บทที่ 7

การทดสอบระบบควบคุมโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่น

7.1 บทนำ

โรงงานนำร่องเพื่อการกลั่นที่ถูกสร้างขึ้นพร้อมอุปกรณ์การวัดและการควบคุมถูกนำมาทดสอบพร้อมระบบควบคุมแบบกระจายส่วนหรือดีซีเอสตามที่ออกแบบ โดยการกลั่นแยกสารละลายเอทธานอลกับน้ำ ความเข้มข้นของเอทธานอลที่ใช้เป็นสารป้อนเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าตัวแปรกระบวนการในลูพควบคุมคุณภาพ ได้แก่ อุณหภูมิยอดหอ และอุณหภูมิก้นหอ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมในการปรับอัตราการไหลของรีฟลักซ์และอัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มซ้ำของไอน้ำ เพื่อหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเมื่อลูพควบคุมเปิด รวมทั้งเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าตัวแปรกระบวนการในลูพควบคุมอินเว็นทอรี ได้แก่ ระดับของเหลวที่ฐานหอ ระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ และอุณหภูมิสารควบแน่น ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมในการปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องควบแน่น ตามลำดับ เพื่อหาโมเดลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุทกับตัวแปร

เอาท์พุท นอกจากนี้ยังทำการทดสอบตัวควบคุมซึ่งใช้การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยอัลกอริธึมแบบพีไอดี โดยใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่หาได้ โดยใช้รูปแบบโครงสร้างการควบคุมกระบวนการกลั่นแบบ (L V) พร้อมทั้งการเลียนแบบกระบวนการกลั่นของโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่นนี้ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus ด้วย

7.2 การเลือกสารที่นำมาใช้ในการกลั่น

การเลือกคู่สารที่จะนำมาใช้ในการกลั่นสำหรับการทดสอบโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่นนั้นใช้หลักในการพิจารณาคือ ต้องเป็นสารที่หาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง และที่สำคัญคือต้องไม่เป็นสารอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพ หรือเป็นสารไวไฟถึงขั้นระเบิดได้ คู่สารที่จะนำมากลั่นแยกต้องมีจุดเดือดที่ต่างกันประมาณ 15-20 °C โดยมีอุณหภูมิจุดเดือดพอประมาณที่ไม่ต่ำเกินไปจนเกิดการระเหยได้ง่ายและไม่สูงเกินไปซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนสูง ตารางที่ 7.1 เป็นตัวอย่างของสารที่นำมาพิจารณาใช้ในกระบวนการกลั่น

สารที่ถูกเลือกใช้สำหรับการทดสอบโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่นนี้ คือ สารผสมสององค์ประกอบระหว่างน้ำกับเอทธานอล ซึ่งมีจุดเดือดต่างกัน 21.6 °C (เอทธานอลมีจุดเดือดเท่ากับ 78.4 °C ที่ความดันบรรยากาศ) สารผสมระหว่างน้ำกับเอทธานอลเป็นสารผสมที่สามารถแยกออกจากกันได้ง่ายด้วยวิธีการกลั่น โดยมีจุดอะซีโอโทรปที่อุณหภูมิเท่ากับ 78.15 °C และสามารถหาข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวกับกระบวนการกลั่นได้ง่าย รวมทั้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ไม่ยาก และมีราคาไม่แพงนัก นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพ โดยมีค่าจำกัดของ

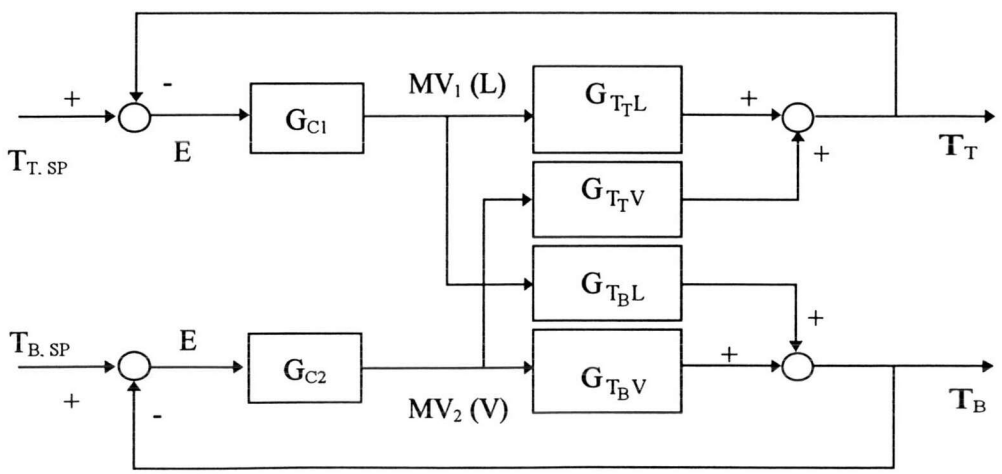
ปริมาณเอทธานอลที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ (Thershold Limit Value: TLV) มีค่าเท่ากับ 1000 ส่วนของเอทธานอลต่อล้านส่วนของอากาศ) แต่เอทธานอลเป็นสารที่สามารถติดไฟได้ โดยมีจุดวาบไฟ (Flash Point) มีค่าเท่ากับ 12.7 °C ซึ่งต้องให้ความระมัดระวังการกระทำที่ทำให้เกิดประกายไฟ (Perry, Green and Maloney, 1973)

ตารางที่ 7.1 สารที่นำมาใช้สำหรับระบบการกลั่นสารคู่ที่เป็นตัวเลือก

สาร	Mwt.	Density (g/ml)	Boiling point (°C)	Flash point (°C)	Autoigi-tion (°C)	TLV	Price (บาท/200 L)
Ethanol	46.07	0.816	78.4	12.7	422	1000	6500
n-propanol	60.09	0.783	97.8	25	371	200	9000
i-proanol	60.09	0.7863	82.4	11.7	453	400	4000
n-butanol	74.12	0.8109	117.0	35.0	.65	50	6000
s-buthanol	74.12	0.808	99.5	23.8	406	100	3500
t-buthanol	74.12	0.779	82.9	11.1	-	-	6000
Cyclohexane	84.0	0.779	80.7	-18.3	245	300	51200
Hexane	86	0.6593	68.7	-22.7	260	50	15000
heptane	100	0.6836	98.4	-3.89	222	400	88000
Ethyacetate	88	0.894	77	-4.4	426	400	14000

7.3 โมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

เราสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของรูปแบบโครงสร้างการควบคุมกระบวนการกลั่นแบบ (L V) ซึ่งเป็นลูพควบคุมคุณภาพ โดยการใช้โมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 จากบล็อกไดอะแกรมของรูปแบบโครงสร้างการควบคุมหอกลั่นแบบ (L V) จะอธิบายได้ว่า การคำนวณค่าตัวแปรปรับเปลี่ยน (MV_1) ของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอกลั่น (G_{C1}) เพื่อปรับอัตราการไหลของรีฟลักซ์ ในการควบคุมอุณหภูมิยอดหอกลั่นให้เท่ากับเซ็ทพอยท์นั้น ส่งผลกระทบทางอ้อมต่อตัวแปรควบคุม คือ อุณหภูมิก้นหอกลั่น ผ่านทางบล็อกทรานเฟอร์ฟังก์ชันระหว่างอัตราการไหลของรีฟลักซ์กับอุณหภูมิก้นหอ เมื่ออุณหภูมิก้นหอกลั่นมีค่าเปลี่ยนแปลงจะทำให้ตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอกลั่น (G_{C2}) คำนวณค่าตัวแปรปรับเปลี่ยน (MV_2) เพื่อปรับอัตราการการให้ความร้อนของไอน้ำในการควบคุมค่าอุณหภูมิก้นหอกลั่นให้กลับเข้าสู่เซ็ทพอยท์ตามปกติ



รูปที่ 7.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงรูปแบบโครงสร้างการควบคุมแบบ (L V)

และเช่นเดียวกัน ค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนที่ได้จากตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอก็จะส่งผลต่อตัวแปรควบคุมของอุณหภูมิยอดหอกลั่นผ่านทางทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันระหว่างอัตราการให้ความร้อนของไอน้ำกับอุณหภูมิยอดหอกลั่น การปฏิบัติการของตัวควบคุมจะทำงานจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

สมการของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเพื่อใช้ในการอธิบายผลการตอบสนองของตัวแปรกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของรูปแบบโครงสร้างการควบคุมกระบวนการกลั่นแบบ (L V) คือ

$$T_{T(S)} = G_{T_T L(S)} L_{(S)} + G_{T_T V(S)} V_{(S)} \tag{7.1}$$

$$T_{B(S)} = G_{T_B L(S)} L_{(S)} + G_{T_B V(S)} V_{(S)} \tag{7.2}$$

เราสามารถเขียนสมการที่ (7.1) และสมการที่ (7.2) ในรูปของเมตริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} T_{T(S)} \\ T_{B(S)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{T_T V} & G_{T_T L} \\ G_{T_B L} & G_{T_B V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{(S)} \\ V_{(S)} \end{bmatrix} \tag{7.3}$$

เมตริกซ์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการควบคุมคุณภาพ ได้แก่

$$G_P(s) = \begin{bmatrix} G_{T_T V} & G_{T_T L} \\ G_{T_B L} & G_{T_B V} \end{bmatrix} \tag{7.4}$$

โมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการควบคุมคุณภาพ เมื่อลูพควบคุมเปิดสามารถแสดงได้ด้วย ดังนี้คือ

$$G_{T_T L}(s) = \frac{T_T(s)}{L(s)} = \frac{K_{T_T L} e^{-\theta_{T_T} s}}{\tau_{T_T L} s + 1} \tag{7.5}$$

$$G_{T_T V}(s) = \frac{T_T(s)}{V(s)} = \frac{K_{T_T V} e^{-\theta_{T_T} s}}{\tau_{T_T V} s + 1} \quad (7.6)$$

$$G_{T_B L}(s) = \frac{T_B(s)}{L(s)} = \frac{K_{T_B L} e^{-\theta_{T_B} s}}{\tau_{T_B L} s + 1} \quad (7.7)$$

$$G_{T_B V}(s) = \frac{T_B(s)}{V(s)} = \frac{K_{T_B V} e^{-\theta_{T_B} s}}{\tau_{T_B V} s + 1} \quad (7.8)$$

เมื่อ $G_{T_T L}$ คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

$G_{T_T V}$ คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนของไอน้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

$G_{T_B L}$ คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิก้นหอ

$G_{T_B V}$ คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราให้ความร้อนของไอน้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

โมเดลของกระบวนการควบคุมอินเว็นทอรี ซึ่งได้แก่ โมเดลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอที่มีผลต่อระดับของเหลวที่ฐานหอกลั่น ($G_{l_B B}$) โมเดลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่มีผลต่อระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์

($G_{l_D D}$) และโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมเพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ป้อนให้กับเครื่องควบแน่นที่มีผลต่ออุณหภูมิของสารควบแน่น ($G_{T_C W}$) สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$G_{l_B B}(s) = \frac{l_B(s)}{B(s)} = \frac{K_{l_B B} e^{-\theta_{l_B} s}}{s} \tag{7.9}$$

$$G_{l_D D}(s) = \frac{l_D(s)}{D(s)} = \frac{K_{l_D D} e^{-\theta_{l_D} s}}{s} \tag{7.10}$$

$$G_{T_C W}(s) = \frac{T_C(s)}{W(s)} = \frac{K_{T_C V} e^{-\theta_{T_C} s}}{\tau_{T_C W} s + 1} \tag{7.11}$$

7.3.1 การหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันด้วยวิธีวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา

การหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันโดยสมมุติให้เป็นกระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเดดไทม์ (First-Order Plus Dead-Time: FOPDT) สามารถทำได้โดยการปรับตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พโดยให้ตัวแปรปรับเปลี่ยนตัวอื่น ๆ คงที่ แล้ววิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาของตัวแปรกระบวนการที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนจะทำทั้งการเพิ่มขึ้นและการลดลงแบบสเต็พ โดยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันจะได้จากการนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยน

แปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนโดยการเพิ่มขึ้นแบบสเต็พและทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนโดยการลดลงแบบสเต็พมาเฉลี่ยกัน

การหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันด้วยวิธีวิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พมีขั้นตอน ดังนี้

1. ปฏิบัติการกลั่นด้วยระบบดีซีเอส โดยใช้การทำงานแบบแมนนวลเพื่อปรับกระบวนการ โดยให้ระบบอยู่ในสถานะคงตัวที่ต้องการ

2. ปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนที่ต้องการหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันด้วยการลดลงแบบสเต็พเพื่อส่งสัญญาณปรับตำแหน่งของวาล์วควบคุม

3. สังเกตและบันทึกผลการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการที่ต้องการหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวใหม่

4. วิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาที่ได้จากผลการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยน

5. ปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนเข้าสู่สภาวะเดิมด้วยการเพิ่มขึ้นแบบสเต็พ และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3-4

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-5 โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พที่ค่าสเต็พต่าง ๆ กันอีก 2 ครั้ง

7. หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนโดยการลดลงแบบสเต็พโดยวิธีวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา และนำค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พทั้ง 3 ครั้งมาเฉลี่ยกัน

8. หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนโดยการเพิ่มขึ้นแบบสเต็พ โดยวิธีวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา และนำค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พทั้ง 3 ครั้งมาเฉลี่ยกัน

9. นำค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากข้อ 7 และข้อ 8 มาเฉลี่ยเพื่อหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ เมื่อลูพเปิด

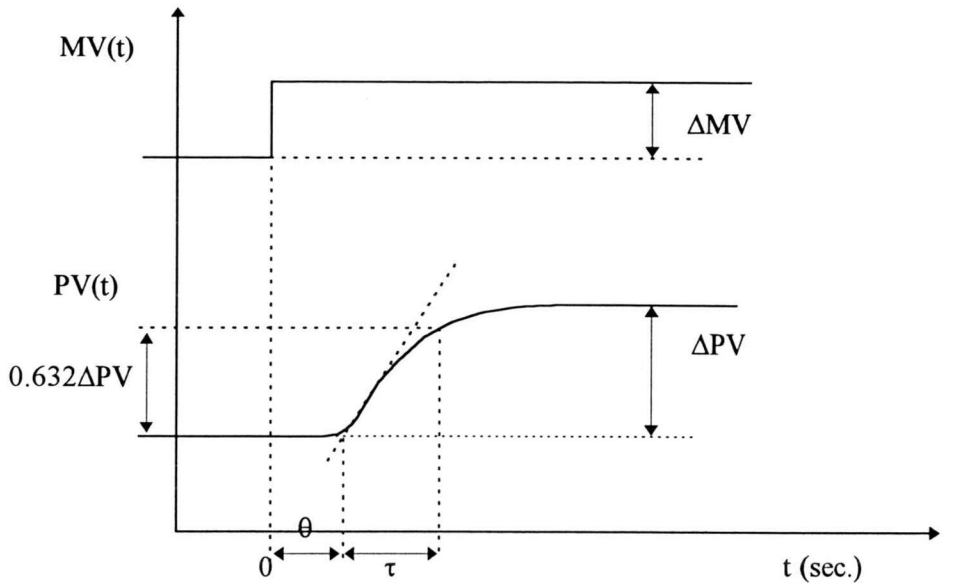
การตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนสำหรับกระบวนการอับดับหนึ่งแบบมีเดดไทม์ มีด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ กระบวนการที่ปรับให้คงที่เองได้ (Self-Regulating Process) และกระบวนการที่ปรับให้คงที่เองไม่ได้ (Nonself-Regulating Process) ดังแสดงในรูปที่ 7.2 และรูปที่ 7.3 ตามลำดับ

การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาแสดงได้ดั้งนี้

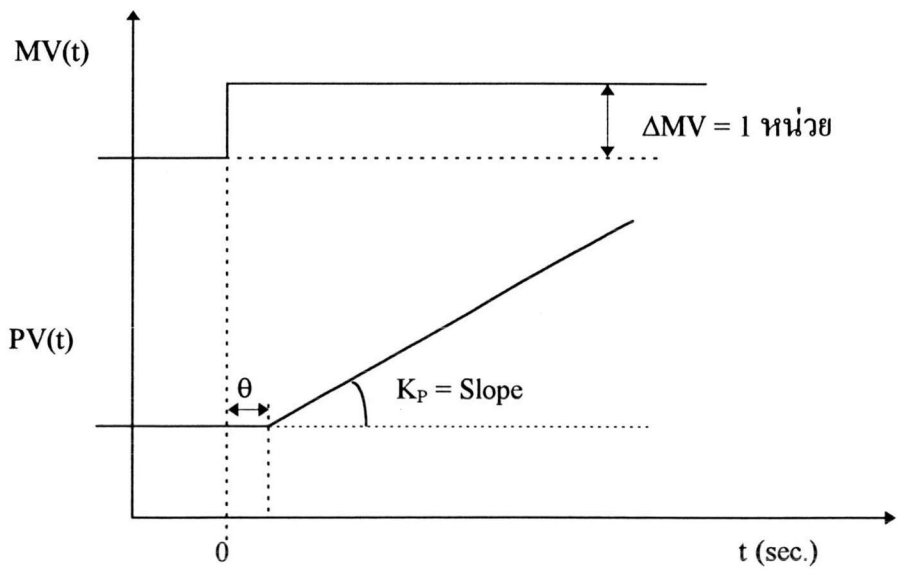
ก. กระบวนการที่ปรับให้คงที่เองได้ (Smith and Corripio, 1985)

โมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเดดไทม์แสดงได้ดังนี้คือ

$$\frac{PV(s)}{MV(s)} = \frac{K_P e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \qquad (7.12)$$



รูปที่ 7.2 กระบวนการที่ปรับให้คงที่เองได้



รูปที่ 7.3 กระบวนการที่ปรับให้คงที่เองไม่ได้

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของตัวแปรปรับเปลี่ยน จะได้

$$PV(s)=\frac{K_P e^{-\theta s}}{\tau s+1}\frac{\Delta MV}{s} \tag{7.13}$$

จัดรูปสมการโดยวิธีแยกสัดส่วน จะได้

$$PV(s)=K_P \Delta MV e^{-\theta s}\left[\frac{1}{s}-\frac{\tau}{\tau s+1}\right] \tag{7.14}$$

จากสมการที่ (7.14) สามารถทำการแปลงลาปาซผกผันได้ ดังนี้คือ

$$\Delta PV(t)=K_P \Delta MV\, u(t-t_0)\left[1-e^{-(t-t_0)/\tau}\right] \tag{7.15}$$

โดยที่ $u(t-t_0)$ คือ ฟังก์ชันสเต็พของหน่วย (Unit Step Funchtion) เพื่อบ่งบอกว่า เมื่อ t มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ t_0 ค่าของ $\Delta PV(t)$ มีค่าเท่ากับ ศูนย์ และเมื่อกำหนดให้ $t = t_0+\tau$ ในสมการที่ (7.15) โดยที่ $K_P=\frac{\Delta PV}{\Delta MV}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta PV(t_0+\tau) &= K_P \Delta MV\left[1-e^{-1}\right] \\ &= 0.632\Delta MV\end{aligned} \tag{7.16}$$

จากรูปแสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการที่ปรับให้คงที่เองได้รูปที่ 7.2 และสมการที่ (7.15) เราสามารถหาค่าคงที่ของเวลาได้จากเวลาที่ทำให้ค่าตัวแปรกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.632 เท่าของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการที่สถานะคงตัวลบด้วยค่าเดดไทม์ ซึ่งค่าเดดไทม์สามารถหาได้จากเส้นโค้งปฏิกิริยา และค่าเกนของกระบวนการสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรกระบวนการกับการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยน ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์หาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเดดไทม์สำหรับกระบวนการปรับคงที่เองได้

ข. กระบวนการที่ปรับให้คงที่เองไม่ได้ (George Stephanopoulos, 1984)

กระบวนการปรับคงที่เองไม่ได้ สำหรับกระบวนอันดับหนึ่งสามารถแสดงโมเดลได้แก่

$$\frac{PV(s)}{MV(s)} = \frac{K_P}{s} \tag{7.17}$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของตัวแปรปรับเปลี่ยน จะได้

$$PV(s) = \frac{K_P \, \Delta MV}{s^2} \tag{7.18}$$

จากสมการที่ (7.18) สามารถทำการแปลงลาปาซผกผันได้ ดังนี้คือ

$$PV(t) = K_P \, t \, \Delta MV \tag{7.19}$$

จากสมการที่ (7.19) และเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าตัวแปรกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พ (รูปที่ 7.3) สามารถหาค่าเกนของกระบวนการได้จากความชันของเส้นโค้งปฏิกิริยา และสามารถทราบค่าเดดไทม์ได้ ซึ่งทำให้สามารถหาโมเดลของกระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเดดไทม์สำหรับกระบวนการที่ปรับให้คงที่เองไม่ได้ ได้ดังนี้

$$\frac{PV(s)}{MV(s)} = \frac{K_P e^{-\theta s}}{s} \tag{7.20}$$

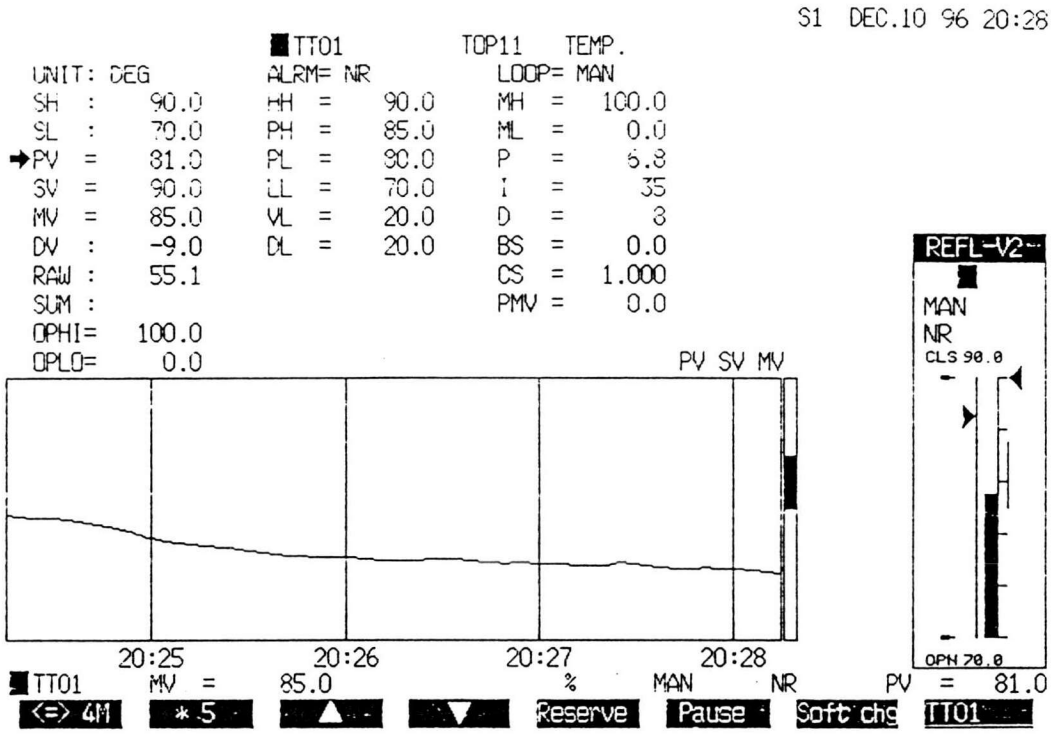
7.3.2 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าตัวแปรกระบวนการที่เป็นตัวแปรเอาท์พุทในลูพควบคุมคุณภาพได้แก่ อุณหภูมิยอดหอ และอุณหภูมิก้นหอ ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมซึ่งเป็นค่าตัวแปรอินพุทเพื่อใช้ในการปรับอัตราการไหลของรีฟลักซ์และอัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มซ้ำของไอน้ำ รวมทั้งเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าตัวแปรกระบวนการในลูพควบคุมอินเว็นทอรี ได้แก่ ระดับของเหลวที่ฐานหอ ระดับของเหลวในถังเก็บรี

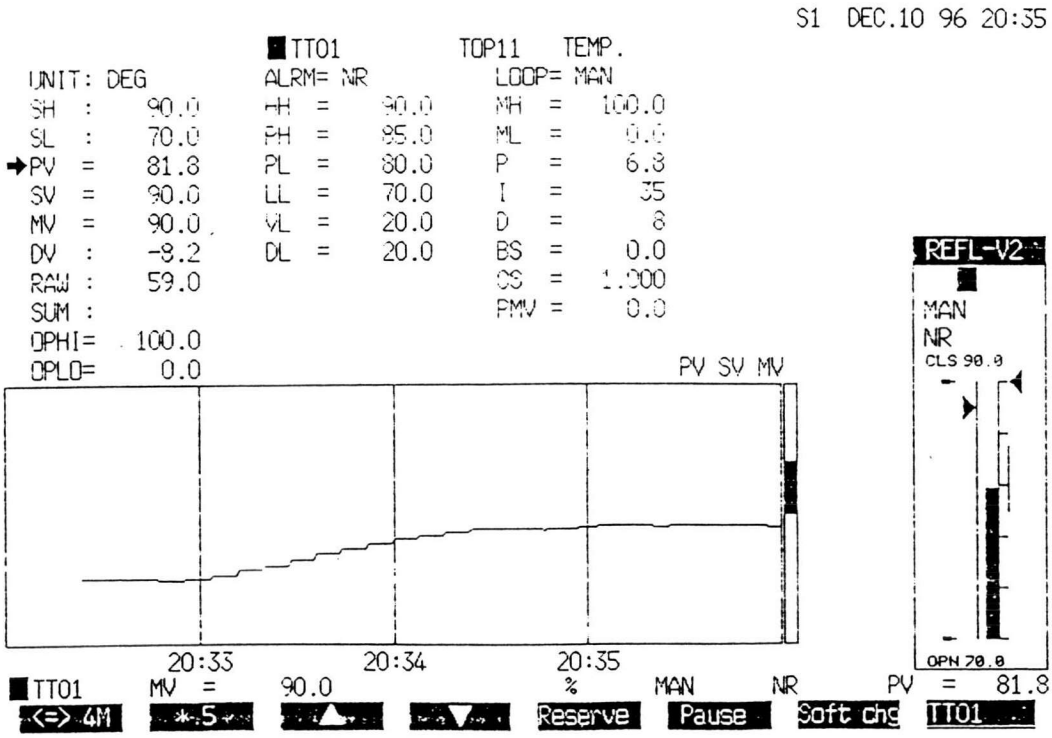
ฟลักซ์ และอุณหภูมิสารควบแน่น ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมเพื่อใช้ในการปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องควบแน่น ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังนี้ (ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข.)

ก. เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิยอดหอกลั่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของรีฟลักซ์

การหาผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของรีฟลักซ์ สามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอซึ่งทำงานแบบแมนนวลแบบสเต็พ เพื่อส่งสัญญาณให้วาล์วควบคุมทำการปรับตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุมสายรีฟลักซ์ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอกระทำที่สเต็พต่าง ๆ คือ -5% +5% -10% +10% -20% และ +20% ที่สถานะคงตัวโดยมีอัตราการไหลของสารป้อน เท่ากับ 180 L/Hr อุณหภูมิก้นหอ เท่ากับ 88.6 °C และอุณหภูมิยอดหอ เท่ากับ 81.2 °C อุณหภูมิยอดหอที่ปฏิบัติการเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนจะรักษาให้อยู่ในช่วง 80.5-82.0 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่กระบวนการกลั่นยังสามารถทำงานได้อย่างปกติ (ช่วงระหว่างอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่ป้อนกลับเข้าหอกลั่นหมดกับค่าอัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถปฏิบัติได้) โดยให้อัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มซ้ำของไอน้ำคงที่ ผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ



รูปที่ 7.4 การตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอ เมื่อ ΔMV เท่ากับ +5%



รูปที่ 7.5 การตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอ เมื่อ ΔMV เท่ากับ -5%

รูปที่ 7.4 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิยอดหอเมื่ออัตราการไหลของรีฟลักซ์ลดลงจาก 55 L/Hr เป็น 30 L/Hr (ค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นจาก 85 % เป็น 90 % หรือ สเต็พของตัวแปรปรับเปลี่ยนเท่ากับ +5 %) อุณหภูมิยอดหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 81.0 °C อุณหภูมิยอดหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 81.8 °C เมื่อวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 0.032 (°C)(Hr)/(L) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 34 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 41 วินาที

รูปที่ 7.5 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิยอดหอเมื่ออัตราการไหลของรีฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 30 L/Hr เป็น 55 L/Hr (ค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนลดลงจาก 90 % เป็น 85 % หรือ สเต็พของตัวแปรปรับเปลี่ยนเท่ากับ -5 %) อุณหภูมิยอดหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 81.9 °C อุณหภูมิยอดหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 81.0 °C เมื่อวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 0.036 (°C)(Hr)/(L) ค่าเดดไทม์เท่ากับ 30 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 32 วินาที

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการทำสเต็พลบ คือ

$$G^{-}_{T_T L}(s) = \frac{-0.0310e^{-33s}}{44s+1} \tag{7.21}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการทำสเต็พบวก คือ

$$G^{+}_{T_T L}(s) = \frac{-0.0320e^{-31s}}{33s+1} \tag{7.22}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยค่าของการสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{T_T L}(s) = \frac{-0.0315e^{-32s}}{39s+1} \tag{7.23}$$

ตารางที่ 7.2 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (°C)(Hr)/(L)	ค่าคงที่ของเวลา (Sec.)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-5 %	0.032	41	34
-10 %	0.031	58	32
-20 %	0.029	34	32
5 %	0.036	32	30
10 %	0.034	32	30
20 %	0.027	35	34
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	0.031	44	33
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	0.032	33	31
ค่าเฉลี่ย	0.0315	39	32

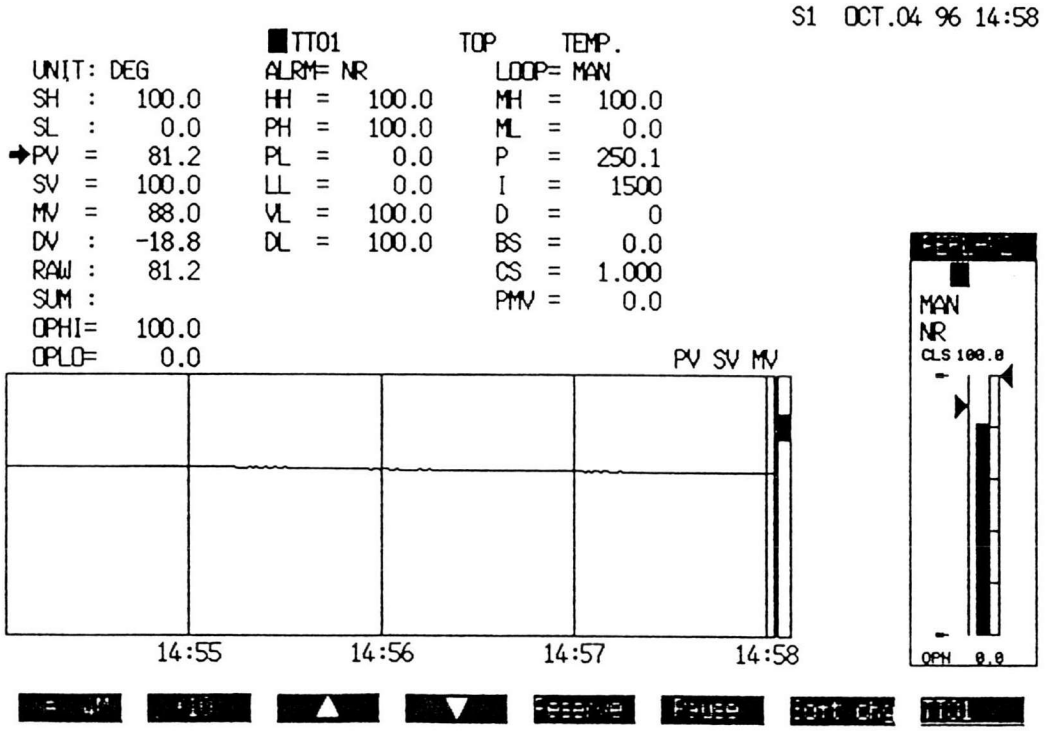
ข. เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิยอดหอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำ

การทดลองหาผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำที่ให้ความร้อนแก่หม้อต้มแบบสเต็พ เพื่อส่งสัญญาณให้วาล์วควบคุมในการปรับตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุมสายไอน้ำ การหาผลการตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอกลั่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอทำที่สเต็พต่าง ๆ คือ -8% +8% -15% +15% -20% และ +20% อุณหภูมิก้นหอที่ปฏิบัติการเปลี่ยน

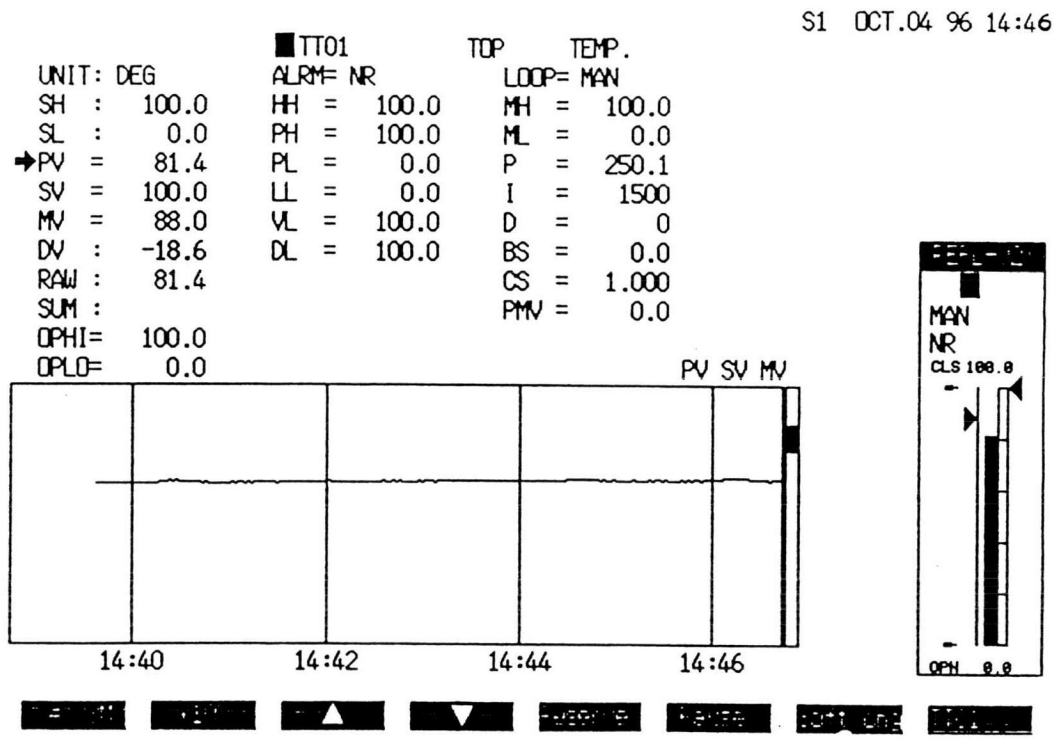
ค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนจะรักษาให้อยู่ในช่วง 87-90.5 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่กระบวนการกลั่นยังสามารถทำงานได้อย่างปกติ (การกลั่นที่ระดับอุณหภูมิก้นหอสูงกว่า 90.5 °C อาจทำให้ไอภายในหอกลั่นมีค่ามากเกินไป และเป็นผลทำให้ความดันที่ก้นหอกลั่นมีค่าสูง ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ท่วมของของเหลวบนเทรย์ได้ และการกลั่นที่ระดับอุณหภูมิก้นหอต่ำกว่า 87 °C ทำให้ไอระเหยขึ้นไปได้น้อย ซึ่งอาจเป็นผลทำให้ปรากฏการณ์รั่วของของเหลวได้) อัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มซ้ำของไอน้ำถูกกำหนดให้คงที่ ผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำที่ให้แก่หม้อต้มซ้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

รูปที่ 7.6 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิยอดหอเมื่อค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอลดลงจาก 18 % เป็น 10 % (สเต็พ เท่ากับ -8 %) อุณหภูมิยอดหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 81.5 °C อุณหภูมิยอดหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 81.2 °C เมื่อวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาจะได้ ค่าเกนของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.0375 (°C)/(%MV) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 15 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 105 วินาที

รูปที่ 7.7 เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิยอดหอ เมื่อค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอเพิ่มขึ้นจาก 10 % เป็น 18 % (สเต็พ เท่ากับ +8 %) อุณหภูมิยอดหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 81.2 °C อุณหภูมิยอดหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 81.5 °C เมื่อวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.0375 (°C)/(%MV) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 15 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 65 วินาที



รูปที่ 7.6 การตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอ เมื่อ ΔMV ของไอน้ำเท่ากับ -8%



รูปที่ 7.7 การตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอ เมื่อ ΔMV ของไอน้ำเท่ากับ +8%

ตารางที่ 7.3 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำที่ให้แก่หม้อต้มซ้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (°C)/(%MV)	ค่าคงที่ของเวลา (Sec.)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-8 %	0.038	105	15
-15 %	0.033	121	11
-20 %	0.030	79	11
8 %	0.038	65	15
15 %	0.040	67	12
20 %	0.030	65	15
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	0.034	102	12
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	0.036	66	14
ค่าเฉลี่ย	0.035	84	13

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พลบ คือ

$$G^{-}{}_{T_T V}(s) = \frac{0.034e^{-12S}}{102s+1} \tag{7.24}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พบวก คือ

$$G^{+}{}_{T_T V}(s) = \frac{0.0360e^{-14S}}{66s+1} \tag{7.25}$$

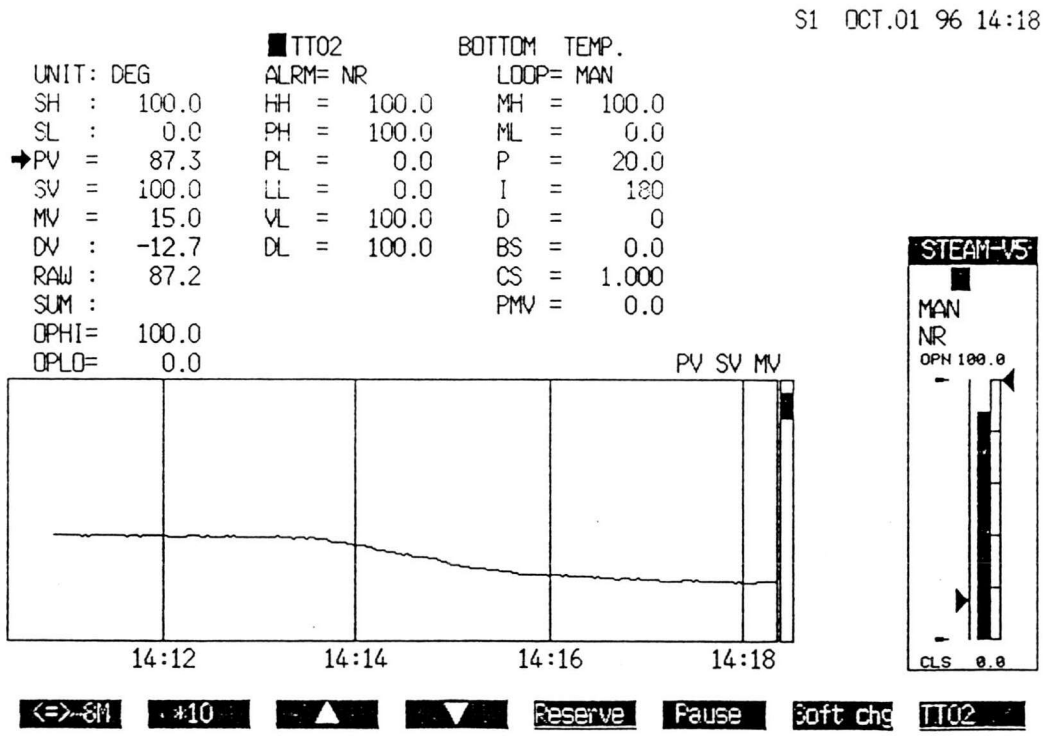
ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{T_T V}(s) = \frac{-0.035e^{-13S}}{84s+1} \tag{7.26}$$

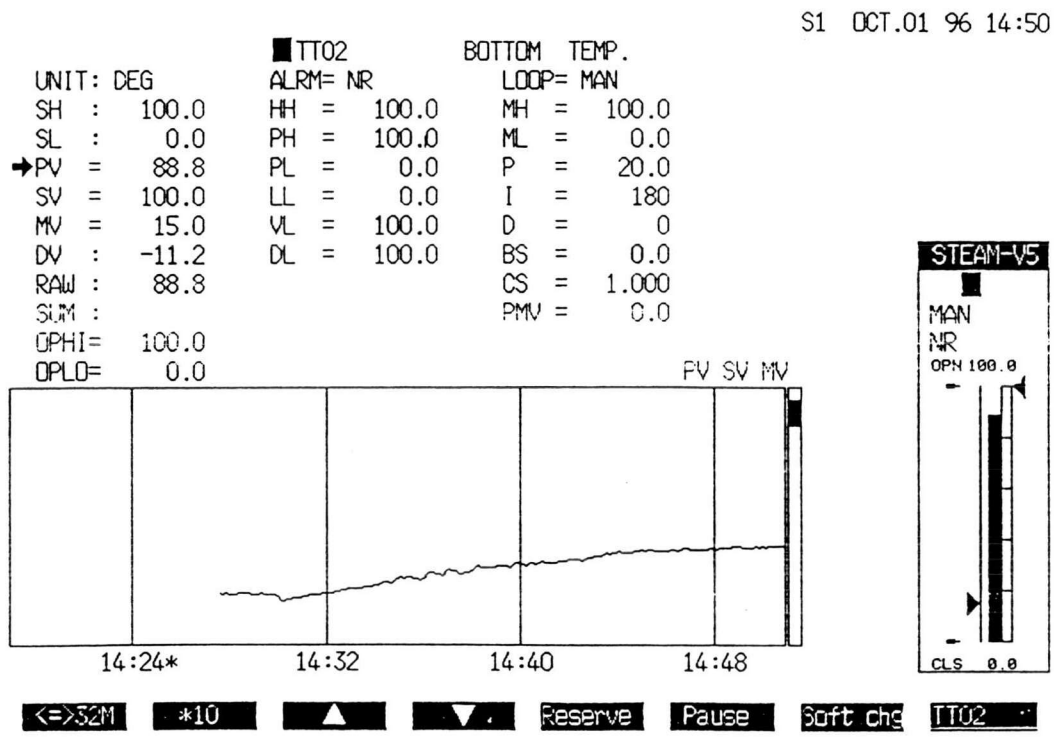
ค. เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิก้นหอกลั่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของรีฟลักซ์

การทดลองหาผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิก้นหอที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของรีฟลักซ์แบบสเต็พ สามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอซึ่งทำงานแบบแมนนวล เพื่อปรับตำแหน่งการเปิดวาล์วควบคุมสายรีฟลักซ์ ที่สถานะคงตัว อัตราการไหลของสารป้อน เท่ากับ 180 L/Hr อุณหภูมิก้นหอ เท่ากับ 88.6 °C และอุณหภูมิยอดหอ เท่ากับ 81.2 °C การหาผลการตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอกลั่นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนกระทำที่สเต็พต่าง ๆ คือ -5% +5% -10% +10% -20% และ +20% ซึ่งอุณหภูมิยอดหอที่ปฏิบัติการจะอยู่ในช่วง 80.5-82.0 °C โดยอัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มซ้ำของไอน้ำ ผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิก้นหอที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำที่ให้แก่หม้อต้มซ้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ

รูปที่ 7.8 เส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิก้นหอกลั่น เมื่ออัตราการไหลของรีฟลักซ์ลดลงจาก 55 L/Hr เป็น 30 L/Hr (ค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมยอดหอเพิ่มขึ้นแบบสเต็พจาก 85 % เป็น 90 %) อุณหภูมิก้นหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 87.6 °C อุณหภูมิก้นหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 88.8 °C เมื่อวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 0.048 (°C)(Hr)/(L) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 113 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 487 วินาที



รูปที่ 7.8 การตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนรีฟลักซ์ +5 %



รูปที่ 7.9 การตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนรีฟลักซ์ -5 %

รูปที่ 7.9 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิก้นหอกลั่น เมื่ออัตราการไหลการรีฟลักซ์เพิ่มขึ้นจาก 30 L/Hr เป็น 55 L/Hr (ค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอลดลงแบบสเต็พจาก 90 % เป็น 85 %) อุณหภูมิก้นหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 88.4 °C อุณหภูมิก้นหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 87.3 °C ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 0.044 (°C)(Hr)/(L) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 104 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 112 วินาที

ตารางที่ 7.4 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิก้นหอ

สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (°C)(Hr)/(L)	ค่าคงที่ของเวลา (Sec.)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-5 %	0.048	487	113
-10 %	0.037	409	155
-20 %	0.040	381	153
5 %	0.044	104	112
10 %	0.040	60	111
20 %	0.040	50	118
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	0.042	426	140
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	0.041	71	114
ค่าเฉลี่ย	0.042	248	127

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พลบ คือ

$$G^{-}_{T_B L}(s) = \frac{0.042e^{-140S}}{426s+1} \tag{7.27}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พบวก คือ

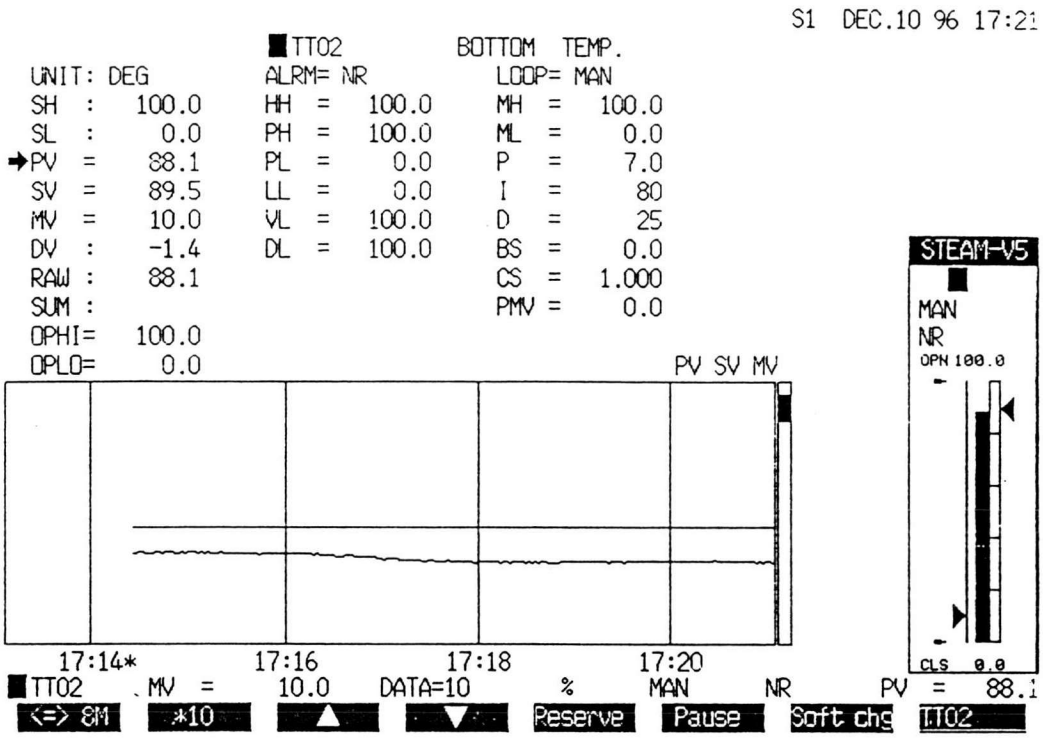
$$G^{+}_{T_B L}(s) = \frac{0.041e^{-114S}}{71s+1} \tag{7.28}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{T_B L}(s) = \frac{-0.042e^{-127S}}{248s+1} \tag{7.29}$$

ง. เส้นโค้งปฏิกิริยาของอุณหภูมิก้นหอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำ

การทดลองหาผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิก้นหอที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการให้ความร้อนแก่หม้อต้มของไอน้ำ สามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอแบบสเต็พเพื่อปรับตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุมสายไอน้ำที่สถานะคงตัวโดยมีอัตราการไหลของสารป้อน เท่ากับ 180 L/Hr อุณหภูมิก้นหอ เท่ากับ 88.6 °C และอุณหภูมิยอดหอ เท่ากับ 81.2 °C การหาผลการตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอกลั่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนกระทำที่สเต็พต่าง ๆ คือ -5% +5% -8% +8% -10% และ +10% โดยอัตราการไหลของรีฟลักซ์คงที่ ผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิก้นหอที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำที่ให้แก่หม้อต้มซ้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิก้นหอ

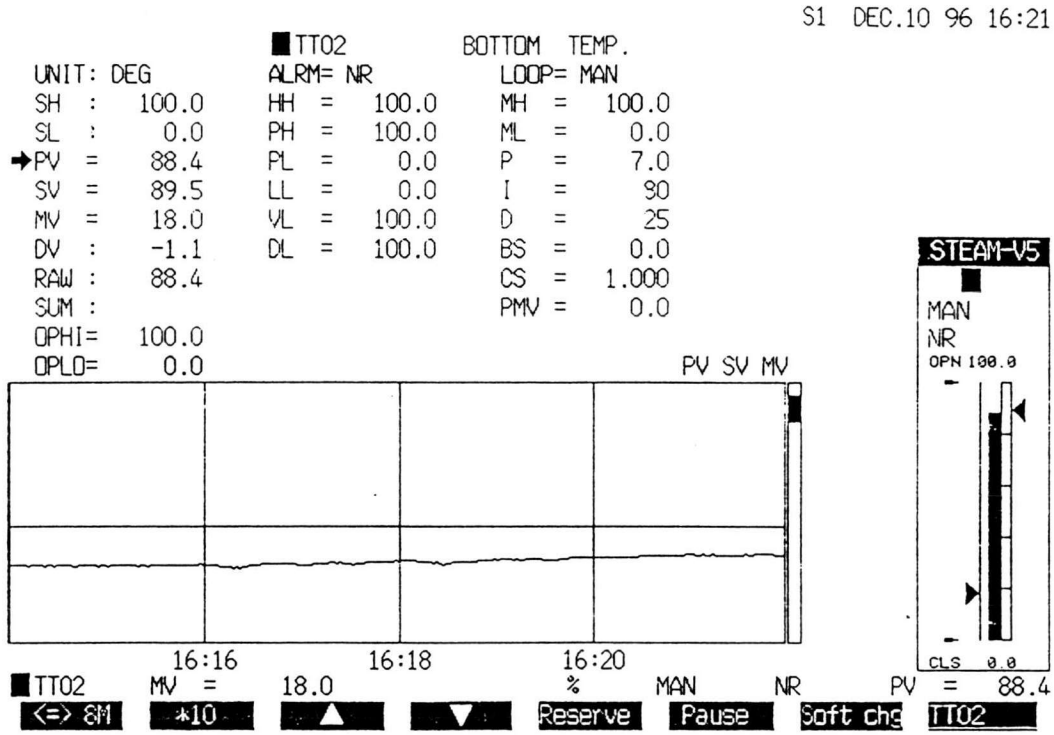


รูปที่ 7.10 การตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนไอน้ำ -8%

รูปที่ 7.10 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของอุณหภูมิก้นหอ เมื่อค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอมีค่าลดลงจาก 18 % เป็น 10 % (สเต็พ เท่ากับ -8 %) อุณหภูมิก้นหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 89.1 °C อุณหภูมิก้นหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 88.1 °C ซึ่งจากการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาจะได้ ค่าเกนของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.125 (°C)/(%MV) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 54 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 191 วินาที

รูปที่ 7.11 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของอุณหภูมิก้นหอ เมื่อค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 % เป็น 18 % (สเต็พ เท่ากับ +8%) อุณหภูมิก้นหอเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 87.6 °C อุณหภูมิก้นหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 88.4 °C จากการวิเคราะห์เส้นโค้ง

ปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.1 (°C)/(%MV) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 48 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 402 วินาที



รูปที่ 7.11 การตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนไอน้ำ +8%

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พลบ คือ

$$G^{-}{}_{T_B V}(s) = \frac{0.102e^{-49S}}{160s+1} \tag{7.30}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พบวก คือ

$$G^{+}{}_{T_B V}(s) = \frac{0.100e^{-53S}}{366s+1} \tag{7.31}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{T_B L}(s) = \frac{0.101e^{-51S}}{263s+1} \qquad (7.32)$$

ตารางที่ 7.5 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของไอน้ำที่ให้แก่หม้อต้มซ้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิก้นหอ

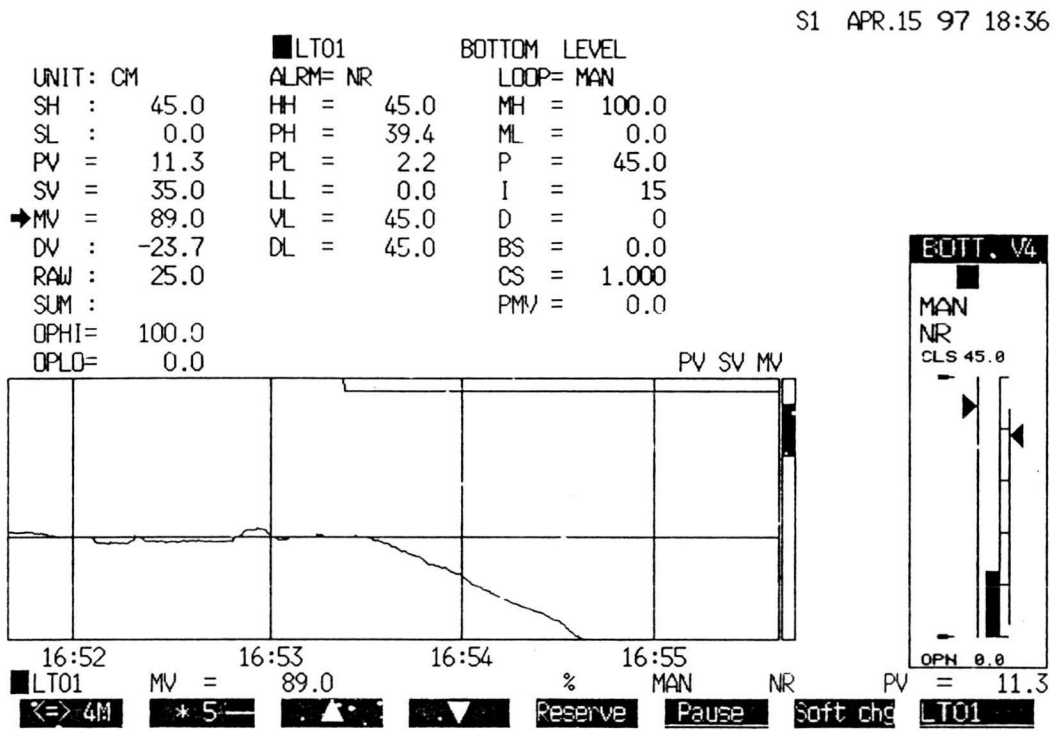
สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (°C)/(%MV)	ค่าคงที่ของเวลา (Sec.)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-5 %	0.080	134	48
-8 %	0125	191	54
-10 %	0.100	156	44
5 %	0.100	342	53
8 %	0.100	402	48
10 %	0.100	355	58
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	0.102	160	49
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	0.100	366	53
ค่าเฉลี่ย	0.101	263	51

จ. การตอบสนองของระดับที่ก้นหอต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ

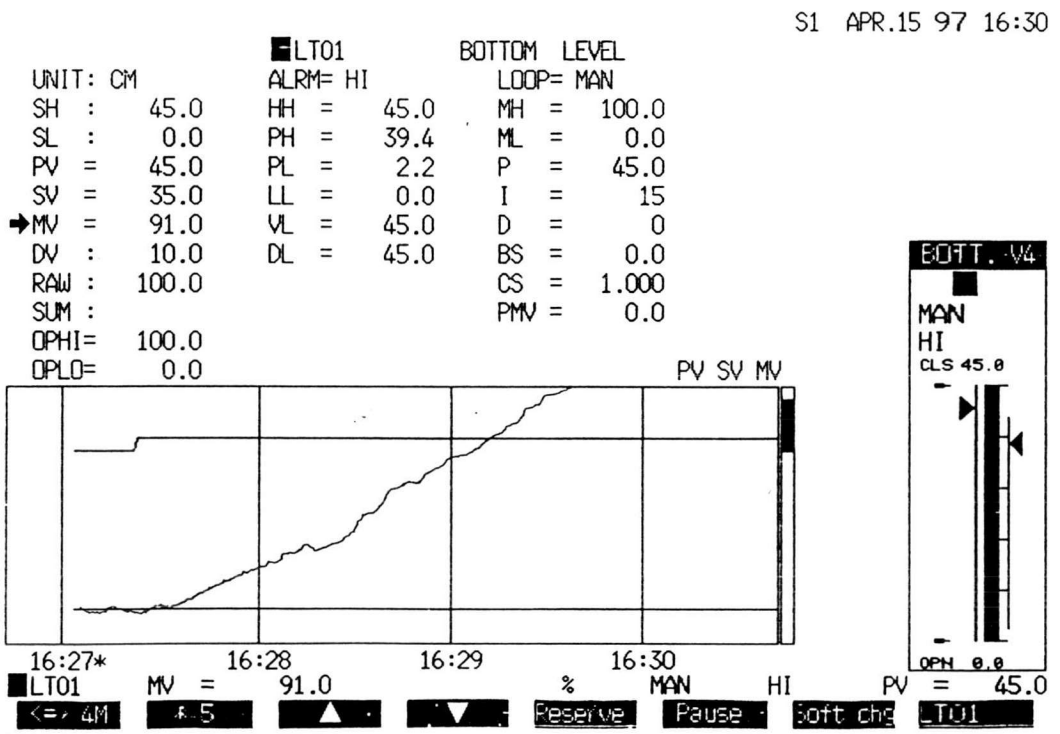
การทดลองหาผลการตอบสนองของระดับที่ก้นหอต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ สามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับที่ก้นหอแบบสเต็พ เพื่อปรับตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุมสายผลิตภัณฑ์ก้น

หอ ที่สถานะคงตัว โดยมีอัตราการไหลของสารป้อน เท่ากับ 180 L/Hr อุณหภูมิก้นหอ เท่ากับ 88.6 °C และอุณหภูมิยอดหอ เท่ากับ 81.2 °C การหาผลการตอบสนองของระดับของของเหลวที่ก้นหอต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พของตัวควบคุมระดับที่ก้นหอกระทำที่สเต็พต่าง ๆ คือ -1% +1% -2% และ +2% โดยให้ตัวแปรปรับเปลี่ยนตัวอื่นคงที่ การปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากกระบวนการความจุของเหลวเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถปรับให้คงที่เองได้ การปรับตัวแปรปรับเปลี่ยนแบบสเต็พที่มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียแก่กระบวนการกลั่นได้ (ของเหลวที่ก้นอาจเกิดการท่วมหรือแห้ง) ผลการตอบสนองของระดับของเหลวที่ก้นหอที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะเส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาโมเดลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของผลิตภัณฑ์ก้นหอที่มีผลต่อระดับของเหลวที่ก้นหอ

ผลการตอบสนองของระดับของของเหลวที่ก้นหอต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอที่เพิ่มขึ้นจาก 143 L/hr เป็น 147 L/Hr (ตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับก้นหอลดลงแบบสเต็พ เท่ากับ -1% โดยค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนลดลงจาก 90% เป็น 89 %) แสดงได้ดังรูปที่ 7.12 ซึ่งเป็นลักษณะของกระบวนการแบบปรับคงที่เองไม่ได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาโดยการหาค่าความชันของเส้นโค้งเพื่อหาค่าเกนของกระบวนการ จะได้ ค่าเกนของกระบวนการได้ เท่ากับ 0.013 (cm)(Hr)/(Sec)(L) และได้ค่าเดดไทม์ เท่ากับ 7.0 วินาที



รูปที่ 7.12 การตอบสนองของระดับของของเหลวที่ก้นหอ เมื่อ ΔMV เท่ากับ -1%



รูปที่ 7.13 การตอบสนองของระดับของของเหลวที่ก้นหอ เมื่อ ΔMV เท่ากับ +1%

รูปที่ 7.13 แสดงผลการตอบสนองของระดับของของเหลวที่ก้นหอต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ลดลงจาก 143 L/hr เป็น 139 L/Hr (ตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับก้นหอเพิ่มขึ้นแบบสเต็พ เท่ากับ 1% โดยค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนพิ่มขึ้นจาก 90% เป็น 91 %) เมื่อนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาโดยการหาค่าความชันของเส้นโค้งเพื่อหาค่าเกนของกระบวนการจะได้ ค่าเกนของกระบวนการได้ เท่ากับ 0.015 (cm)(Hr)/(Sec)(L) และได้ค่าเดดไทม์ เท่ากับ 9.5 วินาที

ตารางที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าโมเดลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอที่มีต่อระดับของเหลวที่ก้นหอ

สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (cm)(Hr)/(Sec.)(L)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-1 %	-0.013	7
-2 %	-0.013	7
1 %	-0.015	9.5
2 %	-0.014	9.4
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	-0.013	7
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	-0.0145	9.45
ค่าเฉลี่ย	-0.1375	8.22

โมเดลความสัมพันธ์ที่ได้จากการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบของตัวแปรปรับเปลี่ยน

$$G^{-}{}_{l_B B} = \frac{-0.013e^{-7S}}{s} \tag{7.33}$$

โมเดลความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำสเต็พบวกของตัวแปรปรับเปลี่ยน คือ

$$G^{+}_{l_B B} = \frac{-0.0145e^{-9.45S}}{s} \tag{7.34}$$

โมเดลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอกับระดับของเหลวที่ก้นหอที่ได้จากการเฉลี่ยค่าโมเดลของการทำสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{l_B B} = \frac{-0.014e^{-8S}}{s} \tag{7.35}$$

ฉ. การตอบสนองของระดับในถังเก็บรีฟลักซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลต

การทดลองหาผลการตอบสนองของระดับที่ยอดหอต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลต สามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับในถังเก็บรีฟลักซ์แบบสเต็พเพื่อปรับตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุมสายผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลต ที่สถานะคงตัวโดยมีอัตราการไหลของสารป้อน เท่ากับ 180 L/Hr อุณหภูมิก้นหอ เท่ากับ 88.6 °C และอุณหภูมิยอดหอ เท่ากับ 81.2 °C การหาผลการตอบสนองของระดับของของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนกระทำที่สเต็พต่าง ๆ คือ -1% +1% -2% และ +2% โดยให้ตัวแปรปรับเปลี่ยนตัวอื่นคงที่ ผลการตอบสนองของระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าโมเดลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลตที่มีผลต่อระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์

ตารางที่ 7.7 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาโมเดลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลตที่มีต่อระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์

สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (cm)(Hr)/(Sec)(L)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-1 %	-0.008	4.7
-2 %	-0.008	4.2
1 %	-0.006	4.7
2 %	-0.006	5.9
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	-0.008	4.45
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	-0.006	5.3
ค่าเฉลี่ย	-0.007	4.875

โมเดลความสัมพันธ์ที่ได้จากการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบของตัวแปรปรับเปลี่ยน

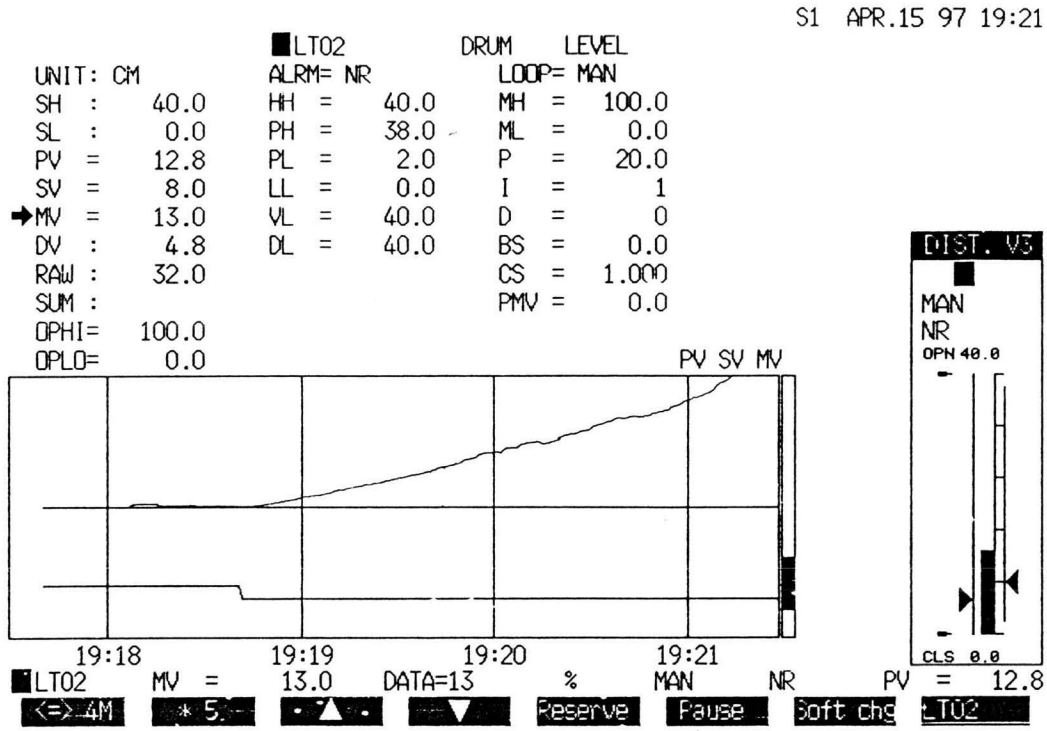
$$G^{-}{}_{I_D D} = \frac{-0.008e^{-4.5S}}{s} \tag{7.35}$$

โมเดลความสัมพันธ์ที่ได้จากการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบของตัวแปรปรับเปลี่ยน

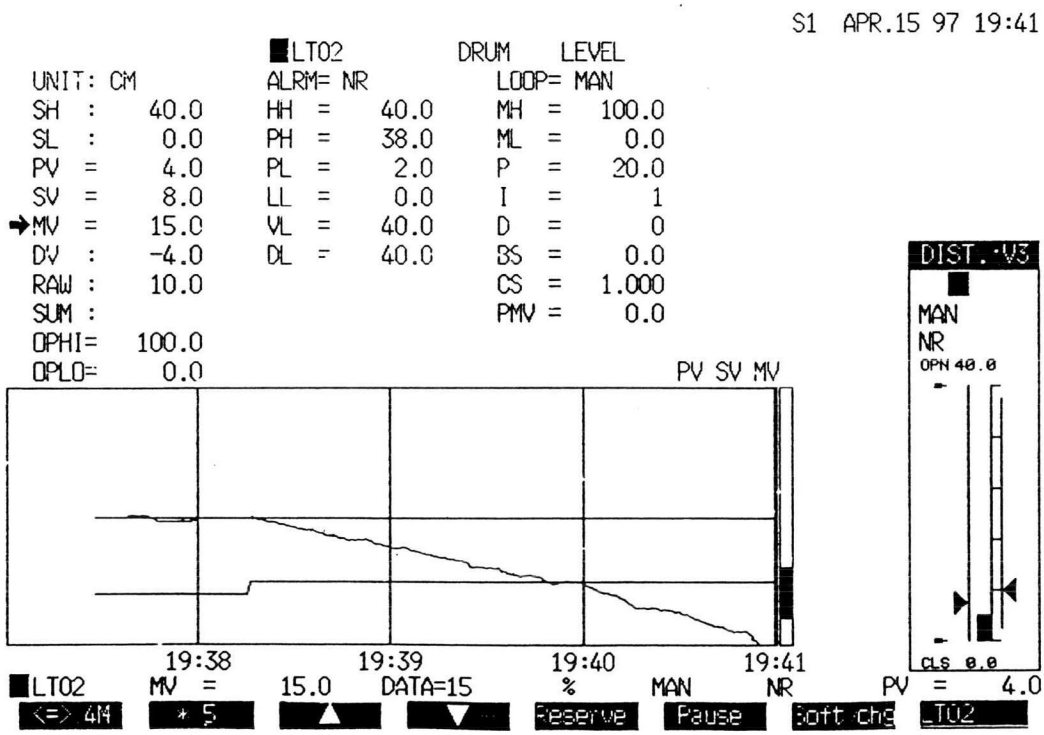
$$G^{+}{}_{I_D D} = \frac{-0.006e^{-5.3S}}{s} \tag{7.36}$$

โมเดลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลตกับระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ที่ได้จากการเฉลี่ยค่าโมเดลของการทำสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{I_D D} = \frac{-0.007e^{-4.9S}}{s} \tag{7.37}$$



รูปที่ 7.14 การตอบสนองของระดับของของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ เมื่อ ΔMV เท่ากับ -1%



รูปที่ 7.15 การตอบสนองของระดับของของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ เมื่อ ΔMV เท่ากับ +1%

รูปที่ 7.14 แสดงผลการตอบสนองของระดับของของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ลดลงจาก 48 L/hr เป็น 45 L/Hr (ตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ลดลงแบบสเต็พ เท่ากับ -1% โดยค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนลดลงจาก 14% เป็น 13 %) ซึ่งผลการตอบสนองของกระบวนการจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นโค้งปฏิกิริยาของระดับที่ก้นหอ เมื่อนำไปวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาโดยการหาค่าความชันของเส้นโค้ง จะได้ ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 0.008 (cm)(Hr)/(Sec)(L) และได้ค่าเดดไทม์ เท่ากับ 4.7

ผลการตอบสนองของระดับของของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่เพิ่มขึ้นจาก 48 L/hr เป็น 51 L/Hr (ตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์เพิ่มขึ้นแบบสเต็พ เท่ากับ +1% โดยค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นจาก 14% เป็น 15 %) แสดงได้ดังรูปที่ 7.15 เมื่อนำไปวิคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาโดยการหาค่าความชันของเส้นโค้ง จะได้ ค่าเกนของกระบวนการ และค่าเดดไทม์ เท่ากับ 0.008 (cm)(Hr)/(Sec)(L) และ 4.2 วินาที ตามลำดับ

ช. การตอบสนองของค่าอุณหภูมิสารควบแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

น้ำหล่อเย็นสำหรับเครื่องควบแน่นถูกใช้เป็นตัวแปรปรับเปลี่ยนเพื่อการรักษาดุลพลังงานของหอกลั่น โดยเป็นตัวดึงพลังงานความร้อนออกจากหอ สารควบแน่นที่ได้จะถูกควบคุมให้อยู่ในรูปของของเหลวอิ่มตัวหรือของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอิ่มตัวเล็กน้อย การ

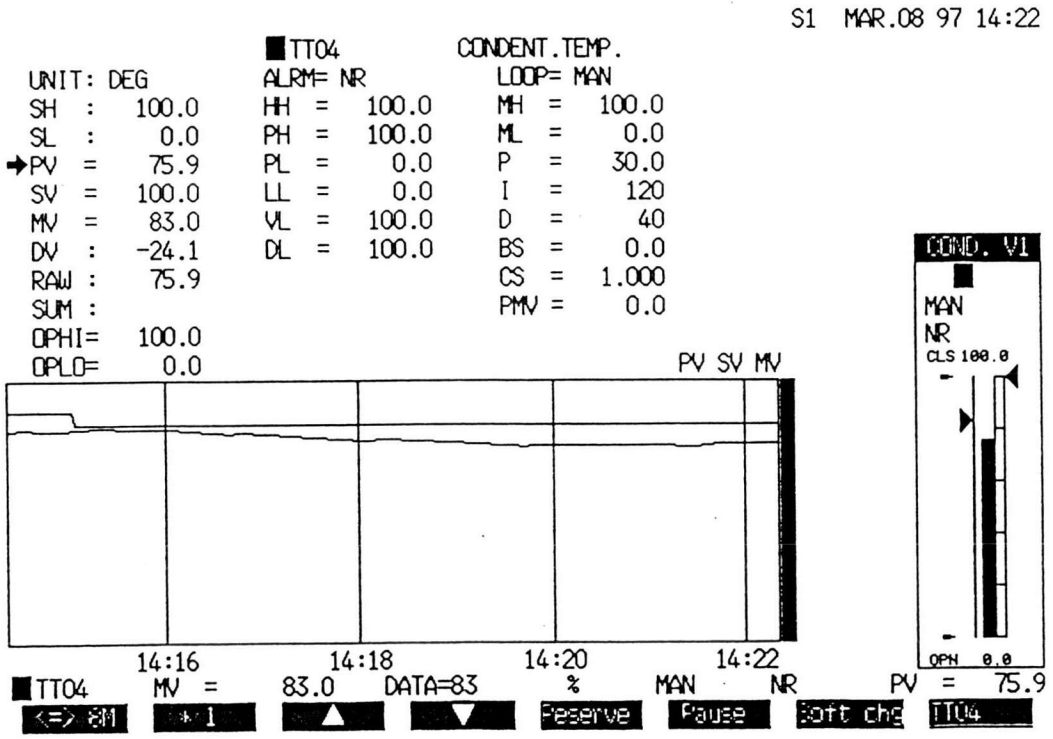
หาผลการตอบสนองของอุณหภูมิสารควบแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อทำการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา สำหรับใช้ในการหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของน้ำหล่อเย็นที่มีผลต่ออุณหภูมิสารควบแน่น การหาผลการตอบสนองของอุณหภูมิสารควบแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำได้โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิสารควบแน่นที่สเต็พต่าง ๆ คือ -5% +5% -8% +8% -10% และ +10%

รูปที่ 7.16 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิสารควบแน่นเมื่อค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิสารควบแน่นลดลงจาก 88% เป็น 83% (สเต็พ เท่ากับ -5%) อุณหภูมิสารควบแน่นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 81.2 °C อุณหภูมิยอดหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 75.9 °C เมื่อทำการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 1.06 (°C)/(%MV) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 63 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 110 วินาที

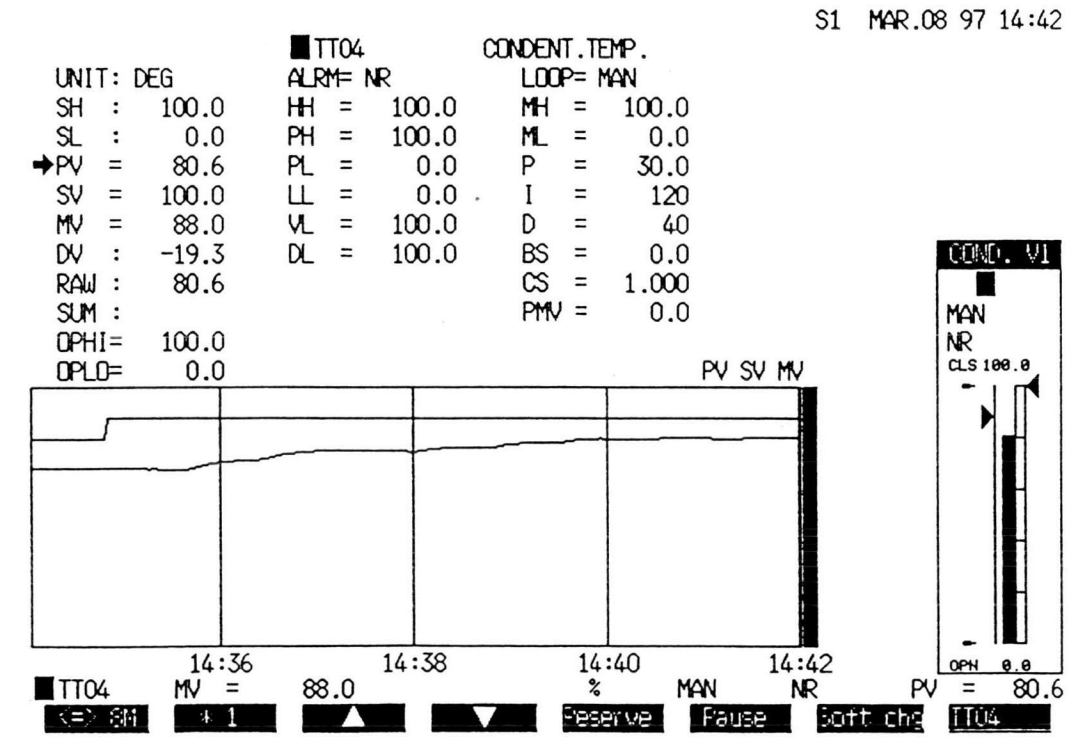
รูปที่ 7.17 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของค่าอุณหภูมิสารควบแน่นเมื่อค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนของตัวควบคุมอุณหภูมิสารควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 83% เป็น 88% (สเต็พ เท่ากับ -5%) อุณหภูมิสารควบแน่นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 76.0 °C อุณหภูมิยอดหอสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 80.6 °C เมื่อทำการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยา จะได้ ค่าเกนของกระบวนการเท่ากับ 0.92 (°C)/(%MV) ค่าเดดไทม์มีค่าเท่ากับ 53 วินาที และค่าคงที่ของเวลามีค่าเท่ากับ 155 วินาที

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พลบ คือ

$$G^{-}{}_{T_C W}(s) = \frac{1.058e^{-49s}}{128s+1} \qquad (7.38)$$



รูปที่ 7.16 การตอบสนองของอุณหภูมิสารควบแน่น เมื่อ ΔMV เท่ากับ -5 %



รูปที่ 7.17 การตอบสนองของอุณหภูมิสารควบแน่น เมื่อ ΔMV เท่ากับ +5 %

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเฉลี่ยของการทำสเต็พบวก คือ

$$G^{+}_{T_C\,W}(s) = \frac{1.003e^{-46S}}{138s+1} \qquad (7.39)$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยค่าของการทำสเต็พลบและสเต็พบวก คือ

$$G_{T_C\,W}(s) = \frac{1.031e^{-48S}}{133s+1} \qquad (7.40)$$

ตารางที่ 7.8 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาเพื่อหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับเปลี่ยนของน้ำหล่อเย็นที่ให้เครื่องควบแน่นที่มีผลต่ออุณหภูมิสารควบแน่น

สเต็พตัวแปรปรับเปลี่ยน (%ΔMV)	ค่าเกนกระบวนการ (°C)/(%MV)	ค่าคงที่ของเวลา (Sec.)	ค่าเดดไทม์ (Sec.)
-5 %	1.060	110	63
-8 %	0.975	120	50
-10 %	1.140	155	35
5 %	0.920	155	53
8 %	0.988	154	50
10 %	1.100	106	35
ค่าเฉลี่ยของสเต็พลบ	1.058	128	49
ค่าเฉลี่ยของสเต็พบวก	1.003	138	46
ค่าเฉลี่ย	1.031	133	48

7.4 การสร้างแบบจำลองของหอกลั่น

การสร้างแบบจำลองของหอกลั่นเพื่อเลียนแบบกระบวนการกลั่นในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองของหอกลั่นด้วยโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันโดยใช้โปรแกรมแม็ทแล็บ เพื่อเลียนแบบกระบวนการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนหรือค่าตัวแปรอินพุท เมื่อลูพควบคุมเปิด การสร้างแบบจำลองของหอกลั่นด้วยโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวน โดยการใช้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่หาได้จากการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการจริงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุทแบบสเต็พของการเพิ่มและแบบสเต็พของการลด กับการใช้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุทแบบสเต็พของการเพิ่มและแบบสเต็พของการลด นอกจากนี้ ยังสร้างแบบจำลองของหอกลั่นโดยใช้โปรแกรม Apen Plus โดยการกำหนดค่าข้อมูลที่จำเป็นของโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่น พร้อมทั้งค่าตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ ของกระบวนการกลั่นที่สถานะคงตัว เพื่อทำการหาประสิทธิภาพของเทรย์ และเปรียบเทียบโปรไฟล์ของอุณหภูมิที่ได้จากการสร้างแบบจำลองกับโปรไฟล์ของอุณหภูมิที่ได้จากกระบวนการกลั่นจริง

7.4.1 การสร้างแบบจำลองของหอกลั่นด้วยโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันโดยใช้โปรแกรมแม็ทแล็บ

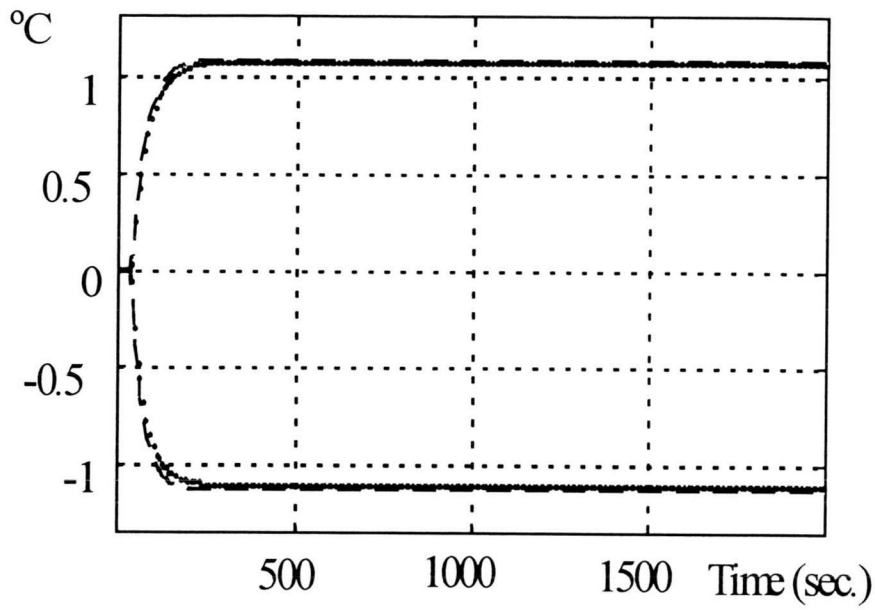
การตอบสนองของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พเพิ่มขึ้นและการลดลงของตัวแปรอินพุทนั้นเป็นลักษณะแบบไม่สมมาตร ซึ่งสามารถหาโมเดลแบบทรานส์

เฟอร์ฟังก์ชันได้ 2 โมเดล นั้นคือ โมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเพิ่มค่าตัวแปรอินพุทแบบสเต็พและโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการลดค่าตัวแปรอินพุทแบบสเต็พ ในที่นี้หอกลั่นจะสมมุติในเป็นกระบวนการแบบสมมาตร โดยการใช้โมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเฉลี่ยในการอธิบายลักษณะการตอบสนองของตัวแปรกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของตัวแปรอินพุทเมื่อลูพเปิด ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากการเฉลี่ยกับทรานส์เฟอร์ฟังชันที่ได้จากการทำสเต็พเพิ่มและการทำสเต็พลด โดยใช้โปรแกรม แมทแล็บ ช่วยในการเลียนแบบกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 7.18 ถึงรูปที่ 7.25 เป็นการแสดงผลการเลียนแบบการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิยอดหอและอุณหภูมิก้นหอ ต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรอินพุทซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของรีฟลักซ์ และอัตราการให้ความร้อนของไอน้ำ เมื่อลูพควบคุมเปิดของกระบวนการที่มีลักษณะแบบไม่สมมาตร (แทนด้วยเส้น ------) รวมทั้งการแสดงผลการเลียนแบบการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของค่าตัวแปรอินพุท เมื่อลูพควบคุมเปิดของโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากการเฉลี่ยที่สมมุติให้เป็นระบบแบบสมมาตร (แทนด้วยเส้น .....)

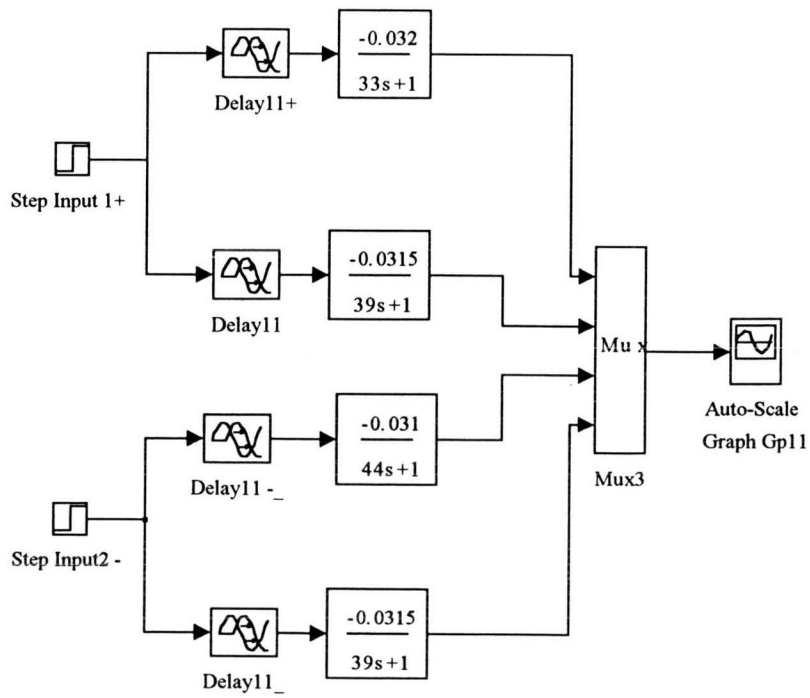
รูปที่ 7.18 การแสดงผลการเลียนแบบการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอกลั่น ต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของรีฟลักซ์ เมื่อลูพควบคุมเปิดของกระบวนการที่มีลักษณะแบบไม่สมมาตรแทนด้วยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากการทำสเต็พเพิ่มและการทำสเต็พลด และการแสดงผลการเลียนแบบการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอกลั่นต่อการ

เปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของรีฟลักซ์ เมื่อลูพควบคุมเปิดของโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากการเฉลี่ยที่สมมุติให้เป็นระบบแบบ สมมาตร ซึ่งสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 7.19

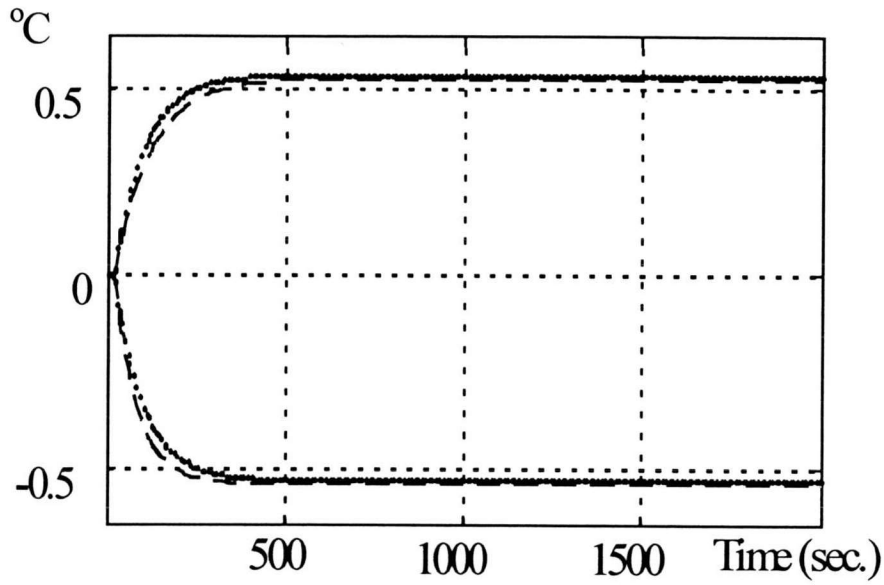
รูปที่ 7.19 เป็นการแสดงบล็อกไดอะแกรม ของซิมูลิงค์ในโปรแกรมแม็ทแล็บเพื่อการแสดงผลการเลียนแบบการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอกลั่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พของอัตราการไหลของรีฟลักซ์ เมื่อลูพควบคุมเปิดของกระบวนการสมมาตรและกระบวนการไม่สมมาตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งการตอบสนองของทั้งสองไม่แตกต่างกันนัก แสดงว่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากการเฉลี่ยสามารถนำมาใช้เป็นโมเดลของการตอบสนองของค่าอุณหภูมิยอดหอต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของรีฟลักซ์ได้ และเช่นเดียวกันทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จากการเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุทที่มีผลต่อตัวแปรกระบวนการอื่น ๆ ได้แก่ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนของไอน้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีฟลักซ์ที่มีผลต่ออุณหภูมิก้นหอ และทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงอัตราให้ความร้อนของไอน้ำที่มีผลต่ออุณหภูมิยอดหอ ก็สามารถใช้แทนโมเดลของกระบวนการได้ ดังแสดงผลการเลียนแบบผลการตอบสนองของค่าตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ ในรูปที่ 7.20 รูปที่ 7.22 และรูปที่ 7.24



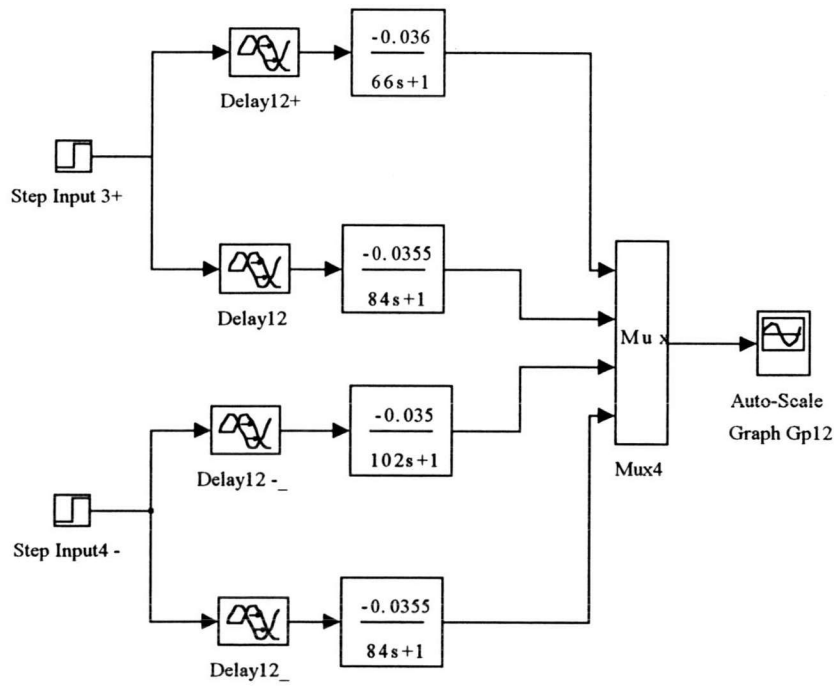
รูปที่ 7.18 การเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอต่อสเต็พของรีฟลักซ์



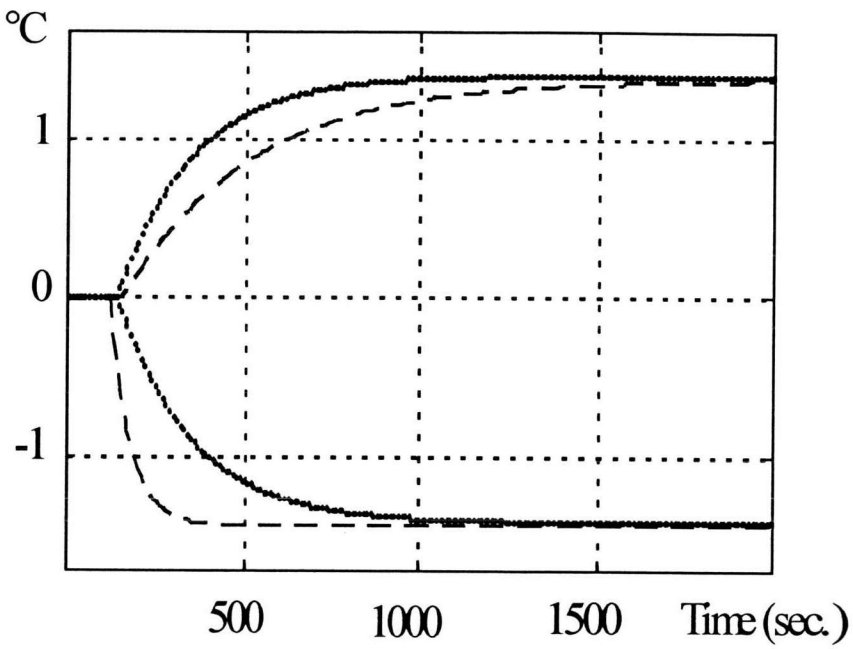
รูปที่ 7.19 บล็อกไดอะแกรมการเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอต่อสเต็พของรีฟลักซ์



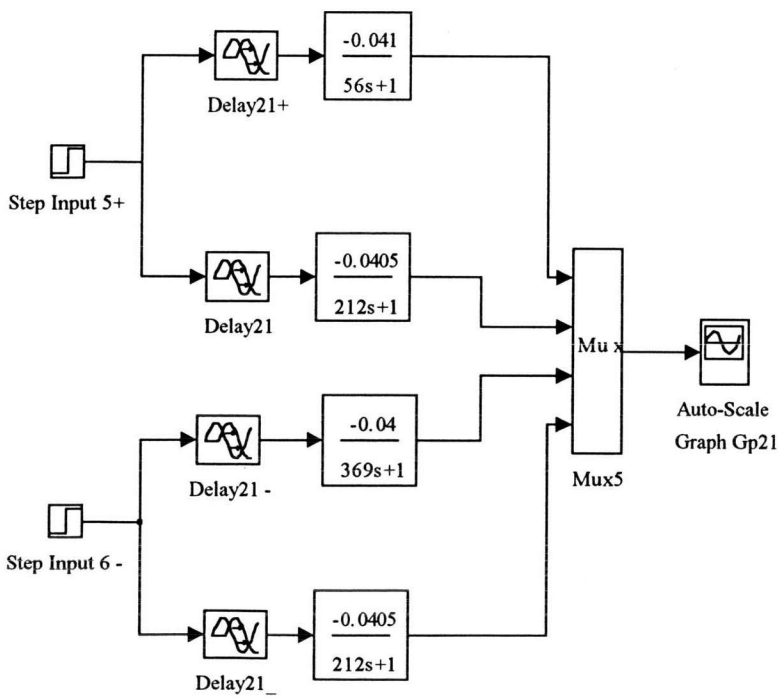
รูปที่ 7.20 การเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอต่อสเต็พของไอน้ำ



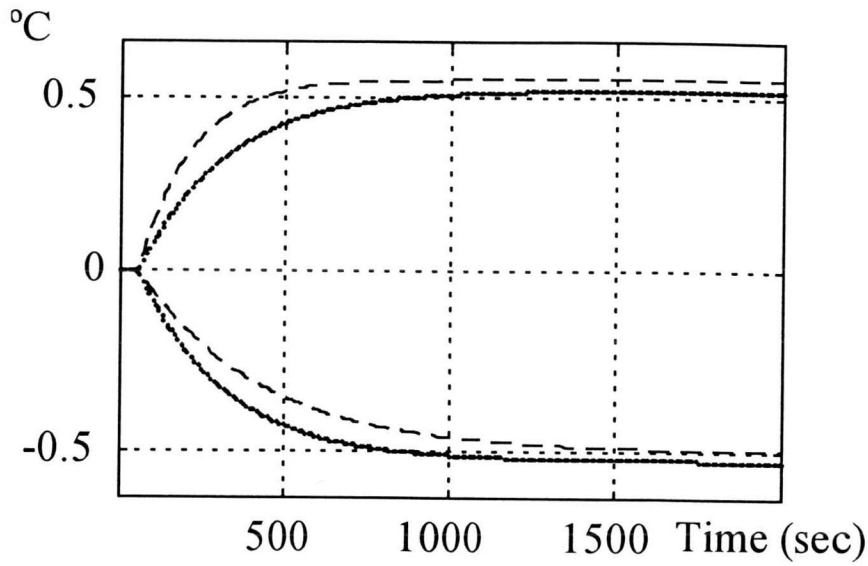
รูปที่ 7.21 บล็อกไดอะแกรมการเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิยอดหอต่อสเต็พของไอน้ำ



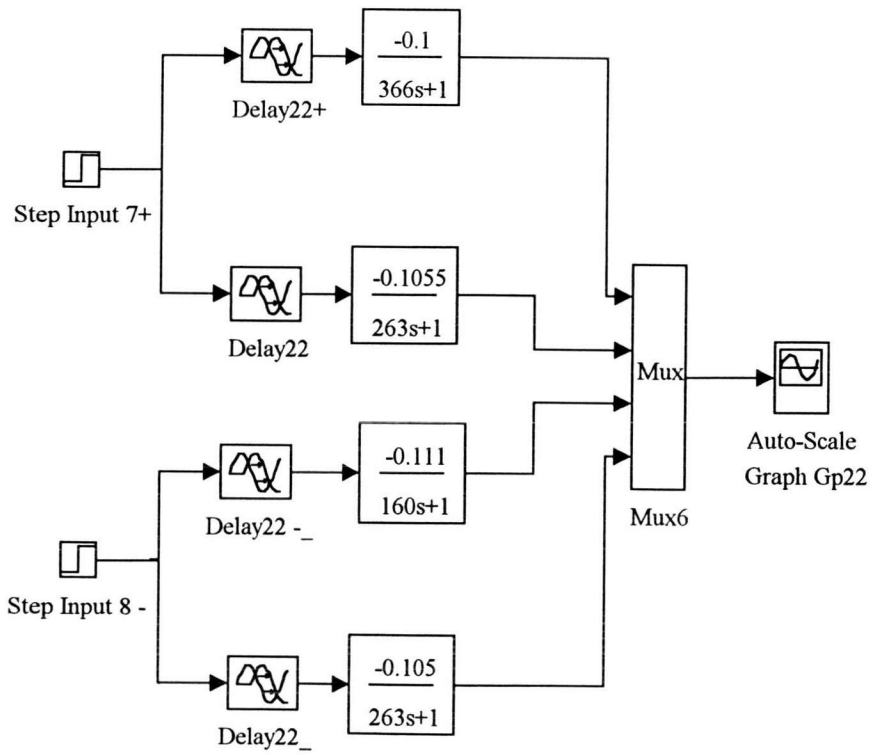
รูปที่ 7.22 การเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของรีฟลักซ์



รูปที่ 7.23 บล็อกไดอะแกรมการเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของรีฟลักซ์



รูปที่ 7.24 การเลียนแบบผลการตอบสนองของอุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของไอน้ำ



รูปที่ 7.25 บล็อคไดอะแกรมการเลียนแบบผลการตอบสนองของ
อุณหภูมิก้นหอต่อสเต็พของไอน้ำ

7.4.2 การการสร้างแบบจำลองของหอกลั่นโดยใช้ Aspen Plus

การเลียนแบบกระบวนการกลั่นของโรงงานนำร่องหอกลั่นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Apen Plus โดยการกำหนดค่าข้อมูลที่จำเป็นของโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่น พร้อมทั้งค่าตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ ของกระบวนการกลั่นที่สถานะคงตัว เพื่อทำการหาประสิทธิภาพของเทรย์ ซึ่งสามารถแสดงไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 7.26 หอกลั่นประกอบด้วยเทรย์ 17 เทรย์ รวมเครื่องควบแน่นและหม้อต้มซ้ำด้วย โดยกำหนดให้เครื่องควบแน่นเป็นเทรย์ที่ 1 และหม้อต้มซ้ำเป็นเทรย์ที่ 17

ข้อมูลของโรงงานนำร่องหอกลั่นที่สถานะคงตัวสามารถแสดงได้ดังนี้

1. สารป้อน

- อัตราการป้อนสารผสมเอทธานอล 30 % กับ น้ำ 70 % โดยน้ำหนัก เท่ากับ 165 Kg/Hr
- อุณหภูมิของสารป้อนก่อนเข้าหอกลั่นที่ตำแหน่งเทรย์ป้อนที่ 13 เท่ากับ 84 °C
- ความหนาแน่นของสารป้อนที่อุณหภูมิ 30 °C เท่ากับ 0.917 Kg/L

2. รีฟลักซ์

- อัตราการไหลของรีฟลักซ์ เท่ากับ 23 Kg/Hr
- อุณหภูมิของรีฟลักซ์ก่อนกลับเข้าหอกลั่นโดยประมาณ เท่ากับ 55 °C
- ความหนาแน่นของรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 55 °C เท่ากับ 0.917 Kg/L

3. ผลิตภัณฑ์

-ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลต เท่ากับ 86 % โดยน้ำหนักของเอทธานอล

-ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ก้นหอกลั่น เท่ากับ 14 % โดยน้ำหนักของเอทธานอล

- อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลต เท่ากับ 37 Kg/Hr

- อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอกลั่น เท่ากับ 128 Kg/Hr

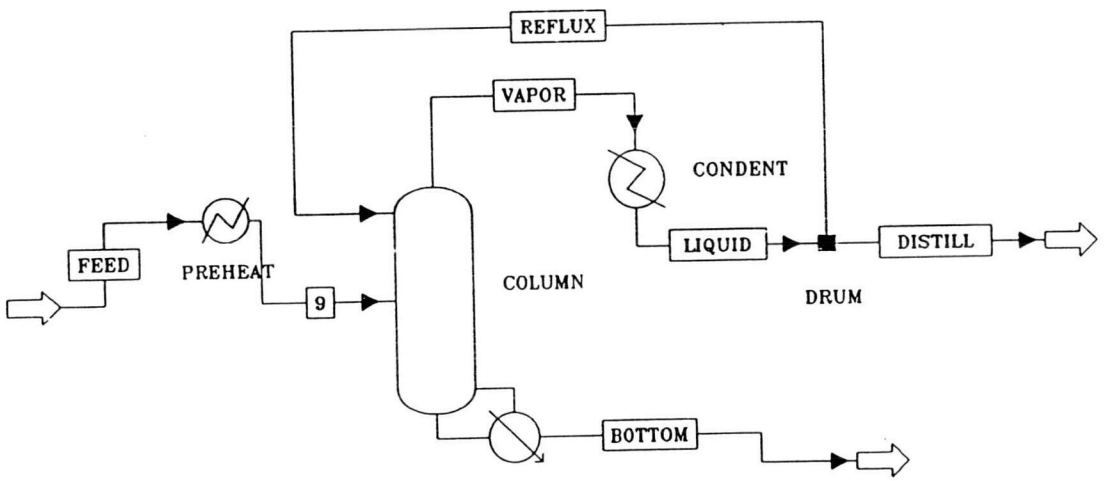
- ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลตที่อุณหภูมิ 55 °C เท่ากับ 0.768 Kg/L

- ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ก้นหอที่อุณหภูมิ 88.6 °C เท่ากับ 0.895 Kg/L

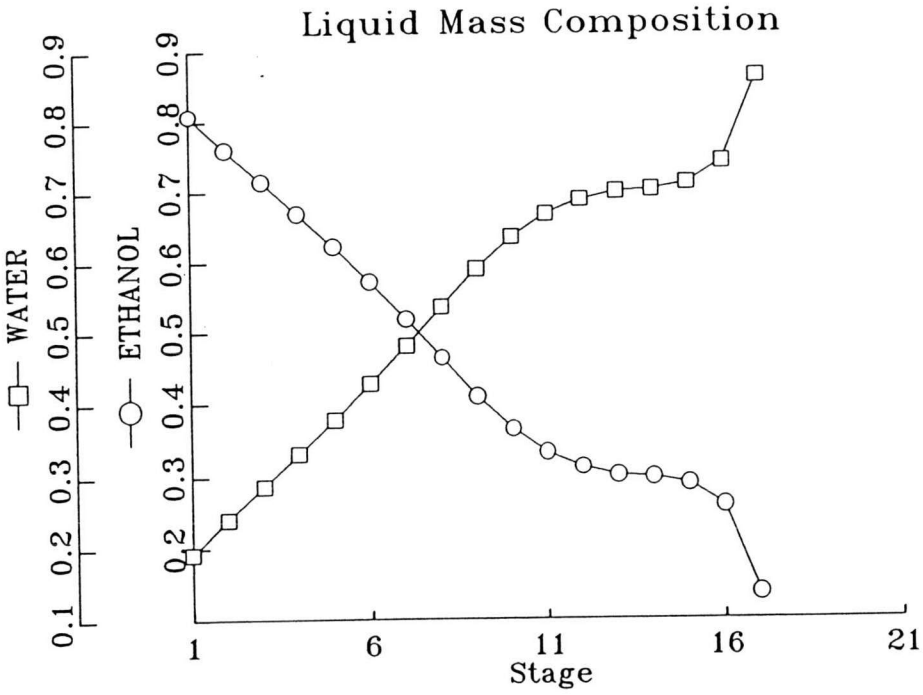
4. อุณหภูมิยอดหอกลั่นที่ตำแหน่งเทรย์ที่ 6 เท่ากับ 81.2 °C

5. อุณหภูมิก้นหอกลั่นที่ตำแหน่งฐานหอ (หม้อต้มซ้ำ) เท่ากับ 88.6 °C

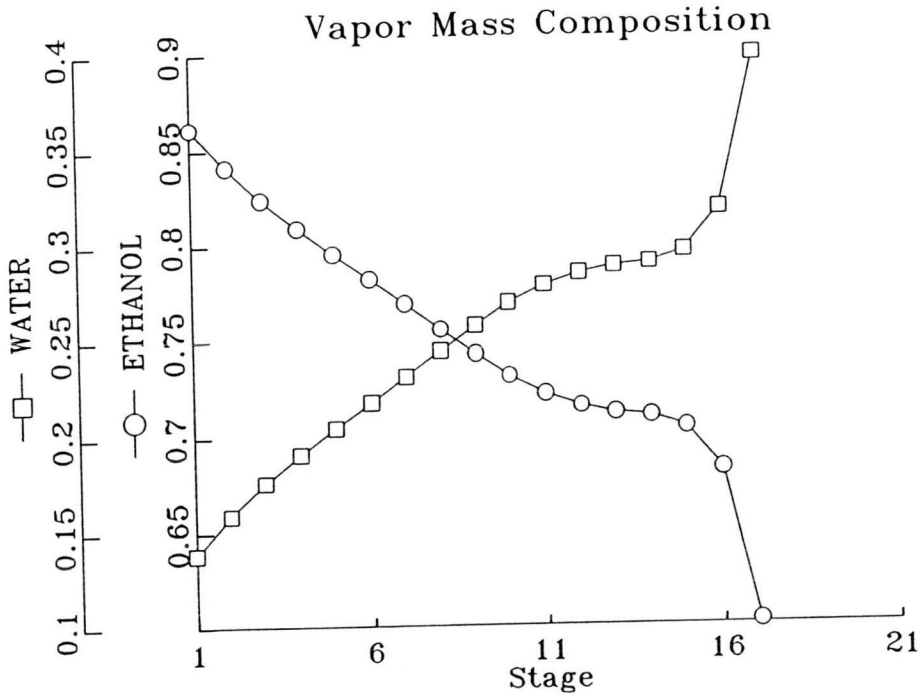
ผลการเลียนแบบกระบวนการกลั่นของโรงงานนำร่องหอกลั่นด้วยโปรแกรม Apen Plus สามารถหาประสิทธิภาพของเมอร์ฟีร์ (Murphree Efficiency) ได้เท่ากับ 0.85 พร้อมทั้งสามารถแสดงผลการเลียนแบบกระบวนการกลั่นของโรงงานนำร่องหอกลั่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.27ถึงรูปที่ 7.29 (ข้อมูลการเลียนแบบกระบวนการกลั่นแสดงในภาคผนวก ค.)



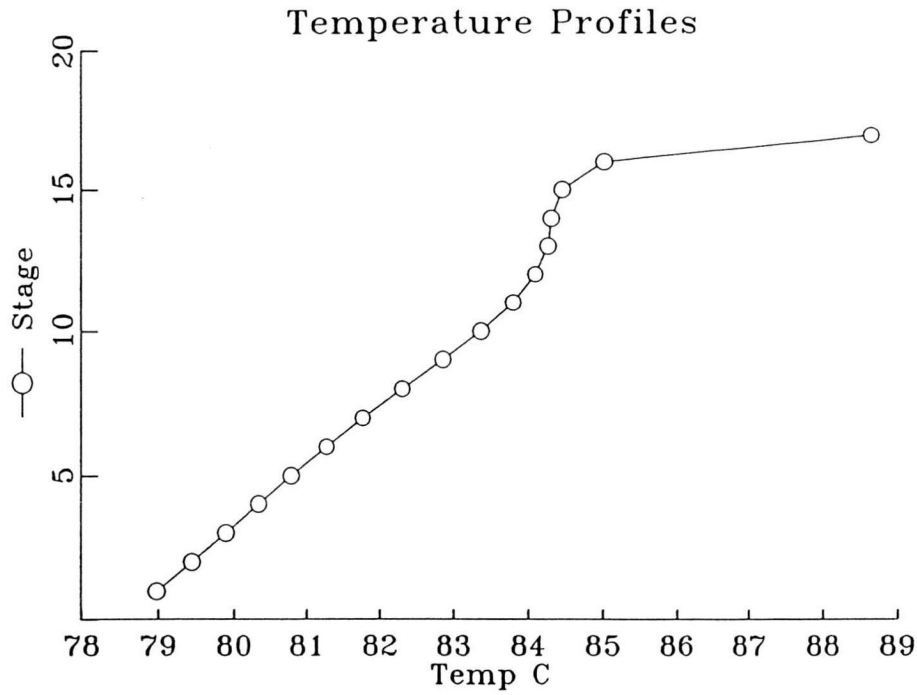
รูปที่ 7.26 ไดอะแกรมการเลียนกระบวนการของโรงงานนำร่องหอกลั่นด้วยโปรแกรม Apen Plus



รูปที่ 7.27 โปรไฟล์แสดงส่วนประกอบโดยน้ำหนักในของเหลวในแต่ละเทรย์



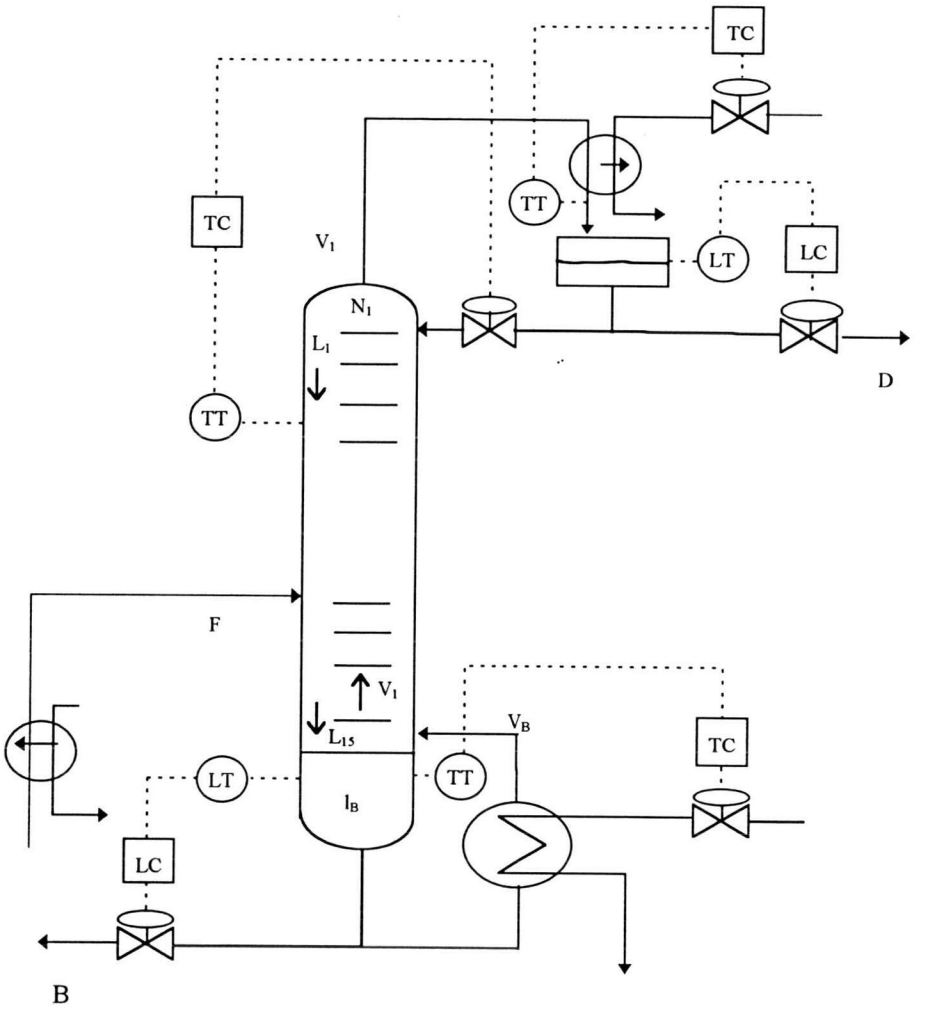
รูปที่ 7.28 โปรไฟล์แสดงส่วนประกอบโดยน้ำหนักในไอในแต่ละเทรย์



รูปที่ 7.29 โปรไฟล์แสดงอุณหภูมิของหอกลั่นในแต่ละเทรย์

7.5 การควบคุมโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่น

ในการควบคุมกระบวนการกลั่นของโรงงานนำร่องหอกลั่นนี้ ประกอบด้วยลูพควบคุม 5 ลูพ ได้แก่ อุณหภูมิยอดหอถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลของรีฟลักซ์ อุณหภูมิก้นหอถูกควบคุมด้วยอัตราการให้ความร้อนของไอน้ำแก่หม้อต้มซ้ำ ระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ดิสทิลเลต ระดับของเหลวที่ฐานหอถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ และอุณหภูมิสารควบแน่นถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 7.30 ซึ่งจะแสดงผลการควบคุมต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 7.30 ระบบการควบคุมหอกลั่น

7.5.1 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

อัลกอริธึมการควบคุมที่ใช้ในโรงงานนำร่องเพื่อการกลั่นนี้เป็นแบบพีไอดี พารามิเตอร์ของตัวควบคุม ได้แก่ แบนด์สัดส่วน ค่าช่วงเวลาอินทิกรัล และค่าเวลาอนุพันธ์ สามารถหาได้

จากวิธีของซิเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nicoles Method) โดยการหาจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเมื่อลูพเปิด และการหาผลการแกว่งของระบบเมื่อลูพปิด แล้วทำการปรับละเอียดอีกครั้ง

ก. ค่าพีไอดีของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเมื่อลูพเปิด

จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเดดไทม์ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(s)=\frac{K_P e^{-\theta s}}{1+\tau s}$$

ค่าพีไอดีหาได้จาก

$$K_C = 1.2/\theta R$$

$$I = 2.0\theta$$

$$D = 0.5\theta$$

เมื่อ R = ความชันของเส้นโค้งต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอินพุท

$$=\left(\frac{\Delta PV}{\tau}\right)\Big/\Delta MV$$

นั้นคือ $R=\frac{K_P}{\tau}$ และ $P=\frac{100}{K_c}$

ข. ค่าพีไอดีของการหาผลการแกว่งของระบบเมื่อลูพปิด

การปรับเครื่องควบคุมโดยวิธีการหาผลการแกว่งของระบบเมื่อลูพควบคุมปิดต่างจากวิธีการหาจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเมื่อลูพควบคุมเปิด เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเปิดลูพควบคุมเพื่อทำงานแบบแมนนวล ทำให้สามารถทดสอบและปรับเครื่องควบคุมในกระบวนการได้โดยตรง การปรับเครื่องคสบคุมโดยวิธีหาผลการแกว่งของระบบปิดมีขั้นตอน ดังนี้

1. ปรับกระบวนการให้ระบบอยู่ในสถานะคงตัวที่จุดปฏิบัติการ

2. ควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบพีเพียงอย่างเดียว (โดยตั้งค่า ไอ เท่ากับ 9999 และดี เท่ากับ 0)

3. เปลี่ยนเซ็ทพอยท์และสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรกระบวนการ แล้วปรับค่าพี จนกว่าค่าตัวแปรกระบวนการแกว่งด้วยขนาดและความถี่คงที่

4. บันทึกค่าพีของตัวควบคุมที่ทำให้ค่าตัวแปรกระบวนการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่ และวัดค่าคาบเวลาของการแกว่งนั้น

5. คำนวณค่าพีไอดีจากสมการของซิเกลอร์-นิโคล ดังนี้

$$P = 1.7\, P_{cr}$$

$$I = 0.5 T_{cr}$$

$$D = 0.125 T_{cr}$$

เมื่อ P_{cr} คือ ค่าพีของตัวควบคุมที่ทำให้ค่าตัวแปรกระบวนการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่ และ T_{cr} คือ คาบเวลาของการแกว่งที่ความถี่และขนาดคงที่ในหน่วยวินาที

ตัวอย่าง การหาค่าพีไอดีจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอ ซึ่งค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ได้แก่

$$G_{T_B L}(s) = \frac{0.101 e^{-51s}}{263s+1}$$

$$P = \frac{100K\theta}{1.2\tau}$$

$$= \frac{(100)(0.1055)(51)}{(1.2)(263)}$$

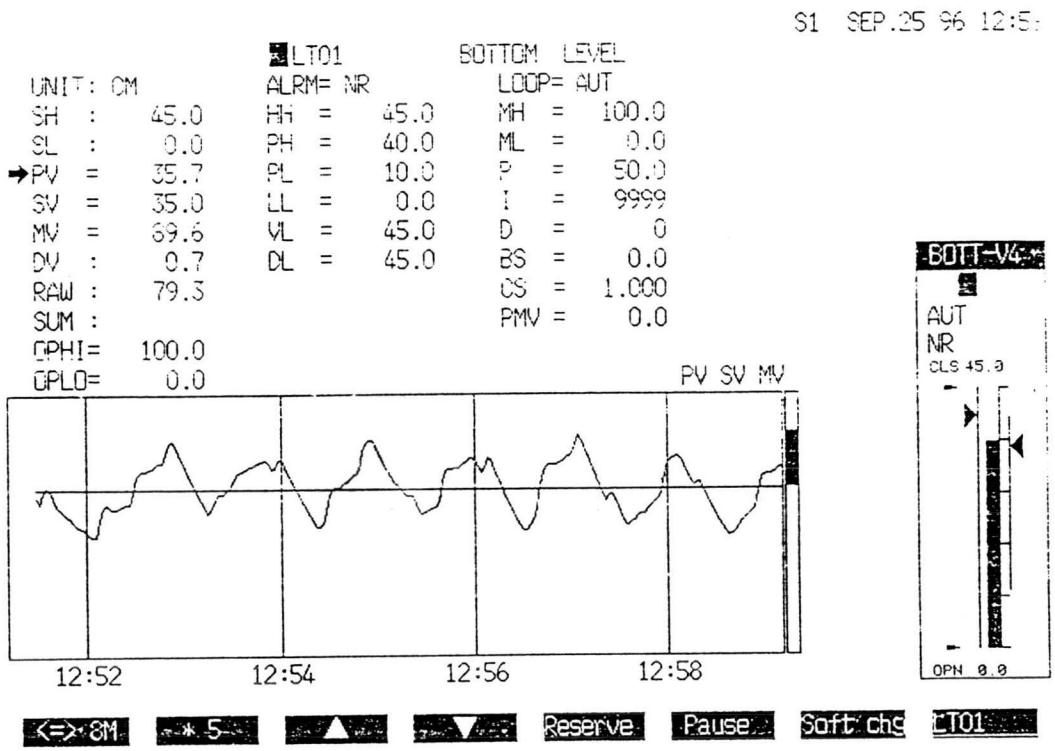
$$= 1.7$$

I = 105

D = 25

เมื่อทำการปรับละเอียดโดยการทดลองควบคุมกระบวนการจริงจะได้ค่า พี เท่ากับ 7 ไอ เท่ากับ 80 และ ดี เท่ากับ 25

ตัวอย่าง การหาค่าพีไอดีจากการหาผลการแกว่งของระบบเมื่อลูพปิด ของตัวควบคุมระดับของเหลวที่ก้นหอ ดังแสดงในรูปที่ 7.31 ค่าพีที่ทำให้ค่าระดับของเหลวที่ก้นหอเกิดการแกว่งที่ความถี่และขนาดคงที่มีค่า เท่ากับ 50 และสามารถวัดคาบเวลาของการแกว่งได้ เท่ากับ 71 วินาที ดังนั้น ค่าพีไอดีของตัวควบคุม ได้แก่



รูปที่ 7.31 การแกว่งที่ความถี่และขนาดคงที่ของระดับของเหลวที่ก้นหอ

$$P = (1.7)(50)$$

$$= 85$$

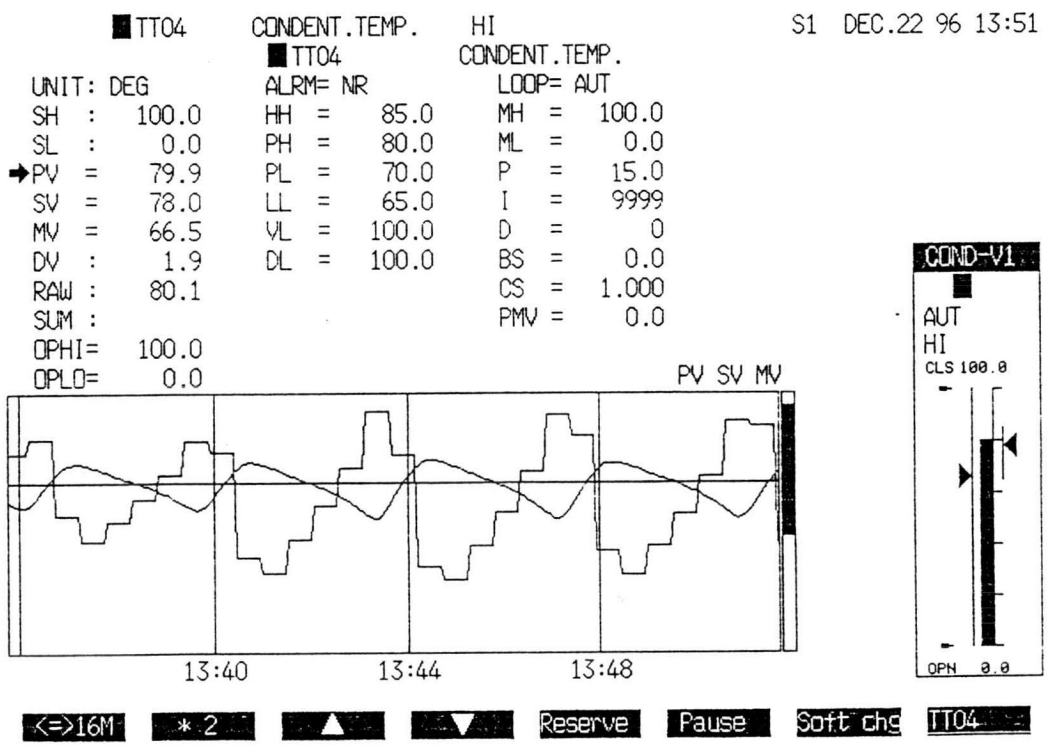
$$I = (0.5)(71)$$

$$= 35.5$$

$$D = (0.125)(71)$$

$$= 8.875$$

เมื่อทำการปรับละเอียดโดยการทดลองการควบคุมของตัวควบคุมระดับของเหลวที่ก้นหอ จะได้ค่าพี เท่ากับ 70 ค่าดี เท่ากับ 35 และค่าไอ เท่ากับ 9



รูปที่ 7.32 การแกว่งที่ความถี่และขนาดคงที่ของอุณหภูมิของสารควบแน่น

พารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

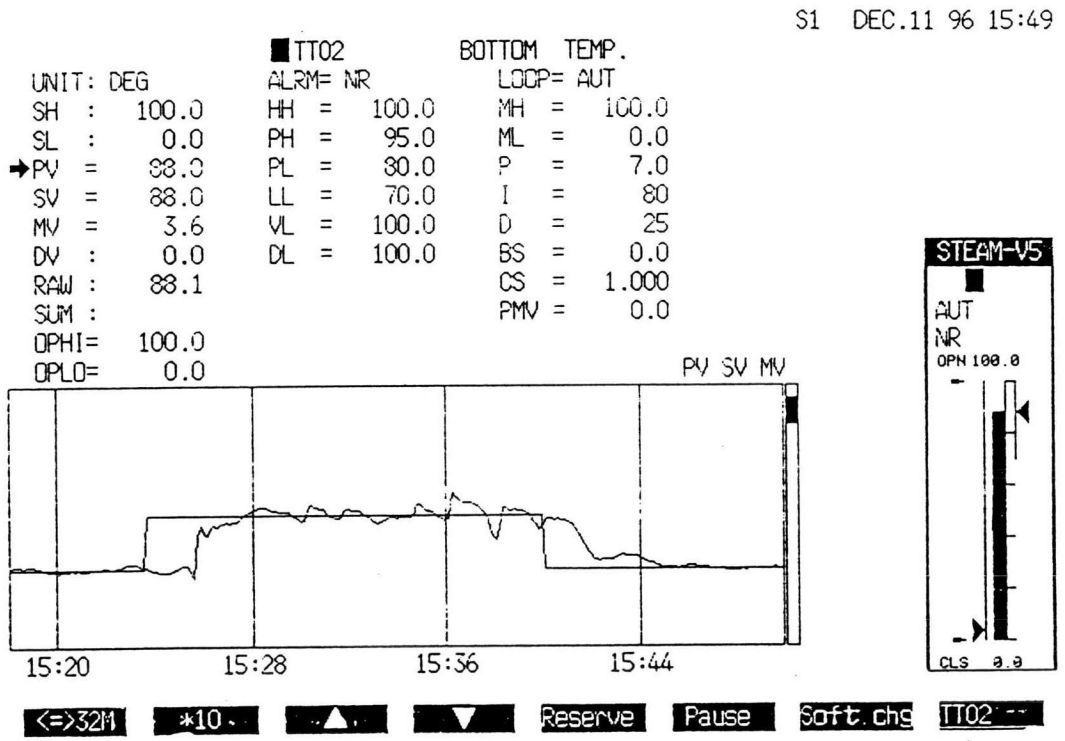
ตัวควบคุม	แบนด์สัดส่วน	ค่าเวลาอินทิกรัล (วินาที)	ค่าเวลาอนุพันธ์ (วินาที)	แอกชัน (ตรง/ผกผัน)
อุณหภูมิก้นหอ	7	80	25	ตรง
อุณหภูมิยอดหอ	80	60	15	ผกผัน
ระดับของเหลวที่ก้นหอ	70	35	9	ผกผัน
ระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์	45	15	0	ตรง
อุณหภูมิสารควบแน่น	26.5	120	30	ผกผัน

7.5.2 การทดสอบตัวควบคุม

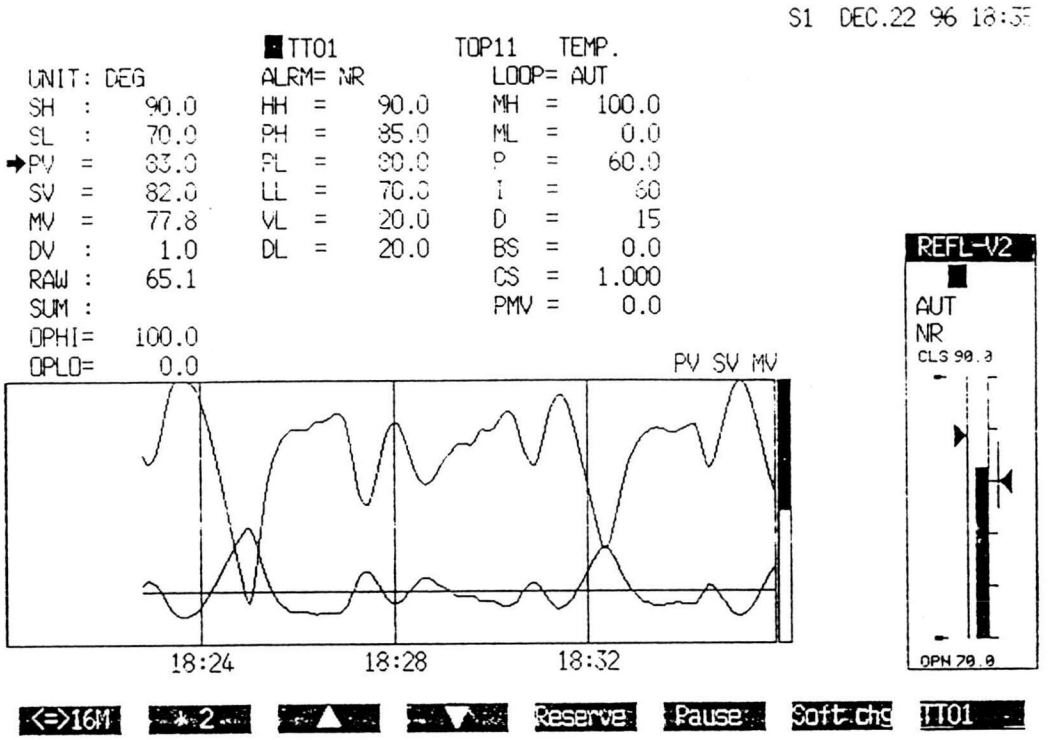
ผลการทดสอบการควบคุมของตัวควบคุมต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

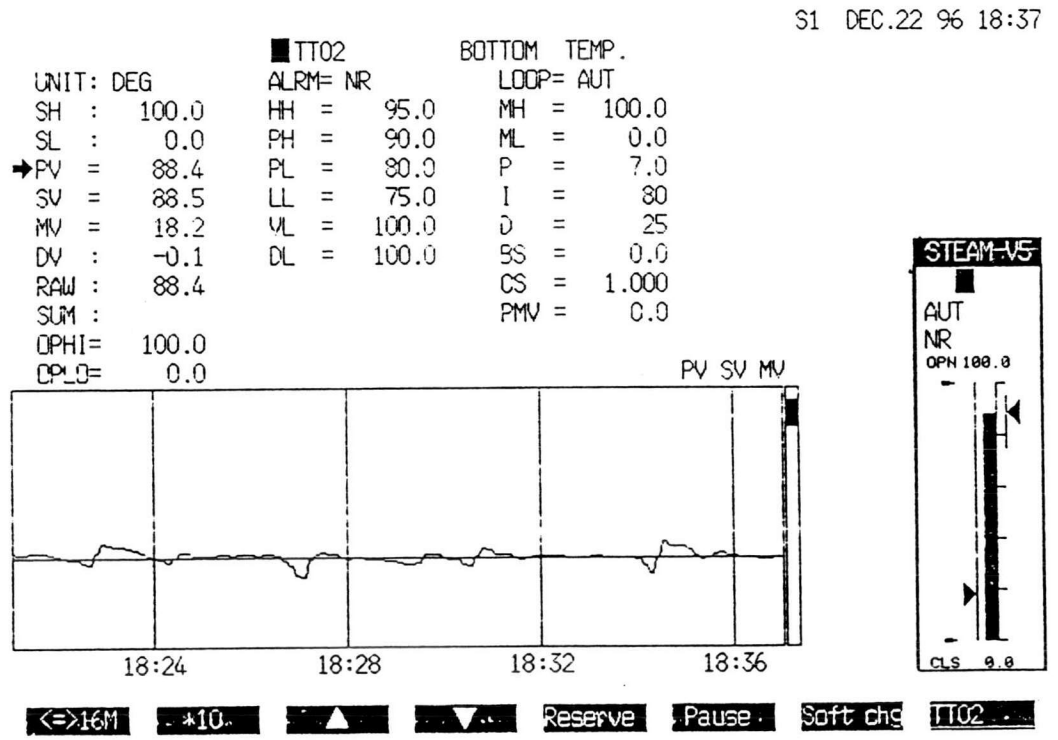
การทดสอบตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอกลั่นโดยการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์แบบสเต็พสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.33 เป็นการควบคุมของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอ เมื่อเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พจากที่อุณหภูมิเท่ากับ 88 °C เป็นอุณหภูมิเท่ากับ 90 °C และการเปลี่ยนแปลงจากที่อุณหภูมิเท่ากับ 90 °C เป็นอุณหภูมิเท่ากับ 88 °C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิยอดหอที่เทรย์

11 เท่ากับ 81.2 °C ผลที่ได้ คือ ระบบสามารถปรับเข้าสถานะคงตัวที่เซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ และเมื่อมีการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยอดหอ นั่นคือ มีตัวรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของรีฟลักซ์ ตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอสามารถปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนเพื่อรักษาอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ให้คงเดิมได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.34 การควบคุมของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอกลั่น (รูปล่าง) เมื่อกระบวนการมีการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิยอดหอกลั่น (รูปบน) เซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอมีค่าเท่ากับ 88.5 °C



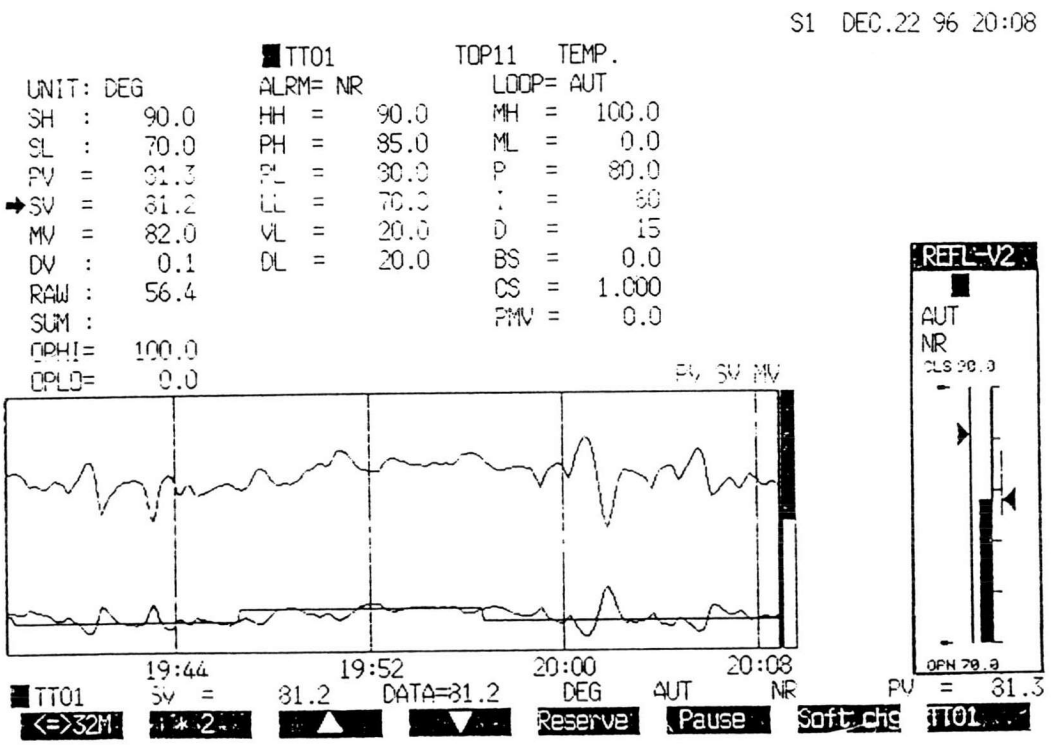
รูปที่ 7.33 การควบคุมอุณหภูมิก้นหอกลั่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์



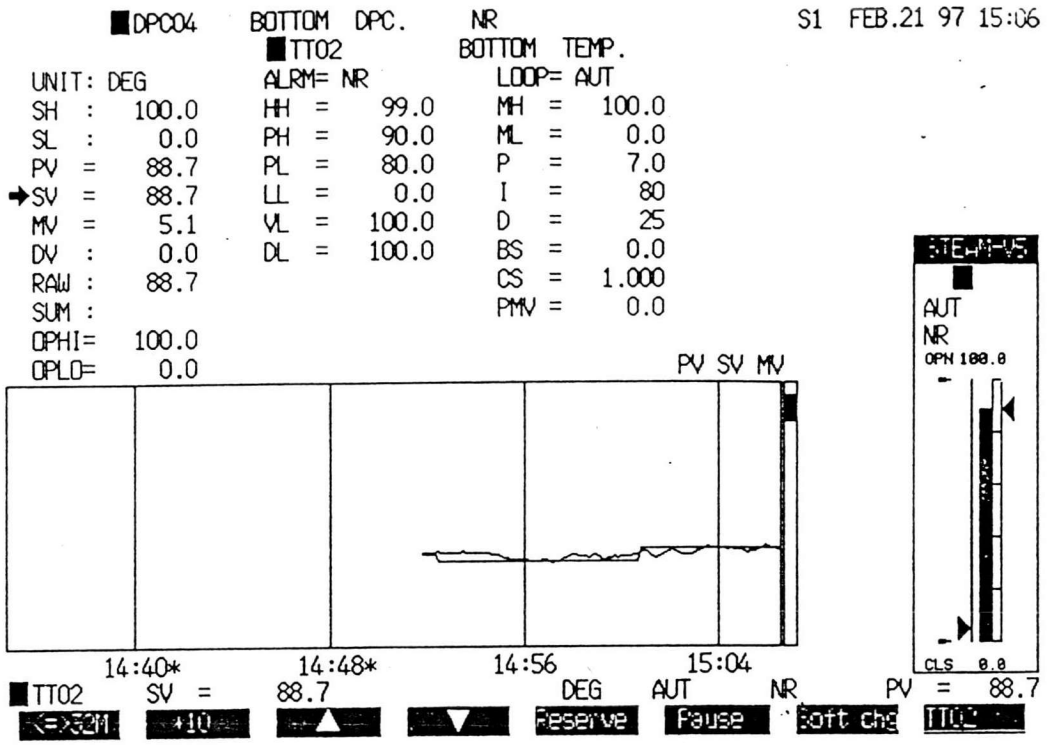


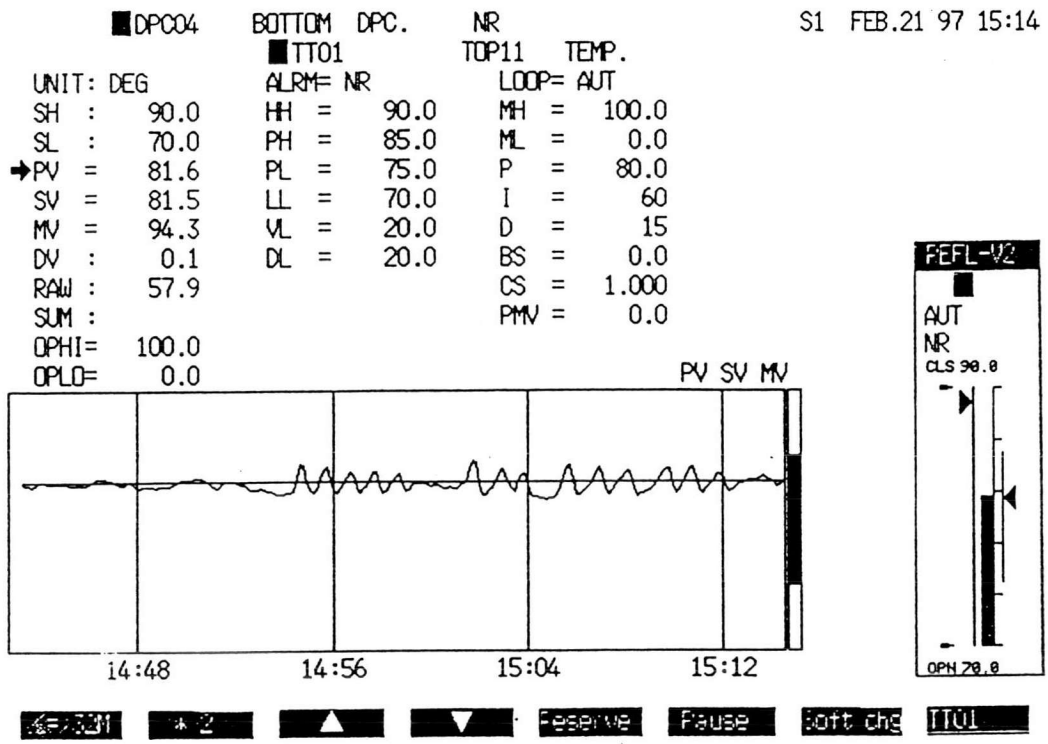
รูปที่ 7.34 การควบคุมของตัวควบคุมอุณหภูมิก้นหอกลั่น เมื่อกระบวนการมีการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิยอดหอกลั่น

การทดสอบตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอกลั่นโดยการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์แบบสเต็พนั้น ตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอสามารถปรับระบบให้เข้าสู่เซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้โดยค่าอุณหภูมิมีการแกว่งเล็กน้อย และการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์แบบสเต็พนั้นต้องไม่เกินค่าอุณหภูมิที่หอกลั่นสามารถปฏิบัติงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.35 แสดงการทำงานของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอ เมื่อเซ็ทพอยท์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พจากที่อุณหภูมิเท่ากับ 81.2 °C เป็นที่อุณหภูมิ เท่ากับ 81.7 °C และการเปลี่ยนแปลงจากที่อุณหภูมิเท่ากับ 81.7 °C เป็นค่าอุณหภูมิเท่ากับ 81.2 °C ตามลำดับ และเมื่อมีการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก้นหอ นั้นคือ มีตัวรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่ให้แก่หม้อต้มซ้ำของไอน้ำ ตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอจะพยายามปรับระบบใช้เข้าสู่เซ็ทพอยท์เดิม ดังแสดงในรูปที่ 7.36 ตัวควบคุมจะพยายามปรับค่าตัวแปรปรับเปลี่ยนเพื่อให้ระบบกลับเข้าสู่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 81.5 °C

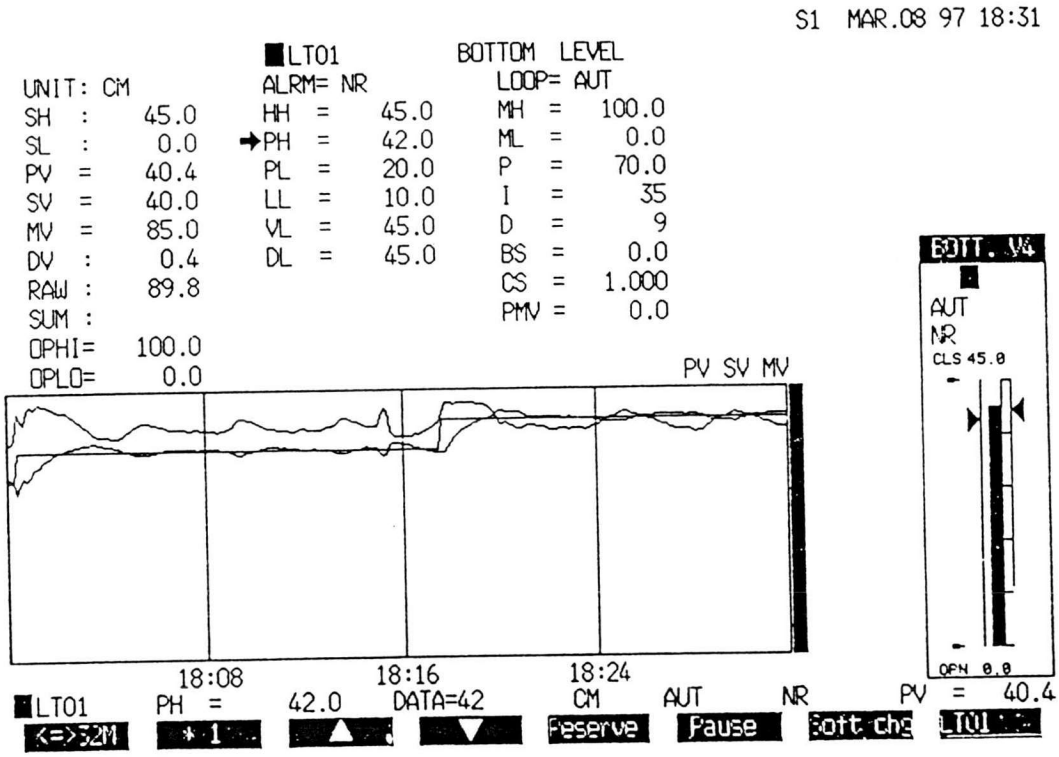


รูปที่ 7.35 การควบคุมอุณหภูมิยอดหอกลั่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์

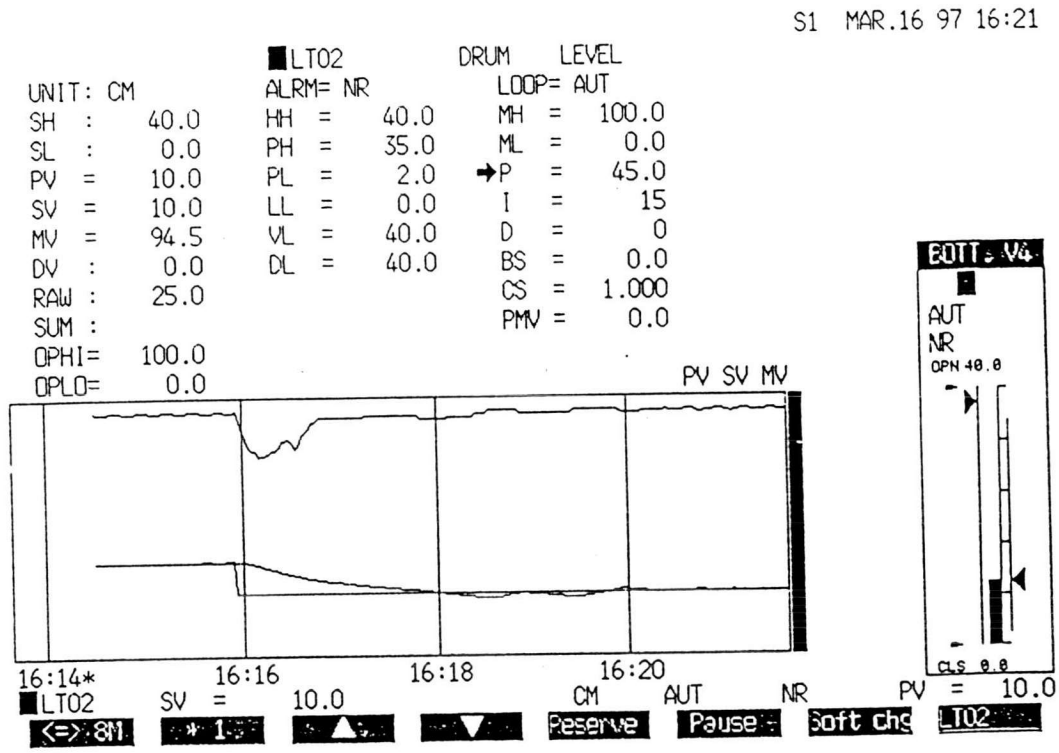




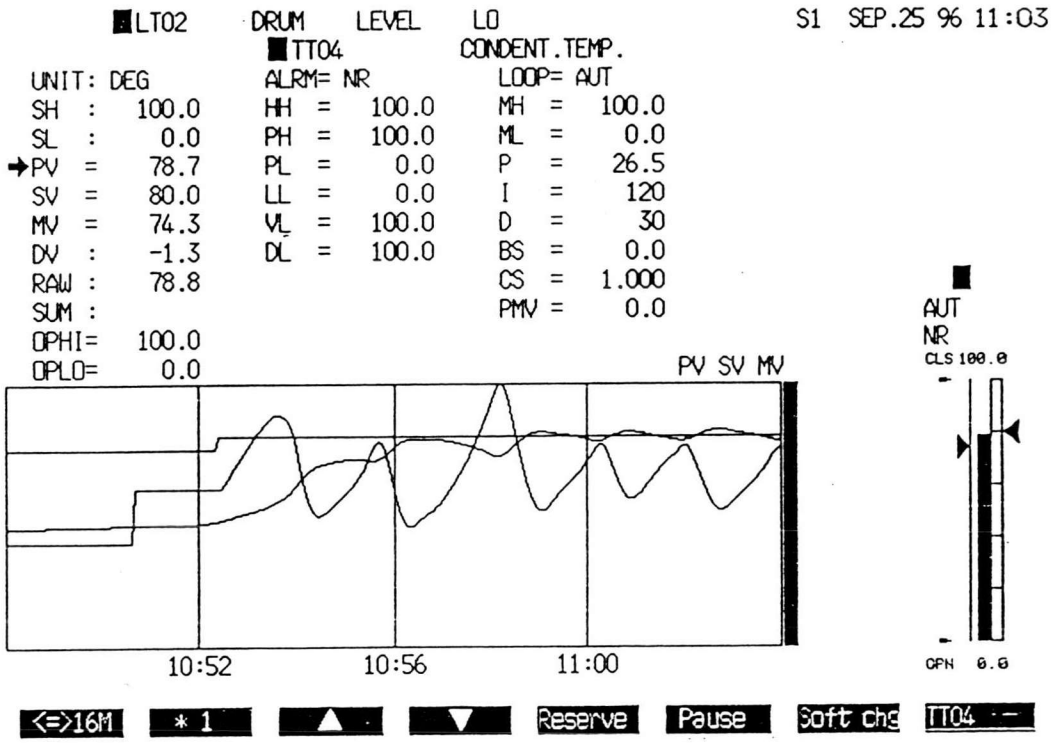
รูปที่ 7.36 การควบคุมของตัวควบคุมอุณหภูมิยอดหอกลั่น เมื่อกระบวนการมีการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก้นหอกลั่น



รูปที่ 7.37 เซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมระดับที่ก้นหอเปลี่ยนแปลงจาก 35 cm. เป็น 40 cm.



รูปที่ 7.38 เซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมระดับในถังเก็บรีฟลักซ์เปลี่ยนแปลงจาก 15 cm. เป็น 10



รูปที่ 7.39 การควบคุมอุณหภูมิของสารควบแน่นที่เซ็ทพอยท์ เท่ากับ 80 °C

การควบคุมลูพอินเว็นทอรี ได้แก่ การควบคุมระดับของของเหลวที่ก้นหอกลั่นและการควบคุมระดับของเหลวในถังเก็บรีฟลักซ์ รวมทั้งการควบคุมอุณหภูมิของสารควบแน่น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.37 รูปที่ 7.38 และรูปที่ 7.39 ตามลำดับ ซึ่งจะช่วยให้กระบวนการกลั่นสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

7.6 สรุป

ในบทนี้เราจะได้ทราบถึงพลวัตของตัวแปรปรับเปลี่ยนกระบวนการที่สำคัญของกระบวนการกลั่นและข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการกลั่น เพื่อประโยชน์ในการพัฒนากระบวน

การควบคุมการกลั่น พร้อมทั้งโมเดลแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันแบบลูพเปิด ของตัวแปรอินพุท และเอาท์พุทพื้นฐานของหอกลั่นที่มีรูปแบบโครงสร้างการควบคุมคุณภาพแบบ (L V) นอกจากนี้เราจะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ในกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อใช้ในการควบคุมตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ อีกด้วย