

การจดจำและจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์จากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



นางสาวปิยะนุช สุจินตนารัตน์

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RADIATED EMI RECOGNITION AND IDENTIFICATION FOR PCB CONFIGURATION



Miss Piyanuch Sujintanarat

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Academic Year 2006

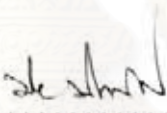
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจดจำและจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์จากสัญญาณ รบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
โดย	นางสาวปิยะนุช สุจินตนารัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุดมิ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

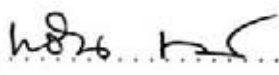
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประทีปมงคลการ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุดมิ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธุ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์)





# #4870384321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY / NEURAL NETWORK / NEAR-FIELD / FAR-FIELD / PRINTED CIRCUIT BOARDS

PIYANUCH SUJINTANARAT : RADIATED EMI RECOGNITION AND IDENTIFICATION FOR PCB CONFIGURATION. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. PRASIT TEEKAPUT, Ph.D., THESIS COADVISOR : KRAISON AUNCHALEEVARAPAN, Ph.D., 102 pp.

In this thesis, the Neural Network (NN) is applied to recognize and identify basic Printed Circuit Board (PCB) configuration using its near-field and far-field radiated Electromagnetic Interference (EMI). The different kinds of PCB shape are used for produce electromagnetic field. The fields are measured using near-field probe with termination load and compared this result with a simulation using Finite Element Method (FEM) based on Maxwell's equation. The actual measurement result is corresponding to simulation result. Image processing is applied to reduce input node and learning time of neural network. After trained, neural network can identify type of PCBs configuration by measured magnetic near-field spectra and electric far-field spectra with impulse noise. Finally, neural network can predict far-field emission spectra from near-field measurement.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature..... *P. Sujintanarat*  
Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature..... *P. Teekaput*  
Academic year ....2006..... Coadvisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ. ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ ที่ช่วยประสิทธิ์  
ประสาทวิชาความรู้ในการทำงานวิจัย เป็นผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำ  
วิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและ  
อิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ขอขอบคุณทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่  
ให้เงินทุนสนับสนุนในด้านการเรียนและทำวิจัยเป็นระยะเวลา 1 ปี (2549-2550)

สุดท้ายขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวและเพื่อนๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมาก  
ในความสำเร็จนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3    วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4    ขั้นตอนดำเนินงาน .....	3
1.5    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2. ทฤษฎี.....	4
2.1    ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC).....	5
2.1.1    กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
2.1.2    มาตรฐานทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Standard) .....	7
2.1.3    การทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Testing) .....	9
2.1.4    การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMS Testing) .....	10
2.2    การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล.....	13
2.2.1    อุปกรณ์ในห้องทดสอบตามมาตรฐาน.....	14
2.2.2    แนวการรับของสายอากาศตามมาตรฐานการทดสอบด้าน EMC .....	15
2.2.2.1    แนวการรับของสายอากาศแนวนอน (Horizontal Polarization).....	15
2.2.2.2    แนวการรับของสายอากาศแนวตั้ง (Vertical Polarization) .....	15
2.2.3    การวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ (Magnetic Near-Field Measurement) .....	16
2.2.3.1    เครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้.....	17
2.2.3.2    สายอากาศที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ .....	17

บทที่	หน้า
2.2.4 การวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล (Electric Far-Field Measurement).....	20
2.3 โครงสร้างของแผนวงจรมิมพ์.....	28
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method).....	29
2.5 การเตรียมข้อมูลภาพ (Pre-processing).....	31
2.5.1 การแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (Thresholding).....	31
2.5.2 การหาขอบภาพ (Edge Detection).....	32
2.5.3 การประมวลผลทำให้เส้นบาง (Thinning).....	34
2.5.4 การประมวลผลทำให้เส้นบาง (Thinning).....	36
3. โครงข่ายประสาทเทียม .....	40
3.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้สอน (Supervised Learning) .....	41
3.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) .....	42
3.3 การแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Backpropagation) .....	44
3.4 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม .....	45
3.5 การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม .....	46
3.5.1 สนามแม่เหล็กกระยะใกล้.....	46
3.5.2 สนามแม่เหล็กกระยะไกล.....	48
4. ผลการทดลองและทำนายโครงข่ายประสาทเทียม.....	51
4.1 สัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์เซียน (White Gaussian Noise).....	51
4.1.1 วิธีใส่สัญญาณรบกวนแบบ White Gaussian Noise .....	52
4.1.2 วิธีใส่สัญญาณรบกวนแบบกำหนดค่า .....	53
4.1.3 ค่าประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม .....	53
4.2 ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอพาทพุต .....	54
4.2.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	55
4.2.2 ผลการทำนาย .....	60
4.3 จำนวนชั้นฮิดเดน .....	63
4.3.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	63
4.3.2 ผลการทำนาย .....	68
4.4 จำนวนฮิดเดนโหนด.....	73

บทที่	หน้า
4.4.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 100 ฮิดเดนโหนด).....	73
4.4.2 ผลการทำนาย .....	74
4.4.3 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 200 ฮิดเดนโหนด).....	77
4.4.4 ผลการทำนาย .....	77
4.4.5 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 500 ฮิดเดนโหนด).....	80
4.4.6 ผลการทำนาย .....	80
4.5 วงจรพิมพ์ชุดที่ 2 .....	83
4.5.1 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 200 โหนด .....	84
4.5.2 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด .....	85
4.5.3 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000 โหนด .....	86
4.5.4 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 15000 โหนด .....	87
4.5.5 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 2000 โหนด .....	88
4.5.6 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 5000 โหนด .....	89
4.5.7 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000, 1000 โหนด .....	90
5.บทสรุป.....	92
5.1 จากผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล .....	92
5.2 จากการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม.....	96
5.3 การประยุกต์ใช้งานเครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะไกล.....	96
รายการอ้างอิง.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	102

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

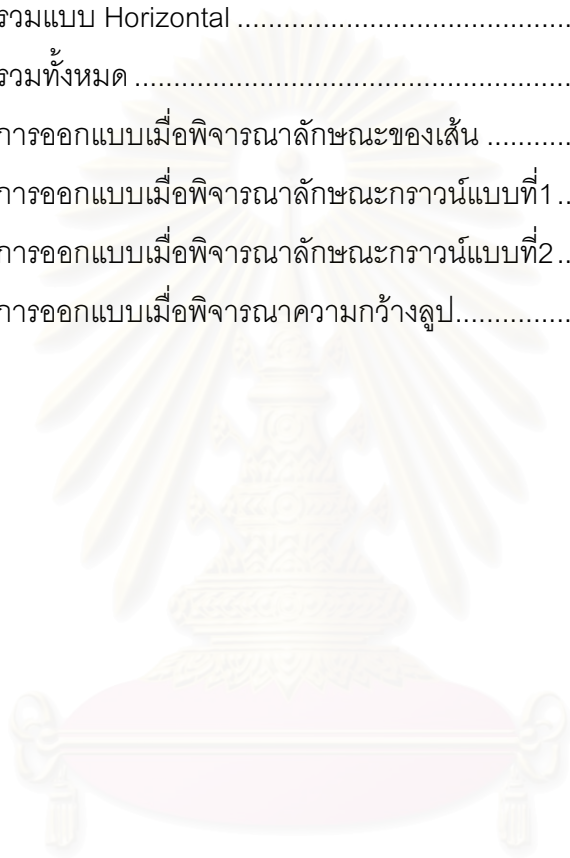
## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานระดับสากล ระดับภูมิภาค และระดับประเทศ.....	8
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานสากลและของไทย .....	9
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบทางด้านภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	12
ตารางที่ 2.4 แสดงผลการหาจุดแยก, จุดปลาย และจุดตัด .....	37
ตารางที่ 3.1 ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ .....	47
ตารางที่ 3.2 ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมสนามไฟฟ้ากระยะใกล้ .....	48
ตารางที่ 4.1 แบบWhite Gaussian Noise (Vertical) .....	60
ตารางที่ 4.2 แบบกำหนดค่า (Vertical) .....	60
ตารางที่ 4.3 แบบWhite Gaussian Noise (Horizontal) .....	61
ตารางที่ 4.4 แบบกำหนดค่า (Horizontal) .....	61
ตารางที่ 4.5 ผลรวมแบบ Vertical .....	62
ตารางที่ 4.6 ผลรวมแบบ Horizontal.....	62
ตารางที่ 4.7 ผลรวมทั้งหมด.....	62
ตารางที่ 4.8 แบบWhite Gaussian Noise (Vertical).....	68
ตารางที่ 4.9 แบบกำหนดค่า (Vertical).....	69
ตารางที่ 4.10 แบบWhite Gaussian Noise (Horizontal) .....	70
ตารางที่ 4.11 แบบกำหนดค่า (Horizontal) .....	71
ตารางที่ 4.12 ผลรวมแบบ Vertical .....	72
ตารางที่ 4.13 ผลรวมแบบ Horizontal .....	72
ตารางที่ 4.14 ผลรวมทั้งหมด .....	72
ตารางที่ 4.15 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Vertical).....	74
ตารางที่ 4.16 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Vertical) .....	74
ตารางที่ 4.17 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Vertical).....	74
ตารางที่ 4.18 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Vertical).....	74
ตารางที่ 4.19 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Vertical) .....	75
ตารางที่ 4.20 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Vertical).....	75
ตารางที่ 4.21 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Horizontal).....	75
ตารางที่ 4.22 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Horizontal) .....	75



ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.23 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Horizontal).....	75
ตารางที่ 4.24 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Horizontal).....	76
ตารางที่ 4.25 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Horizontal).....	76
ตารางที่ 4.26 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Horizontal) .....	76
ตารางที่ 4.27 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Vertical).....	77
ตารางที่ 4.28 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Vertical) .....	77
ตารางที่ 4.29 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Vertical).....	77
ตารางที่ 4.30 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Vertical).....	77
ตารางที่ 4.31 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Vertical) .....	78
ตารางที่ 4.32 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Vertical).....	78
ตารางที่ 4.33 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Horizontal).....	78
ตารางที่ 4.34 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Horizontal) .....	79
ตารางที่ 4.35 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Horizontal).....	79
ตารางที่ 4.36 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Horizontal).....	79
ตารางที่ 4.37 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Horizontal).....	79
ตารางที่ 4.38 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Horizontal) .....	79
ตารางที่ 4.39 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Vertical).....	80
ตารางที่ 4.40 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Vertical) .....	80
ตารางที่ 4.41 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Vertical).....	81
ตารางที่ 4.42 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Vertical).....	81
ตารางที่ 4.43 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Vertical) .....	81
ตารางที่ 4.44 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Vertical).....	81
ตารางที่ 4.45 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Horizontal).....	81
ตารางที่ 4.46 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Horizontal) .....	82
ตารางที่ 4.47 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Horizontal).....	82
ตารางที่ 4.48 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Horizontal).....	82
ตารางที่ 4.49 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Horizontal).....	82
ตารางที่ 4.50 แบบWhite Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Horizontal) .....	82
ตารางที่ 4.51 ผลการทำนายจากการใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด .....	85
ตารางที่ 4.52 ผลการทำนายจากการใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 1000 โหนด .....	86

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.53 ผลการทำนายจากการใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 1500 โหนด .....	87
ตารางที่ 4.54 ผลการทำนายจากการใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 2000 โหนด .....	88
ตารางที่ 4.55 ผลการทำนายจากการใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 5000 โหนด .....	89
ตารางที่ 4.56 ผลการทำนายจากการใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 1000, 1000 โหนด .....	90
ตารางที่ 4.57 ผลรวมแบบ Vertical .....	91
ตารางที่ 4.58 ผลรวมแบบ Horizontal .....	91
ตารางที่ 4.59 ผลรวมทั้งหมด .....	91
ตารางที่ 5.1 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาลักษณะของเส้น .....	93
ตารางที่ 5.2 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาลักษณะกราว์แบบที่1 .....	94
ตารางที่ 5.3 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาลักษณะกราว์แบบที่2 .....	94
ตารางที่ 5.4 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาความกว้างรูป.....	95



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์....	6
รูปที่ 2.2 กลุ่มที่ทำหน้าที่ดูแลมาตรฐานแบ่งตามภูมิภาคต่างๆ .....	7
รูปที่ 2.3 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำ .....	9
รูปที่ 2.4 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ.....	10
รูปที่ 2.5 การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ .....	11
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	14
รูปที่ 2.7 ฉนวนเฟอร์ไรท์ .....	15
รูปที่ 2.8 แผ่นโฟมผสมเฟอร์ไรท์ .....	15
รูปที่ 2.9 แสดงแนวการรับของสายอากาศในแนวนอน.....	15
รูปที่ 2.10 แสดงแนวการรับของสายอากาศในแนวตั้ง.....	16
รูปที่ 2.11 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้.....	17
รูปที่ 2.12(ก) สายอากาศ .....	18
รูปที่ 2.12(ข) วงจรเสมือน.....	18
รูปที่ 2.13 แสดงค่าองค์ประกอบสายอากาศ.....	19
รูปที่ 2.14 ผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้.....	19
รูปที่ 2.15 แสดงการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล.....	20
รูปที่ 2.16(ก) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว I ในแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ .....	22
รูปที่ 2.16(ข) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว O ในแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ .....	23
รูปที่ 2.16(ค) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว L ในแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ .....	24
รูปที่ 2.16(ง) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว H ในแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ .....	25
รูปที่ 2.16(จ) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว X ในแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ .....	26
รูปที่ 2.16(ฉ) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว 7 ในแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ .....	27

ภาพประกอบ .....	หน้า
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของแผ่นวงจรพิมพ์ และวิธีการวัด .....	28
รูปที่ 2.18 รูปแบบแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ .....	28
รูปที่ 2.19 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว I .....	30
รูปที่ 2.20 ผลการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	31
รูปที่ 2.21 รูปแบบแมสค์ที่ใช้ในการหาขอบของภาพ.....	33
รูปที่ 2.22 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการทำการประมวลผลเส้นบาง โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ $A^1-A^{20}$ และ $A^{21}-A^{30}$ .....	35
รูปที่ 2.23 แสดงผลการประมวลผลเส้นบางจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method).....	35
รูปที่ 2.24 แสดงผลการประมวลผลเส้นบางการวัดจริง .....	36
รูปที่ 2.25 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการหาจุดแยก.....	36
รูปที่ 2.26 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการหาจุดปลาย .....	37
รูปที่ 2.27 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการหาจุดตัด.....	37
รูปที่ 3.1 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม .....	41
รูปที่ 3.2 แสดงการเรียนรู้แบบมีผู้สอน .....	42
รูปที่ 3.3 แสดงการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน.....	42
รูปที่ 3.4 แสดงกราฟและสัญลักษณ์ของฟังก์ชัน Log sigmoid .....	43
รูปที่ 3.5 แสดงกราฟและสัญลักษณ์ของฟังก์ชัน Tangent sigmoid.....	43
รูปที่ 3.6 แสดงกราฟและสัญลักษณ์ของฟังก์ชัน Purelin .....	43
รูปที่ 3.7 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Backpropagation Neural Network) .....	44
รูปที่ 4.1(a) กราฟแสดงการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน .....	51
รูปที่ 4.1(b) ตัวอย่างสัญญาณรบกวนขาว .....	51
รูปที่ 4.2(a) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 1 .....	53
รูปที่ 4.2(b) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 2 .....	53
รูปที่ 4.2(c) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 3 .....	53
รูปที่ 4.2(d) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 5 .....	53
รูปที่ 4.2(e) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 10 .....	53
รูปที่ 4.2(f) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 20 .....	53
รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งฟังก์ชันการปรับค่า .....	54

ภาพประกอบ .....	หน้า
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, purelin .....	55
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, purelin .....	55
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, purelin .....	56
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, logsig.....	56
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, logsig .....	57
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, logsig.....	57
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, tansig.....	58
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, tansig .....	58
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, tansig.....	59
รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งสัญญาณรบกวน .....	59
รูปที่ 4.14 โครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นฮิดเดน 2 ชั้น .....	63
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, logsig, purelin.....	63
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, purelin, purelin.....	64
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, tansig, purelin.....	64
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, tansig, purelin.....	65
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, logsig, purelin.....	65
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, purelin, purelin .....	66
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, logsig, purelin.....	66
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, purelin, tansig.....	67
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, tansig, purelin.....	67
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งฮิดเดนโหนดที่จะทำการปรับค่า.....	73
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 100 โหนด.....	73
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 200 โหนด.....	77
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด.....	80
รูปที่ 4.28 รูปแผ่นวงจรมุมพีซูดที่ 2 .....	83
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 200 โหนด.....	84
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด.....	85
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000 โหนด.....	86
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1500 โหนด.....	87
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 2000 โหนด.....	88

ภาพประกอบ ..... หน้า

รูปที่ 4.34 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 5000 โหนด..... 89

รูปที่ 4.35 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮีดเดนโหนดจำนวน 1000, 1000 โหนด..... 90

รูปที่ 5.1 โครงข่ายการออกแบบลายวงจร ..... 93

รูปที่ 5.2(a) รูปแผ่นวงจร ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER ทางด้านบน... 97

รูปที่ 5.2(b) รูปแผ่นวงจร ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER ทางด้านล่าง.. 97

รูปที่ 5.3 ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER ..... 98

รูปที่ 5.4(a) ผลการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้จากด้านบน ..... 98

รูปที่ 5.4(b) ผลการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้จากด้านล่าง ..... 98



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ปัญหาการรบกวนจากการแผ่รังสีสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้กลายมาเป็นปัญหาสำคัญในการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากในประเทศต่างๆ ทั้งในสหรัฐอเมริกา หรือในสหภาพยุโรป ได้มีข้อกำหนดว่าผลิตภัณฑ์ที่จะสามารถนำเข้ามาจำหน่ายในประเทศได้นั้น จะต้องผ่านการทดสอบความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility - EMC) ให้ผ่านตามมาตรฐานที่ในแต่ละประเทศกำหนดไว้ก่อนจึงจะสามารถนำเข้ามาจำหน่ายได้ หรือแม้แต่การจำหน่ายภายในประเทศของตงก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางในการทำนายลักษณะและพฤติกรรมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า ปัญหาการรบกวนจากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปัญหาที่สำคัญ และเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าสูงมากเพราะต้องทดสอบภายในห้องปิดกันไร้คลื่นสะท้อน (Anechoic Chamber) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ผู้ที่ต้องการศึกษาอย่างมาก และเมื่ออุปกรณ์ไม่ผ่านการทดสอบผู้ออกแบบจะต้องทำการแก้ไขจนกว่าจะผ่านตามมาตรฐาน เช่นการวางอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ใหม่ หรือการเพิ่มตัวกรองสัญญาณ (Filter) เข้าไป และถ้ายังไม่สามารถแก้ไขปัญหารบกวนได้ ขั้นตอนการออกแบบลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกนำมาพิจารณาใหม่ ซึ่งเมื่อมาถึงขั้นตอนนี้จะต้องเสียเวลาอย่างมากในการแก้ไข โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์หลายชั้น (Multilayer PCB) การแก้ไขจะต้องกระทำที่ละจุดจนกระทั่งสามารถลดระดับสัญญาณรบกวนลงได้ จากนั้นจึงนำแผ่นวงจรนั้นมาทำการทดสอบซ้ำเพื่อให้ผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมาก

เนื่องจากส่วนประกอบต่างๆ ที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์มีจำนวนมากหลายชนิด และมีพฤติกรรมแผ่รังสีที่ต่างกันโดยขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณขาเข้า (Input Signal) หรือรูปแบบของเส้นทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นต้น ทำให้ผู้ออกแบบไม่สามารถจำแนกหรือบ่งชี้

ชนิดรูปแบบของแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยการพิจารณาจากลักษณะการแพร่คลื่นได้ ดังนั้นเมื่อเกิดปัญหาจากระดับสัญญาณที่เกินมาตรฐานก็จะเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมากในการแก้ปัญหาที่ตั้งได้กล่าวไว้แล้ว โดยถ้าหากเราสามารถรู้ได้ว่าจุดใด หรือลายทองแดงชนิดใดบนแผ่นวงจรพิมพ์เป็นตัวก่อให้เกิดการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาจนเกินเส้นจำกัดมาตรฐาน ก็จะทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ ตรงจุด [1],[2] จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่จะเรียนรู้และทำนายพฤติกรรมการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์

## 1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

การจดจำและจำแนกลักษณะลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ จะทำโดยใช้โปรแกรม เนื่องจากมนุษย์ไม่สามารถจดจำข้อมูลความสัมพันธ์ของความถี่กับแอมพลิจูดที่เป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้ปัจจัยทางด้านการวัด เช่นความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement Uncertainty) หรือสัญญาณรบกวนโดยรอบ (Ambient Noise) ก็ส่งผลทำให้การวัดและการคำนวณผิดพลาดวิธีการอื่น [3] จะให้ค่าการคำนวณเป็นแบบค่าแอมพลิจูดคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ณ ความถี่นั้นๆ ซึ่งไม่สามารถรองรับค่าความไม่แน่นอนที่เกิดในการวัดได้ จึงได้นำเอาโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) มาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ [4] ซึ่งสามารถลดปัญหาความไม่แน่นอนนี้ออกไปได้ โดยนำมาใช้จดจำสนามแม่เหล็กจากการวัดระยะใกล้ และสนามไฟฟ้าจากการวัดระยะไกลที่แพร่ออกมาจากลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ทำการสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้รูปร่างลักษณะของลายวงจรพิมพ์ เพื่อให้สามารถจำแนกรูปแบบของลายทองแดงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมา และสามารถทำนายการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลจากผลการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ได้

## 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ศึกษาการแพร่สนามแม่เหล็กระยะใกล้ (Magnetic Near-Field) และสนามไฟฟ้าระยะไกล (Electric Far-field) จากแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการจดจำและจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยอาศัยการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ที่มีลักษณะรูปแบบแตกต่างกันหลายแบบมาเป็นตัวกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ทำการสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้แบบอัตโนมัติเพื่อใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กจากแผ่นวงจรพิมพ์ สามารถจดจำและจำแนกรูปแบบลายทองแดงจาก

สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่วัดได้จากเครื่องมือวัด และสามารถทำนายการวัดสนามไฟฟ้ากระยะไกลจากผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ได้

#### 1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ให้มีสัญญาณรบกวนต่ำ
2. ศึกษาการใช้งานระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method - FEM) สำหรับแผ่นวงจรพิมพ์
3. ศึกษาอัลกอริทึมสำหรับกระบวนการทางรูปภาพ (Image Processing) เช่น การหาขอบของรูป (Edge Detection), การประมวลผลภาพทำให้เส้นบาง (Thinning) และการแยกวัตถุที่เราสนใจออกจากพื้นหลัง (Thresholding)
4. สร้างต้นแบบเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ (Near-Field Scanner) แบบอัตโนมัติ
5. ออกแบบสร้างแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับการวัดสัญญาณและทำการวัดสัญญาณด้วยเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้
6. เปรียบเทียบผลการจำลอง (Simulation) โดยซอฟต์แวร์ กับผลการวัดจริงโดยเครื่องมือวัด
7. ทำการวัดคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้ากระยะไกล (Far-Field)
8. ศึกษาและทดลองอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม
9. สรุปผลการศึกษา และเรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เรื่องมาตรฐานการทดสอบความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)
2. ได้ความรู้เรื่องระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ระบบการรู้จำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม และเกี่ยวกับการประมวลผลภาพวิธีต่างๆ
3. สามารถทำนายการวัดสนามไฟฟ้ากระยะไกลจากผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

เนื้อหาของทฤษฎีที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะอธิบายถึงความเข้ากันได้ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) ว่ามีความหมายอย่างไร โดยประกอบด้วย กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, มาตรฐานทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Standard) ในประเทศไทยและประเทศต่างๆ, การทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference Testing: EMI Testing) ที่แบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ การทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำและการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ สุดท้ายคือการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility Testing: EMS) เป็นความสามารถในการต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนที่ 2 กล่าวถึงวิธีการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล โดยแบ่งออกเป็นการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ (Magnetic Near-Field Measurement) และการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล (Electric Far-Field Measurement) ว่ามีอุปกรณ์การวัดและวิธีการวัดเป็นอย่างไร รวมถึงแนวการรับของสายอากาศทั้งในแนวตั้ง (Vertical) และแนวนอน (Horizontal)

ส่วนที่ 3 แนะนำถึงโครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าว่าประกอบด้วยอะไรและมีรูปร่างอย่างไร

ส่วนที่ 4 กล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ที่ใช้ในการจำลองการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง โดยใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้แบบอัตโนมัติ (Near-field Scanner) ที่สร้างขึ้นมา ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด สุดท้ายคือทฤษฎีการเตรียมข้อมูลภาพ (Pre-processing) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งประกอบด้วย การแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (Thresholding), การหาขอบภาพ (Edge Detection), การประมวลผลทำให้เส้นบาง (Thinning) และการหาจุดตัด / จุดแยก / จุดปลาย ซึ่งจะเป็นขั้นตอนการเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

## 2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) คือ ความสามารถของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสภาวะแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้า และมีความสัมพันธ์คือไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) และสามารถทนต่อการถูกรบกวนของปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility: EMS) จากภายนอกด้วย ปรากฏการณ์ของปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ปัญหาการรบกวนของคลื่นโทรศัพท์มือถือต่อหน้าจอบนคอมพิวเตอร์ หรือการรบกวนของคอมพิวเตอร์ต่อโทรทัศน์ ซึ่งจะสังเกตได้จากการคลื่นรบกวนบนหน้าจอ เป็นต้น ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Source), ส่วนที่ได้รับผลการรบกวน (Victim) และส่วนเชื่อมต่อ (Coupling) สัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก โดยสัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีเส้นทางเดินจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโดยตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันคือ การแผ่กระจาย (Radiated Emission: RE) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ และอีกรูปแบบคือการแผ่ผ่านทางสายตัวนำ (Conducted Emission: CE) ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแทนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้า (electrically) ซึ่งสามารถแทนให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (capacitor) หรืออยู่ในรูปของแม่เหล็ก (magnetically) ก็สามารรถแทนในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (inductor)

### 2.1.1 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [6] ดังนี้

- Common Ground Impedance Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากความต่างศักย์ระหว่างกราวนด์ของระบบ โดยปกติแล้วระบบหลายๆ ระบบที่นำมาต่อกันเพื่อทำงานร่วมกันจะใช้กราวนด์ของตัวเอง การแยกหรือการใช้งานกราวนด์คนละระบบเมื่อนำมาต่อเชื่อมกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมระหว่างกราวนด์ขึ้น ผลของความต่างศักย์ของระบบกราวนด์นี้เองทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a)

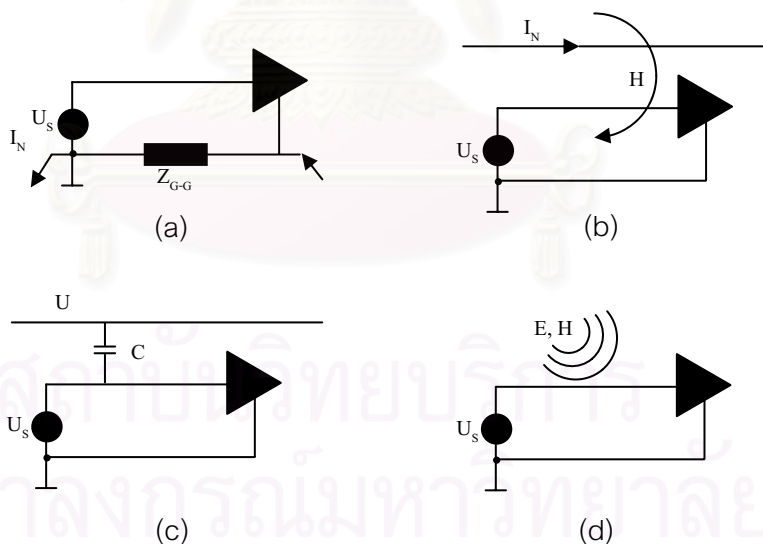
- Inductive Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากกระแสสูงๆ เมื่อกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นโดยรอบตัวนำตามแนวรัศมี ผลของ



สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของกระแสบนตัวนำหรือวงจรถูกที่อยู่ใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b)

- Capacitive Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากแรงดันที่อยู่ข้างเคียง เมื่อนำแหล่งกำเนิดที่มีแรงดันสูงๆ มาวางไว้ใกล้กับวงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์ อากาศซึ่งมีความชื้นซาบแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิด และวงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์จะประพฤติดังเสมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็กและสามารถส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดมายังวงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1(c)

- Radiate Field Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากคลื่นระนาบ (plane wave) ซึ่งประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปรบกวนการทำงานของวงจรถูกอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.1(d) จากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 แหล่งคือ จากแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า สนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์ และสนามแม่เหล็กโลก อีกแหล่งกำเนิดเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น เครื่องรับ-ส่งวิทยุ เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน รถยนต์ และเครื่องบิน เป็นต้น

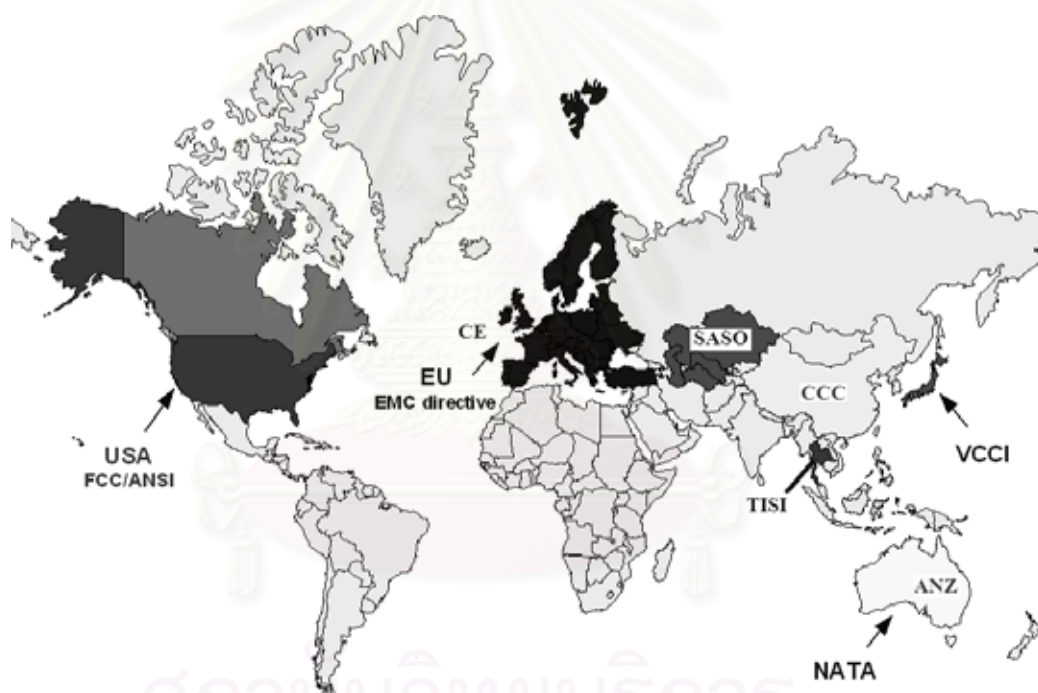


รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์



## 2.1.2 มาตรฐานทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Standard)

เนื่องจากในแต่ละภูมิภาคของโลกมีการใช้งานระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งแรงดันและความถี่ เช่น 100 โวลต์, 110 โวลต์, 130 โวลต์, 220 โวลต์, 230 โวลต์ หรือ 240 โวลต์ และใช้ระดับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 60 เฮิร์ตซ์ นอกจากนี้ปัจจัยต่างๆในแต่ละภูมิภาคที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีผลทำให้การออกข้อกำหนดของมาตรฐาน EMC แตกต่างกัน หากจำแนกมาตรฐานทาง EMC ออกตามภูมิภาค จะสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ เช่น กลุ่มสหภาพยุโรปมี Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC) เป็นผู้รับผิดชอบ ซึ่งมาตรฐานของ CENELEC ยกตัวอย่างเช่น EN 55022, EN55011, และ EN61000-4-2 โดยคำว่า EN หมายถึง European Norm



รูปที่ 2.2 กลุ่มที่ทำหน้าที่ดูแลมาตรฐานแบ่งตามภูมิภาคต่างๆ

ส่วนในกลุ่มอเมริกาเหนือมีหน่วยงานที่ยอมรับ คือ The Federal Communications Commission (FCC) เป็นผู้รับผิดชอบเช่นเดียวกับ The American National Standards Institute (ANSI) ตัวอย่างมาตรฐานเช่น FCC part 15 เป็นมาตรฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ หรือมาตรฐาน FCC part 18 จะเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์อุตสาหกรรม เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น ส่วนกลุ่มประเทศในทวีปออสเตรเลียก็มีองค์กรที่รับผิดชอบมาตรฐาน EMC ชื่อว่า AS/NZS คือ Australian Standard และ New Zealand Standard ตัวอย่างเช่น

AS/NZS 1044 เกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในบ้านโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบ, AS/NZS 1053 เกี่ยวกับเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ เป็นต้น ในประเทศอื่นๆเช่น ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น เยอรมัน สหราชอาณาจักรได้อ้างอิงมาตรฐานกลุ่มสหภาพยุโรป โดยเพิ่มอักษรนำหน้ามาตรฐานของยุโรป CENELEC เช่น BS EN 61000-4-5 คำว่า BS หมายถึง British Standard โดยที่เนื้อหาของในมาตรฐานดังกล่าวจะเหมือนกับมาตรฐาน CENELEC จะสังเกตได้ว่ามาตรฐานในแต่ละภูมิภาคมีชื่อเรียกที่แตกต่างกัน แต่ละรายละเอียดของมาตรฐานจะคล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบมาตรฐานสากล ยุโรป และสหรัฐอเมริกา โดยการแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ถูกแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานระดับสากล ระดับภูมิภาค และระดับประเทศ

หัวข้อ/รายการ	International	European	USA
อุปกรณ์อุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์ การแพทย์	CISPR11	EN55011	FCC Part 18
เครื่องรับสื่อสาร	CISPR 13	EN55013	FCC Part 15
มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน	CISPR 14	EN55014	-
บริภัณฑ์ส่องสว่าง	CISPR 15	EN55015	-
อุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศ	CISPR 22	EN55022	FCC Part 15
ภูมิคุ้มกันไฟฟ้าสถิต	IEC 61000-4-2	EN61000-4-5	-
ภูมิคุ้มกันฟ้าผ่า	IEC 61000-4-5	EN61000-4-5	IEEE C 62.4
ภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กของความถี่สายส่ง	IEC 61000-4-8	EN61000-4-8	-
ภูมิคุ้มกันแรงดันไฟตกและขาดช่วง	IEC 61000-4-11	EN61000-4-11	-

สำหรับในประเทศไทยทางกระทรวงอุตสาหกรรมได้ตั้งคณะกรรมการขึ้นทำงานพิจารณา ร่างมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอ้างอิงกับมาตรฐานสากล คือ CISPR และ IEC โดยเรียกชื่อว่า มาตรฐานอุตสาหกรรม หรือ มอก. สำหรับความสัมพันธ์ของมาตรฐาน มอก. และ มาตรฐานสากลถูกแสดงในตารางที่ 2.2

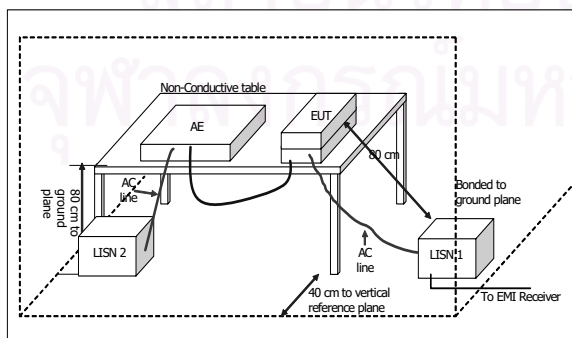
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานสากลและของไทย

รายการ	มาตรฐานสากล	มาตรฐาน มอก.
บริษัทที่ส่งสว่าง	CISPR 15	1955
อุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศ	CISPR 22	1956
การแพร่สัญญาณจากสายส่งแรงสูง	CISPR 18-3	1520
ขีดจำกัดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และ การแพทย์	CISPR 23	144

### 2.1.3 การทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference Testing: EMI Testing)

การทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

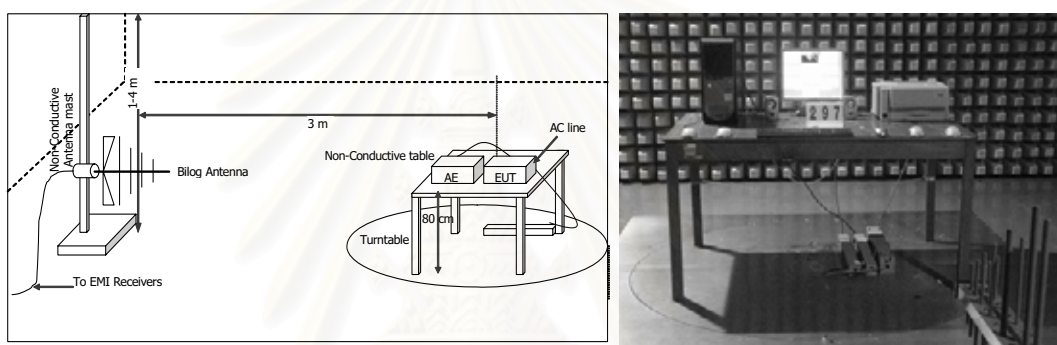
- การทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำ (Conducted EMI Testing) เป็นการทดสอบหาระดับสัญญาณที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ย้อนกลับเข้าไปในแหล่งจ่ายไฟฟ้า (AC main supply) โดยมีสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน (coupling path) ในการทดสอบนี้ต้องนำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shielded room) แล้ววัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ โดยอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้เครื่องวัดสัญญาณรบกวน (EMI receiver) ผ่านการตรวจวัดแล้วเทียบค่าที่วัดได้เทียบกับค่าขีดจำกัด (limit line) ของแต่ละมาตรฐาน สำหรับรูปแบบในการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.3 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำ

โดยมีสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่านแสดงในรูปที่ 2.3

- การทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ (Radiated EMI Testing) เป็นการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่แพร่กระจายออกไปในอากาศโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน การทดสอบนี้จะต้องนำอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) ที่มีขนาดระยะทดสอบ 3 เมตร และวัดสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากตัวอุปกรณ์โดยใช้สายอากาศชนิดพิเศษแบบไบ-ล็อก (Bi-log antenna) เป็นตัวรับสัญญาณและแสดงผลการวัดที่ได้ที่เครื่องวัดสัญญาณรบกวน และเทียบผลที่วัดได้กับค่าขีดจำกัดที่ระบุในมาตรฐานสำหรับการทดสอบในหมวดนี้จะเริ่มทดสอบที่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz แสดงดังรูปที่ 2.4



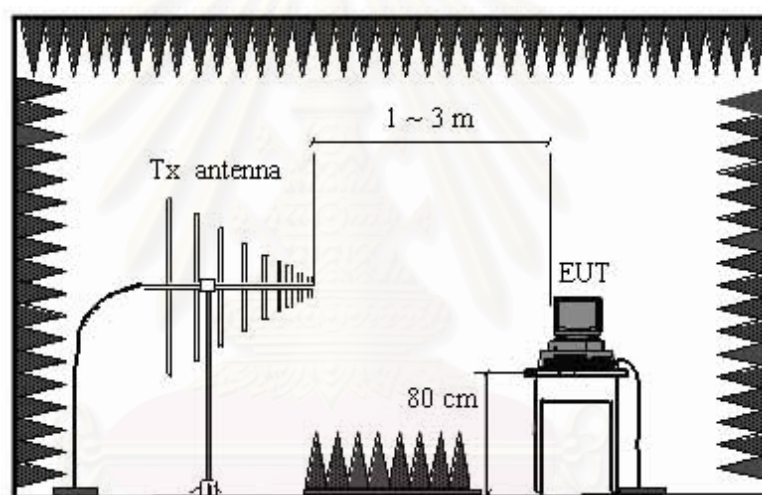
รูปที่ 2.4 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ

#### 2.1.4 การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility Testing: EMS)

การทดสอบในหมวดนี้จะเป็นการสร้างสภาวะแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำลองขึ้นไปรบกวนการทำงานของผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้รับรู้ความสามารถในการต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วระบบหรืออุปกรณ์ต่างๆ จะมีภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่แล้ว แต่การใช้งานบางกรณีหรือในบางสถานที่จะมีระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูง เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม ในห้องเก็บข้อมูล หรือในสถานที่ที่อาจต้องการระดับภูมิคุ้มกันที่สูงกว่าระดับปกติ ตามมาตรฐานภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งระดับภูมิคุ้มกันออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 สามารถทำงานได้ตามปกติ ไม่มีผลกระทบเมื่อได้รับสัญญาณรบกวน กลุ่มที่ 2 มีอาการผิดปกติเมื่อได้รับสัญญาณรบกวน แต่เมื่อสัญญาณรบกวนหายไปแล้ว สามารถกลับไปทำงานได้ตามปกติ กลุ่มที่ 3 มีอาการผิดปกติเมื่อได้รับสัญญาณรบกวน แต่ไม่สามารถกลับไปทำงานตามปกติได้เอง และกลุ่มที่ 4

เครื่องเสียหายหรือถูกทำลาย ไม่สามารถใช้งานได้อีก ในการทดสอบเพื่อหาระดับภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ จึงเป็นการทดสอบว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ สามารถทนต่อการรบกวนได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยมาตรฐานการทดสอบทางด้านภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายหัวข้อ ดังนี้ [7]

การทดสอบทางด้านนี้จะทำในมาตรฐาน IEC 61000 ซึ่งมีการทดสอบอยู่หลายด้าน แต่มีการทดสอบตามมาตรฐานในหัวข้อการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Radiated Immunity Testing: IEC 61000-4-3) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการทดสอบในหัวข้อการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ (Radiated EMI Testing) โดยจะทำการวัดตรงข้ามกันคือจะเปลี่ยนจากสายอากาศเป็นตัวรับการแพร่คลื่นมาเป็นตัวส่งคลื่นรบกวนแทน แล้วทำการวัดค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามระดับภูมิคุ้มกันทั้ง 4 กลุ่ม



รูปที่ 2.5 การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ



ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบทางด้านภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ชื่อมาตรฐาน	รหัสมาตรฐาน
คำแนะนำ คำจำกัดความ และความเป็นมาของการทดสอบภูมิคุ้มกัน Overview of Immunity testing	IEC 61000-4-1
การทดสอบภูมิคุ้มกันทางไฟฟ้าสถิตย์ Electrostatic Discharge Immunity Testing (ESD)	IEC 61000-4-2
การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ Radio Frequency Radiated Immunity Testing (RI)	IEC 61000-4-3
การทดสอบภูมิคุ้มกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็ว Electrical Fast Transient/Burst Immunity Testing	IEC 61000-4-4
การทดสอบภูมิคุ้มกันสัญญาณฟ้าผ่า Surge Immunity Testing	IEC 61000-4-5
การทดสอบภูมิคุ้มกันการรบกวนคลื่นวิทยุผ่านสายตัวนำไฟฟ้า Radio Frequency Conducted Immunity Testing	IEC 61000-4-6
การทดสอบฮาร์โมนิกส์บนแหล่งจ่ายกำลัง Harmonics on Power Supply	IEC 61000-4-7
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงกำลัง Power Magnetic Field Immunity Testing	IEC 61000-4-8
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงพัลส์ Pulse Magnetic Field Immunity Testing	IEC 61000-4-9
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กแบบออสซิลเลต Damp Oscillatory Magnetic field Immunity	IEC 61000-4-10
การทดสอบภูมิคุ้มกันแรงดันไฟฟ้าตกและขาดหายชั่วขณะ Voltage Dips and Short Interruption	IEC 61000-4-11
การทดสอบภูมิคุ้มกันแบบคลื่นกระดิ่ง Ring Wave	IEC 61000-4-12



ในการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุตามมาตรฐาน IEC 61000-4-3 จะต้องนำอุปกรณ์ที่ทดสอบไปวางในห้องทดสอบซึ่งสามารถปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (anechoic chamber) ห้องดังกล่าวจะป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากภายในออกสู่ด้านนอกและลดการรบกวนจากสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ด้านในห้อง จากนั้นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งกำเนิดโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (signal generator) ที่ความถี่ 80 MHz ถึง 1 GHz จะถูกขยายกำลังให้มากขึ้นโดยใช้เครื่องขยายกำลัง (power amplifier) และถูกส่งออกอากาศในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการใช้สายอากาศตัวส่ง (transmitter antenna) ไปรบกวนการทำงานของผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งวางอยู่ในห้อง ตัวอย่างของการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุของเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 2.5 จากรูปจะเห็นว่าอุปกรณ์ทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) ถูกวางอยู่บนโต๊ะสูง 80 เซนติเมตร และห่างจากสายอากาศตัวส่ง 3 เมตร จะพบว่าเครื่องมือในการทดสอบภูมิคุ้มกันนี้คล้ายกับการทดสอบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ (radiated emission) แต่ต่างกันในเรื่องวิธีการในการทดสอบ คือ ในการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ สายอากาศที่ใช้ จะเป็นตัวส่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อออกไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ แต่การทดสอบการแผ่คลื่นของอุปกรณ์ สายอากาศที่ใช้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระดับของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะขึ้นอยู่กับย่านการใช้งาน ว่า เป็นย่านที่อยู่อาศัย ย่านอุตสาหกรรม หรือย่านการทหาร

## 2.2 การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล

ในการทดสอบความเข้ากันได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility - EMC) ตามมาตรฐานสากลจำเป็นต้องทำการทดสอบภายในห้องปิดกั้น (Anechoic Chamber) ที่ได้มาตรฐาน ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายในห้องทดสอบออกสู่ภายนอก และต้องสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า และสัญญาณวิทยุจากภายนอก ไม่ให้เข้ามารบกวนอุปกรณ์ภายในห้องทดสอบระหว่างการทดสอบด้วย โดยภายในห้องทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 อุปกรณ์ในห้องทดสอบตามมาตรฐาน

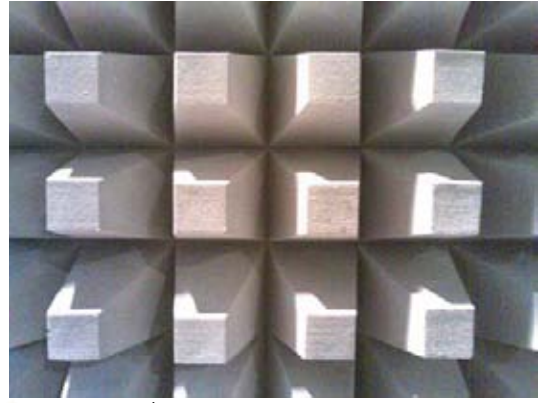
1. ผนังปิดกั้น เป็นโลหะที่มีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กสูง ใช้กันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องทดสอบ
2. ผนังเฟอร์ไรท์ เป็นออกไซด์ของโลหะหลายชนิด ใช้ดูดซับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนภายในห้อง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกดูดซับและไม่มีการสะท้อนภายในห้อง
3. แผ่นโฟมผสมเฟอร์ไรท์ จะดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ ไม่ให้เกิดการสะท้อนภายในห้อง
4. พื้นกราวด์เพลน เป็นแบบเรียบใช้สะท้อนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
5. สายอากาศ ใช้ในการรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยติดตั้งอยู่บนเสาที่เคลื่อนที่ได้ที่ความสูง 4 เมตร
6. แท่นหมุน (Turn Table) เป็นจานโลหะรัศมี 1.5 เมตร ถึง 3 เมตร ที่สามารถหมุนได้รอบ 360 องศา ใช้สำหรับวางอุปกรณ์การทดสอบ เพื่อหาตำแหน่งที่อุปกรณ์การทดสอบแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากที่สุด



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ผนังเฟอร์ไรท์

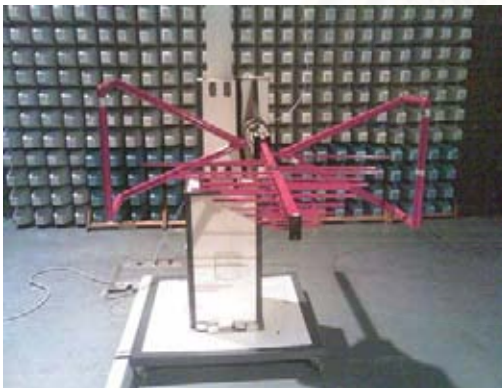


รูปที่ 2.8 แผ่นโพนผสมเฟอร์ไรท์

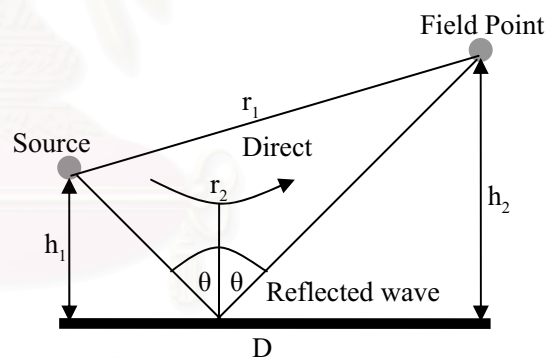
2.2.2 แนวการรับของสายอากาศตามมาตรฐานการทดสอบทางด้าน EMC แบ่งออกเป็น 2 แบบ [8] คือ

2.2.2.1 แนวการรับของสายอากาศแนวนอน (Horizontal Polarization)

ในกรณีของสายอากาศแนวนอน ตกกระทบตั้งฉากและขนานกับผิวสะท้อน เมื่อสายอากาศตัวส่งเป็นไดโพลตั้ง ค่าเกณฑ์ไดเรกแพทเทิร์น  $D(\phi)$  คงที่



รูปที่ 2.9 แสดงแนวการรับของสายอากาศในแนวนอน

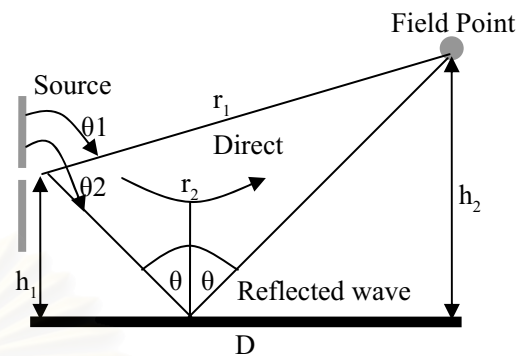


$$Eh_{(r)} = \frac{2\sqrt{30P_0D}}{r} \sin\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) \quad (2.1)$$

2.2.2.2 แนวการรับของสายอากาศแนวตั้ง (Vertical Polarization)

การคำนวณความเข้มสนามสำหรับสายแนวตั้งนี้จะยุ่งยากกว่ากรณีแนวนอน โดยทิศทางของสายอากาศตัวส่งจะต้องพิจารณาจากตัวปล่อยสัญญาณแบบไดโพลสั้น และไดโพลครึ่งคลื่น ความเข้มของสนามไฟฟ้าระยะไกลหาได้ดังสมการ

$$Ev(r) = \frac{2\sqrt{45P_0}}{r} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.10 แสดงแนวการรับของสายอากาศในแนวตั้ง

ทั้งสองสมการ (2.1) และ (2.2) ถูกนำมาใช้ในการทวนค่าที่วัดได้จากสายอากาศแนวตั้ง และแนวนอน โดยจะต้องทราบค่ากำลัง ( $P_0$ ) ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า, ระยะทาง คลื่นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณถึงสายอากาศ ( $r$ ) และความสูงของสายอากาศและแหล่งกำเนิด ( $h$ )

### 2.2.3 การวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ (Magnetic Near-Field Measurement)

การวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้จะทำในห้องทดสอบปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [9] ขนาด  $3\text{m} \times 5\text{m} \times 2\text{m}$  เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด สนามแม่เหล็กระยะใกล้ภายในห้องปิดกั้นมีดังนี้

1. เครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ (Near-Field Scanner) แบบอัตโนมัติ
2. สายอากาศแบบลูป (Loop Antenna) 30 MHz – 1 GHz รุ่น LANGER RF-R400-1
3. เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer) AFJ รุ่น CR55ER
4. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator) รุ่น HP81110A
5. ตัวขยายสัญญาณ (Pre-Amplifier) 24 dB รุ่น LANGER EMV
6. สายนำสัญญาณแบบมีค่าความสูญเสียต่ำ (Ultra Lowlose Cable)
7. เฟอไรท์ แคลมป์ (Ferrite Clamp)
8. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลการวัด

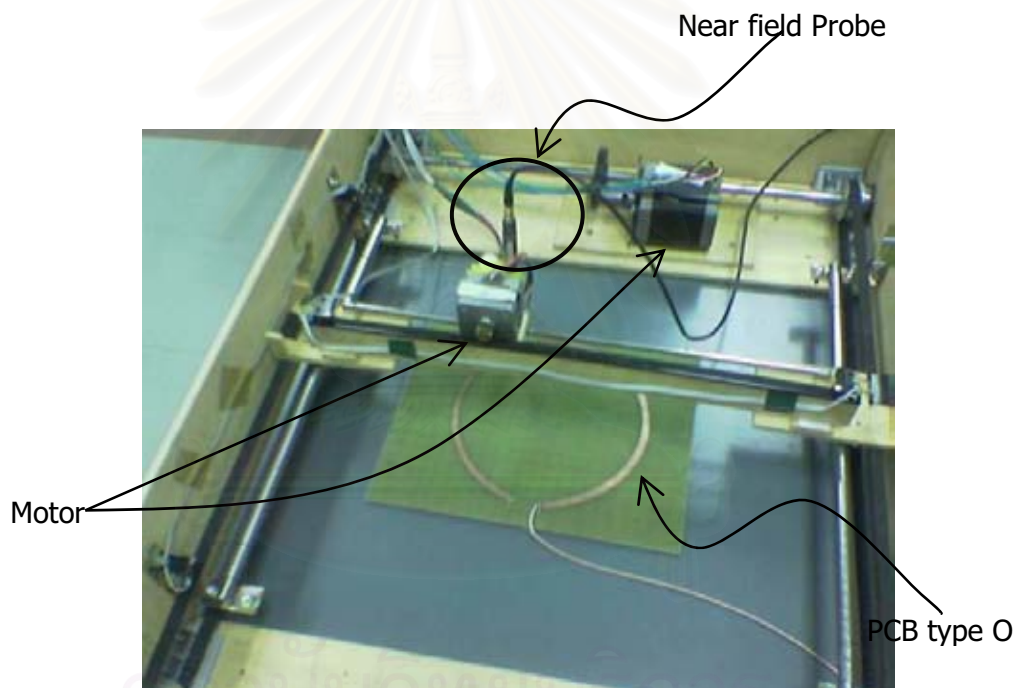
ในกระบวนการวัดแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกวางห่างจากผนังของห้องปิดกั้นมากกว่าระยะ 40 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน CISPR 22 สายสัญญาณขาเข้าของแผ่นวงจรพิมพ์ต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA ที่อยู่ด้านล่างของแผ่นวงจรที่เป็นกราวด์เพลน เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์และเครื่อง วิเคราะห์ความถี่ถูกวางห่างจากแผ่นวงจรพิมพ์ 1 เมตร โดยจะร้อยผ่านเฟอไรท์ แคลมป์



วิธีการวัดสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้สายอากาศแบบลูป จะทำการวางแผ่นวงจรพิมพ์ไว้ที่ด้านล่างของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ โดยปรับความสูงของสายอากาศให้อยู่เหนือแผ่นวงจรพิมพ์เป็นระยะประมาณ 1 เซนติเมตร ทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาทั่วทั้งแผ่นวงจรพิมพ์ โดยสามารถกำหนดระยะห่างแต่ละจุดในการวัดได้จากโปรแกรมที่ควบคุมมอเตอร์ (ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระยะ 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร) ในระหว่างการวัด ค่าแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากสายอากาศแบบลูปจะถูกส่งไปที่เครื่องวิเคราะห์ความถี่ และจะถูกเก็บเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์อย่างอัตโนมัติ

### 2.2.3.1 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้

เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมแกน x และแกน y โดยสามารถปรับระยะห่างในการสแกนได้ดังรูป



รูปที่ 2.11 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้

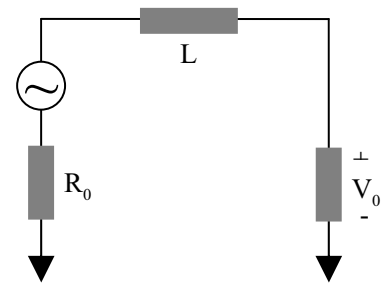
### 2.2.3.2 สายอากาศที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้

สายอากาศที่ใช้ทำด้วยสายเคเบิล (Cable) แบบ Semi-Rigid โดยมีช่องว่างระหว่างปลายทั้งสองเพื่อใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ [10],[11] ปลายข้างหนึ่งถูกต่อเข้ากับตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม ดังรูปที่ 2.12 แสดงรูปสายอากาศและวงจรเสมือน





(ก) สายอากาศ



(ข) วงจรเสมือน

รูปที่ 2.12 (ก) สายอากาศ

(ข) วงจรเสมือน

เมื่อ	$L$	คือ อินдукแตนซ์ของลูป
	$R_0$	คือ ตัวต้านทานที่ปลายมีค่า 50 ohm
	$R_m$	คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือวัด
	$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม
	$\phi$	คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก
	$V_s = j\omega\phi$	ของแหล่งจ่าย

ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\phi = \mu_0 HS \quad (2.3)$$

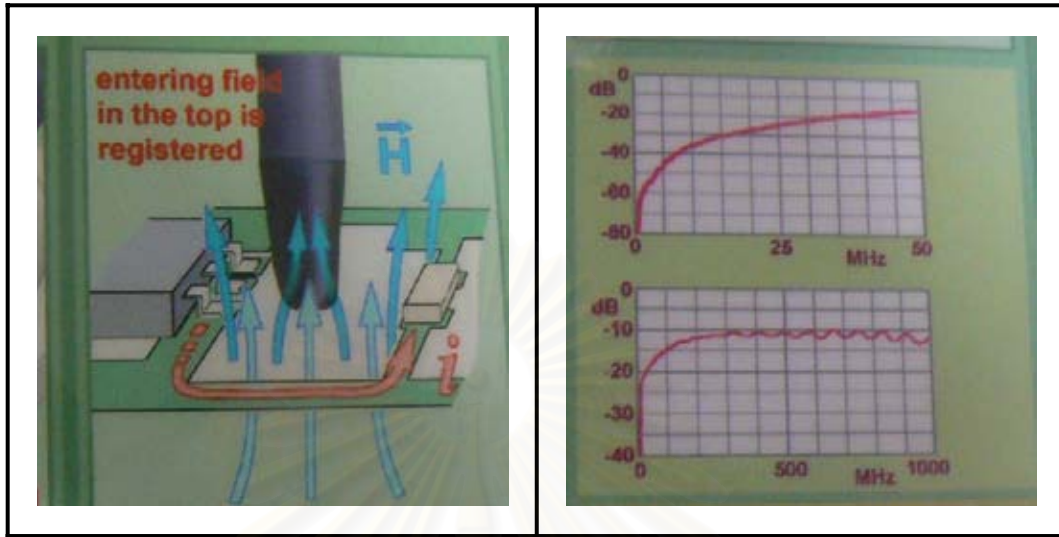
เมื่อ	$\mu_0$	คือ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability)
	$H$	คือ สนามแม่เหล็ก
	$S$	คือ พื้นที่ของสายอากาศ

ค่าองค์ประกอบสายอากาศ (Antenna Factor) คืออัตราส่วนของสนามแม่เหล็กต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_m$  [11]

$$\frac{H}{V} = \left| \frac{R_0 + R_m + j\omega L}{j\omega\mu_0 S R_m} \right| \quad (2.4)$$

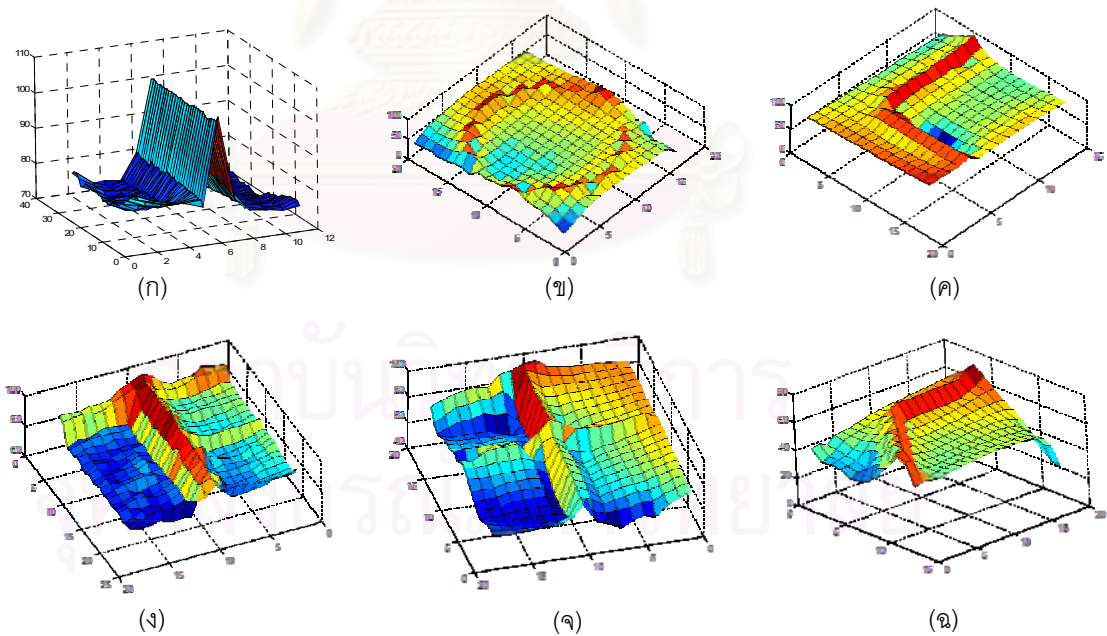
$$= \frac{\sqrt{(R_0 + R_m)^2 + (\omega L)^2}}{\omega\mu_0 S R_m} \quad (2.5)$$

$$\cong \frac{R_0 + R_m}{\omega\mu_0 SR_m} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.13 แสดงค่าองค์ประกอบสายอากาศ

แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของแผ่นวงจรมิมพ์ รูปตัว (ก), ตัว O (ข), ตัว L (ค), ตัว H (ง), ตัว X (จ) และเลข 7 (ฉ) ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผลการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้

#### 2.2.4 การวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล (Electric Far-Field Measurement)

วิธีการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ จะทำโดยนำแผ่นวงจรพิมพ์ไปวางไว้บนโต๊ะซึ่งเป็นฉนวนที่สามารถหมุนได้รอบ (360 องศา) อยู่สูงจากพื้นที่เป็นกราวนด์แพลน 80 เซนติเมตร ทำการทดสอบในห้องปิดกันกึ่งไร้คลื่นแม่เหล็กสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) โดยภาครับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย

1. สายอากาศ Bi-Log วัดในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz

ในระหว่างการวัดสายอากาศจะถูกปรับเปลี่ยนขั้ว (Polarization) ตามสนามไฟฟ้าในแนวนอน (Horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) เพื่อหาความแรงของสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากวงจรพิมพ์ที่มากที่สุดตามมาตรฐาน CISPR22 [12] โดยระยะห่างระหว่างแผ่นวงจรพิมพ์กับตัวสายอากาศมีค่า 3 เมตร เป็นไปตามมาตรฐานด้วย

2. ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) 25 dB
3. เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบพัลส์ (Pulse Generator)

ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบพัลส์เป็นสัญญาณขาเข้าให้กับแผ่นวงจรพิมพ์ โดยตั้งความถี่ของสัญญาณเป็น 30 MHz, เวลาขาขึ้น (Rise Time) และขาลง (Full Time) มีค่า 50 ns และดีวตีไซเคิล (Duty Cycle) 50% ซึ่งเหมือนกับการวัดสนามแม่เหล็กระยะไกล สายนำสัญญาณจากสายอากาศถูกต่อผ่านเฟอร์ไรต์ แคลมป์ ไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่และเครื่องวิเคราะห์ความถี่ ที่ถูกวางไว้นอกห้องปิดกันกึ่งไร้คลื่นแม่เหล็กสะท้อน แสดงดังรูป

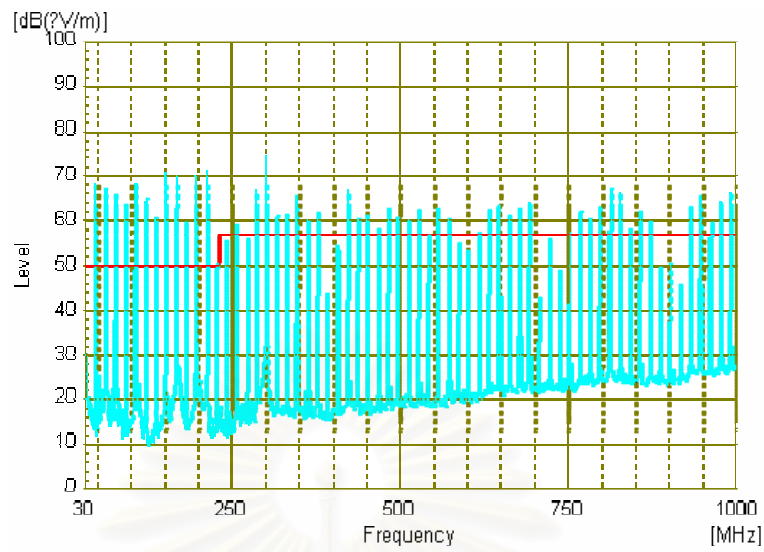


รูปที่ 2.15 แสดงการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล

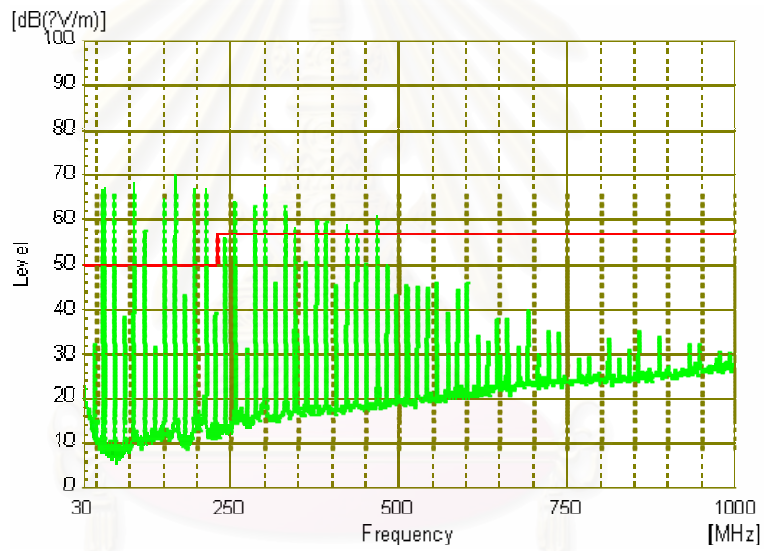
วิธีการวัดจะวัดในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ใช้ตัวตรวจจับแบบ Peak และ Quasi-Peak โดยค่าความสูญเสียในสายนำสัญญาณ (Cable Loss) และเกณฑ์ของสายอากาศ (Antenna Factor) จะถูกชดเชยในระบบการวัด คำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Measurement Uncertainty) ตามมาตรฐาน CISPR16-4 [11]

ในระหว่างการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ สายอากาศที่เป็นตัวรับสนามไฟฟ้าจะถูกเลื่อนขึ้นลงในช่วงความสูง 1 เมตร ถึง 4 เมตร และถูกกลับหัวไปมาในแนวนอนกับแนวตั้งสลับไปมา โดยแทนหมุนที่หมุนได้ 360 องศา ที่มีแผ่นวงจรพิมพ์วางอยู่ก็จะหมุนในทิศตามและทวนเข็มนาฬิกา เพื่อหาความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ ตามมาตรฐาน CISPR22 [12] สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมามากที่สุดจะถูกบันทึกค่าอัตโนมัติโดยการใช้ฟังก์ชัน Max - Hold สำหรับแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการตรวจจับแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแต่ละย่านความถี่ถูกกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน CISPR22 ด้วยเช่นกัน รูปที่ 2.16 แสดงผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์ รูปตัว (ก), ตัว (ข), ตัว (ค), ตัว (ง), ตัว (จ) และเลข 7 (ฉ) ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ

แนวตั้ง (Vertical)



แนวนอน (Horizontal)



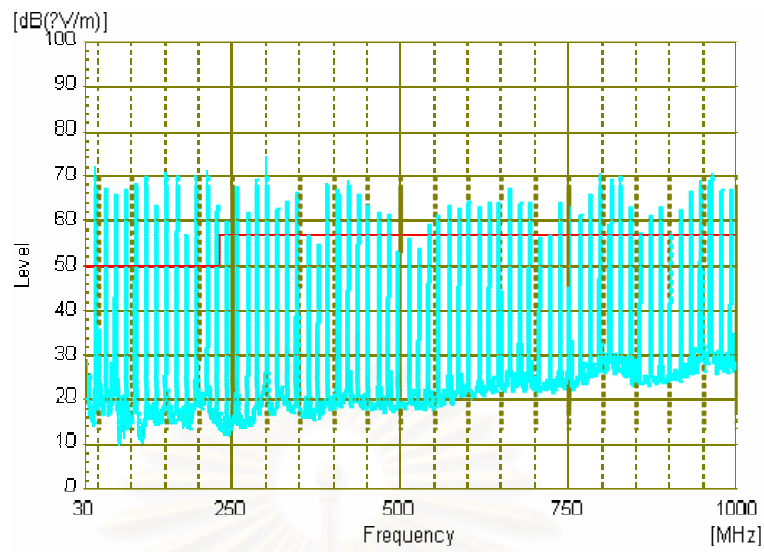
แผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว I



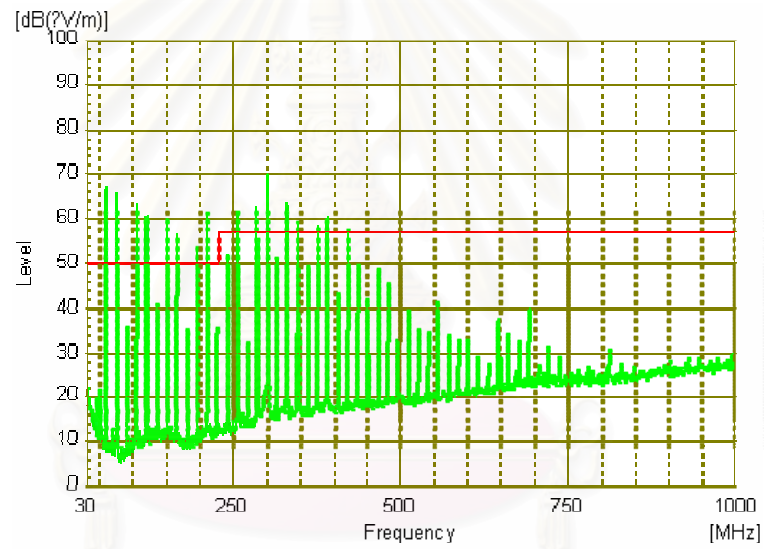
รูปที่ 2.16(ก) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว I ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ



แนวตั้ง (Vertical)



แนวนอน (Horizontal)

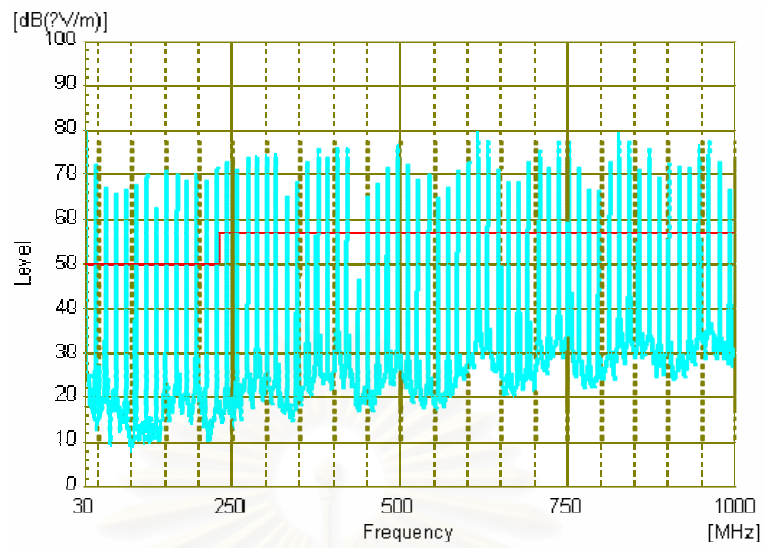


แผ่นวงจรมิมรูปตัว O

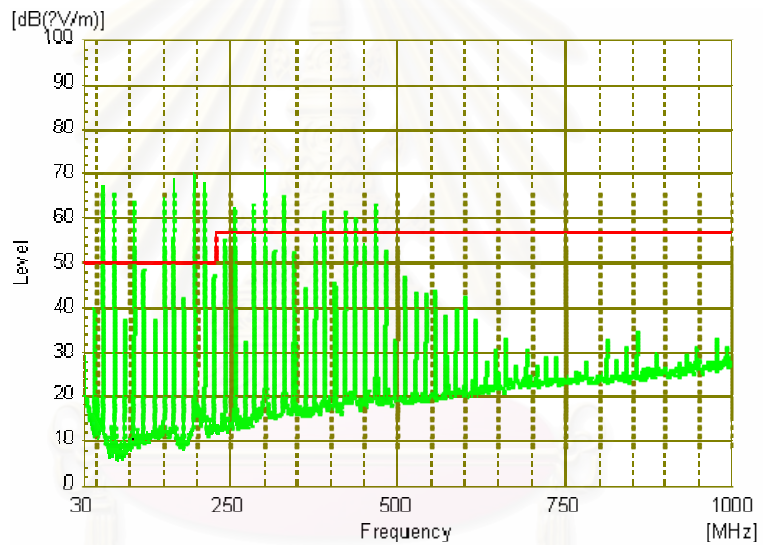


รูปที่ 2.16(ข) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรมิมรูปตัว O ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ

แนวตั้ง (Vertical)



แนวนอน (Horizontal)

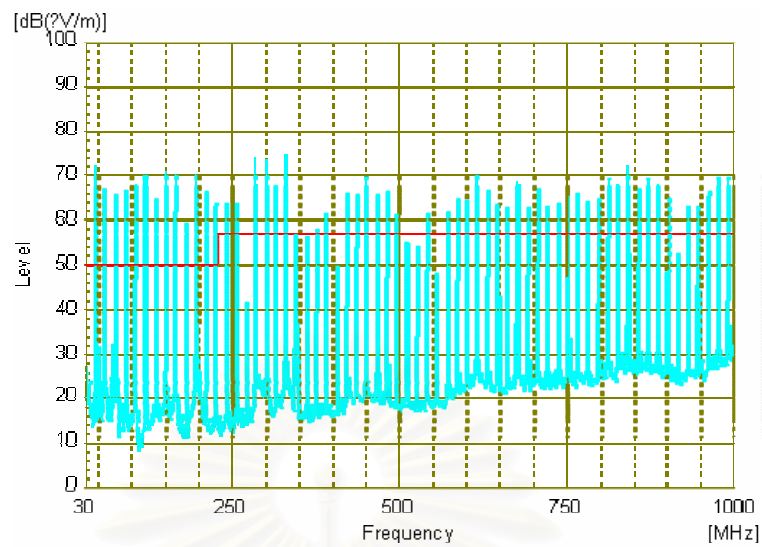


แผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว L

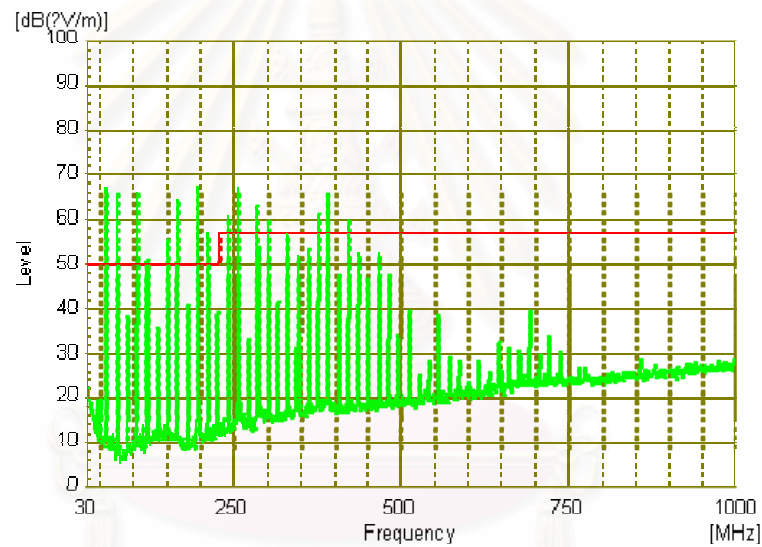


รูปที่ 2.16(ค) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว L ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ

แนวตั้ง (Vertical)



แนวนอน (Horizontal)

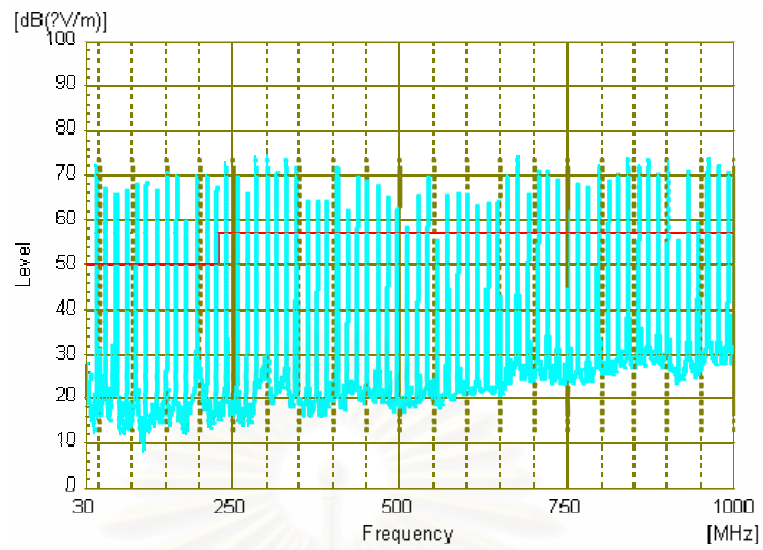


แผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว H

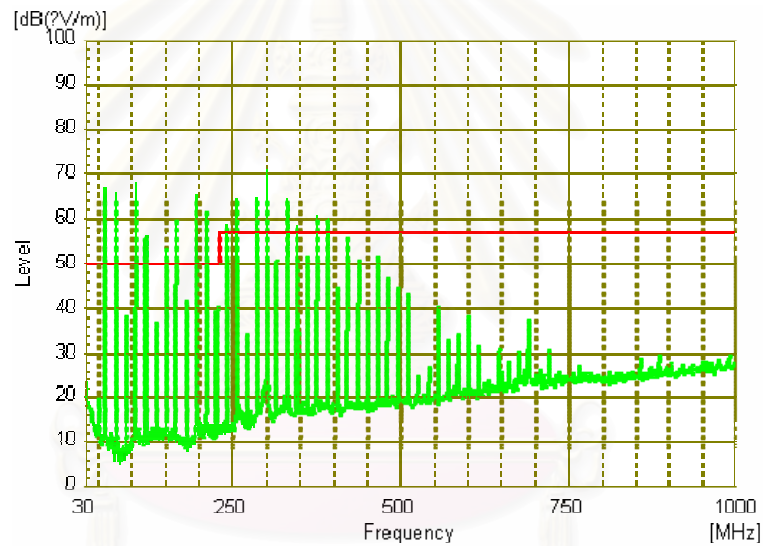


รูปที่ 2.16(ง) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว H ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ

แนวตั้ง (Vertical)



แนวนอน (Horizontal)

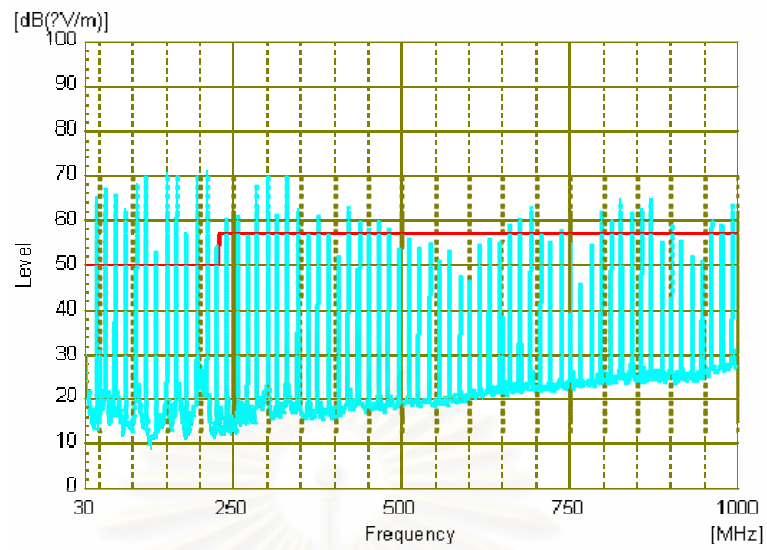


แผ่นวงจรมพิมพ์รูปตัว X

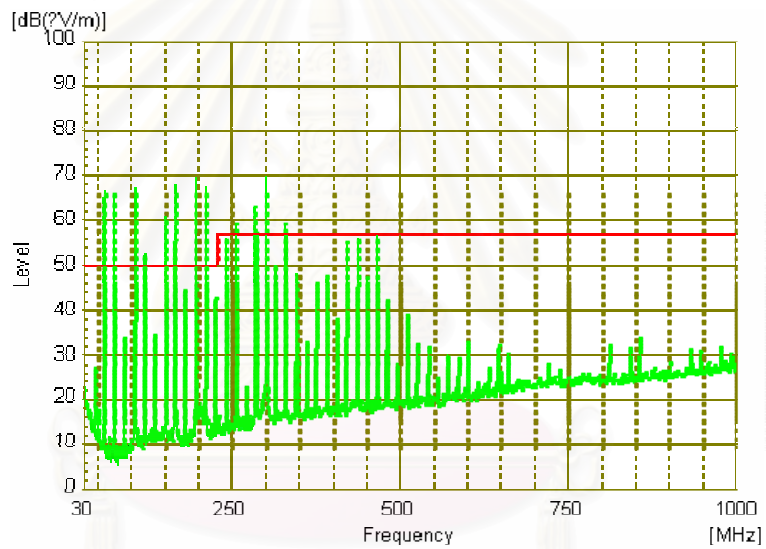


รูปที่ 2.16(จ) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรมพิมพ์รูปตัว X ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ

แนวตั้ง (Vertical)



แนวนอน (Horizontal)



แผ่นวงจรพิมพ์รูปเลข 7

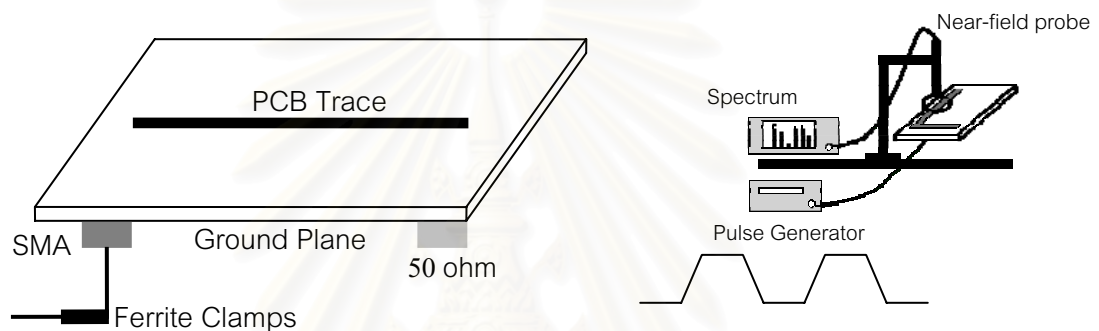


รูปที่ 2.16(จ) ผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปเลข 7 ของสายอากาศในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ



### 2.3 โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์

แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นแผ่นวงจรพิมพ์รูปร่างพื้นฐาน บนแผ่นวงจรพิมพ์ประกอบด้วยลายทองแดงที่มีรูปร่างและลักษณะการจัดวางที่แตกต่างกัน คือมีการเปลี่ยนแปลงความยาว, ความกว้าง, มุม, รัศมี, จำนวนเส้น และรูปร่างลักษณะเฉพาะของลายทองแดง โดยที่จุดปลายของลายทองแดงจะถูกต่อเข้ากับตัวต้านทาน 50 โอห์ม ขั้วอินพุตของแผ่นวงจรเป็นแบบ SMA ต่อเข้ากับสายนำสัญญาณแบบที่มีค่าความสูญเสียต่ำ โดยร้อยเข้ากับเฟอร์ไรท์ แคลมป์ [13] เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนให้มีค่าต่ำที่สุด และที่ด้านล่างของแผ่นเป็นกราวด์เพลนดังรูป



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของแผ่นวงจรพิมพ์ และวิธีการวัด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้แผ่นวงจรพิมพ์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยต่อแผ่นวงจรที่ขั้วต่อแบบ SMA เข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator) ซึ่งสร้างสัญญาณที่มีความถี่ (Frequency) 30 MHz, เวลาขาขึ้น (Rise Time) และขาลง (Full Time) มีค่า 50 ns และ 50% ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ป้อนให้กับแผ่นวงจร โดยวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer)



รูปที่ 2.18 รูปแบบแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้

## 2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ในการแก้ปัญหาใดๆ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations), เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เป็นวิธีที่ตอบสนองทำให้องค์ประกอบหลักทั้ง 3 นี้มีความสมบูรณ์ เริ่มจากการแทนลักษณะรูปร่างของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ขนาดเล็ก ทำให้การสร้างโดเมนของการคำนวณมีความเที่ยงตรง หลังจากการแบ่งโดเมนของการคำนวณออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งสมการเหล่านี้จะสร้างขึ้นมาจากการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ครอบคลุมปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น และเนื่องจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เป็นวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กจำนวนมาก โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์สูง เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องที่สุด โดยรวมแล้วก็เปรียบเสมือนการกับการนำเอาทุกเอลิเมนต์มาประกอบต่อกันขึ้นเป็นรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหานั้น ข้อได้เปรียบของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับวิธีธรรมดาทั่วไปมีดังนี้ [15]

1. สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน และต่างกันได้
2. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าจะเงื่อนไขขอบเขต หรือเงื่อนไขบังคับ จะอยู่ในลักษณะใดๆ
3. สามารถจำลองการกระทำของระบบในสภาพต่างๆ ที่กระจายกำลังอย่างไม่สม่ำเสมอ ได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
4. สามารถเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้มีใหญ่หรือเล็กได้ตามความต้องการ
5. สามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบได้สะดวก

โดยผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ จะมีความถูกต้องและแม่นยำเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

1. สามารถกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะจริงของสิ่งที่กำลังวิเคราะห์ได้มากน้อยเพียงใด
2. สามารถประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพจริงได้เพียงใด
3. ความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ ว่าสามารถคำนวณตัวเลขที่มีความละเอียดสูงๆ ได้เพียงใด

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การจำลองระบบจะใช้โปรแกรม MATLAB [16] ในการคำนวณสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาจะมาจากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ซึ่งใช้สมการดังนี้

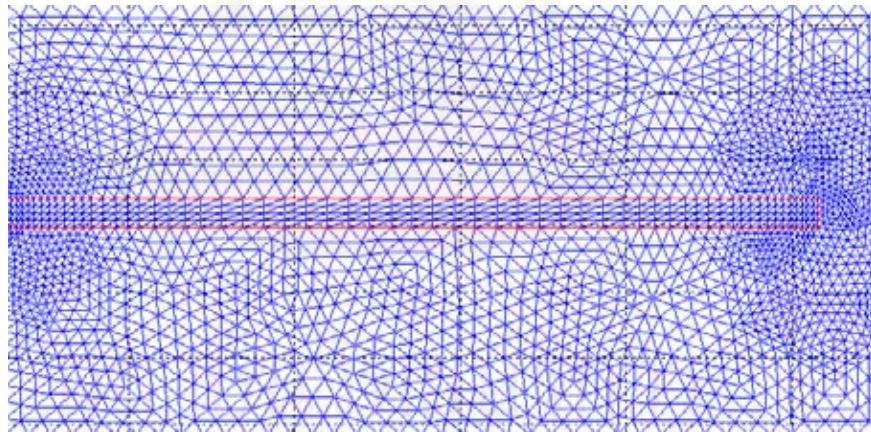
$$E = -\text{grad}(V) \quad (2.7)$$

$$J = \sigma E \quad (2.8)$$

$$\text{div}J = q \quad (2.9)$$

ดังนั้น 
$$-\text{div}(\sigma * \text{grad}(V)) = q \quad (2.10)$$

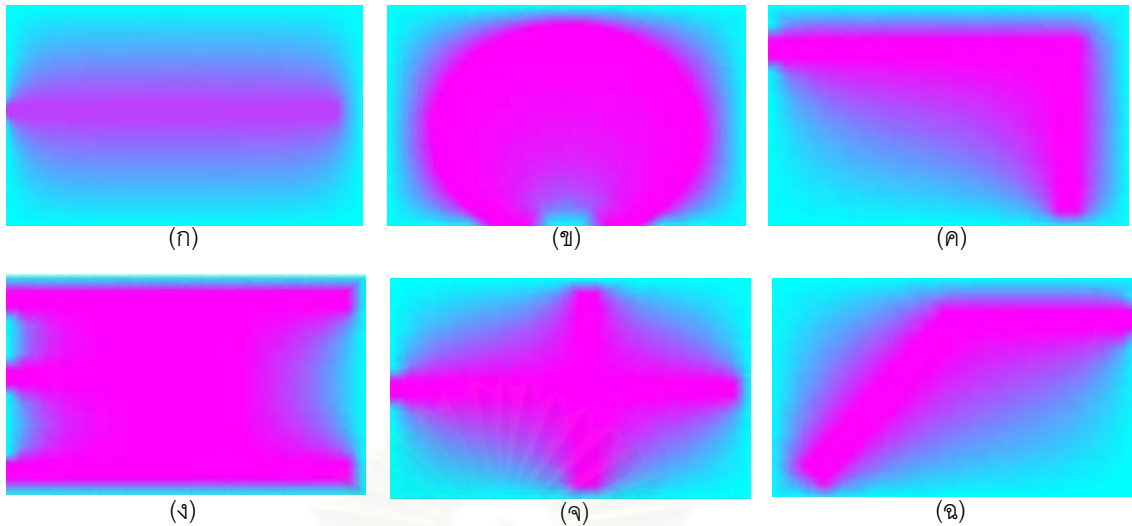
เมื่อ	$E$	คือ สนามไฟฟ้า
	$V$	คือ แรงดันไฟฟ้า
	$\sigma$	คือ ค่าคอนดักติวิตี (Conductivity)
	$q$	คือ กระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.19 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ของแผ่นวงจรมิพพ์รูปตัว I

จากรูปที่ 2.19 แสดงการแบ่งแผ่นวงจรมิพพ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ สังเกตที่จุดปลายของลายทองแดงจะเป็นบริเวณที่เอลิเมนต์มีขนาดเล็ก [15] เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์มีสูง

รูปที่ 2.20 แสดงผลการจำลองระบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นวงจรมิพพ์ รูปตัว I (ก), ตัว O (ข), ตัว L (ค), ตัว H (ง), ตัว X (จ) และเลข 7 (ฉ)



รูปที่ 2.20 ผลการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 2.5 การเตรียมข้อมูลภาพ (Pre-processing)

เป็นขั้นตอนการประมวลผลภาพก่อนที่นำไปเข้าสู่กระบวนการรู้จำที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยมีขั้นตอนตามวิธีการดังนี้

### 2.5.1 การแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (Thresholding)

เป็นการแยกวัตถุที่เราสนใจออกจากพื้นหลัง กระทำโดยการเปรียบเทียบภาพระหว่างจุดที่สนใจกับค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าค่าเทรชโฮล (Threshold Value) วิธีการนี้ใช้กันมากในกรณีที่ข้อมูลภาพมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างวัตถุ (Object) และพื้นหลัง (Background) มาก โดยค่าของจุดภาพใดๆ ที่มีค่าน้อยกว่าค่าเทรชโฮลจะถูกกำหนดให้เป็นจุดสีดำ และถ้าค่าของจุดภาพใดๆ มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับค่าเทรชโฮลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นจุดสีขาว ซึ่งการทำงานสามารถแสดงได้ดังสมการ โดยเราจะกำหนดค่าเทรชโฮล (Thr) ไว้ค่าหนึ่ง

$$\begin{aligned} b(x, y) &= 1 & ; & & g(x, y) < \text{Thr} \\ b(x, y) &= 0 & ; & & g(x, y) \geq \text{Thr} \end{aligned} \quad (2.11)$$

โดยที่

- $b(x, y)$  คือข้อมูลภาพผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการกำหนดค่าเทรชโฮล
- $g(x, y)$  คือข้อมูลภาพอินพุตที่มีระดับความเข้ม 0 ถึง ระดับ L
- Thr คือค่าเทรชโฮลเป็นค่าคงที่ ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง ระดับ L
- 1 คือจุดดำ และ 0 คือจุดขาว
- L คือระดับความเข้มสูงสุดของภาพ



ในการแยกวัตถุออกจากพื้นหลังโดยใช้ค่าเทรชโฮลนี้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดี สิ่งสำคัญที่สุดคือ การเลือกค่าเทรชโฮล เนื่องจากถ้าเราเลือกค่าเทรชโฮลที่ไม่เหมาะสม คือมากหรือน้อยเกินไป ภาพที่ได้อาจจะออกมาไม่ดี ขาดความคมชัดและรายละเอียดบางส่วน กล่าวคือภาพที่ได้อาจจะมึนจืดมาก หรือน้อยเกินไป ดังนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดคือเราต้องเลือกค่าเทรชโฮลให้เหมาะสม โดยแต่ละภาพก็จะมีค่าที่เหมาะสมแตกต่างกันไป

### 2.5.2 การหาขอบภาพ (Edge Detection)

การหาขอบภาพจะสามารถบอกถึงตำแหน่ง ขนาด จนถึงรูปร่างของวัตถุต่างๆ ได้ ในการหาขอบของภาพจะใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองในการตรวจจับ โดยที่อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First Order Derivative) ได้แก่ ตัวดำเนินการ Sobel, Prewitt ส่วนอนุพันธ์อันดับสอง (Second Order Derivative) ได้แก่ ตัวดำเนินการ Laplacian

สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง Gradient และสมการอนุพันธ์อันดับสอง Laplacian แสดงได้ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ [17]

$$\begin{aligned}\nabla f &= \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \\ &= f(x+1) - f(x) + f(y+1) - f(y)\end{aligned}\quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}\nabla^2 f &= \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \\ &= [f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y)] \\ &\quad + [f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y)] \\ &= f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)\end{aligned}\quad (2.13)$$

$$\text{Gradient Magnitude} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}\quad (2.14)$$

นอกจาก Prewitt และ Sobel แล้วยังมี แมสค์ (mask) แบบอื่นๆ อีกเช่น Kirsch, Quick Mask และ Mexican Hat โดยจะมีรูปแบบของแมสค์ที่ต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจจับขอบได้ในทิศทางที่ต่างกันอีกด้วย โดยอาศัยการคอนโวลูชันรูปภาพกับแมสค์ทิศต่างๆ แล้วนำมารวมกันแบบ Gradient Magnitude ตามสมการที่ 2.14



ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้ควิกแมสค์ (Quick Mask) เป็นตัวตรวจจับ ซึ่งแมสค์ชนิดนี้ สามารถตรวจจับขอบได้ทั้งแปดทิศทางได้ในการทำคอนโวลูชันเพียงครั้งเดียว ซึ่งถ้าต้องการ ความเร็วและขอบทุกทิศทางควรเลือกใช้แมสค์ชนิดนี้ แต่ถ้าต้องการขอบของภาพในบางทิศทางก็ สามารถเลือกใช้แมสค์แบบอื่นๆ ได้

Kirsch	Prewitt	Sobel	Quick Mask																																				
<table border="1"><tr><td>5</td><td>5</td><td>5</td></tr><tr><td>-3</td><td>0</td><td>-3</td></tr><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>-3</td></tr></table>	5	5	5	-3	0	-3	-3	-3	-3	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>	1	1	1	1	-2	1	-1	-1	-1	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table>	1	2	1	0	0	0	-1	-2	-1	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>4</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table>	-1	0	-1	0	4	0	-1	0	-1
5	5	5																																					
-3	0	-3																																					
-3	-3	-3																																					
1	1	1																																					
1	-2	1																																					
-1	-1	-1																																					
1	2	1																																					
0	0	0																																					
-1	-2	-1																																					
-1	0	-1																																					
0	4	0																																					
-1	0	-1																																					
<table border="1"><tr><td>-3</td><td>5</td><td>5</td></tr><tr><td>-3</td><td>0</td><td>5</td></tr><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>-3</td></tr></table>	-3	5	5	-3	0	5	-3	-3	-3	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>	1	1	1	1	-2	-1	1	-1	-1	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>-2</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	0	1	0	-1	0	-2	-2										
-3	5	5																																					
-3	0	5																																					
-3	-3	-3																																					
1	1	1																																					
1	-2	-1																																					
1	-1	-1																																					
2	1	0																																					
1	0	-1																																					
0	-2	-2																																					
<table border="1"><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>5</td></tr><tr><td>-3</td><td>0</td><td>5</td></tr><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>5</td></tr></table>	-3	-3	5	-3	0	5	-3	-3	5	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>-1</td></tr></table>	1	1	-1	1	-2	-1	1	1	-1	<table border="1"><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table>	1	0	-1	2	0	-2	1	0	-1										
-3	-3	5																																					
-3	0	5																																					
-3	-3	5																																					
1	1	-1																																					
1	-2	-1																																					
1	1	-1																																					
1	0	-1																																					
2	0	-2																																					
1	0	-1																																					
<table border="1"><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>-3</td></tr><tr><td>-3</td><td>0</td><td>5</td></tr><tr><td>-3</td><td>5</td><td>5</td></tr></table>	-3	-3	-3	-3	0	5	-3	5	5	<table border="1"><tr><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	1	-1	-1	1	-2	-1	1	1	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>-1</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	-1	-2	1	0	-1	2	1	0										
-3	-3	-3																																					
-3	0	5																																					
-3	5	5																																					
1	-1	-1																																					
1	-2	-1																																					
1	1	1																																					
0	-1	-2																																					
1	0	-1																																					
2	1	0																																					
<table border="1"><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>-3</td></tr><tr><td>-3</td><td>0</td><td>-3</td></tr><tr><td>5</td><td>5</td><td>5</td></tr></table>	-3	-3	-3	-3	0	-3	5	5	5	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>-2</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	-1	-1	-1	1	-2	1	1	1	1	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1										
-3	-3	-3																																					
-3	0	-3																																					
5	5	5																																					
-1	-1	-1																																					
1	-2	1																																					
1	1	1																																					
-1	-2	-1																																					
0	0	0																																					
1	2	1																																					
<table border="1"><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>-3</td></tr><tr><td>5</td><td>0</td><td>-3</td></tr><tr><td>5</td><td>5</td><td>-3</td></tr></table>	-3	-3	-3	5	0	-3	5	5	-3	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	-1	-1	1	-1	-2	1	1	1	1	<table border="1"><tr><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr></table>	-2	-1	0	-1	0	1	0	1	2										
-3	-3	-3																																					
5	0	-3																																					
5	5	-3																																					
-1	-1	1																																					
-1	-2	1																																					
1	1	1																																					
-2	-1	0																																					
-1	0	1																																					
0	1	2																																					
<table border="1"><tr><td>5</td><td>-3</td><td>-3</td></tr><tr><td>5</td><td>0</td><td>-3</td></tr><tr><td>5</td><td>-3</td><td>-3</td></tr></table>	5	-3	-3	5	0	-3	5	-3	-3	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	-1	1	1	-1	-2	1	-1	1	1	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1										
5	-3	-3																																					
5	0	-3																																					
5	-3	-3																																					
-1	1	1																																					
-1	-2	1																																					
-1	1	1																																					
-1	0	1																																					
-2	0	2																																					
-1	0	1																																					
<table border="1"><tr><td>5</td><td>5</td><td>-3</td></tr><tr><td>5</td><td>0</td><td>-3</td></tr><tr><td>-3</td><td>-3</td><td>-3</td></tr></table>	5	5	-3	5	0	-3	-3	-3	-3	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>1</td></tr></table>	1	1	1	-1	-2	1	-1	-1	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>-1</td><td>0</td></tr></table>	0	1	2	-1	0	1	-2	-1	0										
5	5	-3																																					
5	0	-3																																					
-3	-3	-3																																					
1	1	1																																					
-1	-2	1																																					
-1	-1	1																																					
0	1	2																																					
-1	0	1																																					
-2	-1	0																																					

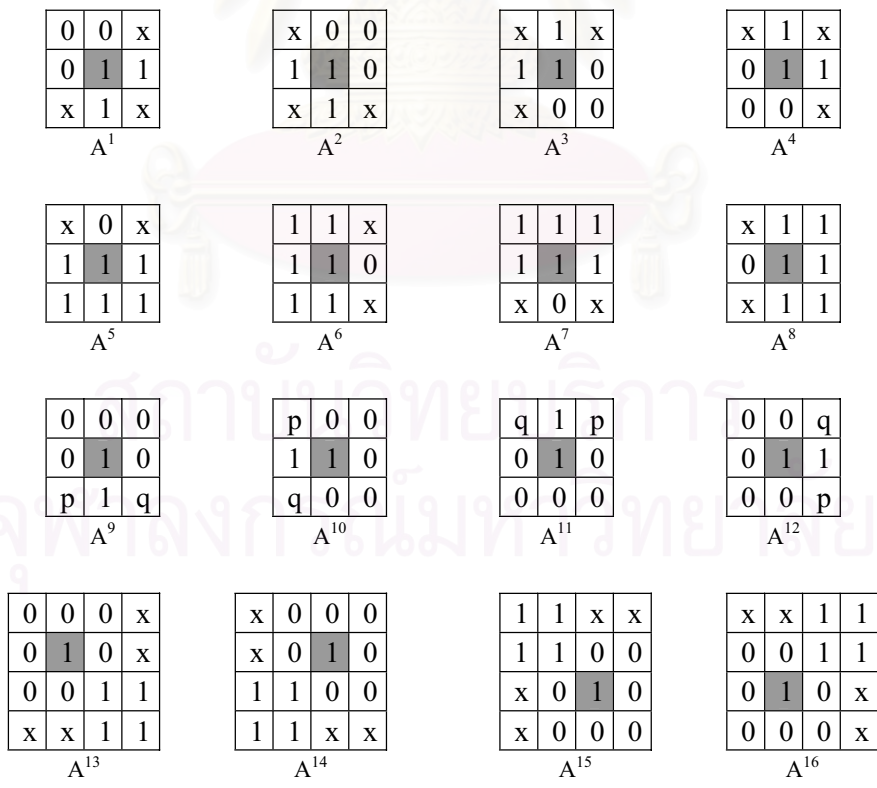
รูปที่ 2.21 รูปแบบแมสค์ที่ใช้ในการหาขอบของภาพ

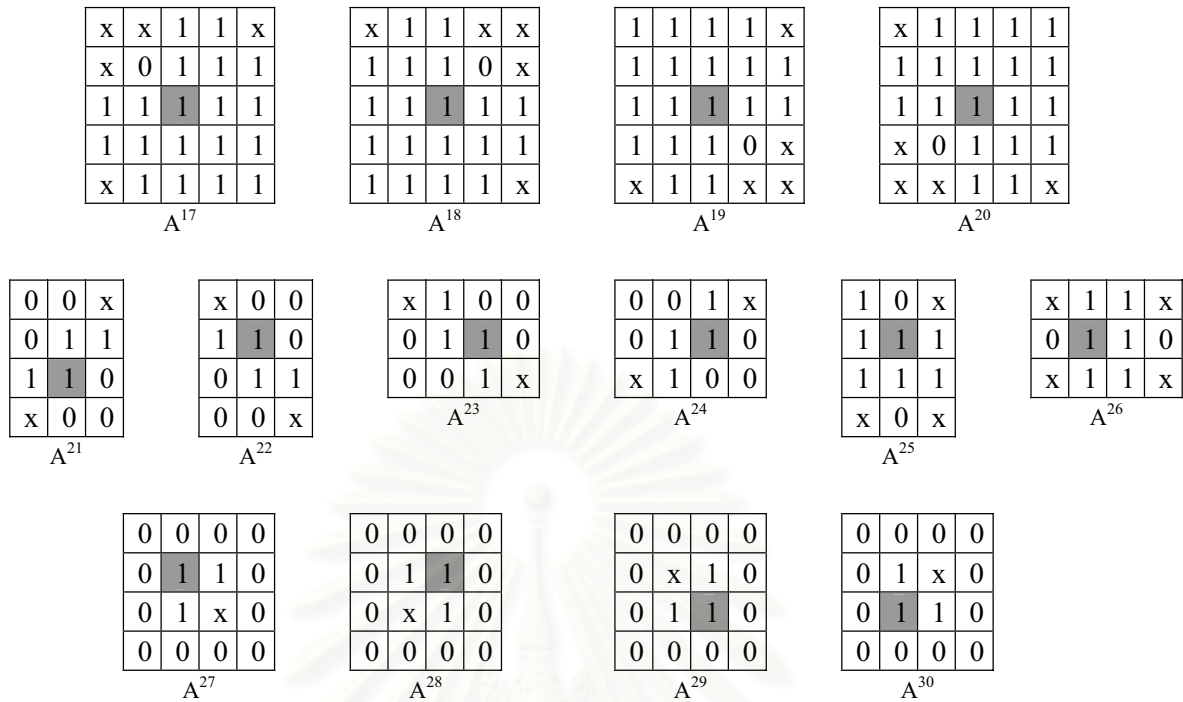
โดยหลังจากการทำคอนโวลูชันแล้วค่าของแต่ละพิกเซลจะเปลี่ยนไป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ได้มีเพียงแค่ 0 และ 1 เท่านั้น แต่จะพบว่ามามีค่า -2, -1, 0, 1, 2 และ 3 รวมกันอยู่ด้วย ซึ่งค่าที่จะเลือกนำมาใช้เพื่อเป็นขอบของภาพ ถูกเลือกจากพิกเซลที่มีค่าน้อยกว่า 0 (ในที่นี้คือ -2 และ -1 นั้นเอง)

2.5.3 การประมวลผลทำให้เส้นบาง (Thinning)

เป็นการทำให้เส้นที่มีความหนบางลงให้เหลือเพียงจุดภาพเดียว แต่ยังคงความต่อเนื่องของเส้นเอาไว้ การทำให้เส้นบางในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอาศัยชุดรูปแบบ (Template) ที่มีทั้งหมด 30 แบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดด้วยกัน คือชุดที่กำจัดพิกเซลออก (Remove Boundary Pixel Templates) และชุดที่คืนค่าพิกเซล (Restoring Templates) โดยชุดแรกจะใช้ชุดรูปแบบตั้งแต่  $A^1$  ถึง  $A^{20}$  ส่วนที่เหลือจะเป็นชุดคืนค่า ( $A^{21}$  ถึง  $A^{30}$ )

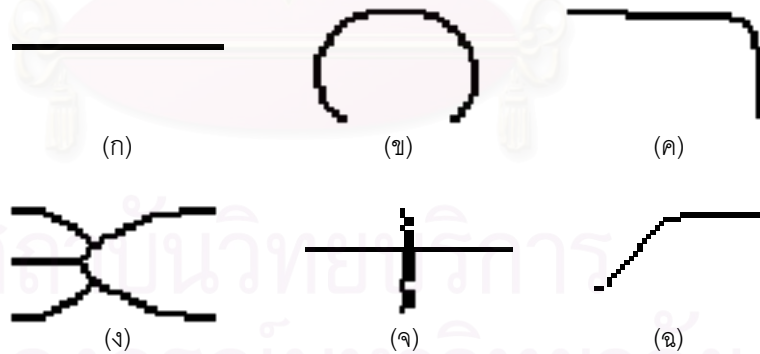
ขั้นตอนของอัลกอริทึมนี้จะเริ่มโดยการนำชุดรูปแบบไปเปรียบเทียบกับภาพที่จะทำการประมวลผลเส้นบาง โดยจุดที่แรกก็คือจุดที่กำลังพิจารณา ถ้าเหมือนกันก็จะทำการเปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ในกรณีที่ใช้ชุดรูปแบบแรก ( $A^1$  ถึง  $A^{20}$ ) แต่ถ้าเข้ากรณีของชุดที่สองก็จะคืนค่าให้เหมือนเดิมทำเช่นนั้นวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้ภาพที่ต้องการ





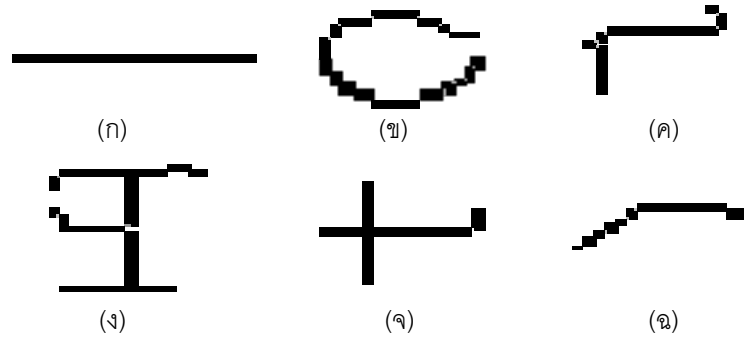
รูปที่ 2.22 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการทำการประมวลผลเส้นบาง โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ  $A^1-A^{20}$  และ  $A^{21}-A^{30}$

โดยที่ p กับ q เป็นตัวแปรที่ต้องมีค่า p หรือ (or) q เป็น 1 ส่วนจุด X จะไม่นำมาพิจารณา (Don't Care) คือ จะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 ก็ได้



รูปที่ 2.23 แสดงผลการประมวลผลเส้นบางจากการจำลองระบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

จากรูปที่ 2.23 แสดงผลการประมวลผลเส้นบาง รูปจากการผลจำลองระบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ของแผ่นวงจรมิมพ์ รูปตัว (ก), ตัว O (ข), ตัว L (ค), ตัว H (ง), ตัว X (จ) และเลข 7 (ฉ)



รูปที่ 2.24 แสดงผลการประมวลผลเส้นบางการวัดจริง

จากรูปที่ 2.24 แสดงผลการประมวลผลเส้นบาง จากผลการวัดจริงด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ของแผ่นวงจรพิมพ์ รูปตัว (ก), ตัว O (ข), ตัว L (ค), ตัว H (ง), ตัว X (จ) และเลข 7 (ฉ)

2.5.4 การหาจุดตัด, จุดแยก และจุดปลาย

ใช้แมสค์ในการหาดังนี้

จุดแยก

X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5

X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5

X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5

X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5

รูปที่ 2.25 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการหาจุดแยก

## จุดปลาย

X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5

X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5	X7	X6	X5

รูปที่ 2.26 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการหาจุดปลาย

## จุดตัด

X1	X2	X3	X1	X2	X3
X8	X0	X4	X8	X0	X4
X7	X6	X5	X7	X6	X5

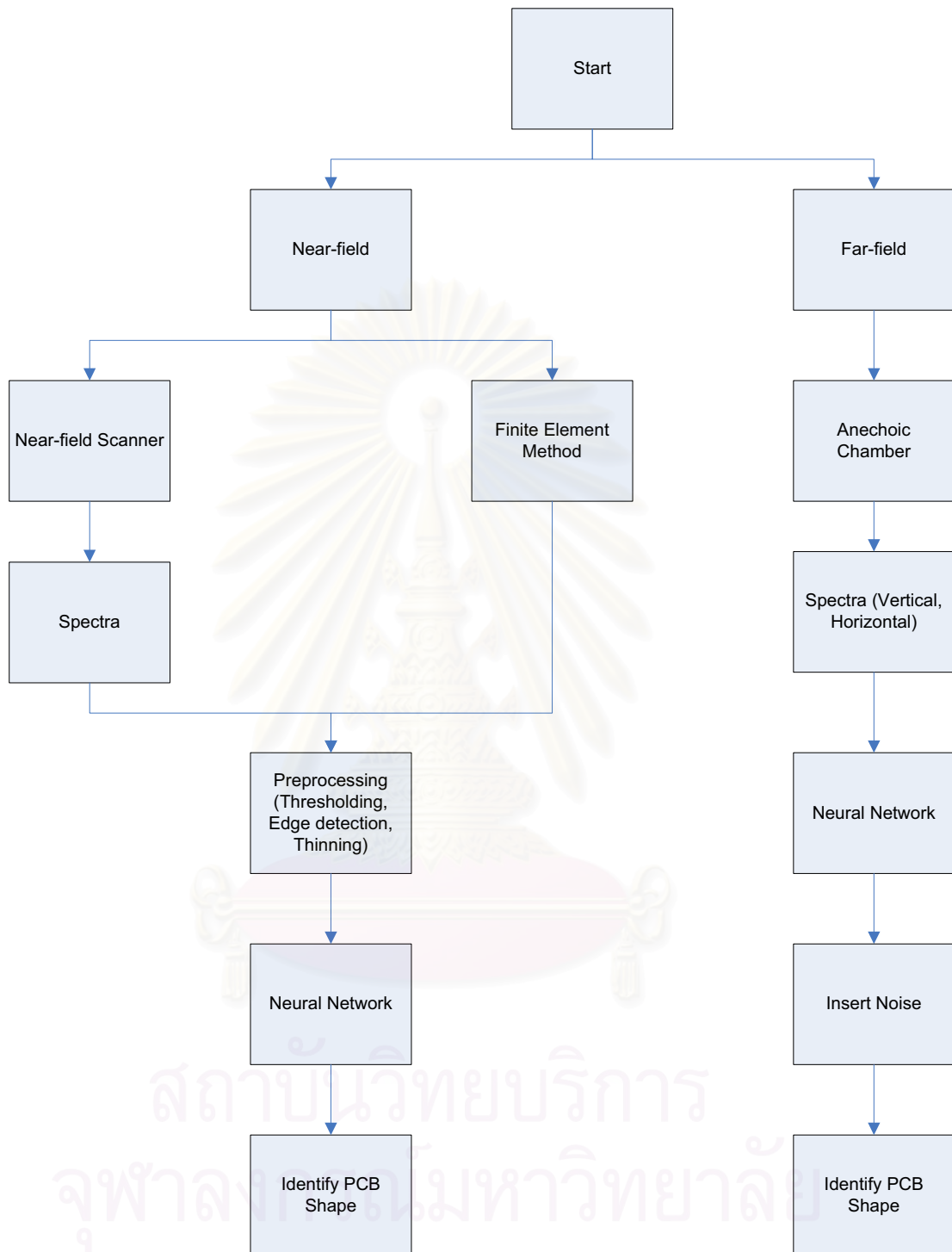
รูปที่ 2.27 ชุดรูปแบบที่ใช้ในการหาจุดตัด

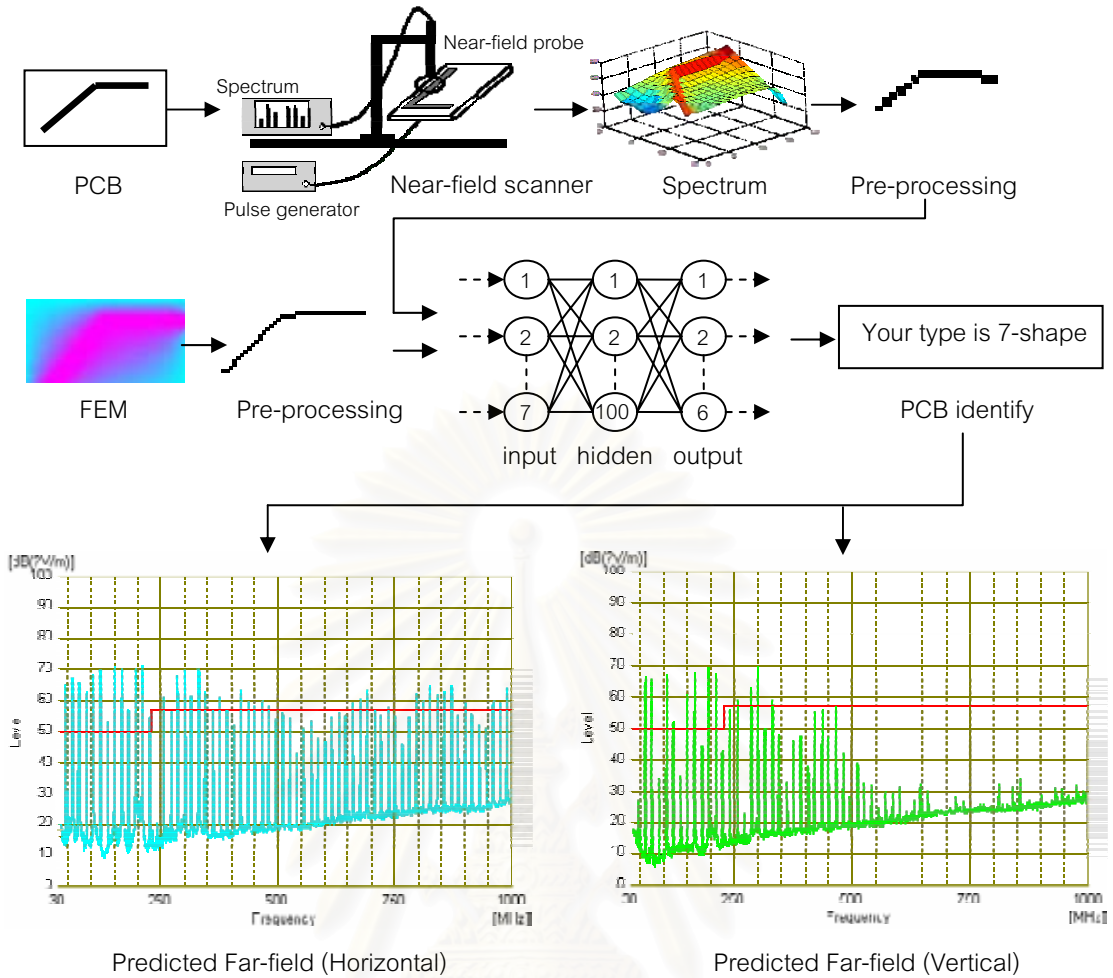
ตารางที่ 2.4 แสดงผลการหาจุดแยก, จุดปลาย และจุดตัด

รูปแบบ	วิธีการ	จำนวนจุดแยก	จำนวนจุดปลาย	จำนวนจุดตัด
7	แบบจำลอง	0	2	0
	วัดจริง	0	2	0
H	แบบจำลอง	3	5	0
	วัดจริง	3	5	0
I	แบบจำลอง	0	2	0
	วัดจริง	0	2	0
L	แบบจำลอง	0	2	0
	วัดจริง	0	2	0
O	แบบจำลอง	0	2	0
	วัดจริง	0	2	0
X	แบบจำลอง	0	4	1
	วัดจริง	0	4	1



## สรุปขั้นตอนการทำงาน





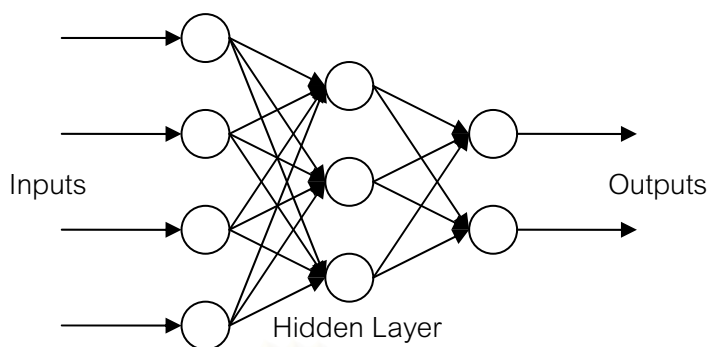
1. วัดสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ และนำไปพล็อตกราฟ
2. จำลองการแพร่สนามแม่เหล็กระยะใกล้ของแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. นำผลที่ได้จากข้อ 1 และ ข้อ 2 เข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพ ซึ่งเป็นการเตรียมข้อมูลเพื่อเข้าสู่กระบวนการรู้จำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
4. ทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลที่ได้จากข้อ 3 โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการสอนแล้วจะสามารถจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์ได้
5. ทำนายผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยแบ่งเป็นการวัดจากสายอากาศในแนวนอนและแนวตั้ง
6. ในขั้นตอนการทำนายโครงข่ายประสาทเทียม จะทำการใส่สัญญาณรบกวนแบบ White Gaussian Noise ซึ่งผลการทดลองจะกล่าวในส่วนถัดไป

### บทที่ 3

## โครงข่ายประสาทเทียม

ในปัจจุบัน คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการประมวลผลข้อมูลและสารสนเทศ เพราะคอมพิวเตอร์สามารถทำงานตามขั้นตอนของคำสั่งได้อย่างรวดเร็วและเที่ยงตรง อย่างไรก็ตาม มนุษย์ก็ยังไม่สามารถทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานบางอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่าสมองของสิ่งมีชีวิต เช่น การเข้าใจคำพูด การรู้จำใบหน้าของมนุษย์ การจดจำรูปแบบต่างๆ เป็นต้น สิ่งที่น่าสนใจคือ แต่ละเซลล์ประสาทของสมองของสิ่งมีชีวิตนั้นทำงานช้ากว่าหน่วยเชิงตรรก (logic unit) ของดิจิทัลคอมพิวเตอร์เป็นล้านๆ เท่า แต่สิ่งมีชีวิตก็มีความสามารถในการทำงานหลายอย่าง ซึ่งถือว่าซับซ้อนมากกว่าคอมพิวเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าคอมพิวเตอร์ที่เร็วที่สุดในโลก ความสามารถที่แตกต่างกันนี้มีรากฐานมาจากความจริงที่ว่าลักษณะของการประมวลผลในระบบประสาทรูปแบบนั้นเป็นคอนกรีตแบบกับวิธีการที่ใช้ในระบบดิจิทัลคอมพิวเตอร์ทั่วไปในปัจจุบัน การพัฒนาคอมพิวเตอร์ไปสู่ระบบประมวลผลชนิดใหม่ ซึ่งสามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนมหาศาลได้ในฉับพลัน ตลอดจนมีความสามารถในการเรียนรู้และคิดได้ ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น "สมองกล" อย่างแท้จริง จึงเป็นเป้าหมายสำคัญเป้าหมายหนึ่งของวงการวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน แนวทางหนึ่งซึ่งนักวิทยาศาสตร์กำลังให้ความสนใจอยู่เป็นอย่างมาก คือ การพยายามศึกษาและเลียนแบบการประมวลผลของสมองสิ่งมีชีวิต โดยมุ่งเน้นว่าระบบประมวลผลที่ได้จะมี "ปัญญา" ในลักษณะเดียวกับสิ่งมีชีวิต ซึ่งระบบประมวลผลดังกล่าวเรียกว่าโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม คือโมเดลทางคณิตศาสตร์ ที่สร้างขึ้นมาเพื่อเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ มีจุดประสงค์เพื่อให้มีความสามารถในการแยกแยะ หรือจดจำรูปแบบต่างๆ ได้ โดยจะประกอบด้วย อินพุตโหนด (input node), เอาท์พุตโหนด (output node) และฮิดเดนโหนด (hidden node) ซึ่งฮิดเดนโหนดนี้อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ ถ้ามีโครงข่ายนั้นก็จะกลายเป็นแบบหลายชั้น (multi-layers) แต่ถ้าไม่มีก็จะเป็นโครงข่ายแบบชั้นเดียว (single layer) โดยจะมีการกำหนดน้ำหนัก (weight) ของอินพุตแต่ละโหนด และจะมีค่าเทรชโฮลด์ (threshold) เป็นตัวกำหนดว่าค่าน้ำหนักรวมของอินพุตต้องมีค่ามากเท่าใดจึงสามารถส่งเอาท์พุตไปยังโหนดอื่นได้ เมื่อนำแต่ละโหนดมาต่อและให้ทำงานร่วมกันแล้ว ก็จะเหมือนกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสมองของมนุษย์ เพียงแต่ในคอมพิวเตอร์ทุกๆ อย่างที่เกิดขึ้นเป็นเฉพาะตัวเลขเท่านั้น

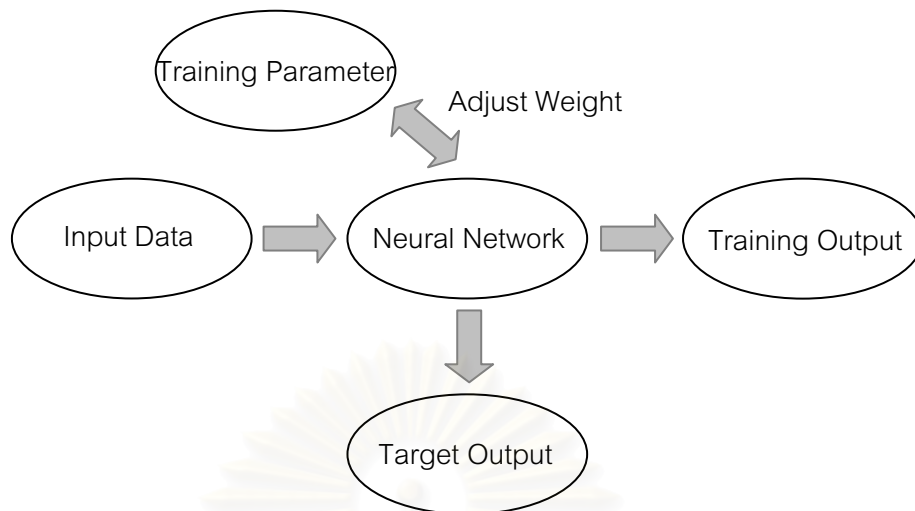


รูปที่ 3.1 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม

การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเกิดขึ้นเมื่อมีอินพุตเข้ามาในชั้นของอินพุต (input layer) โครงข่ายก็จะนำอินพุตนั้นมาคูณกับค่าน้ำหนักของแต่ละโหนดของชั้นถัดไป นำเอาผลลัพธ์ที่ได้มารวมกันแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทรชโฮลด์ ถ้าผลรวมของผลลัพธ์มีค่ามากกว่าค่าเทรชโฮลด์ก็จะส่งเอาท์พุตออกไปยังโหนดถัดไปอีก ซึ่งเอาท์พุตที่ถูกส่งออกมานี้ก็จะถูกส่งไปเป็นอินพุตของชั้นถัดไปที่เชื่อมต่อกันอยู่ในโครงข่าย แต่ถ้าผลรวมของผลลัพธ์มีค่าน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ ก็จะไม่เกิดเอาท์พุตส่งออกไป ดังนั้นสิ่งสำคัญที่สุดที่เราต้องรู้เพื่อให้โครงข่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือค่าน้ำหนัก และค่าเทรชโฮลด์ สามารถแบ่งประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมได้เป็น 2 แบบ [18] คือ แบบ Supervised Learning เป็นการเรียนรู้แบบมีการสอน โดยเปรียบเทียบกับคน จะเหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอยแนะนำ และแบบ Unsupervised Learning เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีการสอน เปรียบเทียบกับคน เช่น การที่เราสามารถแยกแยะพันธู์พืช พันธุ์สัตว์ตามลักษณะรูปร่างของมันได้เองโดยไม่มีใครสอน

### 3.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบมีผู้สอน (Supervised Learning)

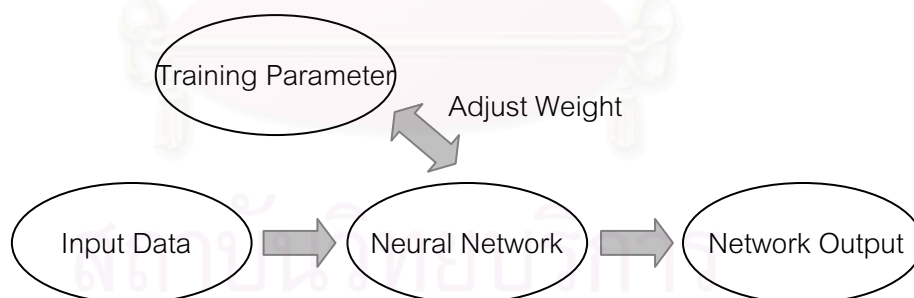
เป็นการสอนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้โครงข่ายมีการปรับตัว โดยชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายจะมีคำตอบไว้อยู่แล้ว และจะคอยตรวจสอบดูว่าค่าน้ำหนักที่ใช้ในแต่ละโหนดนั้นให้คำตอบที่ถูกหรือไม่ ถ้าไม่ โครงข่ายก็จะทำการปรับค่าน้ำหนักไปเรื่อยๆ เพื่อให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงขึ้น



รูปที่3.2 แสดงการเรียนรู้แบบมีผู้สอน

### 3.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

เป็นการสอนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด โดยโครงข่ายจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ โครงข่ายจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้



รูปที่3.3 แสดงการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน

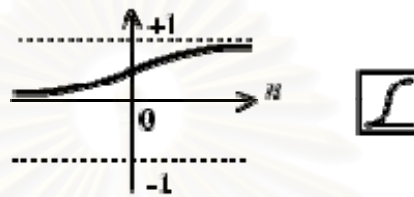
โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นโครงข่ายหลายชั้นประกอบด้วย ชั้นอินพุต, ชั้นฮิดเดน และชั้นเอาต์พุต ใช้อัลกอริทึมการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Feed-forward Backpropagation) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบต้องมีผู้สอน (Supervised Learning) โดยจะทำการปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาศัยค่าความผิดพลาดของโครงข่ายที่กำหนดไว้ กระบวนการเรียนรู้เกิดขึ้นเมื่อมีอินพุตเข้า



มาในโครงข่ายซึ่งจะเริ่มในส่วนของชั้นอินพุต ค่าน้ำหนักที่ติดเดโนโหนด และเอาต์พุตโหนดจะถูกปรับไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความผิดพลาดที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุด (maximum error) ที่กำหนดไว้ กระบวนการเรียนรู้จึงจบลง โดยฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอาต์พุตของแต่ละโหนดแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- Log sigmoid transfer function

จะให้ค่าเอาต์พุตอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงได้ดังรูป



รูปที่3.4 แสดงกราฟและสัญลักษณ์ของฟังก์ชัน Log sigmoid

- Tangent sigmoid transfer function

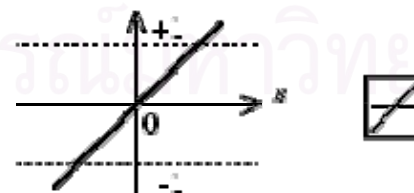
จะให้ค่าเอาต์พุตอยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 แสดงได้ดังรูป



รูปที่3.5 แสดงกราฟและสัญลักษณ์ของฟังก์ชัน Tangent sigmoid

- Purelin transfer function

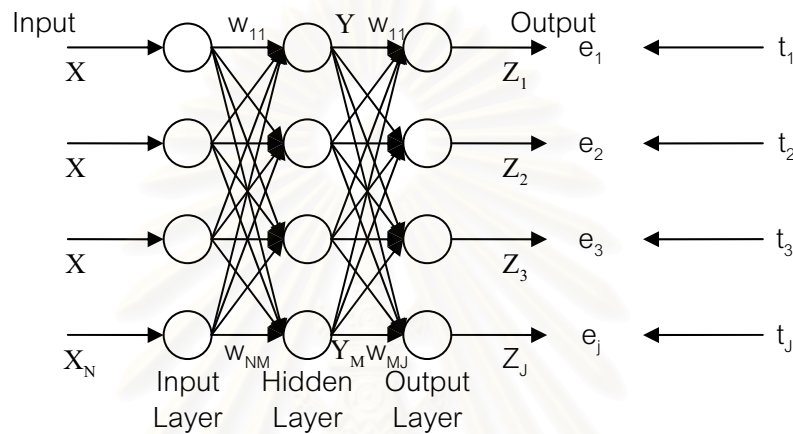
จะให้ค่าเอาต์พุตเป็นจำนวนจริง แสดงได้ดังรูป



รูปที่3.6 แสดงกราฟและสัญลักษณ์ของฟังก์ชัน Purelin

### 3.3 การแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Backpropagation)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ [19] เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในโครงข่ายหลายชั้น เพื่อปรับค่าน้ำหนักระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาศัยอยู่กับค่าความผิดพลาดที่ได้ แสดงสถาปัตยกรรมและขั้นตอนการเรียนรู้ของอัลกอริทึมการแพร่กระจายแบบย้อนกลับได้ดังนี้



รูปที่3.7 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ

โดยที่	$X_n$	คือ อินพุตโหนดที่ $n$ มีทั้งหมด $N$ โหนด
	$S_m$	คือ เอ้าท์พุทของชั้นฮิดเดน ก่อนทำการปรับค่าเป็น $Y_m$
	$Y_m$	คือ เอ้าท์พุทของชั้นฮิดเดน หลังทำการปรับค่าของโหนดที่ $m$ มีทั้งหมด $M$ โหนด
	$V_j$	คือ เอ้าท์พุทของชั้นเอ้าท์พุท ก่อนทำการปรับค่าเป็น $Z_j$
	$Z_j$	คือ เอ้าท์พุทของชั้นเอ้าท์พุท หลังทำการปรับค่าของโหนดที่ $j$ มีทั้งหมด $J$ โหนด
	$t_j$	คือ เอ้าท์พุทที่ต้องการของชั้นเอ้าท์พุทโหนดที่ $j$ มีทั้งหมด $J$ โหนด
	$w_{nm}$	คือ น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นฮิดเดน
	$w_{mj}$	คือ น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นฮิดเดนกับชั้นเอ้าท์พุท
	$e_j$	คือ ค่าความผิดพลาดโหนดที่ $j$ มีทั้งหมด $J$ โหนด

ขั้นตอนการเรียนรู้มีดังนี้

1. สุ่มค่าน้ำหนักเริ่มต้นให้กับทุกๆเส้นในโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 2 ชั้น โดยให้มีค่าอยู่ระหว่าง  $[-0.5, 0.5]$  และกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุด
2. คำนวณค่าเอาต์พุตของชั้นฮิดเดนจากข้อมูลอินพุตที่รับเข้ามาด้วยสมการ

$$s_m = \sum_{n=1}^N x_n * w_{nm} \quad (3.1)$$

แล้วทำการปรับค่าเอาต์พุตด้วยฟังก์ชัน

$$Y_m = f(s_m) \quad (3.2)$$

โดยฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่า  $f(x)$  ที่ใช้มีสมการดังนี้ [14]

- ฟังก์ชัน Log sigmoid

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3.3)$$

- ฟังก์ชัน Tangent sigmoid

$$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (3.4)$$

- ฟังก์ชัน Purelin

$$f(x) = x \quad (3.5)$$

3. คำนวณค่าเอาต์พุตของชั้นเอาต์พุตจากข้อมูลอินพุตที่รับเข้ามาจากชั้นฮิดเดนด้วยสมการ

$$V_j = \sum_{m=1}^M Y_m * w_{mj} \quad (3.6)$$

แล้วทำการปรับค่าเอาต์พุตด้วยฟังก์ชัน

$$Z_j = f(V_j) \quad (3.7)$$

นำเอาที่พุดที่ได้มาเปรียบเทียบกับเอาที่พุดที่กำหนดไว้ เพื่อหาค่าความผิดพลาดและทำการปรับค่าน้ำหนัก โดยมีสมการที่ใช้ในการหาค่าความผิดพลาดดังนี้

$$e_j = \sqrt{\sum_{j=1}^J (t_j - z_j)^2} \quad (3.8)$$

สมการที่ใช้ปรับค่าน้ำหนักดังนี้ [20]

$$w_{mj}^{(r+1)} = w_{mj}^{(r)} + \eta \{ (t_j - Z_j) * [Z_j (1 - Z_j)] * Y_m \} \quad (3.9)$$

$$w_{nm}^{(r+1)} = w_{nm}^{(r)} + \eta \left( \sum_{j=1}^J (t_j - Z_j) * \{ Z_j (1 - Z_j) * w_{mj}^{(r)} \} \right) * (Y_m (1 - Y_m)) (X_n) \quad (3.10)$$

โดยที่  $r$  คือ จำนวนรอบที่เรียนรู้

$\eta$  คือ อัตราการเรียนรู้มีค่า 0.01

4. หาค่าความผิดพลาดรวมเฉลี่ยว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดหรือไม่ ถ้าใช่แสดงว่าโครงข่ายประสาทเทียมนี้ให้ผลลัพธ์ที่ต้องการได้ เป็นการจบการเรียนรู้ของโครงข่ายสมการในการหาค่าความผิดพลาดดังนี้

$$error = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J e_j \quad (3.11)$$

### 3.4 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

เนื่องจากความสามารถในการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่มีความซับซ้อนจากข้อมูลที่ป้อนให้เรียนรู้ การประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการควบคุม ซึ่งมีผู้นำมาประยุกต์ใช้งานหลายประเภท ได้แก่

1. งานการจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน เช่น ลายมือ, ลายเซนดี, ตัวอักษร, รูปหน้า
2. งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ (มีอินพุต และเอาที่พุด ที่ไม่ทราบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร)
3. งานที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (วงจรโครงข่ายสามารถปรับตัวเองได้)
4. งานจัดหมวดหมู่และแยกแยะสิ่งของ

5. งานทำนาย เช่นพยากรณ์อากาศ, พยากรณ์หุ้น
6. การประยุกต์ใช้ทำนายงานระบบประสาทควบคุมกระบวนการทางเคมีโดยวิธีพยากรณ์แบบจำลอง (Model Predictive Control)
7. การประยุกต์ใช้ทำนายงานระบบประสาทแบบแพร่กระจายกลับ ในการทำนายพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในตัวอาคาร
8. การใช้ทำนายงานระบบประสาทในการหาไซโครเมตริกชาร์ท การประยุกต์ใช้ทำนายงานระบบประสาทควบคุมระบบ HVAC

### 3.5 การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

#### 3.5.1 สนามแม่เหล็กกระยะใกล้

นำข้อมูลจากรูปที่ผ่านการทำเส้นบางจากการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวัดจริง มาวิเคราะห์หาจุดตัด, จุดปลาย, จุดแยก, ความยาวเส้นตรงในแนวตั้ง - แนวนอน, ตำแหน่งจุดปลาย และอัตราส่วนระหว่างเส้นกับพื้นหลัง เพื่อเป็นอินพุตสำหรับสอนโครงข่ายประสาทเทียม แสดงอินพุตที่ใช้สอนโครงข่ายได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมสนามแม่เหล็กกระยะใกล้

PCB Conf.	Input data for NN							NN Target		
	Junction point	End point	Cross point	Ratio	Position of end point	Vertical Line	Horizontal Line	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
E	3	5	0	0.0941	0	0	5	0	0	1
I	0	2	0	0.4712	0	0	5	0	1	0
L	0	2	0	0.0525	4	5	5	0	1	1
O	0	2	0	0.0695	0	0	0	1	0	0
X	0	4	1	0.0542	0	5	5	1	0	1
7	0	2	0	0.0500	4	0	5	1	1	0



### 3.5.2 สนามไฟฟ้าระยะไกล

ใช้แอมพลิจูดที่ได้จากการวัดในห้องปิดกั้นที่ช่วงความถี่ 30 MHz – 1 GHz เป็นข้อมูลสำหรับสอนโครงข่าย โดยมีอินพุตในการสอนจำนวน 64 ตัว และใช้เอาต์พุตจำนวน 4 บิต ในการระบุชนิดแผ่นวงจรพิมพ์ โดยบิตสุดท้ายเป็นตัวบ่งบอกว่าเป็นการวัดที่ได้จากแนวตั้ง (V) หรือแนวนอน (H)

ตารางที่ 3.2 ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมสนามไฟฟ้าระยะไกล

Amplitude	PCB Configurations											
	E		I		L		O		X		7	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
30	80.4	80.4	80.4	80.4	80.2	80.4	80.0	80.4	80.4	80.4	80.2	80.4
45	65.0	0.0	72.0	0.0	68.2	32.3	72.2	40.0	72.0	0.0	72.0	0.0
60	67.1	66.4	67.0	67.1	67.1	67.0	67.1	67.0	67.1	67.0	67.1	67.0
75	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8
90	62.8	34.0	66.8	37.9	63.7	38.4	66.8	37.1	66.8	36.0	66.8	38.3
105	68.2	67.1	68.2	66.1	68.2	68.2	67.6	63.7	68.2	63.3	68.2	68.2
120	69.7	52.2	69.7	51.1	65.0	57.5	69.7	48.7	69.7	60.6	68.6	56.0
135	53.1	34.7	64.8	35.9	60.9	31.5	62.4	37.3	63.4	40.8	66.7	37.0
150	70.9	60.8	70.9	55.2	70.9	64.6	70.9	64.9	70.9	60.1	70.9	53.4
165	70.2	67.9	70.2	64.4	70.2	70.2	70.2	68.6	70.2	56.3	70.2	59.6
180	57.1	44.2	59.2	41.0	59.4	43.1	68.9	41.9	56.9	35.3	59.6	41.5
195	70.0	69.6	69.9	67.3	69.9	66.7	70.0	70.0	70.0	53.7	69.9	65.3
210	71.2	67.5	66.4	57.1	71.2	66.7	68.8	67.7	71.2	61.5	70.2	61.0
225	54.2	43.0	63.7	39.3	50.4	39.4	71.6	47.2	63.3	35.7	67.5	40.2
240	60.5	56.0	63.7	60.7	55.6	56.1	72.7	55.5	59.6	51.9	72.7	58.6
255	61.2	58.9	63.6	67.2	58.9	64.0	71.2	62.3	67.5	61.7	69.7	64.5
270	56.3	0.0	41.4	33.1	55.9	31.3	73.7	32.4	61.7	32.3	65.9	34.2
285	67.7	63.1	74.2	63.1	66.9	63.1	74.2	63.0	69.0	62.7	74.2	64.8
300	69.8	69.6	73.1	59.7	74.6	67.1	74.6	70.9	74.1	70.1	74.6	70.8
315	61.4	50.0	68.0	41.7	61.1	46.0	74.9	52.6	62.9	51.3	70.7	50.6
330	70.3	59.0	74.9	57.0	61.5	63.1	65.0	65.2	64.3	63.7	73.6	64.5

ตารางที่ 3.2(ต่อ) ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมสนามไฟฟ้าระยะไกล

Amplitude	PCB Configurations											
	E		I		L		O		X		7	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
345	62.9	48.1	56.8	52.0	65.3	58.3	68.3	52.2	66.2	59.5	71.9	58.5
375	61.0	45.9	58.2	61.1	61.7	59.7	75.8	56.4	54.8	58.4	64.2	60.8
390	57.2	47.5	61.5	65.9	43.5	59.2	73.9	61.5	68.0	60.2	64.0	59.8
405	52.2	38.0	49.5	47.7	54.4	45.2	76.1	45.8	66.7	43.4	71.7	44.5
420	63.2	55.5	66.2	60.0	66.8	58.7	76.2	61.6	68.7	57.5	62.3	55.7
435	59.6	55.9	65.8	52.2	60.3	56.7	46.4	60.1	65.8	49.8	69.7	50.4
450	58.0	47.4	69.3	46.6	61.0	50.5	65.3	54.5	63.5	41.9	68.8	39.4
465	60.1	56.7	65.6	52.4	57.9	60.7	68.1	63.0	61.8	48.6	67.8	51.8
480	58.2	42.3	66.4	47.6	62.8	50.2	71.5	52.7	61.3	45.8	65.3	46.7
495	53.8	28.2	61.0	34.1	60.6	43.1	76.7	32.8	52.9	32.9	62.9	44.5
510	56.0	38.8	55.1	39.6	59.8	45.2	72.3	47.0	56.0	39.7	58.3	43.0
525	54.1	32.7	53.9	0.0	62.5	44.9	69.3	43.2	53.8	35.2	65.5	0.0
540	55.0	31.8	61.3	0.0	56.7	44.6	70.1	43.0	59.1	34.5	69.8	0.0
555	50.8	0.0	47.9	38.7	62.8	46.1	64.7	43.8	61.1	41.3	55.7	40.2
570	53.3	30.0	61.8	0.0	60.3	39.3	67.0	38.3	63.4	34.1	65.5	33.0
585	47.7	0.0	64.9	0.0	55.1	44.2	70.9	39.7	62.8	33.0	66.0	34.1
600	46.8	33.0	64.4	0.0	53.5	45.8	72.6	42.4	64.3	32.8	65.7	38.2
615	54.6	0.0	69.8	0.0	57.2	34.2	79.5	37.2	63.0	0.0	63.2	31.5
630	56.2	0.0	66.5	0.0	62.3	32.9	77.7	0.0	64.1	0.0	63.9	0.0
645	55.4	32.2	63.4	32.6	63.2	37.9	71.3	30.7	64.2	37.7	63.7	31.0
660	59.0	30.2	62.8	31.3	61.0	37.9	68.4	33.1	67.1	34.2	70.3	0.0
675	60.5	0.0	68.4	30.4	62.7	31.4	68.6	0.0	64.0	32.6	74.3	30.3
690	62.9	0.0	62.9	39.7	64.1	39.8	72.7	30.6	64.3	39.9	65.7	37.5
705	57.2	0.0	67.0	0.0	42.5	0.0	75.5	0.0	56.4	0.0	71.1	0.0
720	55.3	0.0	63.0	34.0	56.1	35.1	71.5	0.0	57.2	31.5	71.2	30.6
735	57.9	0.0	63.5	30.1	49.1	34.8	77.7	0.0	64.0	0.0	69.1	0.0
750	54.9	0.0	65.5	0.0	57.4	0.0	77.6	0.0	63.0	0.0	62.0	0.0

ตารางที่ 3.2(ต่อ) ชุดข้อมูลที่ใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียมสนามไฟฟ้าระยะไกล

Amplitude	PCB Configurations												
	E		I		L		O		X		7		
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	
765	46.0	0.0	66.0	0.0	61.9	0.0	71.5	0.0	61.4	0.0	68.2	0.0	
780	54.7	0.0	64.0	0.0	60.2	0.0	66.9	0.0	65.8	0.0	67.3	0.0	
795	61.9	0.0	64.8	0.0	63.1	0.0	66.4	0.0	70.5	0.0	72.3	0.0	
810	59.9	32.1	69.1	0.0	67.0	33.7	72.8	32.8	69.1	30.8	68.9	0.0	
825	64.9	0.0	68.0	0.0	66.0	0.0	79.2	0.0	69.9	0.0	70.3	0.0	
840	61.6	31.7	72.1	0.0	58.0	30.9	77.6	31.1	63.1	0.0	73.8	0.0	
855	62.8	33.9	67.1	0.0	62.2	35.2	71.2	34.4	57.4	0.0	72.3	0.0	
870	64.9	0.0	69.2	0.0	59.8	0.0	75.8	0.0	61.2	0.0	73.6	0.0	
885	55.3	0.0	68.1	0.0	49.6	33.7	69.5	0.0	63.0	0.0	70.6	0.0	
900	59.1	0.0	65.2	0.0	50.3	0.0	72.5	0.0	57.5	0.0	73.0	0.0	
915	55.6	0.0	52.2	0.0	45.8	0.0	72.0	0.0	62.4	0.0	55.5	0.0	
930	52.1	31.3	63.1	0.0	63.2	32.3	71.5	0.0	66.4	0.0	71.0	0.0	
945	51.0	30.9	62.9	0.0	65.4	32.2	76.8	31.2	68.7	0.0	59.3	0.0	
960	60.1	0.0	66.3	0.0	59.3	0.0	77.7	0.0	70.5	0.0	73.8	0.0	
975	59.0	31.8	69.5	0.0	64.3	30.7	72.7	33.1	66.7	0.0	72.2	0.0	
990	63.9	30.2	69.5	0.0	66.2	30.3	66.8	31.2	66.7	0.0	70.8	0.0	
NN Target	T <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	T <sub>2</sub>	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
	T <sub>3</sub>	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
	T <sub>4</sub>	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

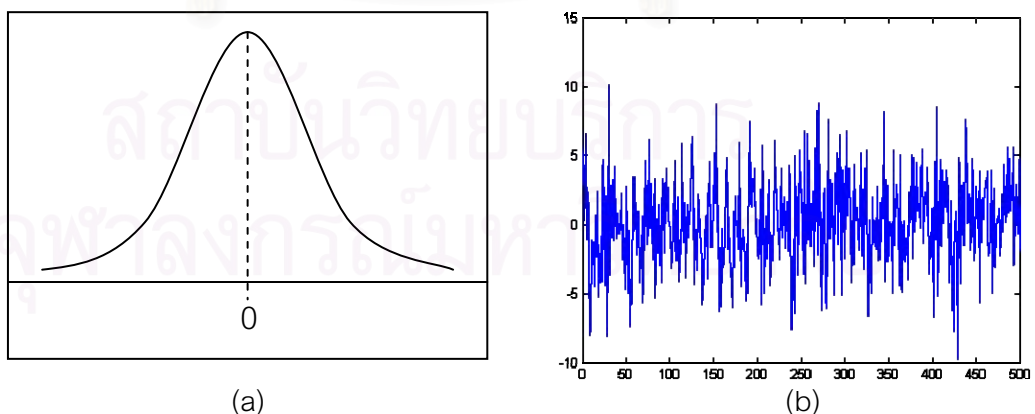
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและทำนายโครงข่ายประสาทเทียม

ทำการทดลองแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการเปลี่ยนฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอาต์พุต (transfer function), จำนวนชั้นฮิดเดน (hidden layer) และจำนวนโหนดในชั้นฮิดเดน (hidden node) [21] โดยในการทำนายเราจะใส่สัญญาณรบกวน 2 แบบ คือ แบบกำหนดค่าและแบบ White Gaussian Noise โดย  $x$  คือจำนวนโหนดที่ใส่สัญญาณรบกวน และ  $y$  เป็นค่าระหว่าง 0 ถึง  $y$  ที่ถูกสุ่มขึ้นมาสำหรับแบบกำหนดค่า และคือค่ากำลัง (power) ของ White Gaussian Noise ที่สุ่มขึ้นมา จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าในโหนดโดยทำการบวก หรือลบ ค่าที่สุ่มได้จาก  $y$  ลงในโหนดที่จะใส่สัญญาณรบกวน

#### 4.1 สัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์เซียน (White Gaussian Noise)

สัญญาณรบกวนขาว (White Noise) เรียกชื่อให้สอดคล้องกับแสงสีขาว ที่ประกอบด้วยแสงทุกความถี่ โดยเป็นสัญญาณรบกวนที่มีการกระจายของกำลังอย่างมีรูปแบบ และครอบคลุมช่วงความถี่ที่กว้างมาก สัญญาณรบกวนขาวจะมีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกว่า สัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์เซียน (White Gaussian Noise) ซึ่งมีค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 และค่าความแปรปรวน (Variance) เป็น 1



รูปที่ 4.1(a) กราฟแสดงการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน

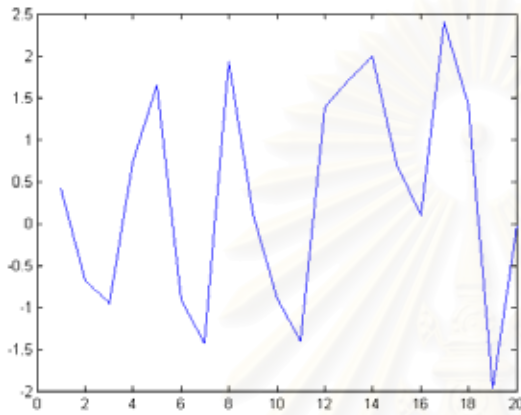
(b) ตัวอย่างสัญญาณรบกวนขาว

#### 4.1.1 วิธีใส่สัญญาณรบกวนแบบ White Gaussian Noise

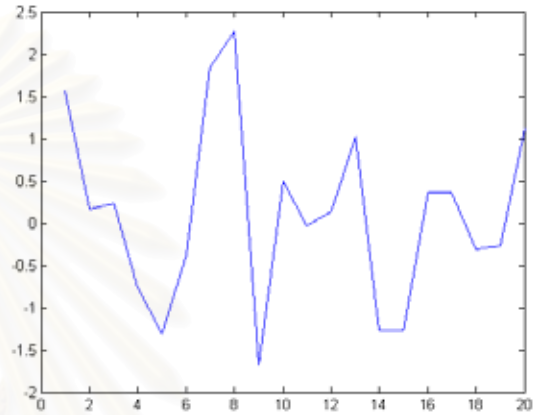
มี 2 ตัวแปร คือ  $x$  และ  $y$

โดยที่  $x$  คือจำนวนโหนดอินพุตที่จะใส่สัญญาณรบกวน มีค่า 5, 10, 15, 20 และ 30 โหนด

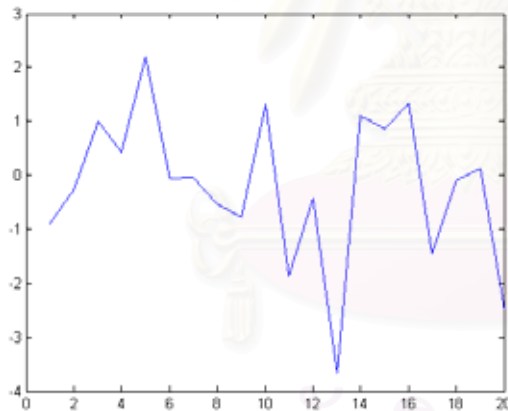
$y$  คือค่ากำลัง (power) ของ White Gaussian Noise มีค่า 1, 2, 3, 5, 10 และ 20



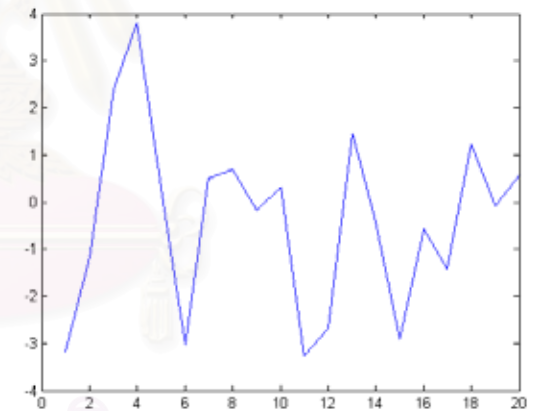
(a)



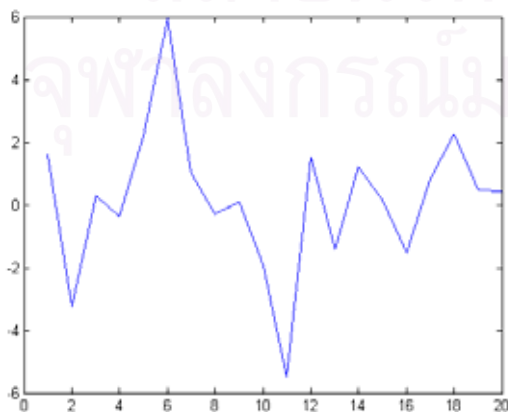
(b)



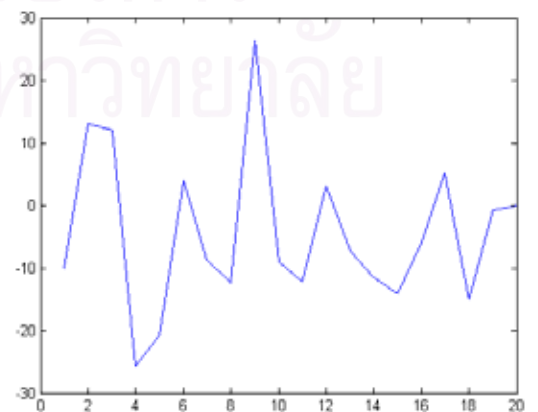
(c)



(d)



(e)



(f)



- รูปที่ 4.2(a) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 1  
 (b) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 2  
 (c) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 3  
 (d) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 5  
 (e) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 10  
 (f) กราฟ White Gaussian Noise ที่มีค่ากำลังเท่ากับ 20

ในการใส่สัญญาณรบกวน จะสร้างสัญญาณรบกวนแบบ White Gaussian Noise ขึ้นมา มีจำนวนตัวเท่ากับจำนวนโหนดอินพุตที่จะใส่สัญญาณรบกวน ( $x$ ) และทำการสุ่มโหนดอินพุตขึ้น เพื่อใส่สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้น โดยทำการบวกหรือลบสัญญาณรบกวนเข้าไปโดยการสุ่ม

- ค่ากำลัง (power)

$$\text{power} = \sqrt{\sum_{i=1}^x (\text{noise}_x)^2} \quad (4.1)$$

#### 4.1.2 วิธีใส่สัญญาณรบกวนแบบกำหนดค่า

มี 2 ตัวแปร คือ  $x$  และ  $y$

โดยที่  $x$  คือจำนวนโหนดอินพุตที่จะใส่สัญญาณรบกวน มีค่า 5, 10, 15, 20 และ 30 โหนด

$y$  คือค่าสูงสุด (Maximum) ของสัญญาณรบกวน มีค่า 1, 2, 3, 5, 10 และ 20

ในการใส่สัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนจะถูกสุ่มขึ้นมาโดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $y$  มีจำนวนตัวเท่ากับโหนดอินพุตที่จะใส่สัญญาณรบกวน ( $x$ ) และทำการสุ่มโหนดอินพุตขึ้นเพื่อใส่สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้น โดยทำการบวกหรือลบสัญญาณรบกวนเข้าไปโดยการสุ่ม

#### 4.1.3 ค่าประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม

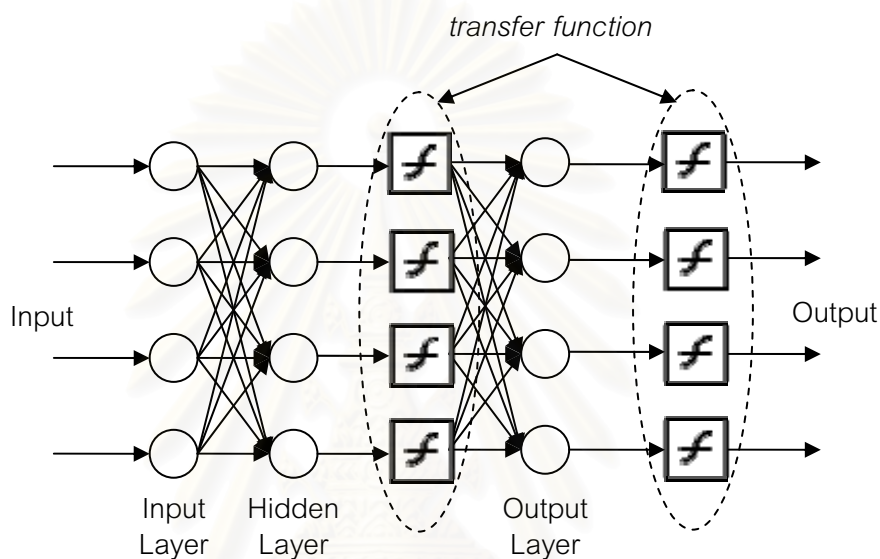
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่โครงข่ายสามารถทำนายได้ถูกต้อง

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่โครงข่ายทำนายถูก}}{\text{จำนวนครั้งที่ทดสอบ}} \times 100 \quad (4.2)$$

## 4.2 ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอาต์พุต

จากที่ได้กล่าวไปว่ามีฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอาต์พุต 3 ฟังก์ชัน คือ

- Log sigmoid transfer function
- Tangent sigmoid transfer function
- Purelin transfer function



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งฟังก์ชันการปรับค่า

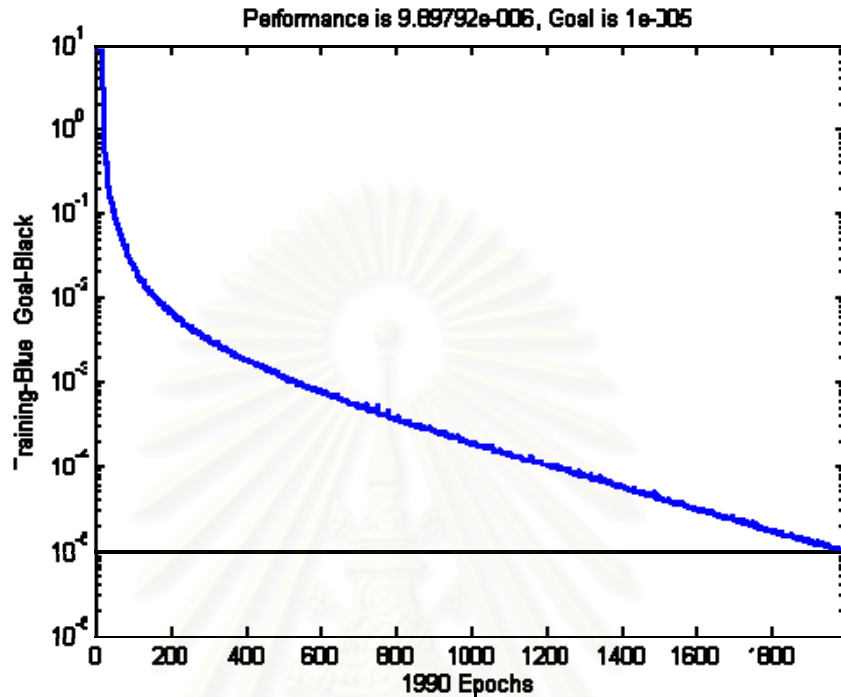
ในการปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ เราจะทำการเปลี่ยนฟังก์ชันใน ส่วนของชั้นฮิดเดน และชั้นเอาต์พุต ซึ่งมีผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียมดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

Hidden node = 100    Function = logsig, purelin

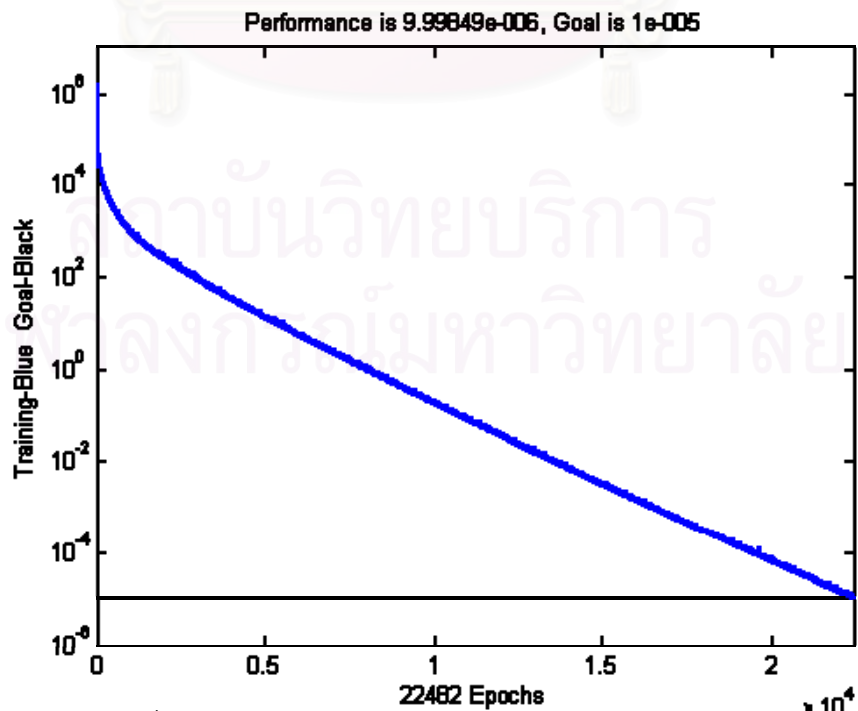
1990 Epochs    Time trained = 15.92206 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, purelin

Hidden node = 100    Function = purelin, purelin

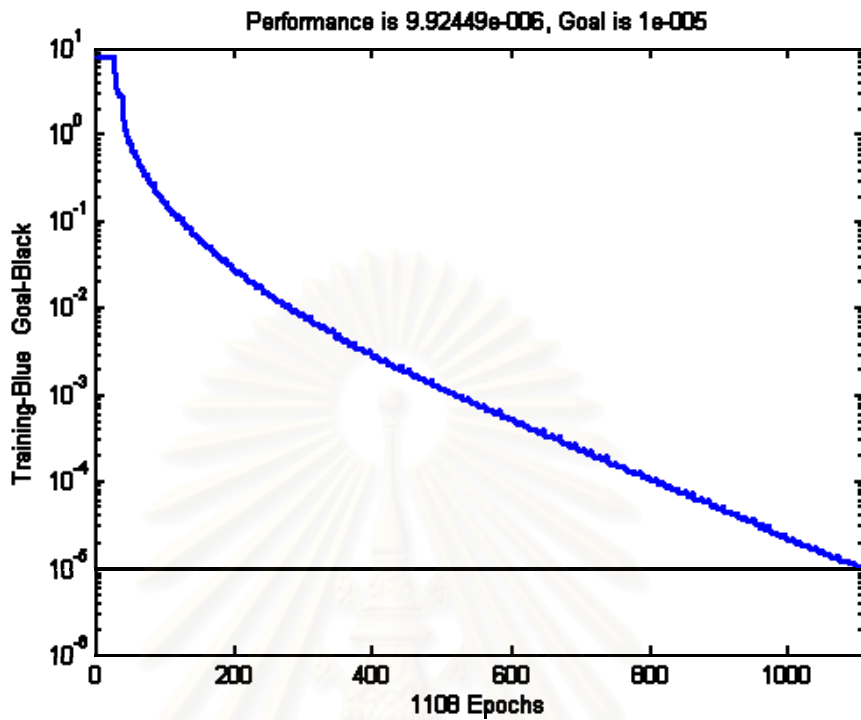
22482 Epochs    Time trained = 263.012928 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, purelin

Hidden node = 100    Function = tansig, purelin

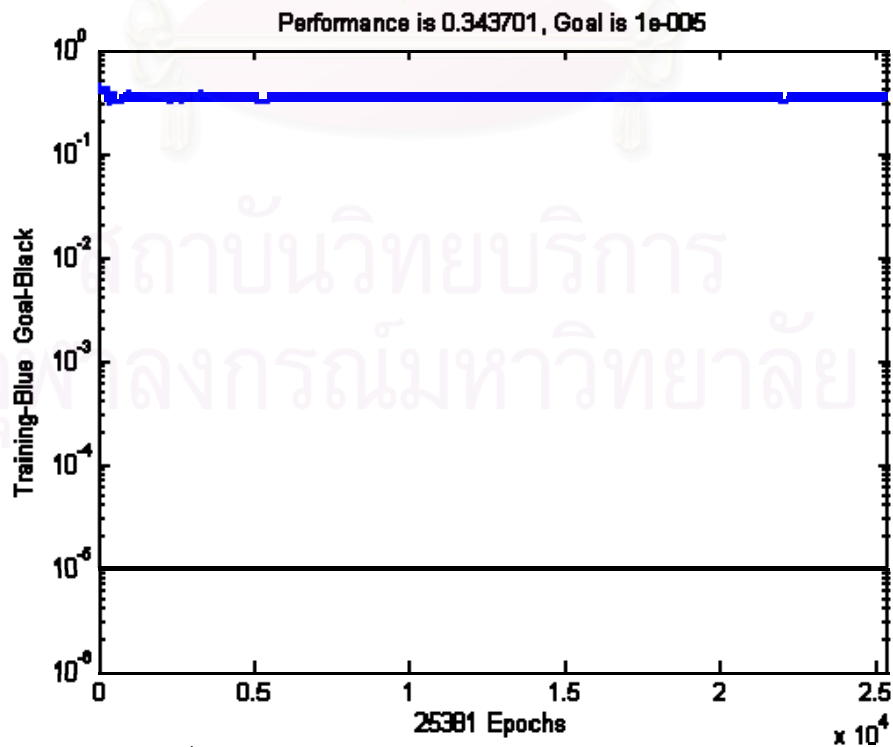
1108 Epochs    Time trained = 11.845372 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, purelin

Hidden node = 100    Function = logsig, logsig

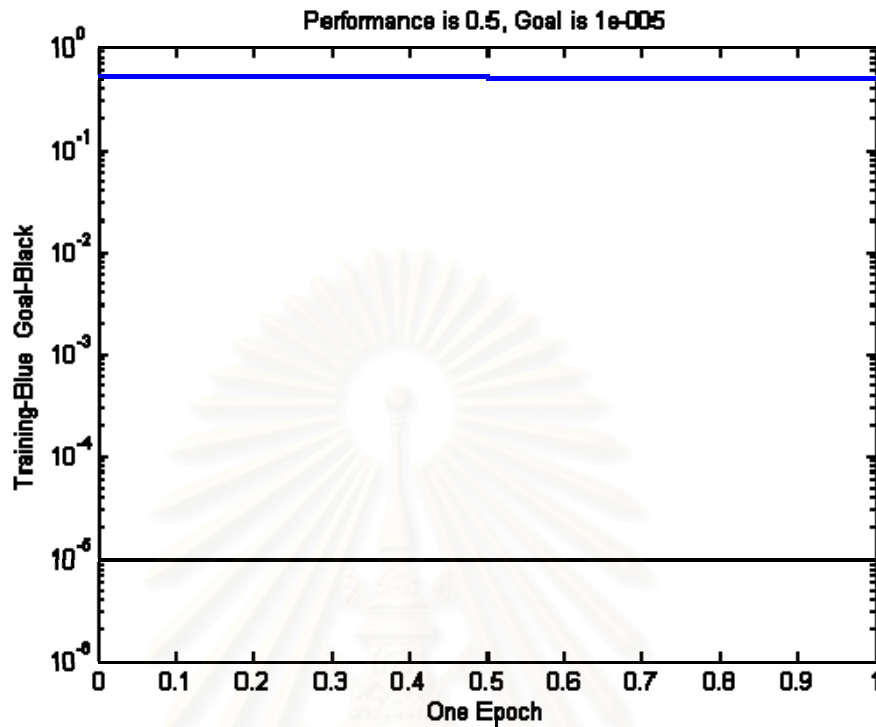
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, logsig

Hidden node = 100    Function = purelin, logsig

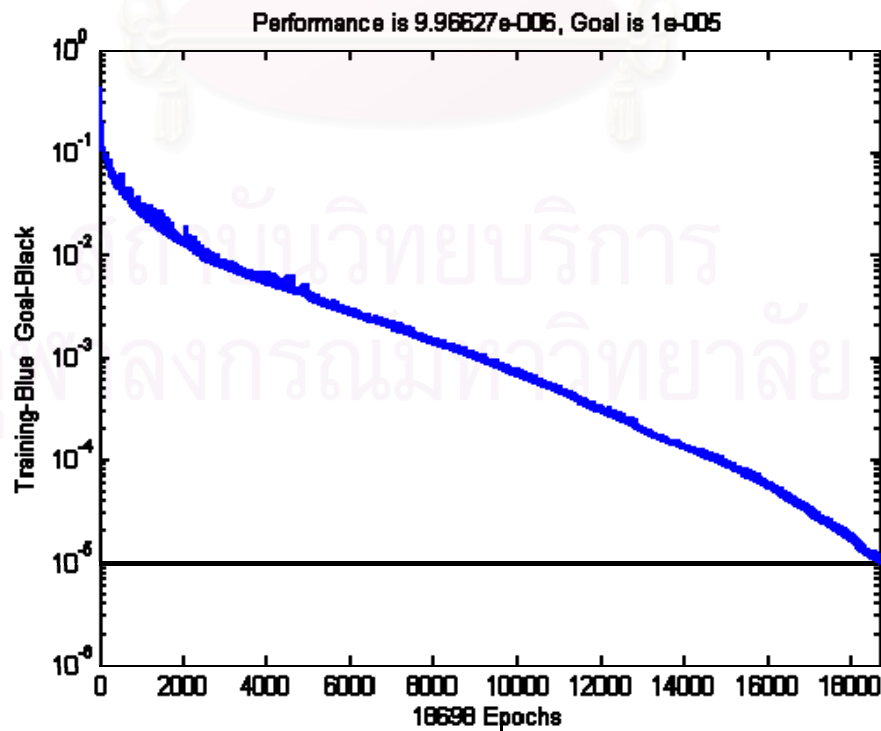
1 Epochs    Time trained = 1.504598 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, logsig

Hidden node = 100    Function = tansig, logsig

18698 Epochs    Time trained = 232.797685 sec    Maximum errors = 10-5

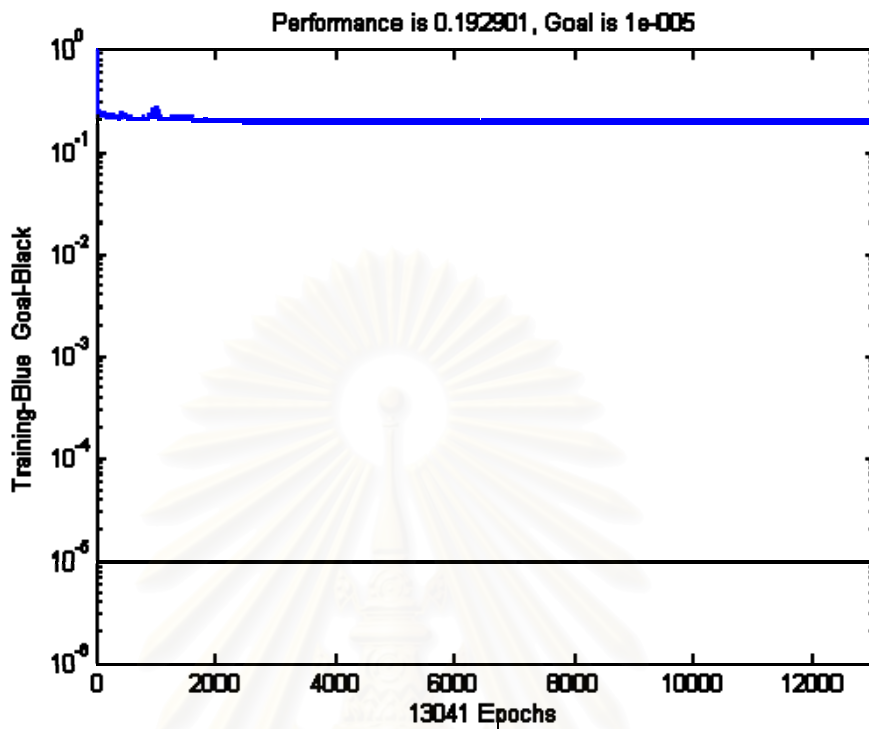


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, logsig



Hidden node = 100    Function = logsig, tansig

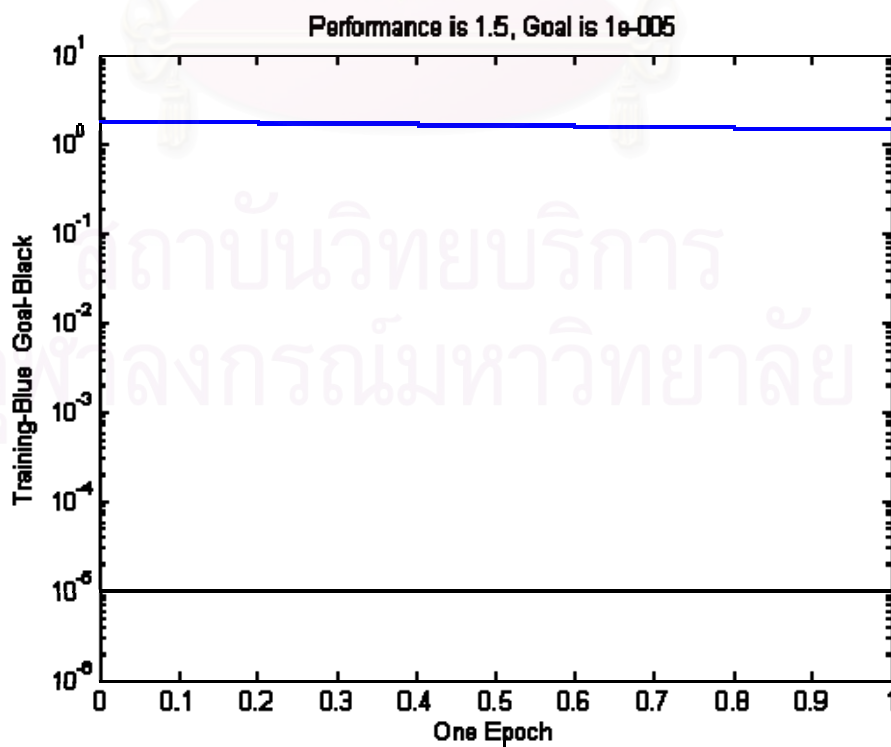
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, tansig

Hidden node = 100    Function = purelin, tansig

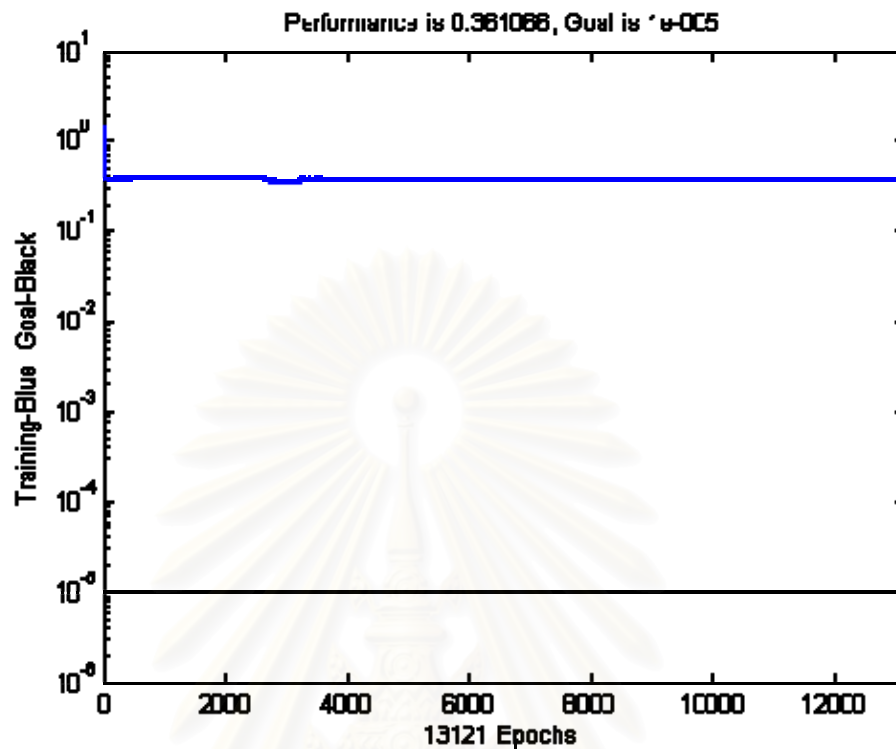
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, tansig

Hidden node = 100    Function = tansig, tansig

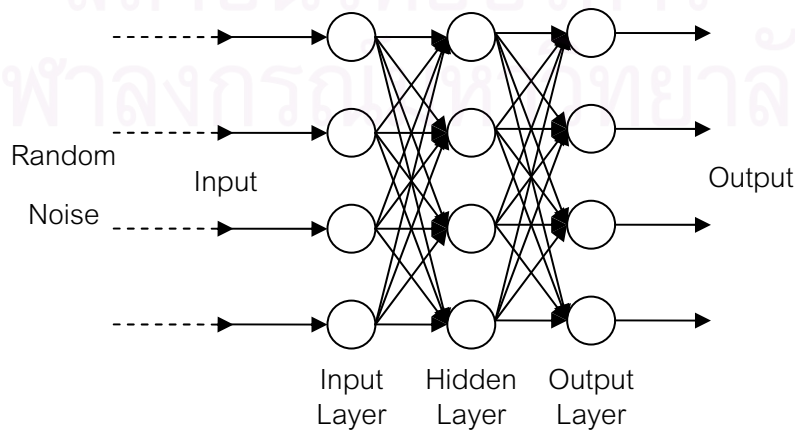
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors =  $10^{-5}$



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, tansig

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่ามีชุดฟังก์ชันที่ใช้ได้ในการสอนจำนวน 4 ชุด คือ logsig, purelin / purelin, purelin / tansig, purelin และ tansig, logsig จึงนำเอาฟังก์ชันทั้ง 4 ชุดนี้มาใช้ในการทำนาย เนื่องจากชุดฟังก์ชันอื่นไม่สามารถลู่เข้าสู่ค่าความผิดพลาดสูงสุดตามต้องการได้ ( $10^{-5}$ )

ในการทดสอบประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียม จะใส่สัญญาณรบกวนเข้าไปในโหนดอินพุตที่ถูกสุ่มขึ้น ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งสัญญาณรบกวน

## 4.2.2 ผลการทำนาย

ตารางที่ 4.1 แบบ White Gaussian Noise (Vertical)

y	function		x				
	first layer	second layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	99.85	99.87	99.53	99.67	99.38
	purelin	purelin	8.55	7.58	7.87	7.57	7.35
	tansig	purelin	99.85	99.87	99.53	99.67	99.38
	tansig	logsig	87.77	76.52	66.32	56.15	40.70
2	logsig	purelin	99.75	99.80	99.53	99.37	99.03
	purelin	purelin	8.03	8.12	7.85	7.62	7.22
	tansig	purelin	99.75	99.80	99.53	99.37	99.03
	tansig	logsig	86.75	75.17	63.88	54.43	38.78
3	logsig	purelin	99.87	99.48	99.18	99.10	98.45
	purelin	purelin	8.08	7.30	7.27	7.18	7.75
	tansig	purelin	99.87	99.48	99.18	99.10	98.45
	tansig	logsig	86.83	73.45	62.38	52.27	36.03
5	logsig	purelin	99.42	99.02	98.60	97.78	96.72
	purelin	purelin	7.78	7.08	7.13	6.95	7.27
	tansig	purelin	99.42	99.02	98.60	97.78	96.72
	tansig	logsig	84.30	70.97	57.38	46.92	30.82
10	logsig	purelin	98.13	96.67	95.30	93.62	89.92
	purelin	purelin	7.20	7.43	7.18	7.38	7.42
	tansig	purelin	98.13	96.67	95.30	93.62	89.92
	tansig	logsig	75.78	55.82	41.15	31.05	19.75
20	logsig	purelin	94.57	88.78	82.90	76.30	64.43
	purelin	purelin	7.25	6.60	6.68	5.53	7.05
	tansig	purelin	94.57	88.78	82.90	76.30	64.43
	tansig	logsig	40.45	20.85	24.77	11.75	9.48

ตารางที่ 4.2 แบบ กำหนดค่า (Vertical)

y	function		x				
	first layer	second layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	100.00	100.00	99.97	100.00	100.00
	purelin	purelin	10.73	8.85	8.93	8.43	8.17
	tansig	purelin	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	tansig	logsig	90.12	80.52	71.53	63.27	49.28
2	logsig	purelin	100.00	99.95	99.95	99.87	99.92
	purelin	purelin	8.47	8.12	7.72	7.15	7.25
	tansig	purelin	100.00	99.97	99.95	99.90	99.93
	tansig	logsig	87.53	75.63	63.23	54.83	38.62
3	logsig	purelin	98.00	99.02	98.45	98.05	97.18
	purelin	purelin	8.10	7.27	7.83	7.87	7.12
	tansig	purelin	99.50	99.02	98.45	98.13	97.05
	tansig	logsig	84.27	69.25	56.15	45.40	29.92
5	logsig	purelin	98.57	96.90	95.40	94.12	90.15
	purelin	purelin	7.73	6.88	7.50	7.02	7.03
	tansig	purelin	98.27	96.58	94.78	93.33	89.07
	tansig	logsig	76.73	57.87	42.07	31.42	20.02
10	logsig	purelin	96.82	92.20	89.37	85.78	78.37
	purelin	purelin	7.77	6.93	6.60	7.07	7.12
	tansig	purelin	96.35	91.18	87.95	83.43	75.48
	tansig	logsig	56.85	32.48	23.07	17.25	11.92
20	logsig	purelin	93.95	86.98	79.92	72.38	58.50
	purelin	purelin	6.80	7.02	7.02	6.88	7.08
	tansig	purelin	93.65	86.33	78.70	70.72	56.83
	tansig	logsig	33.30	16.95	13.15	10.22	8.30

ตารางที่ 4.3 แบบ White Gaussian Noise (Horizontal)

y	function		x				
	first layer	second layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	99.92	99.92	99.77	99.73	99.60
	purelin	purelin	9.13	7.82	7.20	6.95	6.95
	tansig	purelin	99.93	99.92	99.77	99.73	99.60
	tansig	logsig	88.65	77.55	67.17	58.95	42.43
2	logsig	purelin	99.97	99.83	99.73	99.55	99.33
	purelin	purelin	8.32	7.68	7.33	7.57	7.22
	tansig	purelin	99.97	99.83	99.73	99.55	99.33
	tansig	logsig	88.27	76.77	66.07	55.50	39.93
3	logsig	purelin	99.80	99.62	99.45	99.40	99.03
	purelin	purelin	8.30	7.63	7.67	7.03	7.05
	tansig	purelin	99.80	99.62	99.45	99.40	99.03
	tansig	logsig	87.55	75.18	62.42	54.05	36.30
5	logsig	purelin	99.58	99.20	98.68	98.42	97.37
	purelin	purelin	7.98	7.27	6.68	6.73	7.25
	tansig	purelin	99.48	99.00	98.45	98.13	96.77
	tansig	logsig	84.88	70.67	57.65	46.58	30.57
10	logsig	purelin	98.17	95.87	94.33	92.58	89.05
	purelin	purelin	7.75	7.32	7.27	7.70	6.38
	tansig	purelin	97.57	94.53	92.42	89.92	85.22
	tansig	logsig	73.42	52.72	38.48	28.60	17.35
20	logsig	purelin	92.90	84.95	78.20	70.42	56.27
	purelin	purelin	6.82	6.82	7.17	6.28	6.28
	tansig	purelin	92.37	84.07	76.92	68.80	54.88
	tansig	logsig	37.72	19.18	12.17	9.45	7.03

ตารางที่ 4.4 แบบ กำหนดค่า (Horizontal)

y	function		x				
	first layer	second layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00
	purelin	purelin	10.53	8.90	8.78	8.13	7.57
	tansig	purelin	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	tansig	logsig	90.43	82.02	74.02	67.05	53.52
2	logsig	purelin	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	purelin	purelin	8.65	7.27	7.18	7.22	6.02
	tansig	purelin	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	tansig	logsig	88.10	77.07	66.58	55.53	39.85
3	logsig	purelin	99.67	99.53	99.18	98.87	98.40
	purelin	purelin	7.75	7.33	7.13	7.52	7.00
	tansig	purelin	99.67	99.53	99.18	98.87	98.40
	tansig	logsig	85.00	70.47	57.08	46.57	28.72
5	logsig	purelin	98.17	96.75	94.90	93.30	89.55
	purelin	purelin	7.00	7.45	6.55	6.35	7.12
	tansig	purelin	98.17	96.75	94.90	93.30	89.55
	tansig	logsig	70.00	49.28	35.97	27.18	16.88
10	logsig	purelin	94.08	88.32	82.87	77.10	67.95
	purelin	purelin	7.02	7.50	6.42	6.58	6.78
	tansig	purelin	94.08	88.32	82.87	77.10	67.95
	tansig	logsig	52.18	28.38	18.23	13.75	9.32
20	logsig	purelin	90.72	81.13	73.40	63.92	48.48
	purelin	purelin	7.03	7.23	6.30	6.80	6.38
	tansig	purelin	90.72	81.13	73.40	63.92	48.48
	tansig	logsig	30.75	14.85	9.73	8.33	7.20

ตารางที่ 4.5 ผลรวมแบบ Vertical

function		เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
first layer	second layer	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
logsig	purelin	95.47	93.33
purelin	purelin	7.38	7.62
tansig	purelin	95.47	92.82
tansig	logsig	52.62	47.04

ตารางที่ 4.6 ผลรวมแบบ Horizontal

function		เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
first layer	second layer	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
logsig	purelin	94.69	91.21
purelin	purelin	7.32	7.32
tansig	purelin	94.11	91.21
tansig	logsig	52.11	45.80

ตารางที่ 4.7 ผลรวมทั้งหมด

function		เปอร์เซ็นต์ความ
first layer	second layer	ถูกต้อง
logsig	purelin	93.68
purelin	purelin	7.41
tansig	purelin	93.40
tansig	logsig	49.39

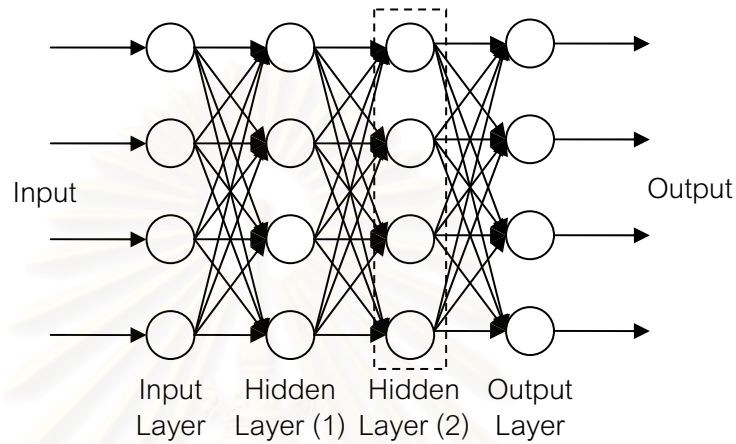
## สรุป

ชุดฟังก์ชัน logsig, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด รองลงมาคือ tansig, purelin และ tansig, logsig ชุดท้ายคือชุดฟังก์ชัน purelin, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุดตามลำดับ



### 4.3 จำนวนชั้นฮิดเดน

โดยเพิ่มจำนวนชั้นฮิดเดนเป็น 2 ชั้น ในแต่ละชั้นประกอบไปด้วยโหนดจำนวน 50 โหนด ทำการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่าเอพ็อดในชั้นฮิดเดน และในส่วนชั้นเอพ็อดจะใช้ฟังก์ชัน purelin ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้

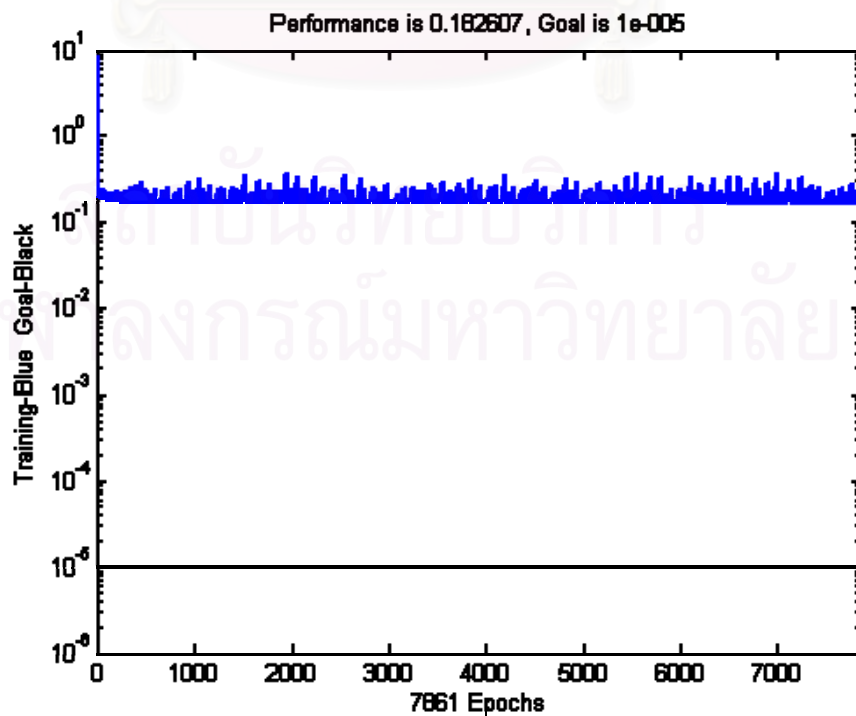


รูปที่ 4.14 โครงข่ายประสาทเทียมที่มีชั้นฮิดเดน 2 ชั้น

#### 4.3.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

Hidden node = 50, 50    Function = logsig, logsig, purelin

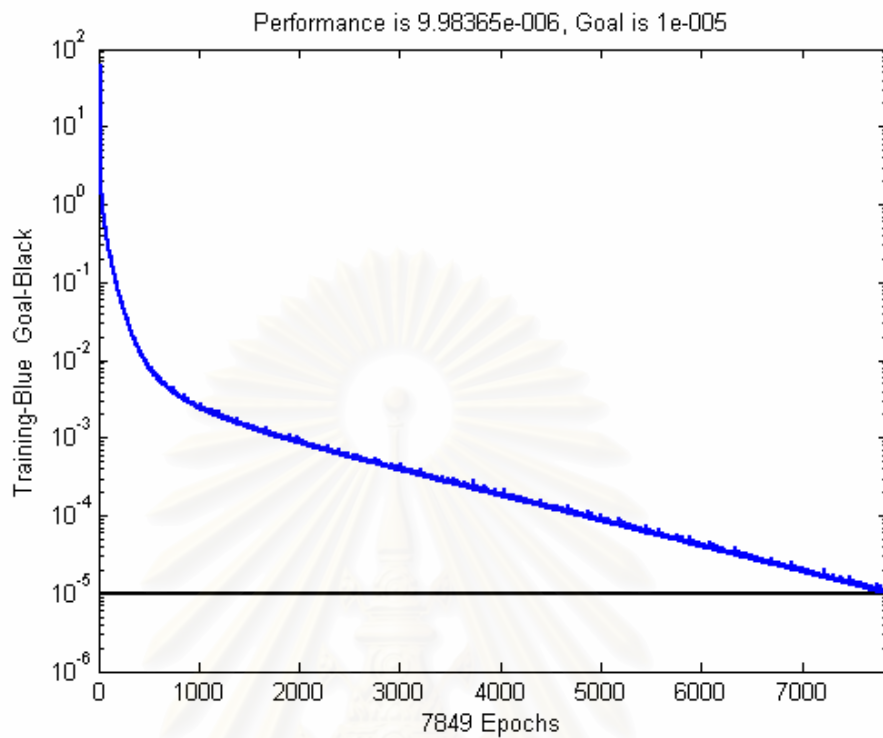
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors = 10<sup>-5</sup>



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, logsig, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = logsig, purelin, purelin

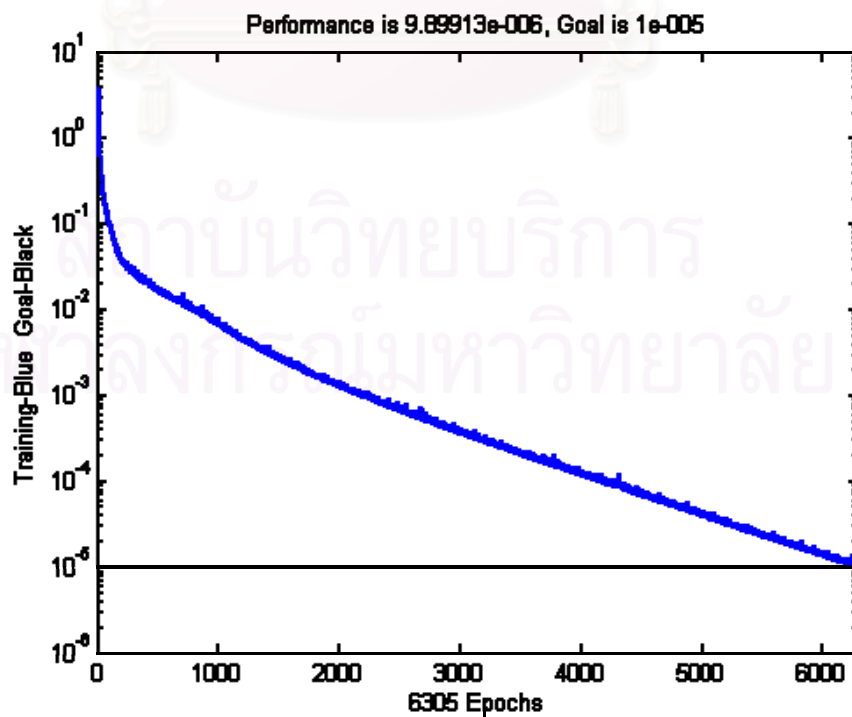
7849 Epochs    Time trained = 102.866234 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, purelin, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = logsig, tansig, purelin

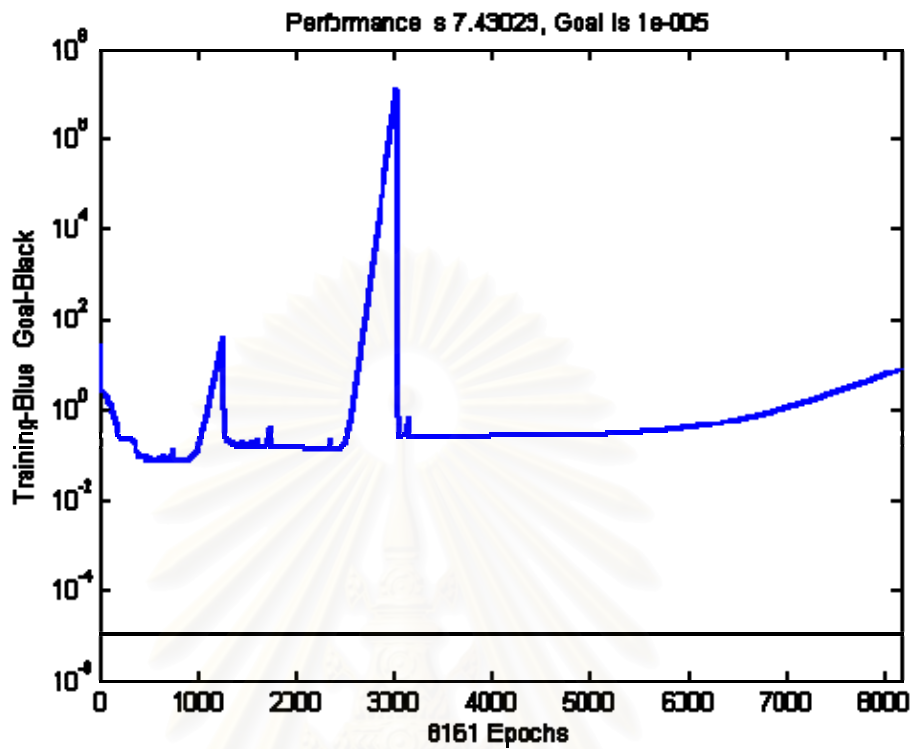
6305 Epochs    Time trained = 80.831641 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน logsig, tansig, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = purelin, tansig, purelin

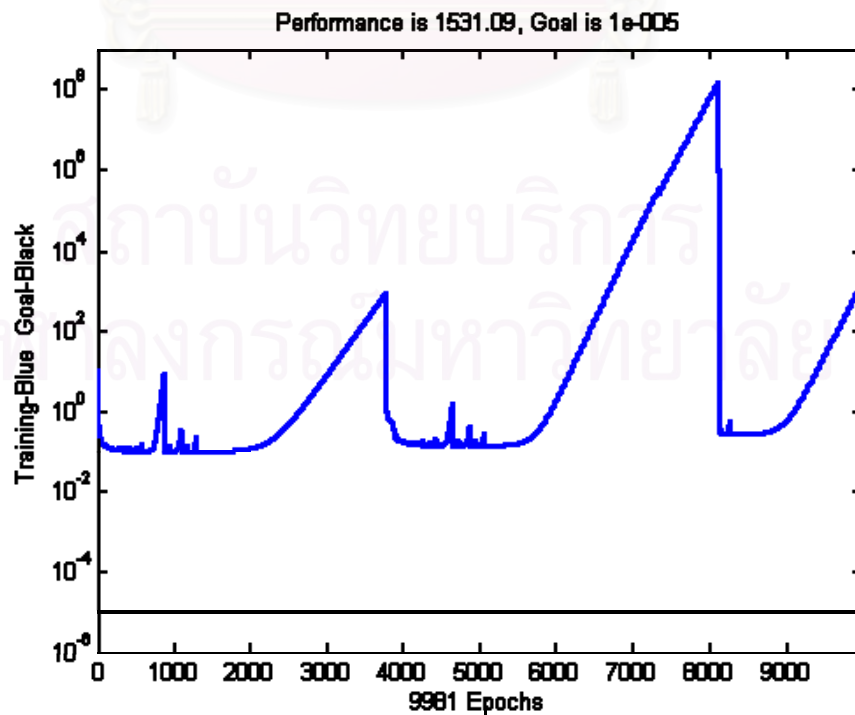
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, tansig, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = purelin, logsig, purelin

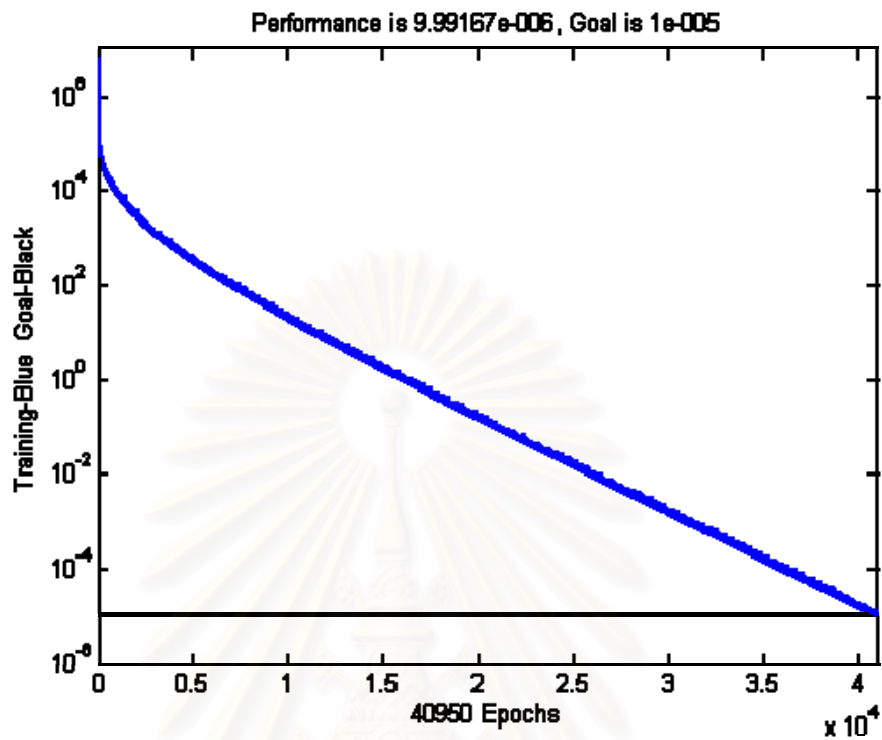
N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, logsig, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = purelin, purelin, purelin

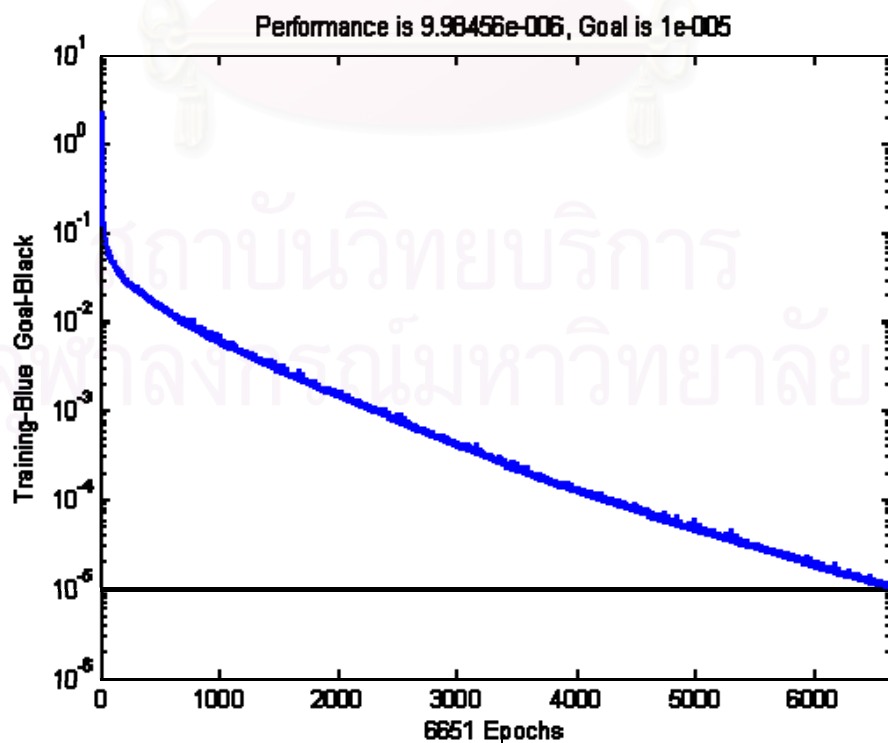
40950 Epochs    Time trained = 602.063900 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน purelin, purelin, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = tansig, logsig, purelin

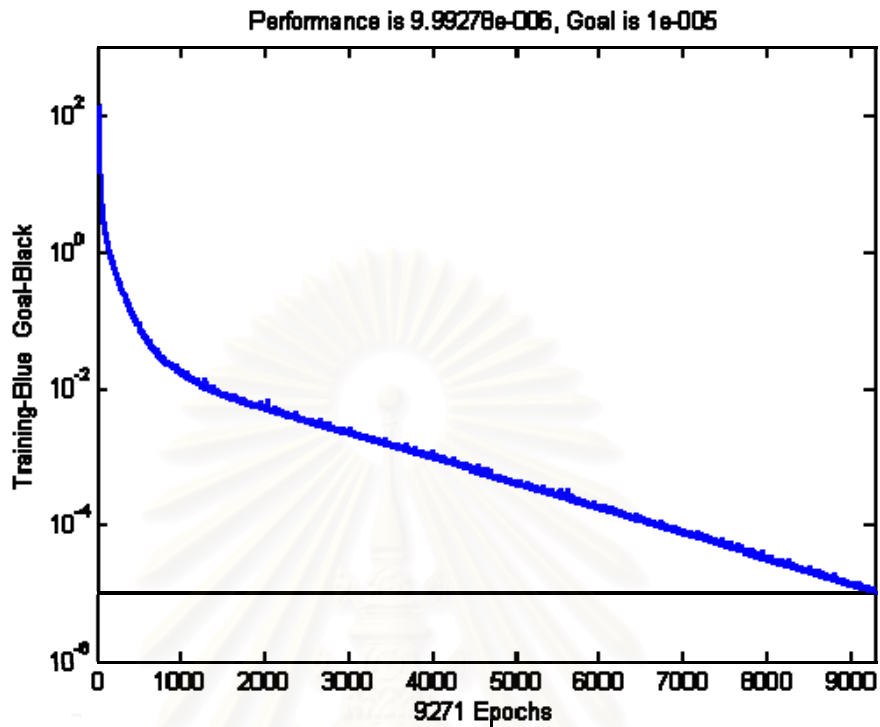
6651 Epochs    Time trained = 78.972359 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, logsig, purelin

Hidden node = 50, 50    Function = tansig, purelin, tansig

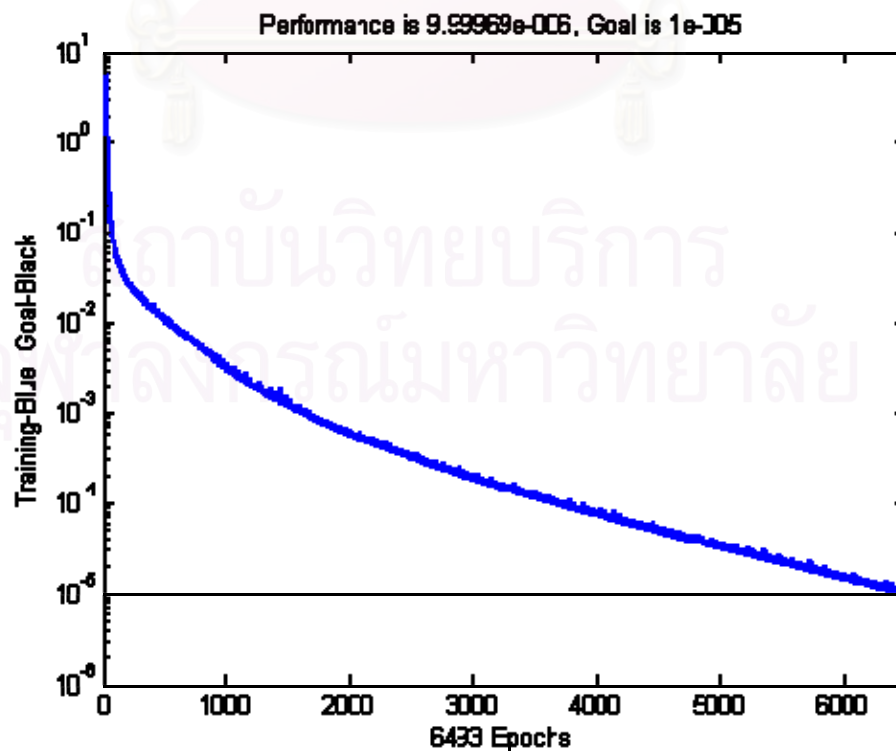
9271 Epochs    Time trained = 124.0883239 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, purelin, tansig

Hidden node = 50, 50    Function = tansig, tansig, purelin

6493 Epochs    Time trained = 75.249779 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฟังก์ชัน tansig, tansig, purelin



จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่ามีชุดฟังก์ชันที่ใช้ได้ในการสอนจำนวน 6 ชุด คือ logsig, purelin, purelin / logsig, tansig, purelin / purelin, purelin, purelin / tansig, logsig, purelin / tansig, purelin, purelin และ tansig, tansig, purelin เนื่องจากกลุ่มเข้าสู่ค่าความผิดพลาดสูงสุดตามต้องการได้ ( $10^{-5}$ ) จึงนำเอาฟังก์ชันทั้ง 6 ชุดนี้มาใช้ในการทำนาย

#### 4.3.2 ผลการทำนาย

ตารางที่ 4.8 แบบ White Gaussian Noise (Vertical)

y	function			x				
	first layer	second layer	third layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	purelin	91.05	80.63	72.30	63.35	50.05
	logsig	tansig	purelin	92.18	83.73	75.73	68.97	57.35
	purelin	purelin	purelin	5.97	5.28	5.13	4.98	5.58
	tansig	logsig	purelin	94.20	88.47	82.00	76.90	66.65
	tansig	purelin	purelin	80.93	62.67	49.15	38.38	23.32
	tansig	tansig	purelin	91.05	80.63	72.30	63.35	50.05
2	logsig	purelin	purelin	89.53	80.83	71.38	62.82	46.52
	logsig	tansig	purelin	91.10	83.35	75.35	67.48	52.42
	purelin	purelin	purelin	5.93	4.98	5.78	5.55	5.10
	tansig	logsig	purelin	93.38	87.30	81.23	75.10	62.92
	tansig	purelin	purelin	79.40	61.55	45.82	34.85	20.40
	tansig	tansig	purelin	89.53	80.83	71.38	62.82	46.52
3	logsig	purelin	purelin	90.05	78.57	70.58	61.87	47.48
	logsig	tansig	purelin	91.08	81.68	74.25	66.48	53.23
	purelin	purelin	purelin	5.15	5.40	5.23	5.33	5.12
	tansig	logsig	purelin	93.18	85.82	79.18	73.32	62.22
	tansig	purelin	purelin	77.43	56.67	41.47	32.10	19.45
	tansig	tansig	purelin	90.05	78.57	70.58	61.87	47.48
5	logsig	purelin	purelin	88.45	78.33	68.70	58.45	42.00
	logsig	tansig	purelin	89.72	80.72	71.40	62.25	46.92
	purelin	purelin	purelin	5.23	5.15	4.97	5.57	5.30
	tansig	logsig	purelin	91.63	83.77	76.55	68.65	55.25
	tansig	purelin	purelin	71.48	49.67	34.58	25.02	15.48
	tansig	tansig	purelin	88.45	78.33	68.70	58.45	42.00
10	logsig	purelin	purelin	85.17	71.73	59.78	48.20	31.22
	logsig	tansig	purelin	86.58	74.68	63.32	53.43	36.08
	purelin	purelin	purelin	4.95	4.75	4.97	5.13	5.03
	tansig	logsig	purelin	88.45	78.53	68.42	59.80	42.95
	tansig	purelin	purelin	54.20	30.20	19.75	14.48	10.10
	tansig	tansig	purelin	85.17	71.73	59.78	48.20	31.22
20	logsig	purelin	purelin	63.27	38.20	25.88	17.62	10.75
	logsig	tansig	purelin	68.62	46.27	32.92	23.23	15.62
	purelin	purelin	purelin	4.70	4.67	5.15	5.32	4.97
	tansig	logsig	purelin	77.17	56.52	41.98	30.27	17.75
	tansig	purelin	purelin	19.32	10.67	8.70	8.45	7.72
	tansig	tansig	purelin	63.27	38.20	25.88	17.62	10.75

ตารางที่ 4.9 แบบกำหนดค่า (Vertical)

y	function			x				
	first layer	second layer	third layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	purelin	92.52	84.93	76.20	70.83	58.93
	logsig	tansig	purelin	93.98	87.97	82.07	77.47	68.50
	purelin	purelin	purelin	5.65	5.32	5.82	5.22	5.53
	tansig	logsig	purelin	97.10	93.93	90.60	88.08	80.90
	tansig	purelin	purelin	89.12	78.53	66.98	59.22	43.43
	tansig	tansig	purelin	92.53	84.93	76.20	70.83	58.93
2	logsig	purelin	purelin	89.37	79.15	70.93	61.07	44.30
	logsig	tansig	purelin	90.30	81.28	73.08	64.78	48.85
	purelin	purelin	purelin	5.50	6.03	5.57	5.17	5.48
	tansig	logsig	purelin	93.02	86.02	79.55	72.82	60.58
	tansig	purelin	purelin	82.40	66.62	52.27	43.50	29.50
	tansig	tansig	purelin	89.37	79.15	70.93	61.07	44.30
3	logsig	purelin	purelin	88.67	76.80	66.35	56.73	41.08
	logsig	tansig	purelin	89.87	77.93	69.17	59.38	44.30
	purelin	purelin	purelin	5.93	5.80	4.98	5.18	4.57
	tansig	logsig	purelin	91.57	82.18	74.28	66.63	53.68
	tansig	purelin	purelin	75.97	53.73	41.00	33.92	23.75
	tansig	tansig	purelin	88.67	76.80	66.35	56.73	41.08
5	logsig	purelin	purelin	85.57	73.57	61.03	48.22	31.08
	logsig	tansig	purelin	86.72	75.47	62.90	51.43	35.28
	purelin	purelin	purelin	5.23	4.57	4.90	4.95	4.97
	tansig	logsig	purelin	88.37	78.43	68.73	57.55	41.93
	tansig	purelin	purelin	60.88	40.45	30.25	24.08	17.78
	tansig	tansig	purelin	85.57	73.57	61.03	48.22	31.08
10	logsig	purelin	purelin	77.22	56.93	39.53	29.08	16.40
	logsig	tansig	purelin	80.55	61.62	46.02	35.13	20.15
	purelin	purelin	purelin	4.95	5.15	5.35	5.43	4.82
	tansig	logsig	purelin	83.88	68.55	54.95	43.25	27.08
	tansig	purelin	purelin	39.12	26.10	19.92	17.57	13.62
	tansig	tansig	purelin	77.22	56.93	39.53	29.08	16.40
20	logsig	purelin	purelin	56.37	31.47	20.30	14.42	9.45
	logsig	tansig	purelin	59.97	35.72	23.18	17.20	11.67
	purelin	purelin	purelin	4.98	5.42	4.68	5.23	4.83
	tansig	logsig	purelin	72.83	51.03	34.10	24.73	15.52
	tansig	purelin	purelin	26.02	17.80	13.73	12.25	11.12
	tansig	tansig	purelin	56.37	31.47	20.30	14.42	9.45

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 แบบ White Gaussian Noise (Horizontal)

y	function			x				
	first layer	second layer	third layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	purelin	91.30	82.80	73.55	65.37	51.02
	logsig	tansig	purelin	90.73	82.75	73.98	66.83	52.48
	purelin	purelin	purelin	5.78	5.25	5.48	5.28	5.18
	tansig	logsig	purelin	92.55	85.63	77.60	70.23	58.35
	tansig	purelin	purelin	80.58	62.02	47.83	36.83	23.38
	tansig	tansig	purelin	91.30	82.80	73.55	65.37	51.02
2	logsig	purelin	purelin	90.22	81.20	72.52	64.72	48.82
	logsig	tansig	purelin	90.37	81.22	73.52	64.47	49.78
	purelin	purelin	purelin	4.98	5.37	4.63	4.92	5.10
	tansig	logsig	purelin	91.50	84.00	76.87	68.98	56.25
	tansig	purelin	purelin	78.08	58.90	43.70	33.23	21.88
	tansig	tansig	purelin	90.22	81.20	72.52	64.72	48.82
3	logsig	purelin	purelin	90.15	80.37	71.42	63.30	47.50
	logsig	tansig	purelin	89.97	80.03	70.93	63.13	47.48
	purelin	purelin	purelin	5.47	5.17	5.27	5.30	4.38
	tansig	logsig	purelin	91.72	83.18	74.85	68.17	53.12
	tansig	purelin	purelin	75.03	54.85	40.18	30.17	19.62
	tansig	tansig	purelin	90.15	80.37	71.42	63.30	47.50
5	logsig	purelin	purelin	88.25	78.27	67.82	59.07	42.88
	logsig	tansig	purelin	87.82	77.85	67.65	57.87	42.33
	purelin	purelin	purelin	5.75	5.12	4.47	4.80	5.30
	tansig	logsig	purelin	89.80	80.92	72.35	63.95	49.17
	tansig	purelin	purelin	69.43	47.00	32.00	25.58	17.47
	tansig	tansig	purelin	88.25	78.27	67.82	59.07	42.88
10	logsig	purelin	purelin	84.78	69.42	55.18	43.92	29.05
	logsig	tansig	purelin	83.80	68.65	55.08	43.80	27.20
	purelin	purelin	purelin	5.40	5.03	5.05	5.32	5.03
	tansig	logsig	purelin	87.63	76.42	64.13	55.45	38.18
	tansig	purelin	purelin	49.87	28.32	19.83	15.93	12.43
	tansig	tansig	purelin	84.78	69.42	55.18	43.92	29.05
20	logsig	purelin	purelin	52.90	28.20	16.90	12.15	7.78
	logsig	tansig	purelin	57.83	31.78	19.05	12.33	6.63
	purelin	purelin	purelin	5.03	4.87	4.85	4.98	4.55
	tansig	logsig	purelin	77.92	56.77	39.65	28.08	14.28
	tansig	purelin	purelin	20.50	11.70	10.27	10.35	8.28
	tansig	tansig	purelin	52.90	28.20	16.90	12.15	7.78

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 แบบกำหนดค่า (Horizontal)

y	function			x				
	first layer	second layer	third layer	5	10	15	20	30
1	logsig	purelin	purelin	93.15	86.53	79.35	73.60	62.53
	logsig	tansig	purelin	92.78	87.23	80.38	74.55	63.25
	purelin	purelin	purelin	6.35	5.07	5.72	5.47	5.07
	tansig	logsig	purelin	94.83	89.68	84.82	79.55	70.03
	tansig	purelin	purelin	87.05	75.18	62.83	52.17	34.70
	tansig	tansig	purelin	94.07	87.48	80.18	75.73	64.37
2	logsig	purelin	purelin	89.73	78.80	70.43	61.48	45.82
	logsig	tansig	purelin	90.02	79.75	72.30	62.45	48.33
	purelin	purelin	purelin	5.82	5.38	5.38	5.20	4.75
	tansig	logsig	purelin	91.45	82.38	75.17	66.48	52.43
	tansig	purelin	purelin	79.20	59.55	43.83	33.75	22.18
	tansig	tansig	purelin	90.23	80.07	73.40	63.52	47.77
3	logsig	purelin	purelin	88.88	78.02	67.33	58.03	40.42
	logsig	tansig	purelin	88.70	77.08	65.70	57.53	40.43
	purelin	purelin	purelin	5.00	5.30	5.28	5.47	4.83
	tansig	logsig	purelin	89.58	79.78	69.85	61.18	46.00
	tansig	purelin	purelin	67.65	44.95	33.07	24.42	17.52
	tansig	tansig	purelin	89.58	78.97	69.05	59.47	43.27
5	logsig	purelin	purelin	85.43	71.40	58.17	45.67	31.17
	logsig	tansig	purelin	84.38	69.35	55.97	44.27	28.30
	purelin	purelin	purelin	4.85	5.03	4.62	4.88	4.62
	tansig	logsig	purelin	87.22	75.80	65.52	54.38	38.05
	tansig	purelin	purelin	49.93	27.82	20.05	15.95	11.62
	tansig	tansig	purelin	86.18	72.82	58.50	47.67	31.40
10	logsig	purelin	purelin	70.45	47.98	32.63	22.62	14.60
	logsig	tansig	purelin	72.50	49.93	32.67	22.38	11.02
	purelin	purelin	purelin	5.60	4.65	4.73	4.42	4.47
	tansig	logsig	purelin	84.25	68.70	53.47	42.40	23.78
	tansig	purelin	purelin	28.38	14.67	12.20	10.70	9.68
	tansig	tansig	purelin	72.17	50.12	34.75	24.32	15.82
20	logsig	purelin	purelin	43.52	20.88	12.82	8.50	6.10
	logsig	tansig	purelin	48.62	24.97	13.03	9.53	5.92
	purelin	purelin	purelin	5.65	5.05	4.97	5.40	4.67
	tansig	logsig	purelin	74.18	48.82	32.65	21.82	10.40
	tansig	purelin	purelin	16.07	11.17	9.63	9.47	9.05
	tansig	tansig	purelin	45.83	23.37	14.35	10.82	6.98

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ผลรวมแบบ Vertical

function			เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
first layer	second layer	third layer	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
logsig	purelin	purelin	61.49	56.95
logsig	tansig	purelin	65.54	60.40
purelin	purelin	purelin	5.21	5.24
tansig	logsig	purelin	71.32	67.40
tansig	purelin	purelin	36.78	40.35
tansig	tansig	purelin	61.49	56.95

ตารางที่ 4.13 ผลรวมแบบ Horizontal

function			เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
first layer	second layer	third layer	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
logsig	purelin	purelin	60.36	54.87
logsig	tansig	purelin	60.58	55.11
purelin	purelin	purelin	5.10	5.12
tansig	logsig	purelin	67.59	63.82
tansig	purelin	purelin	36.17	33.15
tansig	tansig	purelin	60.36	56.41

ตารางที่ 4.14 ผลรวมทั้งหมด

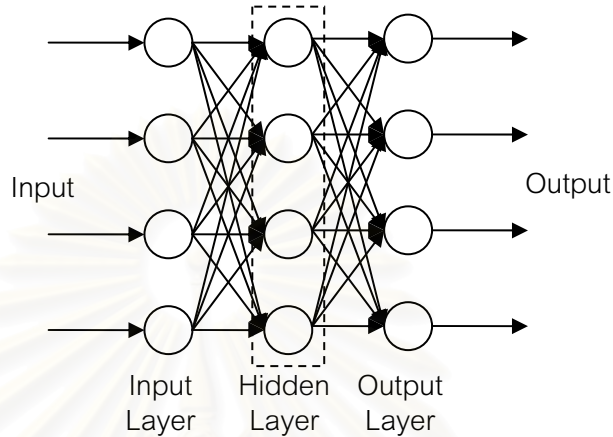
function			เปอร์เซ็นต์ความ ถูกต้อง
first layer	second layer	third layer	
logsig	purelin	purelin	58.42
logsig	tansig	purelin	60.41
purelin	purelin	purelin	5.17
tansig	logsig	purelin	67.53
tansig	purelin	purelin	36.61
tansig	tansig	purelin	58.80

สรุป

ชุดฟังก์ชัน tansig, logsig, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด และชุดฟังก์ชัน purelin, purelin, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุด

#### 4.4 จำนวนฮิดเดนโหนด

ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนฮิดเดนโหนดเป็น 100, 200 และ 500 ตามลำดับ โดยใช้ชุดฟังก์ชันเป็น logsig, purelin เพราะจากการทดลองที่ผ่านมาเป็นชุดฟังก์ชันที่ให้ผลการทดลองถูกต้องมากที่สุด

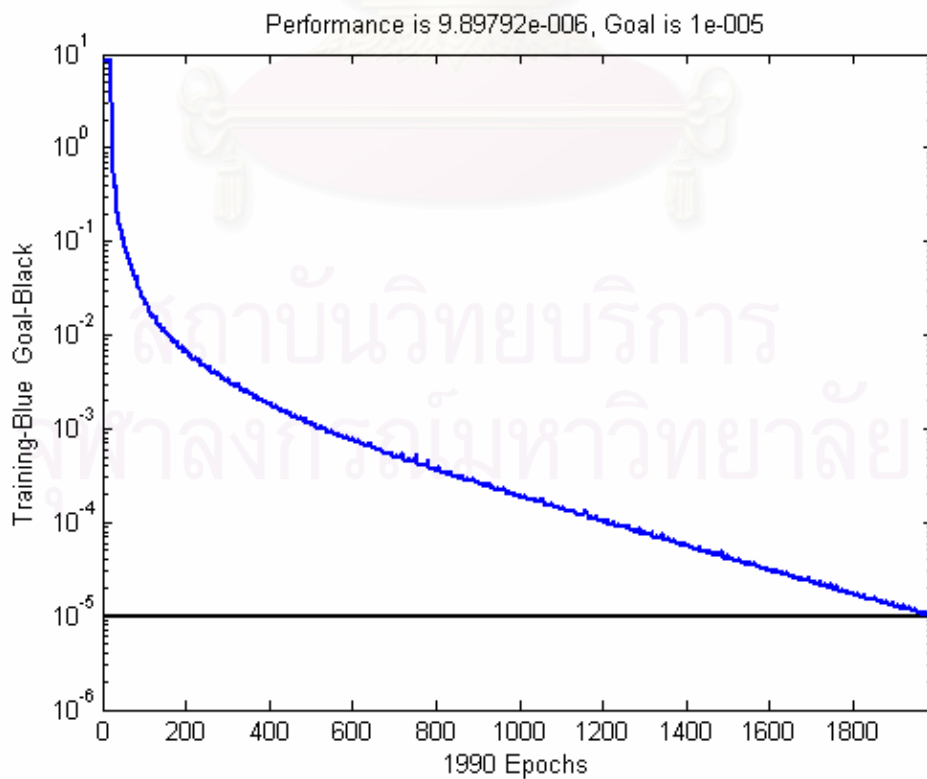


รูปที่ 4.24 ตำแหน่งฮิดเดนโหนดที่จะทำการปรับค่า

##### 4.4.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 100 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 100    Function = logsig, purelin

1990 Epochs    Time trained = 15.92206 sec    Maximum errors = 10<sup>-5</sup>



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 100 โหนด



## 4.4.2 ผลการทำนาย

ตารางที่ 4.15 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	92.42	92.90	84.77	86.07	78.08	79.60	71.92	72.82	59.04	60.34
2	91.65	88.77	83.62	79.46	75.98	69.51	69.07	59.92	55.37	44.30
3	91.25	87.92	82.61	76.56	74.64	64.88	66.62	55.02	52.85	37.40
5	89.97	85.12	80.91	70.57	71.22	57.35	63.11	44.57	47.10	26.41
10	87.43	75.48	75.20	53.09	63.34	36.68	52.27	24.68	35.29	11.16
20	68.55	53.38	44.39	26.67	28.78	15.81	18.93	8.87	9.02	3.79

ตารางที่ 4.16 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	93.0	94.4	81.9	87.5	74.8	83.7	69.0	76.3	53.1	66.0
2	91.3	90.4	82.2	79.6	72.9	68.9	63.9	61.6	48.6	46.7
3	90.5	88.4	81.5	77.8	71.3	66.0	61.6	54.3	45.7	38.4
5	88.3	85.7	77.9	70.3	68.4	58.0	60.0	49.9	45.4	31.9
10	85.4	77.5	71.5	57.8	57.5	41.8	45.3	32.4	30.8	18.3
20	65.3	59.5	41.8	32.3	28.9	20.6	19.8	16.5	10.9	9.7

ตารางที่ 4.17 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.7	90.7	84.9	84.9	75.7	75.7	68.1	68.1	55.7	55.7
2	90.1	90.1	81.8	81.8	76.3	76.3	67.7	67.7	53.7	53.7
3	91.2	91.2	82.1	82.1	72.1	72.1	66.9	66.9	50.4	50.4
5	89.2	89.2	81.1	81.1	68.2	68.2	61.8	61.8	49.9	49.9
10	86.7	86.7	73.7	73.7	61.3	61.3	49.0	49.0	32.7	32.7
20	64.1	64.1	38.3	38.3	24.6	24.6	15.6	15.6	8.6	8.6

ตารางที่ 4.18 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.5	92.1	79.4	82.9	69.2	73.9	60.3	66.3	44.1	51.2
2	88.8	88.0	78.7	77.4	66.1	64.1	60.9	57.0	43.7	38.9
3	87.6	87.0	78.8	75.0	69.1	64.0	57.0	51.9	39.7	32.1
5	87.1	86.3	76.6	71.1	64.3	56.6	54.9	45.4	41.0	28.5
10	84.1	74.3	71.8	52.2	56.9	35.7	45.7	22.9	24.7	9.2
20	60.5	49.9	32.1	22.7	18.5	11.3	10.0	6.1	4.2	2.7

ตารางที่ 4.19 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.2	94.2	83.1	87.9	77.3	83.0	68.0	76.1	54.0	66.6
2	91.7	89.7	82.7	81.2	70.9	70.0	64.1	61.5	50.8	51.3
3	90.8	88.9	81.3	78.8	71.8	66.5	64.2	57.6	49.4	41.9
5	90.2	86.1	78.5	73.1	68.4	60.6	56.6	46.3	42.9	30.1
10	85.1	77.6	72.4	60.3	61.3	44.0	47.9	31.2	31.7	14.8
20	68.3	60.9	42.2	33.4	25.9	19.3	16.3	13.1	6.4	5.2

ตารางที่ 4.20 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.7	93.5	84.9	87.2	75.7	80.5	68.1	73.4	55.7	64.9
2	90.1	89.9	81.8	83.2	76.3	75.1	67.7	64.5	53.7	50.0
3	91.2	90.3	82.1	79.0	72.1	67.9	66.9	63.2	50.4	41.6
5	89.2	85.4	81.1	75.4	68.2	59.6	61.8	49.0	49.9	36.2
10	86.7	78.9	73.7	57.0	61.3	41.3	49.0	29.0	32.7	15.3
20	64.1	55.8	38.3	28.1	24.6	15.2	15.6	12.0	8.6	8.1

ตารางที่ 4.21 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.3	93.8	85.4	91.3	75.4	85.0	70.6	79.0	53.7	68.5
2	90.8	88.3	82.2	78.6	72.2	71.0	65.3	60.6	49.4	47.8
3	89.4	86.9	79.9	73.5	71.0	65.8	61.4	54.5	47.5	37.8
5	88.9	85.0	78.3	69.6	69.3	59.5	58.0	44.6	43.8	26.2
10	84.2	74.1	71.8	49.3	54.8	33.4	44.5	21.8	25.1	9.0
20	61.9	52.7	34.9	22.9	18.8	11.9	10.7	5.6	4.8	1.2

ตารางที่ 4.22 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.3	93.2	83.3	89.2	79.1	83.5	73.6	80.5	56.3	71.1
2	91.8	91.4	82.3	81.2	76.6	78.7	69.7	68.1	57.7	56.4
3	91.2	88.3	82.5	80.1	76.7	69.8	66.8	62.3	54.8	43.6
5	89.3	85.1	80.8	72.1	72.7	60.2	62.7	50.8	48.2	31.3
10	82.8	74.4	70.5	53.1	60.7	40.5	48.0	26.3	32.6	16.3
20	66.8	57.5	41.3	31.4	24.7	21.6	16.6	12.0	10.6	7.5

ตารางที่ 4.23 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.8	94.8	82.5	88.1	73.6	81.7	66.0	74.0	47.8	61.9
2	91.8	90.6	80.4	81.4	73.5	70.0	64.4	62.7	49.1	45.6
3	91.0	89.0	80.6	76.3	70.5	64.2	61.9	58.5	47.5	38.9
5	90.1	86.9	79.7	74.1	72.8	64.7	57.0	51.4	42.2	34.5
10	85.9	78.2	72.8	63.9	57.9	48.4	51.6	42.6	38.1	37.6
20	63.1	55.0	46.1	38.9	34.4	32.3	33.6	31.8	34.5	32.2

ตารางที่ 4.24 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	92.3	94.6	82.6	87.9	73.7	77.8	67.9	74.4	53.4	60.5
2	92.1	90.9	83.8	83.9	75.6	73.8	67.3	67.9	50.2	51.4
3	90.3	89.6	79.7	78.1	73.6	71.2	65.6	58.8	49.0	40.5
5	90.4	87.1	82.3	74.9	74.1	62.4	61.0	46.3	42.5	26.0
10	85.5	73.9	74.2	51.7	57.5	33.1	49.0	22.8	29.6	11.8
20	63.3	52.6	33.6	24.2	16.4	13.5	12.2	7.9	3.7	3.6

ตารางที่ 4.25 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.3	92.1	79.8	80.9	73.0	74.1	59.3	67.8	45.1	52.5
2	88.2	88.0	81.5	78.8	68.9	66.6	61.6	59.8	42.1	39.0
3	89.2	88.0	78.4	74.8	68.6	63.9	56.0	51.7	42.5	36.5
5	87.2	85.4	75.9	70.7	66.4	57.4	51.9	44.2	37.4	27.1
10	83.6	74.8	70.1	49.8	54.2	33.9	43.0	26.0	25.5	12.6
20	60.3	49.6	33.0	24.6	19.7	17.1	12.4	9.7	7.6	3.4

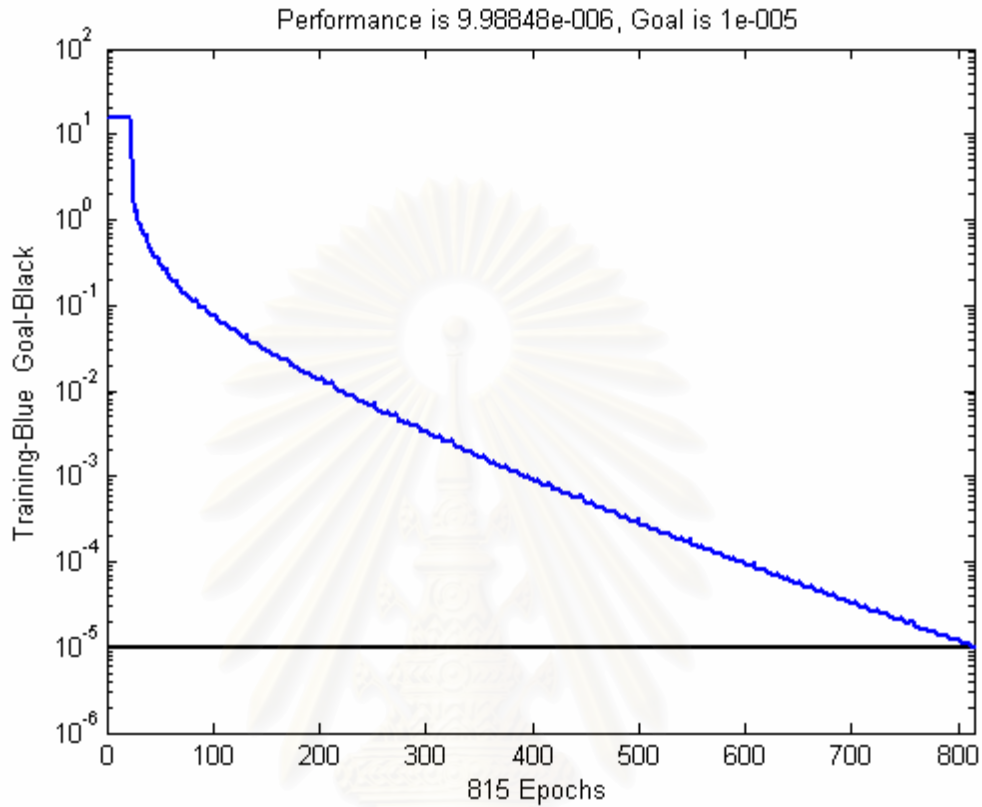
ตารางที่ 4.26 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	92.8	94.1	86.3	87.9	78.3	83.3	71.2	78.7	57.7	65.8
2	91.9	92.3	84.7	85.6	75.9	75.8	72.2	71.3	55.8	59.2
3	93.3	91.0	83.3	82.4	76.3	71.7	71.2	65.2	54.2	46.1
5	91.0	89.4	81.5	76.0	73.8	64.0	65.0	51.8	47.7	34.8
10	87.0	79.1	76.7	60.6	62.7	44.8	52.3	30.7	33.8	16.5
20	66.3	58.7	43.8	36.7	28.2	21.5	19.6	15.1	13.0	9.1

#### 4.4.3 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 200 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 200    Function = logsig, purelin

815 Epochs    Time trained = 10.901743 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 200 โหนด

#### 4.4.4 ผลการทำนาย

ตารางที่ 4.27 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	89.18	91.67	79.42	82.53	69.52	74.39	60.08	66.96	44.01	53.02
2	88.51	88.24	77.52	77.02	68.03	66.45	57.29	55.90	41.23	39.71
3	87.82	86.83	76.84	73.19	66.22	61.22	56.14	50.67	38.84	31.40
5	86.69	83.10	74.37	66.21	62.76	50.28	51.17	36.99	34.09	20.09
10	82.67	68.45	65.51	44.20	49.42	29.50	37.28	20.67	20.73	13.57
20	54.72	47.01	31.44	27.93	23.35	22.20	19.46	19.90	15.82	19.75

ตารางที่ 4.28 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	92.3	96.6	86.5	92.0	78.8	87.8	70.3	82.8	60.6	76.6
2	91.8	91.5	83.8	84.3	80.2	78.4	74.0	68.6	57.0	56.3
3	91.5	89.6	83.2	78.4	72.9	66.4	65.4	57.7	53.8	44.7
5	91.1	85.2	81.4	72.6	74.3	61.6	63.1	45.4	45.8	27.3
10	87.0	77.0	72.3	48.7	61.6	36.6	47.7	26.2	28.1	13.5
20	60.7	53.3	33.3	26.2	19.2	15.4	11.9	8.6	6.5	5.2

ตารางที่ 4.29 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.5	94.1	80.8	86.8	74.5	79.3	66.0	75.2	51.1	61.7
2	90.9	90.3	81.0	80.2	72.4	72.2	63.8	63.9	46.4	47.1
3	90.2	88.4	79.3	75.7	72.1	67.6	61.6	54.6	44.9	36.5
5	88.7	85.2	76.1	68.7	64.8	53.5	56.7	44.7	39.3	23.7
10	85.0	73.8	69.7	51.1	56.0	35.9	44.8	22.4	27.7	9.8
20	60.3	48.7	33.0	24.2	19.6	15.5	12.2	8.8	4.6	3.3

ตารางที่ 4.30 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.5	93.2	81.7	86.6	72.6	78.6	66.0	73.6	47.4	62.4
2	90.2	90.7	79.0	79.9	71.7	70.9	65.9	62.6	46.8	46.9
3	89.1	86.4	79.1	75.9	70.7	64.6	59.0	51.3	42.9	34.2
5	88.3	82.7	75.6	68.2	67.0	56.2	57.9	44.7	38.7	25.9
10	85.3	78.8	69.7	56.9	60.1	42.7	47.9	32.9	29.1	23.7
20	64.0	56.2	39.1	32.2	27.4	23.8	23.3	20.8	23.4	22.8

ตารางที่ 4.31 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	92.3	94.1	84.1	88.5	78.6	82.6	73.3	81.1	57.4	69.7
2	93.0	93.2	84.8	82.2	79.7	76.3	70.1	69.1	58.7	56.3
3	91.7	92.1	84.0	83.8	75.4	72.2	70.2	66.4	56.4	54.6
5	92.3	90.9	84.3	81.6	75.9	70.9	69.7	61.2	54.9	50.5
10	90.2	83.4	81.2	65.6	70.6	56.9	61.6	47.9	48.1	42.2
20	69.0	59.8	48.8	42.0	41.0	33.6	33.9	32.5	33.4	32.8

ตารางที่ 4.32 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	96.0	96.6	84.9	95.0	86.7	90.7	82.9	88.2	75.5	82.1
2	94.1	97.0	81.8	92.5	86.2	86.4	80.7	80.9	70.1	70.3
3	94.4	93.4	82.1	87.7	84.7	79.5	78.0	73.9	68.3	61.8
5	94.0	88.4	81.1	77.5	81.7	70.0	76.4	58.3	63.6	44.3
10	89.2	79.9	73.7	61.8	68.9	46.0	59.4	36.7	44.8	24.6
20	64.6	53.0	38.3	32.3	29.4	22.7	23.4	19.3	18.1	18.0

ตารางที่ 4.33 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	88.7	90.7	78.6	80.5	68.2	73.0	60.9	68.3	41.8	52.6
2	88.7	87.4	77.7	78.0	67.9	66.0	59.3	55.6	40.3	37.5
3	89.6	87.9	75.7	72.1	62.6	58.9	55.4	50.1	37.3	29.7
5	87.4	82.6	75.1	67.8	64.6	50.9	53.5	40.4	34.2	20.0
10	81.9	67.2	64.3	38.7	51.4	24.4	36.2	15.2	19.7	7.3
20	48.4	37.2	23.0	14.9	12.7	8.2	6.4	3.8	3.4	1.7

ตารางที่ 4.34 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.3	90.5	77.5	81.0	68.9	75.1	60.1	67.8	40.9	52.5
2	88.9	88.1	77.2	77.0	67.4	66.0	55.8	54.6	39.4	36.6
3	87.9	87.2	74.8	70.2	64.0	62.2	53.5	47.9	34.8	26.5
5	88.3	81.6	74.7	64.0	61.5	47.3	51.3	33.9	30.6	15.9
10	79.9	63.3	61.6	36.5	42.0	16.7	28.4	10.6	12.5	4.7
20	41.9	30.2	17.0	11.2	7.4	4.0	4.0	2.0	1.6	0.4

ตารางที่ 4.35 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.8	90.1	79.2	81.8	66.3	71.4	55.8	61.3	38.8	47.2
2	91.8	87.5	75.2	76.2	64.2	64.2	56.1	54.2	38.5	36.7
3	91.0	84.2	73.5	72.5	65.1	60.1	51.1	46.0	35.2	25.9
5	90.1	79.6	71.1	60.5	58.9	46.0	48.9	34.3	30.4	15.1
10	85.9	63.2	58.1	33.9	45.4	19.3	31.0	11.1	15.1	4.6
20	63.1	31.3	18.9	10.0	9.3	6.7	5.1	3.5	1.6	0.7

ตารางที่ 4.36 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	94.0	95.0	84.8	86.0	78.9	80.3	73.8	74.2	63.0	63.6
2	93.0	93.1	84.8	83.8	78.0	78.2	71.8	73.9	59.4	62.4
3	91.4	90.5	86.0	81.5	77.2	71.9	70.0	65.6	59.0	55.8
5	91.5	85.0	81.7	71.8	74.4	60.3	63.0	47.2	52.3	31.7
10	84.9	67.7	68.7	41.6	54.0	28.5	45.5	19.1	30.5	12.7
20	50.8	38.2	26.6	20.8	18.0	14.0	10.9	8.3	7.6	4.1

ตารางที่ 4.37 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	88.9	90.1	77.8	80.2	66.9	70.7	59.6	64.5	41.6	48.2
2	87.1	86.4	77.1	76.4	66.6	65.7	57.2	56.0	38.6	37.7
3	86.7	85.2	75.9	73.5	66.2	63.1	54.5	50.4	33.9	31.7
5	86.1	81.7	74.7	67.9	61.7	52.7	52.7	40.6	34.0	22.1
10	81.5	69.4	68.0	48.9	48.4	29.5	40.9	18.8	22.1	9.5
20	52.4	43.8	31.3	24.2	20.1	15.9	13.7	10.8	6.9	5.4

ตารางที่ 4.38 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Horizontal)

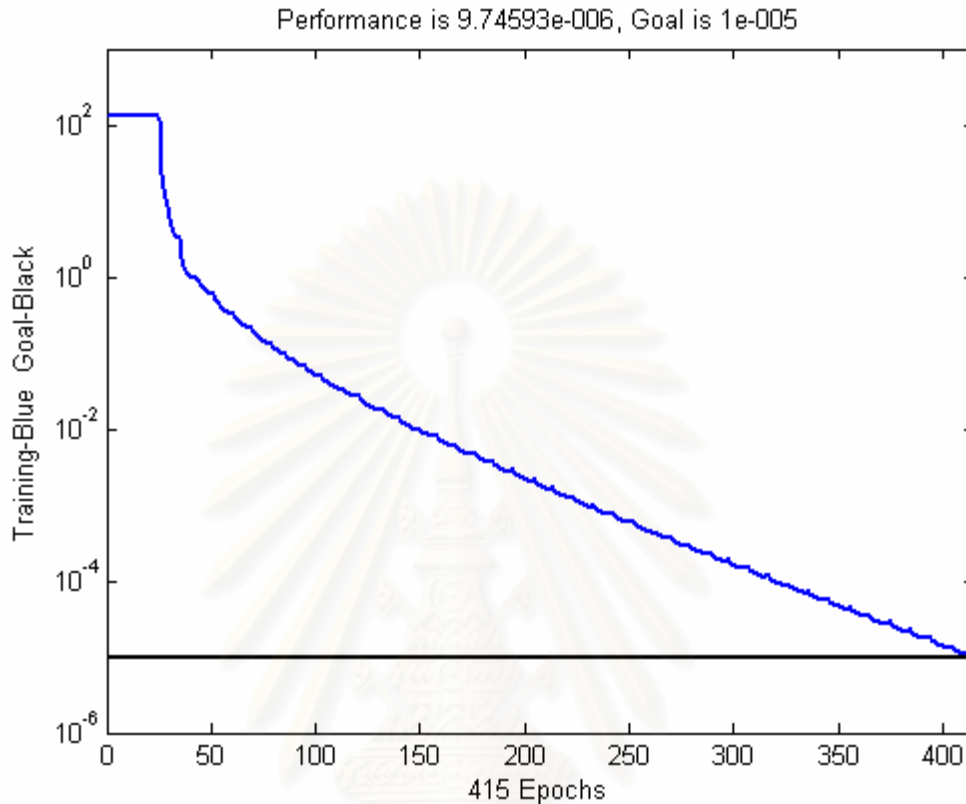
y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.3	93.9	82.5	88.7	74.6	80.0	61.6	74.5	50.3	64.5
2	91.5	88.5	80.8	80.6	71.2	69.6	59.1	56.7	48.2	45.2
3	90.8	89.3	79.6	75.8	69.4	65.4	60.4	52.9	45.8	37.4
5	88.7	85.2	74.8	66.0	64.8	52.3	54.7	39.7	39.3	22.4
10	83.2	66.5	65.6	41.3	57.9	30.1	39.9	20.8	21.4	7.3
20	48.4	42.8	26.3	21.3	16.3	12.1	9.9	5.6	4.4	2.7



#### 4.4.5 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 500 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 500    Function = logsig, purelin

415 Epochs    Time trained = 9.586696 sec    Maximum errors = 10<sup>-5</sup>



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด

#### 4.4.6 ผลการทำนาย

ตารางที่ 4.39 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.1	89.8	76.1	80.0	66.0	72.1	53.8	61.2	36.3	48.9
2	87.0	87.2	75.7	76.1	65.5	65.1	54.9	54.5	33.4	33.1
3	86.0	85.0	75.5	72.8	63.4	56.7	48.1	38.2	29.9	21.3
5	85.8	79.0	71.1	53.6	57.1	37.3	39.3	22.9	24.6	12.9
10	75.5	48.6	49.3	23.3	33.1	13.0	22.5	7.3	10.5	2.2
20	29.1	19.1	12.5	6.5	4.7	2.9	2.2	2.4	0.9	0.8

ตารางที่ 4.40 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Vertical)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.8	93.6	81.3	86.9	71.3	78.7	62.1	73.4	49.2	63.1
2	89.8	90.7	79.0	77.9	69.9	69.1	59.2	61.8	44.9	45.4
3	89.5	87.4	78.0	72.6	69.1	60.7	57.1	51.3	44.4	34.4
5	88.5	80.6	74.0	61.4	64.7	45.3	50.0	32.3	31.2	18.7
10	77.4	57.5	59.4	34.3	43.3	21.3	31.8	14.3	18.1	7.9
20	37.1	35.0	23.8	16.0	13.7	9.4	8.2	9.6	4.6	4.7

ตารางที่ 4.41 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	87.6	88.7	75.8	77.9	63.8	66.7	52.6	57.9	36.3	41.2
2	86.5	87.2	76.6	75.5	61.3	60.4	49.8	49.6	35.9	34.1
3	88.8	86.9	72.9	70.4	59.4	56.1	45.2	41.2	30.6	23.7
5	85.4	78.5	69.8	54.4	54.5	37.1	44.5	24.9	25.5	11.0
10	76.0	53.2	56.3	28.3	39.3	15.5	26.2	8.8	11.5	3.4
20	36.3	27.5	15.7	10.2	5.9	5.3	3.5	4.4	1.8	1.0

ตารางที่ 4.42 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	88.2	90.5	79.5	82.3	63.7	71.1	58.5	66.2	40.5	52.5
2	86.1	85.1	77.7	75.5	65.2	63.3	56.3	54.2	36.8	34.8
3	86.9	84.3	76.6	73.3	65.7	60.3	52.6	50.0	31.3	29.4
5	84.6	78.7	72.7	61.2	60.1	48.9	50.6	36.5	32.0	23.2
10	81.6	59.8	58.9	38.7	44.3	24.6	33.0	15.1	22.8	12.7
20	41.2	30.7	20.9	16.5	13.6	10.1	10.1	7.2	8.8	8.0

ตารางที่ 4.43 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	88.5	89.3	77.9	79.7	65.1	71.1	57.2	66.0	40.0	53.3
2	89.3	88.6	77.2	75.7	67.3	66.6	56.8	55.1	37.4	37.6
3	87.2	85.9	73.4	68.7	64.0	57.0	55.1	46.6	31.6	23.7
5	84.7	75.8	71.4	59.0	58.7	40.2	45.0	30.7	31.1	15.3
10	77.5	58.8	58.2	32.7	40.9	20.9	29.2	15.1	15.2	6.7
20	43.3	34.0	20.5	15.4	12.6	12.0	9.8	6.5	5.2	5.1

ตารางที่ 4.44 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Vertical)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	91.1	91.5	81.2	82.3	72.9	74.4	65.4	68.9	50.2	58.3
2	91.6	91.4	82.1	82.9	72.2	72.2	61.4	63.3	50.7	50.6
3	91.6	89.6	80.6	77.1	69.7	66.4	62.2	57.5	46.9	41.5
5	88.8	83.5	77.4	66.5	67.3	53.4	58.6	42.5	43.4	30.7
10	81.5	64.6	66.1	46.8	51.3	33.5	43.2	32.0	31.9	31.6
20	49.5	42.3	35.4	31.5	29.6	27.7	28.6	30.9	31.3	30.5

ตารางที่ 4.45 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (7-Horizontal)

y \ x	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	86.4	87.1	74.2	76.9	60.1	66.1	49.3	58.9	31.6	40.2
2	84.8	85.2	71.8	72.0	58.7	59.8	49.0	47.5	27.3	28.0
3	83.5	81.6	70.2	63.9	54.5	48.6	44.1	34.3	24.4	19.4
5	80.5	69.0	64.9	47.0	50.4	32.6	36.9	17.8	18.7	7.5
10	69.3	44.7	47.8	22.0	27.8	9.2	19.5	4.9	6.7	1.8
20	28.1	19.9	8.1	4.4	3.4	2.1	1.2	0.9	0.4	0.0

ตารางที่ 4.46 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (H-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	86.6	87.1	73.6	76.2	57.6	61.7	46.1	52.2	31.3	36.9
2	85.7	86.2	70.9	71.6	57.6	58.8	46.8	46.5	29.0	30.6
3	84.2	83.1	69.8	66.2	55.0	50.6	43.4	37.9	25.8	19.3
5	83.8	73.8	66.1	50.8	51.3	35.1	36.7	21.1	21.7	10.4
10	71.8	51.5	49.0	26.8	32.1	16.3	23.0	13.5	11.4	5.9
20	33.3	26.5	17.3	10.0	11.5	8.7	6.7	5.1	2.4	3.3

ตารางที่ 4.47 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (I-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	87.4	89.6	74.6	79.8	62.7	66.4	52.9	60.1	32.9	43.1
2	86.2	86.1	72.4	73.2	60.5	59.5	47.4	48.3	29.4	28.7
3	86.8	84.5	72.5	66.1	59.4	51.5	44.1	38.2	26.7	18.1
5	82.4	71.1	64.1	44.2	48.5	30.3	39.3	20.0	22.0	9.5
10	70.6	43.5	47.2	22.0	31.0	12.3	19.2	6.5	8.1	2.9
20	29.8	24.3	10.0	7.3	3.8	1.9	3.4	1.4	0.6	0.2

ตารางที่ 4.48 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (L-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.7	87.1	78.4	75.9	69.9	68.5	61.3	57.2	43.9	37.9
2	90.0	86.2	77.7	72.8	69.5	63.5	58.7	49.1	39.7	32.9
3	85.7	83.7	77.2	70.4	66.2	55.0	58.1	46.6	42.3	26.5
5	86.6	78.7	68.2	56.0	62.2	39.9	51.6	29.5	34.4	16.8
10	79.3	53.6	55.6	33.1	43.2	24.0	36.1	18.7	22.3	20.6
20	40.7	29.7	27.5	18.0	21.1	16.5	20.8	16.7	18.0	20.4

ตารางที่ 4.49 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (O-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	90.4	90.9	83.5	85.4	67.5	76.2	61.8	70.8	49.7	62.8
2	88.4	88.4	78.8	78.7	72.7	72.6	57.6	59.8	43.4	43.7
3	88.4	83.8	73.2	70.5	65.4	57.8	55.4	45.4	38.5	33.4
5	86.8	77.4	75.6	58.5	59.8	44.7	52.0	34.2	31.7	19.5
10	76.2	54.5	57.0	35.2	42.9	22.4	34.4	18.6	20.0	10.7
20	40.9	34.5	23.3	18.4	15.4	14.3	11.4	9.7	6.7	4.7

ตารางที่ 4.50 แบบ White Gaussian Noise และแบบกำหนดค่า (X-Horizontal)

x \ y	5		10		15		20		30	
	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า	WGN	กำหนดค่า
1	85.5	87.1	73.0	75.9	63.3	68.5	52.4	57.2	31.8	37.9
2	85.7	86.2	72.9	72.8	63.3	63.5	48.2	49.1	31.6	32.9
3	84.4	83.7	72.2	70.4	59.2	55.0	50.3	46.6	30.4	26.5
5	84.6	78.7	67.7	56.0	55.8	39.9	43.9	29.5	24.5	16.8
10	76.1	53.6	55.9	33.1	40.3	24.0	29.4	18.7	18.6	20.6
20	37.2	29.7	20.9	18.0	18.6	16.5	14.4	16.7	21.3	20.4

จากผลการทดลองจะเห็นว่า

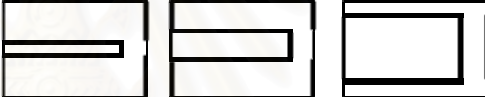


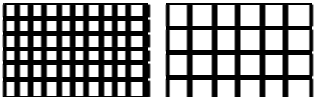
จำนวนฮิตเดนโหนด 100 โหนด โครงข่ายสามารถทำนายได้ถูกต้อง คิดเป็น 61.43 %

จำนวนฮิตเดนโหนด 200 โหนด โครงข่ายสามารถทำนายได้ถูกต้อง คิดเป็น 57.65 %

จำนวนฮิตเดนโหนด 500 โหนด โครงข่ายสามารถทำนายได้ถูกต้อง คิดเป็น 49.34 %

#### 4.5 แผ่นวงจรพิมพ์ชุดที่ 2

ในงานช่างต้นแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้จะมีรูปร่างแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ แบบตัว I, H, L, O, X และแบบเลข 7 ซึ่งแตกต่างกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริง ดังนั้นจึงได้ออกแบบสร้างแผ่นวงจรพิมพ์อีกชุดที่มีลักษณะหลักๆ คล้ายกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีทั่วไปขึ้นมาอีก 16 แบบ เพื่อเพิ่มตัวอย่างการทดลองการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล และทดสอบดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมยังสามารถแยกได้ถูกต้องหรือไม่ ประกอบด้วย

1. การปรับขนาดรูปจากใหญ่ไปเล็ก 
2. การปรับความยาวของเส้นทองแดง ที่มีลักษณะคล้ายสายอากาศไดโพล 
3. การปรับลายทองแดงเป็นแบบลูกคลื่น 
4. การใช้กรวด์เพลนเป็นแบบเต็มแผ่น, แบบตาราง (grid) ถี่และห่าง 



รูปที่ 4.28 รูปแผ่นวงจรพิมพ์ชุดที่ 2

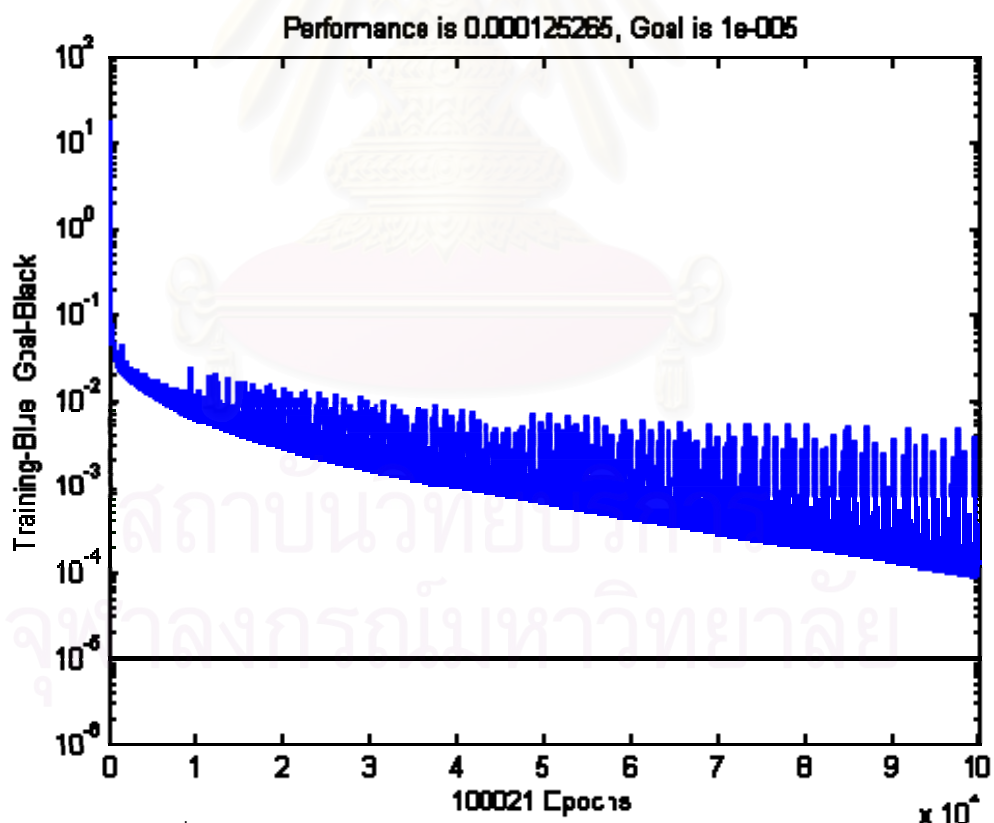
ในการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนฮิดเดนโหนดเป็น 200, 500, 1000, 1500, 2000, 5000 และชั้นฮิดเดนจำนวน 2 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นประกอบด้วยโหนดฮิดเดน 1000 โหนดตามลำดับ โดยใช้ชุดฟังก์ชันเป็น logsig, purelin และ tansig, logsig, purelin สำหรับชั้นฮิดเดน 2 ชั้น เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาเป็นชุดฟังก์ชันที่ให้ผลการทดลองถูกต้องมากที่สุด

ในการทำนายจะใส่สัญญาณรบกวน 2 แบบเหมือนเดิม คือ แบบกำหนดค่า และแบบ White Gaussian Noise โดย  $x$  คือจำนวนโหนดที่ใส่สัญญาณรบกวน และ  $y$  เป็นค่าระหว่าง 0 ถึง  $y$  ที่ถูกสุ่มขึ้นมาสำหรับแบบกำหนดค่า และคือค่ากำลัง (power) ของ White Gaussian Noise ที่สุ่มขึ้นมา จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าในโหนดโดยทำการบวก หรือลบ ค่าที่สุ่มได้จาก  $y$  ลงในโหนดที่จะใส่สัญญาณรบกวน โดยกำหนดค่า  $x$  และ  $y$  เหมือนการทดลองข้างต้น

#### 4.5.1 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 200 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 200    Function = logsig, purelin

N/A Epochs    Time trained = N/A sec    Maximum errors =  $10^{-5}$



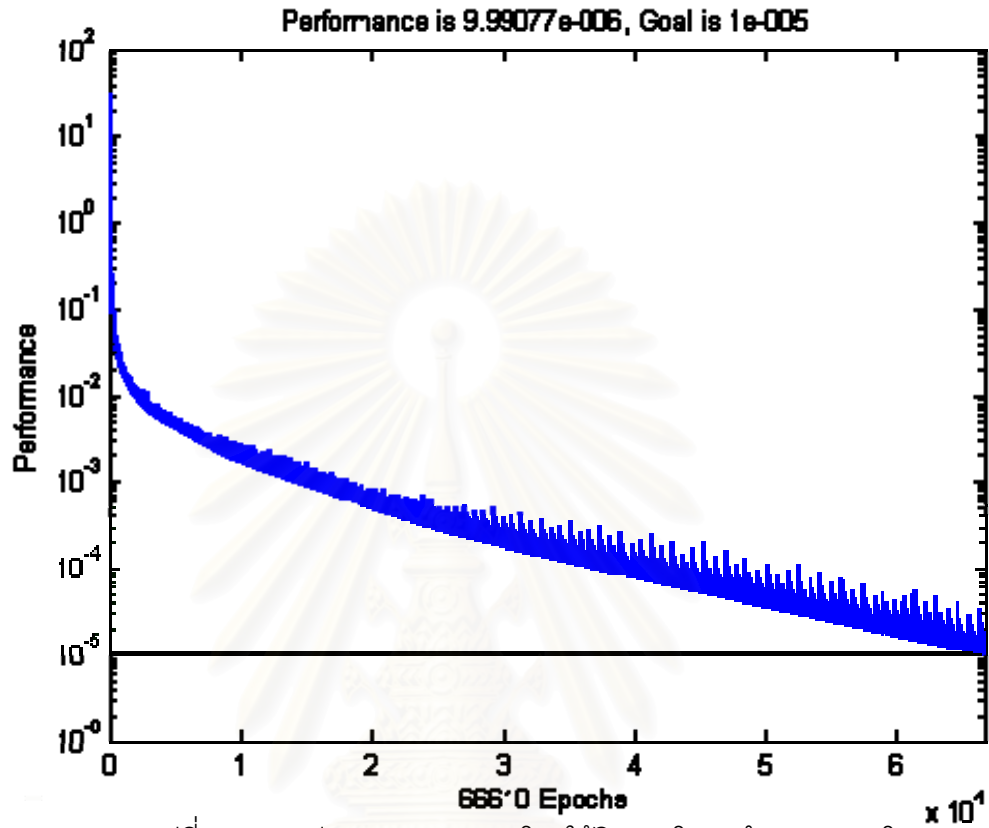
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 200 โหนด

จากกราฟจะเห็นว่า การใช้จำนวนฮิดเดนโหนดเพียง 200 โหนดในการสอนนั้น ไม่เพียงพอที่จะสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้เรียนรู้จนมีค่าความผิดพลาดสูงสุดตามที่กำหนดไว้ คือ  $10^{-5}$

#### 4.5.2 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 500 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 500    Function = logsig, purelin

66610 Epochs    Time trained = 2054.104498 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด

ตารางที่ 4.51 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 500 โหนด

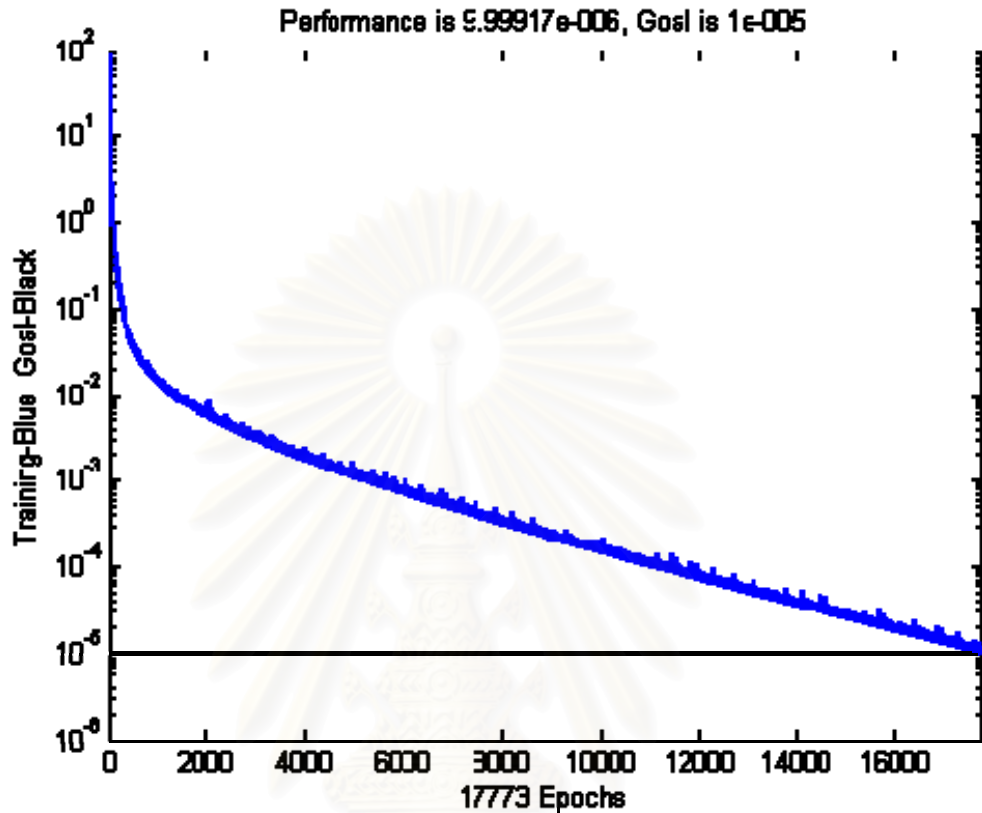
PCB Configuration	Vertical		Horizontal	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
1	98.04	95.27	99.48	97.33
2	99.82	98.67	99.48	97.37
3	99.89	98.76	99.84	98.50
4	98.78	95.73	99.25	97.81
5	98.89	95.37	99.27	96.88
6	99.41	98.67	99.25	99.25
7	99.59	97.87	99.25	96.81
8	97.99	94.56	99.67	96.93
9	99.41	96.93	99.79	98.21
10	99.15	95.63	99.13	96.73
11	99.46	97.48	99.87	98.54
12	99.57	97.36	99.67	98.24
13	99.02	95.88	99.22	96.32
14	97.63	93.87	98.98	96.47
15	98.04	93.98	98.91	96.14
16	99.13	95.91	99.71	97.98



#### 4.5.3 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 1000 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 1000    Function = logsig, purelin

17773 Epochs    Time trained = 1629.049708 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่4.31 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000 โหนด

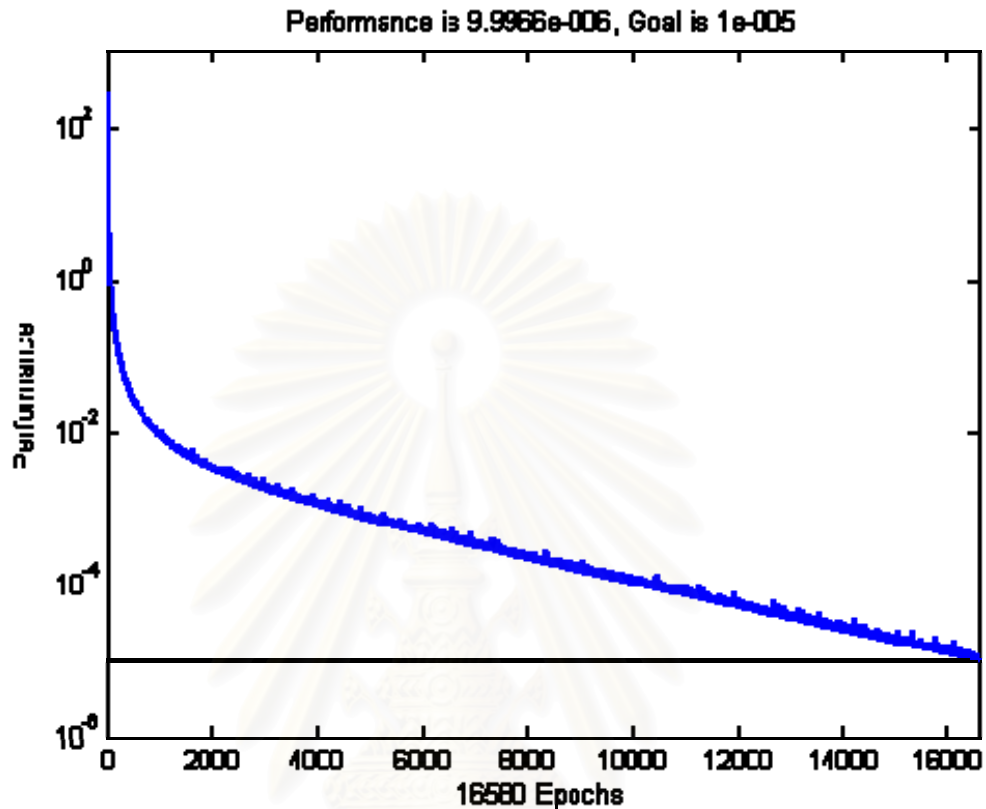
ตารางที่4.52 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000 โหนด

PCB Configuration	Vertical		Horizontal	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
1	94.46	89.16	96.34	91.46
2	95.90	90.48	95.48	90.18
3	95.83	91.21	95.98	90.45
4	95.23	90.04	95.73	90.52
5	95.10	88.95	95.73	89.65
6	95.23	89.45	95.37	90.86
7	96.17	90.91	95.78	90.99
8	94.79	89.48	95.03	89.98
9	97.81	93.41	92.71	96.97
10	94.86	89.47	95.33	89.66
11	96.38	90.95	97.17	93.24
12	97.58	92.88	97.28	93.25
13	95.41	90.33	91.26	95.69
14	95.70	94.44	92.18	96.62
15	94.59	89.25	89.43	95.06
16	95.70	90.38	90.94	96.20

#### 4.5.4 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 1500 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 1500    Function = logsig, purelin

16580 Epochs    Time trained = 1210.575004 sec    Maximum errors = 10<sup>-5</sup>



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1500 โหนด

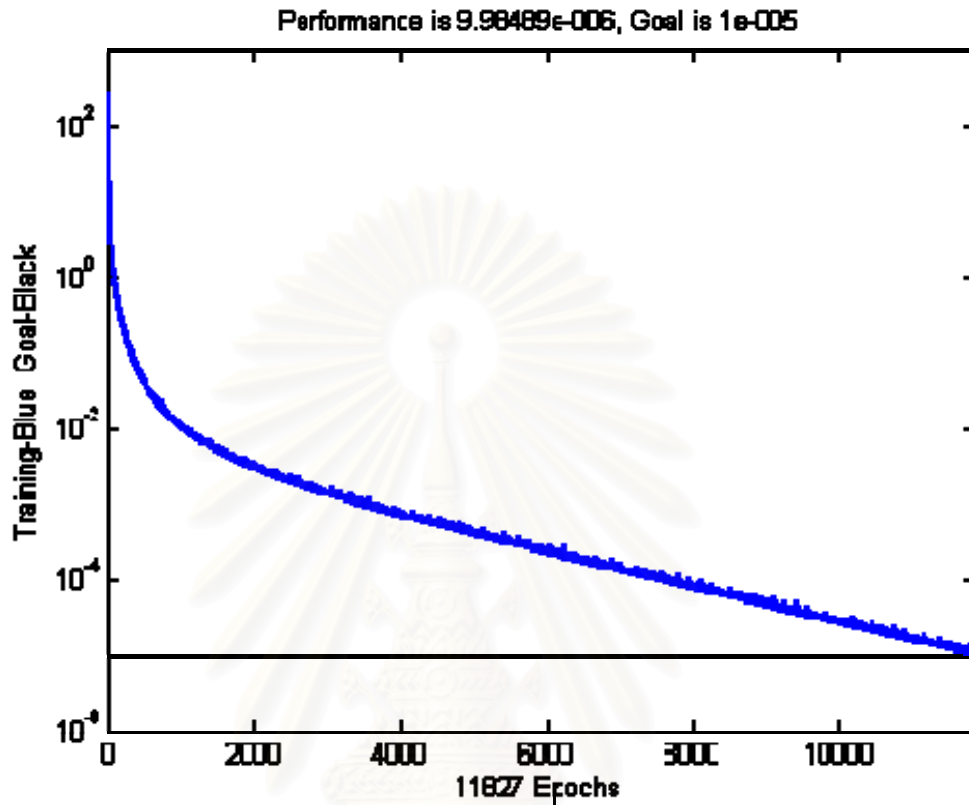
ตารางที่ 4.53 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1500 โหนด

PCB Configuration	Vertical		Horizontal	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
1	92.33	86.98	95.42	89.06
2	93.68	89.03	93.23	87.29
3	93.21	87.89	94.02	88.33
4	91.41	84.44	93.24	87.27
5	92.03	85.40	94.23	88.87
6	94.33	88.80	90.75	85.23
7	92.82	87.33	91.61	85.28
8	91.81	85.73	94.51	88.28
9	88.32	82.35	89.48	83.66
10	90.95	84.88	94.67	87.97
11	91.97	86.29	94.09	89.00
12	93.48	87.56	93.33	87.89
13	94.95	88.43	94.77	88.73
14	91.00	84.78	93.59	88.14
15	91.97	85.94	96.44	90.15
16	94.93	89.80	92.98	88.58

#### 4.5.5 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 2000 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 2000    Function = logsig, purelin

11827 Epochs    Time trained = 986.376129 sec    Maximum errors =  $10^{-5}$



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 2000 โหนด

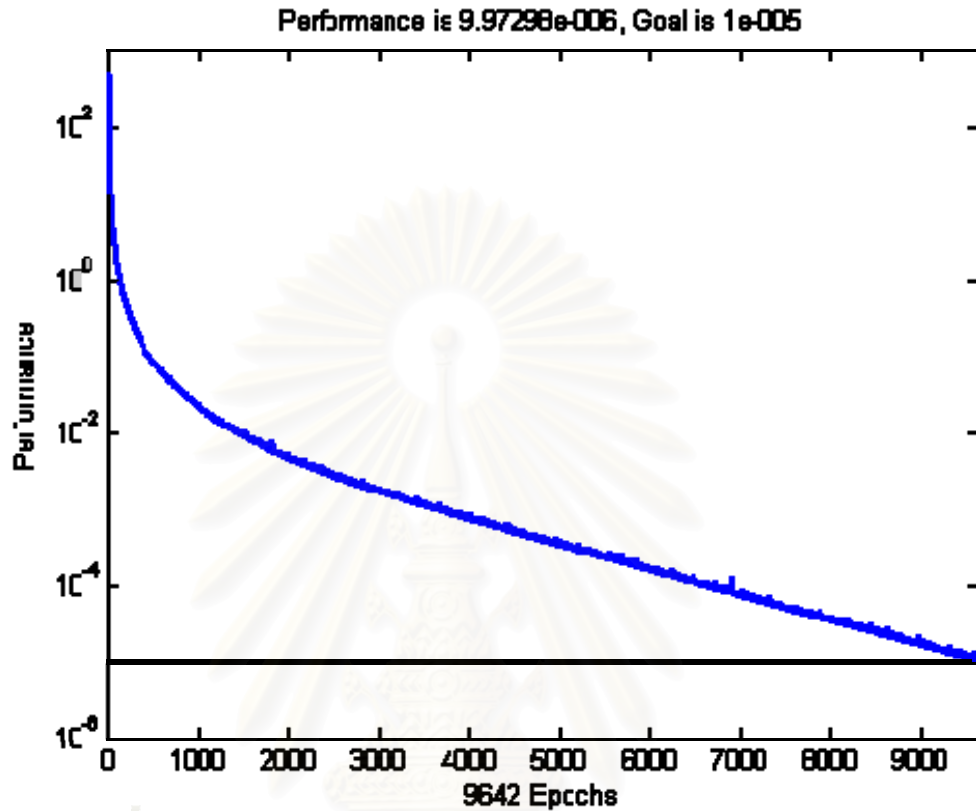
ตารางที่ 4.54 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 2000 โหนด

PCB Configuration	Vertical		Horizontal	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
1	87.60	81.81	90.68	84.86
2	87.85	82.44	87.32	81.53
3	88.21	82.13	85.73	79.28
4	84.92	80.07	82.64	76.93
5	88.72	83.02	86.53	81.52
6	88.74	83.63	87.99	83.18
7	88.21	82.00	85.76	80.22
8	86.07	79.68	87.73	80.68
9	90.36	84.36	89.06	83.03
10	83.03	77.10	84.98	77.16
11	87.98	81.35	86.01	79.61
12	91.71	85.86	88.11	81.83
13	87.48	81.13	87.56	81.79
14	86.96	81.43	90.92	85.18
15	85.96	79.19	84.28	78.00
16	90.43	85.27	87.70	81.68

#### 4.5.6 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 5000 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 5000    Function = logsig, purelin

9642 Epochs    Time trained = 904.372745 sec    Maximum errors = 10-5



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 5000 โหนด

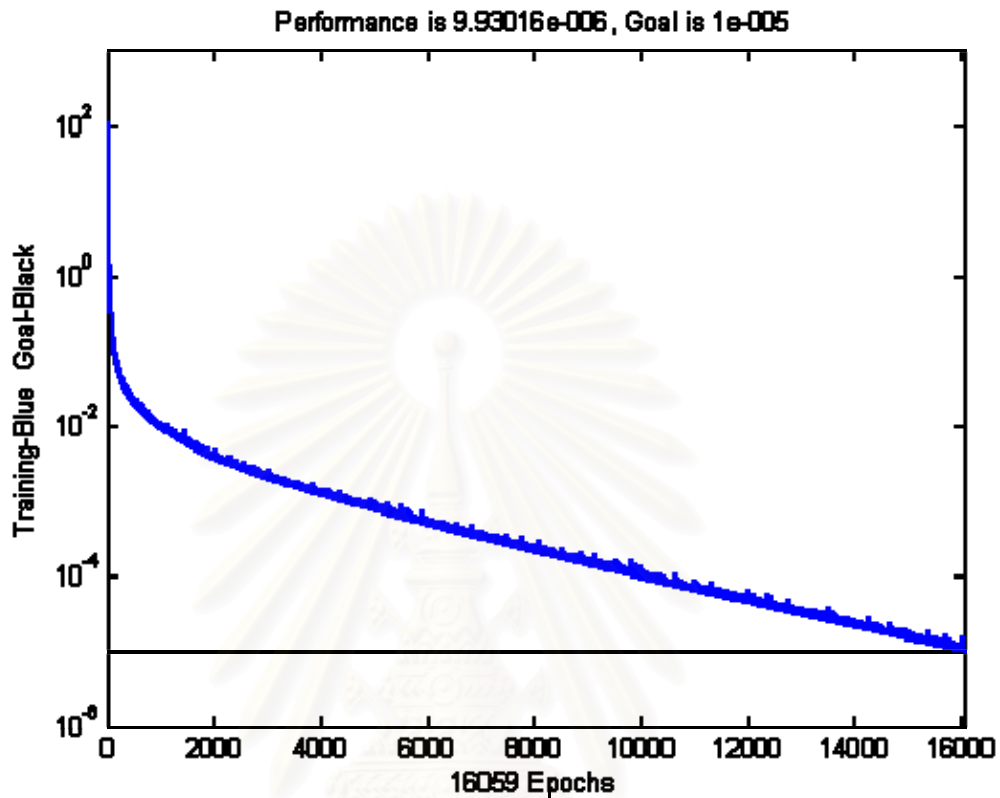
ตารางที่ 4.55 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 5000 โหนด

PCB Configuration	Vertical		Horizontal	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
1	73.33	68.24	73.15	69.03
2	73.39	69.31	67.81	63.85
3	72.85	67.98	70.89	77.56
4	69.19	65.56	68.36	64.55
5	72.01	69.47	73.15	71.81
6	70.76	67.11	72.97	67.46
7	67.13	64.84	61.34	57.83
8	73.77	68.39	69.89	66.28
9	66.20	64.35	71.36	65.07
10	68.33	64.39	67.48	63.43
11	64.82	62.34	79.30	73.34
12	75.00	67.61	80.07	75.42
13	71.85	66.57	72.24	69.23
14	70.65	68.11	74.18	69.20
15	71.62	68.09	63.77	60.94
16	72.88	69.78	78.60	72.52

#### 4.5.7 ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวน 1000, 1000 ฮิดเดนโหนด)

Hidden node = 1000, 1000    Function = logsig, purelin

66610 Epochs    Time trained = 6760.923891 sec    Maximum errors = 10<sup>-5</sup>



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงผลการสอนโดยใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000, 1000 โหนด

ตารางที่ 4.56 ผลการทำนายจากการใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 1000, 1000 โหนด

PCB Configuration	Vertical		Horizontal	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
1	83.24	79.30	84.38	82.24
2	83.74	79.95	83.50	79.81
3	84.45	81.44	83.82	80.59
4	83.11	80.38	84.58	81.11
5	83.97	80.62	84.86	83.35
6	83.72	80.87	82.33	79.57
7	83.86	80.33	83.90	79.88
8	83.79	78.80	83.81	81.09
9	84.37	80.31	83.54	80.42
10	83.68	79.17	84.00	81.49
11	84.54	80.86	84.01	82.23
12	84.43	82.46	83.29	81.10
13	84.10	80.32	84.69	83.31
14	83.24	79.27	84.57	82.58
15	83.96	80.42	84.35	81.29
16	82.85	78.56	83.86	80.04

ตารางที่ 4.57 ผลรวมแบบ Vertical

จำนวนฮிடเดนโหนด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
500	98.98	96.37
1000	95.67	90.67
1500	92.44	86.60
2000	87.76	81.90
5000	70.86	67.00
1000, 1000	83.81	80.19

ตารางที่ 4.58 ผลรวมแบบ Horizontal

จำนวนฮிடเดนโหนด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
500	99.42	97.46
1000	94.48	92.54
1500	93.52	87.73
2000	87.06	81.03
5000	71.53	67.97
1000, 1000	83.96	81.25

ตารางที่ 4.59 ผลรวมทั้งหมด

จำนวนฮிடเดนโหนด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	
	White Gaussian Noise	กำหนดค่า
500	99.20	96.91
1000	95.07	91.60
1500	92.98	87.16
2000	87.41	81.46
5000	71.19	67.48
1000, 1000	83.88	80.72

สรุป

จะเห็นได้ว่าการใช้จำนวนฮிடเดนโหนดมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การทำนายผลไม่จำเป็นต้องมากขึ้นด้วยเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลอื่น ๆ เช่น พุดโหนด และเอาต์พุดโหนด ว่ามีความสัมพันธ์กันซับซ้อนแค่ไหน ถ้าไม่ซับซ้อนก็ไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนฮิดเดนโหนดที่มาก การเพิ่มจำนวนฮิดเดนโหนดนั้นเป็นการช่วยลดเวลาในการสอนเท่านั้น

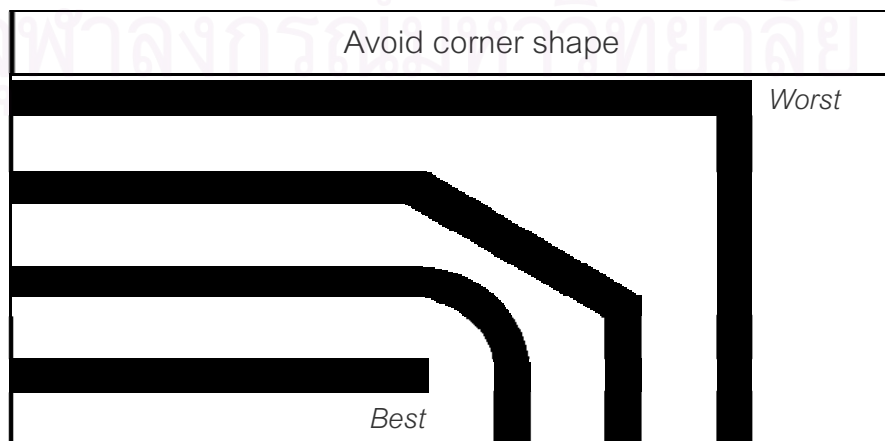


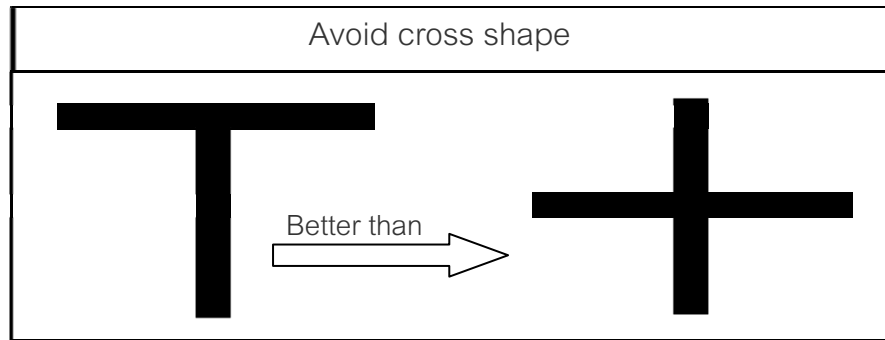
## บทที่ 5

### บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจดจำและจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์พื้นฐาน จากสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ โดยนำสัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีลักษณะรูปแบบแตกต่างกัน มาเป็นตัวกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า การวัดสนามแม่เหล็กทำโดยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้แบบอัตโนมัติที่สร้างขึ้นมา และทำการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณจะมาจากสมการของแมกซ์เวลล์ ผลที่ได้จากทั้งสองวิธีออกมาสอดคล้องกัน นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในกระบวนการรู้จำ และใช้ทฤษฎีการประมวลผลภาพ ซึ่งประกอบด้วย การแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง, การหาขอบภาพ, การประมวลผลทำให้เส้นบาง และการหาจุดตัด / จุดแยก / จุดปลาย มาเป็นขั้นตอนการเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าสู่โครงข่าย เพื่อลดจำนวนโหนดอินพุตในโครงข่ายประสาทเทียม ทำการสอนและทดสอบโครงข่าย โดยในการทดสอบนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอาท์พุต, จำนวนชั้นฮิดเดน และจำนวนโหนดในชั้นฮิดเดน โดยจะใส่สัญญาณรบกวนเข้าไปด้วย โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบกำหนดค่า และแบบ White Gaussian Noise สุดท้ายสามารถทำนายผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลจากผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากแก่ผู้ที่ต้องการศึกษา เนื่องจากในการทดสอบตามมาตรฐานนั้นจะต้องทำการทดสอบภายในห้องปิดกันรั่วคลื่นสะท้อน ซึ่งต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก

#### 5.1 จากผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล





รูปที่ 5.1 รูปการออกแบบลายวงจร

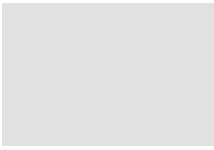
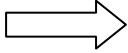
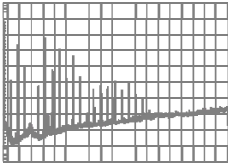
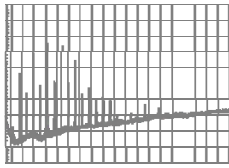
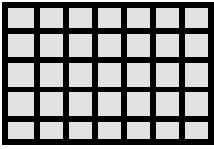
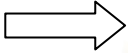
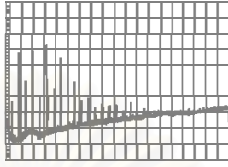
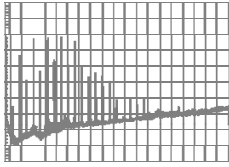
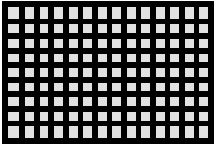

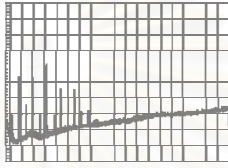
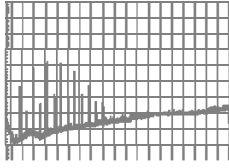
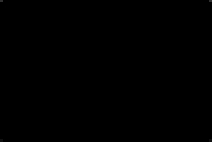
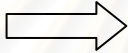
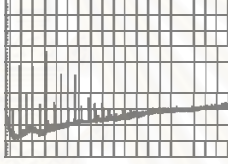
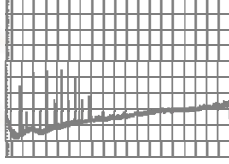
จากผลการทดสอบที่ได้เมื่อพิจารณาที่ลายของวงจร ในการออกแบบควรหลีกเลี่ยงลายวงจรที่เป็นมุมฉาก และมีลักษณะเป็นเส้น 2 เส้นตัดกันเป็นรูปกากบาทดังรูป เนื่องจากลายวงจรทั้งสองแบบนี้จะแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากกว่าแบบอื่น

ตารางที่ 5.1 รูปการออกแบบเมื่อพิจารณาลักษณะของเส้น

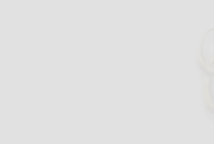
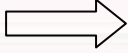
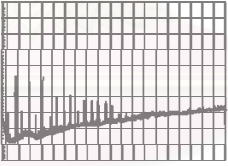
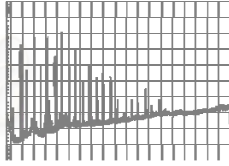
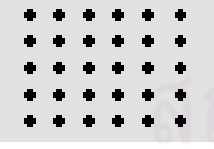
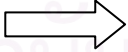
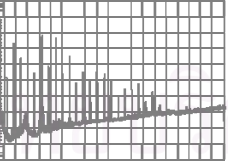
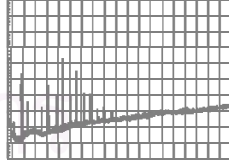

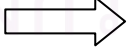
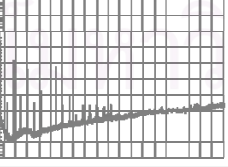
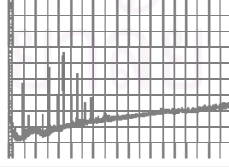

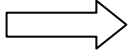
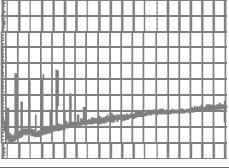
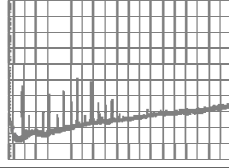
PCB Configuration	Far-field	Vertical	Horizontal	Result
				1
				2
				3
				4

ตารางที่ 5.1 แสดงเส้นลายทองแดงที่มีความยาวและรูปร่างต่างกัน จากการทดสอบสนามไฟฟ้าระยะไกลจะได้ว่า การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์นั้นควรออกแบบให้เส้นของลายทองแดงมีความยาวน้อยที่สุด และเป็นเส้นตรงจะดีกว่าเส้นที่ลักษณะเป็นลูกคลื่นแบบสัญญาณพัลส์ จึงจะได้แผ่นวงจรที่แพร่สัญญาณรบกวนออกมาน้อยที่สุด

ตารางที่ 5.2 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาลักษณะกราวน์แบบที่ 1

PCB Configuration	Far-field	Vertical	Horizontal	Result
				4
				3
				2
				1

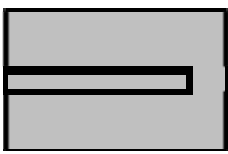
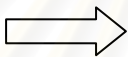
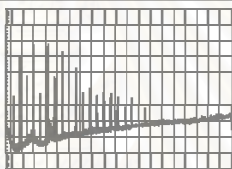
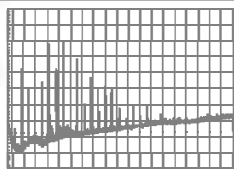
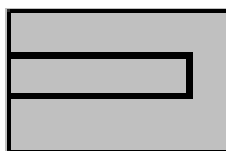
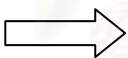
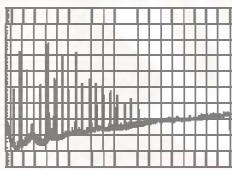
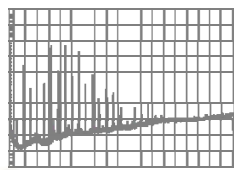
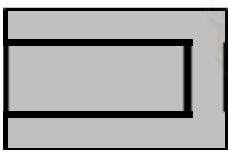

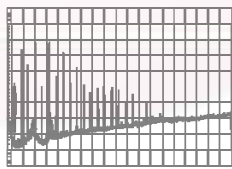
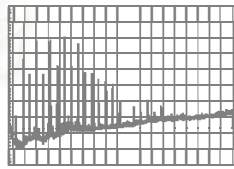
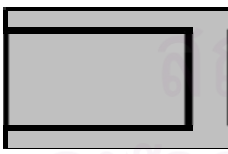
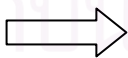
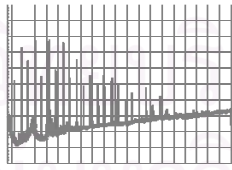
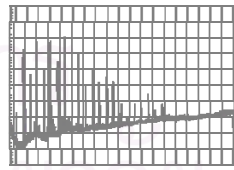
ตารางที่ 5.3 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาลักษณะกราวน์แบบที่ 2

PCB Configuration	Far-field	Vertical	Horizontal	Result
				4
				3
				2
				1

ตารางที่ 5.2 แสดงลักษณะกราวนที่มีรูปร่างต่างกัน รูปบนเป็นแผ่นวงจรแบบไม่มีกราวน ต่อมาคือมีกราวนเป็นตารางแบบห่างและถี่ตามลำดับ สุดท้ายคือเป็นกราวนทั้งแผ่น ผลที่ได้จากการทดสอบคือ แบบกราวนทั้งแผ่นจะแพร่คลื่นออกมาน้อยที่สุด รองลงมาคือกราวนแบบถี่และห่าง ส่วนแผ่นวงจรที่ไม่มีกราวนนั้นจะแพร่คลื่นออกมามากที่สุด

ตารางที่ 5.3 แสดงลักษณะกราวนที่มีรูปร่างต่างกันเช่นกัน แต่ต่างจากตารางที่ 5.2 คือในรูปที่ 2 นั้นจะเป็นกราวนแบบจุด และรูปสุดท้ายจะเป็นกราวนสองแผ่นประกบแผ่นวงจรไว้ ส่วนในรูปที่ 1 และ 3 จะเป็นแบบไม่มีกราวนและมีกราวนทั้งแผ่นตามลำดับ และผลที่ได้จากการทดสอบคือ แบบกราวนสองแผ่นประกบกันนั้นจะแพร่คลื่นออกมาน้อยที่สุด ตามด้วยกราวนทั้งแผ่น กราวนแบบจุด และไม่มีกราวนตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 สรุปการออกแบบเมื่อพิจารณาความกว้างลูป

PCB Configuration	Far-field	Vertical	Horizontal	Result
				1
				2
				3
				4

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างของลายทองแดงแบบลูป จากการทดสอบ จะได้ว่าในการออกแบบนั้น ควรออกแบบให้ลายทองแดงที่เป็นแบบลูปมีความกว้างลูปน้อยที่สุด จึงจะทำให้แพร่สัญญาณรบกวนออกมาน้อยที่สุด

## 5.2 จากการศึกษาทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

1. ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเอาต์พุต ใช้ฮิดเดนโหนดจำนวน 100 โหนด และใช้ฟังก์ชัน log sigmoid, tangent sigmoid และ purelin ในการปรับค่าในชั้นฮิดเดนและเอาต์พุต ผลที่ได้คือชุดฟังก์ชัน logsig, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด รองลงมาคือ tansig, purelin และ tansig, logsig ชุดท้ายคือชุดฟังก์ชัน purelin, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุดตามลำดับ

2. จำนวนชั้นฮิดเดน เปลี่ยนจำนวนชั้นฮิดเดนจาก 1 ชั้น เป็น 2 ชั้น โดยแต่ละมีจำนวน 50 โหนด รวม 2 ชั้น เป็น 100 โหนด ผลที่ได้คือชุดฟังก์ชัน tansig, logsig, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด และชุดฟังก์ชัน purelin, purelin, purelin ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฮิดเดนเพียงชั้นเดียว แต่จำนวนโหนดเท่ากันคือ 100 โหนด พบว่าการใช้จำนวนชั้นฮิดเดนเพียงชั้นเดียวให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากกว่าการใช้จำนวนฮิดเดน 2 ชั้น เป็นจำนวน 27.91%

3. จำนวนโหนดในชั้นฮิดเดน เปลี่ยนจำนวนฮิดเดนโหนดเป็นจำนวน 100, 200 และ 500 โดยใช้จำนวนชั้นฮิดเดน 1 ชั้น และใช้ชุดฟังก์ชัน logsig, purelin ในชั้นฮิดเดนและเอาต์พุตตามลำดับ ผลที่ได้คือการจำนวนฮิดเดนโหนด 100 โหนด ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด และ 500 โหนดเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุด

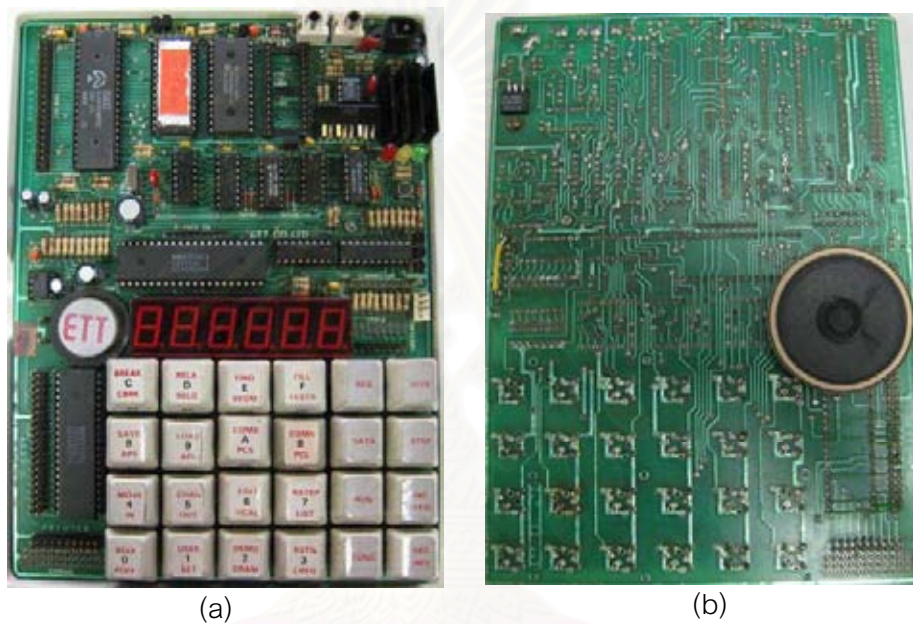
## 5.3 การประยุกต์ใช้งานเครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้

สามารถนำเอาเครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้แบบอัตโนมัติ (Near-field Scanner) ที่สร้างขึ้น โดยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมในแนวแกน x และแกน y มาใช้วัดสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรจริง ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ผลจากการวัดจะทำให้เรารู้ตำแหน่งของอุปกรณ์เหล่านั้นและเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลได้ และในกรณีที่แผ่นวงจรเกิดเสียใช้งานไม่ได้ เราสามารถนำเอาแผ่นวงจรนั้นมาวัดการแพร่สนามแม่เหล็กใหม่ เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ทำให้รู้ว่าอุปกรณ์ ณ ตำแหน่งใดบนแผ่นวงจรที่เสีย จึงทำให้ไม่เสียเวลาในการแก้ไขเพราะแก้ไขได้ง่ายและตรงจุด วิธีการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรนั้น จะนำสายอากาศที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้โดยเฉพาะมาใช้ในการวัด จะนำเอาแผ่นวงจรที่จะทำการวัดการแพร่สัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กไว้ที่ด้านล่างของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ โดยปรับความสูงของ



สายอากาศให้อยู่เหนือแผ่นวงจรเป็นระยะประมาณ 1 เซนติเมตร ทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาทั่วทั้งแผ่นวงจร โดยสามารถกำหนดระยะห่างแต่จุดในการวัดได้จากโปรแกรมที่ควบคุมมอเตอร์ (ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระยะ 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร) ในระหว่างการวัดค่าแอมพลิจูดของการแพร่สนามแม่เหล็กที่วัดได้จากสายอากาศจะถูกส่งไปที่เครื่องวิเคราะห์ความถี่ และจะถูกเก็บเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาใช้วาดกราฟอย่างอัตโนมัติ

ในการทดลองนี้ แผ่นวงจรที่นำมาใช้ทดสอบคือแผ่นวงจร ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER แสดงดังรูปที่ 5.2



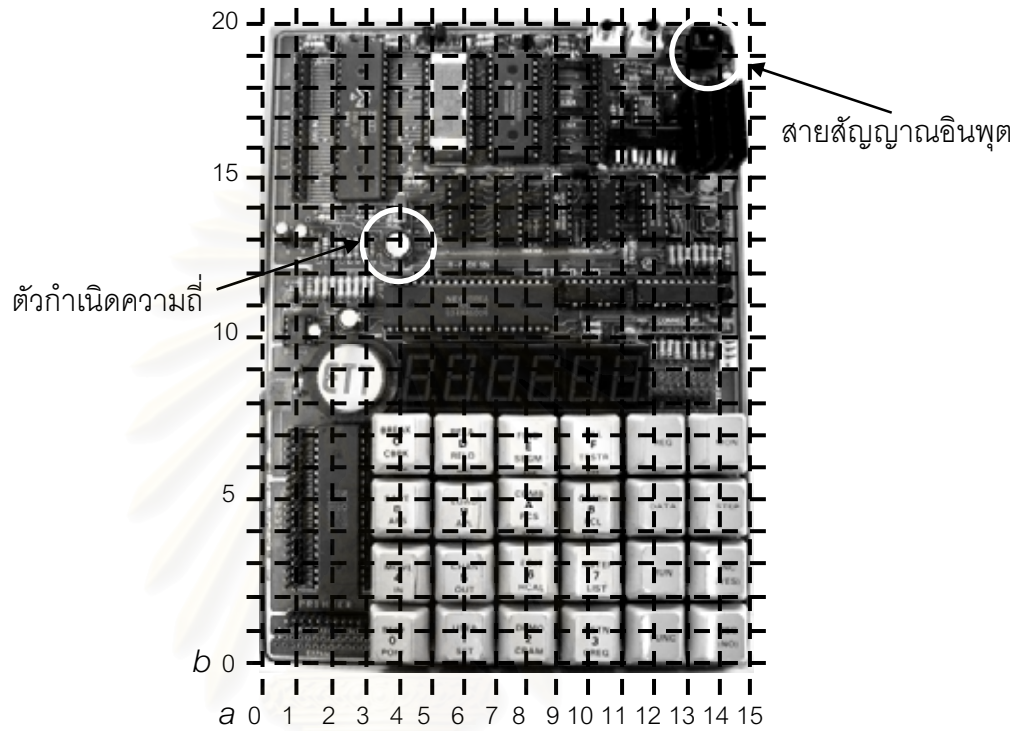
รูปที่ 5.2 (a) รูปแผ่นวงจร ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER ทางด้านบน  
(b) รูปแผ่นวงจร ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER ทางด้านล่าง

ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของแผ่นวงจรทั้งทางด้านบน และทางด้านล่าง โดยแผ่นวงจรจะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หลายชนิดหลายค่า ประกอบด้วย

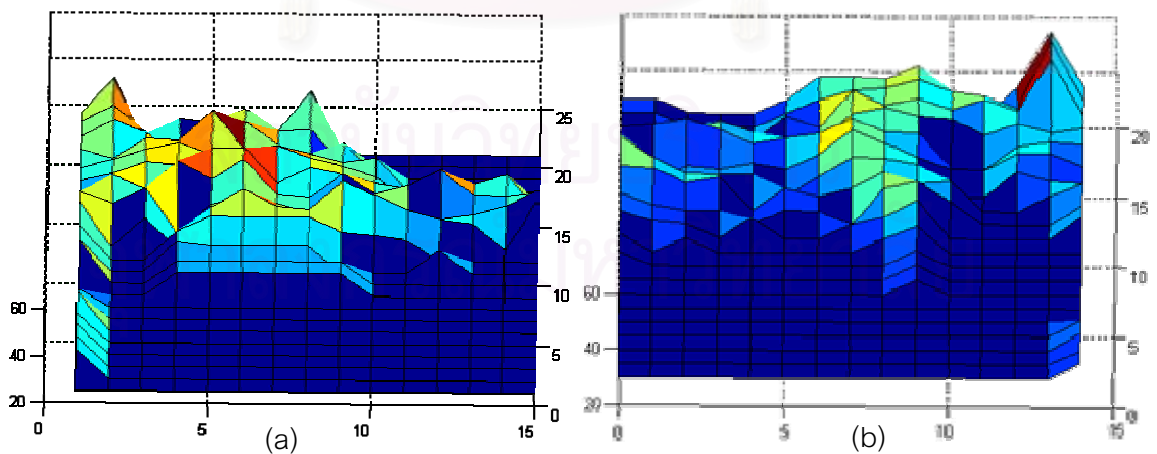
- ตัวต้านทาน (R)
- ตัวเหนี่ยวนำ (L)
- มอสเฟต (Mosfet)
- ไดโอด (Diode)
- ตัวกำเนิดความถี่ (Crystal)
- ตัว Integrated Circuit (IC)
- แผงวงจรหน้าจอบแสดงผลตัวเลข (Display)
- พอร์ตและขั้วต่อชนิดต่างๆ (Port and Connector)
- ตัวเก็บประจุ (C)
- แผงแป้นพิมพ์ (Keyboard)
- ทรานซิสเตอร์ (Transistor)
- หลอดไฟ LED
- สวิตช์ (Switch)
- ลำโพง (Speaker)
- แผงระบายความร้อน (Heat Sink)



สามารถเปรียบเทียบตำแหน่งที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ แพร่ระดับสัญญาณรบกวนออกมาได้เป็นจุดๆ โดยดูได้จากตารางที่อยู่บนแผ่นวงจร (รูปที่5.3) เทียบกับผลจากการวัดได้โดยตรงทั้งจากทางด้านบนและด้านล่าง ซึ่งแผ่นวงจรที่ใช้ในการวัดมีขนาด 15 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร



รูปที่5.3 ET-BOARD SINGLE BOARD MICROCOMPUTER



รูปที่5.4 (a) ผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้จากด้านบน

(b) ผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้จากด้านล่าง

จากผลการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้จากด้านบน บริเวณที่แผ่นวงจรแพร่สัญญาณ ครอบคลุมสนามแม่เหล็กออกมามาก คือบริเวณที่มีตัวกำเนิดความถี่ (Crystal) และบริเวณโดยรอบ ดังที่แสดงได้ในรูป 5.3, 5.4(a) ณ ตำแหน่ง 4a-13b เนื่องจากตัวกำเนิดความถี่จะสร้างความถี่ขึ้นมา เป็นผลให้ที่จุดที่มีตัวกำเนิดความถี่อยู่และบริเวณโดยรอบมีระดับสัญญาณรบกวนสูงกว่าที่อื่นบนแผ่นวงจร อีกตำแหน่งหนึ่งที่แผ่นวงจรแพร่สัญญาณรบกวนออกมาอย่างเห็นได้ชัดอีกก็คือทางขอบด้านขวา ซึ่งมาจากพอร์ตเชื่อมต่อ ดังที่แสดงได้ในรูป 5.3, 5.4(a) ณ ตำแหน่ง 1a-2b ถึง 1a-19b เพราะเนื่องจากเราไม่ได้ทำการต่อสายอะไรที่พอร์ตเชื่อมต่อ สายเปลือยของพอร์ตเชื่อมต่อจะทำตัวเปรียบเสมือนเป็นสายอากาศที่จะแพร่คลื่นออกมา ทำให้ ณ ตำแหน่งนั้นของแผ่นวงจรวัดระดับสัญญาณรบกวนได้สูง โดยส่วนที่แผงวงจรแพร่ออกมาน้อยจะเป็นส่วนของแผงแป้นพิมพ์ (Keyboard) และแผงวงจรหน้าจอแสดงผลตัวเลข (Display) แสดงในรูปคือ ตำแหน่ง 3a-1b ถึง 15a-8b และ 4a-8b ถึง 12a-10b ตามลำดับ เนื่องจากในขณะที่ทำการวัดสนามแม่เหล็กนั้นได้เปิดให้แผ่นวงจรประมวลผลไปเรื่อยๆ โดยไม่มีการกดปุ่มใดๆ บนแผงแป้นพิมพ์ ทำให้อุปกรณ์ในทั้ง 2 ส่วนนี้ไม่มีการทำงาน จึงเป็นผลให้ในบริเวณโดยรอบนี้วัดระดับสัญญาณรบกวนได้น้อย ส่วนผลการวัดสัญญาณรบกวนสนามแม่เหล็กระยะใกล้จากด้านล่างนั้น จะให้ผลไม่ดีเท่าจากการวัดด้านบน ผลที่ได้พบว่าส่วนที่แผ่นวงจรแพร่สัญญาณรบกวนออกมามากที่สุด คือส่วนที่เป็นสายสัญญาณอินพุตที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับสัญญาณไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง 13a-20b ถึง 14a-19b ในรูปที่ 5.3, 5.4(a) สำหรับในส่วนของบริเวณแผงแป้นพิมพ์และแผงวงจรหน้าจอแสดงผลตัวเลขนั้น ให้ผลตรงกับผลการวัดที่ได้จากทางด้านบน คือเป็นส่วนที่แผ่นวงจรแพร่ระดับสัญญาณรบกวนออกมาน้อยที่สุดเช่นกัน

วิธีการวัดดังกล่าวมีประโยชน์อย่างยิ่งในการช่วยผู้ออกแบบวงจรหรือผู้ซ่อมวงจร ในกรณีที่ใช้งานอุปกรณ์ไประยะเวลาหนึ่งและเกิดสภาวะผิดปกติของวงจรขึ้น โดยสามารถนำข้อมูลจากฐานข้อมูลเก่ามาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการวัดใหม่ โดยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้นี้ซึ่งสามารถกำหนดจุดหรือขึ้นส่วนบนอุปกรณ์แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการแก้ไขปัญหาการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีที่นำแผ่นวงจรนี้ไปทดสอบตามมาตรฐาน EMC และไม่ผ่านการทดสอบวิธีการวัดโดยใช้สายอากาศสำหรับวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้โดยเฉพาะนี้ ทำให้เราสามารถหาแหล่งกำเนิดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ของลายบนแผ่นวงจร, ชิ้นส่วน หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นวงจรพิมพ์ได้ และนำมาสู่การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อให้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน EMC ได้รวดเร็วและแม่นยำขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] J. J. Laurin, Z. Ouardhiri, and J. Colinas. Near-field Imaging of Radiated Emission Source on Printed-Circuit Boards. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2001 : 368-373.
- [2] K. Aunchaleevarapan, K. Paithoonwatanakij, Y. Preampraneerach, W. Khan-ngern, and S. nitta. Classification of PCB Configurations from Radiated EMI using Neural Network. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic May 2000 : 105-110.
- [3] A. Rocznik, E. M. Petriu, and G. I. Costache. 3D Electromagnetic Field Modeling Base on Near-Field Measurements. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. Brussels June 1996 : 890-896.
- [4] C. Icheln, T. Laitinen, M. Sippola, H. Siren, R. Sepponen, and P. Vainikainen. Computer Simulations and Near-Field Measurements for the Prediction of Radiated EMI. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Aug 1999 : 878-881.
- [5] O. Hiroshi, I. Hiromasa, I. Takeshi, E. Tsugio, and N. Yoji. Electromagnetic Field Characteristics of Injection Probes. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Aug 1999 : 55-58.
- [6] ประสิทธิ์ ที่ชมพูดี และ ไกรสร อัญชลีวรรณธุ์. EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานและการทดสอบ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [7] ประสิทธิ์ ที่ชมพูดี และ ไกรสร อัญชลีวรรณธุ์. EMC 2: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานและการติดตั้ง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [8] CISPR15. Limit and method of measurement of radio disturbance characteristic of electric lighting and similar equipment. Edition 6.2, 2002-10.
- [9] CISPR16-1. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method. Amendment 1, 2002-8.
- [10] CISPR16-2. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method. Edition 1.2, 2002-10.

- [11] CISPR16-4. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method. Edition 1, 2002-5.
- [12] CISPR22. Information technology equipment Radio disturbance characteristic Limit and methods of measurement. Amendment 2, 2002-10.
- [13] M. I. Montrose. EMC and The Printed Circuit Board. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1999.
- [14] B. R. Archambeault. PCB design for real-world EMI control. Kluwer Academic, 2002.
- [15] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. Finite Element Method for Computational Fluid Dynamics. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [16] L. Junwei. Numerical Computation and Visualization of Electromagnetic Field using MATLAB based on Integrated Programming Language. Proceedings International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications 1999 : 553-556.
- [17] C. R. Gonzalez and E. R. Woods. Digital Image Processing. Prentice Hall, New Jersey, 2001
- [18] H. Demuth and M. Beale. Neural Network Toolbox User's Guide. The Math Works, Inc, 1994.
- [19] H. F. Spence. Printed Circuit Board Diagnosis using Artificial Neural Networks and Circuit Magnetic Fields. IEEE AES Systems Magazine Feb 1994 : 20-24.
- [20] A. I. Hanna, D. P. Mandic, and M. Razaz. A Normalised Gradient Descent Algorithm for Nonlinear Adaptive Filters Using a Gradient Adaptive Step Size. Proceedings of the XI IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing Sep 2001 : 63-72.
- [21] A. Senyard, E. Kazmierczak, and L. Sterling. Software Engineering Methods for Neural Network. Conference on Asia-Pacific Software Engineering 2003 : 468-477.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปิยะนุช สุจินตนารัตน์ เกิดวันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ. 2526 จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย