

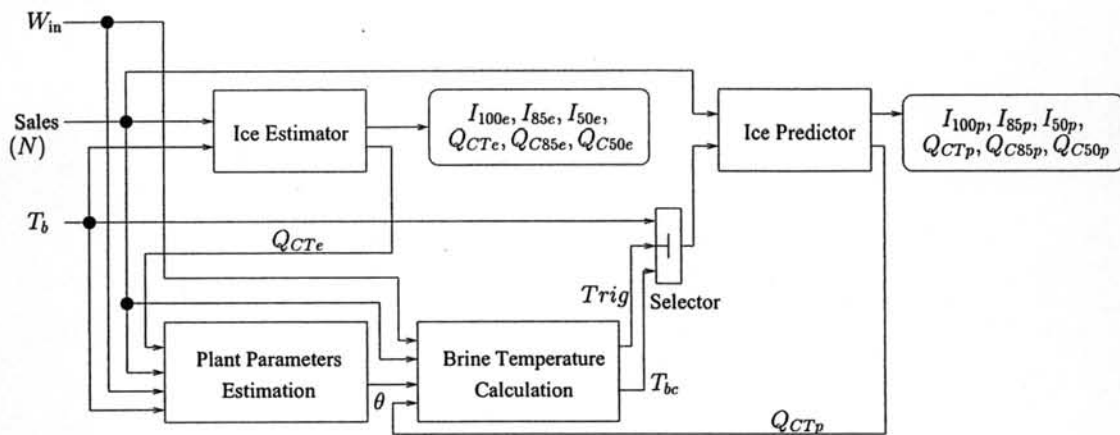
### บทที่ 3

## แบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

### 3.1 บทนำ

การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง สามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองด้วยแบบจำลองเชิงเส้น และแบบจำลองไม่เชิงเส้น โดยทั้งสองแบบมีจุดประสงค์เดียวกันคือ หาสมการคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ภายในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง เราสามารถระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง ได้ทั้งสองแบบโดยเริ่มพิจารณาแบบจำลองเชิงเส้นก่อน ถ้าไม่สามารถระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองเชิงเส้นที่เหมาะสมได้แล้วจึงพิจารณาระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองไม่เชิงเส้นเป็นลำดับถัดไป

### 3.2 แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง



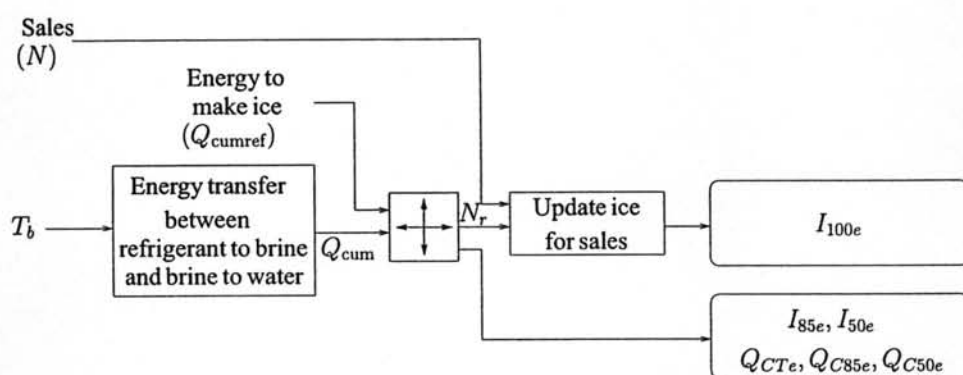
รูปที่ 3.1: แผนภาพแบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง [3] แสดงดังรูปที่ 3.1 เริ่มต้นป้อนยอดขายและอุณหภูมิ น้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิให้กับแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง (Ice Estimator) ซึ่งมีหน้าที่ประมาณจำนวนของน้ำแข็ง และพลังงานถ่ายเทสะสมในแต่ละชั่วโมง จากนั้นส่งพลังงานถ่ายเทสะสมทั้งหมดภายในป้อนในแต่ละชั่วโมง เข้าสู่แบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง (Plant Parameter Estimation) เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็งจากระบบไม่เชิงเส้นให้เป็นระบบเชิงเส้น จากนั้นส่งค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้เข้าสู่แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือ (Brine Temperature Calculation) เพื่อคำนวณอุณหภูมิ น้ำเกลือจากแบบจำลองเชิงเส้นที่ทำได้ โดยนำพลังงานถ่ายเทสะสมทั้งหมดภายในป้อนที่ได้จากแบบจำลอง

ทำนายจำนวนของน้ำแข็ง (Ice Predictor) มาคำนวณด้วยแล้วเริ่มส่งค่าอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้ในเวลาที่ต้องการจากตัวควบคุมการส่ง อุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้จะเข้าสู่แบบจำลองทำนายจำนวนของน้ำแข็ง เพื่อประมาณจำนวนของน้ำแข็งและพลังงานถ่ายเทสะสมในแต่ละชั่วโมง

ลำดับต่อไป จะอธิบายการทำงานของแต่ละส่วนประกอบภายในแบบจำลองสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

### 3.2.1 แบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง



รูปที่ 3.2: แผนภาพแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง

แบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.2 อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือ และน้ำเกลือกับน้ำ เพื่อหาค่าพลังงานถ่ายเทสะสมในแต่ละชั่วโมงจากการเปิดตาราง [2] จากนั้นส่งพลังงานถ่ายเทสะสมของน้ำแข็งแต่ละของภายในบ่อ มาเปรียบเทียบกับพลังงานถ่ายเทสะสมอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งหนึ่งชอง เพื่อตรวจสอบสถานะของน้ำในแต่ละชองว่าอยู่ในสถานะใด จากนั้นส่งจำนวนของน้ำแข็งที่น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งสมบูรณ์แล้ว ไปปรับปรุงจำนวนของน้ำแข็งพร้อมขายในแต่ละชั่วโมง สามารถอธิบายองค์ประกอบของแต่ละส่วนได้ดังนี้

1. พลังงานถ่ายเทระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือและน้ำเกลือกับน้ำ หาได้จากการเปิดตารางฐานข้อมูลการขึ้นรูปน้ำแข็งของ [2] ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ประมาณค่าพลังงานถ่ายเทสะสมของน้ำในแต่ละชั่วโมง มีที่มาดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก
2. พลังงานถ่ายเทสะสมอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งหนึ่งชอง เป็นค่าพลังงานถ่ายเทสะสมที่ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งพอดี โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้าค่าพลังงานสะสมมีค่ามากจนถึงค่านี้เมื่อใด น้ำก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งที่พร้อมขายได้พอดี โดยความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$Q_{\text{cumref}} = MC\Delta T_w + ML$$

เมื่อ  $M$  คือ มวลของน้ำ (kg)

$C$  คือ ค่าคงที่ของการถ่ายเทความร้อนของน้ำในสถานะของเหลวมีค่าเท่ากับ  $4.226 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

$L$  คือ ความร้อนแฝงของการแข็งตัวของน้ำมีค่าเท่ากับ  $338 \text{ kJ/kg}$

$\Delta T_w$  คือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ชั่วโมงเริ่มต้นกับอุณหภูมิน้ำแข็ง ( $^\circ\text{C}$ )

เราสามารถแสดงตัวอย่าง การคำนวณพลังงานถ่ายเทสะสมอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งหนึ่งชอง โดยกำหนดให้ มวลของน้ำ  $160 \text{ kg}$ , อุณหภูมิน้ำที่ชั่วโมงเริ่มต้น  $40^\circ\text{C}$  ดังนั้น  $Q_{\text{cumref}} = 160 \times 4.226 \times (40 - 0) + 160 \times 338 = 81126.4 \text{ kJ}$  หรือเท่ากับ  $22.5351 \text{ kWh}$

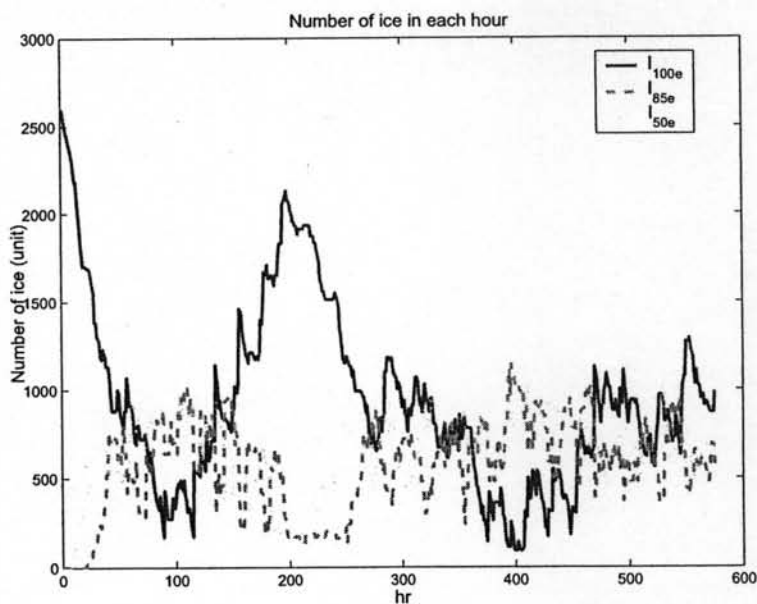
3. ตัวเปรียบเทียบ (comparator) เป็นตัวเปรียบเทียบพลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างน้ำเกลือน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งแล้วหรือไม่ โดยใช้เงื่อนไขดังนี้

- ถ้าพลังงานถ่ายเทสะสมของน้ำภายในชองน้ำแข็ง มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานถ่ายเทสะสมอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งหนึ่งชอง แสดงว่าน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งแล้ว หรือน้ำมีพลังงานถ่ายเทสะสม ที่ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งสมบูรณ์แล้ว โดยจะบันทึกพลังงานถ่ายเทสะสมทั้งหมดภายในชองที่ใช้ไปในแต่ละชั่วโมงด้วย
- ถ้าพลังงานถ่ายเทสะสมของน้ำภายในชองน้ำแข็งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 85 ของพลังงานถ่ายเทสะสมอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งหนึ่งชอง แสดงว่าน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเต็มชองมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 85 แล้ว หรือน้ำมีพลังงานถ่ายเทสะสมที่ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งสมบูรณ์แล้วมากกว่าร้อยละ 85
- ถ้าพลังงานถ่ายเทสะสมของน้ำภายในชองน้ำแข็งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 ของพลังงานถ่ายเทสะสมอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งหนึ่งชอง แสดงว่าน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเต็มชองมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 แล้ว หรือน้ำมีพลังงานถ่ายเทสะสมที่ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งสมบูรณ์แล้วมากกว่าร้อยละ 50

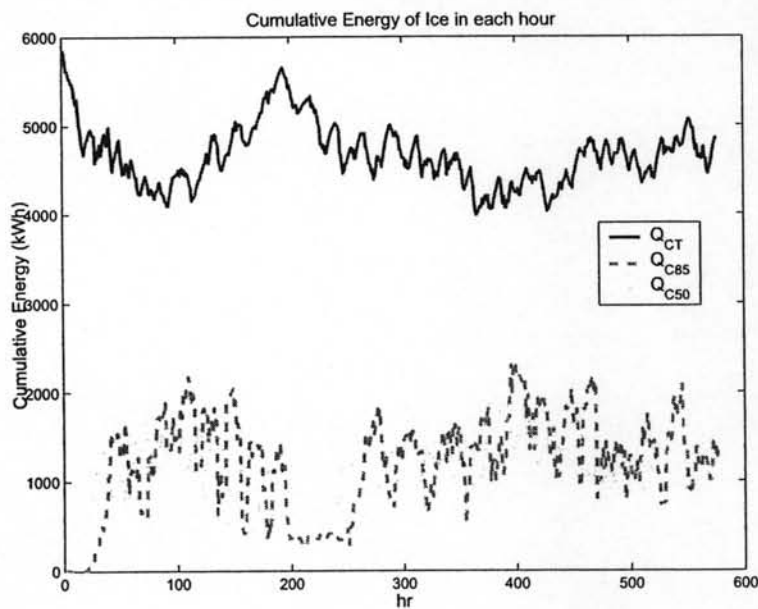
4. ปรับปรุงจำนวนชองน้ำแข็งพร้อมขาย (update ice for sales) เป็นตัวปรับปรุงจำนวนชองน้ำแข็งพร้อมขายในแต่ละชั่วโมง จากจำนวนชองน้ำแข็งคงเหลือในต้นชั่วโมง รวมกับจำนวนชองน้ำแข็งที่น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งสมบูรณ์แล้วที่เพิ่มขึ้น แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปลบกับ ยอดขายน้ำแข็งที่ขายไปแล้ว ดังนั้นจำนวนชองน้ำแข็งพร้อมขาย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการสถานะได้ดังนี้

$$I_{100}(t) = I_{100}(t-1) + N_r(t) - N(t)$$

จากแบบจำลองประมาณจำนวนชองน้ำแข็งในรูปที่ 3.2 เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเกลือน้ำที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ ประมาณจำนวนชองน้ำแข็งและพลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมง โดยใช้ข้อมูลการผลิตน้ำแข็งชองและพลังงานไฟฟ้าของโรงงานน้ำแข็งตัวอย่าง ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี 2004 [5] สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.3 และ 3.4

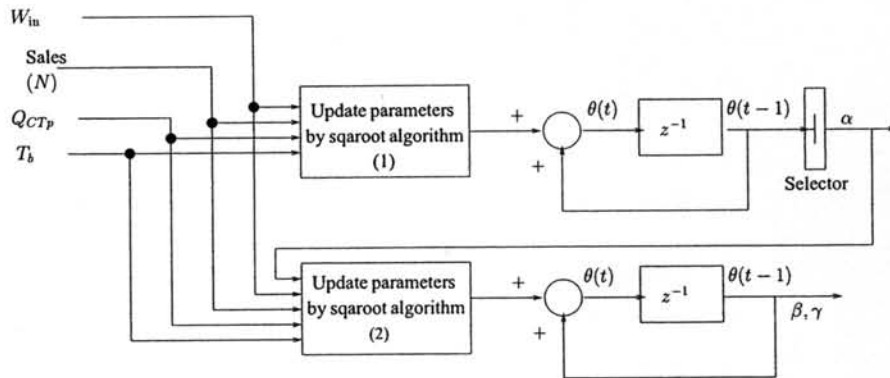


รูปที่ 3.3: จำนวนของน้ำแข็งเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.4: พลังงานถ่ายเทสะสมเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ

### 3.2.2 แบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 3.5: แผนภาพแบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

แบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ แสดงดังรูปที่ 3.5 ป้อนพลังงานไฟฟ้า, ยอดขาย, อุณหภูมิน้ำเกลือและพลังงานถ่ายเทสะสมที่ได้จากแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง เข้าสู่แบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ (recursive least squares) หรือวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำโดยการถอดราก (recursive least squares by square root algorithm) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ( $[\alpha \beta \gamma]$ ) คือ พลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นจากจำนวนยอดขายที่ขายไปแล้ว, พลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือภายในบ่อจากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง, พลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำเกลือกับน้ำภายในบ่อจากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ก่อนหน้าซึ่งพบว่า ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ครั้งที่ 1 มีเพียงค่า  $\alpha$  เพียงค่าเดียวที่ใส่เข้าสู่ค่าจริง ดังนั้นเราจึงประมาณค่าพารามิเตอร์ใหม่อีกครั้งโดยนำค่า  $\alpha$  ที่ได้มาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือด้วย จากนั้นส่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้เข้าสู่แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือต่อไป

จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานด้านเข้าและพลังงานด้านออกของการผลิตน้ำแข็งของ สามารถเขียนได้ว่าพลังงานถ่ายเทสะสมที่ป้อนเข้าไปภายในระบบในแต่ละชั่วโมง เท่ากับพลังงานถ่ายเทสะสมที่ออกจากระบบในแต่ละชั่วโมง โดยที่พลังงานถ่ายเทสะสมที่ป้อนเข้าไปภายในระบบในแต่ละชั่วโมง คือ พลังงานถ่ายเทสะสมที่คอมเพรสเซอร์ป้อนให้กับระบบในแต่ละชั่วโมง ส่วนพลังงานถ่ายเทสะสมที่ออกจากระบบในแต่ละชั่วโมง คือ พลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ

- พลังงานถ่ายเทสะสมจากจำนวนยอดขายที่ขายไปแล้ว
- พลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือภายในบ่อจากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง
- พลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างน้ำเกลือกับน้ำภายในบ่อจากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง

ดังนั้น สามารถเขียนได้ว่า

$$W_{in}(t) = W_{out}(t) \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$W_{out}(t) = \alpha(Q_{cumref} \times I_{100}(t)) + \beta(Q_{cum}(t+1) - Q_{cum}(t)) + \gamma(Q_{tb}(t) - Q_{tb}(t+1)) \quad (3.2)$$

โดยที่  $\theta$  คือ พารามิเตอร์ภายในระบบที่เราต้องการประมาณค่า  $[\alpha \ \beta \ \gamma]^T$

$t$  คือ เวลาเริ่มต้น

$N$  คือ จำนวนขนาดของข้อมูลที่พิจารณา

จากสมการ 3.1 และ 3.2 สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์ดังนี้

$$\min_{\theta} V(\theta) = V(\hat{\theta}) \quad (3.3)$$

โดยที่

$$V(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{m=t+1}^{t+N} ((W_{in}(m)) - (Q_{cumref} \times I_{100}(m) \times \alpha) \dots \\ - ((Q_{cum}(m) - Q_{cum}(m-1)) \times \beta) - ((Q_{tb}(m-1) - Q_{tb}(m)) \times \gamma))^2$$

จากปัญหาการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองในสมการ 3.3 สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด [7] ดังนี้

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y$$

เมื่อ

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{t+1} \\ \vdots \\ \Phi_{t+N} \end{bmatrix}, \Phi_{t+i} = [Q_{cumref} \times \sum_{j=t}^{t+i-1} S(j) \quad Q_{cum}(t+i-1) - Q_{cum}(t) \quad Q_{tb}(t) - Q_{tb}(t+i-1)]$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{t+1} \\ \vdots \\ Y_{t+N} \end{bmatrix}, Y_{t+i} = [\sum_{j=t}^{t+i-1} W_{in}(j)]$$

เนื่องจากปัญหาการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ เป็น ปัญหาเชื่อมโยงตรง (on-line) ดังนั้นเราต้องใช้วิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ ซึ่งมีการหาค่าตอบในหลายวิธี ตัวอย่างเช่น

#### 1. วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ [7]

(a) กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบได้แก่  $\theta(0)$ ,  $P(0)$  และ  $\lambda$  เมื่อ

- $P(t)$  เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนของ  $\hat{\theta}(t)$



- $\lambda$  เป็นตัวประกอบลิมิตมีค่าเท่ากับ 0.997

(b) วัดพลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในระบบ

- พลังงานถ่ายเทสะสมจากจำนวนยอดขายที่ขายไปแล้ว
- พลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือภายในป้อ จากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง
- พลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างน้ำเกลือกับน้ำภายในป้อจากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง

(c) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบจากพลังงานถ่ายเทสะสมทั้งหมดภายในระบบ โดยกำหนดให้

$$a(t) = \begin{bmatrix} Q_{\text{cumref}} \times I_{100}(t) & Q_{\text{cum}}(t+1) - Q_{\text{cum}}(t) & Q_{\text{tb}}(t) - Q_{\text{tb}}(t+1) \end{bmatrix}^T$$

$$y(t) = \sum_{m=t+1}^{t+N} W_{\text{in}}(m)$$

สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของระบบ จากพลังงานถ่ายเทสะสมที่เกิดขึ้นทั้งหมด ภายในระบบได้ดังนี้

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)\epsilon(t)$$

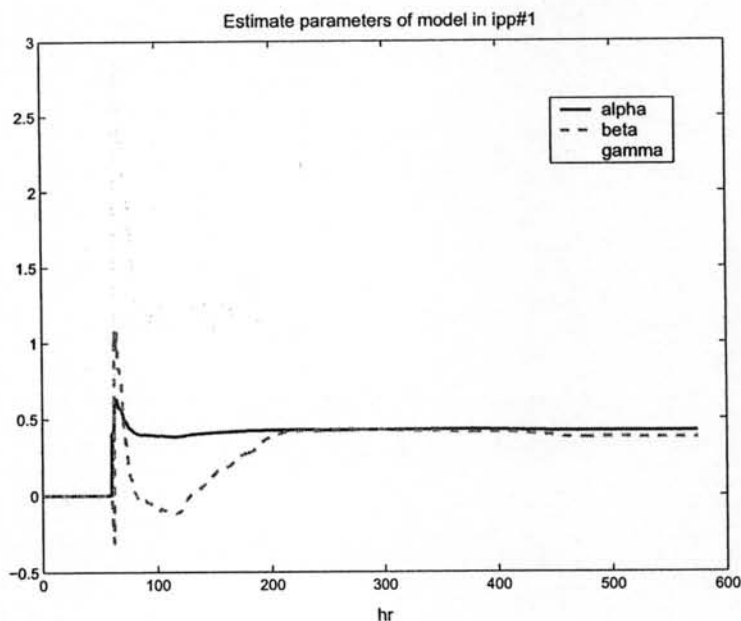
$$K(t) = P(t)a(t)$$

$$\epsilon(t) = y(t) - a^T(t)\hat{\theta}(t-1)$$

(d) ปรับปรุงเมทริกซ์ความแปรปรวนของพารามิเตอร์  $P(t)$  จาก

$$P(t) = \{P(t-1) - P(t-1)a(t)a^T(t)P(t-1)/[\lambda + a^T P(t-1)a(t)]\}/\lambda$$

เมื่อได้ค่า  $P(t)$  แล้ว คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ใหม่โดยกลับไปสู่ขั้นตอน (b) อีกครั้ง แล้ววัดพลังงานถ่ายเทที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่เวลาต่อไป การทำงานจะเป็นเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาที่เรต้องการ ดังนั้นสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่หาได้ในแต่ละชั่วโมงดังรูปที่ 3.6



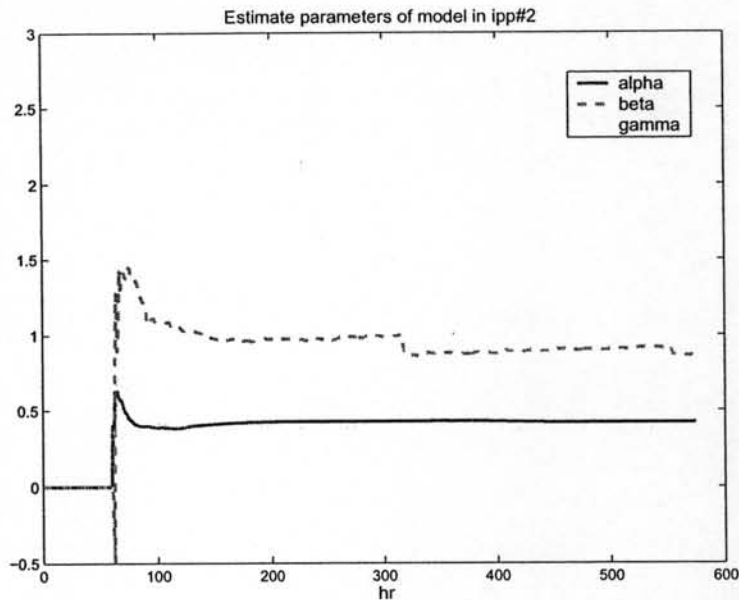
รูปที่ 3.6: พารามิเตอร์ที่ประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำครั้งที่ 1

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  ที่ได้มีค่าลู่เข้าสู่จำนวนจริงที่เป็นค่าพารามิเตอร์จริงของระบบ ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลือ  $\beta, \gamma$  มีการเปลี่ยนแปลงมากและลู่ออกไม่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ดังนั้นเพื่อต้องการหาค่าแท้จริงของพารามิเตอร์ที่เหลือ เราจึงประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหลือนี้ใหม่ด้วยวิธีเดิมแต่เปลี่ยนขนาดของข้อมูลที่พิจารณาเป็น 1 และนำค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  ที่ทำได้ก่อนหน้านี้มาคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$W_{in}(t+1) - \alpha(Q_{cumref} \times I_{100}(t+1)) = \beta(Q_{cum}(t+1) - Q_{cum}(t)) + \gamma(Q_{tb}(t) - Q_{tb}(t+1)) \quad (3.4)$$

จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบใหม่โดยใช้สมการ 3.4 จะได้ดังรูปที่ 3.7





รูปที่ 3.7: พารามิเตอร์ที่ประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำครั้งที่ 2

2. วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำโดยการถดถอย [8], [9]

กำหนดให้  $P(t) = C(t)C^T(t)$  แล้วปรับปรุง  $C(t)$  แทนที่  $P(t)$  ได้โดย

(a) กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบได้แก่  $\theta(0)$ ,  $H(0)$  และ  $\lambda$  เมื่อ  $H(t)$  เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนของ  $C(t)$

(b) วัดพลังงานถ่ายเทที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในระบบ

- พลังงานถ่ายเทสะสมจากจำนวนยอดขายที่ขายไปแล้ว
- พลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือภายในบ่อ จากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง
- พลังงานถ่ายเทสะสมระหว่างน้ำเกลือกับน้ำภายในบ่อจากต้นชั่วโมงจนถึงท้ายชั่วโมง

(c) สร้างเมทริกซ์  $C(t)$

$$C(t) = \left[ \begin{array}{c|c} \sqrt{\lambda} & 0 \\ \hline H(t-1)^T \times a(t) & H(t-1)^T \end{array} \right]$$

(d) แยก QR ของเมทริกซ์  $C(t)$  จะได้  $Q(t)$  เป็นเมทริกซ์ทแยงมุมโดยที่  $Q(t)^T Q(t)$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์และ  $R(t)$  เป็นเมทริกซ์สามเหลี่ยมบน โดยกำหนดให้

- $\eta(t)$  เป็นค่าคงที่ในแถวที่ 1 หลักที่ 1 ของเมทริกซ์  $R(t)$
- $L(t)$  เป็นเวกเตอร์ในแถวที่ 1 หลักที่ 2 ถึง 4 ของเมทริกซ์  $R(t)$
- $M(t)$  เป็นเมทริกซ์ในแถวและหลักที่ 2 ถึง 4 ของเมทริกซ์  $R(t)$

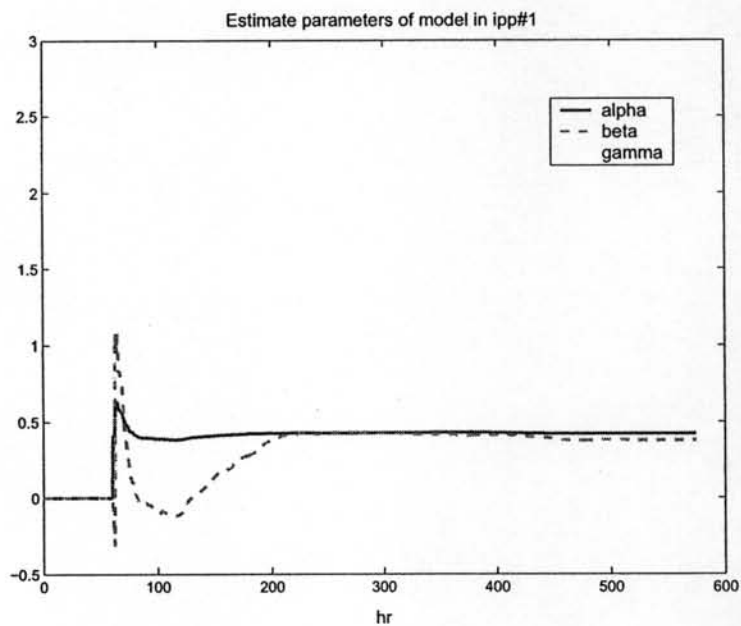
(e) ปรับปรุงเมทริกซ์สามเหลี่ยมล่างของเมทริกซ์  $H(t)$

$$H(t) = \frac{M(t)}{\sqrt{\lambda}}$$

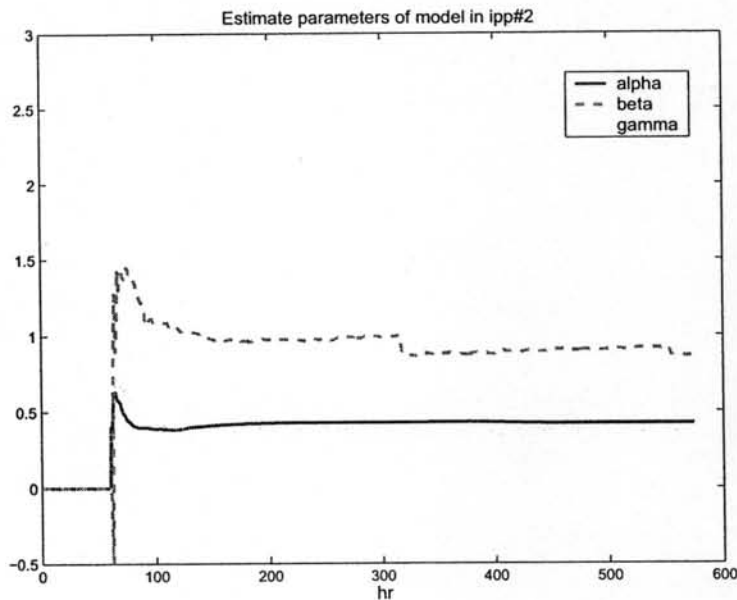
(f) ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์และค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง  $\hat{\theta}(t)$

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{L(t)[W_{in}(t) - a(t) \times \theta(t-1)]}{\eta(t)}$$

เราสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำโดยการถดถอย ได้ ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



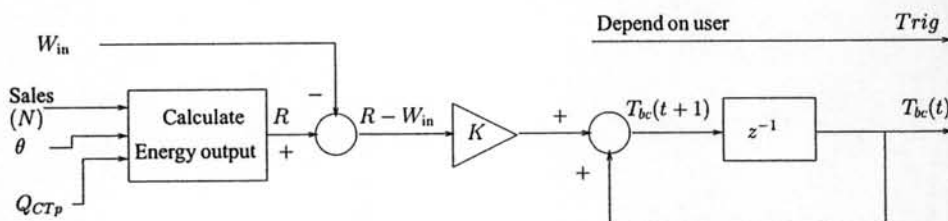
รูปที่ 3.8: พารามิเตอร์ที่ประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำโดยการถดถอยครั้งที่ 1



รูปที่ 3.9: พารามิเตอร์ที่ประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำโดยการถอดรากครั้งที่ 2

จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ของระบบ เมื่อประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำโดยการถอดราก มีค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 และ 3.7

### 3.2.3 แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือ



รูปที่ 3.10: แผนภาพแบบจำลองคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือ

แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อป้อนพลังงานไฟฟ้า, ยอดขาย, อุณหภูมิน้ำเกลือ, พลังงานถ่ายเทสะสมที่ได้จากแบบจำลองทำนายจำนวนของน้ำแข็ง เข้าสู่แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือ แบบจำลองจะประมวลผลโดยเริ่มรับข้อมูลขาเข้าจนครบ 72 ชั่วโมงเพื่อนำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยในช่วงแรกค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้มีการแกว่งไม่สู้เข้าสู่ค่าคงที่ ดังนั้นเราจึงใช้อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ ส่งไปให้แบบจำลองทำนายจำนวนของน้ำแข็งก่อน จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง (ในที่นี้ประมาณ 168 ชั่วโมง) จะได้ค่าพารามิเตอร์ของระบบ

เป็นค่าคงที่ ดังนั้นเราจึงเริ่มคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือ ณ ชั่วโมงนี้ไปอีก 72 ชั่วโมงข้างหน้า ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากแบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ ในชั่วโมงที่ 168 มาคำนวณ สามารถแสดงแบบจำลองเชิงเส้นของระบบได้ดังสมการ

$$W_{in}(t) = 0.4096a_1(t) + 0.3768a_2(t) + 0.9763a_3(t)$$

โดยที่  $a_1(t) = Q_{cumref} \times I_{100}(t)$

$$a_2(t) = Q_{cum}(t+1) - Q_{cum}(t)$$

$$a_3(t) = Q_{tb}(t) - Q_{tb}(t+1)$$

สามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อจากแบบจำลองเชิงเส้น ได้ดังนี้

1. วัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเกลือภายในบ่อในชั่วโมงที่ 168
2. ระบบถ่ายเทพลังงานระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือ ดังรูปที่ 3.10 สามารถเขียนเป็นสมการสถานะได้ดังนี้

$$T_{bc}(t+1) = ((R(t) - W_{in}(t)) \times K) + T_{bc}(t)$$

โดยที่  $K$  คือ  $3600/(\gamma \times M_b \times C_b)$

$M_b$  คือ มวลของน้ำเกลือภายในบ่อ (kg)

$C_b$  คือ ค่าคงที่ของการถ่ายเทความร้อนของน้ำเกลือมีค่าเท่ากับ  $3.33 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

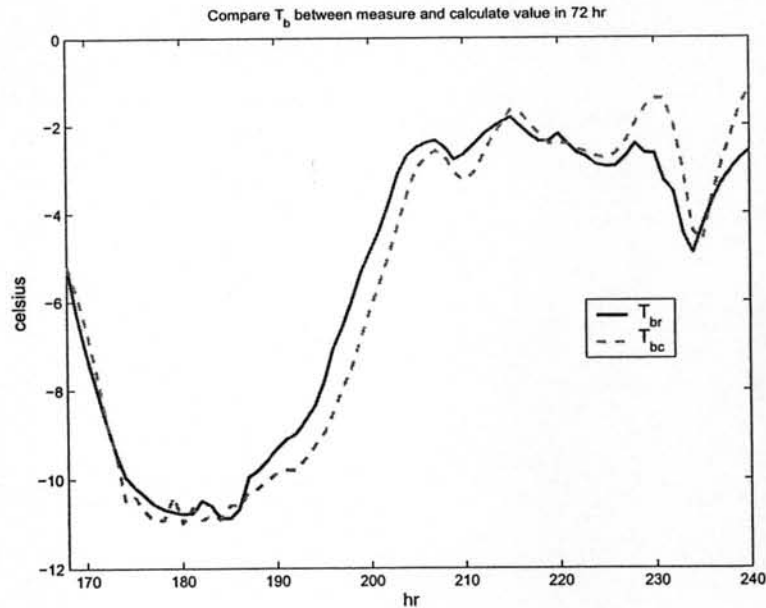
$R(t)$  คือ พลังงานถ่ายเทที่เกิดขึ้นจากจำนวนยอดขายที่ขายไปแล้ว รวมกับพลังงานถ่ายเทที่เกิดขึ้นระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือภายในบ่อที่ขายชั่วโมง โดยเขียนสมการสถานะของพลังงานถ่ายเทได้ดังนี้

$$R(t) = \alpha(Q_{cumref} \times I_{100}(t)) + \beta(Q_{cum}(t+1) - Q_{cum}(t)) - Q_{loss}$$

$Q_{loss}$  คือ พลังงานถ่ายเทที่สูญเสียไปภายในระบบ (กำหนดให้ไม่มีการสูญเสียในระบบ ( $Q_{loss} = 0$ ))

3. กำหนดให้  $T_{bc}$  ที่คำนวณได้มีค่าอยู่ระหว่าง  $-2^\circ\text{C}$  ถึง  $-12^\circ\text{C}$  ดังนั้นเมื่อ  $T_{bc}$  มีค่ามากกว่า  $-2^\circ\text{C}$  แล้ว  $T_{bc}$  มีค่า เท่ากับ  $-2^\circ\text{C}$  ในทำนองเดียวกัน ถ้า  $T_{bc}$  มีค่าน้อยกว่า  $-12^\circ\text{C}$  แล้ว  $T_{bc}$  มีค่าเท่ากับ  $-12^\circ\text{C}$  เพื่อไม่ให้น้ำแข็งมีอุณหภูมิต่ำเกินไปทำให้แตกได้ง่าย

เมื่อคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือได้แล้ว เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้กับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ โดยในชั่วโมงเริ่มต้นจนถึงชั่วโมงที่ 168 ใช้ค่าอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับก่อน เพื่อให้แบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของประมาณค่าพารามิเตอร์ได้แม่นยำยิ่งขึ้น จากนั้นในชั่วโมงที่ 168 จึงจะเริ่มส่งค่าอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้ ซึ่งส่งผลต่อจำนวนของน้ำแข็งและพลังงานถ่ายเทที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมงดังรูปที่ 3.11

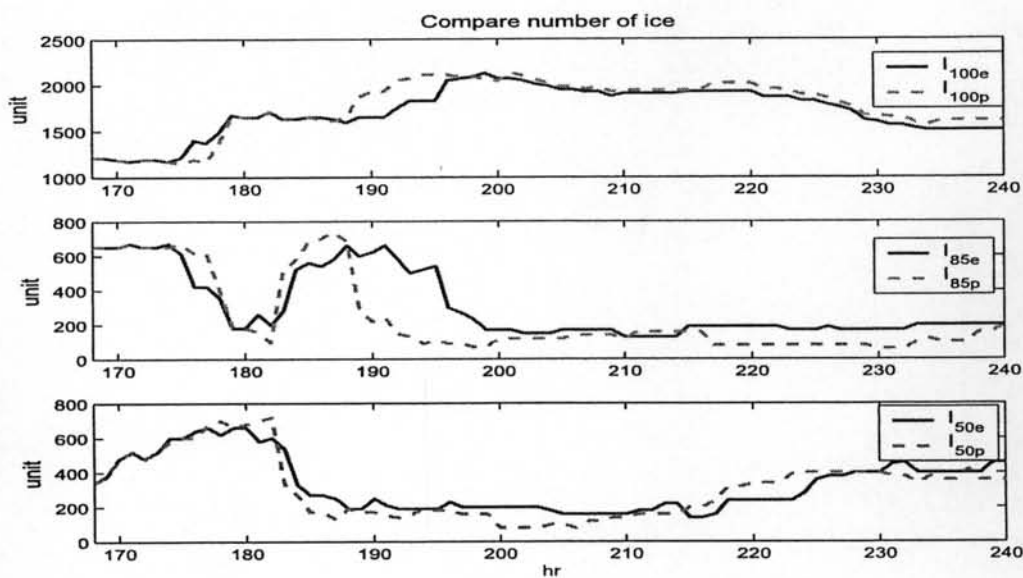


รูปที่ 3.11: อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้กับอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้ใน 72 ชั่วโมงข้างหน้า

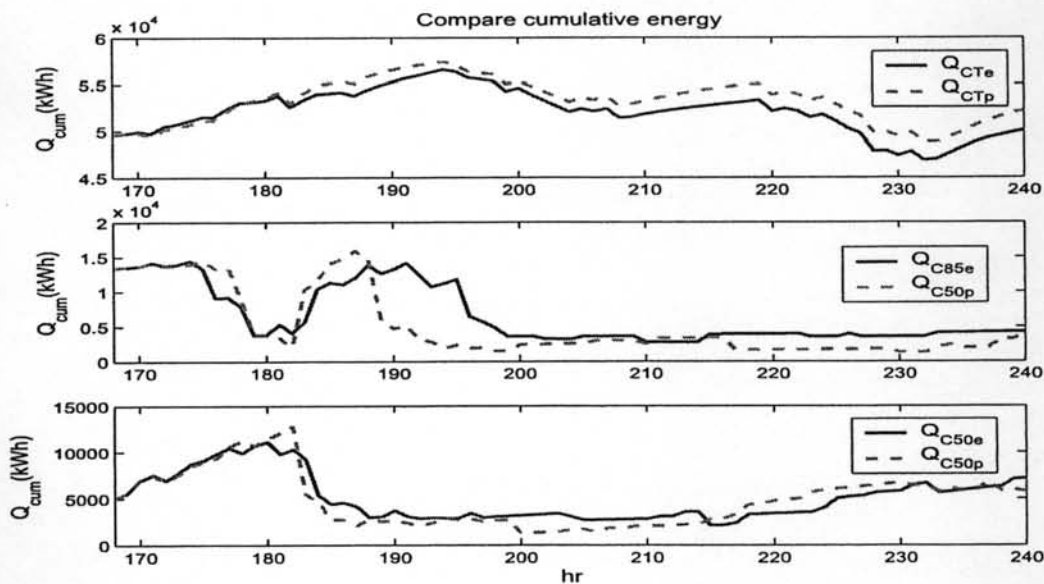
จากรูปที่ 3.11 อุณหภูมิน้ำเกลือในชั่วโมงเริ่มต้นจนถึงชั่วโมงที่ 168 มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ แต่เมื่อเราส่งค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้มาคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือและเริ่มส่งอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้ในชั่วโมงที่ 169 อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้กับอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้ใน 72 ชั่วโมงข้างหน้ามีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 80.21 และมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่คำนวณได้จากรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง 0.72 องศาเซลเซียสเท่านั้น

### 3.2.4 แบบจำลองทำนายจำนวนของน้ำแข็ง

เมื่อคำนวณอุณหภูมิน้ำเกลือได้แล้ว นำค่าที่ได้ป้อนเข้าสู่แบบจำลองทำนายจำนวนของน้ำแข็ง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็งในรูปที่ 3.2 แต่ต่างกันว่าแบบจำลองนี้จะรับค่าอุณหภูมิน้ำเกลือมาจากแบบจำลองตรวจสอบอุณหภูมิน้ำเกลือ โดยในช่วงแรกจะใช้อุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับก่อน จากนั้นจึงเริ่มป้อนอุณหภูมิที่คำนวณได้ในชั่วโมงที่ 169 เพื่อแสดงจำนวนของน้ำแข็งและพลังงานถ่ายเทที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้กับแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็งเมื่อใช้อุณหภูมิที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.12: จำนวนของน้ำแข็ง ( $I_{100p}, I_{85p}, I_{50p}$ ) ที่คำนวณได้ใน 72 ชั่วโมงข้างหน้าเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง



รูปที่ 3.13: พลังงานถ่ายเทสะสม ( $Q_{CTp}, Q_{85p}, Q_{50p}$ ) ที่คำนวณได้ใน 72 ชั่วโมงข้างหน้าเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็ง

จากรูปที่ 3.12 และ 3.13 จำนวนของน้ำแข็งและพลังงานถ่ายเทสะสมที่ได้จากแบบจำลองทำนายจำนวนของน้ำแข็งใน 72 ชั่วโมงข้างหน้า มีค่าใกล้เคียงกับจำนวนของน้ำแข็งและพลังงานถ่ายเทสะสมที่ได้จากแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็งใน 72 ชั่วโมงข้างหน้า เนื่องจากอุณหภูมิน้ำเกลือที่คำนวณได้มี



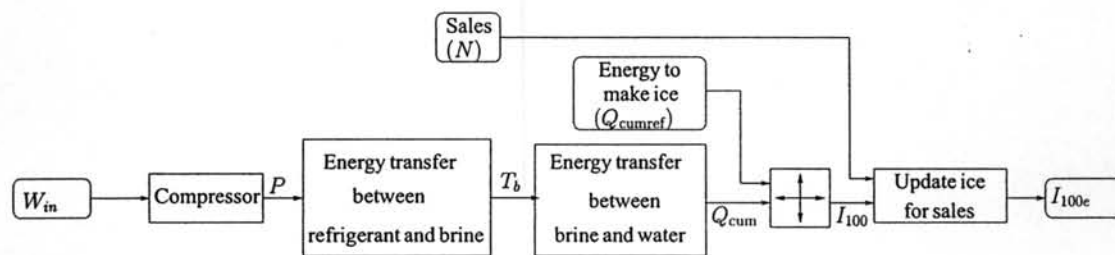
ค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ

### 3.3 แบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

จากแบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาแบบจำลองประมาณจำนวนของน้ำแข็งในส่วนของการทำงานถ่ายเทความร้อนในแต่ละชั่วโมงจากการเปิดตาราง [2] พบว่าพลังงานถ่ายเทความร้อนที่ได้ในแต่ละชั่วโมงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเป็นอย่างมาก ทำให้เราต้องระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของใหม่ เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ภายในระบบได้อย่างสมบูรณ์ ในที่นี้เราเลือกระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น ARX (Auto-Regressive with Exogenous Input Model) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$A(q)y(t) = B(q)u(t)$$

โดยปรับปรุงแบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของใหม่ดังรูปที่ 3.14

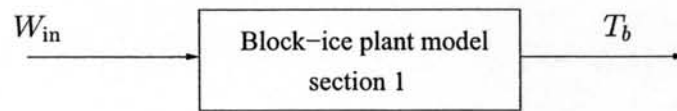


รูปที่ 3.14: แผนภาพแบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของที่ปรับปรุงใหม่

แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของดังรูปที่ 3.14 มีหลักการทำงานดังนี้ คอมเพรสเซอร์รับพลังงานไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานถ่ายเทความร้อน เพื่อดูความร้อนออกจากน้ำเกลือภายในบ่อ อุณหภูมิ น้ำเกลือที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำเกลือ และน้ำเกลือกับน้ำ เพื่อหาพลังงานถ่ายเทความร้อนในแต่ละชั่วโมงจากการเปิดตาราง [2] จากนั้นส่งพลังงานถ่ายเทความร้อนของน้ำแข็งแต่ละของภายในบ่อ เข้ามาเปรียบเทียบกับพลังงานถ่ายเทความร้อนอ้างอิงสำหรับการผลิตน้ำแข็งของ เพื่อตรวจสอบสถานะของน้ำแข็ง ถ้าพลังงานถ่ายเทความร้อนของน้ำแข็งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานถ่ายเทความร้อนสำหรับการผลิตน้ำแข็งของแล้ว แสดงว่าน้ำในของเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งแล้ว จากนั้นส่งจำนวนของน้ำแข็งที่น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งแล้วไปรวมกับ จำนวนของน้ำแข็งคงเหลือในชั่วโมงก่อนหน้า จะได้จำนวนของน้ำแข็งพร้อมขายในชั่วโมงปัจจุบัน แล้วนำมาลบกับยอดขายที่เกิดขึ้นในชั่วโมงปัจจุบัน จะได้จำนวนของน้ำแข็งคงเหลือในชั่วโมงปัจจุบัน เราแบ่งการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองเชิงเส้นออกเป็นสองส่วนดังนี้

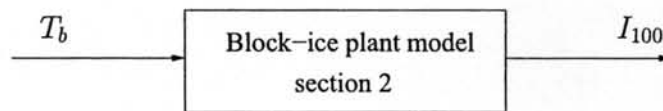
- ส่วนแรกประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์ป้อนให้กับระบบ ซึ่งนำไปสู่กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็น และอุณหภูมิน้ำเกลือ ดังนั้นสัญญาณเข้า-ออก เพื่อใช้ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนนี้ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าและอุณหภูมิน้ำเกลือตามลำดับดังรูปที่ 3.15





รูปที่ 3.15: แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของส่วนแรก

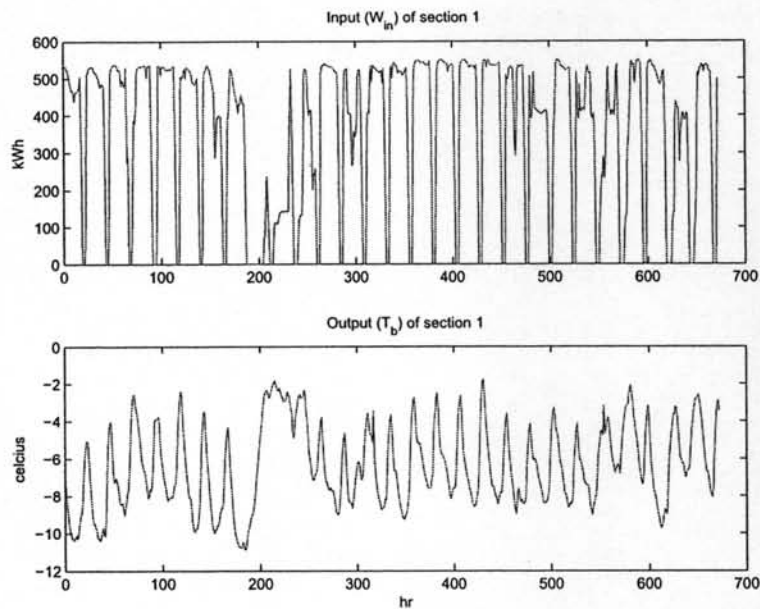
- ส่วนที่สองประกอบด้วย การถ่ายเทพลังงานของอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จากระบบกับน้ำดิบ แล้วตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำดิบแล้ว จากนั้นสอบจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อ ดังนั้น สัญญาณเข้า-ออกเพื่อใช้ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนนี้ได้แก่ อุณหภูมิน้ำเกลือและจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อตามลำดับดังรูปที่ 3.16



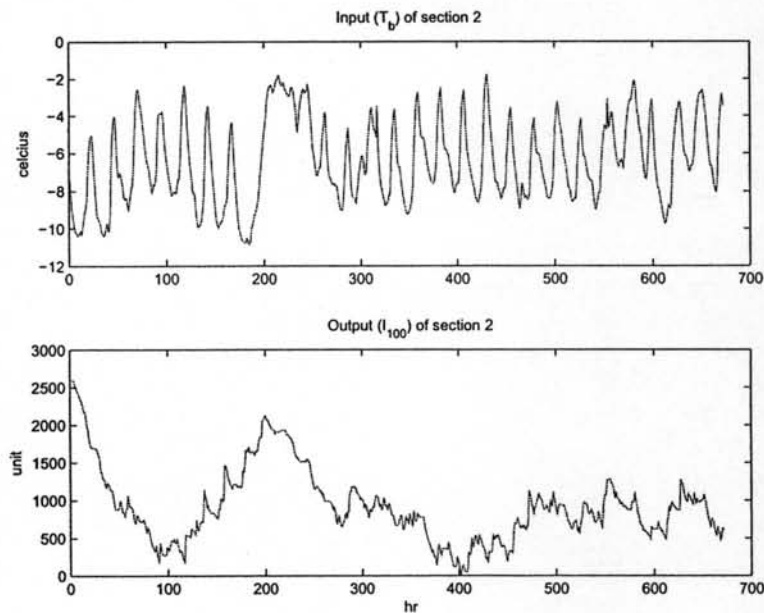
รูปที่ 3.16: แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของส่วนที่สอง

ต่อไปเราจะระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทั้งสองส่วนพร้อมกันโดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนดให้ข้อมูลการระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง เป็นข้อมูลการผลิตน้ำแข็งจากบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ [5] ดังนั้นแบบจำลองส่วนแรกจึงมีสัญญาณเข้า-ออกเป็นพลังงานไฟฟ้า และอุณหภูมิน้ำเกลือตามลำดับดังรูปที่ 3.17 และแบบจำลองส่วนที่สองมีสัญญาณเข้า-ออกเป็นอุณหภูมิน้ำเกลือ และจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อก่อนมีการขายน้ำแข็งเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์



รูปที่ 3.18: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์

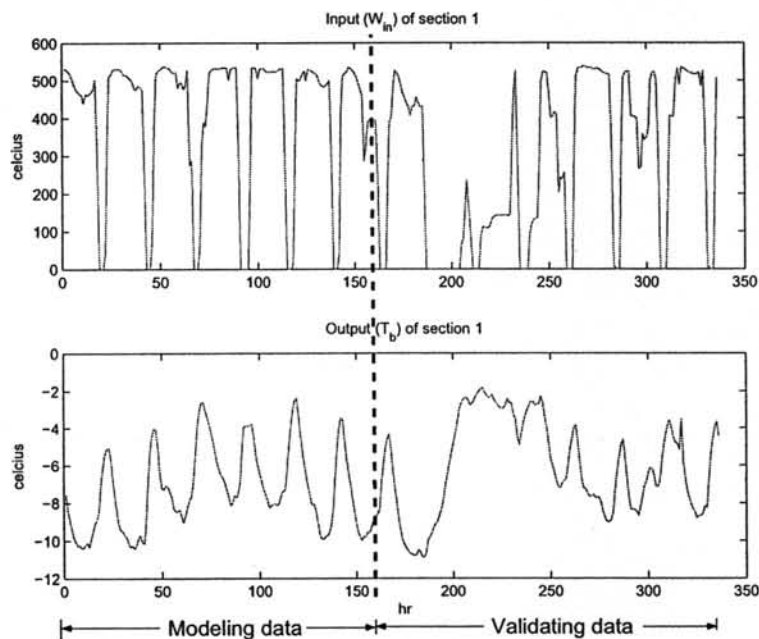
- กำหนดช่วงเวลาที่ใช้ระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทั้งสองส่วน เนื่องจากข้อมูลการผลิตน้ำแข็งในแต่ละเดือนมีการสุ่มเก็บข้อมูลทุกๆ หนึ่งชั่วโมง ทำให้ข้อมูลการผลิตตลอดทั้งเดือนมีจำนวนมาก ดังนั้นเราต้องกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำ

ของแบบจำลองให้ชัดเจน ในที่นี้เรากำหนดให้ช่วงเวลาระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองมีจำนวน 7 วันหรือ 168 ชั่วโมง จากข้อมูลการผลิตน้ำแข็งบ่อที่ 1 ของเดือนกุมภาพันธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 672 ชั่วโมงทำให้เราสามารถแบ่งชุดข้อมูลที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำได้เป็นสองชุดดังตารางที่ 3.1

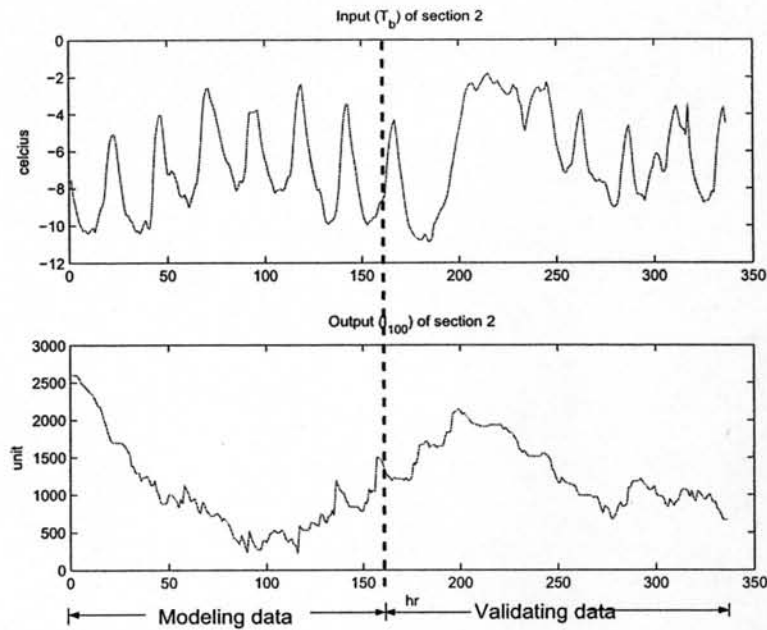
ตารางที่ 3.1: ข้อมูลแสดงช่วงเวลากาการระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

ชุดที่	ช่วงเวลาระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง (Modeling data)	ช่วงเวลาตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง (Validating data)
1	วันที่ 1 – 7 หรือชั่วโมงที่ 1 - 168	วันที่ 8 – 14 หรือชั่วโมงที่ 169 - 336
2	วันที่ 8 – 14 หรือชั่วโมงที่ 169 - 336	วันที่ 15 – 21 หรือชั่วโมงที่ 337 - 504
3	วันที่ 15 – 21 หรือชั่วโมงที่ 337 - 504	วันที่ 22 – 28 หรือชั่วโมงที่ 505 - 672

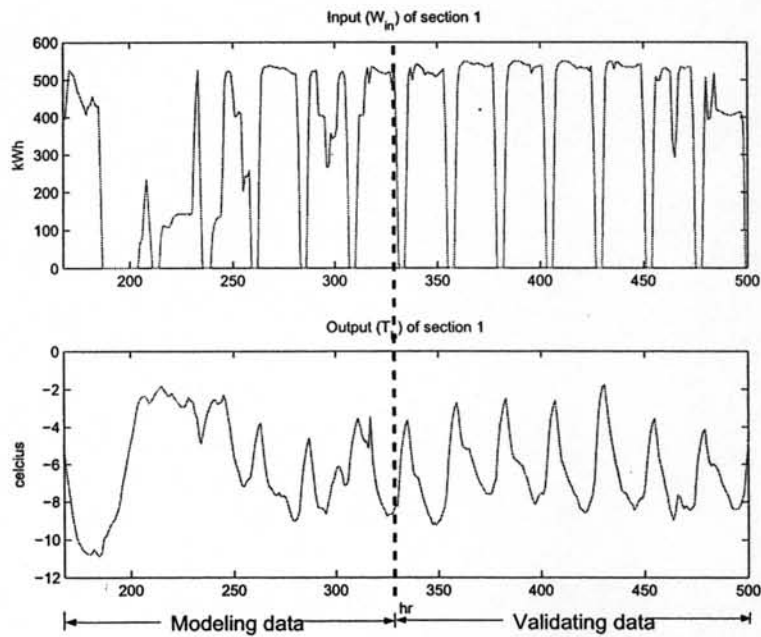
จากตารางที่ 3.1 เมื่อนำข้อมูลทั้งสองชุดมาแสดงช่วงเวลาระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทั้งสองส่วนกับข้อมูลการผลิตจากบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ ดังรูปที่ 3.19 ถึง 3.22



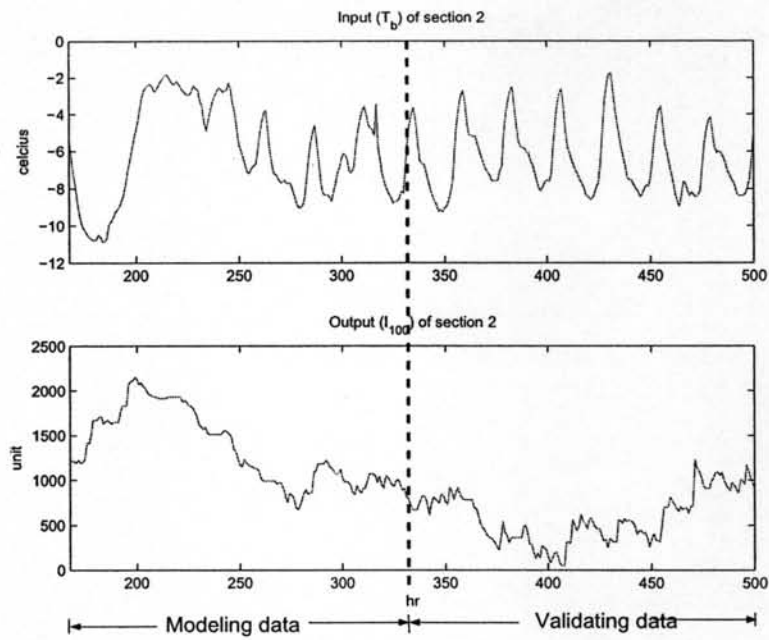
รูปที่ 3.19: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 1 กับข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์



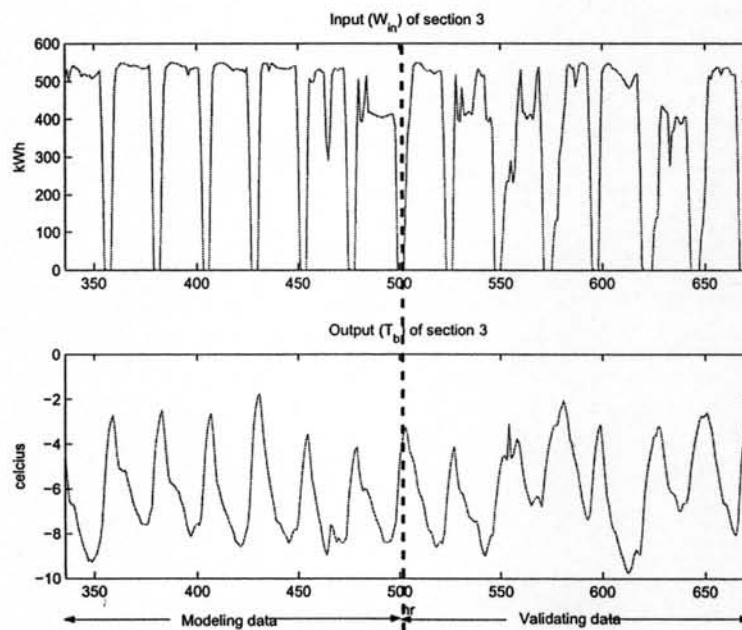
รูปที่ 3.20: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 1 กับข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์



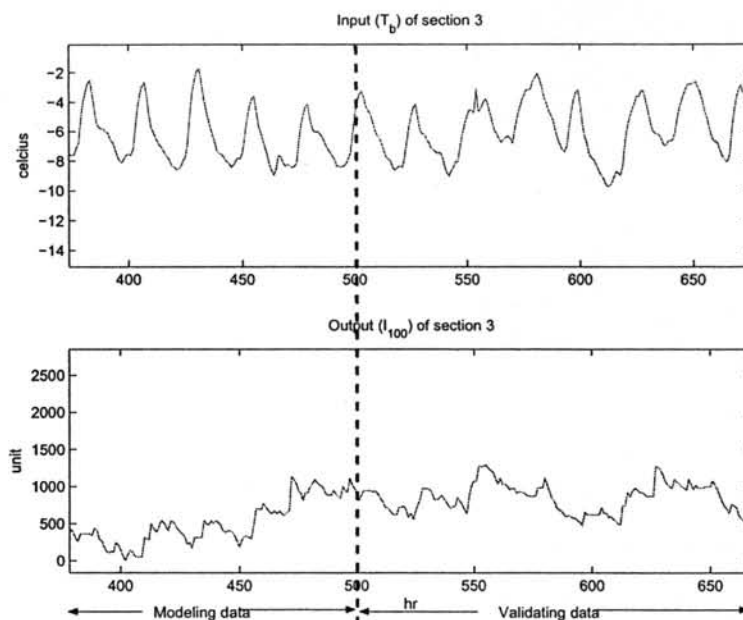
รูปที่ 3.21: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 2 กับข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์



รูปที่ 3.22: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 2 กับข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์



รูปที่ 3.23: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 3 กับข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์



รูปที่ 3.24: สัญญาณเข้า-ออกของแบบจำลองส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลชุดที่ 3 กับข้อมูลการผลิตบ่อที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์

3. กำหนดเงื่อนไขการยอมรับของแบบจำลองจากความแม่นยำ (Fitting,  $f$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$f(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|\hat{y} - \bar{y}\|}\right)$$

เมื่อ  $y$  คือ สัญญาณออกที่วัดได้จริงในช่วงเวลาตรวจสอบความแม่นยำ

$\hat{y}$  คือ สัญญาณออกที่ทำนายได้จากแบบจำลองในช่วงเวลาตรวจสอบความแม่นยำ

$\bar{y}$  คือ เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณออกที่วัดได้จริงในช่วงเวลาตรวจสอบความแม่นยำ

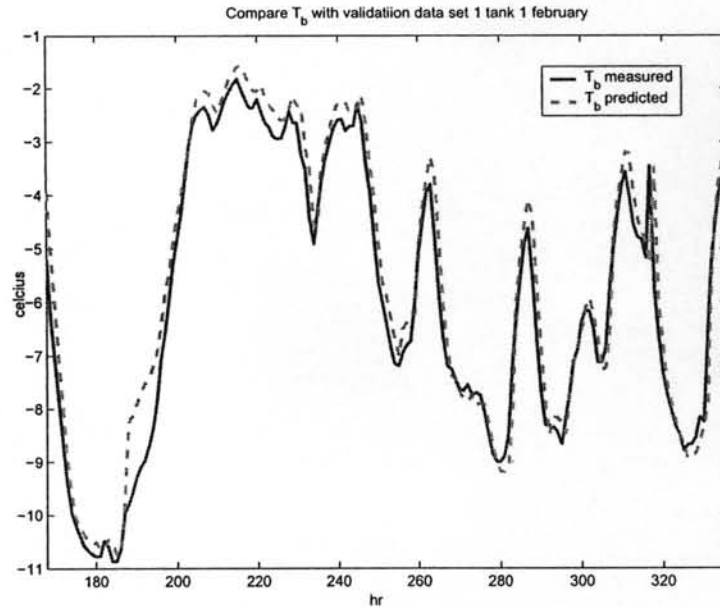
ในที่นี้กำหนดให้ความแม่นยำของแบบจำลองแต่ละส่วนที่ยอมรับได้คือ ร้อยละ 60 ซึ่งเป็นความแม่นยำที่คำนวณได้จากข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำแต่ละชุดของแบบจำลองแต่ละส่วน จากนั้นระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทั้งสองส่วนซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- (a) ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนแรกโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 1 จากตารางที่ 3.1 ซึ่งก็คือสัญญาณเข้าออกของแบบจำลองที่ได้จากรูปที่ 3.19 แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลระบุเอกลักษณ์ชุดนี้คือ

$$\begin{aligned} \hat{T}_b(t+1) = & 0.9259T_b(t) - 0.004269W_{in}(t) \\ & + 0.002319W_{in}(t-1) + 0.0001044W_{in}(t-2) \\ & + 0.0005498W_{in}(t-3) + 0.0001828W_{in}(t-4) \end{aligned}$$

โดยที่  $\hat{T}_b(t+1)$  เป็นอุณหภูมิน้ำเกลือที่ทำนายได้ เมื่อนำแบบจำลองนี้มาตรวจสอบความแม่นยำ

ยากับข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 1 โดยแสดงผลเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริง ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25: อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงกับที่ทำนายได้จากแบบจำลองเชิงเส้นส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 1

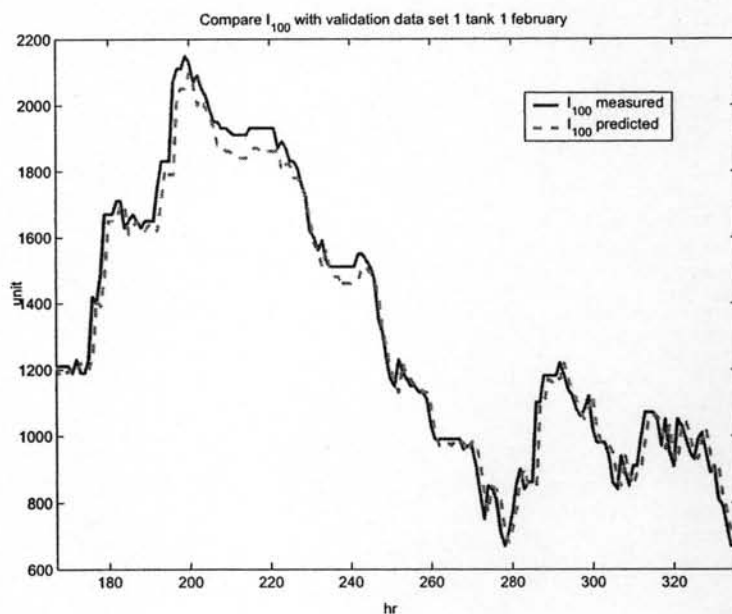
จากรูปที่ 3.25 เมื่อนำอุณหภูมิน้ำเกลือที่ทำนายได้จากแบบจำลองมาคำนวณความแม่นยำเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงได้ร้อยละ 85.35 ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่ไม่สามารถยอมรับได้

- (b) ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนที่สองโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 1 จากตารางที่ 3.1 ซึ่งก็คือสัญญาณเข้าออกของแบบจำลองที่ได้จากรูปที่ 3.20 แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลระบุเอกลักษณ์ชุดนี้คือ

$$\hat{I}_{100}(t+1) = 0.9584I_{100}(t) - 4.7913T_b(t)$$

โดยที่  $\hat{I}_{100}(t+1)$  เป็นจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่ทำนายได้ เมื่อนำแบบจำลองนี้มาตรวจสอบความแม่นยำกับข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 1 โดยแสดงผลเทียบกับจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่วัดได้จริงดังรูปที่ 3.26





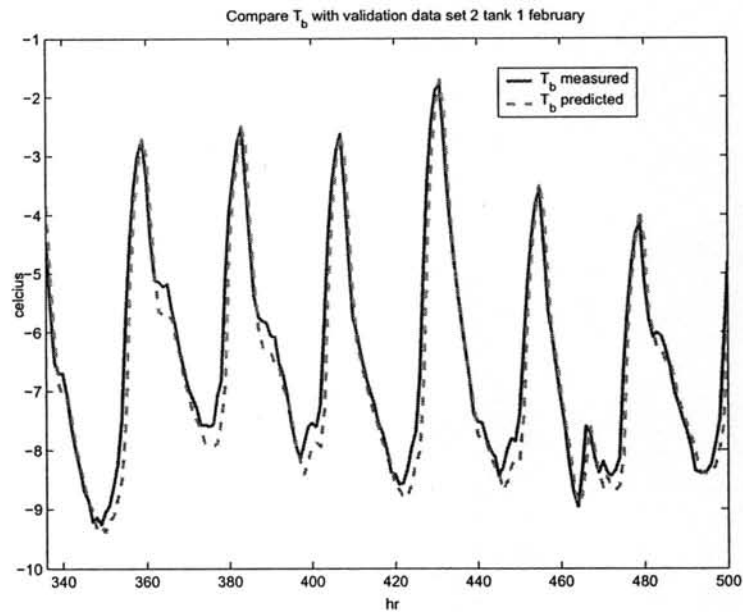
รูปที่ 3.26: จำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่วัดได้จริงกับที่ทำนายได้จากแบบจำลองเชิงเส้นส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 1

จากรูปที่ 3.26 เมื่อนำจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่ทำนายได้จากแบบจำลอง มาคำนวณความแม่นยำเทียบกับจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือ ภายในบ่อที่วัดได้จริงได้ร้อยละ 84.05 ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้

- (c) ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนแรกโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 จากตารางที่ 3.1 ซึ่งก็คือสัญญาณเข้าออกของแบบจำลองที่ได้จากรูปที่ 3.21 แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลระบุเอกลักษณ์ชุดนี้คือ

$$\hat{T}_b(t+1) = 1.149T_b(t) - 0.2007T_b(t-1) - 0.002997W_{in}(t) + 0.001917W_{in}(t-1)$$

เมื่อนำแบบจำลองนี้มาตรวจสอบความแม่นยำกับข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 2 โดยแสดงผลเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงดังรูปที่ 3.27



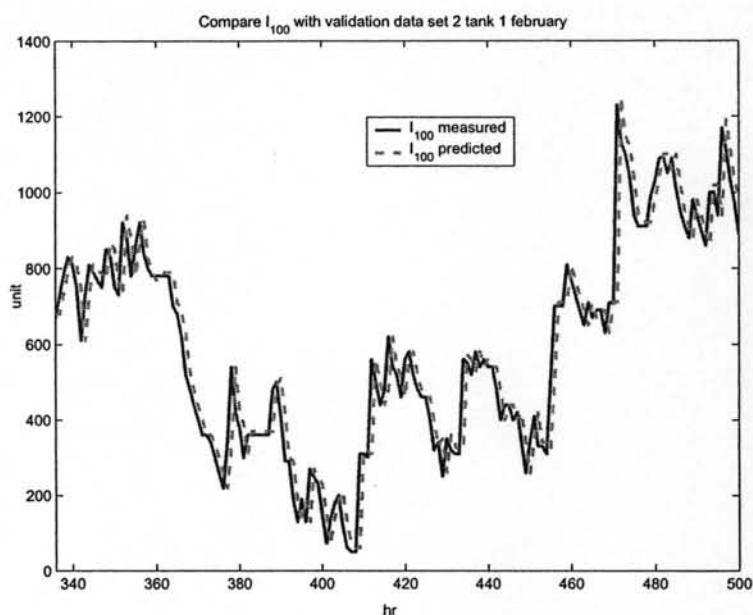
รูปที่ 3.27: อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงกับที่ทำนายได้จากแบบจำลองเชิงเส้นส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 2

จากรูปที่ 3.27 เมื่อนำอุณหภูมิน้ำเกลือที่ทำนายได้จากแบบจำลองมาคำนวณความแม่นยำเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงได้ร้อยละ 84.14 ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้

(d) ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนที่สองโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 จากตารางที่ 3.1 ซึ่งก็คือสัญญาณเข้าออกของแบบจำลองที่ได้จากรูปที่ 3.22 แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลระบุเอกลักษณ์ชุดนี้คือ

$$\hat{I}_{100}(t+1) = 1.083I_{100}(t) - 0.09198I_{100}(t-1) + 3.631T_b(t) - 5.353T_b(t-1)$$

เมื่อนำแบบจำลองนี้มาตรวจสอบความแม่นยำกับข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 2 โดยแสดงผลเทียบกับจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่วัดได้จริงดังรูปที่ 3.28



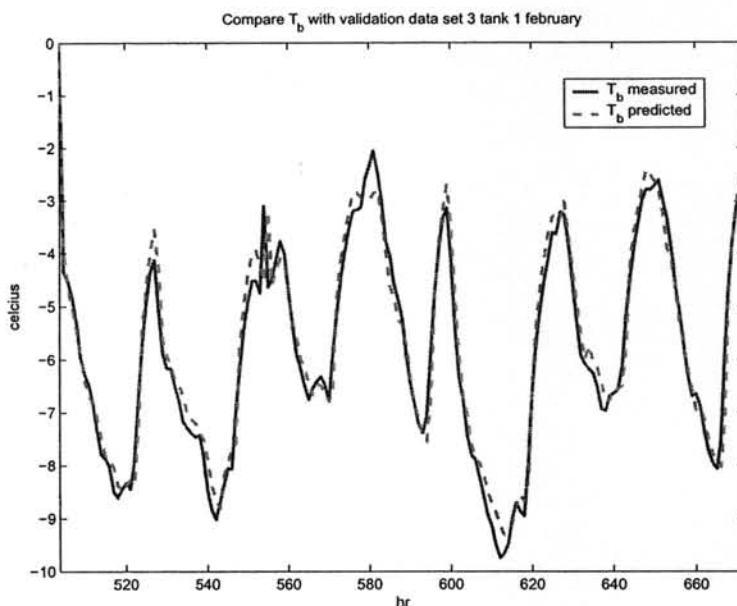
รูปที่ 3.28: จำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่วัดได้จริงกับที่ทำนายได้จากแบบจำลองเชิงเส้นส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 2

จากรูปที่ 3.28 เมื่อนำจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่ทำนายได้จากแบบจำลอง มาคำนวณความแม่นยำเทียบกับจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือ ภายในบ่อที่วัดได้จริงได้ร้อยละ 68.8 ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้

- (c) ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนแรกโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 3 จากตารางที่ 3.1 ซึ่งก็คือสัญญาณเข้าออกของแบบจำลองที่ได้จากรูปที่ 3.23 แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลระบุเอกลักษณ์ชุดนี้คือ

$$\hat{T}_b(t+1) = 0.8104T_b(t) - 0.0029W_{in}(t)$$

เมื่อนำแบบจำลองนี้มาตรวจสอบความแม่นยำกับข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 3 โดยแสดงผลเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงดังรูปที่ 3.29



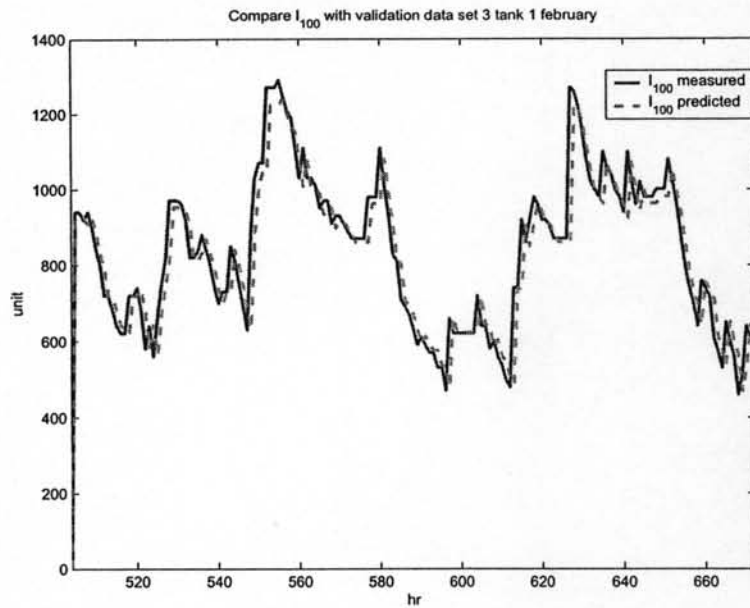
รูปที่ 3.29: อุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงกับที่ทำนายได้จากแบบจำลองเชิงเส้นส่วนแรกเมื่อใช้ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 3

จากรูปที่ 3.29 เมื่อนำอุณหภูมิน้ำเกลือที่ทำนายได้จากแบบจำลองมาคำนวณความแม่นยำเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่วัดได้จริงได้ร้อยละ 80.04 ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้

(f) ระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองส่วนที่สองโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 3 จากตารางที่ 3.1 ซึ่งก็คือสัญญาณเข้าออกของแบบจำลองที่ได้จากรูปที่ 3.24 แบบจำลองที่ได้จากข้อมูลระบุเอกลักษณ์ชุดนี้คือ

$$\hat{I}_{100}(t+1) = 0.962I_{100}(t) + 0.01684I_{100}(t-1) - 16.1T_b(t) + 14.45T_b(t-1)$$

เมื่อนำแบบจำลองนี้มาตรวจสอบความแม่นยำกับข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 3 โดยแสดงผลเทียบกับจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่วัดได้จริงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.30: จำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่วัดได้จริงกับที่ทำนายได้จากแบบจำลองเชิงเส้นส่วนที่สองเมื่อใช้ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่ 3

จากรูปที่ 3.30 เมื่อนำจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือภายในบ่อที่ทำนายได้จากแบบจำลอง มาคำนวณความแม่นยำเทียบกับจำนวนของน้ำแข็งคงเหลือ ภายในบ่อที่วัดได้จริงได้ร้อยละ 55.12 ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่ยอมรับไม่ได้

เราสามารถเขียนสรุปแบบจำลองและค่าความแม่นยำของแบบจำลองแต่ละส่วน จากข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองแต่ละชุดได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2: แบบจำลองเชิงเส้นและความแม่นยำของแบบจำลองแต่ละส่วนจากข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำแต่ละชุด

แบบจำลองส่วนที่	ข้อมูลตรวจสอบความแม่นยำชุดที่	แบบจำลอง	ความแม่นยำ (%)
1	1	$\hat{T}_b(t+1) = 0.9259T_b(t) - 0.004269W_{in}(t) + 0.002319W_{in}(t-1) + 0.0001044W_{in}(t-2) + 0.0005498W_{in}(t-3) + 0.0001828W_{in}(t-4)$	85.35
2	1	$\hat{I}_{100}(t+1) = 0.9584I_{100}(t) - 4.7913T_b(t)$	84.05
1	2	$\hat{T}_b(t+1) = 1.149T_b(t) - 0.2007T_b(t-1) - 0.002997W_{in}(t) + 0.001917W_{in}(t-1)$	84.14
2	2	$\hat{I}_{100}(t+1) = 1.083I_{100}(t) - 0.09198I_{100}(t-1) + 3.631T_b(t) - 5.353T_b(t-1)$	68.8
1	3	$\hat{T}_b(t+1) = 0.8104T_b(t) - 0.0029W_{in}(t)$	80.04
2	3	$\hat{I}_{100}(t+1) = 0.962I_{100}(t) + 0.01684I_{100}(t-1) - 16.1T_b(t) + 14.45T_b(t-1)$	55.12

ดังนั้นแบบจำลองเชิงเส้นทั้งสองส่วนที่หาได้นี้ ไม่สามารถนำมาทดแทนระบบจริงได้ทั้งหมด เนื่องจากไม่สามารถหาแบบจำลองที่เหมาะสมได้อีกทั้งความแม่นยำที่คำนวณได้ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้

### 3.4 สรุป

แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของพลังงานถ่ายเทสะสมภายในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ทำให้เราต้องระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองนี้ให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น โดยแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้รับมีค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้เมื่อใช้กับบางกรณี (สังเกตได้จากความแม่นยำในตารางที่ 3.2) แต่ในบางกรณีความแม่นยำที่ได้รับมีค่าต่ำเกินไป ทำให้ไม่สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ภายในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองได้ เป็นเหตุให้เราต้องระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในกรณีนี้ใหม่ โดยนำการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองไม่เชิงเส้นมาใช้