บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การออกแบบแบบจำลองออบเซิร์ฟเวอร์

แบบจำลองออบเซิร์ฟเวอร์ในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นจากสมการสมดุลมวลสารของแต่ละชั้นของหอกลั่นโดยอาศัยสมมติฐานดังนี้ คือ สมมติว่าจำนวนชั้นและสารตกค้าง (hold up) ในหม้อเก็บรีฟลักซ์คงที่, จำนวนโมลของสารที่เข้าและออกจากแต่ละชั้นมีปริมาณที่เท่ากัน (equimolal overflow), ความสามารถในการกลายเป็นไอสัมพัทธ์ (relative volatility) ของของผสมคงที่ และอัตราการระเหยกลายเป็นไอของของผสม (vapor boil up rate) คงที่

จากสมการสมดุลมวลสารที่มีความสัมพันธ์แบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะถูกใช้ในการพัฒนาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (linearlized) โดยใช้ทฤษฎีของเทเลอร์ (Taylor series expansion) [8] แล้วจัดรูปสมการทั้งหมดใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.7 และ 2.8 โดยเพิ่มส่วนของออบเซิร์ฟเวอร์จะอยู่ในรูปของสมการ 2.9 หรือ 2.10 โดยที่เมตริก A, B และ C คำนวณได้จากสมการที่ให้ไว้ในภาคผนวก ค

5.2 การเลือกตำแหน่งในการวัดค่าอุณหภูมิ

จากการศึกษาของยู และ ลูเบน [3] พบว่าแบบจำลองจะสามารถประมาณการค่าตัวแปรสภาวะได้ต้องมีจำนวนการวัดอุณหภูมิอย่างน้อย NC-1 ตำแหน่ง เมื่อ NC เป็นจำนวนองค์ประกอบในของผสม แต่เพื่อให้การคำนวณนำเข้าสู่ผลลัพธ์อย่างมีเสถียรภาพต้องมีจำนวนการวัดค่าอย่างน้อย NC+2 ตำแหน่ง ดังนั้นแบบจำลองออบเซิร์ฟเวอร์ที่สร้างขึ้นมานี้จึงใช้การวัดอุณหภูมิ 4 ตำแหน่ง โดยให้ระยะห่างของตำแหน่งในการวัดเท่ากัน คือที่ชั้น หม้อต้มไอน้ำ ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 5 และ ชั้นที่ 8

5.3 ความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออก

หลักสำคัญในการสร้างแบบจำลองออบเซิร์ฟเวอร์คือ ต้องตรวจสอบว่าระบบมีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออกหรือไม่ โดยระบบที่มีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออกจะสามารถวางตำแหน่งรากของ

เมตริกวงจรปิด Ac = A-KC ที่ตำแหน่งใดๆก็ได้ทางฝั่งซ้ายของระนาบเชิงซ้อน โดยที่ observability matrix , $\Xi = [C\ CA\ CA^2 \ldots\ CA^{k+1}]^T$ อยู่ในแรงก์ (rank) ของ k เมื่อ k คืออันดับของระบบ

ผลการหาแรงก์ของ observability matrix ของระบบอันดับ 10 พบว่าไม่ full rank แสดงว่าระบบไม่มีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออก ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้แบบจำลอง ควอซิ-ไดนามิก (quasi-dynamic model, OBS-QD) [7] มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยคำนึงถึงเฉพาะชั้นที่ 3 ขึ้นไปของหอกลั่น ทำให้ระบบลดอันดับลงเหลือ 8 และเมื่อตรวจสอบ observability matrix ของระบบอีกครั้งพบว่า full rank ระบบมีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออก

5.4 การหาค่าเมตริกอัตราการขยายวงจรปิดด้วยวิธี Pole-Placement

หลังจากการตรวจสอบว่าระบบมีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออกและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นแล้ว ตามทฤษฎีสามารถวางค่ารากของเมตริกวงจรปิดที่ตำแหน่งใดก็ได้ทางฝั่งซ้ายของระนาบเชิงซ้อน Pole-Placement เป็นวิธีการหาค่าเมตริกอัตราการขยาย K ของออบเซิร์ฟเวอร์ โดยเปลี่ยนค่ารากที่มีการตอบสนองช้า (การเข้าสู่ผลลัพธ์ช้า มีขนาดเล็ก) ของเมตริกวงจรเปิด A เป็นค่าที่มีการตอบสนองเร็วขึ้น (การเข้าสู่ผลลัพธ์เร็ว มีขนาดใหญ่) เช่น ในการทดสอบการกลั่น (simulate) ด้วยแบบจำลอง ที่ความเข้มข้น 25% แอลกอฮอล์ ค่ารากของเมตริกวงจรเปิด A มีค่าเป็น [-68.1056 -58.4764 -44.5580 -29.0979 -15.1288 -0.0003 -5.2928 -0.8477] เมื่อเปลี่ยนค่ารากที่มีการตอบสนองช้าเป็นค่าที่มีการตอบสนองเร็วขึ้น โดยยังคงค่ารากที่ตอบสนองเร็วไว้ได้เมตริกวงจรปิดเป็นเป็น [-68.1056 -58.4764 -44.5580 -29.0979 -28 -27 -26 -25] การเปลี่ยนค่ารากของเมตริกวงจรเปิดนี้ไม่มีหลักที่แน่นอนว่าควรจะเปลี่ยนกี่ค่าหรือเปลี่ยนเป็นค่าเท่าใด แต่ในที่นี้เปลี่ยนเฉพาะค่าที่ต่างจากค่าอื่นมากๆซึ่งได้แก่ค่ารากๆ 4 ค่าสุดท้าย โดยเปลี่ยนให้มีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ 5 โดยให้มีขนาดลดหลั่นกันไป

5.5 การหาค่าเมตริกอัตราการขยายวงจรปิดด้วยวิธี LQE

LQE (linear Quadratic estimator) เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการใช้หาค่าเมตริกอัตราการขยาย K ของออบเซิร์ฟเวอร์ โดยที่ต้องทราบค่ารบกวนของกระบวนการและค่ารบกวนของการวัด (process and measurement noise covariances) q & r ของระบบ และค่าเมตริกแก้ไข (correcting matrix) g ซึ่งในที่นี้ ค่าเมตริกแก้ไขจะใช้ค่าเป็น Identity matrix เนื่องจาก g เป็นค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ เมื่อเทียบกับค่ารบกวนของกระบวนการที่เป็นศูนย์

จากข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริงพบว่ามีค่ารบกวนเกิดขึ้นประมาณ 0.6 องศาเซลเซียส ดังนั้นค่า measurement noise covariance r จึงประมาณได้เป็น 0.6 เท่าของ Identity matrix ส่วน process noise covariance q ไม่สามารถวัดค่าได้จึงสมมุติค่าเริ่มต้นเป็น 0.01, 0.1 และ 1 เท่าของ Identity matrix ผลการทดสอบการทำงานด้วยออบเซิร์ฟเวอร์เมื่อใช้แบบจำลองที่ 25% ของแอกอฮอล์ให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบยอดหอเป็น 0.5028, 0.5449 และ 0.5759 ตามลำดับ และเมื่อใช้ค่า process noise covariance q ในการทดสอบการทำงานด้วยออบเซิร์ฟเวอร์เมื่อใช้แบบจำลองที่ 25% ของแอกอฮอล์เป็น Identity matrix คงที่และเปลี่ยนค่า measurement noise covariance r เป็น 0.06, 0.6 และ 6 เท่าของ Identity matrix จะให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบยอดหอเป็น 0.5974, 0.5759 และ 0.5449 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทั้ง process noise covariance q และ measurement noise covariance r มีผลต่อค่าอัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบยอดหอที่ได้จากการทดสอบการทำงานด้วยออบเซิร์ฟเวอร์ แต่เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริงพบว่ามีค่ารบกวนเกิดขึ้นประมาณ 0.6 องศาเซลเซียส ดังนั้นค่ารบกวนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการจึงควรเป็น 1 เท่าของ Identity matrix เพื่อให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบยอดหอที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบยอดหอจริงที่คำนวณได้จากอุณหภูมิการกลั่น

5.6 ค่า Norm ของเมตริกอัตราการขยาย

ค่า Norm ของเมตริกคือ ค่าตัวเลขที่แสดงถึง "ขนาด" (magnitude) ของเมตริกนั้นๆ ดังนั้นการหาค่า Norm ของเมตริกอัตราขยายจึงเป็นการหาขนาดของเมตริกอัตราขยายนั่นเอง ซึ่งขนาดของเมตริกอัตราขยายจะมีผลต่อการเข้าสู่ค่าจริงของค่าองค์ประกอบที่ประมาณการได้ คือ ถ้าเมตริกอัตราขยายมีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าเวลาคงที่วงจรปิดน้อยและค่าไอเกนเป็นลบมาก ระบบจะเคลื่อนเข้าสู่สภาวะจริงเร็ว จากการคำนวณค่า Norm ของเมตริกอัตราการขยายที่คำนวณด้วยวิธี Pole-Placement มีค่าเป็น 2.0541, 1.9187 และ 1.9759 ตามลำดับสำหรับแบบจำลอง 15, 25 และ 35% แอลกอฮอล์ ค่า Norm ที่คำนวณได้มีค่าที่มากขึ้นตามลำดับของแบบจำลอง ยกเว้น ค่า Norm ของเมตริกอัตราการขยายของแบบจำลองที่ 15% แอลกอฮอล์มีค่าที่สูงกว่าค่า Norm ของเมตริกอัตราการขยายของแบบจำลองที่ 25 และ 35% แอลกอฮอล์ อาจเนื่องจากค่าไอเกนค่าที่ 5 ของระบบวงจรเปิดได้ถูกเปลี่ยนเป็น -28 เช่นเดียวกันกับในแบบจำลองที่ 25 และ 35 % แอลกอฮอล์ แต่ความแตกต่างระหว่างค่าไอเกนค่าที่ 4 และ 5 ของแบบจำลองที่ 15% แอลกอฮอล์มีค่าน้อยกว่าความแตกต่างระหว่างค่าไอเกนค่าที่ 4 และ 5 ของแบบจำลองที่ 25 และ 35% แอลกอฮอล์ (ดูหัวข้อ 4.1.3, 4.1.7 และ_4.1.9 ประกอบ) ส่วนค่า Norm ของเมตริกอัตราการ

ขยายที่คำนวณด้วยวิธี LQE มีค่าเป็น 1.3710, 1.3716 และ 1.3723 ตามลำดับสำหรับแบบจำลอง 15, 25 และ 35 % แอลกอฮอล์ จะเห็นได้ว่าค่า Norm ของเมตริกอัตราการขยายที่คำนวณด้วยวิธี LQE จะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ จึงพอสรุปได้ว่าวิธี Pole-Placement มีผลต่อค่าเมตริกอัตราการขยายมากกว่าวิธี LQE ดังนั้นการประมาณค่าองค์ประกอบยอดหอด้วยวิธี Pole-Placement จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (sensitivity) มากกว่าวิธี LQE

5.7 ผลเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธี Pole-Placement กับวิธี LQE

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการประมาณการค่าองค์ประกอบโดยการใช้วิธี Pole-Placement มี 2 ปัจจัยคือ การวางตำแหน่งรากวงจรปิดของระบบและอุณหภูมิจากการกลั่นจริงที่นำมาใช้ในส่วนของออบเซิร์ฟเวอร์ ส่วนปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการประมาณการค่าองค์ประกอบโดยการใช้วิธี LQE มี 4 ปัจจัยคือ ค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากกระบวนการและอุปกรณ์การวัดค่า (process & measurement noise covariances) q และ r ของระบบ และค่าเมตริกแก้ไข (correcting matrix) g และอุณหภูมิจากการกลั่นจริง ค่าองค์ประกอบที่ได้จากผลการทดสอบการกลั่นพบว่าให้ค่าที่ถูกต้องตามความเป็นจริงกล่าวคือ เมื่อการกลั่นของผสมเริ่มต้นที่ความเข้มข้นแอลกอฮอล์ที่สูงขึ้นจะทำให้ได้องค์ประกอบด้านบนของหอกลั่นที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย และเวลาที่ใช้ในการกลั่นจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจะลดลง โดยที่แนวโน้มขององค์ประกอบด้านบนของหอกลั่นที่ได้จะมีลักษณะความสัมพันธ์เกือบเป็นเส้นตรงตามแบบจำลองของระบบ ในงานวิจัยนี้การใช้วิธี LQE จะให้ผลการประมาณค่าองค์ประกอบยอดหอที่ใกล้เคียงกับองค์ประกอบยอดหอจริงที่คำนวณจากอุณหภูมิการกลั่นมากกว่าวิธี Pole-Placement (ตารางที่ 4.5) เพราะวิธี Pole-Placement เป็นวิธีการกำหนดตำแหน่งรากของระบบเพื่อหาเมตริกอัตราการขยาย แต่วิธี LQE เป็นวิธีที่หาเมตริกอัตราการขยายจากการทราบค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากกระบวนการและอุปกรณ์การวัดค่า ซึ่งแม้ว่าในงานวิจัยนี้จะทราบเพียงค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากอุปกรณ์การวัดค่าเท่านั้นก็ตาม และวิธี Pole-Placement จะให้ค่าการประมาณค่าองค์ประกอบยอดหอที่ 5% ของความผิดพลาดที่เวลา 1130, 2100 และ 2590 วินาที ตามลำดับสำหรับแบบจำลอง 15, 25 และ 35% แอลกอฮอล์ ส่วนวิธี LQE ให้ค่าการประมาณค่าองค์ประกอบยอดหอที่ 5% ของความผิดผลาดที่เวลา 1100, 2000 และ 1960 วินาที แสดงว่าวิธี LQE ให้ผลการประมาณค่าองค์ประกอบยอดหอเร็วกว่าวิธี Pole-Placement เมื่อพิจารณาการเข้าสู่ภาวะเสถียรของอุณหภูมิการกลั่น พบว่าอุณหภูมิการกลั่นของหอกลั่นชั้นที่ 8 จะเข้าสู่ภาวะเสถียรที่เวลา 900, 1200 และ 1400 วินาที ตามลำดับสำหรับแบบจำลอง 15, 25 และ 35% แอลกอฮอล์ แสดงว่าอัตราการนำเข้าสู่ผล

ลัพธ์ของค่าการประมาณค่าองค์ประกอบยอดหอเข้าสู่ผลลัพธ์เร็วกว่าการเข้าสู่ภาวะเสถียรของอุณหภูมิ ดังนั้นแบบจำลองออบเซิร์ฟเวอร์ที่ออกแบบขึ้นมานี้มีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะไปข้างหน้าตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

5.8 อัตราส่วนความคลาดเคลื่อน

เป็นค่าที่คำนวณจากอัตราส่วนของผลต่างระหว่างค่าองค์ประกอบยอดหอที่คำนวณได้จากสมการสมดุลของเฟสโดยใช้อุณหภูมิการกลั่นกับค่าองค์ประกอบยอดหอที่คำนวณได้จากแบบจำลองออบเซิร์ฟเวอร์หารด้วยค่าองค์ประกอบยอดหอที่คำนวณได้จากสมการสมดุลของเฟสอุณหภูมิการกลั่น ผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่ 15% แอลกอฮอล์ให้การลู่เข้าที่เร็วที่สุดแต่มีความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่ามากที่สุด อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิการกลั่นของแบบจำลองที่ 15% แอลกอฮอล์ที่ได้มานั้นได้ถูกทำให้เป็นค่าเฉลี่ยก่อนนำไปใช้ในการประมาณค่า ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิการกลั่นจริงที่ 15% แอลกอฮอล์ (ภาคผนวก ฎ) เกิดการแกว่งของอุณหภูมิมากอันมีสาเหตุมาจากสารตั้งต้นในการกลั่นมีปริมาณแอลกอฮอล์น้อย จุดเดือดของสารตั้งต้นจึงสูงกว่าค่าอุณหภูมิ set point ทำให้วาว์ลควบคุมไอน้ำที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นมีการเปิด-ปิดตลอดเวลาหลังจากอุณหภูมิถึงจุด set point แล้ว สำหรับแบบจำลองที่ 25 และ 35% แอลกอฮอล์การลู่เข้าจะช้าลงตามลำดับแต่เกิดความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่ 15% แอลกอฮอล์เพราะอุณหภูมิการกลั่นของแบบจำลองที่ 25 และ 35% แอลกอฮอล์เป็นอุณหภูมิการกลั่นจริงที่ไม่ได้ผ่านการเฉลี่ย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย