บทที่ 4

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องในระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง

ระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่องเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป ซึ่งนอกจากจะต้องควบคุมระบบให้ได้ตามต้องการแล้ว ยังจำเป็นต้องมีระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องเพื่อป้องกันอันตรายและลดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดความผิดพร่อง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องในระบบนี้ เช่น การประยุกต์ใช้ข่ายงานประสาทเพื่อรู้จำรูปแบบความผิดพร่องเดี่ยวจากสัญญาณที่วัดได้ในระบบในสถานะอยู่ตัวแล้วของ K. Watanabe, I. Matsuura, M. Abe, M. Kubota, D.M. Himmelblau [18], และ M.F. Abdel Mageed, A.F. Sakr, A. Bahgat [21] หรือการประยุกต์ใช้ข่ายงานประสาทเพื่อรู้จำรูปแบบความผิดพร่องเดี่ยวจากสัญญาณที่วัดได้ในระบบในภาวะชั่วครู่ ในงานของ Y. Maki, K.A. Loparo [24]

ในบทนี้เป็นการประยุกต์ใช้ข่ายงานประสาทแบบลำดับชั้นหลายขั้นตอนเพื่อตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องเดี่ยวและความผิดพร่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองแห่งในระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง โดยสามารถตรวจพบความผิดพร่องได้ตั้งแต่ในช่วงภาวะชั่วครู่ของระบบ

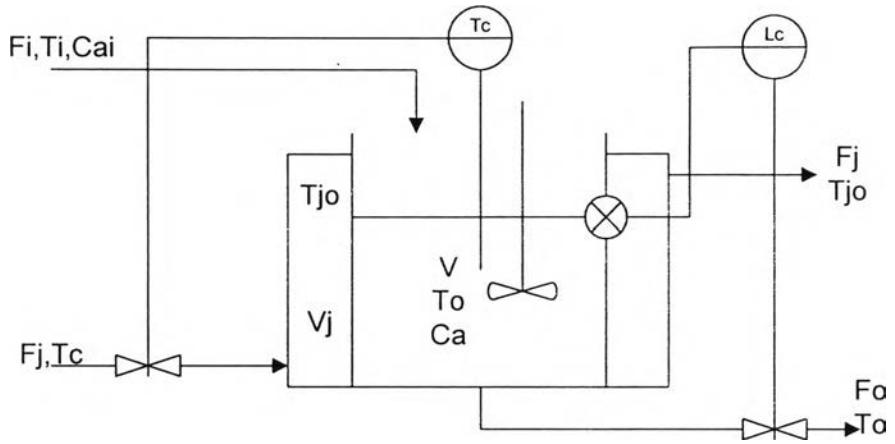
4.1 ระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่องและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [27]

ระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่องที่พิจารณาดังรูปที่ 4.1 เป็นถังปฏิกรณ์เคมีชนิดที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา(Nonisothermal) และภายในถังปฏิกรณ์เคมีจะเกิดปฏิกิริยาของสารชนิดเดียวจากสารตั้งต้น A ไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ B $(A \xrightarrow{k} B)$ โดยที่ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ ΔH (Btu/mol) ของสาร A ที่เกิดปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic)
- เป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่องสามารถหาได้จากสมการสมดุลของมวล และสมการสมดุลของพลังงาน โดยมีสมมติฐานดังนี้

- การสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยมาก
- ความหนาแน่นของสารมีค่าคงที่
- สารในถังปฏิกรณ์ผสมกันอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.1 แผนภาพระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง

และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโดยน้ำเย็นที่ไหลผ่านถังหุ้ม ซึ่งจะถูกฉีดเข้าไปในถังหุ้มด้วยอัตราการไหล F_j ที่อุณหภูมิ T_c โดยที่ปริมาตรของน้ำในถังหุ้มคงที่ สำหรับแบบจำลองที่ใช้นี้จะไม่พิจารณาถึงความเฉื่อยทางความร้อนของผนังโลหะ เพราะค่าความจุความร้อนของผนังโลหะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความจุความร้อนของน้ำ และสมมติให้น้ำในถังหุ้มผสมกันอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ น้ำในถังหุ้มจะมีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด ดังนั้นปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการที่อุณหภูมิ T กับน้ำเย็นที่อุณหภูมิ T_{jo} จะเป็น

$$Q = Ua_0(T - T_{jo}) \tag{4.1}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน

a_0 คือ พื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อน

U คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น จะได้สมการที่ใช้อธิบายระบบดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{dV}{dt} &= F_i - F_o \\
\frac{d}{dt}(VC_a) &= F_iC_{ai} - F_oC_a - V(k_o \exp\frac{-E_a}{RT_o})C_a \\
\rho c_p \frac{d}{dt}(VT_o) &= \rho c_p(F_iT_i - F_oT_o) - \Delta HV(k_o \exp\frac{-E_a}{RT_o})C_a - Ua_o(T_o - T_{jo}) \\
\rho_j V_j c_j \frac{dT_{jo}}{dt} &= \rho_j F_j c_j(T_c - T_{jo}) + Ua_o(T_o - T_{jo})
\end{aligned} \tag{4.2}$$

กำหนดตัวแปรต่างๆ ในระบบ โดยที่ค่าในวงเล็บเป็นค่าที่สภาวะปกติ ตามรายการอ้างอิง [27] และใช้หน่วยของแต่ละตัวแปรเป็นหน่วยเดียวกับที่เขียนในวงเล็บตลอดทั้งบทที่ 4 เป็นดังนี้

F_i	คือ อัตราการไหลเข้าของของเหลว	(40 ft^3/hr)
C_{ai}	คือ ความเข้มข้นของของเหลวที่ไหลเข้า	(0.50 lb mol A / ft^3)
C_a	คือ ความเข้มข้นของของเหลวที่ไหลออก	(0.245 lb mol A / ft^3)
T_i	คือ อุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเข้า	(530 °R *)
T_c	คือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลเข้า	(530 °R)
T	คือ อุณหภูมิของของเหลวในถัง	(600 °R)
T_a	คือ อุณหภูมิของของเหลวในถัง	(600 °R)
T_{jo}	คือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลออก	(594.6 °R)
V	คือ ปริมาตรของของเหลวในถัง	(48 ft^3)
F_a	คือ อัตราการไหลออกของสาร	(40 ft^3/hr)
F_j	คือ อัตราการไหลของน้ำเย็น	(49.9 ft^3/hr)
k_0	คือ แฟกเตอร์ความถี่(Frequency Factor)	(7.08×10^{10} h^{-1})
E_a	คือ พลังงานกระตุ้น	(30,000 Btu / lb mol)
R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ	(1.99 Btu / lb mol °R)
ρ	คือ ความหนาแน่นของของเหลวในถัง	(50 lb_m / ft^3)
c_p	คือ ความจุความร้อนของของเหลวในถัง	(0.75 Btu / lb_m °R)
ΔH	คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา	(-30,000 Btu / lb mol)
a_0	คือ พื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อน	(250 ft^3)
U	คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อน	(150 Btu / hr ft^2 °R)
V_j	คือ ปริมาตรของถังหุ้ม	(3.85 ft^3)
c_j	คือ ความจุความร้อนของน้ำเย็น	(1 Btu / lb_m °R)
ρ_j	คือ ความหนาแน่นของน้ำเย็น	(62.3 lb_m / ft^3)

* หน่วย °R คือ Degree Réaumur ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้ทางวิศวกรรมเคมี โดย 1°R = 274.40 K

การควบคุมระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง โดยปกติมักจะต้องการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการ (T_a) ให้คงที่ ซึ่งในที่นี้ทำการควบคุมแบบ PI โดยใช้วงรอบควบคุม 2 วง คือ ควบคุมปริมาตรของสารในถังโดยการปรับอัตราการไหลออกของสาร F_a และควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการโดยการปรับอัตราการไหลของน้ำเย็น F_j

$$F_0 = 40 - K_{PO}(48 - V) - K_{IO}\int(48 - V)) \qquad K_{PO} = 10, K_{IO} = 40 \qquad (4.3)$$

$$F_j = 49.9 - K_{PJ}(600 - T) - K_{IJ}\int(600 - T)) \qquad K_{PJ} = 4, K_{IJ} = 10 \qquad (4.4)$$

ในที่นี้พิจารณาความผิดพร่องที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรภายนอก ตามตารางที่ 4.1 โดยความผิดพร่องที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการทำงานที่ผิดปกติของตัวขับเร้า, วาล์ว หรือกระบวนการป้อนสาร ซึ่งส่งผลให้สัญญาณต่างๆ ในระบบเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะปกติ และจากชนิดของความผิดพร่องเดี่ยวที่พิจารณาทั้งหมด 8 ชนิดนั้น จะเห็นได้ว่า จะมีกรณีที่ไม่สามารถเกิดความผิดพร่องขึ้นพร้อมกันสองแห่งได้ใน 4 กรณี นั่นคือ กรณีที่สัญญาณตัวเดียวกันมีค่ามากขึ้นพร้อมกับมีค่าน้อยลง ได้แก่

- F#1p เกิดขึ้นพร้อมกันกับ F#1n
- F#2p เกิดขึ้นพร้อมกันกับ F#2n
- F#3p เกิดขึ้นพร้อมกันกับ F#3n
- F#4p เกิดขึ้นพร้อมกันกับ F#4n

ดังนั้น จำนวนกรณีของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองแห่ง จึงมีทั้งหมด 24 กรณี

ตารางที่ 4.1 ความผิดพร่องที่พิจารณาในระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง

สัญลักษณ์	ลักษณะความผิดพร่อง
F#1p	อัตราการไหลเข้าของสาร(F_i) มีค่ามากขึ้น
F#1n	อัตราการไหลเข้าของสาร(F_i) มีค่าน้อยลง
F#2p	ความเข้มข้นของสารเข้า(C_{ai}) มีค่ามากขึ้น
F#2n	ความเข้มข้นของสารเข้า(C_{ai}) มีค่าน้อยลง
F#3p	อุณหภูมิของสารเข้า(T_i) มีค่ามากขึ้น
F#3n	อุณหภูมิของสารเข้า(T_i) มีค่าน้อยลง
F#4p	อุณหภูมิขาเข้าของน้ำเย็น(T_c) มีค่ามากขึ้น
F#4n	อุณหภูมิขาเข้าของน้ำเย็น(T_c) มีค่าน้อยลง

4.2 การตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องของระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง

4.2.1 การออกแบบหน้าต่างเคลื่อนที่และข่ายงานประสาทปฐมภูมิ [28]

สัญญาณเข้าของข่ายงานประสาทปฐมภูมิผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่ในขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นสัญญาณที่วัดได้ทั้งหมด 5 แห่ง โดยกำหนดค่าของความยาวและความสูงสำหรับหน้าต่างแต่ละอันที่ใช้กับแต่ละสัญญาณที่วัดได้จากถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่องดังตารางที่ 4.2 ซึ่งการกำหนดค่านั้น พิจารณาให้มีความไวในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยควรกำหนดความยาวและความสูงของหน้าต่างให้น้อยกว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ เพื่อให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสัญญาณได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ต่างกันเมื่อเกิดความผิดพร่องต่างชนิด และทำให้ข่ายงานประสาทสามารถใช้ข้อมูลนี้ในการวินิจฉัยหาสาเหตุความผิดพร่องได้อย่างรวดเร็ว

ข่ายงานประสาทปฐมภูมิเป็นข่ายงานประสาท 2 ชั้น โดยมีจำนวนโหนดในชั้นอินพุตเท่ากับ 21 โหนด จำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 15 โหนด และจำนวนโหนดในชั้นเอาท์พุตเท่ากับ 3 โหนด ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้บอกแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลว่าเป็นแบบเพิ่มขึ้น ลดลง หรือคงที่ โดยรูปแบบการสอนข่ายงานได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 3

ตารางที่ 4.2 ความยาวและความสูงของหน้าต่างเคลื่อนที่ [28]

	V	T_o	T_{jo}	F_o	F_j
ความยาว	21	21	21	21	21
ความสูง (หน่วย)	2 (ft^3)	6 (°R)	4 (°R)	5 (ft^3 / hr)	15 (ft^3 / hr)

4.2.2 การออกแบบข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 1 (Net_0) [28]

ข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 1 จะรับสัญญาณที่ออกจากข่ายงานประสาทปฐมภูมิ และวินิจฉัยว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติหรือมีความผิดพร่องเกิดขึ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไปจากสภาวะปกติ ข่ายงานประสาทจะวินิจฉัยว่ามีสาเหตุจากความผิดพร่องชนิดใด โดยข่ายงานประสาทในลำดับชั้นที่ 1 จะถูกสอนด้วยชุดข้อมูลในสภาวะปกติของระบบและข้อมูลของความผิดพร่องเดี่ยวแต่ละแห่ง

ข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 1 เป็นข่ายงานประสาท 2 ชั้น โดยมีจำนวนโหนดในชั้นอินพุตเท่ากับ 15 โหนด ซึ่งเท่ากับจำนวนสัญญาณที่วัดได้ 5 แห่ง คูณ 3 ซึ่งเป็นจำนวนโหนดในชั้นเอาท์พุตของข่ายงานประสาทปฐมภูมิ, จำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 10 โหนด และจำนวนโหนดในชั้นเอาท์พุตเท่ากับ 9 โหนด ซึ่งเป็นจำนวนสัญญาณเตือนความผิดพร่อง 8 แห่งและสัญญาณที่บอกถึงสภาวะปกติของระบบ โดยชุดข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ใช้สอนข่ายงานประสาทแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ชุดข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกสำหรับสอน Net_0
ในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดความผิดพร่องเดี่ยวชนิดต่างๆ

สัญญาณเข้า	สัญญาณออก								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ปกติ	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F#1p	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F#1n	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F#2p	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F#2n	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F#3p	0	0	0	0	0	1	0	0	0
F#3n	0	0	0	0	0	0	1	0	0
F#4p	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F#4n	0	0	0	0	0	0	0	0	1

4.2.3 การออกแบบข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 2

ข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่สอง ประกอบด้วยข่ายงานประสาททั้งหมด 8 ข่ายงานซึ่งเท่ากับจำนวนความผิดพร่องเดี่ยวทั้งหมด 8 แห่ง(Net_1p, Net_1n, Net_2p, Net_2n, Net_3p, Net_3n, Net_4p, Net_4n) แต่ละข่ายงานจะถูกสอนด้วยชุดข้อมูลกรณีที่เกิดความผิดพร่องเดี่ยวและกรณีที่เกิดความผิดพร่องพร้อมกัน 2 แห่งเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับความผิดพร่องเดี่ยวของข่ายงานนั้น ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 สำหรับการทำงานของข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่สองจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันกับข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่หนึ่ง แต่การแสดงผลสัญญาณเตือนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อได้รับสัญญาณสวิตช์ซึ่งเป็นสัญญาณออกของข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่หนึ่งเท่านั้น

ข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่สองแต่ละข่ายงานเป็นข่ายงานประสาท 2 ชั้น และกำหนดให้รับสัญญาณที่วัดได้จากระบบเพียง 4 แห่ง โดยดัดสัญญาณที่เป็นปริมาตรของของเหลวในถัง(V) ออกไป เนื่องจากค่า V จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะกรณีที่เกิด F#1p และ F#1n เท่านั้น อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงยังมีค่าน้อยแม้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพร่องจะมีค่ามาก ดังนั้น จำนวนโหนดในชั้นอินพุตของข่ายงานเท่ากับ 12 โหนด ซึ่งเท่ากับจำนวนสัญญาณที่วัดได้ 4 แห่ง คูณ 3 ซึ่งเป็นจำนวนโหนดในชั้นเอาท์พุตของข่ายงานประสาทปฐมภูมิ, จำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 10 โหนด และจำนวนโหนดในชั้นเอาท์พุตเท่ากับ 7 โหนด ซึ่งเป็นจำนวนสัญญาณเตือนความผิดพร่องเดี่ยวของข่ายงานนั้นๆ และความผิดพร่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันกับความผิดพร่องเดี่ยวชนิดอื่นๆ 6 แห่ง ตัวอย่างของชุดข้อมูลสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่

ตารางที่ 4.4 ชุดข้อมูลของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกสำหรับสอน Net_4p

สัญญาณเข้า	สัญญาณออก						
	1	2	3	4	5	6	7
F#4p	1	0	0	0	0	0	0
F#4p, 1p	1	1	0	0	0	0	0
F#4p, 1n	1	0	1	0	0	0	0
F#4p, 2p	1	0	0	1	0	0	0
F#4p, 2n	1	0	0	0	1	0	0
F#4p, 3p	1	0	0	0	0	1	0
F#4p, 3n	1	0	0	0	0	0	1

ใช้สอนข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่สองซึ่งสร้างสัญญาณเตือนที่เกี่ยวข้องกับความผิดพร่อง F#4p (Net_4p) แสดงดังตารางที่ 4.4

4.2.4 การกำหนดฐานความรู้เพื่อการตัดสินใจและสวิตช์ชิ่งของข่ายงานประสาททุติยภูมิ ในกรณีที่ความผิดพร่องต่างชนิดแต่ให้รูปแบบของข้อมูลซ้ำกัน

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ข่ายงานประสาทเพื่อการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องในระบบนั้น อาศัยการรู้จำรูปแบบของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ได้รับการสอน ดังนั้น กรณีที่สัญญาณเข้ามีรูปแบบซ้ำกันแต่ต้องการให้สัญญาณออกต่างกัน จึงทำให้ยากที่ข่ายงานประสาทจะเรียนรู้ และตัดสินใจว่าเป็นสัญญาณออกชนิดใด ตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดความผิดพร่องชนิดที่ 3 ขึ้น และทำให้รูปแบบของสัญญาณเข้าของข่ายงานเป็นแบบเดียวกับความผิดพร่องชนิดที่ 5 จะทำให้ข่ายงานประสาทไม่สามารถเรียนรู้จากชุดข้อมูลเพื่อแยกความแตกต่างของความผิดพร่องได้

ดังนั้น เพื่อให้ข่ายงานประสาทสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องได้ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีฐานความรู้เพื่อช่วยในการตัดสินใจสำหรับการสร้างสัญญาณออกของข่ายงาน โดยฐานความรู้นี้จะอาศัยความแตกต่างกันของสัญญาณบางสัญญาณที่ไม่ได้สอนให้กับข่ายงานประสาท เช่น ขนาดหรือเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด(Peak time)

เนื่องจากในการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องให้ได้ตั้งแต่ระบบยังอยู่ในช่วงภาวะชั่วครู่ อาศัยหน้าต่างเคลื่อนที่และข่ายงานประสาทปฐมภูมิจำแนกแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ดังนั้น สัญญาณเข้าของข่ายงานประสาททุติยภูมิ จึงเป็นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเท่านั้น ซึ่งกรณีของ

ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่องนั้น เลือกใช้เวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j หลังจากเกิดความผิดพร่องเป็นฐานความรู้ให้กับข่ายงานประสาท โดยพิจารณาถึงความผิดพร่อง 2 กรณีที่ให้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณซ้ำกัน แต่มีเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j ที่ต่างกัน

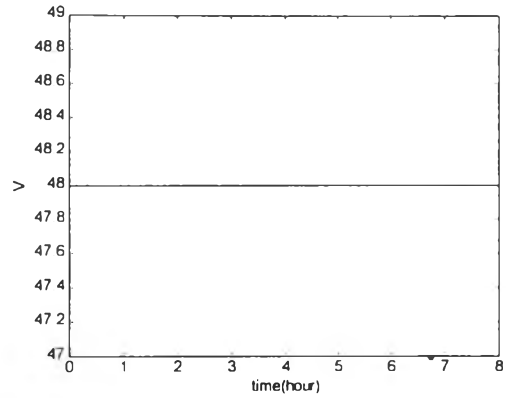
สำหรับกรณีของความผิดพร่องที่ให้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณซ้ำกัน สำหรับการสอน Net_0 เป็นดังรูปที่ 4.2 - 4.3 และตารางที่ 4.5 – 4.6

รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 เป็นรูปเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้จากระบบ เมื่อเกิดความผิดพร่องเดี่ยว 2 ชนิดที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงก่อนถึงค่าพุ่งเกิน(Peak) เป็นแบบเดียวกัน ดังนั้นเมื่อสัญญาณที่วัดได้จากระบบผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่ จะได้สัญญาณออกของข่ายงานประสาทปฐมภูมิ(และเป็นสัญญาณเข้าของข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 1) เป็นแบบเดียวกัน โดยได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ทำให้ข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 1 (Net_0) ไม่สามารถวินิจฉัยจากสัญญาณที่เข้ามาได้ว่าเป็นความผิดพร่องชนิดใด ดังนั้นเพื่อให้ข่ายงานสร้างสัญญาณเตือนได้ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีฐานความรู้เพื่อช่วยในการตัดสินใจสร้างสัญญาณเตือน โดยอาศัยความแตกต่างกันของช่วงเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j ดังนี้

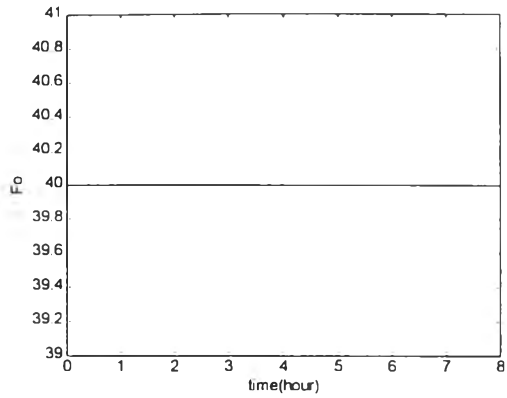
- ในกรณีความผิดพร่อง F#2p จะเห็นว่าช่วงเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินมีค่ามากกว่า 0.45 ชั่วโมง ขณะที่ F#3p นั้น ช่วงเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินมีค่าน้อยกว่า 0.45 ชั่วโมง
- ในกรณีความผิดพร่อง F#2n จะเห็นว่าช่วงเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินมีค่ามากกว่า 0.45 ชั่วโมง ขณะที่ F#3n นั้น ช่วงเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินมีค่าน้อยกว่า 0.45 ชั่วโมง

สำหรับการวินิจฉัยความผิดพร่องของข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่ 2 (Net_1p ถึง Net_4n) พบว่ามีกรณีที่ความผิดพร่องต่างชนิดกันแต่ให้การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงก่อนถึงค่าพุ่งเกินสูงสุดเป็นแบบเดียวกัน โดยเป็นความผิดพร่องที่เกิดพร้อมกับ F#2p, F#3p หรือ F#2n, F#3n ดังรูปที่ 4.4 - 4.5 และตารางที่ 4.7 – 4.8

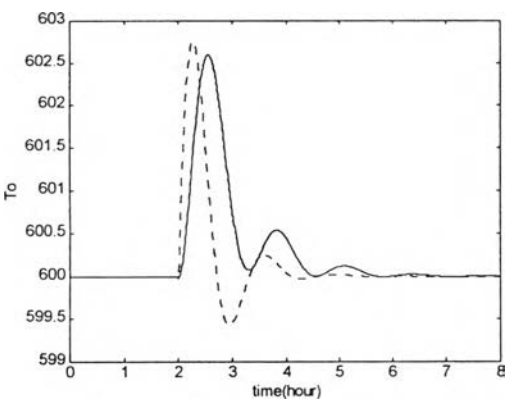
รูปที่ 4.4 – 4.5 เป็นรูปเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแบบเดียวกันของสัญญาณที่วัดได้จากระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องต่างชนิดกัน เมื่อสัญญาณที่วัดได้จากระบบผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่ จะได้สัญญาณออกของข่ายงานประสาทปฐมภูมิ(และเป็นสัญญาณเข้าของข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่สอง) เป็นรูปแบบที่ซ้ำกัน ดังตารางที่ 4.7 – 4.8 ทำให้ข่ายงานประสาททุติยภูมิในลำดับชั้นที่สอง ไม่สามารถวินิจฉัยจากสัญญาณที่เข้ามาได้ว่าเป็นความผิดพร่องชนิดใด ดังนั้นเพื่อให้ข่ายงานสร้างสัญญาณเตือนได้ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีฐานความรู้เพื่อช่วยในการตัดสินใจสร้างสัญญาณเตือน โดยอาศัยความแตกต่างกันของขนาดและเวลาซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j



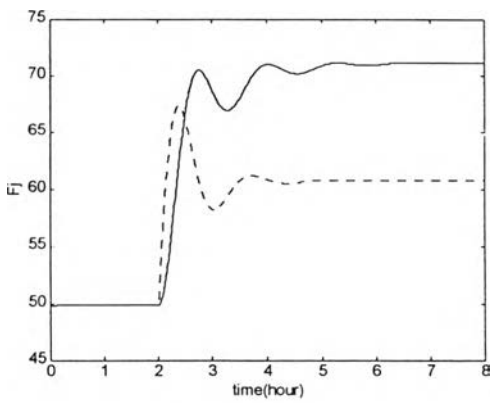
(ก) V



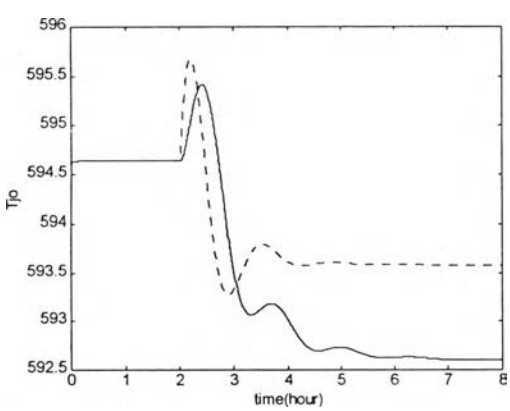
(ง) F_o



(ข) T_o



(จ) F_j



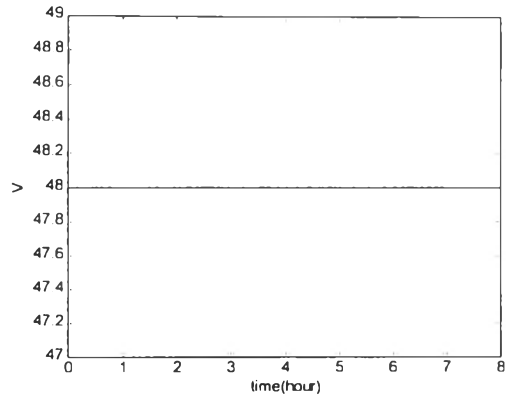
(ค) T_{jo}

รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้กรณีเกิดความผิดพร่องเดี่ยว ณ ชั่วโมงที่ 2

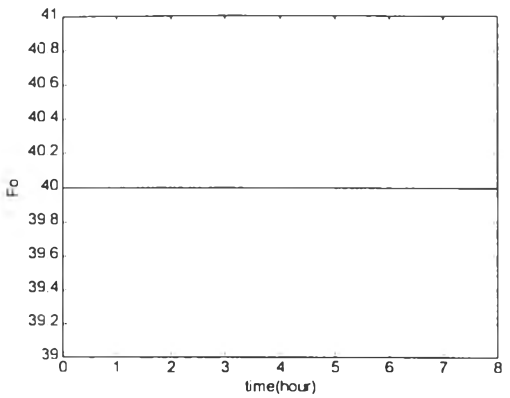
F#2p 25% _____ F#3p 5% _ _ _ _ _ _

ตารางที่ 4.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกของสัญญาณที่วัดได้ กรณีเกิดความผิดพร่องเดี่ยว เมื่อผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่และข่ายงานประสาทปฐมภูมิ

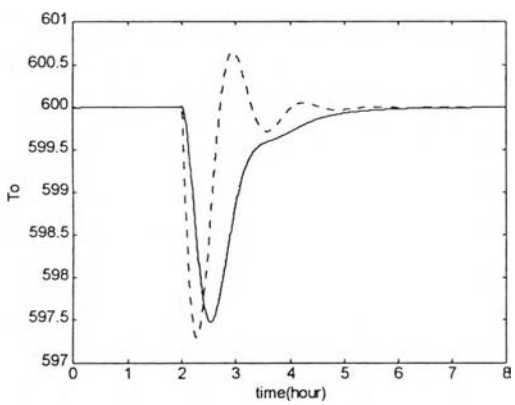
Fault	V	T_o	T_{jo}	F_o	F_j
F#2p	คงที่	เพิ่ม	เพิ่ม	คงที่	เพิ่ม
F#3p	คงที่	เพิ่ม	เพิ่ม	คงที่	เพิ่ม



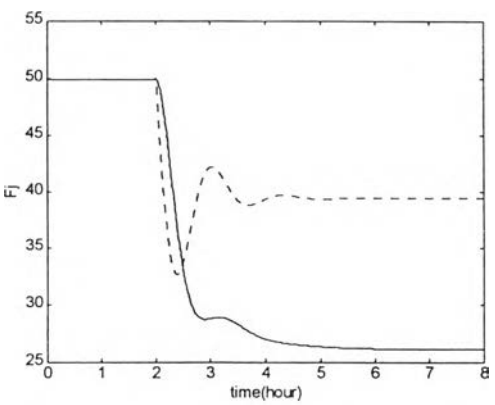
(ก) V



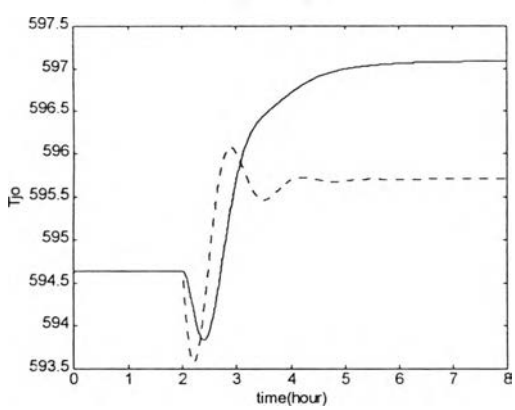
(ง) F_o



(ข) T_o



(จ) F_j



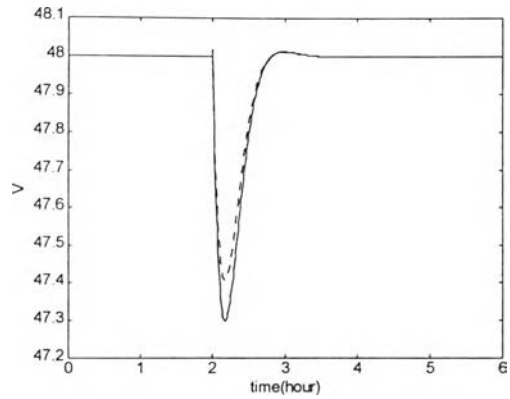
(ค) T_{jo}

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้กรณีเกิดความผิดพร่องเดี่ยว ณ ชั่วโมงที่ 2

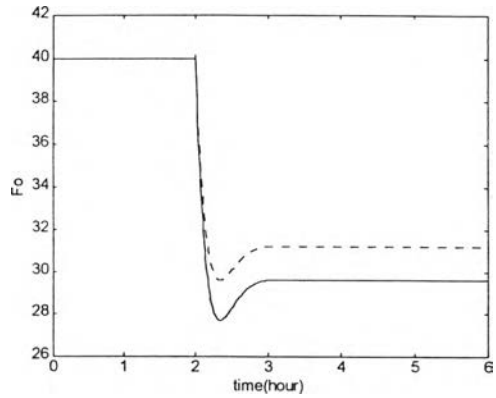
F#2n 30% _____ F#3n 5% _ _ _ _ _

ตารางที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกของสัญญาณที่วัดได้ กรณีเกิดความผิดพร่องเดี่ยว เมื่อผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่และข่ายงานประสาทปฐมภูมิ

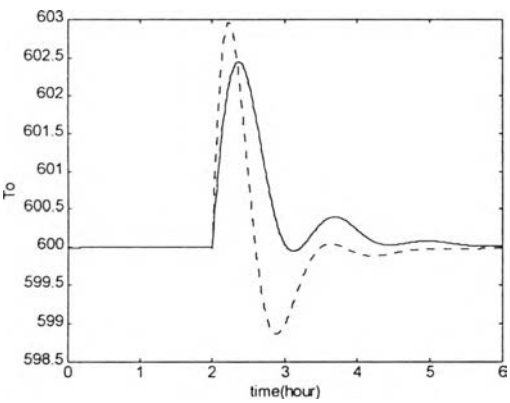
Fault	V	T_o	T_{jo}	F_o	F_j
F#2n	คงที่	ลด	ลด	คงที่	ลด
F#3n	คงที่	ลด	ลด	คงที่	ลด



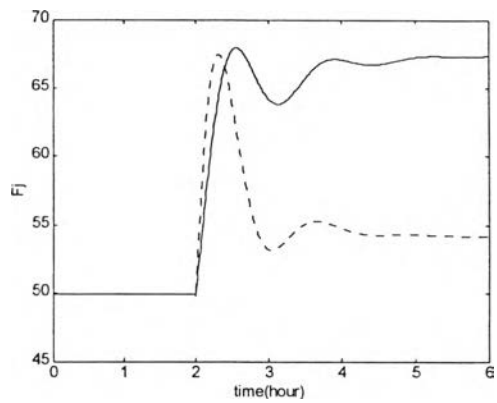
(ก) V



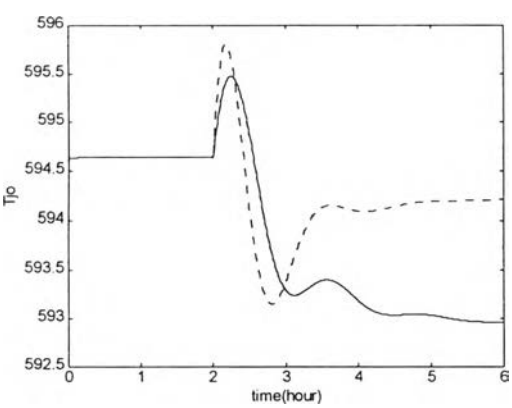
(ง) F_o



(ข) T_o



(จ) F_j



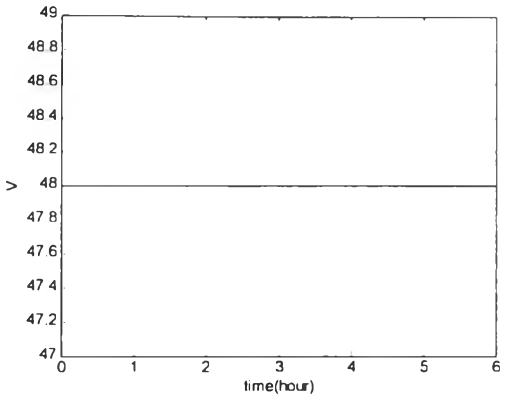
(ค) T_{jo}

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้กรณีเกิดความผิดพร่องสองแห่งพร้อมกัน ณ ชั่วโมงที่ 2

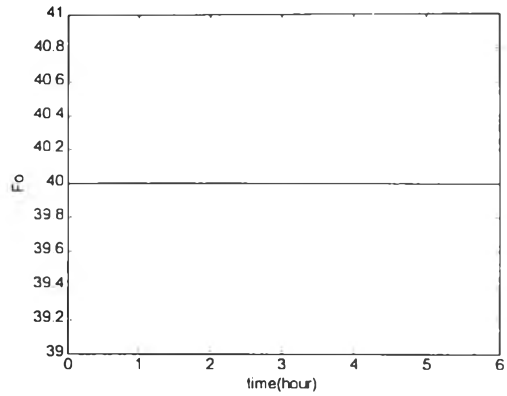
F#1n 26% และ F#2p 32% _____ F#1n 22% และ F#3p 5% _ _ _ _ _ _

ตารางที่ 4.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกของสัญญาณที่วัดได้เมื่อผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่และข่ายงานประสาทปฐมภูมิ กรณีเกิดความผิดพร่องสองแห่งพร้อมกัน

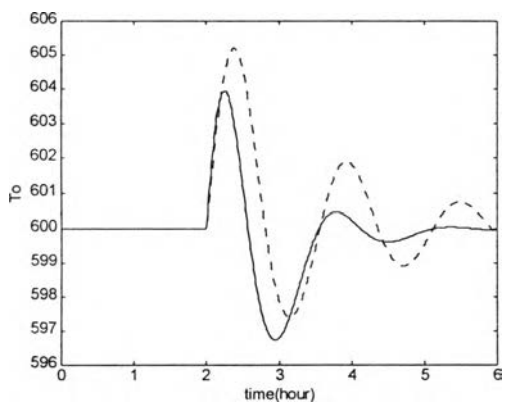
Fault	V	T_o	T_{jo}	F_o	F_j
F#1n, 2p	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม
F#1n, 3p	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม



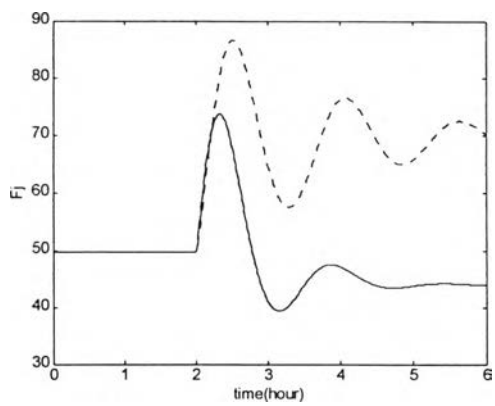
(ก) V



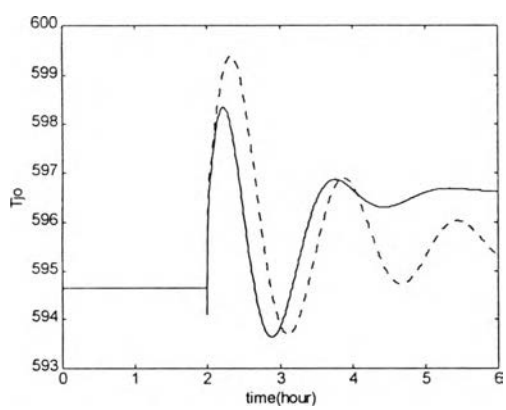
(ง) F_o



(ข) T_o



(จ) F_j



(ค) T_{jo}

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้กรณีเกิดความผิดพร่องสองแห่งพร้อมกัน ณ ชั่วโมงที่ 2

F#4p 4% และ F#2n 25% _____ F#4p 5% และ F#3n 4% _ _ _ _ _

ตารางที่ 4.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกของสัญญาณที่วัดได้เมื่อผ่านหน้าต่างเคลื่อนที่และข่ายงานประสาทปฐมภูมิ กรณีเกิดความผิดพร่องสองแห่งพร้อมกัน

Fault	V	T_o	T_{jo}	F_o	F_j
F#4p, 2n	คงที่	เพิ่ม	เพิ่ม	คงที่	เพิ่ม
F#4p, 3n	คงที่	เพิ่ม	เพิ่ม	คงที่	เพิ่ม

I 19239452

4.2.5 **การกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ เพื่อให้ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องเริ่มสร้างสัญญาณเตือน**

ระบบโดยทั่วไป อาจมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณต่างๆ ในระบบเป็นค่าเล็กๆ และไม่ทำให้ระบบมีความเสียหายมากนัก เนื่องจากตัวควบคุมยังสามารถควบคุมสัญญาณในระบบให้เข้าสู่ค่าอ้างอิงที่กำหนด และมีเสถียรภาพได้

จากผลการจำลองระบบเมื่อเกิดความผิดพร่อง ดังในรูปที่ 4.2 – 4.5 จะเห็นได้ว่าสัญญาณ T_o และ T_{jo} ซึ่งมีค่าที่สภาวะปกติเท่ากับ 600 °R และ 594.6 °R ตามลำดับนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ± 5 °R เท่านั้น โดยเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าที่สภาวะปกติแล้วจะมีค่าน้อยมาก ในขณะที่สัญญาณ F_j ซึ่งมีค่าที่สภาวะปกติเท่ากับ 49.9 ft^3 / hr นั้นมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 10 ft^3 / hr และเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าที่สภาวะปกติ จะได้ว่า F_j เปลี่ยนแปลงไปมากกว่า 20%

ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกให้การเปลี่ยนแปลงของ F_j เป็นตัวบ่งชี้ถึงความผิดพร่องที่เกิดขึ้น เพื่อให้ระบบตรวจพบความผิดพร่องตัดสินใจได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้น เป็นเพียงการรบกวนของระบบหรือต้องสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่อง โดยได้กำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ F_j ที่วัดได้จากระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง(และเป็นสัญญาณเข้าสู่ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปภายในช่วง $\pm 10\%$ ของค่าที่สภาวะปกติ โดยให้ถือว่าเป็นการรบกวนของระบบ และหากเกิดความผิดพร่องที่ทำให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงไปและมีค่าเกินช่วงดังกล่าว ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องจึงจะเริ่มทำงานและสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องออกมา

4.3 ผลการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

จากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้ MSHANN วินิจฉัยความผิดพร่องของระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง ได้ผลการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องเดี่ยว(ดังตารางที่ 4.9) และความผิดพร่องพร้อมกัน 2 แห่ง(ดังตารางที่ 4.10) สรุปได้ดังนี้

1. กรณีเกิดความผิดพร่องเดี่ยว MSHANN สามารถตรวจพบและวินิจฉัยได้ถูกต้องทุกกรณี
2. กรณีเกิดความผิดพร่องพร้อมกัน 2 แห่ง MSHANN สามารถตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องได้ถูกต้องทั้ง 2 แห่ง
3. สามารถตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องได้ตั้งแต่ในช่วงภาวะชั่วครู่ โดยตรวจพบและวินิจฉัยได้ภายในช่วง 3 นาที – 40 นาที หลังจากเกิดความผิดพร่อง ขณะที่ช่วงเวลาเข้าที่ของระบบเป็น 3 ชั่วโมง

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณีเกิด F#3p 1% ณ ชั่วโมงที่ 1 จะเห็นว่าสัญญาณแต่ละแห่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อย จึงได้สัญญาณออกจาก Net_0 คือสัญญาณที่บอกว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติดังรูปที่ 4.6 แต่เมื่อเกิด F#3p 5% จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแต่ละแห่งมีค่ามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า F_j ดังรูปที่ 4.9 และจากรูปที่ 4.8(ก) พบว่า Net_0 สร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องของ F#3p หลังเกิดความผิดพร่องประมาณ 0.4 ชั่วโมงหรือ 24 นาที เนื่องจากต้องรอการตัดสินใจจากช่วงเวลาเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j โดยที่ช่วงเวลาเข้าที่ของระบบประมาณ 2 ชั่วโมง รูปที่ 4.8(ข) เป็นสัญญาณเตือนความผิดพร่องจาก Net_3p ซึ่งทำงานพร้อมกันกับ Net_0 จะพบว่าสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องของ F#3p ได้ไวกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก Net_3p เป็นข่ายงานที่ถูกสอนด้วยรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของ F#3p เป็นหลัก ดังนั้น เมื่อเกิดความผิดพร่อง F#3p ขึ้น จึงสร้างสัญญาณเตือนได้ทันที โดยไม่ต้องรอการตัดสินใจจากช่วงเวลาเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j

รูปที่ 4.10 – 4.13 ซึ่งเป็นกรณีเกิด F#4n 1% และ 4% ณ ชั่วโมงที่ 1 สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.6 – 4.9 แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อเกิด F#4n ไม่ซ้ำกับกรณีเกิดความผิดพร่องชนิดอื่น Net_0 และ Net_4n จึงสร้างสัญญาณเตือน F#4n ได้ทันทีที่พบการเปลี่ยนแปลงโดยไม่จำเป็นต้องรอการตัดสินใจจากช่วงเวลาเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดของ F_j ทำให้สร้างสัญญาณเตือนได้รวดเร็วภายในเวลา 6 นาที หลังเกิดความผิดพร่อง

รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.16 เป็นผลการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองแห่ง โดยในรูปที่ 4.14 – 4.15 แสดงสัญญาณเตือนความผิดพร่องและการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้จากระบบในกรณีที่เกิด F#1p และ F#2p พร้อมกัน ณ ชั่วโมงที่ 0.4 พบว่า Net_0 (รูปที่ 4.14(ก)) สร้างสัญญาณเตือนได้เฉพาะ F#1p และสวิตช์ให้เฉพาะ Net_1p แสดงผล จากรูปที่ 4.14(ข) จะเห็นว่า Net_1p สามารถสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องได้ถูกต้องทั้งสองแห่ง ภายในเวลาประมาณ 4 นาที ซึ่งยังอยู่ในภาวะชั่วครู่ของระบบ และเมื่อสัญญาณผ่านการดำเนินการออร์แล้วจะได้สัญญาณเตือนความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ ถูกต้องทั้งสองแห่ง

รูปที่ 4.16 – 4.17 แสดงสัญญาณเตือนความผิดพร่องและการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้จากระบบในกรณีที่เกิด F#2n และ F#4p พร้อมกัน ณ ชั่วโมงที่ 0.4 พบว่า Net_0 (รูปที่ 4.16(ก)) สร้างสัญญาณเตือนได้เฉพาะ F#4p และสวิตช์ให้เฉพาะ Net_4p แสดงผล จากรูปที่ 4.16(ข) จะเห็นว่า Net_4p สามารถสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องได้ถูกต้องทั้งสองแห่ง และตรวจพบได้ในภาวะชั่วครู่ของระบบ โดยตรวจพบ F#4p ภายในเวลาประมาณ 4 นาที และตรวจพบ F#2n ภายในเวลาประมาณ 24 นาที เนื่องจากต้องรอการตัดสินใจความผิดพร่องที่ซ้ำกันระหว่าง F#2n กับ F#3n จากช่วงเวลาเกิดค่าพุ่ง

เกินสูงสุดของ F_j และเมื่อสัญญาณผ่านการดำเนินการออร์แล้วจะได้สัญญาณเตือนความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ ถูกต้องทั้งสองแห่ง

สำหรับกรณีอื่นๆ ที่เหลือได้สรุปผลไว้แล้วดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ผลการวินิจฉัยความผิดพร่องเดี่ยวด้วย MSHANN และเวลาที่ตรวจพบ

ความผิดพร่อง	สัญญาณเตือนจาก Net_0	สัญญาณเตือนจากข่ายงานทุติยภูมิในขั้นตอนที่ 2	สัญญาณเตือนเมื่อผ่าน OR operation	*	เวลาที่ตรวจพบ (นาที)
#1p	#1p	#1p	#1p	1/1	4
#1n	#1n	#1n	#1n	1/1	4
#2p	#2p	#2p	#2p	1/1	28
#2n	#2n	#2n	#2n	1/1	28
#3p	#3p	#3p	#3p	1/1	24
#3n	#3n	#3n	#3n	1/1	24
#4p	#4p	#4p	#4p	1/1	4
#4n	#4n	#4n	#4n	1/1	6

* จำนวนความผิดพร่องที่วินิจฉัยได้ถูกต้อง / จำนวนความผิดพร่องที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.10 ผลการวินิจฉัยความผิดพร่องสองแห่งพร้อมกันด้วย MSHANN และเวลาที่ตรวจพบ

ความผิดพร่อง	สัญญาณเตือน จาก Net_0	สัญญาณเตือนจาก ข่ายงานทุติยภูมิ ในขั้นตอนที่ 2	สัญญาณเตือน เมื่อผ่าน OR operation	*	เวลาที่ ตรวจพบ (นาที)
#1p,2p	#1p	#1p,2p	#1p,2p	2/2	3 – 17
#1p,2n	#1p	#1p,2n	#1p,2n	2/2	5 – 40
#1p,3p	#1p	#1p,3p	#1p,3p	2/2	3 – 40
#1p,3n	#1p	#1p,3n	#1p,3n	2/2	5 – 24
#1p,4p	#1p,4p	#1p,4p U #1p,4p	#1p,4p	2/2	5 – 30
#1p,4n	#4n	#1p,4n	#1p,4n	2/2	6
#1n,2p	#1n	#1n,2p	#1n,2p	2/2	5 – 20
#1n,2n	#1n	#1n,2n	#1n,2n	2/2	3 – 12
#1n,3p	#1n	#1n,3p	#1n,3p	2/2	5 – 20
#1n,3n	#1n	#1n,3n	#1n,3n	2/2	5 – 30
#1n,4p	#4p	#1n,4p	#1n,4p	2/2	6
#1n,4n	#4n	#1n,4n	#1n,4n	2/2	3
#2p,3p	#2p	#2p,3p	#2p,3p	2/2	28
#2p,3n	#2p,3n	#2p,3n U #2p,3n	#2p,3n	2/2	12 – 28
#2p,4p	#4p	#2p,4p	#2p,4p	2/2	6 – 40
#2p,4n	#4n	#2p,4n	#2p,4n	2/2	6 – 18
#2n,3p	#2n,3p	#2n,3p U #2n,3p	#2n,3p	2/2	10 – 30
#2n,3n	#2n	#2n,3n	#2n,3n	2/2	30
#2n,4p	#4p	#2n,4p	#2n,4p	2/2	6 – 24
#2n,4n	#4n	#2n,4n	#2n,4n	2/2	6 – 30
#3p,4p	#4p	#3p,4p	#3p,4p	2/2	6 – 30
#3p,4n	#4n	#3p,4n	#3p,4n	2/2	4 – 20
#3n,4p	#4p	#3n,4p	#3n,4p	2/2	4 – 30
#3n,4n	#4n	#3n,4n	#3n,4n	2/2	4 – 20

* จำนวนความผิดพร่องที่วินิจฉัยได้ถูกต้อง / จำนวนความผิดพร่องที่เกิดขึ้น

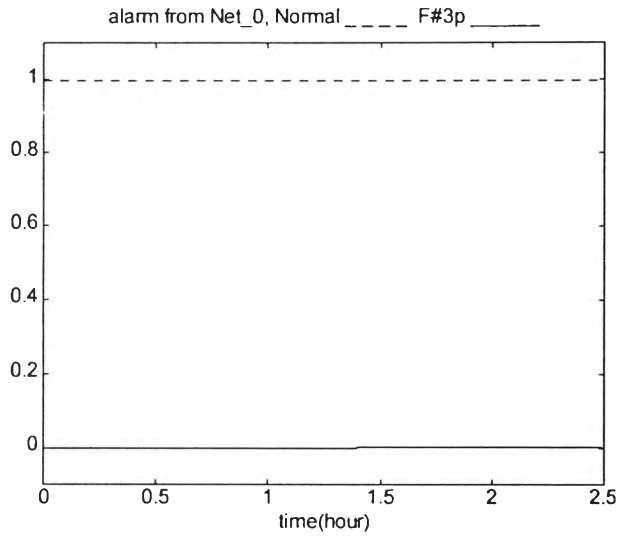
4.4 สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้ข่ายงานประสาทแบบลำดับชั้นหลายขั้นตอนเพื่อตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องในระบบถังปฏิกรณ์เคมีชนิดต่อเนื่อง ซึ่งมีช่วงเวลาเข้าที่ของระบบเป็น 3 ชั่วโมง พบว่าสามารถตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องที่พิจารณา ทั้งความผิดพร่องเดี่ยวและความผิดพร่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองแห่งได้ถูกต้องตั้งแต่ในช่วงภาวะชั่วครู่ โดยตรวจพบและวินิจฉัยได้ภายในช่วง 3 นาที – 40 นาที หลังจากเกิดความผิดพร่องขึ้น

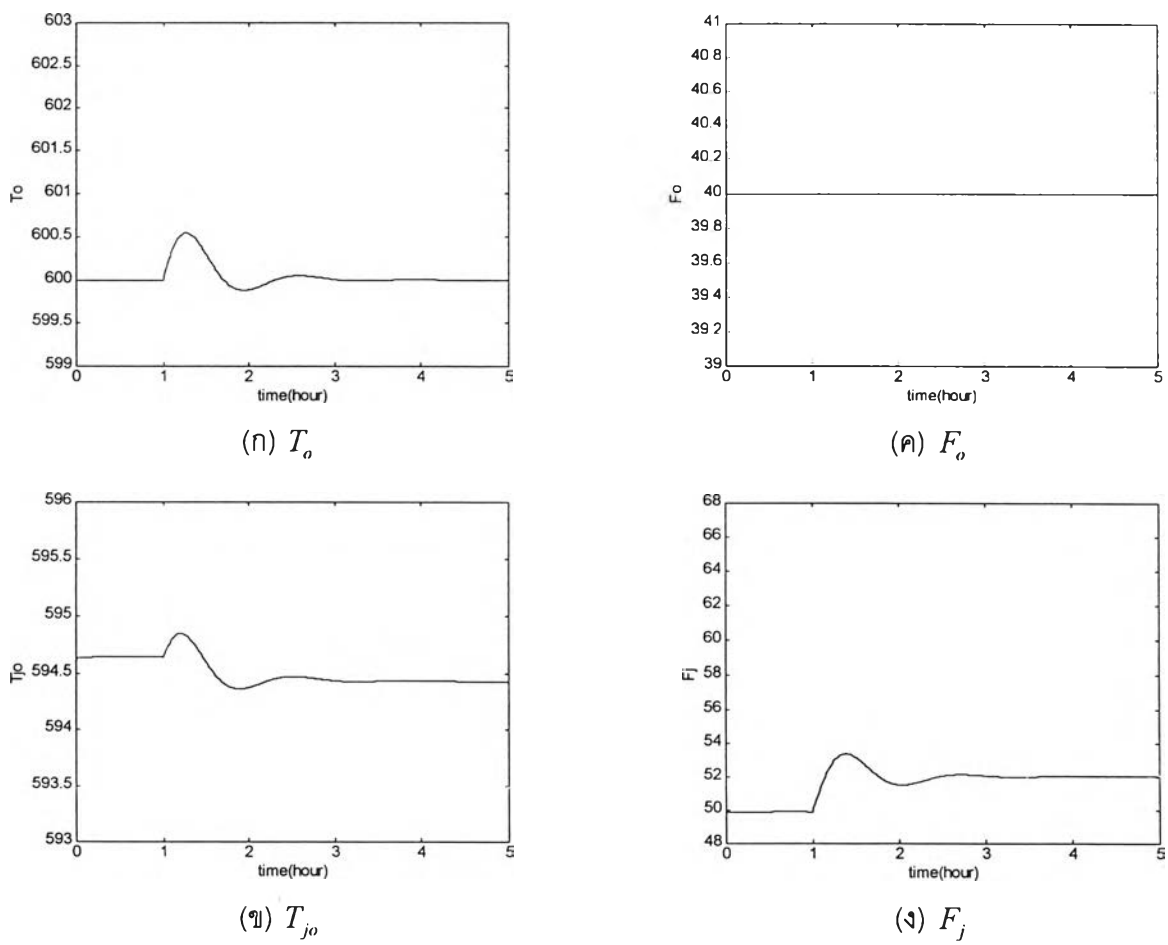
นอกจากนี้การใช้ข่ายงานระบบประสาทแบบลำดับชั้นหลายขั้นตอน ยังสามารถลดจำนวนข้อมูลที่ใช้สอนต่อ 1 ข่ายงานจากชุดข้อมูลความผิดพร่องที่ข่ายงานประสาทต้องวินิจฉัยให้ได้ว่าแตกต่างกันทั้งหมด 32 ชุด(ความผิดพร่องเดี่ยว 8 กรณี และความผิดพร่องพร้อมกันสองแห่ง 24 กรณี) โดยแบ่งออกเป็นเซตของชุดข้อมูลย่อยๆ เพียง 8 ชุดต่อ 1 ข่ายงาน ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการสอนและการวินิจฉัยความผิดพร่องของข่ายงานประสาท

ในกรณีที่ความผิดพร่องที่เกิดขึ้น มีขนาดน้อยๆ และอาจถือเป็นการรบกวนของระบบนั้น ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องจะไม่สร้างสัญญาณเตือนออกมา แต่เมื่อความผิดพร่องที่เกิดขึ้น และทำให้ขนาดของสัญญาณในระบบเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าขอบเขตที่กำหนดไว้ ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องจะทำงานและสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ในกรณีที่ความผิดพร่องต่างชนิดกัน แต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในระบบเป็นรูปแบบที่ซ้ำกัน จึงทำให้ยากในการตัดสินใจว่าเกิดความผิดพร่องชนิดใดขึ้น สามารถแก้ไขได้โดยอาศัยฐานความรู้เพิ่มเติมให้กับระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง เพื่อช่วยให้ข่ายงานประสาทสร้างสัญญาณเตือนความผิดพร่องได้อย่างถูกต้อง



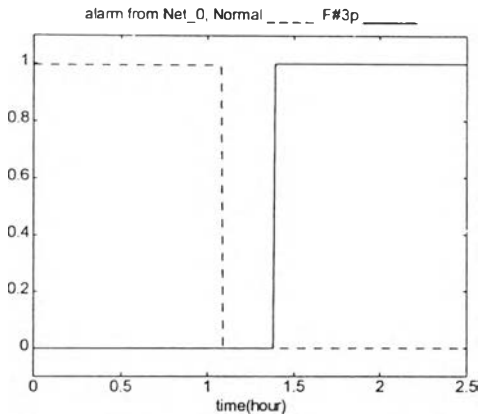
รูปที่ 4.6 สัญญาณเตือนจาก Net_0 กรณีเกิด F#3p 1% ณ ชั่วโมงที่ 1



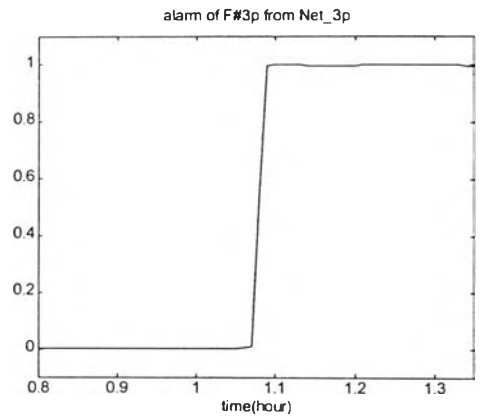
(ก) T_o (ค) F_o

(ข) T_{jo} (ง) F_j

รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณี F#3p 1% ณ ชั่วโมงที่ 1



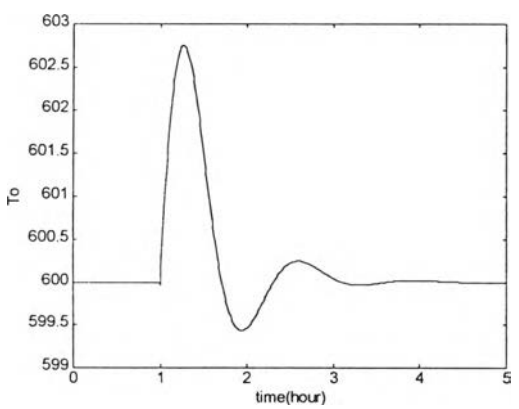
(ก)



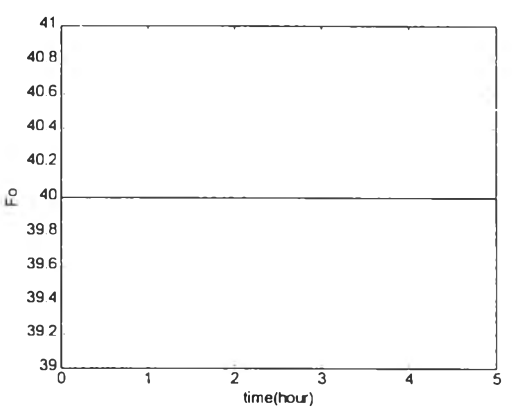
(ข)

รูปที่ 4.8 กรณีเกิด F#3p 5% ณ ชั่วโมงที่ 1

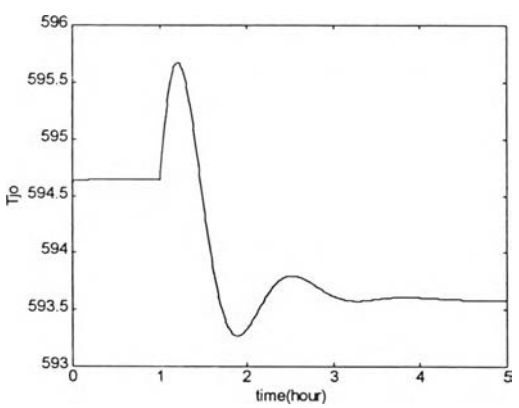
(ก) สัญญาณเตือนจาก Net_0 (ข) สัญญาณเตือนความผิดพร่อง F#3p จาก Net_3p



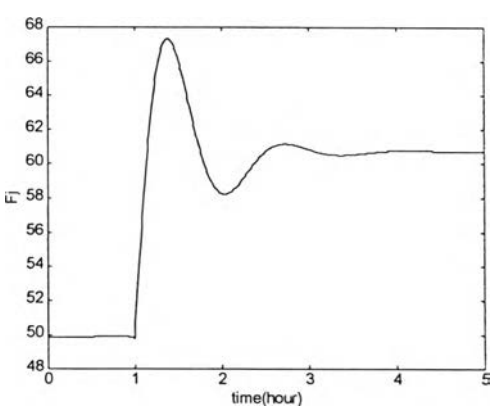
(ก) T_o



(ค) F_o

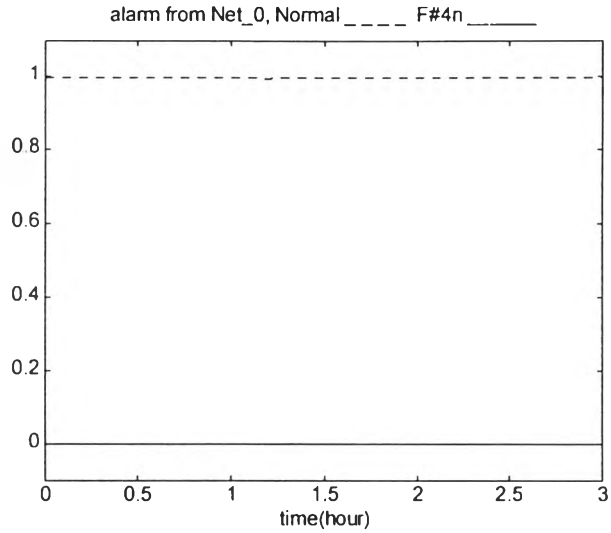


(ข) T_{jo}

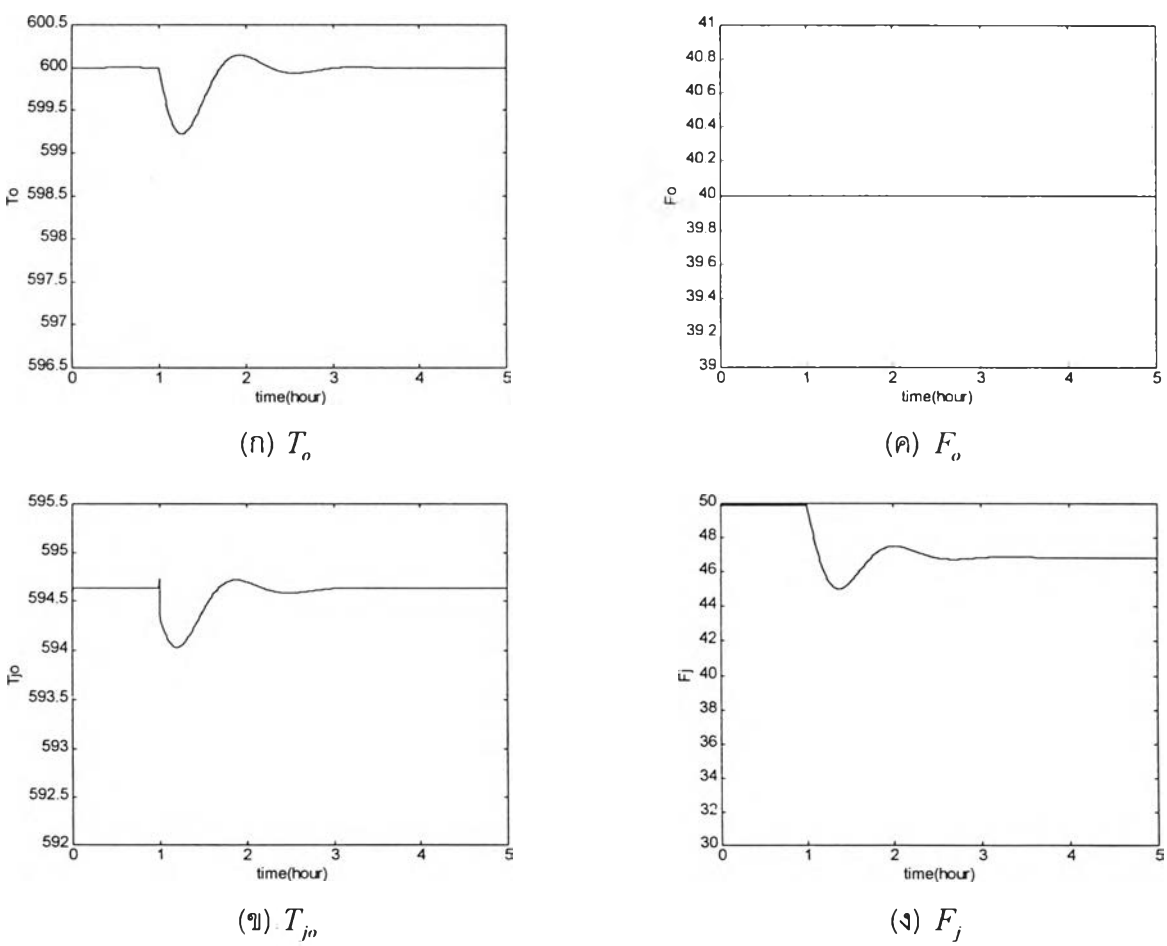


(ง) F_j

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณี F#3p 5% ณ ชั่วโมงที่ 1



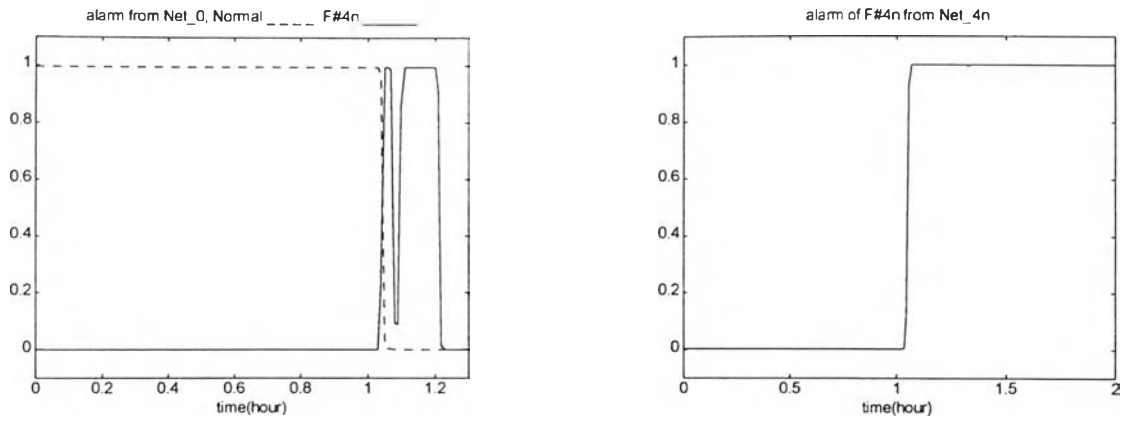
รูปที่ 4.10 สัญญาณเตือนจาก Net_0 กรณีเกิด F#4n 1% ณ ชั่วโมงที่ 1



(ก) T_o (ค) F_o

(ข) T_{jo} (ง) F_j

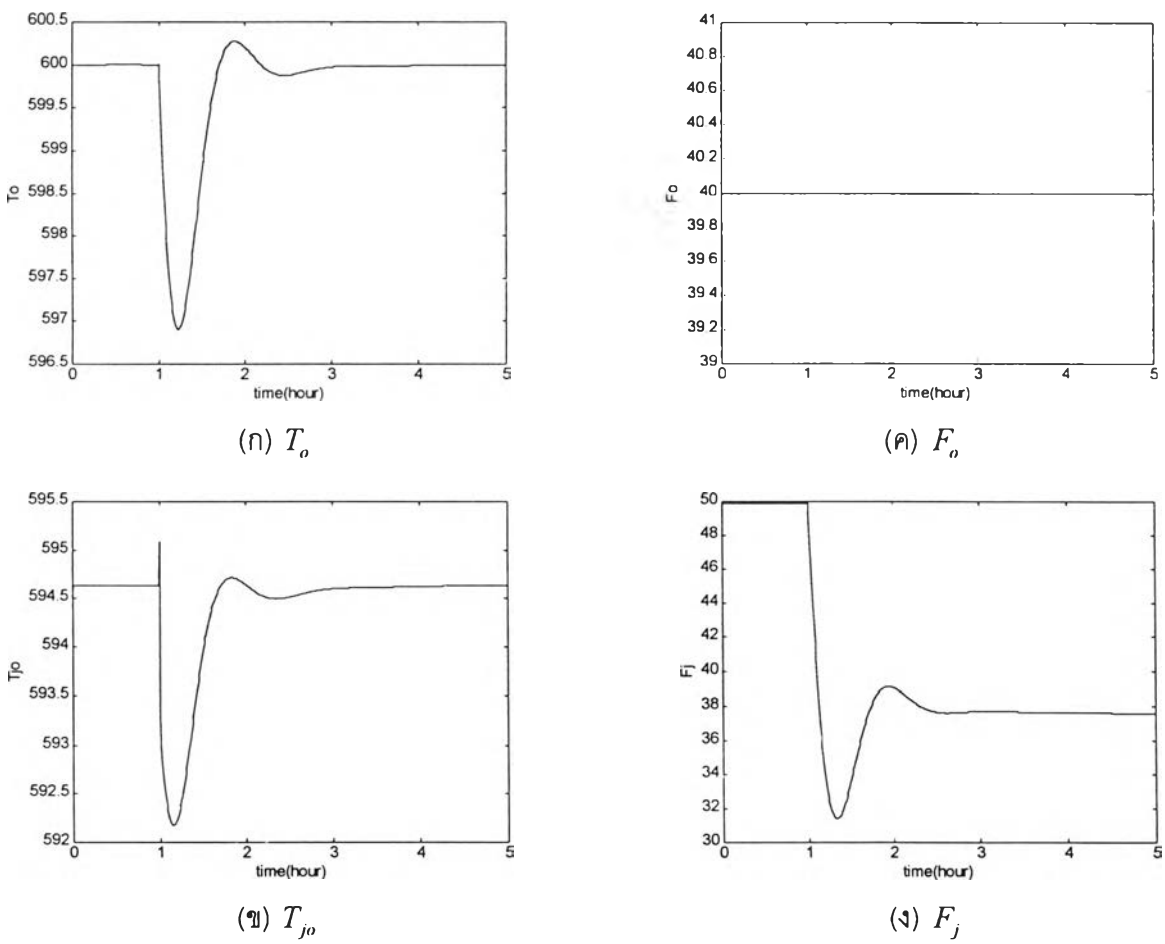
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณี F#4n 1% ณ ชั่วโมงที่ 1



(ก) (ข)

รูปที่ 4.12 กรณีเกิด F#4n 4% ณ ชั่วโมงที่ 1

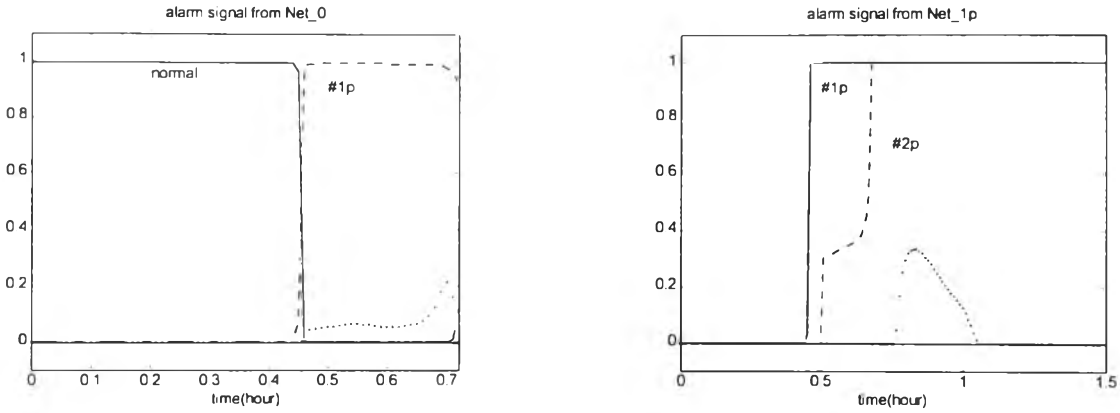
(ก) สัญญาณเตือนจาก Net_0 (ข) สัญญาณเตือนความผิดพร่อง F#4n จาก Net_4n



(ก) T_o (ค) F_o

(ข) T_{jo} (ง) F_j

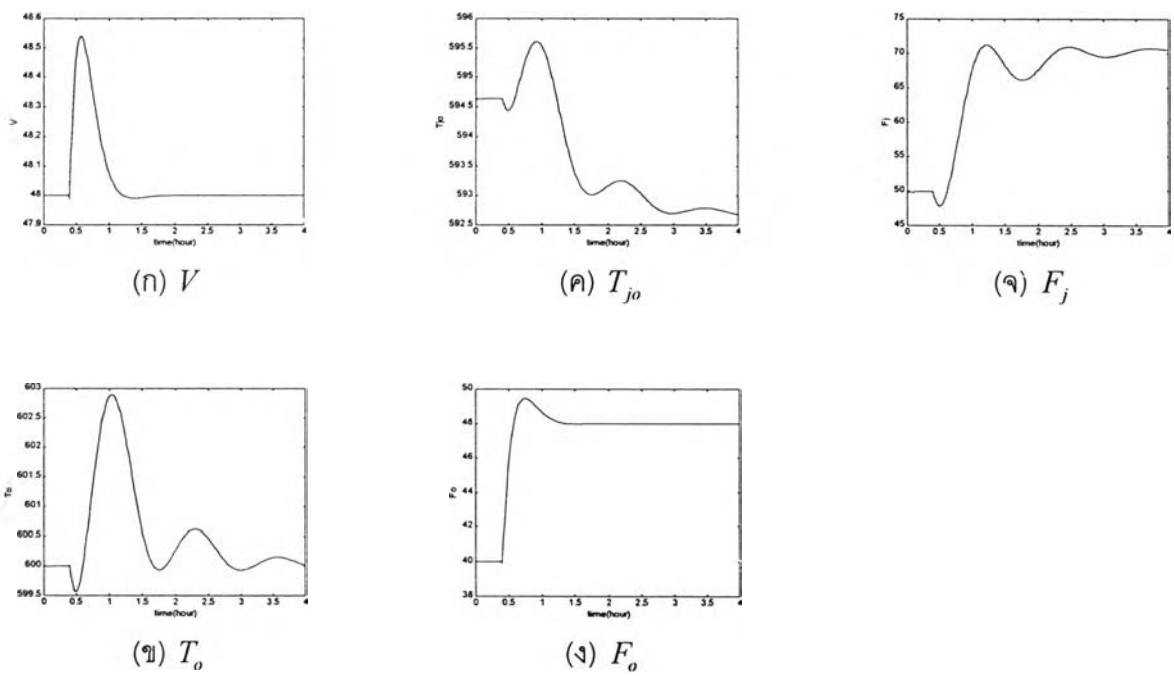
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณี F#4n 4% ณ ชั่วโมงที่ 1



(ก) (ข)

รูปที่ 4.14 กรณีเกิด F#1p 20% และ F#2p 20% ณ ชั่วโมงที่ 0.4

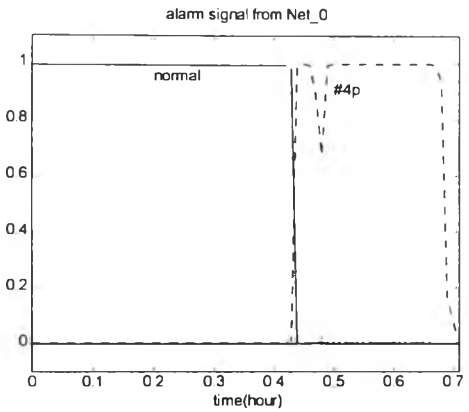
(ก) สัญญาณเตือนจาก Net_0 (ข) สัญญาณเตือนความผิดพร่องจาก Net_4n



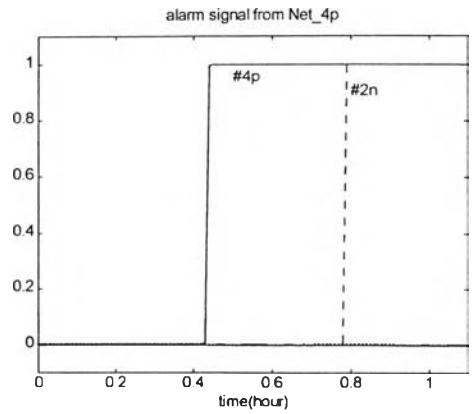
(ก) V (ค) T_{jo} (จ) F_j

(ข) T_o (ง) F_o

รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณี F#1p 20% และ F#2p 20% ณ ชั่วโมงที่ 0.4



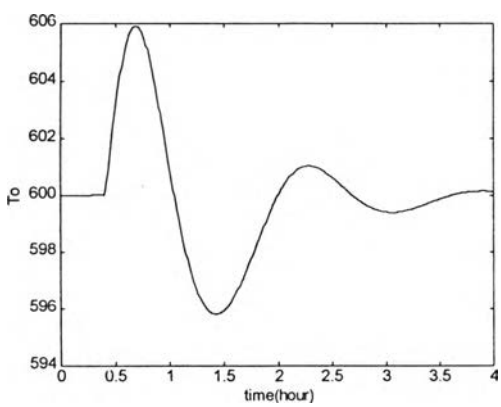
(ก)



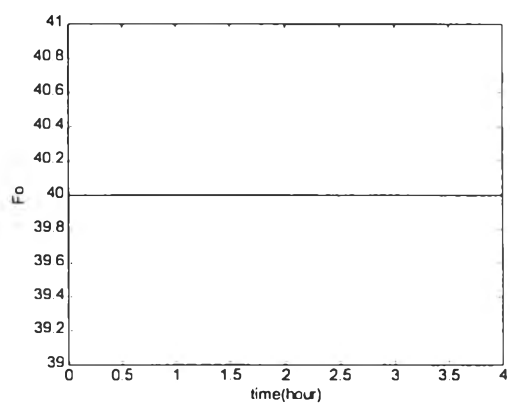
(ข)

รูปที่ 4.16 กรณีเกิด F#2n 25% และ F#4p 5% ณ ชั่วโมงที่ 0.4

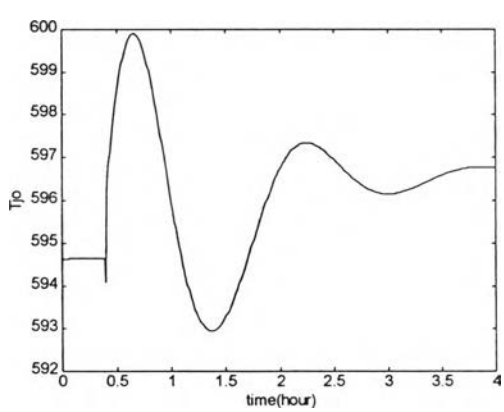
(ก) สัญญาณเตือนจาก Net_0 (ข) สัญญาณเตือนความผิดพร่องจาก Net_4p



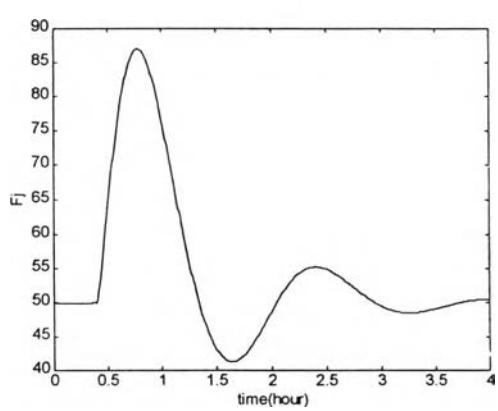
(ก) T_o



(ค) F_o



(ข) T_{jo}



(ง) F_j

รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณี F#2n 25% และ F#4p 5% ณ ชั่วโมงที่ 0.4