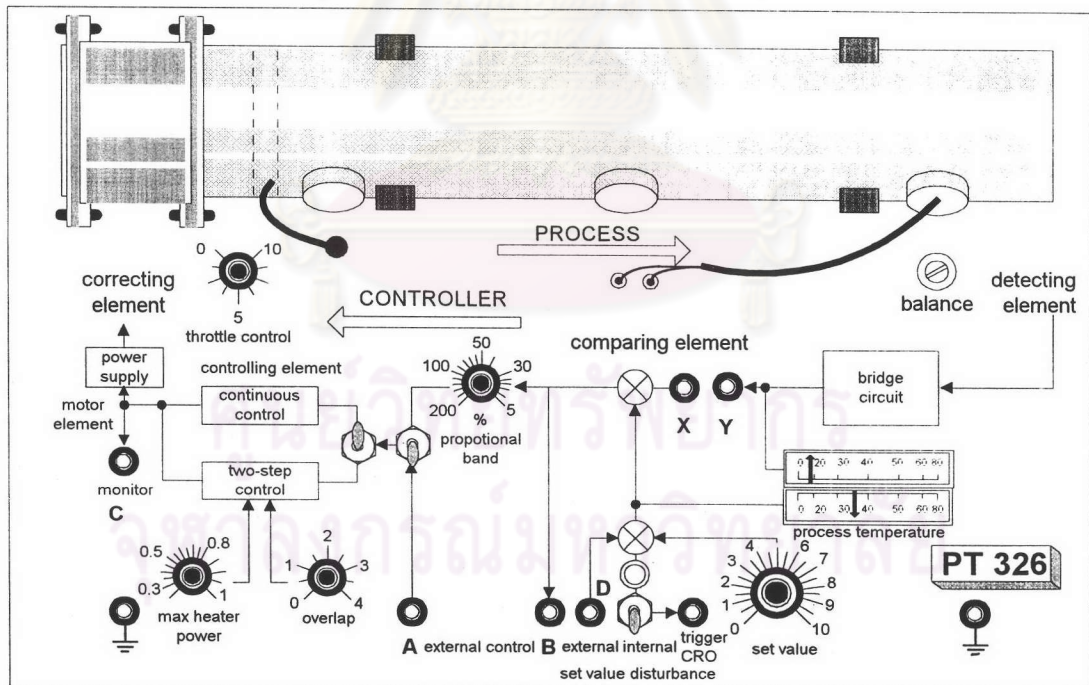


บทที่ 4

ผลการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

ในบทนี้กล่าวถึงผลทดสอบการประยุกต์เครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์และการควบคุมซึ่งกล่าวในบทที่ 3 กับชุดทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริงเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี

4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน [24]



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Process)

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรักษาอุณหภูมิขาออกให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตั้งไว้

โดยอาศัยการทำงานของพัลลิมซึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศให้เข้าไปหมุนเวียนในท่อหน้าอากาศ โดยอัตราการไหลเวียนของกระแสอากาศภายในจะเป็นไปอย่างคงที่ สามารถปรับตั้งปริมาณอากาศที่เข้าไปได้ผ่านทาง Throttle Control กระแสอากาศที่ได้จะไหลผ่านเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าซึ่งอยู่ในท่อหน้า โดยเครื่องทำความร้อนนี้จะมีไทรสเตอร์เป็นตัวขับเร้าและสร้างกำลังให้แก่เครื่องทำความร้อนโดยสอดคล้องกับค่าสัญญาณควบคุมที่รับมา กระแสอากาศที่ได้จะไหลไปตามท่อจนถึงตัววัดอุณหภูมิของอากาศ (เทอร์มิสเตอร์) ซึ่งอยู่ที่ปากท่อ และทำการแปลงอุณหภูมิของอากาศที่ได้โดยผ่านวีตสไตน์บริดจ์เพื่อให้ได้ค่าแรงดันของสัญญาณที่สอดคล้องกับอุณหภูมินั้นๆ และนำไปใช้ในกระบวนการควบคุมต่อไป

4.2 รายละเอียดเบื้องต้นของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

รายละเอียดเบื้องต้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงในตารางที่ 4.1

ลักษณะโดยทั่วไป	พิสัยแรงดันสัญญาณเข้า	0 ถึง +10 โวลท์
	พิสัยแรงดันสัญญาณออก	0 ถึง +10 โวลท์
	ไหลลดต้านทานต่ำสุดบนช่องออกใดๆ	5 กิโลโอมห์
	พิสัยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	0 ถึง 80 องศาเซลเซียส
กระบวนการ	อัตราการไหลของกระแสอากาศ	1 ถึง 10 ฟุต/วินาที
	พิสัยกำลังของเครื่องทำความร้อน	15 ถึง 80 วัตต์
	พิสัยอุณหภูมิของอากาศที่ควบคุม	30 ถึง 60 องศาเซลเซียส
	Distance/Velocity lag	0.18 วินาที
ตัวควบคุม	พิสัยการปรับค่าตั้ง	0 ถึง 10 โวลท์
	พิสัยค่าอุณหภูมิตั้ง	30 ถึง 60 องศาเซลเซียส
	พิสัยค่าอุณหภูมิที่วัดได้	30 ถึง 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

4.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครือข่ายนิรอนกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเครือข่ายนิรอนกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง จำแนกได้ 3 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่

4.3.1 อุปกรณ์แปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลข (Digital Signal) และสัญญาณเชิงอุปมา (Analog Signal) : (A to D and D to A Converter)

ตัวแปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลขและสัญญาณเชิงอุปมาที่ใช้เป็นแผ่นวงจร AT-MIO16-L9 ของบริษัท National Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถรับสัญญาณเชิงอุปมาในช่วง -10 ถึง 10 โวลท์กระแสตรง แปลงเป็นสัญญาณเชิงเลขความละเอียด 12 บิต จำนวน 8 ช่อง และสามารถแปลงสัญญาณเชิงเลขความละเอียด 12 บิตกลับเป็นสัญญาณเชิงอุปมาในช่วง -10 ถึง 10 โวลท์กระแสตรง จำนวน 2 ช่อง

อุปกรณ์ชุดดังกล่าวใช้ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับชุดทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่นำมาทดสอบกับระบบควบคุมที่ออกแบบไว้

4.3.2 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ PC/AT รุ่น 486DX2-66 ซึ่งมีหน่วยประมวลผลร่วมคณิตศาสตร์รวมไว้ในตัว และติดตั้งตัวแปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลขและสัญญาณเชิงอุปมา ดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.3.1

4.3.3 โปรแกรมเครือข่ายนิรอน

โปรแกรมเครือข่ายนิรอนที่ใช้ในการทดสอบถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม Borland C++ รุ่น 3.1 ภายใต้ระบบปฏิบัติการ MS-DOS รุ่น 6.2

4.4 ลักษณะของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการทดสอบ

เครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครือข่ายนิวรอนชนิด Backpropagation ซึ่งใช้วิธีการเรียนรู้โดยอาศัยการแนะนำ (Supervised Learning) เนื่องจากเป็นเครือข่ายที่มีความสามารถในการประมาณค่าฟังก์ชันและสร้างความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันได้จากชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกให้เรียนรู้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มจำนวนชั้นและปมได้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เครือข่ายนิวรอนสามารถจำแนกรูปแบบที่ซับซ้อนหรือประมาณค่าฟังก์ชันที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 กฎการเรียนรู้ที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายซึ่งได้แก่ ค่าน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นวิธี Delta-Bar-Delta เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับมีอัตราการเรียนรู้เป็นของตนเอง และมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้ขึ้นกับทิศการเปลี่ยนแปลงเกรเดียนท์ของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับ ทำให้การปรับค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.7

Activation Function ที่กำหนดในแต่ละปมนิวรอนของเครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบได้เลือกเป็นฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Activation Function) เนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่องมีค่าจำกัดและสามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ตลอดช่วง ทำให้สามารถใช้เทคนิคการอพติไมซ์แบบเกรเดียนท์ในการสร้างอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครือข่ายนิวรอนชนิด Backpropagation ซึ่งเขียนแทนดังสมการที่ 2.6 ในบทที่ 2 โดยสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันซิกมอยด์มีค่าเป็น 1 สำหรับเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์ และมีค่าเป็น 0.9 สำหรับเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม เนื่องจากเครือข่ายนิวรอนที่สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันซิกมอยด์มีค่าน้อยจะทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณออกจากปมนิวรอนมีช่วงกว้าง ทำให้เครือข่ายนิวรอนเรียนรู้ได้ช้ากว่าเครือข่ายนิวรอนที่ฟังก์ชันซิกมอยด์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่า [15] ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิงแบบเดิม โดยส่วนของการหาเอกลักษณ์จะต้องตอบสนองได้เร็วกว่าในส่วนของตัวควบคุม นอกจากนี้สัญญาณเอาต์พุตจากฟังก์ชันซิกมอยด์มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเปลี่ยนจาก $-\infty$ ถึง ∞ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการสัญญาณเอาต์พุตที่อยู่นอกช่วง 0 ถึง 1 จึงจำเป็นต้องเพิ่มส่วนของการแปลงพิสัยขนาดของสัญญาณเอาต์พุตให้อยู่ภายในช่วงที่กำหนด (Scaling Interval) แสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ 4.1-4.3

$$O = \eta(I - I_{\min}) + O_{\min} \dots\dots\dots (4.1)$$

หรือ

$$O = -\eta(I_{\max} - I) + O_{\max} \dots\dots\dots (4.2)$$

โดยที่

$$\eta = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \dots\dots\dots (4.3)$$

กำหนดให้

- O_{\max} ขีดจำกัดบนของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต
- O_{\min} ขีดจำกัดล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต
- O สัญญาณเอาต์พุต
- I_{\max} ขีดจำกัดบนของพิสัยสัญญาณอินพุต
- I_{\min} ขีดจำกัดล่างของพิสัยสัญญาณอินพุต
- I สัญญาณอินพุต
- η อัตราส่วนความแตกต่างระหว่างขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุตต่อความแตกต่างระหว่างขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณอินพุต

จากหลักการแปลงพิสัยดังกล่าวนำไปประยุกต์ใช้ในการแปลงพิสัยของสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากปมนิวรอนซึ่งเขียนแทนด้วยฟังก์ชันซิกมอยด์ดังกล่าว ดังนี้

สัญญาณเอาต์พุตจาก Sigmoid Activation หลังจากการแปลงพิสัย (O) ให้อยู่ในช่วง O_{\max} และ O_{\min} (Scaling Interval : $[O_{\max}, O_{\min}]$) คำนวณดังสมการที่ 4.4 หรือ 4.5

$$O = \eta I + O_{\min} \dots\dots\dots (4.4)$$

หรือ

$$O = -\eta(1 - I) + O_{\max} \dots\dots\dots (4.5)$$

โดยที่

$$\eta = O_{\max} - O_{\min} \dots\dots\dots (4.6)$$

4.5 การทดสอบเครือข่ายนิวรอนกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

การทดสอบวิธีการควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิงด้วยเครือข่ายนิวรอนแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนของการทดสอบการใช้เครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์ (Neural Network Identification) และส่วนของการใช้เครือข่ายนิวรอนเพื่อเป็นตัวควบคุมในระบบควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิง (Neural Network Model-Reference Adaptive Control)

4.5.1 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์ (NN Identification)

การทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. ขั้นตอนการเตรียมชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกเครือข่ายนิวรอน

A) กำหนดจุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value) ที่อุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 6 บ้อนสัญญาณค่าตั้งภายนอก (External Set Value) เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ตำแหน่ง D ในรูปที่ 4.1 สองช่วง ได้แก่ สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Signal) และสัญญาณคลื่นไซน์ (Sin Wave) ขนาด $5 V_{pp}$ ความถี่ 0.1 Hz. ซึ่งครอบคลุมพิสัยอุณหภูมิของอากาศที่สามารถควบคุมได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 30 ถึง 45 องศาเซลเซียส ทำให้เครือข่ายนิวรอนสามารถเรียนรู้และสร้างความสัมพันธ์เลียนแบบกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตั้งภายนอกในลักษณะของคลื่นสี่เหลี่ยมและคลื่นไซน์ภายในช่วงที่กำหนดได้

B) เก็บข้อมูลอินพุตที่ตำแหน่ง B และข้อมูลเอาต์พุตที่ตำแหน่ง Y ในรูปที่ 4.1 จำนวน 1000 ชุด คาบเวลาชักตัวอย่าง (Sampling Period) เท่ากับ 40 มิลลิวินาที

C) ชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากข้างต้นเป็นเซตของข้อมูลที่ใช้ในการฝึก (Training Set) เครือข่ายนิวรอนเพื่อใช้ในการหาเอกลักษณ์ต่อไป

2. ขั้นตอนการฝึกเครือข่ายนิรอนเพื่อใช้ในการหาเอกลักษณ์

A) กำหนดลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์ เนื่องจากไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิรอน ดังนั้นจึงใช้วิธีการลองถูกลองพลาด (Trial and Error) โดยเริ่มจากลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยที่สุด และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความสามารถในการนำไปใช้งานกับระบบควบคุมในเวลาจริง ให้เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทดสอบการฝึกเครือข่ายนิรอนซึ่งมีจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ชั้นอินพุต ชั้นซ่อนภายใน และชั้นเอาต์พุต โดยมีจำนวนปมในชั้นอินพุตและจำนวนปมในชั้นเอาต์พุตเท่ากับ จำนวนสัญญาณเข้าและออกของเครือข่ายเพื่อใช้ในการหาเอกลักษณ์ตามสมการที่ 3.4 ซึ่งมีจำนวน 2 ปมและ 1 ปม ตามลำดับ โดยเปลี่ยนจำนวนปมนิรอนในชั้นซ่อนภายในเพื่อหาโครงสร้างของเครือข่ายนิรอนที่เหมาะสมที่สุดในการหาเอกลักษณ์ แสดงผลดังตารางที่ 4.2

จำนวนปม	ดรรชนีสมรรถนะ	เวลาในการเรียนรู้ต่อข้อมูล 1 ชุด (msec.)
2 x 5 x 1	0.0565	0.45
2 x 10 x 1	0.0350	0.65
2 x 15 x 1	0.0328	0.86
2 x 20 x 1	0.0310	1.09

Note

- จำนวนปมนิรอนในชั้นอินพุต x จำนวนปมนิรอนในชั้นซ่อนภายใน x จำนวนปมนิรอนในชั้นเอาต์พุต
- จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึก 1000 ชุด
- จำนวนรอบการเรียนรู้โดยประมาณ 5000 รอบ

ตารางที่ 4.2 แสดงทดสอบการฝึกเครือข่ายนิรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์

จากตารางที่ 4.2 เลือกเครือข่ายนิรอนที่มีปมในชั้นซ่อนภายในเท่ากับ 10 ปม เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ต่อข้อมูล 1 ชุดมีค่าน้อยกว่าเครือข่ายนิรอนที่มีปมในชั้นซ่อนภายใน 15 และ 20 ปมตามลำดับ ในขณะที่ดรรชนีสมรรถนะของการฝึกเครือข่ายมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อให้การเรียนรู้ของเครือข่ายนิรอนมีประสิทธิภาพและสามารถประยุกต์ใช้งานในเวลาจริงได้อย่างรวดเร็วจึงเลือกลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายดังแสดงในตารางที่ 4.3

Neural Network Identification Structure	
จำนวนชั้น	3
จำนวนปมในชั้นอินพุต	2
จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน	10
จำนวนปมในชั้นเอาต์พุต	1
Activation Function	$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$
Scaling Interval	2.0/8.0
Delta-Bar-Delta Learning	$\beta = 0.8546$
Parameter	$\gamma = 0.0456$
	$\kappa = 0.0025$

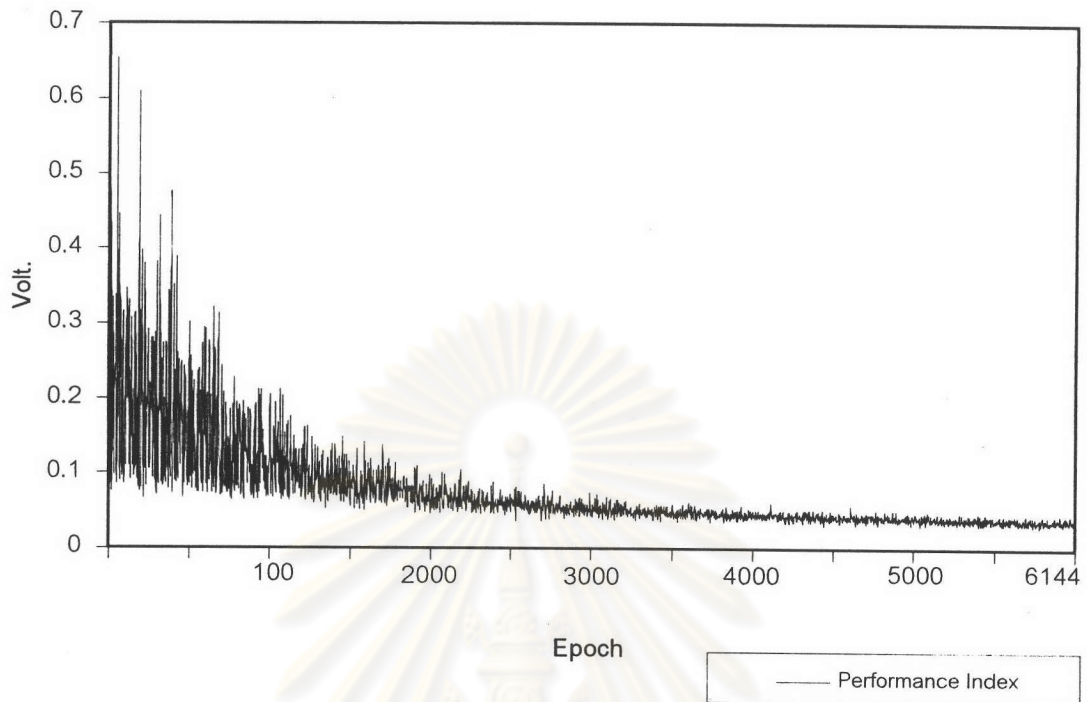
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์

B) ฝึกเครือข่ายนิวรอนโดยอาศัยเซตข้อมูลที่ใช้ในการฝึกจากข้อ 1(c) ผลการฝึกเครือข่ายโดยสรุปแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงดรชนีสมรรถนะของการฝึกเครือข่ายนิวรอนดังรูปที่ 4.2

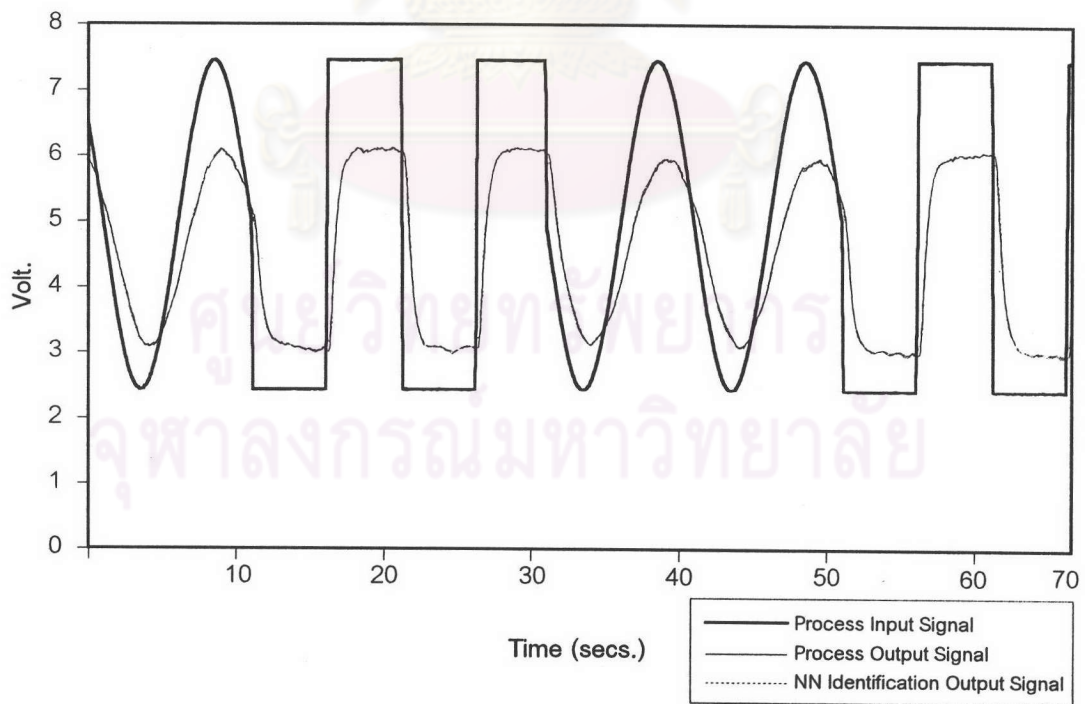
NN Identification Training Result	
Final Mean Sum Square Error	0.03366 V.
เวลาที่ใช้ในการฝึก	1.1097 Hr.
จำนวนรอบของการฝึก	6144 Epoch.

ตารางที่ 4.4 ผลการฝึกเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์

C) ทดสอบเครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์ด้วยชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกข้างต้น แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.3



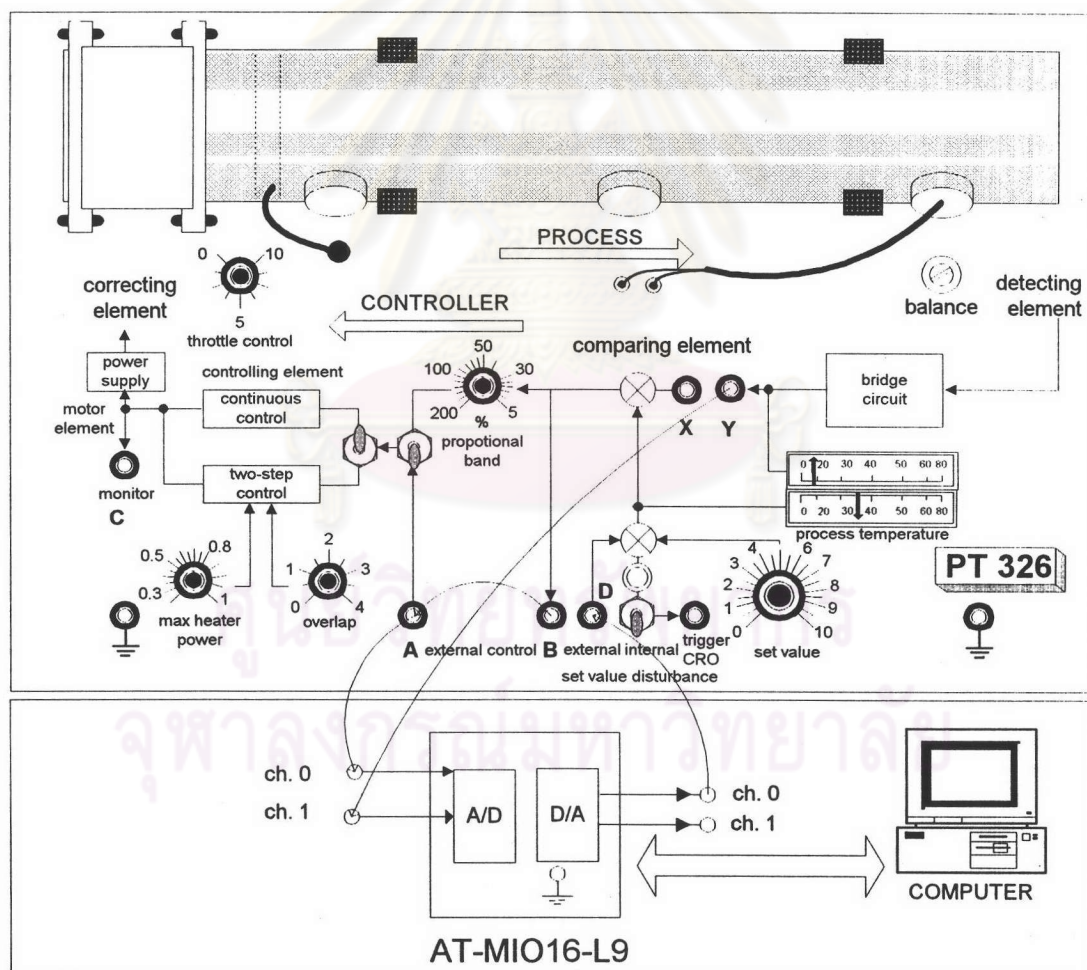
รูปที่ 4.2 แสดงดรชนีสมรรถนะขณะฝึกเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์



รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์

3. ขั้นตอนการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์ในเวลาจริง

A) ทดสอบเครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์ (Neural Network Identification) กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Process) โดยกำหนดค่าน้ำหนักและค่าไบแอสของเครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึก เป็นค่าเริ่มต้นในการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์กับกระบวนการทดลองจริง โดยใช้อุปกรณ์แปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลขและสัญญาณเชิงอุปมาเป็นตัวเชื่อมระหว่างโปรแกรมเครือข่ายนิวรอนที่ได้พัฒนาขึ้นบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์การทดลองในรูปที่ 4.4 โดยใช้คาบเวลาการซักตัวอย่าง (Sampling Period) เท่ากับ 40 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.4 แสดงการทดสอบเครือข่ายนิวรอนที่ได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง

B) การทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง เงื่อนไขการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

B.1) ผลทดสอบเนื่องจากการเปลี่ยนค่าตั้งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

กำหนดตำแหน่งจุดปรับตั้ง (Set Point) ที่ 5 V. และ 5.5 V. ป้อนสัญญาณค่าตั้งจากภายนอก (External Set Value) แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ความถี่ 0.05 Hz. ขนาด 1 V_{p-p}. และ 1.5 V_{p-p}. ที่ตำแหน่ง D ในรูปที่ 4.4 ซึ่งหมายถึงช่วงการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุตระหว่าง 4-6 V. และ 4-7 V. หรือการทดสอบภายในช่วงอุณหภูมิประมาณ 34 ถึง 38 องศาเซลเซียส และ 34 ถึง 42 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 6 แสดงผลดังรูปที่ 4.5-4.6 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตจากเครือข่ายนิรeronใกล้เคียงกับสัญญาณเอาต์พุตจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในบางช่วงอาจมีการคลาดเคลื่อนไปแต่เครือข่ายนิรeronยังสามารถเรียนรู้และสร้างสัญญาณเอาต์พุตได้ดีขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

B.2) ผลทดสอบเนื่องจากการเปลี่ยนค่าตั้งแบบรูปคลื่นไซน์

กำหนดตำแหน่งจุดปรับตั้ง (Set Point) ที่ 5 V. และ 5.5 V. ป้อนสัญญาณค่าตั้งจากภายนอก (External Set Value) แบบรูปคลื่นไซน์ (Sin Wave) ความถี่ 0.05 Hz. ขนาด 1 V_{p-p}. และ 1.5 V_{p-p}. ที่ตำแหน่ง D ในรูปที่ 4.4 ซึ่งหมายถึงช่วงการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุตระหว่าง 4-6 V. และ 4-7 V. หรือการทดสอบภายในช่วงอุณหภูมิประมาณ 34 ถึง 38 องศาเซลเซียส และ 34 ถึง 42 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 6 แสดงผลดังรูปที่ 4.7-4.8 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนสัญญาณค่าตั้งแบบรูปคลื่นไซน์ เครือข่ายนิรeronที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตได้ใกล้เคียงกับสัญญาณเอาต์พุตจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงสัญญาณอินพุต 4-6 V. และ 4-7 V. ได้ดี

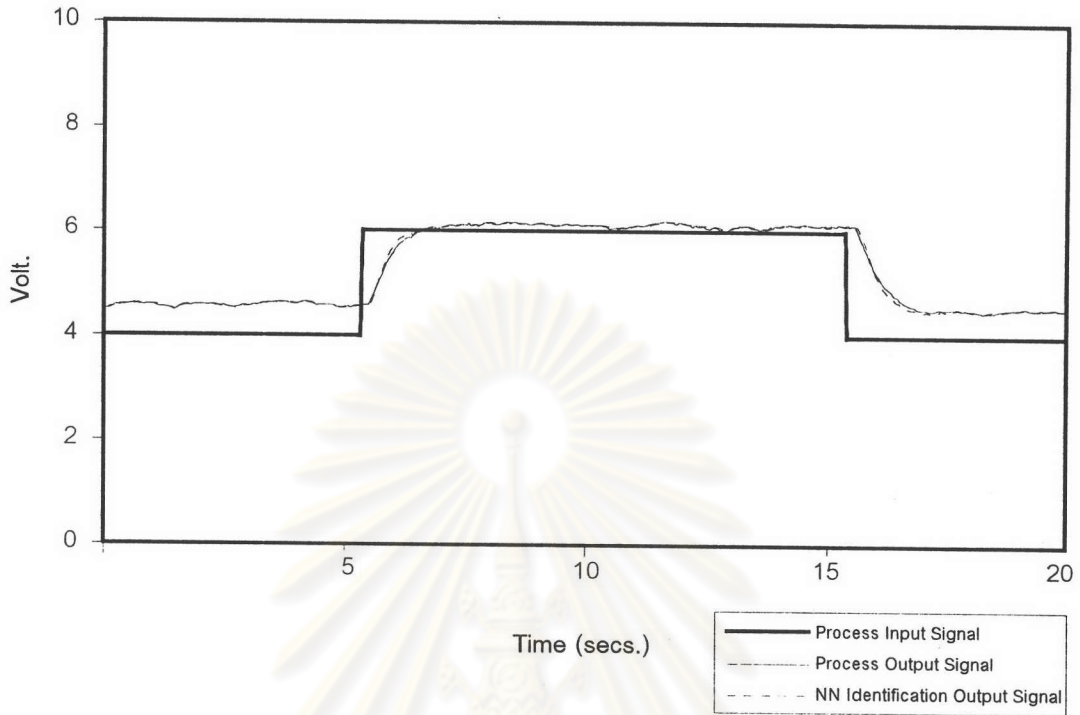
B.3) ผลทดสอบเนื่องจากการเปลี่ยน Load Disturbance

ผลเนื่องจากการเปลี่ยน Load Disturbance โดยการปรับปริมาณของอากาศที่เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างฉับพลันผ่านตำแหน่ง Throttle Control เมื่อทดสอบกับการเปลี่ยนค่าตั้งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) และคลื่นไซน์ (Sine Wave) ความถี่ 0.05 Hz. ขนาด 4-6 V. และ 4-7 V. ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.12 ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 6 ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยน Load Disturbance อย่างฉับพลัน เครื่องขยายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์ยังคงสามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตได้สอดคล้องกับสัญญาณเอาต์พุตจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ถึงแม้ว่าในช่วงการเปลี่ยน Load Disturbance จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องขยายนิวรอนพยายามเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและปรับค่าน้ำหนักและค่าไบแอสของเครื่องขยายให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

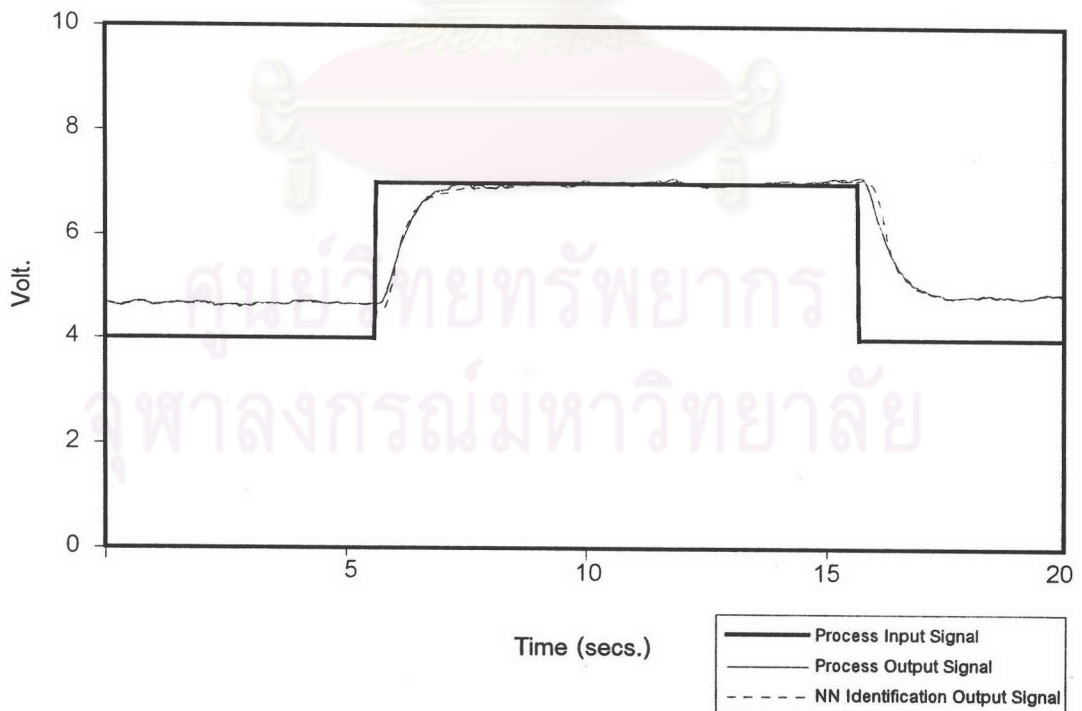
B.4) ผลทดสอบเนื่องจากการเปลี่ยนจุดทำงานของพลานท์

การเปลี่ยนจุดทำงานของพลานท์ โดยการปรับปริมาณของอากาศที่เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างถาวรผ่านตำแหน่ง Throttle control ทดสอบผลการเปลี่ยนค่าตั้งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ขนาด 4-6 V. และ 4-7 V. ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 4 และ 5 แสดงผลดังรูปที่ 4.13-4.20 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่า การเปลี่ยนจุดทำงานของพลานท์ เครื่องขยายนิวรอนสามารถเรียนรู้และสร้างสัญญาณเอาต์พุตได้สอดคล้องกับสัญญาณเอาต์พุตจากพลานท์ที่จุดทำงานใหม่ได้

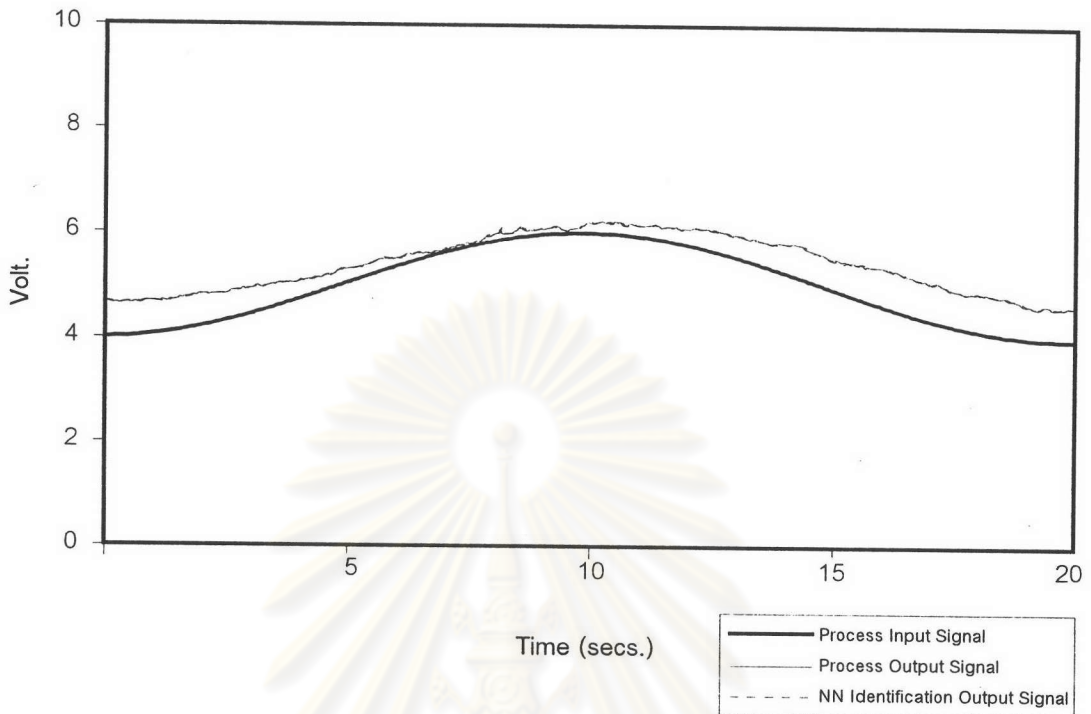
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



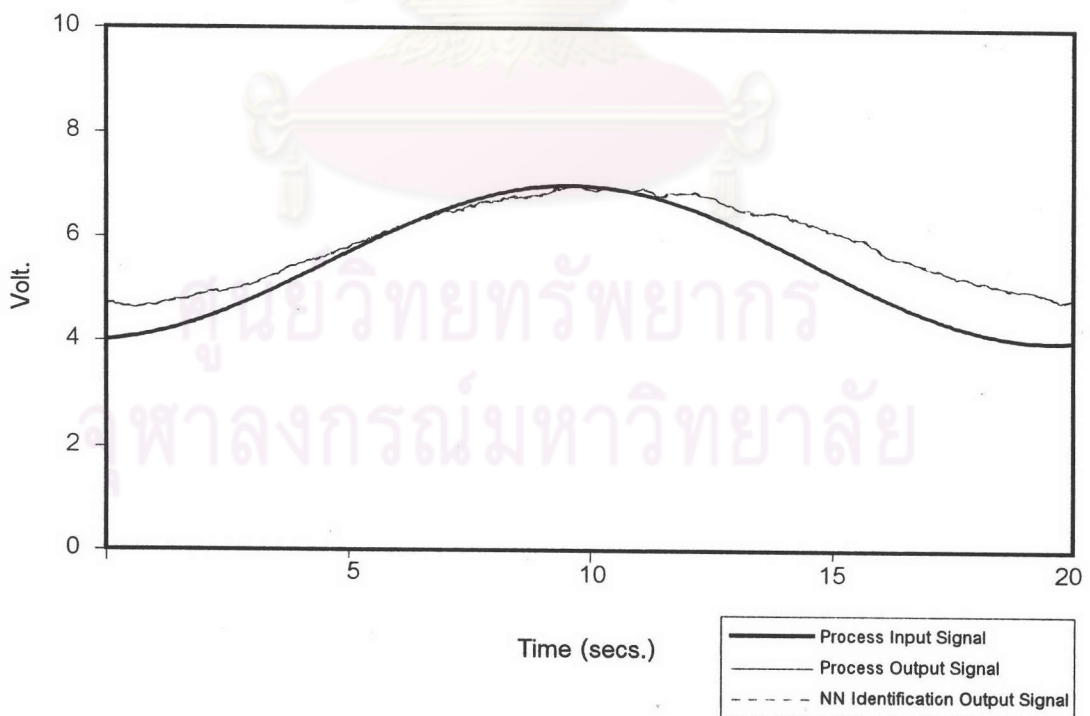
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



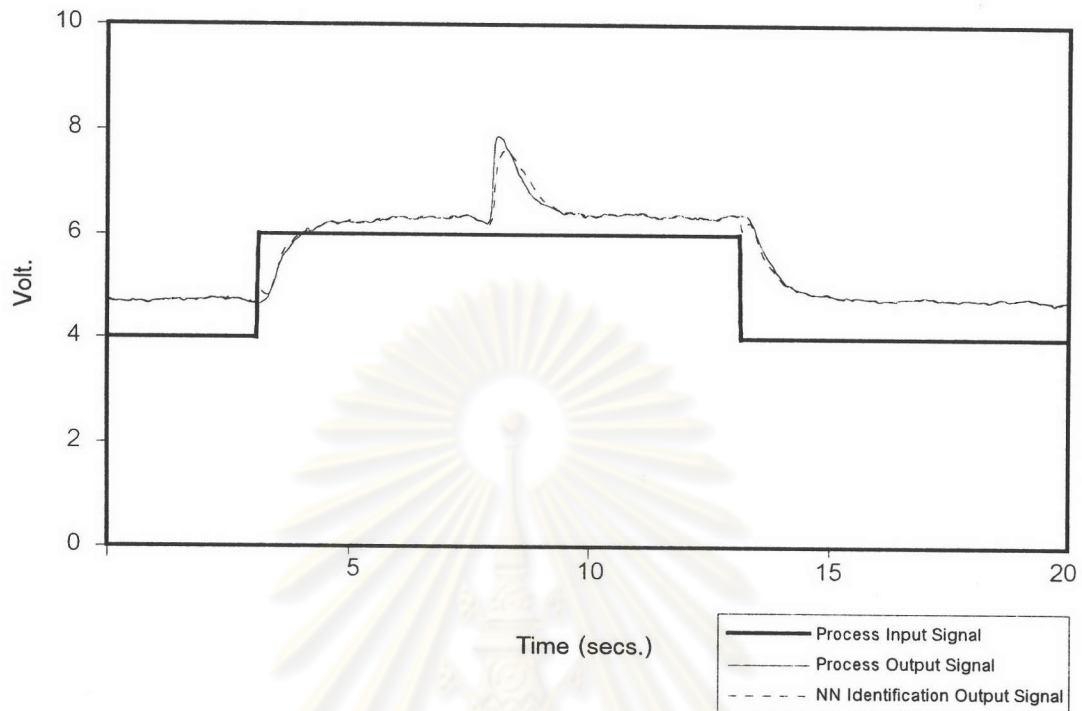
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



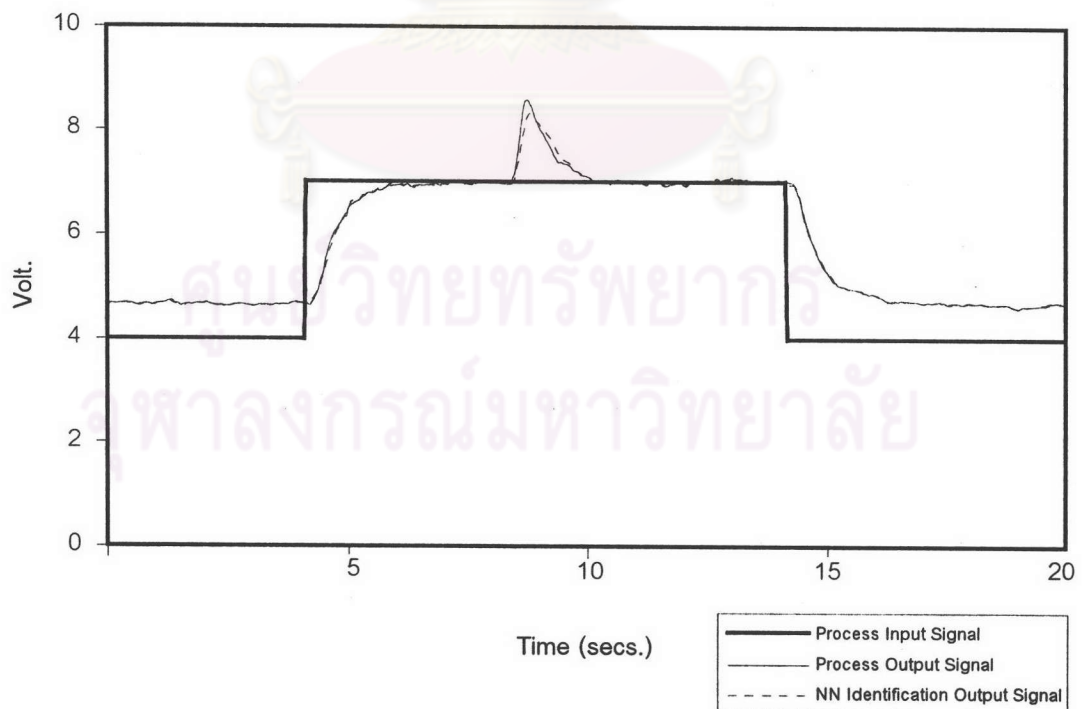
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



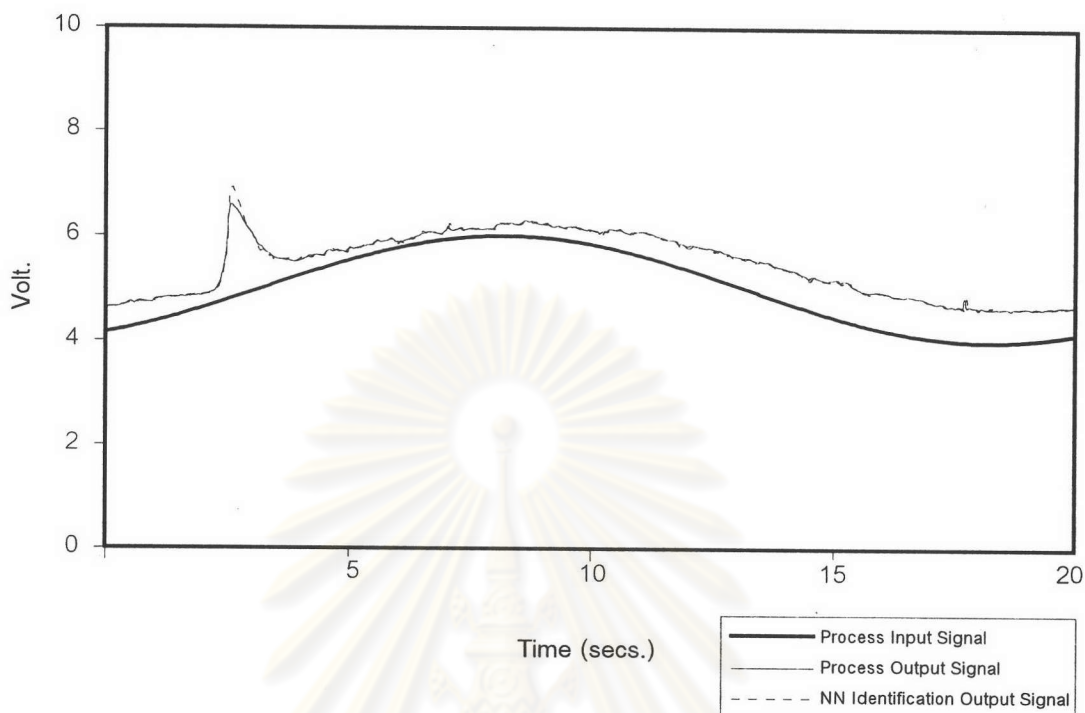
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



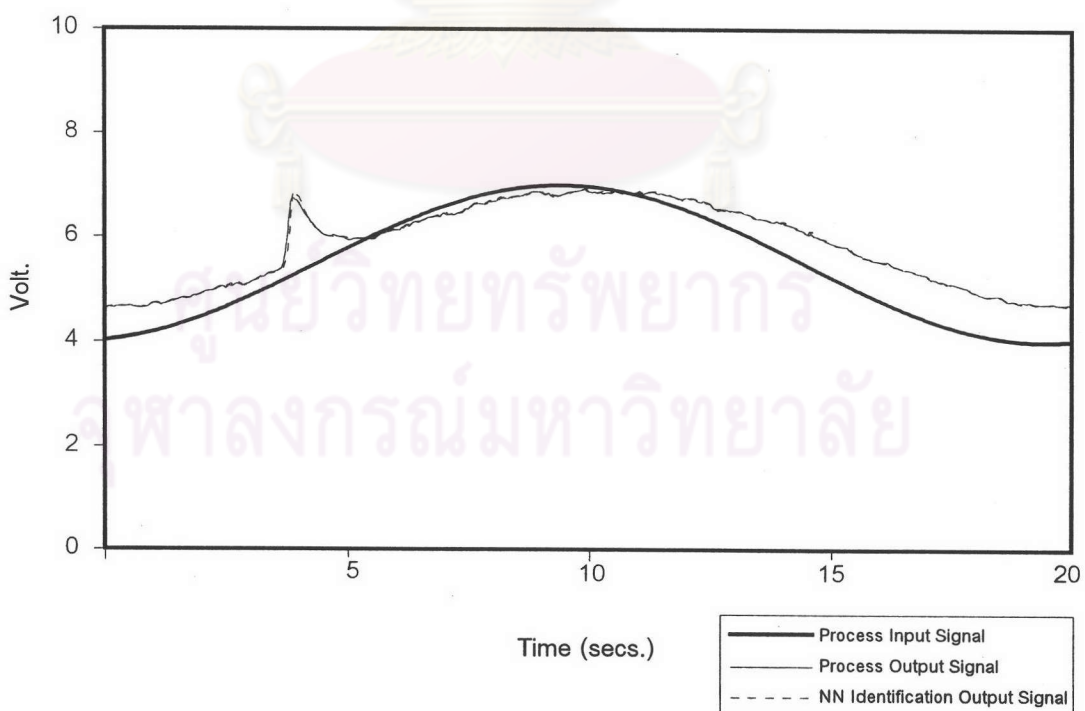
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz.ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มีLoad Disturbance



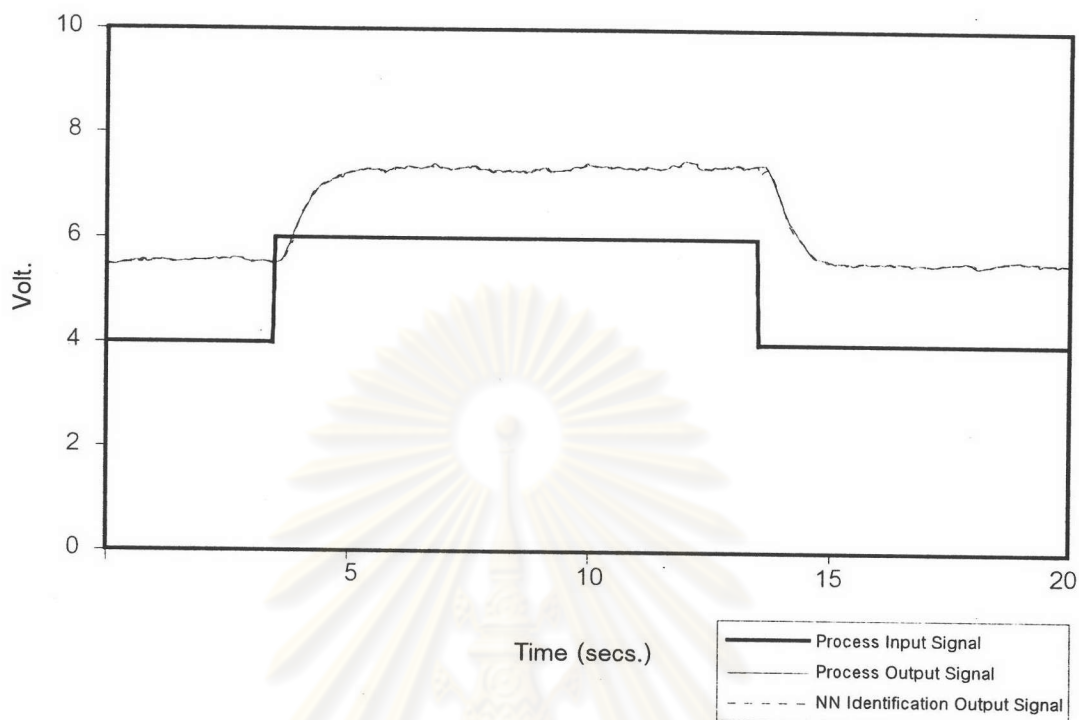
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz.ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มีLoad Disturbance



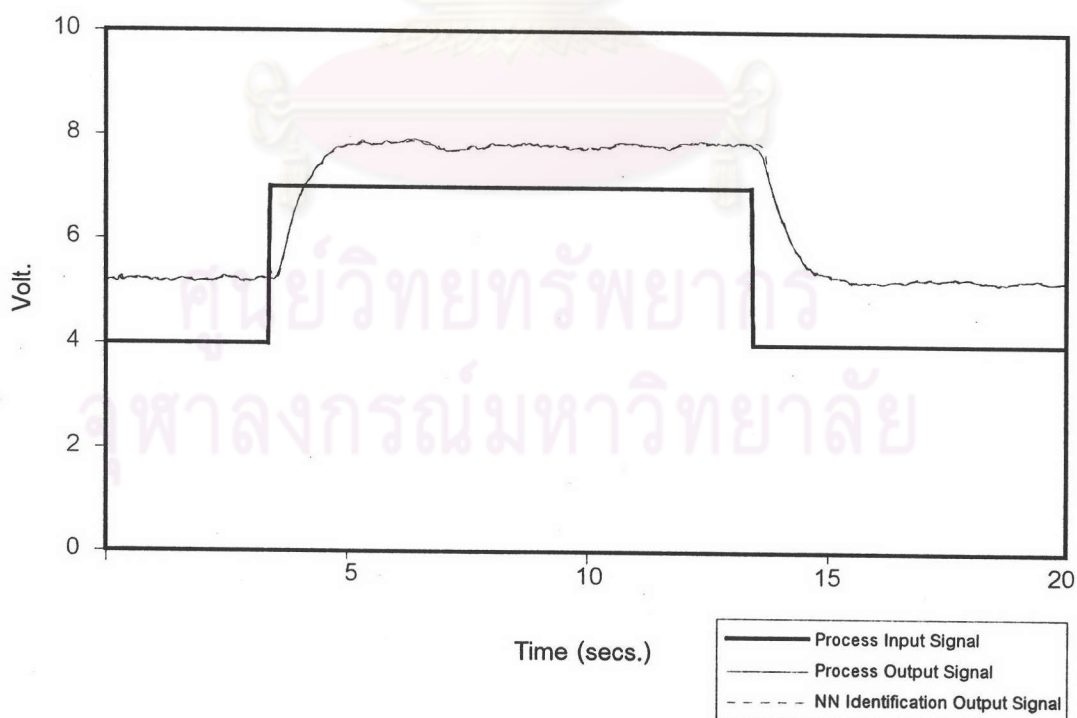
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz.ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มีLoad Disturbance



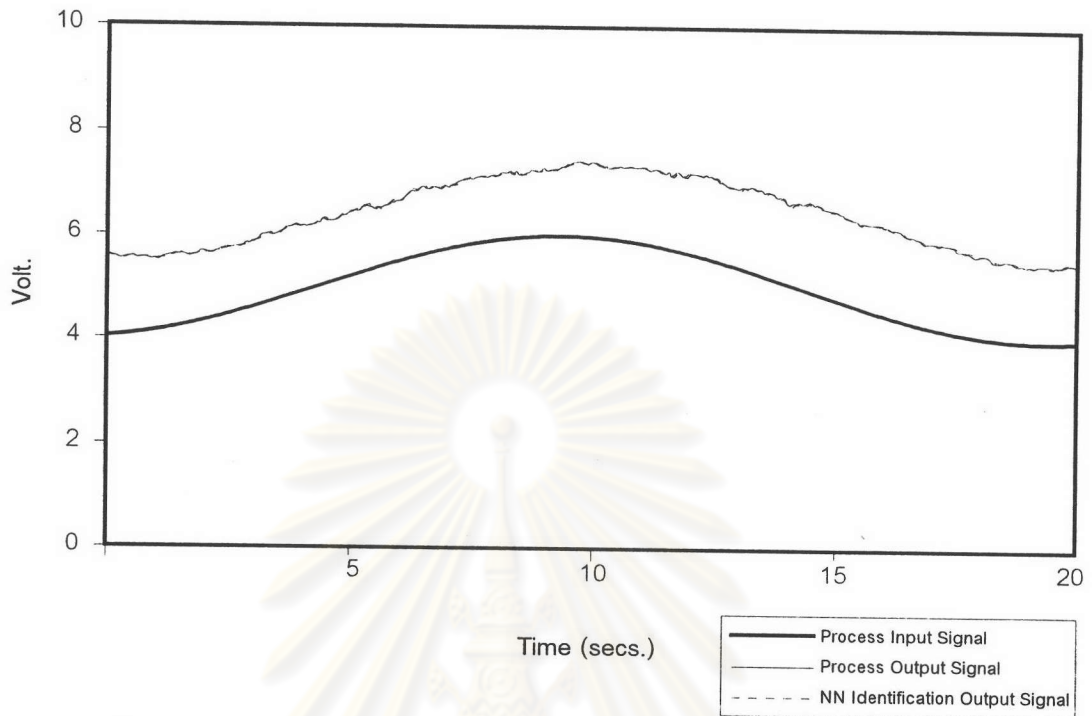
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz.ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มีLoad Disturbance



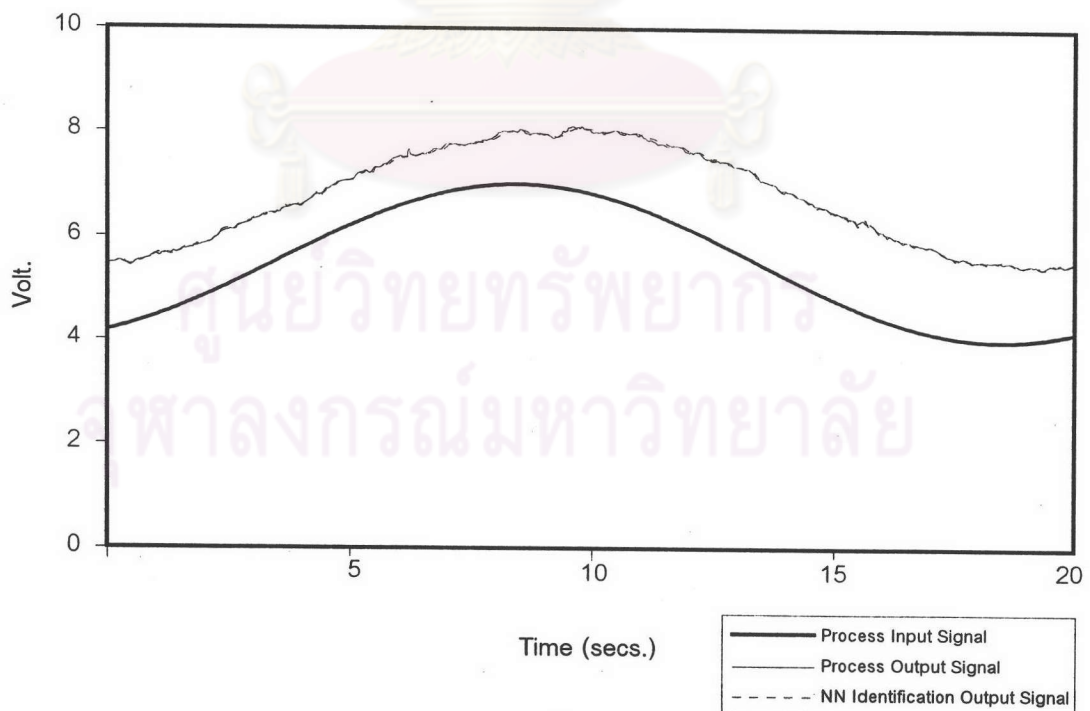
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



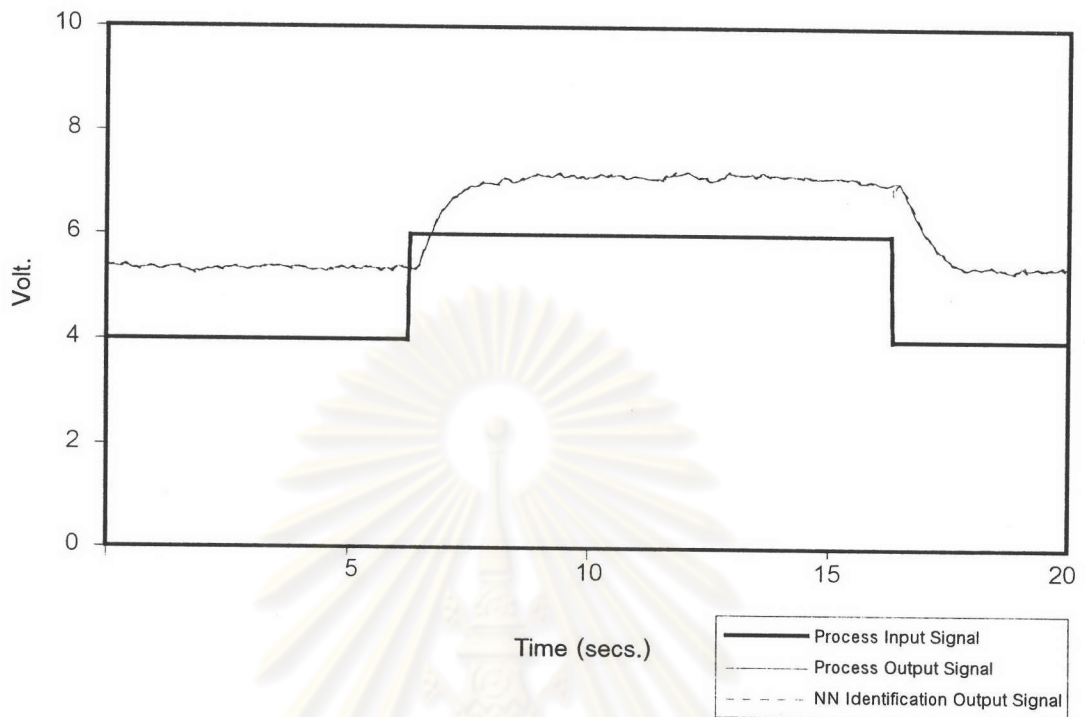
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



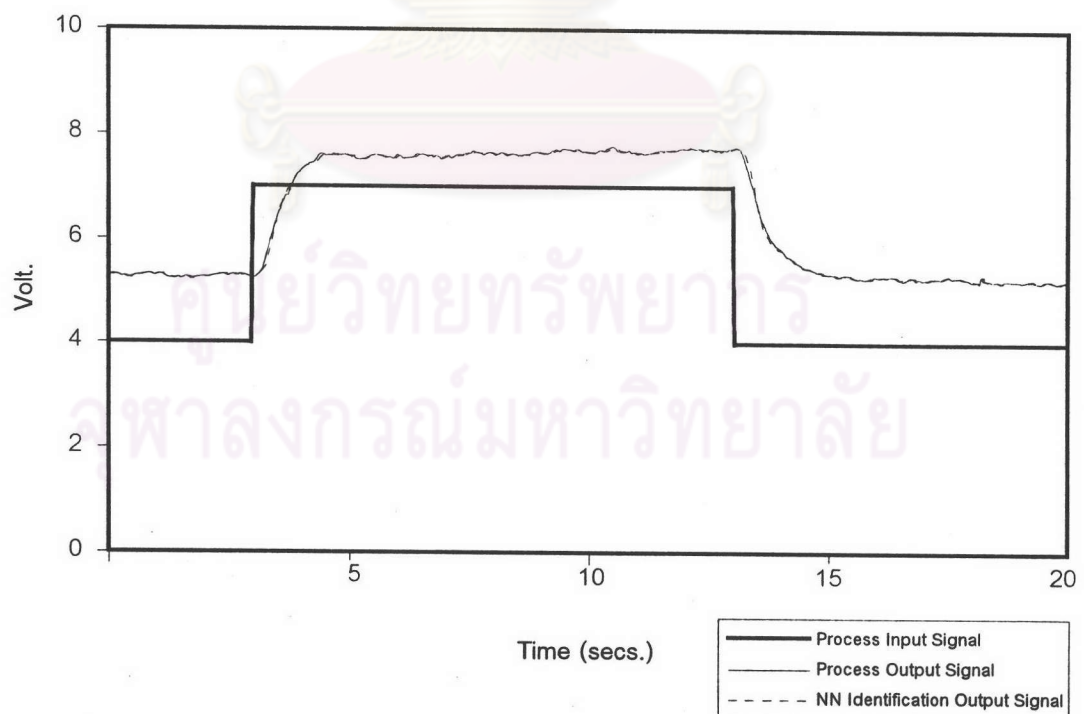
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



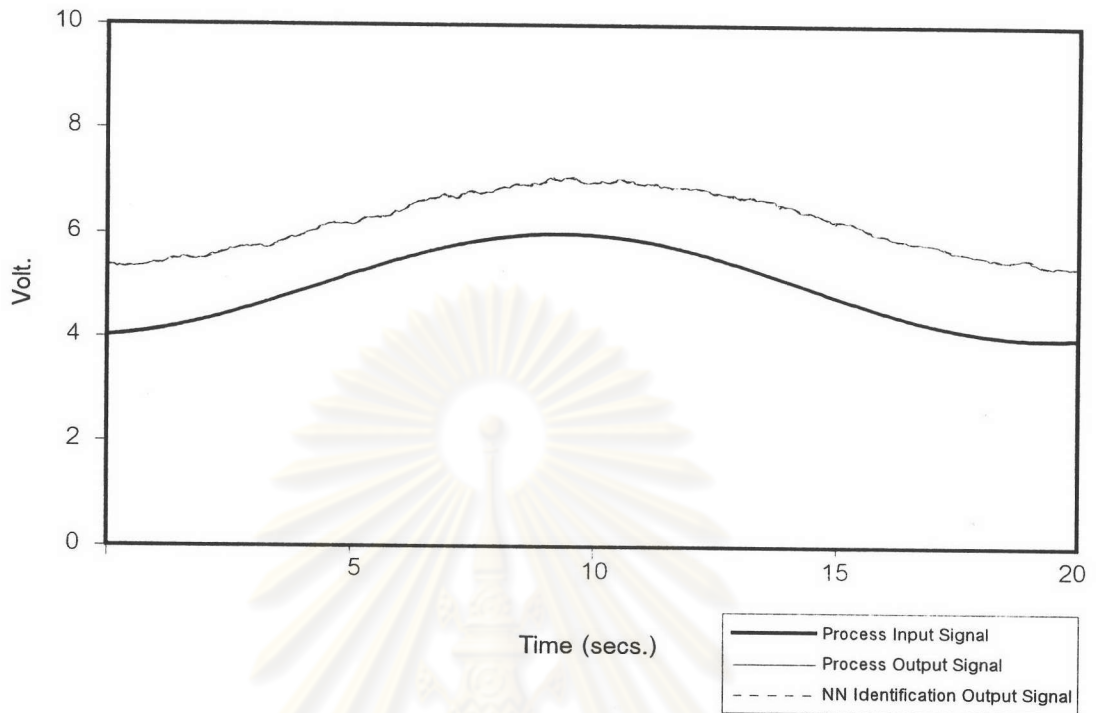
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



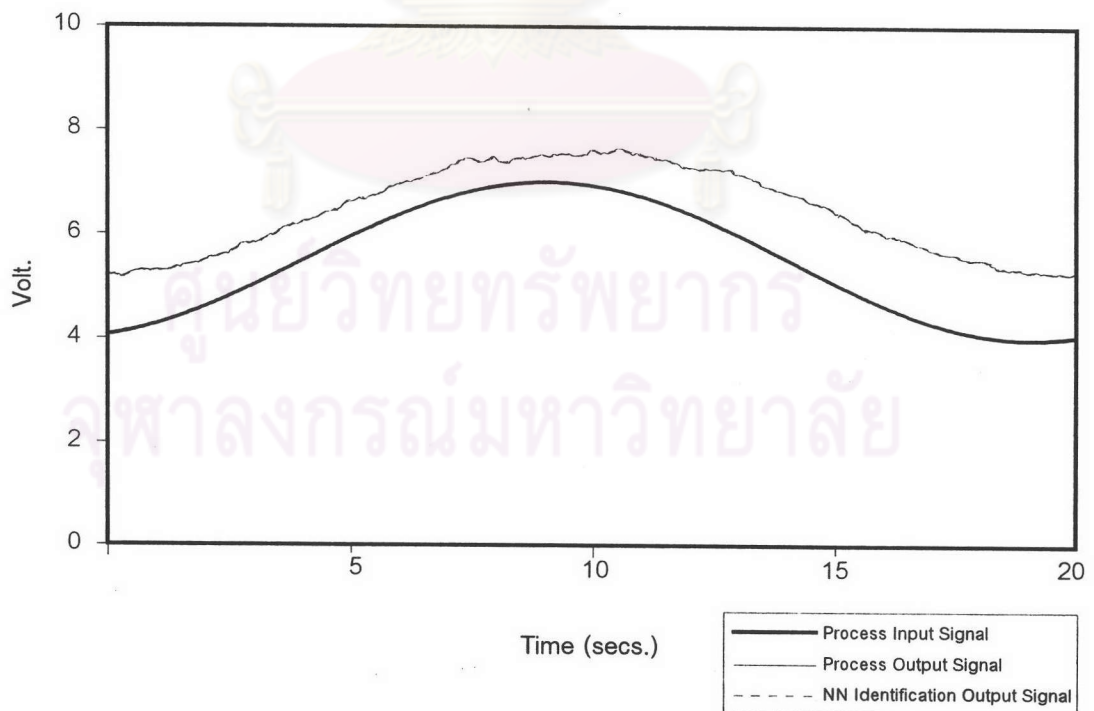
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5

4.5.2 ผลการทดสอบการใช้เครือข่ายนิเวรอนในการควบคุม (NN Controller)

การทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุมแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. ขั้นตอนการเตรียมชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกเครือข่ายนิเวรอน

A) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) ดังสมการที่ 3.1 โดยกำหนดให้มีค่าดังนี้

- อัตราส่วนการหน่วง (Damping Ratio : ζ) = 0.565
- ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time : t_s) = 1.8 วินาที

คำนวณค่าการหน่วงความถี่ธรรมชาติต่ำกว่าวิกฤต (Underdamp Natural Frequency : ω_0) ดังสมการที่ 4.2 [22]

จาก

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_0} \dots\dots\dots (4.1)$$

หรือ

$$\omega_0 = \frac{4}{\zeta t_s} \dots\dots\dots (4.2)$$

จากการคำนวณดังสมการที่ 4.2 ได้ค่า $\omega_0 = 3.933$ พังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองอ้างอิง (Transfer Function of Reference Model) แสดงดังสมการที่ 4.3

$$G_{ref}(s) = \frac{15.468}{s^2 + 4.44429s + 15.468} \dots\dots\dots (4.3)$$

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าว สามารถสรุปการคำนวณลักษณะผลตอบตามสมการที่ 3.17-3.23 ในบทที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ลักษณะผลตอบของฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองอ้างอิง	
ช่วงเวลาดำเนิน (Rise Time)	0.669 วินาที
เวลาค่ายอด (Peak Time)	0.9681 วินาที
ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time)	1.8 วินาที
เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Percent Over Shoot)	11.63%

ตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะผลตอบของฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองอ้างอิง

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอ้างอิงพิจารณาจากลักษณะของผลตอบที่ต้องการและสัญญาณควบคุมที่สร้างขึ้นต้องไม่เกินค่าจำกัดของอุปกรณ์แปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลขและสัญญาณเชิงอุปมา (A/D and D/A Converter) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -10 ถึง 10 โวลต์

B) เก็บข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตจากแบบจำลองอ้างอิง เมื่อป้อนชุดข้อมูลอินพุตสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมและสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 0.1 Hz ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลต์ เนื่องจากจะครอบคลุมช่วงการควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 34 ถึง 42 องศาเซลเซียส จำนวน 1000 ชุด คาบเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 40 มิลลิวินาที

C) ชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองข้างต้นเป็นเซตของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกเครือข่ายนิวรอน (Training Set) เพื่อเป็นตัวควบคุมต่อไป

2. ขั้นตอนการฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม

A) กำหนดลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม เนื่องจากไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอน ดังนั้นจึงใช้วิธีการลองถูกลองพลาด (Trial and Error) โดยเริ่มจากลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยที่สุด และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความสามารถในการนำไปใช้งานกับระบบควบคุมในเวลาจริงให้เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทดสอบเครือข่ายนิวรอนจำนวน 3 ชั้นซึ่งประกอบด้วย ชั้นอินพุต ชั้นซ่อนภายใน และชั้นเอาต์พุต โดยมีจำนวนปมในชั้นอินพุตและจำนวนปมในชั้นเอาต์พุต เท่ากับจำนวน

สัญญาณเข้าและออกของเครือข่ายเพื่อใช้ในการควบคุมตามสมการที่ 3.7 ซึ่งมีจำนวน 2 ปมและ 1 ปมตามลำดับ โดยเปลี่ยนจำนวนปมนิรeronในชั้นซ่อนภายในเพื่อหาโครงสร้างของเครือข่ายนิรeronที่เหมาะสมที่สุดในการหาเอกลักษณ์แสดงผลดังตารางที่ 4.6

จำนวนปม	ดรรชนีสมรรถนะ	เวลาในการเรียนรู้ต่อข้อมูล 1 ชุด (msec.)
2 x 5 x 1	1.125	0.6818
2 x 10 x 1	0.671	0.9057
2 x 15 x 1	0.480	1.1168
2 x 20 x 1	0.468	1.4638

Note

1. จำนวนปมนิรeronในชั้นอินพุต x จำนวนปมนิรeronในชั้นซ่อนภายใน x จำนวนปมนิรeronในชั้นอินพุต
2. จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึก 1000 ชุด
3. จำนวนรอบการเรียนรู้โดยประมาณ 5000 รอบ

ตารางที่ 4.6 แสดงผลทดสอบการฝึกเครือข่ายนิรeronเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม

จากตารางที่ 4.6 เลือกเครือข่ายนิรeronที่มีปมในชั้นซ่อนภายในเท่ากับ 20 ปม เนื่องจากเป็นเครือข่ายนิรeronที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและดรรชนีสมรรถนะมีค่าต่ำสุด ทำให้เครือข่ายนิรeronสามารถจัดการข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในเวลาจริง ลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายแสดงในตารางที่ 4.7

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Neural Network Controller Structure	
จำนวนชั้น	3
จำนวนปมในชั้นอินพุต	2
จำนวนปมในชั้นซ่อนภายใน	20
จำนวนปมในชั้นเอาต์พุต	1
Activation Function	$f(x) = \frac{1}{1+e^{-0.9x}}$
Scaling Interval	2.0/9.0
Delta Bar Delta Learning	$\beta = 0.8546$
Parameter	$\gamma = 0.0456$
	$\kappa = 0.00025$

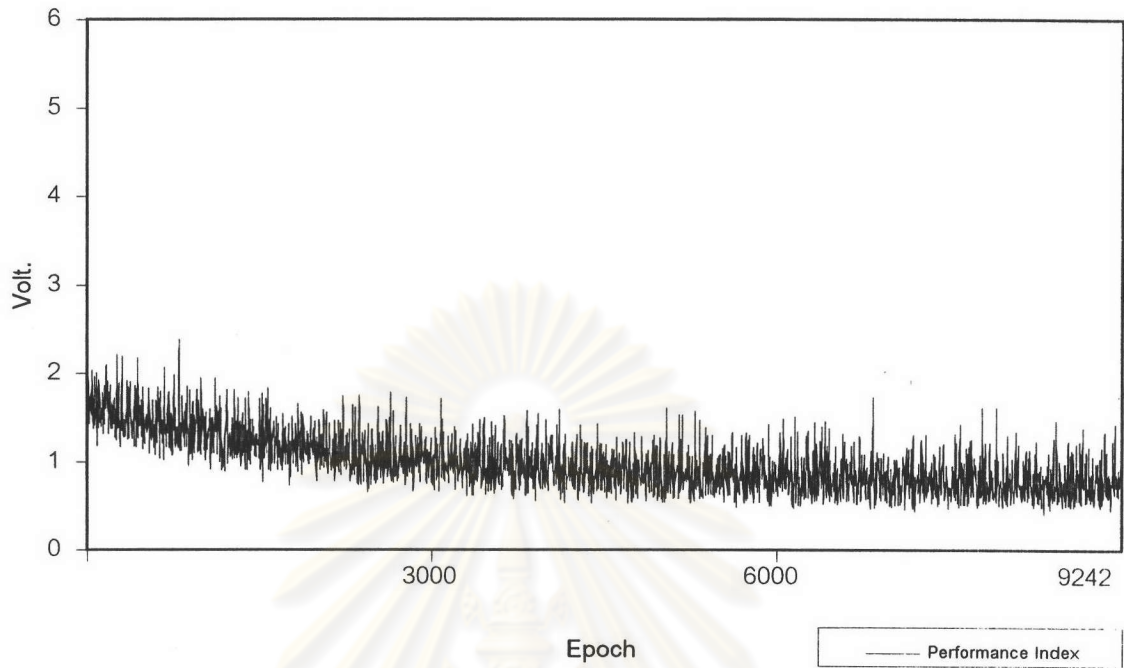
ตารางที่ 4.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม

B) ฝึกเครือข่ายนิวรอนโดยอาศัยเซตข้อมูลที่ใช้ในการฝึกเครือข่ายที่ได้จากข้อ 1(c) ผลการฝึกเครือข่ายโดยสรุปแสดงในตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงดรชนีสมรรถนะขณะฝึกเครือข่ายนิวรอนแสดงดังรูปที่ 4.21

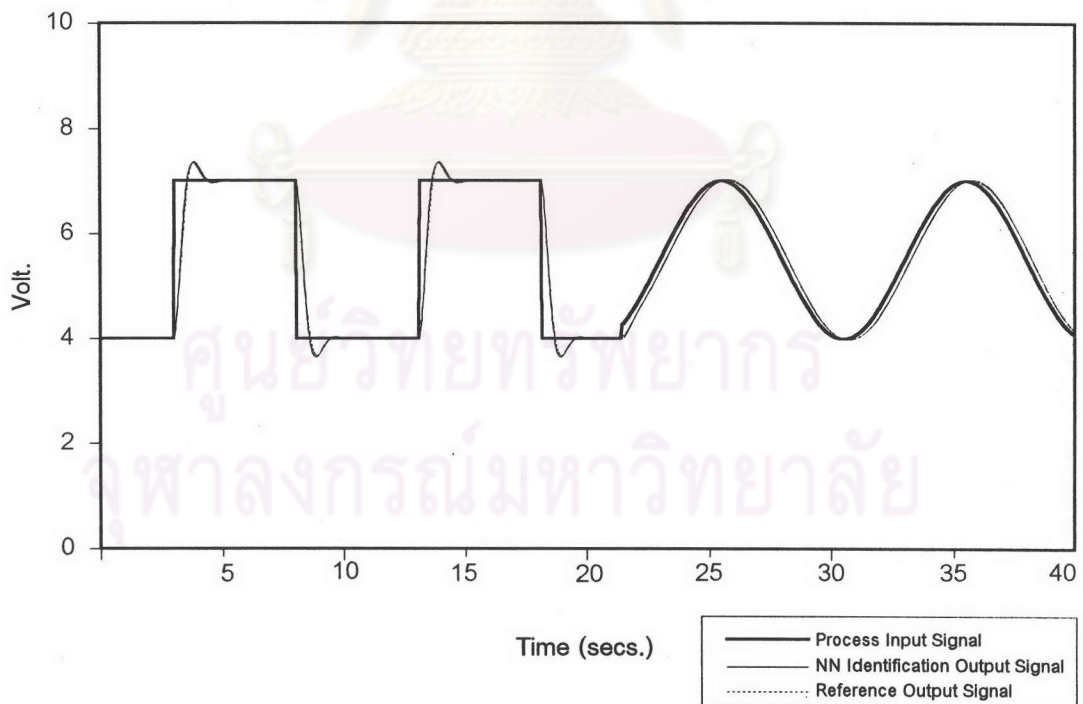
NN Controller Training Result		
Final Mean Sum Square Error	0.46	V.
เวลาที่ใช้ในการฝึก	3.758	Hr.
จำนวนรอบของการฝึก	9242	Epoch.

ตารางที่ 4.8 ผลการฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม

C) ทดสอบเครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึกเป็นตัวควบคุมด้วยชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกข้างต้นแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.22



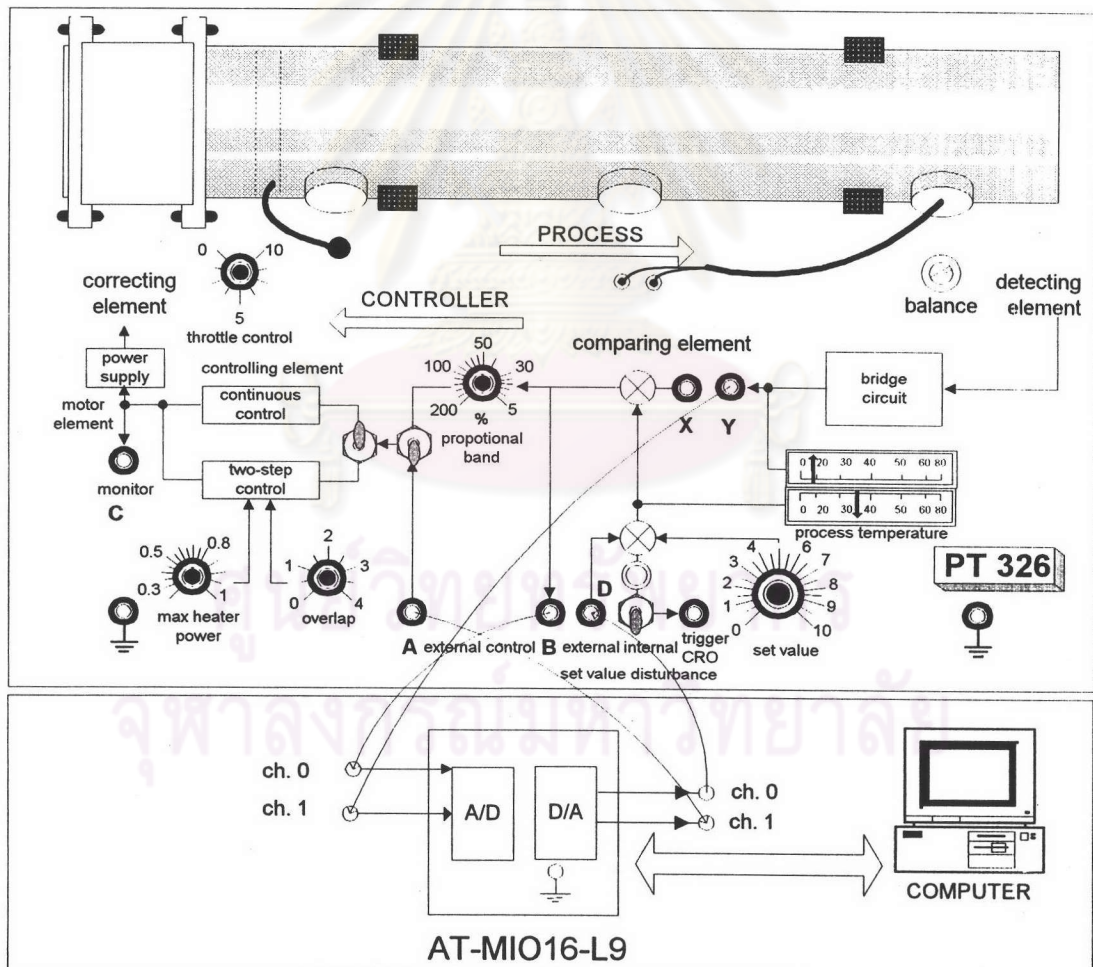
รูปที่ 4.21 แสดงดรชนีสมรรถนะขณะฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อเป็นตัวควบคุม



รูปที่ 4.22 แสดงผลทดสอบระบบควบคุมโดยการใช้เครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึกเพื่อเป็นตัวควบคุม

3. ขั้นตอนการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุมในเวลาจริง

A) ทดสอบเครือข่ายนิวรอนหลังจากฝึกเพื่อเป็นตัวควบคุม (Neural Network Controller) กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Process) โดยกำหนดค่าน้ำหนักและค่าไบแอสของเครือข่ายหลังจากได้รับการฝึกเป็นค่าเริ่มต้นในการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุมกับกระบวนการทดลองจริง โดยใช้อุปกรณ์แปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลขและสัญญาณเชิงอุปมา (A to D and D to A Converter) เป็นตัวเชื่อมระหว่างโปรแกรมเครือข่ายนิวรอนบนเครื่องคอมพิวเตอร์และกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยใช้คาบเวลาการซักร้อยอย่าง (Sampling Period) เท่ากับ 40 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.23 แสดงการทดสอบเครือข่ายนิวรอนที่ได้รับการฝึกเพื่อเป็นตัวควบคุมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง

จากรูปที่ 4.23 อุปกรณ์แปลงผันสัญญาณระหว่างสัญญาณเชิงเลขและสัญญาณเชิงอุปมา (A to D and D to A Converter) จะรับค่าสัญญาณค่าตั้งที่ตำแหน่ง B และสัญญาณเอาต์พุตจากกระบวนการที่ตำแหน่ง Y เพื่อเป็นข้อมูลอินพุตให้กับเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุมและใช้ในการหาเอกลักษณ์ และสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้จากเครือข่ายนิวรอนจะถูกส่งออกไปยังกระบวนการที่ตำแหน่ง A ในขณะที่ส่งสัญญาณค่าตั้งภายนอกที่ตำแหน่ง D ในเวลาเดียวกัน

B) ทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริงเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขซึ่งปรับจูนเริ่มต้นด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols และปรับละเอียดอีกครั้ง ได้ค่าสุดท้ายคือ $P = 52\%$, $I = 0.25$, $D = 0.15$ โดยใช้ช่วงเวลาการซิกตัวอย่าง (Sampling Period) เท่ากับ 40 มิลลิวินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่ค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายนิวรอนทั้งสองส่วนได้แก่ในส่วนของการหาเอกลักษณ์ และในส่วนของตัวควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดการควบคุมเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อระบบ เงื่อนไขการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังต่อไปนี้

B.1) ผลเนื่องจากการเปลี่ยนค่าตั้งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

กำหนดตำแหน่งจุดปรับตั้ง (Set Point) ที่ 5 V. และ 5.5 V. ป้อนสัญญาณค่าตั้งจากภายนอก (External Set Value) แบบสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Signal) ความถี่ 0.05 Hz. ขนาด 1 V_{p-p} และ 1.5 V_{p-p} ที่ตำแหน่ง D ในรูปที่ 4.23 ซึ่งหมายถึงช่วงการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุตระหว่าง 4-6 V. และ 4-7 V. หรือทดสอบการควบคุมภายในช่วงอุณหภูมิประมาณ 34 ถึง 38 องศาเซลเซียส และ 34 ถึง 42 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Throttle Control = 6 แสดงผลดังรูปที่ 4.24 - 4.27 จะเห็นว่าระบบควบคุมโดยเครือข่ายนิวรอนสามารถควบคุมผลตอบให้มีลักษณะเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงที่ออกแบบไว้ โดยสัญญาณควบคุมที่ส่งออกมาจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากการเรียนรู้ชุดข้อมูลในเวลาจริงและปรับการค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายนิวรอนเพื่อรักษาผลตอบให้สอดคล้องกับแบบจำลองอ้างอิง

ลักษณะผลตอบเนื่องจากระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอนเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขภายในช่วงการทำงาน 4-6 V. และ 4-7 V. แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ พบว่าในทั้งสองช่วงการทำงานช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) ของทั้งสองวิธีมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่การพุ่งเกิน (Over Shoot) และช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) ของระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอนจะมีค่าน้อยกว่าระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลข

B.2) ผลเนื่องจากการรบกวนค่าตั้งแบบรูปคลื่นไซน์

กำหนดตำแหน่งจุดปรับตั้ง (Set Point) ที่ 5 V. และ 5.5 V. ป้อนสัญญาณค่าตั้งจากภายนอก (External Set Value) แบบสัญญาณคลื่นไซน์ (Sin Wave Signal) ความถี่ 0.05 Hz. ขนาด $1 V_{p-p}$ และ $1.5 V_{p-p}$. ที่ตำแหน่ง D ในรูปที่ 4.23 ซึ่งหมายถึงช่วงการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุตระหว่าง 4-6 V. และ 4-7 V. หรือทดสอบการควบคุมภายในช่วงอุณหภูมิประมาณ 34 ถึง 38 องศาเซลเซียส และ 34 ถึง 42 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Throttle Control = 6 แสดงผลดังรูปที่ 4.30 - 4.33 จะเห็นว่าทั้งสองช่วงการทำงาน ระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอนสามารถควบคุมผลตอบให้มีลักษณะเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงที่ออกแบบไว้

B.3) ผลเนื่องจากการเปลี่ยน Load Disturbance

การเปลี่ยน Load Disturbance โดยการปรับปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างฉับพลันโดยผ่านการปรับตำแหน่งของ Throttle Control ซึ่งเป็นการรบกวนระบบที่อยู่ในสถานะอยู่ตัว เปรียบเทียบผลตอบเนื่องจากสัญญาณค่าตั้งจากภายนอกที่เป็นแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Signal) และแบบรูปคลื่นไซน์ (Sin Wave Signal) ภายในช่วงการทำงาน 4-6 V. และ 4-7 V. ที่ตำแหน่ง Throttle Control = 6 กับระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขแสดงดังรูปที่ 4.34-4.37 ตามลำดับ จะเห็นว่าลักษณะผลตอบของการเปลี่ยนแปลง Load Disturbance ของระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอนจะมีการปรับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็วและการพุ่งเกินจะน้อยกว่า การแกว่งของผลตอบของสัญญาณออกเนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายนิวรอนซึ่งจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาผลตอบให้เข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วที่สุด

B.4) ผลเนื่องจากการเปลี่ยนจุดทำงานของพลานท์

การเปลี่ยนจุดทำงานของพลานท์ โดยการปรับปริมาณอากาศที่เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยผ่านการปรับตำแหน่งของ Throttle Control จากตำแหน่งเริ่มต้นที่ 6 และมีค่าลดลงเท่ากับ 4 และ 5 ตามลำดับ การเปลี่ยนจุดทำงานของพลานท์ทำให้เครื่องขยายนิวรอนจำเป็นต้องเรียนรู้และสร้างสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมสำหรับจุดทำงานใหม่ ดังนั้นเพื่อให้การเรียนรู้ของเครื่องขยายนิวรอนเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว จึงเปลี่ยนอัตราขยาย (Gain) ของตัวควบคุมด้วยการปรับขอบเขตค่าพิสัยสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องขยายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม การปรับค่าดังกล่าวอาศัยการสังเกตจากลักษณะผลตอบกลับคือ ในช่วงสภาวะอยู่ตัวถ้าผลตอบมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองอ้างอิงที่กำหนดจะทำการเพิ่มขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องขยายนิวรอน ในทางตรงกันข้ามถ้าผลตอบมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอ้างอิงที่กำหนดจะลดขีดจำกัดบนและล่างลง ขอบเขตของค่าพิสัยดังกล่าวเหมาะสมสำหรับสภาวะแวดล้อมในเวลานั้นๆ ขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องขยายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุมแสดงขณะทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9

ตำแหน่ง Throttle Control	ขีดจำกัดล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต	ขีดจำกัดล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต
4	1.75	7.0
5	1.80	8.5
6	2.0	9.0

ตารางที่ 4.9 แสดงขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องขยายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม

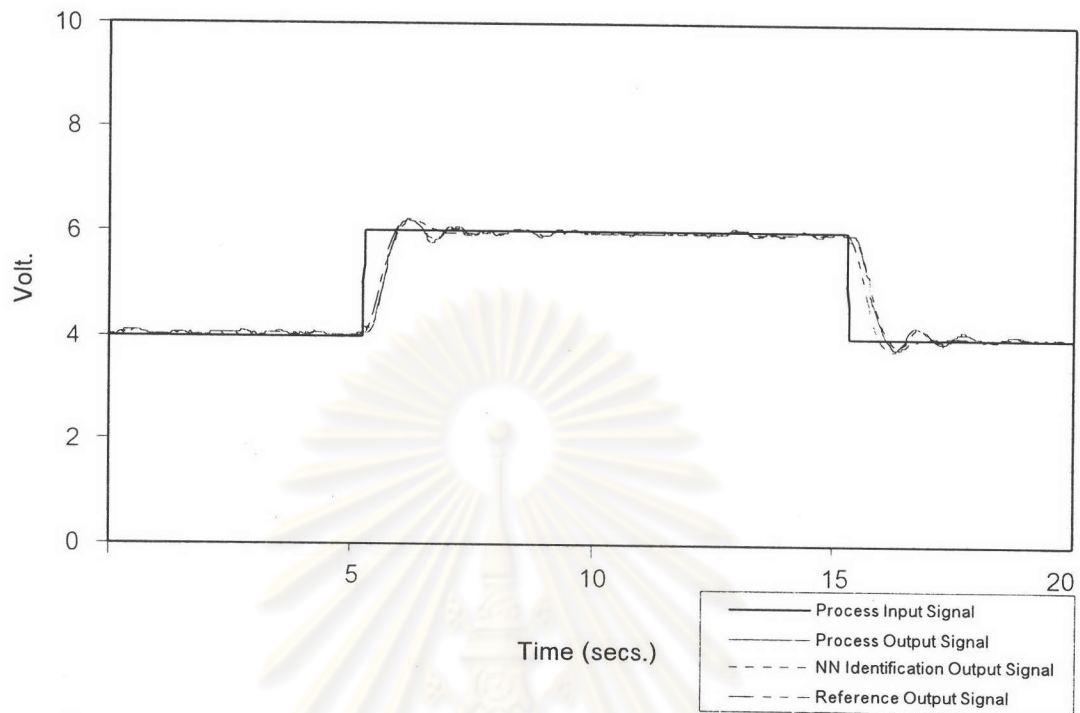
ผลการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่าตั้งแบบคลื่นสี่เหลี่ยมภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลต์ และ 4-7 โวลต์ ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 4 และ 5 แสดงดังรูปที่ 4.38- 4.45 ตามลำดับ พบว่าตัวควบคุมที่ใช้เครื่องขยายนิวรอนสามารถควบคุมผลตอบให้เป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงถึงแม้จะมีการเปลี่ยนตำแหน่ง Throttle Control ลักษณะผลตอบของสัญญาณเอาต์พุตจากพลานท์ในการควบคุมอุณหภูมิภายในช่วง 4-7 โวลต์ ให้ลักษณะที่เรียกว่า

การควบคุมภายในช่วง 4-6 โวลท์ เนื่องจากอัตราการขยายของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุมได้จากการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 4-7 โวลท์ ดังนั้นเมื่อลดช่วงการควบคุมอุณหภูมิลงแต่ยังคงใช้อัตราการขยายค่าเดิมทำให้ผลตอบของสัญญาณเอาต์พุตจากพลานท์มีลักษณะกระเพื่อมมากกว่า เนื่องจากผลของอัตราการขยายดังกล่าวข้างต้น แต่ยังคงรักษาผลตอบให้เป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงได้

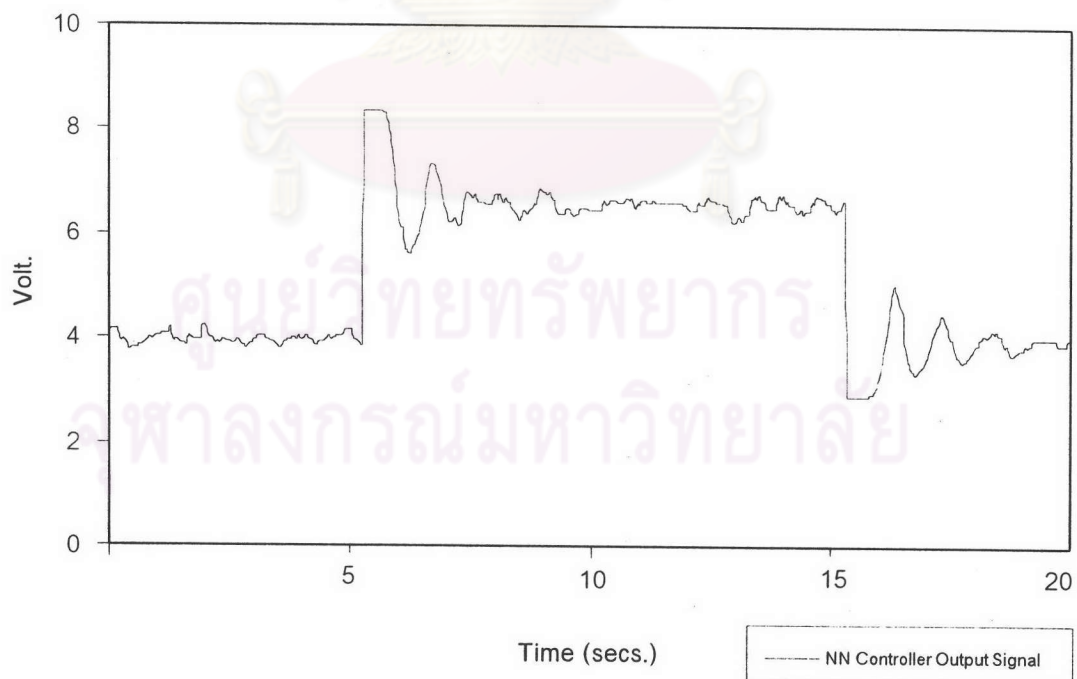
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะผลตอบระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขกับระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณค่าตั้งภายนอก (External Set Value) แบบคลื่นสี่เหลี่ยมภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์และ 4-7 โวลท์ ที่ตำแหน่ง Throttle Control เท่ากับ 4 และ 5 ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.46-4.49 พบว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่ง Throttle Control ลักษณะผลตอบเนื่องจากระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอนยังคงมีการพุ่งเกิน (Over Shoot) และช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) น้อยกว่าระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลข



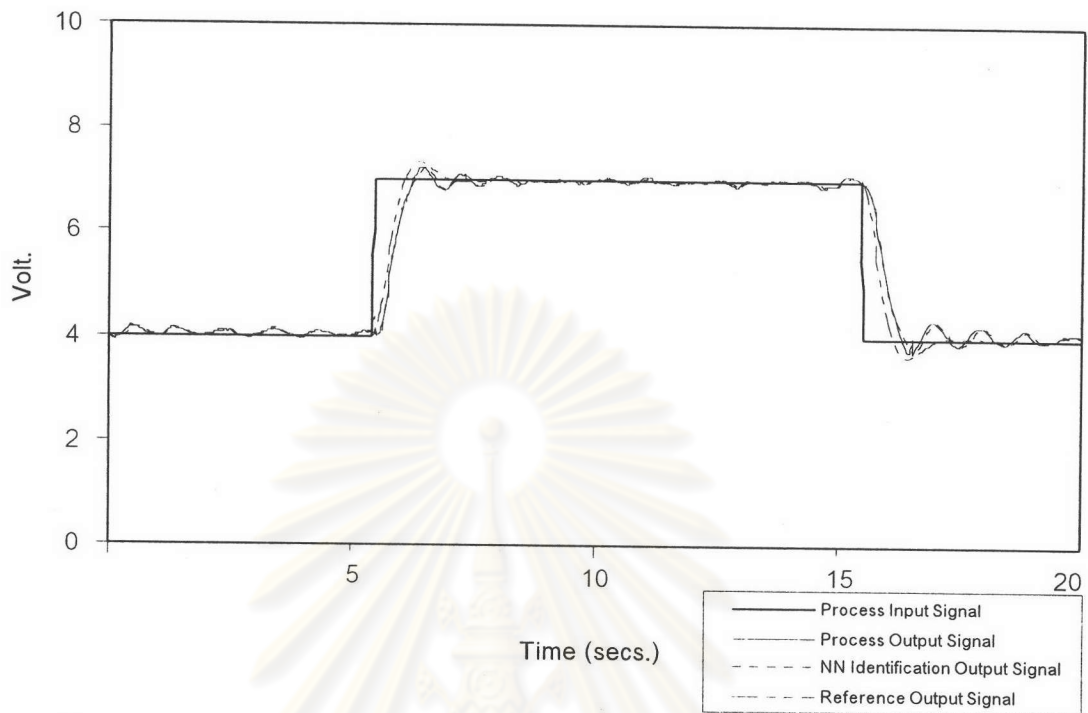
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



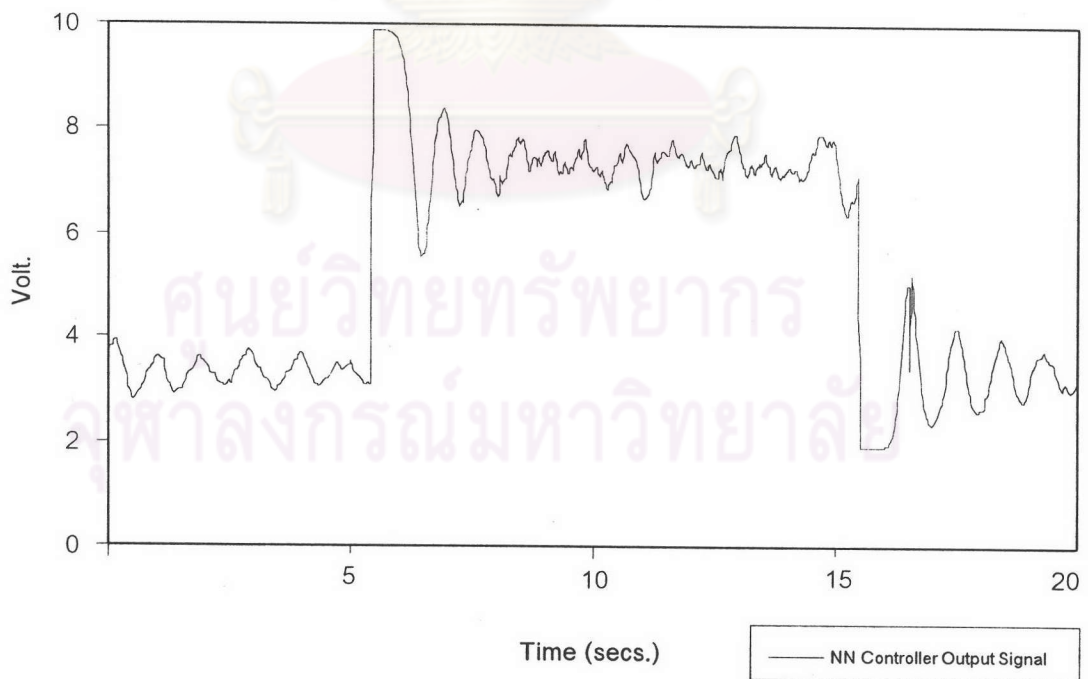
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



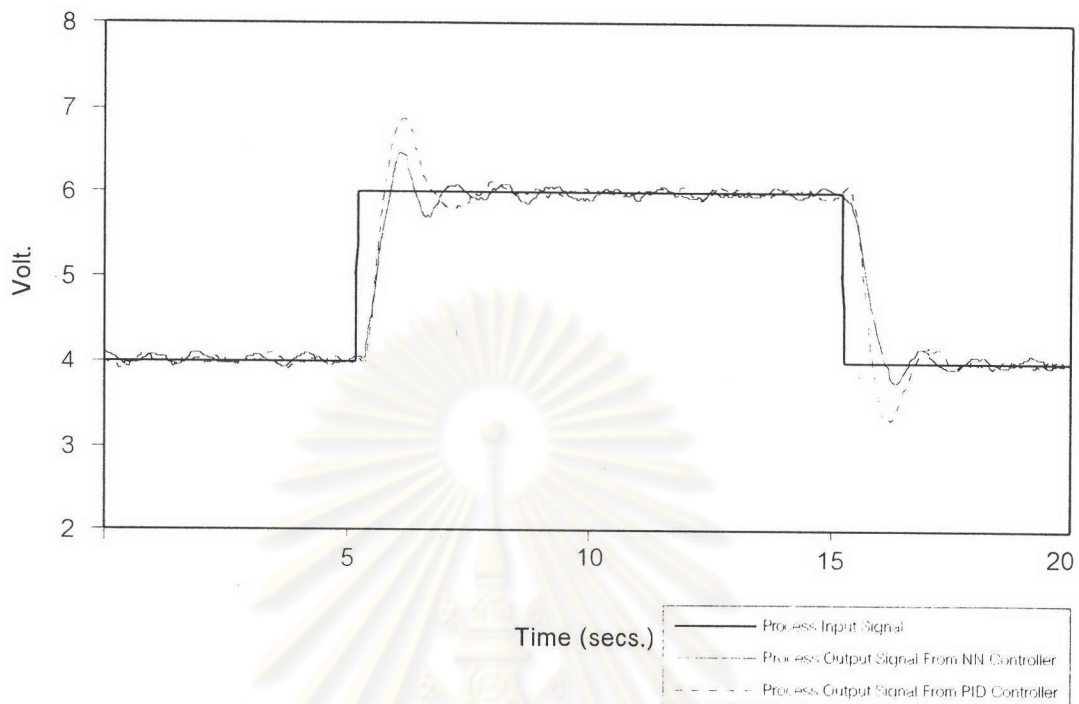
รูปที่ 4.25 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



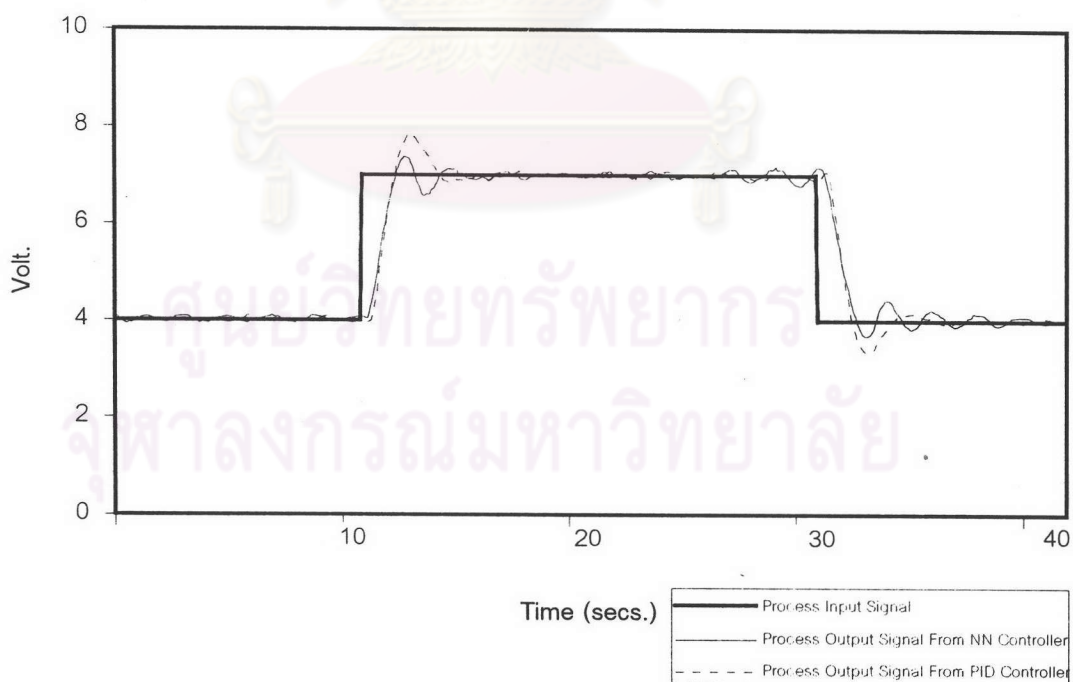
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



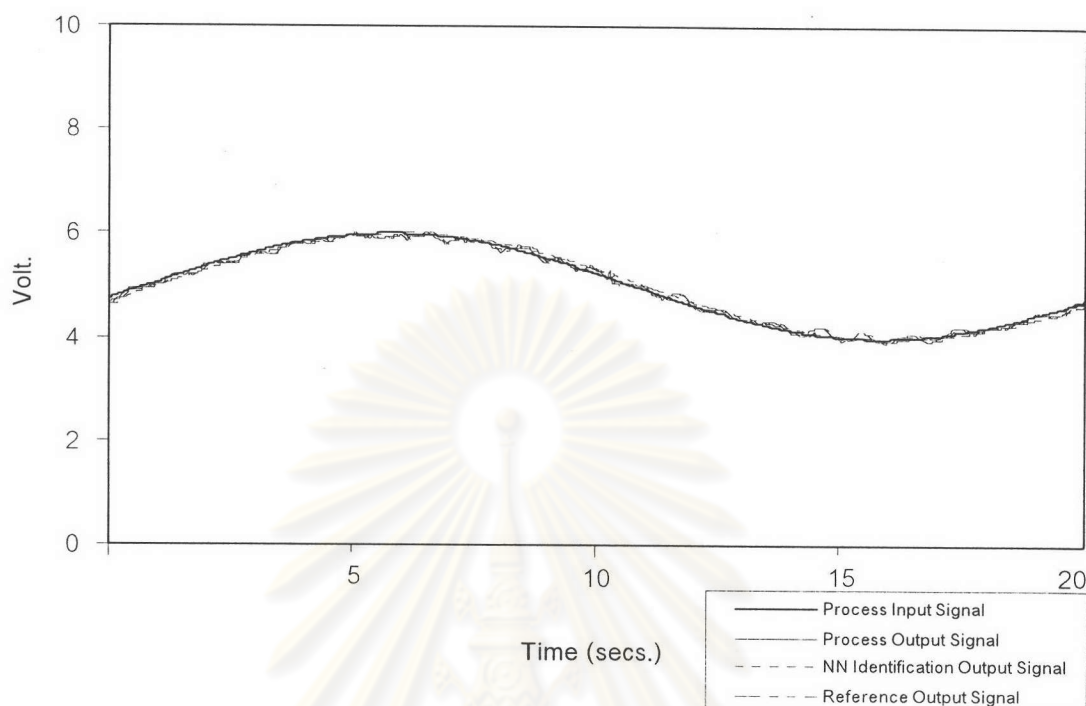
รูปที่ 4.27 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



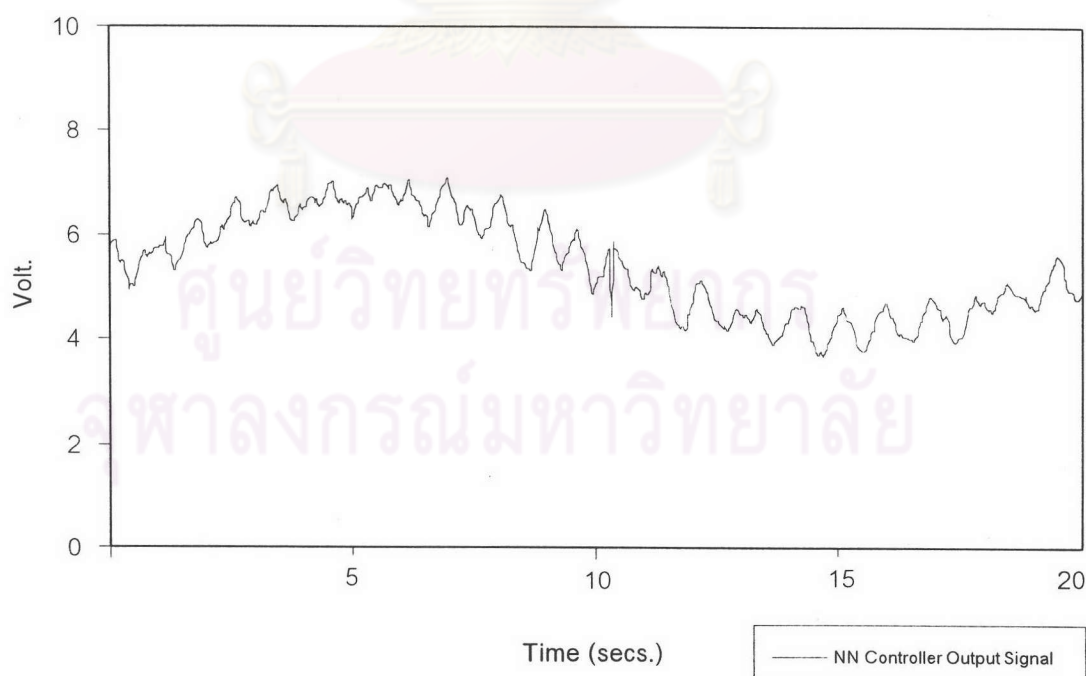
รูปที่ 4.28 แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิรอน
เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



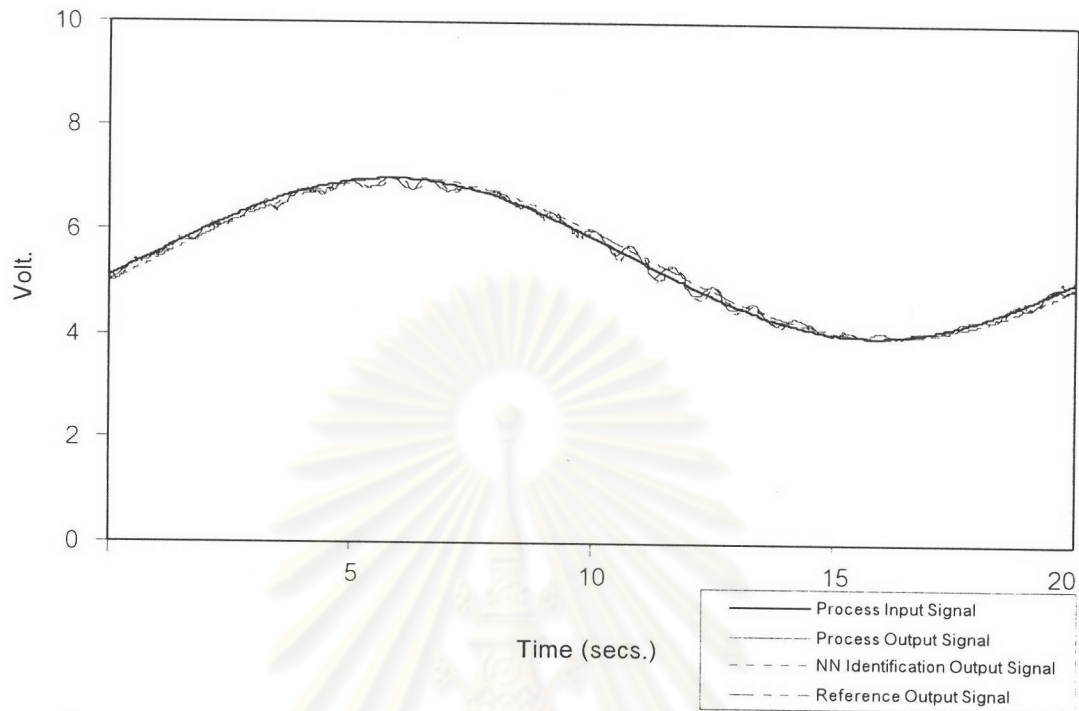
รูปที่ 4.29 แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิรอน
เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



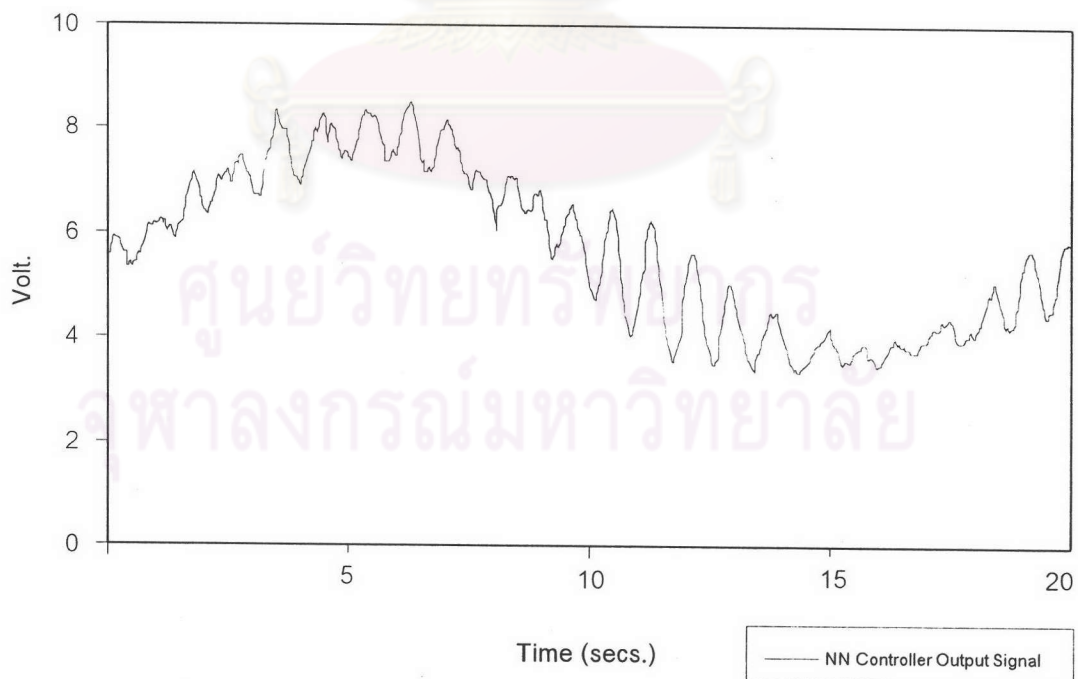
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



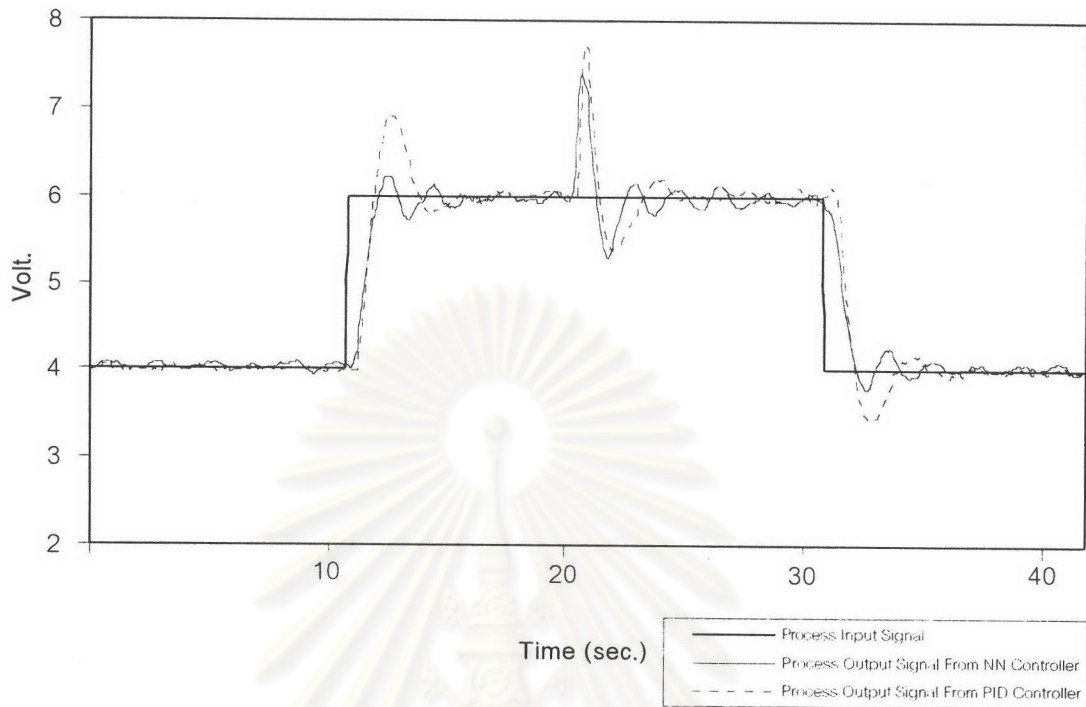
รูปที่ 4.31 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



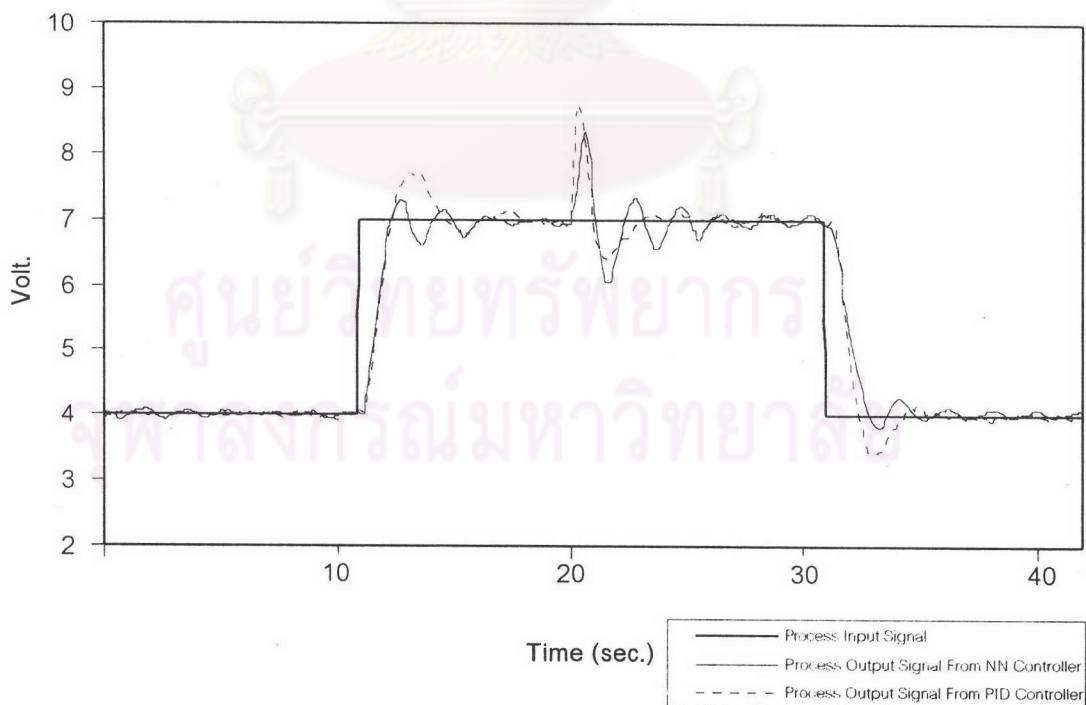
รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



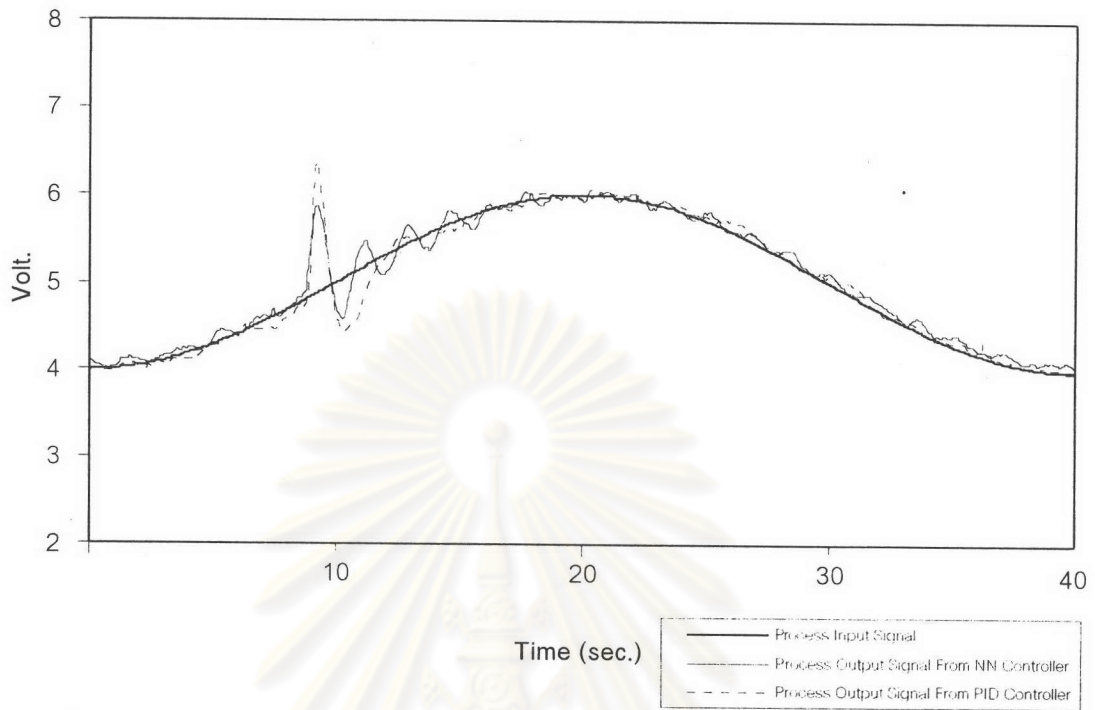
รูปที่ 4.33 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6



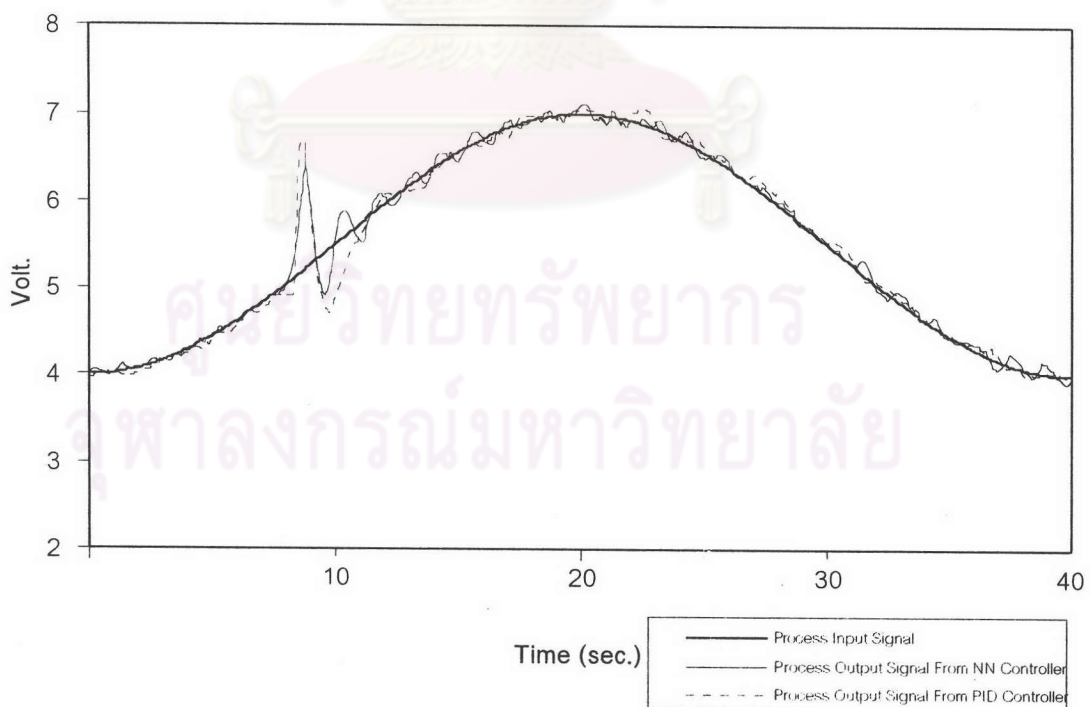
รูปที่ 4.34 ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดี และเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลต์



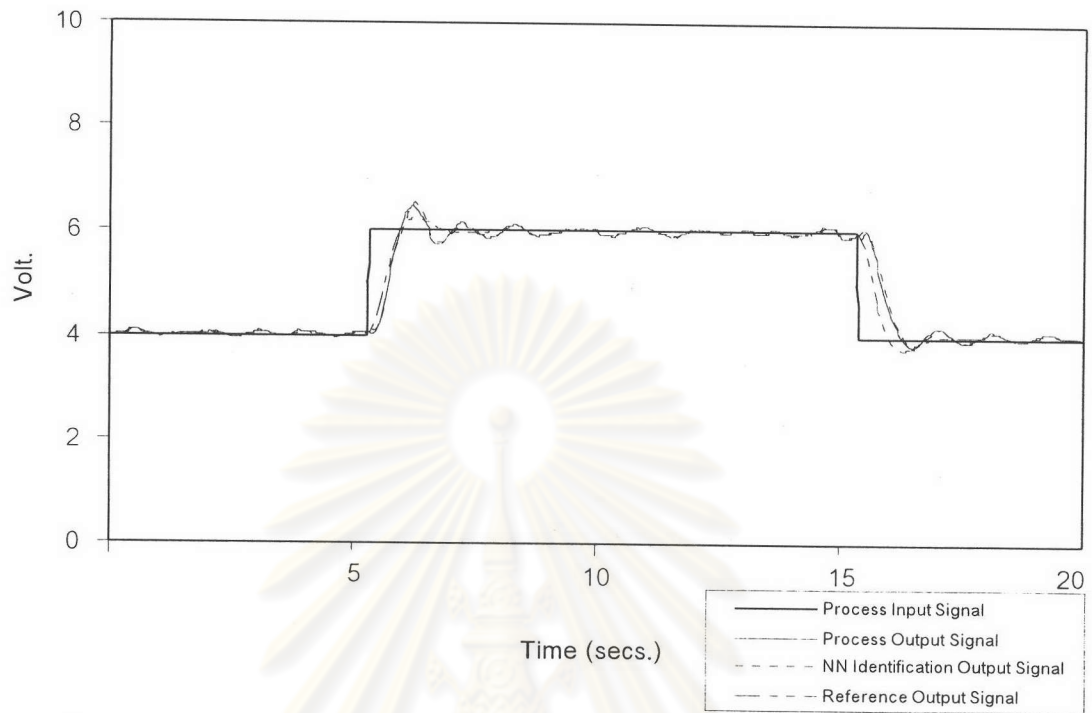
รูปที่ 4.35 ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดี และเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลต์



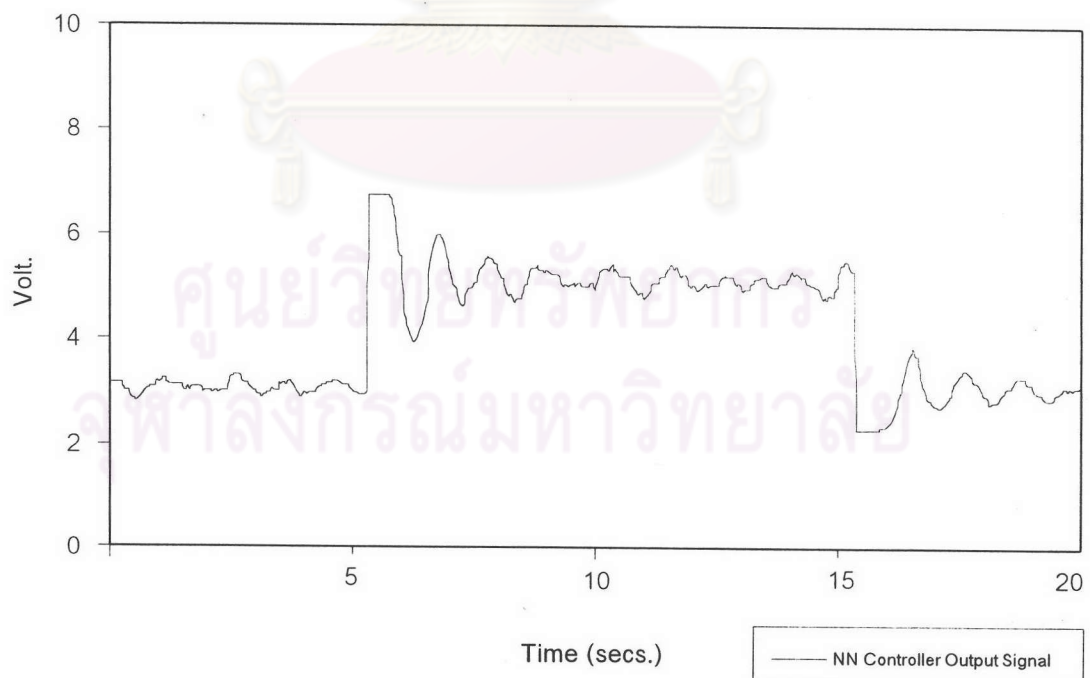
รูปที่ 4.36 ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดี และเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์



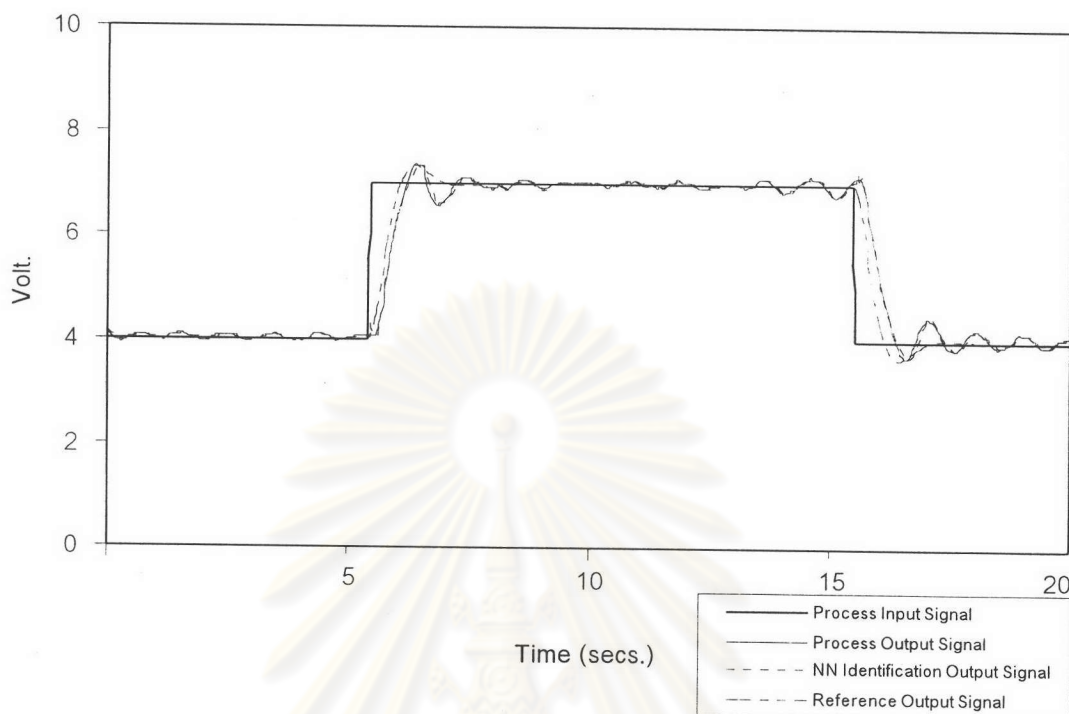
รูปที่ 4.37 ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดี และเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์



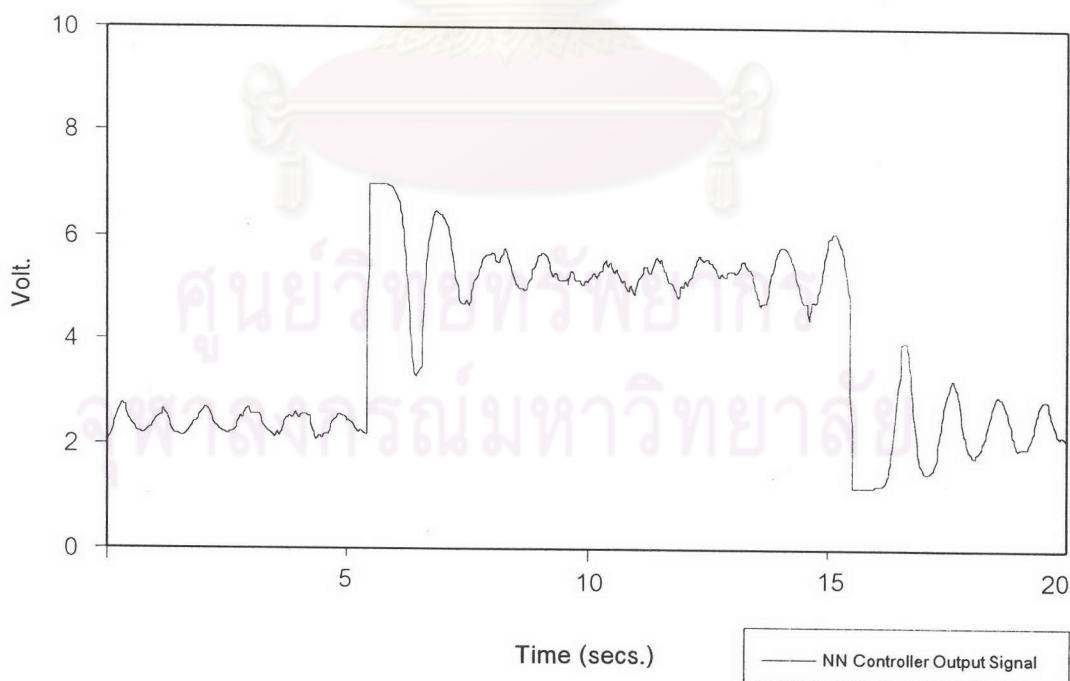
รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



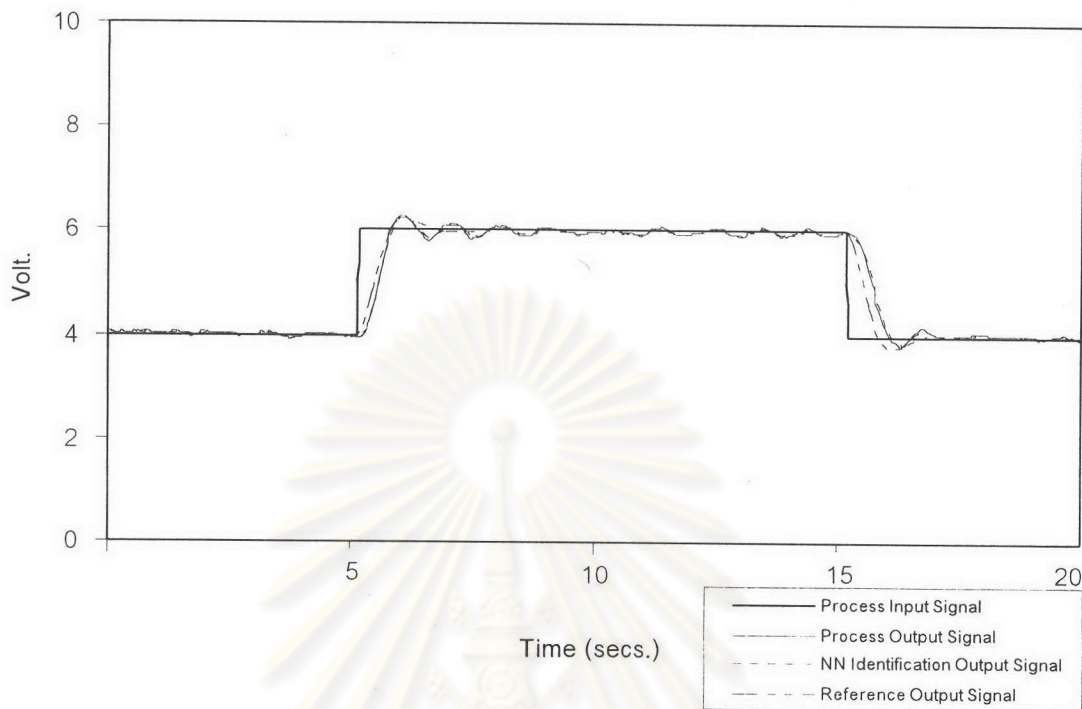
รูปที่ 4.39 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



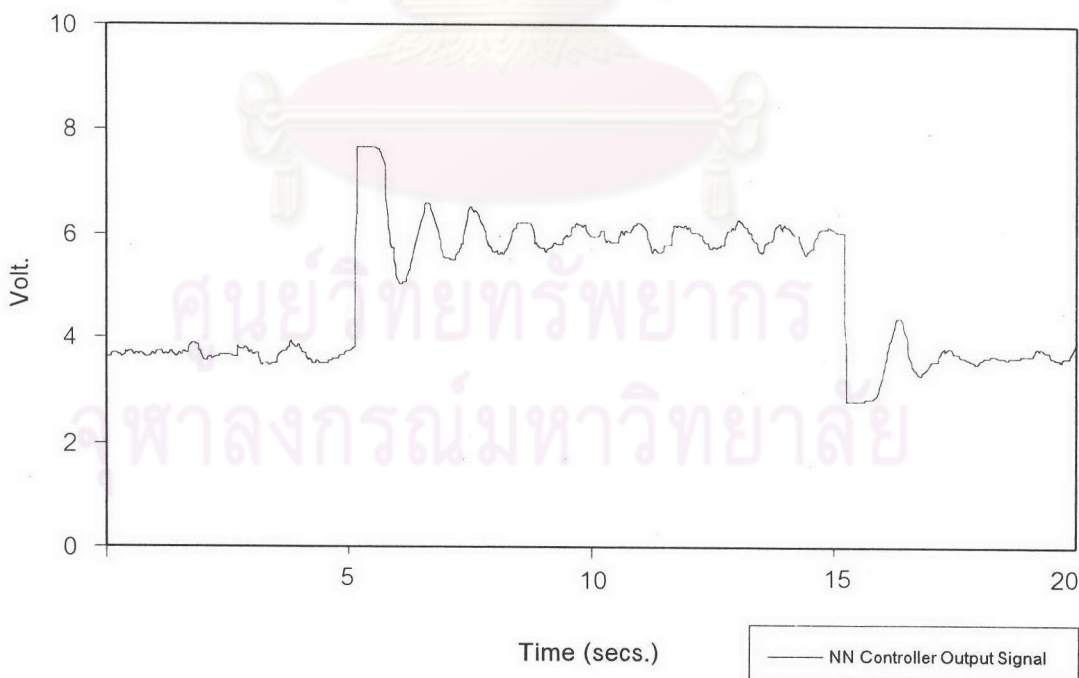
รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



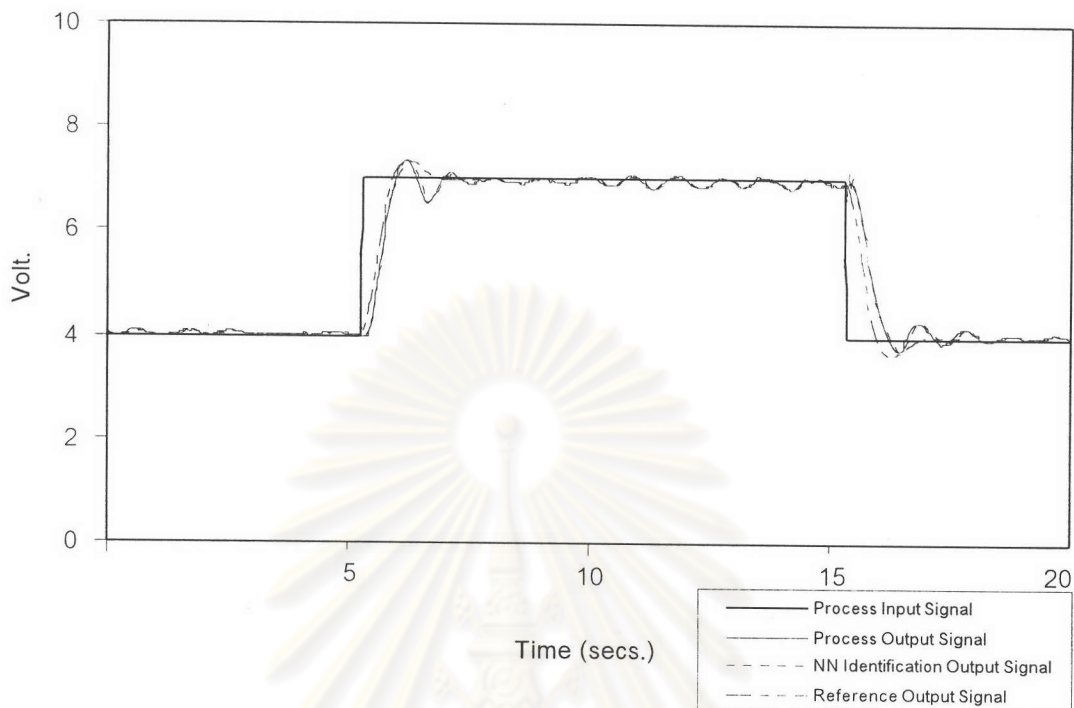
รูปที่ 4.41 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



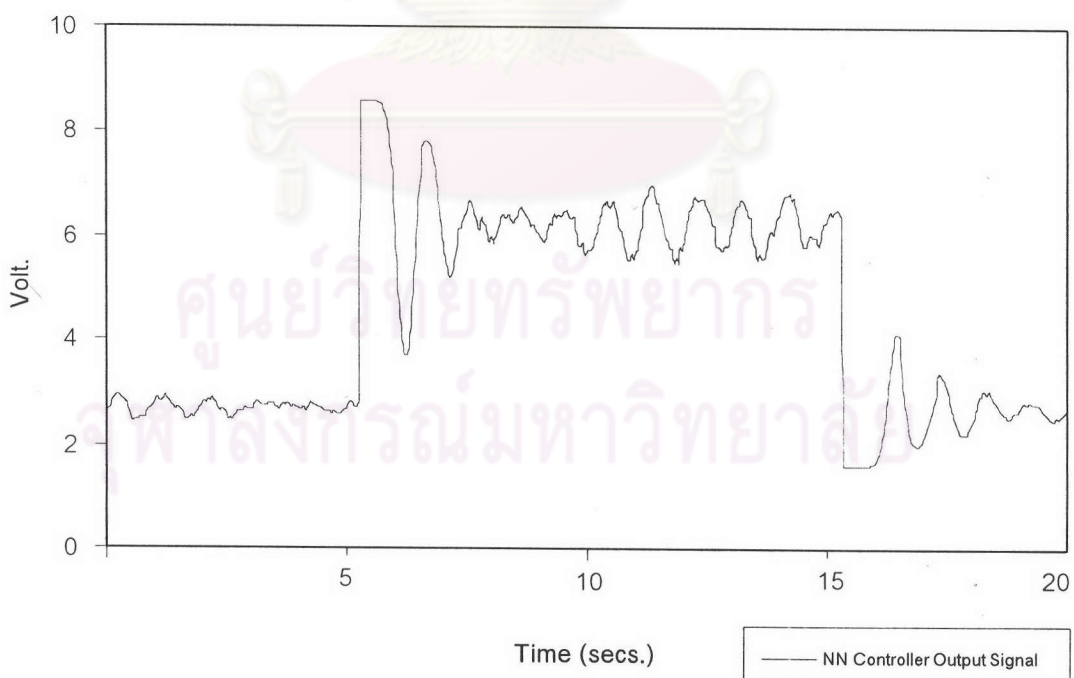
รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5



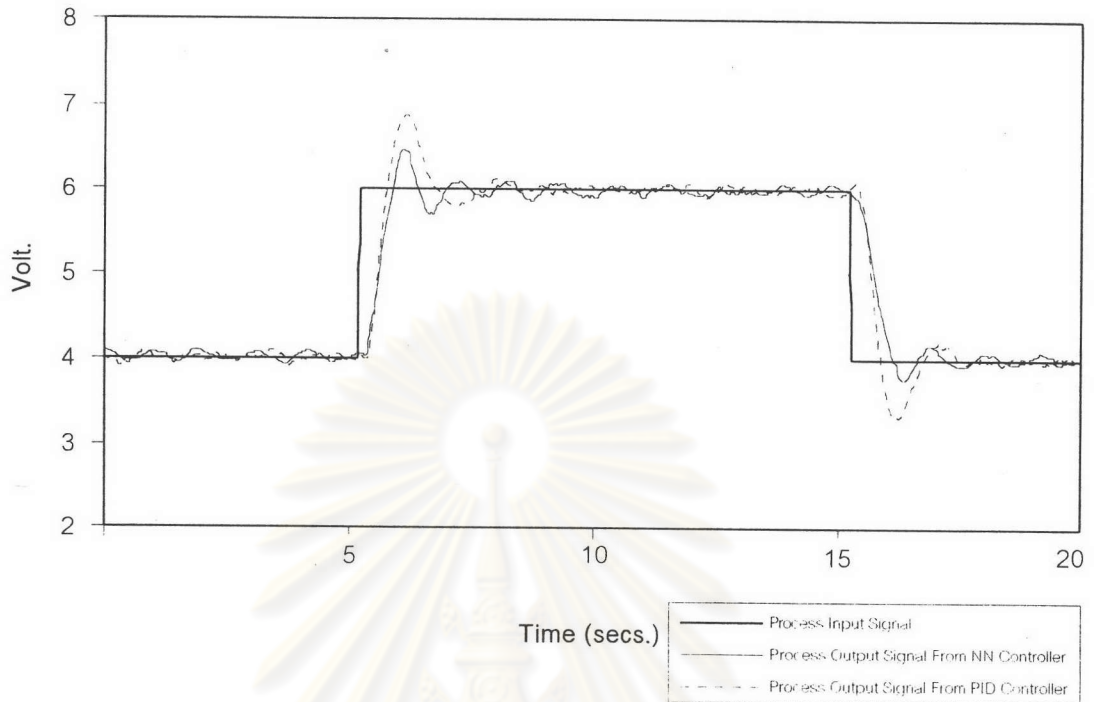
รูปที่ 4.43 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5



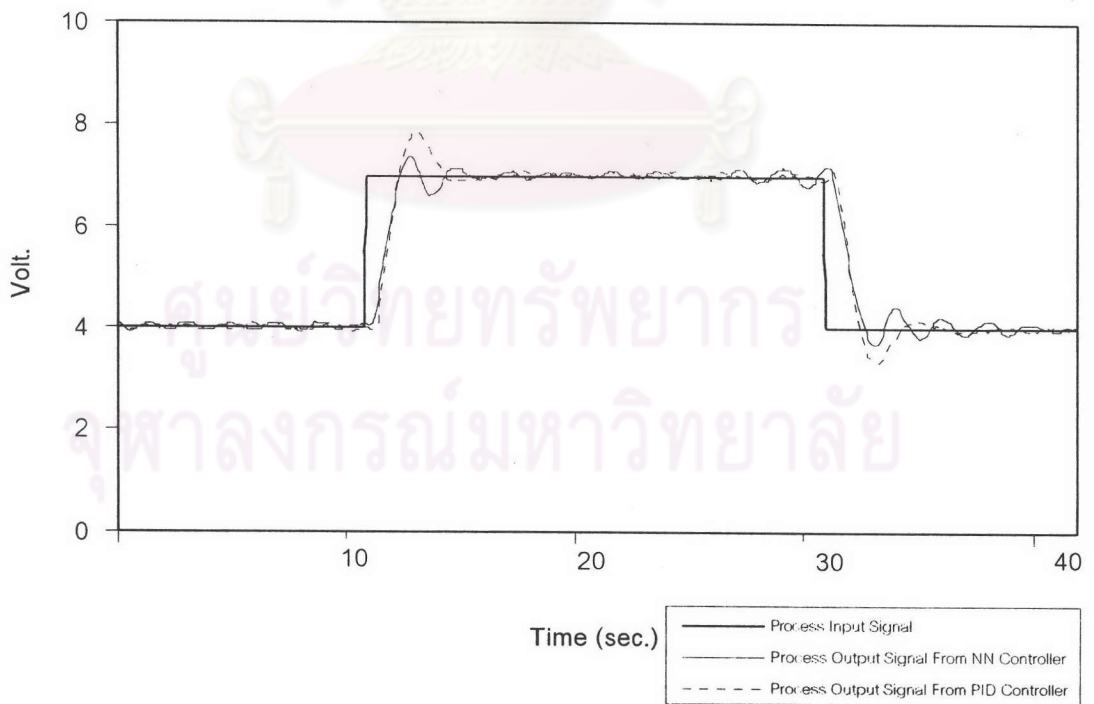
รูปที่ 4.44 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลต์ ที่ Throttle Control = 5



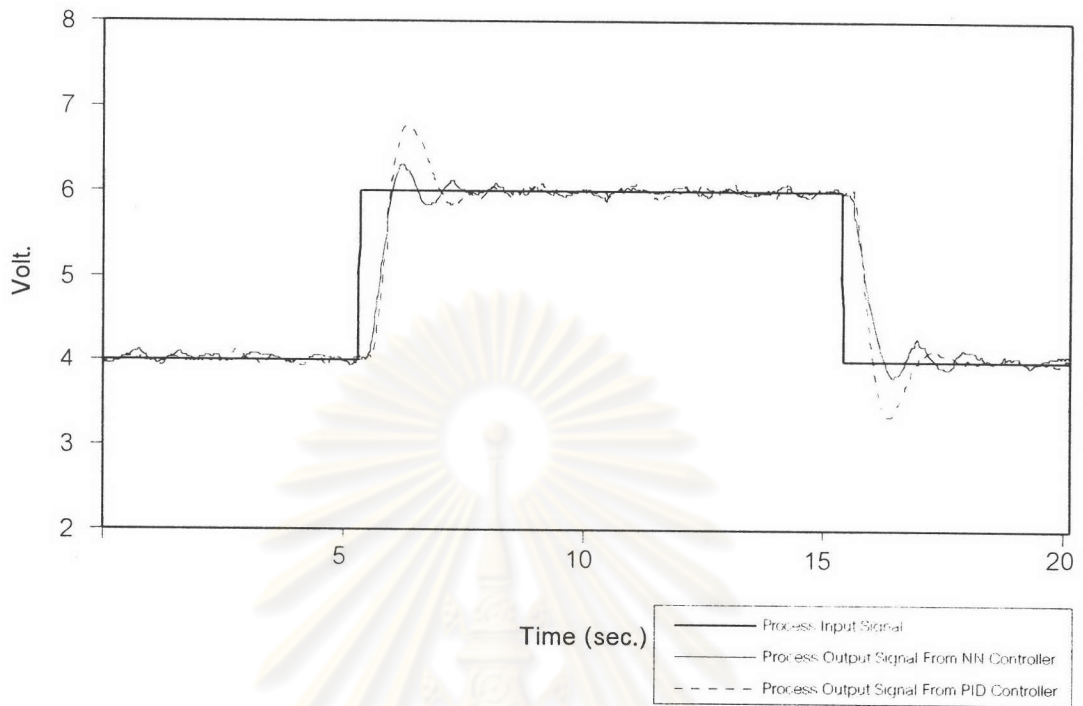
รูปที่ 4.45 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลต์ ที่ Throttle Control = 5



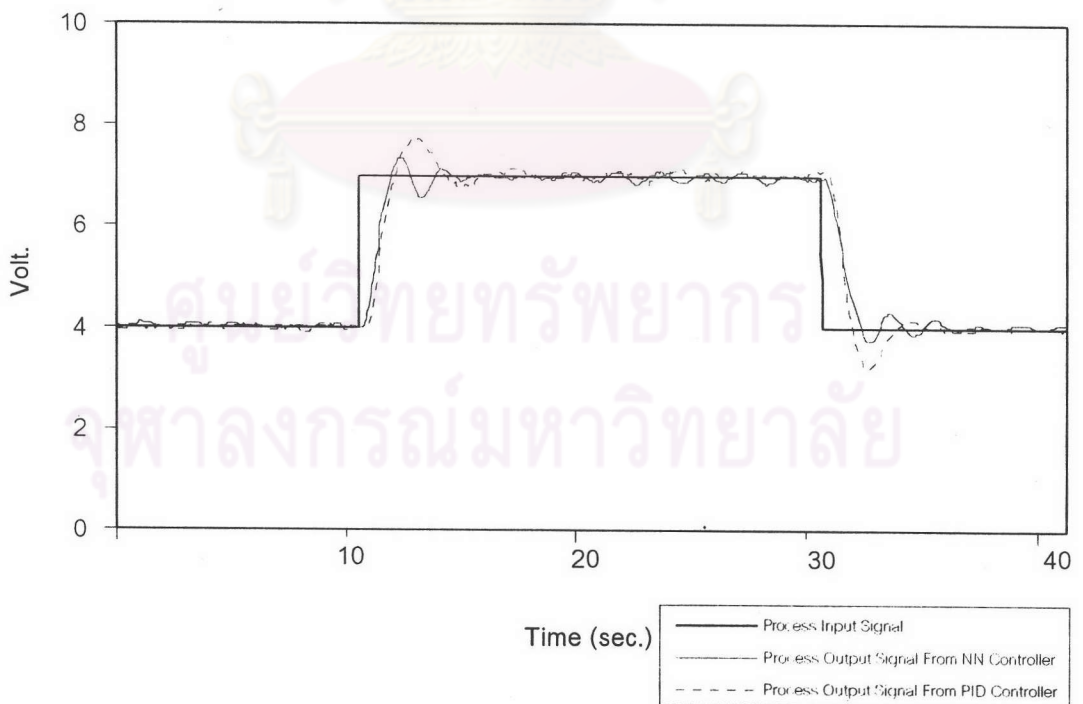
รูปที่ 4.46 แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



รูปที่ 4.47 แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4



รูปที่ 4.48 แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิวรอน
เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลต์ ที่ Throttle Control = 5



รูปที่ 4.49 แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิวรอน
เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลต์ ที่ Throttle Control = 5