

## บทที่ 6

### การออกแบบระบบควบคุมสำหรับหอกลั่นแยกสารสองชนิด

เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีคำนวณดัชนีสมรรถนะที่เสนอในบทที่ 3 สามารถนำมาใช้ออกแบบระบบควบคุมประเภทระบบอนุพันธ์ประวิงเวลาแบบหนึ่ง (หรือ RDDS) และระบบอนุพันธ์เศษส่วนที่มีการประวิงเวลาแบบหนึ่ง (หรือ RFDDS) ได้ ในบทนี้จึงนำวิธีดังกล่าวร่วมกับวิธีออกแบบระบบควบคุมสำหรับหอกลั่นแยกสารสองชนิด (Binary distillation column) โดยมีเกณฑ์การออกแบบ (1.1) เป็นเกณฑ์หลัก

ระบบหอกลั่นแยกสารสองชนิด (Binary distillation column) ณ จุดทำงานหนึ่งๆ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) ประเภท RDDS และเพื่อให้เห็นว่าวิธีที่เสนอสามารถประยุกต์ใช้กับระบบชนิด RFDDS ได้ การออกแบบจะแยกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกตัวควบคุมเชิงปริพันธ์ (proportional plus integral controller หรือ ตัวควบคุมแบบ PI) และกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมสัดส่วนบวกตัวควบคุมเชิงปริพันธ์เศษส่วน (fractional order PI controller หรือ ตัวควบคุมแบบ FPI) โดยการใช้ตัวควบคุมแบบ PI และ FPI ระบบวงปิดที่ได้จะเป็นระบบชนิด RDDS และ RFDDS ตามลำดับ

#### 6.1 ระบบควบคุมหอกลั่นแยกสารสองชนิด

ระบบหอกลั่นเป็นระบบ 2 สัญญาณเข้า 2 สัญญาณออกที่มีปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกันและผลของเวลาหน่วงมีบทบาทต่อพฤติกรรมของระบบ ดังนั้นระบบพลวัตของหอกลั่นจึงมีความซับซ้อน ทำให้ปัญหาการออกแบบระบบควบคุมหอกลั่นเป็นปัญหาที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัยหลายกลุ่ม และยังมีกรวิจัยเพื่อพัฒนาระบบควบคุมหอกลั่นให้มีประสิทธิภาพ งานวิจัยเหล่านั้นอาทิเช่น Wood and Berry (1973), Balachandran and Chidambaram (1997), Luyben (1992), C. Zhou and Gasem (1995) และ Khaisongkram and Banjerdpongchai (2006) เป็นต้น

แบบจำลองหอกลั่นที่พัฒนาโดย Wood and Berry (1973) รอบจุดทำงานที่แสดงในตารางที่ 6.1 เป็นดังนี้

$$\bar{Y}(s) = G(s)\bar{U}(s) + G_d(s)D(s) \quad (6.1)$$

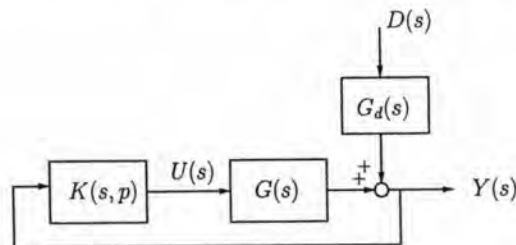
โดยที่

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s + 1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21.0s + 1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s + 1} & \frac{-19.4e^{-2s}}{14.4s + 1} \end{bmatrix}, G_d(s) = \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9 + 1} \\ \frac{4.9e^{-3s}}{13.2s + 1} \end{bmatrix}, \bar{Y}(s) = \begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix}, \bar{U}(s) = \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix},$$

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าจุดทำงาน
$y_1$	ส่วนเพิ่มสารยอดหอ (incremental top product) จากจุดทำงาน	96.5 mol%
$y_2$	ส่วนเพิ่มสารล่างหอ (incremental bottom product) จากจุดทำงาน	0.5 mol%
$u_1$	ส่วนเพิ่มอัตราการกลั่นไหลกลับ (incremental reflux rate) จากจุดทำงาน	1.95 lb/min
$u_2$	ส่วนเพิ่มอัตราการต้มซ้ำ (incremental reboiler rate) จากจุดทำงาน	1.71 lb/min
$d$	ส่วนเพิ่มอัตราการป้อนสาร (incremental feed rate) จากจุดทำงาน	2.45 lb/min

ตารางที่ 6.1: นิยามของตัวแปรสำหรับหอกลั่น

ฟังก์ชัน  $Y_1(s), Y_2(s), U_1(s), U_2(s)$  และ  $D(s)$  เป็นผลแปลงลาปลาซของ  $y_1(t), y_2(t), u_1(t), u_2(t)$  และ  $d(t)$  ตามลำดับ ความหมายของสัญญาณเหล่านี้แสดงในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.1: โครงแบบควบคุม

ระบบวงปิดที่ควบคุมหอกลั่นแสดงในรูปที่ 6.1 ตัวควบคุม  $K(s, p)$  มีโครงสร้างแบบแยกศูนย์ (decentralized controller) ดังนี้

$$K(s, p) = \begin{bmatrix} \frac{p_1 + p_2 s^{p_3}}{s^{p_3}} & 0 \\ 0 & \frac{p_4 + p_5 s^{p_6}}{s^{p_6}} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

โดยที่  $p_i, i = 1, 2, 3, \dots, 6$  เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบ สังเกตว่าตัวควบคุม (6.2) เป็นตัวควบคุมแบบ FPI แต่ถ้ากำหนดให้  $p_3 = p_6 = 1$  ตัวควบคุม (6.2) จะเป็นตัวควบคุม PI ผลการออกแบบทั้งสองกรณีแสดงในหัวข้อที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ

เมื่อกระบวนการกลั่นทำงานรอบจุดทำงานหนึ่ง สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องมีความเข้มข้นคงที่ ในทางปฏิบัติอาจมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากการอัตราการป้อนสารที่ไม่คงที่ อัตราการป้อนสารที่ไม่คงที่เป็นสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบหอกลั่น และเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นเสมอ มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มีคุณสมบัติสัญญาณเข้าอยู่ตัว (ดูหัวข้อที่ 2.4) ดังนั้นเซตเป็นไปได้  $P_1^1$  ถูกใช้ในการกำหนดลักษณะของสัญญาณรบกวนการป้อนสาร  $d$  ในหลายๆกรณี ส่วนเพิ่มของอัตราการป้อนสารมีค่าอยู่ระหว่าง 10-20% ของค่า ณ จุดทำงาน ดังนั้นจากตารางที่ 6.1 กำหนดให้ค่าขอบเขต  $M_\infty = 0.2$  lb/min และให้ค่าขอบเขตความชัน  $D_\infty = 0.2$  lb/min<sup>2</sup> ค่านี้หมายความว่าในหนึ่งนาทีอัตราการป้อนสารเพิ่มขึ้น 0.2 lb

วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือ ต้องการให้สารยอดหามีความแปรปรวนจากค่าที่สถานะอยู่ตัวไม่เกิน  $\pm 0.25$  mol% ขณะที่สารล่างหอไม่เกิน  $\pm 0.49$  mol% ส่วนเพิ่มของอัตราการต้มการกลั่นไหลกลับ และส่วนเพิ่มอัตราการต้มซ้ำมีอยู่ระหว่าง 30-40% ของค่า ณ จุดทำงาน (ดู Wood and Berry, 1973; Khaisongkram and Banjerdpongchai, 2006, เพื่อเป็นตัวอย่าง)

นิยามดัชนีสมรรถนะดังต่อไปนี้

$$\hat{y}_i \triangleq \sup_{t \geq 0} \sup_{f \in \mathcal{P}_1^t} |y_i(t, f)| \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2 \quad (6.3)$$

$$\hat{u}_i \triangleq \sup_{t \geq 0} \sup_{f \in \mathcal{P}_1^t} |u_i(t, f)| \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2 \quad (6.4)$$

วัตถุประสงค์ในการออกแบบคือหาค่าพารามิเตอร์  $p_i$  ในตัวควบคุม (6.2) ที่ทำให้

$$\hat{\lambda} \leq -\varepsilon \quad (6.5)$$

$$\hat{y}_1 \leq 0.25 \text{ mol\%} \quad (6.6)$$

$$\hat{y}_2 \leq \varepsilon_{Y2} \text{ mol\%} \quad (6.7)$$

$$\hat{u}_1 \leq 0.5 \text{ lb/min} \quad (6.8)$$

$$\hat{u}_2 \leq 0.5 \text{ lb/min} \quad (6.9)$$

โดยที่  $\varepsilon$  เป็นค่าบวกขนาดเล็ก และ  $\hat{\lambda}$  เป็นค่าพิกัดเสถียรภาพคำนวณจากวิธีที่เสนอโดย Nguyen and Arunsawatwong (2008)

จากจุดทำงานแสดงในตาราง 6.1 ค่าขอบเขตสำหรับ  $\hat{y}_2$  ควรมีค่า  $\varepsilon_{Y2} < 0.5$  mol% และจากการทดลองหาค่าตอบของการออกแบบหลายๆ ครั้งจากค่าเริ่มต้นหลายค่าที่สุ่มขึ้นพบว่าค่า  $\hat{y}_2$  มีค่าเกินค่าขอบเขต (0.5 mol%) มากกว่าค่าดัชนีตัวอื่นดังนั้นค่าดัชนี  $\hat{y}_2$  จะเป็นค่าที่ทำให้เกณฑ์การออกแบบหาค่าตอบได้ช้า

ในการออกแบบจะกำหนดค่า  $\varepsilon_{Y2}$  ไว้ค่าหนึ่ง ถ้ากระบวนการ moving boundaries หาค่าตอบของการออกแบบที่ทำให้ ค่าดัชนีสมรรถนะสอดคล้องกับเกณฑ์ (6.6)–(6.9) สำหรับค่า  $\varepsilon_{Y2}$  ที่กำหนดไว้ได้ ค่า  $\varepsilon_{Y2}$  จะถูกลดขนาดลงครั้งละ 0.01 mol% แล้วดำเนินการหาค่าตอบของการออกแบบสำหรับค่า  $\varepsilon_{Y2}$  ค่าใหม่นี้ จนกว่ากระบวนการหาค่าตอบที่ไม่สามารถหาค่าดัชนีสมรรถนะน้อยลงได้อีก ทั้งนี้เพื่อเป็นการหาค่าดัชนีสมรรถนะที่ดีที่สุด

ในการค้นหาคำตอบของปัญหาการออกแบบนี้กระบวนการคำนวณที่ 4.1 ถูกนำมาใช้ ทุก 30 รอบของการหาค่าตอบด้วยขั้นตอน MBP ผลตอบอิมพัลส์หนึ่งหน่วยที่คำนวณด้วยตัวประมาณ  $I_{MN}$  ของ Zakian (Zakian's  $I_{MN}$  approximant, ดู Zakian, 1969, 1975 และรายละเอียดในภาคผนวก จ.) ถูกนำมาตรวจสอบเพื่อกำหนดค่าเวลาตัดปลาย  $T$  ที่เหมาะสม อันดับของตัวประมาณ  $(M, N)$  ที่ใช้คือ อันดับ (30, 40) ในช่วงเวลาสั้นๆ และอันดับ (39, 40) เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น เนื่องจากอันดับ (30, 40) ให้ความแม่นยำในช่วงเวลาน้อยดีกว่าการใช้อันดับ (39, 40) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ. และเพิ่มเติมใน Zakian, 1969, 1975) ตัวประมาณ  $I_{MN}$  ของ

$\hat{y}_1$	$= 1.2577 \times 10^{-1}$	$\leq 0.25$	mol%
$\hat{y}_2$	$= 4.7326 \times 10^{-1}$	$\leq 0.48$	mol%
$\hat{u}_1$	$= 1.5681 \times 10^{-1}$	$\leq 0.50$	lb/min
$\hat{u}_2$	$= 7.3823 \times 10^{-2}$	$\leq 0.50$	lb/min

ตารางที่ 6.2: ค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมหอกลับด้วยตัวควบคุม PI

Zakian เป็นตัวประมาณที่มีประโยชน์ สำหรับหาผลแปลงกลับลาปลาซเชิงเลข (numerical inversion of Laplace transformation) และได้พัฒนาเพื่อใช้หาผลตอบของระบบหลายประเภท อาทิเช่น Zakian and Coleman (1971), Zakian (1975), Arunsawatwong (1998) เป็นต้น

## 6.2 การควบคุมหอกลับด้วยตัวควบคุมแบบ PI

กำหนดให้ค่า  $p_3$  และ  $p_6$  ในตัวควบคุม  $K(s, p)$  มีค่าเท่ากับหนึ่ง เริ่มจากค่าขอบเขต  $\varepsilon_{Y2} = 0.49$  mol% กระบวนการ moving boundaries สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับเกณฑ์ (6.6)–(6.9) ได้ แต่เมื่อลดขอบเขตเป็น  $\varepsilon_{Y2} = 0.47$  mol% กระบวนการ moving boundaries ใช้เวลาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์หลายรอบก็ยังไม่สามารถหาค่าดัชนีสมรรถนะที่น้อยกว่า  $\varepsilon_{Y2} = 0.47$  mol% ได้ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่หาได้มีพารามิเตอร์

$$\begin{aligned} p_1 &= 2.49 \times 10^{-2}, & p_2 &= 1.46, & p_3 &= 1.0 \\ p_4 &= -4.52 \times 10^{-5}, & p_5 &= -1.43 \times 10^{-1}, & p_6 &= 1.0 \end{aligned} \quad (6.10)$$

ตัวควบคุมดังกล่าวให้ค่าดัชนีสมรรถนะอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ (สอดคล้องกับเกณฑ์ (6.6)–(6.9)) สำหรับ  $\varepsilon_{Y2} = 0.48$  mol% ซึ่งค่าดัชนีสมรรถนะได้แสดงในตารางที่ 6.2

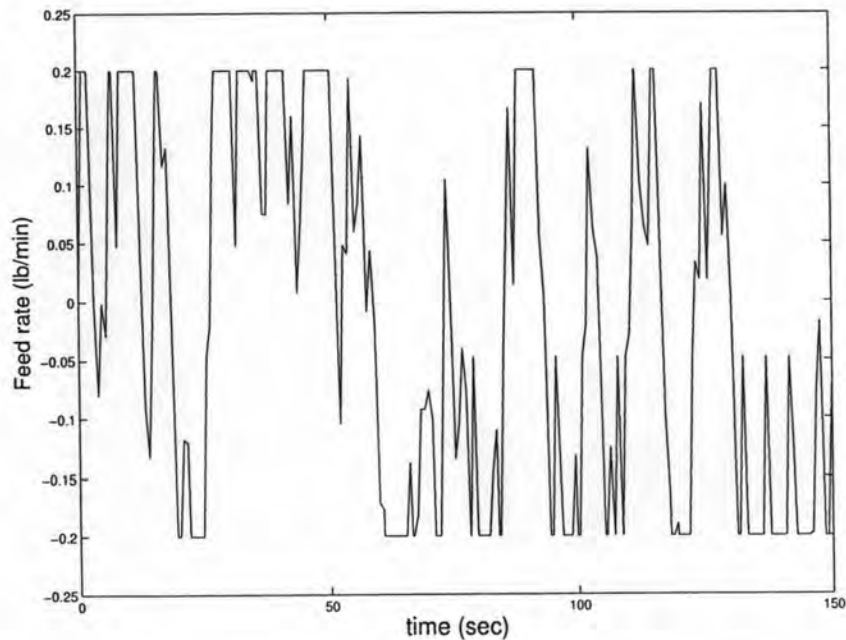
ทดสอบตัวควบคุมดังกล่าวโดยสร้างสัญญาณอัตราการป้อนสารที่มีขนาดและความชันไม่เกิน  $M_\infty$  และ  $D_\infty$  ตามลำดับ จากการสุ่มค่าความชัน แล้วป้อนให้กับระบบควบคุมหอกลับ สัญญาณทดสอบที่นำมาทดสอบแสดงในรูปที่ 6.2 สัญญาณทดสอบดังกล่าวทำให้ส่วนเพิ่มของผลิตภัณฑ์ยอดหอ และล่างหอแสดง มีลักษณะในรูปที่ 6.3 ส่วนเพิ่มของอัตราการใช้กลับและอัตราการใช้ซ้ำมีลักษณะในรูปที่ 6.4 ผลตอบทั้งหมดสอดคล้องกับเกณฑ์ (6.6)–(6.9) ค่ามากที่สุดของผลตอบแต่ละชนิดแสดงในตาราง 6.2 ผลตอบสัญญาณเข้าหนึ่งหน่วยแสดงในรูปที่ 6.5 และ 6.6 และเมื่อทดลองเปลี่ยนสัญญาณทดสอบที่เกิดจากการสุ่มความชันอื่นอีกหลายชุดสัญญาณ ผลตอบก็ที่อยู่ในเกณฑ์ (6.6)–(6.9) เสมอ

## 6.3 การควบคุมหอกลับด้วยตัวควบคุมแบบ FPI

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการหาตัวควบคุม FPI คือค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ที่ได้จากหัวข้อที่แล้ว กล่าวคือใช้ค่าพารามิเตอร์ในชุดสมการ (6.10) และไม่มีการกำหนดเงื่อนไข  $p_3 = p_6 = 1$

$\ y_1\ _\infty$	$= 7.7929 \times 10^{-2}$	mol%
$\ y_2\ _\infty$	$= 4.4928 \times 10^{-1}$	mol%
$\ u_1\ _\infty$	$= 8.7922 \times 10^{-2}$	lb/min
$\ u_2\ _\infty$	$= 5.4926 \times 10^{-2}$	lb/min

ตารางที่ 6.3: ค่ามากที่สุดของสัญญาณออกและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมหอกลับเมื่อมีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม



รูปที่ 6.2: ส่วนเพิ่มของอัตราการป้อนสาร

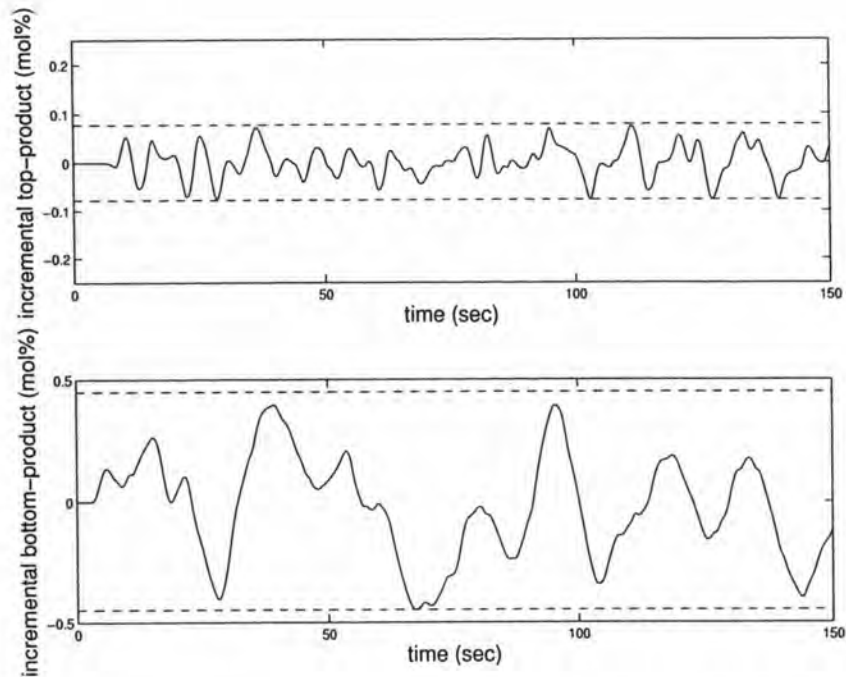
หลังจากปรับลดค่าขอบเขต  $\varepsilon_{Y2}$  ในระหว่างกระบวนการหาค่าตอบ ค่าพารามิเตอร์ที่ของตัวควบคุม  $K(s,p)$  ที่ได้สำหรับ  $\varepsilon_{Y2} = 0.40$  mol% คือ

$$\begin{aligned} p_1 &= 6.33 \times 10^{-2}, & p_2 &= 2.74 \times 10^{-2}, & p_3 &= 6.25 \times 10^{-1} \\ p_4 &= -2.50 \times 10^{-1}, & p_5 &= -1.31 \times 10^{-1}, & p_6 &= 6.26 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (6.11)$$

ค่าดัชนีสมรรถนะแสดงในตารางที่ 6.4

ทดสอบโดยสัญญาณทดสอบอัตราการป้อนสารที่มีลักษณะในรูปที่ 6.2 สัญญาณทดสอบให้ผลตอบส่วนเพิ่มของผลิตภัณฑ์ยอดหอและล่างหอแสดงมีลักษณะในรูปที่ 6.7 ส่วนเพิ่มของอัตราการไหลกลับและอัตราการต้มซ้ำมีลักษณะในรูปที่ 6.8 ผลตอบทั้งหมดสอดคล้องกับเกณฑ์ (6.6)–(6.9) สำหรับ  $\varepsilon_{Y2} = 0.40$  mol% ค่ามากที่สุดของผลตอบแต่ละชนิดแสดงในตาราง 6.3 ผลตอบสัญญาณเข้าหนึ่งหน่วยแสดงในรูปที่ 6.5 และ 6.6

สังเกตว่าจากเดิมที่ กระบวนการ moving boundaries ไม่สามารถหาค่า  $p$  ของตัวควบคุม PI ที่ให้



รูปที่ 6.3: ส่วนเพิ่มของผลภัก์ยอดหอและล่างหอเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PI

$\hat{y}_1$	$= 1.7123 \times 10^{-1}$	$\leq 0.25$	mol%
$\hat{y}_2$	$= 3.9923 \times 10^{-1}$	$\leq 0.40$	mol%
$\hat{u}_1$	$= 2.7449 \times 10^{-2}$	$\leq 0.50$	lb/min
$\hat{u}_2$	$= 1.0280 \times 10^{-1}$	$\leq 0.50$	lb/min

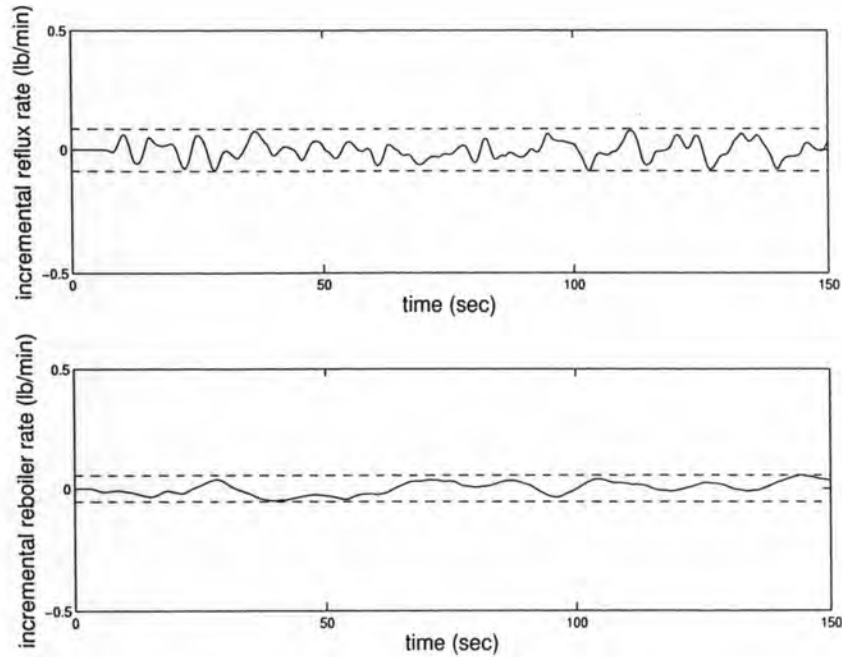
ตารางที่ 6.4: ค่าดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมหอกลับด้วยตัวควบคุม FPI

ค่าดัชนีสมรรถนะ  $\hat{y}_2$  ต่ำว่า  $\varepsilon_{Y2} = 0.47$  mol% ได้ แต่เมื่อไม่กำหนดเงื่อนไข  $p_3 = p_6 = 1$  ซึ่งเป็นเลขยกกำลังของส่วน I ค่าดัชนีสมรรถนะ  $\hat{y}_2$  ที่ได้ต่ำกว่า  $\varepsilon_{Y2} = 0.40$  mol% ผลดังกล่าวเป็นไปตามวิธีสมการ (ดูไบบทที่ 2 หรือดูเพิ่มเติมใน Zakian (2005))

## 6.4 สรุป

ไบบทนี้หาวิธีการคำนวณดัชนีสมรรถนะไปพร้อมกับวิธีสมการในการออกแบบระบบควบคุมหอกลับแยกสารสองชนิด โดยใช้ตัวควบคุมชนิด PI และ FPI เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณดัชนีสมรรถนะสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมประเภท RDDS และ RFDDS ได้

นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพารามิเตอร์ในการออกแบบทำให้ผลที่ได้ดีขึ้น โดยในกรณีศึกษาี้เลือกตัวควบคุม 2 ชนิดที่มีโครงสร้างเหมือนกันได้แก่ ตัวควบคุม PI และตัวควบคุม FPI ตัวควบคุมชนิดแรกกำหนดให้เลขยกกำลังส่วนปริพันธ์มีค่าเป็น 1 ทำให้พารามิเตอร์ในการออกแบบมีจำนวนทั้งสิ้น 4 พารามิเตอร์ ในขณะที่เลขยกกำลังส่วนปริพันธ์ของตัวควบคุมชนิด FPI

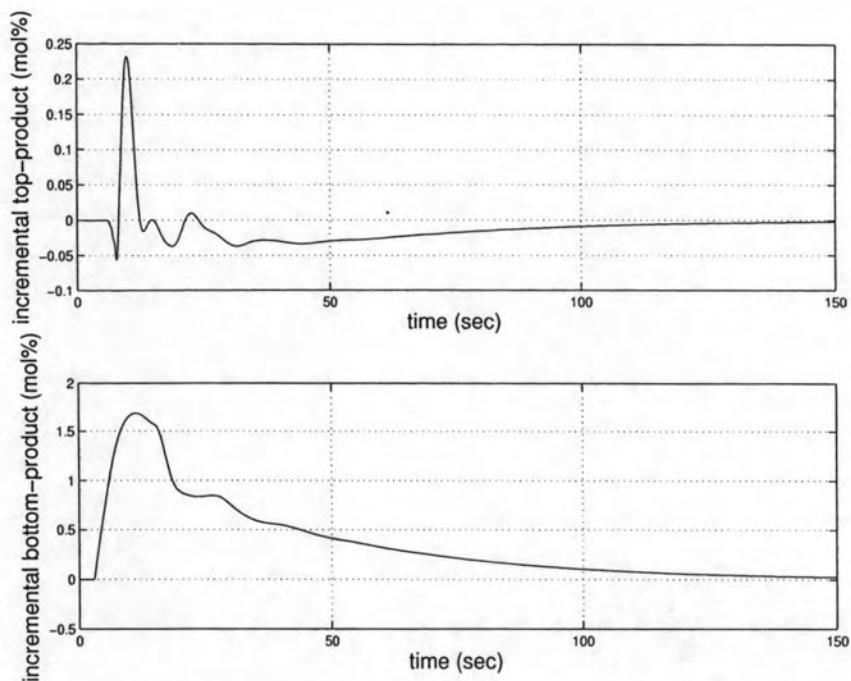


รูปที่ 6.4: ส่วนเพิ่มของอัตราการไหลกลับและอัตราการต้มซ้ำเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PI

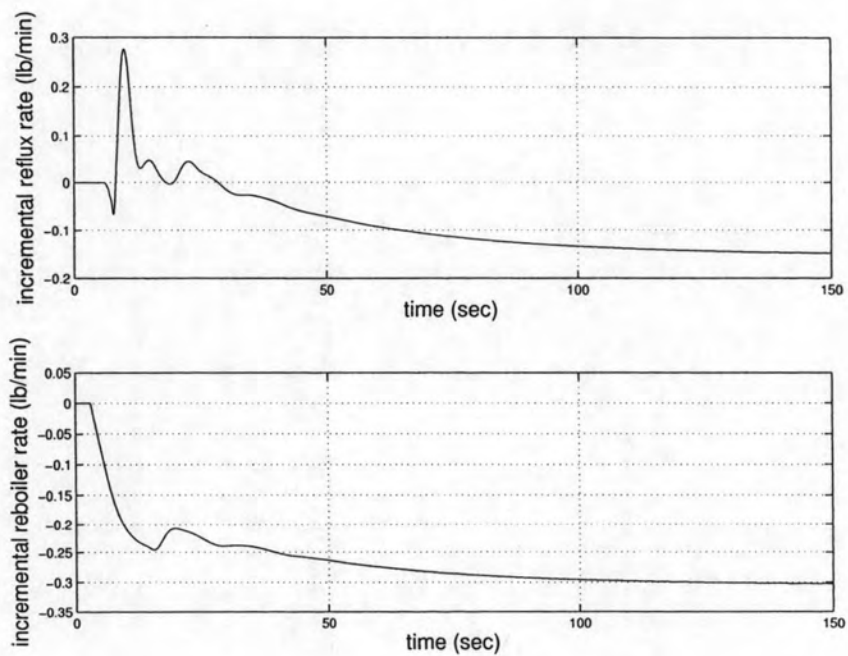
$\ y_1\ _\infty$	$= 1.4204 \times 10^{-1}$	mol%
$\ y_2\ _\infty$	$= 3.0250 \times 10^{-1}$	mol%
$\ u_1\ _\infty$	$= 1.8396 \times 10^{-2}$	lb/min
$\ u_2\ _\infty$	$= 7.7746 \times 10^{-2}$	lb/min

ตารางที่ 6.5: ค่ามากที่สุดของสัญญาณออกและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมหอกลับด้วยตัวควบคุม FPI เมื่อมีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม

เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบด้วยทำให้เมื่อใช้ตัวควบคุม FPI มีพารามิเตอร์ในการออกแบบรวมทั้งสิ้น 6 พารามิเตอร์โดยการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยกระบวนการ moving boundaries ตัวควบคุม PI จะให้ค่าดัชนีสมรรถนะชุดหนึ่ง และไม่สามารถให้ค่าดัชนีสมรรถนะที่ดีกว่านี้ได้ (ไม่สามารถลดค่าขอบเขต  $\epsilon_{Y2}$  ลงได้อีก) แต่เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับหาพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม FPI กระบวนการ moving boundaries สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ดัชนีสมรรถนะ  $\epsilon_{Y2}$  ลดลงได้อีก ผลที่ได้สอดคล้องกับวิธีอสมการ กล่าวคือเมื่อให้พารามิเตอร์มีจำนวนมากขึ้นเซตในการค้นหาค่าตอบจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้โอกาสที่จะหาค่าตอบการออกแบบได้ง่ายขึ้น

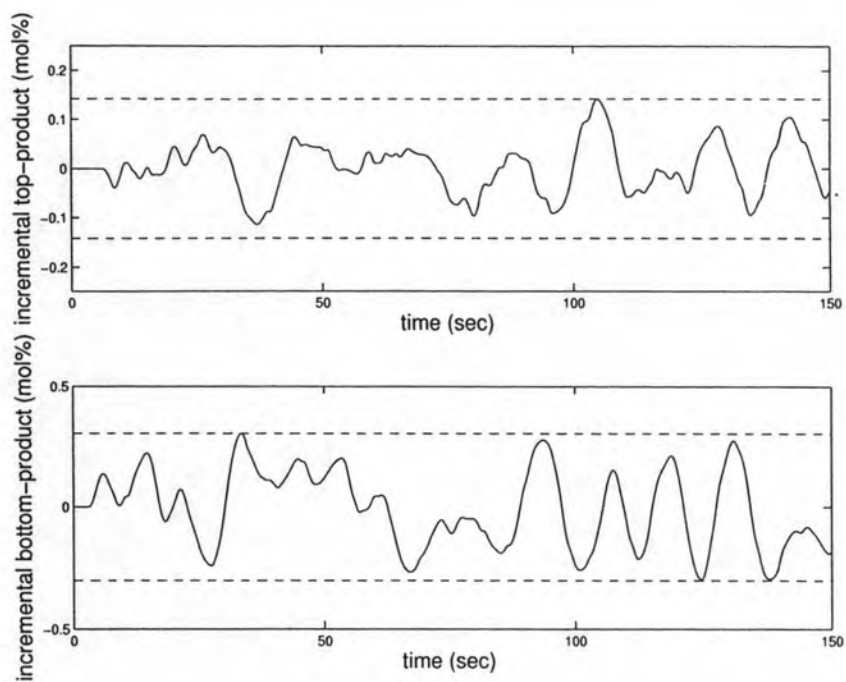


รูปที่ 6.5: ผลตอบสนองขั้นหนึ่งหน่วยส่วนเพิ่มผลิตภัณฑ์ยอดหอและล่างหอเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PI

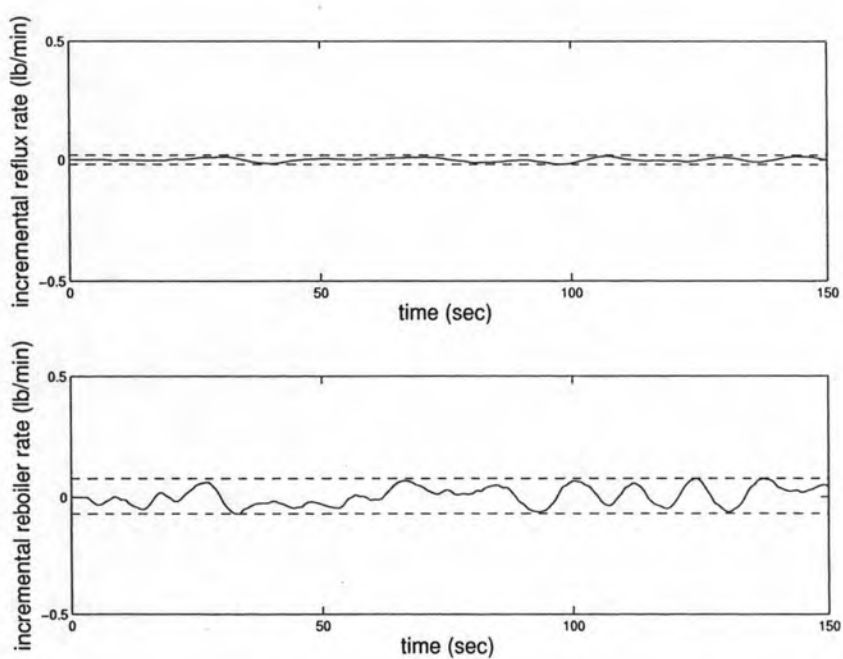


รูปที่ 6.6: ผลตอบสนองขั้นหนึ่งหน่วยอัตราการไหลกลับและอัตราการต้มซ้ำเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม PI

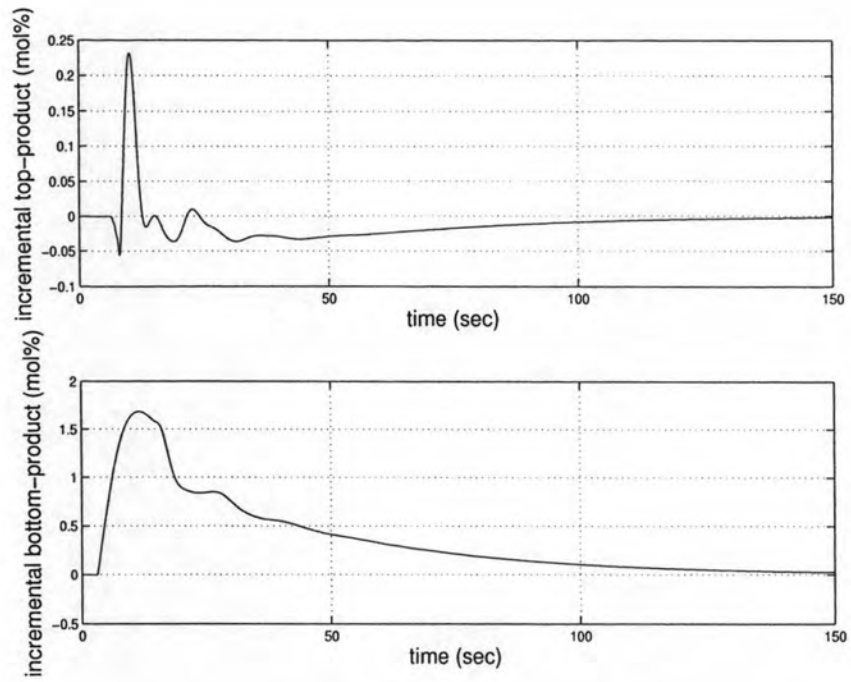




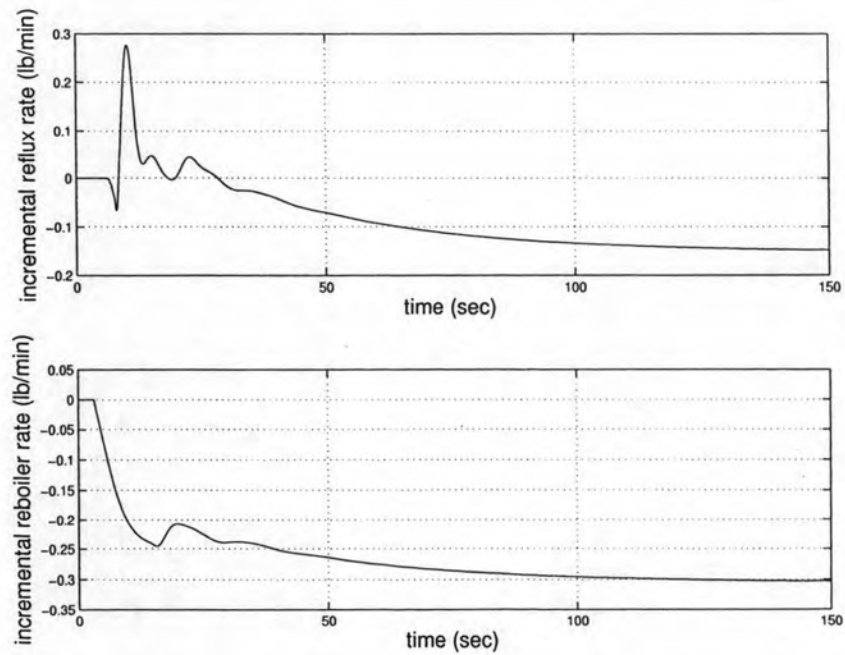
รูปที่ 6.7: ส่วนเพิ่มของผลิตภัณฑ์ยอดหอและล่างหอเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม FPI



รูปที่ 6.8: ส่วนเพิ่มของอัตราการไหลกลับและอัตราการต้มซ้ำเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม FPI



รูปที่ 6.9: ผลตอบสนองขั้นหนึ่งหน่วยส่วนเพิ่มผลิตภัณฑ์ยอดหอและล่างหอเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม FPI



รูปที่ 6.10: ผลตอบสนองขั้นหนึ่งหน่วยอัตราการไหลกลับและอัตราการต้มซ้ำเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุม FPI