

## บทที่ 3

### การควบคุมและการแปลงโครงสร้างการควบคุมหอกลับ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการกลับ การควบคุมหอกลับ โครงสร้างการควบคุมหอกลับแบบต่างๆ การเลือกโครงสร้างการควบคุมหอกลับโดยการพิจารณาการกระทบระหว่าง ลัพควบคุมด้วยเกนอะเรย์สัมพัทธ์และความไวต่อการรบกวน ในส่วนท้ายได้แสดงวิธีการ แปลงโครงสร้างควบคุมหอกลับทั้งเชิงสภาวะคงที่และไดนามิก

#### 3.1 ความรู้เกี่ยวกับการกลับและการควบคุมหอกลับ

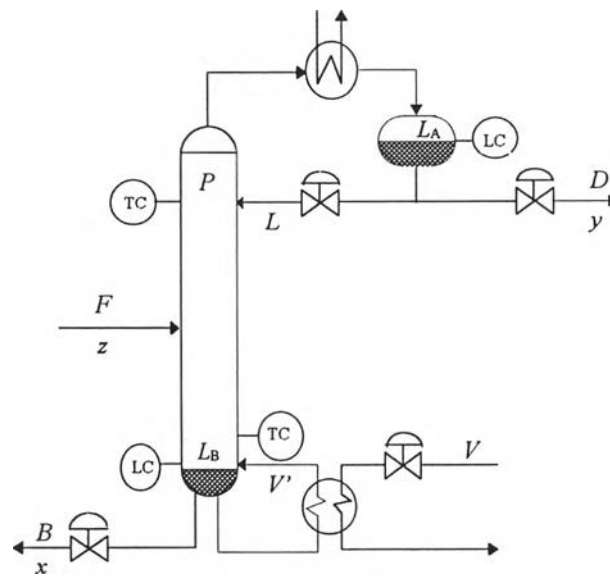
หอกลับ เป็นหน่วยกระบวนการแยกสารผสมที่มีส่วนผสมสองชนิดขึ้นไปเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ควบคุมสูงมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างจุดเดือด และค่าการระเหย (Volatility) ของสารบริสุทธิ์ที่เป็นส่วนประกอบในสารผสม ความสามารถในการกลับแยกขึ้นกับค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative volatility) ของสารผสมและจะสามารถกลับแยกได้ง่ายถ้าค่าการระเหยสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างหอกลับแบบง่าย ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องมือที่สำคัญได้แก่ เครื่องควบแน่น (Condenser), ถังรองรับของเหลวยอดหอ (Reflux drum;  $L_A$ ), ถังรองรับของ

เหลวฐานหอ (Bottom sump;  $L_B$ ) และรีบอยเลอร์ (Reboiler) เมื่อสารผสมถูกป้อนเข้าในหอกลั่น จะได้รับพลังงานความร้อนจากรีบอยเลอร์ทำให้สารผสมกลายเป็นไอ สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาและจุดเดือดต่ำกว่า จะลอยขึ้นส่วนยอดหอผ่านเข้าเครื่องควบแน่น กลายเป็นของเหลวไหลลงถึงรองรับของเหลวยอดหอ บางส่วนถูกแยกออกเป็นผลิตภัณฑ์ยอดหอ (Top product หรือ Distillate;  $D$ ) และส่วนที่เหลือจะป้อนกลับเข้าหอกลั่นที่เรียกว่ากระแสดีสติลเลต ส่วนไอของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดเดือดสูงกว่าจะสะสมในส่วนฐานหอ บางส่วนจะถูกดึงออกเป็นผลิตภัณฑ์ฐานหอ (Bottom product;  $B$ ) ทุกๆ เทอร์รี่จะมีของเหลวไหลลงมาจากเทอร์รี่ด้านบนและมีไอไหลผ่านรูของเทอร์รี่จากเทอร์รี่ที่อยู่ล่าง เกิดการถ่ายเทมวลสารและพลังงานระหว่างไอกับของเหลวที่ไหลสวนทางกัน มีการกระจายของสาร โมเลกุลเบาและโมเลกุลหนักโดยสาร โมเลกุลเบาจะกระจายในเทอร์รี่ส่วนยอดหอมากและสัดส่วนลดลงในเทอร์รี่ที่ต่ำลงไป สาร โมเลกุลหนักจะกระจายที่เทอร์รี่ด้านฐานหอมากกว่าและจะลดลงในเทอร์รี่ส่วนยอดหอ

### 3.1.1 ดีกรีความอิสระ (Degree of Freedom)

ดีกรีความอิสระของกระบวนการใดๆ หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ต้องควบคุม โดยทั่วไปจะหาดีกรีความอิสระของกระบวนการจากจำนวนตัวแปรทั้งหมดในกระบวนการนั้น ลบด้วยสมการอิสระ (Independent equations) W.L.Luyben ได้เสนอวิธีหาค่าดีกรีความอิสระไว้ว่า ดีกรีความอิสระเท่ากับจำนวนของวาล์วควบคุมที่ติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยที่ไม่มีวาล์วควบคุมสองตัวอยู่ในตำแหน่งที่อนุกรมกัน จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า มีวาล์วควบคุม 5 ตัวติดตั้งที่กระแสไหลต่างๆ ได้แก่ รีฟลักซ์ (Reflux หรือ  $L$ ), ดีสติลเลต (Distillate หรือ  $D$ ),



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างหอกกลั่นอย่างง่ายและตัวแปรต่างๆ

กระแสน้ำเย็น (Cooling water stream หรือ  $CW$ ), กระแสไอน้ำ (Vapor stream หรือ  $V$ ) และ กระแสผลิตภัณฑ์ฐานห่อ (Bottom product หรือ  $B$ ) และไม่อนุกรมกัน ดังนั้น มีค่าดีกรีความอิสระเท่ากับ 5

เพื่อให้การทำงานของหอกกลั่นดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จะต้องควบคุมตัวแปรอินเวนทอรี (Inventories controlled variables) ต่างๆ คือ ระดับของเหลวถังพักยอดห่อ ( $L_A$ ), ระดับของเหลวถังพักของเหลวฐานห่อ ( $L_B$ ), และความดันในห่อ ( $P$ ) เมื่อลบจำนวนตัวแปรอินเวนทอรีทั้งสามออกจากจำนวนวาล์วควบคุมตัวแปรปรับ จะเหลือตัวแปรและวาล์วควบคุมอยู่อย่างละสองตัว คือ ผลิตภัณฑ์ยอดห่อ ( $y$ ) และผลิตภัณฑ์ฐานห่อ ( $x$ ) ดังนั้น ดีกรีความอิสระของหอกกลั่น 1 หอจึงเท่ากับ 2 จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะเป็นการกลั่นแบบ 2 ส่วนประกอบ (Binary distillation) หรือการกลั่นแบบหลายส่วนประกอบ (Multicomponent distillation) ก็จะมีดีกรีความอิสระเท่ากับ 2 เหมือนกัน

### 3.1.2 ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables)

การเลือกตัวแปรควบคุมที่เป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับดีกรีความอิสระ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

- ก. ควบคุมส่วนผสมของสารโมเลกุลหนัก (Heavy-key impurity) ในผลิตภัณฑ์
- ข. ควบคุมส่วนผสมของสารโมเลกุลเบา (Light-key impurity) ในผลิตภัณฑ์ฐานหอ
- ค. ควบคุมอุณหภูมิส่วนยอดหอและส่วนฐานหอ (Rectifying and stripping section)
- ง. ควบคุมอุณหภูมิตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งด้วยอัตราไหลรีฟลักซ์
- จ. ควบคุมอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ยอดหอด้วยอัตราไหลไอน้ำที่ไหลเข้ารีบอยเลอร์
- ฉ. ควบคุมอุณหภูมิตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งด้วยอัตราส่วนรีฟลักซ์ (อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของรีฟลักซ์กับดิสทิลเลต หรือ  $L/D$ )

โดยทั่วไปมักเลือกตัวแปรควบคุมในกลุ่ม ข. เนื่องจากสามารถทำการวัดและควบคุมได้ง่าย อีกทั้งอุปกรณ์วัดมีราคาไม่แพงนัก แต่จะเห็นได้ว่าสามารถทำการควบคุมตัวแปรควบคุมเพียงตัวเดียวก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์หรืออุณหภูมิ

### 3.1.3 ตัวแปรปรับ (Manipulated Variables)

มีตัวแปรปรับพื้นฐานที่สำคัญ 2 ตัวที่สามารถควบคุมส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ คือ การไหลแยกของกระแสน้ำ (Feed split) และการกำหนดแฟรคชัน (Fractionation) ดังนี้

- ก. การไหลแยกของกระแสน้ำ (Feed splitting) เป็นการกำหนดสัดส่วนการไหลของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอและฐานหอ ถ้ากำหนดให้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ยอดหอมาก จะทำให้

ความบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์ยอดหอลดลง แต่กลับเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ฐานหอ และในทางกลับกันถ้าเพิ่มสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ฐานหอมากขึ้น จะเป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอแต่ทำให้ความบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์ฐานหอลดลง และตัวแปรปรับที่สามารถกำหนดการไหลแยกของกระแสป้อน คือ  $D$  และ  $B$

ข. การกำหนดเฟรคชัน (Fractionation) เป็นการกำหนดปริมาณของพลังงานที่ใช้ในหอกลั่น ถ้าเพิ่มอัตราส่วนรีฟลักซ์จะทำให้ใช้ไอน้ำมากขึ้น แต่เป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ทั้งยอดหอและฐานหอ ตัวแปรปรับที่ใช้กำหนดเฟรคชัน ได้แก่ อัตราส่วนไอน้ำต่อกระแสป้อน ( $V/F$ ) และอัตราส่วนรีฟลักซ์ต่อกระแสป้อน ( $L/F$ ) เป็นต้น

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่ามียาล์วควบคุมอยู่ 5 ตัว ของกระแสต่างๆ ที่กำหนดให้เป็นตัวแปรปรับ ได้แก่ อัตราไหลดิสทิลเลต ( $D$ ), กระแสผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ ), กระแสรีฟลักซ์ ( $L$ ), กระแสน้ำเย็น ( $CW$ ) เข้าเครื่องควบแน่นและกระแสไอน้ำเข้าหม้อต้มซ้ำ ( $I$ )

#### 3.1.4 การควบคุมความดัน (Pressure Control)

ถ้าความดันหอต่ำ ค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative volatility) จะสูงขึ้น การแยกของสารผสมจะง่ายขึ้น แต่เมื่อความดันสูงขึ้นค่าการระเหยสัมพัทธ์จะลดลง การแยกของสารผสมจะยากขึ้น ดังนั้นจะต้องควบคุมความดันภายในหอกลั่นให้คงที่ตลอดช่วงการทำงาน การกลั่นที่สภาวะความดันต่ำจะลดปริมาณการใช้พลังงานความร้อน ไม่ว่าจะเป็นการกลั่นที่สภาวะใดสิ่งสำคัญจะต้องควบคุมไม่ให้ความดันมีการเปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าความดันลดลงอย่างรวดเร็วจะเกิดการแฟลช (Flashing) ของของเหลวบนเทรย์ ทำให้อัตราการ

เกิดไอสูงเกินไป จนเกิดการท่วม (Flooding) ของของเหลวในหอกถัน แต่ถ้าความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้อัตราการควบแน่นเพิ่มสูงขึ้น อัตราไหลของไอในหอกจะลดลงสามารถเกิดการวิปี่ง (Weeping) ส่งผลให้ของเหลวที่ควบแน่นจะไหลกลับเข้าหอกเพิ่มขึ้น จะเกิดการคัมปีง (Dumping) หรือของเหลวไหลลงบนเทรย์มากเกินไป การควบคุมความดันภายในหอกถัน สามารถควบคุมโดยอัตราควบแน่นของไอในเครื่องควบแน่น ซึ่งมีหลายวิธี ดังต่อไปนี้

ก. ควบคุมอัตราไหลสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น ซึ่งได้แก่ กระแสน้ำเย็น หรือสารพวกรีฟริเกอแรนท์ (Refrigerant) หรือ ถ้าเป็นเครื่องควบแน่นแบบใช้อากาศ จะทำการปรับความเร็วของพัดลม

ข. เครื่องควบแน่นแบบเวนท์บลีด (Vent-bleed condensor) จะป้อนแก๊สเฉื่อยเข้าไป หรือปล่อยแก๊สออกจากระบบ โดยใช้ระบบวาล์วคู่อัลสปลิตเรนจ์ (Dual split-range valve) หรือวาล์วควบคุมสองตัว ตัวแรกจะปรับกระแสของแก๊สเฉื่อย ตัวที่สองจะปรับกระแสของแก๊สที่ปล่อยออกจากระบบ แต่สภาวะปกติวาล์วทั้งสองตัวจะปิด

ค. ควบคุมไอโดยตรง โดยการติดตั้งวาล์วควบคุมในกระแสไอที่ออกจากหอกก่อนไหลเข้าเครื่องควบแน่น แต่ใช้กับหอกถันที่มีขนาดเล็ก

ง. แบบท่วม (Flooded) โดยการควบคุมระดับของของเหลวจากการควบแน่นที่อยู่ในเครื่องควบแน่น โดยระดับของเหลวจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิวสัมผัสที่ไอควบแน่น ถ้าระดับของเหลวสูง พื้นที่ผิวจะน้อยอัตราการควบแน่นจะต่ำ ความดันจะสูงขึ้น

จ. แบบบายพาสไอร้อน (Hot-vapor bypass) โดยมีไอบางส่วนไหลเข้าถังรองรับของ

เหลวยอดหอโดยไม่ผ่านเครื่องควบแน่น ทำให้มีการสัมผัสระหว่างไอร้อนกับของเหลว

เย็นจึงเกิดการควบแน่นอีกครั้งหนึ่งที่บริเวณผิวสัมผัส

จ. แบบความดันลอยตัว (Floating pressure) โดยใช้ตัวควบคุมแบบวาล์วโพสิชัน (Valve-position controller) และให้วาล์วควบคุมในกระแสน้ำเย็นเปิดเกือบหมด และตัวควบคุมความดันจะเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์อย่างช้าๆ

### 3.1.5 การควบคุมระดับของเหลวในถังรองรับของเหลวยอดหอและฐานหอ

การควบคุมระดับของเหลวในถังพักของเหลวยอดหอและฐานหอ มีการพิจารณาตามลักษณะ โครงสร้างและสภาพการทำงานของหอกลั่น ดังนี้

ก. ถ้าหอกลั่นเป็นกระบวนการที่อยู่ในอนุกรมของสายการผลิต จะมีความสำคัญในการควบคุมระดับโรงงาน (Plant wide control) เนื่องจากสามารถรองรับและจัดการต่อผลกระทบจากตัวแปรรบกวน โดยให้ดิสทิลเลต ( $D$ ) ควบคุมระดับถังรองรับของเหลวยอดหอ ( $L_A$ ) และกระแสผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ ) ควบคุมระดับของเหลวฐานหอ ( $L_B$ )

ข. ถ้าอัตราส่วนรีฟลักซ์ (Reflux ratio) มีค่ามากกว่า 5 (หรือ  $L/D$  มากกว่า 5) ควรให้กระแสรีฟลักซ์ควบคุมระดับถังรองรับของเหลวยอดหอ และให้ไอน้ำที่ไหลเข้ารีบอยเลอร์ควบคุมระดับของเหลวฐานหอ

### 3.2 โครงสร้างการควบคุมหอกลั่น (Distillation Column Control Structure)

หอกลั่น 1 หอ มีลู่วควบคุมต่างๆ ได้แก่ ลู่วควบคุมผลิตภัณฑ์ และลู่วควบคุมอิน

เวทอรี สามารถใช้ตัวแปรปรับกลุ่มต่างๆ จัดรูปแบบ โครงสร้างการควบคุมได้หลายแบบ แต่  
 ละครูปแบบจะมีคุณลักษณะ (Characteristic) ลดการกระทบระหว่างลู่วควบคุมและปีดภาระจาก  
 ตัวแปรรบกวนที่แตกต่างกัน จากการวิจัยที่ผ่านมา ได้มีผู้ศึกษาในการเลือก โครงสร้างการควบคุม  
 หอกลับกันอย่างมากมาย

โครงสร้างการควบคุมของหอกลับ เป็นรูปแบบของการเข้าคู่ระหว่างตัวแปรควบคุม  
 กับตัวแปรปรับ ชื่อ โครงสร้างการควบคุมคือตัวแปรปรับที่เข้าคู่กับตัวแปรควบคุมผลิตภัณฑ์  
 ยอดหอ ( $y$ ) และผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $x$ ) เช่น โครงสร้างการควบคุม  $LV$  กระแสรีฟลักซ์ ( $L$ ) จะ  
 ควบคุม  $y$  และกระแสไอน้ำ ( $V$ ) จะควบคุม  $x$  เป็นต้น จำนวนของโครงสร้างการควบคุมจะ  
 สัมพันธ์กับจำนวนตัวแปรควบคุม ดังที่กล่าวแล้วว่า หอกลับมีตัวแปรควบคุม 5 ตัว จำนวน  
 โครงสร้างการควบคุมจะเท่ากับ  $5!$  แบบหรือ 120 แบบ การพิจารณาเบื้องต้นในการเลือก  
 โครงสร้างการควบคุม ได้แก่

ก. พิจารณาความเหมาะสมทางไดนามิกการควบคุม เนื่องจากความดันไอกภายในหอ  
 กลับสามารถควบคุมโดยการควบคุมอัตราการควบแน่นของไอในเครื่องควบแน่น ดังนั้น จึง  
 กำหนดให้กระแสน้ำเย็นที่ไหลเข้าเครื่องควบแน่น ( $CW$ ) ควบคุมความดัน ( $P$ ) จากจำนวนตัว  
 แปรควบคุม 5 ตัว จึงเหลือตัวแปรควบคุม 4 ตัวและตัวแปรปรับ 4 ตัว จึงมีวิธีการเข้าคู่  $4!$  วิธี  
 หรือ 24 วิธี อีกประเด็นหนึ่ง การควบคุมส่วนยอดหอ (ลู่วควบคุม  $y$  และ  $L_A$ ) ควรเลือกเข้าคู่  
 กับตัวแปรปรับส่วนยอดหอเหมือนกัน ( $L$  และ  $D$ ) ทำนองเดียวกัน การควบคุมส่วนฐานหอ  
 (ลู่วควบคุม  $x$  และ  $L_B$ ) ควรเลือกเข้าคู่กับตัวแปรปรับที่อยู่ฐานหอ ( $V$  และ  $B$ ) เพื่อเป็นการลด



เคตไทม์ให้น้อยลงและมีความเหมาะสมทางไดนามิก ดังนั้น สามารถตัดโครงสร้างการควบคุมที่ไม่เหมาะสมออกไป (ได้แก่  $VL$ ,  $VD$ ,  $BL$  และ  $BD$  และลูปควบคุมระดับ  $L_A$  และ  $L_B$  ที่สัมพันธ์กัน) จึงเหลือโครงสร้างการควบคุม 4 แบบ  $DV$ ,  $DB$ ,  $LV$  และ  $LB$

ข. พิจารณาสมการมวลสมดุลสถานะคงที่ อัตราไหลกระแสเป็อน ( $F$ ) จะเท่ากับผลรวมของดิสทิลเลต ( $D$ ) และผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ ) หรือ  $F = D+B$  ในรูปตัวแปรผลต่าง (Deviation variable) ถ้าให้อัตราไหลกระแสเป็อน ( $F$ ) คงที่หรือ  $F = 0$  ดังนั้น  $D = -B$  ดังนั้น ถ้าให้  $D$  กับ  $B$  เป็นตัวปรับพร้อมกัน จะทำให้เกิดการกระทบระหว่างลูปควบคุม จึงตัดโครงสร้าง  $DB$  ออกไป จาก ก. จึงเหลือโครงสร้างการควบคุมที่เป็นไปได้ คือ  $LV$ ,  $LB$  และ  $DV$

ค. ตัวแปรปรับแบบประกอบ (Composite variable) จาก ก. และ ข. ได้แสดงวิธีการเลือกตัวแปรปรับจากการพิจารณาทางกายภาพ ในหัวข้อนี้จะได้เสนอวิธีการหาตัวแปรปรับแบบอื่นๆ ซึ่งมีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาตัวแปรปรับแบบประกอบ โดยนำเอาตัวแปรปรับตามลักษณะเดิมมาจัดรูปแบบใหม่ ทั้งอยู่ในรูปแบบอัตราส่วน, แบบผลบวกและผลสมระหว่างผลบวกกับอัตราส่วน

- แบบอัตราส่วน สามารถหาจำนวนตัวแปรแบบอัตราส่วนได้จาก  ${}^4C_2$  หรือ 6 แบบ ได้แก่  $D/V$ ,  $D/L$ ,  $D/B$ ,  $V/L$ ,  $V/B$  และ  $L/B$  แต่ตัวแปร  $D/B$  ไม่สามารถควบคุมได้จากเหตุผลในข้อ ข. เนื่องจากไอที่ผ่านเข้าเครื่องควบแน่น ( $V$ ) จะเท่ากับผลรวมของกระแสรีฟลักซ์ ( $L$ ) กับกระแสดิสทิลเลต ( $D$ ) ดังสมการ (3.1)

$$V = L + D \quad (3.1ก)$$

$$\frac{V}{L} = 1 + \frac{D}{L} \quad (3.1\text{ข})$$

$$\frac{V}{D} = \frac{L}{D} + 1 \quad (3.1ค)$$

จะเห็นว่าตัวแปร  $V/D$ ,  $L/D$  และ  $D/L$  จะสมมูลกัน จึงต้องเลือกตัวใดตัว

หนึ่งและตัดอีกสองตัวออกไป ถ้าเลือกตัวแปร  $L/D$  และเมื่อรวมกับตัวแปร  $D/F$ ,  $L/F$  และ  $V/F$

ก็จะมีตัวแปรปรับแบบอัตราส่วนทั้งหมด 6 ตัว ดังนี้

$$\frac{L}{D}, \frac{L}{B}, \frac{V}{B}, \frac{D}{F}, \frac{L}{F} \text{ และ } \frac{V}{F} \quad (3.2)$$

• ตัวแปรปรับผลบวก (Summation) เช่น  $L+D$  หรือ  $V$  ตัวอย่าง เช่น เมื่อไอที

ความแน่นหรือ  $V$  ไหลลงถึงรองรับของเหลว ระดับของเหลวในถังจะสูงขึ้น ดังนั้นจะต้องให้

ตัวควบคุมระดับส่งสัญญาณควบคุมออกไปปรับทั้งวาล์วควบคุมเพื่อลดระดับที่สูงขึ้น แต่ตัว

ควบคุมจะสามารถลดระดับได้ทั้งหมด สัญญาณเอาท์พุทจะต้องมีค่า  $L+D$  จะเห็นได้ว่า ถ้า

กำหนดให้ตัวแปรปรับเป็น  $L+D$  ก็จะสามารถลดระดับที่เพิ่มขึ้นในถังได้ โครงสร้างการควบคุม

ที่นำตัวแปรบวกไปใช้ ได้แก่  $D/(L+D), V$  และ  $D/(L+D), V/B$  เป็นต้น แต่ถ้าเป็นโครงสร้าง

การควบคุม  $LV$  ตัวควบคุมระดับจะคำสั่งไปปรับเพียงวาล์วควบคุม  $D$  เท่านั้น หรือโครงสร้าง

การควบคุม  $DV$  ตัวควบคุมระดับจะคำสั่งปรับเพียงวาล์วควบคุม  $L$  ซึ่งไม่สามารถจัดการกับ

ผลกระทบจากระดับของเหลวของถังที่เพิ่มขึ้นได้

• แบบผสมระหว่างแบบอัตราส่วนและแบบผลบวก เช่น โครงสร้างการควบคุม

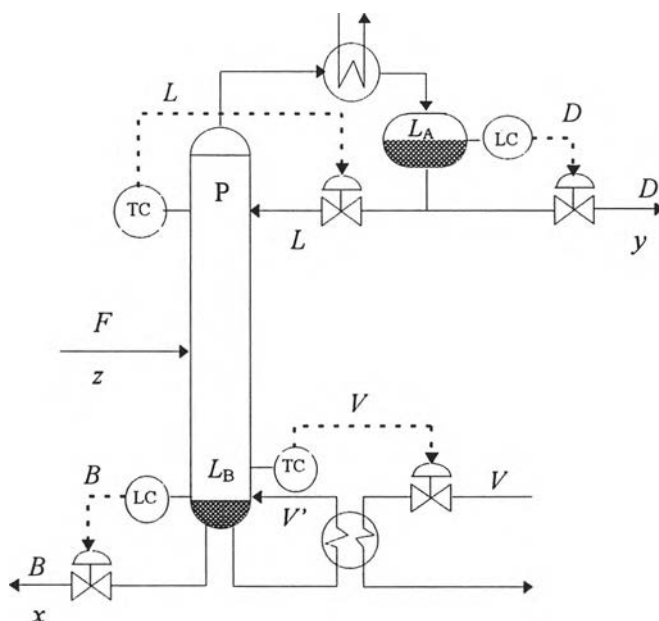
คุม  $[D/(L+D), V]$  และ  $[D/(L+D), V/B]$  เป็นต้น

ต่อไป จะยกตัวอย่างการติดตั้งของโครงสร้างการควบคุมหอกลับ 4 แบบ คือ  $LV$ ,  $DV$ ,

$[D/(L+D), V]$  และ  $[D/(L+D), V/B]$

### 3.2.1 โครงสร้างการควบคุมหอกลับ LV

โครงสร้างการควบคุมนี้มักนิยมใช้ควบคุมกับหอกลับทั่วไป โดยกระแสฟลักซ์ ( $L$ ) จะควบคุมส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยอดหอ ( $y$ ) หรืออุณหภูมิยอดหอ ส่วนกระแสไอน้ำ ( $V$ ) จะควบคุมส่วนผสมผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $x$ ) หรืออุณหภูมิฐานหอ กระแสดีสทิลเลต ( $D$ ) จะควบคุมระดับในถังรองรับของเหลวยอดหอ ( $L_A$ ) อัตราการไหลผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ ) ควบคุมระดับของเหลวฐานหอ ( $L_B$ ) แผนผังการติดตั้งโครงสร้างการควบคุม LV แสดงในรูปที่ 3.2



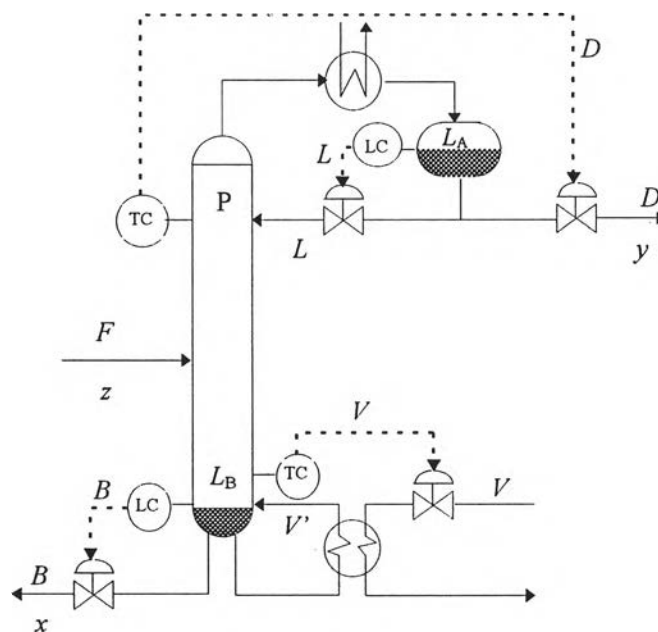
รูปที่ 3.2 การติดตั้งของโครงสร้างการควบคุมหอกลับ LV

แบบจำลองไดนามิกที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมของแต่ละโครงสร้าง จะเป็นแบบ 2 ตัวแปรควบคุม 2 ตัวแปรปรับ ในรูปแบบเมทริกซ์  $2 \times 2$  แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ และตัวแปรควบคุมกับตัวแปรรบกวน เช่น โครงสร้างการควบคุม LV

$$\begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{yL}^{LV} & G_{yV}^{LV} \\ G_{xL}^{LV} & G_{xV}^{LV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{yF}^{LV} & G_{yz}^{LV} \\ G_{xF}^{LV} & G_{xz}^{LV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 โครงสร้างการควบคุมหอกลับ DV

ดังรูปที่ 3.3 โครงสร้างลูปควบคุมยอดหอจะมีลักษณะต่างจากโครงสร้าง LV โดย อัตราการไหลดีสทิลเลต ( $D$ ) จะควบคุมส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยอดหอ ( $y$ ) ส่วนอัตราไหลไอน้ำ ( $V$ ) ควบคุมส่วนผสมผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $x$ ) อัตราการไหลรีฟลักซ์ ( $L$ ) ควบคุมระดับในถังพักรองรับของเหลว ( $L_A$ ) อัตราไหลผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ ) ควบคุมระดับของเหลวฐานหอ ( $L_B$ )



รูปที่ 3.3 การติดตั้งของโครงสร้างการควบคุมหอกลับ DV

แบบจำลองไดนามิกของโครงสร้างการควบคุม DV คือ

$$\begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{yD}^{DV} & G_{yV}^{DV} \\ G_{xD}^{DV} & G_{xV}^{DV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{yF}^{DV} & G_{yz}^{DV} \\ G_{xF}^{DV} & G_{xz}^{DV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

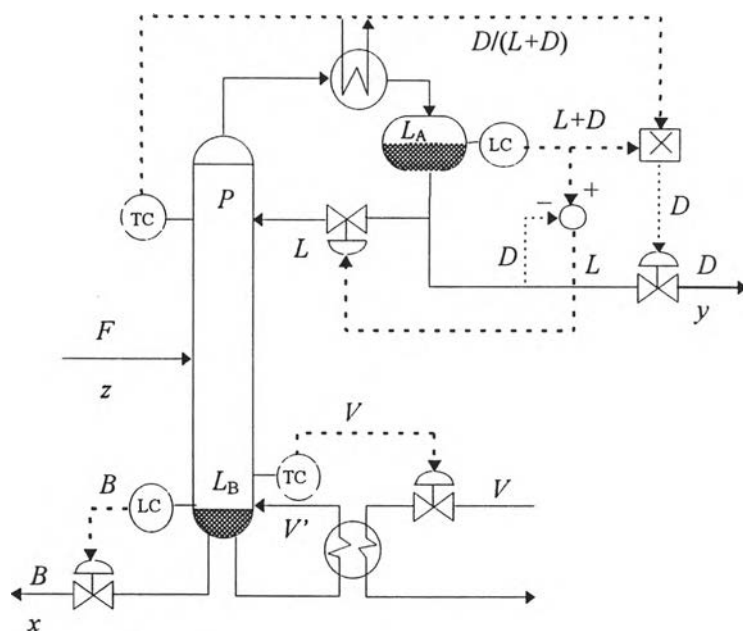
### 3.2.3 โครงสร้างการควบคุมหอกลับ $D/(L+D), V$

พัฒนาโดย C.J.Ryskamp (1980) ดังในรูปที่ 3.4 ตัวควบคุมของลูปควบคุม  $y$  จะส่งเอาต์พุตอัตราส่วน  $D/(L+D)$  ไปยังหน่วยคูณ (Multiply unit) หน่วยคูณก็รับอินพุต  $L+D$  อีกหนึ่งตัวซึ่งเป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมระดับถึงพักของเหลวยอดหอ ทั้งสองสัญญาณจะคูณกันได้เอาต์พุตออกจากหน่วยคูณ  $D$  ไปปรับวาล์วควบคุมกระแสคิสติลเลต ขณะเดียวกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสคิสติลเลต  $D$  ก็จะไปลบจากเอาต์พุตของตัวควบคุมระดับถึงพักของเหลวยอดหอ  $L+D$  ที่หน่วยซับแทรกเตอร์ (Subtractor unit) ซึ่งเป็นตัวคีย์เพลอร์ ได้ผลลัพธ์  $L$  เป็นเอาต์พุต ไปปรับวาล์วควบคุมกระแสรีฟลักซ์ เกนของตัวซับแทรกเตอร์เท่ากับอัตราส่วนระหว่างช่วง (Range) ของโฟลว์มิเตอร์กระแสคิสติลเลต ( $D$ ) กับ โฟลว์มิเตอร์กระแสรีฟลักซ์ ( $L$ ) จะเห็นได้ว่า เอาต์พุตจากตัวควบคุมระดับถึงพักของเหลวยอดหอจะทำการปรับทั้งวาล์วควบคุมกระแสรีฟลักซ์และคิสติลเลต เพื่อให้  $D/(L+D)$  คงที่ ส่วนระบบควบคุมฐานหอ เครื่องควบคุมส่วนผสมผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $x$ ) จะส่งสัญญาณ  $V$  ไปปรับวาล์วควบคุมกระแสไอน้ำ ส่วนตัวควบคุมระดับของเหลวฐานหอ ( $L_B$ ) จะส่งสัญญาณควบคุม  $B$  ไปปรับวาล์วควบคุมกระแสผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ )

แบบจำลองไดนามิกของโครงสร้างการควบคุม  $D/(L+D), V$

$$\begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{yR}^{RV} & G_{yV}^{RV} \\ G_{xR}^{RV} & G_{xV}^{RV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{yF}^{RV} & G_{yz}^{RV} \\ G_{xF}^{RV} & G_{xz}^{RV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

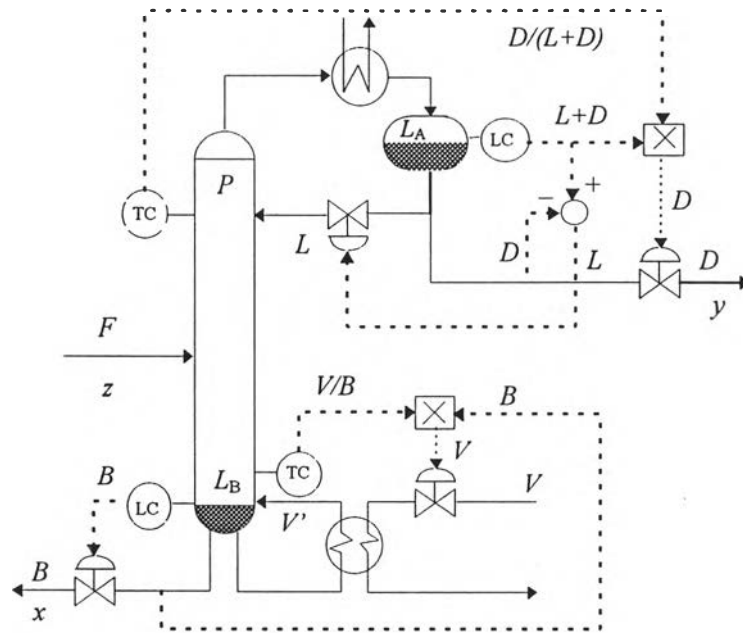
เมื่อ  $R$  คือ  $D/(L+D)$



รูปที่ 3.4 การติดตั้งของโครงสร้างการควบคุมหอกลิ้น  $D/(L+D), V$

### 3.2.4 โครงสร้างการควบคุมหอกลิ้นแบบ $D/(L+D), V/B$

Takamutsu, Hashimoto และ Hashimoto (1982, 1984) และ Shinsky (1984) ได้พัฒนาจากโครงสร้างการควบคุม  $D/(L+D), V$  ของ C.J.Ryskamp ซึ่งดูหอกลิ้นส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยอดหอ ( $y$ ) และระดับถังรองรับของเหลวยอดหอ ( $L_A$ ) เหมือนกับโครงสร้าง  $D/(L+D), V$  แตกต่างกันที่ระบบควบคุมฐานหอ โดยที่ตัวควบคุมส่วนผสมผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $x$ ) จะส่งสัญญาณเอาต์พุต  $V/B$  ออกไปยังหน่วยคูณ ซึ่งหน่วยคูณจะรับสัญญาณ  $B$  จากโพลวีมิเตอร์ ได้เอาต์พุตของหน่วยคูณเป็น  $V$  ส่งไปปรับวาล์วควบคุมกระแสไอน้ำเข้ารีบอยเลอร์ ส่วนตัวควบคุมระดับของเหลวฐานหอจะส่งสัญญาณเอาต์พุต  $B$  ไปปรับวาล์วควบคุมอัตราไหลกระแสผลิตภัณฑ์ฐานหอแผนผังการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การติดตั้งของโครงสร้างการควบคุมหอกลิ้น  $D/(L+D)$ ,  $V/B$

แบบจำลองไดนามิกของโครงสร้างการควบคุม  $D/(L+D)$ ,  $V/B$  คือ

$$\begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{RV'} & G^{yV'} \\ G^{yR} & G^{yV'} \\ G^{RV'} & G^{xV'} \\ G^{xR} & G^{xV'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G^{yF} & G^{yz} \\ G^{xR} & G^{xz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

โดยที่  $R$  คือ  $D/(L+D)$

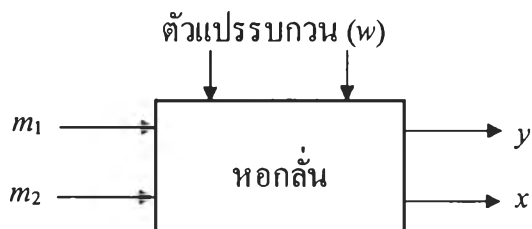
$V'$  คือ  $V/B$

### 3.3 ระบบควบคุมกระบวนการที่มีตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับหลายตัว

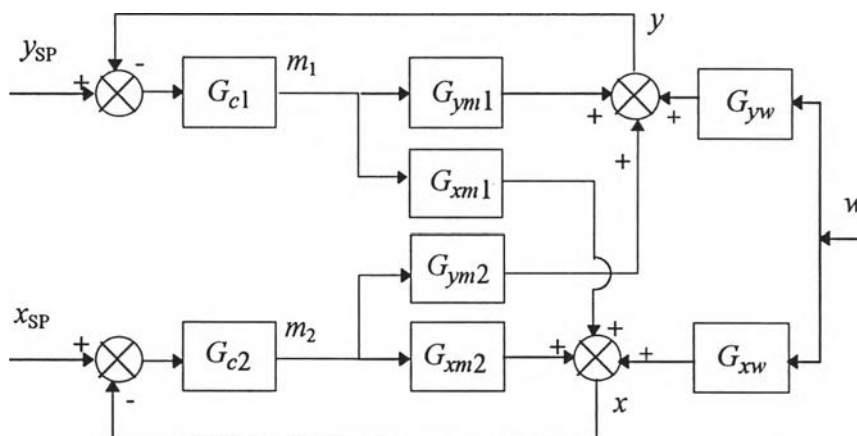
#### (Multiple-Input Multiple-Output Control System)

หอกลิ้น เป็นกระบวนการที่มีตัวแปรควบคุมหลายตัว จำนวนโครงสร้างการควบคุมจะขึ้นกับจำนวนตัวแปรควบคุม (ซึ่งสมมติให้มีจำนวนเท่ากับตัวแปรปรับ) รูปแบบของหอกลิ้นที่ศึกษานี้ ได้กำหนดให้มีการควบคุมผลิตภัณฑ์ยอดหอกและฐานหอกเท่านั้น ดังที่ได้กล่าว

ข้างต้น รูปแบบของระบบควบคุมจึงเป็นแบบ 2x2 คือ สองตัวแปรควบคุม ( $y$  และ  $x$ ) กับสองตัวแปรปรับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพรวมของระบบในการควบคุมหอกลับ



รูปที่ 3.7 ระบบควบคุมสองตัวแปรควบคุมสองตัวแปรปรับ

ซึ่ง  $m_1$  และ  $m_2$  เป็นตัวแปรปรับ ที่เลือกเข้าคู่กับตัวแปรควบคุม  $y$  และ  $x$  ส่วนตัวแปรรบกวน ( $w$ ) เช่น อัตราไหลกระแสเป็อน ( $F$ ) และส่วนผสมกระแสเป็อน ( $z$ )

การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างการควบคุมหอกลับ จะต้องทราบความสัมพันธ์หรือทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันระหว่างตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับ ได้แก่  $y$  กับ  $m_1$ ,  $y$  กับ  $m_2$ ,  $y$  กับ  $w$ ,  $x$  กับ  $m_1$ ,  $x$  กับ  $m_2$  และ  $x$  กับ  $w$  ของแต่ละโครงสร้างการควบคุม ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของโครงสร้างทั่วไปตามรูปที่ 3.7 ได้แก่



$$\frac{y(s)}{m_1(s)} = G_{ym_1}(s) \quad \frac{x(s)}{m_1(s)} = G_{xm_1}(s) \quad (3.7)$$

$$\frac{y(s)}{m_2(s)} = G_{ym_2}(s) \quad \frac{x(s)}{m_2(s)} = G_{xm_2}(s) \quad (3.8)$$

$$\frac{y(s)}{w(s)} = G_{yw}(s) \quad \frac{x(s)}{w(s)} = G_{xw}(s) \quad (3.9)$$

ถ้าสถานะ  $m_1$ ,  $m_2$  และ  $w$  เปลี่ยนแปลงพร้อมกัน จะสามารถรู้ผลการเปลี่ยนแปลงของ  $y$  และ  $x$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$y(s) = G_{ym_1}(s)m_1(s) + G_{ym_2}(s)m_2(s) + G_{yw}(s)w(s) \quad (3.10)$$

$$x(s) = G_{xm_1}(s)m_1(s) + G_{xm_2}(s)m_2(s) + G_{xw}(s)w(s) \quad (3.10)$$

หรือเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ คือ

$$C(s) = G(s)M(s) + G_w(s)w(s) \quad (3.12)$$

โดยที่

$$C(s) = \begin{bmatrix} y(s) \\ x(s) \end{bmatrix} \quad G(s) = \begin{bmatrix} G_{ym_1}(s) & G_{ym_2}(s) \\ G_{xm_1}(s) & G_{xm_2}(s) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad M(s) = \begin{bmatrix} m_1(s) \\ m_2(s) \end{bmatrix}$$

$$G_w(s) = \begin{bmatrix} G_{yw}(s) \\ G_{xw}(s) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad w(s) = F(s) \quad \text{หรือ} \quad w(s) = z(s) \quad (3.13)$$

เพื่อง่ายต่อการพิจารณา จะสมมติให้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันขององค์ควบคุมสุดท้าย

(Final control element) และทรานส์มิเตอร์มีค่าเท่ากับหนึ่ง เมื่อเปลี่ยนค่า  $y_{SP}$  ใหม่ จะมีผลที่

ตามมา คือ

ก. ตัวควบคุม  $G_{C1}$  จะส่งเอาท์พุท  $m_1$  ไปปรับให้  $y$  กลับสู่ค่าเซ็ทพอยท์ ขณะเดียวกัน

$m_1$  จะกระทบต่อ  $x$  อีกเช่นกัน

ข.  $x$  จะเคลื่อนออกจากค่าเซ็ทพอยท์  $x_{SP}$  ตัวควบคุม  $G_{C2}$  จะส่งเอาต์พุต  $m_2$  ไปปรับให้

$x$  กลับสู่ค่าเซ็ทพอยท์ ขณะเดียวกัน  $m_2$  จะกระทบต่อ  $y$  อีกด้วย

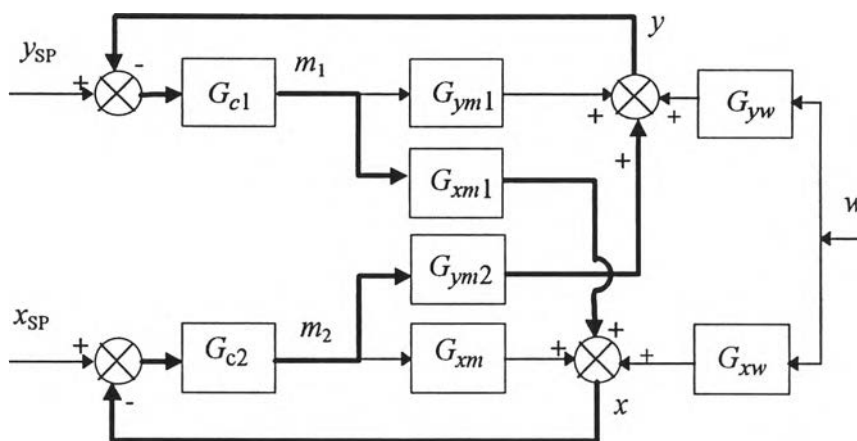
ตัวควบคุมทั้งสองตัว จะส่งเอาต์พุตจนกว่า  $y$  จะเข้าสู่ค่า  $y_{SP}$  ใหม่ ซึ่ง  $m_1$  มีการกระทบต่อ  $y$  โดยตรงและกระทบต่อ  $x$  โดยอ้อมซึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดการกระทบกันระหว่างลูปทั้งสอง

การกระทบกันระหว่างลูป พิจารณาได้ว่า มีลูปป้อนกลับที่สามเพิ่มขึ้น (Hidden

feedback loop) ลูปนี้ประกอบไปด้วย  $G_{C1}$ ,  $G_{ym1}$ ,  $G_{C2}$  และ  $G_{xm1}$  ดังเส้นหนาแสดงในรูปที่ 3.8

ลูปที่สามนี้เป็นสาเหตุให้ระบบเมื่อควบคุมลูปปิดจะมีเสถียรภาพลดลง และทำให้การจูนตัว

ควบคุมยากขึ้น



รูปที่ 3.8 การเกิดลูปป้อนกลับลูปที่สาม (Hidden feedback loop)

ผลลัพธ์อย่างหนึ่ง คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของลูปควบคุมหลักสองลูปแรก ( $y$  กับ  $m_1$

หรือ  $x$  กับ  $m_2$ ) จะเปลี่ยนไปโดยขึ้นกับว่าอีกลูปปิดหรือเปิด

ก. ถ้าลูปควบคุม  $x$  กับ  $m_2$  อยู่สถานะแมนวอลหรือลูปเปิด พบว่า

$$\frac{y(s)}{m_1(s)} = G_{ym_1}(s) \quad (3.14)$$

ข. ถ้าลู่ควบคุม  $x$  กับ  $m_2$  อยู่สถานะอัตโนมัติหรือลูปปิด พบว่า

$$\frac{y(s)}{m_1(s)} = G_{ym_1}(s) - \frac{G_{ym_2}(s)G_{xm_1}(s)G_{c_2}(s)}{1 + G_{c_2}(s)G_{xm_2}(s)} \quad (3.15)$$

ซึ่งเทอมที่เพิ่มขึ้น เป็นเหตุของการกระทบกันระหว่างลู่ สำหรับทรานส์เฟอร์

ฟังก์ชันระหว่าง  $x$  กับ  $m_2$  ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน

นอกจากนี้ สามารถหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่สัมพันธ์ระหว่าง  $y$  และ  $x$  กับ  $y_{sp}$  และ  $x_{sp}$

เมื่อลู่ควบคุมทั้งสองอยู่ที่สถานะลูปปิดได้ดังสมการ

$$y = T_{yy_{sp}} y_{sp} + T_{yx_{sp}} x_{sp} \quad (3.16)$$

$$x = T_{xy_{sp}} y_{sp} + T_{xx_{sp}} x_{sp} \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$T_{yy_{sp}} = \frac{G_{C_1}G_{ym_1} + G_{C_1}G_{C_2} \left[ G_{ym_1}G_{xm_2} - G_{ym_2}G_{xm_1} \right]}{Q} \quad (3.18)$$

$$T_{yx_{sp}} = \frac{G_{C_2}G_{ym_2}}{Q} \quad (3.19)$$

$$T_{xy_{sp}} = \frac{G_{C_1}G_{xm_1}}{Q} \quad (3.20)$$

$$T_{xx_{sp}} = \frac{G_{C_2}G_{xm_2} + G_{C_1}G_{C_2} \left[ G_{ym_1}G_{xm_2} - G_{ym_2}G_{xm_1} \right]}{Q} \quad (3.21)$$

$$Q = \left[ 1 + G_{C_1}G_{ym_1} \right] \left[ 1 + G_{C_2}G_{xm_2} \right] - G_{C_1}G_{C_2}G_{ym_2}G_{xm_1} \quad (3.22)$$

จากสมการ (3.16) และ (3.17) โดยมีประเด็นที่สำคัญคือ

ก. ถ้า  $y_{sp}$  เปลี่ยนค่าไป จะส่งผลกระทบต่อทั้ง  $y$  และ  $x$  เนื่องจาก  $T_{yx_{sp}}(s)$  และ  $T_{xy_{sp}}(s)$

ไม่เท่ากับศูนย์

ข. ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเมื่อลูฟควบคุมเปิด จะมีเทอม  $Q$  เหมือนกัน สามารถหาเสถียร

ภาพของระบบควบคุมได้จากสมการคุณลักษณะ (Characteristic equation)

$$\left[1 + G_{C1} G_{ym1}\right] \left[1 + G_{C2} G_{xm2}\right] - G_{C1} G_{C2} G_{ym2} G_{xm1} = 0 \quad (3.23)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า เสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับตัวควบคุมทั้งสองตัวและ

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันทั้งสอง

กรณีที่  $G_{ym2} = 0$  หรือ  $G_{xm1} = 0$  สมการคุณลักษณะจะได้เป็น

$$\left[1 + G_{C1} G_{ym1}\right] \left[1 + G_{C2} G_{xm2}\right] = 0 \quad (3.24)$$

เสถียรภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับลูฟใดลูฟหนึ่ง สมการคุณลักษณะของระบบจะเป็น

$$\left[1 + G_{C1} G_{ym1}\right] = 0 \quad \text{และ} \quad \left[1 + G_{C2} G_{xm2}\right] = 0 \quad (3.25)$$

ถ้า  $G_{ym2} = 0$  หรือ  $G_{xm1} = 0$  ทำให้ลูฟป้อนกลับลูฟที่สามขาดลง แต่กรณีที่  $G_{ym2} = 0$

หมายความว่า ลูฟควบคุมที่สองไม่มีผลกระทบต่อลูฟที่หนึ่ง แต่ลูฟที่หนึ่งยังมีผลกระทบต่อ

ลูฟที่สอง

### 3.3.1 ระบบควบคุมดีคัปปลิง (Decoupling Control System)

ระบบควบคุมนี้ถูกออกแบบเพื่อลดกระทบกันระหว่างลูฟ โดยได้เพิ่มตัวดีคัปเปิลเลอร์

(Decoupler) ในโครงสร้างระบบควบคุมเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.9 วัตถุประสงค์ของระบบควบคุม

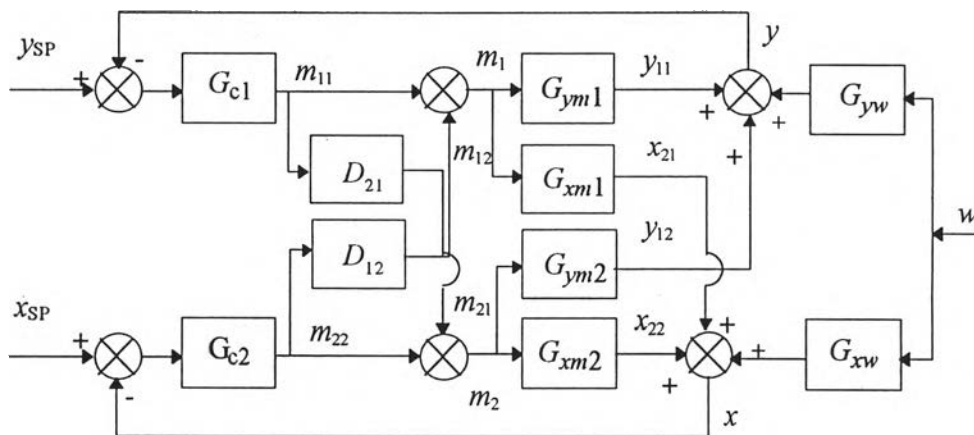
ดีคัปปลิงนี้ ได้แก่

ก. เพื่อลดการกระทบระหว่างลูฟ ซึ่งเสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับลูฟใดลูฟหนึ่ง

ข. การเปลี่ยนแปลงของเซ็ทพอยท์  $y_{sp}$  หรือ  $x_{sp}$  จะไม่มีผลกระทบต่ออีกลูฟหนึ่ง

แต่ดีคัปเปอเรเตอร์ได้อาศัยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ ถ้าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

ไม่ถูกต้อง ดีคัปเปอเรเตอร์ก็ไม่สามารถแก้ไขการกระทบกันระหว่างลูปได้



รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมดีคัปปลิง

วัตถุประสงค์ของการใช้ดีคัปเปอเรเตอร์ เพื่อชดเชยหรือหักล้างการกระทบกันระหว่างลูป

โดยที่  $D_{21}$  จะหักล้าง  $x_{21}$  ที่เป็นผลจาก  $m_1$  กระทบ  $x$  ซึ่งการหักล้างจะเกิดที่ตัวบวก (Summer)

ของ  $x$  ถ้าเอาที่พู่ทของ  $D_{21}$  คือ  $m_{21}$  มีค่าถูกต้องแล้ว จะพบว่า

$$G_{xm1} m_{11} + G_{xm2} m_{21} = 0 \tag{3.26}$$

แทน  $m_{21} = D_{21} m_{11}$  จะได้

$$(G_{xm1} + G_{xm2} D_{21}) m_{11} = 0 \tag{3.27}$$

แต่  $m_{11} \neq 0$  เนื่องจากเป็นเอาที่พู่ทของ  $G_{C1}$  ที่เวลาขณะนั้น ดังนั้น

$$G_{xm1} + G_{xm2} D_{21} = 0 \tag{3.28}$$

ดีคัปเปอเรเตอร์ คือ

$$D_{21} = -\frac{G_{xm1}(s)}{G_{xm2}(s)} \tag{3.29}$$

และพิจารณาได้ทำนองเดียวกัน

$$D_{12} = -\frac{G_{ym_2}(s)}{G_{ym_1}(s)} \quad (3.30)$$

### 3.4 ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างการควบคุมหอกลับแบบต่างๆ

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงข้อพิจารณาที่ใช้ตัดสินในการเลือกโครงสร้างการควบคุมหอกลับของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ การปิดการรบกวนและลดการกระทบระหว่างลูปควบคุม ดังนี้

#### 3.4.1 คุณสมบัติการปิดการรบกวน (Disturbance Rejection Properties)

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน ตัวแปรปรับจะต้องเปลี่ยนไปเพื่อควบคุมให้ตัวแปรควบคุมอยู่ที่เซ็ทพอยท์ ตัวแปรปรับแต่ละแบบ จะมีคุณสมบัติในการปิดการรบกวน (Rejection) ที่เป็นผลกระทบจากตัวแปรรบกวนได้ไม่เท่ากัน ขึ้นกับความไวต่อการรบกวน (Disturbance sensitivity)

P.M.Sandelin, K.E.Haggblom และ K.V.Waller (1991) ได้กล่าวว่า โครงสร้างควบคุมแต่ละแบบมีระดับดีกรีการควบคุมเองได้ (Self-regulating degree) ที่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ความไวต่อการรบกวน (Disturbance sensitivity parameter) เพื่อวัดว่าโครงสร้างควบคุมนั้นๆ มีความไวต่อตัวแปรรบกวนชนิดไหนมากน้อยอย่างไร โดยพารามิเตอร์นี้คำนวณจากค่าสมบูรณของอัตราส่วนระหว่างเกนรบกวนกับไทม์คอนสแตนท์รบกวน หรือ  $\left| \frac{K_w}{\tau_w} \right|$  ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันตัวแปรควบคุมกับตัวแปรรบกวน

### 3.4.2 การกระทบระหว่างลูปควบคุม (Control Loop Interaction)

E.H.Bristol เป็นผู้เสนอวิธีการหาเกนอะเรย์สัมพัทธ์ (Relative Gain Array หรือ RGA)

เพื่อวัดการกระทบระหว่างลูปควบคุม สามารถเลือกรูปแบบการเข้าคู่ระหว่างตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับที่มีการกระทบระหว่างลูปน้อยที่สุด วิธีการคำนวณจะอาศัยข้อมูลกระบวนการสถานะคงที่ หรือเกนของแบบจำลองกระบวนการเท่านั้น แบบจำลองการกลับที่สถานะคงที่

$$y = K_{P11} m_1 + K_{P12} m_2 \quad (3.31)$$

$$x = K_{P21} m_1 + K_{P22} m_2 \quad (3.32)$$

$$\text{เกนอะเรย์ ; } \lambda = \frac{\left(\frac{\partial y}{\partial m_1}\right)_{m_2}}{\left(\frac{\partial y}{\partial m_1}\right)_x} = \frac{\text{open-loop gain}}{\text{closed-loop gain}} \quad (3.33)$$

เมื่อหาจากสมการ (3.31) และ (3.32) จะได้

$$\text{เกนอะเรย์ ; } \lambda = \frac{1}{1 - \frac{K_{P12} K_{P21}}{K_{P11} K_{P22}}} \quad (3.34)$$

$$\text{เกนอะเรย์สัมพัทธ์ ; } RGA = \begin{bmatrix} \lambda & 1-\lambda \\ 1-\lambda & \lambda \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ผลรวมในแต่ละแถวและแต่ละคอลัมน์ของแมทริกซ์ในสมการ (3.35) จะเท่ากับหนึ่ง การวิเคราะห์เป็นดังนี้

ก. ถ้า  $\lambda = 1$ . หมายความว่า ค่าเกนของลูปควบคุมเปิดและปิดจะเหมือนกันหรือลูปควบคุมที่สองจะไม่กระทบกับลูปควบคุมแรก ดังนั้น ให้เลือกเข้าคู่  $y$  กับ  $m_1$  และ  $x$  กับ  $m_2$

ข. ถ้า  $\lambda = 0$ . หมายความว่า ค่าเกณฑ์ของลูฟควบคุมเปิดระหว่าง  $y$  กับ  $m_1$  จะเท่ากับศูนย์ หรือ  $m_1$  ไม่สามารถควบคุม  $y$  ได้ ดังนั้น ให้เลือกเข้าคู่  $y$  กับ  $m_2$  และ  $x$  กับ  $m_1$

ค. ถ้า  $0 < \lambda < 1$ . หมายความว่า ค่าเกณฑ์ของลูฟควบคุมปิดจะมากกว่าของลูฟควบคุมเปิด แสดงว่ามีการกระทบระหว่างลูฟ และจะกระทบมากที่สุดเมื่อ  $\lambda = 0.5$

ง. ถ้า  $\lambda > 1$ . หมายความว่า เมื่อลูฟควบคุมที่สองปิดจะไปลดเกณฑ์ระหว่าง  $y$  กับ  $m_1$  หรือกระทบกับลูฟควบคุมแรก และ  $\lambda$  เพิ่มขึ้น การกระทบก็จะมากขึ้น K.E.Haggblom กับ K.V.Waller (1988) ได้หาสมการเกณฑ์ของโครงสร้าง  $LV$  และ  $DV$  ไว้ดังนี้

$$\text{โครงสร้างการควบคุม } LV; \lambda_{yL}^{LV} = \frac{1}{K_{yV}^{LV} K_{xL}^{LV} - 1} \quad (3.36)$$

$$\text{โครงสร้างการควบคุม } DV; \lambda_{yD}^{DV} = \frac{1}{K_{yV}^{DV} K_{xD}^{DV} - 1} \quad (3.37)$$

ในการเลือกโครงสร้างการควบคุมหอกลับนี้จะใช้เกณฑ์สัมพัทธ์ร่วมกับการพิจารณาพารามิเตอร์ความไวต่อการรบกวน

### 3.5 การแปลงโครงสร้างการควบคุมหอกลับ (Distillation Column Control

#### Structure Transformation)

เรามีวิธีเลือกโครงสร้างควบคุมหอกลับได้โดยวิธีต่างๆ วิธีการที่นิยมกัน คือ ทำการทดลองหรือการเขียนแบบเพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างการควบคุมทุกแบบ แต่อาจมีความคลาด



เคลื่อนของการทดลอง และการเลียนแบบต้องอาศัยแบบจำลองของโครงสร้างการควบคุมทุก โครงสร้างเช่นกัน ซึ่งอาจจะได้แบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อน วิธีการเหล่านี้จะใช้เวลา อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายมากด้วย ดังนั้น จึงมีผู้คิดค้นวิธีการการเลือก โครงสร้างควบคุมที่ให้ผลถูกต้อง ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

K.V.Haggblom (1986) และ K.V.Haggblom กับ K.E.Waller (1986) ได้เสนอวิธีการ แปลงโครงสร้างการควบคุม (Transformation of control structure) เพื่อหาแบบจำลองของ โครงสร้างควบคุมหากลั่นแบบใดๆ ก็ได้ด้วยการแปลงจากแบบจำลองโครงสร้างฐาน (Base model) เช่น การแปลงจากโครงสร้างควบคุม  $LV$  ไปเป็นโครงสร้างควบคุม  $D/(L+D), V$  หรือ  $DV$  เป็นต้น วิธีการนี้จะอาศัยข้อมูลสถานะคงที่แบบจำลองหรือค่าเกณฑ์ แต่สามารถนำวิธีการนี้ไป ประยุกต์ในการแปลงเชิงไดนามิกได้ ดังที่จะได้กล่าวต่อไป ลักษณะของการแปลง จะเป็นการ เปลี่ยนตัวแปรปฐมภูมิ (Primary manipulated variable) ที่ควบคุมผลิตภัณฑ์ยอดหอและ ฐานหอ และเปลี่ยนตัวแปรทุติยภูมิ (Secondary manipulated variable) ที่ควบคุมระดับถังพัก ยอดหอและฐานหอด้วย

ที่ผ่านมา การหาแบบจำลอง โครงสร้างควบคุมจะตั้งสมมติฐานว่า Constant flows ตลอดทุกส่วนของหากลั่น ซึ่งความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (Heat of vaporization) ของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้ไม่ขึ้นกับส่วนผสมของมัน และใช้ Boilup rate เป็นตัวแปรปรับได้ ซึ่งโดย ความเป็นจริง Boilup rate เป็นตัวแปรตามเสมอ ไม่สามารถใช้เป็นตัวแปรปรับได้ แต่วิธีการที่

จะนำเสนอต่อไปเป็นการแปลงโครงสร้างที่สภาวะคงที่ และไม่ต้องมีสมมติฐานเหมือนวิธีข้างต้น ซึ่งใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า

### 3.5.1 การแปลงโครงสร้างควบคุมหากลั่นสภาวะคงที่ (Steady-State Transformation of Distillation Control Structures)

การแปลงที่สภาวะคงที่ จะอาศัยค่าเกณฑ์ของแบบจำลองโครงสร้างฐาน ตัวอย่างที่จะแสดงต่อไป กำหนดให้แบบจำลองโครงสร้างควบคุม  $LV$  เป็นโครงสร้างฐาน ดังต่อไปนี้

$$\Delta y = K_{yu} \Delta u + K_{yw} \Delta w \quad (3.38ก)$$

$$\Delta v = K_{vu} \Delta u + K_{vw} \Delta w \quad (3.38ข)$$

เมื่อ  $y$  เป็นแมทริกซ์ตัวแปรควบคุม โดยที่  $y = [y \ x]^T$

$u$  เป็นแมทริกซ์ตัวแปรปรับปฐมภูมิ โดยที่  $u = [L \ V]^T$

$v$  เป็นแมทริกซ์ตัวแปรปรับทฤษฎภูมิ โดยที่  $v = [D \ B]^T$

$w$  เป็นแมทริกซ์ตัวแปรรบกวน โดยที่  $w = [F \ z]^T$

$K$  เป็นแมทริกซ์เกณฑ์ของแบบจำลอง

ด้วยก  $T$  คือ ทรานส์โพสท์ของแมทริกซ์ ถ้าเราต้องการหาแบบจำลองของโครงสร้างควบคุมใหม่ด้วยเซตตัวแปรปฐมภูมิและทฤษฎภูมิชุดใหม่ โดยให้  $\psi$  เป็นแมทริกซ์ตัวแปรปรับปฐมภูมิ ซึ่ง  $\psi = [\psi_1 \ \psi_2]^T$  และ  $\nu$  เป็นแมทริกซ์ของตัวแปรปรับทฤษฎภูมิของโครงสร้างควบคุมใหม่ ซึ่ง  $\nu = [\nu_1 \ \nu_2]^T$   $\psi$  และ  $\nu$  ต้องเป็นฟังก์ชันของตัวแปรของโครงสร้างควบคุมฐาน ดังสมการ

$$\psi = \psi(u, v, w) \quad (3.39ก)$$

$$v = v(u, v, w) \quad (3.39ข)$$

ทำสมการ (3.39ก) และ (3.39ข) ให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ได้ตัวแปรผลลัพธ์อยู่ในรูปผลต่าง (Deviation variable) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta\psi = H_{\psi u}\Delta u + H_{\psi v}\Delta v + H_{\psi w}\Delta w \quad (3.40ก)$$

$$\Delta v = H_{vu}\Delta u + H_{vv}\Delta v + H_{vw}\Delta w \quad (3.40ข)$$

เมื่อ  $H$  เป็นเมทริกซ์อนุพันธ์ย่อย (Partial derivatives matrix) ของตัวแปร โครงสร้างควบคุมใหม่สอดคล้องกับตัวแปร โครงสร้างควบคุมเก่า และเรียกว่า เมทริกซ์แปลงรูป (Transformation matrixes)

$\psi$  และ  $v$  อาจจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรรอบวนที่สามารถวัดได้ จากนั้น กำจัด  $\Delta v$  ในสมการ (3.40) ด้วยการแทนสมการ (3.38ข) ลงในสมการ (3.40) ได้

$$\Delta\psi = (H_{\psi u} + H_{\psi v}K_{vu})\Delta u + (H_{\psi w} + H_{\psi v}K_{vw})\Delta w \quad (3.41ก)$$

$$\Delta v = (H_{vu} + H_{vv}K_{vu})\Delta u + (H_{vw} + H_{vv}K_{vw})\Delta w \quad (3.41ข)$$

ตัวแปรปรับปฐมภูมิ  $\psi$  ต้องไม่ขึ้นกับตัวแปรใดๆ ถึงแม้กรณีที่  $\Delta w = 0$  หมายความว่า การแปลงรูปเป็นจริงได้เมื่อเมทริกซ์  $H_{\psi u} + H_{\psi v}K_{vu}$  เป็นนอนซิงกูลาร์ (Nonsingular) นอกจากนี้แล้ว ในทางกลับกัน จะต้องสามารถหาตัวแปร  $u$  (และ  $v$ ) จากตัวแปร  $\psi$ ,  $v$  และ  $w$  ได้ด้วย ดังนั้น สามารถหา  $u$  ได้จากสมการ (3.41ก)

$$\Delta u = (H_{\psi u} + H_{\psi v}K_{vu})^{-1} \left[ \Delta\psi - (H_{\psi w} + H_{\psi v}K_{vw})\Delta w \right] \quad (3.42)$$

กำจัด  $u$  ในสมการ (3.38ก) และ (3.41ข) โดยแทนด้วยสมการ (3.42) จะได้แบบจำลองของโครงสร้างควบคุมใหม่ ดังนี้

$$\Delta y = K_{y\psi} \Delta \psi + K_{y\omega} \Delta \omega \quad (3.43ก)$$

$$\Delta v = K_{v\psi} \Delta \psi + K_{v\omega} \Delta \omega \quad (3.43ข)$$

เมื่อ

$$K_{y\psi} = K_{yu} (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} \quad (3.44ก)$$

$$K_{y\omega} = K_{yw} - K_{y\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.44ข)$$

$$K_{v\psi} = (H_{vu} + H_{vv} K_{vu}) (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} \quad (3.44ค)$$

$$K_{v\omega} = (H_{vw} + H_{vv} K_{vw}) - K_{v\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.44ง)$$

เมื่อ  $\omega$  เป็นเมทริกซ์ตัวแปรบกวน เพื่อให้แตกต่างจากโครงสร้างควบคุมฐาน ( $w$ ) สมการ (3.44) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างการควบคุมฐานกับโครงสร้างการควบคุมรูปแบบใหม่ มีประเด็นที่สำคัญคือ ตามสมการ (3.44ก) และ (3.44ข) ถ้า  $H_{\psi v} \neq 0$  จะคำนวณหาเมทริกซ์  $K_{y\psi}$  และ  $K_{y\omega}$  ได้ จะต้องทราบเมทริกซ์  $K_{vu}$  และ  $K_{vw}$  แสดงให้เห็นว่าตัวแปรปรับปฐมภูมิของโครงสร้างควบคุมใหม่ เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรเหตุยภูมิของโครงสร้างควบคุมฐาน นอกจากจะหาเกณฑ์เหตุยภูมิได้จากการทดลองแล้วยังสามารถหาได้จากเกณฑ์ปฐมภูมิโดยอาศัยความสัมพันธ์ Consistency relation

### 3.5.2 การแปลงรูปแบบโครงสร้างควบคุมหอกลับเชิงไดนามิก (Dynamic transformation)

เพื่อให้การเลือกโครงสร้างควบคุมหอกลับมีความน่าเชื่อถือสูงๆ นั้น ควรเปรียบเทียบด้วยแบบจำลองเชิงไดนามิกแทนที่จะใช้เพียงแบบจำลองกระบวนการสถานะคงที่ แต่การแปลงเพื่อหาแบบจำลองไดนามิกจะมีความซับซ้อนยุ่งยากอย่างมาก เนื่องจาก

ก. แบบจำลองเชิงไดนามิกนั้น เป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเหตุและผล (Cause-and-effect relations) ซึ่งไม่สามารถทำการผกผัน (Reverse) ได้

ข. โครงสร้างควบคุมแต่ละแบบมักจะมีระบบควบคุมอินเวนทอรีแตกต่างกัน ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละโครงสร้างจะเกี่ยวข้องกับตัวควบคุมระบบควบคุมอินเวนทอรีด้วย การแปลงโครงสร้างควบคุมต้องออกแบบตัวควบคุมอินเวนทอรีของโครงสร้างใหม่ด้วย สามารถทำการแปลงโครงสร้างแบบไดนามิกโดยใช้รูปแบบการแปลงสถานะคงที่ โดยให้การควบคุมอินเวนทอรีเป็นไปดังสมการ

$$\Delta h = G_{hu} \Delta u + G_{hw} \Delta w \quad (3.45ก)$$

$$\Delta v = G_{vu} \Delta u + G_{vw} \Delta w \quad (3.45ข)$$

$h = [L_A \ L_B]^T$  และให้ทุกโครงสร้างมีสมการ (3.45) เหมือนกัน ถ้าสมการ (3.45ข) เป็นจริง ก็สามารถแปลงเชิงไดนามิกได้เหมือนสถานะคงที่ โดยใช้สมการ (3.46)

$$G_{y\psi} = G_{yu} (H_{\psi u} + H_{\psi v} G_{vu})^{-1} \quad (3.46ก)$$

$$G_{yw} = G_{yw} - G_{y\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} G_{vw}) \quad (3.46ข)$$

อย่างไรก็ตาม ต้องมีสมมติฐานอย่างใดอย่างหนึ่งใน 3 กรณีดังนี้

ก. กรณีที่หนึ่ง สมมติฐานว่าสามารถควบคุมระดับของเหลวทั้งยอดคหและฐานห่อได้ โดยสมบูรณ์ (Perfectly controlled) เพราะว่าสามารถที่จะควบคุมอินเวนทอรีได้ง่ายกว่าควบคุมผลิตภัณฑ์ สมมติฐานนี้จึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่ใช้ในการจำลอง โครงสร้างควบคุม ยกเว้นกรณีที่จูนตัวควบคุมลูพอินเวนทอรีอย่างแน่นหนา (Strongly detuned) สามารถอธิบายข้อสมมติฐานนี้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{yu} & G_{yv} \\ G_{hu} & G_{hv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{yw} \\ G_{hw} \end{bmatrix} \Delta w \quad (3.47)$$

จากสมการ (3.47) ตามสมมติฐานข้างต้น จะได้

$$0 = G_{iu} \Delta u + G_{iv} \Delta v + G_{iw} \Delta w \quad (3.48)$$

ให้โครงสร้างควบคุมที่เกี่ยวข้อง มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ (3.48) สมการนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรปรับของลูพควบคุมอินเวนทอรีมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นอย่างไร ตามข้อสมมติฐานนี้

จากโครงสร้างควบคุมฐาน  $v$  เป็นตัวแปรปรับควบคุมอินเวนทอรี จากสมการ

(3.45 ข) จะได้

$$G_{vu} = -(G_{iv})^{-1} G_{iu} \quad (3.49 ก)$$

$$G_{vw} = -(G_{iv})^{-1} G_{iw} \quad (3.49 ข)$$

และเมทริกซ์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันตามสมการ (3.49) จะใช้ในการแปลงรูปโครงสร้าง

ตามสมการ (3.46) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงไว้ คือ ถ้า  $G_{vu}$  และ  $G_{vw}$  เป็นข้อมูลของการควบคุมอิน

เวนทอรีอย่างไม่สมบูรณ์ (Imperfect inventory control) จะทำให้ไม่สอดคล้องตามนิยามของสมการ (3.49) และไม่ใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ นอกจากนี้ ต้องให้เทอม  $H_{\psi u} + H_{\psi v}G_{vu}$  เป็นนอนซิงกูลาร์ แต่ไม่ยืนยันว่าต้องหาอินเวอร์สได้ ถ้าหาอินเวอร์สไม่ได้ ก็หมายความว่าโครงสร้างการควบคุมนั้นไม่สามารถติดตั้งใช้งานได้จริงตามทฤษฎี

ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีสมมติฐานเพิ่มเติม เพื่อให้การแปลงโครงสร้างควบคุมได้ง่ายและมีความเป็นจริงมากขึ้น โดยปัญหาสำคัญมาจาก  $G_{vu}$  และ  $G_{vw}$  เป็นเทอมไดนามิกที่ทำให้มีความซับซ้อนมาก จึงแก้ไขโดยตัดส่วนที่เป็นไดนามิกออกไป เปลี่ยนมาใช้แมทริกซ์เกน  $K_{vu}$  และ  $K_{vw}$  แทน สมมติฐานนี้ ต้องให้ตัวแปรปรับที่ควบคุมอินเวนทอรีเข้าสู่ค่าสถานะคงที่ (Ultimate steady state) หลังถูกรบกวน ซึ่งมีความสมเหตุสมผลในการปฏิบัติและสอดคล้องกับสมมติฐานควบคุมอินเวนทอรีอย่างสมบูรณ์

ข. กรณีที่สอง สมมติให้ระบบควบคุมอินเวนทอรีของทุกโครงสร้างควบคุมเหมือนกัน นั่นคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมอินเวนทอรีเมื่อแปลงโครงสร้างควบคุม แต่ในการปฏิบัติ ส่วนมากโครงสร้างควบคุมจะมีระบบควบคุมอินเวนทอรีแตกต่างกันอยู่แล้ว กรณีนี้จึงมีน้อยมาก อย่างไรก็ตาม สามารถออกแบบระบบควบคุมอินเวนทอรี และไม่ต้องเปลี่ยนเมื่อทำการแปลง โดยใช้ตัวแปร  $L+D$  และ  $V+B$  เป็นตัวแปรปรับควบคุมอินเวนทอรี เมื่อ  $V$  เป็น Vapor boilup rate และใช้ตัวแปรปรับนี้เหมือนกันทุกโครงสร้างควบคุม

ค. กรณีที่สาม วิธีการนี้ เสนอโดย D.R. Yang และคณะ (1990) โดยสมมติให้ระบบ

ควบคุมผลิตภัณฑ์ไม่มีผลกระทบจากระบบควบคุมอินเวนทอรี และให้  $G_{vu} = 0$  วิธีการนี้สามารถหาแบบจำลองโครงสร้างใหม่ที่มีระบบควบคุมอินเวนทอรีลักษณะใดก็ได้จากแบบจำลองโครงสร้าง  $LV$  เป็นโครงสร้างฐาน แต่ก็ต้องออกแบบระบบควบคุมอินเวนทอรีของโครงสร้างควบคุมใหม่ K.E.Haggblom และ K.V.Waller (1991) ได้โต้แย้งว่าวิธีการนี้ไม่สามารถหาแบบจำลองได้ง่ายนัก และเป็นการยากที่จะออกแบบระบบควบคุมอินเวนทอรีที่สมบูรณ์ได้ จากสมการ (3.45) มีจำนวนตัวแปรปรับ 2 ตัว ( $u$  และ  $w$ ) ซึ่งมากกว่าจำนวนตัวแปรควบคุม ( $h$ ) กรณีที่สามจึงเป็นกรณีเฉพาะเท่านั้น เนื่องจากจะหาค่าควบคุมอินเวนทอรีที่ยาก ดังนั้น สมมติฐานในกรณีที่หนึ่งและสองมีความเชื่อถือได้มากกว่า

งานวิจัยชิ้นนี้ ได้กำหนดใช้สมมติฐานกรณีที่หนึ่งในการแปลงโครงสร้างควบคุม

### 3.5.3 วิธีการแปลงโครงสร้างการควบคุมหอกลับ $[L/(L+D), V]$

การแปลงเพื่อหาแบบจำลองโครงสร้างการควบคุม  $L/(L+D), V$  กำหนดให้แบบจำลองของโครงสร้าง  $LV$  ของตัวอย่างที่ 5 เป็นโครงสร้างฐาน ทั้งการแปลงสถานะคงที่และไดนามิก

#### ก. การแปลงสถานะคงที่ (Steady state transformation)

สมการการแปลงโครงสร้างควบคุม คือ

$$K_{y\psi} = K_{yu} (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} \quad (3.44ก)$$

$$K_{yw} = K_{yw} - K_{y\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.44ข)$$

$$K_{u\psi} = (H_{uu} + H_{uv} K_{vu}) (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} \quad (3.44ค)$$

$$K_{uw} = (H_{uw} + H_{uv} K_{vw}) - K_{u\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.44ง)$$



เมื่อ  $\psi = [\Delta(L/(D+L)) \quad \Delta V]^T$  และ  $v = [\Delta(L+D) \quad \Delta B]^T$

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสภาวะคงที่ของตัวอย่างที่ 5

อัตราไหลกระแสเป็อน ( $F$ )	200	kg/h
อัตราไหลคิสติลเลต ( $D$ )	60	kg/h
อัตราไหลผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $B$ )	140	kg/h
ส่วนผสมกระแสเป็อน ( $z$ )	30	wt%
ส่วนผสมคิสติลเลต ( $y$ )	87	wt%
ส่วนผสมผลิตภัณฑ์ฐานหอ ( $x$ )	5	wt%
อัตราไหลรีฟลักซ์ ( $L$ )	60	kg/h
อัตราไหลไอน้ำเข้ารีบอยเลอร์ ( $V$ )	72	kg/h
อุณหภูมิกระแสเป็อน	65	°C
อุณหภูมิรีฟลักซ์	62	°C

โดยควบคุมอุณหภูมิของเทรย์ที่ 4 (หรือ  $T_4$ ) และ 14 (หรือ  $T_{14}$ ) นับจากยอดหอ และ

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของโครงสร้าง  $LV$  คือ

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0435e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11s+1} \\ \frac{-0.2260e^{-1.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-1.0s}}{10s+1} & \frac{0.0040e^{-1.0s}}{8.5s+1} \\ \frac{-0.1606e^{-1.0s}}{5.5s+1} & \frac{-0.6228e^{-1.0s}}{9.2s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.50ก)$$

$$\begin{bmatrix} D \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.6154e^{-0.5s}}{1.0s+1} & \frac{1.3523e^{-0.5s}}{1.0s+1} \\ \frac{0.6154e^{-1.5s}}{1.5s+1} & \frac{-1.3523e^{-1.5s}}{1.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{0.0591e^{-1.0s}}{4.0s+1} & \frac{0.9418e^{-1.0s}}{2.0s+1} \\ \frac{0.9409e^{-1.0s}}{1.5s+1} & \frac{-0.9418e^{-1.0s}}{3.5s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.50\text{ข})$$

แบบจำลองสถานะคงที่ของโครงสร้างควบคุม LV

$$K_{yu} = \begin{bmatrix} -0.0435 & 0.0458 \\ -0.2260 & 0.5432 \end{bmatrix} \quad (3.50ค)$$

$$K_{yw} = \begin{bmatrix} -0.0010 & 0.0042 \\ -0.1606 & -0.6228 \end{bmatrix} \quad (3.50ง)$$

$$K_{vu} = \begin{bmatrix} -0.6154 & 1.3523 \\ 0.6154 & -1.3523 \end{bmatrix} \quad (3.50จ)$$

$$K_{vw} = \begin{bmatrix} 0.0591 & 0.9418 \\ 0.9409 & -0.9418 \end{bmatrix} \quad (3.50ฉ)$$

หาเมทริกซ์อนุพันธ์ย่อย (Partial derivative matrix) จากเมทริกซ์การแปลง

(Transformation matrix)

$$\begin{bmatrix} \Delta \psi \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\psi u} & H_{\psi v} \\ H_{vu} & H_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{D}}{(\bar{L}+\bar{D})^2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-\bar{L}}{(\bar{L}+\bar{D})^2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta B \end{bmatrix} \quad (3.52ก)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta(L+D) \\ \Delta B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta B \end{bmatrix} \quad (3.52ข)$$

แทนค่าในสมการ (3.52) เมื่อ  $L = 60$  และ  $D = 60$  ได้

$$\begin{bmatrix} \Delta \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0042 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0042 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta B \end{bmatrix} \quad (3.53ก)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta(L+D) \\ \Delta B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta B \end{bmatrix} \quad (3.53\text{ข})$$

จะได้เมทริกซ์การแปลง

$$H_{\psi u} = \begin{bmatrix} 0.0042 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H_{\psi v} = \begin{bmatrix} -0.0042 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.54\text{ก})$$

$$H_{\psi u} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad H_{\psi v} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54\text{ข})$$

ให้  $A = (H_{\psi u} + H_{\psi v}K_{vu})$

$$= \begin{bmatrix} 0.0042 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0042 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.6154 & 1.3523 \\ 0.6154 & -1.3523 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0042 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0026 & -0.0057 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0068 & -0.0057 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{adj } A = \begin{bmatrix} 1 & 0.0057 \\ 0 & 0.0068 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad |A| = 0.0068$$

$$\text{ดังนั้น} \quad (H_{\psi u} + H_{\psi v}K_{vu})^{-1} = A^{-1} = \frac{\text{adj } A}{|A|} = \begin{bmatrix} 147.0588 & 0.8382 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

แทนค่าในสมการ (3.44ก)

$$K_{y\psi} = K_{yu} (H_{\psi u} + H_{\psi v}K_{vu})^{-1} \quad (3.44\text{ก})$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0435 & 0.0458 \\ -0.2260 & 0.5432 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 147.0588 & 0.8382 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -6.3971 & 0.0093 \\ -33.2353 & 0.3538 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} \text{ให้ } B &= (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \text{ เมื่อ } H_{\psi w} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0042 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0591 & 0.9418 \\ 0.9409 & -0.9418 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -0.0002 & -0.0040 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

แทนในสมการ (3.44ข)

$$\begin{aligned} K_{yw} &= K_{yw} - K_{y\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.44ข) \\ &= \begin{bmatrix} -0.0010 & 0.0042 \\ -0.1606 & -0.6228 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -6.3971 & 0.0093 \\ -33.2353 & 0.3538 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.0002 & -0.0040 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -0.0010 & 0.0042 \\ -0.1606 & -0.6228 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.0013 & 0.0256 \\ 0.0066 & 0.1329 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -0.0023 & -0.0214 \\ -0.1672 & -0.7557 \end{bmatrix} \quad (3.56) \end{aligned}$$

แบบจำลองของโครงสร้างควบคุม  $[L/(D+L), V]$  ดังสมการ (3.55) และ (3.56) คือ

$$K_{y\psi} = \begin{bmatrix} -6.3971 & 0.0093 \\ -33.2353 & 0.3538 \end{bmatrix} \quad K_{yw} = \begin{bmatrix} -0.0023 & -0.0214 \\ -0.1672 & -0.7557 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \Delta T_4 \\ \Delta T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6.3971 & 0.0093 \\ -33.2353 & 0.3538 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0023 & -0.0214 \\ -0.1672 & -0.7557 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

ข. การแปลงเชิงไดนามิก (Dynamic transformation)

สมมติฐาน มีดังนี้

ก. ควบคุมอินเวนทอหรืออย่างสมบูรณ์ และกำหนดให้ตัวแปรปรับอินเวนทอรี

(Secondary manipulator) สามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ultimate steady state) หลัฏรบกวน โดยตัวแปรรบกวน

ข. ใช้  $K_{vu}$  และ  $K_{vw}$  แทน  $G_{vu}$  และ  $G_{vw}$  ตามลำดับ

จากสมการ (3.46) โดยสมมติฐานข้อ ข.

$$G_{y\psi} = G_{yu} (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} \quad (3.46ก)$$

$$G_{yw} = G_{yw} - G_{y\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.46ข)$$

แบบจำลองของโครงสร้าง  $LV$  จากสมการ (3.50) จะได้ว่า

$$G_{yu} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0435e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-0.2260e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix} \quad (3.58ก)$$

$$G_{yw} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{10.0s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{8.5s+1} \\ \frac{-0.1606e^{-s}}{5.5s+1} & \frac{-0.6228e^{-s}}{9.2s+1} \end{bmatrix} \quad (3.58ข)$$

$$K_{vu} = \begin{bmatrix} -0.6154 & 1.3523 \\ 0.6154 & -1.3523 \end{bmatrix} \quad (3.50จ)$$

$$K_{vw} = \begin{bmatrix} 0.0591 & 0.9418 \\ 0.9409 & -0.9418 \end{bmatrix} \quad (3.50ฉ)$$

ให้  $A = (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 0.0042 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0042 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.6154 & 1.3523 \\ 0.6154 & -1.3523 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0.0042 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0026 & -0.0057 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0.0068 & -0.0057 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\text{adj } A = \begin{bmatrix} 1 & 0.0057 \\ 0 & 0.0068 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad |A| = 0.0068$$

$$\text{ดังนั้น} \quad (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} = A^{-1} = \frac{\text{adj } A}{|A|} = \begin{bmatrix} 147.0588 & 0.8382 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

แทนค่าในสมการ (3.46ก)

$$G_{y\psi} = G_{yu} (H_{\psi u} + H_{\psi v} K_{vu})^{-1} \quad (3.46ก)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-0.0435e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-0.2260e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 147.0588 & 0.8382 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-6.3971e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.0365e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-33.2353e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.1894e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix}$$

$$\text{ให้} \quad B = (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw})^{-1} \quad \text{เมื่อ} \quad H_{\psi w} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0042 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0591 & 0.9418 \\ 0.9409 & -0.9418 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0002 & -0.0040 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

แทนในสมการ (3.46ข)

$$G_{y\omega} = G_{yw} - G_{y\psi} (H_{\psi w} + H_{\psi v} K_{vw}) \quad (3.46\text{ข})$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{5.5s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{9.2s+1} \\ \frac{10.0s+1}{-0.1606e^{-s}} & \frac{8.5s+1}{-0.6228e^{-s}} \end{bmatrix} - \\
 &\quad \begin{bmatrix} \frac{-6.3971e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.0365e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-33.2353e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.1894e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.0002 & -0.0040 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{5.5s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{9.2s+1} \\ \frac{10.0s+1}{-0.1606e^{-s}} & \frac{8.5s+1}{-0.6228e^{-s}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{0.0013e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0256e^{-0.5s}}{8.1s+1} \\ \frac{0.0066e^{-1.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.1329e^{-1.5s}}{8.1s+1} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{5.5s+1} & \frac{0.0013e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{9.2s+1} & \frac{0.0256e^{-0.5s}}{8.1s+1} \\ \frac{10.0s+1}{-0.1606e^{-s}} & \frac{0.0066e^{-1.5s}}{8.1s+1} & \frac{8.5s+1}{-0.6228e^{-s}} & \frac{8.5s+1}{0.1329e^{-1.5s}} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น แบบจำลองของโครงสร้างควบคุม  $[L/(D+L), V]$  คือ

$$G_{y\psi} = \begin{bmatrix} \frac{-6.3971e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.0365e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-33.2353e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.1894e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix} \quad (3.59\text{ก})$$

$$G_{yw} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{5.5s+1} & \frac{0.0013e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{9.2s+1} & \frac{0.0256e^{-0.5s}}{8.1s+1} \\ \frac{10.0s+1}{-0.1606e^{-s}} & \frac{0.0066e^{-1.5s}}{8.1s+1} & \frac{8.5s+1}{-0.6228e^{-s}} & \frac{8.5s+1}{0.1329e^{-1.5s}} \end{bmatrix} \quad (3.59\text{ข})$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-6.3971e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.0365e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.0458e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-33.2353e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.1894e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.5432e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ V \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{10.0s+1} - \frac{0.0013e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{8.5s+1} - \frac{0.0256e^{-0.5s}}{8.5s+1} \\ \frac{-0.1606e^{-s}}{5.5s+1} - \frac{0.0066e^{-1.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.6228e^{-s}}{9.2s+1} - \frac{0.1329e^{-1.5s}}{8.1s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

เราสามารถใช่โครงสร้าง  $DV$  เป็นโครงสร้างฐานได้เช่นกันกับโครงสร้าง  $LV$  ซึ่งแบบ

จำลองของโครงสร้าง  $L/(L+D)V$  เมื่อใช้  $DV$  เป็น Base Model คือ

แบบจำลองสภาวะคงที่ของโครงสร้าง  $L/(L+D)V$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_4 \\ \Delta T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6.4273 & 0.0092 \\ -33.3912 & 0.3537 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0026 & -0.0213 \\ -0.1689 & -0.7550 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta(L+D) \\ \Delta B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 56.8188 & 1.6749 \\ 90.9100 & -0.8364 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0734 & 1.1704 \\ 0.9636 & -0.5818 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

แบบจำลองไดนามิกโครงสร้าง  $L/(L+D)V$

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-6.4234e^{-0.5s}}{14s+1} & \frac{0.0591e^{-0.5s}}{14s+1} - \frac{0.0499e^{-0.5s}}{15s+1} \\ \frac{-33.3912e^{-0.5s}}{15s+1} & \frac{0.3072e^{-0.5s}}{15s+1} + \frac{0.0465e^{-0.5s}}{10s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{10.0s+1} - \frac{0.0013e^{-0.5s}}{8.1s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{8.5s+1} - \frac{0.0256e^{-0.5s}}{8.5s+1} \\ \frac{-0.1606e^{-s}}{5.5s+1} - \frac{0.0066e^{-1.5s}}{8.1s+1} & \frac{-0.6228e^{-s}}{9.2s+1} - \frac{0.1329e^{-1.5s}}{8.1s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix}$$

### 3.5.4 การแปลงโครงสร้าง $L/(L+D), VB$

แบบจำลองไดนามิก เมื่อใช้โครงสร้าง  $LV$  เป็นโครงสร้างฐาน

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-6.555e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{1.7404e^{-0.5s}}{11s+1} & \frac{-2.4795e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{3.1144e^{-0.5s}}{11.0s+1} \\ \frac{-34.578e^{-1.5s}}{8.1s+1} + \frac{20.6416e^{-0.5s}}{10s+1} & \frac{-12.8934e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{36.9376e^{-0.5s}}{10.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left( \frac{L}{D+L} \right) \\ (V/B) \end{bmatrix}$$



$$+ \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{10.0s+1} - \frac{0.0155e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.0181e^{-0.5s}}{11s+1} & \frac{0.0085e^{-0.5s}}{8.1s+1} - \frac{0.0108e^{-0.5s}}{11s+1} \\ \frac{-0.1606e^{-s}}{5.5s+1} - \frac{0.0804e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.2147e^{-0.5s}}{10s+1} & \frac{-0.6228e^{-s}}{9.2s+1} - \frac{0.051e^{-1.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.1208e^{-0.5s}}{10s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix}$$

### 3.5.5 การแปลงโครงสร้าง LB

แบบจำลองไดนามิก เมื่อใช้โครงสร้าง LV เป็นโครงสร้างฐาน

$$\begin{bmatrix} T_4 \\ T_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0435e^{-0.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.0208e^{-0.5s}}{11.0s+1} & \frac{-0.0339e^{-0.5s}}{11s+1} \\ \frac{-0.2260e^{-1.5s}}{8.1s+1} + \frac{0.2472e^{-0.5s}}{10.0s+1} & \frac{-0.4017e^{-0.5s}}{10s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ B \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{-0.0010e^{-s}}{10.0s+1} + \frac{0.0319e^{-0.5s}}{11s+1} & \frac{0.0040e^{-s}}{8.5s+1} - \frac{0.0319e^{-0.5s}}{11s+1} \\ \frac{-0.1606e^{-s}}{5.5s+1} + \frac{0.3780e^{-0.5s}}{10s+1} & \frac{-0.6228e^{-s}}{9.2s+1} - \frac{0.3783e^{-1.5s}}{10s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ z \end{bmatrix}$$