

การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งสำหรับควบคุมพิเศษของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย



นางสาวนันทนา ศิริพันธ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

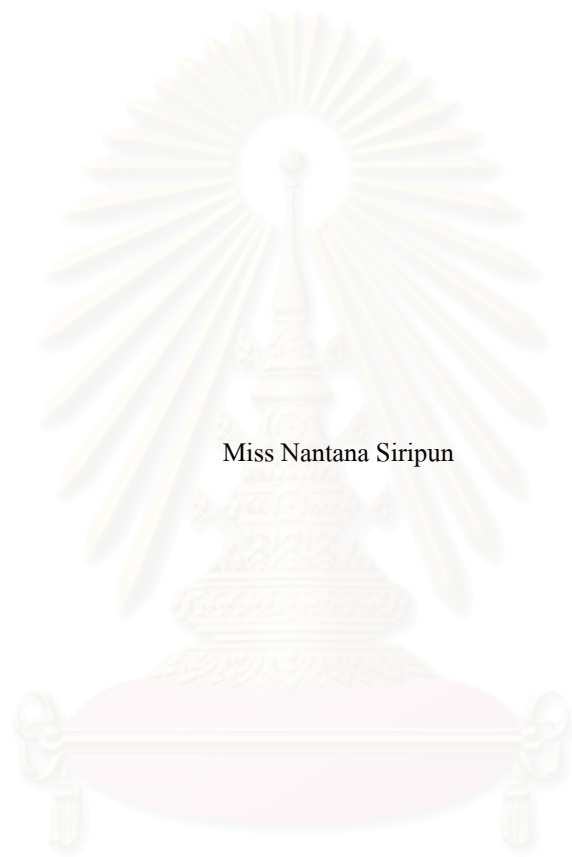
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0275-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GLOBALLY LINEARIZING CONTROL FOR pH CONTROL  
OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS



Miss Nantana Siripun

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0275-4



นันทนา ศิริพันธ์ : การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งสำหรับควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (GLOBALLY LINEARIZING CONTROL FOR pH CONTROL OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS)

อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ไพศาล กิตติศุภกร, 174 หน้า. ISBN 974-13-0275-4

โรงงานอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท อาทิเช่น โรงงานชุบโลหะและโรงงานแปรรูปเหล็ก มีการใช้กรดแก่-ด่างแก่ในสายการผลิต จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อตกตะกอนโลหะหนักและควบคุมพีเอชของน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงาน การควบคุมพีเอชของน้ำเสียมักมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูงและเปลี่ยนแปลงตามเวลา การควบคุมแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กัน คือ การควบคุมแบบเปิด-ปิดและการควบคุมแบบพีไอดีจะให้ผลการควบคุมไม่ดีนัก ดังนั้นเทคนิคการควบคุมแบบก้าวหน้าจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาในการควบคุมพีเอช

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยายเพื่อควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคนิคการควบคุมแบบก้าวหน้าที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ สามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการไม่เชิงเส้นที่มีอินพุตตัวเดียวเอาต์พุตตัวเดียวหรืออินพุตหลายตัวเอาต์พุตหลายตัว ตัวควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องใช้ค่าสเกตและพารามิเตอร์ที่ถูกต้องในการคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ ดังนั้นตัวประมาณค่าสเกตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยายจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง ได้มีการจำลองการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยายเพื่อควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ ในการจำลองได้ทำการทดสอบสมรรถนะโดยให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและให้สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนเกิดขึ้นกับเครื่องมือวัด และนำมาทำการทดสอบความทนทาน โดยให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุมหรือกระบวนการเกิดขึ้น ทำการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีเดียวกันกับที่กล่าวมา เมื่อนำผลการควบคุมมาเปรียบเทียบกันพบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ให้สมรรถนะการควบคุมใกล้เคียงกับการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีที่สภาวะปกติ และให้สมรรถนะและความทนทานดีกว่าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรระบบและมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิติ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

# # 4170368721: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : GLOBALLY LINEARIZING CONTROL/pH CONTROL/KALMAN FILTER  
NANTANA SIRIPUN: GLOBALLY LINEARIZING CONTROL FOR pH CONTROL OF  
THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF.  
PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D., 174 pp. ISBN 974-13-0275-4

Several chemical industrial plants such as electroplating and metal finishing plants have used strong-acids and strong-bases in the production lines which need to be treated in a wastewater system to achieve the compliance with the standard of Industrial Department requirement. The pH control of a wastewater treatment process is one of the most challenging control problems because of high nonlinearity and time-variant of pH value during pH titration. A conventional PID controller and an on-off controller are rarely able to handle this nonlinearity resulting in poor control performances. Therefore, advanced control techniques are needed to cope with the pH control problem.

This research presents the implementation of Globally Linearizing Control (GLC) together with an extended Kalman filter to control pH of the wastewater treatment process that is a part of an electroplating plant. The GLC, one of advanced model-based control techniques, has been developed to be applied to deal with both SISO or MIMO nonlinear process systems. Since the GLC is a model based control technique, it needs measurements and values of states and parameters which are neither all measurable nor known exactly. Therefore, the extended Kalman filter has been applied to estimate unavailable or unknown states and parameters and these estimates are incorporated in the control action determination in the GLC algorithm. Simulation study based on a written MatLab computer program is carried out in the presence of disturbances as well as plant/model mismatch. Simulation results have shown that in a nominal case, the GLC is able to control the pH of the system to a desired set point and its control performance is equivalent to the PID one. In the presence of plant/model mismatch, the GLC is still able to handle this mismatch and gives a good control performance whereas the PID gives a poor control response; the GLC is much more robust than the PID.

Department of Chemical Engineering      Student's signature.....

Field of Chemical Engineering            Advisor's signature.....

Academic year 2000

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยความช่วยเหลือและแนะนำจากท่านตลอดจนข้อเสนอแนะ และแนวความคิดต่างๆ ของงานวิจัยด้วยดีตลอดมาจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ, อาจารย์ดร. มนต์รี วงศ์ศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชงไชย ศรีนพคุณ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและได้ให้ข้อคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้

ขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เป็นแหล่งความรู้ให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาค้นคว้าตลอดการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือสนับสนุนทางการเงิน, ในด้านการศึกษา และการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จการศึกษา

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องๆ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือตลอดมาให้กำลังใจ ด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้ทำการวิจัยใคร่ขอกราบขอบคุณบิดามารดาและผู้มีอุปการคุณที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่งในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป.....	8
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	18
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์.....	22
2.4 บทสรุป.....	24
3. ทฤษฎีของการควบคุม.....	25
3.1 การควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่ง.....	25
3.1.1 อัลกอริทึมของการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่ง.....	25
3.1.2 อนุพันธ์ทางเรขาคณิตที่ใช้ในการออกแบบการควบคุม.....	29
3.1.3 การเลือกค่าพารามิเตอร์ปรับจูน $\beta_{jk}$ .....	32



3.1.4 การปรับจูนพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่ง.....	33
3.2 การประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์.....	34
3.2.1 คาลมานฟิลเตอร์.....	35
3.2.2 คาลมานฟิลเตอร์แบบยืดยาย.....	43
3.2.3 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของคาลมานฟิลเตอร์.....	48
3.3 การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	49
3.4 บทสรุป.....	50
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการและการประยุกต์ใช้	
การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	51
4.1 กระบวนการที่ใช้ในการจำลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
4.2 การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่ง	
ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดยาย.....	56
4.3 บทสรุป.....	59
5. การจำลอง, ผลการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการควบคุม.....	60
5.1 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	60
5.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการควบคุม.....	62
5.2.1 ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุม	
แบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี.....	63
5.2.2 ทำการเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุมระหว่างการควบคุม	
แบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี.....	73
6. สรุปผล.....	85
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	85
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก กระบวนการชุบโลหะ.....	97
ก.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	97
ก.2 การชุบโลหะประเภทต่างๆ.....	100
ก.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย.....	105
ก.4 ความเป็นพิษของโลหะหนัก.....	105
ภาคผนวก ข การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....	109



ข.1 การกำจัดโลหะหนัก.....	109
ภาคผนวก ค การปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง.....	116
ค.1 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	116
ค.2 การนำไปใช้งานและการควบคุมการทำงาน.....	118
ค.3 การเลือกสารเคมีที่จะนำมาใช้ในการปรับค่าพีเอช.....	119
ภาคผนวก ง ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล่อม ฉบับที่ 3	
เรื่อง กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม.....	123
ภาคผนวก จ การแก้สมการคณิตศาสตร์ในกระบวนการวิศวกรรมเคมี	
โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข.....	127
จ.1 วิธีการของออยเลอร์.....	128
จ.2 วิธีการของรุ่งกัตตา.....	128
ภาคผนวก ฉ การประมาณเชิงเส้นของระบบไม่เป็นเชิงเส้น, ความควบคุมได้,	
ความสังเกตได้และเสถียรภาพของระบบ.....	132
ฉ.1 การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	132
ฉ.2 ความควบคุมได้.....	136
ฉ.3 ความสังเกตได้.....	138
ฉ.4 เสถียรภาพของระบบ.....	139
ภาคผนวก ช กราฟแสดงผลการควบคุม.....	141
ภาคผนวก ซ โปรแกรมเม็ทแลบ.....	154
ซ.1 การพัฒนาของโปรแกรมเม็ทแลบ.....	154
ซ.2 การประยุกต์ใช้โปรแกรมเม็ทแลบ.....	155
ภาคผนวก ฅ ตัวอย่างการเขียนโค้ดโปรแกรม.....	157
ฅ.1 ตัวอย่างโปรแกรมเม็ทแลบของระบบควบคุมแบบ	
โกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	157
ฅ.2 ตัวอย่างโปรแกรมเม็ทแลบของระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	167
ประวัติผู้เขียน.....	174

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไร้ซึ่ง.....	29
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง.....	41
รูปที่ 3.3 แสดงการทำงานของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับระบบ.....	42
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยาย.....	46
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไร้ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	50
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	52
รูปที่ 4.2 ดังตกตะกอนโลหะนิกเกิล (ซ้าย) และดังปรับสภาพน้ำให้เป็นกลาง (ขวา).....	52
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไร้ซึ่ง ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยาย.....	59
รูปที่ 5.1 ผลการตอบสนองของค่าพีเอชและความเข้มข้นของนิกเกิลของน้ำเสีย ในดังตกตะกอนนิกเกิล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_m$ เพิ่มขึ้น 30%) ในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	61
รูปที่ 5.2 ผลการตอบสนองของค่าพีเอชของน้ำเสียในดังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_m$ เพิ่มขึ้น 30%) ในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	62
รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิกเกิลของน้ำเสียในดังตกตะกอนนิกเกิล กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไร้ซึ่ง ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	64
รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในดังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไร้ซึ่ง ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	65
รูปที่ 5.5 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิกเกิลของน้ำเสียในดังตกตะกอนนิกเกิล กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	65
รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในดังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	66



รูปที่ 5.18 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบ โกลบอลลิสินีร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	76
รูปที่ 5.19 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$ ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบ โกลบอลลิสินีร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	78
รูปที่ 5.20 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$ ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบ โกลบอลลิสินีร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	78
รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$ ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	79
รูปที่ 5.22 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$ ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	79
รูปที่ 5.23 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบ โกลบอลลิสินีร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	80
รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบ โกลบอลลิสินีร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์.....	81
รูปที่ 5.25 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	81
รูปที่ 5.26 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี.....	82
รูปที่ ก.1 แสดงการต่อของส่วนต่าง ๆ ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	97
รูปที่ ก.2 แสดงขั้นตอนการชุบโลหะอย่างง่าย.....	99
รูปที่ ก.3 ขั้นตอนการชุบโครเมียมบนชิ้นงานประเภทต่าง ๆ.....	103
รูปที่ ก.4 แสดงขั้นตอนการชุบโครเมียมอย่างแข็ง.....	104

รูปที่ ก.5	แสดงของเสียที่เกิดจากขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการชุบโลหะโดยทั่วไป.....	106
รูปที่ ข.1	แสดงค่าความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ.....	112
รูปที่ ข.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักต่างๆ.....	113
รูปที่ ค.1	การเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามปริมาณด่างที่ใส่ลงไปทำปฏิกิริยา.....	119



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ โกลบอลลิณีเยอร์ไรซิ่งในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป.....	13
ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	21
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่องและคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดยาย.....	47
ตารางที่ 4.1 สถานะการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงที่สำหรับควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง.....	55
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนตัวควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซิ่งที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สำหรับควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง.....	66
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง.....	66
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าอินทิกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาด IAE ในการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนโลหะนิเกิลกรณีต่างๆ.....	83
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าอินทิกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาด IAE ในการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางกรณีต่างๆ.....	84
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของสารเคมีเกี่ยวกับปริมาณที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาสะเทินโดยค่า neutralization factor เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถในการทำปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับน้ำหนักของ calcium oxide (CaO).....	120



## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ของกระบวนการ

$\rho$	= ค่าความหนาแน่นของสาร, kg/liter
$C_{H,a}$	= ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในกรด, mol/liter
$C_{H+}$	= ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน, mol/liter
$C_{ni-upper}$	= ความเข้มข้นของนิเกิลมาตรฐานในน้ำเสียที่กรมโรงงานกำหนดไว้, mol/liter
$C_{nicap}$	= ค่าประมาณความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสีย, mol/liter
$C_{Ni,in}$	= ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียก่อนเข้าถังตกตะกอนนิเกิล, mol/liter
$C_{Ni,out}$	= ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล, mol/liter
$C_{OH-}$	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน, mol/liter
$C_{OH,b}$	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในเบส, mol/liter
$C_{OH,in}$	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียก่อนเข้าถังตกตะกอนนิเกิล, mol/liter
$C_{OH,out}$	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล, mol/liter
$C_{OH,out2}$	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง, mol/liter
$C_{OHoutcap}$	= ค่าประมาณความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล, mol/liter
$C_{OHout2cap}$	= ค่าประมาณความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง, mol/liter
$F_a$	= อัตราการไหลเข้าถังของกรด, liter/min
$F_b$	= อัตราการไหลเข้าถังของเบส, liter/min
$F_{in}$	= อัตราการไหลเข้าถังของน้ำเสีย, liter/min
$F_{out2}$	= อัตราการไหลออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง, liter/min
$k_1$	= ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, $(\text{min})^{-1} \cdot (\text{mol/liter})^2$
$K_w$	= ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ
$N_1, N_2$	= ค่าคงที่สมดุล
pH	= พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล
pH <sub>2</sub>	= พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง
pH <sub>sp</sub>	= พีเอชเซ็ทพอยท์ของน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล
pH <sub>2sp</sub>	= พีเอชเซ็ทพอยท์ของน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง



- $\text{pH}_{\text{cap}}$  = ค่าประมาณพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล  
 $\text{pH}_{2\text{cap}}$  = ค่าประมาณพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง  
 $t$  = เวลา  
 $V$  = ปริมาตรของ, liter

### สัญลักษณ์ของตัวควบคุม

- $\tau_D$  = ค่าคงที่เวลาเดริเวทีฟของตัวควบคุมแบบพีไอดี  
 $\tau_I$  = ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดี  
 $A$  = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตท  
 $B$  = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปรับและค่าสเตท  
 $C$  = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดและค่าสเตท  
 $e$  = ค่าความผิดพลาดจากการประมาณ  
 $IAE$  = ค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด  
 $K$  = ค่าเกนคาลมาน  
 $K_C$  = ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดี  
 $L_g$  = ตัวดำเนินการ Lie derivative  
 $P$  = ค่าเมตริกซ์ของความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณ  
 $Q$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของแบบจำลองของกระบวนการ  
 $R$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวนค่าตัวแปรวัด  
 $u$  = ตัวแปรปรับกระบวนการ  
 $v$  = ตัวแปรปรับจากตัวควบคุมภายนอก  
 $v_k$  = ตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของกระบวนการ  
 $w_k$  = ตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนค่าการวัด  
 $x$  = ตัวแปรสเตท  
 $x_m$  = ตัวแปรสเตทที่สามารถวัดค่าได้  
 $x_{um}$  = ตัวแปรสเตทที่ไม่สามารถวัดค่าได้  
 $\hat{x}$  = ค่าประมาณของสเตท  
 $\hat{x}_{um}$  = ค่าประมาณสเตทที่ไม่สามารถวัดค่าได้  
 $y$  = ตัวแปรเอาต์พุต  
 $y^{sp}$  = ตัวแปรเอาต์พุตเซ็ทพอยท์

สัญลักษณ์ตัวห้อย/ตัวยก

cap = ค่าประมาณ

sp = เซ็ทพอยท์

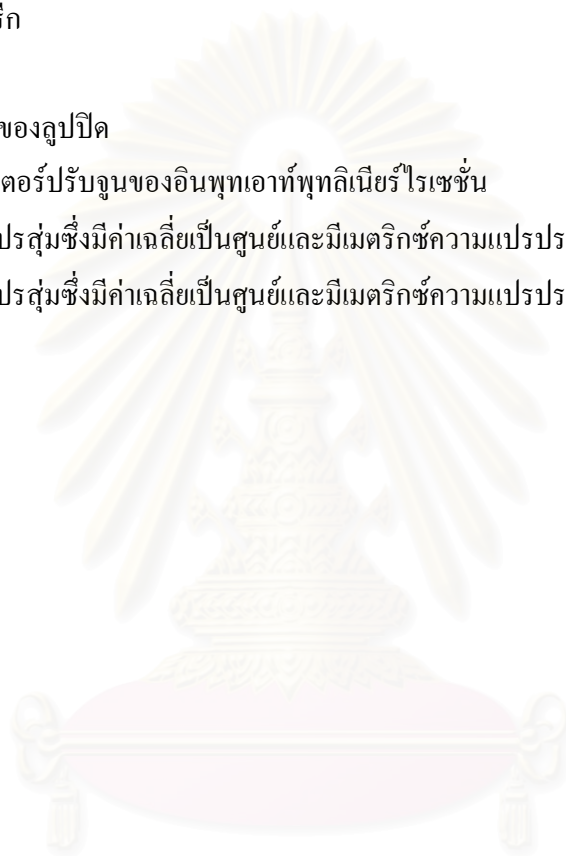
สัญลักษณ์อักษรกรีก

$\lambda$  = ค่าโพลของรูปปิด

$\beta$  = พารามิเตอร์ปรับจูนของอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชัน

$\varepsilon$  = ค่าตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีเมตริกซ์ความแปรปรวน คือ  $WQW^T$

$\eta$  = ค่าตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีเมตริกซ์ความแปรปรวน คือ  $VRV^T$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย, วัตถุประสงค์ของงานวิจัย, ขอบเขตของงานวิจัย, ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย, ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำงานวิจัยและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โรงงานชุบโลหะเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลายประเภทที่สร้างปัญหาด้านมลพิษ อันเกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดจากในกระบวนการผลิตของโรงงานชุบโลหะ เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิต จึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมและวิธีการบำบัดให้ถูกต้องก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม วิธีการที่นิยมใช้คือการตกตะกอนโลหะหนักโดยการปรับค่าพีเอชของน้ำทิ้งให้เหมาะสมต่อการตกตะกอนของโลหะหนัก ซึ่งสารประกอบโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่างๆ ไม่เท่ากัน เช่น สารประกอบโลหะโครเมียมจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุดในช่วงพีเอช 8-9 หรือตกตะกอนได้ดีที่สุดในช่วงพีเอช 8-9 แต่สารประกอบโลหะนิกเกิลจะตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอช 11 เป็นต้น

การปรับค่าพีเอชให้ได้ค่าตามที่ต้องการ สามารถทำได้โดยการใส่กรดหรือด่างลงไป อัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถทำได้ทั้งเป็นแบบกะ (batch) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ตามความเหมาะสมของปริมาณน้ำเสีย และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่ง Shinsky (1988) ศึกษาพบว่า การควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้นทำได้ยาก เนื่องจากมีพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และมีความไวต่อการปรับเปลี่ยนของตัวแปรปรับมาก

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) หรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (on-off controller) ในการควบคุมค่าพีเอช เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ออกแบบได้ง่าย แต่การควบคุมแบบนี้เป็นการควบคุมแบบเชิงเส้น ทำให้ไม่สามารถใช้กับการควบคุมพีเอชได้ดี เพราะการควบคุมพีเอชมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง นอกจากนี้การควบคุมแบบนี้ยังทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช เนื่องจากการควบคุมแบบนี้จะคำนวณผลจากข้อมูลที่เกิดขึ้นแล้ว

ทำให้การควบคุมล่าช้าและมีการแกว่งของตัวแปรปรับสูง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว Gustafsson และ Waller (1992a, 1992b) จึงได้ศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง ซึ่งสามารถควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นสูงได้ และออกแบบตัวควบคุมไม่เชิงเส้นเพื่อใช้ควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นสูง วิธีการที่ออกแบบตัวควบคุมที่ผ่านๆ มา จะทำการประมาณระบบไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นก่อนเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม หลังจากนั้นจึงนำมาควบคุมระบบไม่เชิงเส้น ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะสามารถใช้ควบคุมระบบไม่เชิงเส้นได้ในช่วงแคบๆ ในช่วงเวลา 10 กว่าปีที่ผ่านมา Kravaris และ Chung (1987) ได้ทำการศึกษาวิจัยใช้เทคนิคการทรานสฟอร์มเข้ามาแทน เนื่องจากไม่ต้องการประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งช่วยในการออกแบบตัวควบคุมไม่เชิงเส้นให้ทำได้ง่ายขึ้น และสามารถใช้ในการควบคุมในช่วงที่กว้างขึ้น Slotine และ Li (1991) ได้ศึกษารวบรวมเทคนิคการทรานสฟอร์มต่างๆ อาทิเช่น การทรานสฟอร์มโดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตกับตัวแปรสเตต (input-state linearization) การทรานสฟอร์มโดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุต (input-output linearization)

การออกแบบตัวควบคุมแบบก้าวหน้าที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ โดยใช้เทคนิคการทรานสฟอร์ม เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมเคมีที่มีความไม่เชิงเส้นสูง จึงถูกวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แสดงอยู่ในวารสารทางวิชาการของ Kravaris และ Kantor (1990), Kravaris และ Arkun (1991) การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง (Globally Linearizing Control: GLC) ซึ่งแบบการควบคุมแบบก้าวหน้าที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ โดยใช้เทคนิคการ ทรานสฟอร์มแบบหนึ่ง ได้ถูกคิดค้นโดย Kravaris และ Chung (1987) เพื่อมาทำการควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นสูงที่มีอินพุตเดี่ยวเอาต์พุตเดี่ยว (single input – single output: SISO) โดยทำการควบคุมกระบวนการทางเคมีที่ใช้กับถังปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นพีไอดี จากนั้น Kravaris และ Soroush (1990) ทำการพัฒนาการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง ให้สามารถควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นสูงที่มีอินพุตหลายตัวเอาต์พุตหลายตัว (multi input – multi output: MIMO) โดยทำการควบคุมกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ในถังปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ พบว่าให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นพีไอดี เช่นเดียวกัน ซึ่งการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งเป็นการควบคุมแบบก้าวหน้าที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ ในการทำการควบคุมกระบวนการจริงอาจมีความไม่แน่นอนของแบบจำลองของกระบวนการและพารามิเตอร์เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์ของ Wells (1971) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ที่ดีและเป็นที่ยอมรับใช้กัน เพื่อมาช่วยในการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้ถูกต้อง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับการประมาณค่าสเตรตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เนื่องจากการควบคุมไม่เชิงเส้นที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการโดยใช้เทคนิคการทรานสฟอร์มที่อาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งในโครงสร้างยังมีตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก (external linear controller) เพื่อช่วยในการลดออฟเซ็ทของตัวแปรควบคุม ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของไอออนของโลหะหนักที่มีต่อการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วย เพื่อนำมาทำการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ และศึกษาประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่จำลองขึ้นเพื่อศึกษาหาแนวทางสำหรับการพัฒนาปรับปรุงการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะอื่นๆ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาและประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสเตรตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ ในการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. ประยุกต์ใช้การประมาณค่าตัวแปรสเตรตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการประมาณค่าตัวแปรสเตรตทั้งความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง
3. ทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยเปรียบเทียบผลการควบคุมกับการควบคุมแบบพีไอดี

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองของการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาผลของไอออนของโลหะหนักนิเกิลที่อยู่ในน้ำเสียด้วย บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ

2. สร้างระบบการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ในการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์แม็ทแลบ
3. ทดสอบการทำงานของระบบการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ทั้งสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมสำหรับกรณีต่างๆ เช่น การควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ ระบบ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด และกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการหรือตัวควบคุม เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

##### 1. ศึกษา และรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในช่วงเวลาที่ผ่านมา

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น โดยการค้นคว้าจากวารสารงานวิจัยต่างๆ ที่ได้มีผู้เสนอมาแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งและตัวประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ สำหรับการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักของน้ำเสียในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ให้มีสมรรถนะและความทนทาน โดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษา 2 ส่วน คือ

- ก. ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่ง และการประมาณค่าตัวแปรสเทตและพารามิเตอร์ รวมทั้งการประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมเคมีที่ผ่านมา
- ข. ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

##### 2. ศึกษาการใช้งานและการเขียน โปรแกรมแม็ทแลบ

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการศึกษาวิธีการเขียน โปรแกรมแม็ทแลบ เนื่องจากโปรแกรมแม็ทแลบเป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูง สามารถแสดงผลแบบกราฟฟิกได้ อีกทั้งการเขียนโปรแกรมสามารถทำได้ง่าย จึงเหมาะที่จะใช้ในการออกแบบการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับตัวประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ โดยแบ่งงานในขั้นตอนนี้ออกเป็น 4 ส่วน



- ก. เขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของกระบวนการที่ทำการควบคุม
- ข. เขียนโปรแกรมการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ใด
- ค. เขียนโปรแกรมการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ใดซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์
- ง. เขียนโปรแกรมการควบคุมแบบพีไอดีเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

### 3. การจำลองและเก็บข้อมูลจากการจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ใดซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ที่ออกแบบขึ้นทั้งในด้านสมรรถนะและความทนทาน สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด และกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองและพารามิเตอร์ ในการควบคุมเปรียบเทียบกับควบคุมแบบพีไอดี

### 4. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลการควบคุม โดยพิจารณาจากผลการตอบสนองของกระบวนการ และค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด หลังจากนั้นทำการสรุปผลการควบคุมที่ได้

### 5. จัดทำวิทยานิพนธ์เป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. สามารถใช้การควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ใดซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ในการควบคุมค่าพีเอชที่ค่าพีเอชต่างๆ ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โลหะหนักตกตะกอนสมบูรณ์และควบคุมพีเอชของน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงาน
3. สามารถประมาณค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และประมาณค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง จึงทำให้การใช้การควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ใดซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์มีสมรรถนะและความทนทานสูงขึ้น



## 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ แบ่งออกเป็น 6 บท ซึ่งประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย, วัตถุประสงค์ของงานวิจัย, ขอบเขตงานวิจัย, ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย, ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งเป็นผลงานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาลมานฟิลเตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุม ทั้งการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง, การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ และการนำคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยายซึ่งเป็นการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์แบบหนึ่งไปใช้ร่วมกับการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง เพื่อช่วยเพิ่มความทนทานให้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 4 กล่าวถึงกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัย และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่จะนำมาใช้ในการจำลองการควบคุม รวมทั้งการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยายในการควบคุมกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการประยุกต์ใช้ในการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย ในการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยกล่าวถึงการจำลองการควบคุม, ผลการจำลอง และการวิเคราะห์ผลการควบคุม เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการ ทั้งในกรณีที่มีการควบคุมและไม่มีการควบคุม โดยในกรณีที่มีการควบคุมได้ทำการทดสอบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุม ในกรณีที่สภาวะคงที่ กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการต่างๆ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด กรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองของตัวควบคุมหรือแบบจำลองของกระบวนการ (Plant/Model mismatch) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองรวมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

ภาคผนวกจะกล่าวถึง กระบวนการชูปโลหะ, การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชูปโลหะ, การปรับค่าความเป็นกรดต่าง, ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 เรื่องการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, การแก้สมการคณิตศาสตร์ในกระบวนการวิศวกรรมเคมีโดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method), การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เชิงเส้น, ความควบคุมได้, ความสังเกตได้ และเสถียรภาพของระบบ, กราฟแสดงผลการควบคุม, โปรแกรมเม็ทแลบ และ ตัวอย่างการเขียนโค้ดโปรแกรม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

บทนี้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิง ในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพิเศษของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกาลมานฟิลด์อร์

#### 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิงใน อุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป

ในช่วงเวลา 10 กว่าปีที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาวิธีการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองสำหรับ ควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นเกิดขึ้นมากมาย ความพยายามที่จะหลีกเลี่ยงขั้นตอนในการประมาณ แบบจำลองที่ไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นและใช้กฎการควบคุมไม่เชิงเส้นต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น วิธีการซึ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนยุ่งยากเหล่านี้

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษา “โกลบอลลิเนียร์ไรเซชัน” (Global linearization) ซึ่ง เกี่ยวข้องกับการทรานสฟอร์มสมการสเตตต่างๆ ที่ไม่เชิงเส้นเพื่อหาสมการตัวแปรปรับ ดังนั้นสมการ ตัวแปรปรับที่ทำได้จะมีลักษณะครอบคลุมความไม่เชิงเส้น แนวความคิดนี้เริ่มต้น โดย Brockett (1978) และพัฒนาเพิ่มขึ้นโดย Hunt, Su และ Meyer (1983) ผู้ซึ่งเสนอวิธีการทั่วไปของการ ทรานสฟอร์มตัวแปรสเตตด้วยการใช้กฎการป้อนกลับ ซึ่งสมการของแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะ ถูกทรานสฟอร์มอยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้น โดยวิธีนี้เป็นวิธีการที่ง่าย Hoo และ Kantor (1985), Kantor (1986) ได้นำไปประยุกต์ใช้กับปฏิกรณ์เคมีและชีวภาพต่างๆ ต่อมา Ogunnaike (1986) ได้ เสนอวิธีการทรานสฟอร์มสเตตของระบบไม่เชิงเส้นอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียวเป็นระบบเชิงเส้น โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบการควบคุมระดับน้ำที่มีรูปแบบการไหลแบบต่างๆ ซึ่งมีลักษณะ ไม่เชิงเส้น พบว่าวิธีการทรานสฟอร์มที่เสนอมานั้นช่วยแก้ปัญหาสำหรับระบบที่มีแบบจำลอง ไม่เชิงเส้น อย่างไรก็ตามการใช้ทฤษฎีของ Su และ Hunt (1986) ที่ใช้สำหรับการสร้างตัวควบคุม ไม่เชิงเส้นไม่สามารถใช้ได้กับทุกกรณี เนื่องจากความจริงที่ว่าเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมจะ ไม่มี ความสัมพันธ์โดยตรงกับสเตตที่ทำการทรานสฟอร์มเสมอไป

ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทรานสฟอร์มระบบต่างๆ ขึ้นหลายวิธี จุดประสงค์ในการทรานสฟอร์มเพื่อให้สมการของระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นอยู่ในรูปที่ง่ายต่อการหาสมการตัวแปรปรับแบบไม่เชิงเส้น วิธีที่นิยมใช้กันเมื่อต้องการควบคุมเอาต์พุตให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ ถูกพัฒนาโดย Kravaris (1988) เสนอวิธีการทรานสฟอร์มระบบไม่เชิงเส้นอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียวจากการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมกับตัวแปรอินพุตเรียกวิธีนี้ว่า “Input-Output Linearization” จากความสัมพันธ์ที่ได้ประยุกต์ใช้กฎการป้อนกลับเพื่อหาสมการตัวแปรปรับที่ไม่เชิงเส้น การทรานสฟอร์มวิธีอินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชันได้ถูกพัฒนาให้ใช้กับแบบจำลองไม่เชิงเส้นทั่วไป โดย Henson และ Seborg (1990) ศึกษาเพิ่มเติมในกรณีที่มีอินพุตและเอาต์พุตมีอันดับสัมพัทธ์ (relative order) มากกว่าหนึ่ง ต่อมา Xu, Hauser และ Hunt (1992) ได้ใช้การทรานสฟอร์มด้วยวิธีอินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชัน ซึ่งรวมทอมของความผิดพลาดที่เกิดจากการทรานสฟอร์มอันดับสูงๆ ด้วยการใช้อีกกฎการป้อนกลับ

Kravaris และ Kantor (1990) ได้รวบรวมวิธีทางเรขาคณิตต่างๆ ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างและพัฒนาตัวควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้น ทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์, ระบบไม่เชิงเส้นต่างๆ, วิธีการหาอนุพันธ์ทางเรขาคณิต, อินเวอร์ทของระบบไม่เชิงเส้น, และซีโรไดนามิกของระบบ บทสรุปเกี่ยวกับแนวความคิดของวิธีการทรานสฟอร์มสำหรับระบบไม่เชิงเส้น รวมทั้งได้รวบรวมวิธีการทางเรขาคณิตต่างๆ ในกระบวนการที่ใช้กับระบบไม่เชิงเส้นซึ่งเน้นเกี่ยวกับวิธีการลิเนียร์ไรซ์แบบต่างๆ อาทิเช่น ซูฮันเมเยอร์ลิเนียร์ไรเซชัน (Su-Hunt-Meyer Linearization), อินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชัน และ ฟูลลิเนียร์ไรเซชัน (Full Linearization) นอกจากนี้เขายังได้เสนอโครงสร้างการควบคุมแบบอินเทอร์เนลโมเดล (Internal Model Control: IMC) และการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรเซชัน ต่อจากนั้น Proll และ Karin (1994) ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยการใช้อินพุตทางเรขาคณิต (differential geometry control) ที่ใช้วิธีเอ็กแซคตลิเนียร์ไรเซชัน (exact linearization) กับ อินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชัน โดยทำการจำลองผ่านระบบปฏิบัติการชีวภาพไม่เชิงเส้นหลายตัวแปร พบว่าอินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชันให้ผลที่น่าพอใจในแง่ของการอินเวอร์ทได้ (invertability)

เมื่อก้าวถึงการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรเซชันสำหรับการควบคุมกระบวนการต่างๆ ครั้งแรกนำเสนอโดย Kravaris และ Chung ในปี 1987 ได้เสนอการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรเซชัน (Globally Linearizing Control: GLC) ในการควบคุมระบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียวของถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะ โดยอัลกอริทึมของการควบคุมนี้ได้พัฒนามาจากการใช้อินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชันร่วมกับการใช้กฎการป้อนกลับ (feedback law) เพื่อใช้ในการหาสมการตัวแปรปรับ ซึ่งในอัลกอริทึมยังมีรูปการควบคุมเชิงเส้นภายนอก (external linear control loop) เพื่อลดออฟเซต การพัฒนาเทคนิคลิเนียร์ไรเซชันที่ใช้ความสัมพันธ์ของอินพุตกับเอาต์พุตเป็นพื้นฐานใน

การสร้างความสัมพันธ์ของระบบลูปปิด การพัฒนาเทคนิคด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถเข้าใจได้อย่างชัดเจนและง่ายต่อการใช้

ที่ผ่านมาได้มีผู้คิดค้นกลยุทธ์ในการควบคุมระบบที่ไม่เชิงเส้นต่างๆ อาทิเช่น Shinskey (1962, 1973); Hunt, Su และ Meyer (1983); และ Kravaris และ Chung (1987) ซึ่งส่วนใหญ่จะอ้างอิงวิธีการของ Kravaris และ Chung ซึ่งผู้ทำงานวิจัยที่ผ่านมาจะได้ผลการตอบสนองของตัวแปรปรับ (อินพุทใหม่) กับเอาต์พุทเป็นเชิงเส้นสำหรับระบบต่างๆ สมการตัวแปรปรับมาจากสมการสเตท และสมการเอาต์พุทต่างๆ โดยใช้อนุพันธ์ทางเรขาคณิตมาช่วย เช่น Lie derivative และ Lie brackets โดย Parrish และ Brosilow (1988) ได้เสนอการควบคุมแบบเอ็นไอแอลซี (Nonlinear Interferential Control: NILC) ซึ่งพัฒนามาจากวิธีของ Kravaris และ Chung และศึกษาเพิ่มเติมกรณีที่มีอินพุทที่ไม่ทราบค่า เช่น มีตัวแปรกระบวนการแบบระบบ โดยทำการจำลองการควบคุมนี้กับกระบวนการสองกระบวนการ คือ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) และกระบวนการปรับสภาพน้ำเป็นกลาง (neutralization) การพัฒนาการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง ยังได้มีผู้วิจัยต่อเนื่องและมีการประยุกต์ใช้จริงมากมายหลายงานวิจัย เช่น Kravaris และ Palanki (1988a) ใช้วิธีการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งในการสร้างตัวควบคุม ซึ่งในอัลกอริทึมจะมีการใช้กฎการป้อนกลับซึ่งอยู่บนพื้นฐานของกฎ Liapunov ด้วย ต่อมา Alvarez, J., Alvarez, Ja. และ Gonzalez (1989) ได้ใช้กฎการควบคุมนี้กับการควบคุมระบบถึงกวนแบบต่อเนื่อง ซึ่งในการควบคุมจะใช้การปรับจูนโดยการแทนที่โพล (pole placement) จากผลการจำลองการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งจะให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีมากเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี ในช่วงเวลาเดียวกัน Sastry และ Isidori (1989) ได้เสนอทฤษฎีการควบคุมแบบอแดปทีฟ (Adaptive Control) สำหรับระบบไม่เชิงเส้นอินพุทเดียวเอาต์พุทเดียวที่มีซีโรไดนามิกที่มีเสถียรภาพ การควบคุมแบบอแดปทีฟมีอัลกอริทึมเหมือนกับการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งโดยผ่านกฎการป้อนกลับทำการจำลองผ่านระบบต่อเนื่อง อัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งสำหรับการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นอินพุทเดียวเอาต์พุทเดียวยังถูกพัฒนาต่อมาโดย Kravaris และ Wright (1989) ได้รวมตัวประมาณสเตทของลูปเปิดไว้ในอัลกอริทึมด้วย และยังรวมโครงสร้างของ Smith-like predictor ไว้เพื่อชดเชยผลของ deadtime ที่เกิดขึ้นกับกระบวนการไม่เชิงเส้น และ Vos และ Valavain (1991) ได้เสนอวิธีการควบคุมซึ่งมีอัลกอริทึมเช่นเดียวกับการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง แต่ได้รวมตัวประมาณค่าเพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ วิธีการควบคุมนี้เรียกว่า “Model Adaptive Control Technique: MRAC”

วิธีการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งที่กล่าวมาแล้วใช้สำหรับระบบไม่เชิงเส้นที่มีอินพุทเดียวเอาต์พุทเดียว ซึ่งต่อมา Kravaris และ Soroush (1990) ได้พัฒนาวิธีการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งให้ใช้ได้กับระบบไม่เชิงเส้นที่มีอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัว ในที่นี้ได้ประยุกต์ใช้



การควบคุมนี้สำหรับควบคุมองค์ประกอบของการเกิดพอลิเมอร์ร่วมและตัวเลขของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดยใช้การปรับค่าความร้อนและอัตราของการเติมมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (semibatch) ต่อมา Kravaris และ Daoutidis (1991) ได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งสำหรับระบบไม่เชิงเส้นที่มีอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัว โดยพิจารณาในกรณีที่มีเมตริกซ์เอกพันธ์ซึ่งเป็นปัญหาในการอินเวอร์ทขณะทำการทรานสฟอร์มและส่งผลต่อการหาซีโรไดนามิก จากปัญหาที่เกิดขึ้นได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมในกรณีที่เกิดปัญหาเหล่านั้นขึ้น

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งที่ใช้การป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ (Feedforward/Feedback) ด้วย เริ่มโดย Kravaris และ Daoutidis (1989) ได้นำการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งที่ใช้การป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับในการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นอินพุทเดียวเอาต์พุทเดียว โดยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของการควบคุมชนิดนี้ในการควบคุมองค์ประกอบในน้ำของระบบถังกวนต่อเนื่องสามตัวที่ต่อกันแบบอนุกรม จากผลการจำลองให้ผลการควบคุมที่น่าพอใจเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเซ็ทพอยท์ของการควบคุม ได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งที่ใช้การป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับสำหรับระบบไม่เชิงเส้นอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัวทั่วไป ซึ่งจำลองการควบคุมผ่านปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์แบบต่อเนื่อง ในทางปฏิบัติ Congalidis, Richards, และ Ray (1989) ได้นำตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งที่ใช้การป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์ร่วมในสารละลาย (solution copolymerization reactor) ในโรงงานจริงเป็นผลสำเร็จและให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดี ต่อมา Jayadeva และคณะ (1990) ได้นำการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งที่ใช้การป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการต่างๆ เมื่อทำการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม พบว่าให้สมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมที่ดี ทั้งในกรณีที่มีตัวแปรกระบวนการและกรณีที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองผิดพลาด

Kravaris และ Daoutidis (1990) ได้พัฒนาตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งให้ใช้ได้กับระบบไม่เชิงเส้นอันดับสอง ที่มีซีโรไดนามิกที่ไม่มีเสถียรภาพและจำลองผ่านระบบถังกวนแบบต่อเนื่อง ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมชนิดนี้สามารถควบคุมให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ การพัฒนาอัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งเพื่อใช้ประมาณความเข้มข้นของอินิทิเอเตอร์ (initiator) และ มอนอเมอร์ (monomer) ในถังปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์แบบกะ วัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของปฏิกรณ์ซึ่งถูกควบคุมโดยอัตราการไหลของกระแสความร้อนและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ผลจากการจำลองเมื่อมีตัวแปรกระบวนการและมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ของตัวควบคุม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งที่มีตัวประมาณค่าจะให้สมรรถนะและความ

ทนทานในการควบคุมที่ดีกว่าและมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ง่ายมาก ต่อมา Henson และ Seborg (1994) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นแบบอแดปทีฟ (Adaptive Nonlinear Control) เพื่อควบคุมพีเอชให้เป็นกลางเนื่องจากการควบคุมพีเอชมีความไม่เชิงเส้นสูง และมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอไม่สามารถควบคุมได้ ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งที่มีตัวประมาณค่าสเตรทที่วัดไม่ได้รวมอยู่ในอัลกอริทึมและใช้การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอซึ่งเป็นตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก จากผล การควบคุมพบว่า การควบคุมแบบอแดปทีฟจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีไอ

ในระยะเวลาที่ผ่านมาความก้าวหน้าในการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นต่างๆ และจำนวนของเทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการเกิดขึ้นมากมาย โดยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมไม่เชิงเส้นที่น่าสนใจและนิยมใช้กันมากถูกนำมาพิจารณา คือ เทคนิคการควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดล (Generic Model Control: GMC) และการควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่ง ปัญหาที่น่าสนใจ คือ ตัวควบคุมทั้งสองแบบปรับจูนอย่างไร Barolo (1994) ได้ใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งควบคุมระบบอินพุตเดียวเอาท์พุตเดียวที่มีอันดับสัมพัทธ์เท่ากับหนึ่ง โดยเลือกพารามิเตอร์การปรับจูนของตัวควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งอย่างเหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างการควบคุมทั้งสองวิธีแล้วตัวควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่ง จะให้ผลการตอบสนองลูปปิดที่ดีเยี่ยมเหมือนกับการใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดล

ทฤษฎีที่คล้ายคลึงกันของการควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดลและแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งที่ให้ผลการตอบสนองของลูปปิดที่เหมือนถูกพิสูจน์โดย Barolo (1994) นั้น ได้ถูกนำมาทดสอบสมรรถนะในการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกรณ์แบบกะที่มีวัฏประสงก์ในการควบคุมหลายอย่าง โดย Liu และ Macchietto (1995) พบว่าตัวควบคุมไม่เชิงเส้นทั้งสองแบบซึ่งมีชุดพารามิเตอร์การปรับจูนเพียงชุดเดียวให้สมรรถนะการควบคุมเหนือกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ จากผลการจำลองตัวควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดลและโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งจะให้สมรรถนะการควบคุมที่เหมือนกันสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา

Soroush และ Kravaris (1996a) ได้สร้างการควบคุมในรูปดีสครีตไทม์โดยใช้อัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่ง ซึ่งรวมเทอมความผิดพลาดจากการป้อนกลับสเตรทความผิดพลาดจากการป้อนกลับเอาท์พุต และมีตัวประมาณค่าสเตรทรวมอยู่ด้วย ต่อมา Palanki และ Kravaris (1997) ได้ทำการพัฒนาการควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งให้ใช้กับระบบไม่เชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying) จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบโกลบอลลลิเนียร์ไรซิ่งได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาในการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นต่างๆ โดย Soroush และ Kravaris (1996b) ได้ทำการสร้างการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive



Control: MPC) โดยใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่ง เพื่อแก้ปัญหากรณีมีขอบเขตจำกัดอีกด้วย

สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่งในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไปไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่งในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไป

ชื่อตัวควบคุม หรือ วิธีการควบคุม	ผู้วิจัย / ปี	รูปแบบการควบคุม
Global Transformation	Hunt, Su & Meyer / 1983	- เป็นวิธีการทรานสฟอร์มระบบไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น
Variable Transformation	Ogunnaike / 1986	- เป็นวิธีการทรานสฟอร์มระบบไม่เชิงเส้น SISO ให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเพียงพอที่จะควบคุมโดยใช้ PI
Input/Output Linearization	Kravaris / 1988	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น SISO ทรานสฟอร์มด้วยวิธี I/O ด้วยกฎการป้อนกลับ ซึ่งแทนตำแหน่งโพลที่ซีโรของกระบวนการ
Input/Output Linearization	Henson & Seborg /1990	- เป็นวิธีที่ใช้กับแบบจำลองไม่เชิงเส้นทั่วไป ในการหาตัวแปรควบคุมใช้การทรานสฟอร์มด้วยวิธี I/O ให้เป็นเชิงเส้น เพิ่มเติมในกรณีอินพุทไม่เชิงเส้น และอันดับสัมพัทธ์มากกว่า 1
I/O Linearization - High Order	Xu, Hauser & Hunt / 1992	- ใช้กับระบบไม่เชิงเส้นซึ่งถูกทรานสฟอร์มให้เป็นเชิงเส้น โดยใช้ I/O ลิเนียร์ไรซ์ ซึ่งรวมเทอมของความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณอันดับสูงๆ ผ่านกฎการป้อนกลับ
Geometric Methods	Proll & Karin / 1994	- เปรียบเทียบวิธีเอ็กแซคลิเนียร์ไรเซชันกับ I/O ลิเนียร์ไรเซชัน โดยทำการประยุกต์ใช้กับระบบปฏิกรณ์ชีวภาพไม่เชิงเส้น MIMO พบว่า I/O ลิเนียร์ไรซ์เซชัน ให้ผลที่น่าพอใจในแง่ของการอินเวอร์ทได้ และพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอน

Geometric Methods	Kravaris & Kantor / 1990	- ได้รวบรวมวิธีทางเรขาคณิตที่ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างและพัฒนาตัวควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้น โดยเขาได้เสนอโครงสร้างของ IMC และ GLC
GLC - State Feedback - I/O Linearization	Kravaris & Chung / 1987	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น SISO โดย ทรานสฟอร์มด้วยวิธี I/O ให้เป็นเชิงเส้น แล้วใช้กฎการป้อนกลับ ซึ่งในอัลกอริทึมได้รวมตัวควบคุมเชิงเส้น PI ไว้ด้วย
NLIC	Parrish & Brosilow / 1988	- ใช้การควบคุมแบบ GLC ซึ่งรวมการควบคุมแบบฟีดโวก์ไว้ในอัลกอริทึมและมีตัวประมาณค่าตัวแปรกระบวนการที่ไม่ทราบค่า
GLC	Kravaris & Palanki / 1988a	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นโดยทรานสฟอร์มด้วยวิธี I/O ให้เป็นเชิงเส้นแล้วใช้กฎการป้อนกลับ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานกฎ Liapunov
GLC + Feedback I/O	Alvarez, Alvarez & Gonzalez / 1989	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นที่อยู่ในรูป ODE'S ร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้น การควบคุมทำการปรับจูนโดยการแทนที่โพล
Adaptive Controller (GLC)	Sastry & Isidori / 1989	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น SISO ที่มี minimum-phase ทรานสฟอร์มให้อยู่ในรูปเชิงเส้นด้วยวิธี I/O ลิเนียร์ไรซ์เซชัน ผ่านกฎการป้อนกลับสเตท
GLC + dead time	Kravaris & Wright / 1989	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น SISO โดยการควบคุมใช้อัลกอริทึมตัวควบคุมแบบ GLC ที่มีตัวประมาณค่าสเตทที่มีมินิมัมเฟส รวมโครงสร้างของตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก เพื่อลดออฟเซ็ทและยังรวมโครงสร้างของ smith-like predictor เพื่อชดเชยผลของ deadtime ที่เกิดขึ้น
MRAC	Vos & Valavain / 1991	- ใช้แบบจำลองที่ไม่เชิงเส้น โดยทำการทรานสฟอร์มด้วย I/O ลิเนียร์ไรซ์เซชันร่วมกับตัวประมาณค่าเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีค่าไม่แน่นอน

GLC	Kravaris & Soroush / 1990	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น MIMO ทรานส-ฟอรั่มให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ I/O ลิเนียร์ไรเซชันผ่านกฎการป้อนกลับ
GLC + Feedback I/O	Kravaris & Daoutidis / 1991	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น MIMO โดยพิจารณาปัญหาในการทรานสฟอรั่มระบบอินพุทเอาต์-พุทที่มีเมตริกซ์ไม่เอกพันธ์ ซึ่งเป็นปัญหาในการอินเวอร์ท และส่งผลต่อการหาซีโรไดนามิก
GLC + Feedforward/Feedback	Kravaris & Daoutidis / 1989  Daoutidis, Soroush & Kravaris / 1990  Congalidis, Richards & Ray / 1989  Jayadeva และคณะ / 1990	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น SISO ซึ่งรวมเทอมของอินทิกรัลไว้ในโครงสร้างของตัวควบคุม และโครงสร้างการควบคุมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ  - ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น MIMO ในรูปแบบสเตทสเปซ ซึ่งรวมเทอมของอินทิกรัลแอดชันไว้ในโครงสร้างของตัวควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ  - ประยุกต์ใช้กับการควบคุมปฏิบัติการเกิดพอลิเมอร์ร่วมในสารละลายในโรงงานจริง เป็นผลสำเร็จให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี  - ประยุกต์ใช้อัลกอริธึมการควบคุมแบบ GLC-Feedforward/Feedback ในการควบคุมฟิเอช กรณี regulatory และ servo
GLC - Second-order	Kravaris & Daoutidis / 1990	- ใช้แบบจำลองของระบบที่ไม่เชิงเส้นอันดับสองและซีโรไดนามิกไม่มีเสถียรภาพ โดยใช้กฎการป้อนกลับจำลองระบบ CSTR
GLC + reduce order observe	Soroush & Kravaris / 1992	- ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมแบบ GLC เพื่อควบคุมอุณหภูมิของปฏิบัติการเกิดพอลิเมอร์แบบกะ ซึ่งในอัลกอริธึมได้รวมตัวประมาณค่าเพื่อใช้ประมาณความเข้มข้นของอินนิตีเอเตอร์และมอนอเมอร์
GLC + reduce order	Henson & Seborg / 1994	- ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมแบบ GLC เพื่อควบคุมฟิเอชให้เป็นกลาง ซึ่งในอัลกอริธึมได้

+ open-loop observe		รวมตัวประมาณค่าเพื่อประมาณค่าสเตตที่วัดไม่ได้ โดยค่าปรับจูนปรับจากตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งเป็นตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก
GLC	Barolo / 1994	- เมื่อใช้อัลกอริทึมของ GLC ในกรณีกระบวนการไม่เชิงเส้น SISO ซึ่งมีมินิมัมเฟส, อันดับสัมพัทธ์ 1 โดยเลือกพารามิเตอร์ปรับจูน PI อย่างเหมาะสมเปรียบเทียบกับผลการควบคุมกับ GMC จะให้ผลดีเยี่ยมเหมือนกัน
GLC	Liu & Macchietto / 1995	- จากอัลกอริทึมของ GLC และ GMC ที่ให้ผลการตอบสนองเหมือนกัน โดย Barolo (1994) เพื่อนำมาควบคุมอุณหภูมิของปฏิกรณ์แบบกะหลายตัว พบว่าจะให้สมรรถนะการควบคุมที่เหมือนกัน สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา
GLC – reduced order observe – Mixed error and Feedback	Soroush & Kravaris / 1996a	- ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น MIMO ที่มีมินิมัมเฟส โดยรวมเทอมความผิดพลาดจากการป้อนกลับสเตต และความผิดพลาดจากการป้อนกลับเอาต์พุต ซึ่งทำการทรานสฟอร์มโดยใช้ I/O ลิเนียร์ไรเซชันให้อยู่ในรูปเชิงเส้น และมีตัวประมาณค่าสเตตรวมด้วย
GLC + observe	Khalil / 1996	- ใช้กับระบบไม่เชิงเส้น SISO ที่มีมินิมัมเฟส ทรานสฟอร์มให้อยู่ในรูปเชิงเส้นโดยใช้ I/O ลิเนียร์ไรเซชันผ่านกฎการป้อนกลับเอาต์พุต ซึ่งรวมตัวประมาณค่าไว้ในอัลกอริทึมเพื่อใช้ประมาณค่าสเตตที่วัดไม่ได้
GLC	Soroush & Kravaris / 1996b	- ใช้อัลกอริทึมของ GLC เพื่อสังเคราะห์การควบคุมแบบ MPC
GLC – time-varying	Palanki & Kravaris / 1997	- ทำการพัฒนาอัลกอริทึมของ GLC ให้ใช้ได้กับระบบซึ่งเป็น time-varying โดยยังใช้การทรานสฟอร์มแบบ I/O ลิเนียร์ไรเซชัน

## 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้นทำได้ยาก เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีความไวต่อการปรับเปลี่ยนของค่าตัวแปรปรับมากถูกเสนอโดย Shinsky (1988) และต่อมา Gustafsson และคณะ (1995) ได้ศึกษาปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการควบคุมค่าพีเอชอันเนื่องมาจากความยุ่งยากที่เกิดจากความไม่เข้าใจและขาดรายละเอียดทางเคมี อาทิเช่น การตกตะกอน การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นในระบบ ความสามารถของสารละลายบัฟเฟอร์ จุดสมดุลของการทำปฏิกิริยากันของกรด-ด่าง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณากราฟการไทเทรตระหว่างกรด-ด่างจะมีการกระโดด ณ จุดสมดุล ความชันของกราฟจะมากยิ่งขึ้น ถ้าเป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างกรดแก่กับด่างแก่จะมีจุดสมดุลเท่ากับค่าพีเอช 7 เมื่อมีการเติมกรดหรือด่างเพียงปริมาณเล็กน้อยลงไปในระบบจะทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นอันมาก ทำให้การควบคุมค่าพีเอช ณ จุดสมดุลทำได้ยากมาก และจากการที่ค่าพีเอชเท่ากับผลลบของค่าล็อกการริธึมของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ดังนั้นการที่ค่าพีเอชมีค่าแตกต่างกันเท่ากับหนึ่งแสดงว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนแตกต่างกัน 10 เท่า ถ้าค่าพีเอชต่างกันสองหน่วยแสดงว่าค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนต่างกันถึง 100 เท่า ดังนั้นการปรับค่าพีเอชที่ถูกต้องจึงทำได้ยากและต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง

ในสมัยเริ่มแรกของการศึกษาการควบคุมค่าพีเอชนั้นยังไม่มีการสร้างตัวควบคุมขึ้นมา แต่มีการพัฒนาแบบจำลองของกระบวนการขึ้นมาก่อน McAvoy, Hsu และ Lowenthal (1972) มีการเลือกใช้แบบจำลองมาเป็นพื้นฐานการออกแบบและสร้างสมการพลวัตของกระบวนการพีเอชขึ้นรวมทั้งทำการทดลองแบบจำลองที่สร้างขึ้นในห้องทดลอง ตัวอย่างที่ศึกษาเป็นปฏิกิริยาสะเทินระหว่างด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดแอสซิติคในถังปฏิกรณ์เคมีอย่างต่อเนื่องพบว่าให้ผลการทดลองถูกต้องและเป็นไปตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นตามทฤษฎี ต่อมา Jutila, Orava และ Salmeinen (1981) และ Gustafsson และ Waller (1982) ได้มีการประยุกต์สร้างแบบจำลองกระบวนการพีเอชขึ้นมา นอกจากการสร้างสมการดุลมวลสารแล้วยังอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางเคมี, การคูลประจุให้เป็นกลาง, การแตกตัวของกรดอ่อน, การแตกตัวของด่างอ่อน และการละลายได้ในน้ำ ซึ่งมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเหล่านี้ เช่นค่าคงที่การแตกตัวของกรดอ่อน ( $K_a$ ), ค่าคงที่การแตกตัวของด่างอ่อน ( $K_b$ ), ค่าคงที่ของผลคูณการละลายน้ำ ( $K_w$ )

นอกจากการใช้ค่าสมดุลทางกายภาพและค่าสมดุลทางเคมีเพื่อมาสร้างแบบจำลองของกระบวนการแล้ว Wright และ Kravaris (1986) ได้สร้างกราฟการไทเทรตจาก "สมการพีเอช" ซึ่งเกิดจากการยุบสมการค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดอ่อน, นิยามของค่าพีเอช และนิยามการละลายได้ใน



น้ำทั้งสามสมการรวมกันได้เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความเข้มข้น เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ต่อจากนั้นมีการพัฒนาสร้างตัวควบคุมแบบอื่นๆ ขึ้นมา เพื่อควบคุมค่าพีเอชและขณะเดียวกันก็มีการพัฒนาแบบจำลองของกระบวนการพีเอชควบคู่เรื่อยมา สำหรับตัวควบคุมนั้นมีอยู่หลายประเภทด้วยกันเนื่องจากกระบวนการพีเอชนี้มีความไม่เชิงเส้นสูงจึงมีผู้สนใจประยุกต์ใช้ตัวควบคุมไม่เชิงเส้นมาทำการควบคุมกับกระบวนการนี้เป็นจำนวนมาก แต่ทั้งนี้ยังคงมีผู้สนใจใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นอยู่โดยมีการปรับปรุงอัลกอริทึมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพตัวควบคุมเพื่อสามารถทำการควบคุมค่าพีเอชให้ได้ผลตามที่ต้องการ นอกจากนี้ผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกระบวนการพีเอชที่ศึกษาจะมีความแตกต่างกันในแง่ชนิดของกรด-ด่างที่ทำปฏิกิริยา เช่นอาจเป็นกรดอ่อนทำปฏิกิริยากับด่างแก่, ด่างอ่อนทำปฏิกิริยากับกรดแก่ หรือด่างแก่กับกรดแก่ทำปฏิกิริยากัน สภาวะที่สนใจแตกต่างกัน เช่นต้องการควบคุมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 หรือควบคุมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 11 เพื่อตกตะกอนนิเกิลและถึงปฏิกรณ์ที่ใช้มีทั้งชนิดเป็นถังกวนแบบต่อเนื่อง และเป็นแบบท่อไหล รวมทั้งไม่ใช้ถังปฏิกรณ์เลย แต่ใช้ท่อต่อเป็นสาย (in-line) นอกจากนี้บางระบบอาจมีสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution) รวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจสรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมาแบ่งตามชนิดของตัวควบคุมได้ดังนี้

Jutila, Orava และ Salmein (1981) ได้เสนอการสร้างแบบจำลองของกระบวนการเพื่อใช้สร้างตัวควบคุมแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับโดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแล้วทำการสมมติความเข้มข้นที่ไม่ทราบค่าเป็น “ความเข้มข้นโดยสมมติ (hypothetical concentration)” ซึ่งจะรวมทอมความเข้มข้นของอนุภาคต่างๆ ที่ไม่สามารถวัดค่าได้จากข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์และใช้อัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์ประมาณค่าความเข้มข้นสมมติได้ ลักษณะของกระบวนการพีเอชประกอบด้วยด่างแก่โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาสะเทินกับกรดอ่อนแอสติกในถังปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง 3 ถังที่ต่ออนุกรมกัน ต่อมา Jayadeva และคณะ (1990) ได้สร้างตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นแบบป้อนหน้า/ป้อนกลับซึ่งใช้สมการไม่เชิงเส้นในการหาสมการตัวแปรปรับโดยตรง แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองของ Wright และ Kravaris (1986) ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบที่ประกอบด้วยกรดแก่ไฮโดรคลอริกและด่างแก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรณีที่ศึกษามีทั้งกรณีควบคุมในสภาวะที่มีตัวรบกวนระบบและมีการเปลี่ยนแปลงเซ็ทพอยท์ ซึ่งวิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเป็นวิธีที่ง่ายและเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม พบว่าตัวควบคุมชนิดนี้มีความทนทานทั้งในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของกระบวนการและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวนได้ดี

StØle-Henson (1998) ได้นำตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้นมาใช้ในการควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการตกตะกอนของโลหะหนักนิเกิล โดยกระบวนการที่ศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม

แบบฟีดฟอร์เวิร์ดจะมีสมรรถนะดีขึ้นเมื่อมีการใส่ feedforward compensation นอกจากนั้นยังทำให้ความทนทานของตัวแปรควบคุมดีขึ้นด้วย ต่อมา วารัตน์ ดวงวัง (1999) ได้พัฒนาตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตทแบบไม่เชิงเส้นที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการที่เป็นเชิงเส้นทำการควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้เป็นกลางซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเหล็กรีดเย็น นอกจากนั้นยังใช้ตัวประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์มาประมาณตัวแปรสเตทที่ไม่สามารถวัดค่าได้เปรียบเทียบผลการควบคุมแบบฟีดโอดีในกรณีต่างๆ พบว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตทให้สมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบฟีดโอดี

ได้มีผู้วิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมที่สามารถใช้กับแบบจำลองของกระบวนการที่ไม่เชิงเส้นโดยตรงในการคำนวณหาตัวแปรปรับ เพื่อใช้ในกระบวนการควบคุมพีเอชที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงเกิดขึ้นมากมาย ตัวควบคุมแบบเอ็นแอลไอซีเป็นหนึ่งในการควบคุมที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Parrish และ Brosilow (1988) เสนอผลการควบคุมค่าพีเอชที่ได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบฟีดโอดี โดยจำลองกับกระบวนการที่เป็นปฏิกรณณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องและสมมติฐานให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ สมดุลของกรด-ด่างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารเข้ามีสามสาย คือ สายของกรดอ่อนที่มีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนหนึ่งตัว (monoprotic acid: HA) สายของเกลือของกรดอ่อน (A) และสายของตัวแปรปรับต่างแก่ เมื่อทดสอบความทนทานในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองและมีตัวรบกวนเกิดขึ้น ตัวควบคุมแบบเอ็นแอลไอซีให้ผลดีกว่าตัวควบคุมแบบฟีดโอดี

หลังจากนั้น Wright และ Kravaris (1991) ได้เสนอสมการแบบจำลองของกระบวนการควบคุมพีเอชซึ่งสามารถลดให้เป็นสมการอันดับหนึ่งเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม สมการของแบบจำลองหามาจากดุลมวลสาร สมการค่าคงที่ทางเคมีและนิยามค่าสมดุลอันใหม่ ซึ่งเป็นค่าแปรผันตรงกับตัวแปรสเตท ค่าสมดุลอันใหม่นี้เรียกว่า “ค่าสมดุลกรดแก่” สามารถประมาณค่าสมดุลนี้จากค่าพีเอชที่วัดได้โดยตรงจากพีเอชมิเตอร์ แบบจำลองของกระบวนการถูกทรานสฟอร์มให้อยู่ในรูปเชิงเส้น สมการตัวแปรปรับที่หาได้จะมีค่าสมดุลกรดแก่อยู่ในสมการ หลังจากนั้นประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นฟีดโอดี จากผลการควบคุมแสดงให้เห็นสมรรถนะและความทนทานของตัวควบคุมเป็นที่น่าพอใจ

นอกจากนั้น Shukla (1993) ได้นำเสนอตัวควบคุมที่สามารถใช้กับแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้นมาใช้ในการควบคุมพีเอช คือ ตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอล (Robust Nonlinear Control Law: RNCL) ซึ่งเกิดจากการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบเอ็นไอเอ็มซี (Nonlinear Internal Model Controller: NIMC) ร่วมกับตัวควบคุมแบบอแดปทีฟ (Adaptive Controller) ส่งผลให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่เซ็ทพอยท์ได้เร็วขึ้น และมีความทนทานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบไอเอ็มซีเดิม ซึ่งทดสอบได้จากกรณีที่ตัวแปรรบกวนเกิดการเปลี่ยนแปลง และมีความผิดพลาดของแบบจำลอง



Wong (1994) ได้สร้างแบบจำลองการควบคุมพีเอชในห้องปฏิบัติการ โดยกระบวนการที่สนใจประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีกรดแก่และต่างแก่ทำปฏิกิริยากัน ซึ่งจุดประสงค์การควบคุมเพื่อควบคุมค่าพีเอช ณ จุดสะเทิน พบว่าตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอลจะมีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบอื่นๆ เมื่อมีตัวรบกวน คือ อัตราการไหลของกรดมีการเปลี่ยนแปลงไป สมรรถนะของตัวควบคุมจากความคลาดเคลื่อนของพีค (peak error), เวลาเข้าสู่สมดุลและค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (Integral Absolute Error: IAE) ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมแบบอาร์เอ็นซีแอลมีการใช้ตัวกรองเพื่อเพิ่มความทนทานให้แก่ตัวควบคุมและมีการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของตัวกรอง (filter gain) ทุกครั้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์

Klatt และ Engell (1996) ใช้ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นควบคุมพีเอช ณ จุดสะเทินสำหรับแบบจำลองของกระบวนการที่ใช้ยึดถือตาม Wright และ Kravaris (1991) ตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นมาเกิดจากการรวมอัลกอริทึมของอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชัน และเทคนิคของการควบคุมแบบจีเอสทีซี (Gain-Scheduling Trajectory Control: GSTC) เมื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกับกระบวนการที่มีกรดแอซิดิกทำปฏิกิริยาสะเทินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวควบคุมแบบพีไอ ในแง่ของการมีตัวรบกวนเป็นอัตราไหลเข้าของกรด แล้วมีการเปลี่ยนเซตพอยท์เป็นแบบสแต็บ การควบคุมแบบจีเอสทีซีจะมีสมรรถนะดีกว่าการควบคุมพีไอ

Mahuli, Rhinehart และ Riggs (1992) ได้จำลองกระบวนการควบคุมค่าพีเอชขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยจำลองปฏิกิริยาสะเทินระหว่างสารละลายผสมของกรดแอซิดิก, กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก มีด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำสะเทินและทำการศึกษาทั้งกรณีที่มีสารละลายบัฟเฟอร์และไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งประกอบด้วยเกลือโซเดียมคาร์บอเนต ลักษณะการทดลองจะเป็นท่อที่มีสารละลายกรดไหลอยู่ในท่อและมีจุดที่สามารถฉีดสารละลายต่างเข้าไปทำปฏิกิริยาสะเทิน ตัวควบคุมที่ใช้คือตัวควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดล ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้นได้โดยตรง เพื่อทำการควบคุมค่าพีเอชที่จุดสะเทินของกรด-ด่าง ตัวควบคุมประกอบด้วยพารามิเตอร์สามตัวโดยจำลองช่วงการไทเทรตที่กว้างของกรดแก่ในสารละลายบัฟเฟอร์ด้วย พบว่าตัวควบคุมให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีมากทั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเร็มพ์ และสแต็บของชนิดกรด, ความเข้มข้นของกรด และอัตราการไหลของกรด

นอกจากนั้น William, Rhinehart และ Riggs (1990) ได้นำตัวควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดลมาใช้ในกระบวนการควบคุมค่าพีเอชภายในท่อ ซึ่งแบบจำลองของกระบวนการจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับค่า Gibb's free energy ( $\Delta G$ ) ในขณะที่ทำการศึกษาก็จะมีความล่าช้าของการส่งข้อมูลของอุปกรณ์วัดและมีสัญญาณรบกวนในขณะที่วัดจึงมีการใช้ตัวประมาณค่าแบบ least-square ในการประมาณค่าความเข้มข้น และค่า  $\Delta G$

นอกจากตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่อาศัยแบบจำลองแล้ว ยังมีตัวควบคุมชนิดอื่นที่ไม่เชิงเส้นและไม่อาศัยแบบจำลองได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมค่าพีเอช อาทิเช่น การใช้ตัวควบคุม Relay feedback with hysteresis โดย Lee (1993) ตัวควบคุมชนิดนี้เป็นการจูนพารามิเตอร์แบบออนไลน์ จะลดปัญหาการสร้างกราฟการไทเทรตขณะออนไลน์ลงได้และใช้ตัวกรองสมการอันดับหนึ่ง (first order filter) ที่มีค่าคงที่ของเวลาเท่ากับ 1 วินาที ซึ่งมีการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมด้วยการส่งสัญญาณรบกวนระบบ ตัวกรองนี้สามารถช่วยกรองสัญญาณการวัดให้มีค่าราบเรียบขึ้น และต่อมา Sung และ Lee (1995) ได้เสนออัลกอริทึมใหม่เรียกว่า “การเปลี่ยนแปลงเซตพอยท์อย่างง่าย (simple set point change)” สมการของการควบคุมอยู่ในรูปค่าคงที่ (steady state) เงื่อนไขการใช้อัลกอริทึมนี้ คือต้องไม่มีสารใดแปลกปลอมเข้ามาในระบบหรือเกิดการสูญเสียไปจนหมด ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารต่างๆ ในขาเข้าวิธีนี้จะทำวิธีไอเดนติฟิเคชัน (identification method) โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเซตพอยท์อย่างง่ายและใช้ตัวประมาณค่า least-square เพื่อประมาณค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดอ่อนและความเข้มข้นทั้งหมดทำให้เพิ่มความทนทานให้แก่ตัวควบคุมแบบพีไอดี เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อระบบ

สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบต่างๆ ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ชื่อตัวควบคุม หรือ วิธีการควบคุม	ผู้วิจัย / ปี	ลักษณะของกระบวนการ
ป้อนหน้า/ป้อนกลับ	Jutila, Orava & Salmein / 1981 Jayadeva และคณะ / 1990	- กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR 3 ถังต่อเนื่องกัน - กรดแก่-ด่างแก่
PID แบบเชิงเส้น	StØle / 1998	- การตกตะกอนของโลหะหนักนิเกิล
SFC แบบไม่เชิงเส้น ที่ใช้แบบจำลอง	วานาร์ตัน ดวงวิง	- กรดแก่-เบสแก่, CSTR
NIMC แบบไม่เชิงเส้น ที่ใช้แบบจำลอง	Parrish & Brosilow / 1988	- กรดอ่อนชนิด monoprotic acid, ด่างแก่, สารละลายบัฟเฟอร์, CSTR

RNCL แบบไม่เชิงเส้น ที่ใช้แบบจำลอง	Shukla / 1993 Wong / 1994	- กรดแก่-ด่างแก่ , CSTR - กรดแก่-ด่างแก่ , CSTR
GSTC แบบไม่เชิงเส้น ที่ใช้แบบจำลอง	Klatt & Engell / 1996	- กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR
GMC แบบไม่เชิงเส้น ที่ใช้แบบจำลอง	Mahuli, Rhinehart และ Riggs / 1992  William, Rhinehart และ Riggs / 1990	- สารละลายผสมของกรดแอสติก, กรดฟอส- ฟอริกและกรดซัลฟูริก-ด่างแก่, มี/ไม่มี สารละลายบัฟเฟอร์, In-line - กรดอ่อน-ด่างแก่, In-line, dual base injection
Global linearization with PI แบบไม่เชิงเส้น ที่ใช้แบบจำลอง	Wright & Kravaris / 1991	- กรดแก่-ด่างแก่, CSTR
Relay feedback with Hysteresis แบบไม่เชิงเส้น ที่ไม่ใช่แบบจำลอง	Lee / 1993	- กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR
PID with simple set point change แบบไม่เชิง เส้นที่ไม่ใช่แบบจำลอง	Sung & Lee / 1995	- กรดอ่อน-ด่างแก่, CSTR

## 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกาลมานฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาในการควบคุมกระบวนการ เช่นการที่กระบวนการมีความไม่แน่นอนของแบบจำลองหรือพารามิเตอร์ต่างๆ การที่ไม่สามารถวัดค่าสเตตได้ทั้งหมดและความถูกต้องของสเตตที่วัดได้มีค่าต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุม ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ร่วมกับตัวควบคุมในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งกาลมานฟิลเตอร์เป็นหนึ่งในตัวประมาณค่าที่ได้รับความนิยมและมีผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมขั้นสูงเรื่อยมา สำหรับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกาลมานฟิลเตอร์จะรวบรวมดังต่อไปนี้

Wells (1971) ได้เสนออัลกอริทึมของกาลมานฟิลเตอร์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear Kalman filter และ Extended-Kalman filter) ซึ่งประยุกต์ใช้ในถึงงานที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยการคำนวณค่าสเตตของกระบวนการหรือพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่สามารถวัดได้ถึงหกตัว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการควบคุม

Hemilton, Seborg และ Fisher (1973) ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าสเตทของระบบที่มีสัญญาณรบกวน (noise) โดยทำการจำลองและทดลองกับเครื่องระเหย ซึ่งให้ผลการประมาณที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล นอกจากนี้กาลมานฟิลเตอร์ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ในระบบที่มีค่าประมาณเริ่มต้นผิดพลาดหรือค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองผิดพลาด ซึ่งมีความไวต่อกระบวนการที่มีตัวรบกวนที่ไม่สามารถวัดค่าได้

Mayer และ Luecke (1991) ได้เสนออัลกอริทึมใหม่ที่ใช้ในการแก้สมการแบบเดิมโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาคงตัวเลขของระบบเวลาต่อเนื่องและดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งพบว่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดจะมีลักษณะสมมาตรตลอด โดยมีกระบวนการที่ได้ทำการศึกษาสามตัวอย่าง คือ ถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องที่มีอุณหภูมิคงที่และมีปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้จากสาร  $A \rightarrow B \rightarrow C$  ซึ่งวัดความเข้มข้นของสาร B และประมาณความเข้มข้นของสาร A และ B, ถึงปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่องแบบแอดิแบติก (adiabatic) ของปฏิกิริยา  $A \rightarrow B$  ซึ่งวัดอุณหภูมิในถังและประมาณค่า ความเข้มข้น และได้ศึกษากับกระบวนการของถังหมัก (fermentor) ซึ่งวัดน้ำหนักรวมของมวลชีวภาพ และวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (D.O.) เพื่อนำไปประมาณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) รวมทั้งน้ำหนักรวมของมวลชีวภาพและค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ซึ่งผลการควบคุมทั้งสามตัวอย่าง พบว่าค่าประมาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับของจริงและช่วยส่งเสริมการควบคุมกระบวนการ เหล่านี้มีค่าดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้กาลมานฟิลเตอร์สำหรับกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดย Jo และ Bankoff (1976) ได้ทดลองและศึกษาถึงขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์ต่างๆ โดยสารที่ใช้ในการทดลอง คือ ไวนิลอะซีเตตซึ่งบรรจุในถังแก๊วที่มีการติดตั้งเครื่องวัดดัชนีการหักเหของแสง และเครื่องวัดความหนืด ซึ่งตัวแปรวัดคือค่าดัชนีการหักเหของแสงและความหนืด โดยกาลมานฟิลเตอร์จะให้สมรรถนะที่ดีสามารถประมาณค่าคอนเวอร์ชันและค่าโมเลกุลแบบเฉลี่ยของพอลิเมอร์ได้

Gattu และ Zafirious (1992) ได้ประยุกต์ใช้กาลมานฟิลเตอร์ร่วมกับการควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกเมตริกซ์แบบไม่เชิงเส้น โดยใช้กาลมานฟิลเตอร์เป็นพื้นฐานในการทำนายค่าสเตทในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์ โดยได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมในกรณีที่มีการรบกวนระบบที่จุดดำเนินการที่ไม่เสถียรภาพของลูปเปิด

Kittisupakorn และ Kershenbaum (1994) ได้ทดสอบอัลกอริทึมของกาลมานฟิลเตอร์ซึ่งใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดล ในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์แบบกะ โดยตัวแปรที่วัดคือ อัตราการไหล ระดับน้ำในถัง และอุณหภูมิ เพื่อใช้ประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ผลการควบคุมพบว่ากาลมานฟิลเตอร์สามารถประมาณค่าได้ถูกต้องใกล้เคียงกับของจริง และช่วยให้ตัวควบคุมมีความทนทานมากขึ้น

## 2.4 บทสรุป

การพัฒนาวิธีการออกแบบการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่ง ได้เริ่มมีการพัฒนาตั้งแต่ปี 1978 และมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยในช่วงแรกๆ จะเป็นการพัฒนาวิธีการทรานสฟอร์มเพื่อให้ใช้กับระบบไม่เชิงเส้นได้ครอบคลุมทุกกรณี ต่อมาจึงได้พัฒนามาเป็นการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่งสำหรับระบบไม่เชิงเส้นอินพุตเดียว เอาท์พุตเดียว และอินพุตหลายตัวเอาท์พุตหลายตัว เพื่อมาใช้ควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นอย่างมากได้ โดยไม่ต้องทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นโดยใช้ตัวควบคุมจากภายนอกในการควบคุม นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ เพื่อเพิ่มความทนทานของระบบการควบคุม วิธีการต่างๆ ของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่งที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้เป็นอย่างดี จากผลการวิจัยที่ผ่านมาการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิ่งให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดา และเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในวงการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### ทฤษฎีของการควบคุม

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิง การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ และส่วนสุดท้ายเป็นการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิงร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

#### 3.1 การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิง

การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิงเป็นหนึ่งในเทคนิคการควบคุมแบบก้าวหน้าที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการเป็นพื้นฐาน (Model Based Control) ในการคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ โดยแบบจำลองของกระบวนการจะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ สามารถใช้ควบคุมกระบวนการที่ไม่เชิงเส้นสูง และสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการที่มีอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัว ยิ่งไปกว่านั้นยังมีตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอกอยู่ด้วย เพื่อช่วยในการเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมและลดผลกระทบจากตัวแปรรบกวนระบบ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสเตตและพารามิเตอร์ เช่น คาลมานฟิลเตอร์ เพื่อช่วยให้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิงมีสมรรถนะการทำงานสูงยิ่งขึ้น

##### 3.1.1 อัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิง

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการไม่เชิงเส้นโดยทั่วไป ที่มีอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัว ซึ่งสามารถหาได้จากการทำควมวลาสารและดุลพลังงาน เขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, t) \\ y_j &= h_j(x) \quad , \quad j=1, \dots, m \end{aligned} \tag{3.1}$$



โดย สมการตัวแปรควบคุม  $x$  เป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กับตัวแปรปรับ  $u$  และ เวลา  $t$  ส่วนตัวแปรเอาต์พุต  $y$  มีความสัมพันธ์กับตัวแปรควบคุม  $x$  เป็นค่า  $h(x)$  จากสมการแบบจำลองของกระบวนการ (3.1) ทำการ จัดกลุ่มของสมการให้อยู่ในรูป

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i \quad (3.2)$$

$$y_j = h_j(x) \quad , \quad j = 1, \dots, m \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$f(x) = \{f_1(x), \dots, f_n(x)\}$  เป็นเวกเตอร์มีมิติ  $n \times 1$ ,  $g(x) = \{g_1(x), \dots, g_m(x)\}$  เป็นเวกเตอร์มีมิติ  $m \times m$ ,  $h(x) = \{h_1(x), \dots, h_m(x)\}$  เป็นสเกลาร์มีมิติ  $m \times 1$  และจำนวนตัวแปรเอาต์พุต ( $m$ )  $\leq$  จำนวนตัวแปรควบคุม ( $n$ )

โดยที่ ตัวแปรปรับ (manipulated variables)  $u$  เป็นเวกเตอร์มีมิติ  $m \times 1$  มีเท่ากับ  $m$  ตัว  
 ตัวแปรเอาต์พุต (output variables)  $y$  เป็นเวกเตอร์มีมิติ  $m \times 1$  มีเท่ากับ  $m$  ตัว  
 ตัวแปรควบคุม (controlled variables or states)  $x$  เป็นเวกเตอร์มีมิติ  $n \times 1$  มีเท่ากับ  $n$  ตัว

ใช้วิธีการอินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชันในการหาสมการตัวแปรปรับ  $u_i$  เพื่อให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต  $y_j$  กับตัวแปรปรับ  $u_i$  หรือให้ตัวแปรปรับ  $u_i$  ปรากฏอยู่ในสมการของเอาต์พุต  $y_j$  ที่ทำการควบคุม เพื่อหาสมการตัวแปรปรับ  $u_i$  ต่อไป

เริ่มต้นด้วยการหาอนุพันธ์สมการ (3.3) และ แทนค่า  $\partial x_i / \partial t$  ด้วยสมการ (3.2)

$$\dot{y}_j = \frac{\partial h_j(x)}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial t} \quad (3.4)$$

ซึ่งสามารถเขียนโดยใช้ตัวดำเนินการ Lie derivatives ได้เป็น

$$\dot{y}_j = L_f h_j(x) + \sum_{i=1}^m (L_{g_i} h_j(x))u_i \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (3.5)$$

ถ้า  $L_{g_i} h_j(x) = 0$  (ที่  $i$  ทุกตัว) แล้ว  $u_i$  ไม่ปรากฏในสมการนั้น เราจะต้องทำการหาอนุพันธ์ใหม่ โดยสมมติให้  $r_j$  เป็นจำนวนเต็มที่น้อยที่สุด ซึ่งทำให้  $u_i$  อย่างน้อยหนึ่งตัวปรากฏใน  $y_j^{(r_j)}$  จะเขียนได้เป็นสมการ

$$y_j^{(r_j)} = L_f^{r_j} h_j(x) + \sum_{i=1}^m L_{g_i} L_f^{r_j-1} h_j(x) u_i \quad (3.6)$$

เมื่อเทอม  $L_{g_i} L_f^{r_j-1} h_j(x) \neq 0$  ที่ค่า  $i$  ใดๆ อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า โดยที่  $\forall x \in \Omega$

ถ้ากระทำโดยใช้วิธีการเดียวกันนี้กับเอาต์พุต  $y_j$  แต่ละตัว เราจะได้สมการทั้งหมด  $m$  สมการ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \dots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \dots \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{bmatrix} + E(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

เมื่อเมตริกซ์  $E(x)$  มีขนาด  $m \times m$  คือ

$$E(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & \dots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(x) & \dots & \dots & L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

เรียกเมตริกซ์  $E(x)$  ว่า “เมตริกซ์ลักษณะ (characteristic matrix) หรือ เมตริกซ์ดีคัปปลิง (decoupling matrix)” สำหรับระบบอินพุตหลายตัวเอาต์พุตหลายตัว โดยเมตริกซ์ลักษณะจะต้องเป็นเมตริกซ์ไม่เอกพันธ์

จากสมการ (3.7) ใช้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับสเตทในการหาสมการตัวแปรปรับ  $u_i$  ที่ไม่เชิงเส้น โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซิงเลือก  $u_i$  ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{1r_1} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & \beta_{1r_1} L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \dots & \dots & \dots \\ \beta_{mr_m} L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(x) & \dots & \beta_{mr_m} L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{r_j} \beta_{1k} L_f^{(k)} h_1(x) \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{r_j} \beta_{mk} L_f^{(k)} h_m(x) \end{bmatrix} \right\} \quad (3.9)$$

โดยอนุพันธ์ของเอาต์พุต  $y_j$  แต่ละตัว มีความสัมพันธ์กับอินพุตใหม่  $v_j$  ดังนี้

$$\sum_{k=0}^{r_j} \beta_{jk} y_j^{(k)} = v_j, \quad j=1, \dots, m \quad k=0, \dots, r_j \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\beta_{jk} = [\beta_{1k} \dots \beta_{mk}]^T$  เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ เรียกว่า พารามิเตอร์ปรับจูนของอินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชัน โดยที่  $\beta_{jr_j} \neq 0$  และ  $\det[\beta_{1r_1} \dots \beta_{mr_m}]_{m \times m} \neq 0$

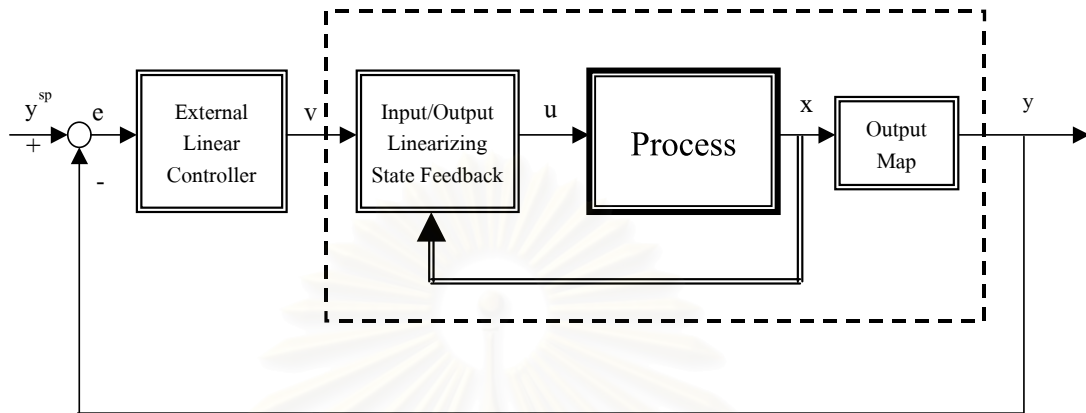
ทำการออกแบบ  $v_j$  ซึ่งในที่นี้มีกำหนดให้ตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก  $v_j$  เป็นแบบพีโอ

$$v_j = \beta_{j0} y_j^{sp}(t) + K_{C_j} [y_j^{sp}(t) - y_j(t)] + \frac{K_{C_j}}{\tau_{I_j}} \int_0^t [y_j^{sp}(t) - y_j(t)] dt, \quad j=1, \dots, m \quad (3.11)$$

เมื่อ  $K_{C_j}$  และ  $\tau_{I_j}$  เป็นพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก

**หมายเหตุ** ในสมการ (3.2) สมการที่นอกเหนือจากสมการที่นำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จำเป็นต้องทำการตรวจสอบพลวัตภายในว่ามีเสถียรภาพหรือไม่ ซึ่งถ้าพลวัตภายในมีเสถียรภาพจะมีความหมายว่า ตัวแปรสแตทที่ไม่ได้ทำการควบคุมจะลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งอยู่ในขอบเขตที่เรากำหนดไว้ สามารถตรวจสอบพลวัตภายในโดยใช้วิธีที่สะดวกและง่ายคือการตรวจสอบซีโรโคนามิก ทำโดยให้ค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรควบคุมที่ทำกรควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\dot{x}_i = 0$ ) และ ค่าตัวแปรปรับคงที่ ( $u_i = 0$ ) แทนค่าในสมการตัวแปรสแตทที่ไม่ได้นำมาใช้ในการออกแบบการควบคุม หากค่าของสมการลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง แสดงว่าพลวัตภายในของกระบวนการนั้นมีเสถียรภาพ

โครงสร้างของการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งสำหรับควบคุมกระบวนการต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่ง

รูปแบบโครงสร้างของการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งนั้น ในขั้นแรกจะเป็นการคำนวณโดยใช้วิธีอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชันร่วมกับกฎการควบคุมแบบป้อนกลับสเตทในการหาสมการตัวแปรปรับ  $u$  ซึ่งแสดงอยู่ในกรอบข้างในเส้นประรูปที่ 3.1 ซึ่งในการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งจะมีการวัดค่าเอาต์พุต  $y$  เพื่อนำไปทำการควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ  $y_{sp}$  โดยใช้การควบคุมเชิงเส้นภายนอก ในที่นี้ใช้การควบคุมแบบพีไอซึ่งมีเทอมของอินทิกรัลเพื่อช่วยลดออฟเซ็ทของตัวแปรควบคุม ซึ่งการควบคุมเชิงเส้นภายนอกนี้มีไว้เพื่อวัตถุประสงค์คือใช้เพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมและลดผลกระทบจากตัวแปรรบกวนระบบ ดังนั้นจึงเป็นที่คาดหมายได้ว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซิ่งจะสามารถทำการควบคุมระบบใดๆ ที่มีแบบจำลองของกระบวนการที่สามารถเป็นตัวแทนของระบบได้อย่างน่าเชื่อถือได้เป็นอย่างดีและให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิม เช่น การควบคุมแบบพีไอดี

### 3.1.2 อนุพันธ์ทางเรขาคณิตที่ใช้ในการออกแบบการควบคุม

อนุพันธ์ทางเรขาคณิตเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการดำเนินการและออกแบบการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น เพื่อให้เกิดวิธีสำหรับจัดการกับสมการเชิงอนุพันธ์แบบธรรมดาไม่เชิงเส้นได้อย่างคล่องแคล่ว และยังใช้เพื่อการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นด้วยวัตถุประสงค์ของการนำอนุพันธ์ทางเรขาคณิตมาใช้คือ

- ทำให้สมการของระบบไม่เชิงเส้นอยู่ในรูปแบบที่ง่ายในการออกแบบการควบคุม
- สร้างรูปแบบที่แน่นอนสำหรับการควบคุม

ซึ่งเครื่องมือนี้มีชื่อว่า “Lie algebra” เป็นเมตริกซ์พีชคณิต (matrix algebra) ซึ่งเป็นตัวดำเนินการทางเรขาคณิตชนิดหนึ่ง ที่สามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้คือเมื่อกำหนดเมตริกซ์สองเมตริกซ์ คือ A และ B และเขียนเป็น AB ซึ่งเป็นการเขียนเพื่อให้มีรูปแบบที่กระชับ โดยลำดับการบวกหรือคูณกัน จะแสดงให้เห็นจากลำดับการเขียนของเรา ในทำนองเดียวกันสัญลักษณ์ Lie algebra ก็เป็นการเขียนที่มีรูปแบบกระชับ โดยมีลำดับของการบวก, การคูณ และการหาอนุพันธ์จากลำดับการเขียน เช่นเดียวกัน โดยให้จำกัดความของตัวดำเนินการ Lie algebra ที่สำคัญ 2 ตัว คือ

- (i) ตัวดำเนินการ Lie derivative
- (ii) ตัวดำเนินการ Lie bracket

- ตัวดำเนินการ Lie derivative

ให้  $h(x)$  เป็นสเกลาร์ และ  $f(x) = \{f_1(x), \dots, f_n(x)\}$  เป็นเวกเตอร์ ดังนั้น Lie derivative ของ  $h(x)$  ทำได้โดยหาอนุพันธ์ของ  $h(x)$  เทียบกับ  $x_i$  แล้วนำไปคูณกับ  $f_i(x)$  สามารถนิยามได้ดังนี้

$$L_f h(x) = \left\langle dh(x), f(x) \right\rangle = \frac{\partial h(x)}{\partial x_1} f_1 + \dots + \frac{\partial h(x)}{\partial x_n} f_n = \sum_{i=1}^n f_i(x) \frac{\partial h(x)}{\partial x_i} \quad (3.12)$$

ดังนั้นตัวดำเนินการ Lie derivative ที่เป็นตัวดำเนินการอนุพันธ์ย่อยเชิงเส้นอันดับหนึ่ง (linear first-order partial differential operator) จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$L_f = \sum_{i=1}^n f_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (3.13)$$

และในกรณีที่ตัวดำเนินการ Lie derivative มีอันดับสูงกว่าหนึ่งจะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
L_f^2 h(x) &= L_f L_f h(x) \\
L_f^3 h(x) &= L_f L_f^2 h(x) \\
&\vdots \\
L_f^k h(x) &= L_f [L_f^{k-1} h(x)] = \left\langle dL_f^{k-1} h(x), f(x) \right\rangle, \quad k=2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{3.14}$$

ตัวอย่าง เมื่อนำตัวดำเนินการ Lie derivative ไปใช้ร่วมกับเวกเตอร์  $g(x)$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์อีกตัวหนึ่งทำได้โดย ขั้นแรกหาอนุพันธ์ของ  $h(x)$  เทียบกับ  $x_i$  แล้วคูณกับ  $f_i$  เมื่อ  $i=1, \dots, n$  หลังจากนั้นนำผลที่ได้ไปหาอนุพันธ์เทียบกับ  $x_j$  อีกครั้งแล้วคูณกับ  $g_j$  เมื่อ  $j=1 \dots n$  แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
L_g L_f h(x) &= \sum_{j=1}^n g_j(x) \frac{\partial (L_f h)}{\partial x_j}(x) = \sum_{j=1}^n g_j(x) \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ f_1(x) \frac{\partial h(x)}{\partial x_1} + \dots + f_n(x) \frac{\partial h(x)}{\partial x_n} \right\} \\
&= \sum_{j=1}^n g_j(x) \left\{ f_1(x) \frac{\partial^2 h(x)}{\partial x_j \partial x_1} + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_j} \frac{\partial h(x)}{\partial x_1} + \dots + f_n(x) \frac{\partial^2 h(x)}{\partial x_j \partial x_n} + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_j} \frac{\partial h(x)}{\partial x_n} \right\} \\
&= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[ g_j(x) f_i(x) \frac{\partial^2 h(x)}{\partial x_j \partial x_i} + g_j(x) \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \frac{\partial h(x)}{\partial x_i} \right]
\end{aligned} \tag{3.15}$$

ดังนั้นตัวดำเนินการ Lie derivative  $L_g L_f$  ซึ่งเป็นตัวดำเนินการอนุพันธ์ย่อยเชิงเส้นที่มีอันดับสองจะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$L_g L_f = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[ g_j(x) f_i(x) \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} + g_j(x) \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} \right] \tag{3.16}$$

- ตัวดำเนินการ Lie bracket

โดยให้  $g(x)$  และ  $f(x)$  เป็นเวกเตอร์ ดังนั้น Lie bracket ของ  $g(x)$  และ  $f(x)$  เป็นเวกเตอร์ ซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้



$$\begin{aligned}
 [f, g](x) = & \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(x) & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n}(x) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1}(x) & \cdots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \\
 - & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(x) & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1(x) \\ \vdots \\ g_n(x) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

ให้คำจำกัดความเมื่อ Lie brackets มีการคำนวณซ้ำหลายๆ ครั้ง เช่น  $[f, [f, g]], [f, [f, [f, g]]]$  เป็นต้น สามารถแสดงสัญลักษณ์ที่ใช้เป็นมาตรฐานได้โดย

$$\begin{aligned}
 \text{ad}_f^0 g &= g \\
 \text{ad}_f^1 g &= [f, g] \\
 \text{ad}_f^2 g &= [f, [f, g]] \\
 &\vdots \\
 \text{ad}_f^k g &= [f, \text{ad}_f^{k-1} g]
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

### 3.1.3 การเลือกค่าพารามิเตอร์ปรับจูน $\beta_{jk}$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของการควบคุมซึ่งเกิดจากการทำอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชัน  $\beta_{jk}$  ( $j=1, \dots, m$  และ  $k=0, \dots, r_j$ ) ขึ้นอยู่กับค่าโพลของกระบวนการที่ไม่มีการควบคุมหรือโพลของลูปเปิด ส่วนใหญ่การเลือกค่าโพลจะใช้วิธีลองผิดลองถูกเพื่อให้ผลการตอบสนองของกระบวนการที่มีการควบคุมมีเสถียรภาพซึ่งมีแนวทางในการเลือกค่าโพลดังนี้

- หากค่าโพลของกระบวนการที่มีอันดับสัมพัทธ์เป็นหนึ่ง มีค่าโพลเท่ากับ  $-1$  ถ้าเปลี่ยนค่าโพลเป็น  $-10$  จะช่วยส่งผลให้ค่าคงที่เวลา (time constant) ลดลง และกระบวนการจะมีการตอบสนองเร็วขึ้น

- ถ้าค่าโพลตัวใดอยู่ฝั่งขวาของแกนจินตภาพหรืออยู่ใกล้กับแกนจินตภาพ ควรจะเปลี่ยนค่าและย้ายข้ามแกนจินตภาพมาอยู่ฝั่งซ้าย โดยเปลี่ยนเครื่องหมายเป็นลบ เช่น ค่าโพลเดิมเท่ากับ 2 ควรเปลี่ยนเป็น  $-2$
- ถ้าค่าโพลเป็นจำนวนเชิงซ้อน สามารถเปลี่ยนค่าและย้ายตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของกระบวนการตามต้องการ โดยมีคอนจูเกตเป็นโพลโดยอัตโนมัติ เช่น ค่าโพลเดิมเท่ากับ  $-0.1 - j10$  กับ  $-0.1 + j10$  เปลี่ยนเป็น  $-1 - j$  กับ  $-1 + j$
- ไม่ควรเลือกค่าโพลที่มีค่าติดลบหรืออยู่ฝั่งซ้ายของแกนจินตภาพมากเกินไป เพราะจะทำให้กระบวนการมี band width เพิ่มขึ้น และมีความไวต่อสัญญาณรบกวนมากขึ้น

หมายเหตุ ค่า  $\beta_{jk}$  จะหาได้จากการใช้ค่าโพลของลูปเปิด ซึ่งส่วนใหญ่นิยมให้  $\beta_{j0} = 1$  เพื่อจะทำการหาค่า  $\beta_{jk}$  ตัวอื่นๆ ต่อไป

ตัวอย่าง กรณีที่สมการมีตัวแปรควบคุมหนึ่งตัวคือ  $j=1$  และ อันดับสัมพันธ  $r_1 = 1$  หรือเป็นสมการอันดับหนึ่ง กำหนดให้  $\beta_{10} = 1$

$$\beta_{11} \frac{dy_1}{dt} + \beta_{10} y_1 = v_1$$

$$\text{จะได้ค่าโพล } \lambda_1 = -\frac{\beta_{10}}{\beta_{11}}$$

ดังนั้น  $\beta_{11} = -1/\lambda_1$  เมื่อ  $\lambda_1$  คือค่าโพลของลูปปิด ซึ่งถูกแทนด้วยค่าโพลของลูปเปิด โดยสามารถหาได้จากแบบจำลองของกระบวนการ ฉะนั้นการเลือกค่า  $\beta_{11}$  ควรจะเลือกค่าที่ทำให้โพลของลูปปิดมีเสถียรภาพ ซึ่งอย่างน้อยที่สุดให้โพลของลูปปิดมีค่าเท่ากับค่าโพลของลูปเปิด ซึ่งเป็นค่าโพลที่ช้าที่สุด

### 3.1.4 การปรับจูนพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่ง

ในการปรับจูนพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่ง หลักการสำคัญได้ถูกกำหนดไว้โดย Soroush และ Kravaris (1992) ซึ่งมาจากประสบการณ์การศึกษาทดลอง และการจำลองการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไร้ซึ่งกับกระบวนการทางเคมีต่างๆ

- ลูบภายในเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการใช้วิธีการอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชัน ในการหาความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาต์พุทของกระบวนการ ไม่ได้ใช้เพื่อเพิ่มความเร็วของผลการตอบสนองของกระบวนการที่มีการควบคุม (ลูบปิด) ดังนั้นค่าโพลต่างๆ ของกระบวนการที่มีการควบคุม (เช่น ถ้ากระบวนการเป็นอันดับหนึ่ง โพลเท่ากับ  $-\beta_{10} / \beta_{11}$ ) จะถูกแทนด้วยค่าโพลที่หาได้แบบจำลองของกระบวนการที่ไม่มีการควบคุมโดยทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้นก่อน (ลูบเปิด) ซึ่งเป็นค่าโพลที่ช้าที่สุด โดยต้องให้ระบบมีเสถียรภาพ
- ตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอกใช้สำหรับเพิ่มความเร็วของผลการตอบสนองของกระบวนการ และลดออฟเซ็ทของตัวแปรควบคุม
- ค่าพารามิเตอร์ปรับจูน  $K_{Cj}$  และ  $\tau_{Ij}$  ของตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอกแบบพีไอถูกปรับจูนโดยใช้วิธีตามความเหมาะสมของการควบคุมกระบวนการ เช่น วิธีการปรับจูนโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด วิธีการปรับจูนโดยการหาผลการแกว่งของระบบปิด วิธีการปรับจูนโดยลองผิดลองถูก เป็นต้น

### 3.2 การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์

เนื่องจากการควบคุมแบบ โกลบอลลิเนียร์ไรเซชันเป็นการควบคุมที่ขึ้นกับแบบจำลอง เมื่อแบบจำลองของการควบคุมแบบ โกลบอลลิเนียร์ไรเซชันแตกต่างจากแบบจำลองของกระบวนการจริง จะให้ผลการควบคุมที่ไม่ดี (การดำเนินการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุทจากแบบจำลองที่ผิดพลาดส่งผลให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมผิดพลาด เมื่อนำค่าตัวแปรปรับที่คำนวณได้นี้ไปทำการควบคุมกับระบบจริง ทำให้การควบคุมไม่ได้ผลดี) ดังนั้นจึงต้องอาศัยการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์เข้ามาช่วยในการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ของแบบจำลองของการควบคุมแบบ โกลบอลลิเนียร์ไรเซชันให้ถูกต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองของกระบวนการจริงมากที่สุดซึ่งจะทำให้การควบคุมแบบ โกลบอลลิเนียร์ไรเซชันมีความทนทานดีขึ้น ในการประยุกต์ใช้จริงปกติแล้วจะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ร่วมอยู่ด้วยเสมอ เนื่องจากเป็นความจริงที่ว่าในการหาแบบจำลองต้องมีการให้สมมติฐานหลายอย่างดังนั้นแบบจำลองที่หาได้ย่อมแตกต่างจากแบบจำลองของกระบวนการจริง ในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกใช้ การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย

### 3.2.1 คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter)

คาลมานฟิลเตอร์เป็นอัลกอริทึมในการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ ซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งของการหาค่าความแปรปรวนต่ำสุด (Minimum Variance) ที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหาในการควบคุมที่มีความยุ่งยากซับซ้อนยิ่งขึ้น สามารถนำมาใช้ประมาณค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดได้ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมค่าสแตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้และสามารถควบคุมกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ คาลมานฟิลเตอร์ที่ใช้กันมักอยู่ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งหลักการของคาลมานคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่องอาศัยการเขียนสมการสแตตสเปซ (state-space) ซึ่งเป็นรูปแบบเชิงเส้นสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (3.19)$$

และสมการค่าการวัด คือ

$$y_k = C_k x_k + v_k \quad (3.20)$$

โดยที่  $w_k$  และ  $v_k$  เป็นตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบและค่าการวัด โดยสมมติให้ทั้ง  $w_k$  และ  $v_k$  เป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีการกระจายแบบปกติซึ่งคือ

$$\text{Prob}(w_k) \approx N(0, Q) \quad (3.21)$$

$$\text{Prob}(v_k) \approx N(0, R) \quad (3.22)$$

เมื่อ  $E(w_k \cdot w_k^T) = Q_k$  คือ ความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของแบบจำลอง  
 $E(v_k \cdot v_k^T) = R_k$  คือ ความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของการวัด

ถ้ากำหนดให้จำนวนสแตตเท่ากับ  $n$  จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการเท่ากับ  $r$  และจำนวนค่าการวัดเท่ากับ  $m$  จะได้ว่าเมตริกซ์  $A_k$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสแตต ณ เวลา  $k$  กับค่าสแตต ณ เวลา  $k+1$  มีมิติ  $n \times n$  เมตริกซ์  $B_k$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรปรับกระบวนการและค่าสแตตมีมิติ  $n \times r$  และ  $C_k$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดกับค่าสแตตมีมิติ  $m \times n$

ถ้ากำหนดให้  $\hat{x}_{k+1/k}$  เป็นค่าประมาณ ณ เวลา  $k+1$  ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต ณ เวลา  $k$  และกำหนดให้  $\hat{x}_{k+1/k+1}$  เป็นค่าประมาณ ณ เวลา  $k+1$  ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าข้อมูลของ  $\hat{x}_{k+1/k}$  และค่าการวัด  $y_{k+1}$  จะสามารถนิยามคลาดเคลื่อนของค่าประมาณได้ ดังนี้

$$e_{k+1|k} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k} \quad (3.23)$$

และ 
$$e_{k+1|k+1} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k+1} \quad (3.24)$$

จะได้เมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$P_{k+1|k} = E[e_{k+1|k} \cdot e_{k+1|k}^T] \quad (3.25)$$

$$P_{k+1|k+1} = E[e_{k+1|k+1} \cdot e_{k+1|k+1}^T] \quad (3.26)$$

ค่าของ  $\hat{x}_{k+1/k}$  จะได้จากการคำนวณโดยอาศัยสมการแบบจำลอง ดังนี้

$$\hat{x}_{k+1/k} = A_k \hat{x}_{k+1/k} + B_k u_k \quad (3.27)$$

ค่าของ  $\hat{x}_{k+1/k+1}$  จะได้จากการคำนวณโดยการรวมเทอมของ  $\hat{x}_{k+1/k}$  กับค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าการวัดที่ได้จากการทำนาย ซึ่งเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1/k}) \quad (3.28)$$

เทอมของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าการวัดที่ได้จากการทำนายนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับความถูกต้องให้กับค่า  $\hat{x}_{k+1/k}$  ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งเรียกว่า “Residual”

เมตริกซ์  $K_{k+1}$  ซึ่งมีมิติ  $n \times m$  ในสมการ (3.28) จะเรียกว่า “เมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix)” ซึ่งจะสามารถหาได้จากการแทนค่าของสมการ (3.28) ลงในสมการ (3.26) แล้วทำการหาค่าเมตริกซ์  $K_{k+1}$  ที่ทำให้สมการ (3.26) มีค่าต่ำที่สุด

จากการแทนสมการที่ (3.28) ลงในสมการ (3.26) จะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k+1} &= E[e_{k+1|k+1} \cdot e_{k+1|k+1}^T] \\ &= E\{[x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k+1}][x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k+1}]^T\} \end{aligned}$$

$$= E\{[(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k}) - K_{k+1}(C_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1} - C_{k+1}\hat{x}_{k+1/k})] \\ [(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k}) - K_{k+1}(C_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1} - C_{k+1}\hat{x}_{k+1/k})]^T\} \quad (3.29)$$

เมื่อแทน  $x_{k+1} - \hat{x}_{k+1/k}$  ด้วย  $e_{k+1|k}$  จะได้

$$P_{k+1|k+1} = E\{[e_{k+1|k} - K_{k+1}(C_{k+1}e_{k+1|k} + v_{k+1})] \\ [e_{k+1|k} - K_{k+1}(C_{k+1}e_{k+1|k} + v_{k+1})]^T\} \quad (3.30)$$

เมื่อทำการกระจายเทอมของสมการ (3.30) และกำหนดให้  $e_{k+1|k}$  ไม่มีความสัมพันธ์ (uncorrelated) กับ  $v_{k+1}$  จะได้

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}C_{k+1})P_{k+1|k}(I - K_{k+1}C_{k+1})^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \quad (3.31)$$

ในการหาค่าที่เหมาะสมของ  $K_{k+1}$  เพื่อที่จะทำให้ค่า  $P_{k+1|k+1}$  มีค่าต่ำที่สุดนั้นอาจทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการหนึ่งอาจจะแสดงได้ตามขั้นตอนดังจะกล่าวต่อไปนี้

จากสมการที่ (3.31) เมื่อทำการกระจายเทอมจะได้

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}C_{k+1})P_{k+1|k}(I - K_{k+1}C_{k+1})^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \\ = P_{k+1|k} - K_{k+1}C_{k+1}P_{k+1|k} - P_{k+1|k}C_{k+1}^TK_{k+1}^T + K_{k+1}(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})K_{k+1}^T \quad (3.32)$$

เนื่องจากเทอม  $K_{k+1}(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})K_{k+1}^T$  เป็นกำลังสองในเทอม  $K_{k+1}$  ซึ่งถ้าสมมติให้เทอม  $K_{k+1}(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})K_{k+1}^T$  เป็นเมตริกซ์สมมาตร (Symmetric) และมีนิยามเชิงบวก (positive definite) และทำการนิยามเทอม  $C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1}$  ด้วย  $SS^T$  ซึ่งก็คือ

$$SS^T \approx C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1} \quad (3.33)$$

จะได้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1}C_{k+1}P_{k+1|k} - P_{k+1|k}C_{k+1}^TK_{k+1}^T + K_{k+1}SS^TK_{k+1}^T \quad (3.34)$$



ถ้าเขียน  $P_{k+1|k+1}$  ในรูปของสมการกำลังสอง ดังนี้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} + (K_{k+1}S - H)(K_{k+1}S - H)^T - HH^T \quad (3.35)$$

และกำหนดให้เทอมของ  $H$  ไม่มี  $K_{k+1}$  เข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อเปรียบเทียบเทอมในสมการ (3.35) กับสมการ (3.34) จะได้

$$K_{k+1}SH^T + HS^TK_{k+1}^T = K_{k+1}C_{k+1}P_{k+1|k} + P_{k+1|k}C_{k+1}^TK_{k+1}^T \quad (3.36)$$

เมื่อเทียบเทอมสัมประสิทธิ์หน้า  $K_{k+1}^T$  ของด้านซ้ายและขวาของสมการ (3.36) จะได้

$$H = P_{k+1|k}C_{k+1}^T(S^T)^{-1} \quad (3.37)$$

เนื่องจากเทอมในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์  $P_{k+1|k+1}$  จะแทนถึงความแปรปรวนของค่าสเกลต่างๆ โดยตรง ดังนั้นในที่นี้จะพิจารณากรณีที่  $P_{k+1|k+1}$  เป็นเมตริกซ์ในแนวทแยงมุม ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการ (3.35) จะเห็นว่ามีเพียงเทอมกลางของสมการทางด้านขวาเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับ  $K_{k+1}$  และเทอมกลางนี้ไม่สามารถมีค่าในแนวทแยงมุมเป็นค่าลบได้เนื่องจากเป็นผลคูณของเมตริกซ์และทรานสโพส (transpose) ของเมตริกซ์นั่นเอง ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดที่จะทำให้  $P_{k+1|k+1}$  มีค่าน้อยที่สุดก็คือ การหาค่า  $K_{k+1}$  ที่ทำให้เทอมกลางมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือ

$$K_{k+1}S = H \quad (3.38)$$

หรือ

$$K_{k+1} = HS^{-1} \quad (3.39)$$

เมื่อทำการแทนสมการ (3.37) ลงในสมการ (3.39) จะได้

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1|k}C_{k+1}^T(S^T)^{-1}S^{-1} \\ &= P_{k+1|k}C_{k+1}^T(SS^T)^{-1} \end{aligned} \quad (3.40)$$

เมื่อแทนค่าของ  $SS^T$  จากสมการ (3.33) ลงในสมการ (3.40) จะได้

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.41) ถ้าค่าของความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน  $P_{k+1|k}$  มีค่าน้อยๆ จะทำให้สมการ (3.28) มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual น้อยลง

$$\lim_{P_{k+1|k} \rightarrow 0} K_{k+1} = 0 \quad (3.42)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าค่าของความแปรปรวนของค่าการวัด  $R_{k+1}$  มีค่าน้อยๆ จะทำให้สมการ (3.32) มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual มากขึ้น

$$\lim_{R_{k+1} \rightarrow 0} K_{k+1} = C_{k+1}^{-1} \quad (3.43)$$

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าถ้า  $P_{k+1|k}$  มีค่าน้อยๆ จะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดจริงมีความน่าเชื่อถือ น้อย และค่าที่ได้จากการประมาณมีความน่าเชื่อถือมาก จึงทำให้สมการ (3.28) มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual น้อย และในทำนองเดียวกันถ้า  $R_{k+1}$  มีค่าน้อยๆ จะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดจริงมีความน่าเชื่อถือมาก และค่าที่ได้จากการประมาณมีความน่าเชื่อถือน้อย จึงทำให้สมการ (3.28) มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual มาก

พิจารณาค่า  $P_{k+1|k+1}$  จากสมการ (3.31) เมื่อทำการกระจายเทอมจะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k+1} &= (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k} (I - K_{k+1} C_{k+1})^T + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \\ &= P_{k+1|k} - K_{k+1} C_{k+1} P_{k+1|k} - P_{k+1|k} C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}) K_{k+1}^T \end{aligned} \quad (3.44)$$

เมื่อแทนค่า  $K_{k+1}$  จากสมการ (3.41) ลงในสมการ (3.44) จะได้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} C_{k+1} P_{k+1|k} \quad (3.45)$$

หรือ

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}) K_{k+1}^T \quad (3.46)$$

หรือ

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k} \quad (3.47)$$

จากรูปแบบของการหาค่าของ  $P_{k+1|k+1}$  ที่ได้ สมการ (3.47) นั้นมีรูปแบบที่ง่ายที่สุดจึงเป็นที่นิยมใช้กัน อย่างไรก็ตามค่าของ  $P_{k+1|k+1}$  ที่หามาได้ในสมการ (3.45), (3.46) และ (3.47) นั้นเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งที่ได้จากการแทนค่า  $K_{k+1}$  ซึ่งคำนวณจากวิธีการที่ได้แสดงไว้ในข้างต้นเท่านั้น

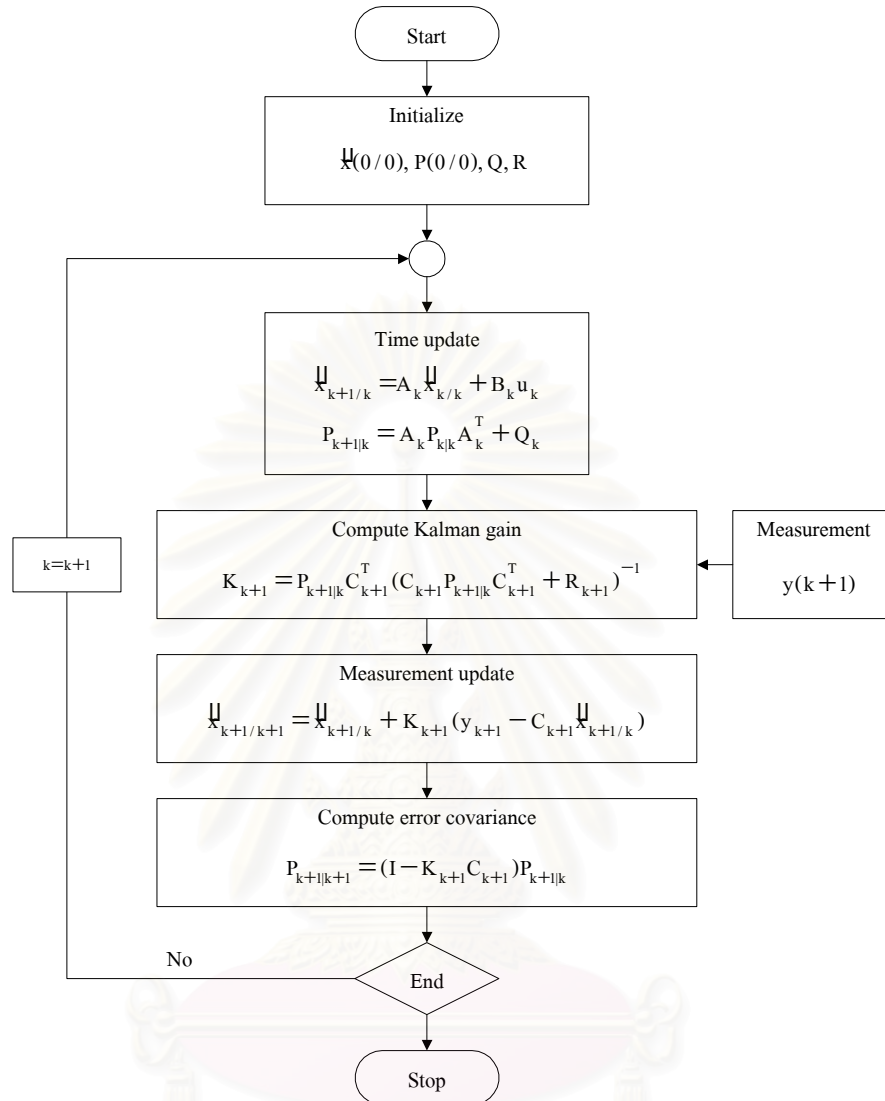
จากสมการ (3.25) เมื่อแทนค่า  $e_{k+1|k} = A_k e_{k|k} + w_k$  และกำหนดให้  $w_k$  ไม่มีความสัมพันธ์กับ  $e_{k|k}$  จะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k} &= E[ e_{k+1|k} \cdot e_{k+1|k}^T ] \\ &= E[ (A_k e_{k|k} + w_k) \cdot (A_k e_{k|k} + w_k)^T ] \\ &= A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k \end{aligned} \quad (3.48)$$

จากสมการที่ได้แสดงมาทั้งหมด สมการ (3.27), (3.28), (3.41), (3.47) และ (3.48) จะถูกนำมารวมเป็นขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์ ซึ่งจะวนเป็นรอบการคำนวณซ้ำไปจนถึงเวลาที่ต้องการ ดังจะกล่าวต่อไปดังนี้

### อัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง

จากสมการด้านบนที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าคาลมานฟิลเตอร์จะทำการประมาณค่าของสเตตจากแบบจำลองก่อนจากนั้นจึงทำการปรับปรุงแก้ไขค่าเพื่อให้ความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นกลุ่มของสมการคาลมานฟิลเตอร์จึงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือสมการการทำนาย (Predictor equations หรือ Time update equations) และสมการการแก้ไข (Corrector equations หรือ Measurement update equations) ซึ่งสามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณ และแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าในการคำนวณจะเริ่มจากสมการการทำนายเพื่อคำนวณค่า  $\hat{x}_{k+1/k}$  และ  $P_{k+1|k}$  จากนั้นจะทำการคำนวณค่าเมตริกซ์เกน  $K_{k+1}$  เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าประมาณค่าใหม่  $\hat{x}_{k+1/k+1}$  และค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่  $P_{k+1|k+1}$  ซึ่งเป็นค่าที่จะนำกลับไปใช้ในสมการการทำนายอีกครั้ง จะเห็นว่าขั้นตอนการคำนวณจะวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาที่ต้องการ

### สมการการทำนาย

- คำนวณค่าประมาณ โดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1/k} = A_k \hat{x}_{k/k} + B_k u_k$$

- คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k$$

### สมการการแก้ไข

- คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

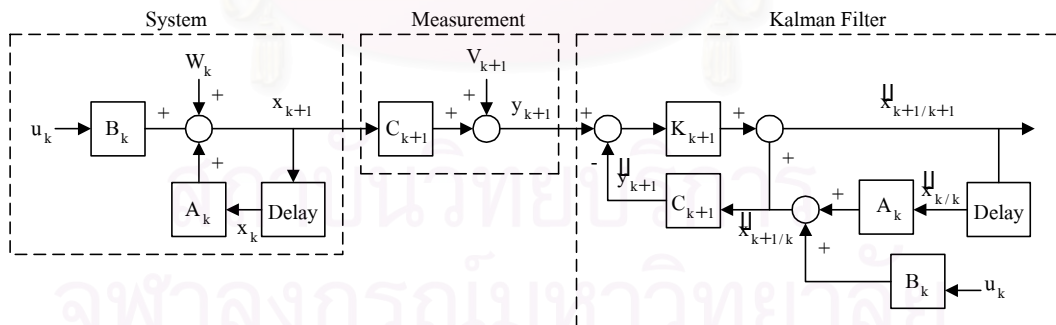
$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$$

- คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1/k})$$

- คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k}$$



รูปที่ 3.3 แสดงการทำงานของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับระบบ

จากรูปที่ 3.3 เป็นแผนภาพแสดงการทำงานของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับระบบ เมื่อพิจารณาบล็อกของระบบจะเห็นว่าจะมีการใช้ค่าข้อมูลต่างๆ ที่เวลา  $k$  ในการคำนวณค่าสแตตที่เวลา  $k+1$  ค่า  $x_{k+1}$  ี่ได้จะถูกส่งกลับไปเข้าสู่หน่วยหน่วงเวลา (delay) เพื่อนำกลับไปใช้ในการ

คำนวณค่าสเตทในเวลาต่อไป นอกจากนี้ ค่า  $x_{k+1}$  ยังถูกส่งเข้าสู่หน่วยการวัดด้วย จากค่าการวัดที่ได้ จะถูกส่งไปสู่คาลมานฟิลเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าประมาณ  $\hat{x}_{k+1/k+1}$  โดยค่า  $\hat{x}_{k+1/k+1}$  ที่ได้จะถูกส่งออกจากลูกเพื่อไปใช้งานต่อไป และจะถูกส่งเข้าสู่หน่วยหน่วยเวลาเพื่อนำกลับไปใช้ในการคำนวณค่าประมาณ  $\hat{x}_{k+1/k}$  ซึ่งขั้นตอนการทำงานจะถูกลงซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาที่ต้องการ

### 3.2.2 คาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย (Extended Kalman Filter, EKF)

ปัญหาโดยทั่วไปของคาลมานฟิลเตอร์นั้นจะเกี่ยวข้องกับการประมาณค่าสเตทของระบบเชิงเส้น แต่ระบบจริงในทางอุตสาหกรรมนั้นมักจะเป็นระบบไม่เชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตทกับค่าการวัดนั้นอาจไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนการคำนวณบางขั้นตอนเพื่อให้สามารถนำคาลมานฟิลเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานกับระบบไม่เชิงเส้นได้ จึงเป็นที่มาของคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย

พิจารณาแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้น ดังนี้

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \quad (3.49)$$

และสมการค่าการวัด คือ

$$y_k = h(x_k, v_k) \quad (3.50)$$

เมื่อ ฟังก์ชัน  $f$  คือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตท ณ เวลา  $k$  และค่าสเตท ณ เวลา  $k+1$

ฟังก์ชัน  $h$  คือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัด  $y_k$  และค่าสเตท  $x_k$

$w_k$  และ  $v_k$  เป็นตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบและค่าการวัดที่เป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีการกระจายแบบปกติ ซึ่งก็คือ  $\text{Prob}(w_k) \approx N(0, Q_k)$  และ  $\text{Prob}(v_k) \approx N(0, R_k)$

เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าสัญญาณรบกวน  $w_k$  และ  $v_k$  นั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบได้อย่างแน่นอน ดังนั้นจึงทำการประมาณสมการ (3.49) และ (3.50) ดังนี้

$$\tilde{x}_{k+1/k} = f(\hat{x}_{k/k}, u_k, 0) \quad (3.51)$$

$$\tilde{y}_{k+1} = h(\tilde{x}_{k+1/k}, 0) \quad (3.52)$$



จากอนุกรมเทเลอร์ ถ้าทำการลিনিยร์ไรซ์รอบค่าประมาณของฟังก์ชันระบบและฟังก์ชันค่าการวัดในสมการ (3.49) และ (3.50) จะได้

$$x_{k+1} = \tilde{x}_{k+1|k} + A_k (x_k - \hat{x}_{k/k}) + W_k w_k \quad (3.53)$$

$$y_{k+1} = \tilde{y}_{k+1} + C_{k+1} (x_{k+1} - \tilde{x}_{k+1|k}) + V_{k+1} v_{k+1} \quad (3.54)$$

เมื่อ  $x_k$  และ  $y_{k+1}$  คือ ค่าสเตทและค่าการวัดจริงของระบบ  
 $\tilde{x}_{k+1|k}$  และ  $\tilde{y}_{k+1}$  คือ ค่าประมาณของสเตทและค่าการวัดที่ได้จากแบบจำลองของสมการ (3.51) และ (3.52) ตามลำดับ  
 $\hat{x}_{k/k}$  คือ ค่าประมาณจริงของสเตท ณ เวลา  $k$   
 $A_k$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) อนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน  $f$  เมื่อเทียบกับ  $x$  ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$A_{k[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}(\hat{x}_{k/k}, u_k, 0)}{\partial x_{k[j]}} \quad (3.55)$$

$W$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียนอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน  $f$  เมื่อเทียบกับ  $w$  ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$W_{k[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}(\hat{x}_{k/k}, u_k, 0)}{\partial w_{k[j]}} \quad (3.56)$$

$H$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียนอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน  $h$  เมื่อเทียบกับ  $z$  ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$C_{k+1[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}(\tilde{x}_{k+1|k}, 0)}{\partial y_{k+1[j]}} \quad (3.57)$$

$V$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียนอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน  $h$  เมื่อเทียบกับ  $v$  ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$V_{k+1[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}(\tilde{x}_{k+1|k}, 0)}{\partial v_{k+1[j]}} \quad (3.58)$$

ถ้านิยามเทอมความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสเตรทจริงกับค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลอง

$$\tilde{e}_{x_{k+1}} = x_{k+1} - \tilde{x}_{k+1|k} \quad (3.59)$$

และเทอม Residual ของค่าการวัดที่ได้จากแบบจำลอง

$$\tilde{e}_{y_{k+1}} = y_{k+1} - \tilde{y}_{k+1} \quad (3.60)$$

$$\text{จะได้ } \tilde{e}_{x_{k+1}} = A(x_k - \hat{x}_{k/k}) + \varepsilon_k \quad (3.61)$$

$$\text{และ } \tilde{e}_{y_{k+1}} = C_{k+1} \tilde{e}_{x_{k+1}} + \eta_{k+1} \quad (3.62)$$

เมื่อ  $\varepsilon_k$  คือ ค่าตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีเมตริกซ์ความแปรปรวน คือ  $WQW^T$

$$\text{หรือ } P(\varepsilon_k) \sim N(0, WQ_k W^T)$$

$\eta_{k+1}$  คือ ค่าตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีเมตริกซ์ความแปรปรวน คือ  $VRV^T$

$$\text{หรือ } P(\eta_{k+1}) \sim N(0, VR_{k+1} V^T)$$

เนื่องจากค่าสเตรทจริง  $x_{k+1}$  นั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบค่าได้อย่างแน่นอน ในขณะที่ค่าการวัดจริง  $y_{k+1}$  นั้นเป็นค่าที่สามารถทราบได้ ดังนั้น จึงอาจจะใช้ค่าการวัดจริง  $y_{k+1}$  มาช่วยในการหาค่าสเตรท  $x_{k+1}$  ซึ่งอาจจะใช้ในรูป Residual ของค่าการวัดในทำนองเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในสมการ (3.28)

ถ้านิยามเทอมความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าประมาณจริงกับค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลอง

$$\hat{e}_{k+1} = \hat{x}_{k+1/k+1} - \tilde{x}_{k+1|k} \quad (3.63)$$

จะได้

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \tilde{x}_{k+1|k} + \hat{e}_{k+1} \quad (3.64)$$

จากสมการ (3.64) ถ้าชดเชยเทอมความคลาดเคลื่อน  $\hat{e}_{k+1}$  ด้วยเทอมของค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับ Residual ของค่าการวัด จะได้

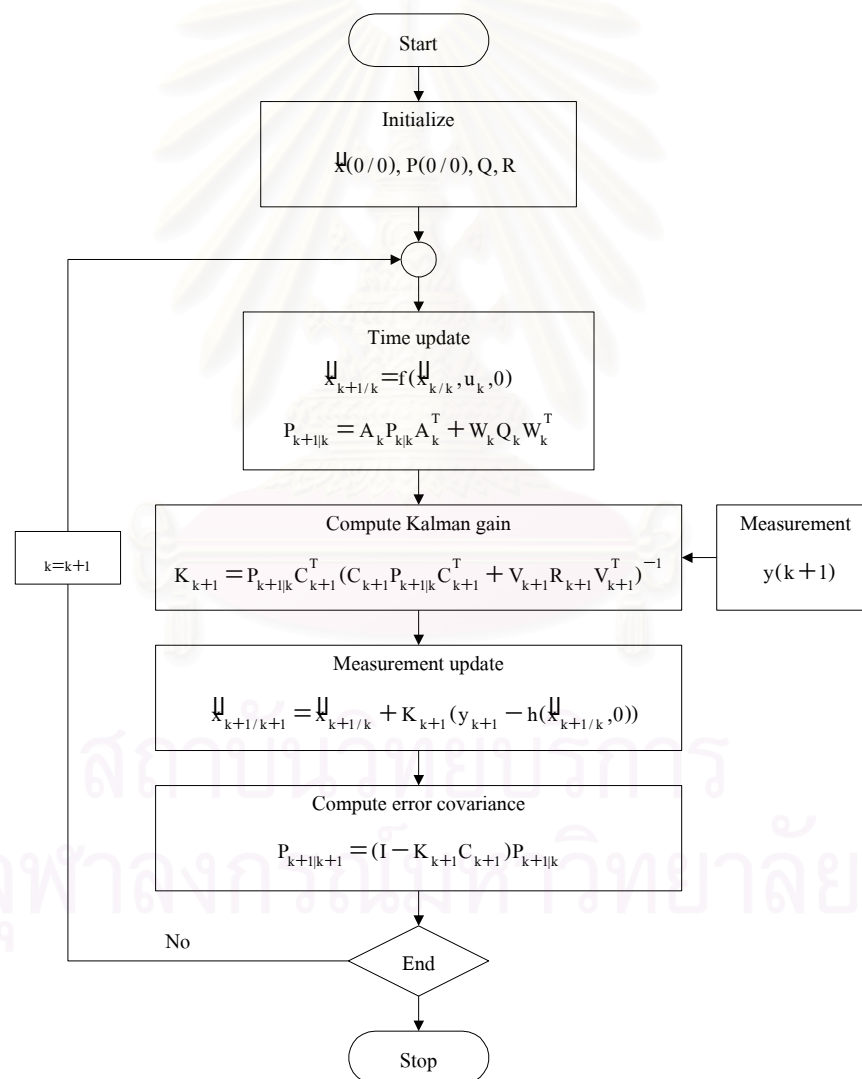
$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \tilde{x}_{k+1/k} + K_{k+1} \tilde{y}_{k+1} \quad (3.65)$$

หรือ

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \tilde{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \tilde{y}_{k+1}) \quad (3.66)$$

### อัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์แบบยี่ดขยาย

จากที่กล่าวมา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนสัญลักษณ์  $\tilde{x}_{k+1/k}$  เป็น  $\hat{x}_{k+1/k}$  จะสามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณและแผนภาพของคาลมานฟิลเตอร์แบบยี่ดขยายได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบยี่ดขยาย

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบอีคซายที่กล่าวในหัวข้อนี้จะคล้ายกับขั้นตอนการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.1 โดยจะต่างกันที่การคำนวณค่า  $\hat{x}_{k+1/k}$  และค่าประมาณของค่าการวัด  $\hat{y}_{k+1}$  ในสมการการปรับปรุง ซึ่งจะทำการคำนวณจากสมการในรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นเลย ในขณะที่ขั้นตอนการคำนวณอื่นยังคงเป็นรูปแบบเดิม

#### สมการการทำนาย

- คำนวณค่าประมาณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1/k} = f(\hat{x}_{k/k}, u_k, 0)$$

- คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1/k} = A_k P_{k|k} A_k^T + W_k Q_k W_k^T$$

#### สมการการแก้ไข

- คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1/k} C_{k+1}^T + V_{k+1} R_{k+1} V_{k+1}^T)^{-1}$$

- คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1/k}, 0))$$

- คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1/k}$$

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณของคาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่องและคาลมานฟิลเตอร์แบบอีคซาย

กาลมานฟิลเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง	กาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย
<p><u>สมการการทำนาย</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\hat{x}_{k+1/k} = A_k \hat{x}_{k/k} + B_k u_k</math></li> <li><math>P_{k+1/k} = A_k P_{k/k} A_k^T + Q_k</math></li> </ol> <p><u>สมการการแก้ไข</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>K_{k+1} = P_{k+1/k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1/k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}</math></li> <li><math>\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1/k})</math></li> <li><math>P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1/k}</math></li> </ol>	<p><u>สมการการทำนาย</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\hat{x}_{k+1/k} = f(\hat{x}_{k/k}, u_k, 0)</math></li> <li><math>P_{k+1/k} = A_k P_{k/k} A_k^T + W_k Q_k W_k^T</math></li> </ol> <p><u>สมการการแก้ไข</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>K_{k+1} = P_{k+1/k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1/k} C_{k+1}^T + V_{k+1} R_{k+1} V_{k+1}^T)^{-1}</math></li> <li><math>\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1/k}, 0))</math></li> <li><math>P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1/k}</math></li> </ol>

### 3.2.3 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของกาลมานฟิลเตอร์

จากขั้นตอนการคำนวณของกาลมานฟิลเตอร์พบว่า ต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ  $x_{k|k}$  และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ  $P_{k|k}$  นอกจากนี้ยังต้องกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง  $Q_k$  และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของการวัด  $R_k$  ซึ่งหลักในการกำหนดค่าดังกล่าวอาจพอสรุปได้ ดังนี้

การกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ ( $x_{k|k}$ ) และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ ( $P_{k|k}$ )

การกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ  $x_{k|k}$  นั้น จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของผู้ใช้ ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรืออาศัยค่าการวัดในอดีต ส่วนการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ  $P_{k|k}$  จะขึ้นอยู่กับความเชื่อมั่นในค่าที่สมมติขึ้น ซึ่งถ้าไม่แน่ใจในค่าที่สมมติก็อาจกำหนดค่าเมตริกซ์  $P_{k|k}$  ให้มีค่ามากๆ โดยค่าที่ตำแหน่งทแยงมุมของเมตริกซ์  $P_{k|k} [i, i]$  จะแทนความไม่แน่นอนของค่าประมาณ  $x_{k|k} [i]$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, n$  ส่วนค่าที่ไม่อยู่ในตำแหน่งทแยงมุม  $P_{k|k} [i, j]$  เมื่อ  $i \neq j$  จะเป็นค่าความไม่แน่นอนร่วมของค่าประมาณ  $x_{k|k} [i]$  และ  $x_{k|k} [j]$  โดยทั่วไปจะสมมติให้ค่าประมาณ  $x_{k|k} [i]$  และ  $x_{k|k} [j]$  ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นั่นก็คือ ค่าที่ไม่อยู่ในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์  $P_{k|k}$  จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง

### การกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง ( $Q_k$ )

โดยทั่วไปเพื่อความง่าย เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง  $Q_k$  จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยการกำหนดค่าเมตริกซ์  $Q_k$  จะขึ้นอยู่กับว่าแบบจำลองที่หามาได้นั้นมีความถูกต้องมากน้อยเพียงไร โดยถ้าเชื่อว่าแบบจำลองที่หามาได้มีความถูกต้อง ก็อาจกำหนดค่าของเมตริกซ์  $Q_k$  ให้มีค่าน้อยๆ ในการตรวจสอบว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องหรือไม่ อาจทำได้โดยการตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง (ทั้งนี้เครื่องมือวัดที่ใช้ นั้นควรจะมีความน่าเชื่อถือ) อย่างไรก็ตามในการกำหนดค่าเมตริกซ์  $Q_k$  นั้นอาจถูกกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับไดนามิกส์ของระบบ เช่น อาจกำหนดให้  $Q_k$  มีค่าน้อยๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกส์อย่างช้าๆ และกำหนดให้  $Q_k$  มีค่ามากๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกส์อย่างรวดเร็ว

### การกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าการวัด ( $R_k$ )

การกำหนดค่าเมตริกซ์  $R_k$  โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยหลักในการกำหนดค่าจะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัด ซึ่งถ้าเครื่องมือวัดมีความน่าเชื่อถือน้อยก็อาจกำหนดค่าของเมตริกซ์  $R_k$  ให้มีค่ามากๆ อย่างไรก็ตามค่าของเมตริกซ์  $R_k$  นั้นอาจจะหาได้จากการสอบเทียบกับเครื่องมือวัด และเช่นเดียวกับการกำหนดค่าเมตริกซ์  $Q_k$  ค่าของเมตริกซ์  $R_k$  อาจถูกกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เช่น ในกรณีที่เครื่องมือวัดได้รับผลกระทบจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเคลื่อนที่

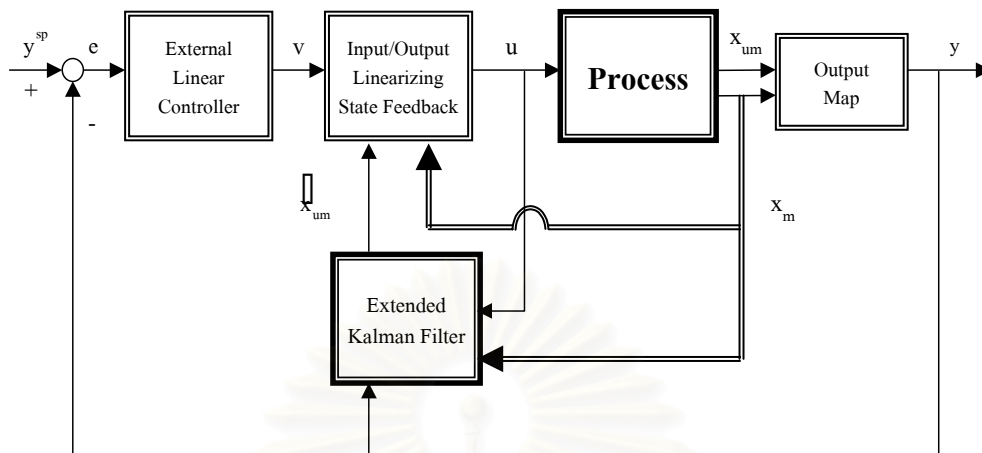
หมายเหตุ ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ  $P_{k|k}$  อาจทำได้โดยการกำหนดค่าของเมตริกซ์  $Q_k$  แล้วจึงทำการแก้สมการ  $P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + W_k Q_k W_k^T$  โดยสมมติให้  $P_{k+1|k} = P_{k|k}$

## 3.3 การควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

การนำการประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ เช่น คาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซิ่ง จะช่วยส่งเสริมให้การควบคุมแบบนี้มีสมรรถนะและความทนทานในการทำงานสูงยิ่งขึ้น ซึ่งในการประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์นั้นจะอาศัย ข้อมูลเอาท์พุทที่วัดได้เป็นฐานในการนำไปคำนวณหรือประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ โดยผลการประมาณค่าจะดีหรือไม่ขึ้นกับค่าเอาท์พุทที่วัดได้มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด แบบจำลองและตัวพารามิเตอร์ที่ใช้ เทคนิคการประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์เอง อีกทั้งแบบจำลองของตัวประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ด้วย

แผนภาพแสดงการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.5





รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการควบคุมแบบ โกลบอลลีนีเยอร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า คาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยาย จะอาศัยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของกระบวนการที่วัดได้ ( $u$ ,  $x_m$  และ  $y$  ตามลำดับ) เป็นฐานในการคำนวณหรือประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ที่ไม่ถูกต้องหรือตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้ โดยอาศัยแบบจำลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาต์พุตที่วัดได้กับค่าสเทตและพารามิเตอร์ที่จะทำการประมาณ ค่าสเทตและพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณจะส่งเข้าตัวควบคุมแบบ โกลบอลลีนีเยอร์ไรซิ่ง ในขณะที่ค่าเอาต์พุตที่วัดได้เหล่านี้จะป้อนให้กับตัวควบคุมแบบ โกลบอลลีนีเยอร์ไรซิ่งที่อาศัยแบบจำลองในการคำนวณค่าของตัวแปรปรับที่เหมาะสม เพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเซตพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้การควบคุมแบบ โกลบอลลีนีเยอร์ไรซิ่งทำงานมีประสิทธิภาพและความทนทานมากขึ้นกว่าเดิม

### 3.4 บทสรุป

สำหรับในงานวิจัยนี้มีเป้าหมาย คือประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบ โกลบอลลีนีเยอร์ไรซิ่ง และทฤษฎีของคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยายดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบ โกลบอลลีนีเยอร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการควบคุมพิเศษของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ที่สามารถรับประกันสมรรถนะและความทนทานของการควบคุม โดยในงานวิจัยได้พิจารณาถึงปัญหาการควบคุมในด้านต่างๆ เป็นต้นว่า สมรรถนะของการควบคุม, การกำจัดค่าตัวแปรรบกวนระบบ และการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุมหรือกระบวนการที่ทำการควบคุม เป็นต้น

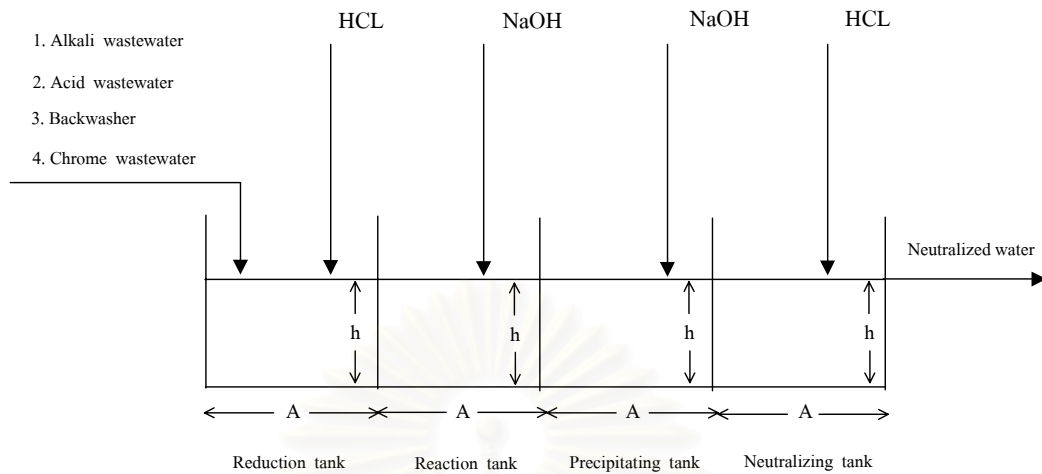
## บทที่ 4

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ และการประยุกต์ใช้ การควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

บทนี้กล่าวถึงกระบวนการที่ใช้ในการจำลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า รวมทั้งการนำการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับการประมาณค่าสแตตและพารามิเตอร์ในรูปแบบคาลมานฟิลเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการ

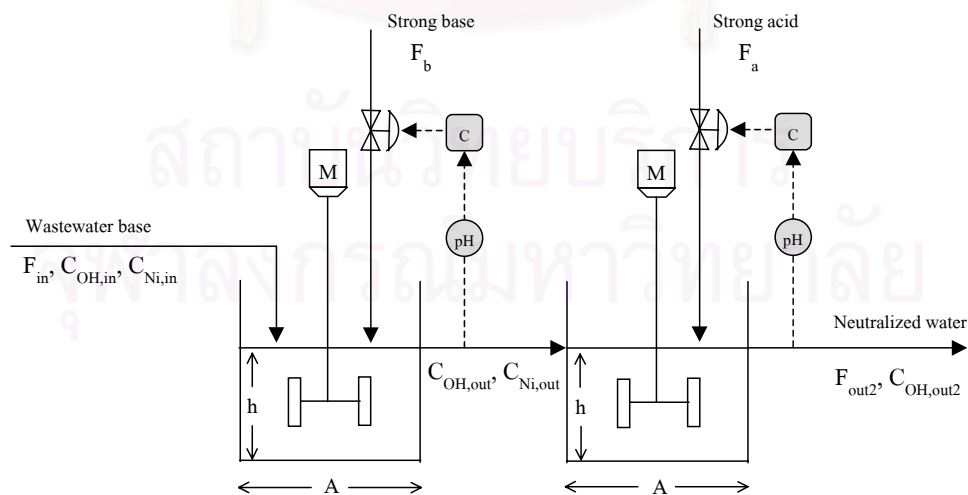
#### 4.1 กระบวนการที่ใช้ในการจำลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับกระบวนการที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งผู้วิจัยได้ไปทำการเก็บข้อมูลจากโรงงาน เพื่อมาทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ โดยกระบวนการที่ทำการศึกษาแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.1 น้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะทั้งหมดจะไหลเข้าสู่ถังแรก ประกอบไปด้วย น้ำเสียที่มีสภาพเป็นด่าง (Alkali wastewater) น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด (Acid wastewater) น้ำเสียที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดสอะอาดเครื่องมือ (Backwasher) และน้ำเสียที่เกิดจากการล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา เช่น การชุบโครเมียม (Chrome wastewater) ในน้ำเสียจากกระบวนการจะมีไอออนของโลหะหนักต่างๆ คือ โครเมียม เฮ็กซะวาเลนต์ อะลูมิเนียม และนิกเกิล ซึ่งทางโรงงานได้ใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยการปรับสภาพความเป็นกรดด่าง เพื่อให้ไอออนของโลหะหนักเกิดการตกตะกอน (เหมาะที่จะกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทางเคมีเพื่อให้เกิดการตกตะกอน) โดยในสองถังแรกจะเป็นการกำจัดโครเมียม ซึ่งโครเมียมเฮ็กซะวาเลนต์จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นโครเมียมไตรวาเลนต์ในถังแรก (ใช้กรดไฮโดรคลอริกปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 2) ก่อนที่จะทำการตกตะกอนในถังที่สอง (ใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 9) ในถังที่สามเป็นถังตกตะกอนนิกเกิล (ใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 11) และถึงที่สุดท้ายเป็นถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง (ใช้กรดไฮโดรคลอริกสะเทินให้เป็นกลาง) ส่วนอะลูมิเนียมไอออนที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานแล้วจึงไม่ต้องทำการบำบัด



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ในงานวิจัยได้ทำการจำลองการควบคุมในส่วนสุดท้ายของกระบวนการ คือ ทำการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เหตุผลในการเลือกกระบวนการนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูง (highly nonlinear) ทำให้การควบคุมทำได้ยาก (ส่งผลให้มีการใช้สารเคมีในการควบคุมพีเอชเกินความจำเป็น ทำให้โลหะหนักไม่สามารถตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์) และยังมีตัวแปรสแตกและพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดค่าได้หรือมีค่าไม่แน่นอน เช่น ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล จึงเหมาะแก่การทดสอบการควบคุมแบบโกลบอลลิสทีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับการประมาณค่าสแตกและพารามิเตอร์ในรูปแบบของคาลมานฟิลเตอร์ กระบวนการดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



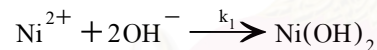
รูปที่ 4.2 ถังตกตะกอนโลหะนิเกิล (ซ้าย) และถังปรับสภาพน้ำให้เป็นกลาง (ขวา)

โดยน้ำเสียเข้า  $F_{in}$  มีค่าพีเอชประมาณ 9 หรือความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไอออน  $C_{OH,in}$  ประมาณ  $10^{-5}$  โมลต่อลิตร และมีความเข้มข้นของนิเกิลไอออน  $C_{Ni,in}$  ประมาณ  $8.5179 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร โดยทำการปรับอัตราการไหลของด่างโซดาไฟ  $F_b$  เพื่อควบคุมให้มีค่าพีเอชประมาณ 11 หรือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน  $C_{OH,out}$  ประมาณ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตร และเพื่อให้มีนิเกิลไอออนเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งน้ำเสียออกจากถังตกตะกอนโลหะนิเกิลมีค่าพีเอชประมาณ 11 และมีปริมาณโลหะหนักนิเกิล  $C_{Ni,out}$  ไม่เกิน  $1.7036 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร ตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด น้ำเสียออกของถังตกตะกอนนิเกิลไหลล้นเข้าสู่ถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางโดยทำการปรับอัตราการไหลของกรดไฮโดรคลอริก  $F_a$  เพื่อควบคุมให้มีค่าพีเอชเป็นกลางหรือมีค่าพีเอช 7 ก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม

สมมติฐานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

- กระบวนการเป็นถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR)
- มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์แบบภายในถัง (perfectly mixed)
- ความหนาแน่นของสารในระบบคงที่
- อุณหภูมิของระบบมีค่าคงที่
- ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

คือ ปฏิกิริยาการตกตะกอนของนิเกิลที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนนิเกิล



ดังนั้นสามารถหาแบบจำลองของกระบวนการจากสมการดุลมวลสารได้ดังนี้

ก. สมการดุลมวลรวมของสารภายในถังตกตะกอนนิเกิล (total mass balance)

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho F_{in} - \rho F_{out} + \rho F_b \quad (4.1)$$

ข. สมการดุลมวลรวมของสารภายในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง (total mass balance)

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho F_{out} - \rho F_{out2} + \rho F_a \quad (4.2)$$

ค. สมการดุลมวลขององค์ประกอบไฮดรอกไซด์ไอออน  $OH^-$  ในถังตกตะกอนนิเกิล

(component  $OH^-$  mass balance)

$$\rho \frac{dVC_{OH,out}}{dt} = \rho F_{in} C_{OH,in} - \rho F_{out} C_{OH,out} + \rho F_b C_{OH,b} - \rho V N_2 r_{OH} \quad (4.3)$$

- ง. สมการดุลมวลขององค์ประกอบไฮดรอกไซด์ไอออน  $\text{OH}^-$  ในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง  
(component  $\text{OH}^-$  mass balance)

$$\rho \frac{dV C_{\text{OH},\text{out}2}}{dt} = \rho F_{\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}} - \rho F_{\text{out}2} C_{\text{OH},\text{out}2} - \rho F_a C_{\text{H},a} \quad (4.4)$$

- จ. สมการดุลมวลขององค์ประกอบนิเกิลไอออน  $\text{Ni}^{2+}$  ในถังตกตะกอนนิเกิล  
(component  $\text{Ni}^{2+}$  mass balance)

$$\rho \frac{dV C_{\text{Ni},\text{out}}}{dt} = \rho F_{\text{in}} C_{\text{Ni},\text{in}} - \rho F_{\text{out}} C_{\text{Ni},\text{out}} - \rho V N_1 r_{\text{Ni}} \quad (4.5)$$

โดยที่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบไฮดรอกไซด์ไอออน  $\text{OH}^-$  ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร  
ในถังตกตะกอนนิเกิล คือ  $r_{\text{OH}} = k_1 C_{\text{Ni},\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}}^2$  (4.6)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบนิเกิลไอออน  $\text{Ni}^{2+}$  ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร  
ในถังตกตะกอนนิเกิล คือ  $r_{\text{Ni}} = k_1 C_{\text{Ni},\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}}^2$  (4.7)

แทนค่าสมการที่ (4.1) และ (4.6) ในสมการที่ (4.3) ดังนั้นสมการที่ (4.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dC_{\text{OH},\text{out}}}{dt} = \frac{1}{V} \left( F_{\text{in}} (C_{\text{OH},\text{in}} - C_{\text{OH},\text{out}}) + F_b (C_{\text{OH},b} - C_{\text{OH},\text{out}}) \right) - N_2 k_1 C_{\text{Ni},\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}}^2 \quad (4.8)$$

ทำนองเดียวกันแทนค่าสมการที่ (4.1) และ (4.2) ในสมการที่ (4.4) ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dC_{\text{OH},\text{out}2}}{dt} = \frac{1}{V} \left( F_{\text{in}} (C_{\text{OH},\text{out}} - C_{\text{OH},\text{out}2}) + F_b (C_{\text{OH},\text{out}} - C_{\text{OH},\text{out}2}) - F_a (C_{\text{OH},\text{out}2} + C_{\text{H},a}) \right) \quad (4.9)$$

แทนค่าสมการที่ (4.1) และ (4.7) ในสมการที่ (4.5) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dC_{\text{Ni},\text{out}}}{dt} = \frac{1}{V} \left( F_{\text{in}} (C_{\text{Ni},\text{in}} - C_{\text{Ni},\text{out}}) - F_b C_{\text{Ni},\text{out}} \right) - N_1 k_1 C_{\text{Ni},\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}}^2 \quad (4.10)$$

ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองของกระบวนการนี้ได้ตั้งสมการที่ (4.8), (4.9) และ (4.10) ตามลำดับ

โดยค่าพีเอชมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน คือ

$$\text{pH} = -\log_{10} C_{\text{H}^+} \quad (4.11)$$

เมื่อ ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำ  $K_w$  มีค่าเป็น  $10^{-14}$  โมลต่อลิตร ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

$$C_{\text{H}^+} C_{\text{OH}^-} = K_w \quad (4.12)$$

แทนค่าสมการที่ (4.12) ในสมการที่ (4.11) เขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ได้เป็น  $\text{pH} = 14 + \log_{10} C_{\text{OH}^-}$  (4.13)

ในที่นี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการมี

ตัวแปรควบคุม (Controlled variables) คือ  $pH, pH_2, C_{Ni,out}$

ตัวแปรปรับ (Manipulated variables) คือ  $F_b, F_a$

ตัวแปรรบกวน (Disturbanced variables) คือ  $F_{in}, C_{OH,in}, C_{Ni,in}$

พารามิเตอร์ (Parameters) คือ  $k_1, V$

จะเห็นได้ว่ากระบวนการนี้มีลักษณะเป็นกระบวนการที่มีอินพุตหลายตัวเอาต์พุตหลายตัว คือมีตัวแปรปรับหลายตัวและตัวแปรควบคุมหลายตัว

โดยที่สภาวะในการปฏิบัติการของระบบแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สภาวะการปฏิบัติการของระบบที่สภาวะคงที่ สำหรับควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าตัวแปร	หน่วย
V	ปริมาตรของถัง (CSTR)	2,000	liter
$k_1$	ค่าคงที่อัตราการผลิตปฏิกิริยา	$1.8 \times 10^6$	(min) <sup>-1</sup> .(mol/liter) <sup>-2</sup>
$N_1, N_2$	ค่าคงที่สมดุล	2, 1	-
$C_{OH,b}$	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในเบส	$2 \times 10^{-1}$	mol/liter
$C_{H,a}$	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในกรด	$2 \times 10^{-1}$	mol/liter
$C_{OH,in}$	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียก่อนเข้าถัง	$1 \times 10^{-5}$	mol/liter
$C_{Ni,in}$	ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียก่อนเข้าถัง	$8.52 \times 10^{-5}$	mol/liter
$C_{OH,out}$	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล	$1 \times 10^{-3}$	mol/liter
$C_{OH,out2}$	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง	$10^{-7}$	mol/liter
$C_{Ni,out}$	ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนิเกิล	$1.038 \times 10^{-5}$	mol/liter



ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าตัวแปร	หน่วย
$F_b$	อัตราการไหลเข้าถังของเบส	5.16	liter/min
$F_a$	อัตราการไหลเข้าถังของกรด	5.03	liter/min
$F_{in}$	อัตราการไหลเข้าถังของน้ำเสีย	1,000	liter/min
$F_{out2}$	อัตราการไหลออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางของน้ำเสีย	1,010.19	liter/min
pH	พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนนี้เกิด	11	-
pH <sub>2</sub>	พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง	7	-

#### 4.2 การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยัดขยาย

ในส่วนนี้กล่าวถึงการนำทฤษฎีการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่ง และทฤษฎีคาลมานฟิลเตอร์จากบทที่ 3 มาประยุกต์ร่วมกัน ในการควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสียของงานวิจัย

ขั้นตอนการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่ง มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. จัดสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปสมการ (3.2) และ (3.3)
2. ตรวจสอบความควบคุมได้ ความสังเกตได้ เสถียรภาพของระบบ แสดงในภาคผนวก ฉ
3. ใช้วิธีอินพุทเอาต์พุทเนียร์โรซึ่งขึ้นกับกฎการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อหาสมการตัวแปรปรับ
4. เลือกค่าพารามิเตอร์ปรับจูน  $\beta_{jk}$  ที่ต้องการ ซึ่งส่งผลให้โพลของลูบปิดมีเสถียรภาพ
5. หาค่าเกน  $K_{C_j}$  และค่าคงที่เวลาอินทิกรัล  $\tau_{I_j}$  ของตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอกพีไอ เพื่อคำนวณตัวแปรปรับที่เหมาะสม

ดังนั้น จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียดังสมการ (4.8), (4.9) และ (4.10) ทำการจัดรูปสมการของแบบจำลองให้อยู่ในรูป (3.2) และ (3.3) ได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g_1(x)F_b + g_2(x)F_a \quad (4.14)$$

$$y_1 = C_{OH,out}, \quad y_2 = C_{OH,out2} \quad (4.15)$$

$$\text{เมื่อ } x = [C_{\text{OH},\text{out}} \quad C_{\text{OH},\text{out}2} \quad C_{\text{Ni},\text{out}}]^T$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} F_{\text{in}}(C_{\text{OH},\text{in}} - C_{\text{OH},\text{out}})/V - N_2 k_1 C_{\text{Ni},\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}}^2 \\ F_{\text{in}}(C_{\text{OH},\text{out}} - C_{\text{OH},\text{out}2})/V \\ F_{\text{in}}(C_{\text{Ni},\text{in}} - C_{\text{Ni},\text{out}})/V - N_1 k_1 C_{\text{Ni},\text{out}} C_{\text{OH},\text{out}}^2 \end{bmatrix}$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} (C_{\text{OH},b} - C_{\text{OH},\text{out}})/V \\ (C_{\text{OH},\text{out}} - C_{\text{OH},\text{out}2})/V \\ -C_{\text{Ni},\text{out}}/V \end{bmatrix}, \quad g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -(C_{\text{OH},\text{out}2} + C_{\text{H},a})/V \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$h_1(x) = C_{\text{OH},\text{out}}, \quad h_2(x) = C_{\text{OH},\text{out}2}$$

โดย ตัวแปรควบคุม  $x$  คือ  $C_{\text{OH},\text{out}}, C_{\text{OH},\text{out}2}, C_{\text{Ni},\text{out}}$   
 ตัวแปรปรับ  $u$  คือ  $F_b, F_a$   
 ตัวแปรเอาต์พุตที่วัดค่าได้  $y$  คือ  $C_{\text{OH},\text{out}}, C_{\text{OH},\text{out}2}$

จากสมการ (4.14) และ (4.15) จะเห็นได้ว่า มีจำนวนของตัวแปรควบคุม  $n = 3$  ตัว และจำนวนตัวแปรปรับกับตัวแปรเอาต์พุต  $m = 2$  ตัว

หลังจากนั้น ใช้วิธีอินพุตเอาต์พุตลิเนียร์ไรเซชัน ในการหาสมการตัวแปรปรับ ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบ ดีกรีความสัมพันธ์  $r_j$  ก่อน ตามสมการ (3.6)

$$L_{g_1} h_1(x) \neq 0, \quad L_{g_2} h_1(x) \neq 0$$

$$L_{g_1} h_2(x) \neq 0, \quad L_{g_2} h_2(x) \neq 0$$

ดังนั้น เอาต์พุตของกระบวนการทั้งสองตัว มีดีกรีความสัมพันธ์เป็น  $r_1 = 1$  และ  $r_2 = 1$  ตามลำดับ โดยเมตริกซ์ลักษณะ  $E(x)$  จะต้องเป็นเมตริกซ์ไม่เอกพันธ์

$$E(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} h_1(x) & L_{g_2} h_1(x) \\ L_{g_1} h_2(x) & L_{g_2} h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{\text{OH},b} - C_{\text{OH},\text{out}})/V & 0 \\ (C_{\text{OH},\text{out}} - C_{\text{OH},\text{out}2})/V & -(C_{\text{OH},\text{out}2} + C_{\text{H},a})/V \end{bmatrix}$$

ดังนั้น ตามสมการ (3.9) จะหาสมการตัวแปรปรับได้จากกฎการป้อนกลับสเตต

$$\begin{bmatrix} F_b \\ F_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11} L_{g_1} h_1(x) & \beta_{11} L_{g_2} h_1(x) \\ \beta_{21} L_{g_1} h_2(x) & \beta_{21} L_{g_2} h_2(x) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \beta_{10} h_1(x) + \beta_{11} L_f h_1(x) \\ \beta_{20} h_2(x) + \beta_{21} L_f h_2(x) \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } L_f h_1(x) &= F_{in} (C_{OH,in} - C_{OH,out}) / V - N_2 k_1 C_{Ni,out} C_{OH,out}^2 \\ L_f h_2(x) &= F_{in} (C_{OH,out} - C_{OH,out2}) / V \end{aligned}$$

$$F_b = \left( v / \beta_{11} (C_{OH,b} - C_{OH,out}) \right) \cdot \left( v_1 - \beta_{10} C_{OH,out} - \beta_{11} (F_{in} (C_{OH,in} - C_{OH,out}) / V - N_2 k_1 C_{Ni,out} C_{OH,out}^2) \right) \quad (4.16)$$

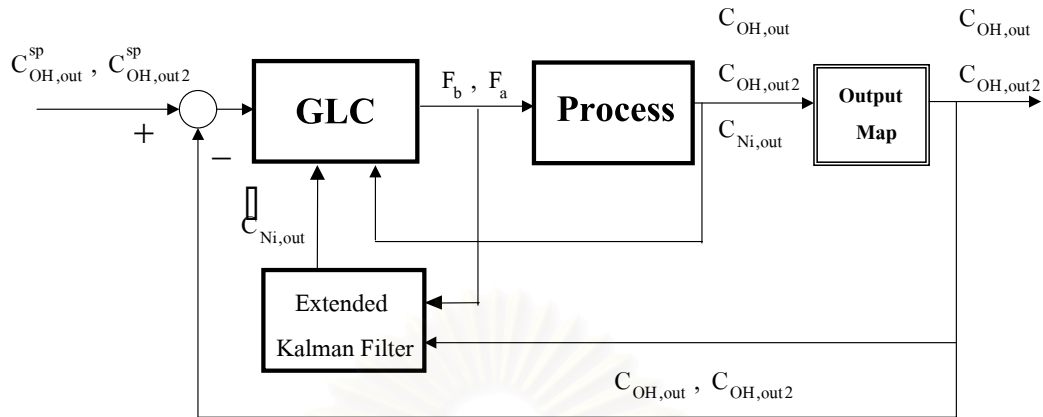
$$F_a = \left( v / \beta_{21} (C_{H,a} + C_{OH,out2}) \right) \cdot \left( (\beta_{21} (C_{OH,out} - C_{OH,out2}) F_b / V) - v_2 + \beta_{20} C_{OH,out2} + \beta_{21} (F_{in} (C_{OH,out} - C_{OH,out2}) / V) \right) \quad (4.17)$$

โดยที่

$$v_1 = \beta_{10} C_{OH,outsp}(t) + K_{C_1} [C_{OH,outsp}(t) - C_{OH,out}(t)] + \frac{K_{C_1}}{\tau_{I_1}} \int_0^t [C_{OH,outsp}(t) - C_{OH,out}(t)] dt \quad (4.18)$$

$$v_2 = \beta_{20} C_{OH,out2sp}(t) + K_{C_2} [C_{OH,out2sp}(t) - C_{OH,out2}(t)] + \frac{K_{C_2}}{\tau_{I_2}} \int_0^t [C_{OH,out2sp}(t) - C_{OH,out2}(t)] dt \quad (4.19)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ มีตัวแปรสเตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้ คือ  $C_{Ni,out}$  จึงได้นำเอาเทคนิคการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย เพื่อประมาณค่า  $C_{Ni,out}$  ผลการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สำหรับควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสียแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย

ในรูปจะเห็นได้ว่าตัวประมาณค่าสเทและพารามิเตอร์แบบคาลมานฟิลเตอร์จะอาศัยค่าตัวแปรปรับ  $F_b$ ,  $F_a$  และเอาท์พุทของกระบวนการที่วัดได้  $C_{OH,out}$ ,  $C_{OH,out2}$  เป็นฐานในการคำนวณค่าความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลที่ไม่สามารถวัดค่าได้  $C_{Ni,out}$  ซึ่งค่าที่ได้จากการประมาณ  $\hat{C}_{Ni,out}$  จะส่งเข้าตัวควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์โรซึ่ง ในขณะเดียวกันกับค่า  $C_{OH,out}$  และ  $C_{OH,out2}$  ที่วัดได้ จะป้อนให้กับตัวควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์โรซึ่ง เพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับ  $F_b$  และ  $F_a$  ที่เหมาะสม เพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมทั้ง  $C_{OH,out}$ ,  $C_{OH,out2}$  และ  $C_{Ni,out}$  ให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ

### 4.3 บทสรุป

ในการออกแบบการควบคุมจำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองของกระบวนการที่ต้องการทำการควบคุม เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการแบบจำลองที่เขียนขึ้นได้จากการคลุมวลสารรอบๆ กระบวนการที่สนใจ เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแล้ว ต้องทำการจัดรูปแบบของสมการให้เหมาะสมเพื่อหาสมการของตัวควบคุม หลังจากนั้นเมื่อได้สมการของตัวควบคุม ก็สามารถนำไปทำการจำลองการควบคุมกระบวนการที่ต้องการควบคุม บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

## บทที่ 5

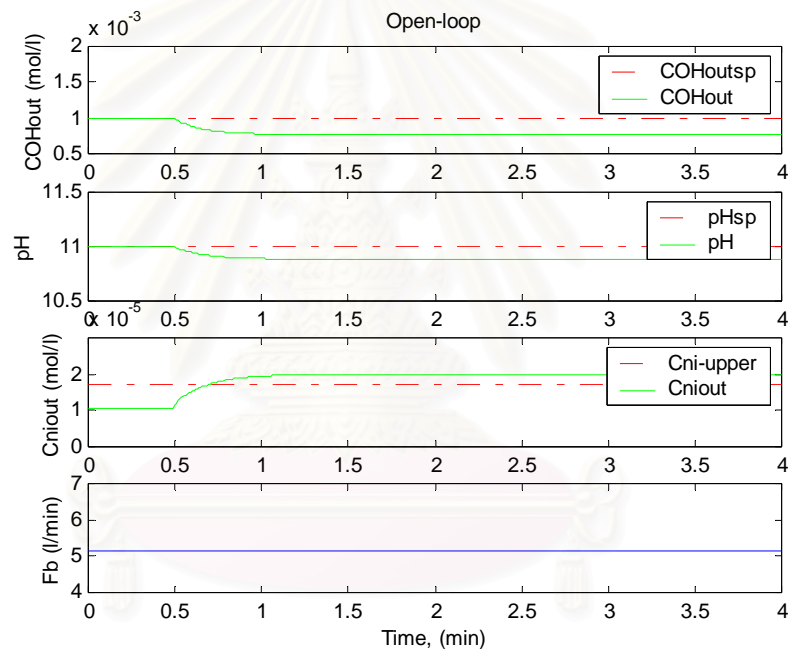
### การจำลอง, ผลการจำลอง และ การวิเคราะห์ผลการควบคุม

บทนี้กล่าวถึง การนำสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่หาได้จากบทที่ 4 และข้อมูลสถานะการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงที่จากตารางที่ 4.1 มาทำการจำลองการควบคุม โดยใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แมทแล็บ เพื่อควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง จากนั้นทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการ ทั้งกรณีที่มีการควบคุมและไม่มีการควบคุม โดยในกรณีที่มีการควบคุมได้ทำการทดสอบสมรรถนะของการควบคุมในกรณีการควบคุมที่สถานะคงที่, กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ และกรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด และทำการทดสอบความทนทานของการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองของตัวควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการ เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี

#### 5.1 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มีการควบคุม (Open-loop Response)

กระบวนการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางได้แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแบบจำลองไดนามิกของกระบวนการอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์ 3 สมการ คือสมการที่ (4.8), (4.9) และ (4.10) ในการจำลองกระบวนการอาศัยการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบโดยวิธีเชิงตัวเลข โดยเริ่มต้นที่สถานะการปฏิบัติการของระบบที่สถานะคงที่แสดงดังตารางที่ 4.1 คือ พีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล,  $\text{pH} = 11$  พีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง,  $\text{pH}_2 = 7$  และความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล,  $C_{\text{Ni,out}} = 1.038 \times 10^{-5}$  โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรกระบวนการแบบสแต็ป เพื่อศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการ ในที่นี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลเข้าถังของน้ำเสีย,  $F_{\text{in}}$  ค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียก่อนเข้าถัง,  $C_{\text{OH,in}}$  และค่าความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียก่อนเข้าถัง,  $C_{\text{Ni,in}}$  เพิ่มขึ้น 30% และ ลดลง 30% ตามลำดับ ซึ่งการกำหนดให้ตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลง 30% เป็นค่าการรบกวนมากที่สุดที่อาจเกิดขึ้นจริงในโรงงาน

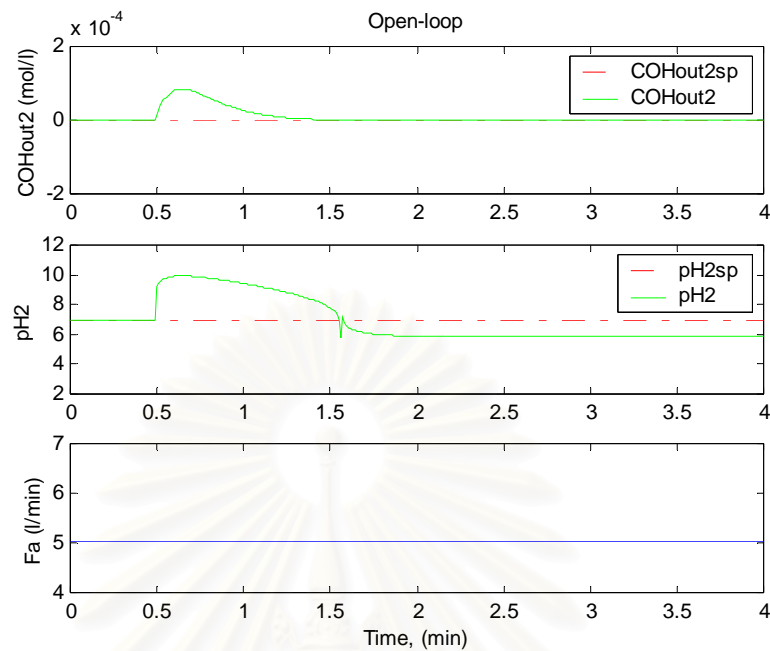
โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแบบสแต็ปที่เวลา 0.5 นาที ส่วนค่าตัวแปรและพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ที่สภาวะการปฏิบัติการดังตารางที่ 4.1 ทำการคำนวณค่าการตอบสนองของกระบวนการเมื่อไม่มีการควบคุมใดๆ สำหรับตัวแปรควบคุมคือ พีเอช, pH และความเข้มข้นของนิเกิล,  $C_{Ni,out}$  ของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล, และพีเอช,  $pH_2$  ของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ในทุกๆ 0.01 นาทีเป็นเวลา 4 นาที จะได้กราฟการตอบสนองของกระบวนการรวมไว้ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.12 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.1 พบว่า กรณีค่าอัตราการไหลเข้าถังของน้ำเสีย  $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30% จะส่งผลต่อระบบรุนแรงสุด เนื่องจากเป็นกรณีเดียวที่ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสีย  $C_{Ni,out}$  เพิ่มขึ้นจนเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้



รูปที่ 5.1 ผลการตอบสนองของค่าพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30%) ในกรณีที่ไม่มี การควบคุม

จากกราฟรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ  $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30% จะส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป คือ ค่าพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลลดลงจากสภาวะคงที่ (ลดลงจากค่าพีเอช 11) เนื่องจากน้ำที่ไหลเข้าถังตกตะกอนนิเกิลเพิ่มขึ้นมีพีเอชเท่ากับ 9 ทำให้โลหะหนักนิเกิลตกตะกอนได้น้อยลง ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียจึงเพิ่มมากขึ้นเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (เกินค่า  $1.7036 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร)





รูปที่ 5.2 ผลการตอบสนองของค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30%) ในกรณีที่ไม่มีการควบคุม

และจากกราฟรูปที่ 5.2 พบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางจะมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 7 ในช่วงแรก ตามค่าพีเอชขาเข้าถึงตกตะกอนนิเกิลซึ่งมีพีเอชเท่ากับ 9 หลังจากนั้นค่าพีเอชจะลดลงตามค่าพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลซึ่งมีค่าพีเอชต่ำกว่า 11 โดยจะลดลงเข้าสู่ค่าพีเอชค่าใหม่ที่ต่ำกว่าพีเอช 7 จะเห็นได้ว่า ผลการตอบสนองของกระบวนการทั้งค่าพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง จะเข้าสู่สภาวะคงที่ใหม่ที่แตกต่างจากเดิม

## 5.2 การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่มีการควบคุม (Closed-loop Response)

การจำลองการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยาย ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้น วัตถุประสงค์ในการควบคุมนี้ คือ เพื่อควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล, pH ให้อยู่ที่พีเอชเท่ากับ 11 และควบคุมความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล,  $C_{Ni,out}$  ไม่เกิน  $1.7036 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร ซึ่งการควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ที่พีเอชเท่ากับ 11 จะส่งผลทำให้ปริมาณโลหะหนักนิเกิลเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่ค่าพีเอชนี้ และปริมาณโลหะที่เหลืออยู่ไม่เกินที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ และเพื่อควบคุม

พีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง,  $\text{pH}_2$  ให้อยู่ที่พีเอชเท่า 7 ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยการปรับอัตราการไหลของด่างโซดาไฟ,  $F_b$  และปรับอัตราการไหลของกรดไฮโดรคลอริก,  $F_a$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวแปรปรับที่ได้ทำการตรวจสอบแล้วว่าการปรับค่าตัวแปรปรับนี้สามารถทำให้ระบบสามารถควบคุมได้ (controllability) ซึ่งตัวแปรปรับสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง  $0 \leq F_b \leq 100 \text{ liter/min}$  และ  $0 \leq F_a \leq 100 \text{ liter/min}$

จากการที่กระบวนการที่ทำการควบคุมนี้เป็นกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นการจำลองกระบวนการจะใช้วิธีเชิงตัวเลขโดยใช้สถานะในการปฏิบัติการเริ่มต้นของระบบแสดงดังตารางที่ 4.1 กำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดค่าไว้ ยกเว้นอัตราไหลของด่าง,  $F_b$  และอัตราการไหลของกรด,  $F_a$  โดยใช้ช่วงเวลาร่วม  $dt = 0.1$  นาที สำหรับตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งใช้แบบจำลองของตัวควบคุมอยู่ในรูปสมการสมการ (4.16) และ (4.17) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับการประมาณค่าเสถียรและพารามิเตอร์ซึ่งใช้อัลกอริทึมของคาลมานฟิลเตอร์แบบยี่ดขยาย ดังแสดงรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 และ 4.2 และใช้ช่วงเวลาร่วม  $dt = 0.1$  นาทีเช่นเดียวกัน สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดีใช้สมการในรูปเวโลซิตี (velocity form) โดยใช้ช่วงเวลาร่วม  $dt = 0.1$  นาทีเช่นเดียวกัน

พิจารณาผลการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ และการควบคุมแบบพีไอดี ดังนี้

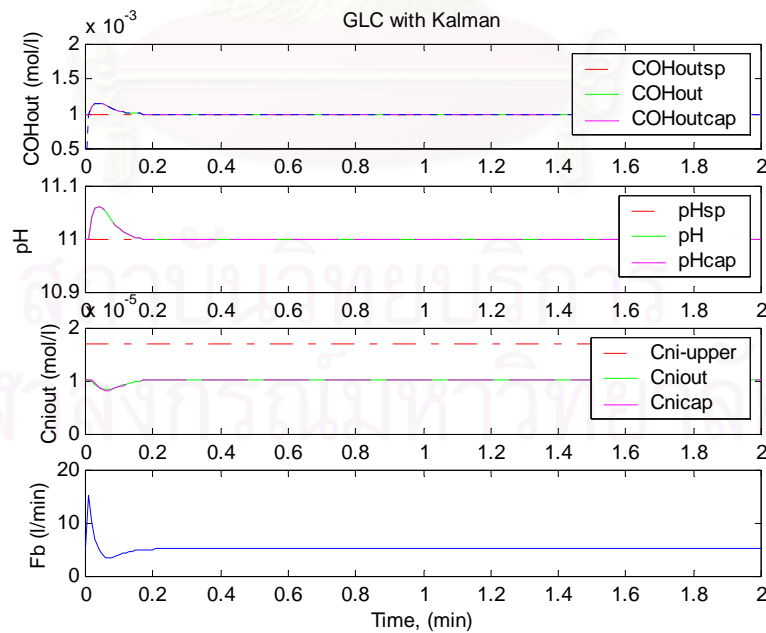
### 5.2.1 ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี

ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าแบบคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี โดยทำการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม ในการจำลองได้กำหนดให้มีกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

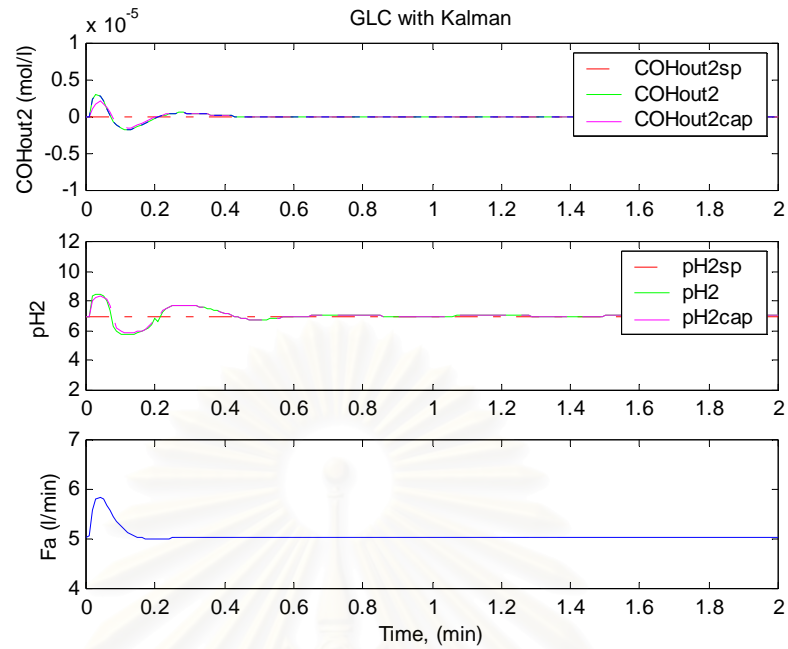
#### 1. การควบคุมในกรณีที่สถานะคงที่

พิจารณาผลการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มเท่ากับ 0.1 นาที และแบบจำลองของกระบวนการอยู่ในรูปดิสครีต ใช้ช่วงเวลาในการสุ่มเท่ากับ 0.01 นาที โดยทำการควบคุมที่สถานะคงที่ตามสถานะปฏิบัติการของระบบดังตารางที่ 4.1 โดยเริ่มทำการควบคุมตั้งแต่เวลา,  $t$  ที่ 0.01 นาทีจนถึงเวลาที่ 2 นาที พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการในช่วงเวลา 2 นาที เปรียบเทียบผลการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมาน

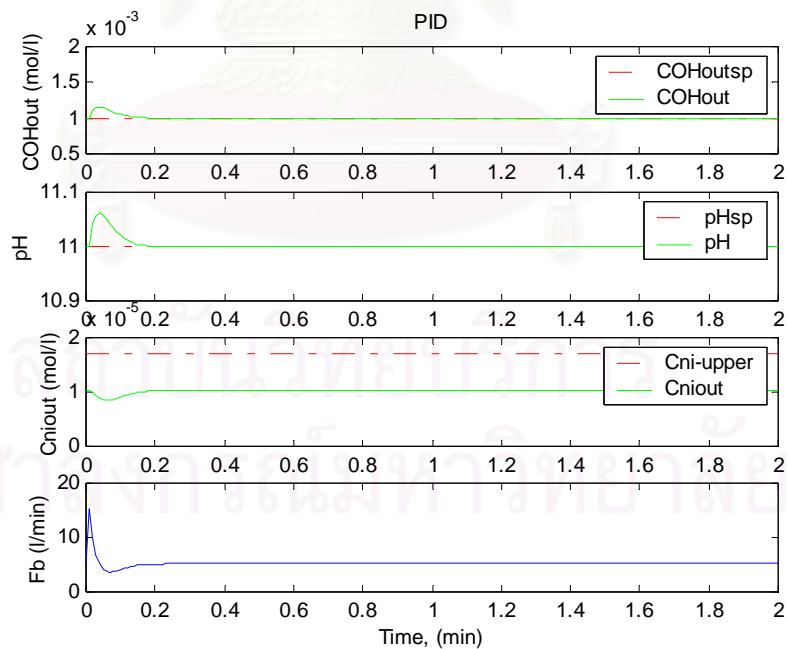
ฟิลเตอร์ที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ปรับจูนในตารางที่ 5.1 แสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 กับการควบคุมแบบพีไอดีที่อาศัยค่าพารามิเตอร์การปรับจูนในตารางที่ 5.2 แสดงดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ในรูป  $C_{\text{OHoutsp}}, C_{\text{OHout2sp}}$  เป็นค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ  $\text{pH}_{\text{sp}}, \text{pH}_{2\text{sp}}$  เป็นค่าพีเอชที่ต้องการ คือ 11 และ 7 ตามลำดับ  $C_{\text{ni-upper}}$  เป็นค่าความเข้มข้นของนิเกิลมาตรฐานของโรงงานที่กำหนดไว้ห้ามเกิน  $1.7036 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร (1 พีพีเอ็ม) และค่า  $C_{\text{OHoutcap}}, C_{\text{OHout2cap}}, \text{pH}_{\text{cap}}, \text{pH}_{2\text{cap}}, C_{\text{nicap}}$  เป็นค่าประมาณที่ได้จากคาลมานฟิลเตอร์ จากกราฟแสดงผลการควบคุม พบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบพีไอดีจะสามารถควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่เซตพอยท์ที่ต้องการได้ โดยในรูปที่ 5.3 และ 5.5 สามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซตพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนด และในรูปที่ 5.4 และ 5.6 สามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางให้เข้าสู่ค่าเซตพอยท์ที่ต้องการได้ และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE) พบว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ให้ค่า IAE (4.445e-2 และ 3.368) โกลด์์เคียงกับการควบคุมแบบพีไอดี (4.449-2 และ 3.371) ทั้งการตอบสนองของการควบคุมพีเอชในถังตกตะกอนนิเกิลและการควบคุมพีเอชในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการควบคุมได้พยายามปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมให้ได้ผลใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ก่อนทำการทดสอบการควบคุมในกรณีอื่นๆ ต่อไป



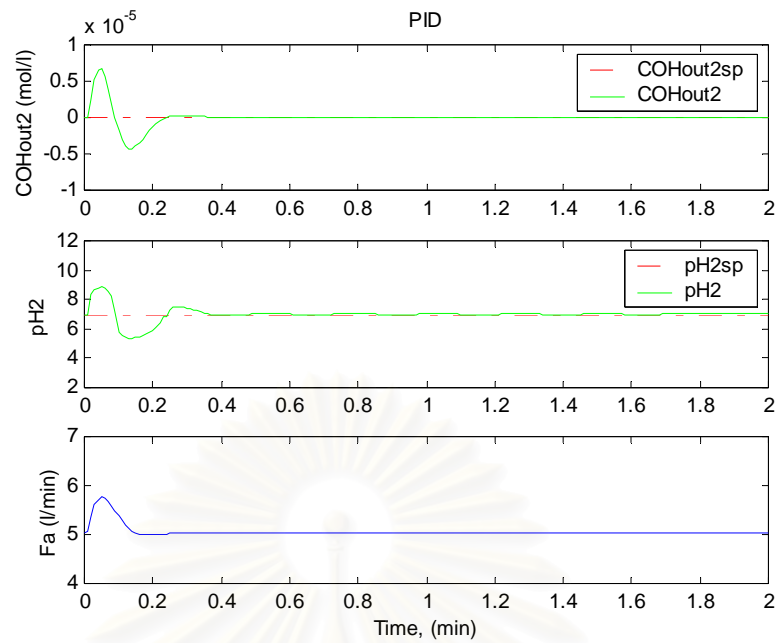
รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ โดยการควบคุมแบบโกลบอลลีสตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.5 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่โดยการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง กรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ โดยการควบคุมแบบพีไอดี

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนตัวควบคุมแบบ โกลบอลลีลิเนียร์ไรซิ่งร่วมกับกาลมาน ฟิลเตอร์ สำหรับควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

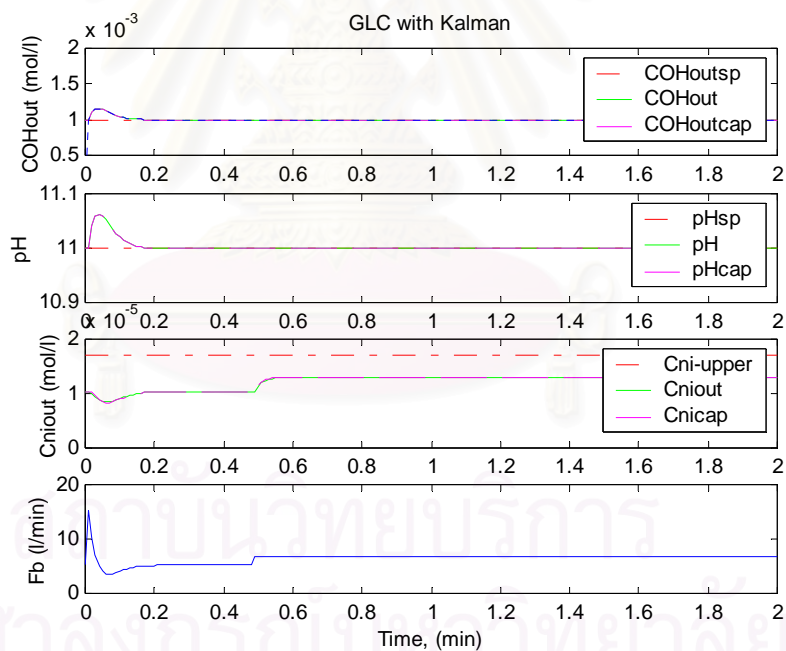
Controller Parameters		Estimator Parameters
$K_{C1} = 0.479$	$K_{C2} = -2$	$P = \text{diag}[0.1 \ 0.01 \ 0.01]$
$\tau_{11} = 0.505$	$\tau_{12} = 0.65$	$Q = \text{diag}[100 \ 10 \ 1]$
$\beta_{10} = 1$	$\beta_{11} = 1$	$R = \text{diag}[0.1 \ 0.01]$
$\beta_{20} = 1$	$\beta_{21} = 1$	

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนตัวควบคุมแบบพีไอดี สำหรับการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

PID Tuning Parameters		
$K_{C1} = 45000$	$\tau_{11} = 0.4728$	$\tau_D = 0.001$
$K_{C2} = 5.0900$	$\tau_{12} = 0.31$	$\tau_{D2} = 0.1$

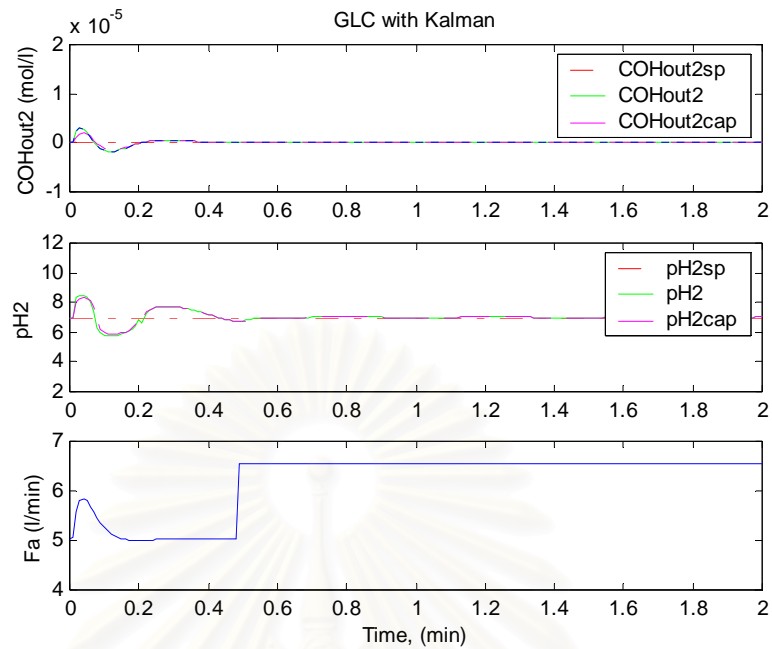
## 2. การควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบกวน

เพื่อทดสอบสมรรถนะของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ในกรณีที่มีตัวแปรบกวน ที่ส่งผลต่อการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ในกระบวนการโดยได้ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับกรณีที่สภาวะคงที่ คือใช้ช่วงเวลาในการสุ่มเท่ากับ 0.1 นาที และแบบจำลองของกระบวนการอยู่ในรูปแบบดีสครีต ใช้ช่วงเวลาในการสุ่มเท่ากับ 0.01 นาที ใช้สภาวะปฏิบัติการเริ่มต้นของระบบดังตารางที่ 4.1 โดยเริ่มทำการควบคุมตั้งแต่เวลา,  $t$  ที่ 0.01 นาที พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการในช่วงเวลา 2 นาที และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลขาเข้าถังของน้ำเสีย,  $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30% ของค่าที่สภาวะคงที่เป็นแบบสเค็บ ที่เวลา 0.5 นาที หลังจากทีระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ แล้วเปรียบเทียบผลกับการควบคุมแบบพีไอดี ที่สภาวะการปฏิบัติการเดียวกัน พิจารณาผลการควบคุมได้ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 , รูปที่ 5.9 และ 5.10

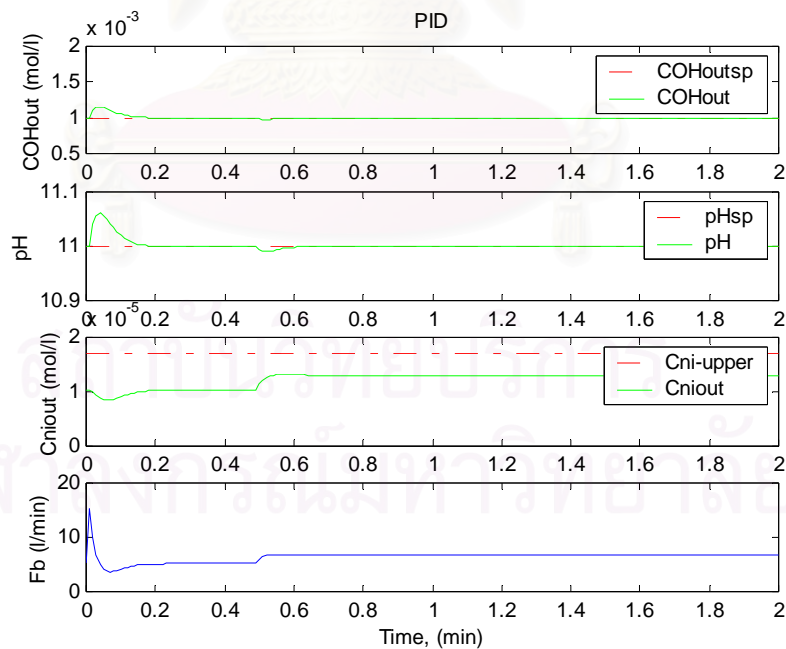


รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบกวน ( $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

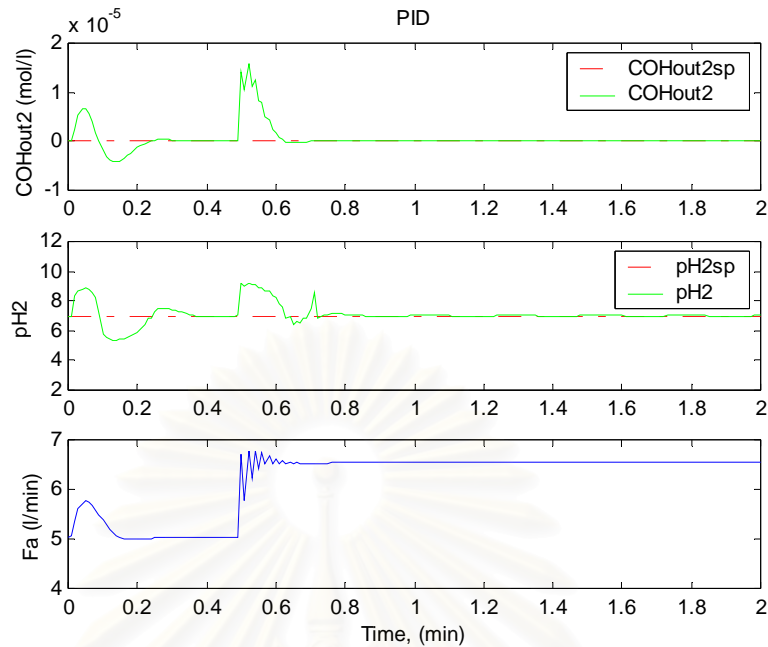




รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลีสตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ( $F_{in}$  เพิ่มขึ้น 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี

จากแสดงผลการควบคุมรูปที่ 5.7 และ 5.8 พบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่งร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์สามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนดได้ และสามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ รูปที่ 5.3 และ 5.4 ส่วนการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการช้ากว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่งร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์ แต่ก็ยังไม่ทำให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลเกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนด และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง พบว่าการควบคุมแบบพีไอดีให้ผลการตอบสนองของกระบวนการแกว่งและเข้าสู่ค่าที่ต้องการช้า และเมื่อพิจารณาผลการควบคุมจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด พบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่งร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์ให้ค่า IAE ( $4.467e-2$  และ  $3.367$ ) ใกล้เคียงกับค่า IAE ในกรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ ( $4.445e-2$  และ  $3.368$ ) และต่ำกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ( $5.5158e-2$  และ  $6.066$ ) ทั้งการตอบสนองของการควบคุมพีเอชในถังตกตะกอนนิเกิลและการควบคุมพีเอชในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อมีตัวแปรรบกวนเข้ามาในระบบการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์โรซึ่งร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ

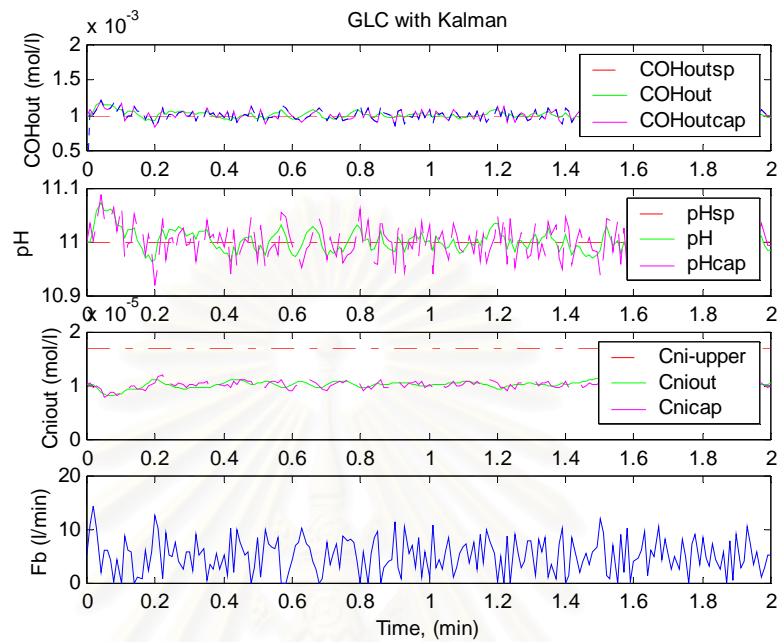
การ จะสามารถรวมเอาค่าตัวแปรรบกวนระบบไว้ในแบบจำลองของตัวควบคุม ส่งผลให้คำนวณค่าตัวแปรปรับได้เหมาะสม จึงสามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการได้ และยังมีกระบวนการควบคุมแบบเชิงเส้นภายนอกมาช่วยลดออฟเซต ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับชนิดหนึ่ง ที่อาศัยเพียงแค่การปรับจูนจากระบบการจริงเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ ดังนั้นจากผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์มีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

### 3. การควบคุมในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด

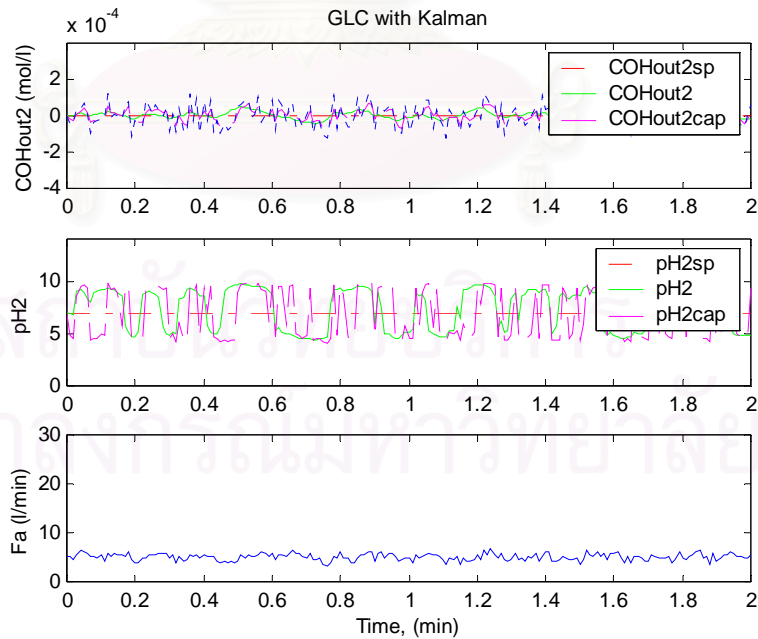
สำหรับในกระบวนการจริง หลีกเลียงไม่ได้ที่จะประสบปัญหาเกี่ยวกับค่าเอาต์พุตที่วัดได้จากเครื่องมือวัด มีความคลาดเคลื่อนหรือเบี่ยงเบนไปจากค่าความเป็นจริง เนื่องมาจากคุณลักษณะทางกายภาพขณะที่ใช้เครื่องมือวัด ณ เวลานั้น มีการสั่นหรือถูกรบกวน อาจเป็นระยะเวลาใดขณะหนึ่งหรือเกิดขึ้นตลอดเวลา หรือเกิดจากคุณสมบัติของเครื่องมือมีการเสื่อมประสิทธิภาพลง ในการจำลองได้ทำการพิจารณาเฉพาะสัญญาณรบกวนที่เกิดจากลักษณะภายนอก เพื่อทดสอบสมรรถนะของการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบพีไอดี จึงทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับในกรณีที่สภาวะคงที่ และกำหนดให้มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัดแบบเกาส์เซียน (gaussian noise) โดยมีค่าความแปรปรวน,  $\sigma_1^2 = 10^{-4}$  และ  $\sigma_2^2 = 10^{-4}$  พิจารณาผลการตอบสนองของกระบวนการในช่วงเวลา 2 นาที เมื่อทำการควบคุมด้วยการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14

จากกราฟรูปที่ 5.11 พบว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์จะสามารถประมาณค่าความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล  $C_{nicap}$  ที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลจากกระบวนการจริง  $C_{niout}$  และให้ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลแก่วงอยู่ในช่วงหนึ่ง น้อยกว่าผลจากการควบคุมที่ใช้การควบคุมแบบพีไอดี ในรูปที่ 5.13 ส่วนผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แสดงในรูปที่ 5.12 พบว่าค่าของตัวแปรปรับ  $F_u$  แก่วงน้อยกว่าผลจากการควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 5.14 และเมื่อพิจารณาค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด พบว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ให้ค่า IAE (2.725e-1 และ 40.28) ต่ำกว่าการควบคุมแบบพีไอดี (5.015e-1 และ 58.261) ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นกับตัวแปรเอาต์พุตในขณะที่ทำการวัด คาลมานฟิลเตอร์จะสามารถกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ค่าตัวแปรปรับและค่าการตอบสนองของ

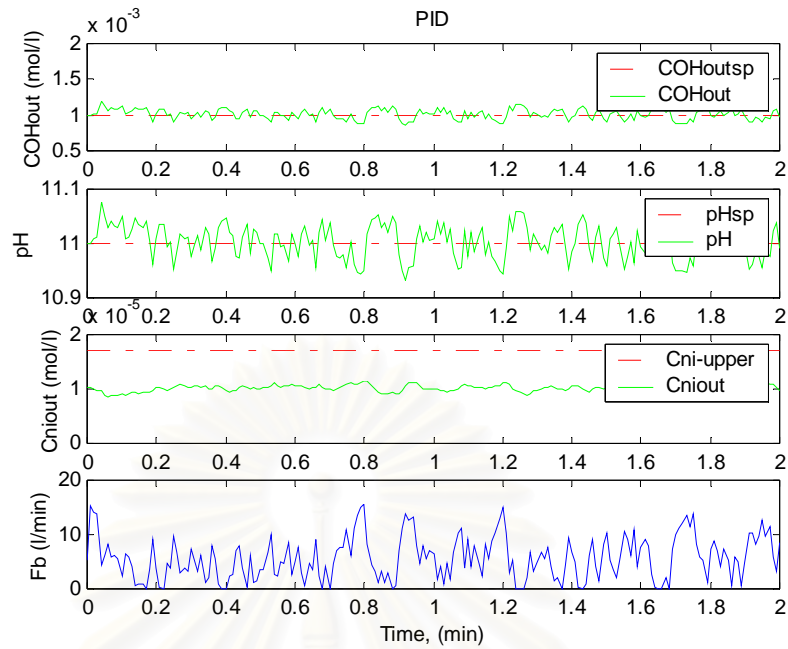
กระบวนการเกิดการแกว่งน้อยลง ส่งผลให้การควบคุมของโกลบอลลิตีเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น



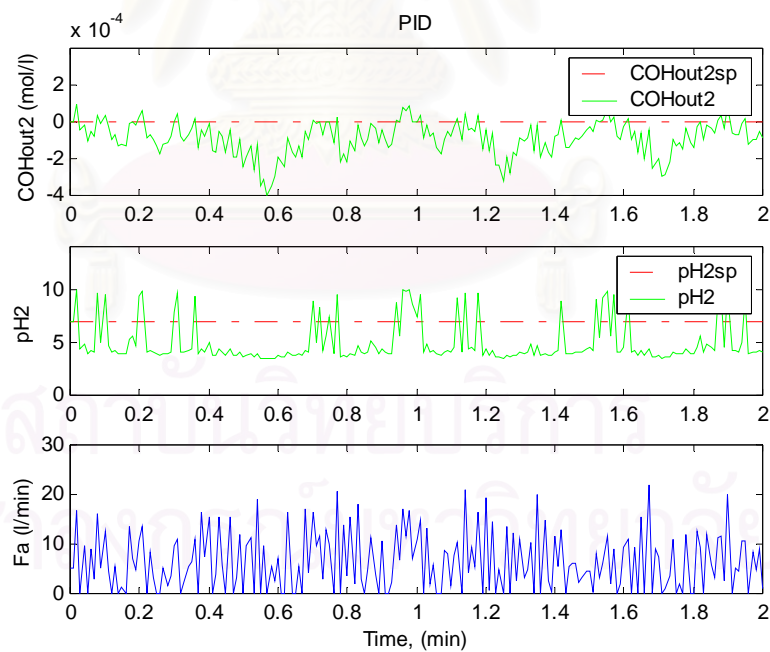
รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อตัวแปรวัดแบบแก๊สเสียนโดยการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อตัวแปรวัดแบบแก๊สเสียนโดยการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.13 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อตัวแปรวัดแบบเกาส์เซียน โดยการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีสัญญาณรบกวนต่อตัวแปรวัดแบบเกาส์เซียน โดยการควบคุมแบบพีไอดี

ในการจำลองควบคุมนี้ใช้สัญญาณรบกวนรุนแรงมากส่งผลให้การควบคุมทำไม่ได้ผลดี เมื่อทำการลดสัญญาณรบกวนลง พบว่าการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งจะสามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของกระบวนการใกล้เคียงกับที่สภาวะคงที่ และดีว่าการควบคุมแบบพีไอดี ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์จะให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

## 5.2.2 ทำการเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี

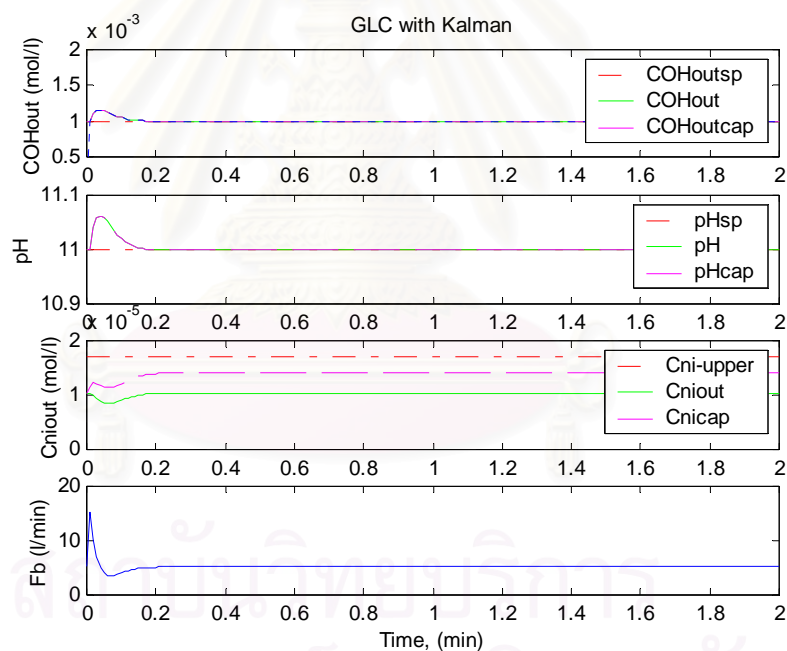
ในการประยุกต์ใช้กับการควบคุมจริงอาจมีความผิดพลาดของตัวควบคุมหรือกระบวนการเกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมไม่ได้ผลดี ในการจำลองได้สมมติให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองของตัวควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาดไปจากค่าที่สภาวะคงที่ตามสภาวะปฏิบัติการของระบบดังตารางที่ 4.1 โดยในตัวควบคุมยังคงใช้ค่าคงที่ของตัวควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมที่สภาวะคงที่ ที่ไม่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหรือกระบวนการ โดยไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใดๆ พิจารณาการตอบสนองของกระบวนการในกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

### 1. การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุม (Model-Mismatch)

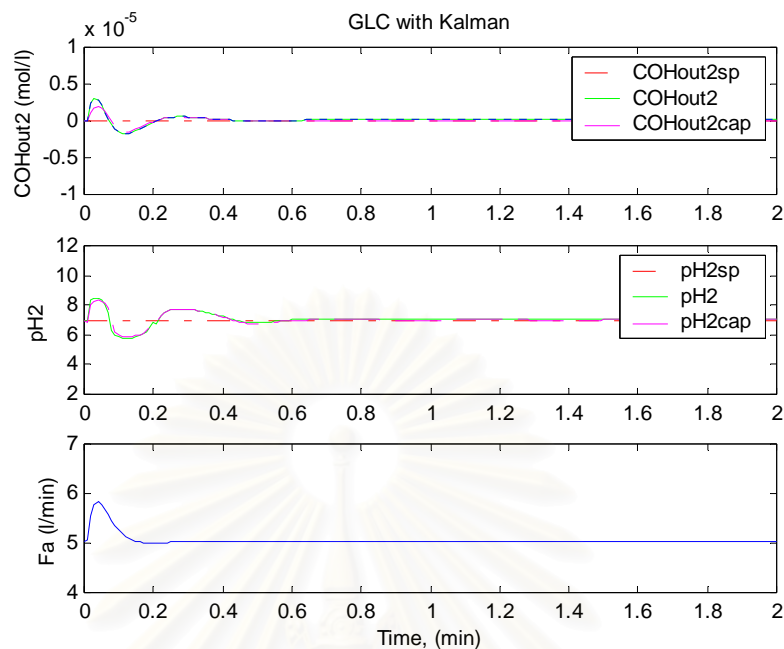
สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุม อันเนื่องมาจากการหาแบบจำลองผิดพลาด หรือมีพารามิเตอร์ใดๆ ผิดพลาดไป ซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดี เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดีจะไม่ขึ้นกับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ใดๆ นอกจากค่าความผิดพลาดจากการควบคุมเท่านั้น และตัวควบคุมพีไอดียังอาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริง ดังนั้นในการจำลองจึงไม่ต้องทำการทดสอบการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีนี้ แต่สำหรับการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเป็นพื้นฐาน เมื่อแบบจำลองมีความผิดพลาดจะส่งผลต่อการควบคุม ดังนั้นเพื่อทดสอบความทนทานของการควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ในการจำลองได้กำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม พิจารณาผลการควบคุมเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ค่าคงที่อัตราการผลิตปฏิกิริยา,  $k_1$  ลดลง 30% และ กรณีที่ค่าปริมาตรของถัง,  $V$  ลดลง 30%



ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับกรณีที่สภาวะคงที่ และกำหนดให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา,  $k_1$  ลดลง 30% จากค่าที่สภาวะคงที่ที่ตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดสูงสุดที่นักออกแบบจำลองของตัวควบคุมจะสามารถยอมรับได้ พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แสดงในรูปที่ 5.15 และ 5.16 พบว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ยังสามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอน นิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนดไว้ และสามารถควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ แม้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (ที่สภาวะคงที่) และเมื่อพิจารณาจากค่าอินทิกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาด พบว่าให้ค่า IAE ( $4.435e-2$  และ  $3.375$ ) ใกล้เคียงกับกรณีที่สภาวะคงที่ ( $4.445e-2$  และ  $3.368$ )

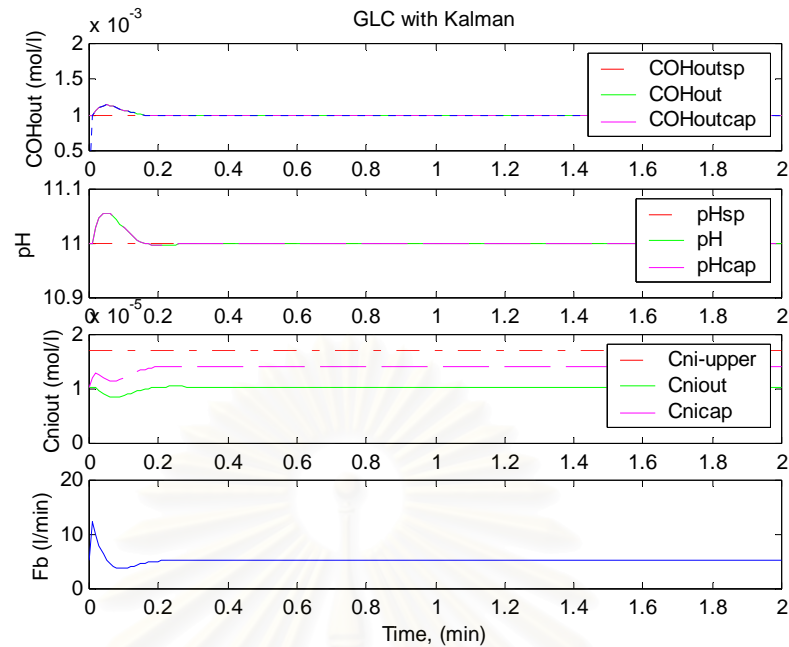


รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม ( $k_1$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิณีเยอร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

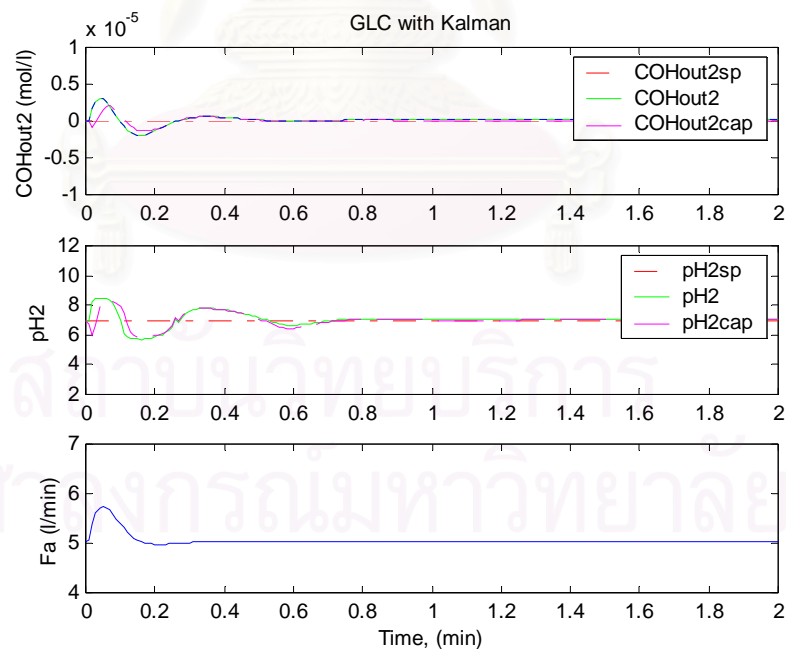


รูปที่ 5.16 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม ( $k_1$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

ทำการจำลองเช่นเดียวกับกรณีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา,  $k_1$  ลดลง 30% แต่เปลี่ยนเป็นกำหนดให้ค่าปริมาตรของถัง,  $V$  ลดลง 30% พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18 พบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ยังสามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนดไว้ และสามารถควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ แม้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม เมื่อเทียบกับกรณีที่สภาวะคงที่ และเมื่อพิจารณาจากค่าอินทิกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาดพบว่าให้ค่า IAE ( $4.481e-2$  และ  $3.394$ ) ใกล้เคียงกับกรณีที่สภาวะคงที่ ( $4.445e-2$  และ  $3.368$ ) แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งที่มีคาลมานฟิลเตอร์รวมอยู่ด้วย จะทำให้การควบคุมมีความทนทานยิ่งขึ้น ส่วนการควบคุมแบบพีไอได้นั้นไม่ต้องอาศัยแบบจำลองของตัวควบคุมแต่อาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริง ดังนั้นในกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม จะไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

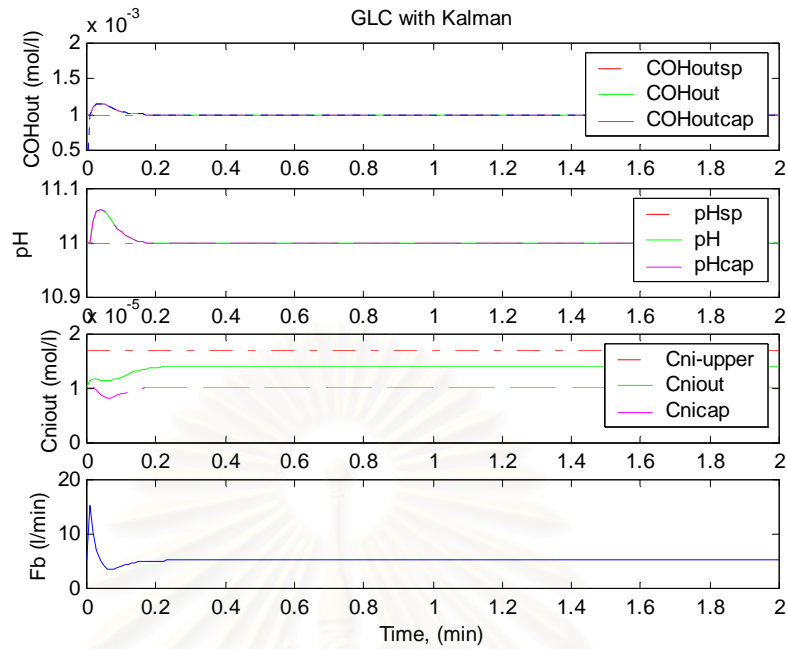


รูปที่ 5.18 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุม (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

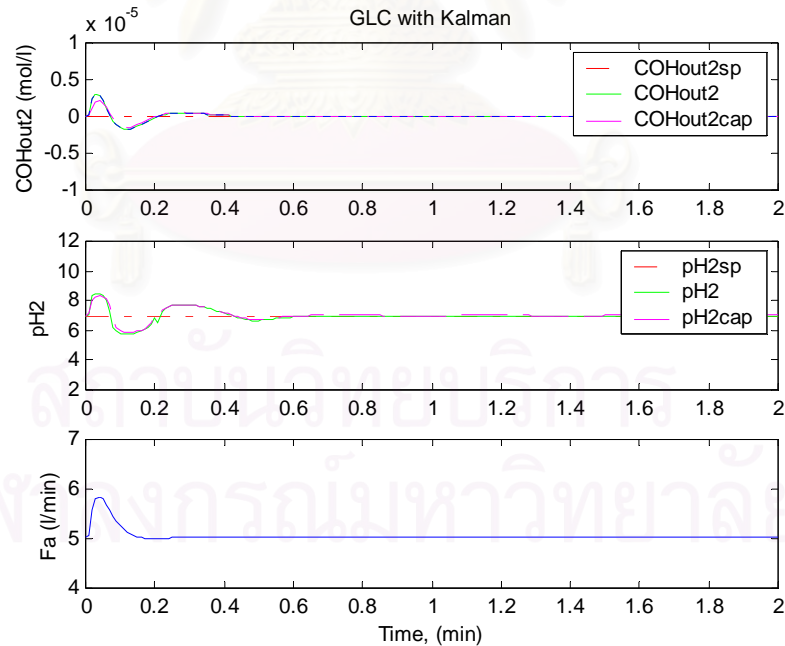
## 2. การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Plant-Mismatch)

สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่จะทำการควบคุมจะส่งผลกระทบต่อการควบคุมทั้งการควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ และการควบคุมแบบพีไอดี เนื่องจากการควบคุมแบบพีไอดีอาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริง ดังนั้นเมื่อเกิดการผิดพลาดใดๆ ของกระบวนการในระหว่างการควบคุม จะทำให้พารามิเตอร์ปรับจูนไม่สามารถปรับตัวควบคุมให้ทำงานได้ดีเทียบเท่ากับกรณีปกติ และสำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเป็นพื้นฐานเมื่อแบบจำลองผิดพลาดจะส่งผลกระทบต่อการควบคุม ดังนั้นเพื่อทดสอบความทนทานของการควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ในการจำลองได้กำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม 2 กรณี ดังนี้ คือ กรณีที่ค่าคงที่อัตราการผลิตปฏิกิริยา,  $k_1$  ลดลง 30% และกรณีที่ค่าปริมาตรของถัง,  $V$  ลดลง 30% พิจารณาผลการควบคุมเปรียบเทียบกับกรณีการควบคุมแบบพีไอดี

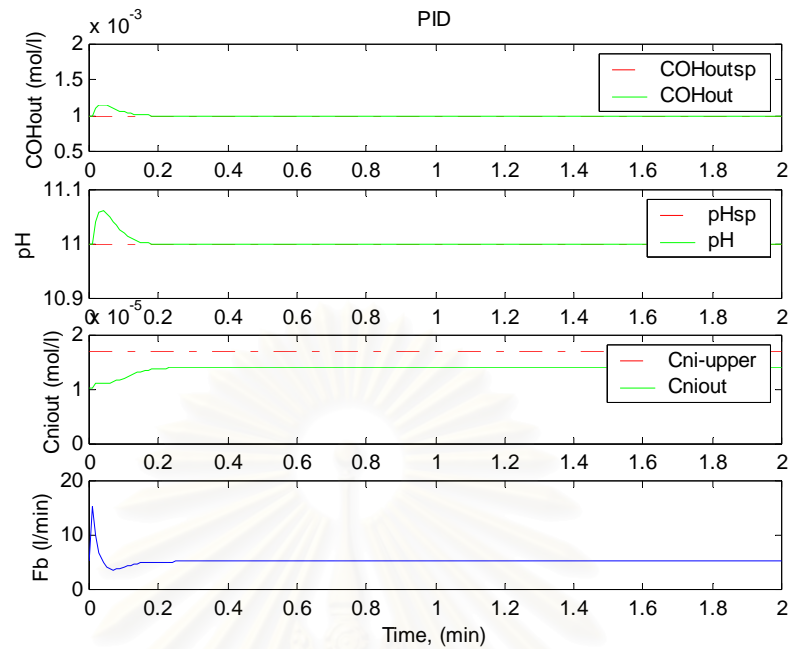
ทำการจำลองการควบคุมเช่นเดียวกับกรณีที่สถานะคงที่ และกำหนดให้ค่าคงที่อัตราการผลิตปฏิกิริยา,  $k_1$  ลดลง 30% จากค่าที่สถานะคงที่ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดสูงสุดที่นักออกแบบจำลองของกระบวนการจะสามารถยอมรับได้ พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แสดงในรูปที่ 5.19 และ 5.20 เปรียบเทียบกับผลการควบคุมแบบพีไอดีแสดงในรูปที่ 5.21 และ 5.22 จากกราฟรูปที่ 5.19 และ 5.20 พบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ สามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนดไว้ และสามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการได้ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ (ที่สถานะคงที่) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการควบคุมแบบพีไอดี จะให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 5.21 และ 5.22 และเมื่อพิจารณาค่าอินทิกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาด พบว่าให้ค่า IAE ( $4.45e-2$  และ  $3.355$ ) ใกล้เคียงกับกรณีที่สถานะคงที่ ( $4.445e-2$  และ  $3.368$ ) และ ให้ค่าต่ำกว่าแบบพีไอดี ( $4.454e-2$  และ  $4.078$ ) เล็กน้อย



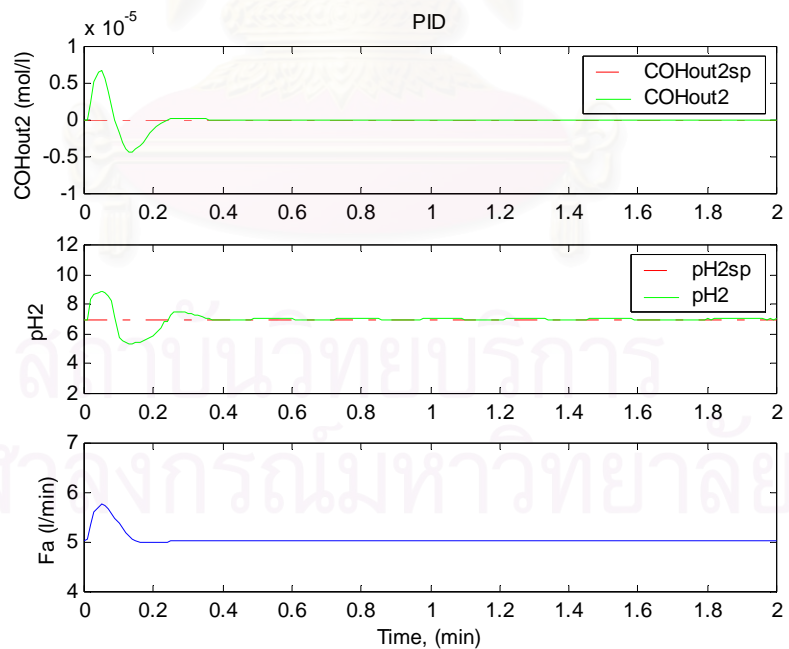
รูปที่ 5.19 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.20 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



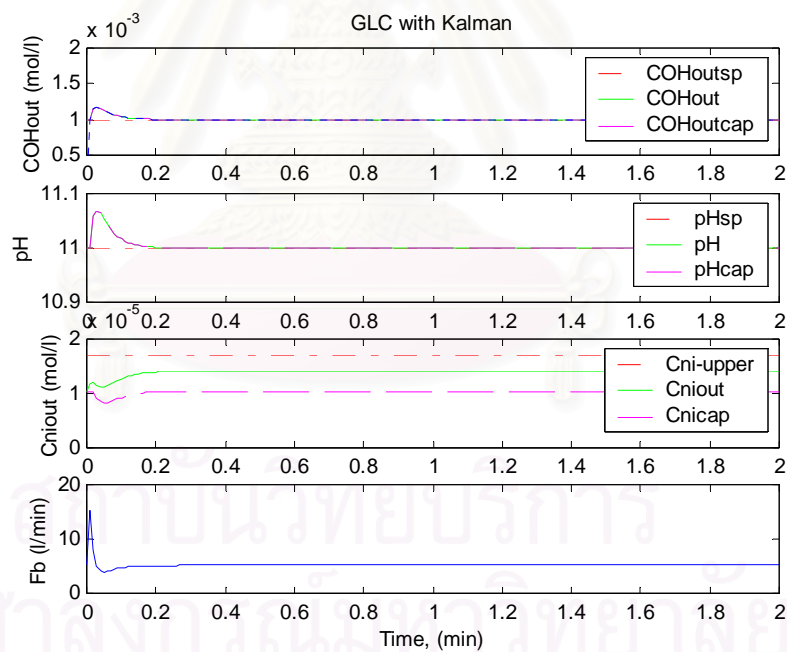
รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี



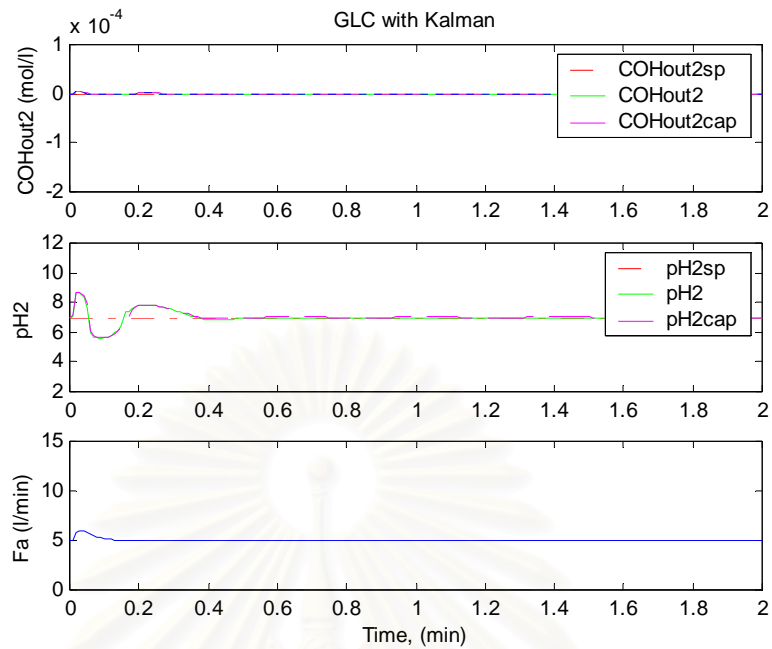
รูปที่ 5.22 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $k_1$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี



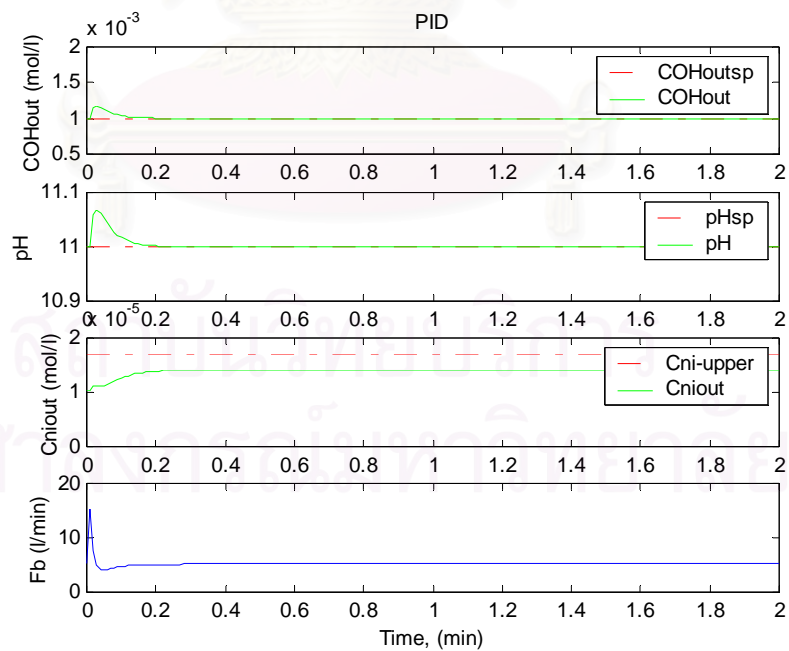
ทำการจำลองเช่นเดียวกับกรณีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา,  $k_1$  ลดลง 30% แต่เปลี่ยนเป็น กำหนดให้ค่าปริมาตรของถัง,  $V$  ลดลง 30% พิจารณาผลการควบคุมสำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิ-ลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แสดงในรูปที่ 5.23 และ 5.24 เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 5.25 และ 5.26 จากกราฟรูปที่ 5.23 พบว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ยังสามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ส่งผลให้ความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนดไว้ เมื่อเทียบกับกรณีที่สภาวะคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 5.25 จะให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกัน และจากกราฟรูปที่ 5.24 พบว่าการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ สามารถควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการเมื่อเทียบกับกรณีที่สภาวะคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 5.26 จะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่ามาก โดยการควบคุมแบบพีไอดีจะไม่สามารถควบคุมให้กระบวนการอยู่ที่ค่าที่ต้องการได้ และยังคงเกิดการแกว่งแบบลู่ออก



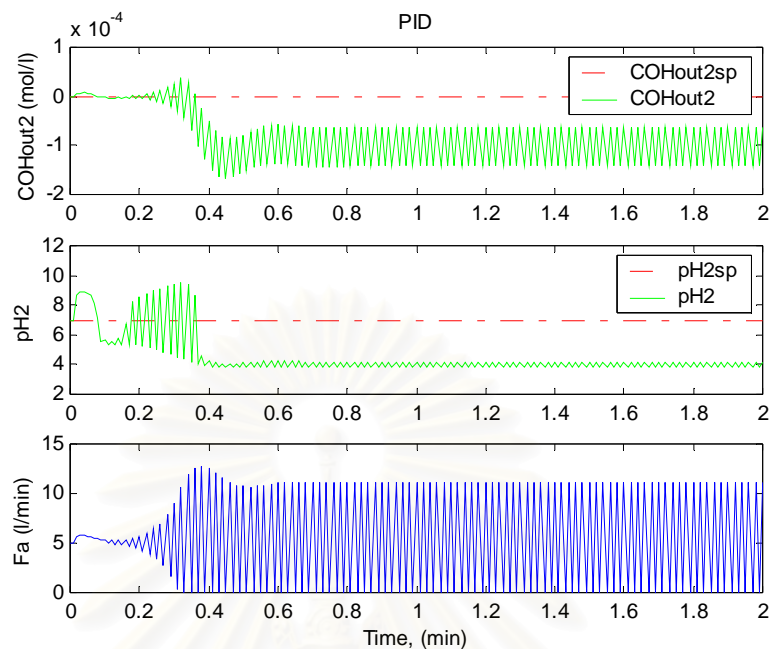
รูปที่ 5.23 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ ( $V$  ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบโกลบอลลิเกอเนียร์ไรซิ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



รูปที่ 5.25 ผลการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.26 ผลการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองกระบวนการ (V ลดลง 30%) โดยการควบคุมแบบพีไอดี

และเมื่อพิจารณาจากค่าอินทิกรัลสัมบูรณ์ของความผิดพลาด พบว่าให้ค่า IAE ( $4.427e-2$  และ  $3.657$ ) ต่ำกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ( $4.444e-2$  และ  $55.075$ ) ซึ่งค่า IAE ของการควบคุมแบบโกลบอลลิสทีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในกรณีการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ( $3.657$ ) จะต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี ( $55.075$ ) ทั้งนี้เนื่องมาจากในกรณีการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นการควบคุมแบบเชิงเส้นจึงไม่สามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบผลจากการควบคุมแบบโกลบอลลิสทีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งเป็นการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจากผลการควบคุมยังแสดงให้เห็นอีกว่าอัลกอริทึมของการควบคุมแบบโกลบอลลิสทีเนียร์ไรซึ่งที่มีคาลมานฟิลเตอร์รวมอยู่ด้วย จะทำให้การควบคุมมีความทนทานยิ่งขึ้น

พิจารณาผลการควบคุมโดยเปรียบเทียบจากค่าอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด IAE ในกรณีต่างๆ ข้างต้นสามารถสรุปผลการควบคุมได้ดังตารางที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าอินทิกรัลของสัมบูรณ์ของความผิดพลาด IAE ในการควบคุมพีเอชของน้ำเสียใน  
ถึงตกตะกอนนี้เกิดกรณีต่างๆ

กรณีการควบคุม	pH	
	GLC with Kalman	PID
1. การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม		
1.1 กรณีที่สภาวะคงที่	4.445e-2	4.449e-2
1.2 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน		
ก. $F_{in}$ เพิ่มขึ้น 30%	4.467e-2	5.158e-2
ข. $C_{OH,in}$ เพิ่มขึ้น 30%	4.445e-2	4.456e-2
ค. $C_{Ni,in}$ เพิ่มขึ้น 30%	4.471e-2	4.475e-2
1.3 กรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด	2.725e-1	5.015e-1
2. การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.1 กรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุม		
ก. $k_1$ ลดลง 30%	4.435e-2	-
ข. $V$ ลดลง 30%	4.481e-2	-
2.1 กรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
ก. $k_1$ ลดลง 30%	4.450e-2	4.454e-2
ข. $V$ ลดลง 30%	4.427e-2	4.444e-2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าอินทิกรัลของสัมบูรณ์ของความผิดพลาด IAE ในการควบคุมพีเอชของน้ำเสียใน  
ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลางกรณีต่างๆ

กรณีการควบคุม	pH <sub>2</sub>	
	GLC with Kalman	PID
1. การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุม		
1.1 กรณีที่สภาวะคงที่	3.368	3.371
1.2 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน		
ก. $F_{in}$ เพิ่มขึ้น 30%	3.367	6.066
ข. $C_{OH,in}$ เพิ่มขึ้น 30%	3.368	3.414
ค. $C_{Ni,in}$ เพิ่มขึ้น 30%	3.365	3.509
1.3 กรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด	40.280	58.261
2. การเปรียบเทียบความทนทานในการควบคุม		
2.1 กรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุม		
ก. $k_1$ ลดลง 30%	3.375	-
ข. $V$ ลดลง 30%	3.394	-
2.1 กรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ		
ก. $k_1$ ลดลง 30%	3.355	4.078
ข. $V$ ลดลง 30%	3.657	55.075

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผล

บทนี้กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการจำลองการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไว้ซึ่งร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์ ในการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานกับการควบคุมแบบพีไอดี จากผลการควบคุมในบทที่ 5 นอกจากนี้ยังกล่าวถึงข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไว้ซึ่ง ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะต่อไปในอนาคต

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

ในโรงงานชุบโลหะมีการใช้กรด-ด่างมากในกระบวนการผลิต จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อตกตะกอนโลหะหนักและควบคุมพีเอชของน้ำทิ้งจากโรงงานให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมโรงงาน สำหรับการควบคุมพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นปัญหาในการดำเนินการที่น่าสนใจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะทำการควบคุมมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูงและเปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าไม่สามารถควบคุมพีเอชให้เป็นไปตามค่าที่ต้องการได้ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียก็จะไม่เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์และค่าพีเอชของน้ำทิ้งก็จะไม่ตรงตามมาตรฐานที่อุตสาหกรรมกำหนดไว้ นอกจากนี้การควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นทำได้ยากเนื่องจากไม่สามารถวัดความเข้มข้นของโลหะหนักได้โดยตรง ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ดังพิจารณาได้จากการตอบสนองของลูปเปิด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการคืออัตราการไหลของน้ำขาเข้าเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้การตอบสนองของพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางเปลี่ยนแปลงไปโดยจะเข้าสู่สภาวะคงที่ค่าใหม่ที่เพิ่มขึ้น และกระบวนการนี้มีลักษณะเป็นกระบวนการที่มีตัวแปรอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัว คือมีตัวแปรปรับสองตัว (อัตราการไหลของเบสแก่และอัตราการไหลของกรดแก่) ตัวแปรปรับตัวแรกใช้ควบคุม



พิเษและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและตัวแปรปรับตัวที่สองใช้ควบคุมพิเษของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อพิจารณาจากพฤติกรรมในการควบคุมดังกล่าว จะเห็นว่ากระบวนการนี้สามารถเป็นตัวแทนที่ดีของกระบวนการที่ครอบคลุมถึงปัญหาในการควบคุมส่วนใหญ่ที่พบในการควบคุมพิเษของกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานชุบโลหะคือกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงซึ่งต้องการการออกแบบการควบคุมที่สามารถให้สมรรถนะและความทนทานที่ดี

จากการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมาพบว่า การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งซึ่งเป็นการควบคุมที่มีสมรรถนะที่ดี สามารถควบคุมกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งในการควบคุมกระบวนการที่มีปัญหาในการควบคุมดังกล่าวข้างต้น ซึ่งการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการเขียนโปรแกรมการควบคุมบนแม่ทเลบซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณทางคณิตศาสตร์แบบจำลองของตัวควบคุมที่ใช้หามาได้จากแบบจำลองของกระบวนการที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์แบบธรรมดาไม่เชิงเส้นซึ่งไม่ต้องทำให้เป็นเชิงเส้นจึงสะดวกและมีลักษณะครอบคลุมความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาศัยการแก้สมการด้วยวิธีอินพุทเอาต์พุทลิลิเนียร์โรเซชั่นร่วมกับการใช้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับ นอกจากนี้ในอัลกอริธึมการควบคุมได้รวมเอาตัวควบคุมภายนอกแบบเชิงเส้นพีไอ โดยสามารถปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งจากตัวควบคุมภายนอกแบบเชิงเส้นพีไอเพื่อลดออฟเซ็ทของตัวแปรควบคุมและเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุม ซึ่งโปรแกรมการควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมพิเษของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะที่มีตัวแปรอินพุทหลายตัวเอาต์พุทหลายตัวได้โดยข้อมูลของตัวแปรอินพุทและเอาต์พุทต่างๆ สามารถรวมเข้าไว้ในอัลกอริธึมสำหรับควบคุม เพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมพร้อมกันทีเดียว ซึ่งให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ใช้การคำนวณแบบหลายดูป

จากการที่การควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองของกระบวนการ ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการอุตสาหกรรม อาจมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ใช้ในตัวควบคุมหรือแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุมเกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมไม่ได้ผลดี ดังนั้นจึงต้องอาศัยการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์เข้ามาช่วยในการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์โรซึ่งให้ถูกต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองของกระบวนการจริงมากที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยายในการประมาณค่าตัวแปรสเตทที่ผิดพลาดและประมาณค่าความเข้มข้นของนิเกิลซึ่งไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยในการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์นั้นอาศัยข้อมูลเอาต์พุทสองตัวคือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและความเข้มข้น

ของไฮดรอกไซด์ของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางที่วัดได้ เป็นฐานในการคำนวณหรือประมาณค่าสเตพและพารามิเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้การควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซึ่งมีสมรรถนะและความทนทานดีขึ้น

ได้ทำการจำลองการควบคุมเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี ในการจำลองการควบคุมได้มีการทดสอบสมรรถนะในการควบคุมทั้งในกรณีการควบคุมที่สภาวะคงที่ กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน และกรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด และการทดสอบความทนทานในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุมหรือกระบวนการที่ทำการควบคุม โดยกำหนดให้มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุมและแบบจำลองของกระบวนการในทิศทางที่จะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่รุนแรงมากขึ้น ในการทดสอบการควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุมนั้นจะไม่ส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดี เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดีไม่ได้อาศัยแบบจำลองในการควบคุม ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการทดสอบการควบคุมแบบพีไอดีในกรณีนี้

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์กับการควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า โดยพิจารณาจากทั้งกราฟแสดงผลการควบคุมและค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ในการควบคุม พบว่าตัวควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนและกรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด โดยเฉพาะในกรณีการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางเมื่อมีตัวแปรรบกวนที่รุนแรงมารบกวนระบบ พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีให้ผลการตอบสนองของกระบวนการแกว่งและเข้าสู่ค่าที่ต้องการช้า และในกรณีการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง เมื่อมีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีให้ผลไม่ดี โดยผลการตอบสนองของกระบวนการและตัวแปรปรับเกิดการแกว่งอย่างมาก นอกจากนี้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่ทำการควบคุม โดยเฉพาะในกรณีการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางตัวควบคุมแบบพีไอดี จะไม่สามารถควบคุมให้กระบวนการอยู่ที่ค่าที่ต้องการได้และยังเกิดการแกว่งแบบลู่ออก ในขณะที่ตัวควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ให้ผลการควบคุมใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีความผิดพลาด แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบโกลบอลลิสต์เนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์มีสมรรถนะและความทนทานสูงกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากผลการจำลองการควบคุมข้างต้นสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- การควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยายเป็นการควบคุมที่มีสมรรถนะและความทนทานสูงสามารถควบคุมกระบวนการไม่เชิงเส้นได้ดี เนื่องจากการควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์แบบยืดขยายเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งมีข้อดีคือข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสามารถถูกรวมเข้าไว้ในแบบจำลองของตัวควบคุม ซึ่งสามารถใช้ทั้งค่าการรบกวนระบบและเอาต์พุตของกระบวนการในการคำนวณหาตัวแปรปรับกระบวนการที่เหมาะสม ด้วยวิธีการอินพุทเอาต์พุทลิเนียร์ไรเซชันร่วมกับการใช้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับ นอกจากนี้ในการควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ยังมีตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอก (ในที่นี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ) เพื่อมาช่วยลดออฟเซ็ทของตัวควบคุมและควบคุมเอาต์พุทให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ จึงทำให้สามารถคำนวณตัวแปรปรับที่เหมาะสมกว่าการควบคุมแบบพีไอซึ่งให้สมรรถนะในการควบคุมที่ไม่ดีตามความต้องการ โดยเฉพาะในกรณีการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง เมื่อมีตัวแปรรบกวนระบบที่รุนแรงมารบกวนตัวควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ซึ่งอาศัยแบบจำลองไม่เชิงเส้นซึ่งรวมค่าการรบกวนระบบไว้ในในการคำนวณหาตัวแปรปรับ จึงสามารถควบคุมพีเอชของถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางได้

- เนื่องจากตัวควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สามารถใช้แบบจำลองของกระบวนการที่ไม่เชิงเส้นได้โดยไม่ต้องอาศัยการประมาณให้เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงส่งผลให้การคำนวณค่าตัวแปรปรับมีความแม่นยำขึ้นและตัวควบคุมยังสามารถใช้ข้อมูลจากแบบจำลองเพื่อมาคำนวณหาตัวแปรปรับไว้ล่วงหน้าหนึ่งขั้น ทำให้สามารถควบคุมระบบไม่เชิงเส้นได้ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นธรรมดาซึ่งอาศัยการปรับจูนค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการจริงและอาศัยเพียงค่าความผิดพลาดในการควบคุมนำมาคำนวณกลับหาตัวแปรปรับที่เหมาะสมเท่านั้น

- ในการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการประมาณสแตทและพารามิเตอร์ เข้ามาช่วยในการประมาณค่าสแตทและพารามิเตอร์ของแบบจำลองของตัวควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งให้ถูกต้องและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุดทำให้ตัวควบคุมสามารถคำนวณค่าตัวแปรปรับที่ถูกต้องเหมาะสม และยังช่วยในการกรองสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ ซึ่งจากผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าคาลมานฟิลเตอร์ช่วยให้การควบคุมแบบโกลบอลลิติเนียร์ไรซึ่งมีสมรรถนะและความทนทานสูงขึ้นและให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

- สำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการที่จะทำการควบคุมจะส่งผลกระทบต่อทั้งการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบพีไอดี เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอคืออาศัยการปรับจูนจากกระบวนการจริงดังนั้นเมื่อมีความผิดพลาดใดๆของกระบวนการในระหว่างการควบคุม จะทำให้พารามิเตอร์ปรับจูนไม่สามารถปรับตัวควบคุมให้ทำงานได้ดีเทียบเท่ากับกรณีปกติ นอกจากทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใหม่ แต่สำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซึ่งที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์จะสามารถชดเชยความผิดพลาดดังกล่าวได้โดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ปรับจูนใหม่ ซึ่งเป็นข้อดีของการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมพิเศษของกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานชุบโลหะที่เราไม่ทราบข้อมูลต่างๆ ดีพอ

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

- แบบจำลองของกระบวนการที่ออกแบบขึ้นนี้ได้พิจารณาในส่วนของ การควบคุมพิเศษ และความเข้มข้นของน้ำเสียในของถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพิเศษของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งในการศึกษาได้ตั้งสมมติฐานว่าโลหะหนักชนิดอื่นได้ถูกกำจัดให้เหลืออยู่ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานกำหนดไว้ ดังนั้นในแบบจำลองของกระบวนการจึงพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนเฉพาะโลหะหนักนิเกิลเท่านั้น ซึ่งในการพัฒนาขั้นต่อไปอาจรวมผลกระทบของโลหะชนิดอื่นๆ ไว้ด้วย

- การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซึ่งนี้ ในอัลกอริทึมของการควบคุมมีพารามิเตอร์ปรับจูนสองตัว ตัวแรกเป็นพารามิเตอร์ปรับจูนกระบวนการให้มีเสถียรภาพ ตัวที่สองเป็นพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอกเพื่อช่วยในการลดออฟเซ็ทของตัวแปรควบคุม และควบคุมให้อาต์พุตเข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกพารามิเตอร์ปรับจูนกระบวนการที่ทำให้ค่าโพลของระบบลูบปีคมีเสถียรภาพ และใช้การปรับจูนพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมเชิงเส้นภายนอกแบบพีไอเท่านั้น ซึ่งการพัฒนาขั้นต่อไปอาจพัฒนาวิธีการเลือกค่าโพลเพื่อให้ระบบเข้าสู่ค่าเซ็ทพอยท์ได้เร็วขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการควบคุม

- เพื่อความสะดวกในการศึกษาค้นคว้าและนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมพิเศษของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การพัฒนาต่อไปอาจมีการพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการควบคุมแบบโกลบอลลิตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

## รายการอ้างอิง

- วนรัตน์ ดวงวัง. (1999). “การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตตสำหรับควบคุมค่าพีเอช ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สงค์ บำรุงวงศ์ดี. (1999). “การออกแบบพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับขั้นตอนวิธีตัวกรองกาลมานด้วย โปรแกรม Borland C++”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Alvarez, J., Alvarez, Ja., and Gonzalez, E.** (1989). “Global Nonlinear Control of a Continuous Stirred Tank Reactor”. *Chem. Eng. Science.* vol. 44 No. 5 : 1147-1160.
- Barolo, M.** (1994). “On The Equivalence between the GMC and the GLC Controllers”. *Comput. Chem. Eng.* vol. 18 No. 4 : 769-772.
- Brockett, R. W.** (1978). “Feedback Invariants for Nonlinear Systems”. *Proc. 7th IFAC World Cong., Helsinki.*
- Congalidis, J. P., Richards, J. R., and Ray, W. H.** (1989). “Feedforward and Feedback Control of a Solution Copolymerization Reactor”. *AIChE J.* vol. 35 No. 6 : 891-907.
- Eilbeck, W. J., and Mattock, G.** (1987). “Chemical Processes in Waste Water Treatment”. Chichester, Eng. : Eillis Horwood.
- Gattu, G., and Zafiriou, E.** (1992). “Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix Control with State Estimation”. *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 31 : 1096-1104.
- Germani, A., Manes, C., and Pepe, P.** (1998). “Linearization and Decoupling of Nonlinear Delay Systems”. *AACC Proceeding of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania* : 1948-1952.
- Gustafsson, T. K. and Waller, K. V.** (1992a). “Dynamic Modeling and Reaction Invariant Control of pH”. *Chem. Eng. Science.* vol. 38 : 389-398.
- Gustafsson, T. K., and Waller, K. V.** (1992b). “Nonlinear and Adaptive Control of pH”. *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 31 : 2681-2693.
- Gustafsson, T. K., Skifvas, B. O., Sandström, K. V., and Waller, K. V.** (1995). “Modelling of pH Control”. *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 34 : 820-827.



- Hemilton, J. C., Seborg, D. E., and Fisher, D. G.** (1973). "An Experimental Evaluation of Kalman Filtering". *AIChE J.* vol. 19 : 901-907.
- Henson, M. A., and Seborg, D. E.** (1990). "Input/Output Linearization of General Nonlinear Processes". *AIChE J.* vol. 36 No. 11 : 1753-1757.
- Henson, M. A., and Seborg, D. E.** (1991). "A Critique of Exact Linearization Strategies for Process Control". *J. of Process Control.*
- Henson, M. A., and Seborg, D. E.** (1994). "Adaptive Nonlinear Control of a pH Neutralization Process". *IEEE Tran. Auto. Cont.* vol. 2 No. 3 : 169-182.
- Hoo, K. A., and Kantor, J. C.** (1985). "An Exothermic Continuous Stirred-Tank Reactor is Feedback Equivalent to a Linear System". *Chem. Eng. Commu.* vol. 37 No.1.
- Hunt, L. R., Su, R., and Meyer, G.** (1983). "Global Transformations of Nonlinear Systems". *IEEE Tran. Auto. Cont.* vol. AC-28 No. 1 : 24-31.
- Isidori, A.** (1989). "Nonlinear Control System : An Introduction". 2nd ed. Berlin.
- Jayadeva, B., Rao, Y. S., Chidambaram, N. M., and Madhavan, K. P.** (1990). "Nonlinear Controller for pH Process". *Comput. Chem. Eng.* vol. 14 No. 8 : 917-920.
- Jo, J. H., and Bankoff, S. G.** (1976). "Digital Monitoring and Estimation of Polymerization". *AIChE J.* vol. 22 : 361-368.
- Jutila, P., Orava, P. J., and Salmeim, B.** (1981). "A Physico-Chemical Model and Simulation of pH-Processing Continuous Stirred Tank Reactor". *Math. Comp. Simul.* vol. 23 : 99-106.
- Kantor, J. C.** (1986). "Stability of State Feedback Transformation for Nonlinear Systems-Some Practical Considerations". *Proc. Am. Control Conf.*, Seattle : 1014.
- Khalil, H. K.** (1994). "Adaptive Output Feedback Control of Nonlinear Systems Represented by Input-Output Model". *IEEE Proceeding of the 33rd Conference on Decsion and Control*, Lake buena vista, FL : 199-204.
- Kittisupakorn, P., and Kershenbaum, L. S.** (1994). "The Use of a Partially Simulated Exothermic (PARSEX) Reactor for Experimental Testing of Control Algorithms". *Tran IchemE.* vol. 72 Part A : 55-63.
- Klatt, K. U., and Engell, S.** (1996). "Nonlinear Control of Neutralization Process by Gain-Scheduling Trajectory Control". *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 35 : 3511-3518.



- Kravaris, C.** (1988). "Input/Output Linearization : A Nonlinear Analog of Placing Poles at Process Zeros". *AIChE J.* vol. 34 No. 11 : 1803-1812.
- Kravaris, C., and Arkun Y.** (1991). "Geometric Nonlinear Control – an Overview". *Proceedings of the 4th International Conference of Chemical Process Control* : 477-516.
- Kravaris, C., and Chung, C.** (1987). "Nonlinear State Feedback Synthesis by Global Input /Output Linearization". *AIChE J.* vol. 33 No. 4 : 592-603.
- Kravaris, C., and Daoutidis, P.** (1989). "Synthesis of Feedforward/State Feedback Controllers for Nonlinear Processes". *AIChE J.* vol. 35 No. 10 : 1602-1616.
- Kravaris, C., and Daoutidis, P.** (1991). "Inversion and Zero Dynamics in Nonlinear Multivariable Control". *AIChE J.* vol. 37 No. 4 : 527-538.
- Kravaris, C., and Daoutidis, P.** (1990). "Nonlinear State Feedback of Second-Order Nonminimum-Phase Nonlinear Systems". *Comput. Chem. Eng.* vol. 14 No. 4/5 : 439-449.
- Kravaris, C., and Kantor, J. C.** (1990). "Geometric Methods for Nonlinear Process Control : 1. Background 2. Controller Synthesis". *Ind. Chem. Res.* vol. 29 : 2295-2323.
- Kravaris, C., and Palanki, S.** (1988a). "A Lyapunov Approach for Robust Nonlinear State Feedback Synthesis". *IEEE Tran. Auto. Cont.* vol. 33 No. 12 : 1188-1191.
- Kravaris, C., and Palanki, S.** (1988b). "Robust Nonlinear State Feedback Under Structured Uncertainty". *AIChE J.* vol. 34 No. 7 : 1119-1127.
- Kravaris, C., and Soroush, M.** (1990). "Synthesis of Multivariable Nonlinear Controller by Input/Output Linearization". *AIChE J.* vol. 36 No. 2 : 249-264.
- Kravaris, C., and Wright, R. A.** (1989). "Deadtime Compensation for Nonlinear Processes". *AIChE J.* vol. 35 No. 9 : 1535-1542.
- Kulkarni, B. D., Tambe, S. S., Shukla, N. V., and Deshpande, P. B.** (1991). "Nonlinear pH Control". *Chem. Eng. Science.* vol. 46 No. 4 : 995-1003.
- Lee, J.** (1993). "Relay Feedback Method for Tuning of Nonlinear pH Control System". *AIChE J.* vol. 39.
- Lee, P. L., Newell, R. B., and Sullivan, G. R.** (1989). "Generic Model Control—A Case Study". *Can. J. Chem. Eng.* vol. 67 : 478-484.
- Lee, P. L., and Sullivan, G. R.** (1988). "Generic Model Control (GMC)". *Comput. Chem. Eng.* vol. 12 No. 6 : 573-580.

- Limqueco, L. C., and Kantor, J. C.** (1990). "Nonlinear Output Feedback Control of an Exothermic Reactor". *Comput. Chem. Eng.* vol. 14 No. 4/5 : 427-437.
- Liu, Z. H., and Macchietto, S.** (1995). "Model based Control of a Multipurpose Batch Reactor-an Experimental Study". *Comput. Chem. Eng.* vol. 19 Suppl. : s477-482.
- Mahuli, S. K., Rhinehart, R. R., and Riggs, J. B.** (1992). "Experimental demonstration of Non-linear Model-Based In-Line Control of pH". *Proc. Cont. 3* : 145-153.
- Mayer, M. A., and Luecke, P. H.** (1991). "Process Control Application of an Extended Kalman Filter Algorithm". *Comp. Chem. Eng.* vol. 15 : 853-855.
- McAvoy, T. J., Hsu, E., and Lowenthal, S.** (1972). "Dynamics of pH in Controlled Stirred Tank Reactor". *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Devel.* vol. 11.
- Oguchi, T., Watanabe, A., and Nakamizo, T.** (1998). "Input-Output Linearization of Retarded Nonlinear Systems by an Extended Lie Derivative". *IEEE Proceeding of the 37rd Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida, USA : 1364-1369.
- Ogunnaike, B. K.** (1986). "Controller Design for Nonlinear Process Systems via Variable Transformations". *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* vol. 25 : 241-248.
- Orava, P. J., and Niemi, A. J.** (1974). "State Model and Stability Analysis of pH Control Process". *Int. J. Cont.* vol. 20 No. 4 : 557-567.
- Palanki, S., and Kravaris, C.** (1997). "Controller Synthesis for Time-Varying Systems by Input/Output Linearization". *Comput. Chem. Eng.* vol. 21 No. 8 : 891-903.
- Parrish, J. R., and Brosilow, C. B.** (1988). "Nonlinear Inferential Control". *AIChE J.* vol. 34 No. 4 : 633-645.
- Pothin, R., Moog, C. H., and Xia, X.** (1999). "Input-Output Linearization of Nonlinear MIMO Systems by Static Output Feedback". *IEEE Proceeding of the 38rd Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, USA : 732-733.
- Proll, T., and Karin, N. M.** (1994). "Nonlinear Control of a Bioreactor Model Using Exact and I/O Linearization". *Int. J. Cont.* vol. 60 No. 4 : 499-519.
- Riggs, J. B., and Rhinehart, R.** (1988). "Comparison Between Process Model Based Controllers". *Proceedings of the 1988 American Control Conference*, Atlanta, GA : 1591-1595.
- Sastry, S. S., and Isidori, A.** (1989). "Adaptive Control of Linearizable Systems". *IEEE Tran. Auto. Cont.* vol. 34 No. 11 : 1123-1131.

- Shinskey, F. G.** (1962). "Controls for Nonlinear Processes". *Chem. Eng.* March 19.
- Shinskey, F. G.** (1973). "pH and pION Control in Process and Waste Streams". 1st ed. New York : John Wiley & Sons.
- Shinskey, F. G.** (1988). "Process Control System". 3rd ed. New York : McGraw-Hill.
- Sinsa, P. K.** (1977). "Controllability, Observability and Decoupling of Multivariable Systems". *Int. J. Cont.* vol. 26, No. 4, : 603-620.
- Slotine, J. E., and Li, W.** (1991). "Applied Nonlinear Control". 1st ed. Chapter 6. New Jersey : Prentice-Hall International.
- Smith, O., J. M.** (1985). "A controller to overcome dead time". *ISA-Journal.* vol. 6 No. 2 : 28-33.
- Soroush, M., and Kravaris, C.** (1992). "Nonlinear Control of Batch Polymerization Reactor : an Experimental Study". *AIChE J.* vol. 38 No. 9 : 1429-1992.
- Soroush, M., and Kravaris, C.** (1994). "Nonlinear Control of a Polymerization CSTR with Singular Characteristic Matrix". *AIChE J.* vol. 40 No. 6 : 980-990.
- Soroush, M., and Kravaris, C.** (1996a). "Discrete-Time Nonlinear Feedback Control of Multivariable Processes". *AIChE J.* vol. 42 No. 1 : 187-203.
- Soroush, M., and Kravaris, C.** (1996b). "MPC Formulation of GLC". *AIChE J.* vol. 42 No. 8 : 2377-2381.
- Støle-Hanson, K.** (1998). "Studies of some Phenomena in Control Engineering Projects-with Application to Precipitation and Cementation Processes". *PhD. Thesis*, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology.
- Su, R., and Hunt, L. R.** (1986). "Canonical Expansion for Nonlinear Systems". *Systems IEEE Trans. Autom. Control.* vol. 31 : 670-673.
- Sung, S. S., and Lee, I. B.** (1995). "pH Control Using a Simple Set Point Change". *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 34 : 1730-1734.
- Vos, E. W., and Valavain, L.** (1991). "Input/Output Linearization Using Model Reference Adaptive Control Techniques". *Proceedings of the 30th conference on Decision and Control*, Brighton, England : 2501-2502.
- Wells, C. H.** (1971). "Application of Modern Estimation and Identification Techniques to Chemical Process". *AIChE J.* vol. 17 : 966-973.

- William, G. L., Rhinehart, R. R., and Riggs, J. B.** (1990). "In-Line Process Model Based Control of Wastewater pH Using Dual Base Injection". *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 29.
- Wong, Y. H.** (1994). "Experimental Application of Robust Nonlinear Control Law to pH Control". *Chem. Eng. Science.* vol. 49.
- Wright, R. A., and Kravaris, C.** (1991). "Nonlinear Control of pH Processes Using the Strong Acid Equivalent". *Ind. Eng. Chem. Res.* vol. 30 : 1561-1572.
- Xia, X., and Moog, C. H.** (1996). "Input Output Linearization of Nonlinear Systems by Output Feedback " *IEEE Proceeding of the 33rd Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan : 82-83.
- Xu, Z., Hauser, J., and Hunt, L. R.** (1992). "Higher Oder Approximate Input-Output Linearization". *IEEE Tran. Auto. Cont.* : 1976-1981.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

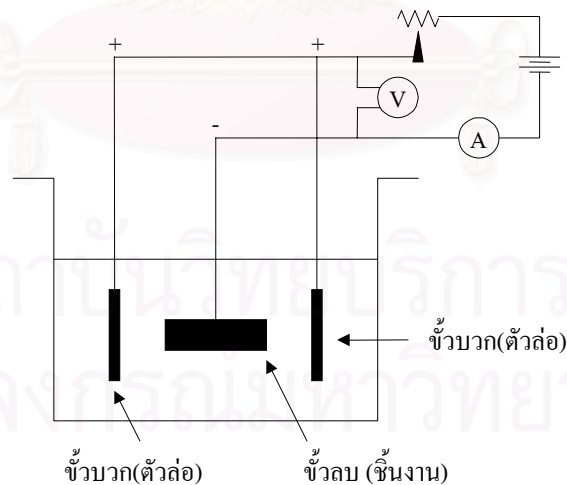
## ภาคผนวก ก

### กระบวนการชุบโลหะ

ในที่นี้จะกล่าวถึง หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะ, การชุบโลหะประเภทต่าง ๆ, แหล่งที่มา และลักษณะน้ำเสีย ตลอดจนความเป็นพิษของโลหะ เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจในกระบวนการชุบโลหะ

#### ก.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การเคลื่อนโลหะลงบนผิวของโลหะอีกชนิดหนึ่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยการจุ่มชิ้นงานที่ต่อเข้ากับขั้วลบ (cathode) ของกระแสไฟฟ้าตรง (D.C. current) ลงในน้ำยาชุบ และต่อตัวล่อกับขั้วบวก (anode) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดการเกาะจับของโลหะที่ชิ้นงาน (ขั้วลบ) ดังรูปที่ ก.1 ประกอบ



รูปที่ ก.1 แสดงการต่อของส่วนต่าง ๆ ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ในการชุบโลหะจะต้องทำการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม เช่น

- พีเอช ที่เป็นกรดมากไปจะทำให้ประสิทธิภาพขั้วลบ (ชิ้นงาน) ลดลง



- พิเศษ ที่เป็นค่ามากไปจะทำให้ประสิทธิภาพขั้วบวก (ตัวล่อ) ลดลง  
เวลาและความหนาแน่นของกระแสจะมีผลต่อความหนาของผิวที่ชุบ  
ระยะระหว่างตัวล่อและชิ้นงาน จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาของผิวที่ชุบ

#### วัตถุประสงค์ในการชุบชิ้นงาน

1. เพื่อความสวยงาม
2. เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวชิ้นงาน เช่น เพิ่มความแข็ง ป้องกันสนิม
3. เพื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานในกรณีที่ชิ้นงานสึกกร่อน

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบ

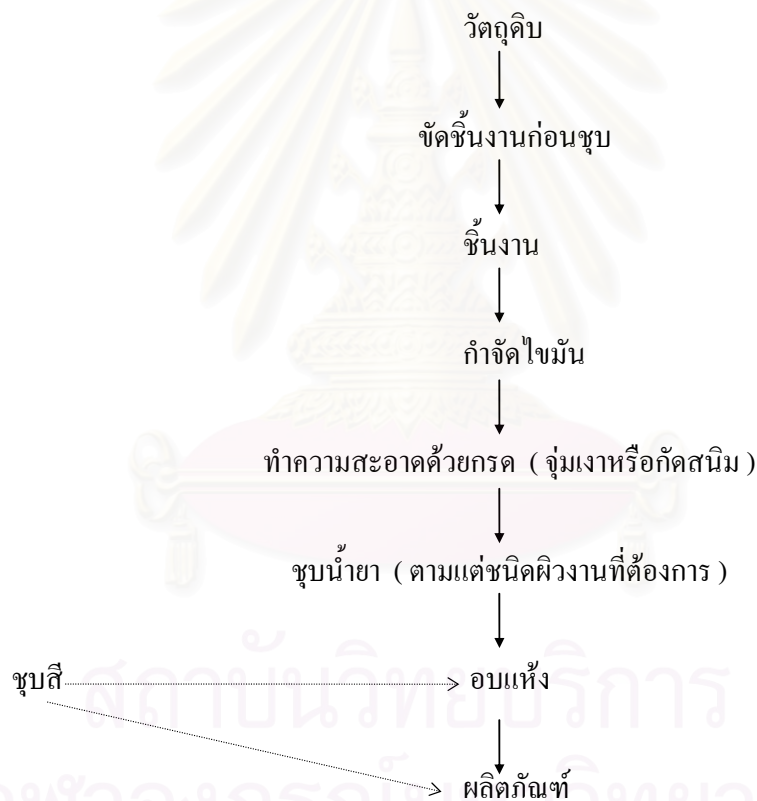
1. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C.) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) ปกติขนาดแรงเคลื่อนไม่เกิน 12 โวลท์
2. ถังบรรจุน้ำยา ซึ่งโดยทั่วไปทำด้วยเหล็กบุภายในด้วยวัสดุทนกรด ต่าง แต่อาจเลือกใช้  
อย่างอื่นดังต่อไปนี้
  - ถังโพลีทีน เหมาะในการใช้สำหรับกัดสนิมและน้ำยาชุบ
  - ถังไฟเบอร์กลาส เหมาะสำหรับน้ำล้าง หรือ กรดเจือจางแต่ไม่เหมาะกับสารที่เป็นค่า
  - สเตนเลส (นิกเกิล 18% , โครเมียม 8%) ใช้บรรจุกรดดินประสี ( $\text{HNO}_3$ ) และกรดที่มีออกซิเจนผสม เช่น กรดโครมิก ( $\text{CrO}_3$ ) และ กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ไม่เหมาะกับกรดเกลือ (HCl)
  - ถังเหล็กบุภายในด้วย PVC สามารถบรรจุน้ำยาชุบได้ทุกชนิด ที่อุณหภูมิไม่เกิน 70 องศา ถังเหล็กบุด้วยตะกั่วเหมาะกับน้ำยาชุบโครเมียม
3. ทางเดินของกระแสไฟฟ้า (Busbars) หมายถึง ทางเดินของไฟฟ้าจากเครื่องแปลงกระแส (Rectifier) ไปยังถังชุบต่างๆ โดยทั่วไปใช้ทองแดงเส้นแบน และอะลูมิเนียม
4. แอมแปร์-ชั่วโมง มิเตอร์ ใช้ควบคุมการทำงานของน้ำยาชุบ
5. เครื่องกรองน้ำยา ใช้กำจัดสิ่งสกปรกที่ปนในน้ำยา
6. บั้มลม และ ท่อจ่ายลม เพื่อกวนน้ำยาและป้องกันการเกาะของก๊าซที่ขั้วทั้งสอง
7. เครื่องทำความร้อน สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม
8. แผงควบคุมกระแสไฟฟ้า
9. อุปกรณ์ขัดชิ้นงาน เช่น แปรงขัด ผ้าขัด เครื่องขัดถึงหมุน ฯลฯ
10. เครื่องอบแห้ง หรือเครื่องเหี่ยยน้ำ

## น้ำยาชุบ

ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าแต่ละประเภท เช่น ชุบโครเมียม ชุบสังกะสี ชุบนิเกิล ชุบทองแดง ฯลฯ น้ำยาที่ใช้ในการชุบก็จะต่างกันไป นอกจากนี้ในการชุบประเภทเดียวกันก็ยังมีน้ำยาหลายสูตร

## ขั้นตอนในการชุบโลหะ

รูปแบบขั้นตอนในการชุบโลหะอย่างง่าย ประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงาน ซึ่งหมายถึง การขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาดและความเรียบตามต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน จากนั้นนำไปจุ่มกรดเพื่อกัดเอาสนิมออก แล้วนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยา ซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามกำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แสดงขั้นตอนการชุบโลหะอย่างง่าย

ความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นวัสดุชุบ และชนิดของผิวโลหะที่ต้องการ โดยวัสดุชุบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม

## การขัดชิ้นงานก่อนชุบ

แบ่งออกเป็น การขัดหยาบและการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดชิ้นแรก โดยขัดเอารอยขีดข่วนเล็กๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ลวดขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมากๆ อาจขัดโดยการใช้อ่างหมุนซึ่งมีหินขัดบรรจุภายใน

การกำจัดไขมัน ทำโดยการใช้วิธีดังต่อไปนี้

- กำจัดโดยไอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapour degreasing) โดยนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน มีการให้ความร้อนจนถึง 86 องศา จะกลายเป็นไอมากระทบกับท่อขุดทำความเย็นบริเวณปากขอบถังและชิ้นงาน ไอจะกลั่นตัวบนผิวงาน และทำการชำระล้างไขมันหรือน้ำมันลงสู่ถัง

- กำจัดโดยใช้ด่างร้อน (Soak clean) แช่ชิ้นงานในถังเหล็ก หรือสแตนเลสที่บรรจุด้วยด่าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

การทำความสะอาดด้วยกรดหรือจุ่มเงา (Pickling and dipping) เป็นการกัดสนิมเหล็ก เหล็กกล้า ออกไซด์ของทองแดง นิกเกิล และทองแดงผสมอื่น โดยใช้ความเข้มข้นของกรดกำมะถันประมาณ 5-10% หรืออาจใช้กรดเกลือ ในอัตราส่วน 1:5 โดยปริมาตร (กรด 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน) ในขั้นตอนนี้จะต้องระวังไอกรดระเหย โดยต้องมีการดูดไอพิษไปกำจัด

## ก.2 การชุบโลหะประเภทต่างๆ

### ก.2.1 การชุบทองแดง

เป็นการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกก่อนนำไปชุบอย่างอื่น เช่น ชุบงานที่มีรอยบัดกรีบนสังกะสีผสม ก่อนที่จะนำไปชุบนิกเกิล เพราะหากเอาชิ้นงานที่มีรอยบัดกรีหรืองานที่มีสังกะสีผสมอยู่ สังกะสีจะละลายในน้ำยานิกเกิลทันที การชุบทองแดงแบ่งออกเป็น การชุบทองแดงแบบต่างและแบบกรด แบบต่างมีกำลังการเคลือบผิวดีมากและการเกาะจับติดแน่น เหมาะสำหรับชุบรองพื้นชิ้นแรกก่อนชุบแบบกรด และนิกเกิลเงา งานสังกะสีหล่อไม่สามารถชุบทองแดงแบบกรดได้โดยตรง ก็ต้องนำมาชุบทองแดงแบบต่างก่อนโดยทั่วไปการชุบทองแดงแบบต่าง สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

1. แบบสไตรค์ (Strike Bath)
2. แบบร็อกเฮล (Rochelle Bath)
3. แบบมีประสิทธิภาพสูง (High efficiency Bath)

ส่วนการชุบแบบกรด มีความเงางามมาก นิยมใช้ชุบผิวโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนชุบนิเกิลเงา

หน้าที่ของส่วนผสม มีดังนี้

1. โซเดียมหรือโปตัสเซียมไฮยาไนด์ เป็นตัวช่วยนำกระแสไฟฟ้า และถ้ามีไฮยาไนด์ปริมาณน้อยกว่าที่กำหนดจะทำให้ผิวชุบวอกเป็นสีดำไม่สามารถทำงานได้
2. โซเดียมหรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ช่วยในการนำไฟฟ้าและช่วยให้ผิวชุบละลายดีขึ้น
3. คาร์บอเนต ช่วยควบคุม pH ไม่ให้เปลี่ยนแปลงได้ง่าย

### ก.2.2 การชุบนิเกิล

การชุบเคลือบนิเกิลลงบนเหล็ก ทองเหลือง และโลหะอื่นๆ นั้น เพื่อรักษาและป้องกันเนื้อโลหะ และยังทำให้ผิวดูสวยงาม ปกติจะตามด้วยการชุบโครเมียมเพราะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด ส่วนผสมของน้ำยาชุบประกอบด้วย

1. นิเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นตัวให้นิเกิลไอออน
2. นิเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นตัวให้นิเกิลไอออนและเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและช่วยให้ผิวชุบละลายดีขึ้น
3. กรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ควบคุมพีเอชไม่ให้เปลี่ยนแปลงมาก

การชุบนิเกิลสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังต่อไปนี้

1. นิเกิลด้าน (Dull Nickel) ใช้ชุบชิ้นงานที่ไม่เหมาะกับการชุบนิเกิลเงา
2. นิเกิลกึ่งเงา (Semi bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบนิเกิลเงา
3. นิเกิลเงา (Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม ทอง และ ทองเหลือง
4. นิเกิลดำ (Black Nickel) ใช้ในงานซึ่งไม่ต้องการสะท้อนแสง เช่น กรอบแว่น อวูธ
5. นิเกิลซาติน (Satin Nickel) จะได้สีเหลืองเหมือนสีแพร หรือเหลืองเหมือนผิวไข่มุกเงา
6. นิเกิลแบบหนา (Heavy electrodeposition of Nickel) ชุบชิ้นงานที่สึกหรอ

### ก.2.3 ชุบโครเมียม

การชุบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative Chromium) และชนิดแข็ง (Hard Chromium) การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดบาง จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะมาก การชุบบางโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไปและทำให้หลุดร่อนได้ การชุบทำได้โดยการรองพื้นชิ้นงานด้วยทองแดงก่อนชุบนิเกิล และรองพื้นด้วยนิเกิลก่อนชุบโครเมียมเหมาะกับชิ้นงานที่เป็นเหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสม ฯลฯ ตัวล่อโครเมียม ใช้โลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุก หรือโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง โดยอัตราส่วน

ตะกั่ว 93% กับดีบุก 7% หรือ ตะกั่ว 92% กับพลวง 8% ขั้นตอนการชุบโครเมียมบนชิ้นงานประเภทต่างๆ แสดงในรูปที่ ก.3

การชุบชนิดแข็ง (Hard Chromium) สามารถทำการชุบโดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดงหรือนิกเกิลรองพื้น คุณสมบัติของชิ้นงานหลังชุบจะมีดังนี้

- มีความแข็งและทนทาน
- ทนต่อการเกิดสนิมและทนต่อความร้อน
- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานต่ำ
- มองดูสวยงาม
- ใช้แม่เหล็กดูดได้

ขั้นตอนการชุบโครเมียมอย่างแข็ง แสดงได้ดังรูปที่ ก.4

#### ก.2.4 การชุบสังกะสี

นิยมใช้กับชิ้นส่วนของรถยนต์ การชุบชิ้นงานบนเหล็กทำได้โดยตรงไม่ต้องมีการชุบรองพื้น การชุบมีทั้งการชุบสังกะสีแบบกรด และ การชุบสังกะสีแบบด่าง การชุบแบบด่าง สามารถแบ่งได้เป็นแบบมีไซยาไนด์สูง มีไซยาไนด์ต่ำ และไม่มีไซยาไนด์ การชุบแบบกรด ไม่มีไซยาไนด์เป็นส่วนผสม

#### ก.2.5 การชุบทอง

ทอง (gold) เป็นโลหะมีค่าสูง มีสีเหลือง มีความเหนียวและอ่อน ทนต่อการเกิดออกไซด์ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี แต่จะหมองถ้าถูกสารซัลเฟอร์ทำปฏิกิริยากับคลอรีนและน้ำยาไซยาไนด์ทองมีจุดหลอมละลายที่  $1063^{\circ}\text{C}$  และละลายได้ในกรดกัดทอง (Aqua regia) ซึ่งเป็นส่วนผสมของกรดเกลือ 3 ส่วนกับกรดดินประสิว 1 ส่วน ทองพบมากแถบแอฟริกาตอนใต้ รัสเซียและทางตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศแคนาดา

การชุบทอง จากประวัติการชุบทองนี้ โดยทั่วไปแล้วจะชุบโลหะที่ไม่ใช่ทองให้เป็นทองเฉพาะบริเวณผิวนอกเพื่อความสวยงาม นักวิทยาศาสตร์ผู้ค้นพบวิธีการนี้เป็นชาวอิตาลีได้ทำการทดลองชุบทองโดยใช้กระแสไฟฟ้า ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการเกี่ยวกับการชุบเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานทางด้านต่างๆกัน เช่น งานวิศวกรรม งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อเสียอยู่อย่างหนึ่งคือ ทองเป็นโลหะที่อ่อนและมีราคาสูง และต่อมาได้มีการค้นคว้าคิดเปลี่ยนน้ำยาชุบทองแบบธรรมดาซึ่งชุบแล้วมีแต่ความสวยงาม ไม่ทนทานให้มีความทนทานมากขึ้น ได้คิดเปลี่ยนน้ำยาชุบทองให้อยู่ในรูปแบบของทองผสมกับโลหะอื่นๆ (gold alloy) ซึ่งทำให้ผิวที่ชุบแข็งและทนทานกว่าเนื้อทองธรรมดา แต่สีทองที่ได้จะเปลี่ยนไปจากเนื้อทองธรรมาคือจะได้สีที่อ่อนกว่า แต่ทนทานกว่า

ชุบบนเหล็ก	ชุบบนทองแดง-ทองเหลือง	ชุบบนสังกะสีหล่อ	ชุบบนอะลูมิเนียม
- ขัดชิ้นงาน	- ขัดชิ้นงาน	- ขัดชิ้นงาน	- ขัดชิ้นงาน
- ล้างชิ้นงาน	- ล้างชิ้นงาน	- ล้างชิ้นงาน	- ล้างด้วยไฟฟ้า
- ล้างด้วยไฟฟ้า	- ล้างด้วยไฟฟ้า	- ล้างด้วยไฟฟ้า	- ล้างน้ำ
- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- จุ่มน้ำยา Bondadip 1-2 นาที
- จุ่มกรด	- จุ่มกรด	- จุ่มกรด	- ล้างน้ำ
- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ชุบบนเกิดเงา
- ชุบบนเกิดเงา	- ชุบบนเกิดเงา	- ชุบบนทองแดงต่าง ๆ	- ล้างน้ำ
- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ชุบบนโครเมียม
- ชุบบนเกิดเงา	- ชุบบนโครเมียม	- จุ่มกรดกำมะถัน	- จุ่มถึง Drag
- ล้างน้ำ	- จุ่มถึง Drag out	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ
- ชุบบนโครเมียม	- ล้างน้ำ	- ชุบบนเกิดเงา	- อบแห้ง
- จุ่มถึง Drag out	- อบแห้ง	- ชุบบนเกิดเงา	
- ล้างน้ำ		- ล้างน้ำ	
- อบแห้ง		- ชุบบนโครเมียม	
		- จุ่มถึง Drag out	
		- ล้างน้ำ	
		- อบแห้ง	

รูปที่ ก.3 ขั้นตอนการชุบโครเมียมบนชิ้นงานประเภทต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ก.4 แสดงขั้นตอนการชุบโครเมียมอย่างแข็ง

การชุบรองพื้นก่อนชุบทอง การชุบทองจะให้สวยงามสุกใสได้ก็จะต้องทำให้โลหะที่จะชุบทองนั้นเป็นเงาสุกใสก่อน ถ้าหากชิ้นงานที่จะชุบทองไม่เป็นเงา เวลาชุบทองขึ้นมาก็ไม่เป็นเงา ฉะนั้นก่อนที่จะนำชิ้นงานไปชุบทองจึงต้องชุบรองพื้นด้วยนิเกิลเงาก่อนหรือถ้าหากชิ้นงานเป็น Zinc Diecasting ก็จำเป็นจะต้องชุบด้วยทองแดงแบบด่าง ทองแดงเงาและนิเกิลเงา แล้วจึงชุบทอง เป็นต้น ส่วนชิ้นงานเป็นทองคำอยู่แล้วไม่ต้องชุบรองพื้น

น้ำยาชุบทอง มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น น้ำยาแบบไซยาไนด์ น้ำยาแบบสภาพน้ำยาเป็นกลาง น้ำยาแบบสภาพน้ำยาเป็นกรด ในการชุบทองนั้นน้ำยาอย่างหนึ่งก็จะได้สีทองอย่างหนึ่ง แต่ถ้านำไปชุบในน้ำยาอีกชนิดหนึ่งก็จะได้สีทองอีกสีหนึ่ง ซึ่งสีทองที่ชุบนี้สีจะเข้มหรือไม่เข้มขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเกลือทองที่มีอยู่ในน้ำยานั้นๆ แต่น้ำยาชุบทองแบบไซยาไนด์ต่างๆ ไป แล้วจะชุบเพื่อความสวยงามเท่านั้นไม่เหมาะที่ชุบบนเครื่องใช้ ส่วนชิ้นงานที่ต้องการความทนทานนั้นจะต้องชุบทองชนิดหนา คือชุบทองแบบกรดให้หนาแล้วจึงชุบทองชนิดที่สีสวยตามต้องการ ทองแบบกรด เช่น ทอง 1N, 2N, 3N ซึ่งเป็นทองผสมอยู่กับเกลือ โลหะอย่างอื่นเพื่อความทนทานของทอง

### ก.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้

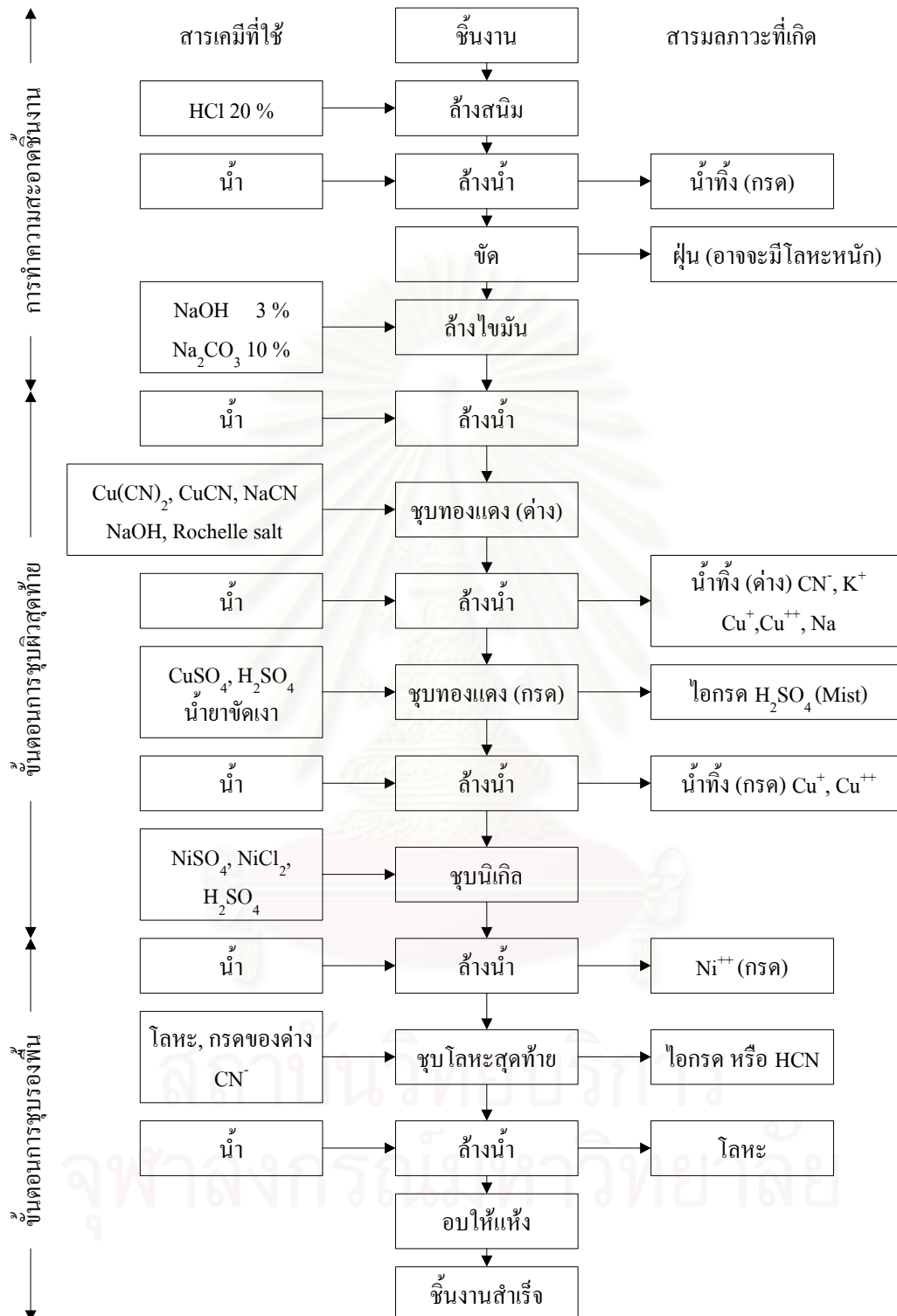
1. น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมันและน้ำมัน
2. น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม
3. น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา
4. น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
5. น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำและไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆ จึงจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำและปริมาณไม่มากนัก

สำหรับแหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ ก.5

### ก.4 ความเป็นพิษของโลหะหนัก

ความเป็นพิษของโลหะหนักเกิดจากการรบกวนเมตาโบลิซึมของเซลล์ โดยกระบวนการที่สำคัญที่สุดคือ การรบกวนการทำงานของระบบเอนไซม์ โลหะหนักที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง เช่น ทองแดง ปรอท และเงิน จะยึดจับกลุ่ม อะมิโน ( $-NH_2$ ) อิมิโน ( $>NH$ ) และซัลไฟไฮดริล ( $-SH$ ) ของเอ็นไซม์ ขัดขวางการทำงานของเอ็นไซม์ที่มีกลุ่มเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญ กลไกที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ โลหะหนักบางชนิด เช่น ทอง แคดเมียม ทองแดง ปรอท และตะกั่ว สามารถยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้คุณสมบัติในการเป็นตัวกั้นและตัวควบคุมในการลำเลียงสารต่าง ๆ ระหว่าง 2 ด้านของเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ ก.5 แสดงของเสียที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการชุบโลหะโดยทั่วไป

โลหะหนักที่มักปะปนออกมากับน้ำทิ้ง คือ

1. ทองแดง
 

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตโลหะผสมอัลลอยด์ โรงงานทำ ถ่านไฟฉาย โรงงานเชื่อมโลหะ ฯลฯ

ความเป็นพิษ : ถ้ำร่างกายได้รับมาก ๆ อาจทำให้เป็นโรคโลหิตจางได้ แต่ถ้ำร่างกาย ขาดสารชนิดนี้จะมีผลต่อการเจริญเติบโต การสร้างกระดูก การสืบพันธุ์ การสร้างเยื่อเกี่ยวพัน การทำงานของหัวใจ การสร้างเม็ดโลหิต

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของทองแดง ที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจาก โรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เหล็ก
 

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานผลิตโลหะผสมอัลลอยด์ โรงงานย้อมผ้า โรงงานเซรามิก ฯลฯ

ความเป็นพิษ : ถ้ำร่างกายได้รับมากเกินไป จะมีอาการท้องเดิน ผิวหนังมีสีของเหล็ก ถ้ำ ร่างกายขาดธาตุเหล็กจะทำให้อัตราการเติบโตลดลง ง่วงซึม อัตราการ เติบโตของหัวใจเพิ่มขึ้น ความต้านทานโรคลดลง

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจาก โรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. นิกเกิล
 

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานทำกระป๋อง โรงงานผลิตโลหะผสมอัลลอยด์ ฯลฯ

ความเป็นพิษ : โดยทั่วไปจะไม่ถูกดูดซึมผ่านทางเดินอาหารเป็นสารชักนำทำให้เกิด โรคมะเร็งในช่องจมูก โพรงจมูก และปอด จะยับยั้งกิจกรรมของ เอนไซม์เมื่อเข้าสู่ร่างกาย นิกเกิลส่วนใหญ่จะไปสะสมตามกระดูกสัน หลัง สมอ ปอด และหัวใจ พิษแบบเฉียบพลันคือ ทำให้มีอาการปวด หัว มึนงง คลื่นไส้และอาเจียน ปวดและแน่นหน้าอก ไอแห้งๆ หายใจ ขาดช่วง ตัวเขียวเพราะขาดออกซิเจน อ่อนเพลียมาก มีเลือดออกในปอด

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิล ที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจาก โรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ตะกั่ว
 

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานพิมพ์หนังสือ โรงงานทำแก้ว โรงงาน ประกอบรถยนต์พ่นสี โรงงานทำแบตเตอรี่ ฯลฯ

ความเป็นพิษ : มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และหน้าที่ของไต มีผลต่อระบบประสาท ทำให้มีเม็นชา อ่อนเพลีย ความจำเสื่อม สั่น ชัก และตายในที่สุด บางกรณีอาจทำให้กระดูกพรุน

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว ที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 5. แคลเมียม

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตโลหะผสมอัลลอยด์ โรงงานแบตเตอรี่รถยนต์ ฯลฯ

ความเป็นพิษ : มีผลต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้อาเจียน และอาจถึงตายได้ถ้ามีการสะสมในร่างกายในปริมาณที่สูง มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการระคายเคืองหลอดลม ปอด จมูกและคอ มีอาการปวดศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ เกิดเป็นโรคฮีโมโกลบินในไต มีผลต่อระบบเลือดที่เข้าสู่หัวใจ ความดันโลหิตสูง มีผลต่อระบบการสร้างเม็ดเลือด และเกิดโรคโลหิตจาง

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของแคลเมียม ที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 6. โคบอลต์

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตโลหะผสมอัลลอยด์ โรงงานเซรามิก ฯลฯ

ความเป็นพิษ : มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ จะมีอาการของโรคหอบหืด มีผลต่อผิวหนัง ทำให้เกิดอาการ คันเป็นผื่น

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของโคบอลต์ ที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 7. สังกะสี

แหล่งที่มา : โรงงานชุบโลหะ โรงงานย้อมผ้า ฯลฯ

ความเป็นพิษ : มีผลต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องร่วง ตะคริว มีผลต่อระบบการเจริญเติบโตทำให้เกิดอาการและแกรน ร่างกายไม่เจริญเติบโต

มาตรฐานน้ำทิ้ง : ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสี ที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

## ภาคผนวก ข

### การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักออกมากับน้ำทิ้ง ซึ่งสารพิษดังกล่าวเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการดังต่อไปนี้

#### ข.1 การกำจัดโลหะหนัก

##### การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้เป็นรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนส่วนประกอบของตัวทำละลายของสาร ซึ่งของแข็งที่ตกตะกอนสามารถแยกออกจากสารละลายน้ำได้โดยการตกตะกอน (settling) หรือการกรอง (filtration)

การตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นโดยความสัมพันธ์ของสถานะสมดุลระหว่างสถานะที่ละลายน้ำ และสถานะที่ไม่ละลายน้ำของสารที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งการพิจารณาถึงสถานะที่ละลายน้ำ และสถานะที่ไม่ละลายน้ำจะเกี่ยวข้องกับค่าคงที่การละลายน้ำ (solubility product constant) ที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $K_{sp}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของความพอดีที่อุณหภูมิ นั้นๆ การตกตะกอนทางเคมีจะเกิดขึ้นได้เมื่อผลคูณดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  ของสารนั้นที่อุณหภูมิที่ระบุไว้

การตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยมีกระบวนการเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง หรือหลายขั้นตอนรวมกัน กล่าวคือ

1. การเติมสารซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อยลง เกิดเป็นตะกอนขึ้น เช่น ในการกำจัดทองแดงละลายน้ำ ( $Cu^{2+}$ ) โดยการเติม โซเดียมซัลไฟด์ ( $Na_2S$ ) จะได้สารประกอบคอปเปอร์ซัลไฟด์ ( $CuS$ ) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยดังสมการ





2. การเติมสารซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของการละลาย (solubility equilibrium) ให้เลื่อนมาถึงจุดซึ่งสารที่ละลายอยู่ในน้ำไม่สามารถละลายอยู่ได้อีกต่อไปเกิดเป็นตะกอนขึ้น เช่น ในการกำจัดทองแดงโดยการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นของทองแดงจะต่ำลง และทองแดงส่วนเกินจะอยู่ในรูปตะกอนสามารถจมตัวได้ดีดังสมการ



โดยที่สมการสมดุลค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} K_{sp} &= [\text{Cu}^{+2}] [\text{OH}^{-}]^2 \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อความเข้มข้นของทองแดงละลายโดยตรง คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์โดยการเพิ่มพีเอชจะทำให้เกิดการลดความเข้มข้นของทองแดงละลายเพื่อรักษาสมดุล

3. การเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิมตัวไปในทิศทางที่ทำให้มีค่าการละลายลดลงจนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็ง เนื่องจากค่าการละลายขึ้นกับอุณหภูมิ

### ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี

1. ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ สารประกอบโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำที่ pH ต่างๆ ไม่เท่ากัน โลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก เช่น ทองแดง สังกะสี โครเมียม นิกเกิล จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจนถึง pH ค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะนั้นต่ำที่สุด และเมื่อเลย pH นี้แล้วโลหะแอมโฟเทอริกจะกลับละลายน้ำได้มากขึ้นอีกดังภาพที่ ข.1 และ ข.2

การกำจัดโลหะออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมีให้มีปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดเป็นไปได้ยาก ยกเว้นแต่จะมีกลไกอย่างอื่นร่วมด้วย เช่น มีการดูดซับไอออนของโลหะบนตะกอนเคมี เป็นต้น

2. พีเอช (pH) สารช่วยในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ pH ช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในช่วงนี้จะทำให้ผลการตกตะกอนไม่ดีเท่าที่ควร

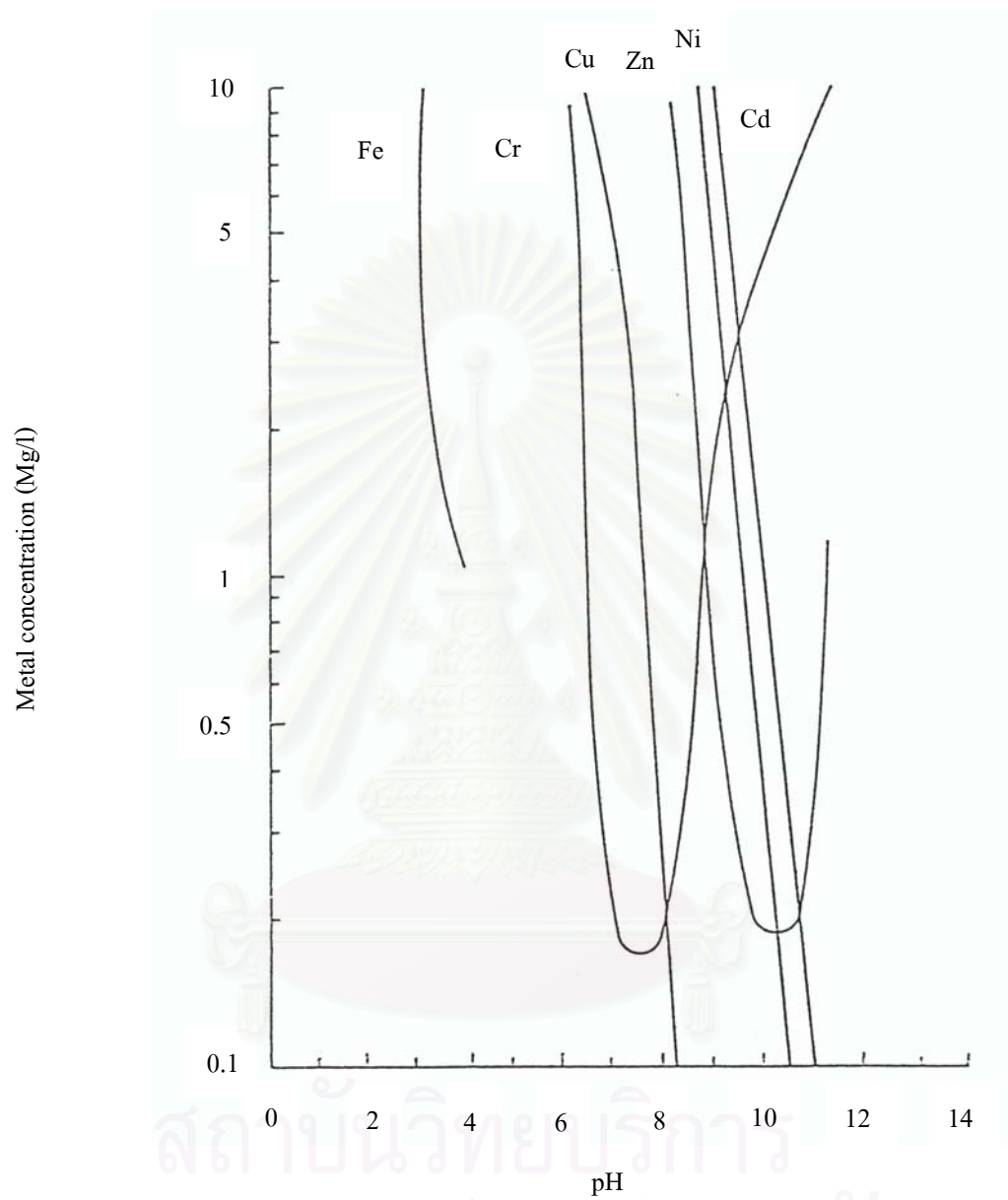
3. คุณสมบัติและชนิดของสารตกตะกอน (precipitant) สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนไม่เหมือนกัน รวมทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การละลายของไอออนโลหะ (residual metal ion solubility) ลักษณะของตะกอน ความเร็วของการตกตะกอน ราคาและความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่ต้องบำบัด

4. ปริมาณของสารตกตะกอน มีผลต่อความสามารถในการตกตะกอน เพราะในการละลายของสารประกอบใดๆ ถ้ามีค่าผลคูณของไอออน (ion product) น้อยกว่าค่า  $K_{sp}$  หรือค่าคงที่การละลายน้ำของสารนั้นแล้วสารนั้นจะไม่ตกตะกอน แต่ถ้ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  จะเกิดการตกตะกอน ดังนั้นปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้จะต้องมากพอโดยไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิด resolubilization ได้

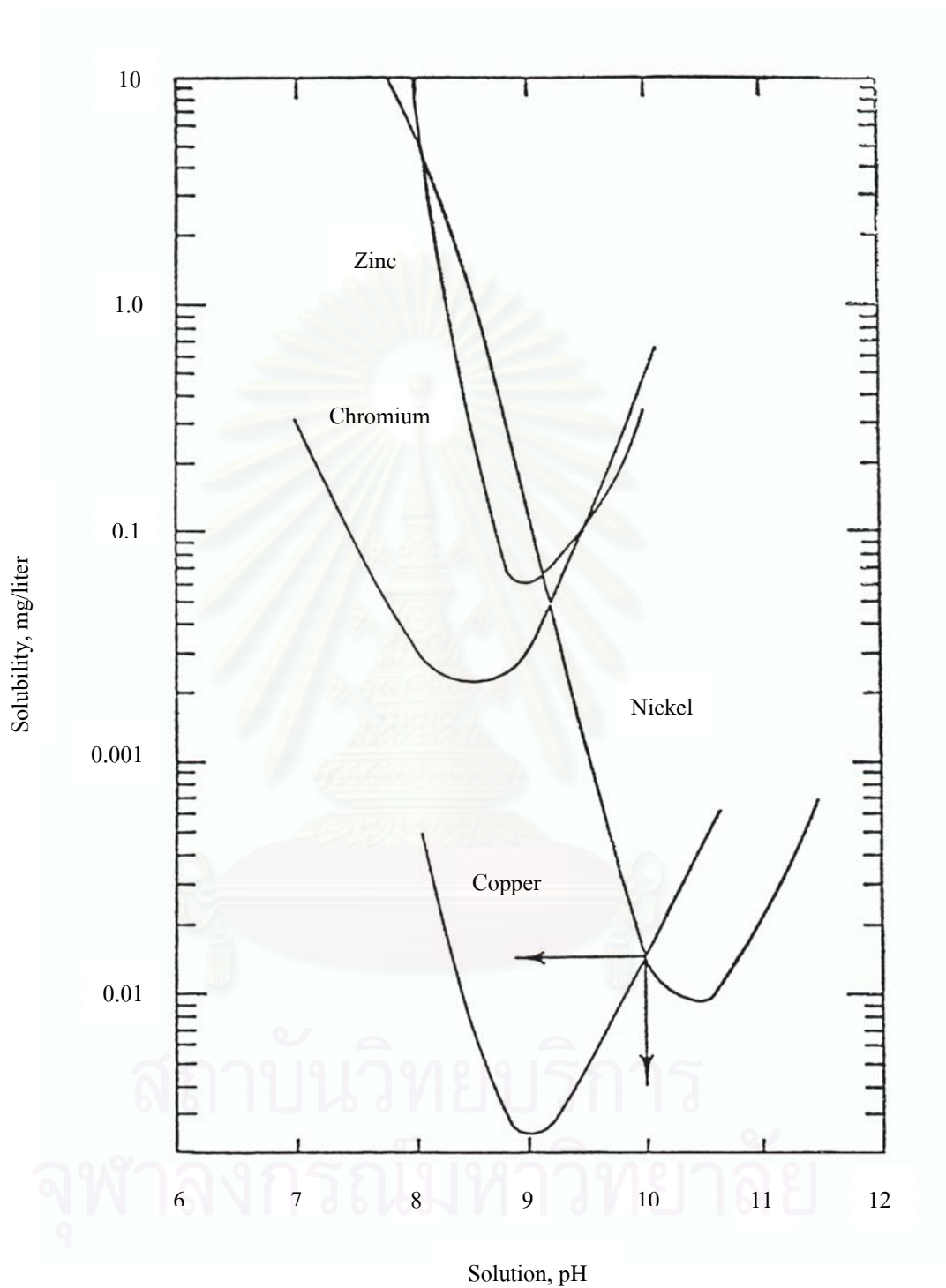
5. อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิจึงกับปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมีว่าเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน ถ้าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

6. การกวน (mixing) เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำต้องมีความเร็วที่เหมาะสม การกวนเร็ว (rapid mixing) ช่วยทำให้สารเคมีกระจายได้อย่างทั่วถึง ส่วนการกวนช้า (slow mixing) จะทำให้สารตกตะกอนทำปฏิกิริยากับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และทำให้มวลตะกอนรวมตัวเป็นตะกอนได้ดี มีความเสถียรสูงและสามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนได้ง่าย ความเร็วของการกวนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่า  $G$  (velocity gradient) สำหรับการกวนเร็วค่า  $G$  ประมาณ 100-1,000 วินาที<sup>-1</sup> กวนช้า 10-75 วินาที<sup>-1</sup> เวลาในการกวนเร็ว 30-60 วินาที กวนช้า 15-30 นาที

7. สารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) เช่น EDTA ไซยาไนต์ แอมโมเนียและสารคีเลนท์ สามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้และเสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสียซึ่งไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลง ดังเช่นสารประกอบไซยาไนต์สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับนิกเกิลในรูปของ  $\text{Na}_2[\text{Ni}(\text{CN})_4] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  นอกจากนี้โลหะหนักคอปเปอร์และนิกเกิลยังสามารถเกิดเป็นเกลือไฮดรอกไซด์ได้หลายรูปแบบ โดยในแต่ละรูปแบบจะมีความเสถียรแตกต่างกันไปซึ่งจะทำให้ค่าการละลายแตกต่างกันด้วย ดังเช่น  $\text{Cu}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$  ซึ่งในรูป  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$  เป็นรูปที่เสถียรมากที่สุด และนิกเกิลสามารถเกิดเกลือไฮดรอกไซด์ได้หลายรูปแบบ เช่น  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ni}_2(\text{OH})^{3+}$ ,  $\text{Ni}_4(\text{OH})_4^{4+}$  ซึ่งในรูป  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  เป็นรูปที่เสถียรมากที่สุด



รูปที่ ข.1 แสดงค่าความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ



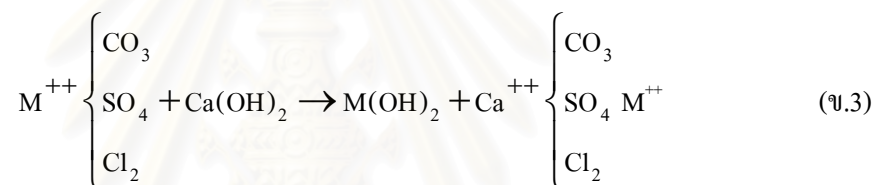
รูปที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักต่างๆ

### สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนทางเคมี (precipitant)

Eilbeck และ Mattock (1987) ได้อธิบายถึงสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการตกตะกอนทางเคมีดังต่อไปนี้คือ

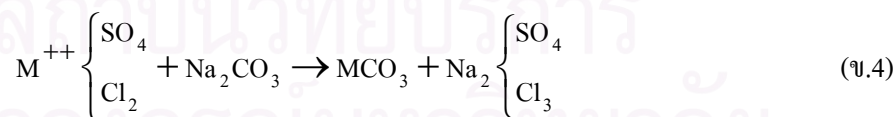
1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) หรือ Hydrated มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{Ca(OH)}_2$  เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยมากนิยมใช้ในรูป slurry ซึ่งความเข้มข้นมากที่สุด 10% น้ำหนัก/น้ำหนัก ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้ความเข้มข้นของ  $\text{Ca(OH)}_2$  15-25% การละลายและค่า pH ที่ให้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดย slurry นี้จะให้ค่ามากที่สุดเท่ากับ 12.5 ที่อุณหภูมิห้องในการใช้  $\text{Ca(OH)}_2$  นั้นต้องมีการดูแลอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเป็นพิเศษ เนื่องจากการจับตัวของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  (ตะกรันหินปูน) ภายในท่อหรือเครื่องสูบน้ำจึงต้องคำนึงถึงเรื่องการทำความสะอาดด้วย

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีโลหะละลายน้ำ (ให้  $\text{M}^{++}$  แทนโลหะประจุบวกทั้งหมด) ซึ่งจะเกิดตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ขึ้นดังสมการ



2. โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) หรือ Soda Ash มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  มีทั้งชนิดที่มีค่า bulk density สูงคือ  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  และชนิดที่มีค่า bulk density ต่ำคือ  $540 \text{ kg.m}^{-3}$  ความเข้มข้นที่นิยมใช้ประมาณ 5% การละลายน้ำของ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ถูกจำกัด โดยอุณหภูมิต่ำที่  $0^\circ\text{C}$  จะตกผลึกซึ่งสร้างผลเสียหายให้แก่ท่อ วาล์ว และเครื่องสูบน้ำ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีโลหะละลายอยู่ (ให้  $\text{M}^{++}$  แทนโลหะประจุบวกทั้งหมด)

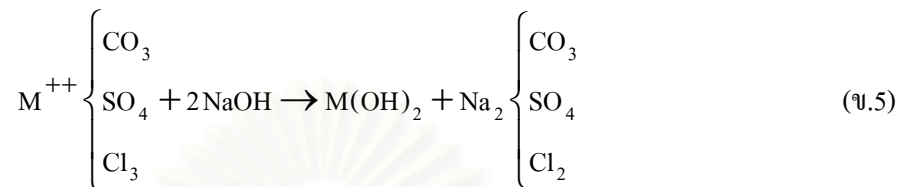


ตะกอนโลหะคาร์บอเนตจะละลายน้ำได้น้อยกว่าตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าเช่นกัน

3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) หรือ caustic soda มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{NaOH}$  นิยมใช้ทั้งในรูปของแข็ง และรูปสารละลายเข้มข้น โดยปกติในรูปสารละลายจะเข้มข้น 46.6% น้ำหนัก/น้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ 1.5 ที่  $20^\circ\text{C}$  ในทางปฏิบัตินิยมใช้ในรูปของสารละลายเจือจาง

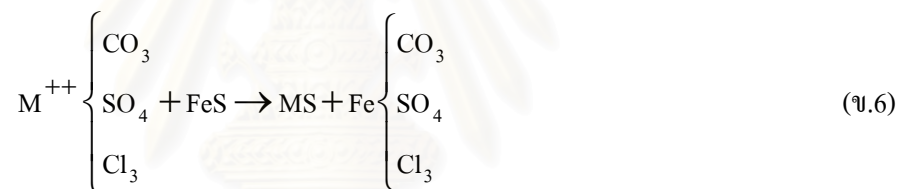
2-10% น้ำหนัก/ปริมาตร ซึ่งถ้าเข้มข้นมากกว่านี้สารละลายจะเหนียวข้นมาก และที่ความเข้มข้นสูงๆ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะตกผลึก

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อในน้ำมีโลหะละลายน้ำอยู่ (ให้  $M^{++}$  แทนโลหะประจุบวกทั้งหมด)



4. เฟอร์รัสซัลไฟด์ (ferrous sulfide) มีสูตรทางเคมีว่า FeS เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อย ในทางปฏิบัตินิยมใช้ในรูป slurry และที่ความเข้มข้นต่ำๆ ของสารละลายเฟอร์รัสซัลไฟด์ ก็เพียงพอ ในการกำจัดโลหะในน้ำเสียได้แล้ว

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อในน้ำมีโลหะละลายอยู่ (ให้  $M^{++}$  แทนโลหะประจุบวกทั้งหมด)



ตะกอนโลหะซัลไฟด์จะละลายน้ำได้น้อยกว่าตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ แต่ปัญหาที่สำคัญของการตกตะกอนโดยใช้ซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอนนั้น คือ ตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นพิษ ดังนั้นวิธีการตกตะกอนโดยใช้ซัลไฟด์ควรหลีกเลี่ยง

สำหรับหลักเกณฑ์ในการเลือกสารเคมีในการตกตะกอนนั้นควรพิจารณาดังนี้

- ต้องมีราคาถูก และหาได้ง่าย
- ต้องใช้ง่าย ไม่ยุ่งยาก
- ต้องไม่เป็นพิษต่อผู้ใช้ เช่น ไม่เกิดการระคายเคืองต่อหน้าตา ผิวหนัง เป็นต้น
- ต้องคำนึงถึงผลสุดท้ายของปฏิกิริยาว่าก่อให้เกิดตะกอนโลหะซัลไฟด์ซึ่งเป็นตะกอนที่เป็นพิษขึ้นหรือไม่



## ภาคผนวก ค

### การปรับค่าความเป็นกรดต่าง

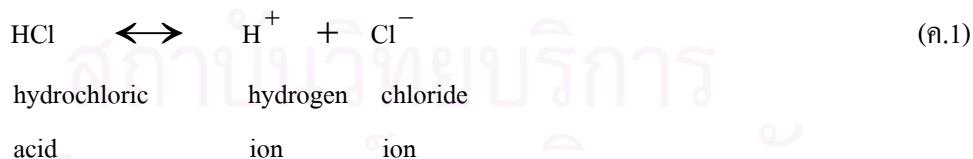
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีหลักการเกี่ยวกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง การนำไปใช้งาน การเลือกสารเคมีที่จะนำมาใช้ในการปรับค่าพีเอช เพื่อนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในการปรับสภาพของน้ำเสียให้ได้น้ำที่มีคุณภาพดีขึ้นสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

#### ค.1 ทฤษฎีและหลักการทำงาน

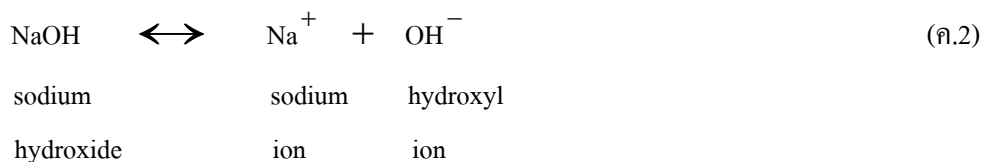
ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่างๆ จำเป็นต้องปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสม เช่น การแยก emulsion การควบคุมปฏิกิริยาทางเคมี การทำให้สารละลายตกตะกอน การบำบัดทางชีววิทยาหากต้องการปรับสภาพของน้ำเสียให้เป็นกลาง ซึ่งมีชื่อเฉพาะเรียกว่า “neutralization”

##### ค.1.1 ความหมายของการสะเทินของสารละลาย (Neutralization in Solution)

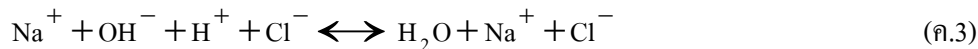
กรดละลายในน้ำสามารถทำให้สารละลายนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากประจุไอออนถูกสร้างขึ้น สมการสำหรับการไอออไนซ์เซชันของกรดไฮโดรคลอริกมีดังนี้คือ



ในทำนองเดียวกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถสร้างไอออนได้เมื่อละลายในน้ำ :

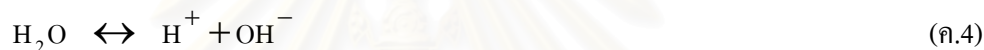


เมื่อสารละลายทั้งสองผสมกัน จะเกิดปฏิกิริยาสะเทินขึ้น ความเป็นกรด-เบสในสารละลายจะหายไป เนื่องจาก เกิดการรวมกันระหว่าง ไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลไอออนกลายเป็นน้ำ



สารละลายยังคงนำไฟฟ้าได้เพราะไอออนของโซเดียมและคลอไรด์แต่ไม่มีความเป็นกรดหรือเบส เนื่องจากจำนวนกรดและเบสเท่ากัน

เมื่อให้ HA และ BOH เป็นสูตรโดยทั่วไปของกรดและเบสตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติความเป็นกรด-เบสจะมีความเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของน้ำ เพราะน้ำมีคุณสมบัติเป็น Amphoteric คือเป็นได้ทั้งกรดและเบส เนื่องจากสามารถสร้างไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลได้ทั้งคู่



อัตราการแตกตัวกลายเป็นไอออนของน้ำเท่ากับอัตราการรวมตัวของไอออน และสมการสมดุลแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$K = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-7} \times 10^{-7} = 10^{-14} \quad \text{ที่ } 25^\circ\text{C} \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่ [ ] แทน ความเข้มข้น หน่วย โมลต่อลิตร

K คือ ค่าคงที่สมดุล

$\text{OH}^-$  เรียกว่า “ไฮดรอกซิลไอออน” จะแสดงคุณสมบัติเป็นด่าง

$\text{H}_3\text{O}^+$  เรียกว่า “ไฮโดรเนียมไอออน” และแสดงคุณสมบัติเป็นกรด บางครั้งอาจเขียนแทนด้วย  $\text{H}^+$  สำหรับกรดแก่เช่น ไฮโดรคลอริก, ไนตริก, ซัลฟูริก และเปอร์คลอริก จะมีการแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออนอย่างสมบูรณ์ทำให้น้ำมีคุณสมบัติเป็นกรดสูง

ในความเป็นจริงแล้วไฮโดรเจนไอออนจะไม่อยู่เป็นอิสระในสารละลาย แต่จะรวมตัวกับโมเลกุลของตัวทำละลาย สมการการแตกตัวของน้ำจึงเขียนในรูปแบบที่สมบูรณ์ดังนี้



### ค.1.2 ความหมายของค่า pH

Sorenson (1909) ได้นิยามค่า pH ไว้ดังนี้

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (\text{ค.7})$$

การที่สารละลายหรือของเหลวที่มีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion  $[\text{H}^+]$ ) และถ้าเป็นด่างเนื่องจากมีไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ion  $[\text{OH}^-]$ ) ดังนั้นจึงบอกค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยค่าพีเอช ซึ่งที่อุณหภูมิห้องจะได้ว่า

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (\text{ค.8})$$

การปรับสภาพของของเหลวให้เป็นกลาง คือ ค่าพีเอชเท่ากับ 7 แสดงว่ามีค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนเท่ากัน ถ้าค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าเป็นด่าง และถ้ามีค่าพีเอชน้อยกว่า 7 แสดงว่าเป็นกรด

การปรับค่าพีเอชให้ได้ค่าตามที่ต้องการสามารถทำได้โดยการใส่กรดหรือด่างลงไปในส่วนที่เหมาะสม หากเป็นการปรับสภาพให้เป็นกลาง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้แก่กับน้ำดังเช่นสมการต่อไปนี้



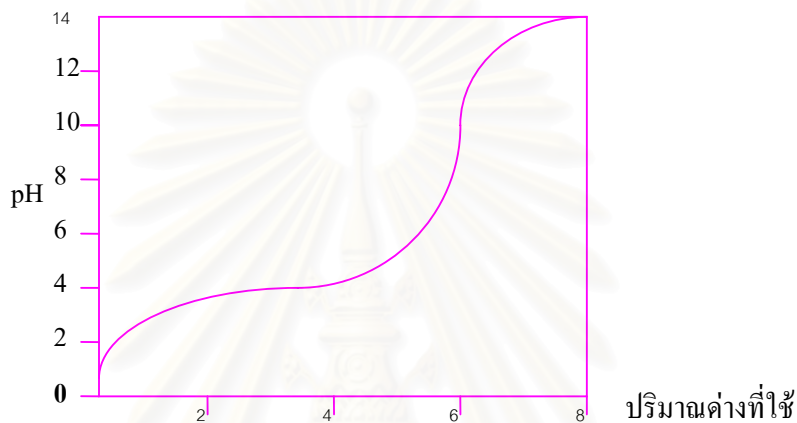
ในอุตสาหกรรมปรับสภาพน้ำเสียจะทำการทดลองจากน้ำเสียจริง เช่น ต้องการปรับสภาพน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดให้เป็นกลางจะต้องทำการไทเทรต โดยการหาค่า acidity ของน้ำเสียในหน่วย  $\text{mg/l as CaCO}_3$  แล้วจึงเติมด่างลงไปจนมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 เมื่อทราบปริมาณของด่างที่ใช้ในการทดลองก็สามารถคำนวณปริมาณที่ใช้ในระบบได้

### ค.2 การนำไปใช้งานและการควบคุมการทำงาน

การปรับค่าพีเอชสามารถทำได้ทั้งเป็นแบบครั้งหรือกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) ตามความเหมาะสมของปริมาณน้ำเสียและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แต่ถ้าออกแบบให้ทำงานเป็นครั้งจะต้องมีถังอย่างน้อย 2 ถัง นอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึงปัญหาในการควบคุมการทำงานซึ่งอาจจะต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงสุดด้วย เช่น ติดตั้งแผ่นป้องกันน้ำหมุน

(Baffle) ที่ขอบถังกลม การใช้วัสดุ หรือการเคลือบถังด้วยสารป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีที่ใช้ และการกวนน้ำจะต้องดีพอที่จะทำให้สารเคมีกระจายได้อย่างทั่วถึง

การควบคุมการทำงานแบบครึ่งหรือกะ จะต้องนำน้ำเสียมมาทำการทดลองหาค่ากรดหรือด่างที่ต้องใช้ในการปรับค่าพีเอชให้ได้ค่าตามที่ต้องการ เพื่อที่จะได้ใส่สารเคมีลงไปได้อย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ ค.1.



รูปที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามปริมาณด่างที่ใส่ลงไปทำปฏิกิริยา

สำหรับน้ำเสียที่เข้ามามีทั้งเป็นกรด หรือบางครั้งก็เป็นด่าง จะต้องมีการเติมทั้งกรดและด่าง และต้องใช้ตัวควบคุมพีเอชที่สามารถตั้งให้ทำงานได้ทั้งสองช่วง

### ค.3 การเลือกสารเคมีที่จะมาใช้ในการปรับค่าพีเอช

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้น (หรือให้เป็นด่าง) ได้แก่

CaCO <sub>3</sub>	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>
MgO	Mg(OH) <sub>2</sub>	Dolomitic quicklime
Dolomitic hydrated lime	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับ pH ให้ต่ำลง (หรือให้เป็นกรด) ได้แก่

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl
HNO <sub>3</sub>	ก๊าซ CO <sub>2</sub>

โดยทั่วไปกรดที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชมักจะใช้กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) และกรดเกลือ (Hydrochloric acid) และด่างมักจะใช้สารประกอบของ โซเดียม แมกนีเซียม และแคลเซียม

### ค.3.1 ระบบปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสภาพกรด

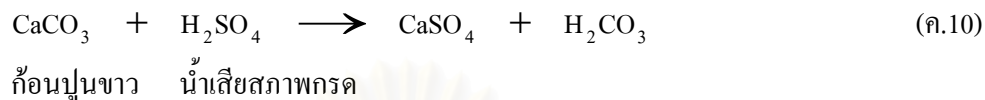
น้ำเสียสภาพกรดสามารถถูกเปลี่ยนเป็นกลางหรือด่างเล็กน้อยด้วยสารต่างๆ ซึ่งสารต่างๆ จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับราคา ความสามารถในการปรับค่าพีเอช อัตราเร็วของปฏิกิริยา การเก็บรักษาเพื่อไว้ใช้ และความเหมาะสมในการนำไปทิ้งภาคตะกอนเคมี นอกจากนี้จุดใหญ่จะต้องดู basicity factor และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารเคมีนั้น ว่าสารใดมีประสิทธิภาพในการปรับค่าพีเอชได้ดีกว่ากัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการละลายน้ำได้ของสารเคมีนั้นๆ ด้วย เพราะถ้าละลายน้ำได้ดีก็สามารถใช้ที่ความเข้มข้นสูงๆ ได้ และไม่มีปัญหาเรื่องตะกอน

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของสารเคมีเกี่ยวกับปริมาณที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาสะเทิน โดยค่า neutralization factor เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถในการทำปฏิกิริยา เมื่อเทียบกับน้ำหนักของ calcium oxide (CaO)

สารเคมี	สูตร	neutralization factor
		<u>Basicity</u>
Calcium carbonate	CaCO <sub>3</sub>	1.786
Calcium oxide	CaO	1.000
Calcium hydroxide	Ca(OH) <sub>2</sub>	1.321
Magnesium oxide	MgO	0.720
Magnesium hydroxide	Mg(OH) <sub>2</sub>	0.041
Dolomitic quick lime	(CaO) <sub>0.6</sub> (MgO) <sub>0.4</sub>	0.888
Dolomitic hydrated lime	[Ca(OH) <sub>2</sub> ] <sub>0.6</sub> [Mg(OH) <sub>2</sub> ] <sub>0.4</sub>	1.209
Sodium hydroxide	NaOH	1.427
Sodium carbonate	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.891
		<u>Acidity</u>
Sulfuric acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.750
Hydrochloric acid	HCl	1.285
Nitric acid	HNO <sub>3</sub>	1.125

- การใช้ก้อนปูนขาว (Limestone Treatment)

การใช้ก้อนปูนขาวในการปรับ pH ของน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด จะมีปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในสมการ (ค.10)



ระบบนี้มีข้อดีที่พวกปูนขาวหรือหินปูนมีราคาถูก แต่ข้อเสียก็คือจะละลายน้ำได้น้อย ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการควบคุมการทำงานสูง เนื่องจากต้องจ่ายเข้าระบบในรูปของ sulfite มีความเข้มข้นไม่เกิน 14 % อีกทั้งหากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มากกว่า 6000 ppm. จะทำให้เกิดตะกอนของ calcium sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ) มากเกินควร ซึ่งไปปกคลุมบริเวณผิวก้อนปูนขาวจนหมดประสิทธิภาพในการปรับค่าพีเอช และนอกจากนั้นระบบนี้ไม่สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มีอะลูมิเนียม ( $\text{Al}^{+3}$ ) หรือเหล็ก ( $\text{Fe}^{+3}$ ) มาก ก็จะทำให้เกิดปัญหาเช่นเดียวกัน คือเกิดตะกอนเคมีของไฮดรอกไซด์ของพวก Al หรือ Fe ปกคลุมผิวก้อนปูนขาว อายุการทำงานของก้อนปูนขาวจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียและสภาพความเป็นกรดของน้ำเสีย

- การใช้น้ำปูนขาว (Lime Slurry Treatment)

การใช้น้ำปูนขาวในการปรับ pH ของน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดจะมีปฏิกิริยาเคมีเหมือนกับของการใช้ก้อนปูนขาว วิธีนี้อาจใช้ระบบการเพิ่มความร้อนหรือระบบการเติมอากาศเข้าไปเพื่อให้ประสิทธิภาพของการปรับ pH ได้สูงขึ้น

- การใช้โซดาไฟ (Caustic soda/Sodium hydroxide treatment)

แม้โซดาไฟจะเป็นสารที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการปรับ pH ได้รวดเร็ว และใช้ปริมาณน้อยกว่าแต่มีราคาแพงกว่าปูนขาว และข้อดีของสารเคมีนี้คืออย่างหนึ่งคือผลของปฏิกิริยาจะมีสภาพละลายและไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณความกระด้างแก่แหล่งรองรับน้ำทิ้งนี้

- การใช้ด่างประเภทอื่น ๆ

ในการใช้ด่างซึ่งเป็นองค์ประกอบ magnesium เพื่อปรับสภาพของกรดกำมะถัน เช่น magnesium oxide, magnesium carbonate, magnesium hydroxide จะได้ผลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเป็น magnesium sulfate ซึ่งละลายน้ำได้ และไม่เกิดปัญหาเหมือนการใช้ calcium

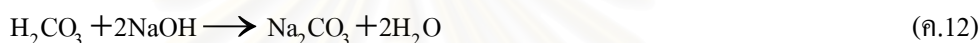
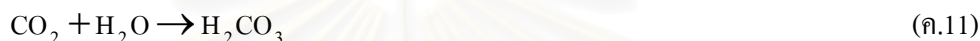


### ค.3.2 ระบบปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียสภาพต่าง

น้ำเสียสภาพต่างสามารถถูกเปลี่ยนเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อยด้วยกรดต่างๆ ซึ่งกรดที่จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว สำหรับการปรับค่าพีเอชด้วยด่างนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และการใช้กรดกำมะถัน (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสภาพต่างให้เป็นกลาง

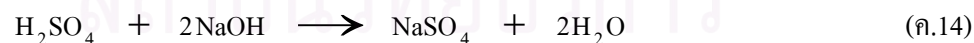
#### ● การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Treatment)

การใช้ในการปรับ pH ของน้ำเสียสภาพต่างจะมีปฏิกิริยาเคมีดังสมการข้างล่าง สำหรับระบบการเติมก๊าซก็จะทำเหมือนกับระบบบำบัดอากาศด้วยเครื่องอัดอากาศของระบบเดิมอากาศในถังทั่วไป



#### ● การใช้กรดกำมะถัน (Sulfuric Treatment)

การใช้กรด H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ในการปรับ pH ของน้ำเสียที่มีสภาพต่างจะมีปฏิกิริยาเคมี การใช้กรดกำมะถันจะนิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาถูก แต่อาจเกิดผลเสียได้เนื่องจากไปทำปฏิกิริยากับสารบางอย่างเกิดเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ เช่น calcium sulfate เกาะอยู่ตามท่อและผนังของถัง ส่วนผลของปฏิกิริยาของกรดเกลือในส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ดี แต่ต้องระวังอีกว่า ถ้าเป็นกรดที่มีความเข้มข้นสูงๆ จะยังเพิ่มการดูแลเก็บรักษาสารเคมีที่ยุ่งยากมากขึ้น เพราะจะกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นในการใช้กรดกำมะถันอาจจำเป็นต้องทำการทดลองกับน้ำเสียจริงในห้องปฏิบัติการเสียก่อน เพื่อหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการเติมผสมลงไปอย่างเหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป และเหมาะสมกับน้ำเสียที่จะถูกนำไปเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต่อไป



เติมกรด            น้ำเสียที่มี  
เพื่อปรับ pH    สภาพต่าง

การปรับสภาพน้ำให้เป็นกลางอาจพิจารณาด้วยการจัดการ โดยนำน้ำเสียจากส่วนที่เป็นกรดมาผสมกับส่วนที่เป็นด่างภายในโรงงานเองถ้าสามารถทำได้ หรือใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากปล่องอากาศเสียเพื่อลดค่าพีเอช ปฏิกิริยาในการปรับค่าพีเอชเป็นแบบที่ให้ความร้อนออกมา (Exothermic) ดังนั้นจึงต้องวางแผนการทำงานและใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยัง อาจเกิดควัน (เช่น กรดเกลือ) เกิดกลิ่น ฯลฯ ซึ่งจะทำอันตรายต่อคนและ โครงสร้างใกล้เคียงได้

## ภาคผนวก ง

### ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

#### เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 55 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติพ.ศ. 2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษและโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมออกสู่สิ่งแวดล้อม ไว้ดังต่อไปนี้

#### ข้อ 1 ในประกาศนี้

“ โรงงานอุตสาหกรรม ” หมายความว่า โรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน

“ นิคมอุตสาหกรรม ” หมายความว่า นิคมอุตสาหกรรมตามกฎหมายว่าด้วยนิคมอุตสาหกรรม หรือโครงการที่จัดไว้สำหรับการประกอบการอุตสาหกรรมที่มีการจัดการระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมกัน

“ น้ำเสีย ” หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปน หรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

“ น้ำทิ้ง ” หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของโรงงานรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในนิคมอุตสาหกรรมด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 ให้กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 1 ไว้ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value) ระหว่าง 5.5 – 9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

- 2.1 ดีเอส ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ อาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2.2 น้ำทิ้ง ซึ่งจะระบายออกจากโรงงาน ลงสู่แหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่าที่ดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ดีเอสที่มีอยู่ใน แหล่งน้ำกร่อยหรือทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. แขนวลอย (Suspended Solids) ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ อาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือ ประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำทิ้งที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะไม่เกิน 40 องศา C
5. สีหรือกลิ่น (Color or Odor) เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะแล้วไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. โลหะหนักมีค่าดังนี้
- 8.1 สังกะสี (Zn) ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.2 โครเมียม ชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.3 โครเมียม ชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium) ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.4 อาร์เซนิก (As) ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.5 ทองแดง (Cu) ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.6 ปรอท (Hg) ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.7 แคดเมียม (Cd) ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.8 แบเรียม (Ba) ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.9 เซเลเนียม (Se) ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.10 ตะกั่ว (Pb) ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.11 นิกเกิล (Ni) ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 8.12 แมงกานีส (Mn) ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. น้ำมันและไขมัน (Fat Oil and Grease) ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

10. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
11. สารประกอบฟีนอล (Phenols) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
12. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
13. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide) ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด

14. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

15. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Demand) ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

16. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรม ต้องเป็นไปตาม ข้อ 2 เว้นแต่ค่า บีโอดี ต้องมีค่าไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 และ จากนิคมอุตสาหกรรมตามข้อ 3 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)
2. การตรวจสอบค่าทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้งระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง
3. การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท (Titrate)
6. การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิทูริกแอซิด (Pyridine – Barbituric Acid)
7. การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้
  - 7.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคลเดียม แบเรียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตเมตตรี (Atomic

Absorption Spectrophotometry) ชนิดไดเรกต์แอสไพเรชัน (Direct Aspiration) หรือวิธีพลาสมา อิมัลชัน พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

7.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิก และ เซเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์ เจนเนอเรชัน (Hydride Generation) หรือ วิธีพลาสมา อิมัลชัน สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิลด์ พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

7.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน โคลด์ เวปอร์เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour Technique)

8. การตรวจสอบน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

9. การตรวจสอบค่าฟอรัมาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)

10. การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอลให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี 4 – อิมิโนแอนติไพรีน (Distillation , 4 – Aminoantipyrine )

11. การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method)

12. การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas – Chromatography)

13. การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วันติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษให้ความเห็นชอบ

14. การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)

14. การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลายโดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

ข้อ 5 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากนิคมอุตสาหกรรม ตามข้อ 4 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Assosiation, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ข้อ 6 วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ความถี่ และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา



## ภาคผนวก จ

### การแก้สมการคณิตศาสตร์ในกระบวนการวิศวกรรมเคมี โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

กระบวนการในทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการ ซึ่งเรียกว่าแบบจำลองกระบวนการ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ต่างๆ เช่น สมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดา (Ordinary differential equation-ODE) ซึ่งรูปแบบสมการทั่วไปสำหรับสมการอนุพันธ์อันดับที่  $n$  ใด ๆ เป็น

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (\text{จ.1})$$

โดยที่ค่า  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  เป็นค่าคงที่

$f(t)$  เป็นค่าของอินพุตหรือตัวรบกวนที่ใส่ลงไปในระบบ (forcing function or disturbance)

$y(t)$  เป็นค่าที่ตอบสนองออกมาจากระบบที่เวลา  $t$

โดยทั่วไปจะสนใจระบบที่มีสมการอนุพันธ์อันดับที่  $n=1$  และ  $n=2$

สมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 (first order differential equation) มีรูปแบบสมการทั่วไปเป็น

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (\text{จ.2})$$

สมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second order differential equation) มีรูปแบบสมการทั่วไปเป็น

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (\text{จ.3})$$



สมการอนุพันธ์ดังกล่าวสามารถหาคำตอบได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ อันได้แก่วิธีของรังกัตตา (Runge-Kutta Method) ซึ่งสามารถแก้สมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี เนื่องมาจากบางครั้งไม่สามารถหาฟังก์ชันที่แน่นอนสำหรับ  $y' = \frac{dy}{dx} = f(t, y)$  โดยวิธีการอินทิเกรตเทคนิคแบบธรรมดาได้ (analytical technique)

### จ.1 วิธีการของออยเลอร์ (Euler's method)

วิธีการของออยเลอร์จัดเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและมีความถูกต้องน้อยที่สุด ในการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง หลักการที่ใช้คือการประมาณฟังก์ชัน โดยใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่ง (First-Order Taylor's Series Expansion) พิจารณาการประมาณค่าของฟังก์ชัน  $f(x)$  ที่ตำแหน่งใดๆ โดยใช้อนุกรมเทเลอร์

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + hf'(x_i) + \frac{h^2}{2!} f''(x_i) + \dots + \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(x_i) \quad (จ.4)$$

เมื่อ  $h = x_{i+1} - x_i$  หรือระยะห่างระหว่างจุด  $x_i$  กับ  $x_{i+1}$  (step size)

เนื่องจาก  $y = f(x)$  ดังนั้นถ้าให้  $y_{i+1} = f(x_{i+1}), y_i = f(x_i), y'_i = f'(x_i)$  วิธีการของออยเลอร์พิจารณาจากสมการ (จ.4) จะได้

$$y_{i+1} = y_i + hy'_i \quad (จ.5)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่า  $y_{i+1}$  แล้วสามารถนำไปใช้เพื่อหาค่าอื่นต่อไปเช่น

$$y_{i+1} = y_i + hy'_i \quad (จ.6)$$

กล่าวได้ว่าวิธีการของออยเลอร์นี้ก็คือวิธีการของรังกัตตาอันดับหนึ่ง (first-order Runge - Kutta method)

### จ.2 วิธีการของรังกัตตา (Runge-Kutta Methods)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง วิธีการของรังกัตตามีด้วยกันหลายรูปแบบ ที่ใช้กันมากคือรังกัตตาอันดับ 2 และ 4 (2<sup>nd</sup>-order และ 4<sup>th</sup>-order Runge-Kutta) ที่อยู่ในรูปแบบ explicit รูปแบบ implicit ของวิธีการนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากความยุ่งยากในการคำนวณมีค่อนข้างมาก

พิจารณาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (\text{จ.7})$$

จัดสมการให้อยู่ในรูป

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (\text{จ.8})$$

กำหนดสถานะเริ่มต้น (initial condition):  $t = t_0, y = y_0$

อัลกอริทึมของรังกัดตาอันดับที่ 2 เพื่อแก้สมการหา  $y(t)$  คือ

$$k_1 = hf(y_0, t_0) \quad (\text{จ.9})$$

$$k_2 = hf\left(y_0 + \frac{k_1}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \quad (\text{จ.10})$$

$$y_1 = y_0 + k_2 \quad (\text{จ.11})$$

$$t_1 = t_0 + h \quad (\text{จ.12})$$

$h$  คือช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นของตัวแปรอิสระ  $t$

ในการเพิ่มความถูกต้องของการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สามารถทำได้ โดยใช้สมการการอินทิเกรตของรังกัดตาที่อันดับสูงขึ้น เช่น วิธีการของรังกัดตาอันดับ 4 จะใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์ที่มีทั้งอนุพันธ์อันดับ 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> และ 4<sup>th</sup> ในการประมาณฟังก์ชัน  $f(t, y)$

อัลกอริทึมของรังกัดตาอันดับที่ 4 เพื่อแก้สมการหา  $y(t)$  คือ

$$k_1 = hf(y_0, t_0) \quad (\text{จ.13})$$

$$k_2 = hf\left(y_0 + \frac{k_1}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \quad (\text{จ.14})$$

$$k_3 = f\left(y_0 + \frac{k_2}{2}, t_0 + \frac{dt}{2}\right) \quad (\text{จ.15})$$

$$k_4 = hf(y_0 + k_3, t_0 + h) \quad (\text{จ.16})$$

$$y_1 = y_0 + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6 \quad (\text{จ.17})$$

$$t_1 = t_0 + dt \quad (\text{จ.18})$$

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ไม่ว่าจะเป็นอนุพันธ์อันดับใดก็ตามเราสามารถที่จะแปลงให้อยู่ในรูปของสมการ ODEs อันดับ 1 ได้ ตัวอย่างเช่นสมการอนุพันธ์อันดับ 2

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = f(t) \quad (จ.19)$$

แปลงสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์อันดับ 1 สองสมการ โดยกำหนดให้

$$y_1 = y \text{ และ } y_2 = \frac{dy_1}{dt} = \frac{dy}{dt} \quad (จ.20)$$

ดังนั้น

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 \quad (จ.21)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -\frac{a_0}{a_2} y_1 - \frac{a_1}{a_2} y_2 + \frac{1}{a_2} f(t) \quad (จ.22)$$

กรณีที่ตัวแปรตามเป็น  $y_1, y_2$  และตัวแปรอิสระเป็น  $t$  จัดสมการให้อยู่ในรูป

$$\frac{dy_1}{dt} = f(y_1, y_2, t) \quad (จ.23)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = f(y_1, y_2, t) \quad (จ.24)$$

วิธีการ Runge-Kutta จะเขียนได้ในรูป

$$k_1 = hf_1(y_{10}, y_{20}, t_0) \quad (จ.25)$$

$$l_1 = hf_2(y_{10}, y_{20}, t_0) \quad (จ.26)$$

$$k_2 = hf_1\left(y_{10} + \frac{k_1}{2}, y_{20} + \frac{l_1}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \quad (จ.27)$$

$$l_2 = hf_2\left(y_{10} + \frac{k_1}{2}, y_{20} + \frac{l_1}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \quad (จ.28)$$

$$k_3 = hf_1\left(y_{10} + \frac{k_2}{2}, y_{20} + \frac{l_2}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \quad (จ.29)$$

$$l_3 = hf_2\left(y_{10} + \frac{k_2}{2}, y_{20} + \frac{l_2}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \quad (\text{จ.30})$$

$$k_4 = hf_1(y_{10} + k_3, y_{20} + l_3, t_0 + h) \quad (\text{จ.31})$$

$$l_4 = hf_2(y_{10} + k_3, y_{20} + l_3, t_0 + h) \quad (\text{จ.32})$$

$$y_{11} = y_{10} + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6 \quad (\text{จ.33})$$

$$y_{21} = y_{20} + (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)/6 \quad (\text{จ.34})$$

$$t_1 = t_0 + dt \quad (\text{จ.35})$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ความควบคุมได้, ความสังเกตได้ และเสถียรภาพของระบบ

ในบทนี้กล่าวถึงการทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น (Linearization of Nonlinear Systems) โดยทำการประมาณค่าของเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นรอบจุดใดๆ โดยใช้อนุกรมเทเลอร์ และกล่าวถึงคุณสมบัติของกระบวนการที่จะทำการควบคุมซึ่งจำเป็นต้องตรวจสอบก่อนที่จะลงมือควบคุม คุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ ความควบคุมได้ (controllability), ความสังเกตได้ (observability) และเสถียรภาพของระบบที่ทำการควบคุม (system stability)

#### จ.1 การประมาณเชิงเส้นของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

##### (Linearization of Nonlinear System)

ในการทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น เราสามารถทำได้โดยการประมาณค่าของเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นรอบจุดใด ๆ โดยใช้อนุกรมเทเลอร์ ดังนี้

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad (\text{จ.1})$$

โดยที่  $x_0$  เป็นจุดที่ทำการประมาณ

ในกรณีที่ตัวแปรมากกว่า 1 เราสามารถทำการประมาณเชิงเส้นได้ดังนี้

$$f_1(x, y) \approx f_1(x^s, y^s) + \frac{df_1}{dx} /_{(x_s, y_s)} (x - x^s) + \frac{df_1}{dy} /_{(x_s, y_s)} (y - y^s) \quad (\text{จ.2})$$

$$f_2(x, y) \approx f_2(x^s, y^s) + \frac{df_2}{dx} /_{(x_s, y_s)} (x - x^s) + \frac{df_2}{dy} /_{(x_s, y_s)} (y - y^s) \quad (\text{จ.3})$$

โดยในที่นี้จะทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดสถานะคงที่ (steady state)

ในการทำให้ระบบที่ทำการควบคุมเป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = f[x(t), u(t)] \quad (จ.4)$$

โดยที่  $x$  คือ เวกเตอร์สเตท (ตัวแปรที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ทั้งหมด)

$u$  คือ เวกเตอร์ตัวแปรปรับ

ซึ่งจะทำการประมาณเชิงเส้นรอบจุดใดจุดหนึ่ง (โดยทั่วไปคือจุดที่ภาวะคงที่) โดยใช้อนุกรมเทเลอร์จะได้

$$\frac{dx}{dt} \approx f(x^s, u^s) + \frac{df}{dx} /_{(x_s, u_s)} (x - x^s) + \frac{df}{du} /_{(x_s, u_s)} (u - u^s) \quad (จ.5)$$

กำหนดให้

$$\delta x = x - x_s \text{ และ } \delta u = u - u_s \quad (จ.6)$$

ซึ่งจะได้

$$\delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_s \text{ และ } \dot{x}_s = f(x_s, u_s) \quad (จ.7)$$

ดังนั้นสมการ (จ.5) เขียนได้เป็น

$$\delta \dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x} /_{(x_s, u_s)} \delta x + \frac{\partial f}{\partial u} /_{(x_s, u_s)} \delta u \quad (จ.8)$$

หรือ

$$\delta \dot{x} = A \delta x + B \delta u \quad (จ.9)$$

โดยที่

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (จ.10)$$



$$B = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (\text{ฉ.11})$$

ตัวอย่าง การทำการประมาณเชิงเส้นของกระบวนการควบคุมพีเอชของถังตกตะกอนโลหะนิกเกิลและถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dC_{OH,out}}{dt} = \frac{1}{V} (F_{in} (C_{OH,in} - C_{OH,out}) + F_b (C_{OH,b} - C_{OH,out})) - N_2 r_{OH} \quad (\text{ฉ.12})$$

$$\frac{dC_{OH,out2}}{dt} = \frac{1}{V} (F_{in} (C_{OH,out} - C_{OH,out2}) + F_b (C_{OH,out} - C_{OH,out2}) - F_a (C_{OH,out2} + C_{Ha})) \quad (\text{ฉ.13})$$

$$\frac{dC_{Ni,out}}{dt} = \frac{1}{V} (F_{in} (C_{Ni,in} - C_{Ni,out}) - F_b C_{Ni,out}) - N_1 r_{Ni} \quad (\text{ฉ.14})$$

เมื่อ  $r_{OH} = k_1 C_{Ni,out} C_{OH,out}^2 \quad (\text{ฉ.15})$

$$r_{Ni} = k_1 C_{Ni,out} C_{OH,out}^2 \quad (\text{ฉ.16})$$

สามารถทำการประมาณเชิงเส้นหรือเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเตตสเปซในรูปของสมการ

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (\text{ฉ.17})$$

$$y = Cx \quad (\text{ฉ.18})$$

ดังนั้นสมการ (ฉ.12)-(ฉ.14) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{113} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} u \quad (\text{ฉ.19})$$

$$y = [c_{11} \quad c_{12} \quad c_{13}] x \quad (\text{ฉ.20})$$

ตัวอย่าง การหาค่าสมาชิกของเมตริกซ์ A, B และ C ได้ดังนี้

เมตริกซ์ A

$a_{11} = \frac{1}{V}(-F_{in} - F_b) - 2Nk_1 C_{Ni,out} C_{OH,out}$	$a_{12} = 0$	$a_{13} = -N_2 k_1 C_{OH,out}^2$
$a_{21} = \frac{1}{V}(F_{in} + F_b)$	$a_{22} = \frac{1}{V}(-F_{in} - F_b - F_a)$	$a_{23} = 0$
$a_{31} = -2Nk_1 C_{Ni,out} C_{OH,out}$	$a_{32} = 0$	$a_{33} = \frac{1}{V}(-F_{in} - F_b) - N_1 k_1 C_{OH,out}^2$

เมตริกซ์ B

$b_{11} = \frac{1}{V}(C_{OH,b} - C_{OH,out})$	$b_{12} = 0$
$b_{21} = \frac{1}{V}(C_{OH,out} - C_{OH,out2})$	$b_{22} = \frac{1}{V}(-C_{OH,out2} - C_{Ha})$
$b_{31} = -\frac{1}{V}(C_{Ni,out})$	$b_{32} = 0$

เมตริกซ์ C

$c_{11} = 1$	$c_{12} = 0$	$c_{13} = 0$
$c_{21} = 0$	$c_{22} = 1$	$c_{23} = 0$

เมตริกซ์ D

$d_{11} = 0$	$d_{12} = 0$	$d_{13} = 0$
$d_{21} = 0$	$d_{22} = 0$	$d_{23} = 0$
$d_{31} = 0$	$d_{32} = 0$	$d_{33} = 0$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ณ สภาวะตามตารางที่ 4.1 จะได้ค่า A, B, C ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -5.3995e-1 & 0 & -1.8000 \\ 5.0258e-1 & -5.0509e-1 & 0 \\ -7.4744e-2 & 0 & -4.1025 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 9.9499e-5 & 0 \\ 4.9995e-7 & -1.0000e-4 \\ -5.1905e-9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

## ฉ.2 ความควบคุมได้ (Controllability)

ในการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบโกลบอลลีนีเยอร์ใดซึ่งเวลาจะเริ่มทำการออกแบบตัวควบคุมควรทำการตรวจสอบความควบคุมได้ (controllability) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าระบบที่ต้องการควบคุมนี้สามารถควบคุมได้หรือไม่โดยการปรับตัวแปรปรับที่กำหนดให้

การพิจารณาว่าเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้หรือไม่นั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าแรงค์ (rank) ของเมตริกซ์ของความควบคุมได้ (controllability matrix) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ

$$\text{Controllability Matrix} = [ B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B ] \quad (\text{ฉ.21})$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนตัวแปรสแตต ถ้าค่านี้มีค่าเท่ากับฟูลแรงค์ (full rank) หรือขนาดของเมตริกซ์เดียวกันแล้วระบบนี้จะเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวแปรปรับกระบวนการที่เลือกไว้

สำหรับในกรณีที่เมตริกซ์ความควบคุมได้ไม่เป็นเมตริกซ์จัตุรัสค่าแรงค์ของเมตริกซ์สามารถหาได้จากการหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) ของเมตริกซ์นั้น ถ้าค่าดีเทอร์มิแนนต์ไม่เท่ากับศูนย์ค่าแรงค์จะเท่ากับขนาด หรือค่าแรงค์ของเมตริกซ์สามารถหาโดยตรวจสอบว่าแต่ละแถวใดๆ ไม่สามารถถูกแทนที่ด้วยแถวอื่นได้ซึ่งแสดงถึงว่า สมการไม่ขึ้นต่อกันดังนั้นค่าแรงค์เท่ากับขนาด

ตัวอย่าง สำหรับระบบที่ใช้ในการจำลองการควบคุมนี้ มีค่า  $n = 3$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{Controllability Matrix} = [B \ AB \ A^2B]$$

โดยที่

$$AB = \begin{bmatrix} -5.5157e-1 & 0 & -1.7605 \\ 5.0258e-1 & -5.0509e-1 & 0 \\ -6.1328e-3 & 0 & -4.0237 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.9499e-5 & 0 \\ 4.9995e-7 & -1.0000e-4 \\ -5.1905e-9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -5.3716e-5 & 0 \\ 4.9754e-5 & 5.0509e-5 \\ -7.4157e-6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A^2B = \begin{bmatrix} 4.2608e-1 & 0 & 8.3565 \\ -5.2522e-1 & 2.5511e-1 & -9.0464e-1 \\ 3.4700e-1 & 0 & 1.6965e+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.9499e-5 & 0 \\ 4.9995e-7 & -1.0000e-4 \\ -5.1905e-9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 4.2352e-5 & 0 \\ -5.2127e-5 & -2.5512e-5 \\ 3.4438e-5 & 0 \end{bmatrix}$$

Controllability Matrix =

$$\begin{bmatrix} 9.9499e-5 & 0 & -5.3716e-5 & 0 & 4.2353e-5 & 0 \\ 4.9995e-7 & -1.0000e-4 & 4.9754e-5 & 5.0509e-5 & -5.2127e-5 & -2.5512e-5 \\ -5.1915e-9 & 0 & -7.4157e-6 & 0 & 3.4439e-5 & 0 \end{bmatrix}$$

แรงค์ของ Controllability Matrix มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ พูลแรงค์

ดังนั้น ระบบจะสามารถควบคุมได้ นั่นคือ ตัวแปรปรับที่เลือกไว้ คือ  $F_u$  และ  $F_b$  สามารถควบคุมระบบได้

### ฉ. 3 ความสังเกตได้ (observability)

ในการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับการประมาณค่าสเททและพารามิเตอร์เวลาจะเริ่มออกแบบตัวควบคุมควรทำการตรวจสอบความสังเกตได้ (observability) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าเอาท์พุทที่เลือกมาจะสามารถนำไปทำนายค่าสเททหรือพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดไม่ได้ของระบบได้หรือไม่ เนื่องจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าสเททและพารามิเตอร์จะสามารถนำมาใช้กับระบบที่ซึ่งเอาท์พุทสามารถวัดได้และเชื่อถือได้เท่านั้น (ทั้งนี้เอาท์พุทที่วัดค่าได้ต้องเป็นเอาท์พุทที่ทำให้ระบบที่สนใจสามารถสังเกตได้) ทำได้โดยการหาเมตริกซ์ความสังเกตได้ (observability matrix) ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$\text{Observability Matrix} = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T)^2 C^T \quad \dots \quad (A^T)^{n-1} C^T] \quad (\text{ฉ.22})$$

ถ้าสามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นฟูลเรงก์ (full rank) หรือค่าดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) หากค่าได้ไม่เท่ากับศูนย์แล้วค่าตัวแปรเอาท์พุทที่เลือกมานี้สามารถที่จะนำไปทำนายค่าสเททและพารามิเตอร์ต่างๆ ได้

ตัวอย่าง สำหรับระบบที่ใช้ในการจำลองการควบคุมนี้ มีค่า  $n = 3$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{Observability Matrix} = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T)^2 C^T]$$

โดยที่

$$A^T C^T = \begin{bmatrix} -5.3995e-1 & 5.0258e-1 & -7.4744e-2 \\ 0 & -5.0509e-1 & 0 \\ -1.8000 & 0 & -4.1025 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -5.3995e-1 & 5.0258e-1 \\ 0 & -5.0509e-1 \\ -1.8000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(A^T)^2 C^T = \begin{bmatrix} 4.2608e-1 & -5.2522e-1 \\ 0 & 2.5512e-1 \\ 8.3565 & -9.0464e-1 \end{bmatrix}$$

observability Matrix =

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -5.3995e-1 & 5.0258e-1 & 4.2690e-1 & -5.2522e-1 \\ 0 & 1 & 0 & -5.0509e-1 & 0 & 2.5512e-1 \\ 0 & 0 & -1.8000 & 0 & 8.3566 & -9.0464e-1 \end{bmatrix}$$

แรงค์ของ observability Matrix มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ พูลแรงค์

ดังนั้น ระบบจะสามารถสังเกตได้ นั่นคือ สามารถวัดความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน,  $C_{OH,out}$  ในถังตกตะกอนนิเกิลและความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน,  $C_{OH,out2}$  ในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง หรือสามารถวัดค่าพีเอช, pH ของถังตกตะกอนนิเกิลและพีเอช,  $pH_2$  ในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลาง แล้วสามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนในการประมาณค่าสเตรทหรือพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดได้หรือไม่ทราบค่าแน่นอนของระบบนี้ได้

#### ฉ.4 เสถียรภาพของระบบ (System Stability)

ในการตรวจสอบดูว่าระบบนั้นๆ มีเสถียรภาพหรือไม่สามารถดูได้จากค่าของโพลของลูปเปิด (open-loop pole) หรือค่าไอเก้น (eigen value) ของระบบนั้นว่าอยู่ทางซ้ายหรือทางขวาของแกนเชิงซ้อน ถ้าโพลอยู่ทางซ้ายของแกนเชิงซ้อนหรือค่าไอเก้นมีค่าเป็นลบก็แสดงว่าระบบนั้นๆ มีเสถียรภาพ แต่ถ้ามีโพลค่าใดค่าหนึ่งของระบบอยู่ทางขวาของแกนเชิงซ้อนหรือค่าไอเก้นค่าใดค่าหนึ่งเป็นลบแสดงว่าระบบนั้นๆ ไม่มีความเสถียร

พิจารณาระบบที่อยู่ในรูปของสมการสเตรทสเปซดังสมการที่ (ฉ.17) ในการหาค่าโพลของระบบเริ่มต้นจากสมการ

$$\dot{x} = Ax \tag{ฉ.23}$$



ถ้าให้คำตอบของสมการเป็น

$$x = ke^{\lambda t} \quad (\text{จ.24})$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (จ.24)

$$\dot{x} = \lambda ke^{\lambda t} \quad (\text{จ.25})$$

แทนค่าสมการ (จ.24) และ (จ.25) ใน (จ.23)

$$\lambda ke^{\lambda t} = Ake^{\lambda t} \quad (\text{จ.26})$$

จะได้ว่า

$$\lambda x = Ax \quad (\text{จ.27})$$

$$\lambda x = Ax \quad (\text{จ.28})$$

$$(\lambda I - A)x = 0 \quad (\text{จ.29})$$

$$\therefore \det(\lambda I - A) = 0 \quad (\text{เมื่อ } x \neq 0) \quad (\text{จ.30})$$

ดังนั้น ค่า  $\lambda$  ที่ได้คือค่าของโพลของรูปเปิดหรือค่าไอเก้นของระบบที่ทำการควบคุม

ตัวอย่าง สำหรับระบบที่ใช้ในการจำลองการควบคุมนี้

$$A = \begin{bmatrix} -5.3995e-1 & 0 & -1.8000 \\ 5.0258e-1 & -5.0509e-1 & 0 \\ -7.4744e-2 & 0 & -4.1025 \end{bmatrix}$$

$$\text{Eigen value} = \begin{bmatrix} -5.0509e-1 \\ -5.0258e-1 \\ -4.1400 \end{bmatrix}$$

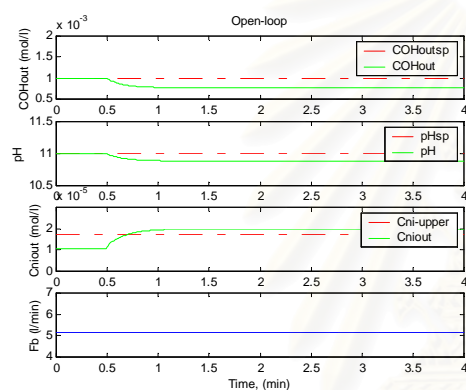
ดังนั้น ระบบรูปเปิดมีเสถียรภาพ เนื่องจากค่าไอเก้นของระบบทุกค่ามีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงอยู่ทางซ้ายของแกนเชิงซ้อน

## ภาคผนวก ข

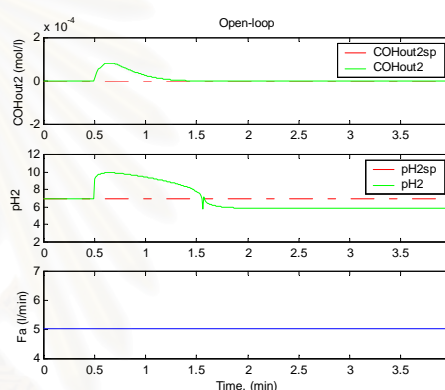
### กราฟแสดงผลการควบคุม

#### 1. การตอบสนองของกระบวนการในกรณีที่ไม่มี การควบคุม (Open-loop Response)

- เมื่อมีตัวแปรบกวนระบบ  $F_{in} +30\%$

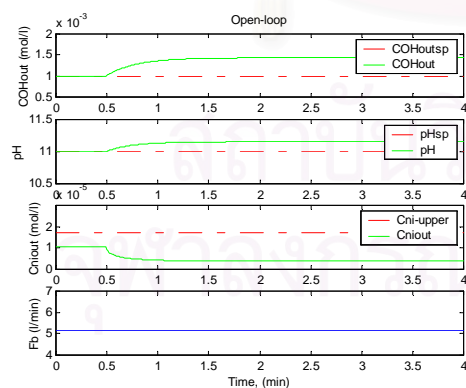


ช.1 ถึงตกตะกอนนิเกิด

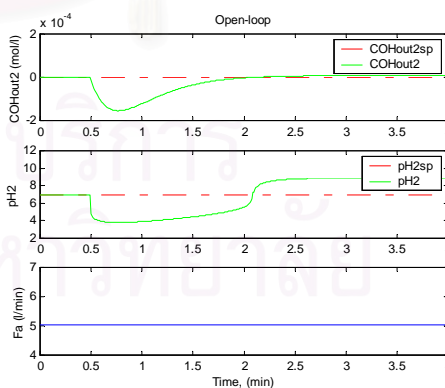


ช.2 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- เมื่อมีตัวแปรบกวนระบบ  $F_{in} -30\%$

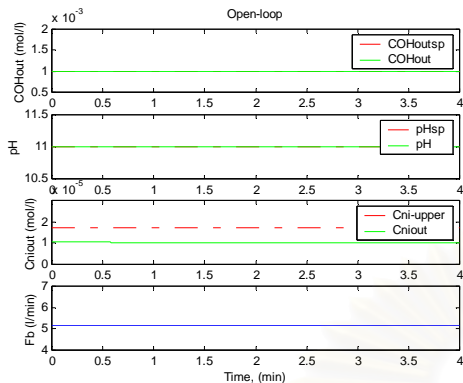


ช.3 ถึงตกตะกอนนิเกิด

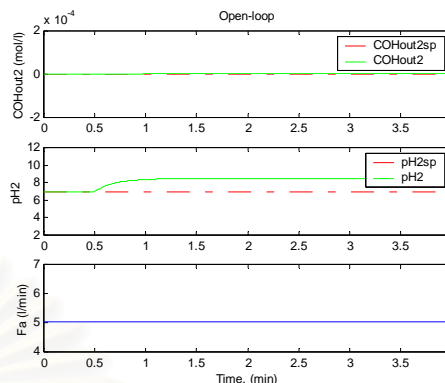


ช.4 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

● เมื่อมีตัวแปรบกวนระบบ  $C_{OH,in} +30\%$

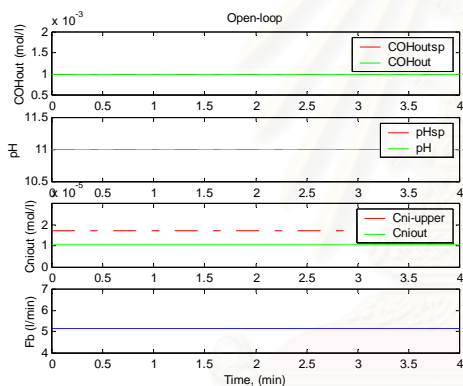


ช.5 ถึงตกตะกอนนิเกิล

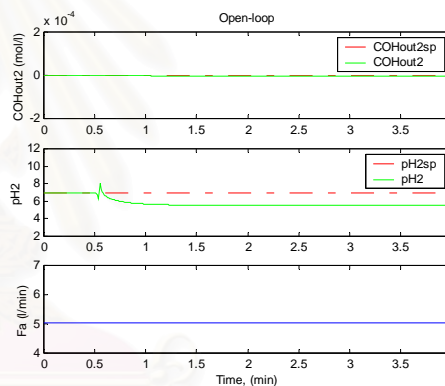


ช.6 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

● เมื่อมีตัวแปรบกวนระบบ  $C_{OH,in} -30\%$

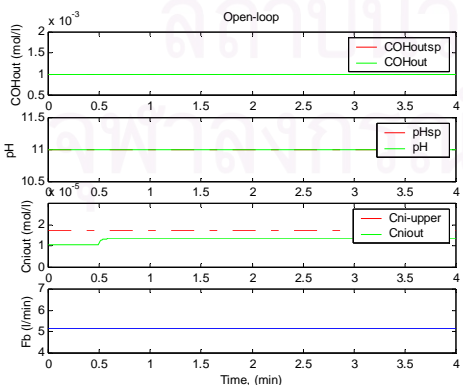


ช.7 ถึงตกตะกอนนิเกิล

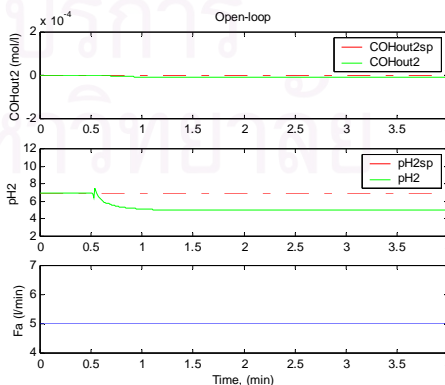


ช.8 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

● เมื่อมีตัวแปรบกวนระบบ  $C_{Ni,in} +30\%$

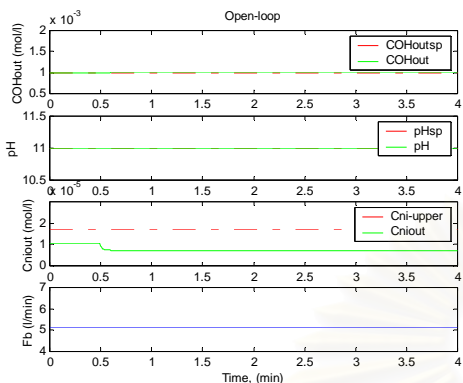


ช.9 ถึงตกตะกอนนิเกิล

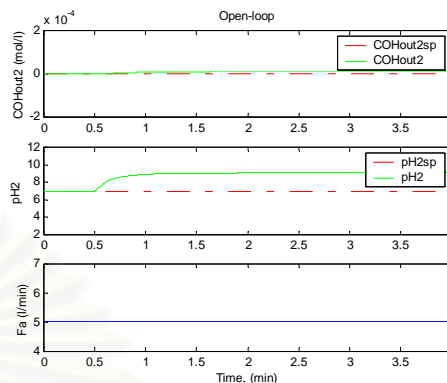


ช.10 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- เมื่อมีตัวแปรบกวนระบบ  $C_{Ni,in} -30\%$



ช.11 ถึงตกตะกอนนิเกิล



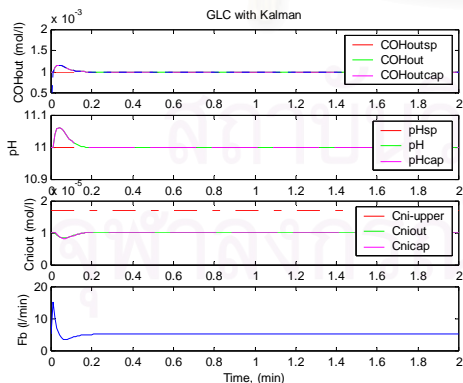
ช.12 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

## 2. การตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการควบคุม (Closed-loop Response)

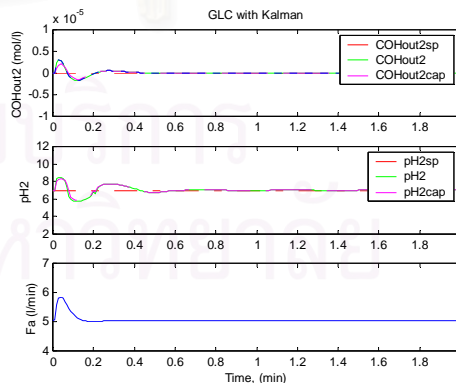
2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์ไรซิงร่วมกับ การประมาณค่าแบบคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี

2.1.1 การควบคุมในกรณีที่สภาวะคงที่

การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์ไรซิงร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

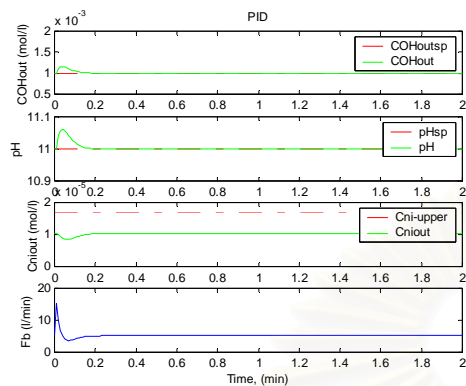


ช.13 ถึงตกตะกอนนิเกิล

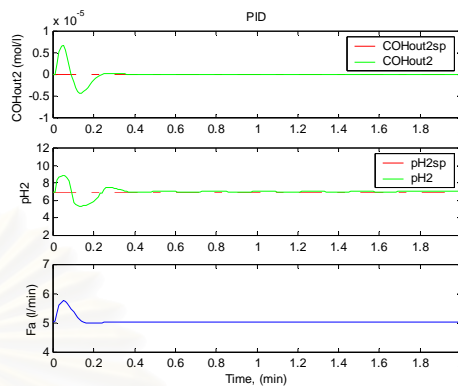


ช.14 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

การควบคุมแบบพี ไอ ดี



ช.15 ถึงตกตะกอนนิเกิล

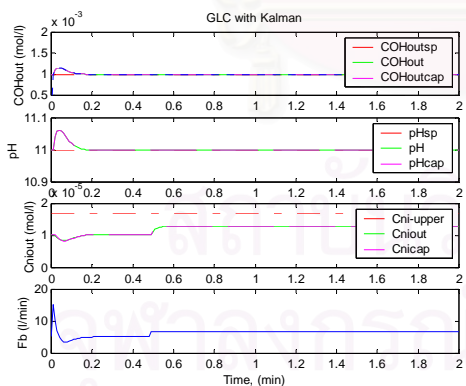


ช.16 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

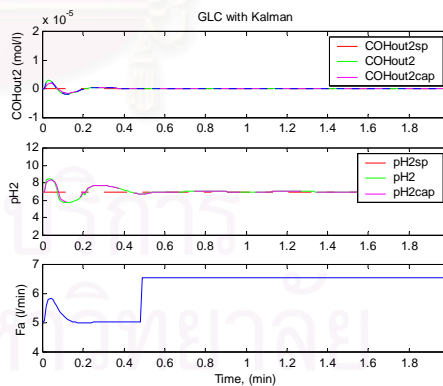
2.1.2 การควบคุมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบกวน

- ค่าอัตราการไหลขาเข้าตั้งของน้ำเสีย,  $F_{in} + 30\%$

การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

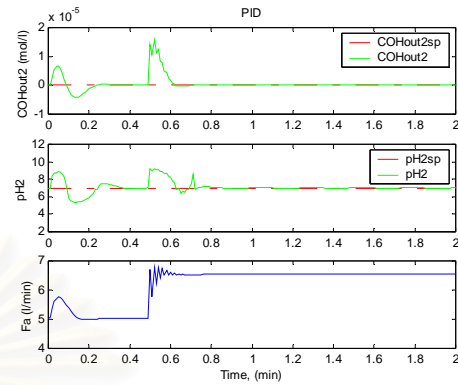
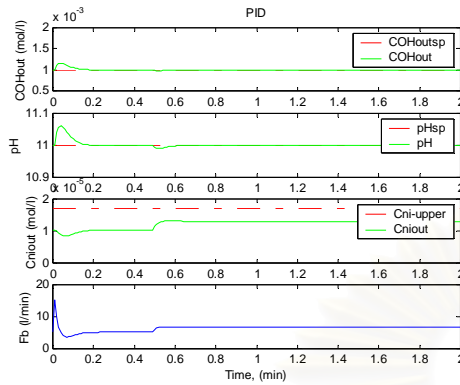


ช.17 ถึงตกตะกอนนิเกิล



ช.18 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

การควบคุมแบบพีไอดี

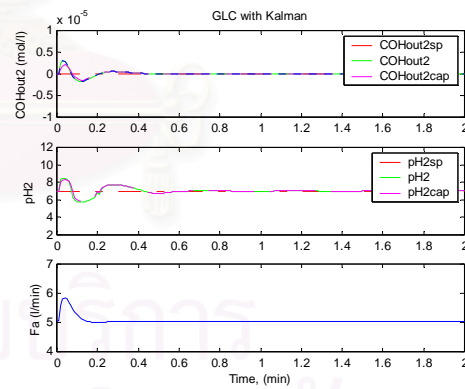
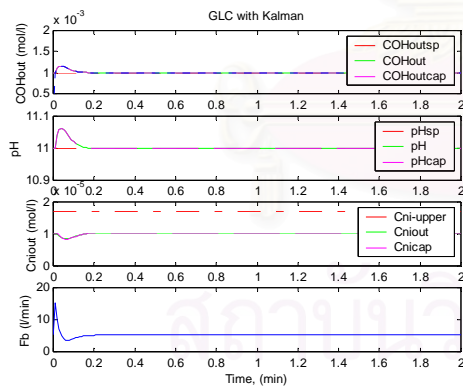


ช.19 ถึงตกตะกอนนิเกิล

ช.20 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- ค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียก่อนเข้าถึง,  $C_{OH,in} + 30\%$

การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

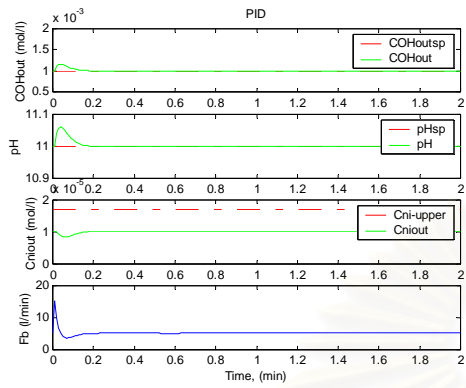


ช.21 ถึงตกตะกอนนิเกิล

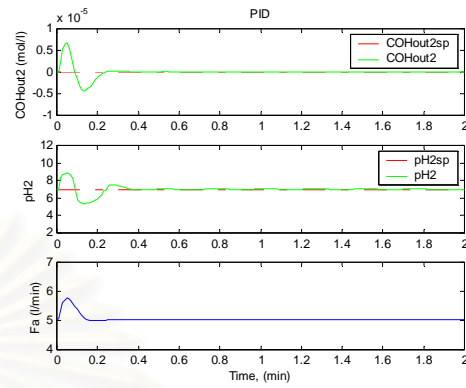
ช.22 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง



การควบคุมแบบพีไอ



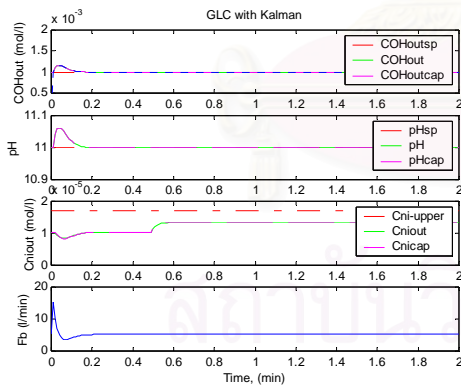
ช.23 ถึงตกตะกอนนิเกิล



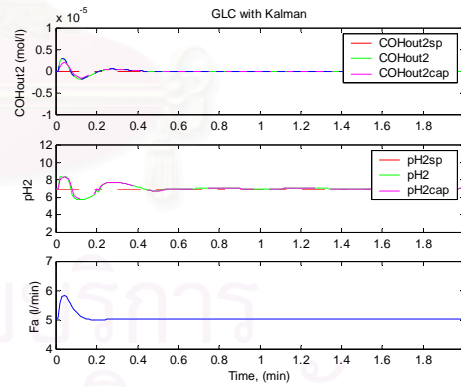
ช.24 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- ค่าความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียก่อนเข้าถัง,  $C_{Ni,in} + 30\%$

การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์โรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

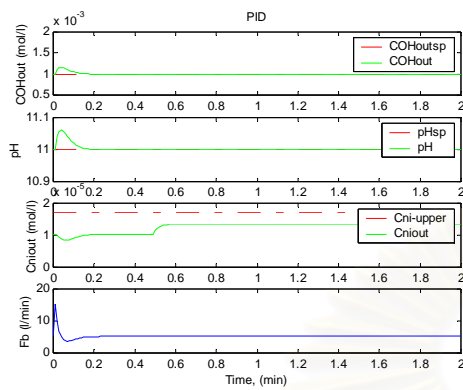


ช.25 ถึงตกตะกอนนิเกิล

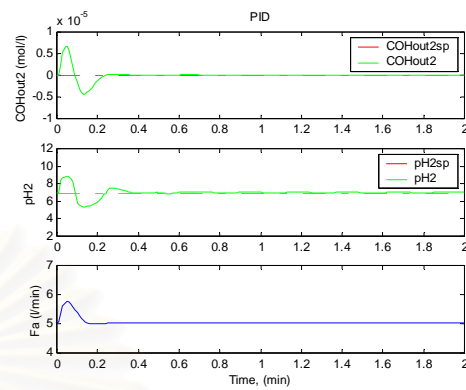


ช.26 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

การควบคุมแบบพีไอ



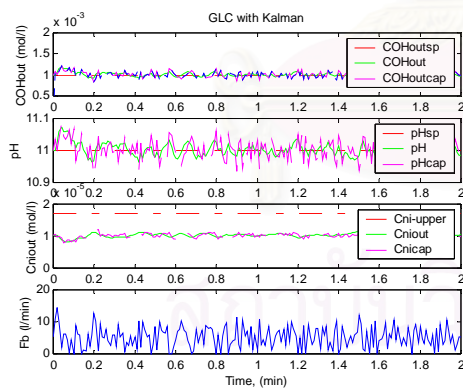
ช.27 ถึงตกตะกอนนิเกิล



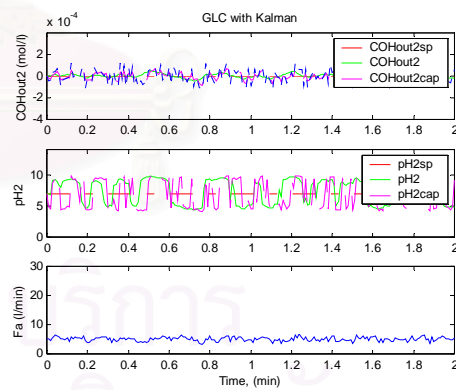
ช.28 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

2.1.3 การควบคุมในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนตัวแปรวัด

การควบคุมแบบโกลบอลลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

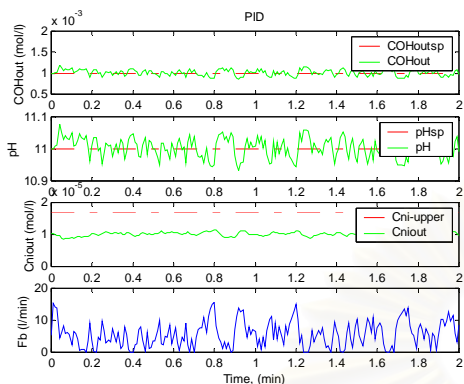


ช.29 ถึงตกตะกอนนิเกิล

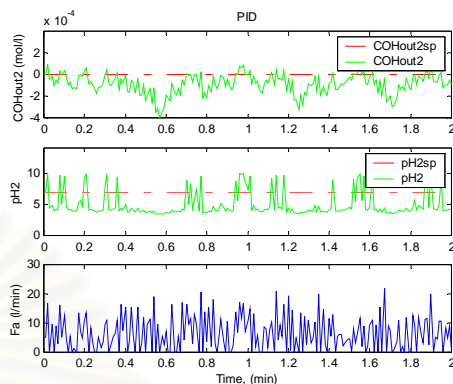


ช.30 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

การควบคุมแบบพีไอดี



ช.31 ถึงตกตะกอนนิเกิล



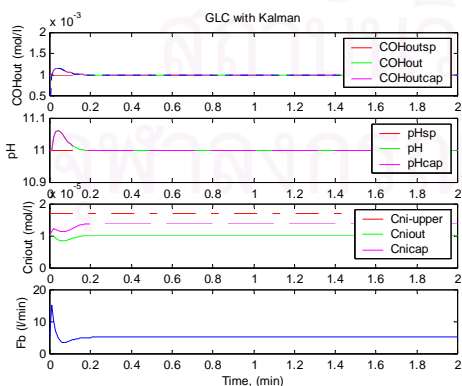
ช.32 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

2.2 การเปรียบเทียบความทนทานของการควบคุมระหว่างการควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์ไร้ซึ่ง  
ร่วมกับการประมาณค่าแบบคาลมานฟิลเตอร์ กับการควบคุมแบบพีไอดี

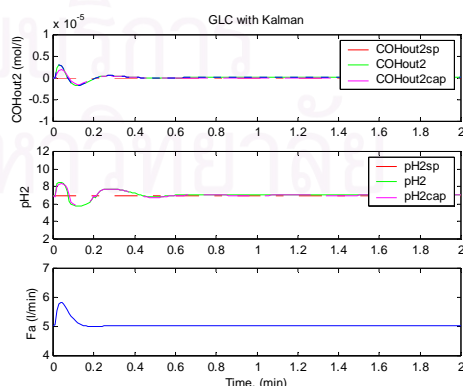
2.2.1 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของตัวควบคุม (Model-Mismatch)

- ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา,  $k_1$  - 30%

การควบคุมแบบ โกลบอลลีลิเนียร์ไร้ซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



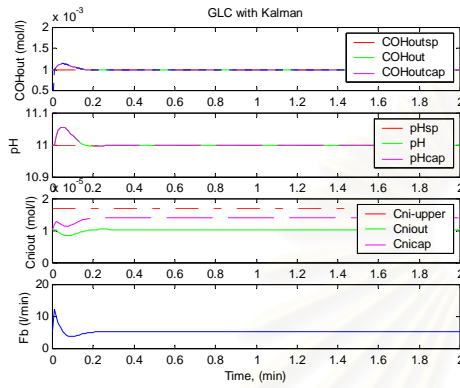
ช.33 ถึงตกตะกอนนิเกิล



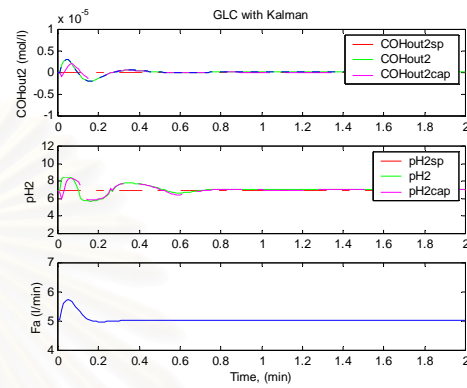
ช.34 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- ค่าปริมาตรของถัง,  $V = 30\%$

การควบคุมแบบโกลบอลลีสตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



ช.35 ถึงตกตะกอนนิเกิล

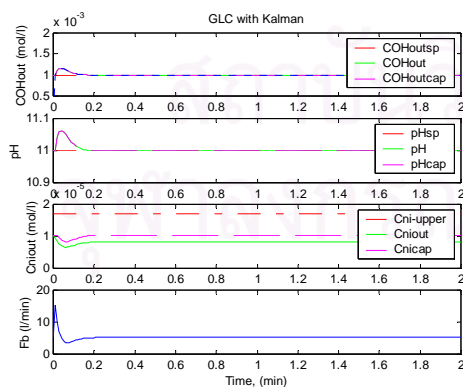


ช.36 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

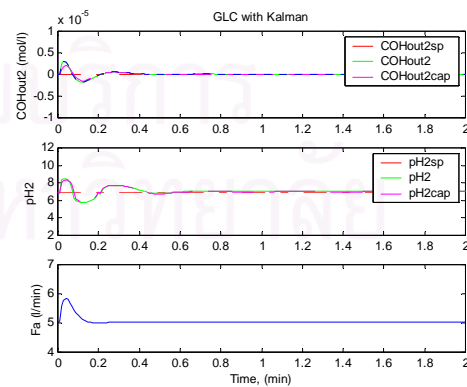
## 2.2.2 การควบคุมในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการ (Plant-Mismatch)

- ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา,  $k_1 + 30\%$

การควบคุมแบบโกลบอลลีสตีเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

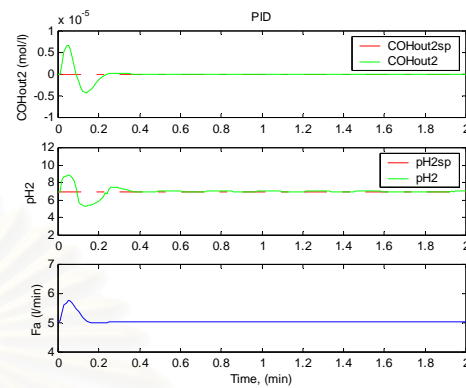
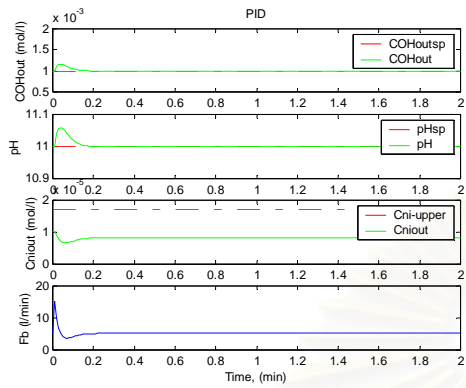


ช.37 ถึงตกตะกอนนิเกิล



ช.38 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

การควบคุมแบบพีไอดี

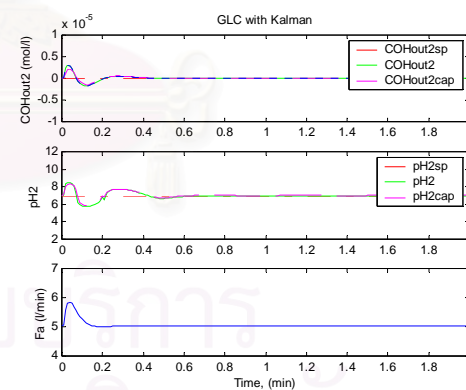
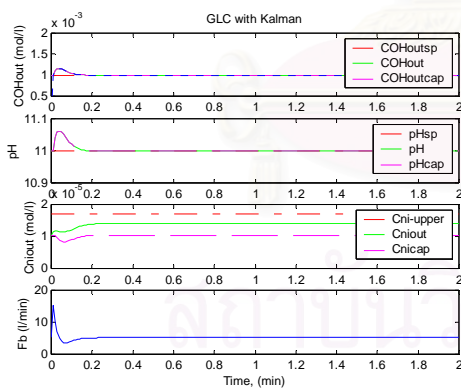


ช.39 ถึงตกตะกอนนิเกิล

ช.40 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา,  $k_1$  - 30%

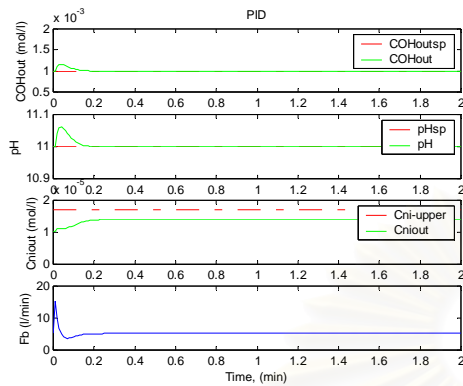
การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์ไรซิงร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



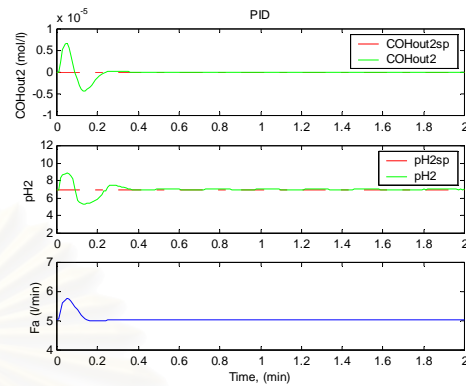
ช.41 ถึงตกตะกอนนิเกิล

ช.42 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

การควบคุมแบบพีไอดี



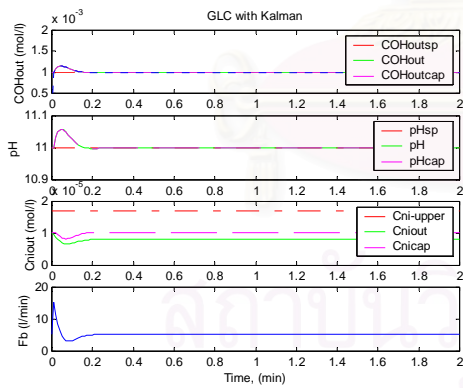
ช.43 ถึงตกตะกอนนิเกิล



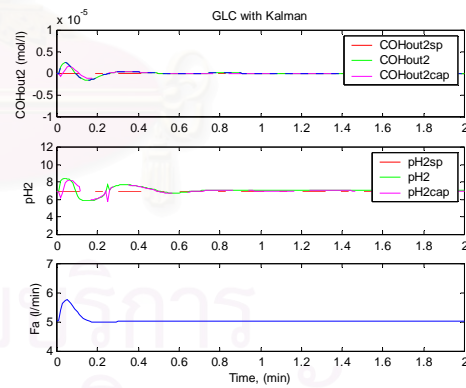
ช.44 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- ค่าปริมาตรของถัง, V +30%

การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียร์ไรซิงร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



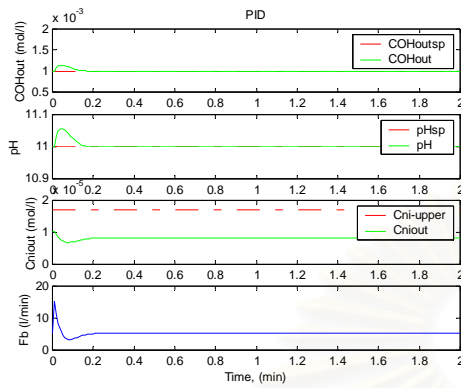
ช.45 ถึงตกตะกอนนิเกิล



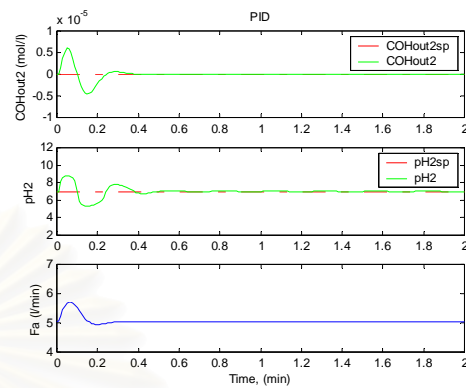
ช.46 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง



การควบคุมแบบพีไอดี



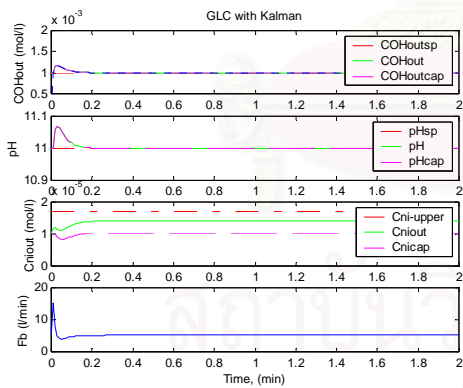
ช.47 ถึงตกตะกอนนิเกิล



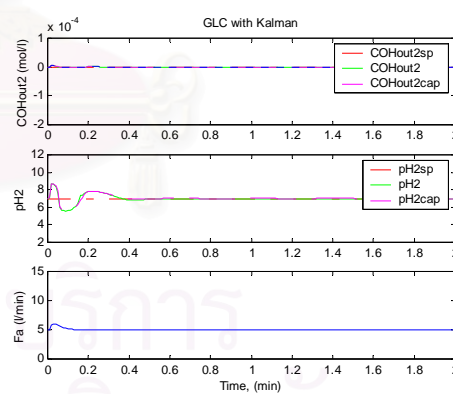
ช.48 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

- ค่าปริมาตรของถัง, V - 30%

การควบคุมแบบโกลบอลลีเนียนี่ร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์



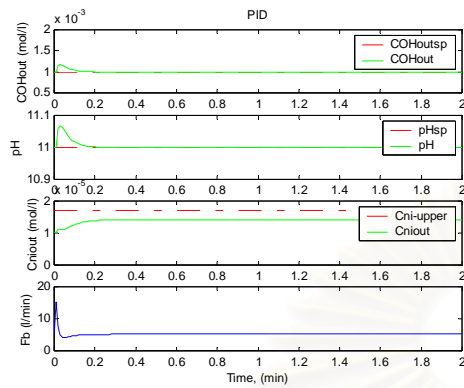
ช.49 ถึงตกตะกอนนิเกิล



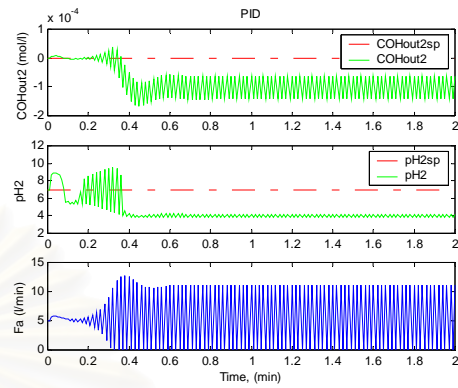
ช.50 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การควบคุมแบบพีไอ



ช.51 ถึงตกตะกอนนิเกิล



ช.52 ถึงปรับสภาพน้ำเป็นกลาง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### โปรแกรมเม็ทแลบ

โปรแกรมเม็ทแลบ (Matlab) เป็นเทคนิคการเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลข, การคำนวณเกี่ยวกับเมตริกซ์ และเวกเตอร์, การวิเคราะห์สัญญาณของกระบวนการ ปัจจุบันโปรแกรมเม็ทแลบ เป็นซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายในสายงานทางด้านวิศวกรรม และได้รับการยอมรับว่าเป็นโปรแกรมที่ได้มาตรฐานสำหรับการซิมูเลชัน (simulation) และการวิเคราะห์เชิงไดนามิกของระบบต่างๆ ทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากโปรแกรมเม็ทแลบนั้นเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมที่ดีของการเขียนโปรแกรมภาษาอื่นเข้ามาไว้รวมกัน เช่น การที่ไม่ต้องประกาศชื่อและชนิดของตัวแปรที่เหมือนกับภาษาเบสิก และการเขียนโปรแกรมที่เป็นโครงสร้างที่เข้าใจง่ายที่ใช้ในภาษาซีและปาสคาล การเขียนโปรแกรมเม็ทแลบสามารถทำได้ง่ายโดยผู้ใช้สามารถดึงคำสั่งต่างๆ ที่ต้องการมาใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลาเขียนเองทั้งหมดเหมือนโปรแกรมภาษาอื่นๆ นอกจากนี้โปรแกรมเม็ทแลบยังสามารถแสดงผลในรูปของกราฟิกในหลายรูปแบบซึ่งเป็นข้อดีของโปรแกรมเม็ทแลบ

#### ข.1 การพัฒนาโปรแกรมเม็ทแลบ

เม็ทแลบ (MATLAB) เป็นชื่อย่อของ MATrix LABoratory ซึ่งมีข้อพิจารณาอยู่ 2 ประการคือ จากคำแรก “matrix” เนื่องจากองค์ประกอบพื้นฐานเป็นเมตริกซ์ ดังนั้นจึงมักนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับพีชคณิตเชิงเส้น (linear algebra) ส่วนคำว่า “laboratory” ซึ่งแสดงถึงแนวความคิดของการทำงานที่ก้าวหน้าโดยเน้นถึงความสามารถของโปรแกรมซึ่งใช้สำหรับวัตถุประสงค์ในการศึกษาค้นคว้าและการทำงานวิจัย โปรแกรมเม็ทแลบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกที่มหาวิทยาลัยนิวแม็กซิโก และมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดในปลายทศวรรษที่ 1970 เพื่อใช้สอนทฤษฎีเกี่ยวกับเมตริกซ์, ฟังก์ชันพีชคณิตแบบเชิงเส้น (linear algebra) และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis)

โปรแกรมเม็ทแลบถูกเขียนเป็นครั้งแรกโดยใช้ภาษาฟอร์แทรน (Fortran) โดย Cleve Moller จากนั้นก็ได้รับการพัฒนาจากโปรแกรมเมอร์อีกหลายท่าน ในโครงการ “LINPACK and EISPACK” ปัจจุบันโปรแกรมเม็ทแลบถูกเขียนขึ้นโดยใช้ภาษาซี (C language) โดยบริษัท Math

Works ซึ่งออกมามากครั้งแรกโดย Steve Bangert ผู้เขียนเฟเซอร์/อินเตอร์พรีเตอร์ (phaser/interpreter), Steve Kleiman, ผู้เขียนกราฟิก และ John Little และ Cleve Moler ผู้เขียนรูทีน (routine) ต่างๆ, คำแนะนำสำหรับผู้ใช้ (user guide) และเอ็ม-ไฟล์ (M-files) ส่วนใหญ่

## ซ.2 การประยุกต์ใช้โปรแกรมเมทแลบ

โปรแกรมเมทแลบสามารถนำมาใช้ในการศึกษาค้นคว้าและการทำงานวิจัยต่างๆ ที่ต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง ในทางอุตสาหกรรมได้อาศัยโปรแกรมเมทแลบในงานวิจัยทางวิศวกรรมและการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ ยกตัวอย่างเช่นในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรม ได้อาศัยโปรแกรมเมทแลบในการศึกษาและออกแบบการควบคุมต่างๆ ใช้ในการจำลองกระบวนการและการวิเคราะห์เชิงไดนามิกของระบบทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งระบบเวลาต่อเนื่องและระบบเวลาดิสครีต การแก้ปัญหาเกี่ยวกับการอพติไมซ์กระบวนการเป็นต้น การทำงานของโปรแกรมเมทแลบอาศัยฟังก์ชันของคำสั่งที่อยู่ในรูปของโปรแกรม “M-files” ซึ่งคำสั่งเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหาต่างๆ ได้ เช่น

### ก. การคำนวณเกี่ยวกับเมตริกซ์

โปรแกรมเมทแลบสามารถทำการบวก ลบ คูณ หาร เมตริกซ์, ทำเมตริกซ์ทรานสโพส, การหารดีเทอร์มิแนนต์, การหาแรงค์ของเมตริกซ์, การทำอินเวอร์ทเมตริกซ์, การหาค่าไอเก้น, การแก้สมการเชิงเส้น, และการประมาณค่าพารามิเตอร์

### ข. การคำนวณโพลิโนเมียล

โปรแกรมเมทแลบสามารถใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับโพลิโนเมียล เช่น การหารากของโพลิโนเมียล การหาคอนโวลูชัน (convolution) และดีคอนโวลูชัน (deconvolution) การหารโพลิโนเมียล และการหาสมการลดดอยแบบโพลิโนเมียล โดยในโปรแกรมเมทแลบโพลิโนเมียลถูกแทนด้วยเวกเตอร์แถว (row vector) ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียลที่มีกำลังลดลงตามลำดับ ตัวอย่างเช่นโพลิโนเมียล  $p(s) = s^3 + 4s^2 + 2s + 5$  สามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์  $p = [1 \ 4 \ 2 \ 5]$  เป็นต้น

### ค. การจัดการเกี่ยวกับเวกเตอร์และการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมเมทแลบสามารถนำมาคำนวณผลรวมแบบเวกเตอร์, การหาค่าเฉลี่ย, การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าโควาเรียนซ์, และการหาค่าสูงสุดต่ำสุดของข้อมูล

### ง. การจัดการเกี่ยวกับการแสดงผลกราฟ

กราฟิกเป็นรูปแบบหนึ่งซึ่งแสดงถึงลักษณะพิเศษของโปรแกรมเมทแลบ ซึ่งใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลต่าง ๆ โปรแกรมเมทแลบมีการแสดงผลเป็นกราฟให้เลือกได้ 7 แบบคือ

- การพล็อตกราฟ x-y บนสเกลเส้นตรง
- การพล็อตกราฟ x-y บนสเกลล็อก-ล็อก
- การพล็อตกราฟ x-y บนสเกลกึ่งล็อกบนแกน x
- การพล็อตกราฟ x-y บนสเกลกึ่งล็อกบนแกน y
- การพล็อตกราฟแบบโพลาร์
- การพล็อตกราฟแบบตะแกรง 3 มิติ
- การพล็อตกราฟแบบคอนทัวร์

โปรแกรมเมทแลบสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมภาษาอื่นๆ เช่น โปรแกรมภาษาซี และโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน นอกจากนี้โปรแกรมเมทแลบยังมีทุลบอกซ์ (Toolboxes) ที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น

- |                                    |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| ● Control System Toolbox           | ● Optimization Toolbox              |
| ● SIMULINK                         | ● Signal Processing Toolbox         |
| ● Neural Network Toolbox           | ● Statistics Toolbox                |
| ● Fuzzy Logic Toolbox              | ● System Identification Toolbox     |
| ● Image Processing Toolbox         | ● Spline Toolbox                    |
| ● Model Predictive Control Toolbox | ● Robust Control Toolbox            |
| ● Nonlinear Control Design Toolbox | ● Mu-Analysis and Synthesis Toolbox |

## ภาคผนวก ฅ

### ตัวอย่างการเขียนโค้ดโปรแกรม

ในบทนี้กล่าวถึง ตัวอย่างการโค้ดโปรแกรมแม่ทแลบ 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแม่ทแลบของระบบควบคุมแบบ โกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ และ โปรแกรมแม่ทแลบของระบบควบคุมแบบพีไอดี เพื่อใช้ในระบบการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิลและควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

#### ฅ.1 ตัวอย่างโปรแกรมแม่ทแลบของระบบควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

การเขียนโปรแกรมควบคุมของระบบควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์จะอยู่ในรูปของเอ็ม-ไฟล์ (M-File)

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมของระบบควบคุมแบบโกลบอลลิลิเนียร์ไรซึ่งร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สำหรับการควบคุมพีเอชและความเข้มข้นของนิเกิลของน้ำเสียในถังตกตะกอนนิเกิล และควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับน้ำเป็นกลางของระบบบำบัดน้ำเสียแสดงดังนี้

```
1 clear
2 clc
3
4 % Simulation time
5 time=2; %final time of simulation
6 dt=0.01; %step size
7 m=10;
8 dt_sampling=dt*(m); %sampling time
9 nt=time/dt+1; %step number of simulation
```



```

10  t=linspace(0,time,nt);           %time of simulation
11
12  % Plant parameters
13  V=2000;                          %volume of nickel-precipitation tank
                                   and volume of neutralization tank
14  N1=2;                             %stoichiometric coefficients for reacting of
                                   nickel ion
15  N2=1;                             %stoichiometric coefficients for reacting of
                                   hydroxide ion
16  k1=1800000;                      %reaction rate constant
17
18  % Controller parameters
19  % nickel-precipitation tank
20  Kc=4.79;
21  Ti=0.505;
22  % neutralization tank
23  Kc2=-2;
24  Ti2=0.65;
25
26  % Estimator parameters
27  Pkk=[0.1 0 0; 0 0.01 0; 0 0 0.01];
28  Q=[100 0 0; 10 0 0; 0 0 1];
29  R=[0.1 0; 0 0.01];
30  C=[1 0 0; 0 1 0];
31
32  % Initial condition
33  % nickel-precipitation tank
34  Cniout(1)=1.03811*10^(-5);        %concentrations of outlet nickel
35  COHout(1)=10^(-3);                %concentrations of outlet stream
36  rni(1)=k1*Cniout(1)*((COHout(1))^(2)); %rate of reaction of nickel ion
37  rOH(1)=k1*Cniout(1)*((COHout(1))^(2)); %rate of reaction of hydroxide ion

```

```

38 e(1)=0;
39 sume(1)=0;
40 Fb(1)=5.16268;                                %base stream
41 % neutralization tank
42 COHout2(1)=9.999993*10(-8);
43 e2(1)=0;
44 sume2(1)=0;
45 Fa(1)=5.02531448;                             %acid stream
46
47 % Disturbanced variables
48 for i=1:nt
49   Fin(i)=1000;
50   %inlet stream
51   Cniin(i)=5/(1000*58.7);                      %concentrations of inlet nickel
52   COHin(i)=10(-5);                             %concentrations of inlet stream
53   end
54   COHb=2*10(-1);                               %concentrations of base stream
55   CHa=2*10(-1);                               %concentrations of acid stream
56
57 % Setpoint
58 % nickel-precipitation tank
59 COHoutsp=10(-3);
60 pHsp=11;
61 Cnisp=1/(1000*58.7);
62 % neutralization tank
63 pH2sp=7;
64 COHout2sp=10(-7);
65
66 % Simulation section
67 for i=2:nt

```

```

68
69 % Process loop
70 for j=1:m
71 % nickel-precipitation tank
72 COHout_glc(1)=COHout(i-1);
73 Cniout_glc(1)=Cniout(i-1);
74 rOH_glc(j)=k1*Cniout_glc(j)*((COHout_glc(j))^2);
75 rni_glc(j)=k1*Cniout_glc(j)*((COHout_glc(j))^2);
76 COHout_glc(j+1)=COHout_glc(j)+(dt/(V))*(((COHin(i-1)-COHout_glc(j))*Fin(i-1)) +
((COHb-COHout_glc(j))*Fb(I-1)))) - (dt*N2*rOH_glc(j));
77 Cniout_glc(j+1)=Cniout_glc(j)+(dt/(V))*(((Cniin(i-1)-Cniout_glc(j))*Fin(i-1)) -
(Cniout_glc(j)*Fb(i-1))) - (dt*N1*rni_glc(j));
78 % neutralization tank
79 COHout2_glc(1)=COHout2(i-1);
80 COHout2_glc(j+1)=COHout2_glc(j)+(dt/(V))*((Fin(i-1)*(COHout_glc(j)-
COHout2_glc(j)))+(Fb(i-1)*(COHout_glc(j)-COHout2_glc(j)))-(Fa(i-1)*
(COHout2_glc(j)+CHa))));
81 end
82
83 % Output of process from sampling
84 COHout(i)=COHout_glc(j+1);
85 COHout2(i)=COHout2_glc(j+1);
86 Cniout(i)=Cniout_glc(j+1);
87 Y=[COHout(i); COHout2(i)];
88 Y1(i)=Y(1,1);
89 Y2(i)=Y(2,1);
90
91 % Kalman Filter loop
92 % Initial estimated value
93 COHout_cap(1)=COHout(1);
94 COHout2_cap(1)=COHout2(1);

```

```

95   Cniout_cap(1)=Cniout(1);
96
97   % Evaluate coefficient matrix update
98   A(1,1)=((1/(V))*(-Fin(i-1)-Fb(i-1)))-(2*N2*k1*Cniout_cap(i-1)*COHout_cap(i-1));
99   A(1,2)=0;
100  A(1,3)=-N2*k1*COHout_cap(i-1)^(2);
101  A(2,1)=((1/(V))*(Fin(i-1)+Fb(i-1)));
102  A(2,2)=((1/(V))*(-Fin(i-1)-Fb(i-1)-Fa(i-1)));
103  A(2,3)=0;
104  A(3,1)=-2*N1*k1*Cniout_cap(i-1)*COHout_cap(i-1);
105  A(3,2)=0;
106  A(3,3)=((1/(V))*(-Fin(i-1)-Fb(i-1)))-(N1*k1*COHout_cap(i-1)^(2));
107  I=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
108  AA=I+dt_sampling*A;
109
110  % Step1. Prediction phase
111  rOH_cap(i-1)=k1*Cniout_cap(i-1)*((COHout_cap(i-1))^(2));
112  rni_cap(i-1)=k1*Cniout_cap(i-1)*((COHout_cap(i-1))^(2));
113  COHout_cap(i)=COHout_cap(i-1)+( dt_sampling/(V))*(((COHin(i-1)-
COHout_cap(i-1))*Fin(i-1)) + ((COHb-COHout_cap(i-1))*Fb(i-1)))) -
(dt_sampling*N2*rOH_cap(i-1));
114  COHout2_cap(i)=COHout2_cap(i-1)+( dt_sampling/(V))*(( Fin(i-1) *
(COHout_cap(i-1)-COHout2_cap(i-1)))+(Fb(i-1)*(COHout_cap(i-1) -
COHout2_cap(i-1)))-(Fa(i-1)*(COHout2_cap(i-1)+CHa) ) ) );
115  Cniout_cap(i)=Cniout_cap(i-1)+( dt_sampling/(V))*(((Cniin(i-1)-Cniout_cap(i-1))*
Fin(i-1)) - (Cniout_cap(i-1)*Fb(i-1) ) ) - (dt_sampling*N1*rni_cap(i-1));
116  Xcapk1k=[COHout_cap(i); COHout2_cap(i); Cniout_cap(i)];
117  Pk1k=AA*Pkk*AA' + Q;
118
119  % Step2. Kalman gain
120  K=Pk1k*C'*inv(C*Pk1k*C'+R);

```

```

121
122 % Step3. State update
123 Xcap=Xcap1k+K*(Y-C*Xcap1k);
124
125 % Step4. Weight matrix update
126 Pkk=(I-K*C)*Pk1k*(I-K*C)'+K*R*K';
127 COHout_cap(i)=Xcap(1);
128 COHout2_cap(i)=Xcap(2);
129 Cniout_cap(i)=Xcap(3);
130
131 % Controller with estimator loop
132 e(i)=COHoutsp-COHout_cap(i);
133 e2(i)=COHout2_cap(i)-COHout2sp;
134 sume(i)=sume(i-1)+(e(i)*dt_sampling);
135 sume2(i)=sume2(i-1)+(e2(i)*dt_sampling);
136 v(i)=COHoutsp+(Kc*e(i))+((Kc/Ti)*sume(i));
137 v2(i)=COHout2sp+(Kc2*e2(i))+((Kc2/Ti2)*sume2(i));
138 % controller of nickel-precipitation tank
139 Fb(i)=((V)/(COHb-COHout_cap(i)))*(v(i)-((Fin(i)*(COHin(i)-COHout_cap(i))/(V)) -
(2*k1*Cniout_cap(i)*(COHout_cap(i)^2)))));
140 % controller of neutralization tank
141 Fa(i)=((V)/(COHout2_cap(i)+CHa))* (-v2(i)+(((Fin(i)*(COHout_cap(i)-
COHout2_cap(i)))+(Fb(i)*(COHout_cap(i)-COHout2_cap(i))))/(V)) );
142
143 % Boundary of controller
144 if Fb(i)<0
145 Fb(i)=0;
146 elseif Fb(i)>100
147 Fb(i)=100;
148 end
149 if Fa(i)<0

```

```
150 Fa(i)=0;
151 elseif Fa(i)>100
152 Fa(i)=100;
153 end
154
155 end
156
157 % Output
158
159 % nickel-precipitation tank
160 pH=-log10(10^(-14)./COHout);
161 % neutralization tank
162 for i=1:nt
163 if COHout2(i)>0
164 pH2(i)= 14-(-log10(COHout2(i)));
165 elseif COHout2(i)==0
166 pH2(i)= 7;
167 else
168 pH2(i)= -log10(-COHout2(i));
169 end
170 end
171
172 % Output (estimator)
173
174 % nickel-precipitation tank
175 pH_cap=-log10(10^(-14)./COHout_cap);
176 % neutralization tank
177 for i=1:nt
178 if COHout2_cap(i)>0
179 pH2_cap(i)= 14-(-log10(COHout2_cap(i)));
180 elseif COHout2_cap(i)==0
```



```
181 pH2_cap(i)= 7;
182 else % COHout2(i) < 0
183 pH2_cap(i) = -log10(-COHout2_cap(i));
184 end
185 end
186
187 % Calculate IAE of controller
188
189 % nickel-precipitation tank
190 for i=1:nt
191 eee(i)=abs(pHsp-pH(i))*dt_sampling;
192 eeer=eee(:);
193 IAEPH=sum(eeer);
194 if Cniout(i)>=Cnisp
195 ee(i)=abs(Cniout(i)-Cnisp)*dt_sampling;
196 eer=ee(:);
197 IAECni=sum(eer);
198 elseif Cniout(i)<Cnisp
199 ee2(i)=abs(Cniout(i)-Cnisp)*dt_sampling;
200 eer2=ee2(:);
201 IAECni2=0;
202 end
203 end
204 % neutralization tank
205 for i=1:nt
206 e2(i)=abs(pH2(i)-pH2sp)*dt_sampling;
207 e2r=e2(:);
208 IAEPH2=sum(e2r);
209 end
210
211 % Performance Index of estimator
```

```

212
213 for i=1:nt
214 ek(i)=abs(COHout(i)-COHout_cap(i))*dt_sampling;
215 eek=ek(:);
216 sumer=sum(eek);
217 e2k(i)=abs(COHout2(i)-COHout2_cap(i))*dt_sampling;
218 ee2k=e2k(:);
219 sumer2=sum(ee2k);
220 e3k(i)=abs(Cniout(i)-Cniout_cap(i))*dt_sampling;
221 ee3k=e3k(:);
222 sumer3=sum(ee3k);
223 end
224
225 % Plot graph
226
227 % nickel-precipitation
228 figure
229 subplot(4,1,1)
230 plot(t,COHoutsp*ones(1,nt),'r-',t,COHout(1:nt),'g-',t,COHout_cap(1:nt),'m--',t,
      Y1(1:nt),'b:')
231 title('GLC with Kalman')
232 legend('COHoutsp','COHout','COHoutcap')
233 ylabel('COHout (mol/l)')
234 axis([0 2 0.5*10(-3) 2*10(-3)])
235 subplot(4,1,2)
236 plot(t,pHsp*ones(1,nt),'r-',t,pH(1:nt),'g-',t,pH_cap(1:nt),'m--')
237 legend('pHsp','pH','pHcap')
238 ylabel('pH')
239 axis([0 2 10.9 11.1])
240 subplot(4,1,3)
241 plot(t,Cnisp*ones(1,nt),'r-',t,Cniout(1:nt),'g-',t,Cniout_cap(1:nt),'m--')

```

```
242 legend('Cnisp','Cniout','Cnicap')
243 ylabel('Cniout (mol/l)')
244 axis([0 2 0 2*10^(-5)])
245 subplot(4,1,4)
246 plot(t,Fb(1:nt))
247 ylabel('Fb (l/min)')
248 xlabel('Time, (min)')
249 axis([0 2 0 20])
250 % neutralization tank
251 figure
252 subplot(3,1,1)
253 plot(t,COHout2sp*ones(1,nt),'r-.',t,COHout2(1:nt),'g-',t,COHout2_cap(1:nt),'m--',t,
      Y2(1:nt),'b:')
254 title('GLC with Kalman')
255 legend('COHout2sp','COHout2','COHout2cap')
256 ylabel('COHout2 (mol/l)')
257 axis([0 2 -1*10^(-5) 1*10^(-5)])
258 subplot(3,1,2)
259 plot(t,pH2sp*ones(1,nt),'r-.',t,pH2(1:nt),'g-',t,pH2_cap(1:nt),'m--')
260 legend('pH2sp','pH2','pH2cap')
261 ylabel('pH2')
262 axis([0 2 4 10])
263 subplot(3,1,3)
264 plot(t,Fa(1:nt))
265 ylabel('Fa (l/min)')
266 xlabel('Time, (min)')
267 axis([0 2 4 7])
```

## ณ.2 ตัวอย่างโปรแกรมเม็ทแลบของระบบควบคุมแบบพีไอดี

การเขียนโปรแกรมควบคุมระบบควบคุมแบบพีไอดีจะเขียนอยู่ในรูปของเอ็ม-ไฟล์ (M-File) เช่นเดียวกัน

ตัวอย่างโปรแกรมของระบบการควบคุมแบบพีไอดี สำหรับการควบคุมพีเอชในถังตกตะกอน นิเกิลและการควบคุมพีเอชของน้ำเสียในถังปรับสภาพน้ำเป็นกลางของระบบบำบัดน้ำเสียแสดง ได้ดังนี้

```

1 clear
2 clc
3
4 % Simulation time
5 time=2; %final time of simulation
6 dt=0.01; %step size
7 m=10;
8 dt_sampling=dt*(m); %sampling time
9 nt=time/dt+1; %step number of simulation
10 t=linspace(0,time,nt); %time of simulation
11
12 % Plant parameters
13 V=2000; %volume of nickel-precipitation tank
    and volume of neutralization tank
14 N1=2; %stoichiometric coefficients for reacting of
    nickel ion
15 N2=1; %stoichiometric coefficients for reacting of
    hydroxide ion
16 k1=1800000; %reaction rate constant
17
18 % Controller parameters
19 % nickel-precipitation tank
20 Kc=45000;

```

```

21  Ti=0.4728;
22  Td=0.001;
23  % neutralization tank
24  Kc2=50900;
25  Ti2=0.31;
26  Td2=0.1;
27
28  % Initial condition
29  % nickel-precipitation tank
30  Cniout(1)=1.03811*10^(-5);           %concentrations of outlet nickel
31  COHout(1)=10^(-3);                 %concentrations of outlet stream
32  rni(1)=k1*Cniout(1)*((COHout(1))^(2)); %rate of reaction of nickel ion
33  rOH(1)=k1*Cniout(1)*((COHout(1))^(2)); %rate of reaction of hydroxide ion
34  Cniout(2)=1.038111069998650*10^(-5) ;
35  COHout(2)= 1.000000065444789*10^(-3) ;
36  rni(2)=k1*Cniout(2)*((COHout(2))^(2));
37  rOH(2)=k1*Cniout(2)*((COHout(2))^(2));
38  e(1)=0;
39  e(2)=0;
40  Fb(1)=5.16268;                       %base stream
41  Fb(2)=1.540072003989111*10^(1) ;
42  Fout(1)=Fin(1)+Fb(1);
43  Fout(2)=Fin(2)+Fb(2);
44  % neutralization tank
45  COHout2(1)=9.999993*10^(-8);
46  COHout2(2)=9.994106079401226*10^(-8);
47  e2(1)=0;
48  e2(2)=0;
49  Fa(1)=5.02531448;                     %acid stream
50  Fa(2)=5.075491658025341;
51

```

```

52
53 % Disturbanced variables
54 for i=1:nt
55     Fin(i)=1000;                                %inlet stream
56     Cniin(i)=5/(1000*58.7);                    %concentrations of inlet nickel
57     COHin(i)=10^(-5);                          %concentrations of inlet stream
58 end
59     COHb=2*10^(-1);                            %concentrations of base stream
60     CHa=2*10^(-1);                             %concentrations of acid stream
61
62 % Setpoint
63 % nickel-precipitation tank
64     COHoutsp=10^(-3);
65     pHsp=11;
66     Cnisp=1/(1000*58.7);
67 % neutralization tank
68     pH2sp=7;
69     COHout2sp=10^(-7);
70
71 % Simulation section
72 for i = 3:nt
73
74 % Process loop
75     for j=1:m
76 % nickel-precipitation tank
77         COHout_pid(1)=COHout(i-1);
78         Cniout_pid(1)=Cniout(i-1);
79         rOH_pid(j)=k1*Cniout_pid(j)*((COHout_pid(j))^2);
80         rni_pid(j)=k1*Cniout_pid(j)*((COHout_pid(j))^2);
81         COHout_pid(j+1)=COHout_pid(j)+((dt/(V))*(((COHin(i-1)-COHout_pid(j))*Fin(i-1))
            ((COHb-COHout_pid(j))*Fb(i-1)))) - (dt*N2*rOH_pid(j));

```



```

82  Cniout_pid(j+1)=Cniout_pid(j)+( dt/(V))*(((Cniin(i-1)-Cniout_pid(j))*Fin(i-1)) -
      (Cniout_pid(j)*Fb(i-1))) - (dt*N1*rni_pid(j));
83  % neutralization tank
84  COHout2_pid(1)=COHout2(i-1);
85  COHout2_pid(j+1)=COHout2_pid(j)+( dt/(V))*((Fin(i-1)*(COHout_pid(j)-
      COHout2_pid(j)))+(Fb(i-1)*(COHout_pid(j)-COHout2_pid(j)))-(Fa(i-1)*
      (COHout2_pid(j)+CHa))) );
86  end
87
88  % Output of process from sampling
89  COHout(i)=COHout_pid(j+1);
90  COHout2(i)=COHout2_pid(j+1);
91  Cniout(i)=Cniout_pid(j+1);
92
93  % Controller with estimator loop
94  e(i)=COHoutsp-COHout(i);
95  e2(i)=COHout2(i)-COHout2sp;
96  % controller of nickel-precipitation tank
97  Fb(i)=Fb(i-1)+ (Kc*(e(i)-e(i-1))) + (Kc*(e(i)/Ti)*dt_sampling)+( Kc*Td*(e(i)-
      (2*e(i-1))+e(i-2))/dt_sampling);
98  % controller of neutralization tank
99  Fa(i)=Fa(i-1)+(Kc2*(e2(i)-e2(i-1))) + (Kc2*(e2(i)/Ti2)*dt_sampling)+( Kc2*Td2*(e2(i)-
      (2*e2(i-1))+e2(i-2))/dt_sampling);
100
101  % Boundary of controller
102  if Fb(i)<0
103    Fb(i)=0;
104  elseif Fb(i)>100
105    Fb(i)=100;
106  end
107  if Fa(i)<0

```

```
108 Fa(i)=0;
109 elseif Fa(i)>100
110 Fa(i)=100;
111 end
112
113 end
114
115 % Output
116
117 % nickel-precipitation tank
118 pH=-log10(10^(-14)./COHout);
119 % neutralization tank
120 for I=1:nt
121 if COHout2(i)>0
122 pH2(i)= 14-(-log10(COHout2(i)));
123 elseif COHout2(i)==0
124 pH2(i)= 7;
125 else
126 pH2(i) = -log10(-COHout2(i));
127 end
128 end
129
130 % Calculate IAE of controller
131
132 % nickel-precipitation tank
133 for I=1:nt
134 eee(i)=abs(pHsp-pH(i))*dt_sampling;
135 eeer=eeer+eee(i);
136 IAEpH=sum(eeer);
137 if Cniout(i)>=Cnisp
138 ee(i)=abs(Cniout(i)-Cnisp)*dt_sampling;
```

```

139 eer=ee(:);
140 IAECni=sum(eer);
141 elseif Cniout(i)<Cnisp
142 ee2(i)=abs(Cniout(i)-Cnisp)*dt_sampling;
143 eer2=ee2(:);
144 IAECni2=0;
145 end
146 end
147 % neutralization tank
148 for I=1:nt
149 e2(I)=abs(pH2(i)-pH2sp)*dt_sampling;
150 e2r=e2(:);
151 IAEpH2=sum(e2r);
152 end
153
154 % Plot graph
155
156 % nickel-precipitation
157 figure
158 subplot(4,1,1)
159 plot(t,COHoutsp*ones(1,nt),'r -.',t,COHout(1:nt),'g-')
160 title('PID')
161 legend('COHoutsp','COHout')
162 ylabel('COHout (mol/l)')
163 axis([0 2 0.5*10^(-3) 2*10^(-3)])
164 subplot(4,1,2)
165 plot(t,pHsp*ones(1,nt),'r -.',t,pH(1:nt),'g-')
166 legend('pHsp','pH')
167 ylabel('pH')
168 axis([0 2 10.9 11.1])
169 subplot(4,1,3)

```

```
170 plot(t,Cnisp*ones(1,nt),'r -.',t,Cniout(1:nt),'g-')
171 legend('Cnisp','Cniout')
172 ylabel('Cniout (mol/l)')
173 axis([0 2 0 2*10^(-5)])
174 subplot(4,1,4)
175 plot(t,Fb(1:nt))
176 ylabel('Fb (l/min)')
177 xlabel('Time, (min)')
178 axis([0 2 0 20])
179 % neutralization tank
180 figure
181 subplot(3,1,1)
182 plot(t,COHout2sp*ones(1,nt),'r-.',t,COHout2(1:nt),'g-')
183 title('PID')
184 legend('COHout2sp','COHout2')
185 ylabel('COHout2 (mol/l) ')
186 axis([0 2 -1*10^(-5) 1*10^(-5)])
187 subplot(3,1,2)
188 plot(t,pH2sp*ones(1,nt),'r -.',t,pH2(1:nt),'g-')
189 legend('pH2sp','pH2')
190 ylabel('pH2')
191 axis([0 2 4 10])
192 subplot(3,1,3)
193 plot(t,Fa(1:nt))
194 ylabel('Fa (l/min)')
195 xlabel('Time, (min)')
196 axis([0 2 4 7])
```

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวนันทนา สิริพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสตรีวิทยา 2 เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2541 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย