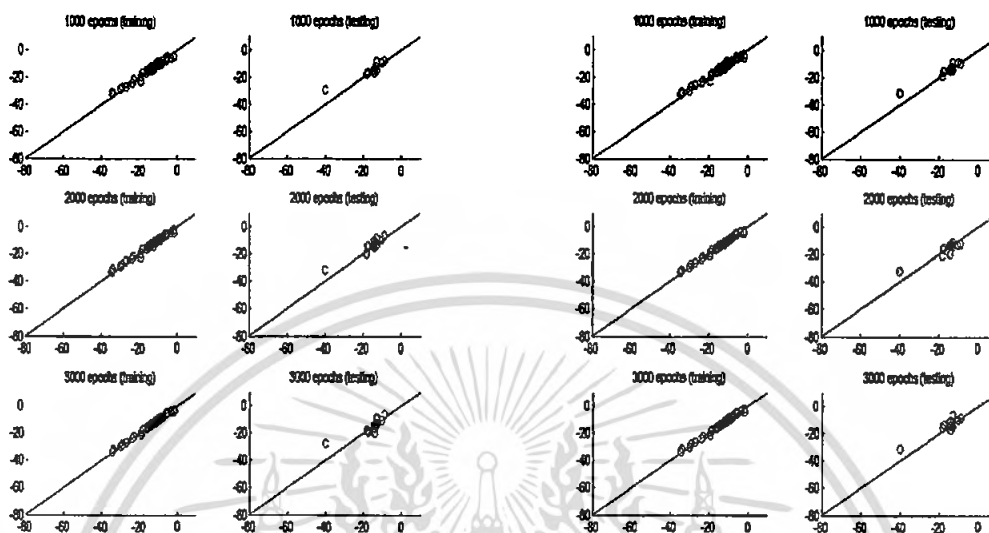
ตารางที่ 4.5 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นดินโดยใช้ชุดข้อมูล โซน A

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	6.85/4.18	6.19/4.00	8.21/2.55
15 หน่วย	7.65/4.05	6.99/2.71	7.88/1.81
20 หน่วย	6.23/3.25	7.05/1.98	6.87/1.60



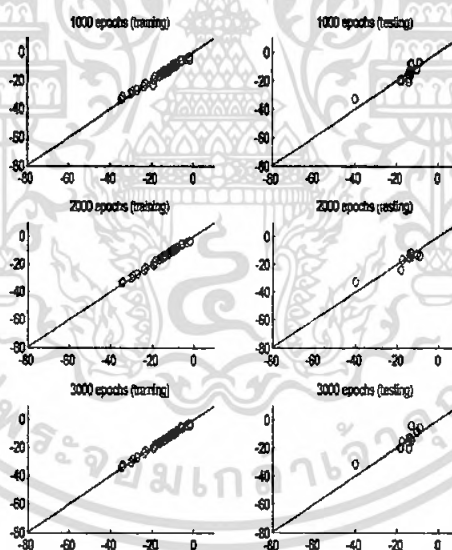
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชุดข้อมูลในโซน B ไม่มีข้อมูลในชั้นดินที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทราย ทำให้ไม่มีผลการทดสอบของชั้นดินแบบนี้ ซึ่งจากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบดังนี้



a) 10 nodes

b) 15 nodes



c) 20 nodes

รูปที่ 4.10 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูลโซน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

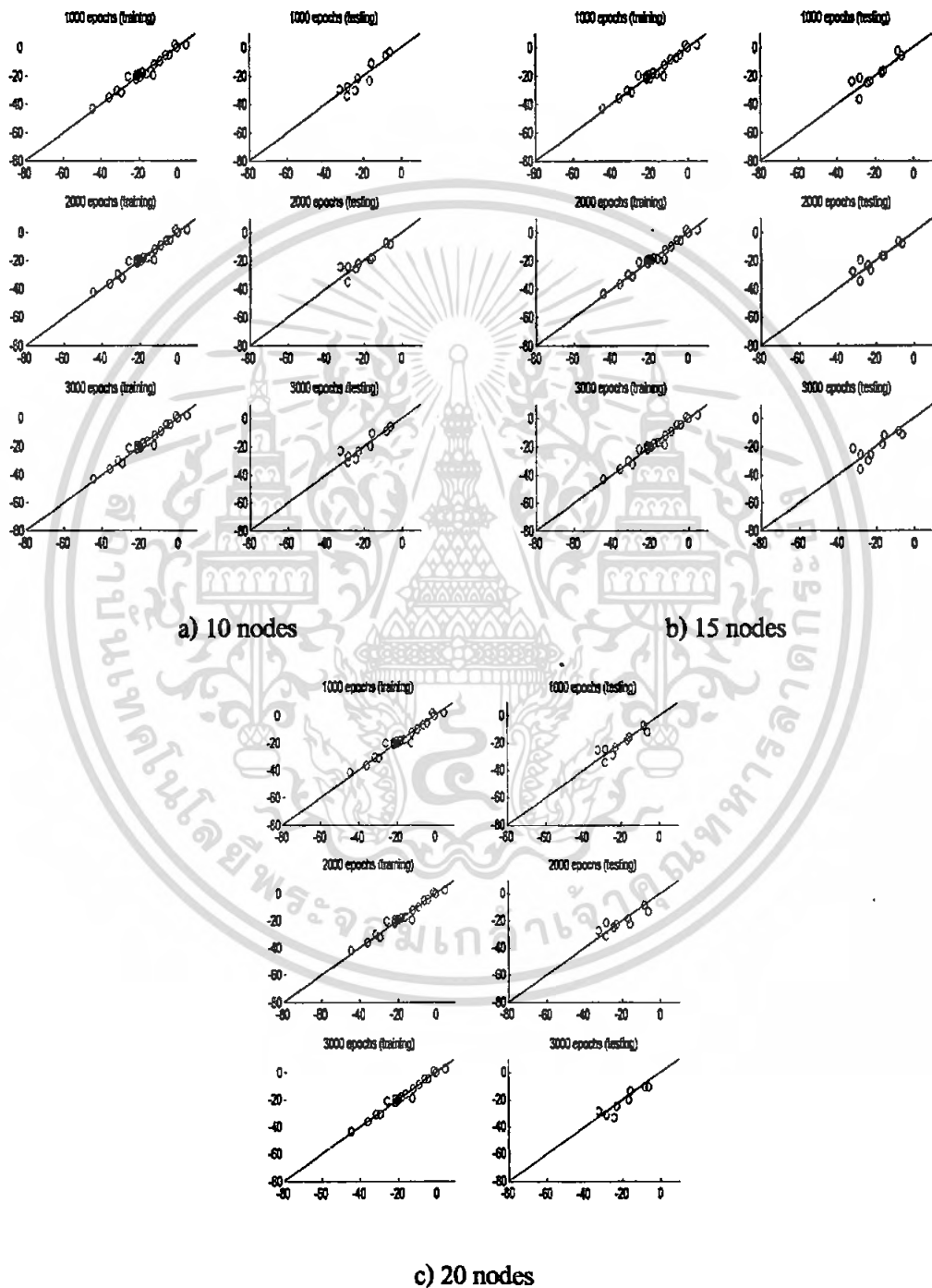
ตารางที่ 4.6 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นดิน โดยใช้ชุดข้อมูล โซน B

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	3.75/1.36	3.45/1.10	4.39/0.67
15 หน่วย	3.13/1.31	3.45/0.75	3.93/0.76
20 หน่วย	3.81/1.09	3.33/0.57	4.61/0.55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชุดข้อมูลในโซน C ไม่มีข้อมูลในชั้นคินที่เป็นชั้นคินเหนียวแข็ง-ชั้นทราย และชั้นทราย-ชั้นทราย ทำให้ไม่มีผลการทดสอบของชั้นคินทั้งสองแบบนี้ ซึ่งจากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.11 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นคิน โดยใช้ชุดข้อมูลโซน C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

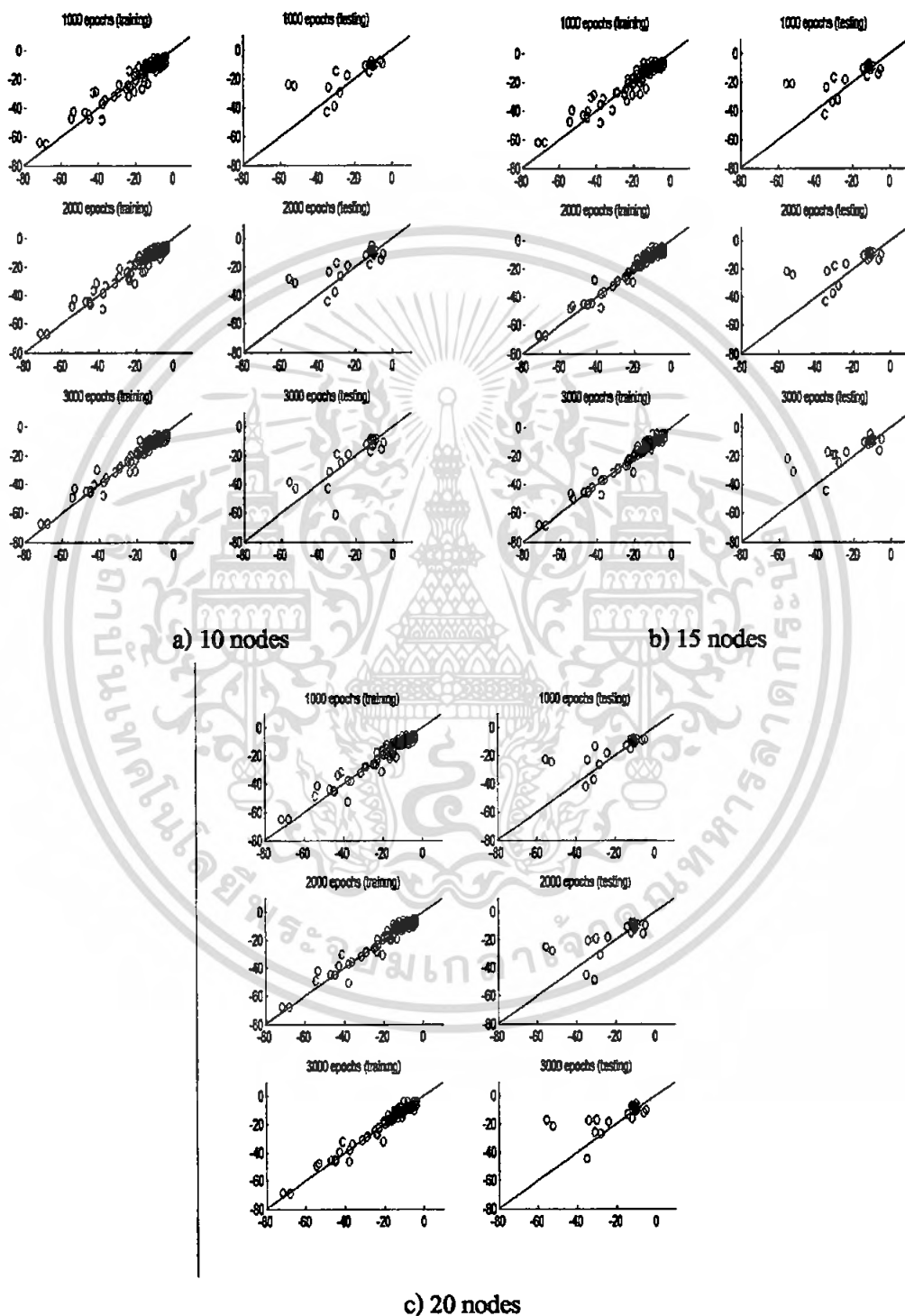
ตารางที่ 4.7 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นคืนโดยใช้ชุดข้อมูลโซน C

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	4.13/2.41	4.02/2.38	4.06/2.11
15 หน่วย	4.93/2.54	4.20/2.22	5.53/1.97
20 หน่วย	4.22/2.38	4.45/2.28	4.26/2.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชุดข้อมูลในโซน D มีข้อมูลในทุกชั้นดิน ซึ่งจากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบ ดังนี้



รูปที่ 4.12 กราฟทดสอบโครงข่ายแบบแยกชั้นดินโดยใช้ชุดข้อมูลโซน D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแยกชั้นคืนโดยใช้ชุดข้อมูลโซน D

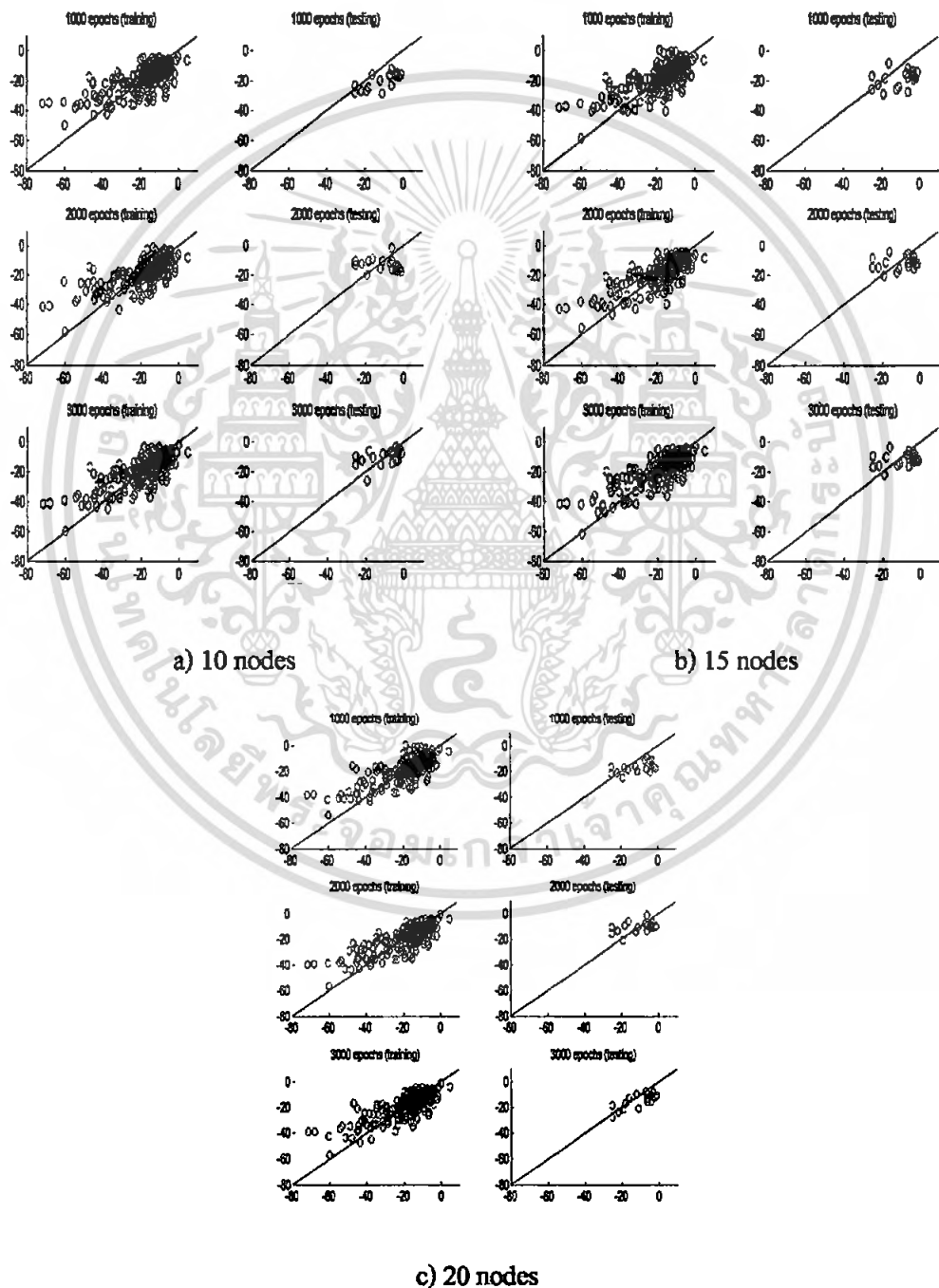
จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	10.45/4.28	9.39/3.61	9.06/3.22
15 หน่วย	11.46/4.40	11.15/2.96	10.95/2.71
20 หน่วย	10.84/3.67	10.88/3.25	12.29/2.65

จากการทดสอบในชุดการทดสอบที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อแยกโครงข่ายประสาทเทียมตามลักษณะของชั้นคืนจะทำให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์มีผลโดยรวมที่ดีขึ้น ยกเว้นการพยากรณ์จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับชั้นทราย - ชั้นทราย

แต่อย่างไรก็ตามค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าไม่คงที่ในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบ

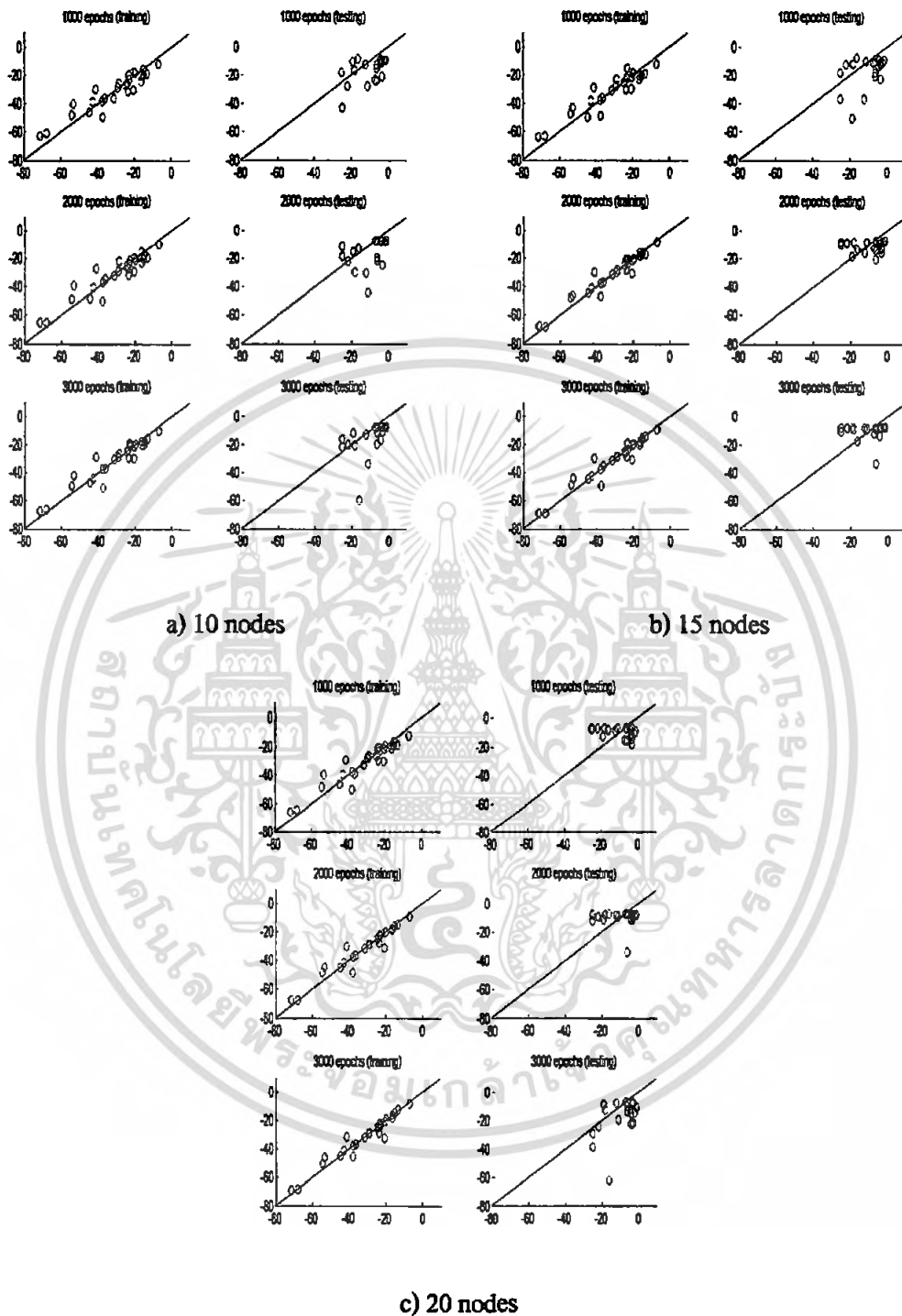
### 4.3 ผลการทดสอบการปรับปรุงประสิทธิภาพในการประมาณค่าการทรุดตัวในชั้นทราย

จากการทดสอบในหัวข้อ 4.2 นั้น มีผลการทดสอบความสามารถในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวในชั้นทรายที่ต่ำมากคือ มีค่าค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดที่สูงมาก ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงชุดข้อมูลที่จะใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้การพยากรณ์ค่าของ โครงข่ายมีความแม่นยำมากขึ้น โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้



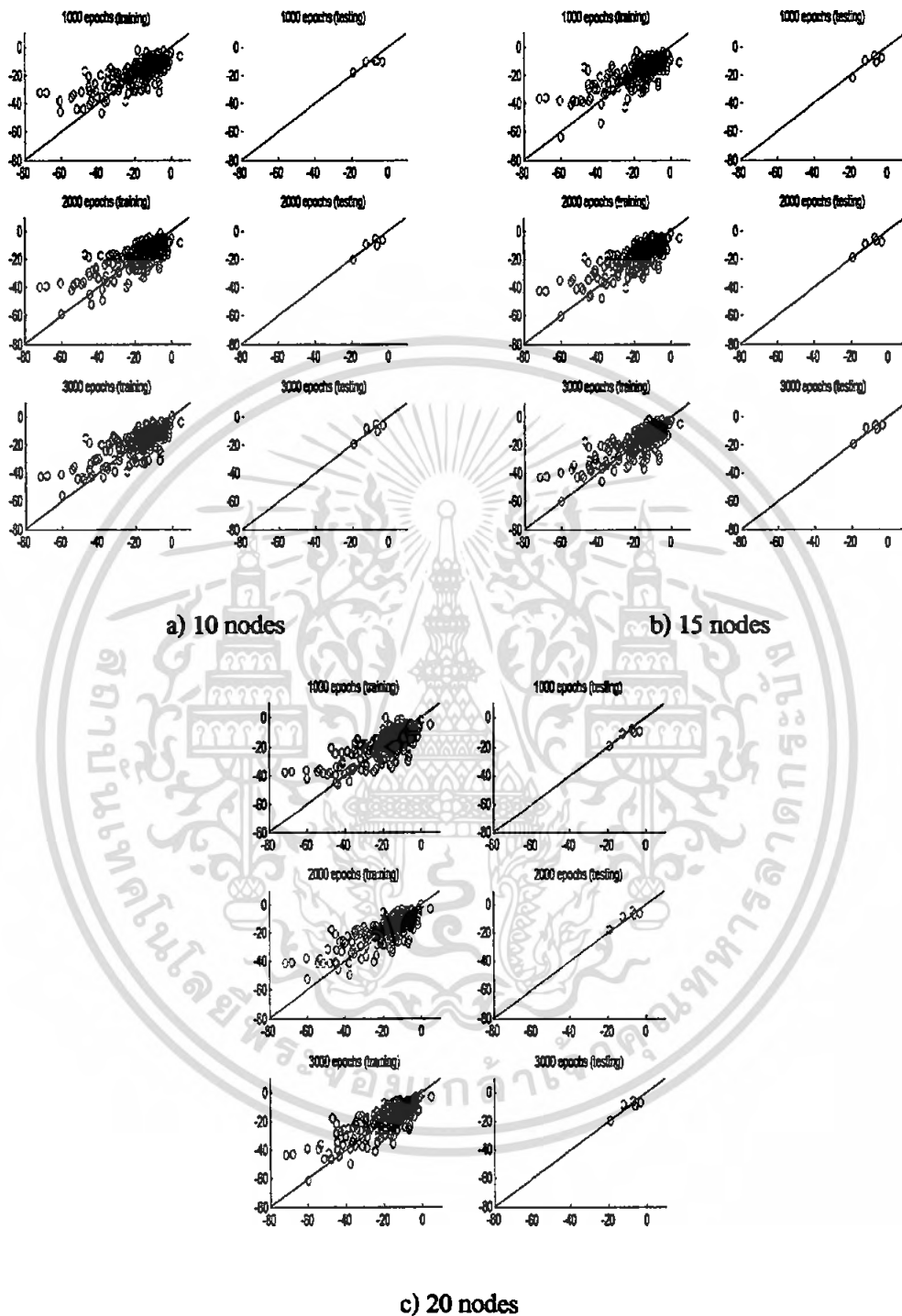
รูปที่ 4.13 กราฟทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดในโครงการ MRTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



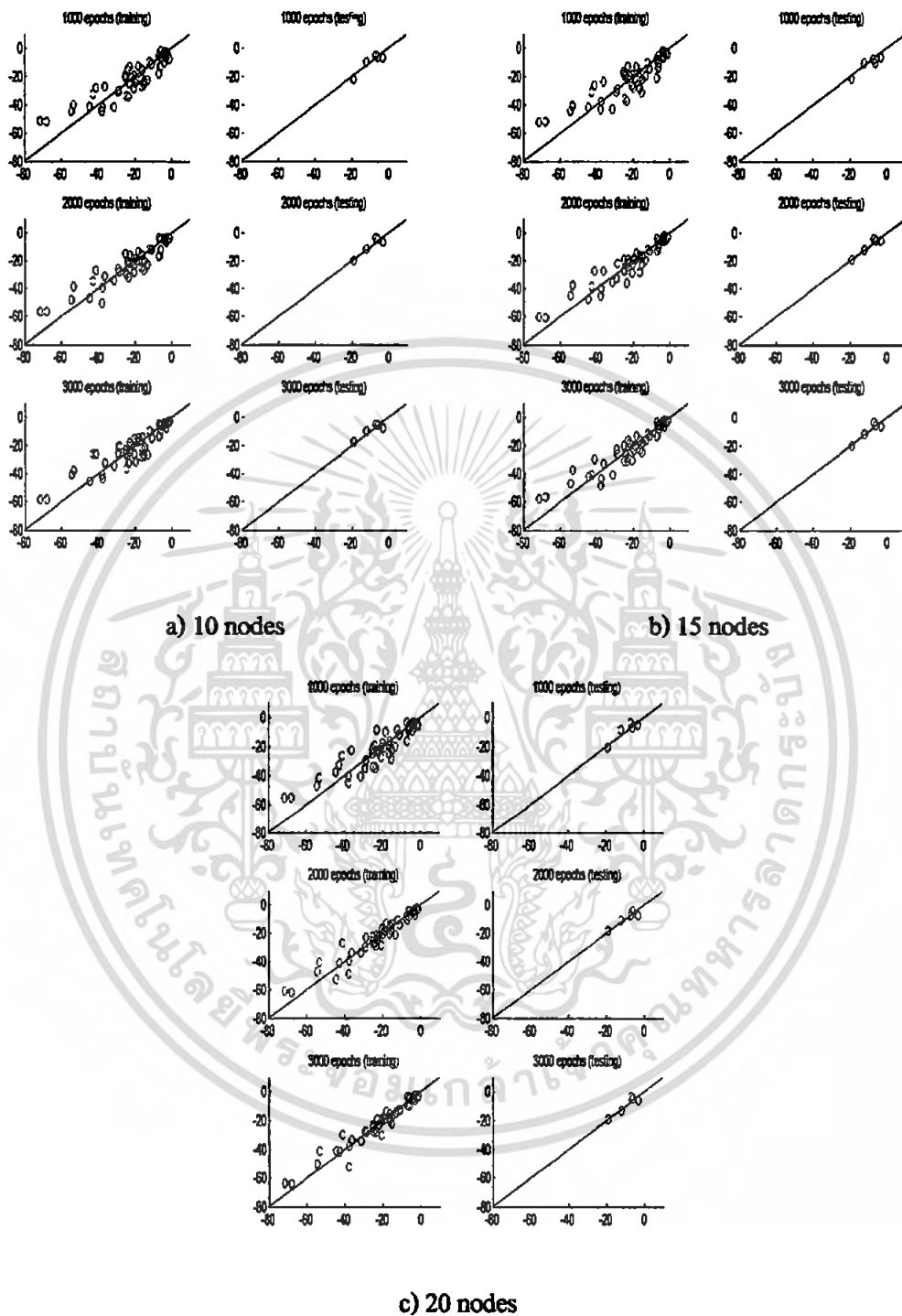
รูปที่ 4.14 กราฟทดสอบจันทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นจันทราย-จันทรายใน โครงการ MRTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟทดสอบชั้นทราย โดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดใน โครงการ MRTA และ โครงการ BMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.16** กราฟทดสอบชั้นทราย โดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทรายใน โครงการ MRTA และ โครงการ BMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดในโครงการ MRTA

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	11.26/9.45	9.50/9.62	6.78/8.65
15 หน่วย	12.11/9.44	8.09/8.47	7.78/8.38
20 หน่วย	9.14/9.09	6.72/8.50	6.23/8.51

ตารางที่ 4.10 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทรายในโครงการ MRTA

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	10.69/6.09	12.11/5.96	11.35/5.13
15 หน่วย	14.47/5.99	8.64/4.23	10.71/4.57
20 หน่วย	9.19/5.59	9.13/4.26	13.02/3.84

ตารางที่ 4.11 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดในโครงการ MRTA และโครงการ BMA

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	3.91/8.96	2.79/8.76	2.90/8.33
15 หน่วย	3.44/8.90	2.70/8.26	2.56/8.23
20 หน่วย	3.33/8.65	2.56/8.40	2.78/7.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่า RMSE ของการทดสอบชั้นทรายโดยชุดข้อมูลฝึกสอนที่เป็นชั้นทราย-ชั้นทรายใน  
โครงการ MRTA และ โครงการ BMA

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	2.46/7.67	2.37/6.49	2.75/7.22
15 หน่วย	2.85/8.18	1.88/5.81	2.12/5.90
20 หน่วย	2.48/7.33	2.36/4.89	2.19/4.41

จากการทดสอบชุดการทดสอบที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวในชั้นทราย - ชั้นทรายได้ผลที่ดีขึ้น

#### 4.4 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการแบ่งกลุ่มข้อมูลตามความสัมพันธ์ของตัวแปร

เนื่องจากการทดสอบที่ผ่านมาจะสังเกตได้ว่าการแบ่งกลุ่มข้อมูลอาจทำให้การพยากรณ์ค่าการทรุดตัวมีประสิทธิภาพดีขึ้นซึ่งการแบ่งกลุ่มที่สังเกตได้ง่ายที่สุดคือการแบ่งกลุ่มตามชั้นดิน แต่จากการศึกษาโดยดูจากค่าความผิดพลาดของแต่ละบรรทัดข้อมูลพบว่าเราอาจจะแบ่งกลุ่มข้อมูลได้โดยการตรวจสอบค่าความผิดพลาดของแต่ละบรรทัดข้อมูลแล้วจึงทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแต่ละกลุ่มข้อมูล

จากการทดสอบเพื่อการแบ่งกลุ่มจะได้กลุ่มของข้อมูลดังนี้

- ชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง

- กลุ่มที่ 1

- กลุ่มที่ 2

- ชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง

- กลุ่มที่ 1

- กลุ่มที่ 2

- กลุ่มที่ 3

- ชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นทราย

- กลุ่มที่ 1

- กลุ่มที่ 2

จากกลุ่มข้อมูลดังกล่าวจะสังเกตเห็นว่า ไม่มีการแบ่งกลุ่มข้อมูลในชั้นทราย - ชั้นทราย  
เนื่องจากข้อมูลนี้ มีจำนวนข้อมูลน้อยมากจึงไม่สามารถแยกกลุ่มได้  
กลุ่มข้อมูลต่าง ๆ นั้น มีค่าแต่ละบรรทัดข้อมูลดังตารางต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
19.74	1508.4	-0.89	42.75	39.85	-0.74	2.5	118	-28.91
17.5	15.6	1.35	167.06	12.95	0.24	0.9	150	-27
21.6	420	-2.74	143.25	27.95	0.8275	2.4	118	-15.5
20.23	511.2	-1.37	137.25	25.65	0.7405	2.5	122	-19
12.32	68.4	6.53	127.5	31	-0.22	1.6	150	-16.25
12.78	123.6	6.07	133.75	28.2	-0.13	2	150	-5.8
13.73	226.8	5.12	145.25	23.25	-0.27	2.3	150	-2
15.28	385.2	3.57	156.75	31.5	-0.22	2.1	150	-14
17.22	54	1.63	400	41.28	0.4188	2	150	0
17.4	78	1.45	350	41.28	-0.21	2	150	-1
17.43	81.6	1.42	350	41.28	-0.23	2	150	5
19.27	655.2	-0.42	246.26	41.28	0.36	2	150	-18
15.35	1036.8	3.5	175	60.75	2.6	5	181.25	-10.8

ตารางที่ 4.13 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
14.6	1066.8	4.25	166	63	3	5	181.25	-10.5
12.34	1156.8	6.51	169	77.25	2.3	5	181.25	-7
11.78	1184.4	7.07	137.78	66.75	1.4	5	181.25	-12

ตารางที่ 4.14 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
14.69	326.4	4.16	152.25	30.6	-0.25	2.2	150	-13
14.82	340.8	4.03	151.75	27.1	-0.3	2.5	150	-9

ตารางที่ 4.15 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (จุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความชื้นน้ำหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	ความชื้นน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย (กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup> )	มุมหัวเจาะ			
17.8	62.4	1.05	189	14.8	-0.09	0.5	150	-33.89
17.47	10.8	1.38	168.46	11.56	-0.02	0.7	150	-22.92
17.6	31.2	1.25	173	14.2	0.06	0.8	150	-19.28
17.68	43.2	1.17	175	13.85	0.19	1.78	150	-30
18.46	165.6	0.39	159.5	17.35	-0.24	2.2	150	-14.42
15.68	424.8	3.17	140.5	28.15	-0.09	2.1	150	-34.5
18.27	193.2	0.58	200	41.28	-0.23	2	150	-12
19.88	43.2	-1.03	146.5	39.778	-2	2.6	150	-45
13.85	1096.8	5	162.8	63.3	2.9	5	181.25	-14.2
13.09	1126.8	5.76	157	63.75	2.7	5	181.25	-3.5

ตารางที่ 4.16 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวอ่อน - ชั้นดินเหนียวแข็ง (จุดทดสอบ)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความชื้นน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
18.21	126	0.64	148.5	11.75	-0.17	1.7	150	-18
18.34	146.4	0.51	158.25	16.45	-0.21	1.5	150	-14.17
18.48	222	0.37	197.86	40.95	-0.12	2	147.44	-6
18.73	255.6	0.12	183.5	27.63	0.2	2	147.44	-8

ตารางที่ 4.17 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	การกระจายตัวของ แรงดันน้ำหัวเจาะ			แรงดันน้ำป้อน (บาร์)	% การแทนที่ น้ำป้อน	ค่าการทรุดตัว
			เฉลี่ย	เฉลี่ย (เบี่ยงเบน/นาที)	มุมหัวเจาะ			
18.61	58.8	0.24	32	42.4	-1.01	3.03	100	-51.4
18.7	62.4	0.15	31	41.65	-1.05	3.03	100	-47.9
19.63	99.6	-0.78	84.5	32.55	-0.88	5.6	116	-15.9
20.17	121.2	-1.32	100.5	30	-1.12	5.3	110	-13.5
21.1	158.4	-2.25	131	26.4	-1.11	2.5	121	-15.7
22.06	196.8	-3.21	123	29.75	-1.11	2.5	117	-16.8
20.8	954	-1.95	87.5	49.7	1.17	3.8	97	-15.56
20.95	1552.8	-2.1	111	27.2	-0.58	2.5	131	-19.28
22.39	1605.6	-3.54	69.25	26.35	-0.69	2.5	70	-28.57
23.3	2253.6	-4.45	37.75	20.1	1.43	2.5	121	-22.5
18.6	186	0.25	175	26.4	-0.36	1.8	150	-8.75
18.73	206.4	0.12	177.5	27	-0.21	1.6	150	-10
18.96	243.6	-0.11	182.25	24.65	-0.02	2.3	150	-9.33

ตารางที่ 4.17 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (จุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแตกที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย	มุมหัวเจาะ			
17.89	631.2	0.96	168.75	22.65	0.16	2.4	150	-6
21.01	76.8	-2.15	133.75	23.8	-0.775	2.2	117	-12
21.98	126	-3.12	136.25	23.9	-0.8265	2.5	117	-10.8
17.21	574.8	1.64	156	21.85	0.25	1.8	150	-12
20.48	559.2	-1.63	246.26	41.28	0.36	2	150	-9
20.98	181.2	-2.13	117.1	47.667	0.4188	2.38	150	-21.5
22.02	394.8	-3.17	33	55	-0.12	0.72	150	-44.6
21.62	494.4	-2.77	29.5	47	0.47	1.68	150	-35.8
20.19	704.4	-1.34	138.75	47	0.39	2.25	150	-19.5
18.38	969.6	0.47	159	47	1.44	2.12	150	-20.38
18.18	999.6	0.67	147	49	1.29	2.53	150	-16.15
19.63	96	-0.78	193.4	66.905	-2.8	3.9	143.75	-10
23.81	235.2	-4.96	84.5	54.1	0.8	3.8	162.5	-11

ตารางที่ 4.17 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
25.32	285.6	-6.47	133.3	48.9	1	3.9	137.5	-10
26.4	321.6	-7.55	119.25	48.15	-1.083	3.8	162.5	-10
28.46	579.6	-9.61	121.41	54.464	-1.083	3.83	162.5	-13
28.07	657.6	-9.22	165.95	54.55	-1.083	3.9	137.5	-10
27.24	700.8	-8.39	113.33	46.18	-1.083	4.3	143.75	-14.33
28.07	373.2	-9.22	254.85	63	2.4	5	187.5	-7
27.59	397.2	-8.74	272.2	65	2.1	5	187.5	-7.5
27.35	409.2	-8.5	268.25	64.25	1.9	5	181.25	-5
27.11	421.2	-8.26	232.7	61	2.2	5	187.5	-8
26.44	454.8	-7.59	149.7	68.3	2.6	5	187.5	-11
25.13	520.8	-6.28	158.8	66	2	5	187.5	-12
24.53	550.8	-5.68	178.75	65.5	2.5	5	181.25	-7
23.33	610.8	-4.48	161.6	66.25	1.5	5	181.25	-5.2

ตารางที่ 4.17 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การถมที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
23.15	636	-4.3	156.1	63	0.9	5	181.25	-5
23.56	18	-4.71	230.39	58.61	-1.4	5	181.25	-5
23.56	26.4	-4.71	225.2	64.15	-1.8	5	181.25	-4
24.03	38.4	-5.18	232.8	67.4	-2.4	5	181.25	-3.5
24.81	61.2	-5.96	232.8	45.5	-3.4	5	181.25	-4.3
27.37	92.4	-8.52	215.85	61.5	-3.3	5	181.25	-5
26.46	108	-7.61	211.35	62.75	-2.4	5	181.25	-8
19.87	856.8	-1.02	151	74.5	3.2	5	181.25	-9.6
19.15	885.6	-0.3	165.25	78.15	2.9	5	181.25	-8.2
18.4	915.6	0.45	164.5	70.65	3.1	5	181.25	-3.8
16.11	1006.8	2.74	157.5	53.75	3	5	181.25	-10

ตารางที่ 4.18 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความชื้นน้ำหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	ความชื้นน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมน้ำหัวเจาะ			
22.68	176.4	-3.82	134.25	25.9	-0.446	2.5	118	-10.2
23.4	267.6	-4.54	141.75	22.65	0.4475	2.6	120	-14
21.86	328.8	-3.01	67.25	40	-0.23	2.06	150	-32.3
28.19	381.6	-9.34	85.55	47.65	-1.083	3.8	162.5	-10
29.15	442.8	-10.3	90.25	45.95	-1.038	3.8	162.5	-14
30.78	236.4	-11.93	158	66.35	1.9	4.6	175	-10.5

ตารางที่ 4.19 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดฝึกสอน)

ค่ามอดูล (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วก้าวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	%การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
20.43	669.6	-1.58	154.25	48	0.36	2.55	150	-21.3
22.37	187.2	-3.52	185.7	56.75	0.5	3.9	137.5	-12
28.73	526.8	-9.88	124.55	60.2	-1.083	3.8	162.5	-5
29.12	320.4	-10.27	163.8	79.35	2.4	5	187.5	-9.5
27.83	385.2	-8.98	270.65	63	2.1	5	181.25	-12
25.72	490.8	-6.87	155.2	72.45	2.6	5	187.5	-18
23.91	582	-5.06	158.8	65	2.5	5	181.25	-15
17.13	966	1.72	161	54	2.9	5	181.25	-13.7

ตารางที่ 4.20 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (ชุดทดสอบ)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การยกที่ น้ำปุ้ม	ค่าการหดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	ความเร็วน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
21.26	228	-2.41	80.38	47.667	0.4188	2.38	150	-22.7
21.36	244.8	-2.51	73.75	44	-0.21	3.26	150	-15.7
21.93	340.8	-3.08	47.5	52	-0.23	2.13	150	-28.4
19.74	770.4	-0.89	184.25	53	0.38	2.58	150	-24.2
18.96	884.4	-0.11	157	47	0.41	2.94	150	-16.43
28.93	486	-10.08	87.45	52.85	-1.083	3.8	162.5	-5
30.19	266.4	-11.34	191.65	78.6	2	4.7	175	-10

ตารางที่ 4.21 กลุ่มข้อมูลที่ 3 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (จุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ห้องอุโมงค์ (เมตร)	ความชื้นสัมพัทธ์			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำที่เจาะ เฉลี่ย	ความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ย (บิลลิเมตร/เมตร)	มุมที่เจาะ			
18.2	33.6	0.65	34.5	33.5	-0.07	3.03	129	-60.5
19.78	1005.6	-0.93	88.75	48.6	1.36	2.5	119	-20
17.89	1107.6	0.96	121	41.2	0.92	2.5	123	-33
23.64	1654.8	-4.79	60	24.55	-0.84	2.5	99	-38.57
23.06	2304	-4.21	45.75	23.5	1.26	2.5	224	-15
22.07	2904	-3.22	18.75	34.25	-0.56	2.5	106	-27.5
18.86	430.8	-0.01	102.5	22.25	0.32	2.4	127	-9.17
21.16	2083.2	-2.31	124.5	26	0.92	2.9	124	-16.25
22.74	333.6	-3.88	128.5	23.55	0.78	2.4	180	-23.8
16.26	482.4	2.59	124.75	21.25	-0.1	2.4	116	-29.17
19.55	363.6	-0.7	185	45.45	0.36	2	126	-6
20.12	439.2	-1.27	165	47	0.36	2	150	-4
18.91	891.6	-0.06	150	45	0.46	3.23	150	-18.07

ตารางที่ 4.21 กลุ่มข้อมูลที่ 3 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (จุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มีลิเมตร นาที)	มุมหัวเจาะ			
18.52	949.2	0.33	176.5	47	1.22	2.52	150	-20
20.74	73.2	-1.89	161	39.778	-2.5	2.6	150	-45
21.4	96	-2.55	181	39.778	-2.5	2.7	150	-47
21	141.6	-2.15	121.41	54.464	-3	3.83	150	-9
26.87	78	-8.02	219	57.5	-3.36	5	150	-10

ตารางที่ 4.22 กลุ่มข้อมูลที่ 3 ในชั้นดินเหนียวแข็ง - ชั้นดินเหนียวแข็ง (จุดทดสอบ)

ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ 4.23 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (จุดฝึกสอน)

ถาวร (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำในท่อ			แรงดันน้ำปุ๋ย (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ๋ย	ค่าการหลุดร่วง
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	ความเร็วน้ำเจาะ เฉลี่ย (ลิตร/เมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
23.31	555.6	-4.46	53.5	70	0.42	2.5	129	-36.4
23.05	607.2	-4.2	55.25	76.85	0.5	2.5	119	-35.1
22.56	708	-3.71	63.25	58	0.57	2.5	123	-31.5
24.82	1902	-5.97	35.25	51.15	-0.06	2.5	99	-19.28
24.74	1953.6	-5.89	26.5	45.4	0.4	2.5	224	-43.57
23.83	2053.2	-4.98	46	42.7	0.71	2.5	106	-13.57
23.36	2104.8	-4.51	46.5	43	1.18	2.5	127	-21.14
22.92	2152.8	-4.07	62.5	41.8	1.39	2.5	124	-24.3
22.05	2953.2	-3.2	17	42.9	0.18	2.5	180	-48.89
22.78	3002.4	-3.93	30.75	37.55	0.6	2.5	116	-15.5
22.01	3055.2	-3.16	25.5	37.65	0.77	2.5	126	-21.5
21.49	1202.4	-2.64	134.75	22	-1.23	2.5	150	-10.5
22.47	1251.6	-3.62	143.5	19	-1.13	2.2	150	-8.33

ตารางที่ 4.23 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (จุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะทาง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (เบ็คคิงเมตร นาที)	มุมหัวเจาะ			
23.12	1302	-4.27	130	21	-0.58	2.4	150	-14.67
24.34	1501.2	-5.49	122	18	-0.45	2.6	150	-11.67
24.59	1551.6	-5.74	88.5	17	-0.45	2.5	150	-11.67
24.51	1633.2	-5.66	248.5	17	0.16	1.9	150	-13.5
24.39	1683.6	-5.54	237.5	19	-0.02	2.5	150	-16.25
24.15	1782	-5.3	117	19	-0.1	2.8	150	-13.75
22.41	1832.4	-3.56	124	21	0.45	2.7	150	-12.5
22.16	1882.8	-3.31	127	22	0.73	2.4	150	-18.25
21.91	1933.2	-3.802	140	20.895	-0.2621	2.4	150	-11.67
25.38	254.4	-6.53	306.35	39.778	-1.114	3.3	150	-10
25.4	255.6	-6.55	304.35	39.778	-1.114	3.2	150	-12
23.97	358.8	-5.12	232.75	41.51	1.9	3.6	125	-7.5
22.88	438	-4.03	236.5	41.7	2	3.8	156.25	-7.71

ตารางที่ 4.23 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ห้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำไหล			แรงดันน้ำป้อน (บาร์)	% การแทนที่ น้ำป้อน	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	ความเร็วน้ำไหล เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหน้าหัว			
21.82	514.8	-2.97	226.75	34.75	2.6	3.8	143.75	-4.24
28.45	26.4	-9.6	113.05	63.48	-0.4	4.8	175	-9
28.88	56.4	-10.03	115.1	64.11	-1.4	4.8	175	-12
30.07	116.4	-11.22	115.95	62.3	-1.5	4.6	175	-6
30.66	146.4	-11.81	120.4	64.715	-1.4	4.6	175	-7.5
31.24	176.4	-12.39	126	64.5	0	4.7	175	-8
27.07	139.2	-8.22	204.5	53	0.1	5	181.25	-10
26.14	254.4	-7.29	203	77.25	1.1	5	181.25	-15
25.7	308.4	-6.85	163	77.8	1.1	5	181.25	-9.5
25.31	355.2	-6.46	150	66.85	1.3	5	181.25	-12.8
23.58	565.2	-4.73	150	79.25	1.2	5	181.25	-13
23.37	591.6	-4.52	134.25	80.5	1.2	5	181.25	-8
22.81	658.8	-3.96	118	65.95	1.5	5	181.25	-15.5

ตารางที่ 4.23 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันน้ำหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
22.59	685.2	-3.74	153	79.5	1.3	5	181.25	-11
22.35	715.2	-3.5	163.5	81.5	1	5	181.25	-10.6
22.18	735.6	-3.33	120.75	62.65	1.8	5	181.25	-14.8
22.08	747.6	-3.23	103	52.65	1.8	5	181.25	-16.9
21.86	774	-3.01	132	81.75	2.8	5	181.25	-12.8
20.63	826.8	-1.78	150.5	81.5	3.2	5	181.25	-10

ตารางที่ 4.24 กลุ่มข้อมูลที่ 1 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (จุดทดสอบ)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การก่อกมที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
23.91	404.4	-5.06	77.5	54.25	-0.16	2.5	120	-29.16
24.11	1753.2	-5.26	70	37.7	0.02	2.5	212	-34.08
23.58	1351.2	-4.73	134.95	22	-0.33	2.5	150	-12.92
24.09	1452	-5.24	124.5	17	-0.47	2.5	150	-13.33
24.99	229.2	-6.14	320.5	39.778	-1.6	3.6	150	-12
31.38	206.4	-12.53	147.7	60.275	0.9	4.6	175	-11
24.71	428.4	-5.86	139.5	80	1.4	5	181.25	-10.8
24.49	454.8	-5.64	143.85	80.75	1.3	5	181.25	-12
24.31	476.4	-5.46	139.6	77	1.1	5	181.25	-11.6
24.07	506.4	-5.22	135.5	75.25	1.1	5	181.25	-9
23.83	535.2	-4.98	141	76	1	5	181.25	-10

ตารางที่ 4.25 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (ชุดฝึกสอน)

ความลึก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอิมก (เมตร)	ความเร็วน้ำเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การแทนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	บนหัวเจาะ			
23.91	404.4	-5.06	77.5	54.25	-0.16	2.5	120	-41.6
24.11	1753.2	-5.26	70	37.7	0.02	2.5	212	-34.57
23.58	1351.2	-4.73	134.95	22	-0.33	2.5	150	-40
24.09	1452	-5.24	124.5	17	-0.47	2.5	150	-20
24.99	229.2	-6.14	320.5	39.778	-1.6	3.6	150	-11.33
31.38	206.4	-12.53	147.7	60.275	0.9	4.6	175	-3.33
24.71	428.4	-5.86	139.5	80	1.4	5	181.25	-14
24.49	454.8	-5.64	143.85	80.75	1.3	5	181.25	-9.75
24.31	476.4	-5.46	139.6	77	1.1	5	181.25	-18.43
24.07	506.4	-5.22	135.5	75.25	1.1	5	181.25	-13.53
23.83	535.2	-4.98	141	76	1	5	181.25	-18
26.76	180	-7.91	200.9	65	1	5	181.25	-19.6
25.1	381.6	-6.25	142	70.25	1.1	5	181.25	-7

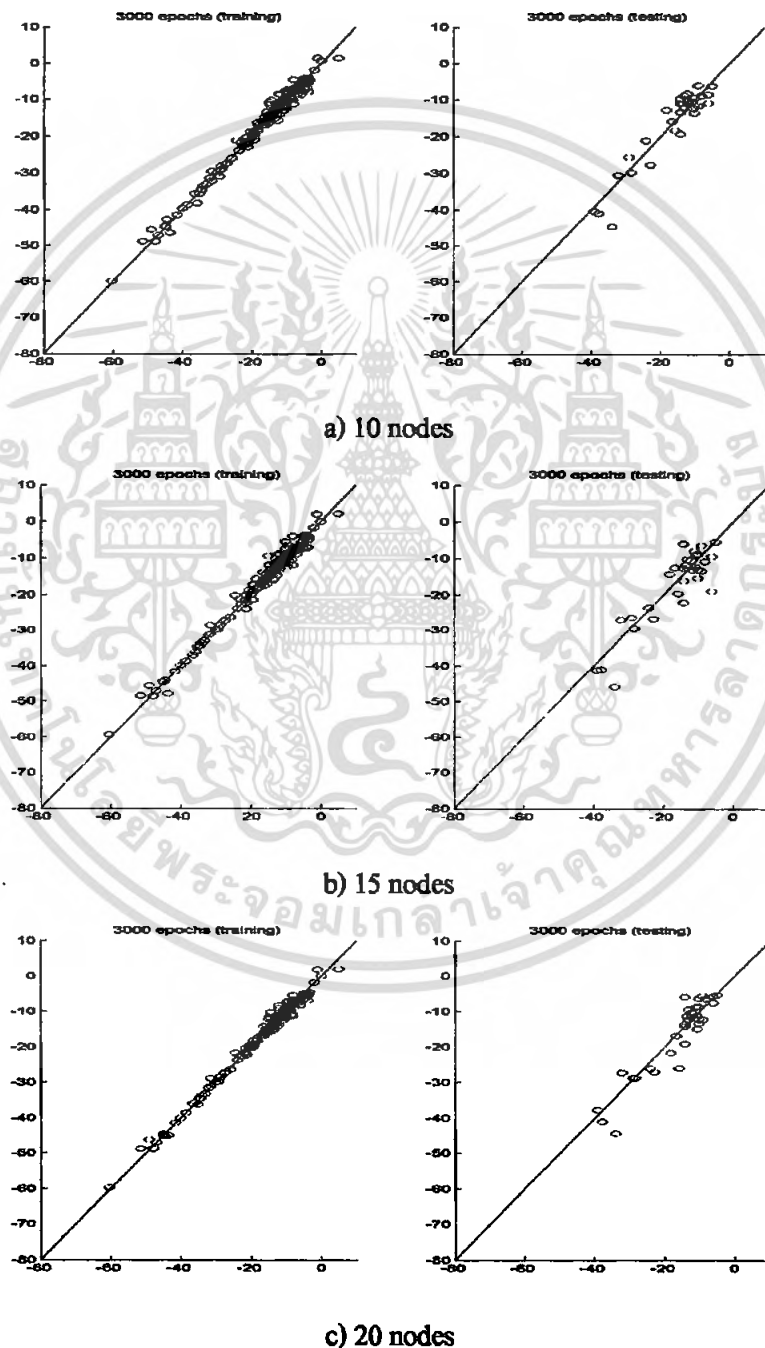
ตารางที่ 4.25 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (ชุดฝึกสอน)

กาบกลิก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การปนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
23.21	610.8	-4.36	131.5	73.5	1.6	5	181.25	-5

ตารางที่ 4.26 กลุ่มข้อมูลที่ 2 ในชั้นดินเหนียวแข็ง – ชั้นทราย (ชุดทดสอบ)

กาบกลิก (เมตร)	ระยะห่าง จาก จุดปล่อย (เมตร)	ระดับน้ำใต้ดิน จาก ท้องอุโมงค์ (เมตร)	ความเร็วหัวเจาะ			แรงดันน้ำปุ้ม (บาร์)	% การปนที่ น้ำปุ้ม	ค่าการทรุดตัว
			แรงดันหน้าหัวเจาะ เฉลี่ย	เฉลี่ย (มิลลิเมตร/นาที)	มุมหัวเจาะ			
23.56	504	-4.71	39.5	67.9	0.45	2.5	139	-39.1
24.35	1804.8	-5.5	31.75	44.45	0.03	2.3	122	-37.86
23.83	1401.6	-4.98	90.5	20	-0.22	1.4	150	-14.17
23.99	186	-5.14	254.5	39.778	-2.8	3.1	162.5	-6

สำหรับการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบโดยกำหนดรอบการฝึกสอนไว้เพียง 3000 รอบเท่านั้น เนื่องจากแนวคิดในการแยกกลุ่ม เมื่อจำนวนกลุ่มในการฝึกสอนมีเพียงกลุ่มเดียว การปรับค่าน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นการปรับค่าแบบลู่เข้าหาจุดเพียงจุดเดียวหรือเรียกว่า **Convergence** ซึ่งการทดสอบโครงข่ายโดยแบ่งกลุ่มข้อมูลมีผลการทดสอบ โดยแสดงเป็นกราฟดังนี้



**รูปที่ 4.17** กราฟทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยแบ่งรูปแบบโครงข่ายตามกลุ่มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดดังตารางนี้

ตารางที่ 4.27 ค่า RMSE ของทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยแบ่งรูปแบบ โครงข่ายตามกลุ่มข้อมูล

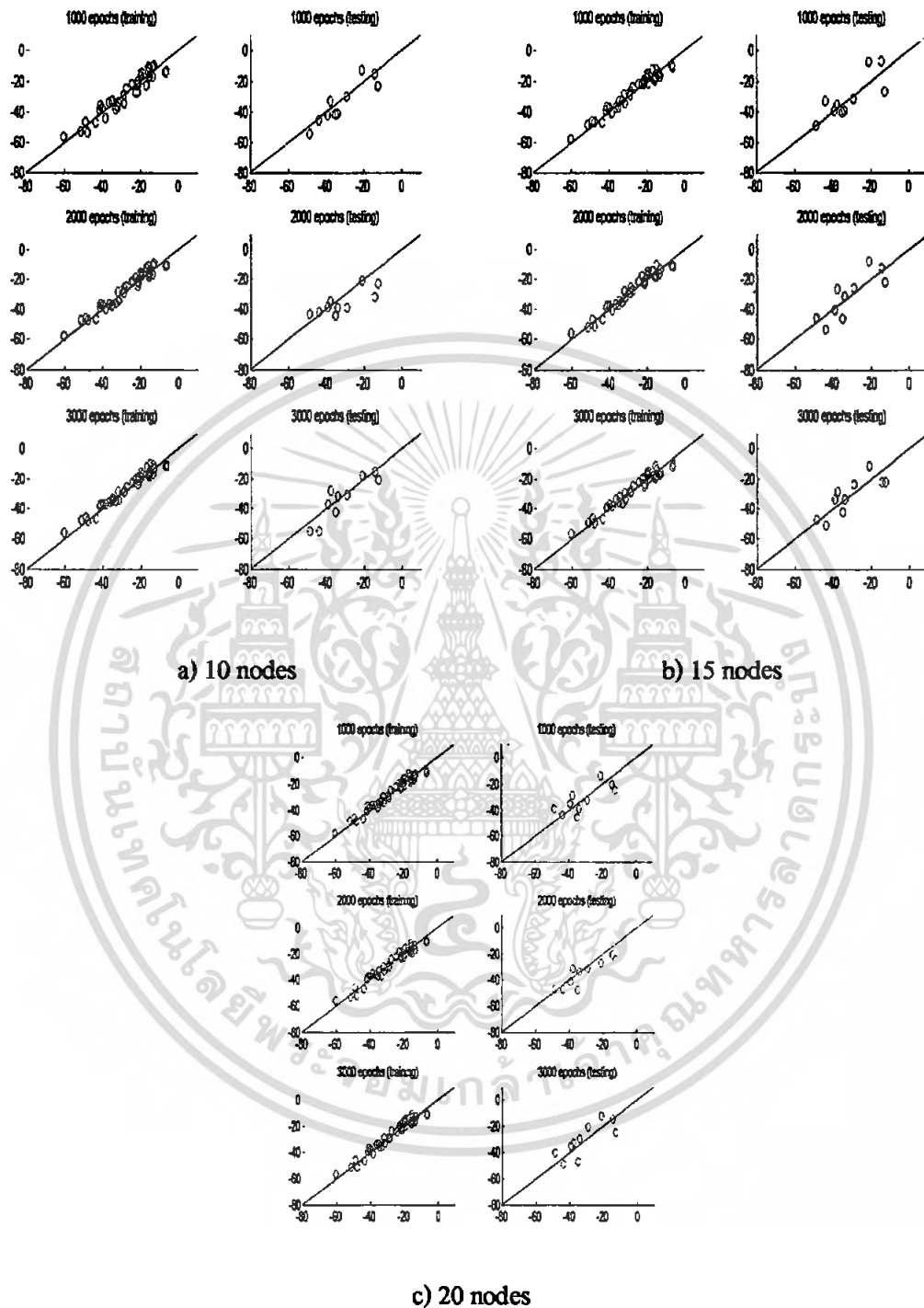
จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	-	-	3.34/1.37
15 หน่วย	-	-	4.44/1.44
20 หน่วย	-	-	3.77/1.20

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะสามารถสรุปได้ว่าการแยกข้อมูลเป็นกลุ่มตามความสัมพันธ์จะทำให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวได้ผลที่ดีขึ้น และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดในแต่ละครั้งในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ก็ไม่สามารถอธิบายปัจจัยที่ใช้ในการแยกกลุ่มข้อมูลได้ เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มมีความซับซ้อนมากเกินไป

#### 4.5 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมโดยเว้นรัศมีความผิดพลาดในการฝึกสอน

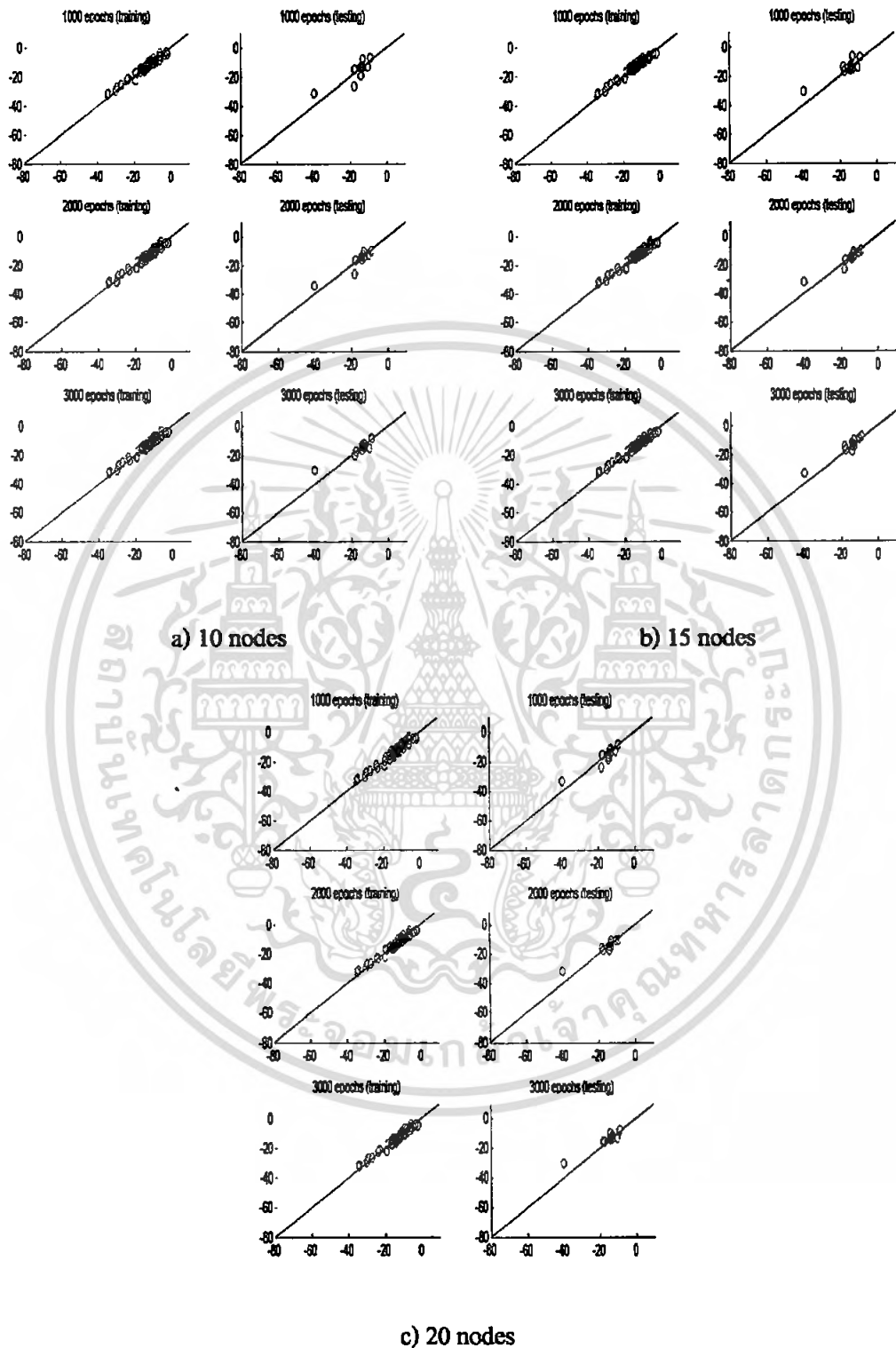
จากการศึกษาที่พบว่า การแบ่งกลุ่มข้อมูลมีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัว แต่จากชุดการทดสอบการแยกกลุ่มที่ผ่านมาเห็นได้ว่าตัวแปรป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนในการจำแนกกลุ่มมาก ดังนั้นหากสร้างรัศมีความผิดพลาดของกลุ่มที่สามารถยอมรับได้ขึ้นมา เพื่อไม่ให้เกิดการปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่ายประสาทเทียมเบี่ยงเบนไปทางกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งมากเกินไปอาจจะสามารถทำให้ผลในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวที่มีความผิดพลาดมาก ๆ ลดน้อยลงได้

ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมในชุดฝึกสอนและชุดทดสอบแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวจริงกับค่าที่พยากรณ์ได้ดังนี้



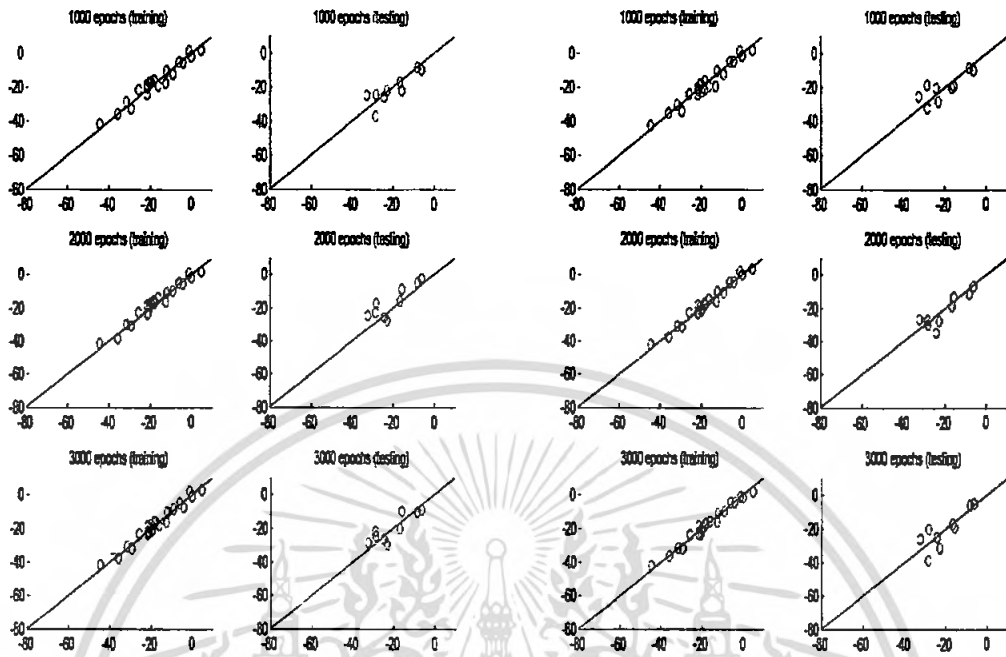
**รูปที่ 4.18** กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน  
โซน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



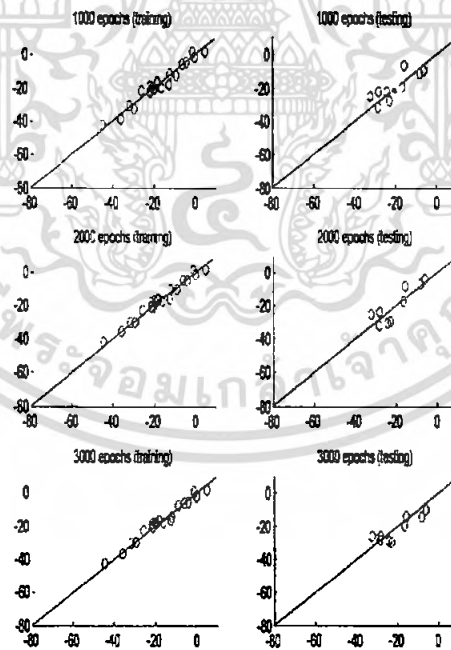
**รูปที่ 4.19** กราฟทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาดโดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) 10 nodes

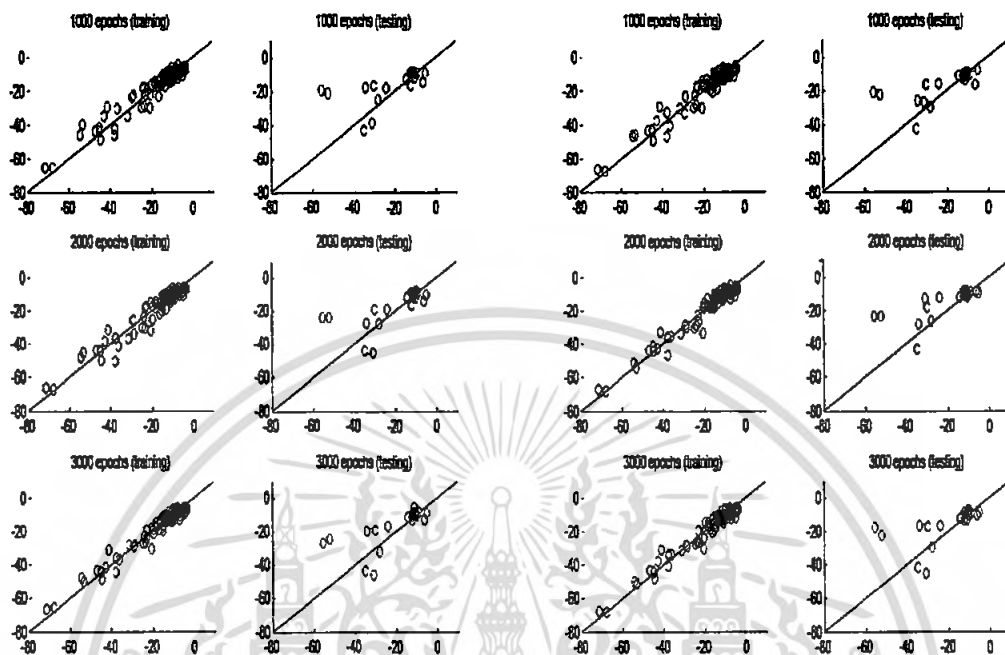
b) 15 nodes



c) 20 nodes

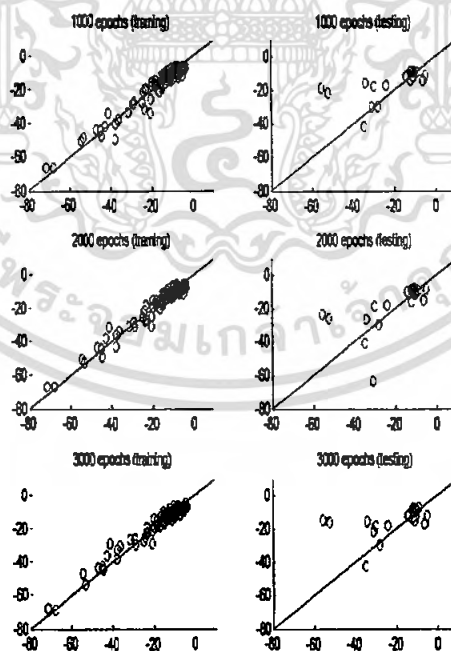
**รูปที่ 4.20** กราฟทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาดโดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) 10 nodes

b) 15 nodes



c) 20 nodes

รูปที่ 4.21 กราฟทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาดโดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน

โชน D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนโซน A

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	5.62/3.91	8.01/2.97	6.36/2.74
15 หน่วย	7.76/2.78	7.97/2.93	7.08/2.90
20 หน่วย	7.49/2.55	6.52/2.90	7.82/2.72

ตารางที่ 4.29 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนโซน B

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	4.51/1.58	3.27/1.62	3.50/1.63
15 หน่วย	4.14/1.55	3.11/1.62	3.04/1.52
20 หน่วย	3.31/1.62	3.16/1.46	3.56/1.58

ตารางที่ 4.30 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาด โดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนโซน C

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	4.65/2.84	5.99/2.32	4.50/2.21
15 หน่วย	5.21/2.74	4.60/1.94	5.79/1.80
20 หน่วย	5.29/2.42	5.12/2.03	4.46/2.11

ตารางที่ 4.31 ค่า RMSE ของทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม โดยเว้นรัศมีความผิดพลาดโดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน โชน D

จำนวนรอบการ คำนวณ จำนวนหน่วย	1000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	2000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)	3000 รอบ (ทดสอบ/ฝึกสอน)
10 หน่วย	12.01/3.87	10.60/3.76	10.61/3.02
15 หน่วย	11.19/3.75	11.29/3.14	12.33/2.96
20 หน่วย	12.06/3.33	12.36/2.99	13.59/3.06

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การพยากรณ์การทรุดตัวสำหรับบรรทัดข้อมูลที่มีค่าการทรุดตัวมาก ๆ นั้นมีความผิดพลาดน้อยลงซึ่งกลุ่มข้อมูลที่มีค่าการทรุดตัวมากเป็นกลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนน้อย แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวโดยรวมได้อย่างชัดเจน

## บทที่ 5

### 5.1 สรุปผล

#### 5.1.1 สรุปผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป

จากการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยการใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนทั้งหมดในแต่ละโซนของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม และใช้ข้อมูลทดสอบทั้งหมดในแต่ละโซนของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลในการฝึกสอนเช่นกันในการทดสอบ ซึ่งได้ผลสรุปจากการทดสอบดังนี้

จากผลที่ได้นั้นจะเป็นผลของแต่ละโซนของสายเฉลิมรัชมงคล ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกัน จะต้องทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาด (Mean of RMSE) และ ซึ่งจะได้เป็นตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ค่า Mean ของ RMSE ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย	Training					
10 หน่วย	5.3450	4.9275	4.3125	4.6525	3.9575	3.9200
15 หน่วย	5.1100	4.6625	3.8750	4.1300	3.6550	2.6625
20 หน่วย	4.7650	4.5350	4.0900	3.8375	3.0950	2.6525
	Testing					
10 หน่วย	6.2125	6.4950	6.1000	6.1900	6.1325	6.0950
15 หน่วย	5.9950	6.2875	5.8375	6.4600	6.0275	6.6950
20 หน่วย	6.4400	6.4600	6.7075	6.4250	6.4600	6.2600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลของงานวิจัยที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเดียวกัน

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย						
Training						
10 หน่วย	5.97	4.79	4.59	5.27	2.96	2.47
15 หน่วย	5.41	4.97	3.74	4.07	3.47	2.19
20 หน่วย	5.13	5.08	3.53	4.90	2.23	1.48
Testing						
10 หน่วย	10.49	9.26	9.30	11.26	12.72	15.37
15 หน่วย	8.01	9.39	9.18	12.26	8.46	9.81
20 หน่วย	8.22	7.33	10.37	13.21	10.45	12.61

ซึ่งเมื่อเทียบกับผลของงานวิจัยเดิมที่ใช้ชุดข้อมูลและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมือนกันจะได้ว่าค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดในการทดสอบนี้โครงสร้างทุกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่างานวิจัยที่อ้างอิงถึง เนื่องจากค่าเริ่มของค่าตัวนำหนักมีค่าที่ไม่เท่ากันในแต่ละครั้งที่ทำการสร้างโครงข่าย แต่จากการทดสอบโดยการสร้างโครงข่ายแล้วทดสอบหลายครั้งจะทำให้ได้ค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมกับโครงข่ายนั้น ๆ จะเห็นได้ว่าค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดสำหรับแต่ละโครงสร้างนั้นมีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของค่าตัวนำหนักในโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่าความแปรปรวนของ RMSE ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมแบบทั่วไป

จำนวนชั้นแฝง และรอบการ คำนวณ	1 ชั้นแฝง			2 ชั้นแฝง		
	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ	1000 รอบ	2000 รอบ	3000 รอบ
จำนวนหน่วย						
Training						
10 หน่วย	1.75	1.94	1.78	2.02	2.10	1.96
15 หน่วย	2.29	1.89	2.03	2.72	1.86	2.14
20 หน่วย	1.98	1.93	1.72	2.07	1.83	2.11
Testing						
10 หน่วย	1.75	1.94	1.78	2.02	2.10	1.96
15 หน่วย	2.29	1.89	2.03	2.72	1.86	2.14
20 หน่วย	1.98	1.93	1.72	2.07	1.83	2.11

จากตารางค่าความแปรปรวนจะเห็นได้ว่าค่าความแปรปรวนจะมีค่าประมาณ 1-2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกลุ่มข้อมูลฝึกสอนในแต่ละ โชนมีความครอบคลุมและความสมดุลระหว่างกลุ่มข้อมูลที่ไม่เท่ากัน

#### 5.1.2 สรุปผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมตามชนิดชั้นดิน

จากผลการทดสอบในบทที่ 4 เมื่อเทียบค่าความผิดพลาดที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดของแต่ละ โครงสร้าง โครงข่ายประสาทเทียมจะมีค่าที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดที่น้อยลงกว่าเดิม ซึ่งหมายถึงพารามิเตอร์เดิมที่ให้ค่าของชนิดชั้นดินที่หัวเจาะฝังตัวอยู่เป็นตรรกศาสตร์นั้นให้ผลเสียต่อการพยากรณ์ค่าของ โครงข่ายประสาทเทียม

ที่ได้จากการสังเกตอีกสิ่งหนึ่งคือ ค่าความผิดพลาดในการพยากรณ์ค่าของชั้นทราย-ชั้นทราย นั้นมีความผิดพลาดสูงมากซึ่งอาจเป็นผลจากการที่มีตัวอย่างในกลุ่มชั้นทรายน้อยมากและไม่มีความครอบคลุมในทุกกลุ่มของข้อมูลรวมถึงความสมดุลของปริมาณของข้อมูลในแต่ละกลุ่ม ไม่มีความเหมาะสมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 สรุปการทดสอบการปรับปรุงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวในชั้นทราย

เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของดินเมื่อหัวเจาะทำงานอยู่ที่ชั้นทรายซึ่งมีความแปรปรวนของการทรุดตัวสูงมากนำชุดข้อมูลในชั้นดินอื่นมารวมกันเพื่อใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งได้ผลว่าการที่นำข้อมูลที่หลากหลายมากขึ้นมารวมกันเพื่อฝึกสอนโครงข่ายจะทำให้โครงข่ายมีการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการที่เพิ่มข้อมูลที่ใช้สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายที่เป็นข้อมูลในชั้นทราย-ชั้นทรายเท่านั้นจะทำให้ผลการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวมีค่าน้อยกว่าการใช้ข้อมูลจากหลายชนิดชั้นดิน

### 5.1.4 สรุปการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการแยกกลุ่มข้อมูลตามความสัมพันธ์

#### ของตัวแปร

จากการทดสอบที่ผ่านมาทำให้รู้ว่าข้อมูลที่ใช้ในนั้นสามารถแยกกลุ่มข้อมูลออกจากกันได้อีก ซึ่งสามารถแยกกลุ่มข้อมูลได้จากการพิจารณาค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกันในแต่ละบรรทัดข้อมูล โดยการทดสอบแยกกลุ่มข้อมูลและสร้างโครงข่ายประสาทเทียมให้มีความเหมาะสมกับกลุ่มข้อมูลนั้น ๆ เห็นได้ชัดว่ามีความสามารถในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวได้ดีขึ้นมาก รวมถึงมีค่าความแปรปรวนของการพยากรณ์ที่น้อยด้วยเช่นกัน

แต่อย่างไรก็ตามการหาความสัมพันธ์กันภายในกลุ่มข้อมูลและความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาวิธีการแบ่งข้อมูลที่ได้รับเข้ามายังไม่สามารถที่จะหาฟังก์ชันความสัมพันธ์มาอธิบายได้

### 5.1.5 สรุปการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมโดยเว้นรัศมีค่าความผิดพลาดในการฝึกสอน

จากการทดสอบที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่ามีทั้งกลุ่มที่มีความผิดพลาดในการพยากรณ์น้อยและมากสำหรับกลุ่มข้อมูลฝึกสอน ซึ่งข้อมูลส่วนมากจะมีความผิดพลาดน้อย เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าน้ำหนักเพื่อทำให้ค่าความผิดพลาดรวมมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นกลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนสมาชิกมาก ๆ จะมีอิทธิพลต่อการปรับค่าน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียม

จากข้อสังเกตนี้ หากเว้นรัศมีค่าความผิดพลาดเพื่อใช้ในการลดทิสทางการปรับค้ำเข้าสู่กลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนสมาชิกมาก ๆ ตามการทดสอบนี้แล้ว จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีการปรับค้ำน้ำหนักโดยมีทิศทางการปรับค้ำเข้าหากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ มากขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้นั้นจะเป็นได้ว่ามีการพยากรณ์กลุ่มข้อมูลบางกลุ่มได้ดีขึ้น แต่โดยรวมนั้นยังมีค่าใกล้เคียงกับการพยากรณ์ค่าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการฝึกสอนโดยชุดข้อมูลที่มีการแยกชั้นดิน

## 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา

**ปัญหา** จากการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการทุจริตตัวของดิน พบว่าปัจจัยการทุจริตตัวของดินนั้นประกอบด้วยหลายสาเหตุ ซึ่งมีตัวแปรมากมายที่มีผลต่อการทุจริตตัวของดิน สามารถชี้แจงปัญหาได้ดังต่อไปนี้

- ในการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมนั้น มีตัวแปรที่ใช้ในการดำเนินงานที่ไม่ครอบคลุมทั้งหมด ซึ่งตัวแปรบางตัวอาจมีผลต่อการทุจริตอย่างมาก เช่น ความชื้นในดิน ความหนาของชั้นดินที่หิวเจาะฝังตัวอยู่ การเกิดเหตุการณ์ธรรมชาติ เป็นต้น
- ตัวแปรที่มีอยู่ทั้ง 13 ตัวนั้น ไม่ได้ครอบคลุมถึงเวลาในการวัด ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าข้อมูลที่อยู่คอลัมน์แรกจนถึงคอลัมน์สุดท้ายเป็นข้อมูลที่เรียงกันไปตามระยะเวลาาก่อนหลังหรือไม่ ทำให้เกิดปัญหาในการเปรียบเทียบข้อมูล
- การทุจริตตัวของดินในแต่ละระยะทางนั้น ๆ ค่าที่ได้มีทั้งค่าจากการวัดของบุคคล และจากการส่งค่าของหิวเจาะเจาะ ไม่สามารถที่จะบอกได้ว่าข้อมูลที่เข้ามาในแต่ละคอลัมน์เป็นข้อมูลที่สามารวัดได้จากพื้นที่บริเวณเดียวกัน

### แนวทางแก้ไขปัญหา

- แก้ไข โดยการขอข้อมูลที่มีตัวแปรเพิ่มเติม หรือเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายเพื่อให้กลุ่มของข้อมูลที่สามารถเป็นไปได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปมีปริมาณที่มากกว่ากลุ่มข้อมูลเกิดในบางช่วงเวลามาก ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับข้อมูลที่มีความเป็นมาตรฐานให้มากขึ้น
- ตรวจสอบและปรับปรุงวิธีการวัดข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลจริง หรือใกล้เคียงความจริงให้มากที่สุด

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

- ศึกษาหาทฤษฎีและแนวคิดใหม่ ๆ เพื่อปรับปรุง โครงสร้างของ โครงข่ายประสาทเทียม และการคำนวณของ โครงข่ายประสาทเทียม
- ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของ โครงข่ายประสาทเทียมกับตัวแปรต่าง ๆ ทั้งตัวแปรของข้อมูลที่จะป้อนเข้าโครงข่ายและ คำนวณน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียม
- ศึกษาและวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และความแตกต่างของกลุ่มข้อมูลและระหว่างกลุ่ม ข้อมูลเพื่อหาวิธีในการแยกข้อมูลที่จะพยากรณ์การทรุดตัวว่า เหมาะสมกับ โครงข่าย ประสาทเทียมแบบใด
- เพิ่มข้อมูลในการศึกษาเพื่อแยกกลุ่มข้อมูลให้ได้มากที่สุดสำหรับการใช้การจริง



## บรรณานุกรม

- S. Lu and A. Szeto. 1993. **Hierachical Artificial Neural Networks for Edge Enhancement**. Vol. 26. No. 2. Pattern Recognition.
- J. Lee, R. C. Weger, S. K. Sengupta and R. M. Welch. 1990. **A Neural Network Approach to Cloud Classification**. Vol. 28. No. 5. IEEE Trans, Geoso.. Remote Sensing.
- B. Kosko. 1992. **Neural Networks and Fuzzy Systems, ADynamical Systems Approach to Machine Intelligence**. NJ : Prentice Hall.
- Suchatvee Suvansawat and Herbert H.Einstein. **Artificial Neural Networks for Predicting the Maximum Surface Settlement Caused by EPBShield Tunneling**. Bangkok : King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).
- A. A. Kempka. 1994. **Activating Neural Networks**. Part I. AI Expert.
- A. A. Kempka. 1994. **Activating Neural Networks**. Part II. AI Expert.
- R. P. Lippmann. 1987. **An Introduction to Computing with Neural Nets**. IEEE ASSP Mag..
- J. E. Dayhoff. 1990. **Neural Network Architectures an Introduction**. Van Nostrand Reinhold.
- M. Caudill. 1991. **Understanding Neural Networks**. Vol. 2. Computer Explorations.