

การระบุเอกลักษณ์ระบบแก๊สซีไฟเออร์สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

นางสาวจิตรัตน์ สชนเสาวภาคย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2554

**GASIFIER SYSTEM IDENTIFICATION FOR BIOMASS
POWER PLANTS**

Jittaratt Satonsaowapak



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การระบุเอกลักษณ์ระบบแก๊สซีไฟเออร์สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ชนัดชัช กุลวรรณิพงษ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อัจฉาญ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จิตรัตน์ สธนเสาวภาคย์ : การระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซิไฟเออร์สำหรับโรงไฟฟ้า

ชีวมวล (GASIFIER SYSTEM IDENTIFICATION FOR BIOMASS POWER PLANTS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไทย์, 195 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซิไฟเออร์สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยมีพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ 3 ตัว คือ ปริมาณขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง (Ash discharge rate (kg/h) : F_{ash}) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อชั่วโมง (Biomass consumption rate (kg/h) : F_{bc} และอุณหภูมิที่วัดจากโซนเผาไหม้ (Combustion zone temperature (°C): T_{comb}) ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อค่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel flow rate : F_{gas}) การวิเคราะห์การถดถอยถูกนำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ โดยใช้สมการเส้นตรง, สมการลำดับที่ 2 และสมการลำดับที่ 3 ในการประมาณฟังก์ชัน และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ เครื่องข่ายประสาทเทียมเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบแพร่กลับ จากผลการดำเนินงานพบว่าการระบุเอกลักษณ์สามารถใช้ได้ทั้งการวิเคราะห์การถดถอยและเครื่องข่ายประสาทเทียมซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

JITTARATT SATONSAOWAPAK : GASIFIER SYSTEM

IDENTIFICATION FOR BIOMASS POWER PLANTS. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. ANANT OONSIVILAI, Ph.D., 195 PP.

GASIFIER/REGRESSION ANALYSIS/BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK

This thesis presents gasifier system identification for biomass power plants with three interested variables which is ash discharge rate, biomass consumption rate and temperature at combustion zone. These variables effect to output of gasifier system which is gas flow rate. Regression analysis is used to find function approximation by the linear model, second order polynomial, third order polynomial and logarithm regression. Backpropagation neural network is the one method is used to approximated function. From which satisfactory results, regression analysis and backpropagation neural network are able to identify when compare with error.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อุ่นศิริไพลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

จิตต์รัตน์ สชนเสาวภาคย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	4
2.3 โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	5
2.4 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดคว้านคราฟต์	5
2.5 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	6
2.6 ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน	6
2.7 การระบุเอกลักษณ์.....	9
2.8 การวิเคราะห์การถดถอย.....	10
2.9 เครื่องข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ	13
2.10 สรุป.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	15
3.1	บทนำ.....	15
3.2	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	15
3.3	ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน.....	15
3.4	ส่วนประกอบของระบบ.....	18
3.5	ขั้นตอนการเดินระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ.....	25
3.6	พารามิเตอร์ที่ทำการเก็บข้อมูล.....	29
3.7	สรุป.....	34
4	การระบุเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย.....	35
4.1	บทนำ.....	35
4.2	การวิเคราะห์การถดถอย.....	35
4.2.1	ชนิดของการวิเคราะห์การถดถอย.....	35
4.2.2	หลักการการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้เมตริกซ์.....	37
4.2.3	การเลือกตัวแปรอิสระ.....	41
4.2.4	ผลการทดสอบ.....	43
4.3	สรุป.....	54
5	การระบุเอกลักษณ์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม.....	55
5.1	บทนำ.....	55
5.2	การเรียนรู้ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม.....	55
5.2.1	แบบจำลองของนิวรอน - นิวรอนแบบอินพุตเดียว.....	56
5.2.2	ฟังก์ชันถ่ายโอน.....	57
5.2.3	แบบจำลองของนิวรอนเดียวแบบหลายอินพุต.....	64
5.2.4	สถาปัตยกรรมเครือข่าย.....	64
5.2.5	กฎการเรียนรู้.....	67
5.3	การเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	68
5.3.1	อัลกอริทึมแพร่กลับ.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.2 การประมาณค่าฟังก์ชันด้วยเครือข่ายแบบแพร่กลับ.....	75
5.3.3 คำสั่ง MATLAB ในการฝึกสอน	76
5.3.4 ผลการทดสอบ	77
5.4 สรุป.....	97
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	98
6.1 สรุป.....	98
6.2 ข้อเสนอแนะ	99
รายการอ้างอิง	100
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ	102
ภาคผนวก ข. ผลการรัน โปรแกรมด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย	107
ภาคผนวก ค. ผลการรัน โปรแกรมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ	135
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	183
ประวัติผู้เขียน	195

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	พารามิเตอร์ที่โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบทำการเก็บข้อมูล 30
3.2	ระยะติดตั้ง Thermocouple ที่เตาแก๊สซีไฟเออร์ 33
4.1	ผลการทดสอบการเลือกตัวแปรด้วยวิธีออก โปสลิเบล รีเกรสชัน 42
4.2	ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 100 m ³ /h และ เชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 38-47 kg/h..... 43
4.3	ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 120 m ³ /h และ เชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 44-68 kg/h..... 44
4.4	ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 200 m ³ /h และ เชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 126-141 kg/h..... 44
4.5	ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้..... 52
5.1	สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊ส เชื้อเพลิงที่ 100 m ³ /h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ 77
5.2	สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการ take ln คือ ปริมาณ เชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100 m ³ /h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ 78
5.3	สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊ส เชื้อเพลิงที่ 120 m ³ /h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ 78
5.4	สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการ take ln คือ ปริมาณ เชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 120 m ³ /h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ 79
5.5	สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊ส เชื้อเพลิงที่ 200 m ³ /h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ 80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6	สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการ take ln คือ ปริมาณ เชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 200 m ³ /h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ..... 81
5.7	สรุปผลการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซิไฟเออร์ที่ดีที่สุด ด้วยเครือข่ายแบบแพร่ กลับที่อัตราการไหลของแก๊ส 100, 120 และ 200 m ³ /h..... 82
5.8	ผลการรัน โปรแกรมของชุดฝึกสอนและชุดทดสอบที่รวมทุกอัตราการไหลของ แก๊สเชื้อเพลิง 92
5.9	ค่าพารามิเตอร์ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่ 81.28 m ³ /h..... 95



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 6
2.2	ระบบที่ y คือเอาต์พุต u คือ อินพุต และ e คือสัญญาณรบกวน..... 9
2.3	ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบ 10
3.1	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 16
3.2	เตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Open Top Downdraft Gasifier..... 19
3.3	Cyclone Collector 20
3.4	Water Scrubber และ Chiller Scrubber..... 21
3.5	ถังบำบัดน้ำ Flocculation Tank..... 22
3.6	ถังเก็บน้ำและพักน้ำเสีย Buffer Tank 22
3.7	Biomass Filter Unit..... 23
3.8	Bag Filter Unit 23
3.9	เครื่องยนต์แก๊ส 24
3.10	เครื่องยนต์ดีเซล..... 25
3.11	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส..... 25
3.12	ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงานของโรงไฟฟ้าชีวมวล..... 26
3.13	ตำแหน่งของสวิทช์ระบบควบคุมเตาแก๊สซิไฟเออร์ 28
3.14	ตู้ควบคุมแก๊สเชื้อเพลิง 29
3.15	เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูล..... 31
3.16	เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้กระถินยักษ์ 32
3.17	ตำแหน่งการติดตั้งและวัดอุณหภูมิที่เตาแก๊สซิไฟเออร์ 33
4.1	ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถอดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สองที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 46
4.2	ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถอดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สองที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$	47
4.4 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$	47
4.5 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$	48
4.6 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$	48
4.7 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$	49
4.8 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$	49
4.9 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$	50
4.10 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$	51
4.11 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$	51
4.12 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$	52
4.13 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่รวมทุกอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง.....	53
4.14 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่รวมทุกอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง.....	54
5.1 ตัวอย่างการประมาณค่าฟังก์ชัน จุดในรูปคือข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้.....	56
5.2 นีวرونอินพุตเดียว.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3	นิวรอนหลายอินพุต..... 63
5.4	การกำหนดรูปแบบสัญลักษณ์ของนิวรอน 64
5.5	เครือข่ายชั้นเดียวที่มี S นิวรอน..... 65
5.6	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายชั้นเดียวในรูปของเมตริกซ์ 66
5.7	เครือข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์..... 67
5.8	การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครือข่าย N ชั้น 69
5.9	ตัวอย่างเครือข่ายสำหรับการประมาณค่าฟังก์ชัน 76
5.10	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 8-1 84
5.11	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 10-1 85
5.12	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 3-1 86
5.13	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 8-1 (take ln) 88
5.14	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin เครือข่าย 3-1 (take ln) 90
5.15	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin, purelin เครือข่าย 3-1-1 91
5.16	ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 3-1 ที่ข้อมูลรวมทุก อัตราการใช้ของแก๊ส เมื่อถูกแปลงให้อยู่ในรูปของลอการิทึม..... 93
5.17	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครือข่ายประสาทเทียมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 3-1 เมื่อพิจารณาที่ชุดข้อมูลรวมทุกอัตราการใช้ของแก๊สที่ถูกแปลงให้อยู่ ในรูปของลอการิทึม 94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

จากวิกฤตการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทยในปัจจุบัน ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องมาจากประเทศไทยเป็นประเทศที่นำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นหลัก เพื่อเป็นการสร้างความมั่นคงทางด้านเศรษฐกิจและพลังงานให้กับประเทศ จึงมีการสนับสนุนแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ขึ้นมา ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพของแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวล หากสามารถนำพลังงานเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนของประเทศได้

โรงไฟฟ้าเป็นแหล่งหนึ่งที่มีการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ในปัจจุบันพบว่าแหล่งเชื้อเพลิงหลัก อันได้แก่ ถ่านหินและน้ำมันดิบมีปริมาณลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากปริมาณความต้องการใช้งานมีสูง ซึ่งเป็นไปตามจำนวนประชากรของโลกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการหาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่น สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจและมีการนำไปวิจัยเพื่อพัฒนาอยู่ไม่น้อย

โดยทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ดำเนินการพัฒนาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน ซึ่งมีกำลังการผลิตขนาด 100 กิโลวัตต์ มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเพื่อนำมาใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาวิจัยเทคโนโลยีการผลิตพลังงาน และเป็นหน่วยสาธิต เผยแพร่และฝึกอบรมเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กให้กับชุมชน เทคโนโลยีของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ที่มีเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดควาร์ตกราฟต์ มีหลักการทำงานโดยการเปลี่ยนองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ไปเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) ที่จุดติดไฟง่าย สามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการผลิตพลังงานความร้อนโดยการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้ (Burner) หรือแม้กระทั่งนำไปใช้กับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในการผลิตกระแสไฟฟ้า (Engine-generator Set) ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าวก็คือสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เป็นสภาวะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน เพราะหากมีแก๊สออกซิเจนเพียงพอ หรือมากเกินไปจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่

สมบูรณ (Combustion) จะมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำออกมาซึ่งจะทำให้ชีวมวลไม่ติดไฟได้ [1]

ข้อดีของระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ เหมาะกับระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (ต่ำกว่า 1 เมกะวัตต์) สำหรับหมู่บ้านชนบทที่กระแสไฟฟ้าเข้าไม่ถึง และมีปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลเพียงพอต่อการผลิต แต่ข้อด้อยของระบบนี้คือเทคโนโลยียังไม่เสถียร ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันมาผลิตแก๊สเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยใช้เตาผลิตแก๊สแบบดาวน์ดราฟต์ (Downdraft Gasification) ซึ่งข้อเด่นของเตาชนิดนี้ คือออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันดินโดยเฉพาะ เมื่อพิจารณาถึงข้อดีของเทคโนโลยีนี้จะพบว่าหากสามารถทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ ก็จะสามารถปรับปรุงการทำงานให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ก็จะส่งผลดีต่อประชาชนที่อาศัยอยู่ในหมู่บ้านที่กระแสไฟฟ้ายังไม่สามารถเข้าถึงได้ เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน

2.1 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1.1 สามารถระบุเอกลักษณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชันได้
- 2.1.2 เพื่อเผยแพร่ความรู้ที่ได้แก่ชุมชนเพื่อนำไปใช้

3.1 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 3.1.1 ใช้แก๊สซิฟิเคชันแบบดาวน์ดราฟต์
- 3.1.2 อัตราการไหลของอากาศและแรงดันมีค่าคงที่
- 3.1.3 ข้อมูลที่ใช้ศึกษามาจากเชื้อเพลิงชนิดไม้กระถินยักษ์
- 3.1.4 โรงไฟฟ้าต้นแบบที่ทำการศึกษาคือ โรงไฟฟ้าชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3.1.5 ในการระบุเอกลักษณ์ สามารถใช้ Toolbox ในโปรแกรมแมทแล็บ

4.1 ขอบเขตของการวิจัย

- 4.1.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน
- 4.1.2 ระบุเอกลักษณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชันด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยและเครือข่ายประสาทเทียม

5.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.1.1 ได้แบบจำลองผลระบบแก๊สซีไฟเออร์

5.1.2 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับรูปแบบการทำงานของระบบแก๊สซีไฟเออร์ซึ่งอธิบายโดยสมการคณิตศาสตร์

5.1.3 ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ที่ศึกษาเพื่อนำมาใช้กับระบบแก๊สซีไฟเออร์

5.1.4 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ

5.1.5 ได้มอบบัณฑิตทางด้านวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง 1 คน เพื่อพัฒนาประเทศ

6.1 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 4 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โรงไฟฟ้าชีวมวลและการระบุเอกลักษณ์

บทที่ 3 กล่าวถึงโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบที่ใช้ทำการศึกษา

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์แบบถดถอย โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง และการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สามในการอนุมาน รวมทั้งผลการทดสอบที่ได้ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้ MATLAB

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบแพร่กลับ และใช้ MATLAB ในการประมวลผล

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของข้อมูลฝึกสอนและทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ข. ผลการรันโปรแกรมด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย

ภาคผนวก ค. ผลการรันโปรแกรมด้วยเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยปริทัศน์วรรณกรรม จะสรุปโดยย่อเกี่ยวกับงานวิจัยของนักวิจัยต่าง ๆ ที่ดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการแก้สซิปิเคชันและจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด ได้แก่ เทคโนโลยีแก้สซิปิเคชัน การวิเคราะห์การถดถอย และเครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเตาผลิตแก๊วชีวมวล โดยย่อได้ดังนี้

Delavari, A.R. และ Klein, R.L. (1988) นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ระบบแก้สซิปิเคชันด้วยสมการลำดับที่ 1 และสมการลำดับที่ 2 ผ่านการหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธี recursive maximum likelihood โดยศึกษาที่ 2 สภาวะคือสภาวะที่ไม่ปนเชื้อเพลิงชีวมวลกับสภาวะปนเชื้อเพลิงตามปกติ จะพบว่าสมการลำดับที่ 2 สามารถทำการระบุเอกลักษณ์ได้ดีกว่าเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศ ความดันของอากาศ ความดันของไอน้ำและ อุณหภูมิอากาศ ที่มีผลต่ออุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิง นิรมล ชูลิเลศวิทยาภรณ์, พงนิย์ ขุมมงคล และ ดำรุง ขุมมงคล (2537) พบว่าวิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex method) สามารถหาภาวะที่จะผลิตแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ดีที่สุด โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ขนาดความยาวของเชื้อเพลิง อัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลของแก๊ส CO ที่ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ของแก๊ส ฌคร เอื้อสกุล และ สิ้นชัย ชินวรรตน์. (2546) ได้ใช้แบบจำลองพีชชีลोजิกที่ใช้การเรียนรู้แบบแพร่กลับในการฝึกสอนหาเอกลักษณ์ของเตาเผาขยะมูลฝอยแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินและอัตราส่วนของอากาศส่วนที่สองต่ออากาศทั้งหมดที่สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น CO_2 , CO ความเข้มข้นของ CO, NO, N_2O และ อุณหภูมิที่ฐานเตา พบว่ายังมีเอาต์พุตบางตัวที่ยังมีค่าความผิดพลาดสูงอยู่เมื่อทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีดังกล่าว ฌคร เอื้อสกุล. (2547) พบว่าทำการระบุเอกลักษณ์เตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบดับบลิงด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองพีชชีลोजิก สามารถให้ค่าเอาต์พุตจาก

แบบจำลองใกล้เคียงกับค่าจากระบบจริง โดยมีอินพุตของแบบจำลองคือความดันตกคร่อมเตาเผาและอุณหภูมิที่ฐานเตา และเอาต์พุตคือปริมาณแก๊ส CO_2 , CO , O_2 , NO , N_2O และ SO_2 Sagues, C., Garcia-Bacaicoa, P., and Serrano, S. (2007). ได้ทำการควบคุมเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ระบบการอนุมานฟuzzy เข้ามาช่วยในส่วนของ การปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุม ข้อมูลที่ใช้ป้อนให้ตัวควบคุม คือประเภทของชีวมวลและค่าความชื้นของชีวมวลที่ใช้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บผล โดยพบว่าตัวควบคุมฟuzzy ให้ผลการทำงานที่ดีสำหรับการควบคุมแก๊สซัลไฟเดชันของชีวมวล ไม่ว่าที่สภาวะอินพุตใดๆก็ตาม ทำให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น สุรงค์กร เพชรรักษ์และวิชัย ศิวะโกศิษฏ. (2551) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณโดยโปรแกรม Fluent 6.2.12 สามารถทำนายอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่สอดคล้องกับค่าจากการทดลองจริงได้ โดยพิจารณาที่บริเวณไฟโรไลซิสเท่านั้น

จากการทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ยังไม่มีมีคณะนักวิจัยใดได้เคยพิจารณางานวิจัยที่คล้ายหรือซ้ำซ้อนกับงานวิจัยที่จะดำเนินการในครั้งนี้มาก่อน

2.3 โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นโรงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต 100 กิโลวัตต์ ใช้เทคโนโลยีแก๊สซัลไฟเดชันในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด Open Top Downdraft Gasifier เป็นส่วนผลิตแก๊สชีวมวล เตาสามารถรองรับปริมาณชีวมวลที่เป็นชิ้นไม้ได้ในปริมาณ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 130 กิโลกรัมต่อชั่วโมงในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นแกลบโรงไฟฟ้าชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ เตาแก๊สซิไฟเออร์ ระบบทำความสะอาดแก๊ส และระบบผลิตกระแสไฟฟ้า โรงไฟฟ้าชีวมวลนี้ได้ทำการศึกษาเชื้อเพลิงชีวมวลหลากหลายชนิด สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำผลการทดลองที่ได้จากไม้กระถินยักษ์มาศึกษา

2.4 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดดาวน์ดราฟต์ (Downdraft Gasifier)

อากาศไหลลงทิศทางเดียวกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง เตาชนิดนี้มีจุดประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์จากชั้นก้นสลายไหลผ่านชั้นเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะไหลออกจากเตาผลิตแก๊ส ดังรูปที่ 2.1 แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมี ปริมาณน้ำมันดินปนอยู่ต่ำ แต่แก๊สเชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิสูงถึง 300-500 °C จุดสำคัญของ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดดาวน์ดราฟต์คือลักษณะชั้นเผาไหม้ รูปแบบตะแกรงและวิธีการ ป้อนอากาศลักษณะรูปร่างของชั้นเผาไหม้ จะออกแบบให้เล็กกลงโดยการ ลดพื้นที่หน้าตัด และปรับลักษณะการป้อนอากาศเพื่อทำให้อุณหภูมิชั้นเผา

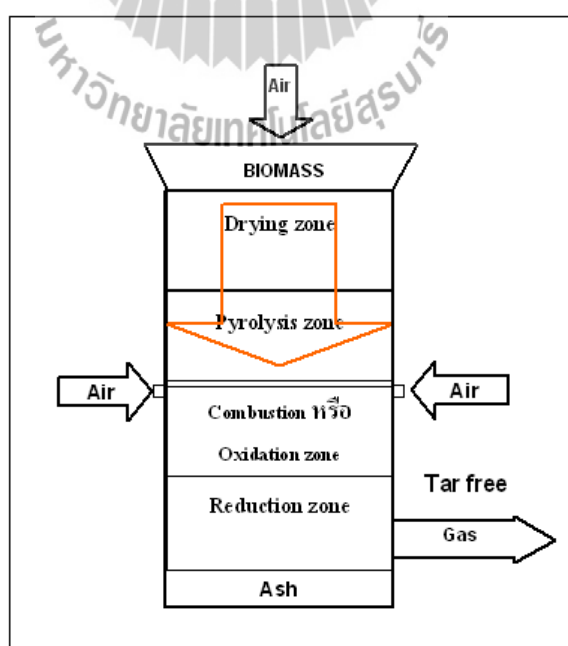
ไผ่มีค่าสูงเพียงพอในการสลายน้ำมันดิน แต่ถ้าเชื้อเพลิงที่มีค่าสูงกว่า 6% และมีความชื้นสูงกว่า 20% จะไม่เหมาะกับเตาชนิดนี้ เนื่องจากเตาอาจหลอมละลายติดกับคอกอดและจะขัดขวางการไหลของเชื้อเพลิงและแก๊ส อัตราการผลิตแก๊สที่เหมาะสมจะมีค่าอัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยา ผลิตแก๊สในเวลาหนึ่งชั่วโมงต่อพื้นที่หน้าตัดของเตาแรง (Specific Gasification Rate: SGR) อยู่ระหว่าง 2900-3900 kg/hr m² (รายงานการวิจัยบทที่ 3,2549)

2.5 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยให้ความร้อนผ่านตัวกลางของกระบวนการเช่น อากาศออกซิเจน ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 800 °C ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) โดยสภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงคือ สภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ นั่นคือมีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน

2.6 ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยโซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังต่อไปนี้ (รายงานการวิจัยบทที่ 3, 2549)



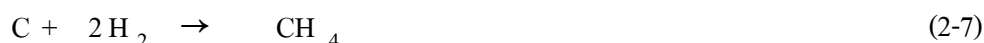
รูปที่ 2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

1. ชั้นเผาไหม้ (Combustion หรือ Oxidation Zone) เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2-1) ถึง (2-2)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (2-1) และ (2-2) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในชั้นรีดักชันและชั้นกลั่นสลาย อุณหภูมิในชั้นเผาไหม้จะมีค่าระหว่าง 1100 – 1500 °C

2. ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) แก๊สร้อนที่ผ่านมาจากชั้นเผาไหม้ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในชั้นนี้ โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 °C ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (2-3) ถึง (2-7)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (2-3) เรียกว่า Boudouard Reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (2-4) เรียกว่า Water Gas Reaction เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการ

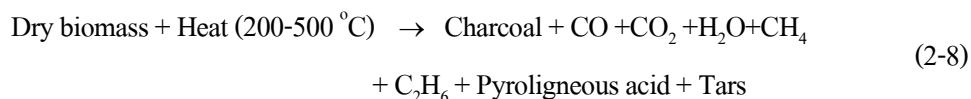
ทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีววมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีววมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีววมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีววมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ

แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในชั้นรีดักชัน สูงกว่า $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของชั้นรีดักชัน

ในขณะที่แก๊สร้อนจากชั้นเผาไหม้ ไหลเคลื่อนเข้าสู่ชั้นรีดักชัน จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2-5) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่าประมาณ $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (2-6) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reaction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากจนเกินไป นอกจากนี้ในชั้นรีดักชัน แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (2-7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Reaction

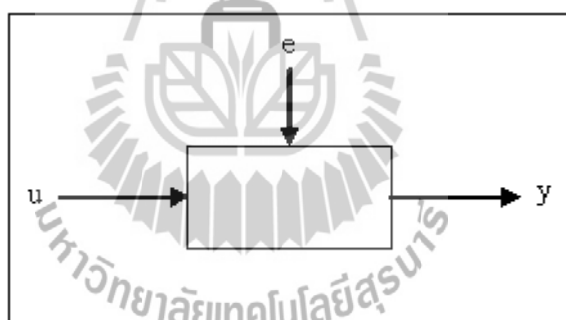
3. ชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis หรือ Distillation Zone) จะรับความร้อนจากชั้นรีดักชัน ทำให้สารระเหย (Volatile matter) ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีววมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในชั้นนี้มีค่าประมาณ $200\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในชั้นรีดักชัน และชั้นเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (2-8)



4. ชั้นลดความชื้น (Drying Zone) ในชั้นนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ ชั้นนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C

2.7 การระบุเอกลักษณ์

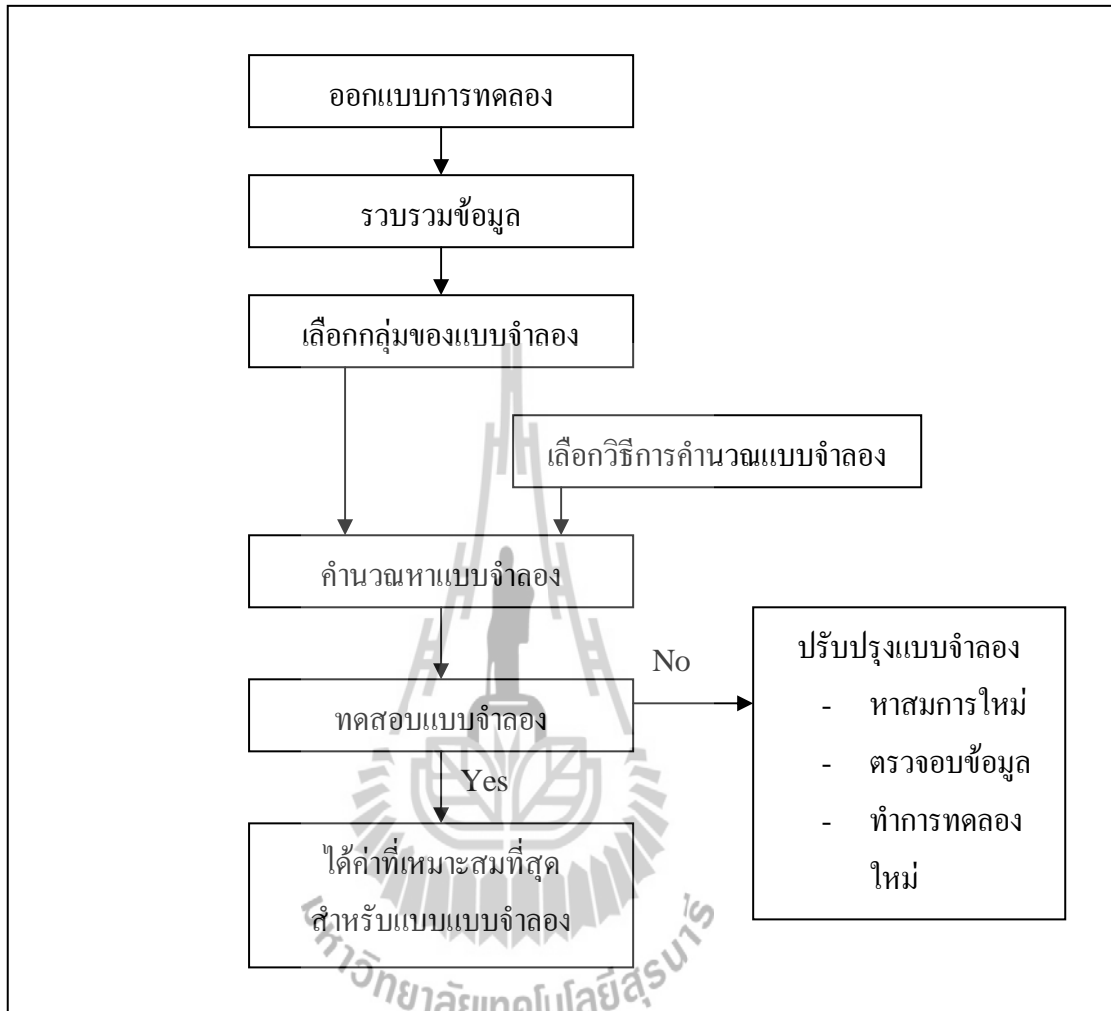
การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) คือการอนุมานความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตกับข้อมูลเอาต์พุตของระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการระบุเอกลักษณ์คือการเลือกแบบจำลองที่ใช้จำลองระบบ ถ้าให้อินพุต เอาต์พุต และสัญญาณรบกวนแทนด้วย u , y และ e ตามลำดับความสัมพันธ์ของสัญญาณดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.2 (สรวาฐิ สุจิตจร, 2551)



รูปที่ 2.2 ระบบที่ y คือเอาต์พุต u คือ อินพุต และ e คือสัญญาณรบกวน

ขั้นตอนในการหาเอกลักษณ์ของระบบ เริ่มต้นโดยการเก็บข้อมูลซึ่งบางครั้ง อาจได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาจจะกำหนดว่าจะวัดสัญญาณอะไร เมื่อใด และเลือกอินพุตแบบใด ขั้นตอนต่อไปคือการเลือกแบบจำลองหรือโครงสร้างของแบบจำลอง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด การเลือกวิธีการในการคำนวณแบบจำลองหรือวิธีการในการหาเอกลักษณ์เป็นขั้นตอนถัดมาซึ่งเป็นการเลือกวิธีในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ขั้นตอนสุดท้ายของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ คือ การทดสอบแบบจำลองที่ได้ ทำได้โดยการนำข้อมูลชุดใหม่ซึ่งไม่ได้ใช้ในการหาเอกลักษณ์มาทดสอบแบบจำลองแล้วเปรียบเทียบเอาต์พุตของแบบจำลองกับเอาต์พุตที่ได้จากการสังเกต

ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบ

2.8 การวิเคราะห์การถดถอย

การถดถอย (Regression) เป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจหา หรือตรวจสอบ ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร 2 ชุด คือ ตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันทั่วไปของสมการการถดถอย กรณีมีตัวแปรอิสระ k ตัว (ทัศนีย์ ชังเทศ และ สมภพ ถาวรยิ่ง, 2537). แสดงดังสมการ (2-1)

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2-9)$$

2.9.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

ฟังก์ชันเชิงเส้นตรงเป็นสมการพื้นฐานที่ง่ายที่สุด ที่รู้จักกันว่าเป็นสมการลำดับที่หนึ่ง (First-order equation) มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \varepsilon \quad (2-10)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่สังเกตได้ ในที่นี้คือ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel flow rate : F_{gas})

a_0, a_i คือ สัมประสิทธิ์สมการ

x_i คือ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ในที่นี้ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณน้ำไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง (Ash discharge rate (kg/h) : F_{ash}) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อชั่วโมง (Biomass consumption rate (kg/h) : F_{bc}) และอุณหภูมิที่วัดจาก โซนเผาไหม้ (Combustion zone temperature ($^{\circ}$ C): T_{comb}) ซึ่งก็คือ x_1, x_2 และ x_3 ตามลำดับ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

2.9.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามลำดับที่สอง

ในกรณีที่พื้นผิวมีความโค้งของข้อมูล จะทำการประมาณโดยใช้รูปแบบของสมการลำดับที่สอง (Second-order equation) ดังสมการ (2-11)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2-11)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่สังเกตได้

a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} คือ สัมประสิทธิ์สมการ

x_i, x_j คือ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

2.9.3 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามลำดับที่สาม

รูปแบบของสมการลำดับที่สาม (Third-order equation) ดังสมการ (2-12)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijl} x_i x_j x_l + \varepsilon \quad (2-12)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่สังเกตได้

$a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij}, a_{ijl}$ คือ สัมประสิทธิ์สมการ

x_i, x_j, x_l คือ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

2.9.4 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard error of estimate : $S_{y/x}$) เป็นความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณของค่า y บนค่า x (ทัศนีย์ ชังเทศ และ สมภพ ฉาวรุ่ง, 2537)

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (2-13)$$

จากค่า $S_{y/x}$ จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของข้อมูล กล่าวคือ ถ้า $S_{y/x}$ มีค่าน้อย บอกรายว่าข้อมูล y ที่ใช้คำนวณนั้นกระจุกกระจายอยู่ใกล้ชิดกับเส้นการถดถอยมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้า $S_{y/x}$ ที่คำนวณได้มีค่ามาก แสดงให้เห็นว่าข้อมูล y ที่นำมาใช้คำนวณนั้นกระจายห่างจากเส้นการถดถอยมาก และถ้า $S_{y/x} = 0$ ค่า y จะอยู่บนเส้นการถดถอยทั้งหมด

2.9.5 สัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด

สมการที่ดีที่สามารถนำไปคาดคะเนค่า y ในอนาคต โดยมีโอกาสที่จะถูกต้องตรงกับค่า Y ที่แท้จริงได้มากนั้น จะต้องสามารถอธิบายการกระจายที่เกิดขึ้น ในค่า y ได้มากที่สุด นั่นคือผลรวมกำลังสองของการกระจายที่อธิบายได้ จะต้องมีความใกล้เคียงกับผลรวมกำลังสองของการกระจายทั้งหมด และถ้าผลรวมกำลังสองของการกระจายที่อธิบายได้เท่ากับผลรวมกำลังสองของการกระจายทั้งหมดแล้ว สมการการถดถอยจะสามารถอธิบายการกระจายของ y ทั้งหมดได้ถึง 100% ถ้านำสมการ

ไปคาดคะเนค่า y ในอนาคตจะได้ค่า y ถูกต้องกับความเป็นจริง 100% เช่นกัน (ทัศนีย์ ชังเทศ และ สมภพ ถาวรยิ่ง, 2537)

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการวัดอัตราส่วนระหว่างผลรวมกำลังสองของการกระจายที่อธิบายได้ด้วยผลรวมกำลังสองของการกระจายทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (Coefficient of determination: R^2) นั่นคือ

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2-14)$$

คุณสมบัติของ R^2

1. R^2 มีค่าเป็นบวกเสมอ

2. R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100%

ประโยชน์ของ R^2

1. R^2 เป็นเครื่องวัดความใกล้ชิดระหว่างเส้นการถดถอยกับค่า y หมายความว่า

ถ้า $R^2 = 1$ ค่า y จะอยู่บนเส้นการถดถอยทุกจุด

ถ้า R^2 มีค่ามาก y จะอยู่ชิดกับเส้นการถดถอย

ถ้า R^2 มีค่าน้อย y จะอยู่ห่างจากเส้นการถดถอย

ถ้า R^2 มีค่าเท่ากับศูนย์ y จะอยู่ห่างจากเส้นการถดถอยมาก จนหาแนวโน้มที่ถูกต้องไม่ได้

2. ในทางปฏิบัติใช้ R^2 เป็นเครื่องแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ x ที่มีต่อตัวแปรตาม y กล่าวคือสามารถอธิบายได้ว่า การกระจายของค่า y ทั้งหมดนั้น สามารถอธิบายได้จากค่า x ได้กี่เปอร์เซ็นต์ หรือ x มีอิทธิพลต่อ y กี่เปอร์เซ็นต์ เช่น ถ้า $R^2 = 0.7958$ หมายความว่า สมการการถดถอยนี้สามารถอธิบายการกระจายของ y ได้ 79.58% ที่เหลือ 20.42% เป็นส่วนของตัวแปรอิสระอื่นๆ ที่ไม่ได้พิจารณา

2.9 เครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ

เครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) หรือที่มักจะเรียกสั้น ๆ ว่า ข่ายงานประสาท (neural network หรือ neural net) คือโมเดลทางคณิตศาสตร์ สำหรับประมวลผลสารสนเทศ ด้วยการคำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ ด้วยวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ

(Pattern recognition) และการอุปमानความรู้ (Knowledge deduction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

2.9.1 หลักการ

การทำงานของ Neural networks คือ เมื่อมีอินพุตเข้ามายังเครือข่าย ก็เอาอินพุตมาคูณกับน้ำหนักประสาท (weight) ของแต่ละขา ผลที่ได้จากอินพุตทุก ๆ ขาของนิวรอน จะเอามารวมกันแล้วก็เอามาเทียบกับ threshold ที่กำหนดไว้ ถ้าผลรวมมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า threshold แล้ว ก็จะส่งเอาต์พุตออกไป และเอาต์พุตนั้นก็จะถูกส่งไปยังอินพุตของนิวรอนอื่น ๆ ที่เชื่อมกันในเครือข่ายตามที่เราต้องการ อาจเขียนออกมาได้ดังนี้

If (sum (input*weight) > threshold) then output

สิ่งสำคัญคือ ต้องทราบค่าน้ำหนักประสาทและ threshold สำหรับสิ่งที่เราต้องการ เพื่อให้คอมพิวเตอร์รู้และจำ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้ โดยการสอนให้รู้จัก pattern ของสิ่งที่เราต้องการให้เครือข่ายรู้จำ เรียกว่า การแพร่กลับ (Back-Propagation) ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จำ ในการฝึก feed-forward neural networks จะมีการใช้อัลกอริทึมแบบ Back-Propagation เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักคะแนนของเครือข่าย (neural weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้ว ค่าเอาต์พุตที่ได้รับจากเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป

2.10 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยได้กล่าวถึงโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบที่ใช้ศึกษา เตาแก๊สซิไฟเออร์ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย และเครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ สำหรับข้อมูลของโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.1 บทนำ

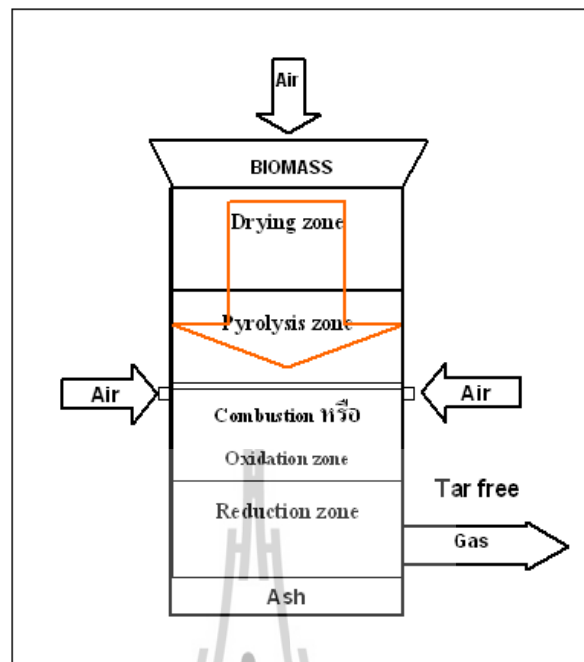
โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นโรงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต 100 กิโลวัตต์ ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิดควอเตอร์ดราฟต์เป็นส่วนผลิตแก๊สชีวมวล สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ เตาแก๊สซิฟิเคชัน ระบบทำความสะอาดแก๊ส และระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

3.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยให้ความร้อนผ่านตัวกลางของกระบวนการเช่น อากาศ ออกซิเจน ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) โดยสถานะที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงคือ สถานะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ นั่นคือมีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน

3.3 ปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชัน

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งบริเวณการเกิดปฏิกริยาออกเป็น 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยบริเวณของปฏิกริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังต่อไปนี้ (รายงานการวิจัยบทที่ 3, 2549)



รูปที่ 3.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

1. ชั้นเผาไหม้ (Combustion หรือ Oxidation Zone) เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (3-1) ถึง (3-2)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (3-1) และ (3-2) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในชั้นรีดักชันและชั้นกลั่นสลาย อุณหภูมิในชั้นเผาไหม้จะมีค่าระหว่าง 1100 – 1500 °C

2. ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) แก๊สร้อนที่ผ่านมาจากชั้นเผาไหม้ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในชั้นนี้ โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 °C ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่าน

คาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (3-3) ถึง (3-7)



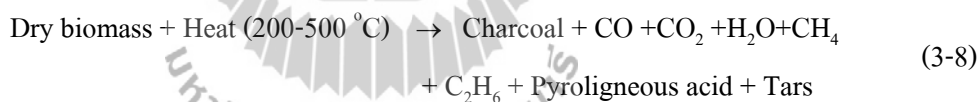
ปฏิกิริยาในสมการที่ (3-3) เรียกว่า Boudouard Reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (3-4) เรียกว่า Water Gas Reaction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีววมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโชนของนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีววมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีววมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีววมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ

แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในชั้นรีดักชัน สูงกว่า 900 °C แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของชั้นรีดักชัน

ในขณะที่แก๊สร้อนจากชั้นเผาไหม้ ไหลเคลื่อนเข้าสู่ชั้นรีดักชัน จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (3-5) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่าประมาณ 500 -600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (3-6) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reaction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในชั้นรีดักชัน แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (3-7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Reaction

3. ชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis หรือ Distillation Zone) จะรับความร้อนจากชั้นรีดักชัน ทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีววมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในชั้นนี้จะมีค่าประมาณ 200-500°C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือคาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในชั้นรีดักชัน และชั้นเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (3-8)



4. ชั้นลดความชื้น (Drying Zone) ในชั้นนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ ชั้นนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C

3.4 ส่วนประกอบของระบบ

ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีววมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ เตาแก๊สซีไฟเออร์ ระบบทำความสะอาดแก๊สและระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

3.5.1 เตาแก๊สซิฟิเคชัน

เตาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้เป็นเตาชนิด Open Top Downdraft Gasifier สามารถรองรับปริมาณชีวมวลที่เป็นชิ้นไม้ได้ในปริมาณ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 130 กิโลกรัมต่อชั่วโมงในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแกลบ (<http://www.satake-group.com/news/2006/061023.html>) โดยภายนอกทำจากวัสดุโลหะมวลกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อน ทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper Feeder รับเชื้อเพลิงชีวมวล และฝาปิดที่ซีล (Seal) ด้วยน้ำ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้าเตาขณะ Shut down ระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้องกันอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับใช้ในการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากเตา สามารถควบคุมระยะเวลาการลำเลียงขี้เถ้าออกได้ (รายงานการวิจัย บทที่ 3,2549) แสดงไว้ใน รูปที่ 3.2 ข้อดีของเตาประเภทนี้คือ ออกแบบเพื่อขจัดน้ำมันดินโดยเฉพาะและไวต่อการตอบสนอง ส่วนข้อด้อยนั้นเตาชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ต้องทำการลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดด เพื่อให้มีค่าความชื้นได้ไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.2 เตาแก๊สซิฟิเคชันชนิด Open Top Downdraft Gasifier

3.5.2 ระบบทำความสะอาดแก๊ส

ระบบทำความสะอาดแก๊สจะเป็นการทำความสะอาดอย่างเหนียวและฝุ่น และทำการลดอนุภาค เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ที่เป็นต้นกำลังของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป โดยระบบทำความสะอาดจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 5 ชุด คือ

3.4.2.1 Cyclone Collector

เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊ส ใช้หลักการดักฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดแก๊สหมุนวน จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของ Cyclone Collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนอยู่ด้านบนแล้วไหลตามท่อไปสู่ระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ต่อไป รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ Cyclone Collector (รายงานการวิจัย บทที่ 3, 2549)



รูปที่ 3.3 Cyclone Collector

3.4.2.2 Water Scrubber and Chiller Scrubber

เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊ส โดยใช้ละอองน้ำ ส่วน Chiller Scrubber เป็นอุปกรณ์ดักขางเหนียวและฝุ่น โดยใช้น้ำเย็น ซึ่งไอระเหยของขางเหนียวจะควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำลงไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ลักษณะของ Water Scrubber และ Chiller Scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (รายงานการวิจัย บทที่ 3, 2549)



รูปที่ 3.4 Water Scrubber และ Chiller Scrubber

3.4.2.3 Closed-loop wastewater treatment

ระบบบำบัดน้ำเสีย Closed-loop wastewater treatment ที่ใช้เป็นระบบปิด มีส่วนประกอบคือ Flocculation Tank และ Buffer tank โดย Flocculation Tank ทำหน้าที่เป็นถังบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีจับตะกอนด้วยสารเคมีโดยการเติมสาร Polymer Coagulants จากวิธีนี้จะทำให้น้ำเสียเปลี่ยนเป็นตะกอนและน้ำใส ในส่วนของ Buffer Tank จะเป็นถังเก็บน้ำและพักน้ำเสียที่ได้มาจาก Water Scrubber และ Chiller Scrubber เป็นถังรับน้ำจาก Water Scrubber และ Chiller Scrubber ทุกตัว โดยจะรองรับน้ำและนำไปบำบัดที่ Flocculation Tank รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะถังบำบัดน้ำ Flocculation Tank และ รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของ Buffer Tank (รายงานการวิจัย บทที่ 3, 2549)



รูปที่ 3.5 ถังบำบัดน้ำ Flocculation Tank



รูปที่ 3.6 ถังเก็บน้ำและพักน้ำเสีย Buffer Tank

3.4.2.4 Biomass Filter Unit

ทำหน้าที่ดักความชื้น ฟุ่นและอนุภาคอื่น ๆ โดยใช้ไม้ที่สับแล้วขนาดเล็กเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ถูกทำความสะอาดจากระบบ Scrubber นั้นยังมีความชื้นสูง และมีละอองไอน้ำมันดินเหลืออยู่ หน่วยบำบัดนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของถลุงกรองใน Bag Filter Unit ได้ ลักษณะของ Biomass Filter Unit แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 (รายงานการวิจัย บทที่ 3, 2549)



รูปที่ 3.7 Biomass Filter Unit

3.4.2.5 Bag Filter Unit

ทำหน้าที่ดักฝุ่นหรืออนุภาคและความชื้นครั้งสุดท้าย เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไปได้ อุปกรณ์นี้สามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ถึง 0.1 มิลลิเมตร รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของ Bag Filter Unit (รายงานการวิจัย บทที่ 3, 2549)



รูปที่ 3.8 Bag Filter Unit

3.5.3 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

ในส่วน of ระบบผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จะใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการกระบวนการทำความสะอาด เป็นอินพุตให้กับเครื่องยนต์เพื่อไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยชุดผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบนี้มี 2 ชนิด คือ ชุดเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบเครื่องยนต์แก๊สขนาด 115 KVA โดยจะใช้แก๊สเชื้อเพลิง 100 เปอร์เซ็นต์ ต่อเครื่องยนต์เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่มีขนาดกำลังผลิต 100 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที และเครื่องยนต์ดีเซล ขนาด 125 KVA ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้างต้น โดยจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลในการผลิตกระแสไฟฟ้า รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะเครื่องยนต์แก๊ส รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะเครื่องยนต์ดีเซล และรูปที่ 3.11 แสดงลักษณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส



รูปที่ 3.9 เครื่องยนต์แก๊ส



รูปที่ 3.10 เครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

3.5 ขั้นตอนการเดินระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ

ขั้นตอนการเดินระบบของโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การเริ่มต้นจุดเตาแก๊สซีฟิเออร์ การป้อนแก๊สเข้าเครื่องยนต์และการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการหยุดการทำงานของเตาแก๊สซีฟิเออร์

3.5.1 การเริ่มต้นจุดเตาแก๊สซีฟเอร์

เริ่มต้นจากการเปิดฝาด้านบนของเตาแก๊สซีฟเอร์เพื่อและทำการปล่อยน้ำซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการไหลเข้าออกของอากาศในช่วงที่ดับเตาแก๊สซีฟเอร์ จากนั้นจึงทำการเติมเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้รอกไฟฟ้าในการลำเลียงขึ้นไปด้านบน สำหรับปริมาณเชื้อเพลิงที่เติมนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของชีวมวลที่ใช้โดยได้จากการคำนวณ ทำการเปิดวาล์วทางเข้าอากาศที่อยู่รอบเตาเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในเตา จากนั้นทำการเปิดสวิตช์ระบบควบคุมเตาแก๊สซีฟเอร์แล้วจึงทำการจุดเตาแก๊สซีฟเอร์ ทำการทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ภายหลังจากจุดเตาไปแล้วประมาณ 2 ชั่วโมงที่ชุดทดสอบการลุกไหม้ (Start up flare) ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.12 (รายงานการวิจัย บทที่ 3, 2549)



ก. เปิดฝาด้านบนเพื่อเติมเชื้อเพลิง

ข. ทำการปล่อยน้ำบริเวณข้างขอบเตา



ค. ลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้รอกไฟฟ้า

ง. การเติมเชื้อเพลิงชีวมวล

รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงานของโรงไฟฟ้าชีวมวล



จ. เปิดวาล์วทางเข้าของอากาศรอบเตา

ฉ. เปิดสวิตช์ควบคุมการเดินระบบแก๊สซีไฟเออร์

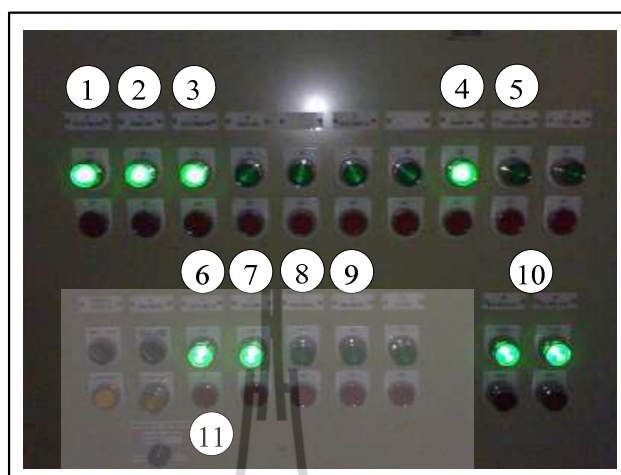


ช. ทำการจุดเตาแก๊สซีไฟเออร์

ซ. การทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง

รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเริ่มต้นการทำงานของโรงไฟฟ้าชีวมวล (ต่อ)

สำหรับในส่วนของสวิตช์ควบคุมการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันระบบควบคุมโรงไฟฟ้าชีวมวลนั้น แสดงตำแหน่งการควบคุมที่ต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของสวิตช์ระบบควบคุมเตาแก๊สซิฟิเคชัน

1. Cooling tower pump
2. Scrubber pump
3. Chilled scrubber pump
4. Reactor pump
5. Flocculate pump
6. Cooling tower fan
7. Gas blower
8. Screw conveyor
9. Agitator
10. Water motor valve
11. Blower speed

3.5.2 การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ทำการเปิดสวิตช์ภายในตู้ควบคุมแก๊สเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 3.14 กรณีใช้เครื่องยนต์ดีเซลร่วมจะทำการสตาร์ทเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการจุดระเบิดในช่วงเริ่มต้น จากนั้นจะทำการปิด Flare valve (หมายเลข1) และเปิด Engine valve (หมายเลข 2) เพื่อให้แก๊ส

เชื้อเพลิงที่ผลิตได้เข้าไปแทนที่การใช้น้ำมันดีเซล แล้วทำการควบคุมปริมาณแก๊สชีววมวลให้อยู่ในช่วง 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีใช้เครื่องยนต์แก๊ส จะทำการเปิด Flare valve ที่ 25 องศา และเปิด Engine valve ที่ 75 องศา จากนั้นจึงสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊ส แล้วทำการปิด Flare valve และเปิด Engine valve ที่ 90 องศาแทน (मुखของวาล์วนี้จะใช้ปรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เครื่องยนต์)



รูปที่ 3.14 ตู้ควบคุมแก๊สเชื้อเพลิง

3.5.3 การหยุดการทำงานของเตาแก๊สซีไฟเออร์

ทำการปิดช่องทางเข้าของอากาศบริเวณรอบเตาแก๊สซีไฟเออร์เพื่อไม่ให้อากาศเข้าสู่ภายในเตา จากนั้นกดปุ่มปิดสวิทช์ควบคุมการทำงานของเตาแก๊สซีไฟเออร์ ปิดฝาด้านบนของเตา และปล่อยน้ำเข้าไปบริเวณช่องด้านข้างของเตาเพื่อป้องกันการไหลเข้าออกของอากาศในช่วงที่ดับเตา

3.6 พารามิเตอร์ที่ทำการเก็บข้อมูล

โรงไฟฟ้าชีววมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้ทำการศึกษาเชื้อเพลิงชีววมวลหลากหลายชนิด สำหรับข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำข้อมูลที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงชีววมวลจากไม้กระถินยักษ์มาใช้ในการศึกษา โดยพารามิเตอร์ที่โรงไฟฟ้าชีววมวลทำการเก็บข้อมูลแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่โรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบทำการเก็บข้อมูล (รายงานการวิจัย บทที่4, 2549)

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เครื่องมือวัด/Sensor	ระบบการวัด
1. อุณหภูมิ 1.1 อุณหภูมิที่เตา 1.2 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิง - แก๊สที่ออกจากเตาแก๊สซีไฟเออร์ (°C) - แก๊สที่เข้าเครื่องยนต์(°C)	$T_1 - T_6$ T_0 T_g	Thermocouple Type K	Online Measuring System
2. อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง (m ³ /h)	F_{gas}	Gas Flow Meter	Online Measuring System
3. ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h)	F_{bc}	ตาชั่ง	Manual
4. ปริมาณขี้เถ้า (kg/h)	F_{ash}	ตาชั่ง	Manual
5. Gas Composition (%V)	G_c	Gas Chromatography Shimazu GC14B	Laboratory Analysis
6. Exhaust Gas	G_{ex}	Flue Gas Analyzer	Onsite Measure
7. Impurities (Tar & Dust) - After Reactor (mg/Nm ³) - After Scrubber(mg/Nm ³) - After Biomass Filter (mg/Nm ³) - After Fabric Filter (mg/Nm ³)	TD_1 TD_2 TD_3 TD_4	Filter and Condenser	Onsite Measure
8. Waste water characteristics - After Scrubber - After Flocculation - Sludge	W_1 W_2 W_3	เครื่องมือตาม มาตรฐาน APHA	Laboratory Analysis



ก. Thermocouple Type K



ข. Gas Flow Meter



ค. ตาชั่ง

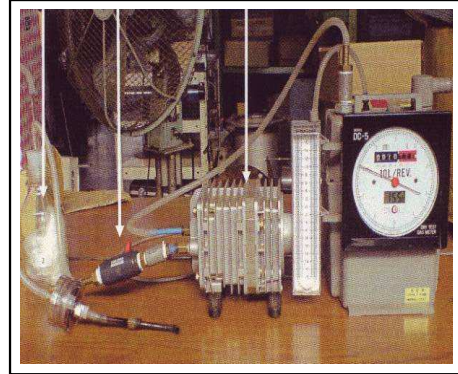


ง. Flue Gas Analyzer

รูปที่ 3.15 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูล



จ. Gas Chromatography



ฉ. Filter and Condenser

รูปที่ 3.15 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูล (ต่อ)

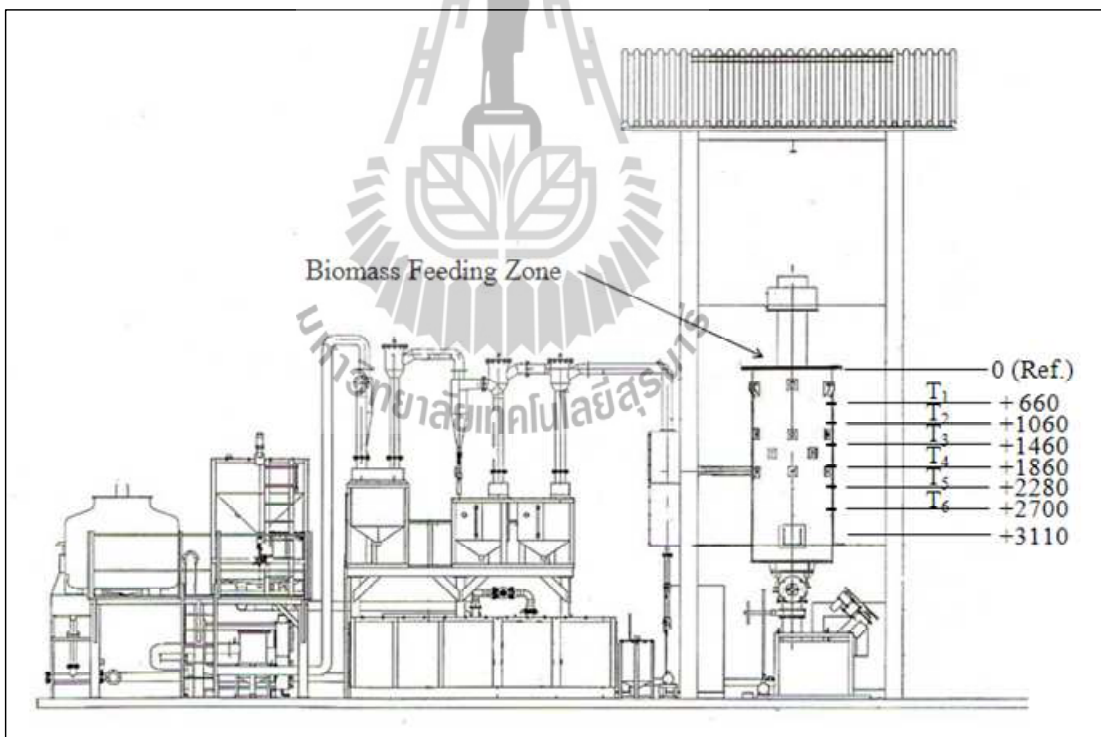


รูปที่ 3.16 เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้กระถินยักษ์

สำหรับการวัดอุณหภูมิของเตาแก๊สซีฟเออร์ จะทำการวัดทั้งหมด 6 จุด โดยติดตั้ง Thermocouple ที่ระยะแตกต่างกัน โดยมีระยะอ้างอิงจากขอบเตา แสดงดังรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.2 ระยะติดตั้ง Thermocouple ที่เตาแก๊สซีฟเออร์

ระยะจากจุดอ้างอิง (mm)	ตำแหน่งเครื่องมือวัด
660	T ₁
1060	T ₂
1460	T ₃
1860	T ₄
2280	T ₅
2700	T ₆



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการติดตั้งและวัดอุณหภูมิที่เตาแก๊สซีฟเออร์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจความสัมพันธ์ของปริมาณซีเฝ้า ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล และอุณหภูมิบริเวณชั้นเผาไหม้ที่ส่งผลต่ออัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากไม้กระถินยักษ์ในการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าว

3.7 สรุป

จากเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงโรงไฟฟ้าชีวมวลต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจความสัมพันธ์ของปริมาณซีเฝ้า ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลและอุณหภูมิบริเวณชั้นเผาไหม้ที่ส่งผลต่ออัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากไม้กระถินยักษ์ในการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งวิธีการหาความสัมพันธ์จะได้กล่าวในบทถัดไป



บทที่ 4

การระบุเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย

4.1 บทนำ

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซิไฟเออร์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยด้วยสมการเส้นตรง สมการลำดับที่สอง สมการลำดับที่สาม โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับระบบแก๊สซิไฟเออร์ ประกอบด้วย ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (F_{bc}) ปริมาณขี้เถ้า (F_{ash}) และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ (T_{comb}) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้มีความสัมพันธ์กับเอาต์พุตซึ่งก็คือ ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง (F_{gas}) ในที่นี้จะศึกษาที่ 100, 120 และ 200 m^3/h สำหรับชุดข้อมูลที่ใช้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะศึกษาที่ชุดข้อมูลปกติตามที่โรงไฟฟ้าเก็บข้อมูลได้ ในส่วนที่สองจะนำข้อมูลในส่วนแรกมา แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยการถดถอยอีกครั้งหนึ่ง

4.2 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่ง ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยแบ่งเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) และตัวแปรตาม (Dependent variable)

4.2.1 ชนิดของการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย มีหลายชนิด ขึ้นกับลักษณะของตัวแปรตาม รูปแบบความสัมพันธ์ และการกำหนดตัวแปรอิสระ (ตัวแปรต้น) ในที่นี้ได้ทำการศึกษากการวิเคราะห์การถดถอย 4 ประเภท คือ

4.2.1.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple linear regression analysis)

จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์เป็นการหาขนาดของความสัมพันธ์ และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการ

พยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม ฟังก์ชันเชิงเส้นตรงเป็นสมการพื้นฐานที่ง่ายที่สุด มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \varepsilon \quad (4-1)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่สังเกตได้ ในที่นี้คือ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel flow rate : F_{gas})

a_0, a_i คือ สัมประสิทธิ์สมการ

x_i คือ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ในที่นี้ประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณชี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง (Ash discharge rate (kg/h) : F_{ash}) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อชั่วโมง (Biomass consumption rate (kg/h) : F_{bc}) และอุณหภูมิที่วัดจากโซนเผาไหม้ (Combustion zone temperature ($^{\circ}$ C): T_{comb}) ซึ่งก็คือ x_1, x_2 และ x_3 ตามลำดับ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

4.2.1.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สอง (Multiple Quadratic regression analysis)

รูปแบบของสมการลำดับที่สอง (Second-order equation) แสดงดังสมการ (4-2)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4-2)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่สังเกตได้

a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} คือ สัมประสิทธิ์สมการ

x_i, x_j คือ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

4.2.1.3 การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สาม (Multiple Cubic regression analysis)

รูปแบบของสมการลำดับที่สาม (Third-order equation) ดังสมการ (4-3)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijl} x_i x_j x_l + \varepsilon \quad (4-3)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่สังเกตได้

$a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij}, a_{ijl}$ คือ สัมประสิทธิ์สมการ

x_i, x_j, x_l คือ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

สำหรับวิธีการวิเคราะห์นั้นจะใช้หลักการเดียวกันแต่สิ่งที่ต่างกันคือรูปแบบสมการ โดยถือหลักการว่าจะต้องมีผลรวมของระยะห่างหรือค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด เราเรียกหลักการนี้ว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method)

4.2.2 หลักการการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้เมตริกซ์

ในกรณีแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง โดยเส้นตรงที่ต้องการต้องเป็นเส้นที่ลากผ่านจุดโดยมีผลรวมค่าผิดพลาดจากจุดข้อมูลทั้งหมดที่น้อยที่สุด พิจารณาชุดข้อมูล (Steven, C.C., and Raymond, P.C., 2004)

$$y = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) \quad (4-4)$$

ต้องการแทนสมการด้วยชุดข้อมูลเส้นตรง

$$y = a_0 + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_n x_{ni} + \varepsilon \quad (4-5)$$

เมื่อ ε คือ ค่าความผิดพลาด จะได้ว่า

$$\varepsilon = y - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni} \quad (4-6)$$

ความใกล้เคียงของเส้นตรงและชุดข้อมูลวัดได้จาก

$$S_r = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (4-7)$$

$$= \sum_{i=1}^n (y - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni})^2 \quad (4-8)$$

ถ้าสมการที่ข้อมูลทุกจุด จะได้ว่า

$$S_r = 0 \quad (4-9)$$

สามารถหาค่า a_0, a_1, \dots, a_n ได้จาก

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = 0 \quad (4-10)$$

$$= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni}) \quad (4-11)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = 0 \quad (4-12)$$

$$= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni}) x_{1i} \quad (4-13)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_2} = 0 \quad (4-14)$$

$$= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni}) x_{2i} \quad (4-15)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_n} = 0 \quad (4-16)$$

$$= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i} - \dots - a_n x_{ni}) x_{ni} \quad (4-17)$$

จาก (4-11) (4-13) (4-15) และ (4-17) จะได้ว่า

$$\sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_{1i} - \sum a_2 x_{2i} - \dots - \sum a_n x_{ni} = 0 \quad (4-18)$$

$$\sum y_i x_{1i} - \sum a_0 x_{1i} - \sum a_1 x_{1i}^2 - \sum a_2 x_{1i} x_{2i} - \dots - \sum a_n x_{1i} x_{ni} = 0 \quad (4-19)$$

$$\sum y_i x_{2i} - \sum a_0 x_{2i} - \sum a_1 x_{1i} x_{2i} - \sum a_2 x_{2i}^2 - \dots - \sum a_n x_{2i} x_{ni} = 0 \quad (4-20)$$

$$\sum y_i x_{ni} - \sum a_0 x_{ni} - \sum a_1 x_{1i} x_{ni} - \sum a_2 x_{2i} x_{ni} - \dots - \sum a_n x_{ni}^2 = 0 \quad (4-21)$$

เมื่อ

$$\sum a_0 = n a_0 \quad (4-22)$$

และ

$$\sum a_i x_i = a_i \sum x_i \quad (4-23)$$

เมื่อแทน (4-22) (4-23) ใน (4-18) (4-19) (4-20) และ (4-21) จะได้สมการทั่วไป คือ

$$n a_0 + a_1 \sum x_{1i} + a_2 \sum x_{2i} + \dots + a_n \sum x_{ni} = \sum y_i \quad (4-24)$$

$$a_0 \sum x_{1i} + a_1 \sum x_{1i}^2 + a_2 \sum x_{1i} x_{2i} + \dots + a_n \sum x_{1i} x_{ni} = \sum y_i x_{1i} \quad (4-25)$$

$$a_0 \sum x_{2i} + a_1 \sum x_{1i} x_{2i} + a_2 \sum x_{2i}^2 + \dots + a_n \sum x_{2i} x_{ni} = \sum y_i x_{2i} \quad (4-26)$$

$$a_0 \sum x_{ni} + a_1 \sum x_{1i}x_{ni} + a_2 \sum x_{2i}x_{ni} + \dots + a_n \sum x_{ni}^2 = \sum y_i x_{ni} \quad (4-27)$$

สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \dots & \sum x_{ni} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \dots & \sum x_{1i}x_{ni} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 & \dots & \sum x_{2i}x_{ni} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{ni} & \sum x_{1i}x_{ni} & \sum x_{2i}x_{ni} & \dots & \sum x_{ni}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{ni}y_i \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

ดังนั้น a_0 a_1 a_2 และ a_n สามารถหาได้จาก (4-28) เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์แล้ว
จะได้สมการแทนชุดข้อมูลตามต้องการ โดยความสามารถในการแทนชุดข้อมูลของสมการเส้นตรง
ประเมินได้จาก standard error of estimate หรือ $S_{y/x}$

$$\begin{aligned} S_{y/x} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1}} \\ &= \sqrt{\frac{S_r}{n-k-1}} \end{aligned} \quad (4-29)$$

เมื่อ k คือจำนวนตัวแปร และ n คือ จำนวนข้อมูล

เมื่อเทียบค่า \bar{y} กับสมการเส้นตรงที่ใช้แทนชุดข้อมูลคือ นำ \bar{y} เป็นค่าแทนชุด
ข้อมูลทั้งหมด จะได้ค่าผิดพลาดยกกำลังสอง ดังนี้

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4-30)$$

จะได้ค่าความแตกต่างระหว่าง S_r และ S_t ดังนี้

$$R^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (4-31)$$

เรียก R^2 ว่า Coefficient of determination และเรียก R ว่า Correlation coefficient

4.2.3 การเลือกตัวแปรอิสระ

ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบหลายขั้นนั้น การใช้ตัวแปรอิสระหลาย ๆ ตัว บางครั้งทำให้เกิดความยุ่งยากทั้งในด้านการคำนวณ การนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้เพราะตัวแปรอิสระ บางตัวที่ใส่เข้าไปในสมการอาจไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลยก็ได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงหาทางขจัด ตัวแปรอิสระ ที่ไม่มีความสำคัญต่อตัวแปรตามทิ้งเสีย แล้วจัดลำดับตัวแปรอิสระตามความสำคัญ

วิธีการจัดลำดับตัวแปรอิสระที่มีความสำคัญต่อตัวแปรตาม มีหลายวิธีด้วยกัน ใน ที่นี้จะกล่าวถึงวิธีออก โปสทีเบล รีเกรสชัน (All Possible Regression) เท่านั้น

4.2.3.1 วิธีออก โปสทีเบล รีเกรสชัน

เป็นวิธีการกำจัดตัวแปรอิสระวิธีหนึ่ง โดยการนำตัวแปรอิสระทุกตัวที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์ หรือมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แล้วใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2) เป็นตัวตัดสิน ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้ (ทักษิณ ช่างเทศและสมภพ การวยิ่ง, 2537)

ขั้นที่ 1 ใส่ตัวแปรอิสระทุกตัวที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามลงในสมการ ทั้งนี้โดยการใส่ตัวแปรอิสระลงไปแต่ละตัวก่อน ในขั้นนี้มีตัวแปรอิสระ 3 ตัว คือ x_1 คือ ปริมาณจี๊ด้า , x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, และ x_3 คืออุณหภูมิ และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง ดังนั้นจะมีสมการที่นำมาศึกษาดังนี้

ก. สมการที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว

$$y = a_0 + a_1x_1 + \varepsilon$$

$$y = a_0 + a_2x_2 + \varepsilon$$

$$y = a_0 + a_3x_3 + \varepsilon$$

ข. สมการที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 2 ตัว

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \varepsilon$$

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_3x_3 + \varepsilon$$

$$y = a_0 + a_2x_2 + a_3x_3 + \varepsilon$$

ก. สมการที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัว

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \varepsilon$$

ขั้นที่ 2 หาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2) ของแต่ละสมการในทุกกลุ่ม

ก. $R_{Y1}^2, R_{Y2}^2, R_{Y3}^2$

ข. $R_{Y.12}^2, R_{Y.13}^2, R_{Y.23}^2$

ค. $R_{Y.123}^2$

ต่อจากนั้นพิจารณาคุณค่า R^2 ในแต่ละกลุ่ม แล้วเลือกค่า R^2 ที่สูงที่สุดของแต่ละกลุ่มมาศึกษา ตัวอย่างแสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการเลือกตัวแปรด้วยวิธีออล โพลสตีเบิล รีเกรสชัน

จำนวนตัวแปรอิสระในสมการ	R^2 ที่ชุดข้อมูลอัตราการใช้ต่าง ๆ					
	100	120	200	100 (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)	120 (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)	200 (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)
$y = f(x_1)$	44.74 %	10.90 %	43.76 %	43.76 %	10.45 %	42.86 %
$y = f(x_2)$	33.07 %	2.68 %	53.58 %	33.23 %	2.19 %	53.48 %
$y = f(x_3)$	6.92 %	19.76 %	77.59 %	6.97 %	19.65 %	77.65 %
$y = f(x_1x_2)$	61.68 %	10.92 %	54.10 %	60.97 %	10.59 %	53.81 %
$y = f(x_1x_3)$	55.73 %	33.50 %	78.44 %	55.06 %	33.17 %	78.50 %
$y = f(x_2x_3)$	33.30 %	20.72 %	82.95 %	33.35 %	20.29 %	82.93 %
$y = f(x_1x_2x_3)$	64.69 %	35.17 %	84.43 %	63.76 %	35.81 %	84.41 %

จากตารางค่า R^2 ของความสัมพันธ์ $y = f(x_1x_2x_3)$ มีค่าดีที่สุด จึงเลือกทั้งสามตัวแปรอิสระมาใช้ในสมการการถดถอยต่อไป

4.2.4 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบได้แบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 6 ชุด โดย 3 ชุดแรกจะเป็นชุดข้อมูลปกติที่ได้จากค่าอัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ค่าเฉลี่ยประมาณ 100,120 และ 200 m³/h นำมาทดสอบกับการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ การถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สอง การถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สามและ 3 ชุดหลังจะเป็นการนำกลุ่มข้อมูลใน 3 ชุดแรกมาแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมแล้วจึงนำมาทดสอบกับวิธีข้างต้น ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 100 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 38-47 kg/h

รูปแบบ	MSE		R ²		S _{y/x}	
	train	test	train	test	train	test
เชิงเส้นแบบพหุ	0.0854	0.8498	0.6469	0.1556	0.2923	0.9219
โพลีโนเมียลลำดับ 2	0.0558	0.5104	0.7695	0.2312	0.2362	0.7144
โพลีโนเมียลลำดับ 3	5.31x10 ⁻⁵	5.18 x10 ⁻⁵	0.0012	0.0005	728.42	719.47
การถดถอยเชิงเส้น (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	8.54x10 ⁻⁶	8.40x10 ⁻⁵	0.6376	0.5519	0.0029	0.0092
โพลีโนเมียลลำดับ 2 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	3.05x10 ⁻⁴	1.60x10 ⁻⁴	0.6651	0.6233	0.0175	0.0127
โพลีโนเมียลลำดับ 3 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	0.0289	0.0549	0.6695	0.5312	0.1701	0.2343

ตารางที่ 4.3 ผลหาค่าข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 120 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 44-68 kg/h

รูปแบบ	MSE		R ²		S _{y/x}	
	train	test	train	test	train	test
เชิงเส้นแบบพหุ	0.0767	0.0770	0.3517	0.3301	0.2769	0.2775
โพลีโนเมียลลำดับ 2	6.34x10 ⁻⁴	0.4631	0.9946	0.2234	0.0252	0.6805
โพลีโนเมียลลำดับ 3	9.48x10 ³	2.25x10 ⁴	0.0012	0.0001	97.39	149.96
การถดถอยเชิงเส้น (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	5.03x10 ⁻⁶	7.14x10 ⁻⁶	0.3581	0.3212	0.0022	0.0027
โพลีโนเมียลลำดับ 2 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	0.0013	0.0012	0.5509	0.5799	0.0365	0.0341
โพลีโนเมียลลำดับ 3 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	4.63x10 ³	4.33x10 ³	0.0015	0.0009	68.04	65.78

ตารางที่ 4.4 ผลหาค่าข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 200 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 126-141 kg/h

รูปแบบ	MSE		R ²		S _{y/x}	
	train	test	train	test	train	test
เชิงเส้นแบบพหุ	0.4568	0.1852	0.8443	0.9416	0.6759	0.4304
โพลีโนเมียลลำดับ 2	0.3240	8.8673	0.8896	0.2307	0.5692	2.9778
โพลีโนเมียลลำดับ 3	5.40x10 ⁴	4.86 x10 ⁴	0.0003	0.0001	232.36	220.45
การถดถอยเชิงเส้น (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	8.98x10 ⁻⁶	3.61x10 ⁻⁶	0.8441	0.9425	0.0030	0.0019
โพลีโนเมียลลำดับ 2 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	1.43x10 ⁻⁴	5.02x10 ⁻⁴	0.6684	0.6229	0.0119	0.0224

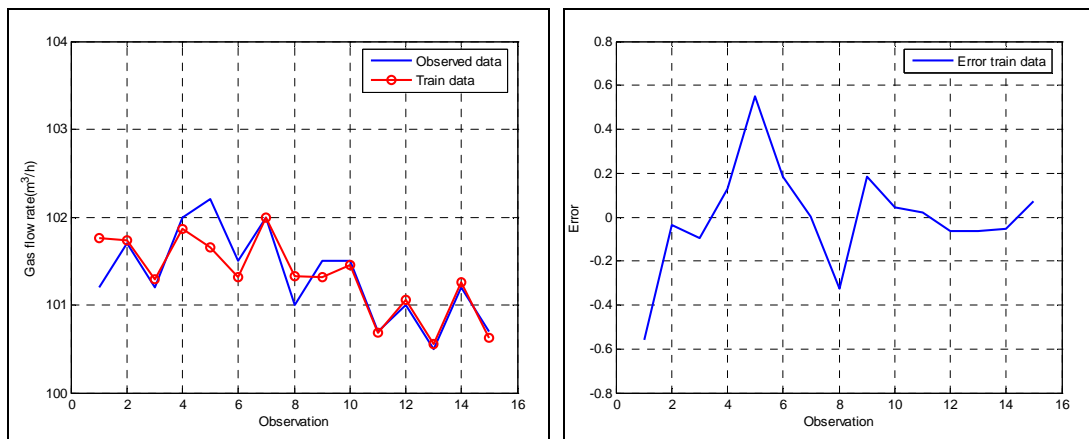
ตารางที่ 4.4 ผลหาค่าข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 200 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 126-141 kg/h (ต่อ)

รูปแบบ	MSE		R ²		S _{y/x}	
	train	test	train	test	train	test
โพลีโนเมียลลำดับ 3 แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม	49.98	49.43	0.0123	0.0154	7.07	7.03

ตารางที่ 4.2 ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 100 m³/h จะเห็นได้ว่าการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สองสามารถประมาณค่าฟังก์ชันได้ดีกว่าค่าอื่น ๆ เมื่อเป็นชุดข้อมูลปกติ แต่เมื่อนำข้อมูลมาแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม การถดถอยแบบเชิงเส้นสามารถประมาณค่าฟังก์ชันได้เหมือนกัน ตารางที่ 4.3 ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 120 m³/h การถดถอยแบบเชิงเส้นพหุให้ผลที่ดีกว่า ทั้งที่ชุดข้อมูลปกติหรือชุดข้อมูลที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ตารางที่ 4.4 ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 200 m³/h การถดถอยแบบเชิงเส้นพหุให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า ทั้งที่ชุดข้อมูลปกติหรือชุดข้อมูลที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม เช่นเดียวกับอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง 120 m³/h โดยพิจารณาจากค่า MSE

ผลจากการรัน โปรแกรมที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 100 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 38-47 kg/h จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังสมการ (4-32) เมื่อทดสอบที่ชุดข้อมูลปกติ

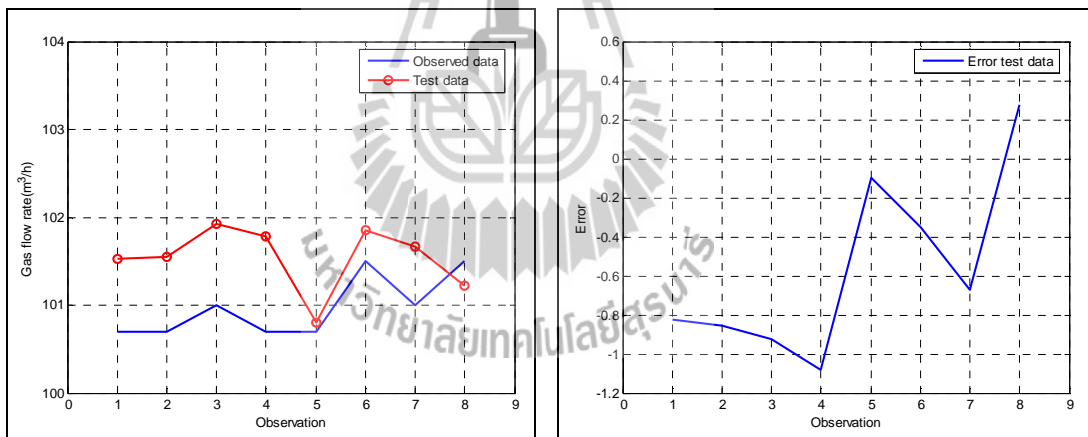
$$y = 1790.6 - 96.892x_1 + 5.3216x_2 - 5.0149x_3 - 21.315x_1^2 - 0.017936x_2^2 + 0.0036664x_3^2 + 0.88218x_1x_2 - 0.0080243x_2x_3 + 0.19618x_1x_3 \quad (4-32)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สองที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$



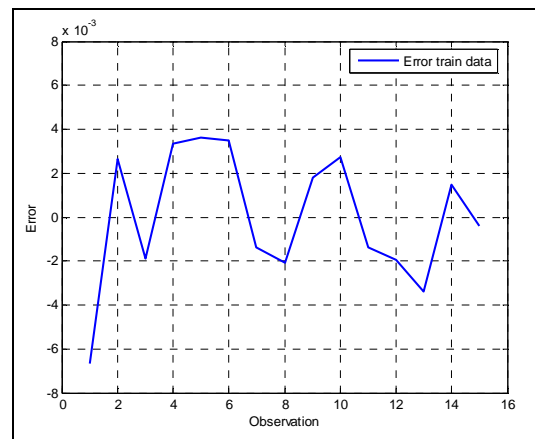
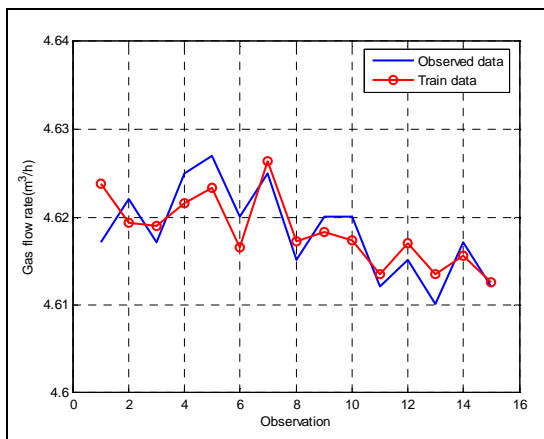
ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สองที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$

และสมการ (4-33) เมื่อชุดข้อมูลผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม

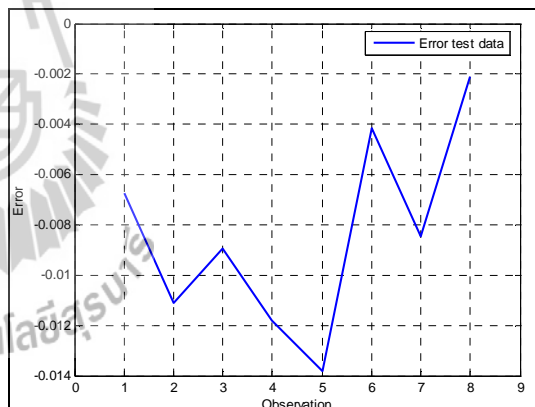
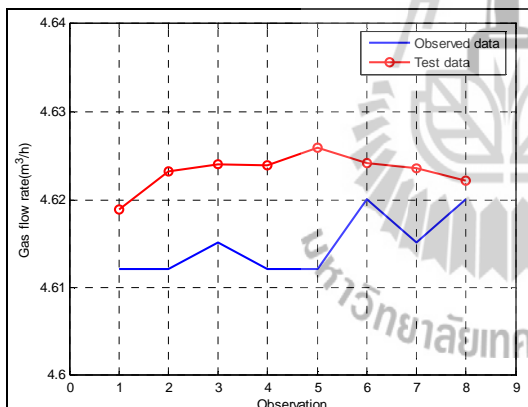
$$y = 5.7949 - 0.059993x_1 - 0.02832x_2 - 0.15834x_3 \quad (4-33)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$



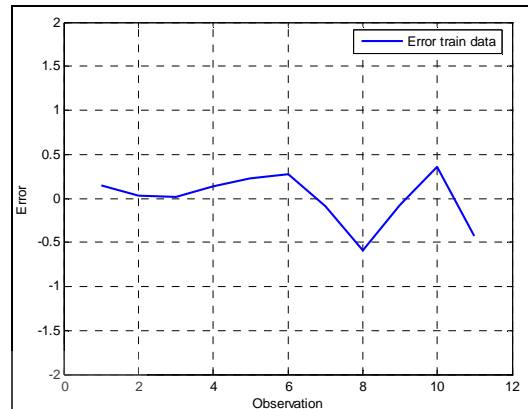
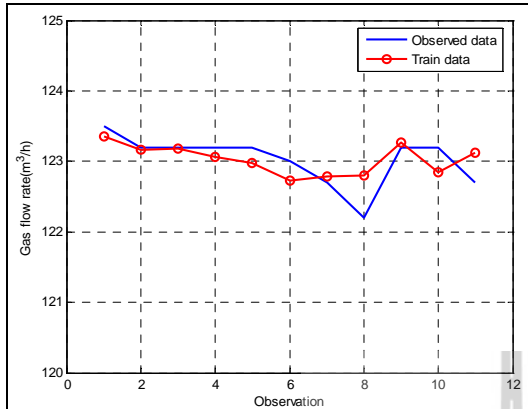
ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$

ผลจากการรัน โปรแกรมที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$ และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง $38\text{-}47 \text{ kg/h}$ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังสมการ (4-34) เมื่อทดสอบที่ชุดข้อมูลปกติ

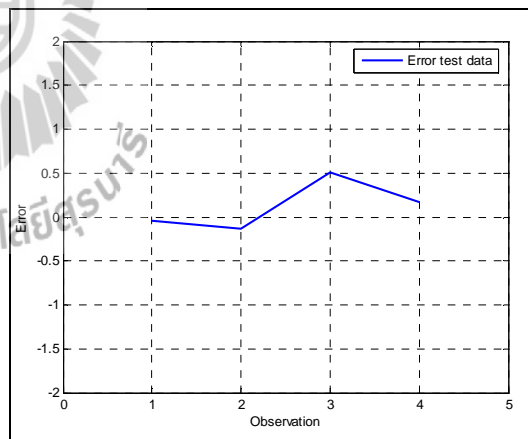
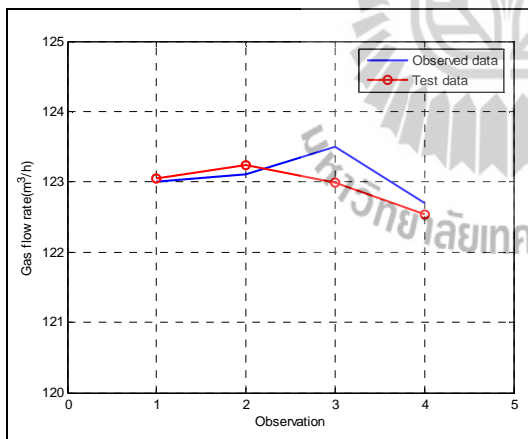
$$y = 153.43 + 0.49704x_1 - 0.0093196x_2 - 0.044413x_3 \quad (4-34)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงค่าประมาณ 120 m³/h



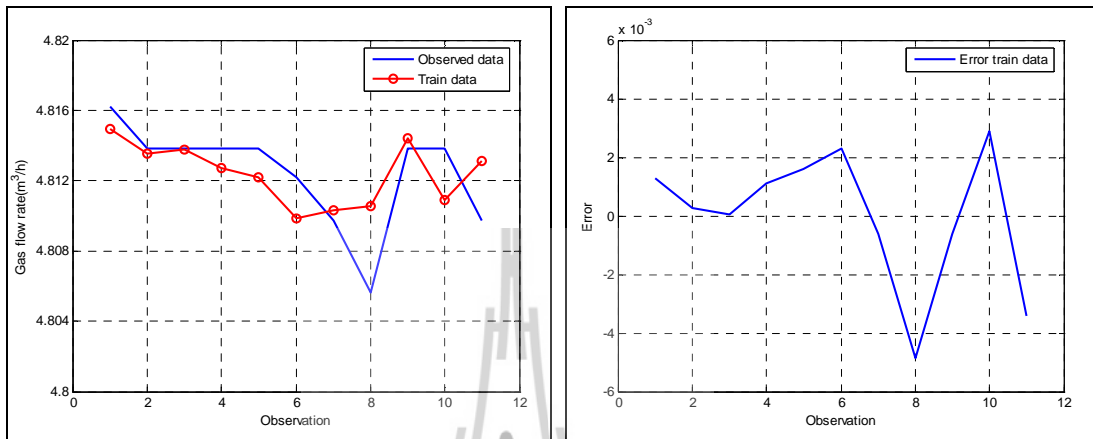
ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h

และสมการ (4-35) เมื่อชุดข้อมูลผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม

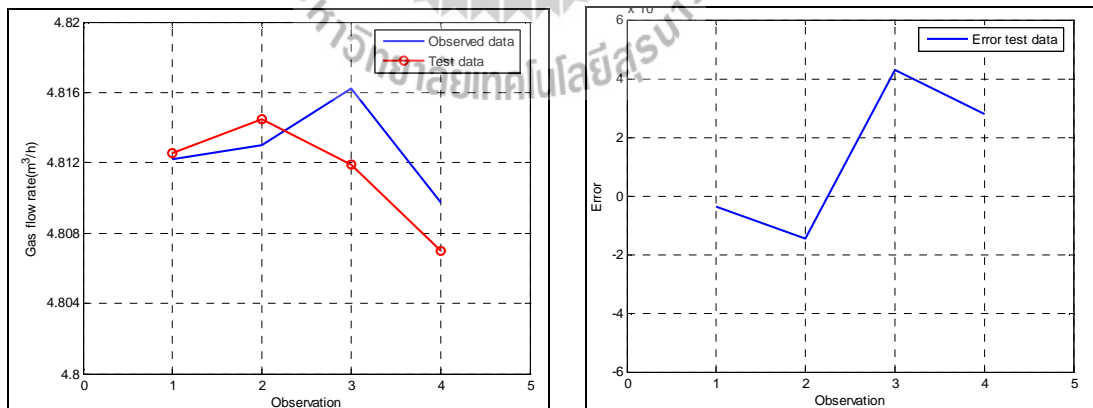
$$y = 6.5206 + 0.010102x_1 - 0.0050782x_2 - 0.25898x_3 \quad (4-35)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊ส เชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h



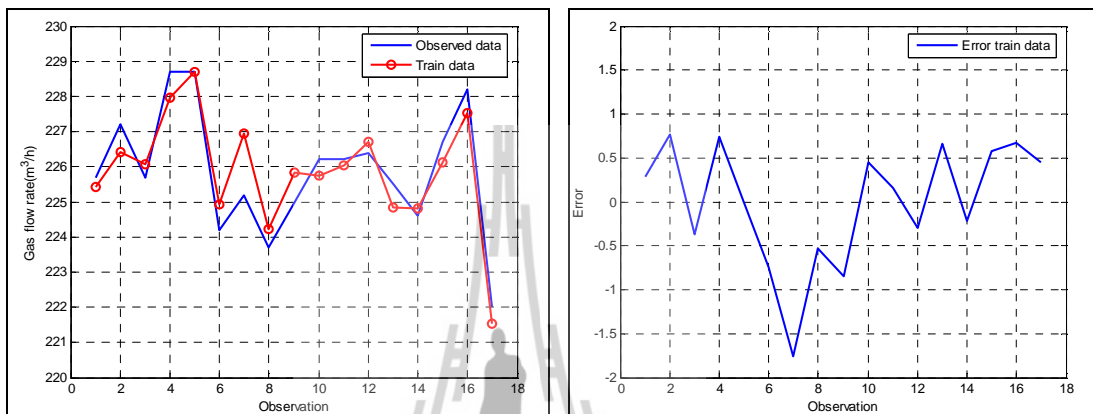
ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบของชุดทดสอบแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h

ผลจากการรัน โปรแกรมที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$ และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง $126\text{-}141 \text{ kg/h}$ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังสมการ (4-36) เมื่อทดสอบที่ชุดข้อมูลปกติ

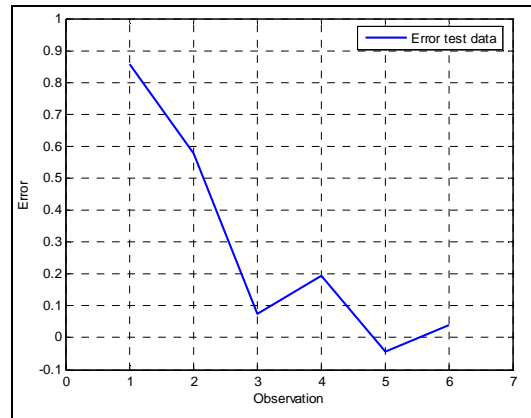
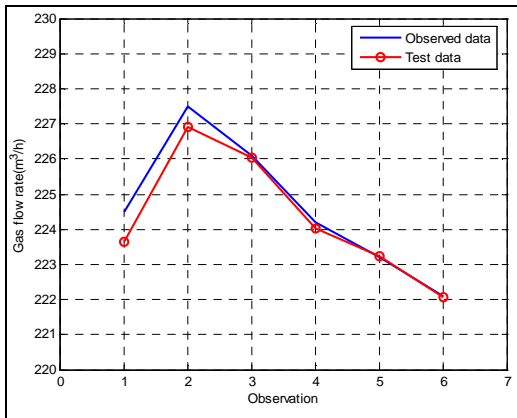
$$y = 70.082 - 0.74504x_1 + 0.22215x_2 + 0.20475x_3 \quad (4-36)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$



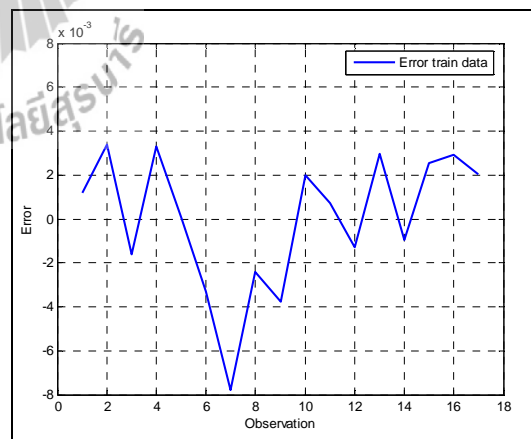
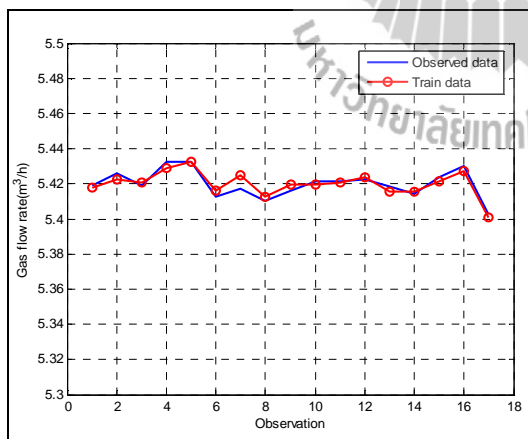
ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$

และสมการ (4-37) เมื่อชุดข้อมูลผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม

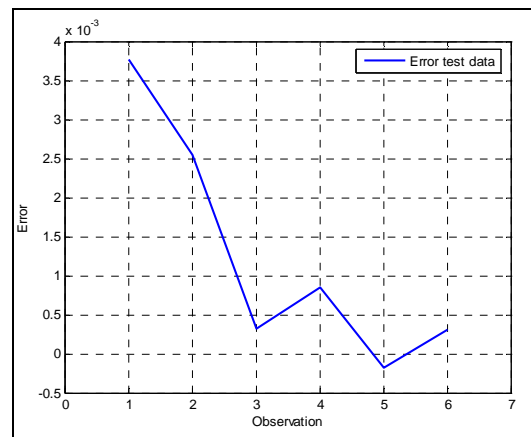
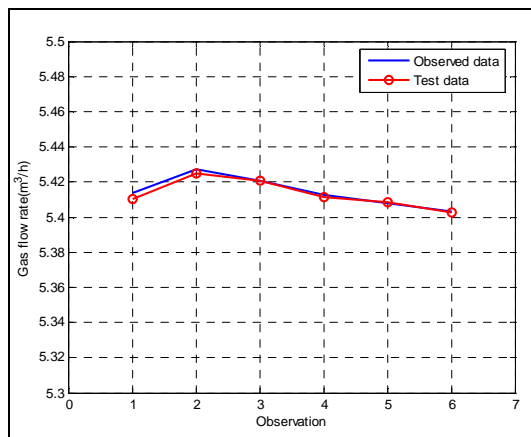
$$y = 0.98213 - 0.049198x_1 + 0.13317x_2 + 0.60221x_3 \quad (4-37)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบของชุดทดสอบแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$

จากผลการรันโปรแกรมโดยแยกชุดข้อมูลตามอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงจะพบว่าชุดข้อมูลจะได้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่มีค่าเฉพาะในแต่ละอัตราการไหลเท่านั้น จึงได้ทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยชุดข้อมูลอีกชุดหนึ่งซึ่งรวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงมาเป็นข้อมูลทดสอบและข้อมูลฝึกสอนอย่างละ 1 ชุด แล้วทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยอีกครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้

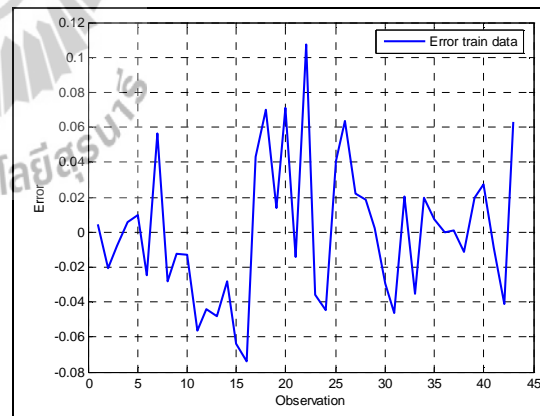
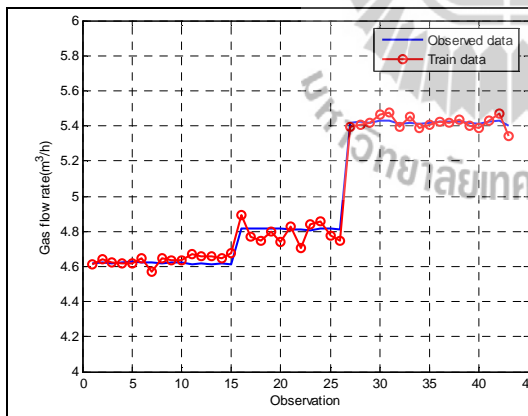
รูปแบบ	MSE		R^2		$S_{y/x}$	
	train	test	train	test	train	test
เชิงเส้นแบบพหุ	26.9886	25.9232	0.6917	0.6916	5.1951	5.0915
พอลิโนเมียลลำดับ 2	10.9752	60.3965	0.7966	0.0085	3.3129	7.7715
พอลิโนเมียลลำดับ 3	2.9367	11.0424	0.9991	0.9964	1.7137	3.3230
การถดถอยเชิงเส้น (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	0.0016	0.0027	0.9876	0.9781	0.0401	0.0524

ตารางที่ 4.5 ผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้
(ต่อ)

โพลีโนเมียลลำดับ 2 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	6.98×10^{-4}	0.0034	0.9946	0.9728	0.0264	0.0584
โพลีโนเมียลลำดับ 3 (แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	9.2744	9.5252	0.0042	0.0023	3.0454	3.0863

จากตาราง 4.5 จะได้ค่าการระบุเอกลักษณ์ของเตาแก๊สซีไฟเออร์ของโรงไฟฟ้าชีว
มวลต้นแบบเมื่อใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้กระถินยักษ์ โดยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่ชุดข้อมูลทั้งหมด
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงถูกแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมสามารถระบุเอกลักษณ์ได้ดีที่สุดเมื่อ
พิจารณาเฉพาะวิธีการถดถอย ผลจากการรัน โปรแกรมจะได้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังสมการ (4-38)

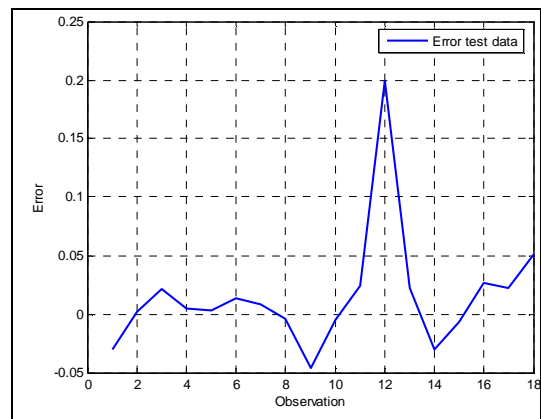
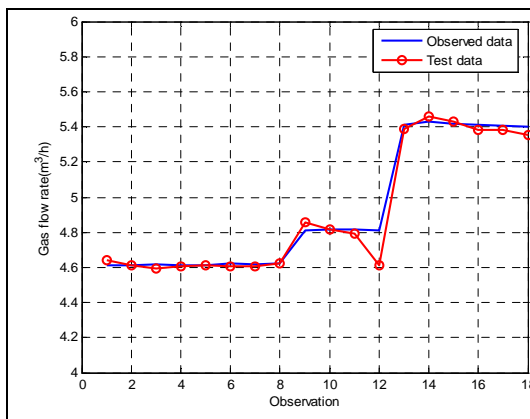
$$y = -11.0507 + 0.2877x_1 + 0.1928x_2 + 2.2669x_3 \quad (4-38)$$



ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม) ด้วยการถดถอยแบบเชิง
เส้นที่รวมทุกอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้นที่รวมทุกอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง

4.3 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซีไฟเออร์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย ทั้งในส่วนทฤษฎี และผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าจากวิธีออลโพสลิเบิลรีเกรสชัน ตัวแปรทั้งสามที่เป็นอินพุตของระบบมีความสัมพันธ์กัน และวิธีการวิเคราะห์การถดถอยสามารถใช้ระบุเอกลักษณ์ชุดข้อมูลที่ทำกรทดสอบได้เช่นกัน โดยเมื่อทำการระบุเอกลักษณ์จากชุดข้อมูลที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงแล้วจะพบว่า การถดถอยแบบเชิงเส้นที่ชุดข้อมูลถูกแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมสามารถระบุเอกลักษณ์ได้ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเป็นหลัก

บทที่ 5

การระบุเอกลักษณ์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม

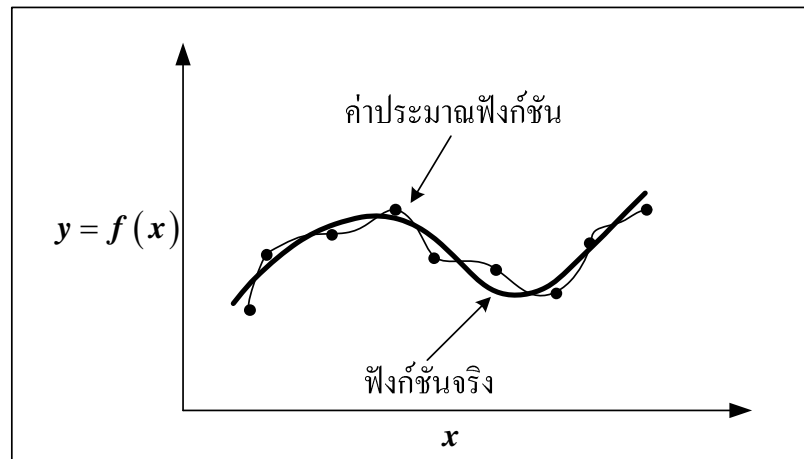
5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซีไฟเออร์ด้วยการวิเคราะห์เครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับซึ่งเป็นการประมาณค่าฟังก์ชัน โดยที่ไม่ทราบสมการความสัมพันธ์ โดยมีพารามิเตอร์ที่เป็นอินพุตของเครือข่ายประสาทเทียมทั้งหมด 3 ตัว ประกอบด้วย ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (F_{bc}) ปริมาณขี้เถ้า (F_{ash}) และอุณหภูมิบริเวณชั้นเผาไหม้ (T_{comb}) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้มีความสัมพันธ์กับเอาต์พุตซึ่งก็คือ ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง (F_{gas})

5.2 การเรียนรู้ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียม (artificial neuron network) คือการคำนวณที่มีความสามารถคล้ายคลึง (ในระดับหนึ่ง) กับระบบประสาทในสมองของสิ่งมีชีวิตได้ โดยเฉพาะในเรื่องของการเรียนรู้ของเครือข่าย เครือข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้และปรับตัวให้เข้ากับสถานะแวดล้อมได้ การประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ เช่น การทำนาย การจดจำรูปแบบ การประมาณฟังก์ชัน การจัดกลุ่มข้อมูล การบีบอัดข้อมูล การค้นหาและสังเคราะห์เสียง การจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น การควบคุม การคัดแยกรูปแบบ การหาค่าเหมาะที่สุด ฯลฯ การเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียมถือเป็นจุดเด่นที่สุด การแบ่งชนิดของเครือข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครือข่ายไปข้างหน้า (feed-forward network) ซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเป็นแบบทิศทางเดียว คือมีทิศทางจากอินพุตไปยังเอาต์พุต และเครือข่ายป้อนกลับ (recurrent network) ซึ่งเป็นเครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อภายในระหว่างนิรอนในรูปแบบป้อนกลับหรือวงรอบ การแบ่งชนิดของเครือข่ายประสาทเทียมยังสามารถแบ่งเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (supervised learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (unsupervised learning) ได้อีกด้วย

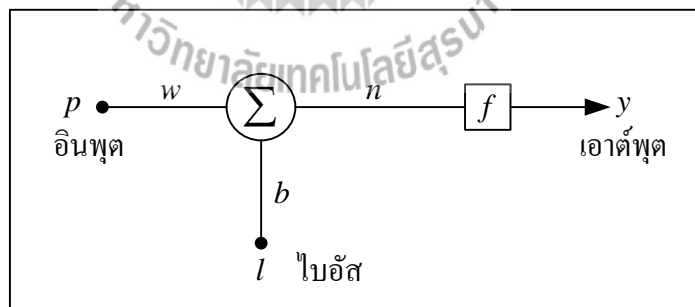
การประมาณค่าฟังก์ชัน (function approximation) พิจารณาข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้ N ชุด $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}, \dots, \{x_N, y_N\}$ ในรูป {เวกเตอร์อินพุต, เวกเตอร์เป้าหมาย} ซึ่งได้มาจากฟังก์ชัน $y = f(x)$ ที่ไม่ทราบค่า การประมาณฟังก์ชันคือ การหาค่าประมาณ $\hat{y} = \hat{f}(x)$ ของฟังก์ชัน $f(x)$



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการประมาณค่าฟังก์ชัน จุดในรูปคือข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้

5.2.1 แบบจำลองของนิวรอน - นิวรอนแบบอินพุตเดียว

โครงสร้างพื้นฐานของนิวรอนที่มีอินพุตเดียวแสดงในรูปที่ 5.2 อินพุต p ถูกคูณด้วยค่าน้ำหนักประสาท (weight) w โดยมีไบอัส b เป็นอีกอินพุตหนึ่งซึ่งมีค่าน้ำหนักประสาทคงที่เท่ากับ 1 อินพุตทั้งสองถูกรวมและได้เอาต์พุตเป็น n มักจะเรียกว่าเน็ตอินพุต (net input) ซึ่งจะเป็นอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน f (transfer function) และได้เอาต์พุตของนิวรอนคือ y (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)



รูปที่ 5.2 นิวรอนอินพุตเดียว

เอาต์พุตของนิวรอนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$y = f(wp + b)$$

(5-1)

เอาต์พุตของนิเวรอนจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอน w และ b จะสามารถปรับค่าได้นั้นคือเป็นพารามิเตอร์ของนิเวรอน โดยปกติแล้วฟังก์ชันถ่ายโอนจะถูกออกแบบโดยผู้ใช้และพารามิเตอร์ w และ b จะถูกปรับค่าจากกฎการเรียนรู้ จากแบบจำลองข้างต้น

5.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นส่วนที่ทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขจากเอาต์พุตของนิเวรอน แล้วทำการตัดสินใจว่าจะยิงสัญญาณเอาต์พุตออกไปในรูปใด ฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบ ที่นำเอาเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่หลายรูปแบบ แบบที่ใช้งานทั่ว ๆ ไปมากที่สุดมีรายละเอียดดังนี้ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

5.2.2.1 ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต – *hard limit*

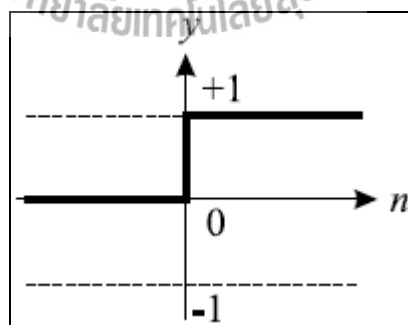
- สมการความสัมพันธ์ :

$$y=0 \text{ ถ้า } n < 0$$

$$y=1 \text{ ถ้า } n \geq 0$$

(5-2)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : `hardlim`
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : 

5.2.2.2 ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิตแบบสมมาตร – *symmetrical hard limit*

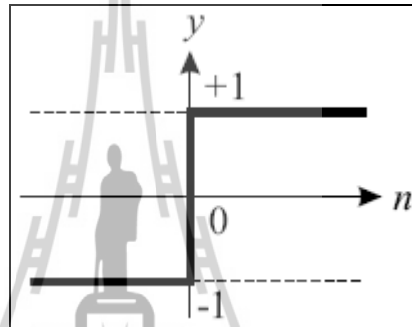
- สมการความสัมพันธ์ :

$$y = -1 \text{ ถ้า } n < 0$$

$$y = +1 \text{ ถ้า } n \geq 0$$

(5-3)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : `hardlims`
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : 

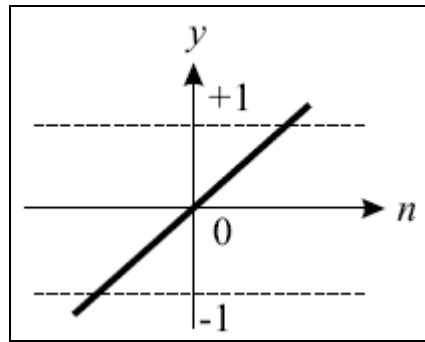
5.2.2.3 ฟังก์ชันเส้นตรง – *linear*

- สมการความสัมพันธ์ :

$$y = n$$

(5-4)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : `purelin`
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : 

5.2.2.4 ฟังก์ชันเส้นตรงบวก – positive linear

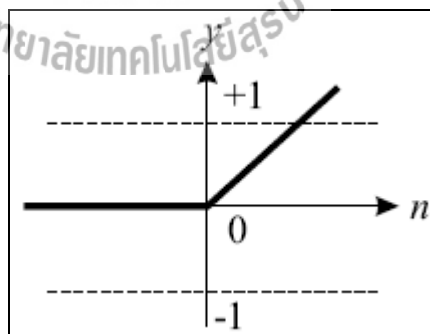
- สมการความสัมพันธ์ :

$$y=0 \text{ ถ้า } n < 0$$

$$y=n \text{ ถ้า } n \geq 0$$

(5-5)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : poslin
- กราฟความสัมพันธ์ :



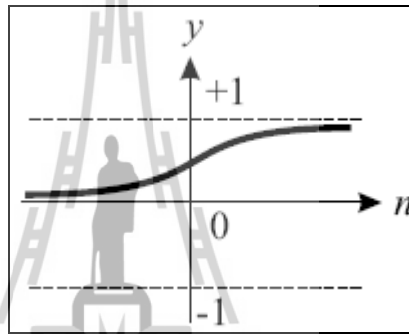
- สัญลักษณ์ : 

5.2.2.5 ฟังก์ชันซิกมอยแบบลอการิทึม – *log-sigmoid*

- สมการความสัมพันธ์ :

$$y = \frac{1}{1+e^{-n}} \quad (5-6)$$

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : `logsig`
- กราฟความสัมพันธ์ :



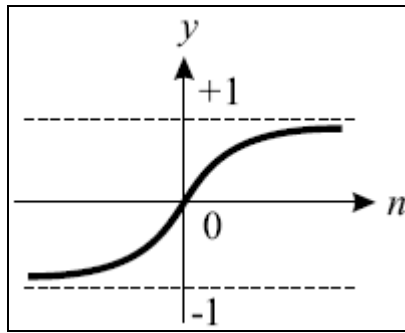
- สัญลักษณ์ : 

5.2.2.6 ฟังก์ชันซิกมอยแบบเส้นสัมผัสไฮเพอร์โบลาร์ – *hyperbolic tangent sigmoid*

- สมการความสัมพันธ์ :

$$y = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (5-7)$$

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : `tansig`
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : \mathcal{S}

5.2.2.7 ฟังก์ชันแข่งขัน – competitive

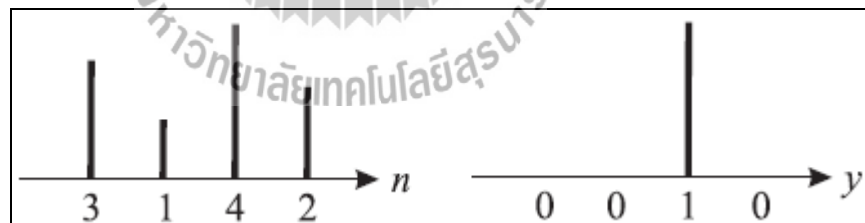
- สมการความสัมพันธ์ :

$y=1$ สำหรับนิวรอนที่มีค่า n สูงสุด

$y=0$ สำหรับนิวรอนอื่นๆ

(5-8)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : `compet`
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : \mathcal{C}

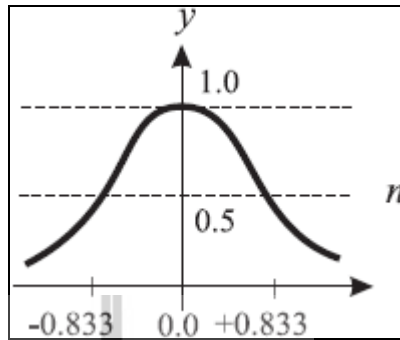
5.2.2.8 ฟังก์ชันฐานรัศมี – radial basis function

- สมการความสัมพันธ์ :

$$y = e^{-n^2}$$

(5-9)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : radbas
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : 

5.2.2.9 ฟังก์ชัน ไตรรัศมี – triangular basis function

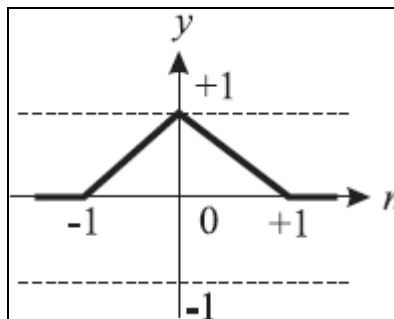
- สมการความสัมพันธ์ :

$$y=1-|n| \text{ สำหรับ } -1 \leq n \leq +1$$

$$y=0 \text{ สำหรับ } n \text{ อื่นๆ}$$

(5-10)

- ชื่อ MATLAB ฟังก์ชัน : tribas
- กราฟความสัมพันธ์ :



- สัญลักษณ์ : 

5.2.3 แบบจำลองของนิวรอนเดี่ยวแบบหลายอินพุต

โดยปกติแล้ว ในแบบจำลองของนิวรอนจะมีอินพุตมากกว่าหนึ่งอินพุต พิจารณาในรูปที่ 5.3 ซึ่งมี R อินพุต แต่ละอินพุตย่อย p_1, p_2, \dots, p_R มีค่าน้ำหนักประสาทของตัวเองคือ $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1R}$ และสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์เรียกว่าเมตริกซ์น้ำหนักประสาท (weight matrix) มีสัญลักษณ์คือ W พิจารณาเนื้ออินพุต n (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

$$n = w_{11}p_1 + w_{12}p_2 + \dots + w_{1R}p_R + b \quad (5-11)$$

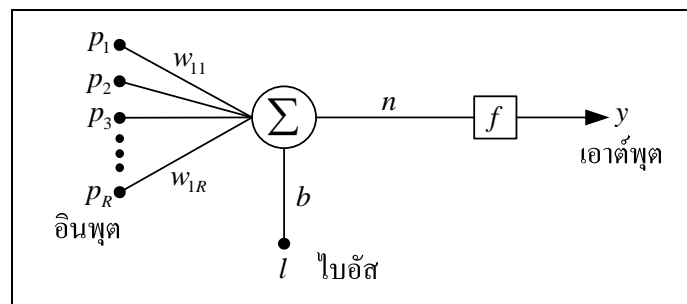
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$n = Wp + b \quad (5-12)$$

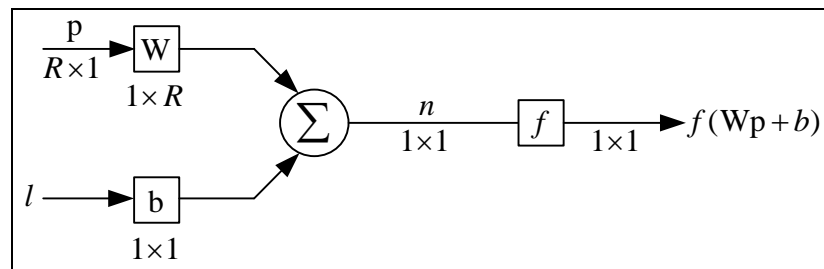
โดยเมตริกซ์ W เป็นเมตริกซ์หลัก (column matrix) นั่นคือมีเพียงหนึ่งแถว ดังนั้นเอาต์พุตของนิวรอน y สามารถเขียนได้เป็น

$$y = f(Wp + b) \quad (5-13)$$

ตัวห้อยของค่าน้ำหนักประสาทเป็นตัวระบุความสัมพันธ์ระหว่างนิวรอน กล่าวคือตัวห้อยตัวแรกหมายถึงนิวรอนปลายทาง (ซึ่งในที่นี้มีอยู่เพียงหนึ่งนิวรอน) ในขณะที่ตัวห้อยตัวที่สองหมายถึงที่มาของอินพุตที่เชื่อมมายังนิวรอนนั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น w_{13} หมายถึงค่าน้ำหนักประสาทที่เชื่อมอินพุตที่ 3 มายังนิวรอนที่ 1 โดยทั่วไปแล้ว เมื่อโครงสร้างของเครือข่ายประกอบไปด้วยนิวรอนจำนวนมาก การใช้สัญลักษณ์อาจจะทำได้ตามตัวอย่างในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 นิวรอนหลายอินพุต



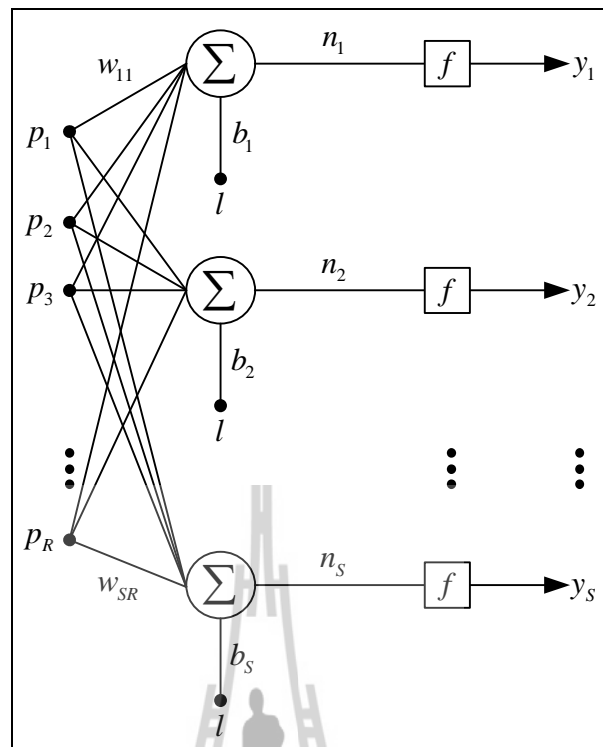
รูปที่ 5.4 การกำหนดรูปแบบสัญลักษณ์ของนิวรอน

5.2.4 สถาปัตยกรรมเครือข่าย (Network Architecture)

โครงสร้างการเชื่อมต่อ รวมไปถึงรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายประสาทเทียม เรียกว่าเป็นสถาปัตยกรรมของเครือข่าย สถาปัตยกรรมของเครือข่ายที่แตกต่างกัน มีผลให้พฤติกรรมของเครือข่ายแตกต่างกันด้วย โดยรูปแบบของเครือข่ายมีแบบไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้แบบเครือข่ายไปข้างหน้า จึงขอแนะนำเฉพาะเครือข่ายแบบนี้เท่านั้น

5.2.4.1 เครือข่ายไปข้างหน้า (Feedforward Network)

โดยปกติแล้วเครือข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วยนิวรอนหลาย ๆ ตัวและเชื่อมต่อแบบขนานกันหลาย ๆ ชั้นหรือเรียกว่า layer โครงสร้างของเครือข่ายแบบชั้นเดียว(single layer) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลของข้อมูลไปยังเอาต์พุตจะไม่มี การป้อนกลับแต่อย่างใดจึงเรียกเครือข่ายประเภทนี้ว่าเป็นแบบไปข้างหน้า



รูปที่ 5.5 เครือข่ายชั้นเดียวที่มี S นิวรอน

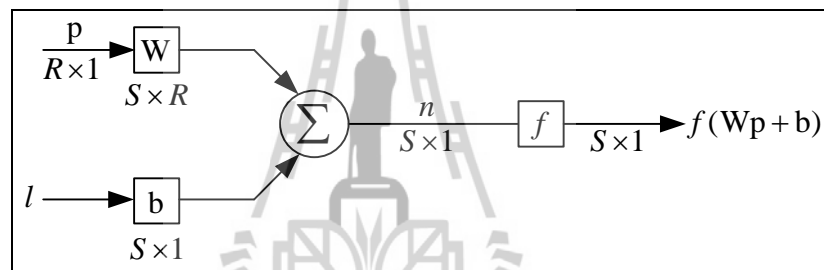
พิจารณาเครือข่ายชั้นเดียวที่มี R อินพุตและ S คำนวณน้ำหนักประสาทต่อเข้าสู่แต่ละนิวรอน แต่ละนิวรอนจะมีตัวรวมไบอัส (b) ฟังก์ชันถ่ายโอนและเอาต์พุต ($y = f(Wp + b)$) โครงสร้างของเครือข่ายนี้สามารถแสดงในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_R \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_S \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1R} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S1} & w_{S2} & \cdots & w_{SR} \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

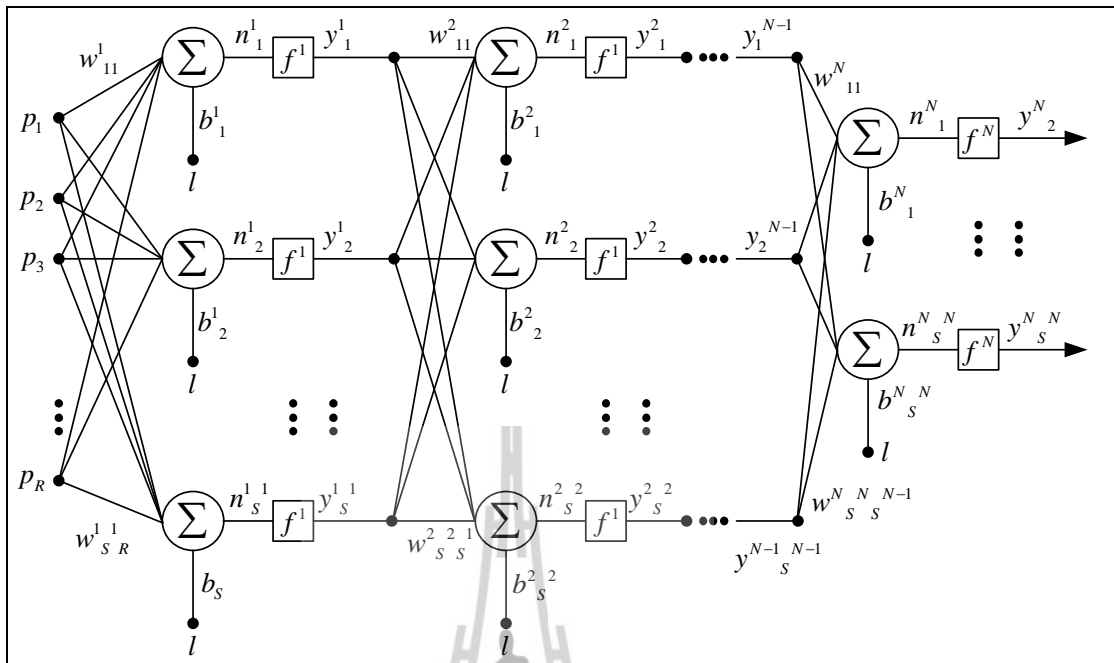
โดยปกติแล้ว จำนวนของอินพุตไม่จำเป็นต้องเท่ากับจำนวนของนิวรอนในชั้นนั้น ๆ ($R \neq S$) ในทำนองเดียวกันกับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่จำเป็นจะต้องเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด พิจารณาเมตริกซ์ W จะเห็นได้ว่าค่าน้ำหนักประสาทของแต่ละแถวมีตัวห้อยแรกแสดงว่าเป็นของนิวรอนตัวไหน (มีทั้งหมด S แถว สำหรับ S นิวรอน) และมีตัวห้อยที่สองแสดงว่ามาจากอินพุตไหน (มีทั้งหมด R อินพุต) โครงสร้างทั้งหมดของเครือข่ายแบบชั้นเดียวสามารถแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายชั้นเดียวในรูปของเมตริกซ์

โดยปกติในทางปฏิบัติทั่วไปแล้ว เครือข่ายประสาทเทียมจะมีโครงสร้างหลายชั้น (multiple layers หรือ multi-layer network) ดังแสดงในรูปที่ 5.7 แต่ละชั้นมีเมตริกซ์น้ำหนักประสาท W ไบอัส b เน็ตเอาต์พุต n และเอาต์พุต y ของชั้นนั้น จากรูปจะเห็นว่าแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือเครือข่ายชั้นแรก (มักเรียกว่าชั้นอินพุต) มี R อินพุตชั้นที่ 1 มี S^1 นิวรอน ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงชั้นสุดท้าย คือชั้นเอาต์พุต ซึ่งมี S^N นิวรอน เอาต์พุตของชั้นแรกจะเป็นอินพุตให้กับชั้นที่สอง ฯลฯ เครือข่ายที่ไม่ใช่ชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่าเป็นชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) เอาต์พุตของแต่ละชั้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} y^1 &= f^1(W^1 p + b^1) \\ y^2 &= f^2(W^2 y^1 + b^2) \\ &\vdots \\ y^N &= f^N(W^N y^{N-1} + b^N) \end{aligned} \quad (5-17)$$



รูปที่ 5.7 เครือข่ายหลายชั้นในรูปแบบของเมตริกซ์

เครือข่ายหลายชั้นจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเครือข่ายชั้นเดียวมาก ยกตัวอย่างเช่น เครือข่ายที่ชั้นแรกเป็นฟังก์ชันซิกมอย และชั้นที่สองเป็นฟังก์ชันเส้นตรงสามารถถูกฝึกสอนให้เป็นฟังก์ชันประมาณค่าได้เกือบทุกฟังก์ชัน ที่ซึ่งเครือข่ายชั้นเดียวไม่สามารถทำได้ เครือข่ายหลายชั้นนี้มีพารามิเตอร์ค่อนข้างมาก ดังนั้นสิ่งแรกที่จะนำเอาเครือข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่นจำนวนชั้น จำนวนนิวรอนในแต่ละชั้น จำนวนอินพุต จำนวนเอาต์พุต ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน ฯลฯ อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ยกตัวอย่างเช่นจำนวนชั้นของเครือข่าย ที่ซึ่งเพียงสองหรือสามชั้นก็เพียงพอต่อปัญหาทั่ว ๆ ไป ถึงแม้ว่าเครือข่ายที่มากกว่าสามชั้นจะมีใช้บ้างแต่ก็ไม่มากนัก

5.2.5 กฎการเรียนรู้ (Learning rule)

การเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียมเปรียบได้โดยตรงกับการเรียนรู้ในระบบประสาทของมนุษย์ การเรียนรู้คือ วิถีทางที่สิ่งมีชีวิตจะได้รับข้อมูลความรู้จากสภาวะแวดล้อม ที่ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ การเรียนรู้ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถเก็บและเรียกคืนข้อมูลความรู้ได้ซึ่งสิ่งนี้เรียกรวมแล้วว่าเป็นความทรงจำ ในระบบประสาทของมนุษย์ การเรียนรู้เป็นการ

ปรับในส่วนจุดประสานประสาท ในลักษณะเดียวกันกับการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียม ที่ซึ่งเป็นกรรมวิธีในการปรับค่าน้ำหนักประสาทของเครือข่ายนั่นเอง

ในการออกแบบสร้างเครือข่ายประสาทเทียม หลังจากได้ทำการเลือกโครงสร้างของเครือข่าย เช่นจำนวนอินพุต จำนวนเอาต์พุต จำนวนชั้นของเครือข่าย จำนวนนิวรอนในแต่ละชั้น ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน ฯลฯ ขั้นตอนต่อไปก็คือการหาพารามิเตอร์ของเครือข่าย อันได้แก่ค่าน้ำหนักประสาท (weight) และไบอัส (bias) ขั้นตอนการปรับหาพารามิเตอร์เหล่านี้เรียกว่ากฎการเรียนรู้ของเครือข่าย (learning rule หรือ training algorithm) จุดประสงค์ของการเรียนรู้ก็เพื่อฝึกสอนให้เครือข่ายทำงานตามที่ต้องการได้ โดยทั่วไปแล้วกฎการเรียนรู้มีอยู่มากมายหลายแบบ แต่สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่มคือ การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (supervised) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (unsupervised) และการเรียนรู้แบบเสริมความเข้มแข็ง (reinforcement) ในที่นี้ขอนำเสนอเฉพาะการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนเท่านั้น

5.2.5.1 การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน

ในการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนจะมีการนำเสนอกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง (examples หรือ training set) ให้กับเครือข่ายในรูปของอินพุตพร้อมกับเป้าหมาย (target) ที่ต้องการให้เครือข่ายตอบสนอง พิจารณาคู่อินพุตและเป้าหมายดังนี้

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\}$$

โดยที่ $p_i \in R^N$ เป็นอินพุตของเครือข่ายและ $t_i \in R^M$ เป็นเป้าหมายของอินพุตนั้นๆ เมื่ออินพุตถูกป้อนให้กับระบบ เอาต์พุตของเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายของอินพุต แล้วเครือข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบอัสตามกฎการเรียนรู้ เพื่อให้เอาต์พุตของเครือข่ายเข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ

5.3 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Back-Propagation Learning)

งานวิจัยนี้แนะนำเสนอการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (back-propagation learning) ซึ่งเป็นการเรียนรู้ที่สามารถฝึกสอนเครือข่ายแบบหลายชั้นได้

5.3.1 อัลกอริทึมแพร่กลับ (Backpropagation Algorithm)

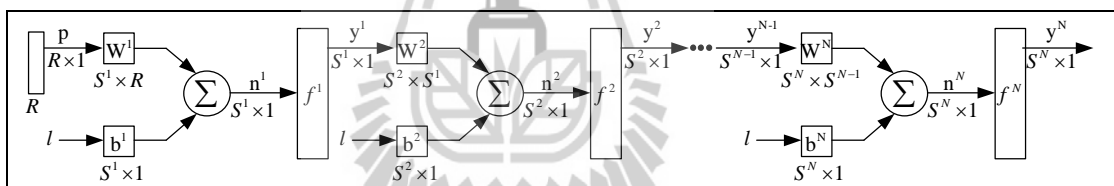
พิจารณาจากเครือข่าย N ชั้น เอาต์พุตของแต่ละชั้นจะเป็นอินพุตให้กับชั้นถัดไป สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

$$y^{l+1} = f^{l+1}(W^{l+1}y^l + b^{l+1}) \quad (5-18)$$

โดยที่ $l = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ชั้นแรกนั้นจะเป็นชั้นอินพุตซึ่งรับอินพุตโดยตรงจากภายนอกเครือข่าย กล่าวคือ

$$y^0 = p \quad (5-19)$$

ในขณะที่เอาต์พุตในชั้นสุดท้ายคือ y^N รูปที่ 5.8 แสดงรายละเอียดของเครือข่าย N ชั้น



รูปที่ 5.8 การกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครือข่าย N ชั้น

อัลกอริทึมแพร่กลับใช้หลักการเดียวกันกับอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (Least Mean Square หรือ LMS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) เช่นเดียวกัน ในอัลกอริทึมแพร่กลับ มีการนำเสนออินพุตและเป้าหมายให้เครือข่ายเรียนรู้ดังนี้

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\} \quad (5-20)$$

เมื่อป้อนแต่ละอินพุตให้กับเครือข่าย เอาต์พุตที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมาย อัลกอริทึมจะทำการปรับพารามิเตอร์ของเครือข่าย ซึ่งได้แก่น้ำหนักประสาทและไบอัส

เพื่อให้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยของเอาต์พุตและเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด จะได้ตัวชี้ประสิทธิภาพ (performance index) คือ (สังเกตว่าเป็นตัวเดียวกันกับอัลกอริทึม LMS)

$$F(x) = E[e^2] = E[(t - y)^2] \quad (5-21)$$

โดยที่ x เป็นเมตริกซ์ของน้ำหนักประสาทและไบอัส ในกรณีที่เครือข่ายมีเอาต์พุตมากกว่าหนึ่ง จะได้กรณีทั่วไป ดังนี้

$$F(x) = E[e^T e] \quad (5-22)$$

$$= E[(t - y)^T (t - y)] \quad (5-23)$$

เช่นเดียวกับอัลกอริทึม LMS เราสามารถประมาณค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\hat{F}(x) = (t(k) - y(k))^T (t(k) - y(k)) \quad (5-24)$$

$$= e^T(k) e(k) \quad (5-25)$$

จากอัลกอริทึมลงแบบขั้นสุดจะได้รับการปรับค่าองค์ประกอบของเมตริกซ์น้ำหนักประสาทและไบอัส ณ รอบที่ $k+1$ ด้วยการประมาณค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยและค่าคงที่การเรียนรู้ α คือ

$$w_{ij}^m(k+1) = w_{ij}^m(k) - \alpha \frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m} \quad (5-26)$$

และ

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} \quad (5-27)$$

เมื่อพิจารณาเครือข่ายชั้นเดียวแบบ ADALINE (ADActive LLinear NEuron) อนุพันธ์ย่อยที่ปรากฏในสมการ (5-26) และ (5-27) สามารถคำนวณหาได้โดยตรง (ในรูปของ $2ep^T$)

สำหรับเทอม $\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m}$ และ $2e$ สำหรับเทอม $\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m}$) อย่างไรก็ตาม ในกรณีของเครือข่ายหลายชั้นซึ่งมีชั้นซ่อนเร้นนั้นจะไม่สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดโดยตรงในรูปของอินพุต p และเป้าหมาย t ได้ จึงมีการนำเอากฎลูกโซ่ (chain rule) มาช่วยในการคำนวณหาความสัมพันธ์ (ของอนุพันธ์) ระหว่างแต่ละชั้น ดังนั้นจากเทอมอนุพันธ์ย่อยในสมการ (5-26) และ (5-27) จะได้ว่า

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \frac{\partial n_i^m}{\partial w_{ij}^m} \quad (5-28)$$

และ

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} \quad (5-29)$$

เทอมที่สองจากทั้งสองสมการข้างต้นสามารถคำนวณได้ เนื่องจากเอาต์พุตของเครือข่ายชั้นที่ m (นั่นคือ n_i^m) เป็นฟังก์ชันของค่าน้ำหนักประสาทและไบอัสในชั้นนั้น ๆ กล่าวคือ

$$n_i^m = \sum_{j=1}^{s^{m-1}} w_{ij}^m y_j^{m-1} + b_i^m \quad (5-30)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial n_i^m}{\partial w_{ij}^m} = y_j^{m-1} \quad (5-31)$$

และ

$$\frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} = 1 \quad (5-32)$$

พิจารณาเทอม $\frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m}$ ในสมการ (5-28) และ (5-29) กำหนดให้ความไวของค่าความผิดพลาด (error sensitivity) คือ

$$\delta_i^m = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \quad (5-33)$$

จากสมการ (5-28), (5-29), (5-31) และ (5-32) จะได้

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m} = \delta_i^m y_j^{m-1} \quad (5-34)$$

และ

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} = \delta_i^m \quad (5-35)$$

ในการนำไปใช้งานจริง จำเป็นจะต้องคำนวณหาค่าความไวของค่าความผิดพลาด เริ่มจากใช้กฎลูกโซ่อีกครั้ง ดังนี้

$$\delta_i^m = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \quad (5-36)$$

$$= \frac{\partial \hat{F}}{\partial y_i^m} \frac{\partial y_i^m}{\partial n_i^m} \quad (5-37)$$

เนื่องจากเอาต์พุตของเครือข่าย y_i^m เป็นฟังก์ชันโดยตรงของเครือข่ายเอาต์พุต n_i^m กล่าวคือ

$$y_i^m = f(n_i^m) \quad (5-38)$$

โดยที่ $f(\cdot)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของชั้นนั้น ๆ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial y_i^m}{\partial n_i^m} = f'(n_i^m) \quad (5-39)$$

เมื่อพิจารณาเทอม $\frac{\partial \hat{F}}{\partial y_i^m}$ จะต้องแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีชั้นที่ m เป็นชั้นเอาต์พุต ($m = N$) เราสามารถหาอนุพันธ์ของ \hat{F} เทียบโดยตรงกับเอาต์พุต y_i^N ได้เนื่องจาก

$$\hat{F} = (t - y)^T (t - y) = \sum_{j=1}^{S^N} (t_j - y_j^N)^2 \quad (5-40)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial y_i^N} = \frac{\partial \sum_{j=1}^{S^N} (t_j - y_j^N)^2}{\partial y_i^N} \quad (5-41)$$

$$= 2(t_i - y_i^N) \frac{\partial (t_i - y_i^N)}{\partial y_i^N} \quad (5-42)$$

$$= -2(t_i - y_i^N) \quad (5-43)$$

ดังนั้นจะได้ค่าความไวของค่าความผิดพลาดในกรณีที่ m เป็นชั้นเอาต์พุตคือ

$$\delta_i^N = -2(t_i - y_i^N) f'(N_i^N) \quad (5-44)$$

2. กรณีชั้นที่ m เป็นชั้นซ่อนเร้น ในกรณีนี้เราไม่สามารถหาอนุพันธ์ของ \hat{F} ได้โดยตรง โดยการใช้ กฎลูกโซ่อีกครั้ง จะได้ว่า

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial y_i^m} = \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_l^{m+1}} \frac{\partial n_l^{m+1}}{\partial y_i^m} \quad (5-45)$$

สมการข้างต้นเป็นผลรวมของ S^{m+1} นิเวรอน ในชั้น $m+1$ (เนื่องจากเอาต์พุต y_i^m จะเป็นอินพุตให้กับทุกนิเวรอนในชั้นที่ $m+1$) ดังนั้นจากเทอมหลังของสมการข้างต้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial n_l^{m+1}}{\partial y_i^m} = \frac{\partial}{\partial y_i^m} \left(\sum_{r=1}^{S^m} w_{rl}^{m+1} y_r^m + b_r^{m+1} \right) \quad (5-46)$$

$$= \frac{\partial (w_{il}^{m+1} y_i^m)}{\partial y_i^m} \quad (5-47)$$

$$= w_{il}^{m+1} \quad (5-48)$$

แทนค่าจากสมการ (5-48) ลงในสมการ (5-45) จะได้

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial y_i^m} = \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_l^{m+1}} w_{il}^{m+1} \quad (5-49)$$

จากนิยามค่าความไวของค่าความผิดพลาดจะได้ว่า

$$\delta_l^{m+1} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_l^{m+1}} \quad (5-50)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial y_i^m} = \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \delta_l^{m+1} w_{il}^{m+1} \quad (5-51)$$

ดังนั้นค่าความไวของค่าความผิดพลาด ณ ชั้น m คือ

$$\delta_i^m = f'(n_i^m) \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \delta_l^{m+1} w_{il}^{m+1} \quad (5-52)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นถึงที่มาของชื่ออัลกอริทึมแพร่กลับ กล่าวคือค่าความไวของค่าความผิดพลาดที่ได้ในชั้นที่พิจารณาสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบในชั้นถัดไป (ค่าความไวเป็นส่วนหนึ่งของการปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบอัสเท่านั้น)

จากสมการ (5-26), (5-27), (5-34) และ (5-35) สามารถสรุปอัลกอริทึมแบบแพร่กลับสำหรับปรับค่าน้ำหนักประสาทได้ดังนี้

$$w_{ij}^m(k+1) = w_{ij}^m(k) - \alpha \delta_i^m(k) y_j^{m-1}(k) \quad (5-53)$$

และ

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \delta_i^m(k) \quad (5-54)$$

หรือในรูปของเมตริกซ์คือ

$$W_{new}^m = W_{old}^m - \alpha \delta^m y^{m-1} \quad (5-55)$$

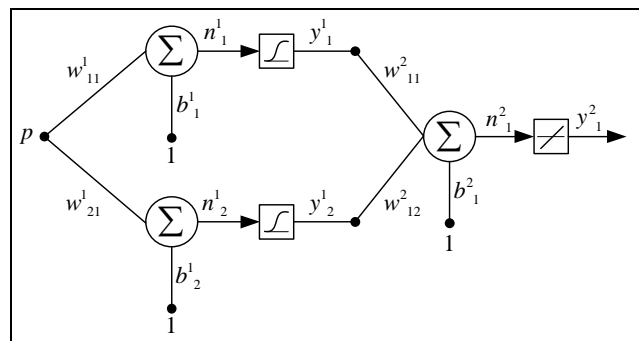
และ

$$b_{new}^m = b_{old}^m - \alpha \delta^m \quad (5-56)$$

5.3.2 การประมาณค่าฟังก์ชันด้วยเครือข่ายแบบแพร่กลับ

เครือข่ายแบบไปข้างหน้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นเครือข่ายในการประมาณค่าฟังก์ชันใด ๆ ได้ ซึ่งการประมาณค่าฟังก์ชันดังกล่าวมีประโยชน์ในงานหลาย ๆ ด้าน

ในการประมาณค่าฟังก์ชัน $y = f(x)$ คู่อินพุต/เป้าหมายที่ใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายจะอยู่ในรูป $\{x, y\}$ โดยที่ x เป็นค่าอินพุต และ y เป็นค่าเอาต์พุตหรือเป้าหมายที่ต้องการเครือข่ายสามารถมีค่าอินพุตได้มากกว่า 1 อินพุต โดยปกติแล้วเครือข่ายไปข้างหน้าที่มี 2 ชั้นเพียงพอที่จะใช้ประมาณค่าฟังก์ชันใด ๆ ถ้ามีการออกแบบเลือกจำนวนนิรอนและชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสม รูปที่ 5.9 แสดงตัวอย่างเครือข่ายสำหรับการประมาณค่าฟังก์ชันซึ่งเป็นเครือข่าย 2 ชั้น ชั้นแรกมีสองนิรอน แต่ละนิรอนมีฟังก์ชันถ่ายโอนแบบซิกมอยด์ ชั้นเอาต์พุตมีเพียงหนึ่งนิรอนและฟังก์ชันถ่ายโอนคือฟังก์ชันเส้นตรง เครือข่ายมีอินพุตเดียว (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างเครือข่ายสำหรับการประมาณค่าฟังก์ชัน

5.3.3 คำสั่ง MATLAB ในการฝึกสอน

ใน MATLAB Neural Network Toolbox คำสั่งที่ใช้ในการสร้างเครือข่ายคือ `net = newff` ซึ่งจะทำการสร้างเครือข่ายไปข้างหน้า เมื่อทำการสร้างเครือข่ายด้วยคำสั่งข้างต้นแล้ว จะสามารถทดสอบเครือข่ายได้ด้วยคำสั่ง `y = sim(net,p)` โดยที่ตัวแปร `net` เป็นตัวแปรที่ได้จากการสร้างเครือข่ายด้วยคำสั่ง `newff` ตัวแปร `p` เป็นอินพุตที่ต้องการทดสอบ และตัวแปร `y` เป็นเอาต์พุตจากเครือข่าย พิจารณาคำสั่ง `newff` ซึ่งจะสร้างเครือข่ายที่มีค่าเมตริกซ์น้ำหนักประสาทและไบอัสเริ่มต้นด้วยค่าสุ่ม ดังนั้นเมื่อทดสอบกับอินพุตในขณะนี้ เอาต์พุตที่ได้จึงสามารถคาดเดาได้ว่าจะไม่เป็นไปตามเป้าหมายหรือฟังก์ชันที่เราต้องการ ในการฝึกสอนเครือข่ายนั้นจะใช้คำสั่ง `net = train(net,p,t)` โดยที่ตัวแปร `p` และ `t` เป็นคู่อินพุต/เป้าหมายที่ต้องการให้เครือข่ายเรียนรู้ โดยปกติแล้ว ตัวแปร `net` ซึ่งเป็นตัวแปร โครงสร้างที่เก็บรายละเอียดของเครือข่ายไว้ จะมีพารามิเตอร์ภายในที่สามารถใช้ปรับแต่งการฝึกสอนตามต้องการได้ ตัวอย่างพารามิเตอร์ดังกล่าวมีเช่น (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

- `Net.performFcn` : ฟังก์ชันประเมินค่า (ค่าปกติคือ `mse` หรือ `mean square error`)
- `Net.trainFcn` : ฟังก์ชันการฝึกสอน (ค่าปกติคือ `trainlm`)
- `Net.trainParam` : ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ย่อยเช่น
 - `.epochs` : จำนวนรอบสูงสุดในการฝึกสอน (ค่าปกติเท่ากับ 50)
 - `.goal` : ค่าความผิดพลาดเป้าหมาย (ค่าปกติเท่ากับ 0)
 - `.min_grad` : ค่าเกรเดียนที่น้อยที่สุด (ค่าปกติเท่ากับ 1×10^{-15})
 - `.show` : จำนวนรอบที่จะแสดงผลการฝึกสอน (ค่าปกติเท่ากับ 25)

พารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถปรับแต่งได้ตามต้องการ

5.3.4 ผลการทดสอบ

การระบุเอกลักษณ์ด้วยเครือข่ายแบบแพร่กลับได้ทำการทดสอบกับชุดข้อมูลที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงเท่ากับ 100, 120 และ 200 m³/h โดยใช้ชุดข้อมูลปกติ กับชุดข้อมูลที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมมาทดสอบ สำหรับผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

- Net.performFcn : ฟังก์ชันประเมินค่า คือ mean square error
- Net.trainFcn : ฟังก์ชันการฝึกสอน คือ trainlm
- Net.trainParam : ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ย่อยเช่น
 - .epochs : จำนวนรอบสูงสุดในการฝึกสอน คือ 8000 รอบ
 - .goal : ค่าความผิดพลาดเป้าหมาย คือ 1×10^{-5}
 - .min_grad : ค่าเกรเดียนที่น้อยที่สุด คือ 1×10^{-10}
 - .show : จำนวนรอบที่จะแสดงผลการฝึกสอน คือ 200

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณซีเมนต์ และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100 m³/h ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ

อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
100	tansig, purelin	3-1	2.65×10^{-6}	0.6576
	tansig, purelin	5-1	6.82×10^{-6}	1.0634
	tansig, purelin	8-1	1.37×10^{-6}	0.6817
	tansig, purelin	10-1	3.85×10^{-6}	10.3057
	logsig, purelin	3-1	3.38×10^{-6}	1.0218
	logsig, purelin	5-1	4.72×10^{-6}	4.3923
	logsig, purelin	8-1	9.83×10^{-6}	3.0508
	logsig, purelin	10-1	3.66×10^{-6}	131.6940
	purelin, purelin	3-1	3.64×10^{-6}	0.2428
	purelin, purelin	5-1	5.07×10^{-6}	0.2128
	purelin, purelin	8-1	5.90×10^{-6}	0.1629
	purelin, purelin	10-1	4.43×10^{-6}	0.1819

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ

อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
100 (ผ่านการแปลง ให้อยู่ในรูป ลอการิทึม)	tansig, purelin	3-1	8.52×10^{-6}	0.0933
	tansig, purelin	5-1	1.64×10^{-6}	8.1421
	tansig, purelin	8-1	4.74×10^{-8}	3.79×10^{-4}
	tansig, purelin	10-1	5.43×10^{-6}	1.3252
	logsig, purelin	3-1	6.04×10^{-6}	0.0996
	logsig, purelin	5-1	3.85×10^{-6}	0.0541
	logsig, purelin	8-1	7.17×10^{-10}	3.99×10^{-5}
	logsig, purelin	10-1	1.42×10^{-6}	1.7001
	purelin, purelin	3-1	2.79×10^{-8}	9.88×10^{-4}
	purelin, purelin	5-1	1.02×10^{-7}	0.0114
	purelin, purelin	8-1	1.32×10^{-7}	0.0171
	purelin, purelin	10-1	6.35×10^{-7}	0.0097

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $120 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ

อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
120	tansig, purelin	3-1	6.3×10^{-5}	3.2184
	tansig, purelin	5-1	1.23×10^{-6}	0.2340
	tansig, purelin	8-1	3.10×10^{-6}	0.1900
	tansig, purelin	10-1	8.07×10^{-7}	130.5370
	logsig, purelin	3-1	4.27×10^{-5}	3.2256

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $120 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ (ต่อ)

อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
120	logsig, purelin	5-1	6.25×10^{-6}	3.3779
	logsig, purelin	8-1	3.49×10^{-7}	0.8551
	logsig, purelin	10-1	3.18×10^{-8}	541.4202
	purelin, purelin	3-1	6.36×10^{-6}	0.3493
	purelin, purelin	5-1	6.55×10^{-6}	0.2242
	purelin, purelin	8-1	2.03×10^{-6}	0.0984
	purelin, purelin	10-1	1.93×10^{-6}	0.0578

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $120 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ

อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
120 (ผ่านการ แปลงให้อยู่ ในรูป ลอการิทึม)	tansig, purelin	3-1	1.67×10^{-10}	6.64×10^{-6}
	tansig, purelin	5-1	3.87×10^{-9}	0.0013
	tansig, purelin	8-1	6.12×10^{-8}	0.0082
	tansig, purelin	10-1	1.33×10^{-7}	0.0438
	logsig, purelin	3-1	4.77×10^{-6}	9.1492
	logsig, purelin	5-1	2.73×10^{-9}	4.24×10^{-5}
	logsig, purelin	8-1	1.14×10^{-8}	2.8616
	logsig, purelin	10-1	4.29×10^{-8}	285.4467
	purelin, purelin	3-1	1.96×10^{-7}	0.0360
	purelin, purelin	5-1	6.31×10^{-6}	0.2407

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $120 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ (ต่อ)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
120 (ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)	purelin, purelin	8-1	3.30×10^{-7}	0.0746
	purelin, purelin	10-1	5.12×10^{-8}	0.0064

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการรันโปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่การฝึกสอนเครือข่ายต่าง ๆ

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
200	tansig, purelin	3-1	9.99×10^{-6}	2.9526
	tansig, purelin	5-1	7.67×10^{-6}	41.8573
	tansig, purelin	8-1	5.63×10^{-6}	1.2799
	tansig, purelin	10-1	9.54×10^{-6}	1.0566
	logsig, purelin	3-1	9.19×10^{-6}	0.9968
	logsig, purelin	5-1	9.89×10^{-6}	0.6436
	logsig, purelin	8-1	9.95×10^{-6}	2.4853
	logsig, purelin	10-1	4.74×10^{-6}	2.1522
	purelin, purelin	3-1	1.14×10^{-5}	0.1852
	purelin, purelin	5-1	1.14×10^{-5}	0.1852
	purelin, purelin	8-1	1.14×10^{-5}	0.1852
	purelin, purelin	10-1	1.14×10^{-5}	0.1852

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการรัน โปรแกรมสำหรับพารามิเตอร์ 3 ตัวที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล, ปริมาณขี้เถ้า และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่มี ความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 200 m³/h ที่การฝึกสอนเครือข่าย ต่าง ๆ

อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
200 (ผ่านการ แปลงให้อยู่ ในรูป ลอการิทึม)	tansig, purelin	3-1	7.91×10^{-7}	0.0032
	tansig, purelin	5-1	5.03×10^{-9}	1.37×10^{-4}
	tansig, purelin	8-1	7.93×10^{-6}	0.1347
	tansig, purelin	10-1	1.58×10^{-8}	0.0157
	tansig, purelin, purelin	3-1-1	5.17×10^{-9}	7.98×10^{-5}
	logsig, purelin	3-1	3.20×10^{-6}	0.0060
	logsig, purelin	5-1	4.89×10^{-7}	0.0295
	logsig, purelin	8-1	1.32×10^{-6}	0.9805
	logsig, purelin	10-1	4.51×10^{-7}	0.0026
	logsig, purelin, purelin	3-1-1	8.57×10^{-10}	9.36×10^{-6}
	purelin, purelin	3-1	1.99×10^{-9}	2.47×10^{-4}
	purelin, purelin	5-1	2.68×10^{-9}	9.44×10^{-5}
	purelin, purelin	8-1	2.21×10^{-7}	0.0079
	purelin, purelin	10-1	8.05×10^{-8}	0.0015
	purelin, purelin, purelin	3-1-1	1.59×10^{-9}	3.61×10^{-6}

จากตารางที่ 5.1 ถึง 5.6 สามารถสรุปฟังก์ชันถ่ายโอนและเครือข่ายทดสอบที่ดีที่สุด สำหรับชุดทดสอบและอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซีฟเออร์ที่ดีที่สุด ด้วยเครือข่ายแบบแพร่กลับที่อัตราการไหลของแก๊ส 100, 120 และ 200 m³/h

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
100	purelin, purelin	8-1	5.90×10^{-6}	0.1629
120	purelin, purelin	10-1	1.93×10^{-6}	0.0578
200	purelin, purelin	3-1	1.14×10^{-5}	0.1852
100 (ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)	logsig, purelin	8-1	7.17×10^{-10}	3.99×10^{-5}
120 (ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)	tansig, purelin	3-1	1.67×10^{-10}	6.64×10^{-6}
200 (ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)	purelin, purelin, purelin	3-1-1	1.59×10^{-9}	3.61×10^{-6}

จากตารางที่ 5.7 จะพบว่าที่ชุดข้อมูลปกติ ถึงแม้้อัตราการไหลเชื้อเพลิงจะต่างกัน แต่ฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนคือ purelin, purelin แต่เมื่อนำชุดข้อมูลปกติมาผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดจากผลการรันโปรแกรมแสดงดังนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin ที่เครือข่าย 8-1 จะให้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 100 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 38-47 kg/h จะได้ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 คือ

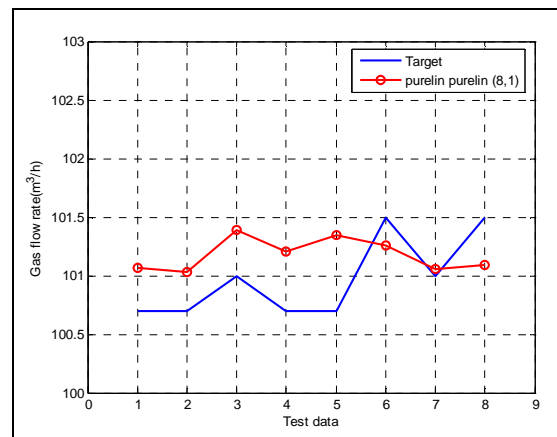
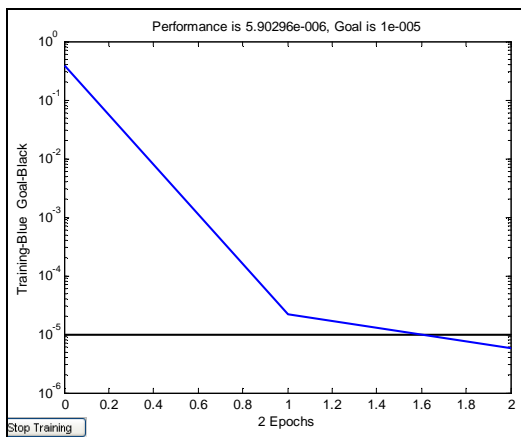
$$w_1 = \begin{bmatrix} -0.7606 & 0.7461 & -0.5138 \\ 0.0427 & -0.4784 & 0.9842 \\ -0.7656 & 0.7586 & -0.5774 \\ 0.5438 & -0.6715 & 0.0330 \\ -0.2554 & -1.0316 & -0.4676 \\ 0.6495 & -0.4233 & 0.3736 \\ -0.9104 & 0.7440 & 0.8816 \\ 0.1934 & -0.9514 & 0.5109 \end{bmatrix} \quad (5-57)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} 0.4689 \\ -0.6885 \\ -0.7958 \\ -1.0842 \\ -0.2744 \\ 0.5382 \\ 1.0812 \\ -0.8949 \end{bmatrix} \quad (5-58)$$

และข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คือ

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.5431 \\ 0.1152 \\ -0.2009 \\ -0.5455 \\ 0.8052 \\ -0.2406 \\ 0.4625 \\ 0.2851 \end{bmatrix} \quad (5-59)$$

$$b_2 = [-0.3498] \quad (5-60)$$



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 8-1

ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin ที่เครือข่าย 10-1 จะให้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 44-68 kg/h จะได้อ่านน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 คือ

$$w_1 = \begin{bmatrix} 0.7491 & -0.5439 & -0.5346 \\ 0.0586 & -0.2954 & 0.0439 \\ -0.3819 & -0.3064 & -0.5777 \\ -0.4181 & 0.2128 & -0.4378 \\ 0.4777 & -0.6931 & 0.2730 \\ 0.1639 & -0.1782 & 0.7082 \\ 0.0778 & 0.4115 & -0.3685 \\ 0.2601 & 0.6364 & 0.8075 \\ 0.8232 & 0.8897 & -0.6640 \\ 0.5142 & -0.8926 & 0.5996 \end{bmatrix}$$

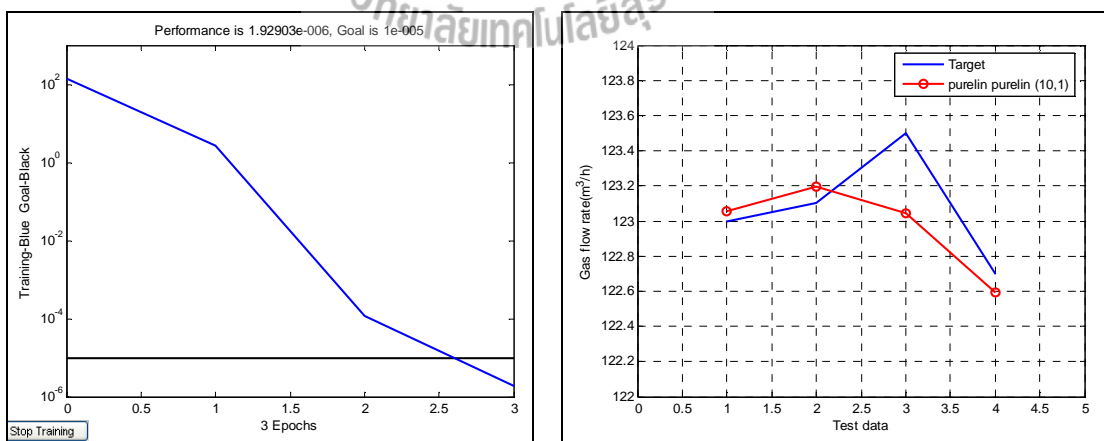
(5-61)

$$b_1 = \begin{bmatrix} -0.0657 \\ -0.4463 \\ 0.0912 \\ 0.0704 \\ -0.9219 \\ 0.3226 \\ -0.7750 \\ 0.3581 \\ -0.0699 \\ -0.6325 \end{bmatrix} \quad (5-62)$$

และข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คือ

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.8027 \\ 0.3661 \\ 0.4880 \\ -0.2684 \\ -0.3689 \\ -0.2748 \\ -0.9683 \\ 0.7241 \\ 0.0585 \\ -0.1221 \end{bmatrix} \quad (5-63)$$

$$b_2 = [-0.3806] \quad (5-64)$$



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 10-1

ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin ที่เครือข่าย 3-1 จะให้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$ และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง $126\text{-}141 \text{ kg/h}$ จะได้ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 คือ

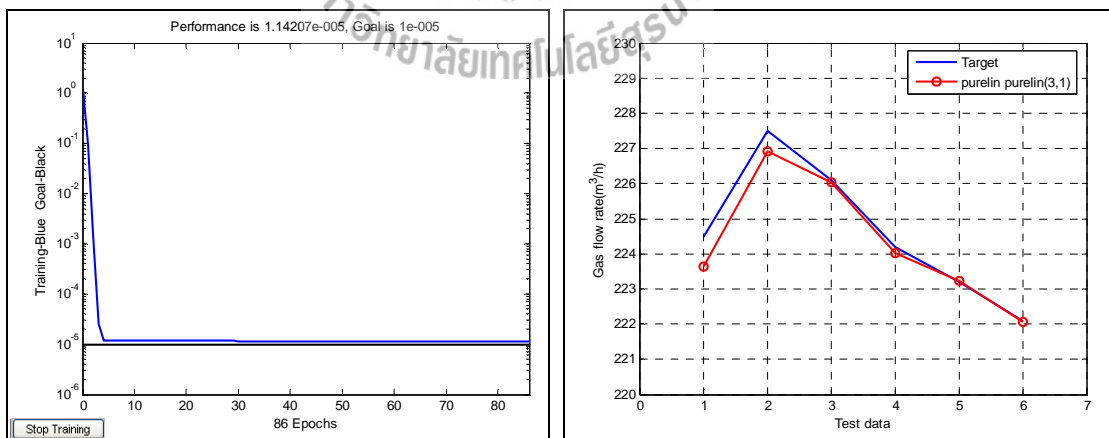
$$w_1 = \begin{bmatrix} -0.8064 & -0.4182 & 0.3046 \\ -0.2397 & -0.2626 & 0.6034 \\ -0.4788 & 0.8024 & -0.1680 \end{bmatrix} \quad (5-65)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} 0.6094 \\ -0.7341 \\ -0.8897 \end{bmatrix} \quad (5-66)$$

และข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คือ

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.4792 \\ 0.2685 \\ 0.6145 \end{bmatrix} \quad (5-67)$$

$$b_2 = [0.8023] \quad (5-68)$$



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 3-1

เมื่อชุดข้อมูลที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง $38\text{-}47 \text{ kg/h}$ ไปผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin ที่เครือข่าย 8-1 จะให้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด จะได้ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 คือ

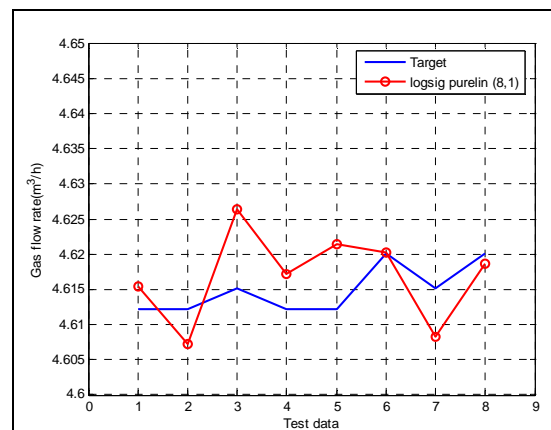
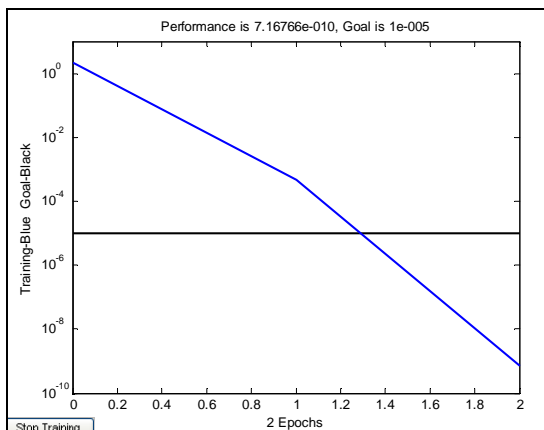
$$w_1 = \begin{bmatrix} -0.4275 & -0.8683 & 0.7808 \\ 0.3536 & 0.7571 & 0.5261 \\ 0.1724 & -0.0239 & 0.3109 \end{bmatrix} \quad (5-69)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} 0.8749 \\ -0.6079 \\ -0.7184 \end{bmatrix} \quad (5-70)$$

และข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คือ

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.3754 \\ -0.2828 \\ 0.0229 \end{bmatrix} \quad (5-71)$$

$$b_2 = [-0.4548] \quad (5-72)$$



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 8-1 (ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)

เมื่อชุดข้อมูลที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$ และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง $44\text{-}68 \text{ kg}/\text{h}$ ไปผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin ที่เครือข่าย 3-1 จะให้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด จะได้ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 คือ

$$w_1 = \begin{bmatrix} 0.7491 & -0.5439 & -0.5346 \\ 0.0586 & 0.2954 & -0.0439 \\ -0.3819 & -0.3064 & -0.5777 \\ -0.4181 & 0.2128 & -0.4378 \\ 0.4777 & -0.6931 & 0.2730 \\ 0.1639 & -0.1782 & 0.7082 \\ 0.0778 & 0.4115 & -0.3685 \\ 0.2601 & 0.6364 & 0.8075 \\ 0.8232 & 0.8897 & -0.6640 \\ 0.5142 & -0.8926 & 0.5996 \end{bmatrix}$$

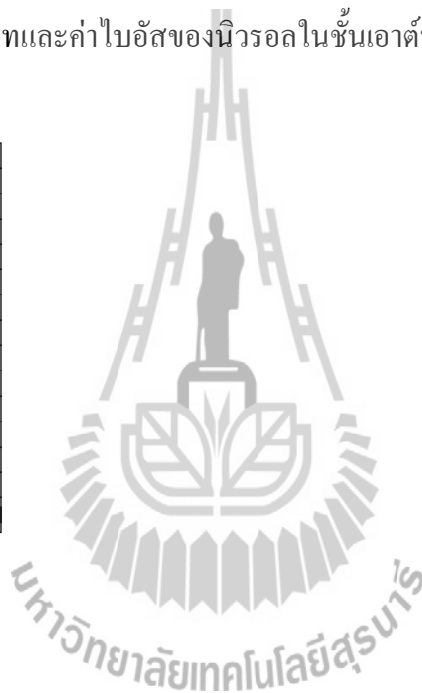
(5-73)

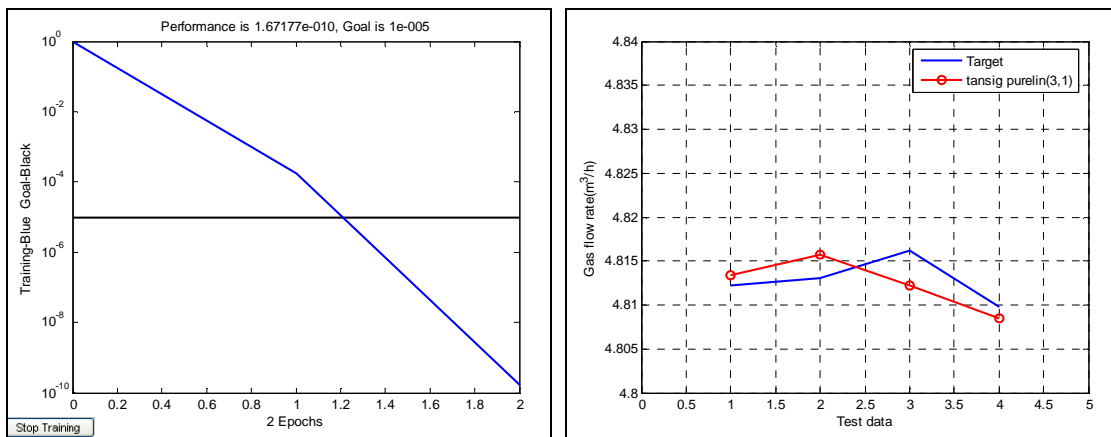
$$b_1 = \begin{bmatrix} -0.0657 \\ -0.4463 \\ 0.0912 \\ 0.0704 \\ -0.9219 \\ 0.3226 \\ -0.7750 \\ 0.3581 \\ -0.0699 \\ -0.6325 \end{bmatrix} \quad (5-74)$$

และข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอลในชั้นเอาต์พุต คือ

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.8027 \\ 0.3661 \\ 0.4880 \\ -0.2684 \\ -0.3689 \\ -0.2748 \\ -0.9683 \\ 0.7241 \\ 0.0585 \\ -0.1221 \end{bmatrix} \quad (5-75)$$

$$b_2 = [-0.3806] \quad (5-76)$$





ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin เครือข่าย 3-1 (ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม)

เมื่อชุดข้อมูลที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$ และเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง $126\text{-}141 \text{ kg/h}$ ไปผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin, purelin ที่เครือข่าย 3-1-1 จะให้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุดจะได้ค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 คือ

$$w_1 = \begin{bmatrix} -0.2491 & 0.3433 & 0.6797 \\ -0.6397 & -0.1096 & -0.7936 \\ 0.2460 & -0.8919 & 0.6155 \end{bmatrix} \quad (5-77)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} -0.1555 \\ -0.5245 \\ 0.4514 \end{bmatrix} \quad (5-78)$$

ข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 2 คือ

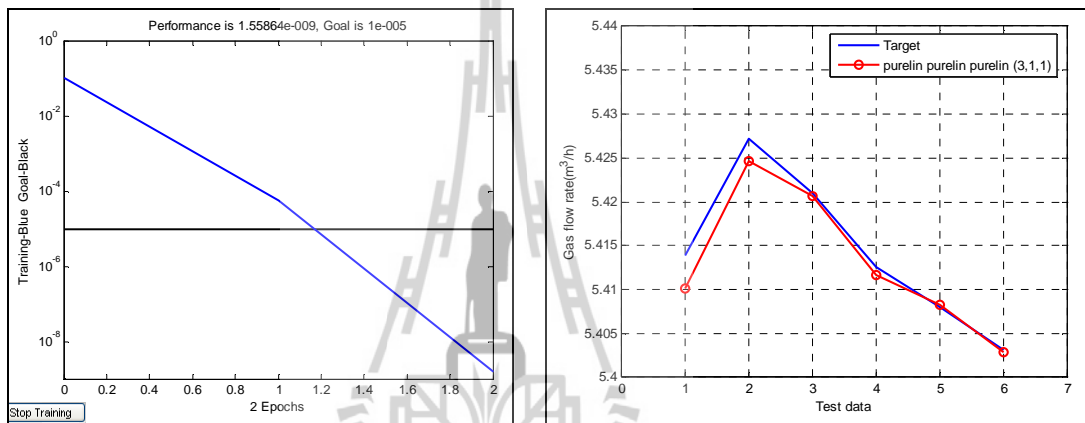
$$w_2 = \begin{bmatrix} -0.7170 \\ 0.1442 \\ -0.1254 \end{bmatrix} \quad (5-79)$$

$$b_2 = [-0.2045] \quad (5-80)$$

และข้อมูลน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต คือ

$$w_3 = [-0.8869] \quad (5-81)$$

$$b_3 = [-0.1948] \quad (5-82)$$



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

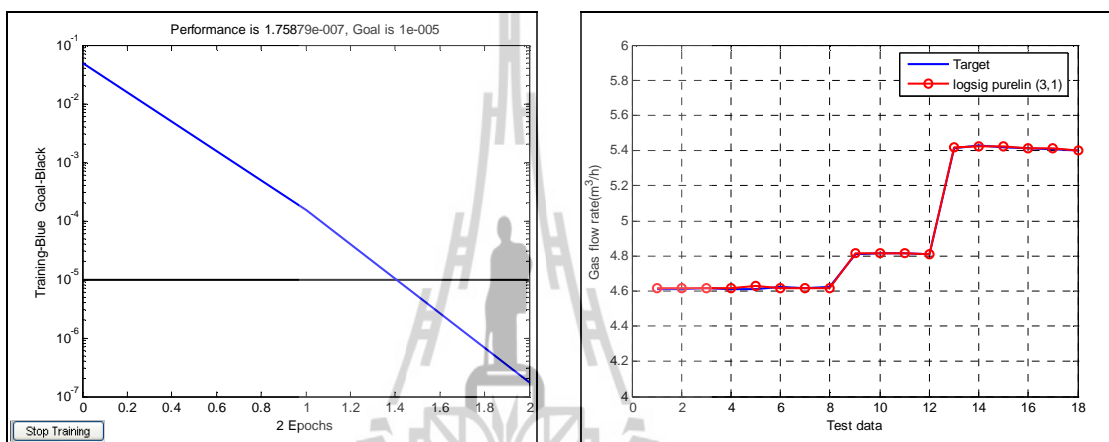
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin, purelin เครือข่าย 3-1-1

จากผลการรันโปรแกรมโดยแยกชุดข้อมูลตามอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงจะพบว่าชุดข้อมูลจะได้ค่าการระบุเอกลักษณ์ที่มีค่าเฉพาะในแต่ละอัตราการไหลเท่านั้น จึงได้ทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยชุดข้อมูลอีกชุดหนึ่งซึ่งรวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงมาเป็นข้อมูลทดสอบและข้อมูลฝึกสอนอย่างละ 1 ชุด แล้วทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับอีกครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ผลการรันโปรแกรมของชุดฝึกสอนและชุดทดสอบที่รวมทุกอัตราการเรียนรู้ของแก๊สเชื้อเพลิง

ชุดข้อมูล	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
ปกติ	purelin, purelin	3-1	6.75×10^{-4}	25.9232
	purelin, purelin	5-1	6.75×10^{-4}	25.9232
	purelin, purelin	8-1	6.75×10^{-4}	25.9232
	purelin, purelin	10-1	6.75×10^{-4}	25.9232
	logsig, purelin	3-1	9.73×10^{-6}	0.1890
	logsig, purelin	5-1	9.99×10^{-6}	0.1914
	logsig, purelin	8-1	9.95×10^{-6}	0.8591
	logsig, purelin	10-1	9.98×10^{-6}	0.8304
	tansig, purelin	3-1	9.96×10^{-6}	0.1547
	tansig, purelin	5-1	9.74×10^{-6}	0.4335
	tansig, purelin	8-1	9.97×10^{-6}	0.3341
	tansig, purelin	10-1	9.96×10^{-6}	0.6511
แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม	purelin, purelin	3-1	4.76×10^{-7}	0.0027
	purelin, purelin	5-1	7.52×10^{-8}	0.0027
	purelin, purelin	8-1	7.85×10^{-8}	0.0027
	purelin, purelin	10-1	1.73×10^{-7}	0.0027
	logsig, purelin	3-1	1.76×10^{-7}	3.34×10^{-5}
	logsig, purelin	5-1	8.54×10^{-6}	1.47×10^{-4}
	logsig, purelin	8-1	9.99×10^{-11}	4.19×10^{-4}
	logsig, purelin	10-1	9.99×10^{-11}	4.44×10^{-4}
	tansig, purelin	3-1	8.65×10^{-10}	3.05×10^{-4}
	tansig, purelin	5-1	9.91×10^{-10}	8.08×10^{-5}
	tansig, purelin	8-1	9.85×10^{-10}	4.12×10^{-5}
	tansig, purelin	10-1	9.99×10^{-11}	7.23×10^{-4}

รูปที่ 5.16 แสดงผลการรันที่ดีที่สุดสำหรับชุดข้อมูลที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปของลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 3-1 โดยค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลทดสอบมีค่าเท่ากับ 3.34×10^{-5} ซึ่งผลที่ได้นี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุดจากผลการรันโปรแกรมที่ได้สำหรับเตาแก๊สซีฟิเออร์ชนิดควานด์ราฟต์ขนาด 100 กิโลวัตต์ ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้กระถินยักษ์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณที่เผาต่อชั่วโมง, ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลต่อชั่วโมงและอุณหภูมิที่บริเวณชั้นเผาไหม้ กับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 3-1 ที่ข้อมูลรวมทุกอัตราการไหลของแก๊ส เมื่อถูกแปลงให้อยู่ในรูปของลอการิทึม

และจะได้สมการ (5-83) และ (5-84) ที่แสดงค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นที่ 1 ที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครือข่าย 3-1 ดังนี้

$$w_1 = \begin{bmatrix} -663.35 & -1082.1 & -4518.1 \\ 1901.5 & -2912.4 & -89304 \\ -1906.2 & 2909.2 & 89434 \end{bmatrix} \quad (5-83)$$

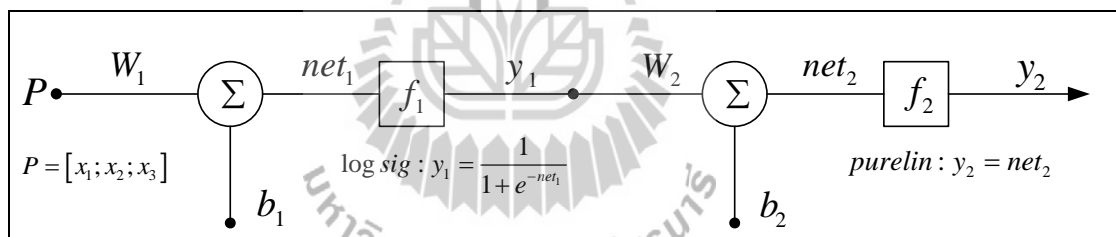
$$b_1 = \begin{bmatrix} 178.37 \\ 2967.3 \\ -2971.5 \end{bmatrix} \quad (5-84)$$

และสมการ (5-85) และ (5-86) แสดงค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต

$$w_2 = \begin{bmatrix} -0.0041 \\ 0.5882 \\ 0.5891 \end{bmatrix} \quad (5-85)$$

$$b_2 = [-0.5610] \quad (5-86)$$

ในกรณีที่ต้องการทราบค่าพารามิเตอร์ที่อัตราการไหลอื่น ๆ สามารถคำนวณค่าได้ตามตัวอย่างดังนี้ ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่ $81.28 \text{ m}^3/\text{h}$ ที่สัมพันธ์กันกับพารามิเตอร์ที่พิจารณาในช่วงเวลาเดียวกัน โดยพารามิเตอร์นั้นคือปริมาณจีแก๊สต่อชั่วโมง, ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล และอุณหภูมิบริเวณชั้นเผาไหม้ ที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครื่องข่าย 3-1



รูปที่ 5.17 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครือข่ายประสาทเทียมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig, purelin เครื่องข่าย 3-1 เมื่อพิจารณาที่ชุดข้อมูลรวมทุกอัตราการไหลของแก๊สที่ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของลอการิทึม

ตารางที่ 5.9 ค่าพารามิเตอร์ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่ 81.28 m³/h

พารามิเตอร์	ปกติ	ผ่านการแปลงลอการิทึมและปรับค่า
x_1 : ปริมาณเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง	1.90	0.0032
x_2 : ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล	36.98	0.0181
x_3 : อุณหภูมิบริเวณชั้นเผาไหม้	600.1	0.0320
y_2 : อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง	81.28	0.0220

จากรูปที่ 5.17 สามารถแสดงตัวอย่างการประมาณค่าอัตราการไหลแก๊สได้ดังนี้

$$net_1 = [W_1][P] + [b_1] \quad (5-87)$$

แทนค่า $[W_1]$ และ $[b_1]$ จากสมการ (5-83) และ (5-84) ลงในสมการ (5-87) จะได้

$$net_1 = \begin{bmatrix} -663.35 & -1082.1 & -4518.1 \\ 1901.5 & -2912.4 & -89304 \\ -1906.2 & 2909.2 & 89434 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 178.37 \\ 2967.3 \\ -2971.5 \end{bmatrix} \quad (5-88)$$

$$= \begin{bmatrix} -663.35 & -1082.1 & -4518.1 \\ 1901.5 & -2912.4 & -89304 \\ -1906.2 & 2909.2 & 89434 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.003209 \\ 0.018052 \\ 0.031985 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 178.37 \\ 2967.3 \\ -2971.5 \end{bmatrix} \quad (5-89)$$

$$= \begin{bmatrix} 12.194 \\ 64.377 \\ -64.462 \end{bmatrix} \quad (5-90)$$

ทำการหาค่า y_1 เมื่อฟังก์ชันถ่ายโอนคือ logsig จะได้

$$y_1 = f(net_1) \quad (5-91)$$

$$y_1 = \frac{1}{1 + e^{-net_1}} \quad (5-92)$$

$$y_1 = \frac{1}{1 + e^{-\begin{bmatrix} 12.194 \\ 64.377 \\ -64.462 \end{bmatrix}}} \quad (5-93)$$

$$y_1 = \begin{bmatrix} 0.99999 \\ 1 \\ 1.01e-028 \end{bmatrix} \quad (5-94)$$

y_1 ที่ได้จากสมการ (5-94) นี้จะเป็นอินพุตในชั้นเอาต์พุตต่อไป จึงทำการหาค่า net_2 ต่อ ดังแสดงในสมการ (5-95)

$$net_2 = [W_2][y_1] + [b_2] \quad (5-95)$$

และทำการหาค่า y_2 เมื่อฟังก์ชันถ่ายโอนคือ purelin จะได้

$$y_2 = f(net_2) \quad (5-96)$$

$$y_2 = [W_2][y_1] + [b_2] \quad (5-97)$$

แทนค่า สมการ (5-85) และ (5-86) ที่แสดงค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัสของ นิวรอลในชั้นเอาต์พุต และ y_1 ในสมการ (5-94) ลงในสมการ (5-97) จะได้ y_2 ซึ่งเป็นเอาต์พุตของ เครือข่ายดังนี้

$$y_2 = \begin{bmatrix} -0.0041 & 0.5882 & 0.5891 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.99999 \\ 1 \\ 1.01e-028 \end{bmatrix} + [-0.5610] \quad (5-98)$$

$$y_2 = 0.0231 \quad (5-99)$$

หรือ

$$y_2 = 101.47 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5-100)$$

เมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากการทดสอบที่ logsig,purelin เครือข่าย 3-1 กับข้อมูลจริง จะพบว่าค่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ แต่เนื่องจากฟังก์ชัน logsig,purelin เครือข่าย 3-1 ที่ใช้ทดสอบ ได้มาจากช่วงของอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่อยู่ในช่วง 100-228.7 m^3/h ดังนั้นเมื่อใช้ค่าที่อยู่ นอกเหนือจากชุดข้อมูลจึงมีความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้เป็นธรรมดา แต่ทั้งนี้หลักการคำนวณ ไม่ได้มีความแตกต่างกัน จึงนำเสนอตัวอย่างนี้เพื่อให้ได้ทราบถึงหลักการที่มาของค่าเอาต์พุต

5.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซีไฟเออร์ด้วยเครือข่ายแบบแพร่กลับ ซึ่งได้กล่าวถึงทั้งในส่วนทฤษฎี และผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าการระบุเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคนี้สามารถทำการประมาณค่าฟังก์ชันและได้เอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับข้อมูลทดสอบมากกว่าวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ผลที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ 3 ตัว ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล ปริมาณจีเอ็ม และอุณหภูมิบริเวณเผาไหม้ ที่ส่งผลกับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง จากสมการ (5-83) ถึง (5-86) จะแสดงให้เห็นผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์จากฟังก์ชันถ่ายโอนและเครือข่ายที่ดีที่สุดที่ได้จากชุดข้อมูลทดสอบที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมแล้ว ซึ่งก็คือฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin ที่เครือข่าย 3-1 และทั้งนี้ ได้แสดงตัวอย่างหลักการคำนวณหาค่าอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ โดยยกตัวอย่างที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่ค่าอื่น

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ระบบแก๊สซีไฟเออร์สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยต้นแบบการศึกษาคือ โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โรงไฟฟ้าชีวมวลนี้มีกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ เป็นโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กใช้เทคโนโลยีแก๊สซีไฟเคชันชนิดเตาดาวน์ดราฟต์ ทำการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน และเอาต์พุตที่ได้จากเตาดาวน์ดราฟต์คือปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง หากสามารถทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ก็จะสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของระบบแก๊สซีไฟเออร์ได้ จึงเป็นประเด็นหลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซีไฟเออร์นี้ขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ 2 วิธีคือ วิธีการวิเคราะห์การถดถอยและเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ ซึ่งชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบคือชุดข้อมูลที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้กระถินยักษ์ โดยมีอัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100, 120 และ 200 m^3/h ซึ่งชุดข้อมูลนี้จะทดสอบแบบเป็นข้อมูลปกติและแบบชุดข้อมูลที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม นำมาระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยด้วยสมการลำดับที่หนึ่ง สมการลำดับที่สอง สมการลำดับที่สาม และนำชุดข้อมูลเดียวกันนี้มาประยุกต์ใช้กับการเรียนรู้แบบแพร่กลับของเครือข่ายประสาทเทียม จะพบว่าการเรียนรู้แบบแพร่กลับสามารถให้ค่าระบุเอกลักษณ์ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ทั้งหมด โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย เมื่อเปรียบเทียบผลจากสมการลำดับที่หนึ่ง สมการลำดับที่สอง สมการลำดับที่สามจากชุดข้อมูลปกติและชุดข้อมูลที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม โดยชุดข้อมูลที่ใช้เป็นชุดข้อมูลที่รวมทุกอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ 100, 120 และ 200 m^3/h จากการระบุเอกลักษณ์จะพบว่าที่การถดถอยแบบเชิงเส้นเมื่อชุดข้อมูลผ่านการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมสามารถให้ผลการระบุเอกลักษณ์ที่ดีที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 0.0027 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอื่นที่ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเหมือนกัน

2) การระบุเอกลักษณ์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับได้ทดลองโดยใช้ชุดข้อมูลเดียวกับการวิเคราะห์การถดถอย โดยใช้ Neural Network Toolbox ผลที่ได้คือเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับสามารถระบุเอกลักษณ์ได้ดีกว่าวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสมจากในผลการทดสอบทั้งหมดคือ `logsig,purelin` ที่เครือข่าย

3-1 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 3.34×10^{-5} ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนและจำนวนเครือข่ายที่ได้นี้จะถือว่าเป็นตัวแทนของการระบุเอกลักษณ์ของระบบแก๊สซิไฟเออร์สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดไม้กระถินยักษ์

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการระบุเอกลักษณ์ระบบแก๊สซิไฟเออร์นี้ได้ทำการระบุจากพารามิเตอร์ 3 ตัวอันได้แก่ ปริมาณขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง (Ash discharge rate (kg/h) : F_{ash}) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อชั่วโมง (Biomass consumption rate (kg/h) : F_{bc}) และอุณหภูมิที่วัดจากโซนเผาไหม้ (Combustion zone temperature ($^{\circ}\text{C}$): T_{comb}) ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อค่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel flow rate : F_{gas}) ซึ่งได้มาจากผลการทดสอบจริงของโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งเป็นข้อจำกัดจากชุดข้อมูลที่มี สำหรับโรงไฟฟ้าอื่นสามารถศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์อื่นได้ ขึ้นอยู่กับผลการทดลองที่มีและแนวคิดของผู้วิจัยเป็นสำคัญ

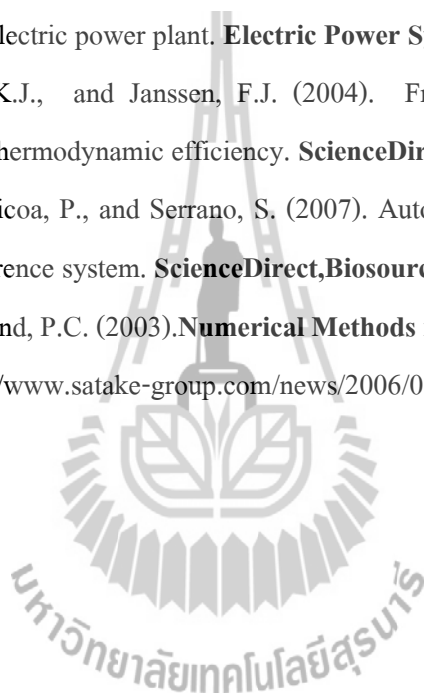
2) ปริมาณของชุดข้อมูลฝึกสอนมีผลต่อการระบุเอกลักษณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการระบุเอกลักษณ์ด้วยเครือข่ายประสาทที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ ดังนั้นเพื่อให้ได้การระบุเอกลักษณ์ที่ดีขึ้น ปริมาณของชุดข้อมูลจึงสามารถปรับเพิ่มได้ตามความต้องการและปริมาณข้อมูลที่ผู้วิจัยมีนั่นเอง

3) ในการทำนายค่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงนั้น ถ้าหากค่าที่ต้องการทำนายอยู่นอกเหนือจากชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนแล้ว ผลที่ได้จากการทำนายย่อมมีความคลาดเคลื่อนมากเป็นธรรมดา ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหานี้ในส่วนนี้ ผู้วิจัยอาจต้องมีชุดข้อมูลที่ครอบคลุมมากพอ แต่ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับผู้วิจัยเองด้วยว่าออกแบบการทดลองเป็นในลักษณะใด

รายการอ้างอิง

- ฉกร เอื้อสกุล. (2547). การหาเอกลักษณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบบับบลิ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ฉกร เอื้อสกุล และ สิ้นชัย ชินวรรรัตน์. (2546). การหาเอกลักษณ์ของเตาเผาขยะมูลฝอยแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยระบบพีซีดีเอจิก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17. วันที่ 15-17 ตุลาคม: 452-457.
- ทรงศิริ เต็มบัวดี. (2541). การวิเคราะห์การถดถอย. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.: 61-98.
- ทัศนัย องค์กรบิลย์ ประพันธ์ คูชลธารา และ เลอสรวง เมฆสุด. (2549). การพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินและชีวมวลโดยแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับการเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทัศนีย์ ชังเทศ และ สมภพ ถาวรยิ่ง. (2537). การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.: 130-138, 215-221.
- นิรมล ชุติเลิศวิทยากรณ์ พงนิษฐ์ ขุมมมงคล และ ดำรง ขุมมมงคล. (2537). การหาภาวะที่ผลิตคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ดีที่สุดของเครื่องผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลขึ้นโดยวิธีการค้นหาแบบ Simplex. การประชุมทางวิชาการคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจข. ครั้งที่ 2. วันที่ 7-8 มิถุนายน: 96-110.
- วีรชัย อาจหาญ. รายงานการวิจัยบทที่ 2. (2549) . การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. รายงานการวิจัยโรงไฟฟ้าชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 7-12.
- รายงานการวิจัยบทที่ 3. (2549). การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. รายงานการวิจัยโรงไฟฟ้าชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 2-4.
- ศราวุฒิ สุจิตจร.(2551) System Modeling. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- สุรงค์กร เพชรรักษ์ และ วิชัย สีวะ โกศิษฐ. (2551). การทำนายอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาชีวมวลแบบไหลลงโดยใช้การจำลองแบบเชิงตัวเลข. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46. วันที่ 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์: 192-199.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญหาเชิงคำนวณ. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 181-206,267-273.
- Delavari, A.R., and Klein, R.L. (1988). Gasifier System Modelling. **Electronic Letters**.24: 1586-1588.
- Jurado, F., Orgeta, M., Cano, A., and Scarpio, J. (2002). Neuro-Fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant. **Electric Power System Research** 60.: 123-135.
- Prins, M.J., Ptasiński, K.J., and Janssen, F.J. (2004). From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency. **ScienceDirect, Energy**. 32: 1248-1259.
- Sagues, C., Garcia-Bacaicoa, P., and Serrano, S. (2007). Automatic control of biomass gasifiers using fuzzy inference system. **ScienceDirect, Biosource Technology**.98: 845-855.
- Steven, C.C., and Raymond, P.C. (2003). **Numerical Methods for Engineers**. McGraw-Hill.
- Available: <http://www.satake-group.com/news/2006/061023.html>





ภาคผนวก ก

ข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

ข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

ข้อมูลที่น่ามาทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบ 6 ชุด แบ่งเป็นชุดข้อมูลฝึกสอน 3 ชุด และชุดทดสอบอีก 3 ชุด โดยใช้ข้อมูลจากต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลคือไม้กระถินยักษ์ ที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 100, 120 และ 200 m³/h ตามลำดับ โดยที่ x_1 คือ ปริมาณขี้เถ้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล(kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และ y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

ตารางที่ ก.1 ชุดข้อมูลฝึกสอนที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 m³/h

x_1	x_2	x_3	y
1.7	43.1	680.1	101.2
1.8	43.1	684.2	101.7
1.9	41.5	676.5	101.2
1.8	41.3	679.7	102.0
1.7	43.5	681.0	102.2
1.9	44.6	678.2	101.5
1.8	38.1	669.3	102.0
1.9	42.9	680.1	101.0
1.9	42.1	678.0	101.5
1.9	44.7	674.6	101.5
1.9	49	679.9	100.7
1.8	46.6	684.7	101.0
2	44.7	677.7	100.5
1.9	47.3	675.1	101.2
2	44	684.0	100.7

ตารางที่ ก.2 ชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 m³/h

x_1	x_2	x_3	y
1.8	44.6	682.2	100.7
1.7	45.2	676.5	100.7
1.8	39.5	674.7	101
1.7	43.6	677.9	100.7
1.6	44.4	682.7	100.7
1.7	43.1	678.2	101.5
1.7	44.8	676.2	101
1.7	45.4	680.6	101.5

ตารางที่ ก.3 ชุดข้อมูลฝึกสอนที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 120 m³/h

x_1	x_2	x_3	y
2.9	61.7	696.8	123.5
2.1	57.5	692.8	123.2
2.1	48.6	694.5	123.2
2.2	59.3	695.9	123.2
2.1	44	700.0	123.2
2.2	59.8	703.4	123.0
1.8	44.4	700.7	122.7
2.4	55.3	705.1	122.2
2.8	52.9	699.3	123.2
2.1	50	701.8	123.2
2	53.8	693.4	122.7

ตารางที่ ก.4 ชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 120 m³/h

x_1	x_2	x_3	y
2.5	62.8	699.0	123.0
2.7	44	700.8	123.1
2	68.4	693.4	123.5
1.3	44.7	700.9	122.7

ตารางที่ ก.5 ชุดข้อมูลฝึกสอนที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 200 m³/h

x_1	x_2	x_3	y
14.5	135.5	664.4	225.7
14	131.1	672.3	227.2
14.7	134.3	669.6	225.7
15.6	140.6	675.3	228.7
15.8	141.3	678.9	228.7
14.3	131.2	666.0	224.2
15.5	136.2	674.8	225.2
14.7	132.3	662.8	223.7
14.6	134.8	667.6	225.0
15.1	135.6	668.1	226.2
15.1	138.1	666.8	226.2
15.3	139.8	668.9	226.4
14.5	130.4	667.1	225.5
14.1	129.8	666.2	224.6
15.3	136.1	670.1	226.7
15.8	136.1	678.8	228.2
14.3	129.3	651.5	222.0

ตารางที่ ก.6 ชุดข้อมูลทดสอบที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 200 m³/h

x_1	x_2	x_3	y
15.1	133.4	660.2	224.5
15.6	135	676.3	227.5
15.1	134.9	670.2	226.1
14.6	131.6	662.1	224.2
14.9	130.1	661.1	223.2
14.2	126.2	657.0	222.1

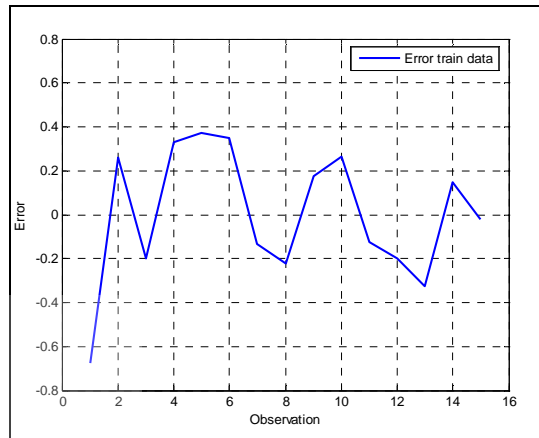
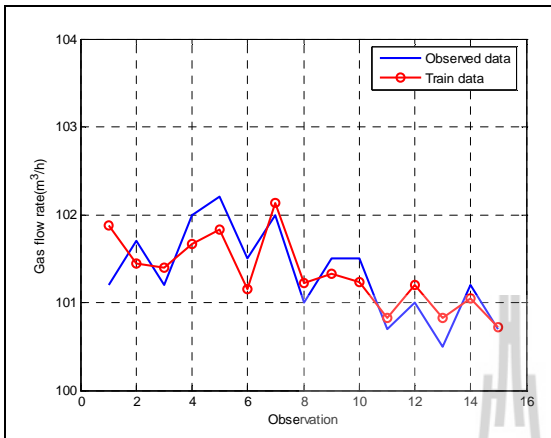




ภาคผนวก ข

ผลการรันโปรแกรมด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

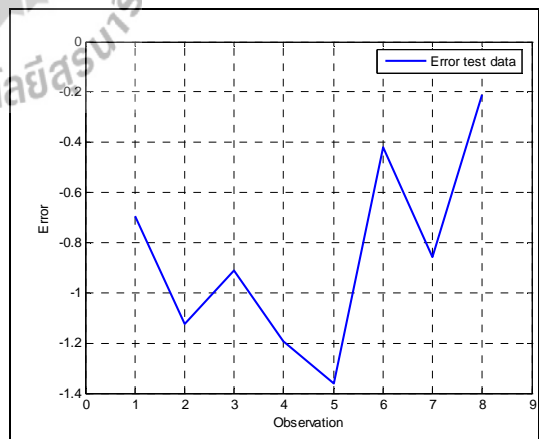
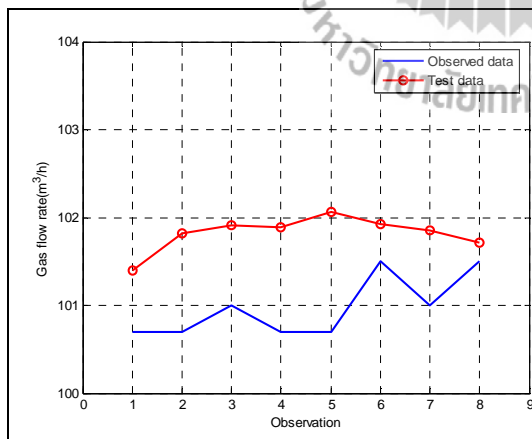


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

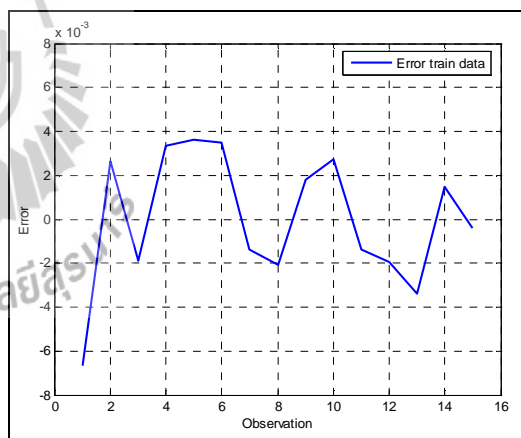
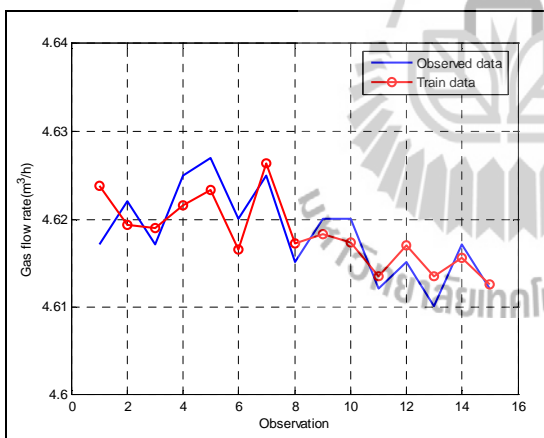
ตารางที่ ข.1 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น

$$y = 126.85 - 3.3378x_1 - 0.065904x_2 - 0.024206x_3 \tag{ข-1}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.0854	0.8498	0.6469	0.1556	0.2923	0.9219

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 100 m³/h ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

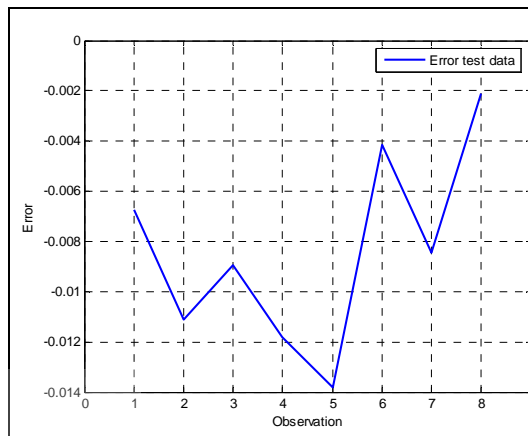
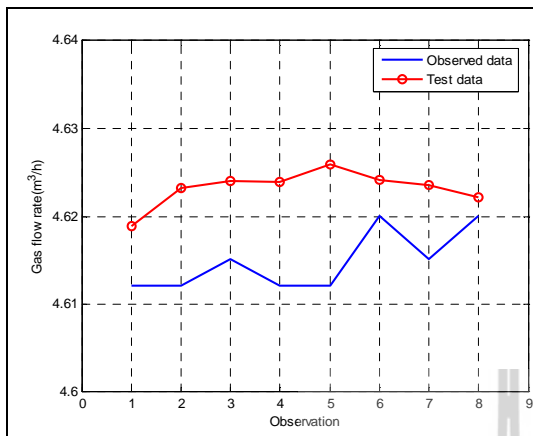


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

ชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

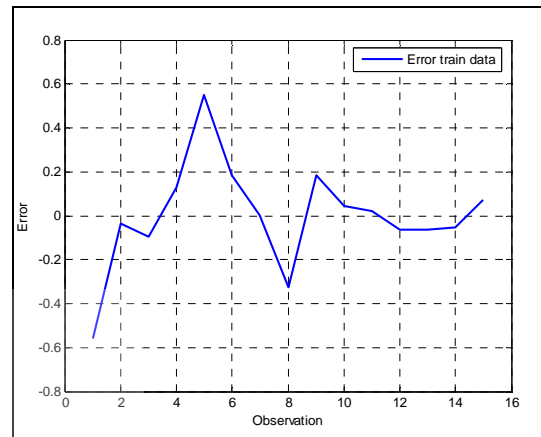
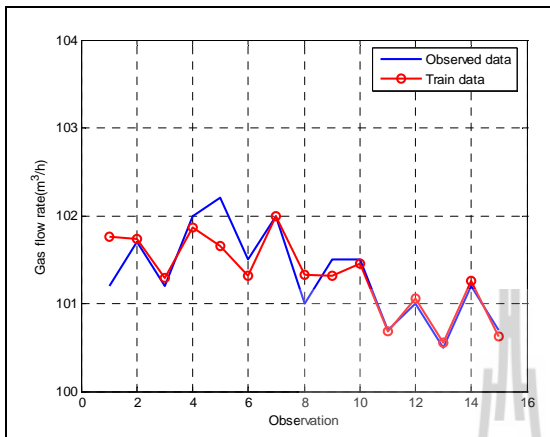
ตารางที่ ข.2 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take ln) จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

$$y = 5.7949 - 0.059993x_1 - 0.02832x_2 - 0.15834x_3 \quad (\text{ข-2})$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
8.54x10 ⁻⁶	8.40x10 ⁻⁵	0.6376	0.5519	0.0029	0.0092

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณน้ำเข้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

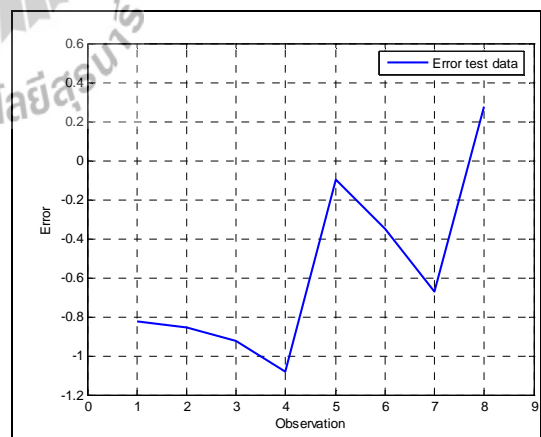
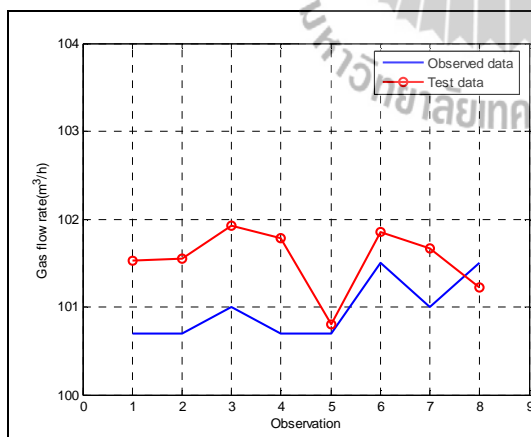


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.5 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.6 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

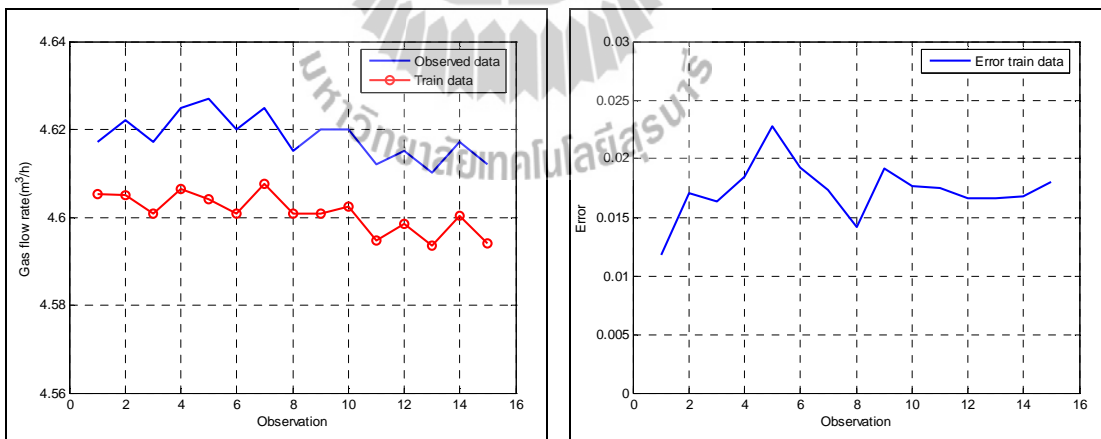
ตารางที่ ข.3 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม
โนเมียลลำดับที่สอง

$$y = 1790.6 - 96.892x_1 + 5.3216x_2 - 5.0149x_3 - 21.315x_1^2 - 0.017936x_2^2 + 0.0036664x_3^2 + 0.88218x_1x_2 - 0.0080243x_2x_3 + 0.19618x_1x_3 \quad (\text{ข-3})$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.0558	0.5104	0.7695	0.2312	0.2362	0.7144

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 100 m³/h ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ พหุนามโนเมียลลำดับที่สอง

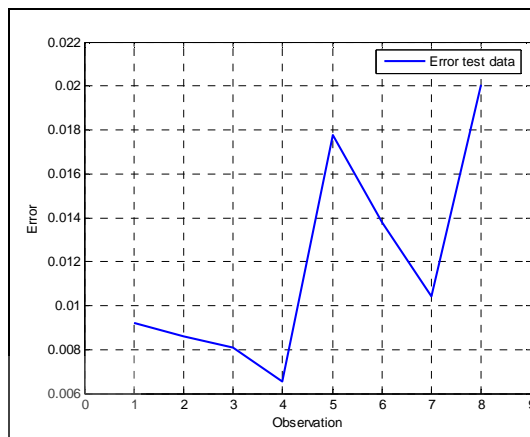
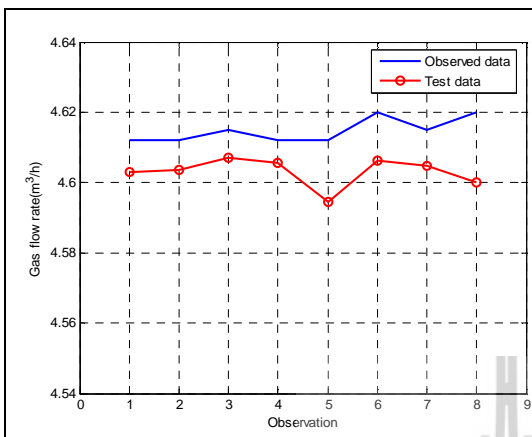


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.7 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ พหุนามโนเมียลลำดับที่สอง

ชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.8 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

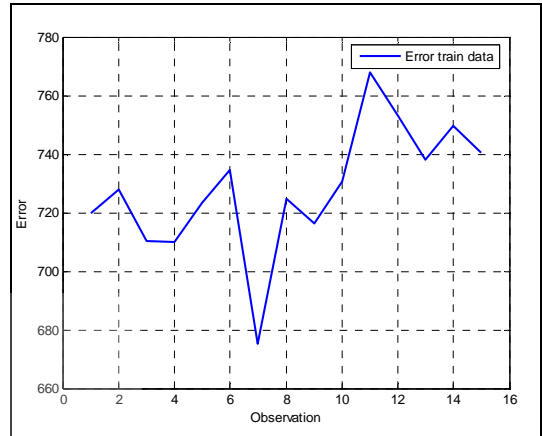
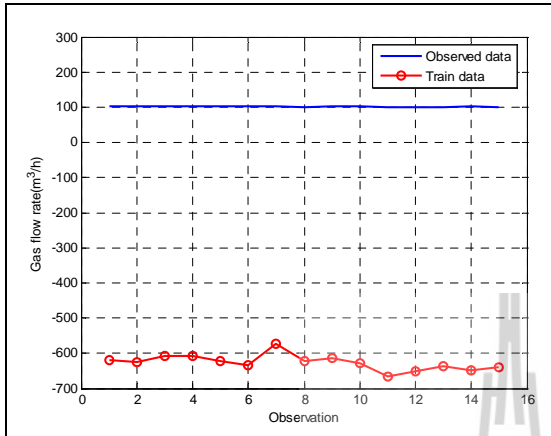
ตารางที่ ข.4 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take ln) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

$$y = 733.22 - 18.275x_1 + 18.04x_2 - 232x_3 - 0.73641x_1^2 - 0.34767x_2^2 + 18.359x_3^2 + 0.65783x_1x_2 - 2.4302x_2x_3 + 2.5486x_1x_3 \quad (\text{ข-4})$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
3.05x10 ⁻⁴	1.60 x10 ⁻⁴	0.6651	0.6233	0.0175	0.0127

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณน้ำเก่า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สาม

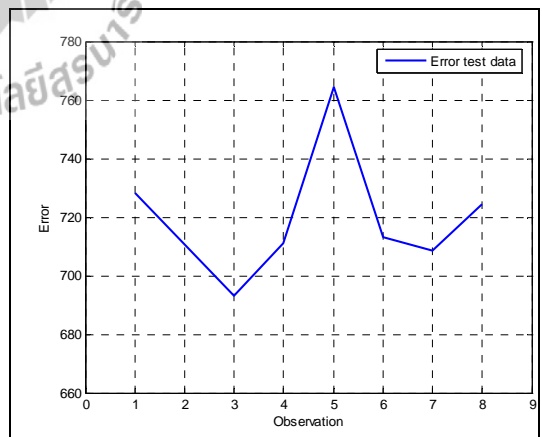
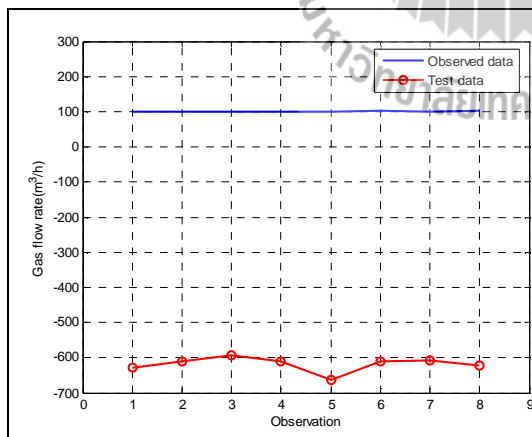


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.9 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สาม

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สาม



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.10 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สาม

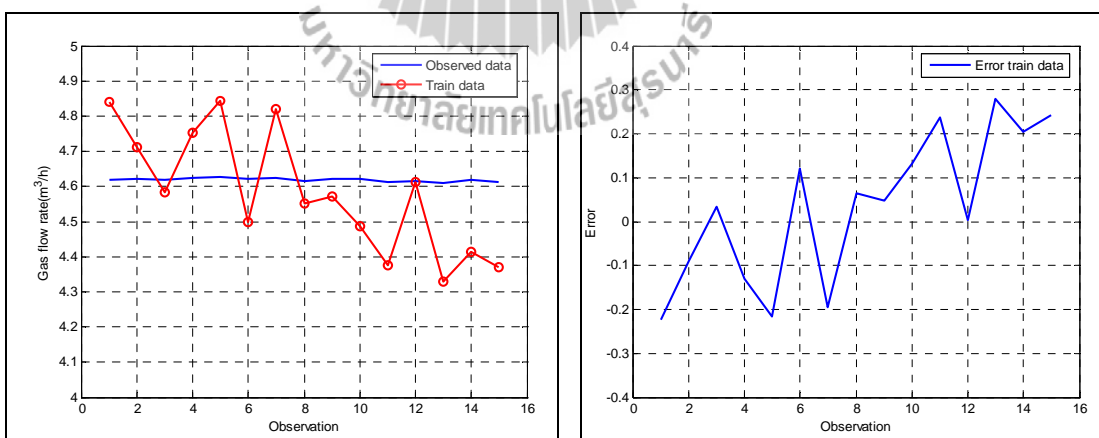
ตารางที่ ข.5 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม
โนเมียลลำดับที่สาม

$$\begin{aligned}
 y = & -12640 + 38896x_1 - 1704.3x_2 + 36.414x_3 - 39396x_1x_2 + 37.301x_2x_3 - 0.22821x_1x_3 \\
 & - 546.38x_1^2 + 1.5732x_2^2 + 127.46x_3^2 - 0.79419x_1x_2x_3 + 227.59x_1x_1x_2 \\
 & + 10.727x_1x_1x_3 + 2.6475x_1x_2x_2 - 0.090698x_1x_3x_3 - 0.092823x_2x_2x_3 \\
 & + 0.0060842x_2x_3x_3 + 3956.5x_1^3 + 0.15243x_2^3 + 2.7635e-5x_3^3
 \end{aligned}
 \tag{ข.5}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
5.31x10 ⁵	5.18 x10 ⁵	0.0012	0.0005	728.42	719.47

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เถ้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C)
และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 100 m³/h
ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบพหุนามโนเมียลลำดับที่สาม

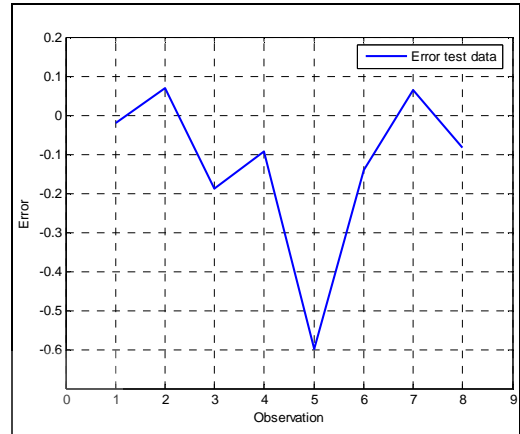
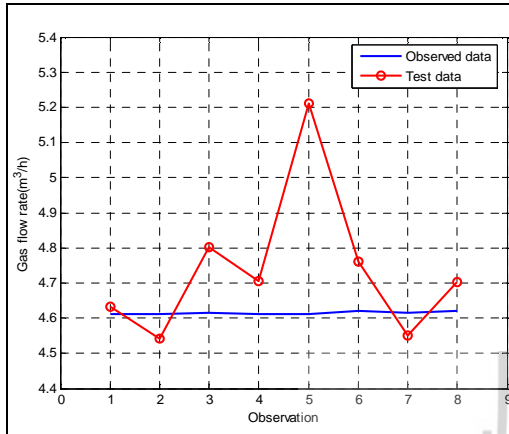


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.11 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบพหุนามโนเมียลลำดับที่สาม

ชุดทดสอบ (take In) ด้วยการถดถอยแบบพหุนามลำดับที่สาม



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.12 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take In) ด้วยการถดถอยแบบพหุนามลำดับที่สาม

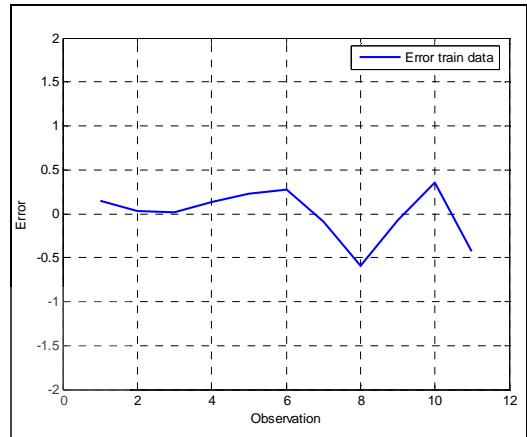
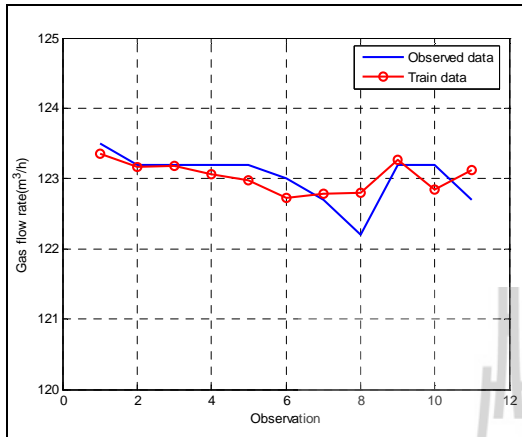
ตารางที่ ข.6 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take In) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามลำดับที่สาม

$$\begin{aligned}
 y = & -12640 + 38896x_1 - 1704.3x_2 + 36.414x_3 - 39396x_1x_2 + 37.301x_2x_3 - 0.22821x_1x_3 \\
 & - 546.38x_1^2 + 1.5732x_2^2 + 127.46x_3^2 - 0.79419x_1x_2x_3 + 227.59x_1x_1x_2 \\
 & + 10.727x_1x_1x_3 + 2.6475x_1x_2x_2 - 0.090698x_1x_3x_3 - 0.092823x_2x_2x_3 \\
 & + 0.0060842x_2x_3x_3 + 3956.5x_1^3 + 0.15243x_2^3 + 2.7635e-5x_3^3
 \end{aligned}
 \tag{ข.6}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.0289	0.0549	0.6695	0.5312	0.1701	0.2343

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณเชื้อเพลิง (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คือ อุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

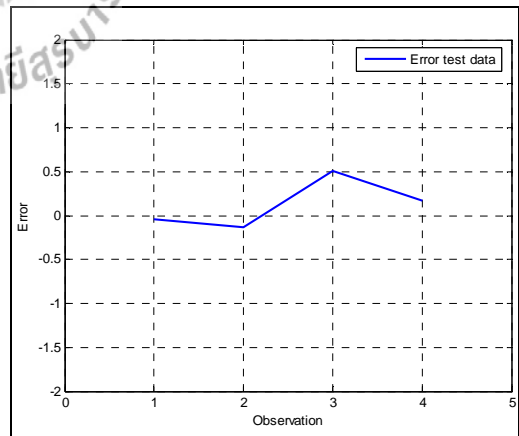
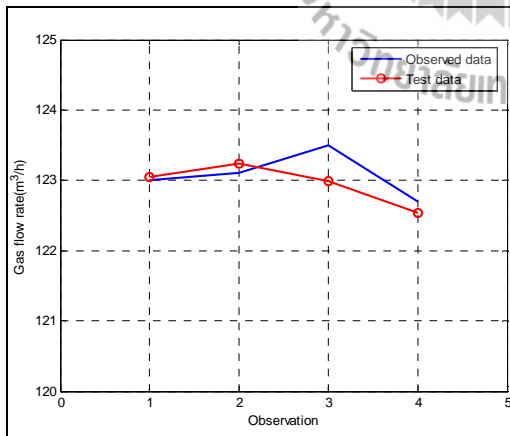


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.13 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.14 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

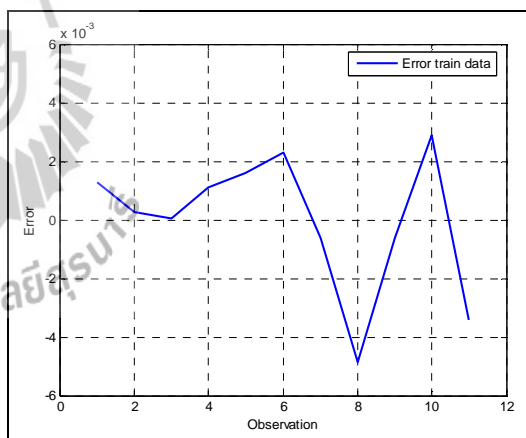
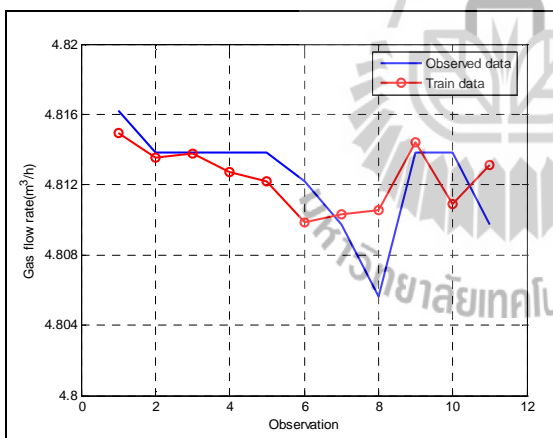
ตารางที่ ข.7 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น

$$y = 153.43 + 0.49704x_1 - 0.0093196x_2 - 0.044413x_3 \tag{ข.7}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.0767	0.0770	0.3517	0.3301	0.2769	0.2775

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

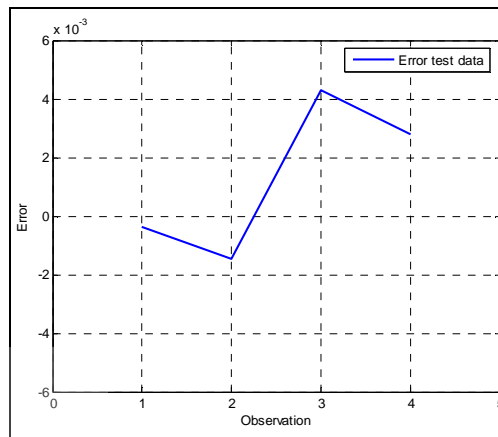
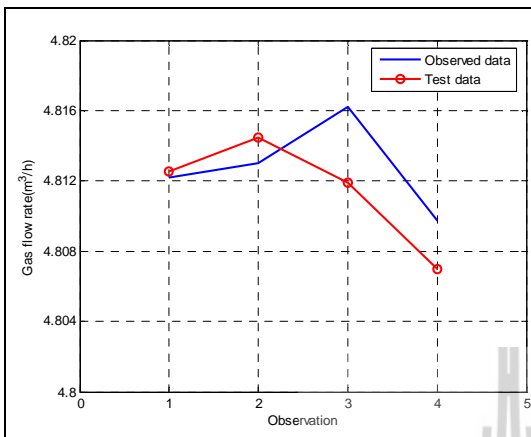


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.15 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

ชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.16 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

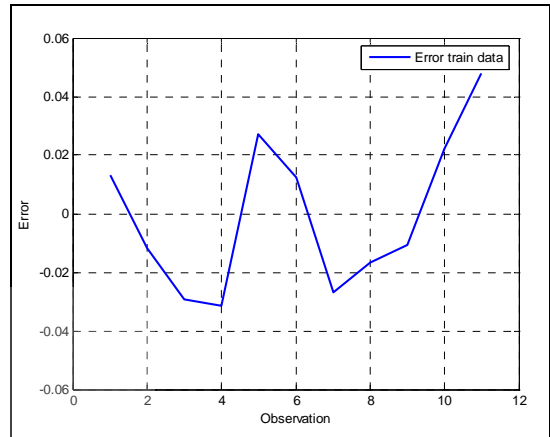
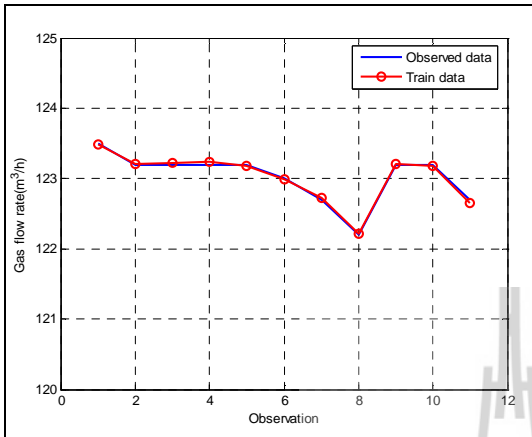
ตารางที่ ข.8 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take ln) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น

$$y = 6.5206 + 0.010102x_1 - 0.0050782x_2 - 0.25898x_3 \tag{ข.8}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
5.03x10 ⁻⁶	7.14x10 ⁻⁶	0.3581	0.3212	0.0022	0.0027

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณน้ำเก่า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

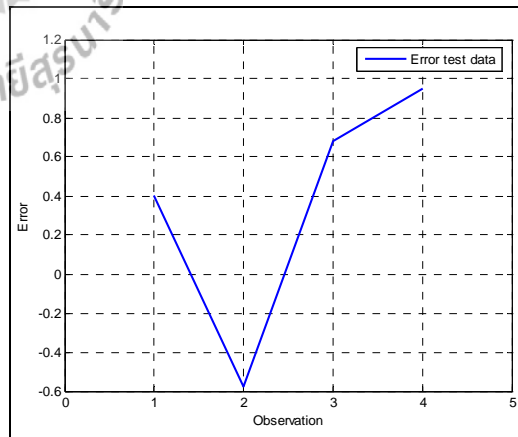
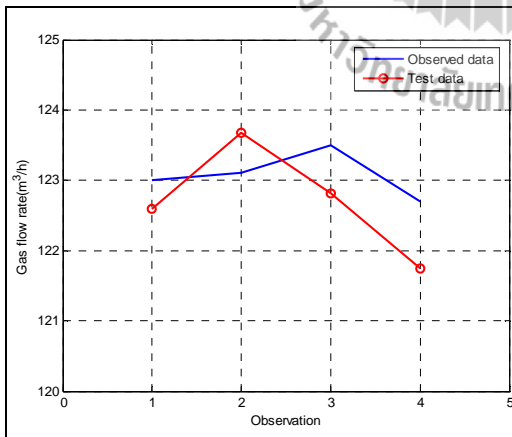


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.17 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.18 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

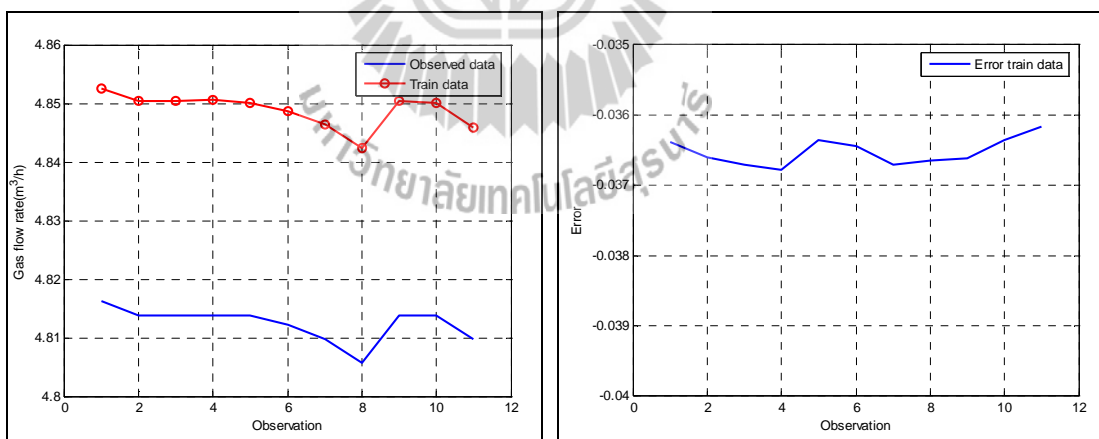
ตารางที่ ข.9 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

$$y = 4256.6 + 581.5x_1 - 1.1651x_2 - 13.511x_3 - 0.85461x_1^2 + 0.00082605x_2^2 + 0.01082x_3^2 - 0.18283x_1x_2 + 0.0020786x_2x_3 - 0.81131x_1x_3 \quad (ข.9)$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
6.34x10 ⁻⁴	0.4631	0.9946	0.2234	0.0252	0.6805

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เก่า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลิโนเมียลลำดับที่สอง

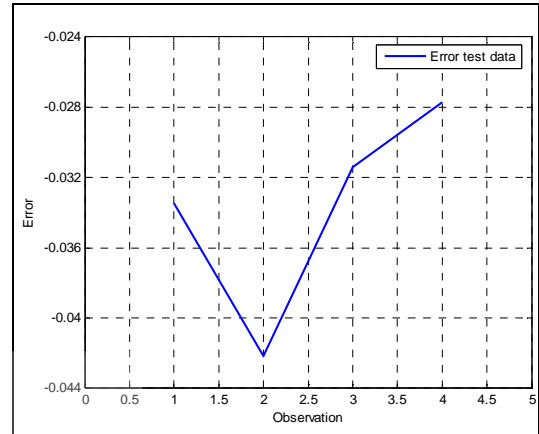
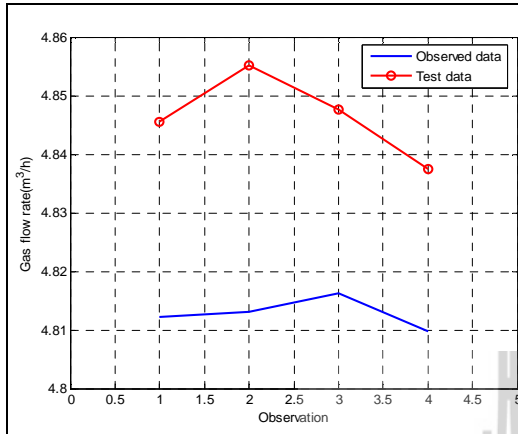


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.19 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

ชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.20 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

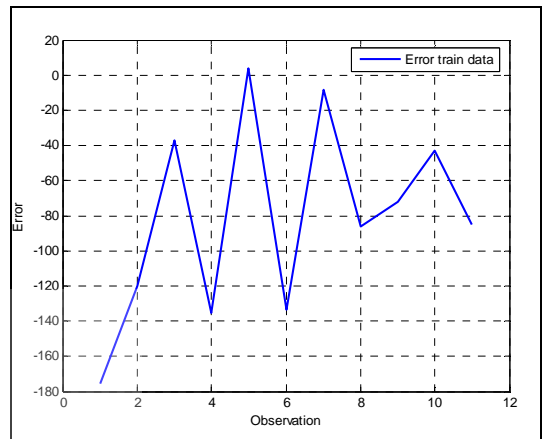
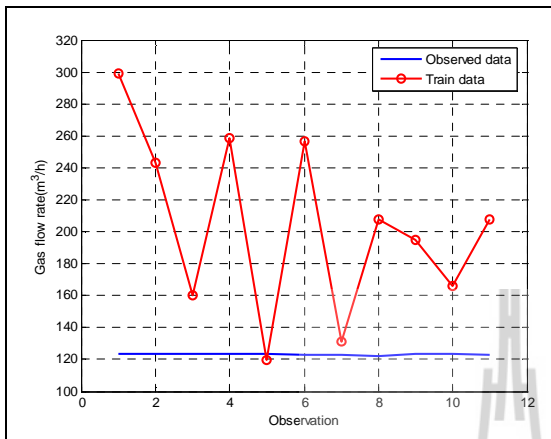
ตารางที่ ข.10 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take ln) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

$$y = 1664.2 + 65.681x_1 - 4.6119x_2 - 511.46x_3 - 0.016009x_1^2 + 0.021251x_2^2 + 39.404x_3^2 - 0.18679x_1x_2 + 0.69923x_2x_3 - 9.9092x_1x_3 \quad (\text{ข.10})$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.0013	0.0012	0.5509	0.5799	0.0365	0.0341

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $120 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

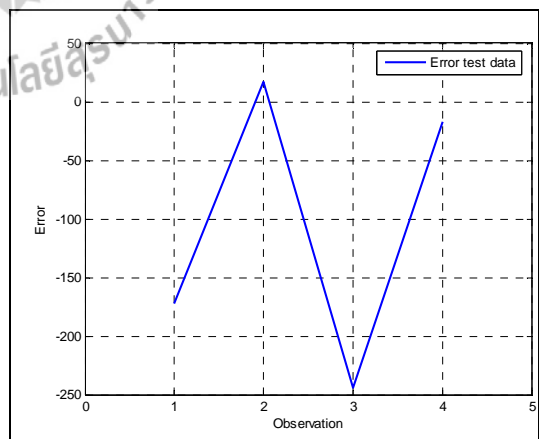
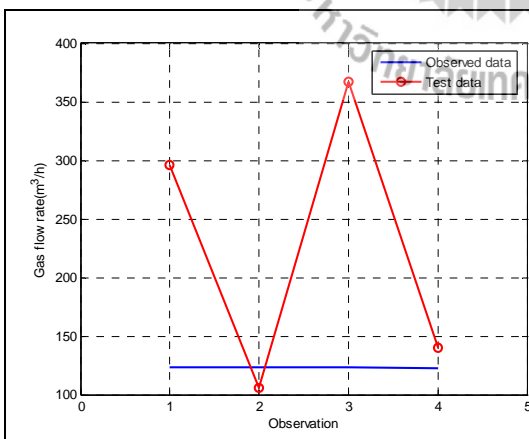


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.21 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบ โพลิ โนเมียลลำดับที่สาม

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบ โพลิ โนเมียลลำดับที่สาม



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.22 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบ โพลิ โนเมียลลำดับที่สาม

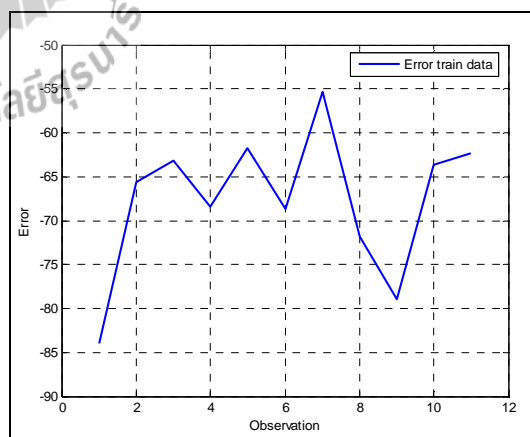
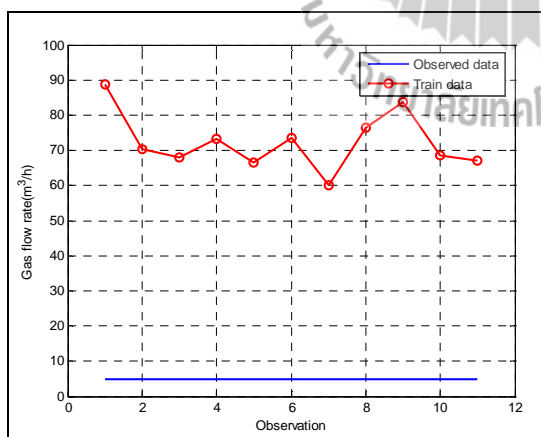
ตารางที่ ข.11 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

$$\begin{aligned}
 y = & 448 + 16x_1 - 2.625x_2 - 0.0625x_3 - 22x_1x_2 + 0.13672x_2x_3 - 0.00097656x_1x_3 \\
 & + 3.25x_1^2 - 0.010742x_2^2 - 0.046875x_3^2 + 0.0037842x_1x_2x_3 + 0.25x_1x_1x_2 \\
 & - 0.17969x_1x_1x_3 - 0.050781x_1x_2x_2 + 0.00020504x_1x_3x_3 - 0.00016403x_2x_2x_3 \\
 & + 1.0014e-5x_2x_3x_3 + 22.5x_1^3 + 0.0011597x_2^3 + 4.7684e-7x_3^3
 \end{aligned}
 \tag{ข.11}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
9.48x10 ³	2.25 x10 ⁴	0.0012	0.0001	97.39	149.96

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณจีเฝ้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 120 m³/h ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลิโนเมียลลำดับที่สาม

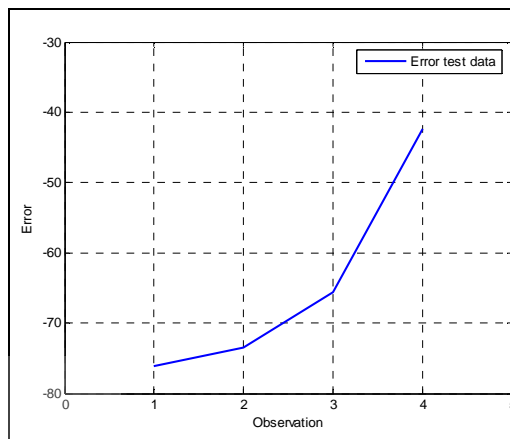
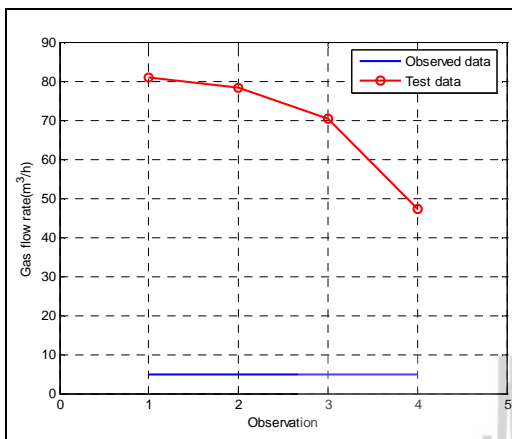


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.23 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลิโนเมียลลำดับที่สาม

ชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สาม



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.24 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สาม

ตารางที่ ข.12 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take ln) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สาม

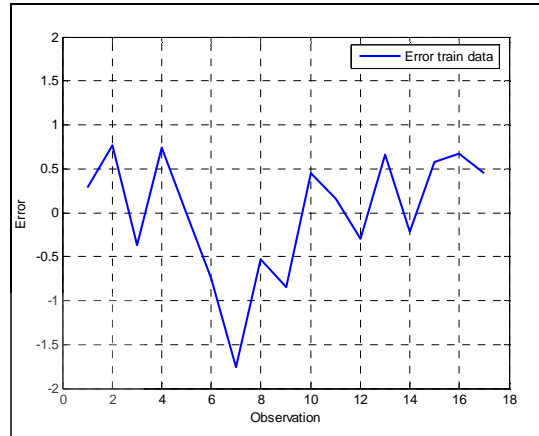
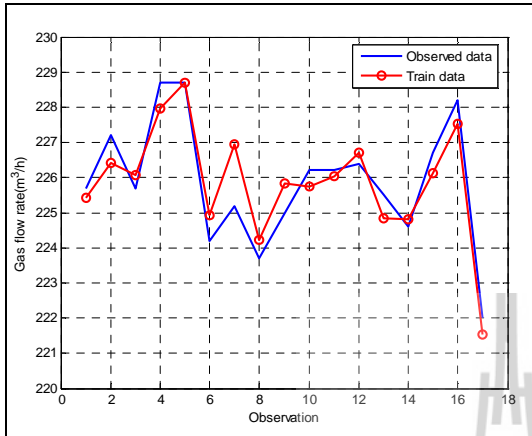
$$\begin{aligned}
 y = & 448 + 16x_1 - 2.625x_2 - 0.0625x_3 - 22x_1x_2 + 0.13672x_2x_3 - 0.00097656x_1x_3 \\
 & + 3.25x_1^2 - 0.010742x_2^2 - 0.046875x_3^2 + 0.0037842x_1x_2x_3 + 0.25x_1x_1x_2 \\
 & - 0.17969x_1x_1x_3 - 0.050781x_1x_2x_2 + 0.00020504x_1x_3x_3 - 0.00016403x_2x_2x_3 \\
 & + 1.0014e-5x_2x_3x_3 + 22.5x_1^3 + 0.0011597x_2^3 + 4.7684e-7x_3^3
 \end{aligned}
 \tag{ข.12}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
4.63x10 ³	4.33 x10 ³	0.0015	0.0009	68.04	65.78

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณน้ำเต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$

ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

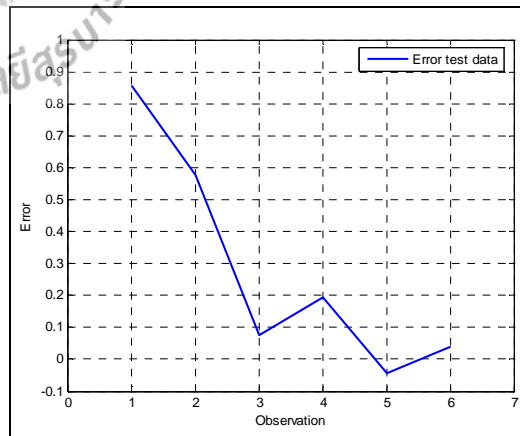
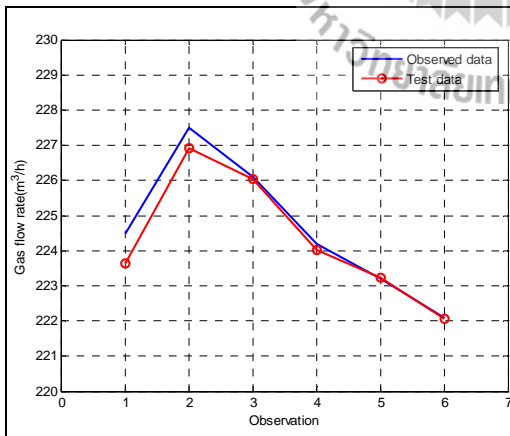


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.25 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.26 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

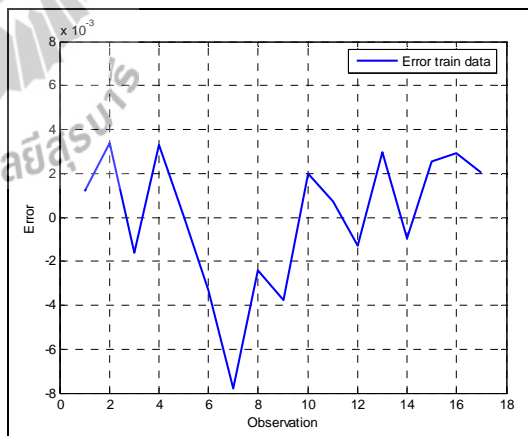
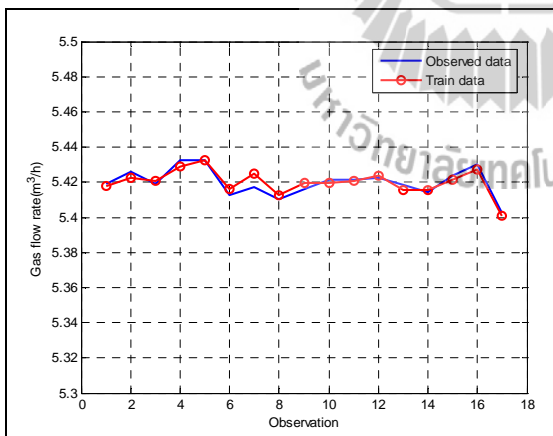
ตารางที่ ข.13 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น

$$y = 70.082 - 0.74504x_1 + 0.22215x_2 + 0.20475x_3 \tag{ข.13}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.4568	0.1852	0.8443	0.9416	0.6759	0.4304

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 200 m³/h ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

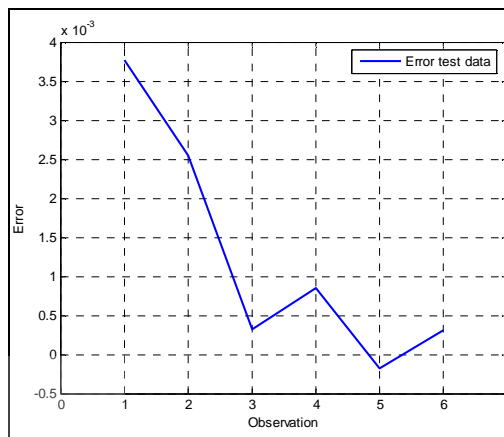
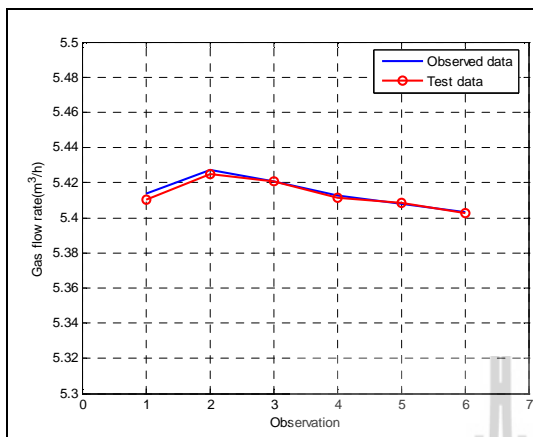


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.27 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

ชุดทดสอบ (take In) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น



ก. ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.28 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take In) ด้วยการถดถอยแบบเชิงเส้น

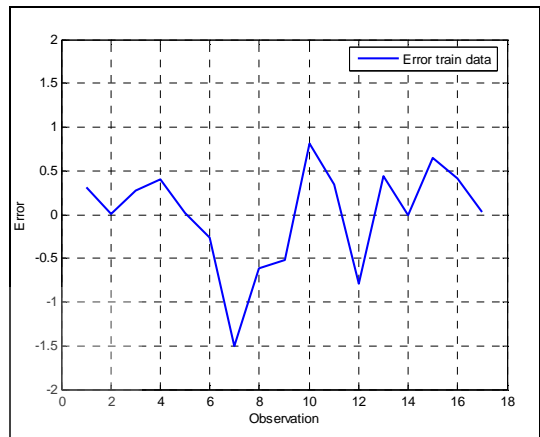
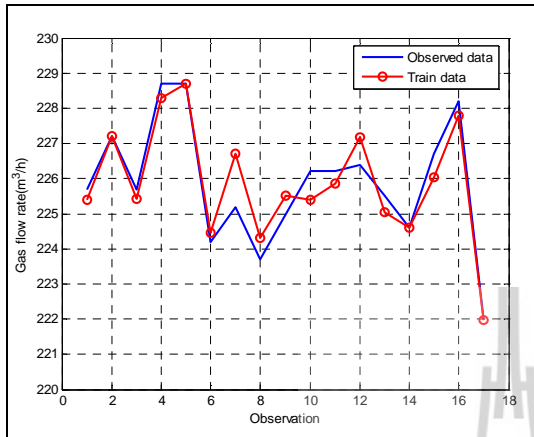
ตารางที่ ข.14 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take In) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น

$$y = 0.98213 - 0.049198x_1 + 0.13317x_2 + 0.60221x_3 \tag{ข.14}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
8.98x10 ⁻⁶	3.61x10 ⁻⁶	0.8441	0.9425	0.0030	0.0019

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

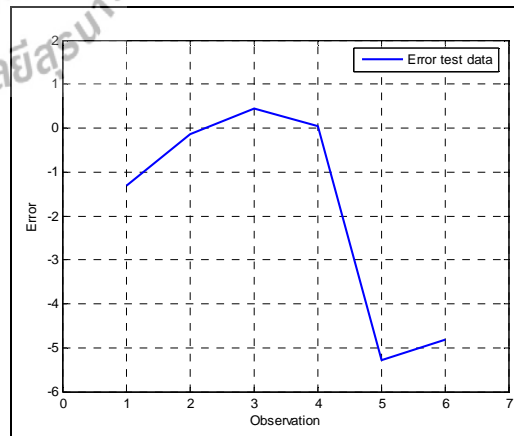
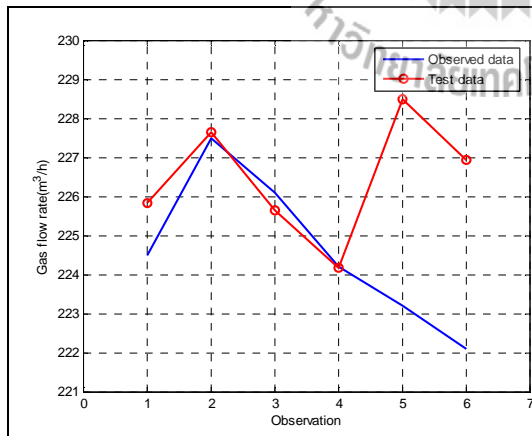


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.29 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง



ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.30 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลีโนเมียลลำดับที่สอง

ตารางที่ ข.15 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

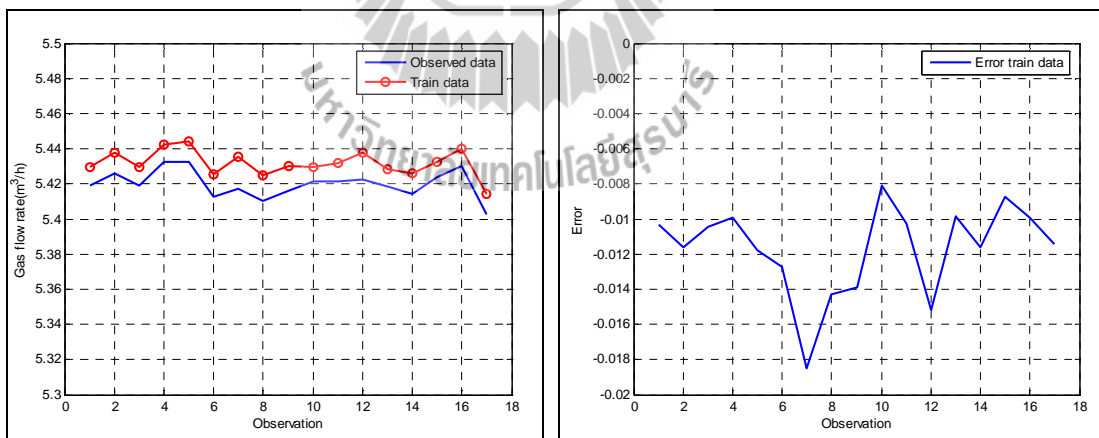
$$y = -940.28 + 313.04x_1 - 52.42x_2 + 6.8844x_3 + 7.73x_1^2 + 0.15264x_2^2 - 0.0066224x_3^2 - 1.9862x_1x_2 + 0.061333x_2x_3 - 0.41187x_1x_3 \quad (\text{ข.15})$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
0.3240	8.8673	0.8896	0.2307	0.5692	2.9778

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณจี๊ด้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 200 m³/h

ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลิโนเมียลลำดับที่สอง

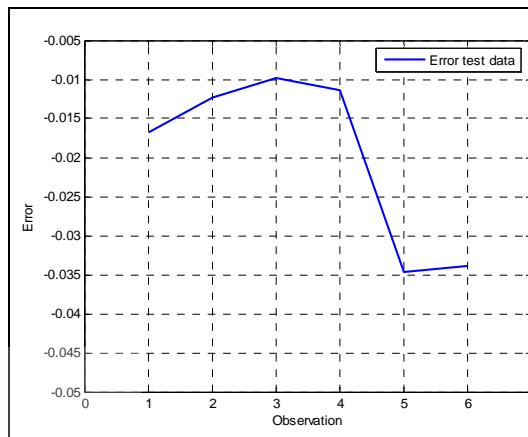
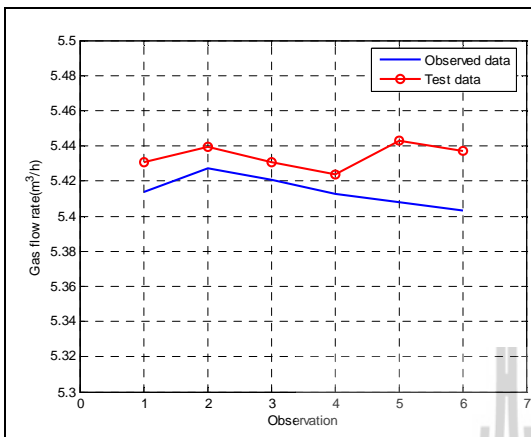


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.31 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สอง

ชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สอง



ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.32 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สอง

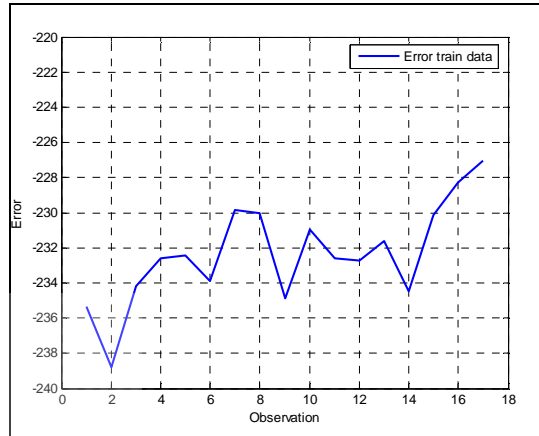
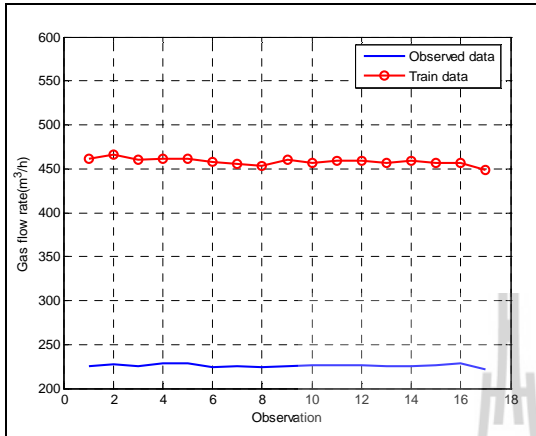
ตารางที่ ข.16 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take ln) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่สอง

$$y = 40.866 + 151.51x_1 - 214.58x_2 + 87.39x_3 + 7.1409x_1^2 + 12.17x_2^2 - 11.45x_3^2 - 16.978x_1x_2 + 21.701x_2x_3 - 16.419x_1x_3 \quad (\text{ข.16})$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
1.43 x10 ⁻⁴	5.02 x10 ⁻⁴	0.6684	0.6229	0.0119	0.0224

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณน้ำ (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$
 ชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

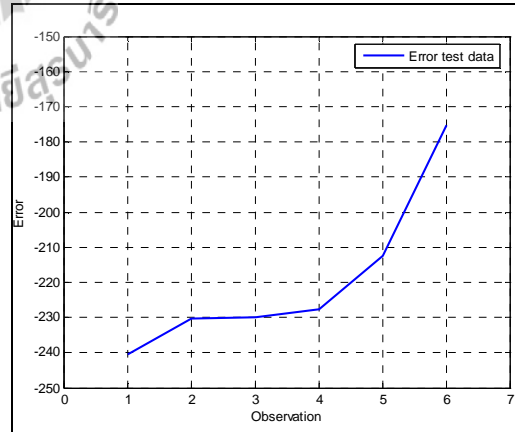
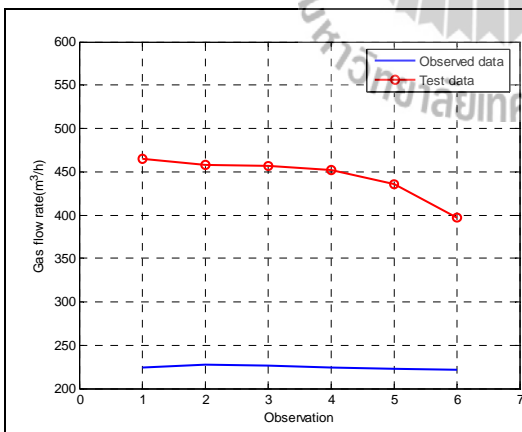


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.33 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอนด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

ชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม



ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.34 ผลการทดสอบของชุดทดสอบด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

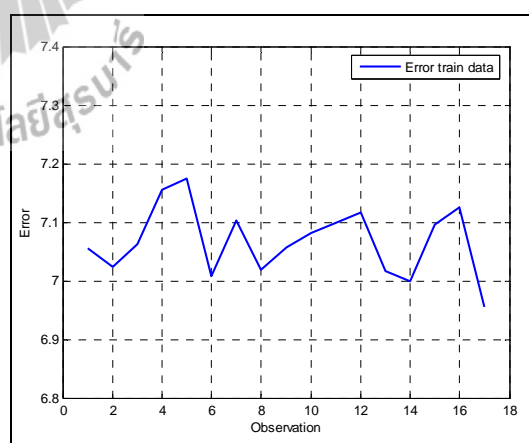
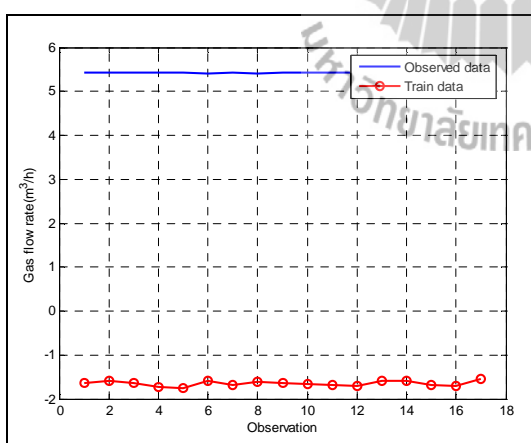
ตารางที่ ข.17 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม
โนเมียลลำดับที่สาม

$$\begin{aligned}
 y = & 94456 - 20229x_1 + 5184.1x_2 - 982.78x_3 + 1191.3x_1x_2 - 82.463x_2x_3 + 0.34467x_1x_3 \\
 & + 193.98x_1^2 + 13.667x_2^2 - 30.537x_3^2 + 0.04425x_1x_2x_3 - 1.8821x_1x_1x_2 \\
 & - 3.9224x_1x_1x_3 - 0.61792x_1x_2x_2 + 0.10447x_1x_3x_3 + 0.12644x_2x_2x_3 \\
 & - 0.036406x_2x_3x_3 + 37.895x_1^3 + 0.017677x_2^3 + 0.0015661x_3^3
 \end{aligned}
 \tag{ข.17}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
5.40x10 ⁴	4.86 x10 ⁴	0.0003	0.0001	232.36	220.45

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณชี้เก่า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C)
และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 200 m³/h
ชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบ พหุนามโนเมียลลำดับที่สาม

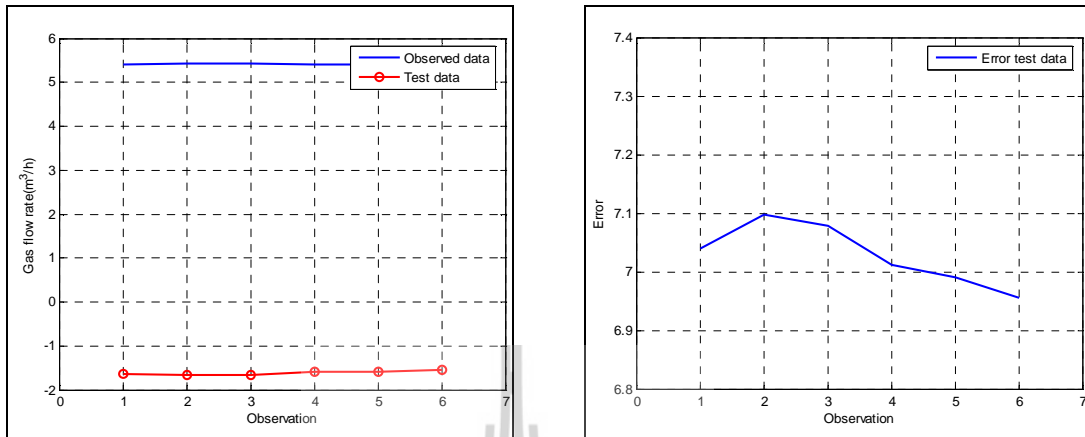


ก. ผลจากชุดฝึกสอนกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.35 ผลการทดสอบของชุดฝึกสอน (take ln) ด้วยการถดถอยแบบพหุนามโนเมียลลำดับที่สาม

ชุดทดสอบ (take In) ด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม



ผลจากชุดทดสอบกับข้อมูลจริง

ข. ค่าความคลาดเคลื่อน

รูปที่ ข.36 ผลการทดสอบของชุดทดสอบ (take In) ด้วยการถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

ตารางที่ ข.18 สรุปผลชุดข้อมูลฝึกสอนกับชุดข้อมูลทดสอบ (take In) จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียลลำดับที่สาม

$$\begin{aligned}
 y = & 94456 - 20229x_1 + 5184.1x_2 - 982.78x_3 + 1191.3x_1x_2 - 82.463x_2x_3 + 0.34467x_1x_3 \\
 & + 193.98x_1^2 + 13.667x_2^2 - 30.537x_3^2 + 0.04425x_1x_2x_3 - 1.8821x_1x_1x_2 \\
 & - 3.9224x_1x_1x_3 - 0.61792x_1x_2x_2 + 0.10447x_1x_3x_3 + 0.12644x_2x_2x_3 \\
 & - 0.036406x_2x_3x_3 + 37.895x_1^3 + 0.017677x_2^3 + 0.0015661x_3^3
 \end{aligned}
 \tag{ข.18}$$

MSE		R ²		S _{y/x}	
train	test	train	test	train	test
49.98	49.43	0.0123	0.0154	7.07	7.03

โดยที่ x_1 คือ ปริมาณน้ำเต้า (kg/h), x_2 คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h), และ x_3 คืออุณหภูมิ (°C) และตัวแปรตาม y คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m³/h)

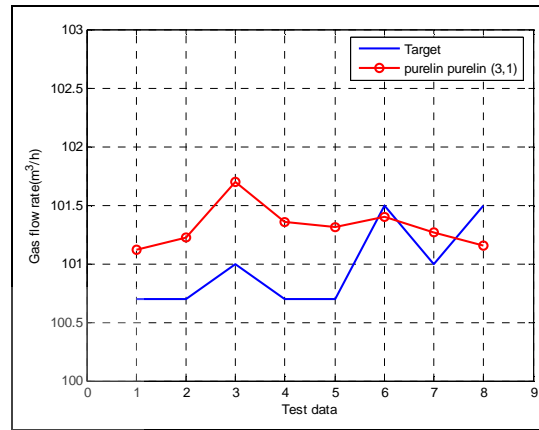
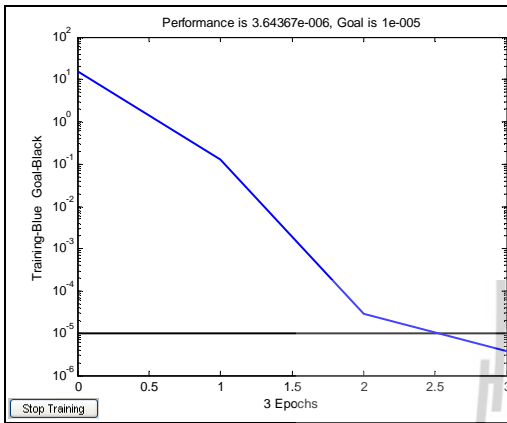


ภาคผนวก ค

ผลการรันโปรแกรมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$

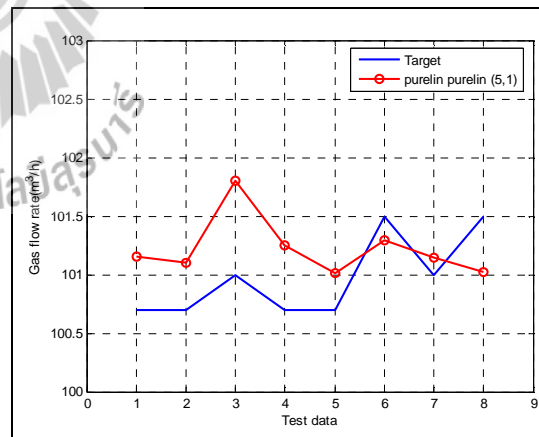
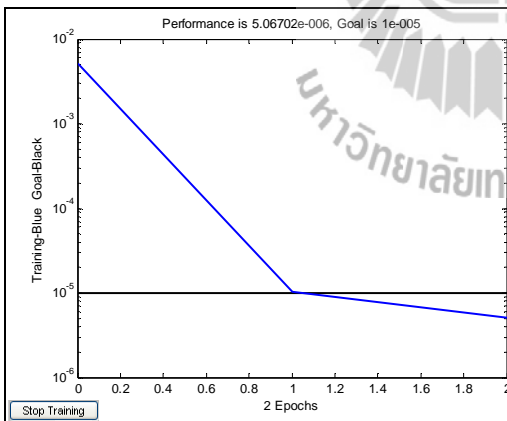
ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

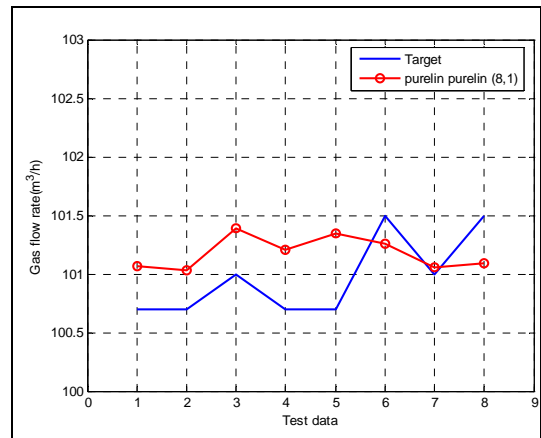
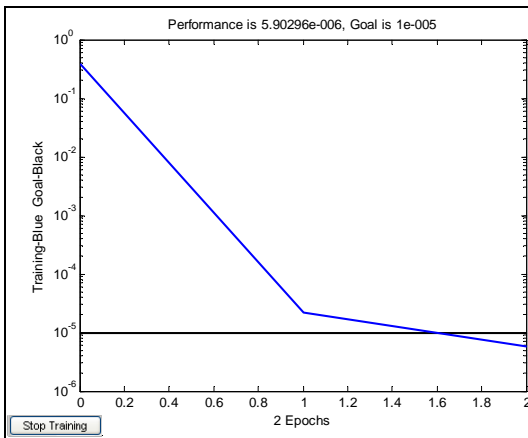
รูปที่ ค.1 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

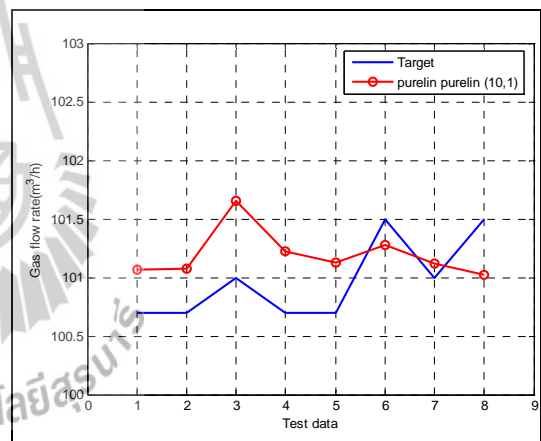
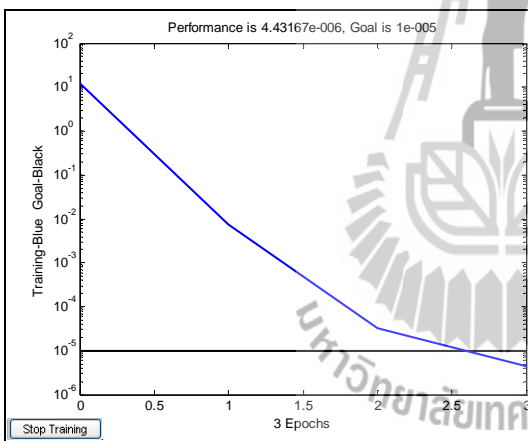
รูปที่ ค.2 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอادتัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 8-1



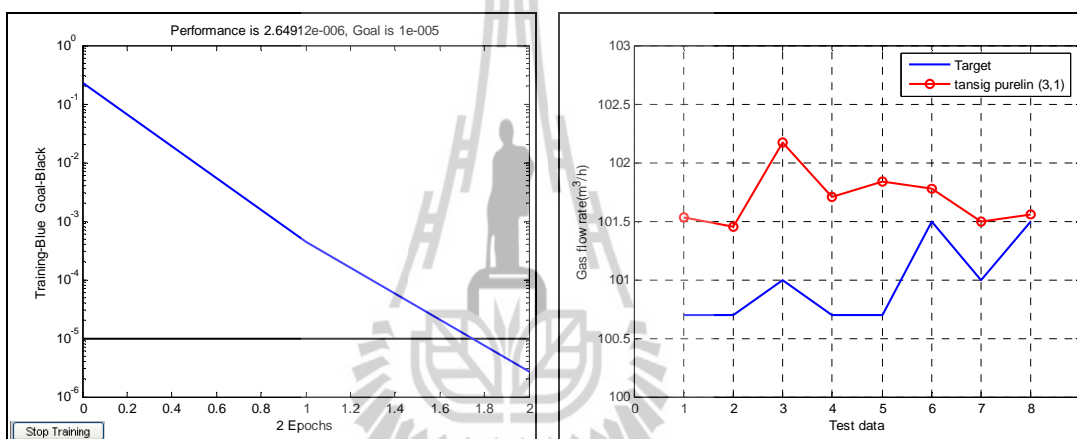
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอادتัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.4 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	purelin, purelin	3-1	3.64×10^{-6}	0.2428
2	purelin, purelin	5-1	5.07×10^{-6}	0.2128
3	purelin, purelin	8-1	5.90×10^{-6}	0.1629
4	purelin, purelin	10-1	4.43×10^{-6}	0.1819

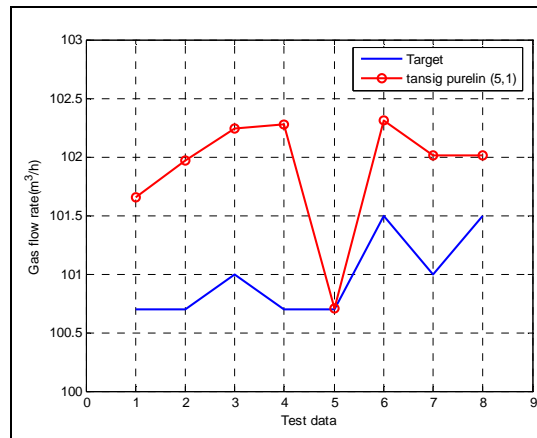
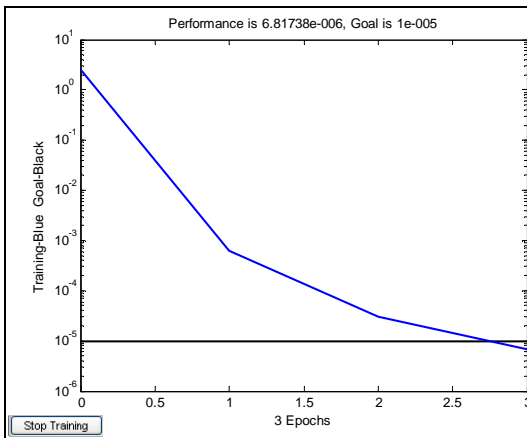
ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

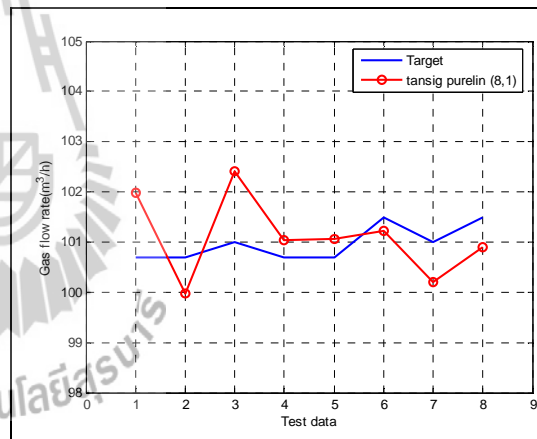
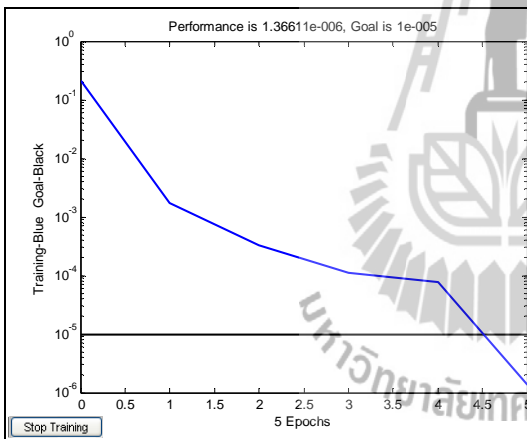
รูปที่ ค.5 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พูดและเป้าหมาย

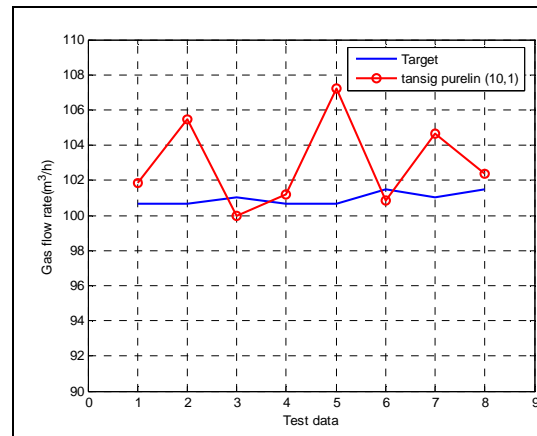
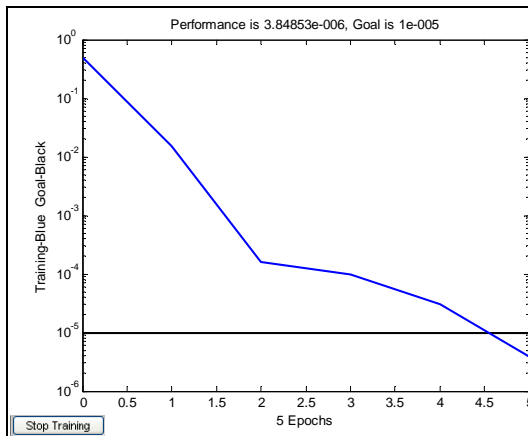
รูปที่ ค.6 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelinเครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พูดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.7 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelinเครือข่าย 8-1



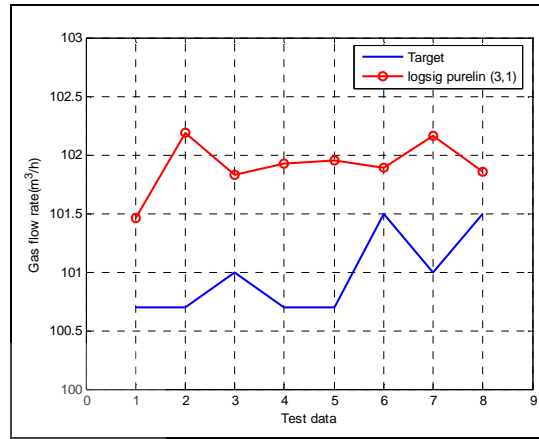
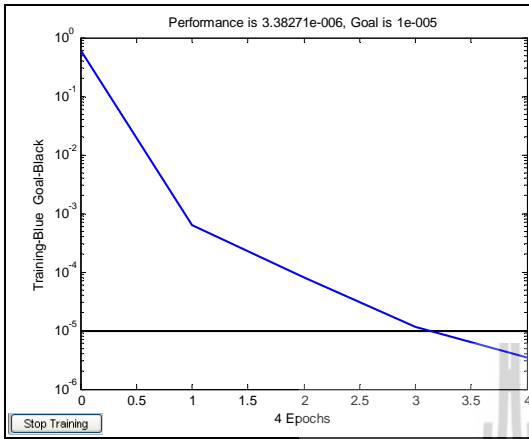
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เออร์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.8 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelinเครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	tansig, purelin	3-1	2.65×10^{-6}	0.6576
2	tansig, purelin	5-1	6.82×10^{-6}	1.0634
3	tansig, purelin	8-1	1.37×10^{-6}	0.6817
4	tansig, purelin	10-1	3.85×10^{-6}	10.3057

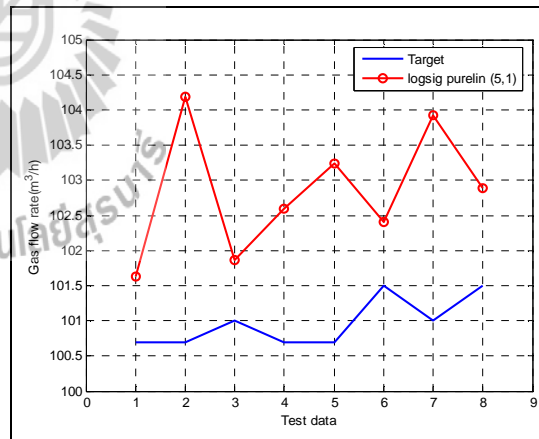
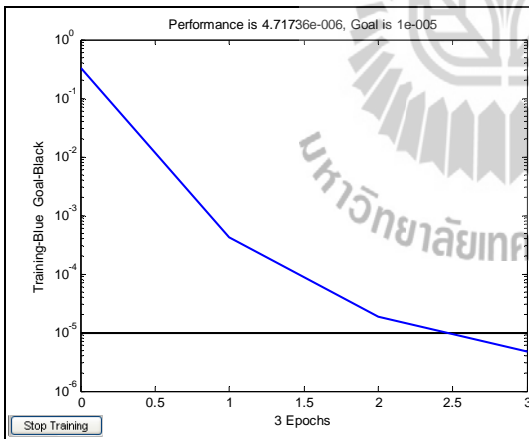
ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอนlogsig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

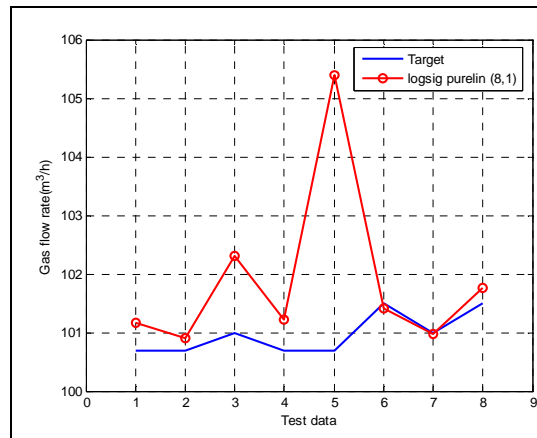
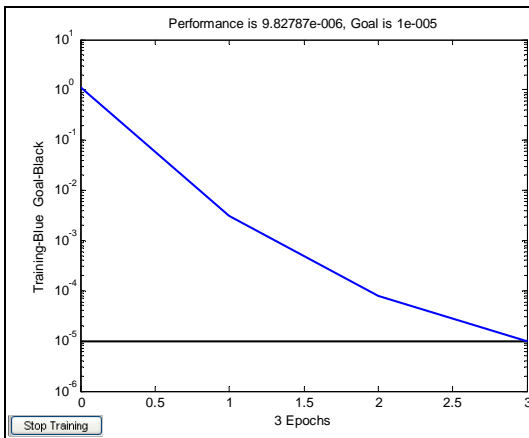
รูปที่ ค.9 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelinเครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

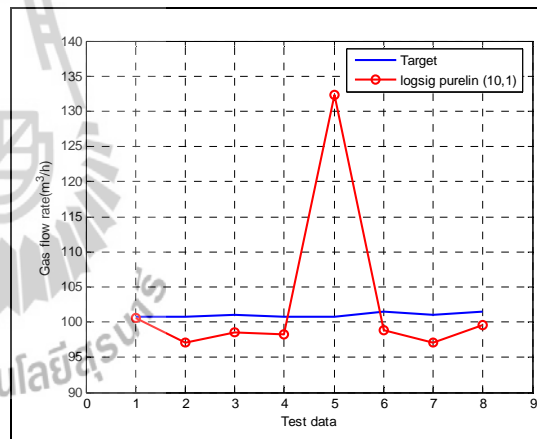
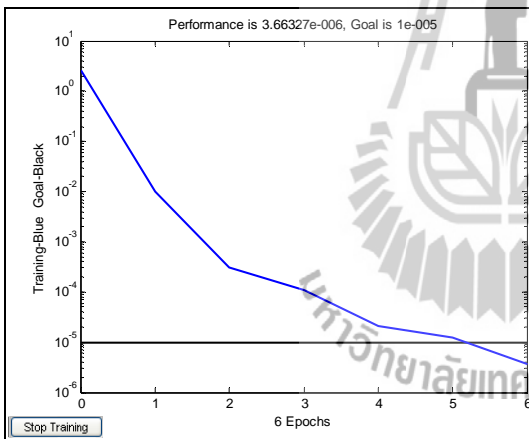
รูปที่ ค.10 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelinเครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.11 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelinเครือข่าย 8-1



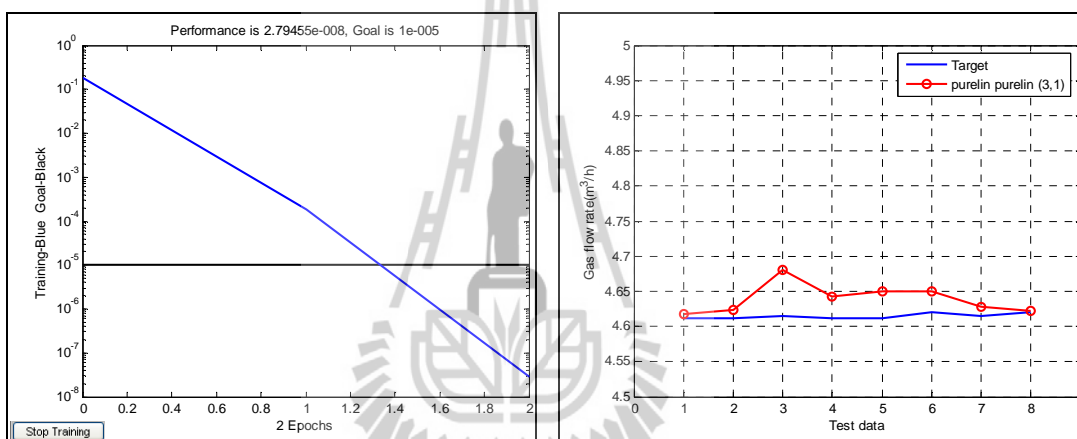
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.12 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelinเครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	logsig, purelin	3-1	3.38×10^{-6}	1.0218
2	logsig, purelin	5-1	4.72×10^{-6}	4.3923
3	logsig, purelin	8-1	9.83×10^{-6}	3.0508
4	logsig, purelin	10-1	3.66×10^{-6}	131.6940

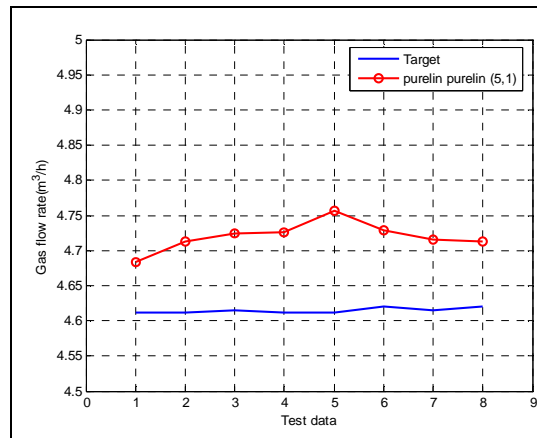
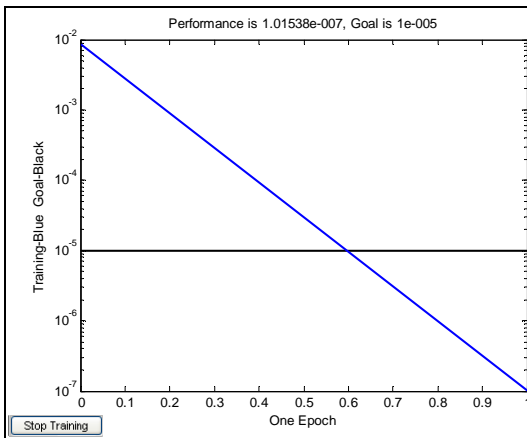
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

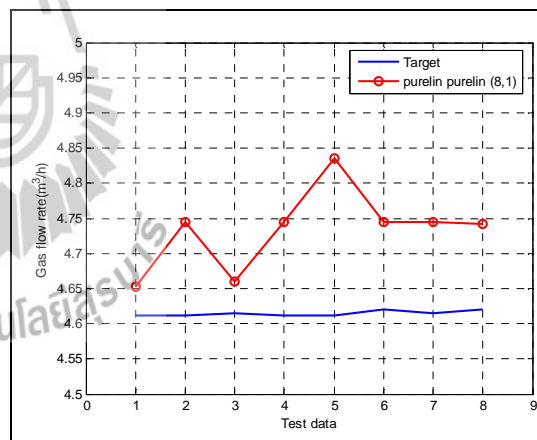
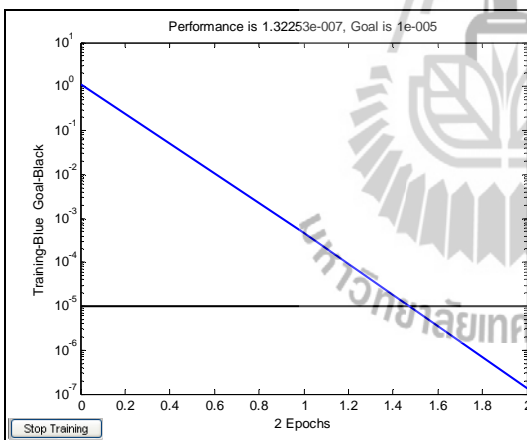
รูปที่ ค.13 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

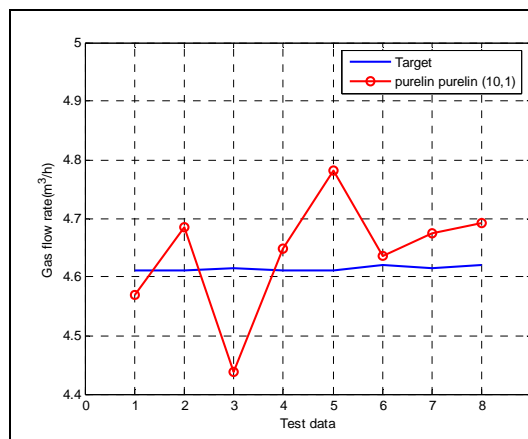
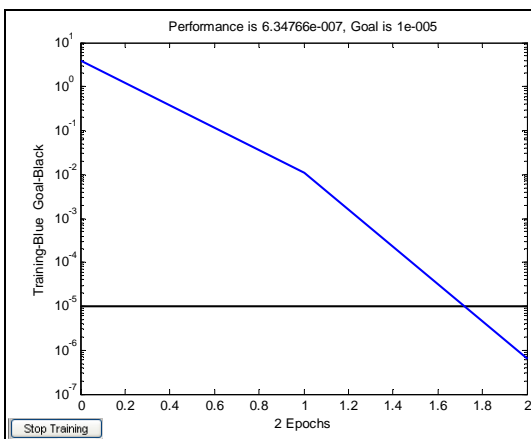
รูปที่ ค.14 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.15 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



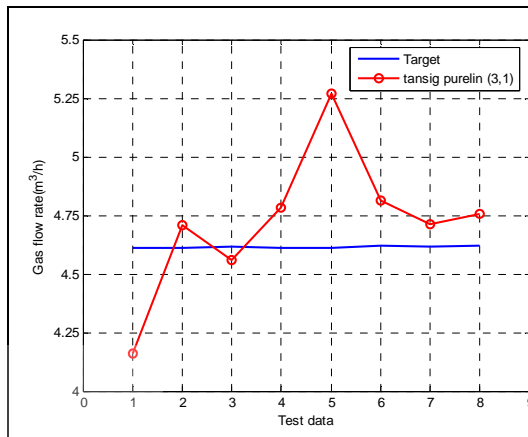
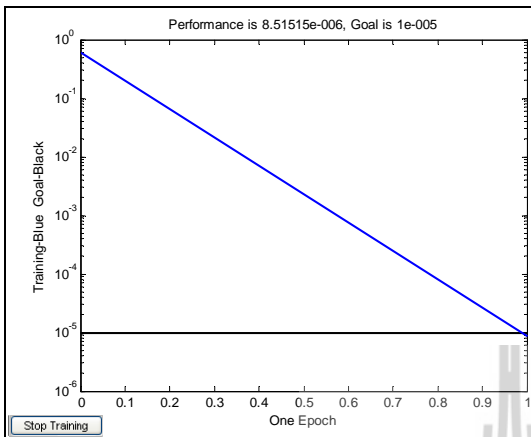
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอادتัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.16 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	purelin, purelin	3-1	2.79x10 ⁻⁸	9.88 x10 ⁻⁴
2	purelin, purelin	5-1	1.02x10 ⁻⁷	0.0114
3	purelin, purelin	8-1	1.32x10 ⁻⁷	0.0171
4	purelin, purelin	10-1	6.35x10 ⁻⁷	0.0097

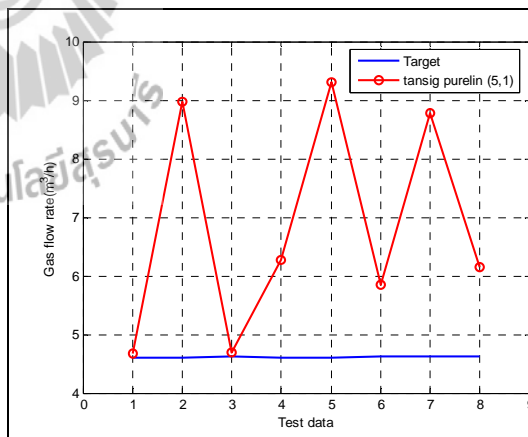
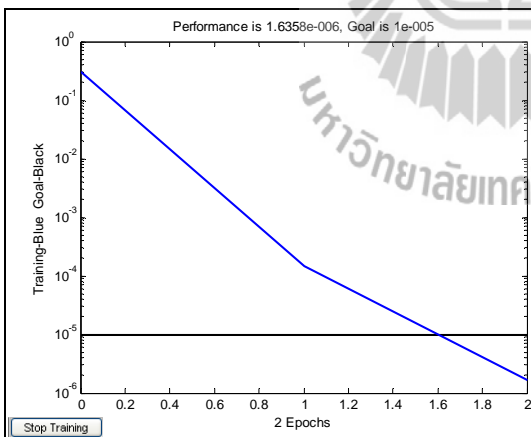
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

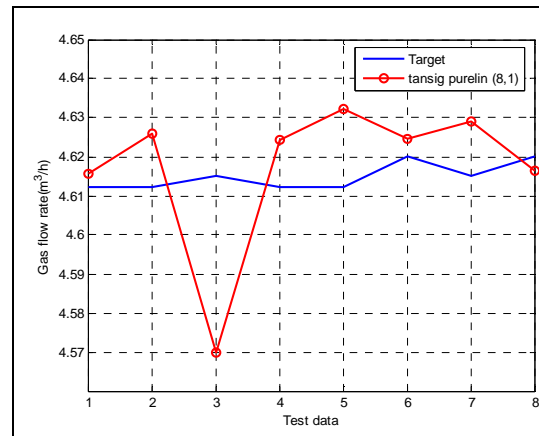
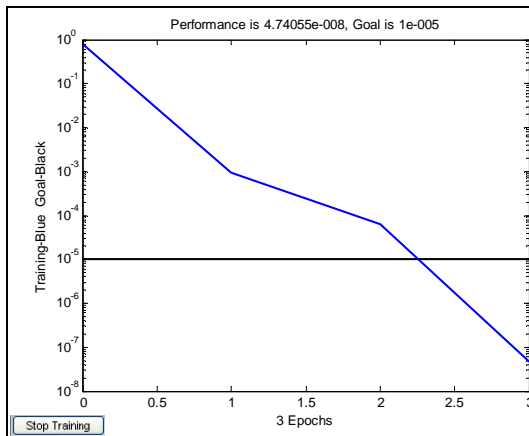
รูปที่ ค.17 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

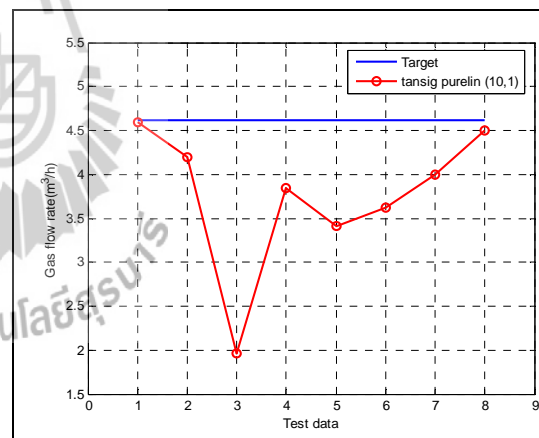
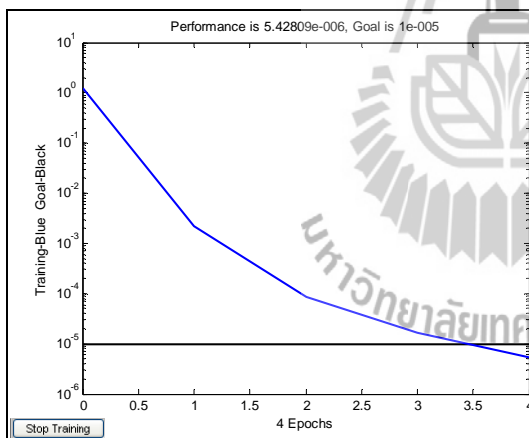
รูปที่ ค.18 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.19 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



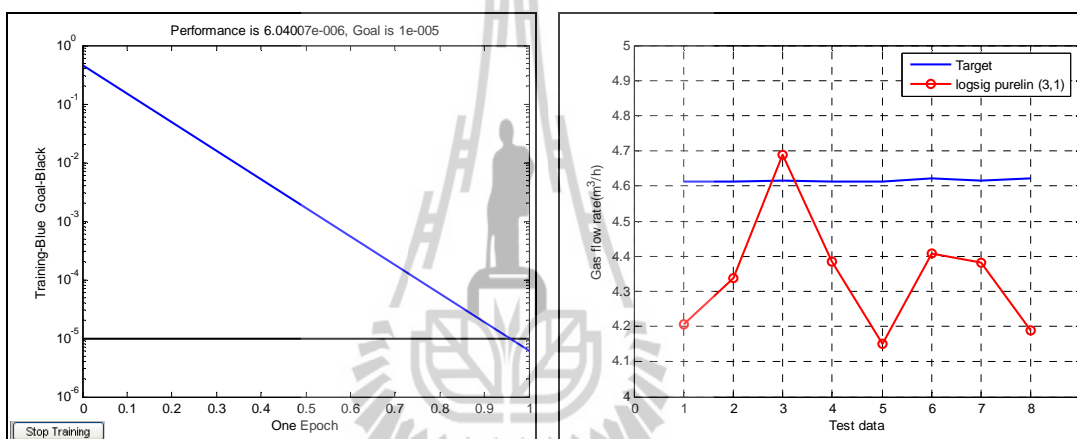
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.20 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	tansig, purelin	3-1	8.52×10^{-6}	0.0933
2	tansig, purelin	5-1	1.64×10^{-6}	8.1421
3	tansig, purelin	8-1	4.74×10^{-8}	3.79×10^{-4}
4	tansig, purelin	10-1	5.43×10^{-6}	1.3252

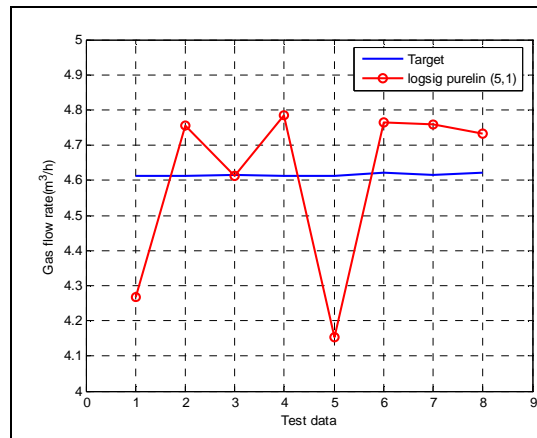
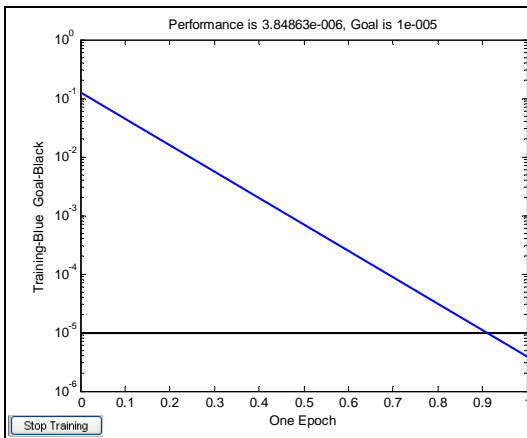
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอนlogsig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

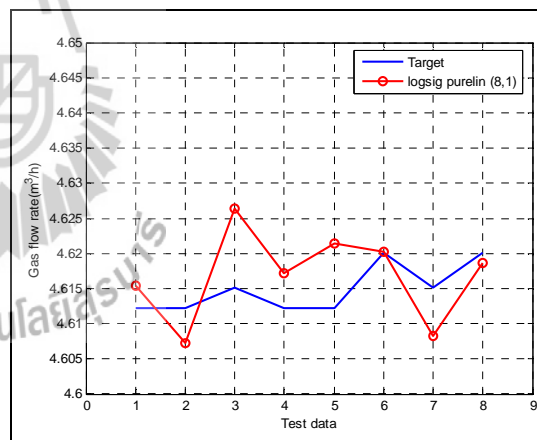
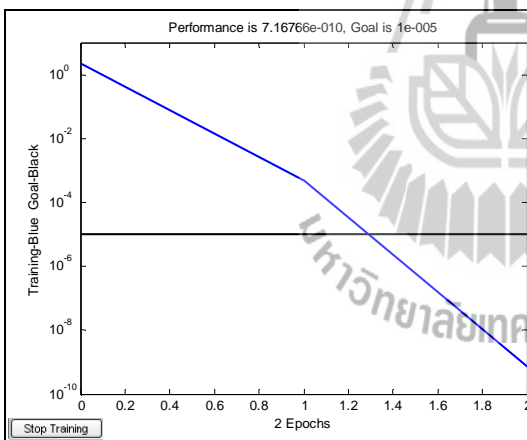
รูปที่ ค.21 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

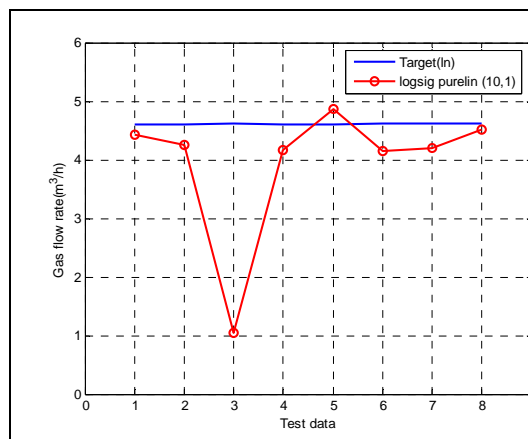
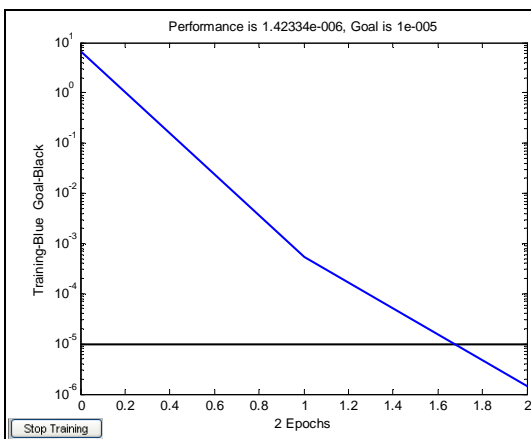
รูปที่ ค.22 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.23 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

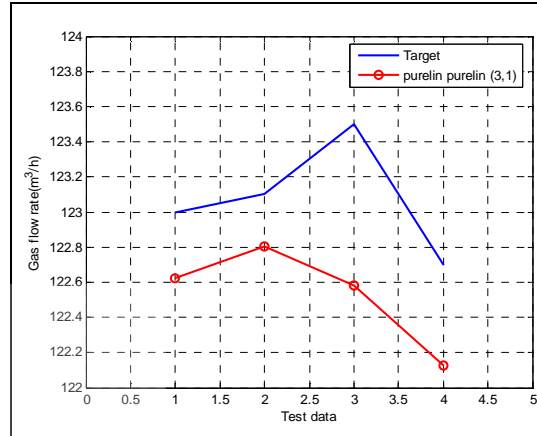
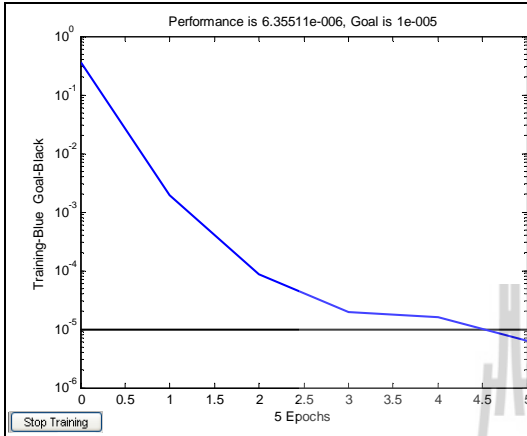
ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.24 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	logsig, purelin	3-1	6.04x10 ⁻⁶	0.0996
2	logsig, purelin	5-1	3.85x10 ⁻⁶	0.0541
3	logsig,purelin	8-1	7.17x10 ⁻¹⁰	3.99 x10 ⁻⁵
4	logsig, purelin	10-1	1.42x10 ⁻⁶	1.7001

อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 120 m³/h

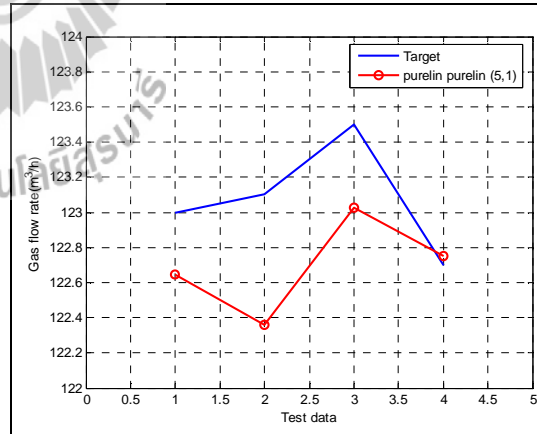
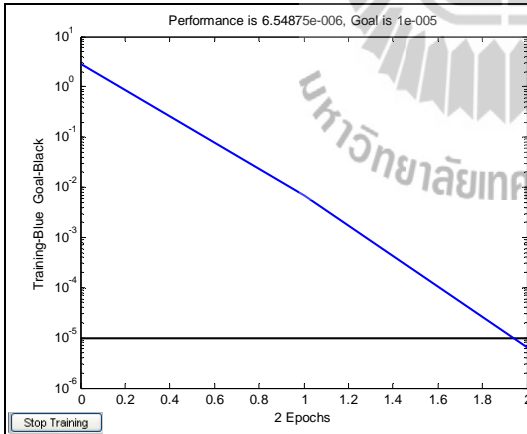
ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

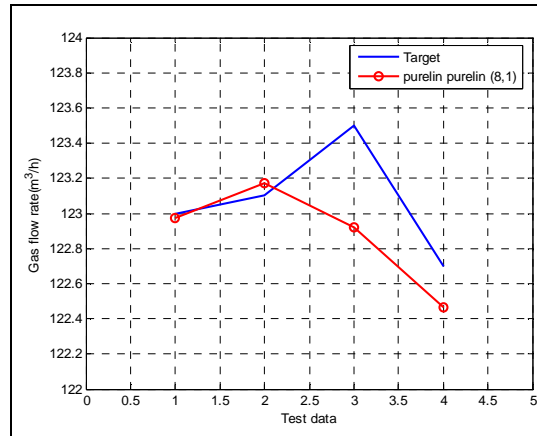
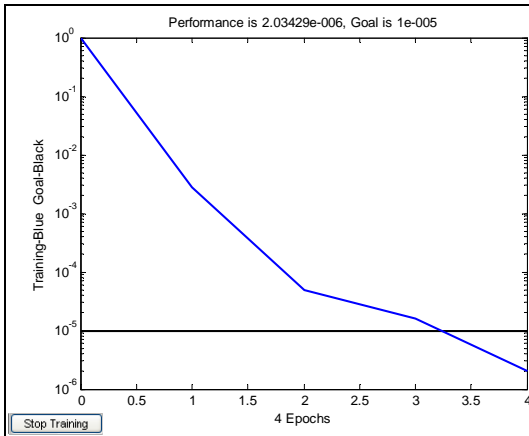
รูปที่ ค.25 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

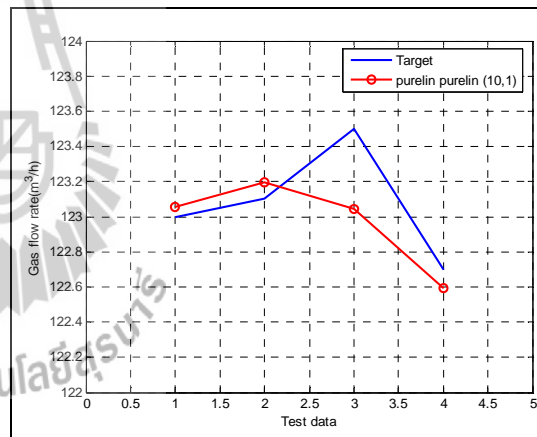
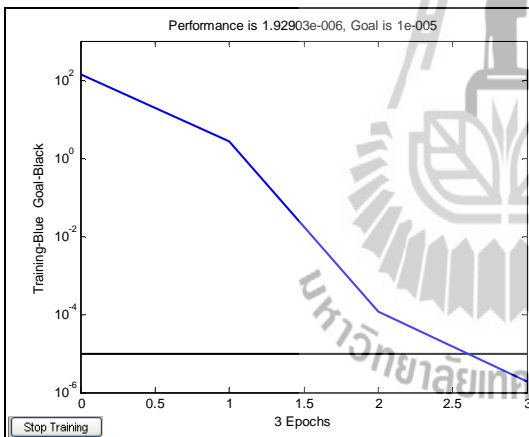
รูปที่ ค.26 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.27 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 8-1



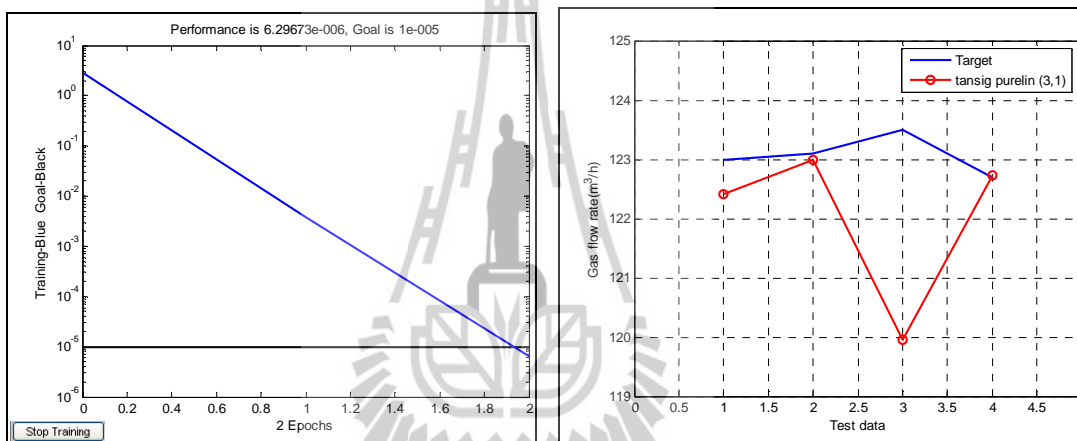
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.28 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	purelin, purelin	3-1	6.36×10^{-6}	0.3493
2	purelin, purelin	5-1	6.55×10^{-6}	0.2242
3	purelin, purelin	8-1	2.03×10^{-6}	0.0984
4	purelin, purelin	10-1	1.93×10^{-6}	0.0578

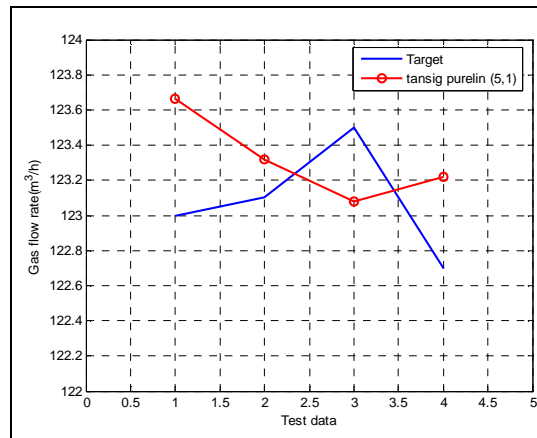
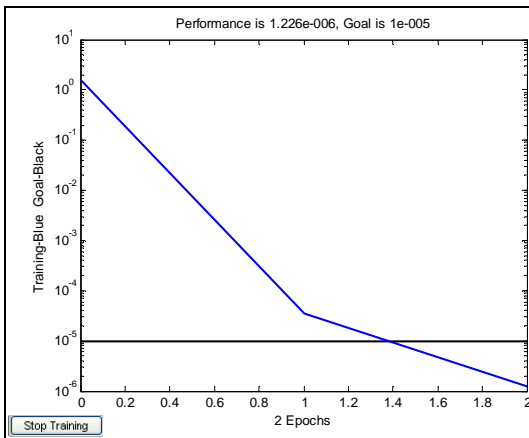
ทดสอบชุดข้อมูลฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

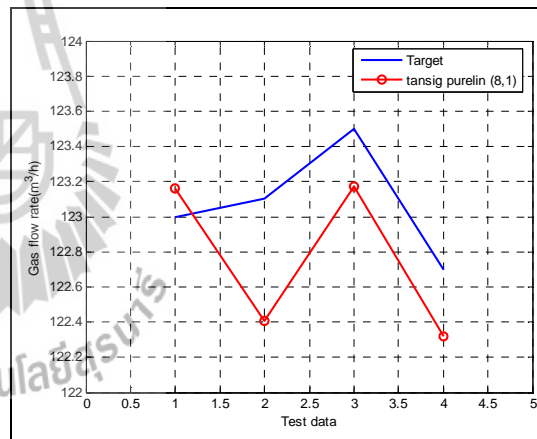
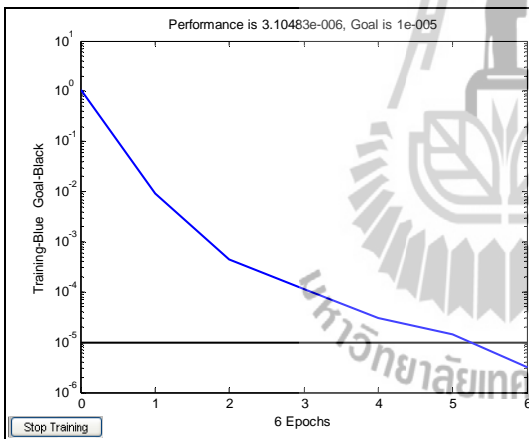
รูปที่ ค.29 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

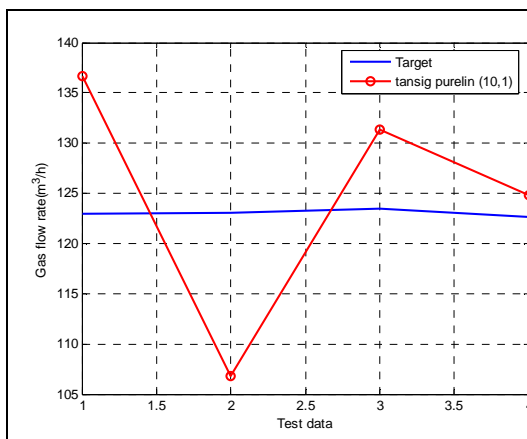
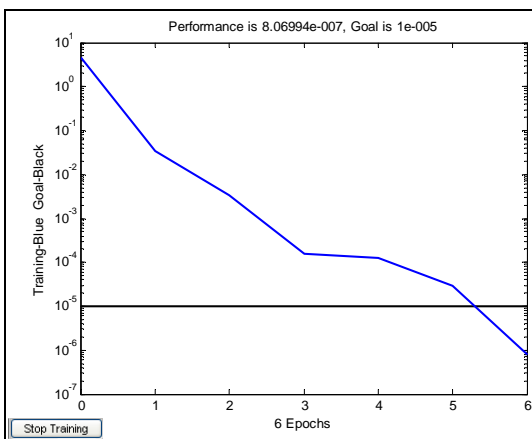
รูปที่ ค.30 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.31 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 8-1



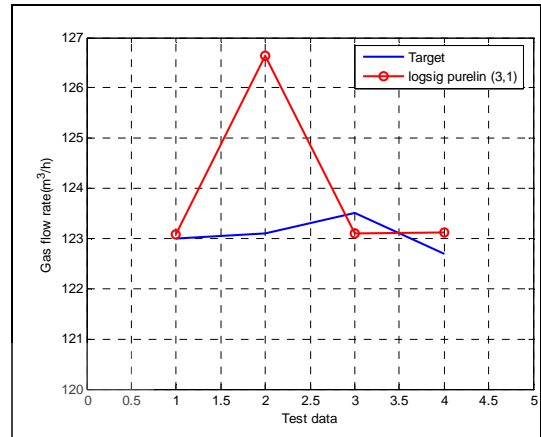
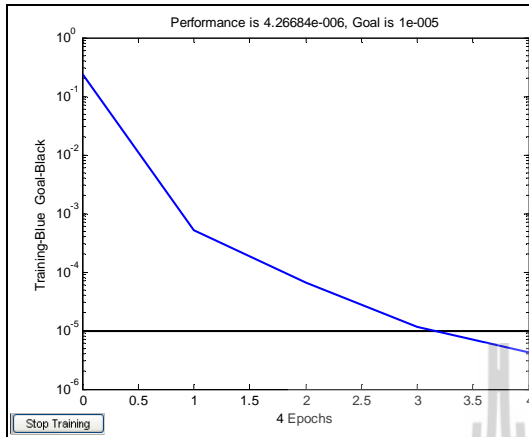
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอادتัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.32 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	tansig, purelin	3-1	6.3x10 ⁻⁵	3.2184
2	tansig, purelin	5-1	1.23 x10 ⁻⁶	0.2340
3	tansig, purelin	8-1	3.10x10 ⁻⁶	0.1900
4	tansig, purelin	10-1	8.07x10 ⁻⁷	130.5370

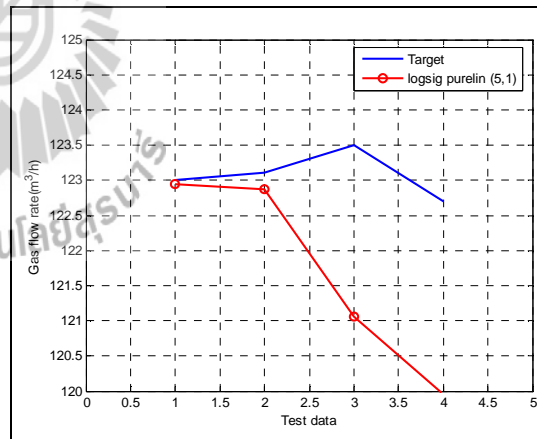
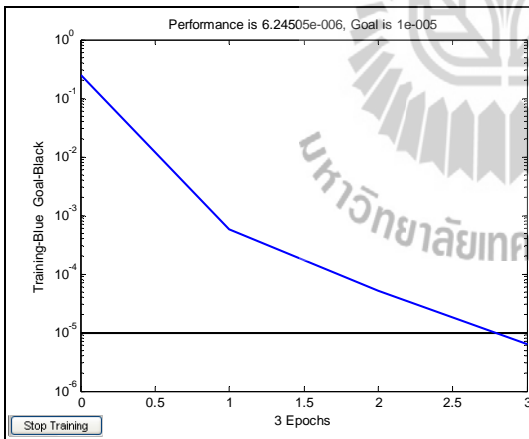
ทดสอบชุดข้อมูลฟังก์ชันถ่ายโอนlogsig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

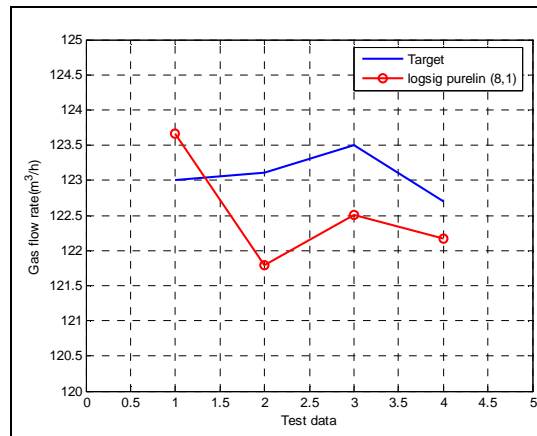
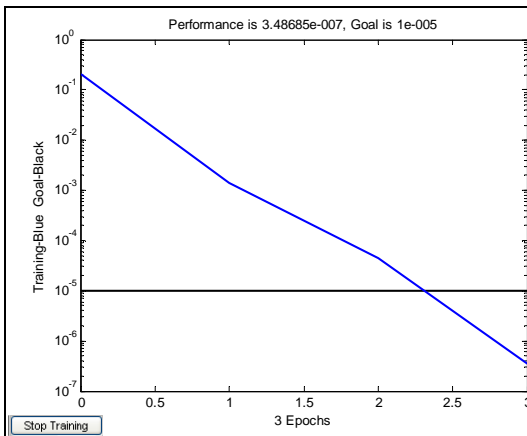
รูปที่ ค.33 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

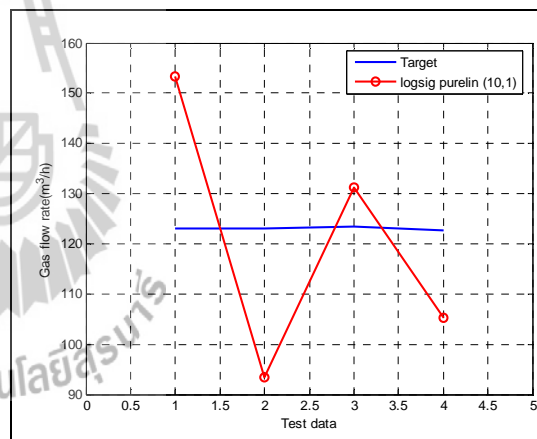
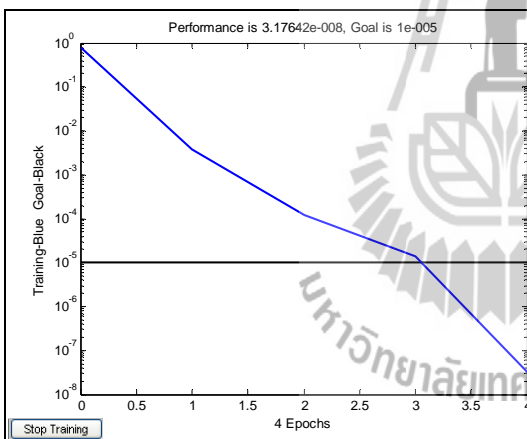
รูปที่ ค.34 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.35 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 8-1



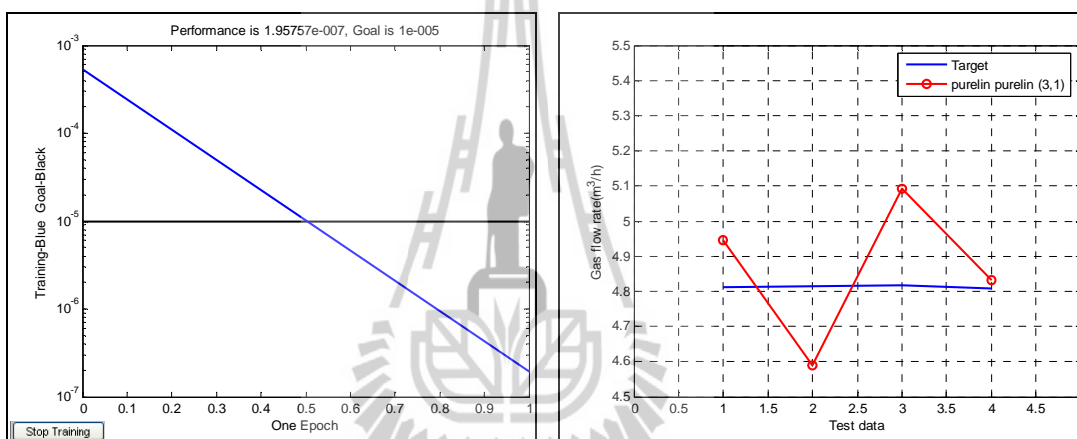
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.36 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	logsig, purelin	3-1	4.27×10^{-5}	3.2256
2	logsig, purelin	5-1	6.25×10^{-6}	3.3779
3	logsig, purelin	8-1	3.49×10^{-7}	0.8551
4	logsig, purelin	10-1	3.18×10^{-8}	541.4202

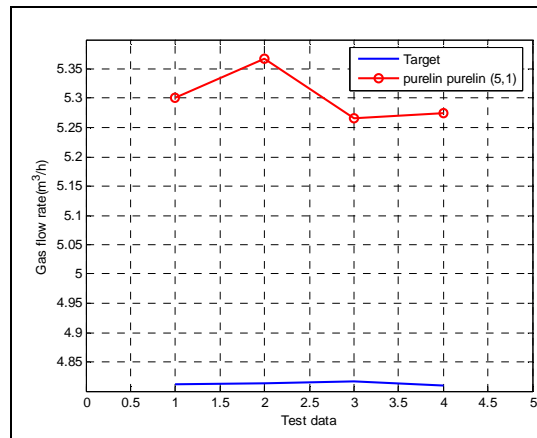
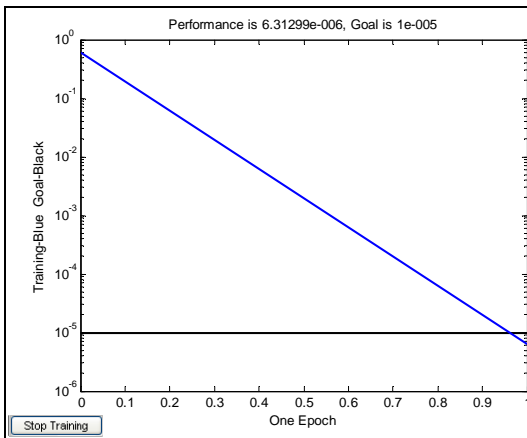
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

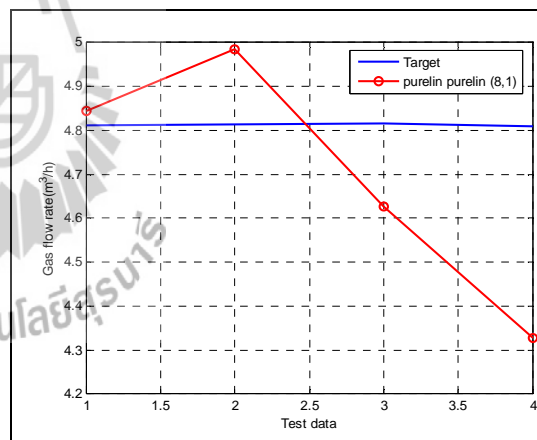
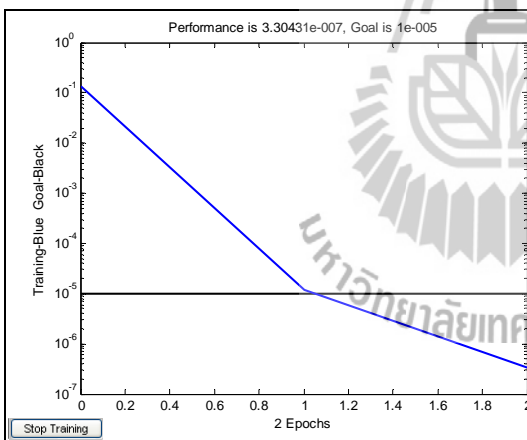
รูปที่ ค.37 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin ,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

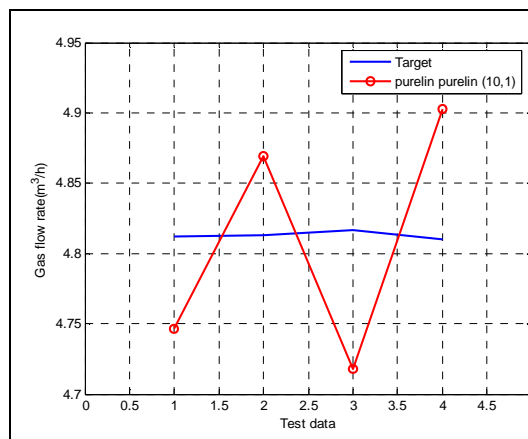
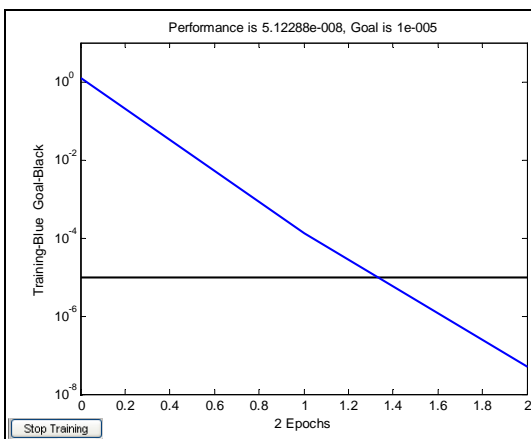
รูปที่ ค.38 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin ,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.39 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin ,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



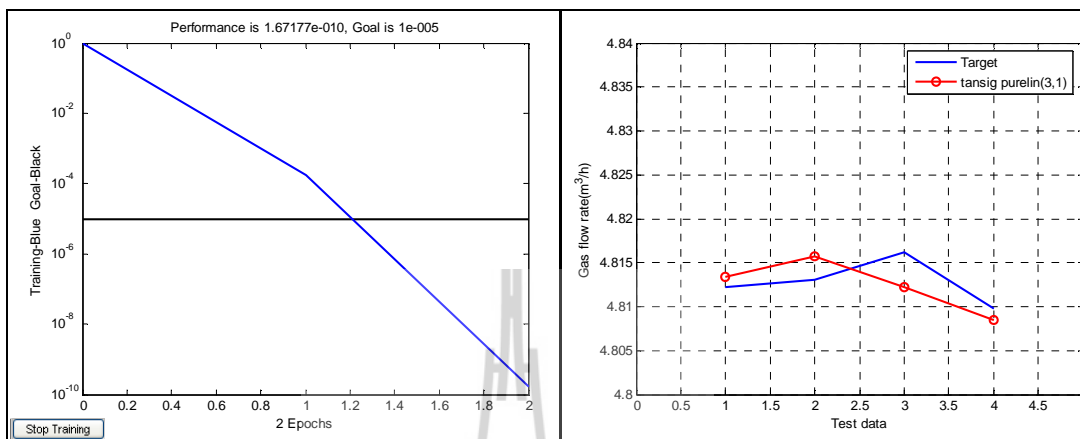
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.40 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin ,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	purelin, purelin	3-1	1.96×10^{-7}	0.0360
2	purelin, purelin	5-1	6.31×10^{-6}	0.2407
3	purelin, purelin	8-1	3.30×10^{-7}	0.0746
4	purelin, purelin	10-1	5.12×10^{-8}	0.0064

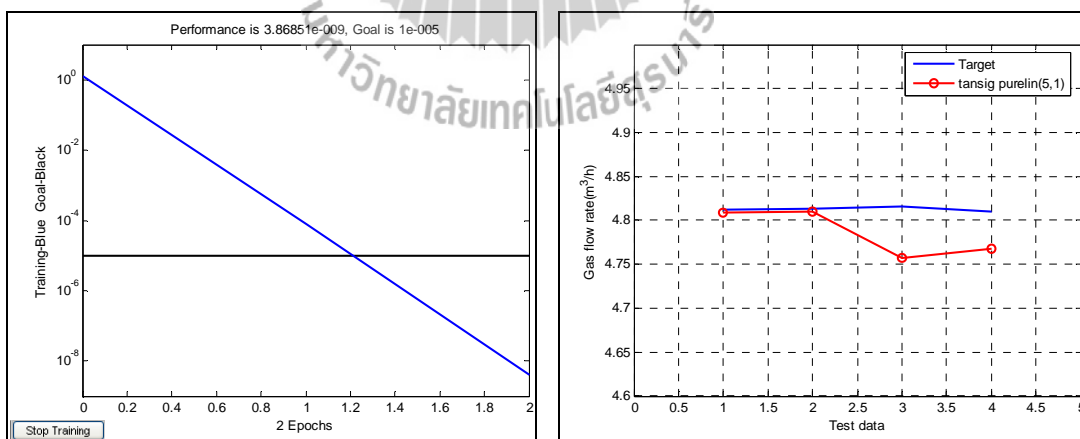
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

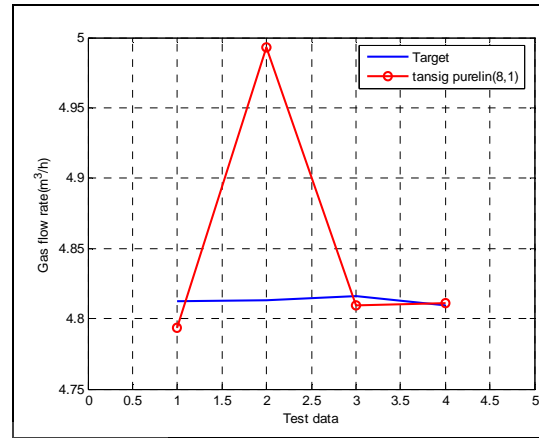
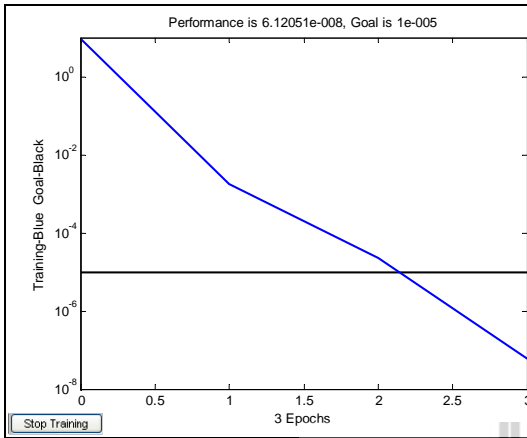
รูปที่ ค.41 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุตและเป้าหมาย

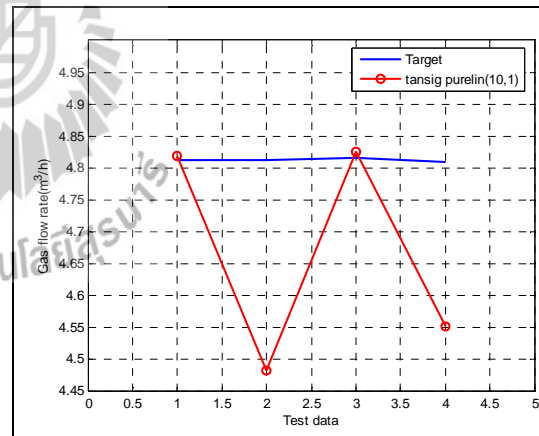
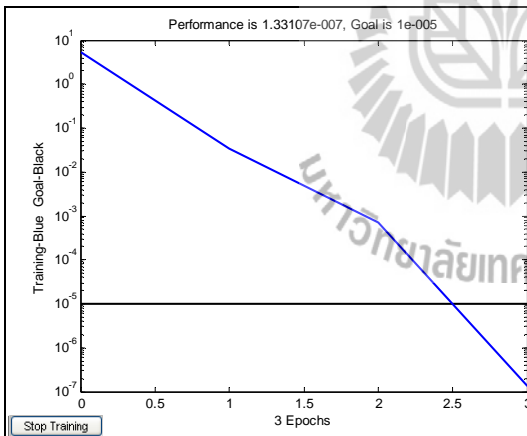
รูปที่ ค.42 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.43 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



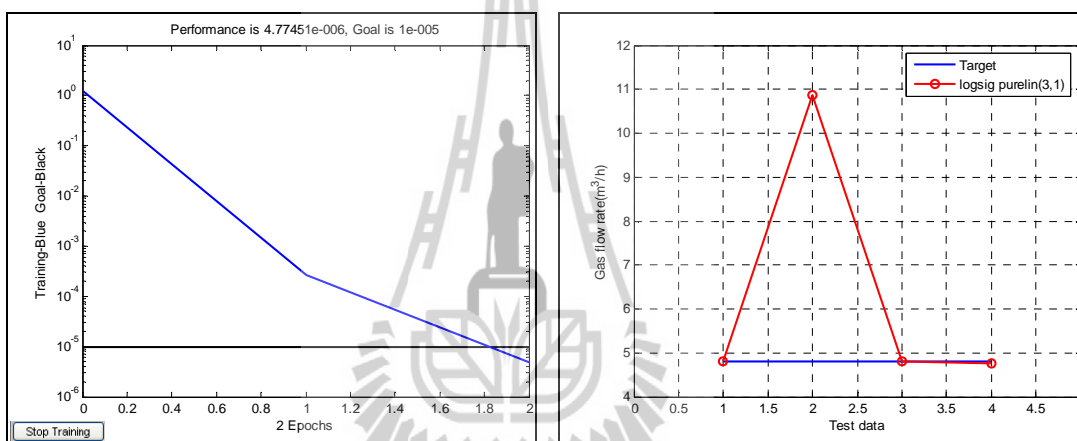
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.44 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	tansig, purelin	3-1	1.67×10^{-10}	6.64×10^{-6}
2	tansig, purelin	5-1	3.87×10^{-9}	0.0013
3	tansig, purelin	8-1	6.12×10^{-8}	0.0082
4	tansig, purelin	10-1	1.33×10^{-7}	0.0438

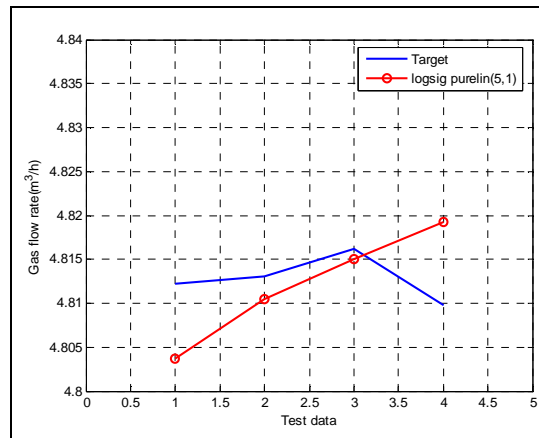
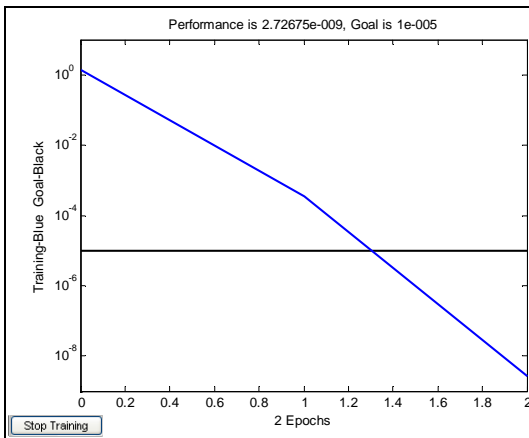
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ที่ฟังก์ชันถ่ายโอนlogsig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

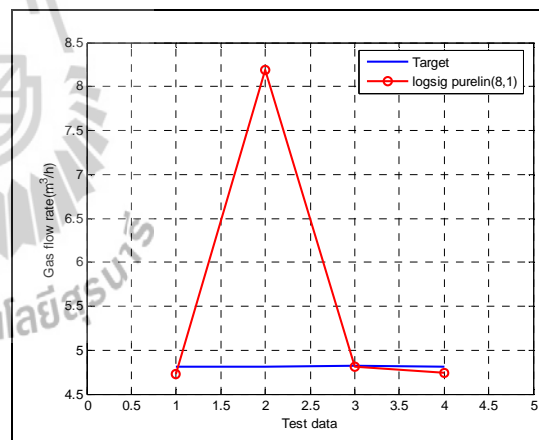
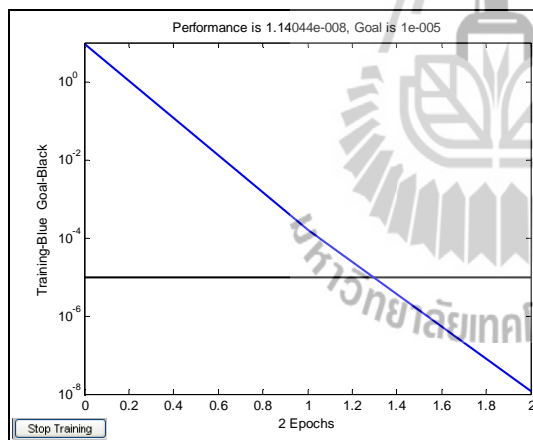
รูปที่ ค.45 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

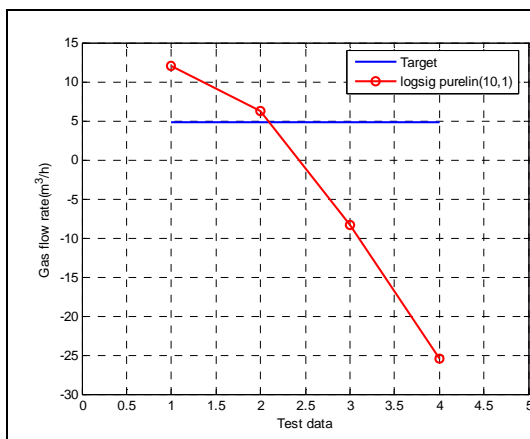
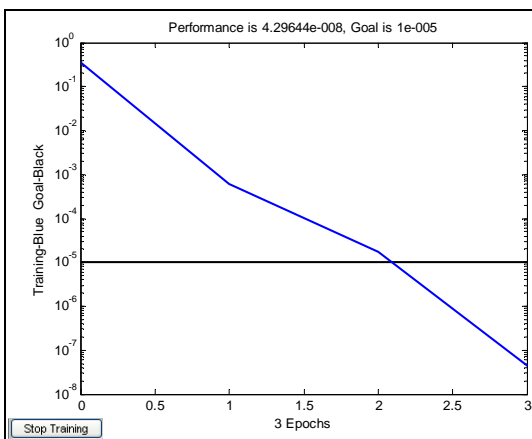
รูปที่ ค.46 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.47 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



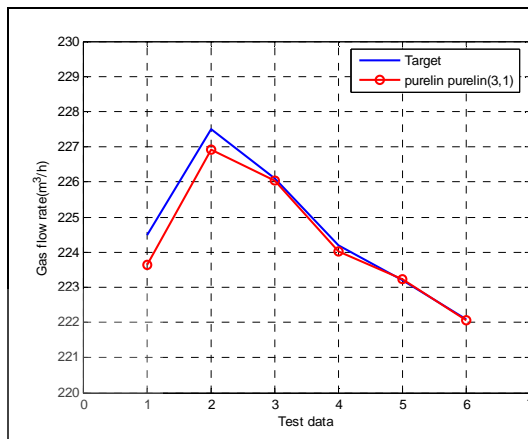
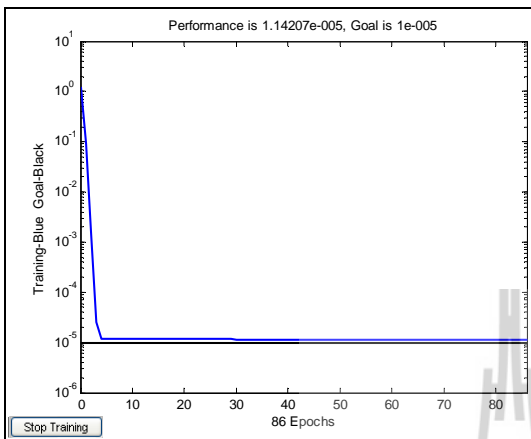
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตัพุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.48 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการีทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	logsig, purelin	3-1	4.77×10^{-6}	9.1492
2	logsig, purelin	5-1	2.73×10^{-9}	4.24×10^{-5}
3	logsig,purelin	8-1	1.14×10^{-8}	2.8616
4	logsig, purelin	10-1	4.29×10^{-8}	285.4467

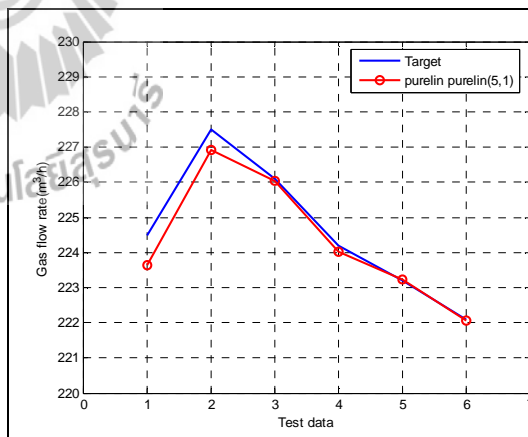
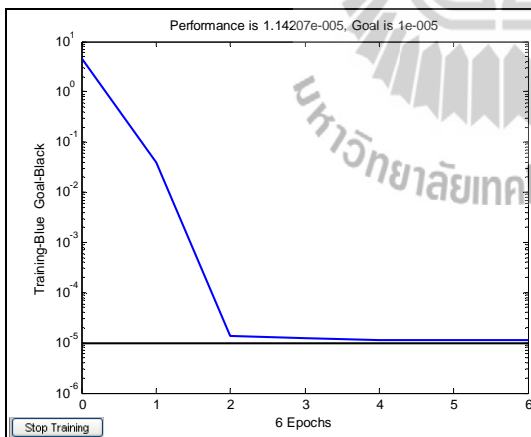
อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยประมาณ $200 \text{ m}^3/\text{h}$
 ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

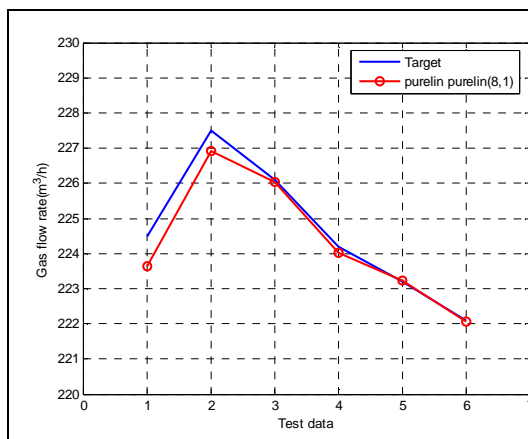
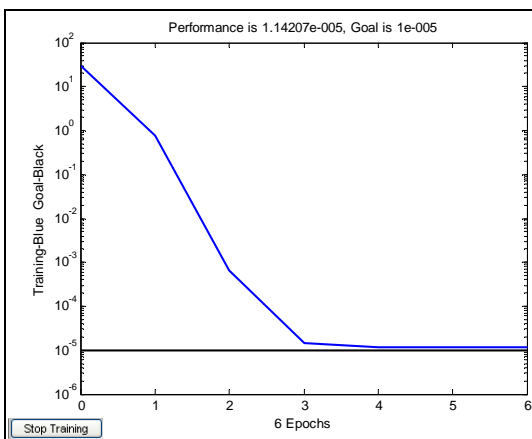
รูปที่ ค.49 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

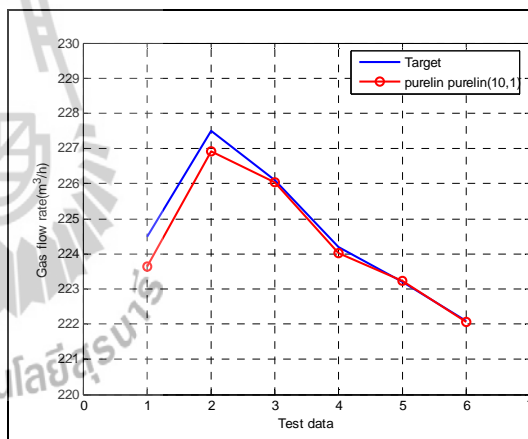
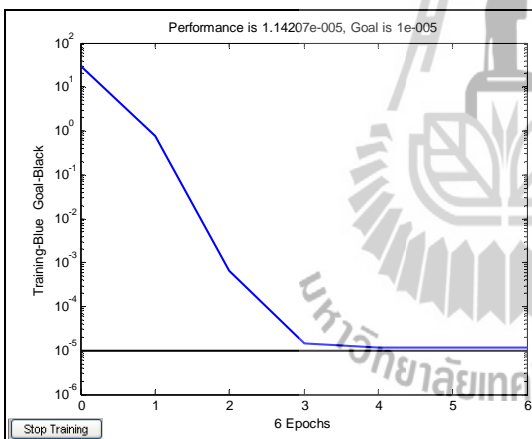
รูปที่ ค.50 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.51 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 8-1



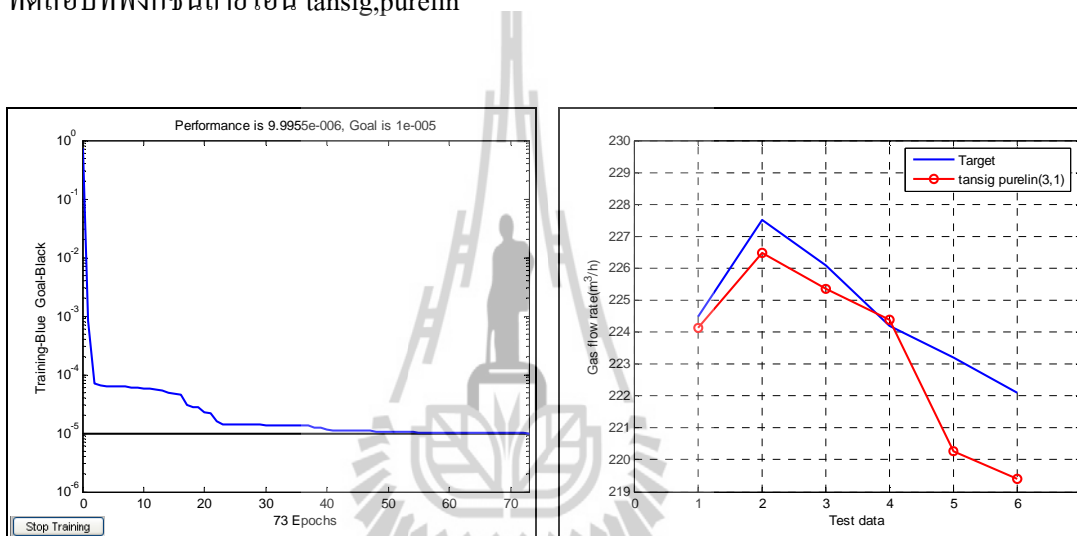
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.52 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 10-1

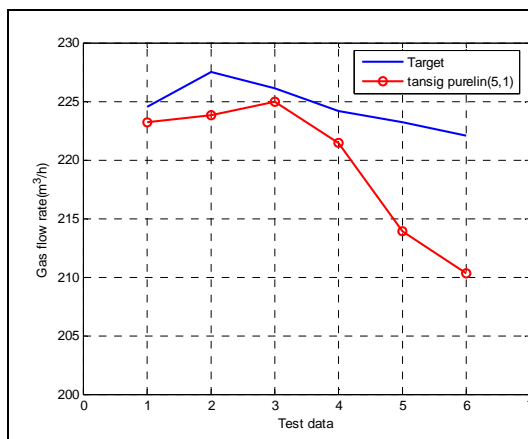
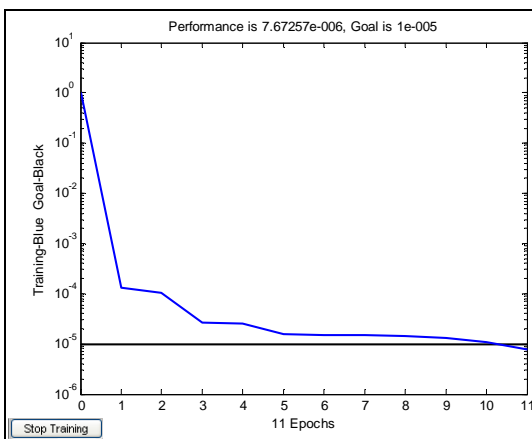
ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน		เครือข่าย	MSE	
	ชั้นที่ 1	ชั้นเอาต์พุต		ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	purelin	purelin	3-1	1.14×10^{-5}	0.1852
2	purelin	purelin	5-1	1.14×10^{-5}	0.1852
3	purelin	purelin	8-1	1.14×10^{-5}	0.1852
4	purelin	purelin	10-1	1.14×10^{-5}	0.1852

ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

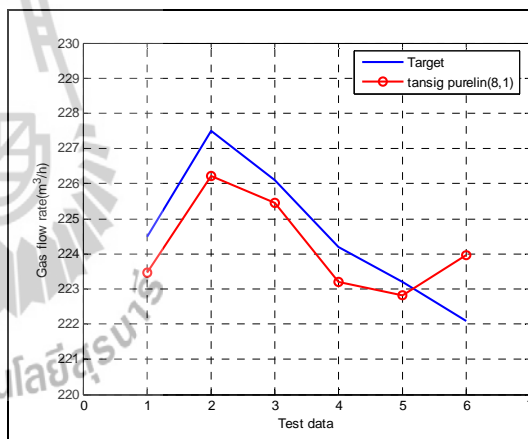
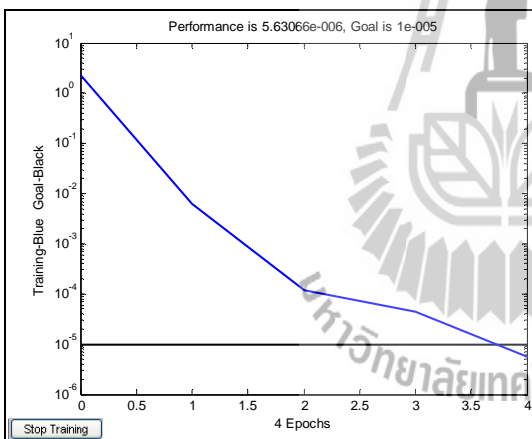
รูปที่ ค.53 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

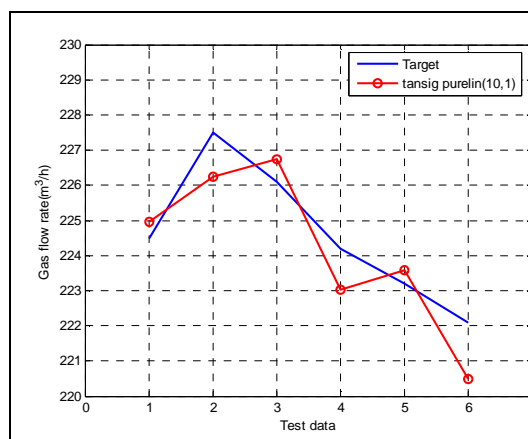
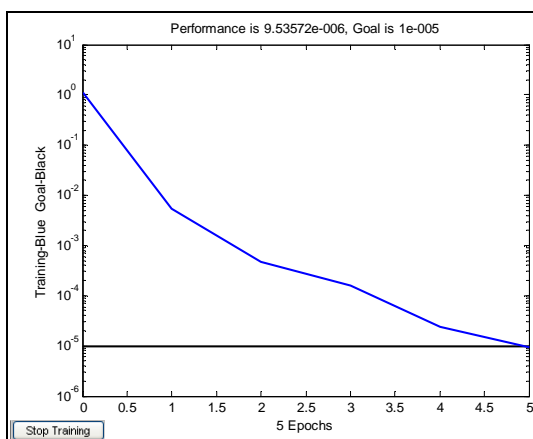
รูปที่ ค.54 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

รูปที่ ค.55 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 8-1



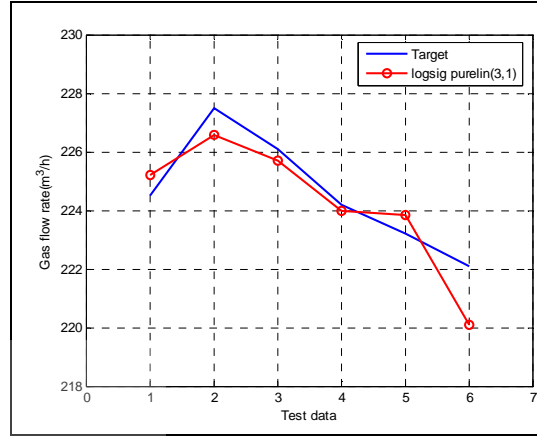
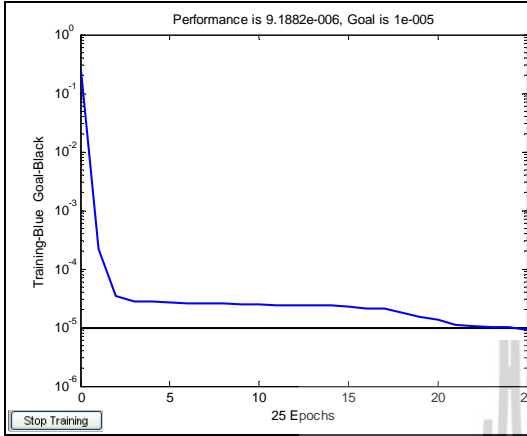
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.56 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 10-1

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน		เครือข่าย	MSE	
	ชั้นที่ 1	ชั้นเอาต์พุด		ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	tansig	purelin	3-1	9.99×10^{-6}	2.9526
2	tansig	purelin	5-1	7.67×10^{-6}	41.8573
3	tansig	purelin	8-1	5.63×10^{-6}	1.2799
4	tansig	purelin	10-1	9.54×10^{-6}	1.0566

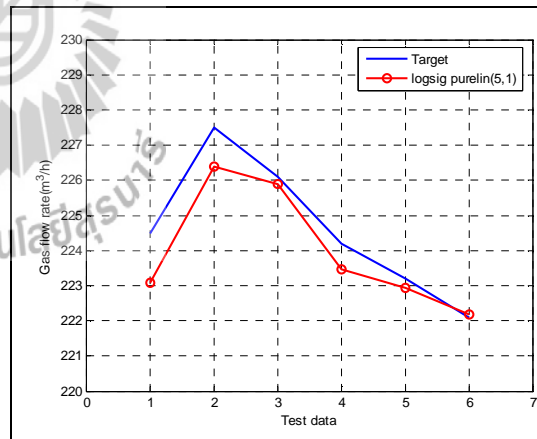
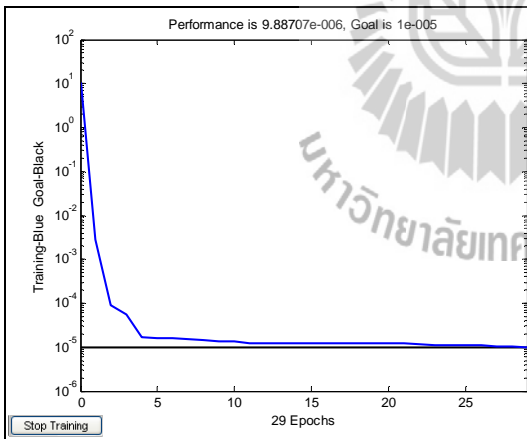
ทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

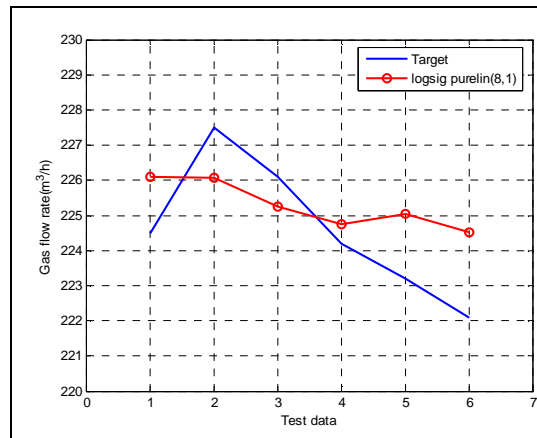
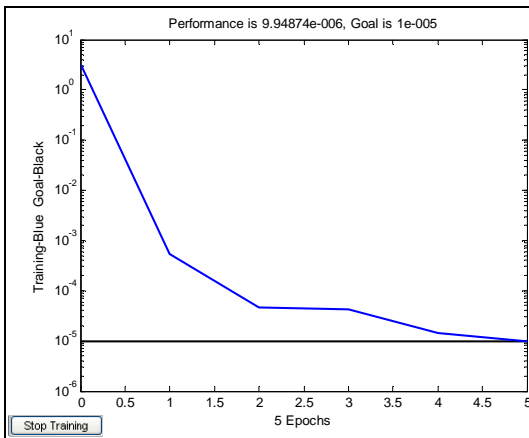
รูปที่ ค.57 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 3-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

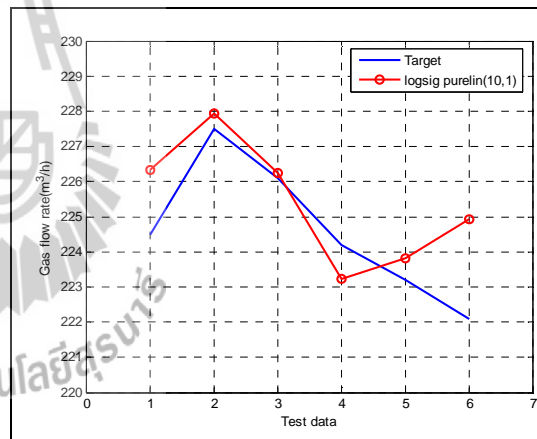
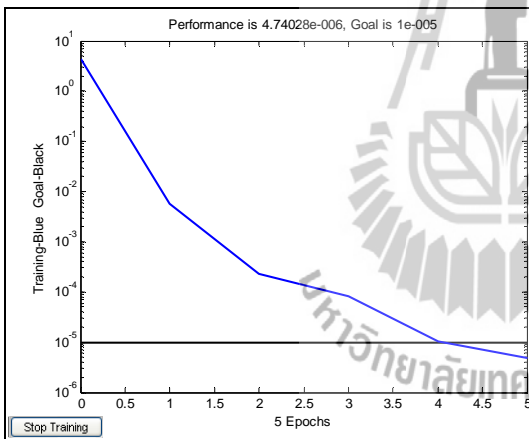
รูปที่ ค.58 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 5-1



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.59 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 8-1



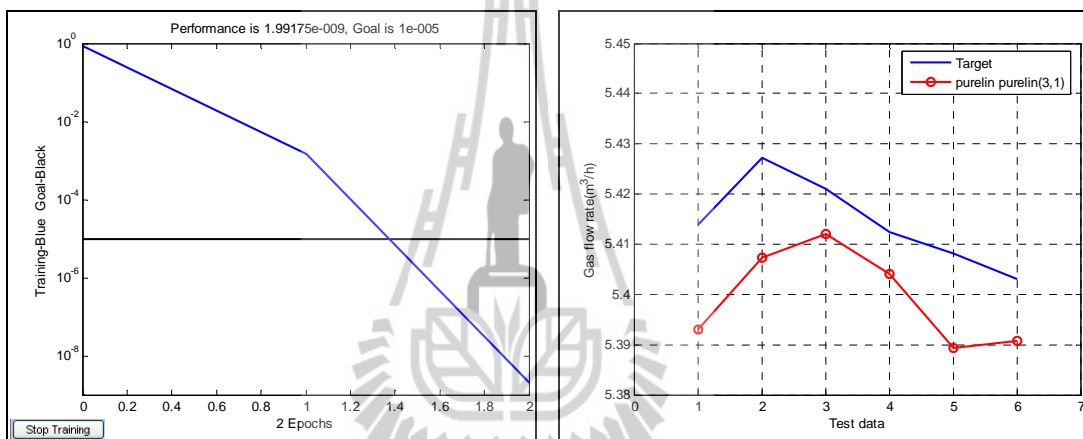
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.60 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 10-1

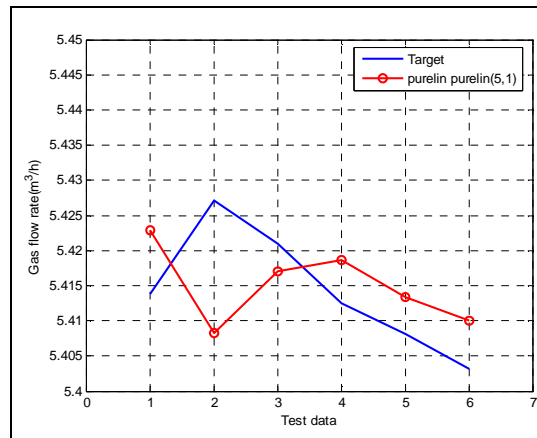
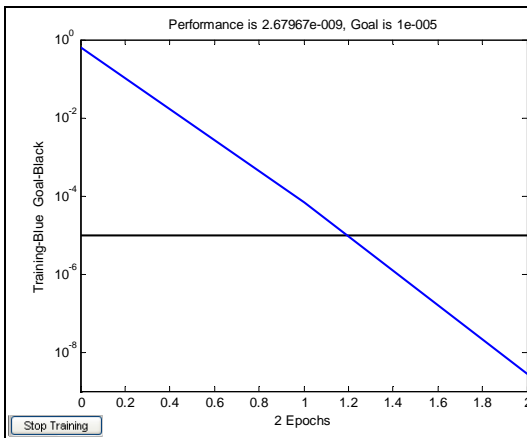
ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน		เครือข่าย	MSE	
	ชั้นที่ 1	ชั้นเอาต์พุต		ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	logsig	purelin	3-1	9.19×10^{-6}	0.9968
2	logsig	purelin	5-1	9.89×10^{-6}	0.6436
3	logsig	purelin	8-1	9.95×10^{-6}	2.4853
4	logsig	purelin	10-1	4.74×10^{-6}	2.1522

ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด ข. เอาต์พุตและเป้าหมาย

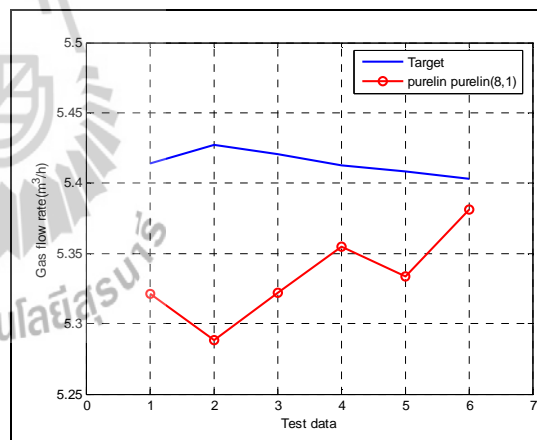
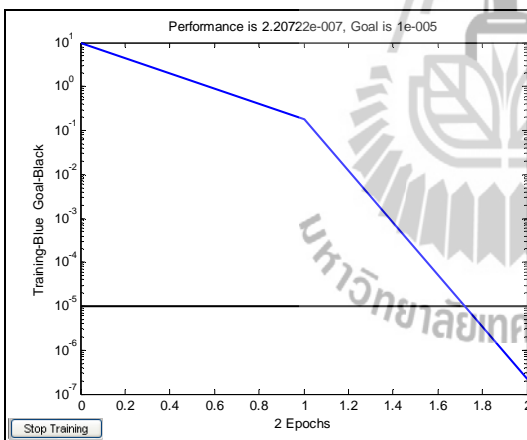
รูปที่ ค.61 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุดและเป้าหมาย

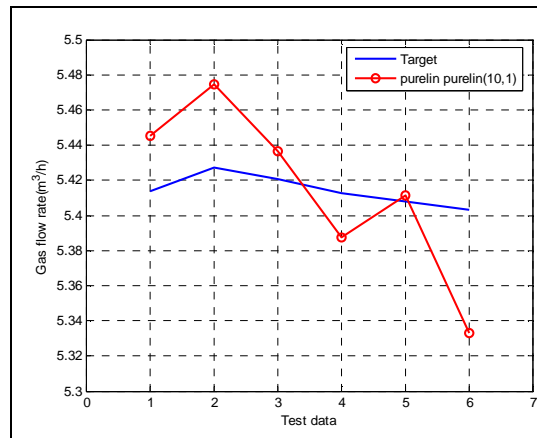
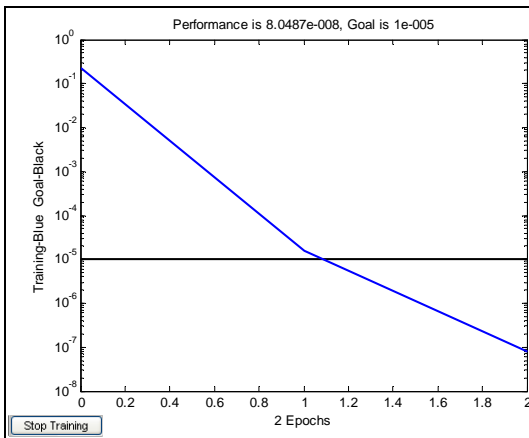
รูปที่ ค.62 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์ฟุดและเป้าหมาย

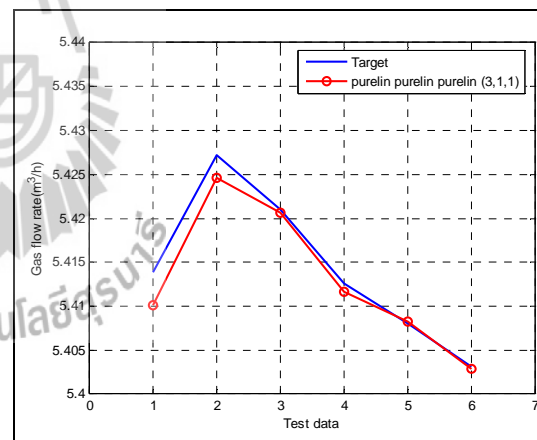
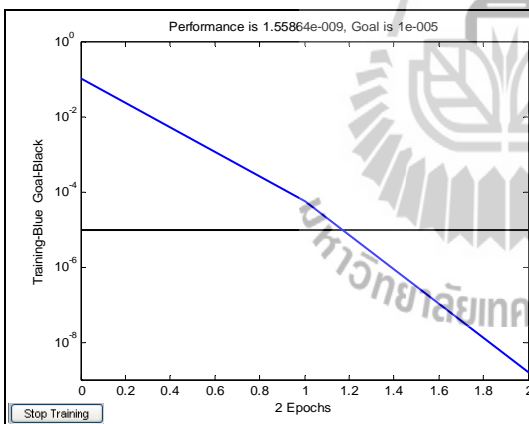
รูปที่ ค.63 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.64 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



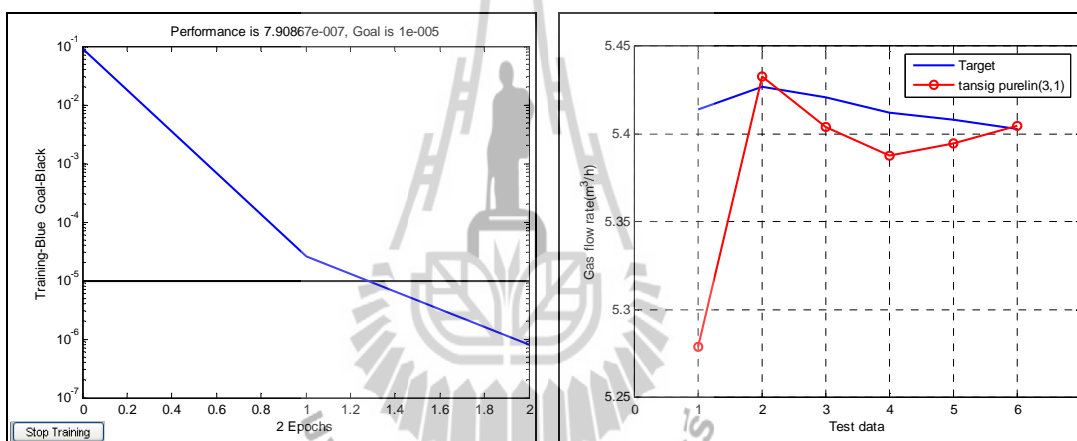
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.65 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน purelin, purelin, purelin เครือข่าย 3-1-1 ที่แปลงให้อยู่ ในรูปลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	purelin, purelin	3-1	1.99×10^{-9}	2.47×10^{-4}
2	purelin, purelin	5-1	2.68×10^{-9}	9.44×10^{-5}
3	purelin, purelin	8-1	2.21×10^{-7}	0.0079
4	purelin, purelin	10-1	8.05×10^{-8}	0.0015
5	purelin, purelin, purelin	3-1-1	1.59×10^{-9}	3.61×10^{-6}

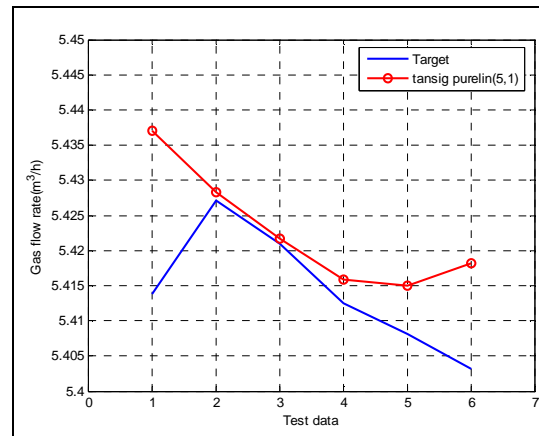
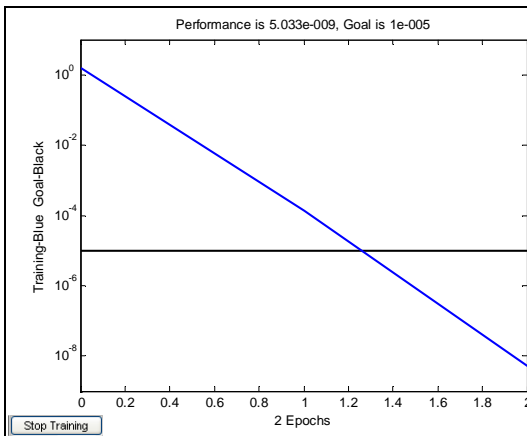
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

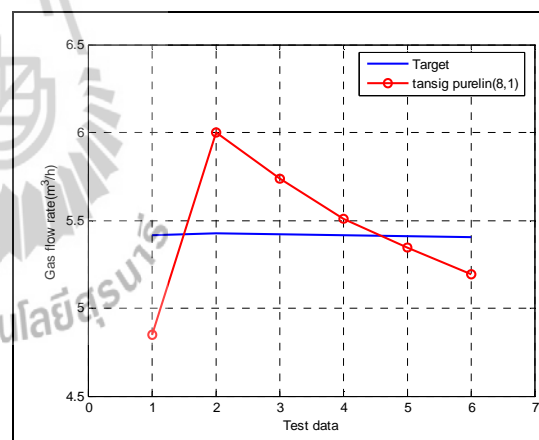
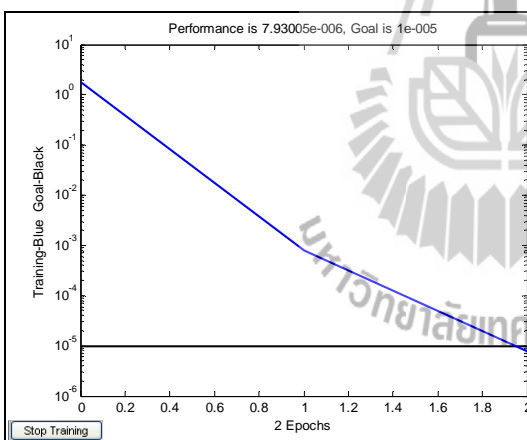
รูปที่ ค.66 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig, purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

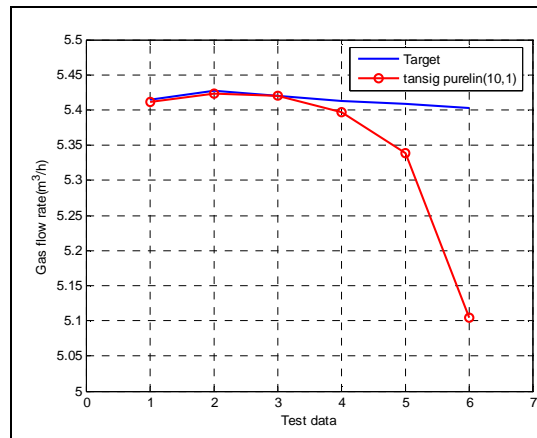
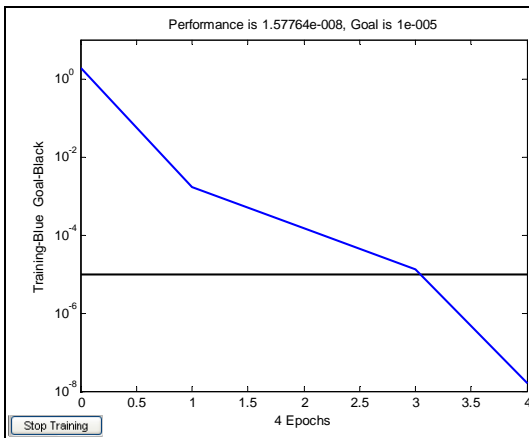
รูปที่ ค.67 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

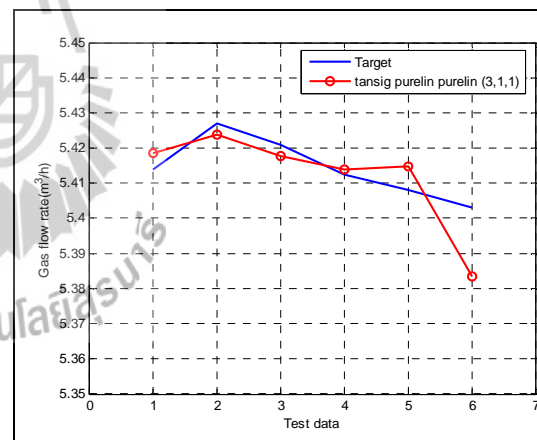
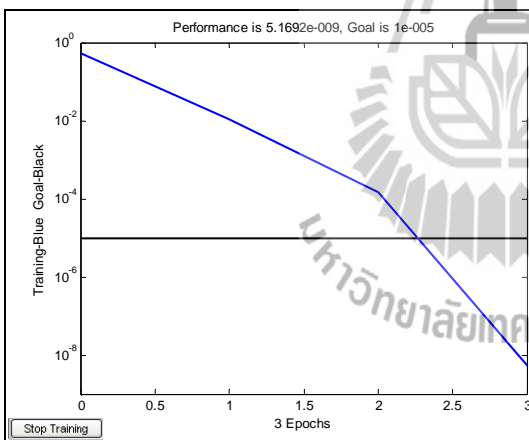
รูปที่ ค.68 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.69 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



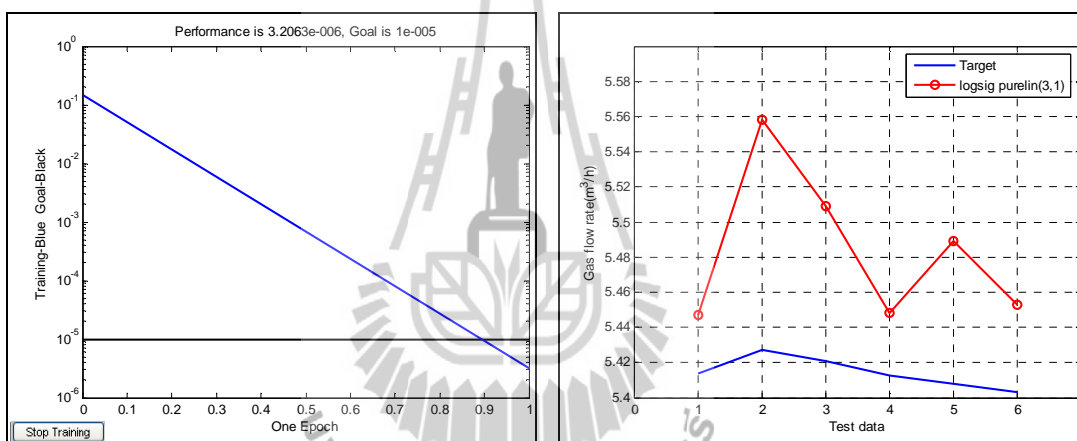
ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.70 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน tansig,purelin,purelin เครือข่าย 3-1-1 ที่แปลงให้อยู่ใน รูปลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	tansig, purelin	3-1	7.91×10^{-7}	0.0032
2	tansig, purelin	5-1	5.03×10^{-9}	1.37×10^{-4}
3	tansig, purelin	8-1	7.93×10^{-6}	0.1347
4	tansig, purelin	10-1	1.58×10^{-8}	0.0157
5	tansig, purelin, purelin	3-1-1	5.17×10^{-9}	7.98×10^{-5}

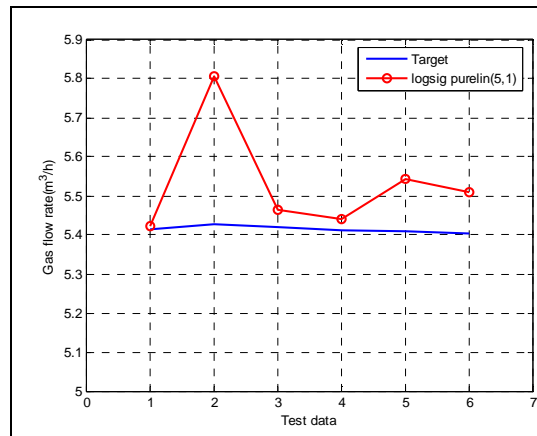
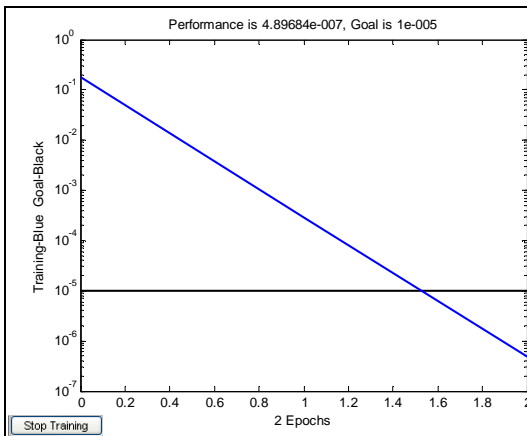
ทดสอบชุดข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมที่ฟังก์ชันถ่ายโอนlogsig,purelin



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอตู้พุดและเป้าหมาย

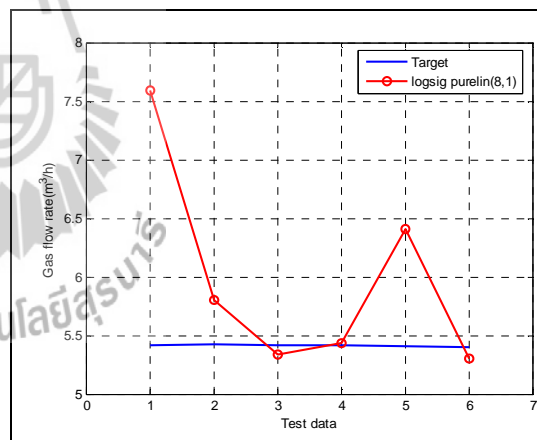
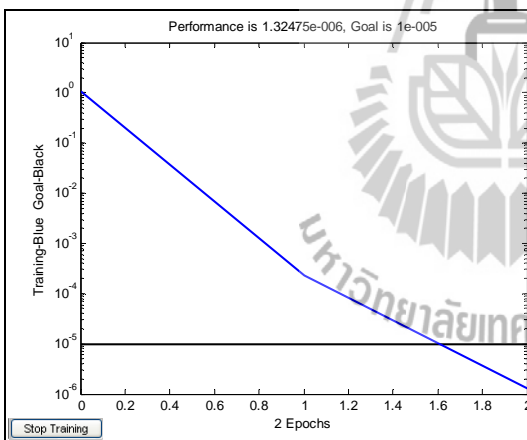
รูปที่ ค.71 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 3-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

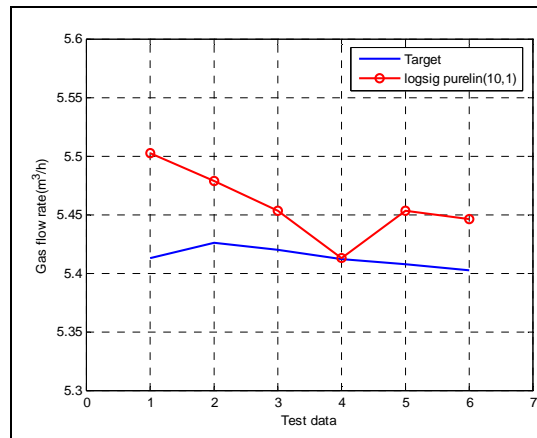
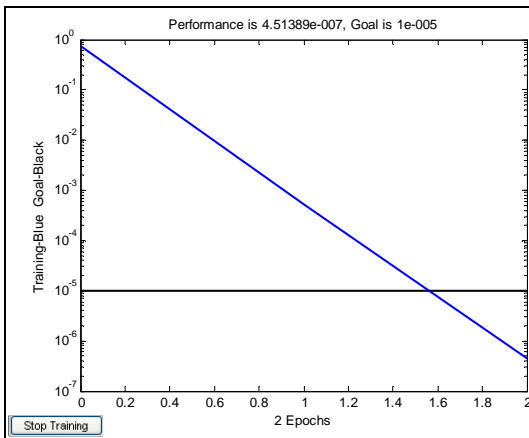
รูปที่ ค.72 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 5-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

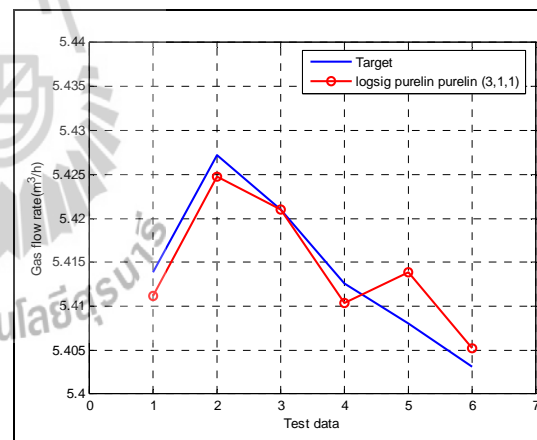
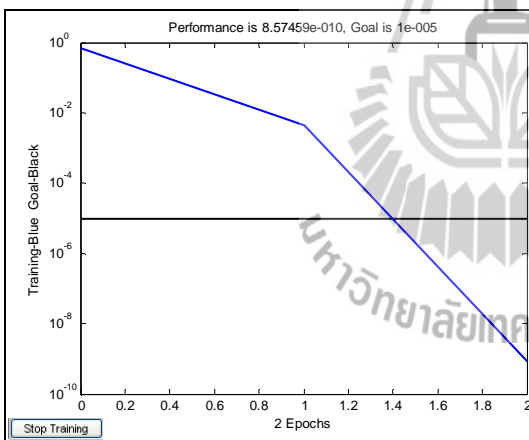
รูปที่ ค.73 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 8-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.74 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin เครือข่าย 10-1 ที่แปลงให้อยู่ในรูป ลอการิทึม



ก. ค่าความผิดพลาด

ข. เอต์พุดและเป้าหมาย

รูปที่ ค.75 ผลการทดสอบที่ฟังก์ชันถ่ายโอน logsig,purelin,purelin เครือข่าย 3-1-1 ที่แปลงให้อยู่ ในรูปลอการิทึม

ลำดับ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	เครือข่าย	MSE	
			ชุดฝึกสอน	ชุดทดสอบ
1	logsig, purelin	3-1	3.20×10^{-6}	0.0060
2	logsig, purelin	5-1	4.89×10^{-7}	0.0295
3	logsig, purelin	8-1	1.32×10^{-6}	0.9805
4	logsig, purelin	10-1	4.51×10^{-7}	0.0026
5	logsig, purelin, purelin	3-1-1	8.57×10^{-10}	9.36×10^{-6}





รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Estimation missing air flow rate model of biomass gasifier using Neural Network.

International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well Being (STISWB 2009). pp.157-160, 23-24 July 2009. (สงวนลิขสิทธิ์)

Response Surface Method Application in Gasifier System Identification for Biomass Power Plants. WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS, ISSN:1109-2777. pp.629-638,

Estimation missing air flow rate model of biomass gasifier using Neural Network. WASET, 25-26 2011. (สงวนลิขสิทธิ์)



Response Surface Method Application in Gasifier System Identification for Biomass Power Plants

**A. Oonsivilai^{1*}, J. Satonsaowapak¹, T. Ratniyomchai²,
T. Kulworawanichpong², P. Pao-La-Or², and B. Marungsri¹.**

¹ Alternative and Sustainable Energy, Smart Materials and Intelligent System Research Unit,
^{1,2} School of Electrical Engineering
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000
THAILAND

*Corresponding author: anant@sut.ac.th

Abstract: - The use of renewable energy sources becomes more necessary and interestingly, wider application of renewable energy devices at domestic, commercial and industrial levels is not only resulted in greater awareness but also significantly installed capacities. In addition, biomass principally is in the form of woods and more than that used in form of energy by humans for a long time. Gasification is a process of conversion of solid carbonaceous fuel into combustible gas by partial combustion. Many gasifier models have various operating conditions thus the parameters were kept in each model are different. This study applied the experimental data which have three inputs that are biomass consumption, air flow rate and ash discharge rate and one output is gas flow rate. For this paper, response surface methods was used to identify the gasifier system equation that suitable for this experimental data in this paper and the method were used to identify gasifier system model were multiple linear regression, quadratic model and cubic model. In the result, cubic model was better way from three methods to get the answer.

Key-Words: - Gasifier System, Identification, Response Surface Method

1 Introduction

The use of renewable and sustainable energy resources will play a major role in many aspects of electricity generation. In particular, due to environment issues and ever increasing energy demands, the world is forced to look for alternative energy sources. Also, it is anticipated that shortage of hydrocarbon fuel will be inevitable. In terms of population growth, it has been estimated that by the year 2060, the world population will be in excess of 12 billions. Currently, over 80% of the crude oil reserves are under the control of only eight countries. Therefore, a number of strategies, such as special tariff and subsidy agreements, have been established in many countries in order to stimulate the research and utilization of alternative energy sources [5].

Biomass is organic material, which has stored solar energy from sunlight in the form of chemical in the plants through the process called photosynthesis. Biomass fuels include agricultural wastes, crop residues, wood, and woody wastes etc.

Unless like fossil fuels biomass does not add carbon dioxide to the atmosphere as it absorbs the same amount of carbon while growing. It is the cheapest, eco-friendly, renewable source of energy [4].

Power generation from biomass has emerged as a very interesting complement to conventional sources of energy because of its contribution to the reduction of the green house effect [1]. Biomass is recognized to be one of the major potential sources for energy production. There has been an increasing interest for thermochemical conversion of biomass and urban wastes for upgrading the energy in terms of more easily handled fuels, namely gases, liquids, and charcoal in the past of decade. It is a renewable source of energy and has many advantages from an ecological point of view [2]. Biomass fuels are characterized by high and variable moisture content, low ash content, low density, and fibrous structure [3].

Biomass gasification is a technology that transforms solid biomass into syngas. It is important and efficient energy conversion technology along

with interventions to enhance the sustainable supply of biomass fuels can transform the energy supply situation in rural areas [2].

Gasifier system is an important part to produce fuel gas. This paper studied the experimental data which have three inputs that are biomass consumption, air flow rate and ash discharge rate and one output is gas flow rate. This is the energy conversion technologies which is suitable for small-scale.

The response surface method has been widely used in practical engineering design optimization problems [6]. This method originates from science disciplines in which physical experiments are performed to explore the unknown relations between a set of variables and the system output, and these unknown relations are modeled as polynomials using the least square method. These straightforward polynomial models allow the objective and constraints of the optimization to be evaluated quickly to obtain better search points for more accurate surrogate models and eventually converge to the global optimum [7].

This paper is divided into five sections. Section 2 presents gasification system. Section 3 presents response surface method. Section 4 shows results. Finally, conclusions are presented in section 5.

2 Biomass Gasification

Biomass gasification is a Technology that transforms solid biomass into syngas (hydrogen and carbon monoxide mixtures produced from carbonaceous fuel). Biomass fuels are characterized by high and variable moisture content, low ash content, low density and fibrous structure. In comparison with other fuels, they are regarded as of low quality despite low ash content and very low sulfur content [1]. Biomass gasification system consists of 2 main parts. They are gasifier and gas cleaning system. For the first part, this paper used downdraft gasifiers which are simple and robust. The gas exiting the reactor flowed through a cyclone and scrubbers just to remove a dust and the tars. Next, the clean gas passed through several heat exchangers to condense water vapor. After that, the gas was conditioned to be used in the internal combustion engine [1]. Figure 1 show the biomass gasification system which consists of gasifier, gas cleaning system and engine-generator.

2.1 Gasifier

Biomass gasification converts solid biomass into more convenient gaseous form. This process is made possible in a device called gasifier. The

gasifier was a cylindrical reactor which had the moving bed of biomass rested on a perforated eccentric rotating grate which was at the bottom of

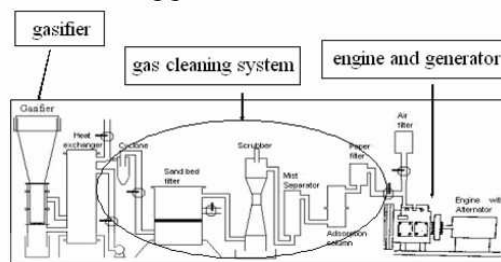


Fig.1 shows biomass gasification system.

the gasifier. The ash fell through the perforated grate to be collected in a lower chamber. The biomass feeding at the top of gasifier after that biomass was burnt in process zones. Finally, the gasifier received producer gas [4]. This is the energy conversion technologies which is suitable for small-scale. Figure 2 shows process zone for downdraft gasifiers

2.1.1 Process zone

Four distinct process take place in a gasifier as the fuel makes its way to gasification. They are:

- a) Drying zone
- b) Pyrolysis zone
- c) Combustion zone
- d) Reduction zone

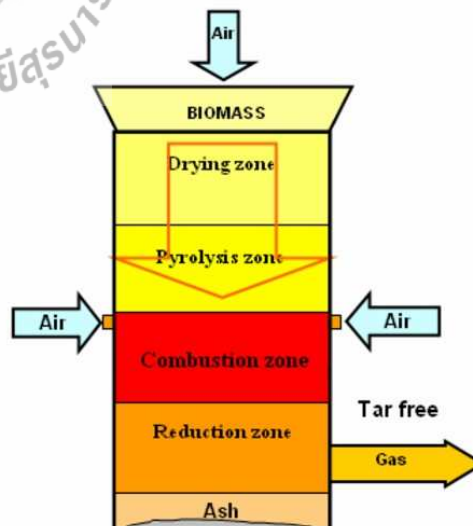


Fig.2 shows process zone for downdraft gasifiers.

2.1.2 Reaction chemistry

The following major reactions take place in combustion and reduction zone [12]

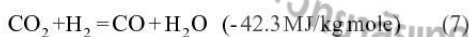
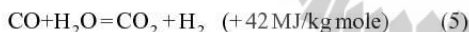
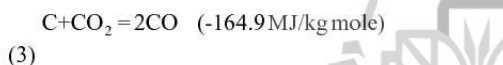
Combustion zone

The combustible substance of a solid fuel is usually composed of elements carbon, hydrogen and oxygen. In complete combustion carbon dioxide is obtained from carbon in fuel and water is obtained from the hydrogen, usually as steam. The combustion reaction is exothermic and yields a theoretical oxidation temperature of 1450 °C. The main reactions are:



Reaction zone

The products of partial combustion (water, carbon dioxide and uncombusted partially cracked pyrolysis products) now pass through a red-hot charcoal bed where the following reduction reactions take place.



Reactions (3) and (4) are main reduction reactions and being endothermic have the capability of reducing gas temperature. Consequently the temperatures in the reduction zone are normally 800-1000 °C. Lower the reduction zone temperature (~700-800 °C), lower is the calorific value of gas.

Pyrolysis zone

Up to the temperature of 200 °C only water is driven off. At temperature of 200 to 280 °C carbon dioxide, acetic acid and water are given off. The real pyrolysis, which takes place between 280 to 500 °C, produces large quantities of tar and gases containing carbon dioxide. Besides light tars, some methyl alcohol is also formed. At temperature of 500 to 700 °C the gas production is small and contains hydrogen. In downdraft gasifier the tar have to go

through combustion and reduction zone and are partially broken down. Since majority of fuels like wood and biomass residue do have large quantities of tar, downdraft gasifier is preferred over others.

Drying zone

The main process is of drying of wood. Wood entering the gasifier has moisture content 10-30%. Various experiments on different gasifiers in different conditions have shown that on an average the condensate formed is 6-10% of the weight of gasified wood. Some organic acids also come out during the drying process. These acids give rise to corrosion of gasifiers.

This paper interested in four parameters that were three inputs and one output. Three inputs were biomass consumption, ash discharge rate and air flow rate. The output is gas flow rate.

3 Response Surface Method

Response surface method is a statistical and mathematical method that gives an effective practical means for design optimization. When response y , which should be taken into consideration for design, is determined as a function of multiple design variables x_i , the behavior in response surface method is expressed by the approximation as a polynomial $y = f(x_i)$ on the basis of conservation data [8],[10]. The response surface method postulates a model of term:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (8)$$

Where the form of the true response function y is unknown or very complicated, $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ is a known polynomial function of (x_1, x_2, \dots, x_k) , and ε is a term that represents random error. It is assumed to be normally distributed with mean zero and variance.

Because the form of y is unknown, it must be approximated by a known polynomials function $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$. The more suitable approximation for y , the accuracy is higher. In general, the first-order polynomials are [9, 11]

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \varepsilon \quad (9)$$

The first-order model is likely to be appropriate when the experimenter is interested in approximating the true response surface over a

relatively small region of the input variable space in a location where there is little curvature in f .

For a quadratic response function with k variables by a regression model, it is expressed by (10)

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (10)$$

And, a cubic response function with k variables by a regression model, it is expressed by (11)

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^k b_{ijl} x_i x_j x_l + \varepsilon \quad (11)$$

For this paper, the response function with $k=3$ variables, the first-order polynomials is

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \varepsilon \quad (12)$$

the quadratic response function is

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + \varepsilon \quad (13)$$

the cubic response function is

$$y = \text{quadratic model} + b_{123} x_1 x_2 x_3 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{113} x_1^2 x_3 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{133} x_1 x_3^2 + b_{223} x_2^2 x_3 + b_{233} x_2 x_3^2 + b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3 + b_{333} x_3^3 + \varepsilon \quad (14)$$

where

x_1 is biomass consumption (kg/h)

x_2 is ash discharge rate (kg/h)

x_3 is air flow rate (kg/h)

y is gas flow rate (kg/h)

Then, n sets of observation data in correspondence with design variables can be expressed by matrix representation in (15) and (16)

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \vdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \vdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \vdots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$y = Xb + \varepsilon \quad (16)$$

Coefficient vector b is obtained by the following equation using the condition where the square of error is minimized:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (17)$$

where X the design matrix of sample data points is, X^T is its transpose, Y is a column vector containing the values of the response at each sample point.

By obtaining coefficient vector b from (17), the response surface is prepared [8].

4 Results and Discussion

The method described in the previous section was applied to estimate the coefficient of model. Fig.3-5 show values comparison of response surface method with observed data in different equation model. Fig. 3 presents comparison of linear equation with observed data. Fig.4 presents comparison of quadratic equation with observed data. Fig. 5 presents comparison of cubic equation with observed data. From these answer, the error value can calculate by using values from experiment compared with values from response surface method as shows in Fig. 6-8. Fig. 6 presents gas flow rate error with linear equation. Fig. 7 presents gas flow rate error with quadratic equation. Fig. 8 presents gas flow rate error with cubic equation. Table 1 shows the experimental data test for solving response surface method which was kept at biomass power plant in Suranaree University of Technology. Table 2 presents the gas flow rate which approximated by using response surface method (linear equation, quadratic equation and cubic equation). Table 3 presents error values from different method. These errors were used to consider the response surface method which should be to be represented the gasifier system that had three outputs which were biomass consumption, ash discharge rate and air flow rate and one output is gas flow rate. From three equations, the cubic equation is most suitable than others equation for this experimental data. In the future, the method which better than three methods may be used to solve and present replace such as artificial intelligent (fuzzy, neuron network, etc.) which can used with complicated system and widely use in engineering fields [13-34].

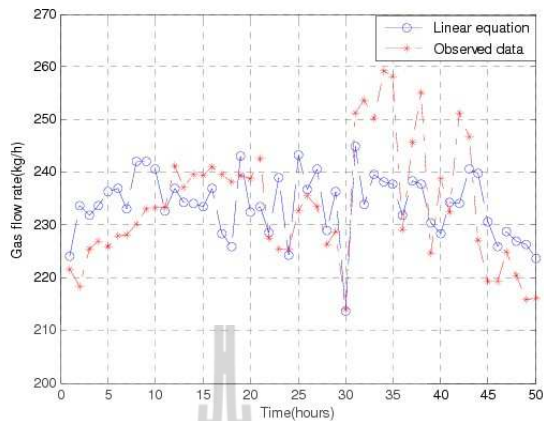


Fig. 3 comparison of linear equation with observed data

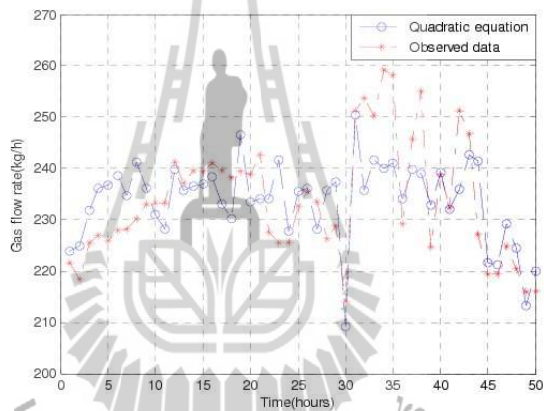


Fig. 4 comparison of quadratic equation with observed data

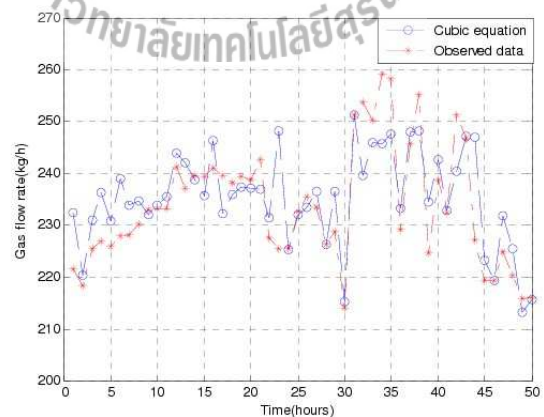


Fig. 5 comparison of cubic equation with observed data

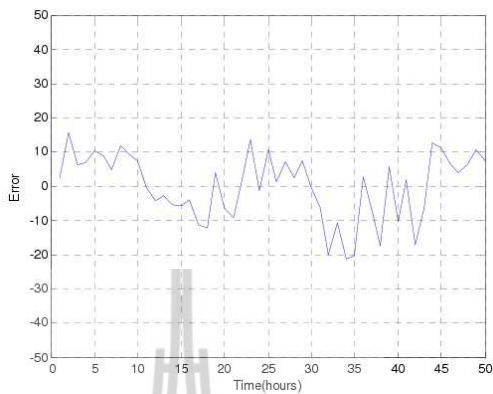


Fig. 6 Gas flow rate error with linear equation.

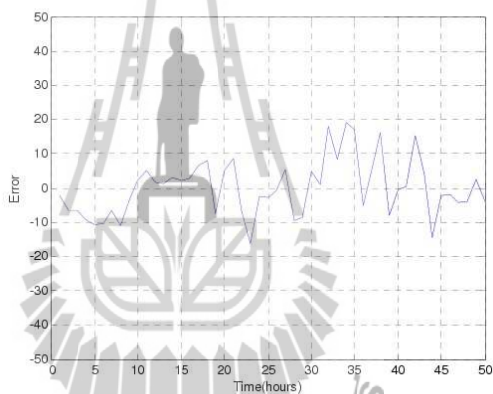


Fig. 7 Gas flow rate error with quadratic equation.

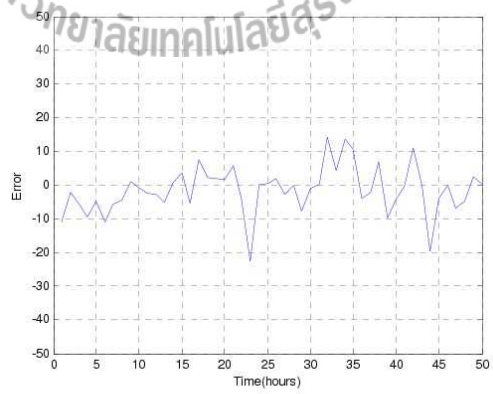


Fig. 8 Gas flow rate error with cubic equation.

Table 1: Experimental data test for solving response surface method

x_1	x_2	x_3	y
103.90	13.00	117.2899	221.5537
138.30	15.20	117.7695	218.2254
108.60	15.30	116.5175	225.4367
119.40	13.80	116.2114	226.8789
117.50	16.50	116.3934	225.9914
124.80	14.30	115.9330	227.9884
107.50	14.50	115.8788	228.2102
138.10	14.00	115.4149	230.2072
114.00	16.20	114.7040	232.9808
128.00	12.30	114.6112	233.2027
85.10	14.30	114.6112	233.2027
134.50	13.90	116.3644	241.3015
119.50	14.60	116.3415	237.0857
123.20	13.90	116.3644	239.6374
124.60	13.20	116.3644	239.3046
128.10	15.00	116.3644	240.9687
105.70	12.90	116.3644	239.6374
92.40	13.50	116.3644	238.1951
149.30	15.70	116.3644	239.3046
111.00	14.90	116.3644	238.7499
112.60	15.30	116.3644	242.6329
102.80	12.60	116.0728	227.4336
142.50	14.40	116.5175	225.4367
85.90	13.90	116.5175	225.4367
132.10	14.00	114.7895	232.6480
117.30	13.90	115.4245	235.4216
125.60	12.30	114.4316	233.5355
112.30	12.00	116.3283	226.3242
119.80	14.20	115.7427	228.7650
103.00	9.90	118.6889	214.1205
161.90	14.70	116.3644	251.2864
120.70	14.10	116.3644	253.7272
138.40	15.10	116.3644	250.1770
134.20	14.80	116.3644	259.2744
138.60	13.80	116.3644	258.1649
104.10	13.50	115.6583	229.0978
131.80	15.40	116.3644	245.7393
127.30	15.80	116.3644	255.1695
117.20	13.30	116.7175	224.6601
117.80	10.70	116.3644	238.7499
115.00	10.80	114.8220	232.4261
121.40	14.20	116.3644	251.2864
137.60	16.00	116.3644	246.8487
133.20	15.50	116.1584	227.1008
128.30	14.70	117.7502	219.3348
119.70	12.90	117.7502	219.3348
103.20	14.50	116.6633	224.8819

119.60	12.90	117.5429	220.4442
x_1	x_2	x_3	y
114.80	14.60	117.9394	215.7846
117.00	12.10	117.8948	216.0065

Table 2: Comparison the answer from response surface method

y from data	y from linear	y from quadratic	y from cubic
221.5537	224.1418	223.7887	232.4226
218.2254	233.7366	224.9082	220.2762
225.4367	231.8209	231.9196	230.9956
226.8789	233.7054	236.1938	236.3622
225.9914	236.2436	236.7139	230.8330
227.9884	236.9332	238.4906	239.0053
228.2102	233.1437	234.7633	233.9202
230.2072	242.0234	241.1779	234.6349
232.9808	242.1413	236.2022	232.0724
233.2027	240.5492	230.9283	233.9752
233.2027	232.6885	228.1107	235.6134
241.3015	236.9482	239.7238	243.9408
237.0857	234.2981	235.7063	242.0908
239.6374	234.1392	236.4563	238.8243
239.3046	233.5059	237.0372	235.7444
240.9687	236.8993	238.2797	246.3773
239.6374	228.3870	233.0761	232.2378
238.1951	225.9219	230.2470	235.9443
239.3046	243.1506	246.6494	237.3718
238.7499	232.5083	233.5145	237.0982
242.6329	233.4667	234.1439	236.9103
227.4336	228.4863	234.0327	231.4417
225.4367	238.9864	241.7312	248.1160
225.4367	224.2154	227.7921	225.2218
232.6480	243.1929	235.5359	232.0899
235.4216	236.6717	236.1817	233.4258
233.5355	240.7168	228.2097	236.4518
226.3242	228.9197	235.6943	226.3865
228.7650	236.3598	237.3698	236.5295
214.1205	213.6197	209.1642	215.1954
251.2864	244.8810	250.3597	251.2532
253.7272	233.7981	235.7885	239.5268
250.1770	239.5999	241.7452	245.9601
259.2744	238.1353	240.0511	245.7369
258.1649	237.8272	241.0059	247.5644
229.0978	231.8348	234.1183	233.1635
245.7393	238.3798	239.8535	248.0519
255.1695	237.8219	238.9032	248.2492

224.6601	230.3041	232.8233	234.4443
238.7499	228.3109	239.2540	242.6230
232.4261	234.3179	231.9957	232.9261
251.2864	234.1123	235.9816	240.3618
246.8487	240.6627	242.7187	247.2194
y from data	y from linear	y from quadratic	y from cubic
227.1008	239.7445	241.5385	246.9711
219.3348	230.6319	221.5105	223.2733
219.3348	225.9708	221.1655	219.4175
224.8819	228.7367	229.2315	231.7332
220.4442	226.8280	224.4592	225.3833
215.7846	226.3308	213.1743	213.2890
216.0065	223.5628	219.8892	215.7291

10.5449	2.8879	-0.5581
1.2501	0.7601	-1.9958
7.1813	-5.3258	2.9163
2.5955	9.3701	0.0623
7.5948	8.6048	7.7645
Error from linear equation	Error from quadratic equation	Error from cubic equation
-0.5008	-4.9563	1.0749
-6.4054	-0.9267	-0.0332
-19.9291	-17.9387	-14.2004
-10.5771	-8.4318	-4.2169
-21.1391	-19.2233	-13.5375
-20.3377	-17.159	-10.6005
2.737	5.0205	4.0657
-7.3595	-5.8858	2.3126
-17.3476	-16.2663	-6.9203
5.644	8.1632	9.7842
-10.439	0.5041	3.8731
1.8918	-0.4304	0.5
-17.1741	-15.3048	-10.9246
-6.186	-4.13	0.3707
12.6437	14.4377	19.8703
11.2971	2.1757	3.9385
6.636	1.8307	0.0827
3.8548	4.3496	6.8513
6.3838	4.015	4.9391
10.5462	-2.6103	-2.4956
7.5563	3.8827	-0.2774

Table 3: Comparison the error with different equation model on response surface method

Error from linear equation	Error from quadratic equation	Error from cubic equation
2.5881	2.235	10.8689
15.5112	6.6828	2.0508
6.3842	6.4829	5.5589
6.8265	9.3149	9.4833
10.2522	10.7225	4.8416
8.9448	10.5022	11.0169
4.9335	6.5531	5.71
11.8162	10.9707	4.4277
9.1605	3.2214	-0.9084
7.3465	-2.2744	0.7725
-0.5142	-5.092	2.4107
-4.3533	-1.5777	2.6393
-2.7876	-1.3794	5.0051
-5.4982	-3.1811	-0.8131
-5.7987	-2.2674	-3.5602
-4.0694	-2.689	5.4086
-11.2504	-6.5613	-7.3996
-12.2732	-7.9481	-2.2508
3.846	7.3448	-1.9328
-6.2416	-5.2354	-1.6517
-9.1662	-8.489	-5.7226
1.0527	6.5991	4.0081
13.5497	16.2945	22.6793
-1.2213	2.3554	-0.2149

For this paper, the response function with the first-order polynomials from equation (12) is

$$y = 679.1520 + 0.2486x_1 + 1.4018x_2 - 4.2549x_3 \tag{18}$$

The quadratic response function from equation (13) is

$$y = (-60830) + (-6.4469)x_1 + (98.189)x_2 + (1049.6)x_3 + (0.019073)x_1x_2 + (0.051547)x_1x_3 + (-0.94989)x_2x_3 + (0.0018346)x_1^2 + (0.3572)x_2^2 + (-4.5033)x_3^2 \tag{19}$$

The cubic response function is from equation (14) is

$$\begin{aligned}
 y = & (8.2015e+006) + (-2796.2)x_1 + (-11704)x_2 \\
 & + (-2.0779e+005)x_3 + (5.2532)x_1x_2 \\
 & + (47.321)x_1x_3 + (200.53)x_2x_3 + (-0.025587)x_1^2 \\
 & + (-11.763)x_2^2 + (1754.6)x_3^2 + (-0.035694)x_1x_2x_3 \\
 & + (-0.032769)x_1^2x_2 + (0.0031139)x_1^2x_3 \\
 & + (0.24306)x_1x_2^2 + (-0.20375)x_1x_3^2 + (0.22478)x_2^2x_3 \\
 & + (-0.87786)x_2x_3^2 + (0.00035003)x_1^3 + (-1.0499)x_2^3 \\
 & + (-4.9363)x_3^3
 \end{aligned}$$

5 Conclusion

Gasifier system is an important part to produce fuel gas. It is the good way to know the function which can use to predict the results. This study applied the experimental data which have three inputs that entry the system are biomass consumption, ash discharge rate and air flow rate and the output of system is gas flow rate which means fuel gas that used in the internal combustion engine. In the results, cubic equation is better than linear and quadratic equation. So the represent equation of gasifier system for this experimental data is shown in equation (20).

6 Acknowledgement

The experimental data was supported by Center of Excellence in Biomass Suranaree University of Technology. Funding in this research was supported by Suranaree University of Technology Research and Development Funds.

References:

- [1] Sagues, C., Garcia-Bacaicoa, P. and Serrano, S., Automatic control of biomass gasifiers using fuzzy inference systems, *Bioresource Technology*, Vol.98, 2007, pp. 845-855.
- [2] Sheth, P.N. and Babu, B.V., Effect of Moisture Content on Composition Profiles of Producer Gas in Downdraft Biomass Gasifier, *Proceedings of International Congress Chemistry and Environment (ICCE)*, 2005, pp. 356-360.
- [3] Schuster, G., Loffler, G., Weigl, K. and Hofbauer, H., Biomass Steam Gasification-an Extensive Parametric Modeling Study, *Bioresource Technology*, 2001, pp. 71-79.
- [4] Ashok, S. and Balamurugan, P., Biomass Gasifier Based Hybrid Energy System for Rural Ares, *IEEE Canada Electrical Power Conference*, 2007, pp. 371-375.
- [5] Panote, W., Chun, C.F. and Chem, C.N., A Study on The Potential of Corn Cob Engine-Generator for Electricity Generation in Thailand, *Proceeding of IEEE TENCON'02*, 2002, pp. 1958-1961.
- [6] Bo, P.W., Zhen, X.H. and Tommi, R., A Novel Response Surface Method for Design Optimization of Electronic Packages, *6th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*, 2005, pp. 175-181.
- [7] Ruoning, X. and Zuomin, D., Fuzzy Modeling in Response Surface Method for Complex Computer Model Based Design Optimization, *Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Proceedings of the 2nd IEEE/ASME International Conference on*, 2006, pp. 1-6.
- [8] Yingjun, C., Gaowei, X., Dapeng, Z., Wenjie, Z. and Le, L., Thermal Analysis for Indirect Liquid Cooled Multichip Module Using Computational Fluid Dynamic Simulation and Response Surface Methodology, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.29, 2006, pp. 39-46.
- [9] Ke, L., Haobo, Q., Liang, G. and Yifei, S., Comparison of Stochastic Response Surface Method and Response Surface Method for Structure Reliability Analysis, *IEEE Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2009, pp. 172-175.
- [10] Laurent, J., Jabbar, M.A. and Lui, Q., Design Optimization of Permanent Magnet Motors Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithms, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.41, 2005, pp. 3928-3930.
- [11] Hsien-Chie, C., Wen-Hwa, C. and I-Chun, C., Integration of Simulation and Response Surface Methods for Thermal Design of Multichip Modules, *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, Vol.27, 2004, pp. 359-372.
- [12] Anil, K.R., Biomass Gasification, *Alternative Energy in Agriculture*, Vol.II, 1986, pp. 83-102.
- [13] Oonsivilai, R. and Oonsivilai, A., Probabilistic Neural Network Classification for Model β -Glucan Suspensions, *Proceedings of the 7th*

WSEAS Int. Conf. on Simulation, Modelling and Optimization, 2007, pp. 159-164.

- [14] Oonsivilai, A. and El-Hawary, M.E., Wavelet Neural Network Based Short Term Load Forecasting of Electric Power System Commercial Load, *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol.3, 1999, pp. 1223-1228.
- [15] Oonsivilai, A. and El-Hawary, M.E., A Self-organizing Fuzzy Power System Stabilizer, *Proceedings of the 1998 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol.1, 1998, pp. 197-200.
- [16] Oonsivilai, A. and El-Hawary, M.E., Power System Dynamic Load Modeling using Adaptive- Network- Based Fuzzy Inference System, *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol.3, 1999, pp. 1217-1222.
- [17] Marungsri, B., Meeboon, N., and Oonsivilai, A., Dynamic Model Identification of Induction Motors using Intelligent Search Techniques with taking Core Loss into Account, *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, Vol.1, 2006.
- [18] Marungsri, B. and Oonsivilai, A., Fuzzy ArtMap technique for speech noise reduction, *WSEAS*, 2007.
- [19] Oonsivilai, A. and Marungsri, B., Optimal PID Tuning for AGC system using Adaptive Tabu Search, *WSEAS. Sep 15-17, Beijing, China*.
- [20] Oonsivilai, A. and Oonsivilai, R., Genetic Algorithm Approach to Twin-Screw Food Extrusion Process Frequency Domain Parameter Estimation, *Proceeding of the 7th WSEAS International Conference on Applied Computer and Applied Computational Science (ACACOS'08)*, 2008, pp. 645-650.
- [21] Pao-La-Or, P., Kulworawanichpong, T. and Oonsivilai, A., Bi-objective intelligent optimization for frequency domain parameter identification of a synchronous generator, *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, Vol.3, 2008.
- [22] Oonsivilai, A. and Pao-La-Or, P., Application of adaptive tabu search for optimum PID controller tuning AVR system, *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, Vol.3, 2008, pp. 495-506.
- [23] Oonsivilai, A. and Marungsri, B., Application of artificial intelligent technique for partial discharges localization in oil insulating transformer, *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, Vol. 8, 2008, pp. 920-929.
- [24] Greyson, K.A. and Oonsivilai, A., Identification of critical measurements in power system network, *Proc. IEEE Power System & Conference and Exposition (PSCE)*, 2009, pp. 1-6.
- [25] Oonsivilai, A. and Oonsivilai, R., A genetic algorithm application in natural cheese products, *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, Vol. 8, 2009, pp. 44-54.
- [26] Greyson, K.A. and Oonsivilai, A., Alternative technique of classifying PMUs at optimal environment in power system, *WSEAS TRANSACTIONS on Power Systems*, Vol. 3, 2008, pp. 643-652.
- [27] Oonsivilai, A. And Pao-La-Or, P., Optimum PID Controller tuning for AVR System using Adaptive Tabu Search, *12th WSEAS CSCC July 18-20, 2008*.
- [28] Oonsivilai, A. and Marungsri, B., Optimal PID tuning for power system stabilizer using adaptive particle swarm optimization technique, *12th WSEAS CSCC July 18-20, 2008*.
- [29] Oonsivilai, A. and Oonsivilai, R., Parameter Estimation of Frequency Response Twin-Screw Food Extrusion Process using Genetic Algorithm, *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, Vol. 7, 2008.
- [30] Xavier, P. and Andreu, C., Learning Fault Tolerance in Radial Basis Function Networks, *Proceedings of European Symposium on Artificial Neural Networks Bruges (Belgium)*, 2001, pp. 341-346.
- [31] Hafizah, H., Marzuki, K. and Rubiyah, Y., Nonlinear Function Approximation using Radial Basis Neural Networks, *Student Conference on Research and Development Proceedings*, 2002, pp. 326-329.
- [32] Leonid, R. and Anthony, L., Choice of the Radial Basis Function Approximation in Neural Networks Used for Fuzzy System Implementation, *IEEE*, 2001, pp. 3032-3037.
- [33] Bing, Y. and Xingshi, H., Training Radial Basis Function Networks with Differential Evolution, *Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.11, 2006, pp.157-160.
- [34] Jea-Rong, T., Pau-Choo, C. and Chein-I, C., A Sigmoidal Radial Basis Function Neural Network For Function Approximation, *IEEE*, 1996, pp.496-501.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิตต์รัตน์ สชนเสาวภาคย์ เกิดเมื่อวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เมื่อปีการศึกษา 2550 โดยได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 8 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 รวมทั้งปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการอนุรักษ์พลังงานในโรงไฟฟ้าชีวมวล และงานระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในขณะศึกษา:

1. Response Surface Method Application in Gasifier System Identification for Biomass Power Plants
2. Gasifier System Identification for Biomass Power Plants Using Neural Network
3. Estimation missing air flow rate model of biomass gasifier using Neural Network