รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์. พลศาสตร์กระบวนการ : การควบคุมกระบวนการ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ท.วัฒนาการพิมพ์, 2543.

สายฝน เกียรติวารินทร์. การออกแบบโครงสร้างการควบคุมประยุกต์กับปัญหาการควบคุมแบบแพลนไวด์ของกระบวนการไฮโดรดีอัลคิเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

วราพร กิติเกียรติโสภณ. ระบบควบคุมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ภาษาอังกฤษ

Aspen Technology. Aspen Plus users manual. Cambridge, Aspen Tech, 2000.

B. Bequette. Process Control : Modeling, Design and Simulation. Prentice Hall, 1998.

C.A. Smith Automated continuous process Control. New York : Wiley, 2002.

E. Gagnon, A. Pomerleau, A. Desbiens, Simplified, ideal or inverted decoupling?. ISA Transactions, 37 (1998) : 265-276.

E. Thomas Marlin. Process Control : Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. New York : McGraw-Hill, 1995.

F. Bezzo, F. Micheletti, R. Muradore, et al. Using MPC to control middle-vessel continuous distillation columns. Process Control, 15 (2005) : 925–930.

J. Andrew Peacock. HANDBOOK OF POLYETHYLENE structures, Properties, and Applications. New York : Marcel Dekker, 2002.

J.D. Seader, J. Ernest Henley. Separation Process Principles. New Jersey : John Wiley & Sons (Asia) Pte, 2006.

L. I-Kuan, H. Shih-Bo, H. Wan-Jen, et al. Design and control of reactive distillation for ethyl and isopropyl acetates production with azeotropic feeds, Chemical Engineering Science, 62 (2007) : 878-898.

L. William Luyben. Distillation Design and Control Using Aspen Simulation. New Jersey : John Wiley & Sons, 2006.

L. William Luyben. PLANTWIDE DYNAMIC SIMULATORS IN CHEMICAL PROCESSING and CONTROL. New York : Marcel Dekker, 2002.

L. William Luyben. PRACTICAL DISTILLATION CONTROL. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992.

P. Guedes, F. Feitosa, S. Vasconcelos, et al. Sensitivity and dynamic behavior analysis of an industrial azeotropic distillation column. Separation and Purification Technology, 56 (2007) : 270-277.

S. Hurowitz, J. Anderson, M. Duvall, et al. Distillation control configuration selection. Process Control, 13 (2003) : 357-362.

ภาคผนวก (Appendices)

ภาคผนวก ก (Appendix A)

ภาคผนวก ก

ก1. การตั้งค่าเครื่องควบคุมในโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์

โปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ใช้ในการจำลองกระบวนการผลิตเชิงพลวัต เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการ รวมถึงการควบคุมกระบวนการ ประกอบด้วยบล็อกในการจำลองดังตารางที่ ก1.

ตารางที่ ก1. บล็อกการจำลองกระบวนการควบคุมของโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์

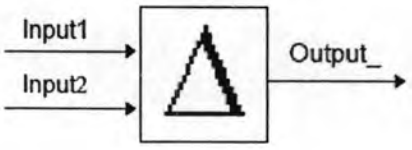
แบบจำลองการควบคุม	รูปแบบการนำไปใช้งาน
Comparator	บล็อกคำนวณความแตกต่างระหว่างสัญญาณป้อนเข้าสองสัญญาณ
Dead time	บล็อกกำหนดเวลาหน่วงให้แก่สัญญาณตามเวลาที่ระบุ
Discretize	บล็อกสร้างสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง
HiLoSelect	บล็อกเลือกสัญญาณที่ค่าสูงหรือค่าต่ำจากสัญญาณขาเข้าสองสัญญาณ
IAE	บล็อกคำนวณค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ากระบวนการและค่าเป้าหมาย
ISE	บล็อกคำนวณค่ากำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ากระบวนการและค่าเป้าหมาย
Lag 1	บล็อกแบบจำลองความล่าช้าของสมการอันดับที่ 1 ระหว่างตัวแปรขาเข้าและขาออก
Lead lag	บล็อกแบบจำลองความล่าช้าของสมการอันดับที่ 1 ทั้งตัวแปรขาเข้าและขาออก
Multiply	บล็อกคำนวณค่าสัญญาณลัพธ์ของสัญญาณขาเข้าทั้งสอง
Noise	บล็อกเครื่องให้กำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน
PID	บล็อกเครื่องควบคุมแบบกำหนด 3 รูปแบบ คือ แบบพี พีไอ และพีไอดี
PRBS	บล็อกเครื่องให้กำเนิดสัญญาณ 2 ระบบ แบบกึ่งการสุ่มสัญญาณ
Ratio	บล็อกคำนวณค่าสัดส่วนของสัญญาณขาเข้าสองสัญญาณ
Scale	บล็อกกำหนดมาตราส่วนสัญญาณขาเข้า
SplitRange	บล็อกการทำงานแบบเลือกช่วงสัญญาณ
Sum	บล็อกคำนวณผลรวมของสัญญาณขาเข้าสองสัญญาณ
Transform	บล็อกการแปลงสัญญาณเป็นแบบล็อก กำลังสอง รากที่สอง และเลขยกกำลัง
Valve_dyn	บล็อกการจำลองวาล์วเชิงพลวัต

ก2. การประยุกต์ใช้บล็อกการจำลองกระบวนการควบคุม

บล็อกการจำลองกระบวนการควบคุมของโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์มีวัตถุประสงค์และการนำมาใช้งานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของการจำลอง ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวเพียงบล็อกที่สำคัญและได้นำมาใช้ในการจำลองกระบวนการควบคุมสำหรับงานวิจัยนี้เท่านั้น

ก2.1 บล็อก Comparator

บล็อก Comparator (รูปที่ ก1.) ใช้ในการคำนวณสัญญาณขาออกที่เป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างสัญญาณขาเข้าสองสัญญาณ



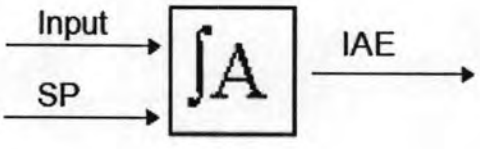
รูปที่ ก1. บล็อกการจำลองแบบ Comparator

สมการที่ใช้ในการจำลองสำหรับบล็อกการจำลองแบบ Comparator คือ

สัญญาณขาออก = สัญญาณขาเข้า 1 – สัญญาณขาเข้า 2

ก2.2 บล็อก IAE

บล็อก IAE (รูป ก2.) ใช้สำหรับการคำนวณค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ากระบวนการและค่าเป้าหมาย ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ



รูปที่ ก2 บล็อกการจำลองแบบ IAE

สมการที่ใช้ในการจำลองสำหรับบล็อกการจำลองแบบ IAE สมการมาตรฐานในรูปอินทิกรัลสำหรับค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน คือ

$$IAE = \int_0^T |e(t)|.dt$$

โดยที่ e คือ ค่าความเบี่ยงเบนของค่าตัวแปรไปจากค่าเป้าหมาย

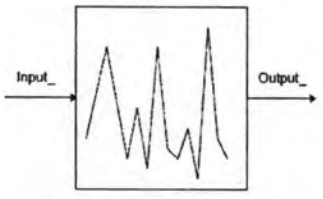
t คือ เวลา

IAE คือ ค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน

T คือ เวลาปัจจุบัน

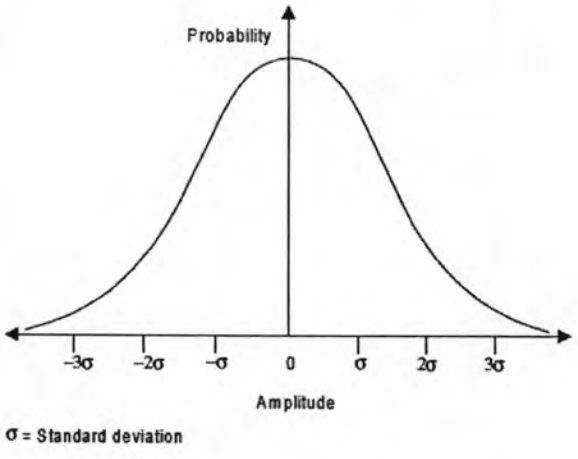
ก2.3. บล็อก Noise

บล็อก Noise (รูป ก3.) ให้กำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน ซึ่งสามารถใช้ได้สองทางคือ การเพิ่มสัญญาณรบกวนที่สัญญาญขาเข้า และการให้กำเนิดสัญญาณรบกวนโดยตรง



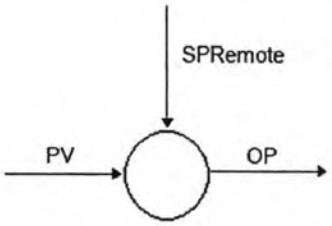
รูปที่ ก3. บล็อกการจำลองแบบ Noise

บล็อก Noise เป็นการให้กำเนิดค่าแบบสุ่มที่มีขนาดของแอมพลิจูดเป็นไปตามการกระจายของความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน (รูป ก4.) โดยที่ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนจะเป็นศูนย์ และขนาดของสัญญาณรบกวนถูกกำหนดโดยขนาดของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระบุไว้ โดยที่ค่าสัญญาณขาออกเป็นผลรวมของค่าสัญญาณขาเข้ารวมกับค่าสัญญาณรบกวน



รูปที่ ก4. กราฟแสดงการกระจายแบบเกาส์เซียน

ก2.4 บล็อก PID



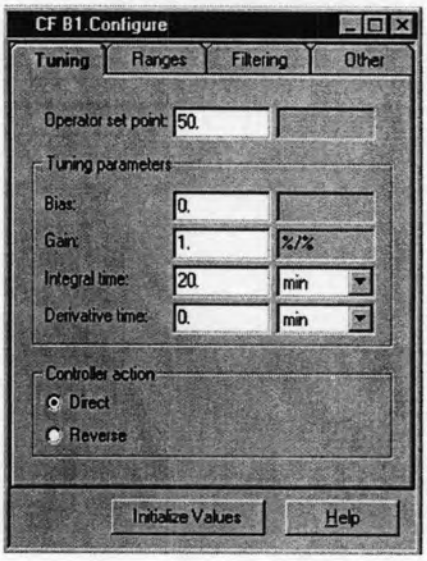
รูปที่ ก5.1 บล็อกการจำลองแบบ PID

การจำลองเครื่องควบคุมแบบพี พีไอ และพีไอดี (ก5.1) โดยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ ก2.1 ในการปรับแต่งเครื่องควบคุมชนิดต่างๆ

ตารางที่ ก2.1 ค่าคงที่การปรับแต่งเครื่องควบคุมโดยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์

To simulate this controller type	Use this value for the tuning constant
Proportional (P)	Gain > 0.0, Integral time = 1E6, Derivative time = 0.0
Proportional Integral (PI)	Gain > 0.0, Integral time > 0.0, Derivative time = 0.0
Proportional Integral Derivative (PID)	Gain > 0.0, Integral time > 0.0, Derivative time > 0.0

การป้อนค่าพารามิเตอร์ในหน้าต่างการตั้งค่าพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ ก5.2 ก่อนทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต้องทำการติดตั้งสายสัญญาณการรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรกระบวนการ (Process variables: PV) เข้ากับเครื่องควบคุม และสายสัญญาขาออกจากเครื่องควบคุมไปยังวาล์วควบคุม (OP) ซึ่งหลักวิธีการตั้งค่าโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์จะกำหนดค่าเริ่มต้นดังตารางที่ ก2.1 และช่วงของขอบเขตของค่าตัวแปรและค่าเป้าหมายดังตารางที่ ก2.2



รูปที่ ก5.2 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม

ตารางที่ ก2.2 หน้าต่างกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปรและค่าเป้าหมาย

Parameter	Initialized to
Operator set point	Measured Variable
Bias	Manipulated Variable
PV range minimum	If Measured Variable > 0 0 If Measured Variable < 0 2 x Measured Variable
PV range maximum	If Measured Variable > 0 2 x Measured variable If Measured Variable < 0 0
Output range maximum	If Manipulated Variable > 0 0 If Manipulated Variable < 0 2 x Manipulated Variable
Output range minimum	If Manipulated Variable > 0 2 x Manipulated Variable If Manipulated Variable < 0 0

ก2-1 ขอบเขตการปรับแต่งเครื่องควบคุม

หน้าต่างการปรับแต่งเครื่องควบคุมประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งขอบเขตของค่าพารามิเตอร์กำหนดโดยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ ดังตารางที่ ก2.3

ตารางที่ ก2.3 ขอบเขตการป้อนค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์

Description	Parameter	Units	Valid values	Default Value
Operator set point	Spo	-	-1E9 -> 1E9	50
Bias	Bias	-	-1E9 -> 1E9	0
Gain	Gain	-	-1E9 -> 1E9	1
Integral time	IntegralTim e	min	1E-3 -> 1E12	20
Derivative time	DerivTime	min	0 -> 1E6	0
Controller action	Action	-	Direct Reverse	Direct

คำอธิบาย

1. Operator set point (SPo) ถูกใช้เมื่อเครื่องควบคุมอยู่ในรูปแบบการทำงานอัตโนมัติ (Auto mode) แต่หากเครื่องควบคุมอยู่ในรูปแบบลำดับขั้น ค่าเป้าหมายจะเป็นแบบการควบคุมจากทางไกล (Remote Set point)
2. Bias เป็นค่าคงที่ในส่วนของสัญญาณขาออกจากเครื่องควบคุม โดยทั่วไปค่าไบแอสถูกตั้งตามค่าของตัวแปรปรับเมื่อกระบวนการอยู่ในสถานะคงตัว
3. Gain เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึง พจน์ของค่าความไวในการตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งอยู่ในเทอมไร้หน่วย นอกจากนี้ ค่าความไวในการตอบสนองของกระบวนการยังสัมพันธ์กับค่าแถบสัดส่วนความคลาดเคลื่อน (Proportional band) ของเครื่องควบคุม แสดงได้ดังสมการ

$$\text{Gain} = 100\% / \text{Proportional band}$$

4. Integral Time หรือรู้จักในนามค่า Reset time ซึ่งอยู่ในหน่วยของ เวลาต่อรอบการทำซ้ำ โดยเป็นเวลาที่เครื่องควบคุมใช้ในการปรับค่า Kc เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งเท่า
5. Derivative time เป็นค่าเวลาคงที่อนุพนธ์ ในหน่วยของเวลา

ก2-2 พฤติกรรมของเครื่องควบคุม

พฤติกรรมของเครื่องควบคุมสามารถกำหนดได้ทั้งแบบทางตรง (Direct) และแบบสวนกลับ (Reverse) แสดงดังตาราง ก2.4

ตารางที่ ก2.4 พฤติกรรมของเครื่องควบคุมและค่าของตัวแปรปรับ

When the action is	And the measured variable	Then the manipulated variable is
Direct	Increases	Increased
Direct	Decreases	Decreased
Reverse	Increases	Decreased
Reverse	Decreases	Increased

ก2-3 ขั้นตอนวิธีของเครื่องควบคุมพีไอดี (PID algorithms)

สมการที่ใช้ในแบบจำลองเครื่องควบคุมพีไอดีที่อธิบายซึ่งสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมสัมพันธ์กับขั้นตอนวิธีของเครื่องควบคุม ซึ่งแบ่งได้ 3 รูปแบบ คือ

1. ขั้นตอนวิธีแบบอุดมคติ (Ideal algorithm)

สมการที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมแสดงได้ดังนี้

$$OP = Bias + Gain * \left\{ E_P + \frac{1}{IntegralTime} \int E_I.dt + DerivTime \frac{d(E_D)}{dt} \right\}$$

โดยที่

E_p คือ ความคลาดเคลื่อนของแบบสัดส่วน (Proportional mode error)

E_I คือ ความคลาดเคลื่อนของแบบอินทิกรัล (Integral mode error)

E_D คือ ความคลาดเคลื่อนของแบบอนุพันธ์ (Derivative mode error)

ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดนี้ถูกพัฒนามาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน โดยอยู่ในรูปสมการ

ค่าความคลาดเคลื่อน = ค่าเป้าหมาย - ค่ากระบวนการ

2. ขั้นตอนวิธีแบบอนุกรม (Series algorithm)

สมการที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมแสดงได้ดังนี้

$$OP = Bias + Gain.\left\{ E_P + \frac{1}{IntegralTime} \int E_I.dt \right\}.\left\{ 1 + DerivTime \frac{d(E_D)}{dt} \right\}$$

3. ขั้นตอนวิธีแบบขนาน (Parallel algorithm)

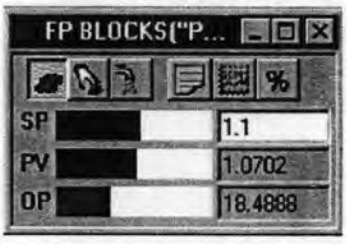
สมการที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมแสดงได้ดังนี้

$$OP = Bias + Gain.E_P + \frac{1}{IntegralTime} \int E_I.dt + DerivTime \frac{d(E_D)}{dt}$$

ก2-4 หน้าต่างแสดงค่าการควบคุม (PID faceplate)

เครื่องควบคุมพีไอดีมีหน้าต่างในการเฝ้าติดตามกระบวนการระหว่างการดำเนินกระบวนการ ซึ่งมีรูปแบบที่คล้ายกับเครื่องควบคุมแบบพีไอดีจริง โดยประกอบด้วยบาร์แนวนอนสามแถวตามแนวนอนแสดงซึ่งค่าเป้าหมาย ค่าตัวแปรกระบวนการ และค่าสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม แสดงเป็นช่วงแบบค่าเปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ ข5.3

รูปที่ ก5.3 หน้าต่างเฝ้าติดตามค่ากระบวนการของเครื่องควบคุมพีไอดี

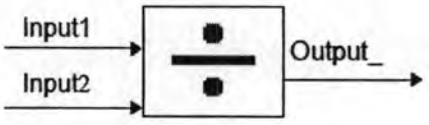


โดยที่ สามปุ่มแรกด้านบนซ้ายเป็นส่วนสำหรับการปรับรูปแบบการทำงานของเครื่องควบคุม ระหว่างการทำงานแบบปรับค่าเอง การทำงานแบบอัตโนมัติ และการทำงานแบบลำดับขั้นตามลำดับ ในกรณีที่อยู่ในการทำงานแบบอัตโนมัติ ช่องป้อนค่าเป้าหมายจะเป็นพื้นสีขาว หมายความว่าเป็นส่วนที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าใหม่ได้ เมื่ออยู่ในการทำงานแบบปรับค่าเอง ช่อง OP หรือค่าสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมจะเป็นพื้นสีขาว นั่นหมายความว่าการทำงานแบบปรับค่าเองจะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าในช่อง OP ได้

ปุ่มที่ 4 ทางด้านบนซ้ายเป็นการเข้าสู่หน้าต่างการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ปุ่มที่ 5 เป็นปุ่มแสดงกราฟของกระบวนการ ค่าเป้าหมายและค่าสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม และปุ่มที่ 6 เป็นปุ่มเปลี่ยนแปลงการแสดงค่าตัวแปรในรูปของหน่วยไปเป็นค่าเปอร์เซ็นต์

ก2.5 บล็อก Ratio

บล็อก Ratio คำนวณค่าสัดส่วนระหว่างสัญญาณขาเข้า 1 ต่อสัญญาณขาเข้า 2 (รูป ก6.)



รูปที่ ก6. บล็อกการจำลองแบบ Ratio

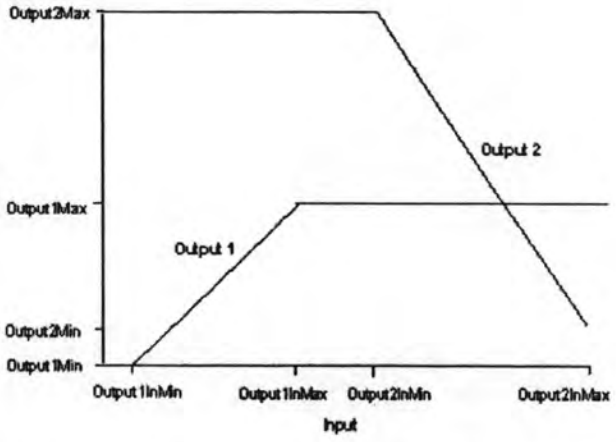
สมการการคำนวณของบล็อก Ratio แสดงดังสมการ

$$Output_ = \frac{Input1}{Input2}$$

ก2.6 บล็อก SplitRange

รูปที่ ก7.1 บล็อกการจำลองแบบ SplitRange

บล็อก SplitRange (รูป ก7.1) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาเข้าต่อสัญญาณขาออกได้ดังรูปที่ ก7.2



รูปที่ ก7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณของตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก

ซึ่งในตัวอย่างที่ได้แสดง สัญญาณขาออกจะมีพฤติกรรมแสดงดังตาราง ก3.1

ตารางที่ ก3.1 พฤติกรรมของตัวแปรขาออกของบล็อกสัญญาณ

Output	Action	Meaning
1	Direct	Increases as the input increases
2	Reverse	Decreases as the input increases

อธิบายได้ว่า สัญญาณขาออก 1 เพิ่มจากสัญญาณขาออก 1MIN ไป 1MAX เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของสัญญาณขาออกจาก 1InMin ไป 1InMax

สัญญาณขาออก 2 ลดลงจากสัญญาณขาออก 2MAX ไป 2MIN เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของสัญญาณขาออกจาก 2InMin ไป 2InMax

พารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดลงในบล็อก SplitRange แสดงดังตารางที่ ก3.2

ตารางที่ ก3.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของบล็อก SplitRange

Parameter	Description	Units	Valid Values	Default Value
Output1Action	Action for Output 1	–	Direct Reverse	Direct
Output1Min	Minimum value of Output 1	–	-1E9 ->1E9	0
Output1Max	Maximum value of Output 1	–	-1E9 ->1E9	100
Output1InMin	Value of input above which Output 1 starts to change	–	-1E9 ->1E9	0
Output1InMax	Value of input above which Output 1 stops changing	–	-1E9 ->1E9	50
Output2Action	Action for Output 2	–	Direct Reverse	Direct
Output2Min	Minimum value of Output 2	–	-1E9 ->1E9	0
Output2Max	Maximum value of Output 2	–	-1E9 ->1E9	100
Output2InMin	Value of input above which Output 2 starts to change	–	-1E9 ->1E9	50
Output2InMax	Value of input above which Output 2 stops changing	–	-1E9 ->1E9	100

โดยที่ และพฤติกรรมของ Output1Action ระบุไว้ไม่ว่าสัญญาณขาออก 1 เพิ่มหรือลดดังที่สัญญาณขาเข้าเพิ่มขึ้น แสดงผลของพฤติกรรมของสัญญาณขาออก 1 ต่อการเพิ่มของสัญญาณขาเข้า ดังตาราง ก3.3

ตารางที่ ก3.3 ผลของพฤติกรรมของตัวแปรขาออก 1

If Output1Action is	The result is
Direct	Output 1 increases as Input increases
Reverse	Output 1 decreases as Input increases

Output1Min ระบุถึงค่าต่ำที่สุดของสัญญาณขาออก 1

Output1Max ระบุถึงค่าสูงที่สุดของสัญญาณขาออก 1

Output1InMin ระบุถึงค่าของสัญญาณขาเข้าเกินกว่าที่ซึ่งสัญญาณขาออก 1 เริ่มเปลี่ยนแปลง

Output1InMax ระบุถึงค่าของสัญญาณขาเข้าเกินกว่าที่ซึ่งสัญญาณขาออก 1 ไม่เปลี่ยนแปลง

และพฤติกรรมของ Output2Action ระบุไว้ไม่ว่าสัญญาณขาออก 1 เพิ่มหรือลดดังที่สัญญาณขาเข้าเพิ่มขึ้น แสดงผลของพฤติกรรมของสัญญาณขาออก 2 ต่อการเพิ่มของสัญญาณขาเข้า ดังตาราง ก3.4

ตารางที่ ก3.4 ผลของพฤติกรรมของตัวแปรขาออก 2

If Output2Action is	The result is
Direct	Output 2 increases as Input increases
Reverse	Output 2 decreases as Input increases

Output2Min ระบุถึงค่าต่ำที่สุดของสัญญาณขาออก 2

Output2Max ระบุถึงค่าสูงที่สุดของสัญญาณขาออก 2

Output2InMin ระบุถึงค่าของสัญญาณขาเข้าเกินกว่าที่ซึ่งสัญญาณขาออก 2 เริ่มเปลี่ยนแปลง

Output2InMax ระบุถึงค่าของสัญญาณขาเข้าเกินกว่าที่ซึ่งสัญญาณขาออก 2 ไม่เปลี่ยนแปลง

ภาคผนวก ข (Appendix B)

ภาคผนวก ข

การคำนวณเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array)

ข1. บทนำ

เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนเป็นตารางเมทริกซ์ที่แสดงถึงค่าที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อเลือกคู่ตัวแปรปรับที่ใช้ในการควบคุมตัวแปรควบคุมนั้นๆ โดยค่าเกนสัมพัทธ์คือ ค่าเกนที่ถูกดัดแปลงเพื่อให้เป็นอิสระจากหน่วย กล่าวคือ เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับหน่วย นั่นหมายความว่า ค่าเกนสัมพัทธ์ของอุณหภูมิ ความดัน หรือไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลก็สามารถใช้เปรียบเทียบกันได้โดยตรง ซึ่งเกนสัมพัทธ์เป็นค่าที่สามารถกำจัดข้อด้อยของการเลือกคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมโดยใช้ค่าเกน

ข2. ขั้นตอนวิธีการหาค่าเมทริกซ์ของเกน

1. หาค่าเกนของตัวแปรที่สนใจเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับ j ที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม i ดังแสดงในรูปสมการพื้นฐานสมการที่ ข1

$$K_{11} = \left.\frac{\Delta c_1}{\Delta m_1}\right|_{m2} \qquad K_{12} = \left.\frac{\Delta c_1}{\Delta m_2}\right|_{m1} \qquad \text{ข1)}$$

$$K_{21} = \left.\frac{\Delta c_2}{\Delta m_1}\right|_{m2} \qquad K_{22} = \left.\frac{\Delta c_2}{\Delta m_2}\right|_{m1}$$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าเกนของอัตราการไหล 703 เมื่อทำการปรับวาล์ว V02 เพิ่ม 1% (พิจารณาควบคู่กับรูปที่ 4.3)

ข้อมูลตั้งต้น:

1. ค่าอัตราการไหลที่สถานะคงตัวเดิม 13,500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง วาล์วเปิด 50%
2. ปรับวาล์วให้เปิดเพิ่มเป็น 51% วัดค่าอัตราการไหลเมื่อกระบวนการเข้าสู่สถานะคงตัวใหม่ อัตราการไหลของกระแส 703 วัดค่าได้ 13820 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คำนวณหาค่าเกนโดยใช้สมการที่ ข1)

$$K_{11} = \frac{\Delta Output}{\Delta Input} = \frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} = \frac{13820 - 13500}{51 - 50} = 319.6 \frac{kg/hr}{\%CO_1}$$

3. เนื่องจากตัวการควบคุมกระบวนการแบบหลายตัวแปร (Multivariables control) กระบวนการจะมีตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมหลายตัวแปร ดังนั้น การแสดงค่าเกนในรูปของเมทริกซ์จะเป็นประโยชน์ยิ่งในการเลือกคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม กล่าวคือ ตัวแปรปรับที่ 1 อาจส่งผลกระทบต่อตัวแปรควบคุมอื่นๆเช่นเดียวกัน ดังนั้น ทำการหาค่าเกนของตัวแปรปรับที่ 1 เมื่อปรับเปลี่ยนค่าแล้วส่งผลกระทบต่อตัวแปรควบคุมอื่นเท่าไร

   ตัวอย่าง การปรับวาล์ว V02 เพิ่ม 1% อาจส่งผลต่อตัวแปรที่ต้องการควบคุมคือความดันที่ก้นหอกลั่น T-703 (ตัวแปรควบคุมลำดับที่ 3 ในตาราง 4.8) จึงต้องหาค่าเกนของการปรับวาล์ว V02 แล้วส่งผลกระทบต่อความดันที่ก้นหอกลั่นนี้ โดย

$$K_{31} = \frac{\Delta C_3}{\Delta M_1} = \frac{2.9853 - 3.0000}{51 - 50} = -0.0146 \frac{K/G}{\%CO_1}$$

4. ทำการคำนวณหาค่าเกนของตัวแปรที่ต้องการควบคุมเมื่อทำการปรับวาล์ว V02 จนครบทุกตัวแปร จะทำให้ได้แถวของค่าเกน 1 แถว ซึ่งเป็นแถวของการปรับวาล์ว V02 ต่อตัวแปรที่ต้องการควบคุมต่างๆ ในงานวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 16 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ ข1.

ตารางที่ ข1. ค่าเกนของตัวแปรควบคุมต่างๆเมื่อทำการปรับวาล์ว V02

เกน	**ตัวแปรที่ต้องการควบคุมในกระบวนการ**			
ปรับ V02	**1. กระแส 703**	**2. กระแส 715**	**3. ความดัน T-703**	**4. กระแส PW**
	319.6009	1.3926	-0.0146	-0.0553
	5. กระแส HX	**6. ความดัน D-702**	**7. กระแส LS**	**8. กระแส MS**
	-0.0405	0.0038	-0.2500	0.0400
	9. ความดัน 713	**10. อุณหภูมิ 713-3**	**11. กระแส 713**	**12. อุณหภูมิ 718**
	-0.0080	-0.0820	2.3000	0.0356
	13. ระดับ D-702	**14. ระดับ/2 D-702**	**15. ระดับ T-704**	**16. ระดับ D-711**
	-0.0187	-0.0017	0.0156	0.0847

หมายเหตุ: ตัวแปรต่างๆอยู่ในตาราง 4.8ก

5. ทำการปรับค่าการเปิดของวาล์ว V02 ให้เท่าเดิม จากนั้นทำการปรับวาล์วอื่นๆในกระบวนการและทำการหาค่าเกนด้วยวิธีที่ได้กล่าวในข้างต้น
6. หาค่าเกนสัมพัทธ์ในขั้นตอนต่อไป

2. ค่าเกนของตัวแปรควบคุม i และตัวแปรปรับ j นำมาหาค่าเกนสัมพัทธ์ในสมการที่ ข2 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีชื่อว่า MATLAB ในการคำนวณหาค่าเกนสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีตรงและวิธีการเขียนโค๊ดคำนวณ ดังจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป

$$\mu = \frac{K}{K'} = K.(K^{-1})' \qquad \text{ข2)}$$

วิธีการหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน

1. วิธีตรง โดยการคำนวณตามขั้นตอนของเมทริกซ์ดังสมการ ข2)
2. วิธีการเขียนโค๊ด โดยการเขียนโค๊ดลงใน M-file ของโปรแกรม MATLAB

ทั้งสองวิธีจะแสดงการหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ข3. การหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนวิธีตรง

1. สร้างตัวแปรขึ้นมาหนึ่งตัวแปร เพื่อเก็บค่าเมทริกซ์ของเกนที่คำนวณในหัวข้อ ข2. ในตัวอย่างได้ใช้ตัวแปร g เก็บค่าเมทริกซ์ของเกน ดังแสดงในรูปที่ ข1.

```
Command Window
g =

  Columns 1 through 8

  319.6009    1.3926   -0.0146   -0.0553   -0.0405    0.0038   -0.2500    0.0400
   11.6009   56.3926   -0.0035   -0.0168   -0.0125    0.0012   -0.0800    0.0100
  143.6009    6.3926   -0.0429    0.0248    0.0166   -0.0016    0.1200    0.1100
  -11.4798   -0.7215    0.0034    3.8267   -0.0871    0.0083   -0.5747   -0.0100
  -10.9458   -0.5215    0.0032   -0.1204    1.9040    0.0083   -0.5500   -0.0080
  -10.9518   -0.5215    0.0032   -0.1213   -0.0873    0.0084   -0.5520   -0.0080
   -0.3991   -0.6074   -0.0002    0.0035    0.0037   -0.0004   37.8624         0
   -3.3991   -0.6074    0.0008    0.0020    0.0013    1.7989    0.0098   23.7109
   -0.8798   -0.1215    0.0002   -0.1373   -0.0991    0.0095   -0.6260   -0.0020
   -2.3991   -0.6074    0.0005    0.0017    0.0010   -0.0001    0.0081   -0.0004
  -72.7158   -3.1215    0.0213   -0.0893   -0.0651    0.0062   -0.4160   -0.0520
  Columns 9 through 16

   -0.0080   -0.0820    2.3000    0.0356   -0.0187   -0.0017    0.0154    0.0847
   -0.0030    9.9870   -0.2000    0.0106   -0.0050   -0.0007    0.0017    0.0858
   -0.0187   -0.2300   13.2000    0.1376    0.0290    0.0001   -0.0029    0.0845
    0.0015    0.0182   -1.0400   -0.0109   -0.0104   -0.0029    0.0617    0.0175
    0.0014    0.0181   -0.9900   -0.0103   -0.0102   -0.0039    0.0595    0.0175
    0.0014    0.0174   -1.1200   -0.0103   -0.0103   -0.0041    0.0594    0.0175
         0   -0.0010    0.1000    0.0006    0.0042         0   -0.0330    0.0865
    0.0005    0.0050   -0.1000   -0.0024    0.0015         0   -0.0055    0.0865
   -0.0966    0.1250  -31.7900    0.1259   -0.0180   -0.0042    0.0806    0.0154
    0.0039    0.2167   -4.8000    0.0926    0.0012         0   -0.0055    0.0854
   -0.1207   -0.5462  165.2300   -0.7361    0.0116   -0.0040    0.0685    0.0299
         0   -0.0001         0    0.1032    0.0006   -0.0001   -0.0053    0.0865
    0.0172    0.2029  -11.6538   -0.1151   -0.2294   -0.0067    0.2716    0.0192
         0   -0.0001    0.0120    0.0000   -0.0006   -0.0039   -0.0022    0.0173
         0    0.0002         0    0.0000    0.0003   -0.0000   -0.1417    0.0173
         0    0.0001         0         0    0.0002   -0.0000   -0.1134    0.0173

>>
```

รูป ข1. ค่าเมทริกซ์ของเกนที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ ข2.

เนื่องจากกระบวนการที่ทำการศึกษามีตัวแปรปรับ 16 ตัวแปร และตัวแปรควบคุม 16 ตัวแปร ดังนั้น ตารางเมทริกซ์ของเกนจึงเป็นเมทริกซ์ขนาด 16X16 ซึ่งรายละเอียดของตัวแปรแสดงในตารางที่ 4.8ก

2. จากสมการ ข2) คำนวณหาเมทริกซ์ผกผันของค่าเกนในตาราง ข1. โดยใช้ฟังก์ชัน inv(...) สั่งการคำนวณหาเมทริกซ์ผกผันของค่าเกน ซึ่งเมื่อคำนวณได้ให้เก็บค่าลงในตัวแปร Ginv เขียนความสัมพันธ์ภาพรวมในหน้าต่างโปรแกรม MATLAB ได้ดังนี้

Ginv=inv(g) (รูป ข2.)

```
Command Window
>> Ginv=inv(g)

Ginv =

  1.0e+003 *

  Columns 1 through 8

    0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000
   -0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0002    0.0000    0.0000
    0.0122    0.0032   -0.0350   -0.0008   -0.0012    0.0635    0.0003    0.0001
   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0003   -0.0000   -0.0002    0.0000    0.0000
   -0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0005   -0.0005    0.0000    0.0000
   -0.0001   -0.0004    0.0097    0.0036    0.0052    0.1902    0.0023   -0.0000
    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
    0.0000    0.0000   -0.0007   -0.0003   -0.0004   -0.0144   -0.0002    0.0000
   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0084   -0.0000   -0.0000
    0.0000   -0.0000    0.0002    0.0000    0.0000   -0.0010   -0.0000   -0.0000
    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000
    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0001    0.0000    0.0000
   -0.0001   -0.0002   -0.0001   -0.0001   -0.0001    0.0911    0.0006    0.0000
   -0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0000   -0.0001   -0.0169   -0.0001   -0.0000
   -0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0001    0.0000    0.0000
    0.0000    0.0001   -0.0002   -0.0000   -0.0000    0.0011    0.0000    0.0000

  Columns 9 through 16

   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0001   -0.0001
   -0.0000   -0.0010   -0.0000    0.0007   -0.0000   -0.0002   -0.0049    0.0062
    0.0010   -0.1852   -0.0028    0.1836   -0.0089   -0.0606   -0.3489    0.4500
    0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0001    0.0001   -0.0001
    0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0001   -0.0001
   -0.0001    0.0225    0.0007   -0.0157   -0.0068   -0.1975    0.7078   -0.7937
    0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0005   -0.0006
    0.0000   -0.0017   -0.0001    0.0012    0.0005    0.0150   -0.0528    0.0591
   -0.0083    0.0003   -0.0015    0.0001    0.0002    0.0013   -0.0008   -0.0009
    0.0000    0.0055    0.0001   -0.0041    0.0001    0.0008    0.0296   -0.0373
   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0009   -0.0012
    0.0000   -0.0001   -0.0000    0.0098    0.0000   -0.0000    0.1922   -0.2406
   -0.0001    0.0081    0.0003   -0.0050   -0.0081   -0.0825    0.1850   -0.2016
   -0.0000   -0.0008   -0.0000    0.0006    0.0013   -0.2445   -1.0573    1.3199
   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0001   -0.0352    0.0352
   -0.0000   -0.0069   -0.0002    0.0052   -0.0001   -0.0012   -0.2676    0.3347

>> Gtran=Ginv'
```

รูป ข2. เมทริกซ์ผกผันของค่าเกน (Inverse matrix)

3. สลับแถวเป็นหลักและหลักเป็นแถวของเมทริกซ์ผกผันของค่าเกนในรูปที่ ข2. โดยใช้คำสั่ง Transpose ซึ่งใช้สัญลักษณ์ (...') โดยเก็บค่าของเมทริกซ์ที่ได้ลงในตัวแปรใหม่ที่ตั้งชื่อว่า Gtran เขียนความสัมพันธ์ภาพรวมในหน้าต่างโปรแกรม MATLAB ได้ดังนี้

Gtran=Ginv' (รูป ข3.)

Command Window

```
>> Gtran=Ginv'

Gtran =

  1.0e+003 *

  Columns 1 through 8

    0.0000   -0.0000    0.0122   -0.0000   -0.0000   -0.0001    0.0000    0.0000
    0.0000    0.0000    0.0032    0.0000    0.0000   -0.0004    0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0000   -0.0350   -0.0000   -0.0000    0.0097   -0.0000   -0.0007
   -0.0000   -0.0000   -0.0008    0.0003   -0.0000    0.0036    0.0000   -0.0003
   -0.0000   -0.0000   -0.0012   -0.0000    0.0005    0.0052    0.0000   -0.0004
    0.0000    0.0002    0.0635   -0.0002   -0.0005    0.1902   -0.0000   -0.0144
    0.0000    0.0000    0.0003    0.0000    0.0000    0.0023    0.0000   -0.0002
   -0.0000    0.0000    0.0001    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0000    0.0010    0.0000    0.0000   -0.0001    0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0010   -0.1852   -0.0000   -0.0000    0.0225   -0.0000   -0.0017
    0.0000   -0.0000   -0.0028   -0.0000   -0.0000    0.0007   -0.0000   -0.0001
    0.0000    0.0007    0.1836    0.0000   -0.0000   -0.0157    0.0000    0.0012
   -0.0000   -0.0000   -0.0089   -0.0000   -0.0000   -0.0068    0.0000    0.0005
   -0.0000   -0.0002   -0.0606    0.0001    0.0000   -0.1975    0.0000    0.0150
    0.0001   -0.0049   -0.3489    0.0001    0.0001    0.7078    0.0005   -0.0528
   -0.0001    0.0062    0.4500   -0.0001   -0.0001   -0.7937   -0.0006    0.0591

  Columns 9 through 16

   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0000   -0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000   -0.0002    0.0000   -0.0000    0.0001
    0.0000    0.0002    0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0001   -0.0000   -0.0002
    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0000   -0.0000   -0.0000
    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0001   -0.0000   -0.0000
    0.0084   -0.0010   -0.0000   -0.0001    0.0911   -0.0169    0.0001    0.0011
   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0006   -0.0001    0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
   -0.0083    0.0000   -0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0000   -0.0000   -0.0000
    0.0003    0.0055    0.0000   -0.0001    0.0081   -0.0008    0.0000   -0.0069
   -0.0015    0.0001    0.0000   -0.0000    0.0003   -0.0000    0.0000   -0.0002
    0.0001   -0.0041    0.0000    0.0098   -0.0050    0.0006    0.0000    0.0052
    0.0002    0.0001    0.0000    0.0000   -0.0081    0.0013   -0.0000   -0.0001
    0.0013    0.0008    0.0000   -0.0000   -0.0825   -0.2445   -0.0001   -0.0012
   -0.0008    0.0296    0.0009    0.1922    0.1850   -1.0573   -0.0352   -0.2676
   -0.0009   -0.0373   -0.0012   -0.2406   -0.2016    1.3199    0.0352    0.3347
```

รูปที่ ข3. สลับแถวเป็นหลักและหลักเป็นแถวของเมทริกซ์ผกผันของค่าเกน (Transpose)

4. เมทริกซ์ที่ได้จากการสลับแถวและหลักในรูปที่ ข3. นำมาคูณกับเมทริกซ์ของเกน (รูป ข1.) ตามสมการ เก็บค่าการคำนวณไว้ที่ตัวแปรที่ชื่อ RGA แสดงดังรูปที่ ข4.

$$\mu = \frac{K}{K'} = K.(K^{-1})' = g.*Gtran = RGA \qquad \text{ข3)}$$

Command Window

```
>> RGA=g.*Gtran

RGA =

  Columns 1 through 8

    1.1756   -0.0010   -0.1786    0.0000    0.0000   -0.0005   -0.0000    0.0004
    0.0002    1.0827   -0.0113   -0.0000   -0.0000   -0.0005   -0.0000    0.0003
   -0.2037   -0.1855    1.5005   -0.0000   -0.0000   -0.0156   -0.0000   -0.0811
    0.0000    0.0003   -0.0028    0.9688    0.0000    0.0302   -0.0000    0.0027
    0.0000    0.0003   -0.0038    0.0000    0.9562    0.0434   -0.0000    0.0032
   -0.0724   -0.0928    0.2057    0.0294    0.0435    1.5902    0.0040    0.1155
   -0.0000   -0.0007   -0.0001    0.0000    0.0000   -0.0009    0.9987         0
    0.0000   -0.0000    0.0001    0.0000    0.0000   -0.0040    0.0000    1.0039
    0.0001    0.0002    0.0002   -0.0000   -0.0000   -0.0013   -0.0000   -0.0000
    0.0016    0.5954   -0.0926   -0.0001   -0.0000   -0.0023   -0.0000    0.0007
   -0.0011    0.0825   -0.0588    0.0001    0.0000    0.0045    0.0000    0.0029
   -0.0005   -0.4436   -0.0184    0.0000   -0.0000    0.0016    0.0000         0
    0.0986    0.0980   -0.3413    0.0016    0.0003   -0.6404   -0.0028   -0.0485
    0.0006    0.0193    0.0012    0.0000    0.0000    0.0079    0.0000         0
   -0.0049    0.5965         0    0.0001    0.0000   -0.0283    0.0011         0
    0.0060   -0.7517         0   -0.0000   -0.0000    0.0160   -0.0010         0

  Columns 9 through 16

    0.0001   -0.0003    0.0003    0.0004    0.0025    0.0001   -0.0000    0.0010
    0.0000   -0.0838    0.0000    0.0000    0.0008   -0.0000   -0.0000    0.0116
   -0.0005   -0.0356    0.0440    0.0006   -0.0024   -0.0000    0.0000   -0.0207
    0.0000    0.0000   -0.0001   -0.0001    0.0010    0.0000   -0.0001   -0.0002
    0.0000    0.0001   -0.0001   -0.0001    0.0010    0.0002   -0.0001   -0.0003
    0.0120   -0.0167    0.0206    0.0010   -0.9344    0.0693    0.0060    0.0192
         0    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0025         0   -0.0000    0.0004
   -0.0000   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000         0   -0.0000    0.0000
    0.8008    0.0010    0.1975    0.0002    0.0016    0.0000   -0.0000   -0.0002
    0.0011    1.1992   -0.1062   -0.0138    0.0097         0   -0.0000   -0.5928
    0.1832   -0.0817    0.8693    0.0015    0.0032    0.0001    0.0000   -0.0056
         0    0.0004         0    1.0117   -0.0028   -0.0001   -0.0000    0.4516
    0.0034    0.0180   -0.0255   -0.0052    1.8593   -0.0084   -0.0044   -0.0027
         0   -0.0001    0.0002   -0.0000    0.0477    0.9439    0.0002   -0.0209
         0    0.0047         0    0.0038    0.0511    0.0211    4.9850   -4.6303
         0   -0.0052         0         0   -0.0407   -0.0264   -3.9865    5.7897

>>
```

รูปที่ ข4. เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (RGA)

วิธีการพิจารณาตารางเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนศึกษาในหัวข้อ 4.3.3

ข4. การหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนวิธีเขียนโค๊ด

1. เขียนโค๊ดใน M-file ของโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างสมการการคำนวณให้สามารถทำการคำนวณหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการคำนวณหลายขั้นตอน โค๊ดที่สร้างขึ้นมาอ้างอิงดังรูปที่ ข5. โดยใช้สมการ ข2)

```
function lambda=rga(g)
%
%calculate the Relative Gain Array for a
%square  gain matrix of any size
%
%first, check the dimentions to see if the
%process gain matrix is square
%
    [mrow ncol]=size(g);
%
%if the gain matrix is not square, let the
%user know
%
    if mrow~=ncol;
        disp('needs to be square, buddy')
    end;
%
%the matrix ghat is simply the inverse of the
%gain matrix. ghatt is the transpose of ghat
%
    ghat=inv(g);
    ghatt=ghat';
%
%perform an element by element multiplication
%of g and ghatt to find the Relative Gain Array
%
    lambda=g.*ghatt;
end
```

รูปที่ ข5. โค๊ดการคำนวณเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนใน M-file โปรแกรม MATLAB (B. Bequette, 1998)

2. ป้อนค่าเมทริกซ์ของเกนดังรูปที่ ข1.
3. พิมพ์คำสั่งให้โปรแกรมดึงค่าตัวแปร g ที่กำหนดให้เป็นเมทริกซ์ของเกนไปคำนวณหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน โดยการพิมพ์คำสั่ง rga(g) แล้วกด Enter
4. โปรแกรมจะคำนวณค่าเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนทันที ได้คำตอบดังรูป ข4.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชูศักดิ์ คิ้วเจริญ เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2550 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550