

## บทที่ 4

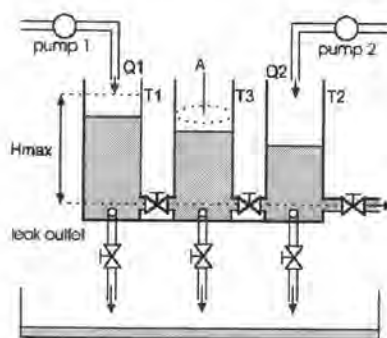
### ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดปกติในระบบสามถัง

ในการทดสอบและนำตัวประมาณออนไลน์มาใช้ในเบื้องต้นนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบสามถัง ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเข้าใจความผิดปกติได้ง่าย อีกทั้งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการส่วนใหญ่จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบสามถัง การตรวจพบและวินิจฉัยความผิดปกติในระบบสามถังได้มีการศึกษาในงานของ P.M. Frank [22] โดยใช้ตัวกรองหลายตัวสำหรับความผิดปกติแต่ละแบบ และสนใจเพียงความผิดปกติอันเนื่องจากการรั่วของถังเท่านั้น นอกจากนี้ในระบบสามถังยังมีการศึกษาในงานของ R.J. Patton, J. Chen, T.M. Siew [16] ซึ่งนำข่ายงานประสาทมาประยุกต์ใช้เป็นตัวทำนาย และแยกแยะความผิดปกติ แต่งานวิจัยนี้สนใจแค่การรั่วของถังเช่นเดียวกับงานของ P.M. Frank ความผิดปกติเนื่องจากการอุดตันของท่อได้มีการศึกษาในงานของ T. Marcu และ L. Mirea [23] ซึ่งนำข่ายงานประสาทมาจำลองระบบในสภาวะความผิดปกติต่าง ๆ กัน แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดในการใช้ข้อมูลจำนวนมากเพื่อฝึกข่ายงานประสาท

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการนำตัวประมาณออนไลน์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดปกติในระบบสามถัง โดยกล่าวถึงระบบสามถังและการนำตัวประมาณออนไลน์ในบทที่ 3 มาประยุกต์ใช้ พร้อมทั้งการพัฒนาและปรับปรุงสำหรับระบบสามถัง และรวมทั้งผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบแน่นอน และกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ของระบบ

#### 4.1 ระบบสามถังและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบสามถังเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นประกอบไปด้วยถังน้ำสามถังซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  และมีท่อเชื่อมต่อถึงกัน และมีท่อที่ปล่อยน้ำไหลออกดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบสามถัง

ระบบสามถังมีเป้าหมายที่จะควบคุมความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 (ซ้ายสุด และ ขวาสุด ตามลำดับ) ด้วยการควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลเข้าถัง ( $Q_1, Q_2$ ) ตัวควบคุมสำหรับระบบสามถังที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งนิยมใช้กันแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเลือกใช้ค่าอัตราขยายสัดส่วนและอินทิกรัลเป็น 500 และ 3000 ตามลำดับ

สำหรับความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นและพิจารณาในงานวิทยานิพนธ์นี้ มีด้วยกัน 6 แบบดังแสดงในตารางที่ 4.1 ข้างล่าง

สัญลักษณ์	ความผิดพลาด
L1	เกิดการรั่วที่ถัง 1 (แทนด้วยการเปิดวาล์วที่ถัง 1)
L2	เกิดการรั่วที่ถัง 2 (แทนด้วยการเปิดวาล์วที่ถัง 2)
L3	เกิดการรั่วที่ถัง 3 (แทนด้วยการเปิดวาล์วที่ถัง 3)
C13	เกิดการอุดตันในท่อระหว่างถัง 1 และ 3 (แทนด้วยการปิดวาล์วบางส่วนในท่อระหว่างถัง 1 และ 3)
C23	เกิดการอุดตันในท่อระหว่างถัง 2 และ 3 (แทนด้วยการปิดวาล์วบางส่วนในท่อระหว่างถัง 2 และ 3)
C20	เกิดการอุดตันทางออกถัง 2 (แทนด้วยการปิดวาล์วบางส่วนในท่อทางออกถัง 2)

ตารางที่ 4.1 ความผิดพลาดในระบบสามถัง และสัญลักษณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามถังสามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง โดยพิจารณาจากมวลสารที่ไหลเข้า-ออก และกฎของ Torricelli [22] ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
A \frac{dh_1(t)}{dt} &= Q_1(t) - z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|} + Q_{f1}(t) \\
A \frac{dh_2(t)}{dt} &= Q_2(t) - z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|} \\
&\quad - z_2 S_n \sqrt{2gh_2(t)} + Q_{f2}(t) \\
A \frac{dh_3(t)}{dt} &= z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|} \\
&\quad - z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|} + Q_{f3}(t)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

เมื่อ

- $h_1, h_2, h_3$  คือ ระดับความสูงของน้ำในถัง 1, 2 และ 3 ตามลำดับ  
 $Q_1, Q_2$  คือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าถัง 1 และ 2 ตามลำดับ  
 $S_n$  คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดถัง  
 $g$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลก  
 $Q_{f1}, Q_{f2}, Q_{f3}$  คือ ปริมาณน้ำที่รั่วออกเมื่อเกิดรั่วที่ถัง 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (มีค่าเป็น 0 ที่สภาวะปกติ)  
 $z_1, z_2, z_3$  คือ การปิดเปิดวาล์วท่อระหว่างถัง 1 กับ 3, ท่อทางออกถัง 2 และ ท่อระหว่างถัง 2 กับ 3 ตามลำดับ (มีค่าเป็น 1 ที่สภาวะปกติ)

#### 4.2 ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดปกติในระบบสามถัง

จากระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดปกติด้วยตัวประมาณออนไลน์ในบทที่ 2 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสามถัง และจัดรูปสมการใหม่ตามสมการ (3.17)

$$\dot{x} = \xi(x, u) + Ef(x, u)$$

จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( Q_1 - z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|} \right) / A \\ \left( Q_2 + z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|} - z_2 S_n \sqrt{2gh_2(t)} \right) / A \\ \left( z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|} - z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|} \right) / A \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q_{f1}(t)/A \\ -Q_{f2}(t)/A \\ -Q_{f3}(t)/A \\ \Delta z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|} \\ \Delta z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|} \\ \Delta z_2 S_n \sqrt{2gh_2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) พบว่าเมตริกซ์  $E^T E$  ไม่สามารถหาตัวผกผันได้ จึงไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการวินิจฉัยได้ในทฤษฎีที่ 3.2 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงวิธีการประยุกต์ใช้งานซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3 สำหรับในหัวข้อนี้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และศึกษาการนำตัวประมาณออนไลน์มาประยุกต์ จะพิจารณาความผิดพลาดเฉพาะรั้วที่ถึง 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (L1, L2 และ L3) ซึ่งเมตริกซ์  $E^T E$  สามารถหาตัวผกผันได้ สอดคล้องกับทฤษฎีที่ 3.2 โดยจัดรูปสมการตามสมการ (3.17) ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Q_1 - z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|}) / A \\ (Q_2 + z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|} - z_2 S_n \sqrt{2gh_2(t)}) / A \\ (z_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_3(t)|} - z_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_3(t) - h_2(t)|}) / A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q_{f1}(t)/A \\ -Q_{f2}(t)/A \\ -Q_{f3}(t)/A \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

จากสมการ (3.3) สามารถตัวประมาณฟังก์ชันที่เขียนเบนไปจากสภาวะปกติ ซึ่งในที่นี้ได้แก่  $-Q_{f1}(t)/A$ ,  $-Q_{f2}(t)/A$ ,  $-Q_{f3}(t)/A$  โดยสร้างแบบจำลองที่ใช้ประมาณได้ตามสมการ (3.18)

$$\dot{\hat{x}} = \xi(x, u) + E\hat{f}(x, u; \hat{\theta}) + G(\hat{x} - x)$$

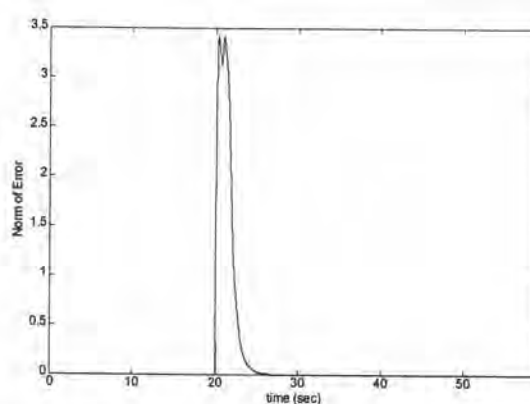
และใช้กฎการปรับค่าพารามิเตอร์ตามสมการ (3.19)

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma Z E^T e$$

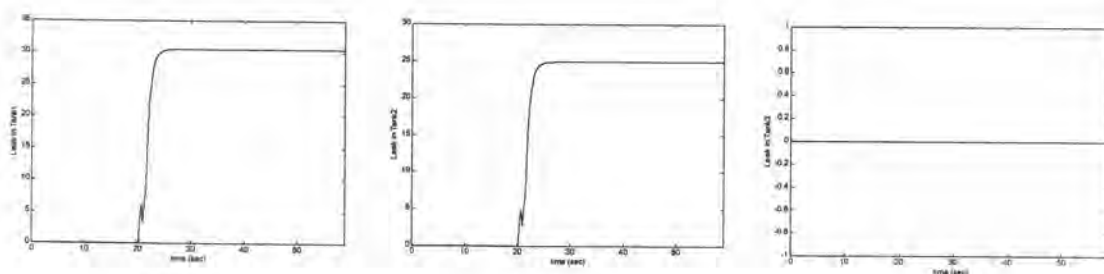
รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ในกรณีที่ เกิดการรั้วในถึงที่ 1 50 % และรั้วในถึงที่ 2 50% ของปริมาณที่สามารถรั้วได้ (ขนาดของวาล์วที่เปิดได้มากสุดในรูปที่ 1) ที่เวลา 20 วินาที โดยเลือกเมตริกซ์  $G$  เท่ากับ  $-10 \times I$  และเมตริกซ์อัตราการเรียนรู้  $\Gamma$  เท่ากับ  $10 \times I$  โดย  $I$  เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) และใช้ข่ายงานเรเดียลเบซีสที่มีโดเมนตาราง 4.2

ตัวแปร	โดเมน
$h_1$	56 - 64 cm.
$h_2$	36 - 44 cm.
$h_3$	36 - 58 cm.

ตารางที่ 4.2 โดเมนของข่างานเรเคิลเบซีสในการตรวจพบ  
และวินิจฉัยความผิดปกติในระบบสามถัง



รูปที่ 4.2 นอร์มของความผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะ  
ในกรณีที่เกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และรั่วในถังที่ 2 50% ที่เวลา 20 วินาที



(ก) L1

(ข) L2

(ค) L3

รูปที่ 4.3 ค่าฟังก์ชันจากตัวประมาณออนไลน์  
ในกรณีที่เกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และรั่วในถังที่ 2 50% ที่เวลา 20 วินาที

(ก) ค่าประมาณความผิดปกติ L1

(ข) ค่าประมาณความผิดปกติ L2

(ค) ค่าประมาณความผิดปกติ L3

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่าตัวประมาณออนไลน์สามารถประมาณฟังก์ชันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ถูกต้อง โดยค่าอนุกรมของความผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะจะเข้าสู่ศูนย์ และตัวประมาณออนไลน์สามารถประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถวินิจฉัยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ถูกต้อง อย่างไรก็ตามความเร็วในการประมาณยังคงขึ้นอยู่กับทางเลือกเมตริกซ์  $G$  และเมตริกซ์อัตราการเรียนรู้  $\Gamma$  ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

### หลักการเลือกเมตริกซ์ $G$ และเมตริกซ์อัตราการเรียนรู้ $\Gamma$

จากบทที่ 3 เมตริกซ์  $G$  ต้องเป็นเมตริกซ์เสถียร และเมตริกซ์อัตราการเรียนรู้  $\Gamma$  ต้องเป็นเมตริกซ์ที่เป็นบวกแน่นอน (positive definite) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ในที่นี้จึงให้

$$G = -g \times I \text{ และ } \Gamma = p \times I$$

โดย  $g$  และ  $p$  เป็นค่าคงที่มีค่าเป็นบวก

และ  $I$  เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $g$  เป็น 1, 10 และ 50 ตามลำดับ โดยเมตริกซ์อัตราการเรียนรู้  $\Gamma$  คงที่ จะเห็นว่า เมื่อค่า  $g$  มีค่ามากเช่นเท่ากับ 50 ตัวประมาณออนไลน์จะประมาณฟังก์ชันได้ช้า ทั้งนี้เพราะค่า  $g$  ที่มีค่ามากจะทำให้พลวัตของความผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะ ในสมการ (3.20)

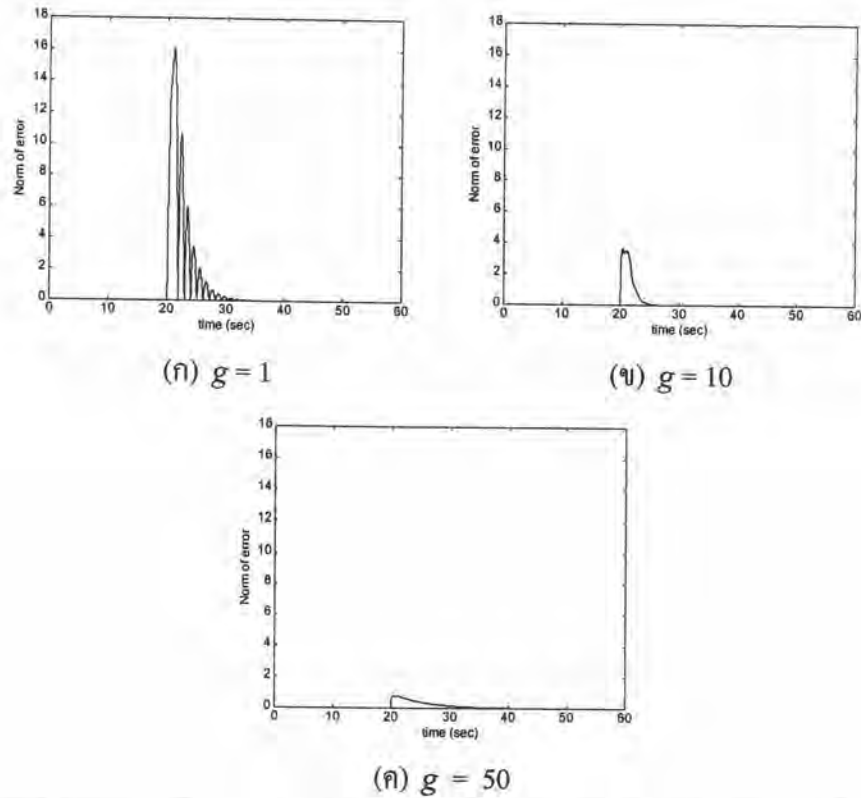
$$\dot{e} = Ge + E(\beta(t-T)\hat{f}(x,u;\hat{\theta}^*) - \hat{f}(x,u;\hat{\theta}) + v)$$

คู่เข้าเร็ว ทำให้การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวประมาณออนไลน์ในสมการ (3.19)

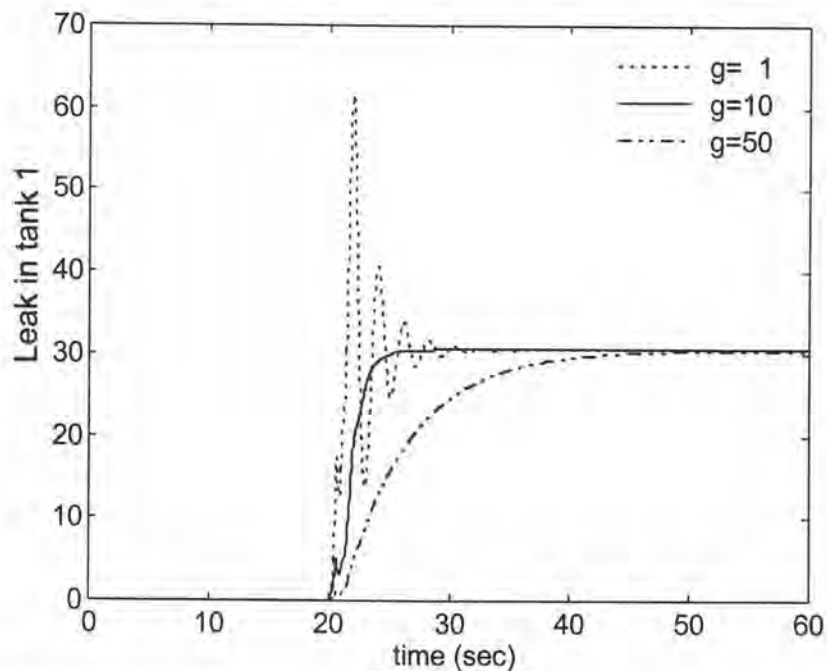
$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma Z E^T e$$

มีการปรับตัวช้าลง ส่วนในกรณีที่ค่า  $g$  มีค่าน้อยจะทำให้ความผิดพลาดลดลงช้าทำให้มีการปรับค่าพารามิเตอร์เร็ว จึงเกิดการแกว่งในการประมาณฟังก์ชัน จากการศึกษาพบว่า ค่า  $g$  ที่เหมาะสมควรมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของค่าเจาะจงที่มากที่สุดของระบบที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานปกติ

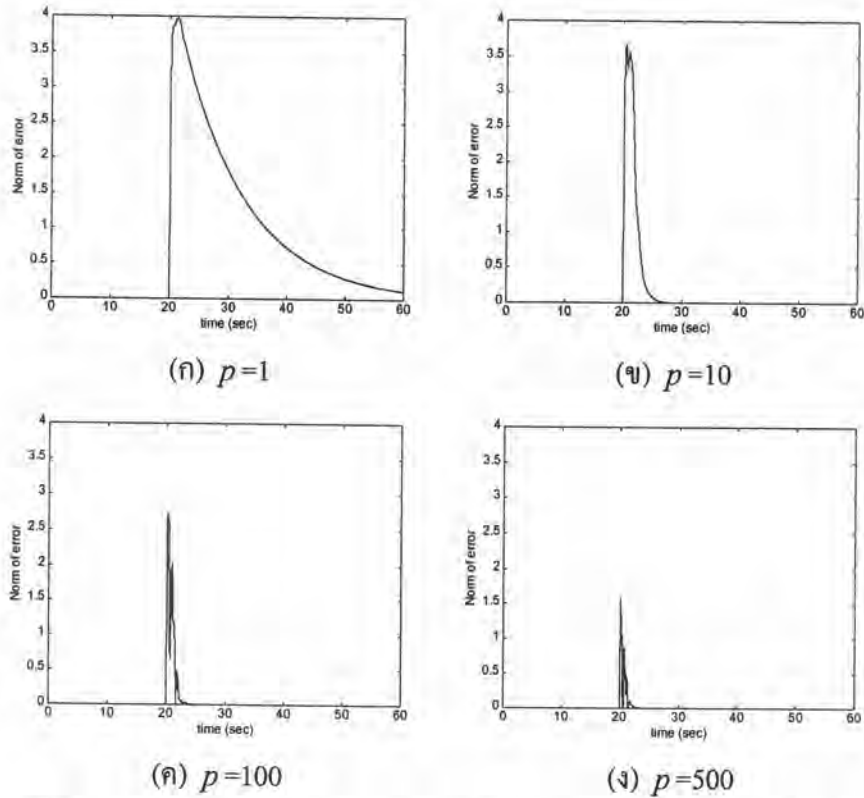
สำหรับการเลือกเมตริกซ์อัตราการเรียนรู้ จากรูปที่ 4.6-4.7 จะเห็นว่าเมื่อเลือกค่า  $p$  ให้มีค่ามากขึ้น การประมาณฟังก์ชันก็จะเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการเรียนรู้ที่มีค่าสูงมากอาจทำให้เกิดการแกว่งในการประมาณฟังก์ชันได้



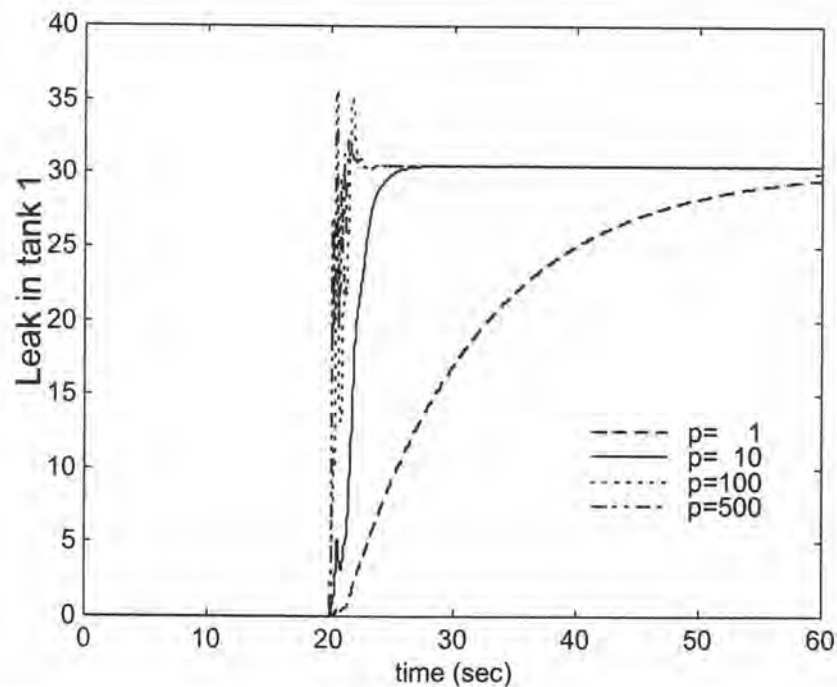
รูปที่ 4.4 นอร์มของความผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะ เมื่อ  $G = -g \times I$  โดย  $g = 1, 10, 50$  และ  $\Gamma = 10 \times I$  ในกรณีที่ เกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และรั่วในถังที่ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4.5 ค่าประมาณความผิดพลาด LI เมื่อ  $G = -g \times I$  โดย  $g = 1, 10, 50$  และ  $\Gamma = 10 \times I$  ในกรณีที่ เกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และรั่วในถังที่ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4.6 นอร์มของความผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะ เมื่อ  $\Gamma = p \times I$  โดย  $p = 1, 10, 100, 500$  และ  $G = -10 \times I$  ในกรณีที่เกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และรั่วในถังที่ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที

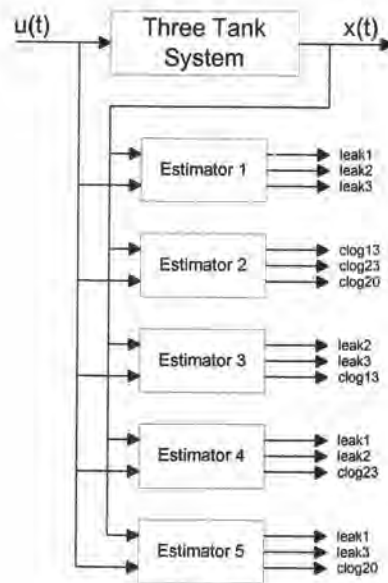


รูปที่ 4.7 ค่าประมาณความผิดพลาด  $L1$  เมื่อ  $\Gamma = p \times I$  โดย  $p=1,10,100,500$  และ  $G = -10 \times I$  ในกรณีที่เกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และรั่วในถังที่ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที



### 4.3 การพัฒนาสร้างชุดของตัวประมาณสำหรับระบบสามถัง

จากสมการ (3.2) ที่กล่าวในข้างต้น จะเห็นว่า ในระบบสามถังเมื่อพิจารณาความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นทั้งหมดในตารางที่ 4.1 ไม่สอดคล้องกับทฤษฎี 3.2 อย่างไรก็ตาม จากความรู้เกี่ยวกับระบบสามถังที่ว่า ลักษณะของความผิดพลาดในระบบสามถัง ณ จุดทำงานหนึ่งจะเป็นฟังก์ชันทางเดียว (monotonic function) สำหรับในที่นี้พิจารณาระบบที่จุดทำงาน  $h_1 > h_3 > h_2$  ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างของระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพลาดด้วยชุดของตัวประมาณดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ชุดของตัวประมาณ

ชุดของตัวประมาณเป็นการใช้ตัวประมาณแบบจำลองหลายตัวในการประมาณ โดยตัวประมาณแบบจำลองแต่ละตัวจะสามารถประมาณเพียงบางความผิดพลาดที่ทำให้ได้เมตริกซ์  $E^T E$  ที่สามารถหาตัวผกผันได้ และในแต่ละตัวประมาณแบบจำลองจะมีตัวประมาณออนไลน์  $\hat{f}$  ที่ให้ค่าไม่เป็นลบ เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น ตัวประมาณแบบจำลองที่สามารถประมาณความผิดพลาดที่สอดคล้องกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งทำให้ตัวประมาณออนไลน์ในตัวประมาณแบบจำลองดังกล่าวสามารถประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ถูกต้อง

### หลักในการสร้างชุดของตัวประมาณ

ในการสร้างชุดของตัวประมาณ มีหลักดังต่อไปนี้

1. ใช้ตัวประมาณออนไลน์  $\hat{f}$  ที่ไม่มีค่าที่เป็นลบ
2. เมตริกซ์  $E$  ในแต่ละตัวประมาณแบบจำลอง ต้องสามารถหาตัวผกผันของ  $E^T E$  ได้
3. ไม่มีตัวประมาณแบบจำลองตัวที่  $k$  และ  $m$  ( $k \neq m$ ) ที่  $e^k = 0$  และ  $e^m = 0$  (เมื่อ  $e^k, e^m$  คือ ค่าผิดพลาดจากการประมาณตัวแปรสถานะของ ตัวประมาณแบบจำลอง ที่  $k$  และ  $m$  ตามลำดับ) ที่ทำให้

$$\sum a_i v_i^k = \sum b_j v_j^m \quad (4.4)$$

เมื่อ  $v_i^k$  คือ คอลัมน์เวกเตอร์ที่  $i$  ในเมตริกซ์  $E$  ของตัวประมาณแบบจำลองที่  $k$

$v_j^m$  คือ คอลัมน์เวกเตอร์ที่  $j$  ในเมตริกซ์  $E$  ของตัวประมาณแบบจำลองที่  $m$

$a_i, b_j$  คือ ค่าใดๆ ที่  $\geq 0$

โดยที่ เมื่อ  $a_i \neq 0$  แล้วไม่มี  $a_i, b_j$  ที่  $a_i v_i^k = b_j v_j^m$

จากสมการ(4.3) ในระบบสามถึงตัวประมาณแบบจำลองที่สอดคล้องกลับหลักการข้างต้น แต่ละตัวจะมีเมตริกซ์  $E$  ดังตารางที่ 4.3

เนื่องจากในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเน้นความผิดพลาดอย่างเดี่ยว (single fault) และความผิดพลาดสองอย่างพร้อมกัน (double fault) ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความซ้ำซ้อนเกินความจำเป็น จึงเลือกใช้ตัวประมาณแบบจำลอง ที่มีเมตริกซ์  $E$  ตั้งแต่  $E_1 - E_5$  ซึ่งจะได้ชุดของตัวประมาณดัง แสดงในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 เมตริกซ์  $E$  ที่เป็นไปได้ในแต่ละตัวประมาณแบบจำลอง สำหรับระบบสามถัง

เมตริกซ์ $E$	ความคิดพ้องที่สามารถประมาณได้
$E_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\{L_1, L_2, L_3, L_1L_2, L_1L_3, L_2L_3, L_1L_2L_3\}$
$E_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\{C_{13}, C_{23}, C_{20}, C_{13}C_{23}, C_{13}C_{20}, C_{23}C_{20}, C_{13}C_{23}C_{20}\}$
$E_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\{L_2, L_3, C_{13}, L_2L_3, L_2C_{13}, L_3C_{13}, L_2L_3C_{13}\}$
$E_4 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\{L_1, L_2, C_{23}, L_1L_2, L_1C_{23}, L_2C_{23}, L_1L_2C_{23}\}$
$E_5 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\{L_1, L_3, C_{20}, L_1L_3, L_1C_{20}, L_3C_{20}, L_1L_3C_{20}\}$
$E_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\{C_{13}, C_{23}, L_2, C_{13}C_{23}, L_2C_{13}, L_2C_{23}, L_2C_{13}C_{23}\}$
$E_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\{C_{13}, C_{20}, L_3, C_{13}C_{20}, L_3C_{13}, L_3C_{20}, L_3C_{13}C_{20}\}$
$E_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\{C_{23}, C_{20}, L_1, C_{23}C_{20}, L_1C_{23}, L_1C_{20}, L_1C_{23}C_{20}\}$

หมายเหตุ

$L_1, L_2, L_3$  หมายถึง ความคิดพ้องเนื่องจากการรั่วที่ถัง 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

$C_{13}, C_{23}$  หมายถึง ความคิดพ้องเนื่องจากการอุดตันในท่อระหว่างถัง 1 กับ 3 และอุดตันในท่อระหว่างถัง 2 กับ 3 ตามลำดับ

$C_{20}$  หมายถึง ความคิดพ้องเนื่องจากการอุดตันในท่อทางออกของถังที่ 2

#### 4.4 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

ตัวอย่างในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในที่นี้แยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบแน่นอน
2. กรณีมีความคลาดเคลื่อนในค่าพารามิเตอร์ระบบ

โดยในแต่ละตัวประมาณสถานะในชุดของตัวประมาณเลือกใช้ตัวประมาณออนไลน์เป็นข่ายงานประสาทสี่ชั้นดังรูป 4.9 โดยใช้ฟังก์ชันการกระตุ้น (activation function) สำหรับชั้นที่ 2, 3 เป็นฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoidal function)

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.5)$$

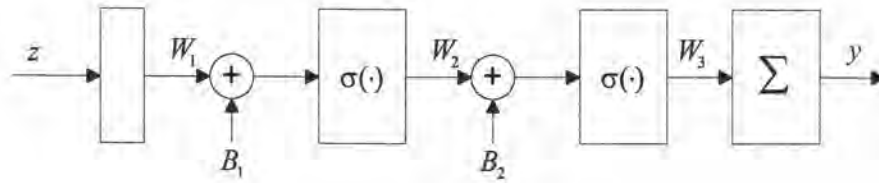
และในชั้นที่ 4 เป็นผลรวมเชิงเส้น ดังนั้นข่ายงานประสาทที่ใช้งานในที่นี้เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = W_3 \sigma(W_2 \sigma(W_1 z + B_1) + B_2) \quad (4.6)$$

โดยที่

$z$	เป็นสัญญาณเข้าขนาด $n \times 1$
$y$	เป็นสัญญาณออกขนาด $1 \times 1$
$W_1 \ W_2 \ W_3$	เป็นน้ำหนักของกิ่งเชื่อมระหว่างชั้น 1 กับ 2, 2 กับ 3 และ 3 กับ 4 ตามลำดับ โดยมีขนาด $i \times n$ , $j \times i$ และ $k \times j$ ตามลำดับ เมื่อ $i$ เป็นจำนวนปมในชั้นที่ 2 $j$ เป็นจำนวนปมในชั้นที่ 3 (ในที่นี้เท่ากับ 1) $k$ เป็นจำนวนปมในชั้นที่ 4 (ชั้นเอาต์พุต) ในที่นี้ เท่ากับ 1
$B_1 \ B_2$	เป็นไบแอสในชั้นที่ 2, 3 ตามลำดับ มีขนาด $i \times 1$ และ $j \times 1$ ตามลำดับ

จากเงื่อนไขในการสร้างชุดของตัวประมาณ ตัวประมาณออนไลน์ต้องมีค่าประมาณไม่ลบ และเนื่องจากสัญญาณเข้าของฟังก์ชันซิกมอยด์มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มเงื่อนไขของพารามิเตอร์  $W_3$  คือ  $W_3 \geq 0$



รูปที่ 4.9 ข่ายประสาทงานสี่ชั้น

#### 4.4.1 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบแน่นอน

##### ก) ความผิดพลาดอย่างเดียว

ในการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพลาดอย่างเดียว ชุดของตัวประมาณสามารถตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพลาดได้ถูกต้องทุกกรณี ภายในเวลาประมาณ 2-3 วินาที โดยสามารถตรวจพบได้ทุกระดับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

##### ข) ความผิดพลาดสองอย่างพร้อมกัน

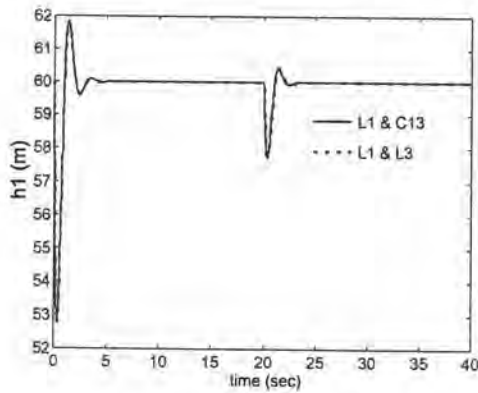
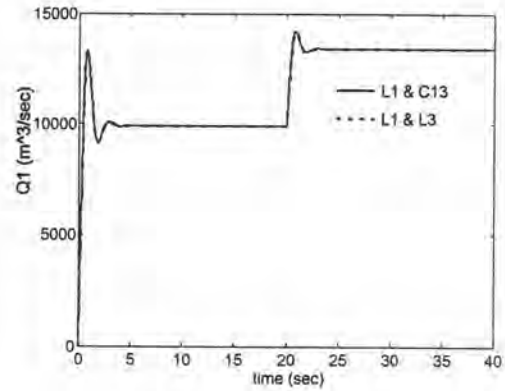
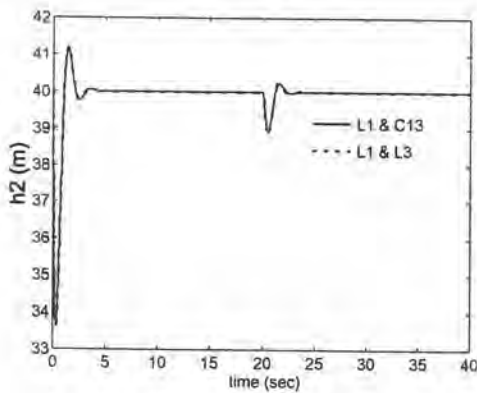
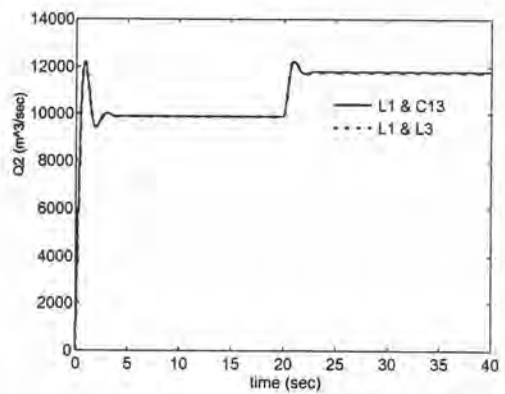
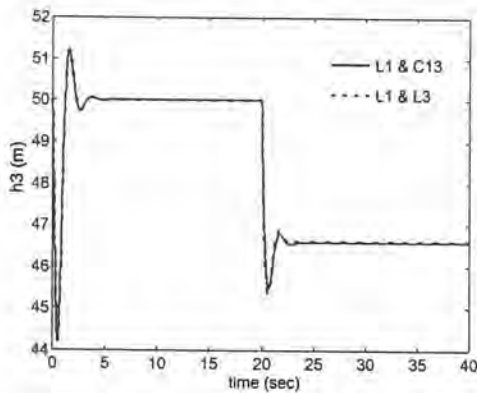
- กรณีเกิดการรั่วของถังสองถังพร้อมกัน ชุดของตัวประมาณสามารถตรวจพบและวินิจฉัยได้ถูกต้องทุกถังที่เกิดรั่วพร้อมกัน และตรวจพบได้ทุกระดับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

- กรณีเกิดการอุดตันในท่อพร้อมกันสองจุด ชุดของตัวประมาณสามารถตรวจพบและวินิจฉัยได้ถูกต้องทุกการอุดตันที่เกิดขึ้นพร้อมกัน และตรวจพบได้ทุกระดับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

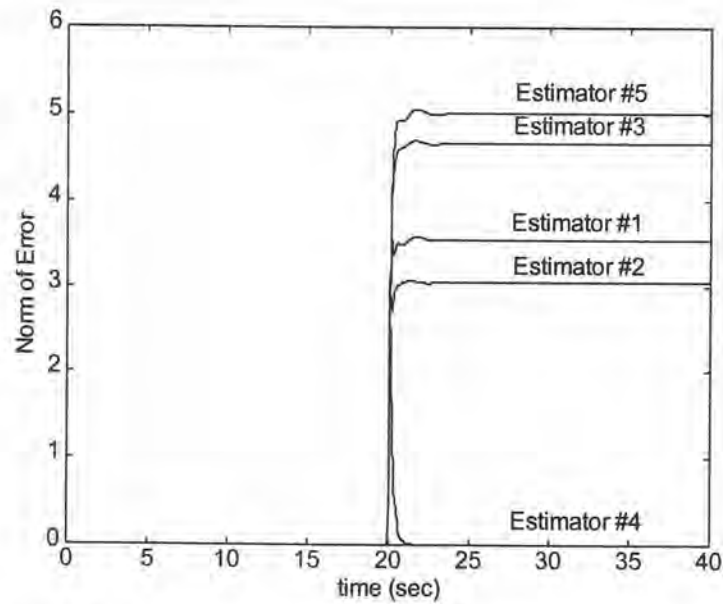
- กรณีเกิดการรั่วและอุดตันพร้อมกัน เนื่องจากความผิดพลาดเนื่องจากการรั่วของถังและความผิดพลาดเนื่องจากการอุดตันในท่อที่มีผลต่อระบบในลักษณะที่ซัดเซกกัน ทำให้ยากในการวินิจฉัย เช่น ในกรณีที่เกิดการรั่วในถังที่ 2 พร้อมกันเกิดการอุดตันในท่อทางออกของถังที่ 2 ปริมาณน้ำที่ไหลออกในท่อที่ทางออกซึ่งอุดตันอาจจะลดลงในปริมาณที่เท่ากับน้ำที่รั่วออกไปจากถัง หรือในกรณีที่แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในระบบกรณีที่เกิดการรั่วของถังที่ 1 (L1) 50% และเกิดการอุดตันในท่อระหว่างถัง 1 กับ 3 (C13) 30% พร้อมกัน เทียบกับกรณีที่เกิดการรั่วของถังที่ 1 (L1) 18% และเกิดการรั่วของถังที่ 3 (L3) 36% พร้อมกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในทั้งสองกรณีมีลักษณะคล้ายกันจึงทำให้ไม่สามารถวินิจฉัยได้

อย่างไรก็ตามชุดของตัวประมาณยังคงสามารถวินิจฉัยความผิดพลาดเมื่อเกิดการรั่วและอุดตันพร้อมกันส่วนใหญ่ได้ถูกต้อง โดยสามารถวินิจฉัยความผิดพลาดในกรณีเกิด

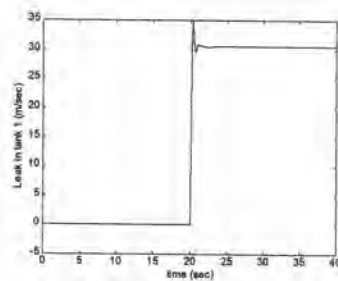
ความผิดพร่อง L1 กับ C23, L1 กับ C20, L2 กับ C13, L2 กับ C23, L3 กับ C13 และ L3 กับ C20 ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.11- 4.12 ซึ่งแสดงผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อเกิดการรั่วของถังถึง 1 50% และเกิดการอุดตันในท่อระหว่างถังที่ 2 กับ 3 50%

ก)  $h_1$ ง)  $Q_1$ ข)  $h_2$ จ)  $Q_2$ ค)  $h_3$ 

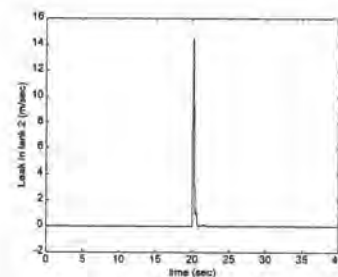
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในระบบเมื่อเกิดความผิดพร่อง L1 50% กับ C13 30% พร้อมกัน เปรียบเทียบกับเมื่อเกิดความผิดพร่อง L1 18% กับ L3 36% พร้อมกัน



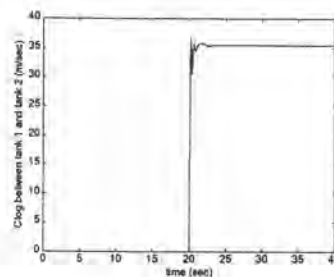
รูปที่ 4.11 นอร์มของค่าผิดพลาดจากการประมาณของตัวประมาณแบบจำลองแต่ละตัว เมื่อเกิดการรบกวนถึงที่ 1 50 % และจุดคั่นที่ระหว่างถึงที่ 2 และ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที กรณีทราบพารามิเตอร์ของระบบแน่นอน



(ก)



(จ)



(ค)

รูปที่ 4.12 ค่าประมาณความผิดพลาดของตัวประมาณแบบจำลองตัวที่ 4 เมื่อเกิดการรบกวนถึงที่ 1 50 % และจุดคั่นที่ระหว่างถึงที่ 2 และ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที กรณีทราบพารามิเตอร์ของระบบแน่นอน

(ก) ประมาณความผิดพลาด L1

(จ) ประมาณความผิดพลาด L2

(ค) ประมาณความผิดพลาด C23



#### 4.4.2 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีมีความคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ของระบบ

ในกรณีนี้ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของตัวประมาณแบบจำลอง โดยเพิ่มข่ายงานประสาทเข้าไปในแบบจำลอง โดยข่ายงานประสาทดังกล่าวจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อชดเชยความผิดพลาดของแบบจำลองในสภาวะปกติ ดังนั้นในสภาวะปกติจะมีแบบจำลองเป็น

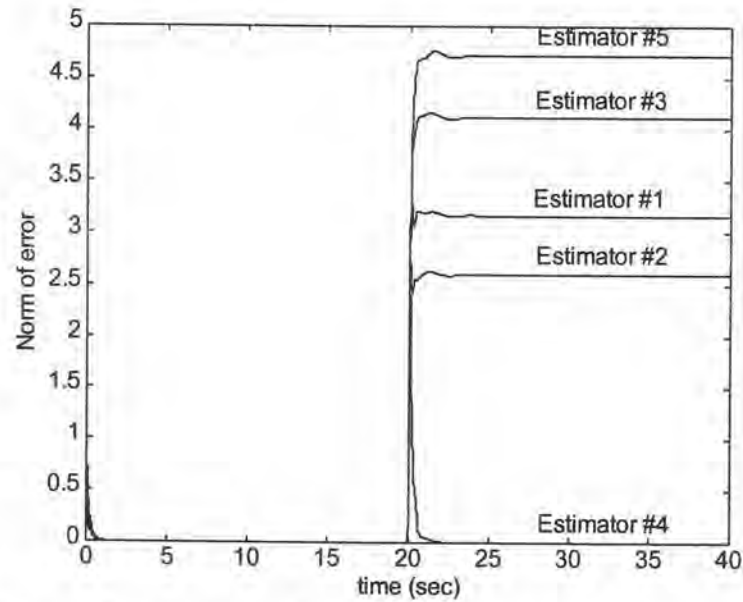
$$\dot{x}_N = \xi(x_N, u) + NN(x, u) \quad (4.7)$$

ข่ายงานประสาทที่เพิ่มเข้ามาเพื่อชดเชยในการจำลองนี้ใช้ข่ายงานประสาทที่มีชั้นซ่อนเป็นฟังก์ชันซิกมอยด์ 10 ปม และมีชั้นสัญญาณออกเป็นผลรวมเชิงเส้น โดยมีการปรับค่าเพื่อเรียนรู้ในช่วงเวลา 10 วินาทีแรก

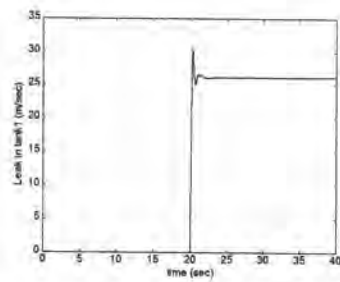
เนื่องจากข่ายงานประสาทที่ใช้ชดเชยสามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนได้เพียงในโดเมนที่ได้เรียนรู้หรือสภาวะปกติ ดังนั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นข่ายงานประสาทที่ใช้ชดเชยจึงไม่สามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนได้ทั้งหมด ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่เหลือซึ่งไม่ได้รับการชดเชยจึงถูกประมาณด้วยตัวประมาณออนไลน์ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวินิจฉัยความผิดพลาดดังแสดงในรูปที่ 4.13 - 4.14 ซึ่งเป็นผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อเกิดการรั่วของถังที่ 1 50% และเกิดการอุดตันระหว่างถังที่ 2 กับถังที่ 3 50% ในกรณีที่มีพื้นที่หน้าตัดถึงมากไป 5% และพื้นที่หน้าตัดที่น้อยไป 5% จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่ามีการวินิจฉัยความผิดพลาดผิด โดยมีการวินิจฉัยว่าเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการรั่วของถังที่ 2 เล็กน้อย ซึ่งผลการวินิจฉัยมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการรั่วของถังที่ 1 50% เกิดการอุดตันในท่อระหว่างถังที่ 2 กับ 3 50% และเกิดการรั่วของถังที่ 2 2% ดังแสดงในรูปที่ 4.15

จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในหลายกรณีพบว่า ผลการวินิจฉัยที่ผิดพลาดเนื่องจากไม่สามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ได้หมด ให้ผลการวินิจฉัยว่าเกิดความผิดพลาดประมาณ 2-3% ดังนั้นในการใช้งานจริงในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ของระบบจำเป็นต้องมีระดับในการตัดสินใจว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งระดับที่ใช้ตัดสินใจดังกล่าวจะมีผลต่อความไวในการตรวจพบและวินิจฉัย อย่างไรก็ตามระดับที่ใช้ตัดสินใจขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ ระดับที่ใช้ตัดสินใจสามารถมีค่าน้อยเพื่อทำให้ความไวในการตรวจพบดีขึ้นถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง อนึ่งในกรณีที่มีระดับการตัดสินใจที่เหมาะสม ชุดของตัวประมาณยังคงมีความสามารถในการวินิจฉัยความผิดพลาดทั้งในกรณีความผิดพลาดอย่างเดียวและสองอย่างพร้อมกันเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ของระบบ

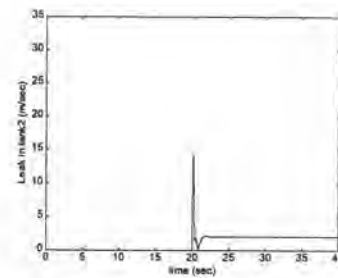




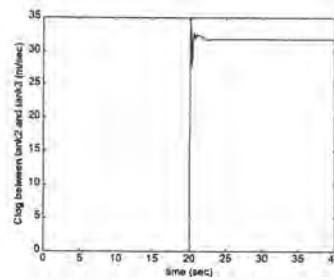
รูปที่ 4.13 นอร์มของค่าผิดพลาดจากการประมาณของตัวประมาณแบบจำลองแต่ละตัว เมื่อเกิดการรั่วในถังที่ 2 50% และจุดคั่นที่ระหว่างถังที่ 2 และ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที กรณีมีคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ของระบบ



(ก)



(ข)



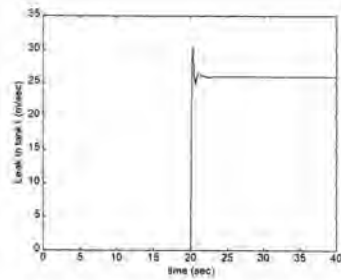
(ค)

รูปที่ 4.14 ค่าประมาณความผิดพลาดของตัวประมาณแบบจำลองตัวที่ 4 เมื่อเกิดการรั่วในถังที่ 1 50% และจุดคั่นที่ระหว่างถังที่ 2 และ 3 50% ที่เวลา 20 วินาที กรณีมีคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ของระบบ

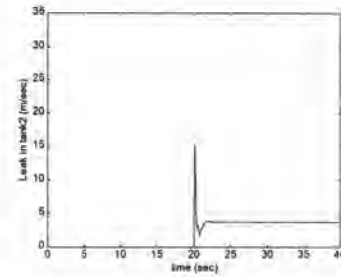
(ก) ประมาณความผิดพลาดของ L1

(ข) ประมาณความผิดพลาดของ L2

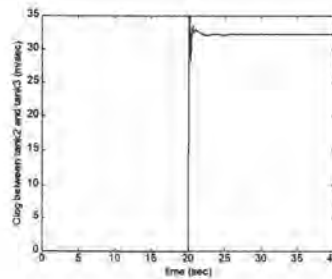
(ค) ประมาณความผิดพลาดของ C23



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 ค่าประมาณความผิดพลาดของตัวประมาณแบบจำลองตัวที่ 4 เมื่อเกิดการรั่วในถังที่ 1 50 % เกิดการอุดตันที่ระหว่างถังที่ 2 และ 3 50% และเกิดการรั่วในถังที่ 2 2% ที่เวลา 20 วินาที กรณีมีคลาดเคลื่อนในพารามิเตอร์ของระบบ

(ก) ประมาณความผิดพลาด L1

(ข) ประมาณความผิดพลาด L2

(ค) ประมาณความผิดพลาด C23

#### 4.5 สรุปและวิจารณ์

ในบทนี้ ได้มีการพัฒนาชุดของตัวประมาณซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีตัวประมาณแบบจำลองหลายตัว โดยตัวประมาณแบบจำลองแต่ละตัวจะมีความสามารถในการประมาณความผิดพลาดแตกต่างกัน

จากการทดสอบกับระบบดังพบว่า ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดอย่างเดียวชุดของตัวประมาณที่นำเสนอสามารถตรวจและวินิจฉัยได้ทุกกรณี ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดสองอย่างพร้อมกันชุดของตัวประมาณสามารถตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพลาดเมื่อเกิดการรั่วสองถังพร้อมกัน และเกิดการอุดตันสองจุดพร้อมกันได้ทุกกรณี และสามารถวินิจฉัยความผิดพลาดเนื่องจากการรั่วและอุดตันพร้อมกันส่วนใหญ่ได้ถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องด้วยข้อจำกัดของลักษณะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งมีรูปแบบซ้ำซ้อนกัน

สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของระบบ ได้มีการนำรายงานประสาทเข้า  
ไปชดเชยความผิดพลาดดังกล่าว แต่เนื่องจากรายงานประสาทที่ใช้ชดเชยไม่สามารถชดเชยความ  
คลาดเคลื่อนได้หมดในช่วงเกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระดับที่ใช้ในการตัดสินใจ ซึ่ง  
ระดับดังกล่าวจะทำให้ความไวในการวินิจฉัยน้อยลง อย่างไรก็ตามการตรวจพบและวินิจฉัยความ  
ผิดพลาดจะมีความไวต่อขนาดความผิดพลาด และมีความแม่นยำมากขึ้น ถ้าแบบจำลองที่ใช้ในการ  
สร้างชุดตัวประมาณใกล้เคียงกับระบบจริง