บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ผลลัพท์สำคัญที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองทั้งแบบจำลองเชิงเส้น และแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่แปรผันตามเวลา บทสรุปของวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งได้เป็นประเด็นสำคัญๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. ในบทที่ 2 เราได้แสดงวัฏจักรการทำความเย็นพื้นฐาน องค์ประกอบหลักและกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง รวมถึงการดำเนินงานของโรงงานผลิตน้ำแข็งซองตามลำดับ

2. ในบทที่ 3 เรากล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง โดยกล่าวถึงสาเหตุที่ต้องระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลอง จากนั้นระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองด้วยแบบจำลองเชิงเส้นซึ่งพบว่า แบบจำลองเชิงเส้นที่ได้มีความแม่นยำที่ยอมรับได้ในบางกรณีเท่านั้น เป็นเหตุให้เราต้องระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในกรณีนี้ใหม่ โดยนำการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองไม่เชิงเส้นมาใช้

3. ในบทที่ 4 เนื่องจากแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้จากบทที่ผ่านมามีค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้ในบางกรณีเท่านั้น ดังนั้นเราจึงเปลี่ยนการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองใหม่โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองไม่เชิงเส้น NARX โดยใช้ดัชนีสมรรถนะ SERR เป็นเกณฑ์ในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพบว่าแบบจำลองไม่เชิงเส้น NARX มีค่าความแม่นยำมากกว่าหรือเท่ากับแบบจำลองเชิงเส้นในบทที่ผ่านมา และในบางกรณีแบบจำลองไม่เชิงเส้น NARX ที่ได้มีค่าเท่ากับแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้จากบทที่ผ่านมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

สังเกตได้ว่าการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองด้วยแบบจำลองไม่เชิงเส้น NARX โดยการตรวจสอบดัชนีสมรรถนะ SERR ทำให้ได้รับแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง แต่เราสามารถระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยแบบจำลองไม่เชิงเส้น NARX ด้วยโครงสร้างของแบบจำลองอื่นๆ อีกได้ อาทิเช่น วิธีซิกซ์มอยด์เครือข่ายประสาท (Sigmoid neural network), วิธีเวฟเลท (Wavelet) หรือวิธีตัวประมาณเคอร์เนล (Kernal estimator) ซึ่งอาจทำให้ได้รับแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงขึ้น

เมื่อหาแบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองแล้ว สิ่งที่ควรทำต่อไป ได้แก่ การออกแบบตัวควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดค่าไฟฟ้า พร้อม ๆ กับรักษากระบวนการทำงานภายใต้เงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ในที่นี้ขอนำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุม ด้วยโปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic Programming) [14] ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่

สุด การสร้างโปรแกรมเชิงพลวัตอาศัยแบบจำลองของระบบเวลาวิยุต (discrete-time system) ดังนี้

$$x(t+1) = f_t(x(t), u(t), w(t))$$

โดยที่ $x(t)$ คือ สถานะของระบบ ณ เวลา t

f_t คือฟังก์ชันที่ใช้อธิบายระบบในเวลา t

$u(t)$ คือ สัญญาณควบคุมที่มีเงื่อนไขบังคับ (constraint) ณ เวลา t

$w(t)$ คือ พารามิเตอร์สุ่ม (random parameter) ณ เวลา t

กำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์เชิงการบวก (additive cost function, J) มีรูปแบบเป็น

$$J = E[g_N(x(N)) + \sum_{t=0}^{N} g_t(x(t), u(t), w(t))]$$

โดยที่ E คือ ค่าคาดหมาย (expectation) , g คือ ฟังก์ชันราคาที่สถานะ t และ N คือ จำนวนสถานะทั้งหมด จุดประสงค์ คือ การหานโยบายแบบวงปิด (closed-loop policies, $\mu(t)$) โดยที่ $\mu(t) = \mu_t(x(t))$ เพื่อทำให้ J มีค่าต่ำสุด

การสร้างโปรแกรมเชิงพลวัต แบ่งปัญหาเริ่มต้นเป็นปัญหาย่อยหรือสถานะย่อย ในการหานโยบายวงปิด มีหลักการสำคัญ คือการแก้ปัญหาจากสถานะสุดท้ายย้อนกลับมายังสถานะก่อนหน้าตามลำดับจนถึงสถานะเริ่มต้น เรียกวิธีนี้ว่า "การสร้างโปรแกรมเชิงพลวัตย้อนหลัง (backward DP)" เราเขียนฟังก์ชันราคาในสมการ (5.1) ใหม่เพื่อความสะดวกในการแก้ปัญหา คือ

$$\begin{aligned} J_N(x(N)) &= g_N(x(N)) \\ J_t(x(t)) &= \min_{u(t)\in U_t(x(t))} E[g_t(x(t), u(t), w(t)) + J_{t+1}(f_t(x(t), u(t), w(t)))] \end{aligned} \tag{5.1}$$

เมื่อ $t = 0,\ 1,\ 2,\ ...,\ N-1$ และ U_t คือ เซตเงื่อนไขบังคับ (constraint set)

มีงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมในระบบการผลิตน้ำแข็งที่น่าสนใจ ดังนี้ ในปี ค.ศ. 2006 Lertpiya [6] ได้เสนอการออกแบบและพัฒนาระบบบริหารจัดการพลังงานเพื่อกำหนดเวลาการเดินเครื่องมอเตอร์-คอมเพรสเซอร์ สำหรับโรงงานน้ำแข็งซองที่ใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOD และแบบ TOU ประกอบกับมีการพยากรณ์ยอดขายใน 3 วันข้างหน้าหลักการควบคุมการทำงานอาศัยดัชนีที่เรียกว่า ความเสี่ยงต่อการผลิตน้ำแข็งไม่ทันตามความต้องการของลูกค้า เพื่อใช้ตัดสินใจการเดินเครื่องคอมเพรสเซอร์ที่เหมาะสม ในปี ค.ศ. 1995 Henze [15] นำเสนอการออกแบบการควบคุมความเย็นด้วยระบบหน่วยเก็บน้ำแข็งโดยประยุกต์ใช้การสร้างโปรแกรมเชิงพลวัตเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทำความเย็น โดยแบ่งหน่วยเก็บน้ำแข็งออกเป็นสองแบบ [16] ได้แก่ หน่วยเก็บทั้งหมด (full storage) พลังงานความเย็นในช่วงเวลาความต้องการความเย็นสูง มาจากการละลายน้ำแข็งที่กักเก็บไว้ทั้งหมด และ หน่วยเก็บบางส่วน (partial storage) ต่อมา [17] พัฒนาการสร้างโปรแกรมพลวัตกับตัวอย่างเชิงเลข ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า พลังงานความเย็นในช่วงเวลาความต้องการสูงมาจากการละลายน้ำแข็งและมาจากระบบทำความเย็นทางตรง ซึ่งสอดคล้องกับ [15] นอกจากนี้ การออกแบบที่ดีควรคำนึงถึงความผิดพลาดของการทำนายโหลดความเย็นในระบบทำความเย็น

ต่อไป เราจะนำเสนอสมการสถานะและเงื่อนไขบังคับของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง รวมถึงฟังก์ชันจุดประสงค์หรือค่าไฟฟ้าของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

พิจารณาสมการสถานะของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองดังนี้

$$x(t+1) = f_t(x(t), u(t))$$

เมื่อf_t เป็นฟังก์ชันที่ใช้อธิบายระบบในเวลา t จะได้

$$T_b(t+1) = f_t(T_b(t),\ W_{\text{in}}(t))$$

ต่อมาพิจารณาสมการสถานะของระบบผลิตน้ำแข็งซองส่วนที่สองดังนี้

$$I_{100}(t+1) = h_t(I_{100}(t),\ T_b(t))$$

เมื่อ h_t เป็นฟังก์ชันที่ใช้อธิบายระบบในเวลา t ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการสถานะของแบบจำลองระบบผลิตน้ำแข็งซองทั้งสองส่วนได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} T_b(t+1) \\ I_{100}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_t(T_b(t),\ W_{\text{in}}(t)) \\ h_t(I_{100}(t),\ T_b(t)) \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ $\tilde{x}(t) = (T_b(t), I_{100}(t))$ สามารถเขียนสมการสถานะใหม่ได้เป็น

$$\tilde{x}(t+1) = z_t(\tilde{x}(t), W_{\text{in}}(t))$$

เมื่อ z_t เป็นฟังก์ชันที่ใช้อธิบายระบบในเวลา t โดยที่แบบจำลองของแต่ละช่วงเวลาที่หาได้จากบทที่ผ่านมาเป็นดังนี้

ตารางที่ 5.1: แบบจำลองของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงเวลา	แบบจำลอง
วันที่ 8 – 14 หรือชั่วโมงที่ 169 ถึงชั่วโมงที่ 336	$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} 0.8286T_b(t) - 0.0004W_{\text{in}}(t)T_b(t) \\ 0.9584I_{100}(t) - 4.791T_b(t) \end{bmatrix}$
วันที่ 15 – 21 หรือชั่วโมงที่ 337 ถึงชั่วโมงที่ 504	$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} 0.9118T_b(t) - 0.0019W_{\text{in}}(t) \\ 0.9836I_{100}(t) - 0.0026T_b(t)I_{100}(t) \end{bmatrix}$
วันที่ 22 – 28 หรือชั่วโมงที่ 505 ถึงชั่วโมงที่ 672	$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} 0.8104T_b(t) - 0.0029W_{\text{in}}(t) \\ 0.9836I_{100}(t) - 0.0026T_b(t)I_{100}(t) \end{bmatrix}$

เงื่อนไขบังคับของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองคือ

$$\begin{aligned} 0 &\leq I_{100}(t) \leq I_{100}^{\max} \\ T_b^{\min} &\leq T_b(t) \leq T_b^{\max} \\ W_{\text{in}}^{\min} &\leq W_{\text{in}}(t) \leq W_{\text{in}}^{\max} \end{aligned}$$

กำหนดให้ $I_{100}^{\max} = 2600$ ซอง จากนั้นเราจะทำให้เป็นค่าบรรทัดฐาน (normalized) โดยนำค่า $I_{100}^{\max}$ หารตลอดในเงื่อนไขบังคับเงื่อนไขแรก โดยกำหนดให้ $I(t) = \frac{I_{100}(t)}{I_{100}^{\max}}$ ส่วนเงื่อนไขที่สองคือ อุณหภูมิน้ำเกลือในที่นี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง $T_b^{\min} = -12$ องศาเซลเซียส ถึง $T_b^{\max} = -2$ องศาเซลเซียส และเงื่อนไขที่สามหมายความว่า กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบมีค่าอยู่ระหว่าง $W_{\text{in}}^{\min} = 0$ กิโลวัตต์-ชั่วโมงถึง $W_{\text{in}}^{\max} = 4R_c$ กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อ R_c เป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ภายในระบบมีค่าเท่ากับ 135 kWh ซึ่งมีทั้งหมด 4 ตัวต่อบ่อ ดังนั้นเราสามารถเขียนเงื่อนไขบังคับใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} 0 &\leq I(t) &&\leq 1 \\ -12 &\leq T_b(t) &&\leq -2 \\ 0 &\leq W_{\text{in}}(t) &&\leq 540 \end{aligned}$$

โดยในที่นี้เราเพิ่มเงื่อนไขสำหรับการควบคุมดังนี้ การเปิด-ปิดคอมเพรสเซอร์ในแต่ละชั่วโมงต้องเปิดครั้งละหนึ่งตัวเท่านั้นและคอมเพรสเซอร์ที่เปิดไปแล้วจะต้องเปิดอย่างน้อย 4 ชั่วโมงจึงสามารถปิดได้

เนื่องจากจุดประสงค์ของปัญหานี้คือ การควบคุมการเปิด-ปิดคอมเพรสเซอร์ของระบบ เพื่อประหยัดค่าไฟฟ้าของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง โดยมีจำนวนซองน้ำแข็งคงเหลือพอขายซึ่งหาได้จากการทำนายจำนวนยอดขายน้ำแข็งซองที่เกิดขึ้นในอีก 3 วันข้างหน้าแล้วออกแบบควบคุมการเปิด-ปิดคอมเพรสเซอร์เพื่อประหยัดค่าไฟฟ้าให้มากที่สุด ดังนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาจึงเขียนให้อยู่ในรูปค่าไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาการใช้ TOU ซึ่งการคิดค่าไฟฟ้าประกอบด้วย 4 ส่วนดังนี้

1. ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (kW) คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นกิโลวัตต์ในช่วงเวลา On Peak ของหนึ่งเดือน
2. ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมในระยะเวลาหนึ่งเดือน (kWh)
3. ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor)
4. ค่าใช้จ่ายผันแปรตามต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (ft)

ค่าไฟฟ้าแบบ TOU ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการใช้งาน โดยแบ่งเป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามาก (On Peak) คือ ตั้งแต่ 9 โมงเช้าจนถึง 3 ทุ่มของวันธรรมดา (จันทร์-ศุกร์) และช่วงเวลาอื่นๆ เป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ (Off Peak) โดยเรากำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังและค่าใช้จ่ายผันแปรตามต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงไม่รวมอยู่ในฟังก์ชันจุดประสงค์จะได้ฟังก์ชันจุดประสงค์หรือค่าไฟฟ้าตลอดทั้งสัปดาห์เป็นดังนี้

$$J = r_d W_{\text{in}}^{\max} + \left(\frac{672}{t_w}\right) \sum_{t=t_i}^{t_w} r_{e,\nu}(t) W_{\text{in}}(t) \Delta t$$

เมื่อ J เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์หรือค่าไฟฟ้าในหนึ่งเดือน

r_d เป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่คิดจากความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามาก

$W_{\text{in}}^{\max}$ เป็นกำลังไฟฟ้าที่มากที่สุดในหนึ่งเดือนในช่วงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามาก

$W_{\text{in}}(t)$ เป็นกำลังไฟฟ้าในเวลา t

t_i เป็นเวลาเริ่มต้นของการควบคุม

t_w เป็นเวลาท้ายสุดของการควบคุม

$r_{e,\nu}$ เป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่คิดจากค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วง (Onpeak : $\nu = 1$, Off Peak : $\nu = 2$)

Δt เป็นระยะเวลาระหว่างการควบคุมในแต่ละรอบ

ดังนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์หรือค่าไฟฟ้าในส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองคือ

$$J_{e,t_w} = \sum_{t_i=0}^{t_w} r_{e,\nu}(t) W_{\text{in}}(t) \Delta t$$

เมื่อ J_{e,t_w} เป็นค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงระยะเวลา t_w ชั่วโมง เราสามารถเขียนฟังก์ชันจุดประสงค์ในรูปแบบของฟังก์ชันเวียนเกิด (recursive function) ด้วยหลักการของการสร้างโปรแกรมเชิงพลวัตโดยกำหนดให้

$$g_t(x(t), u(t)) = r_{e,\nu}(t) W_{\text{in}}(t) \Delta t$$

จะได้

$$J_{e,\nu} = \sum_{\tau=t_i}^{t_w} g_\tau(x(\tau), u(\tau))$$

และ

$$\begin{aligned} J_t(x(t)) &= \min_{u(j) \in U_j \ ; \ j=t_i,\ldots,t_w} \left\{ \sum_{\tau=t_i}^{t_w} g_\tau(x(\tau),\ u(\tau)) \right\} \\ &= \min_{u(t) \in U_t} \{ g_t(x(t), u(t)) + J_{t+1}(f_t(x(t), u(t))) \end{aligned}$$

เมื่อ U เป็นเซตของสัญญาณควบคุมที่เป็นไปได้ ดังนั้นค่าไฟฟ้าในส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองคือ

$$J_t(T_b(t), I_{100}(t)) = \min_{W_{\text{in}}(t) \in U(t)} \{ g_t(T_b(t), I_{100}(t), W_{\text{in}}(t)) + J_{t+1}(f_t(T_b(t), W_{\text{in}}(t)), g_t(I_{100}(t), T_b(t)) \}$$

เมื่อเราได้ฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองแล้ว เราสามารถสร้างโปรแกรมเชิงพลวัตเพื่อออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดได้ต่อไป