

ระบบควบคุมสำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมแบบเซลล์เดี่ยว



นางสาว วราภรณ์ เริงฤทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4643-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A CONTROL SYSTEM FOR A SINGLE-CELL PEMFC TEST STATION

Miss Warapron Rernglit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University


Academic Year 2005

ISBN 974-17-4643-1

481714

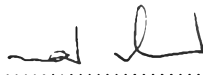
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบควบคุมสำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดียว
โดย นางสาว วราภรณ์ เริงฤทธิ์
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

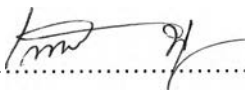

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤชาทร)

วราภรณ์ เรืองฤทธิ์ : ระบบควบคุมสำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์แบบเซลล์เดี่ยว (A CONTROL SYSTEM FOR A SINGLE-CELL PEMFC TEST STATION)
 อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 119 หน้า. ISBN 974-17-4643-1

งานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบนิรพลเน็ตเวิร์กเทียมของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์แบบเซลล์เดี่ยวเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุต โครงสร้างของนิรพลเน็ตเวิร์กประกอบด้วยชั้นอินพุตจำนวน 4 โหนด ชั้นซ่อนจำนวน 4 โหนด โดยใช้ฟังก์ชัน \tanh -sigmoid เป็นแอคติเวชันฟังก์ชันและมีชั้นเอาต์พุตจำนวน 3 โหนด ซึ่งใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นเป็นแอคติเวชันฟังก์ชัน กำหนดให้ค่าอุณหภูมิของเซลล์ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและค่าความหนาแน่นกระแสเป็นข้อมูลทางด้านอินพุต ส่วนข้อมูลทางด้านเอาต์พุตประกอบด้วยอัตราการเกิดน้ำ ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น วิธีการฝึกนิรพลเน็ตเวิร์กเป็นแบบ Levenberg-Marquardt back propagation (LMBP) ซึ่งส่งผลให้การเรียนรู้ของเน็ตเวิร์กมีอัตราการลู่เข้าสู่ค่าที่กำหนดตามค่าเป้าหมายได้เร็ว และได้ค่าสมรรถนะดีกว่าค่าเป้าหมาย แบบจำลองนิรพลเน็ตเวิร์กที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นเสมือนหน่วยทดสอบเพื่อทำการจำลองระบบควบคุมกระบวนการแบบพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิง จากการทดลองได้ระบบควบคุมที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ๆ ได้

ภาควิชา..... เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต..... 3510301..... ๒๖.๖.๖๖.....
 สาขาวิชา..... เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..... 2548.....

4572477123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : PEMFC / FUEL CELL / SIMULATION / ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

WARAPRON RERNGLIT: A CONTROL SYSTEM FOR A SINGLE-CELL PEMFC

TEST STATION. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.DR.PORNPOTE

PIUMSOMBOON, Ph.D., 119 pp. ISBN 974-17-4643-1

This thesis is to develop an artificial neural network (ANN) model of a single-cell PEM fuel cell test station for predicting the relationship of input variables and output variables. The architecture of neural network is consisted of 4 nodes of input layer, 4 nodes of a hidden layer with tanh-sigmoid activation functions and three nodes of output layer with linear activation function. Specify the cell temperature, flow of hydrogen, flow of oxygen and current density as inputs, with water production, cell voltage and power as outputs. To train the network, Levenberg-Marquardt back propagation (LMBP) was used since it is an efficient method. The solution was quickly converge and better target was achieved. The obtained ANN was used as a process model for designing a control system. The system was tested and its performance was satisfactory.

DepartmentChemical Technology ... Student's signature Warapron Rernglit

Field of studyChemical Technology ... Advisor's signature 

Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ หากขาดความช่วยเหลืออันดียิ่งของท่านรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้มอบคำแนะนำในทุก ๆ ด้าน ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง, ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ในกลุ่มงานวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่คอยให้คำแนะนำ และคอยให้กำลังใจมาตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัย จนกระทั่งมีวันนี้ได้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือในทุกปัญหาที่เกิดขึ้น

สุดท้ายขอขอบคุณคุณพ่อ-คุณแม่และน้อง ๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือเสมอมาตั้งแต่เกิดจนถึงทุกวันนี้

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
2 วิธีการพัฒนาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	3
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	3
2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	3
2.3 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	5
2.4 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	6
2.4.1 อิทธิพลของน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์.....	6
2.4.2 อิทธิพลของความดันแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดและแคโทด.....	7
2.4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	8
2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ.....	8
2.6 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	9
2.6.1 ศักย์ไฟฟ้าสมดุล	10
2.6.2 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี	12
2.6.3 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า	15
2.6.4 ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องจากความเข้มข้น	16
2.6.5 อัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	16

บทที่	หน้า
2.6.6 อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	17
2.6.7 อัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3 วิธีการพัฒนาแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียม	22
3.1 เครือข่ายประสาทธรรมชาติ	22
3.2 เซลล์ประสาทธรรมชาติ	23
3.3 เครือข่ายประสาทเทียม	24
3.4 แอคติเวชันฟังก์ชัน	26
3.4.1 ฟังก์ชันเทรชโฮลด์ (Threshold function)	26
3.4.2 ฟังก์ชันเชิงเส้นอิ่มตัว (Saturating Linear function)	26
3.4.3 ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function)	27
3.5 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาท (Neural network architecture)	28
3.5.1 เครือข่ายป้อนสู่ด้านหน้าชั้นเดียว (Single-layer feedforward networks) ..	29
3.5.2 เครือข่ายป้อนสู่ด้านหน้าหลายชั้น (Multilayer feedforward networks)	29
3.6 การเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียม (Neural network learning)	31
3.6.1 การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised learning)	31
3.6.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised learning)	32
3.7 เครือข่ายเพอร์เซพตรอน (Perceptron network)	32
3.7.1 โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายเพอร์เซพตรอน	32
3.7.2 กฎการเรียนรู้ของเพอร์เซพตรอน (Perceptron learning rule)	33
3.7.3 กฎการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์เดสเซนต์ (Gradient descent learning)	34
3.7.4 กฎการเรียนรู้แบบการแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error back-propagation learning rule)	35
3.7.5 วิธีการฝึกเครือข่ายแบบ Levenberg-Marquadt	39
3.8 ปัจจัยที่มีต่อการปรับสอน	40
3.8.1 จำนวนชั้นซ่อน	40
3.8.2 จำนวนหน่วยของชั้นซ่อน	40
3.8.3 จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการปรับสอน	40
3.8.4 ค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้น	41

บทที่	หน้า
3.9 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียม.....	41
3.9.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของนิวรอลเน็ตเวิร์ก (Neural network modeling).....	41
3.9.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่มตามลักษณะโครงสร้างนิวรอลเน็ตเวิร์ก	42
3.10 การสร้างระบบควบคุมของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่ม.....	43
4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	44
4.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	44
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
4.2.1 หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	44
4.2.2 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat	46
4.2.3 เซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ	47
4.2.4 เซนเซอร์วัดความดันแตกต่าง.....	49
4.2.5 เซนเซอร์วัดความดัน	51
4.2.6 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส.....	51
4.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	52
4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	52
4.3.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง.....	54
4.4 การสร้างแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์กเทียมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่ม	55
5 ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	57
5.1 แบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์กเทียมจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่ม	57
5.1.1 ผลการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กด้วยข้อมูลจากแบบจำลองทางกายภาพ	58
5.1.1.1 ผลของฟังก์ชันการฝึกของนิวรอลเน็ตเวิร์ก	58
5.1.1.2 ผลของจำนวนโหนดในชั้นซ่อน	60
5.1.1.3 การฝึกเน็ตเวิร์กด้วยข้อมูล 400 ชุด	61
5.1.1.4 การฝึกเน็ตเวิร์กด้วยข้อมูล 800 ชุด	67
5.2 การฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กด้วยข้อมูลจากการทดลอง	74
5.2.1 ภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2	75
5.2.2 ภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4	82
5.3 ระบบควบคุมของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็่ม	89

บทที่	หน้า
5.3.1 ผลของการปรับแต่งเครื่องควบคุมโดยวิธีวงควบคุมแบบเปิด	89
5.3.2 ผลของการปรับแต่งเครื่องควบคุมโดยวิธีวงควบคุมแบบปิด.....	92
5.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุม	98
5.4.1 ความทนทานของการควบคุม.....	98
5.4.2 ความเร็วในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย.....	98
6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	100
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	108
ภาคผนวก ค.....	111
ภาคผนวก ง	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	119

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	9
2.2 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับสมการของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง	18-19
3.1 เปรียบเทียบระหว่างนิรพลธรรมชาติและแบบจำลองนิรพล.....	25
4.1 ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ	48
4.2 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น.....	48
4.3 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ.....	49
4.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ASP 1400 เซนเซอร์.....	50
4.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์วัดความดัน	51
5.1 จำนวนข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพเพื่อใช้ในการฝึกแบบจำลอง.....	58
5.2 ค่าสมรรถนะของนิรพลเน็ตเวิร์กเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดในชั้นซ่อน.....	60
5.3 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิรพลเน็ตเวิร์กในชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อน สำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด	63
5.4 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิรพลเน็ตเวิร์กในชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อน สำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด	69
5.5 ภาวะการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิง.....	74
5.6 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิรพลเน็ตเวิร์กในชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อนและชั้นซ่อนไป ยังชั้นเอาต์พุตสำหรับการฝึกข้อมูลของสภาวะการทดลองที่ 1 และสภาวะการทดลองที่ 2.....	78
5.7 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิรพลเน็ตเวิร์กในชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อนและชั้นซ่อนไป ยังชั้นเอาต์พุตสำหรับการฝึกข้อมูลของสภาวะการทดลองที่ 3 และสภาวะการทดลองที่ 4.....	85
1ก ตัวอย่างข้อมูลที่นำไปฝึกนิรพลเน็ตเวิร์ก.....	107
1ค ตัวอย่างข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองเพื่อนำไปฝึกนิรพลเน็ตเวิร์ก.....	111
2ค ตัวอย่างข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองเพื่อนำไปฝึกนิรพลเน็ตเวิร์ก เมื่อมีค่าความดันแตกต่างกัน	114

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	4
2.2 โพลีเมอร์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	5
2.3 ปฏิกิริยาการไหลของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ.....	7
3.1 องค์ประกอบของเครื่องจ่ายประสาทของสมอมนุษย์.....	22
3.2 เซลล์ประสาทอย่างง่าย.....	23
3.3 เซลล์ประสาทเทียมอย่างง่าย.....	25
3.4 ฟังก์ชันเทอร์สโสด.....	26
3.5 ฟังก์ชันเชิงเส้นอิมิตว.....	27
3.6 ฟังก์ชันลอจิสติกที่ค่าความชันต่าง ๆ.....	28
3.7 แบบจำลองนิรอรอย่างง่าย.....	28
3.8 เครื่องจ่ายป้อนสู่อ้านหน้าชั้นเดียว.....	29
3.9 เครื่องจ่ายป้อนสู่อ้านหน้าหลายชั้น.....	30
3.10 เครื่องจ่ายเพอร์เซฟตรอน.....	33
3.11 เครื่องจ่ายประสาทแบบป้อนไปข้างหน้าที่มี 2 ชั้น.....	35
3.12 แผนภูมิแสดงการทำงานของเครื่องจ่ายประสาทเทียมที่ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ แพร่กระจายความผิดพลาดกลับ.....	39
3.13 โครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้น.....	41
3.14 โครงสร้างนิรอรเน็ตเวิร์กของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม.....	42
3.15 ระบบควบคุมหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	43
4.1 แผนผังของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	45
4.2 แผนผังของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อติดอุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ.....	46
4.3 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat.....	47
4.4 Humidity & Temperature sensor.....	47
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง SO_{RH} กับร้อยละของความชื้น.....	49
4.6 Bidirectional differential pressure meter.....	50
4.7 กราฟแสดงลักษณะของการวัดค่าของ ASP1400 เซนเซอร์.....	50
4.8 Pressure sensor.....	51
4.9 Mass flow controller.....	52
4.104-channel readout.....	52

ภาพประกอบ	หน้า
5.1 ค่าสมรรถนะของนิรอลเน็ตเวิร์กที่มีวิธีฝึกต่างกัน.....	59
5.2 ความผิดพลาดกำลังของสองโดยวิธีการฝึกแบบ Levenberg-Marquadt BP สำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด	62
5.3 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิรอลเน็ตเวิร์กสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด.....	63
5.4 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด.....	64
5.5 อัตราการเกิดน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด	65
5.6 กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด.....	65
5.7 เปรียบเทียบค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิรอลเน็ตเวิร์กกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด.....	66
5.8 การเปรียบเทียบค่าผลต่างของอัตราการเกิดน้ำระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิรอลเน็ตเวิร์กกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด.....	66
5.9 การเปรียบเทียบค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิรอลเน็ตเวิร์กกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 400 ชุด.....	67
5.10 ค่าความผิดพลาดกำลังของสองโดยวิธีการฝึกแบบ Levenberg-Marquadt BP สำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด	68
5.11 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิรอลเน็ตเวิร์กสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด.....	69
5.12 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด.....	70
5.13 อัตราการเกิดน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด	71
5.14 กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด.....	71
5.15 เปรียบเทียบค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิรอลเน็ตเวิร์กกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด	72
5.16 การเปรียบเทียบค่าผลต่างของอัตราการเกิดน้ำระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิรอลเน็ตเวิร์กกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด.....	72
5.17 การเปรียบเทียบค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิรอลเน็ตเวิร์กกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 800 ชุด	73
5.18 โพลาริเซชันที่ได้จากการทดลอง.....	75
5.19 ค่าความผิดพลาดกำลังของสองโดยวิธีการฝึกแบบ Levenberg-Marquadt BP สำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 817 ชุด	76

ภาพประกอบ	หน้า
5.20 คำน้่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิวรอลเน็ตเวิร์กสำหรับสำหรับภาวะ การทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	77
5.21 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	79
5.22 อัตราการเกิดน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	79
5.23 กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	80
5.24 เปรียบเทียบค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์ก กับค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	80
5.25 การเปรียบเทียบค่าผลต่างของอัตราการเกิดน้ำระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิวรอลเน็ตเวิร์กกับค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	81
5.26 การเปรียบเทียบค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง นิวรอลเน็ตเวิร์กกับค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับภาวะการทดลองที่ 1 และภาวะการทดลองที่ 2.....	81
5.27 โครงสร้างนิวรอลเน็ตเวิร์กของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มเมื่อเพิ่มตัวแปรอินพุต.....	82
5.28 ค่าความผิดพลาดกำลังของสองโดยวิธีการฝึกแบบ Levenberg-Marquadt BP สำหรับการฝึกข้อมูลจำนวน 404 ชุด.....	83
5.29 คำน้่าน้ำหนักในแต่ละโหนดของนิวรอลเน็ตเวิร์กสำหรับสำหรับภาวะ การทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4.....	84
5.30 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4.....	86
5.31 อัตราการเกิดน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4.....	86
5.32 กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4.....	87

ภาพประกอบ	หน้า
5.33เปรียบเทียบค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองนิวโรลเน็ตเวิร์กกับค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4	87
5.34การเปรียบเทียบค่าผลต่างของอัตราการเกิดน้ำระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองนิวโรลเน็ตเวิร์กกับค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4	88
5.35การเปรียบเทียบค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองนิวโรลเน็ตเวิร์กกับค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับภาวะการทดลองที่ 3 และภาวะการทดลองที่ 4	88
5.36ระบบควบคุมของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยวแบบวงปิด	90
5.37ระบบควบคุมของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยวแบบวงเปิด	90
5.38การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน.....	91
5.39ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน.....	91
5.40อัตราการเกิดกำลังไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.3	93
5.41 อัตราการเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.3	93
5.42 อัตราการเกิดน้ำเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.3	94
5.43 อัตราการเกิดกำลังไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.6.....	95
5.44 อัตราการเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.6	95
5.45 อัตราการเกิดน้ำเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.6	96
5.46 อัตราการเกิดกำลังไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.9	97
5.47 อัตราการเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.9	97
5.48 อัตราการเกิดกำลังไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 0.1 ถึง 0.9.....	98
1ข การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรขาเข้า	108
2ข การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของตัวแปรขาเข้า	108
1ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง.....	112
2ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง.....	112

ภาพประกอบ	หน้า
3ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าอัตราการเกิดน้ำที่ได้ จากการทดลอง.....	113
4ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ได้จากการทดลอง	113
5ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ จากการทดลอง.....	115
6ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ จากการทดลอง.....	115
7ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าอัตราการเกิดน้ำที่ได้ จากการทดลอง.....	116
8ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ได้จากการทดลอง	116
9ค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าความดันแตกต่าง ทางด้านแคโทด.....	117