

รายการอ้างอิง



- Alvarez ,J., "Global Nonlinear Control of a Continuous Stirred Tank Reactor"
Chem.Eng.Sci 44,No.5 (1989) : 1147-1160.
- Bequette,B.W., "Nonlinear Control of Chemical Process :A review"
Ind.Eng.Chem.Res 30 (1991) : 1391-1413.
- Dutton,K.,Thompson,S.and Barraclough,B. *The Art of Control Engineering*, 1st
ed.(England : Addison-Wesley,1997) : 318-324.
- Fisher,D.G. and Newell,R.B., "Experimental Evaluation of Optimal,Multivariable
Regulatory Controllers with Model-Following Capabilities" *Automatica* 8
(1972) : 247-262.
- Gustafsson,T.K. and Waller,K.V., "Dynamic Modeling and Reaction Invariant
Control of pH" *Chem. Eng. Sci* 38 (1992) : 389-398.
- Gustafsson,T.K. and Waller,K.V., "Nonlinear and Adaptive Control of pH"
Ind.Eng.Chem.Res 34 (1995) : 820-827.
- Hamilton,J.C.,Seborg,D.E. and Fisher,D.G., "An Experimental Evaluation of
Kalman Filtering" *AIChE* 19 (1973) : 901-909.
- Jayadeva,B.,Rao,Y.S. N.M. ,Chidambarams ,M.and Madahavan,K.P., "Nonlinear
Controller for a pH Process" *Comp. Chem.Engng* 14 (1990) : 917-920.
- Jo,J.H.and Bankoff,S.G., "Digital Monitoring and Estimation of Polymerization
Reactors" *AIChE* 22 (1976) : 361-368.
- Jutila,P.Orava,P.J.,and Salm in,B., "A Physico-Chemical Model and Simulation
of pH-Processing Continuous Stirred Tank Reactor" *Math.Comp.Simul* 23
(1981) : 99 -106.
- Kittisupakorn,P. and Kershenbaum,L.S., "The Use of a Partially Simulated
Exothermic (PARSEX) Reactor for Experimental Testing of Control
Algorithms" *Tran IChemE* 72,Part A (1994) : 55-63.

- Klatt, K-U and Engell, Sebastian.**, "Nonlinear Control of Neutralization Process by Gain-Scheduling Trajectory Control" *Ind.Eng.Chem.Res.*35(1996) : 3511-3518.
- Kravaris, C.**, " Input/Output Linearization : A Nonlinear Analog of placing Poles at the Process Zeros" *AChE* 34 (1988)
- Kravaris, C. and Chung, C.B.**, " Nonlinear State Feedback Synthesis by Global Input/Output Linearization" *AChE* 33 (April 1987) : 592-603.
- Kravaris, C. and Daoutidis, P.**, "Synthesis of Feedforward/State Feedback Controller for Nonlinear Processes" *AChE* 35 (October 1989) : 1602-1616.
- Kravaris, C. and Soroush, M.**, "Synthesis of Multivariable Nonlinear Controllers by Input/Output Linearization" *AChE* 36 (1990)
- Kuo, B.C.**, *Automatic Control System*, 6th ed. USA : Prentice-Hall, 1991.
- Lee, Jietae.**, "Relay Feedback Method for Tuning of Nonlinear pH Control System" *AChE* 39 (1993)
- Mahuli, S.K., Rhinehart, R.R. and Riggs, J.B.**, "Nonlinear Model-Based In-Line Control of Wastewater pH : a Laboratory Study " *ISA Transaction* 32 (1993) : 241-245.
- Mahuli, S.K., Rhinehart, R.R. and Riggs, J.B.**, "Experimental demonstration of Non-linear Model-Based In-Line Control of pH" *Proc. Cont.*3 (1992) : 145-153.
- Mcavoy, T.J., Hsu, E. and Lowenthal, S.**, "Dynamics of pH in Controlled Stirred Tank Reactor" *Ind.Eng.Chem.Proc.Des.Develop.*, 11 (1972)
- Myer, M.A. and Luecke, P.H.**, "Process Control Applications of an Extended Kalman Filter Algorithm" *Comp.Chem.Engng* 15 (1991) : 853-855.
- Ogata, K.**, *Modern Control Engineering*, 3rd ed. USA : Prentice-Hall, 1997.
- Stefani, R.T.**, *Design of Feedback Control System*, 3rd ed. USA: Saunderson College Publishing, 1994.

- Sung,S.S. and Lee,I.B., "PH Control Using a Simple Set Point Change",
Ind.Eng.Chem.Res 34 (1995) : 1730-1734.
- Sung,S.S.,Lee,I.B. and Yang,D.R., "PH Control Using and Identification Reactor",
Ind .Eng.Chem.Res 34 (1995) : 2418-2426.
- Wells,C.H., "Application of Modern Estimation and Identification Techniques to
Chemical Process" *AIChE* 17 (1971) : 966-973.
- William,G.L.,Rhinehart,R.R,Riggs,J.B., "In-line Process Model Based Control of
WastewaterpH Using Dual Base Injection" *Ind.Eng.Chem.Res.*29 (1990)
- Wong,Y.H., "Experimental Application of Robust Nonlinear Control Law to pH
Control" *Chem. Eng.Sci* 49 (1994) : 199-207.
- Wright,R.A.,Kravaris,C., "Nonlinear Control of pH Processes Using the Strong
Acid Equivalent" *Ind.Eng.Chem.Res* 30 (1991) : 1561-1572.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ก.1 ความหมายของน้ำเสีย และ กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในปริมาณสูง ไม่เป็นที่ต้องการ และก่อให้เกิดปัญหาแก่ชุมชนโดยทั่วไป เช่น มีกลิ่นเหม็น หรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งเจือปนที่ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำเสีย อาจอยู่ในรูปของ สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ และไม่สามารถละลายน้ำได้, กรด-ด่าง, น้ำมัน, ไขมัน, เกลือของแข็งหรือตะกอนแขวนลอย และแร่ธาตุที่เป็นพิษ เช่น โลหะหนักต่าง ๆ เป็นต้น ประเภทของน้ำเสียอาจจำแนกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียต่าง ๆ ที่เกิดจากกิจกรรมประจำวัน ของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท น้ำเสียส่วนใหญ่ มักเป็นน้ำล้างจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ เช่น การล้างถังหรือ ภาชนะ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียมีสิ่งเจือปนจากวัตถุติดด้วยเสมอ จึงกล่าวได้ว่าน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม จะมีลักษณะที่ดูได้จากวัตถุติดจากโรงงาน ซึ่งอาจเป็นผลผลิตทางเกษตรกรรม สารอินทรีย์เคมี หรือสารเคมีโลหะหนัก

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย จึงหมายถึง กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย เพื่อให้ได้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่ก่อให้เกิดการเน่าเสียหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย โดยปกติของแข็งหรือตะกอนแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำเสีย มักบำบัดออกได้ด้วยวิธีการกายภาพ ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายในน้ำเสียต้องบำบัดออกโดยใช้วิธีเคมีหรือวิธีชีวเคมี ซึ่งสามารถทำให้ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลาย กลายเป็นตะกอนแขวนลอยที่รวมกันเป็น ก้อนใหญ่ จนสามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้โดยวิธีการกายภาพ

ก.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment Process)

ในระบบบำบัดน้ำเสียในสมัยแรกๆ ได้รู้จักการใช้สารเคมีเพื่อช่วยตกตะกอนของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) และอนุภาคขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย แต่มีปัญหาอยู่ที่ไม่สามารถกำจัดมลสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (Soluble organics) ออกได้ ทำให้ในระยะต่อมาได้เปลี่ยนมาใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาทนจนกระทั่งเมื่อประมาณ 10 ปีที่แล้วมา นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้เริ่มให้ความสนใจในการใช้กระบวนการทางฟิสิกส์-เคมีมากขึ้น เพื่อใช้ลดปริมาณ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และใช้ปรับสภาพของตะกอน (Sludge condition) เพื่อช่วยให้การตกตะกอนและ กำจัดสารโลหะต่างๆ ที่มีมากขึ้นในน้ำเสีย

วัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี แบ่งออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. สร้างตะกอนให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ง่าย (Coagulation and flocculation)
2. ทำให้มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำตกตะกอน (Precipitation) หรือทำให้ไม่ละลายน้ำ (Insolubilization)
3. ปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เติมสารอาหาร (Nutrient)
4. ฆ่าเชื้อโรค (Disinfection)
5. ปรับสภาพของตะกอน (Sludge conditioning) เพื่อใช้ในกระบวนการย่อยตะกอนและ/หรือ แยกเอาน้ำออกจากตะกอน

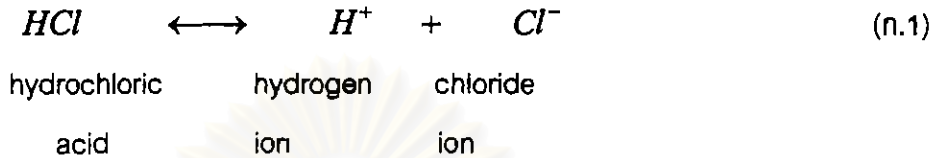
ก.3 การปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH adjustment)

ก.3.1 ทฤษฎีและหลักการทำงาน

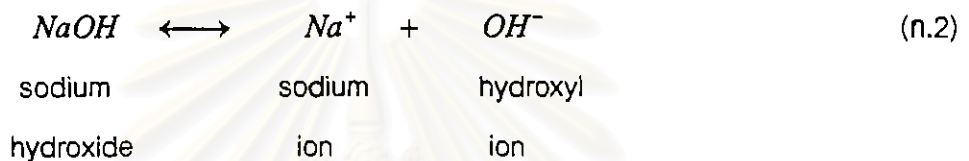
ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ จำเป็นต้องปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสม เช่น การแยก emulsion การควบคุมปฏิกิริยาทางเคมี การทำให้สารละลายตกตะกอน การบำบัดทางชีววิทยาหากต้องการปรับสภาพของน้ำเสียให้เป็นกลาง ซึ่งมีชื่อเฉพาะเรียกว่า neutralization

ก.3.1.2 ความหมายของการสะเทินของสารละลาย (Neutralization in Solution)

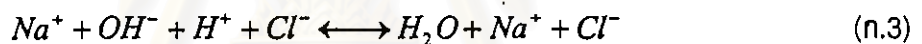
กรดละลายในน้ำสามารถทำให้สารละลายนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากประจุไอออนถูกสร้างขึ้น สมการสำหรับการไอออไนซ์เรซันของกรดไฮโดรคลอริกมีดังนี้คือ



ในทำนองเดียวกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถสร้างไอออนได้เมื่อละลายในน้ำ :



เมื่อสารละลาย ทั้งสองผสมกัน จะเกิดปฏิกิริยาสะเทินขึ้น ความเป็นกรด-เบสในสารละลายจะหายไป เนื่องจาก เกิดการรวมกันระหว่าง ไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลไอออนกลายเป็นน้ำ



สารละลายยังคงนำไฟฟ้าได้ เพราะไอออนของโซเดียมและคลอไรด์แต่ไม่มีความเป็นกรดหรือเบส เนื่องจากจำนวนกรดและเบสเท่ากัน

เมื่อให้ HA และ BOH เป็นสูตรโดยทั่วไปของ กรด และเบส ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติ ความเป็นกรด-เบส จะมีความเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของน้ำ เพราะน้ำมีคุณสมบัติเป็น Amphoteric คือเป็นได้ทั้งกรดและเบส เนื่องจากสามารถสร้าง ไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลได้ทั้งคู่



อัตราการแตกตัวกลายเป็นไอออนของ น้ำ เท่ากับ อัตราการรวมตัวของไอออน และ สมการสมดุลแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่ [] แทน ความเข้มข้น หน่วย โมลต่อลิตร

K คือ ค่าคงที่สมดุล

OH^- เรียกว่า ไฮดรอกซิลไอออน จะแสดงคุณสมบัติเป็นต่าง

H_3O^+ เรียกว่า ไฮโดรเนียม ไอออน และแสดงคุณสมบัติเป็นกรด บางครั้ง อาจเขียนแทนด้วย H^+ สำหรับ กรดแก่เช่น ไฮโดรคลอริก, ไนตริก, ซัลฟูริก และ เปอร์คลอริก จะมีการแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออน อย่างสมบูรณ์ ทำให้น้ำมีคุณสมบัติเป็นกรดสูง

ในความเป็นจริงแล้ว ไฮโดรเจนไอออนจะไม่อยู่เป็นอิสระในสารละลาย แต่จะรวมตัวกับโมเลกุลของตัวทำละลาย สมการการแตกตัวของน้ำจึงเขียนในรูปแบบที่สมบูรณ์ดังนี้



ก.3.1.3 ความหมายของค่า pH

Sorenson, ค.ศ. 1909, ได้นิยามค่า pH ไว้ดังนี้

$$pH = -\log[H^+] \quad (ก.7)$$

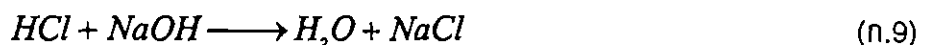
การที่สารละลายหรือของเหลวที่มีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากมี ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion [H^+]) และถ้าเป็นด่างเนื่องจากมี ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ion [OH^-]) ดังนั้นจึงบอกค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยค่าพีเอช

ซึ่งที่อุณหภูมิห้องจะได้ว่า

$$pH + pOH = 14 \quad (ก.8)$$

การปรับสภาพของของเหลวให้เป็นกลาง คือค่าพีเอช เท่ากับ 7 แสดงว่ามีค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน และ ไฮดรอกซิลไอออนเท่ากัน ถ้าค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่า เป็นด่าง และถ้ามีค่า พีเอช น้อยกว่า 7 แสดงว่าเป็นกรด

การปรับค่า พีเอช ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใส่กรดหรือด่างลงไป อัตราส่วนที่เหมาะสม หากเป็นการปรับสภาพให้เป็นกลาง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้แก่ลือกกับน้ำ เช่น สมการต่อไปนี้



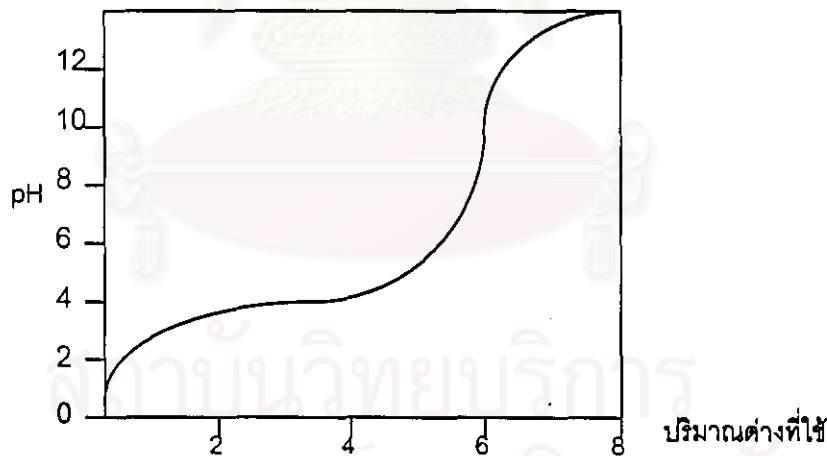
ในอดีตการทำงานปรับสภาพน้ำเสีย จะทำการทดลองจากน้ำเสียจริง เช่นต้องการปรับสภาพน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดให้เป็นกลาง จะต้องทำการกราฟไตเตรชัน โดยการหาค่า acidity ของน้ำ

เสียในหน่วย mg/l as CaCO₃ แล้วจึงเติมต่างลงไป จนมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 เมื่อทราบปริมาณของต่างที่ใช้ในการทดลองก็สามารถคำนวณปริมาณที่ใช้ในระบบได้

ก.3.2 การนำไปใช้งานและการควบคุมการทำงาน

การปรับค่าพีเอช สามารถทำได้ทั้งเป็นแบบครั้งหรือกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) ตามความเหมาะสมของปริมาณน้ำเสีย และระยะเวลา ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แต่ถ้ายกแบบให้ทำงานเป็นครั้งจะต้องมีถังอย่างน้อย 2 ถัง นอกจากนั้น จะต้องคำนึงปัญหาในการควบคุมการทำงาน ซึ่งอาจจะต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงสุดด้วย เช่น ติดตั้งแผ่นป้องกันน้ำหมุน (Baffle) ที่ขอบถังกลม การใช้วัสดุ หรือการเคลือบถังด้วยสารป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีที่ใช้ และการกวนน้ำจะต้องดีพอที่จะทำให้สารเคมีกระจายได้อย่างทั่วถึง

การควบคุมการทำงานแบบครั้งหรือกะ จะต้องนำน้ำเสียมาทำการทดลองหาค่ากรดหรือต่าง ที่ต้องใช้ในการปรับค่าพีเอช ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ เพื่อที่จะได้ใส่สารเคมีลงไปได้พอเหมาะ ดังแสดงในรูปที่ ก.1.



รูปที่ ก.1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามปริมาณต่างที่ใส่ลงไปทำปฏิกิริยา

สำหรับน้ำเสียที่เข้ามามีทั้งเป็นกรด หรือบางครั้งก็เป็นด่าง จะต้องมีสารเคมีทั้งกรดและด่าง และต้องใช้ตัวควบคุมพีเอช ที่สามารถตั้งให้ทำงานได้ทั้งสองช่วง

ก.3.3 การเลือกสารเคมีที่จะมาใช้ในการปรับค่า พีเอช

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้น(หรือให้เป็นกรด)ได้แก่

CaCO_3	CaO	Ca(OH)_2
MgO	Mg(OH)_2	Dolomitic quicklime
Dolomitic hydrated lime	NaOH	Na_2CO_3

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับ pH ให้ต่ำลง (หรือให้เป็นกรด)ได้แก่

H_2SO_4	HCl
HNO_3	ก๊าซ CO_2

โดยทั่วไปกรดที่ใช้ในการปรับ ค่าพีเอช มักจะใช้กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) และกรดเกลือ (Hydrochloric acid) และต่างมักจะใช้สารประกอบของ โซเดียม แมกนีเซียมและแคลเซียม

ก.3.3.1 ระบบปรับค่าพีเอชของน้ำเสียดสภาพกรด

น้ำเสียดสภาพกรดสามารถถูกเปลี่ยนเป็นกลาง หรือต่างเล็กน้อยด้วยสารต่างๆ ซึ่งสารต่างที่จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับราคา ความสามารถในการปรับค่าพีเอช อัตราเร็วของปฏิกิริยา การเก็บรักษาเพื่อไว้ใช้ และความเหมาะสมในการนำไปทิ้งกากตะกอนเคมี นอกจากนั้น จุดใหญ่จะต้องดู basicity factor และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารเคมีนั้น ว่าสารใดมีประสิทธิภาพในการปรับค่าพีเอช ได้ดีกว่ากัน นอกจากนั้น ยังต้องคำนึงถึง การละลายน้ำได้ของสารเคมีนั้นๆ ด้วย เพราะถ้าละลายน้ำได้ดี ก็สามารถใช้ที่ความเข้มข้นสูงๆ ได้ และไม่มีปัญหาเรื่องตะกอน

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

●การใช้ก้อนปูนขาว (Limestone Treatment)

การใช้ก้อนปูนขาว ในการปรับ pH ของน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด จะมีปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในสมการ(1.20)



ระบบนี้มีข้อดีที่พวกปูนขาวหรือหินปูนมีราคาถูก แต่ข้อเสียก็มีคือจะละลายน้ำได้น้อย ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการควบคุมการทำงานสูง เนื่องจากต้องจ่ายเข้าระบบในรูปของ sulfite มีความเข้มข้นไม่เกิน 14% อีกทั้งหากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ H₂SO₄ มากกว่า 6000 ppm. จะ

ทำให้เกิดตะกอนของ calcium sulfate (CaSO_4) มากเกินควร ซึ่งไปปกคลุมบริเวณผิวก้อนปูนขาว จนหมดประสิทธิภาพ ในการปรับค่าพีเอช และนอกจากนั้น ระบบนี้ไม่สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มี อลูมิเนียม (Al^{+3}) หรือเหล็ก (Fe^{+3}) มาก ก็จะทำให้เกิดปัญหาเช่นเดียวกัน คือเกิดตะกอนเคมีของไฮดรอกไซด์ของพวก Al หรือ Fe ปกคลุมผิวก้อนปูนขาว อายุการทำงานของก้อนปูนขาวจะขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย และสภาพความเป็นกรดของน้ำเสีย

•การใช้ปูนขาว (Lime Slurry Treatment)

การใช้ปูนขาวในการปรับ pH ของน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดจะมีปฏิกิริยาเคมีเหมือนกับ ของการใช้ก้อนปูนขาว วิธีนี้อาจใช้ระบบการเพิ่มความร้อน หรือระบบการเติมอากาศเข้าไปเพื่อให้ประสิทธิภาพของการปรับ pH ได้สูงขึ้น

•การใช้โซดาไฟ (Caustic soda/Sodium hydroxide treatment)

แม้โซดาไฟจะเป็นสารที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการปรับ pH ได้รวดเร็ว และใช้ปริมาณน้อยกว่าแต่มีราคาแพงกว่าปูนขาว และข้อดีของสารเคมีนี้คืออย่างหนึ่งคือ ผลของปฏิกิริยาจะมีสภาพละลาย และไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณความกระด้างแก่แหล่งรองรับน้ำทิ้งนี้

•การใช้ด่างประเภทอื่น ๆ

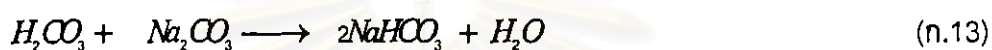
ในการใช้ด่าง ซึ่งเป็นองค์ประกอบ magnesium เพื่อปรับสภาพของกรดกำมะถัน เช่น magnesium oxide, magnesium carbonate, magnesium hydroxide จะได้ผลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเป็น magnesium sulfate ซึ่งละลายน้ำได้ และไม่เกิดปัญหาเหมือนการใช้ calcium

ก.3.3.2 ระบบปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียสภาพต่าง

น้ำเสียสภาพต่างสามารถถูกเปลี่ยนเป็นกลาง หรือเป็นด่างเล็กน้อยด้วยกรดต่าง ๆ ซึ่งกรดที่จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว สำหรับการปรับค่าพีเอชด้วยด่างนี้ จะอธิบายเกี่ยวกับการใช้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และการใช้กรดกำมะถัน (H_2SO_4) ในการปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียสภาพต่างให้เป็นกลาง

●การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂ Treatment)

การใช้ในการปรับ pH ของน้ำเสียสภาพต่างจะมีปฏิกิริยาเคมีดังสมการข้างล่าง สำหรับระบบการเติมก๊าซ ก็จะทำเหมือนกับระบบอัดอากาศด้วยเครื่องอัดอากาศของระบบเติมอากาศในถังทั่วไป



●การใช้กรดกำมะถัน (Sulfuric Treatment)

การใช้กรด H₂SO₄ ในการปรับ pH ของน้ำเสียที่มีสภาพต่าง จะมีปฏิกิริยาเคมี การใช้กรดกำมะถันจะนิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาถูก แต่อาจเกิดผลเสียได้ เนื่องจากไปทำปฏิกิริยากับสารบางอย่าง เกิดเป็นเกลือ ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น calcium sulfate เกาะอยู่ตามท่อและผนังของถัง ส่วนผลของปฏิกิริยาของกรดเกลือ นั้น ส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ดี แต่ต้องระวังอีกว่า ถ้าเป็นกรดที่มีความเข้มข้นสูง ๆ จะยิ่งเพิ่มการดูแล เก็บรักษาสารเคมีที่ยุ่งยากมากขึ้น เพราะจะกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นในการใช้กรดกำมะถันอาจจำเป็นต้องทำการทดลองกับน้ำเสียจริงในห้องปฏิบัติการเสียก่อน เพื่อหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการเติมผสมลงไปอย่างเหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป และเหมาะสมกับน้ำเสียที่จะถูกนำไปเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต่อไป



เติมกรด น้ำเสียที่มี
เพื่อปรับ pH สภาพต่าง

การปรับสภาพน้ำให้เป็นกลาง อาจพิจารณาด้วยการจัดการ โดยนำน้ำเสียจากส่วนที่เป็นกรดมาผสมกับส่วนที่เป็นด่างภายในโรงงานเอง ถ้าสามารถทำได้ หรือใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากปล่องอากาศเสีย เพื่อลดค่าพีเอช

ปฏิกิริยาในการปรับค่าพีเอช เป็นแบบที่ให้ความร้อนออกมา (Exothermic) ดังนั้นจึงต้องวางแผนการทำงาน และใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังอาจจะเกิดควัน (เช่น กรดเกลือ) เกิดกลิ่น ฯลฯ ซึ่งจะทำอันตรายต่อคนและโครงสร้างใกล้เคียงได้

ภาคผนวก ข.

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ ฯ

เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่ง กำเนิดประเภทรองงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๕๕ แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๑๕๒๕ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษ และโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากแหล่งกำเนิดประเภทรองงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมออกสู่สิ่งแวดล้อม ไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ในประกาศนี้

“โรงงานอุตสาหกรรม” หมายความว่า โรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน

“นิคมอุตสาหกรรม” หมายความว่า นิคมอุตสาหกรรมตามกฎหมายว่าด้วยนิคมอุตสาหกรรม หรือโครงการที่จัดไว้สำหรับการประกอบการอุตสาหกรรมที่มีการจัดการระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมกัน

“น้ำเสีย” หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปน หรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงานรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม หรือในนิคมอุตสาหกรรมด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ ๒ ให้กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ ๑ ไว้ดังต่อไปนี้

(๑) ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value) ระหว่าง ๕.๕ ถึง ๙.๐

(๒) ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

๒.๑ ค่าทีดีเอสไม่เกิน ๓,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน ๓,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

๒.๒ น้ำทิ้งซึ่งจะระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน ๒,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือทะเลได้ไม่เกิน ๕,๐๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๓) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่เกิน ๕๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน ๑๕๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๔) อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำทิ้งที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะไม่เกิน ๑๕๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๕) สีหรือกลิ่น (Color or Odor) เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะแล้วไม่เป็น ๔๐ องศาเซลเซียส

(๖) ซัลไฟด์ (Sulfide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่เกิน ๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๗) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่เกิน 0.๒ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๘) โลหะหนักมีค่าดังนี้

๘.๑ สังกะสี (Zn) ไม่เกิน ๕.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๒ โครเมียม ชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) ไม่เกิน ๐.๒๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๓ โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium) ไม่เกิน ๐.๗๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๔ อาร์เซนิก (As) ไม่เกิน ๐.๒๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๕ ทองแดง (Cu) ไม่เกิน ๒.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๖ ปรอท (Hg) ไม่เกิน ๐.๐๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๗ แคดเมียม (Cd) ไม่เกิน ๐.๐๓ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๘ แบเรียม (Ba) ไม่เกิน ๑.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๙ เซเลเนียม (Se) ไม่เกิน ๐.๐๒ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๑๐ ตะกั่ว (Pb) ไม่เกิน ๐.๒ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๑๑ นิกเกิล (Ni) ไม่เกิน ๑.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

๘.๑๒ แมงกานีส (Mn) ไม่เกิน ๕.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๙) น้ำมันและไขมัน (Fat Oil and Grease) ไม่เกิน ๕ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน ๑๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๐) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่เกิน ๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๑) สารประกอบฟีนอล (Phenols) ไม่เกิน ๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๒) คลอรีนอิสระ (Free chlorine) ไม่เกิน ๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๓) สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide) ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด

(๑๔) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ไม่เกิน ๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน ๖๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๕) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่เกิน ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๖) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน ๑๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน ๔๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๔ มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องเป็นไปตามข้อ ๒ เว้นแต่ค่าบีโอดี ต้องมีค่าไม่เกิน ๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๕ การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ ๒ และจากนิคมอุตสาหกรรมตามข้อ ๓ ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(๑) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)

(๒) การตรวจสอบค่าทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ ๑๐๓ องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ ๑๐๕ องศาเซลเซียส ในเวลา ๑ ชั่วโมง

(๓) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)

(๔) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

(๕) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการ ไตเตรท (Titrate)

(๖) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิทูริก (Pyridine-Barbituric Acid)

(๗) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

๗.๑ การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปคโตรโฟโตเมตตรี (Atomic Absorption spectrophotometry) หรือวิธีพลาสมา อีมิชชัน สเปคโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

๗.๒ การตรวจสอบค่าอาร์เซนิกและเซเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอ็บซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) หรือวิธีพลาสมา อีมิชชัน สเปคโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

๗.๓ การตรวจสอบค่าปรอทให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอ็บซอร์ปชัน โคลด์ เวปเปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapor Technique)

(๘) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

(๙) การตรวจสอบค่าฟอร์มาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)

(๑๐) การตรวจสอบสารประกอบพินอลให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธี ๔-อะมิโน แอนติไพรีน (Distillation, 4-Aminoantipyrine)

(๑๑) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดเมตริก (Iodometric Method)

(๑๒) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ให้ใช้วิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas - Chromatography)

(๑๓) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ ๒๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๕ วัน ติดต่อกัน หรือใช้วิธีการอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษให้ความเห็นชอบ

(๑๔) การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาร์ล (Kjeldah)

(๑๕) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยวิธีไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

ข้อ ๕ การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและจากนิคมอุตสาหกรรม ตามข้อ ๔ จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของ สหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ข้อ ๖ วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ความถี่ และระยะเวลา ในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ (MATLAB) และ ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมในการควบคุมค่าพีเอช

โปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ (MATLAB) เป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในทางด้านวิศวกรรม สามารถใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง และใช้แก้ปัญหาที่เป็นเมทริกซ์และเวกเตอร์ได้เป็นอย่างดี ข้อดีของโปรแกรมแมทแลบยังมีอีกมาก อาทิเช่น เป็นโปรแกรมที่ประกอบไปด้วย ฟังก์ชันจำนวนมาก ที่ช่วยให้สามารถเรียกนำมาใช้งานได้สะดวก และรวดเร็ว รวมทั้งมีการแสดงผลทางด้านกราฟิก มีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่น ๆ ได้ เช่น โปรแกรมภาษาซี,โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน เป็นต้น นอกจากนี้ การเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรมแมทแลบ จะง่ายกว่าโปรแกรมภาษาอื่นๆ เช่น ไม่ต้องมีการประกาศชื่อและชนิดของตัวแปร มีโครงสร้างที่เข้าใจง่าย ฯลฯ

ค.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลบ

MATLAB ย่อมาจาก Matrix Laboratory ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกที่มหาวิทยาลัยนิวแม็กซิโกและมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดในช่วงปลาย ค.ศ. 1970 เพื่อใช้ในการเรียนการสอนทางด้าน Matrix, ฟังก์ชันพีชคณิตเชิงเส้น (Linear algebra function) และการวิเคราะห์ในเชิงตัวเลข (Numerical analysis) ซึ่งถูกเขียนขึ้นโดยภาษาฟอร์แทรนและได้รวมเอาการพัฒนาโปรแกรมลินแพค (Linpack) และอีสปัค (EISPACK) มาใช้ด้วย ทำให้นักศึกษาสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเกี่ยวกับการคำนวณทางด้านเมทริกซ์โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมในภาษาฟอร์แทรน

ปัจจุบันความสามารถของโปรแกรมแมทแลบถูกพัฒนาขึ้นจากเดิมอย่างมาก และมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง โปรแกรมแมทแลบถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านการวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ตลอดจนการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์

การทำงานของโปรแกรมแม่ทแลบจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันหรือโปรแกรมพิเศษขึ้นมาใช้ จน โดยเฉพาะในรูปของเอ็มไฟล์ (M-files) ซึ่งสามารถนำมาใช้งานทางด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณเกี่ยวกับแมทริกซ์

โปรแกรมแม่ทแลบสามารถทำแมทริกซ์ทรานส์โพส, การคูณแมทริกซ์, การหาดีเทอร์มิแนนท์, การทำอินเวอร์ส, ค่าเจาะจง, การแก้สมการเชิงเส้น, และการประมาณค่าพารามิเตอร์

2. การคำนวณโพลีโนเมียล

โปรแกรมแม่ทแลบสามารถใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับโพลีโนเมียล เช่น การหารากของโพลีโนเมียล การหาคอนโวลูชัน (convolution) และดีคอนโวลูชัน (deconvolution) การหารโพลีโนเมียล และการหาสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียล

3. การจัดการเกี่ยวกับเวกเตอร์ และการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมแม่ทแลบสามารถนำมาคำนวณผลรวมแบบเวกเตอร์, การหาค่าเฉลี่ย, การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าโคแวนเรียนซ์, และ การหาค่าสูงสุดต่ำสุดของข้อมูล

4. การจัดการเกี่ยวกับการแสดงผลกราฟ

โปรแกรมแม่ทแลบมีการแสดงผลเป็นกราฟให้เลือกได้ 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

โปรแกรมแม่ทแลบสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมภาษาอื่น ๆ เช่น โปรแกรมภาษาซี และ โปรแกรมภาษาฟอร์แทรน นอกจากนี้โปรแกรมแม่ทแลบ มี Toolboxes ที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งใช้ในสาขาต่าง ๆ เช่น

- Control System Toolbox
- Fuzzy Logic Toolbox
- Image Processing Toolbox
- Model Predictive Control Toolbox

- Mu-Analysis and Synthesis Toolbox
- Nonlinear Control Design Toolbox
- Neural Network Toolbox
- Optimization Toolbox
- Signal Processing Toolbox
- SIMULINK
- Statistics Toolbox
- System Identification Toolbox
- Spline Toolbox
- Robust Control Toolbox

ค.2 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เม็ทแลบในการควบคุมค่าพีเอช

สำหรับในงานวิจัยนี้ โปรแกรมสำคัญ ๆ มีอยู่ 3 โปรแกรมคือ โปรแกรมที่ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต, โปรแกรมที่ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ และโปรแกรมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีเอชดี ในการควบคุมค่าพีเอชและความสูงของระดับน้ำในถัง ลำดับขั้นตอนในการเขียนโปรแกรมทั้ง 3 โปรแกรม มีความคล้ายกันและแตกต่างกันดังนี้

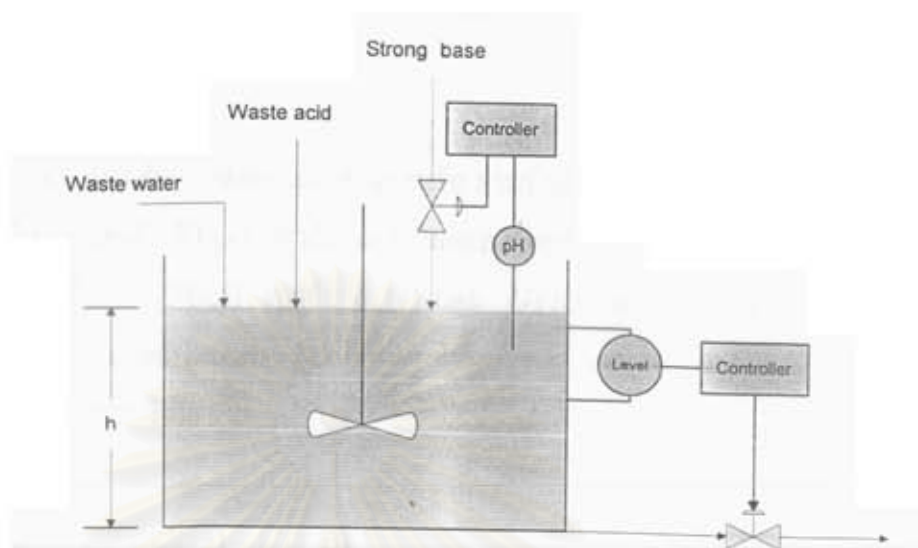
ความคล้ายกัน ในส่วนของ

- กระบวนการและค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการ
- ในการแก้สมการอนุพันธ์ใช้วิธีของริงก์ตาดอันดับสี่ (4th order Runge-Kutta Method)
- ใช้หลักการของอินทิกรัลความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) ในการหาสมรรถนะของตัวควบคุม
- แสดงผลการควบคุมในรูปของกราฟการตอบสนองของกระบวนการในแกน x-y

ความแตกต่างกัน ในส่วนของ

- ตัวควบคุม

กระบวนการควบคุมค่าพีเอชในถังละเห็นของกรดแก่และต่างแก่



รูปที่ ค.1 กระบวนการควบคุมค่าพีเอชในถังสะเทิน

แบบจำลองของกระบวนการอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A}(q_a + q_w + q_b - q) \quad (\text{ค.1})$$

$$\frac{dC_{H^+}}{dt} = \frac{1}{Ah}(q_a(C_{H^+a} - C_{H^+}) + q_w(C_{H^+w} - C_{H^+}) - q_b(C_{OH^-} + C_{H^+})) \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ	h = ความสูงของระดับน้ำในถัง	หน่วย m
	A = พื้นที่หน้าตัดของถัง	หน่วย m^2
	q_a = อัตราไหลเชิงปริมาตรของน้ำเสียเข้าถัง	หน่วย m^3 / min
	q_w = อัตราไหลเชิงปริมาตรของกรดเสียเข้าถัง	หน่วย m^3 / min
	q_b = อัตราไหลเชิงปริมาตรของด่างโซดาไฟเข้าถัง	หน่วย m^3 / min
	q = อัตราไหลออกเชิงปริมาตรของน้ำทิ้ง	หน่วย m^3 / min
	C_{H^+a} = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในกรดเสีย	หน่วย g / min
	C_{H^+w} = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในน้ำเสีย	หน่วย g / min
	C_{H^+} = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในถัง	หน่วย g / min

C_{OH^-} = ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสายต่าง หน่วย g/min

กำหนดตัวแปรดังนี้คือ

ให้ X , U แทนตัวแปรสแตต และตัวแปรปรับ ตามลำดับ

ดังนั้น กำหนดให้ เวกเตอร์ $X(1,i)$ เท่ากับ $h(i)$ และเวกเตอร์ $X(2,i)$ เท่ากับ $C_{H^+}(i)$

ส่วนตัวแปรปรับ $U(1,i)$ เท่ากับ $q_b(i)$ และ $U(2,i)$ เท่ากับ $q(i)$

เมื่อ i แทนเวลาใดๆ ในลูทโปรแกรม

จัดสมการ (ค.1) และ (ค.2) ใหม่

$$\frac{dX(1,i)}{dt} = \frac{1}{A}(q_a + q_b + U(1,i) - U(2,i)) \quad \text{ค.3}$$

$$\frac{dX(2,i)}{dt} = \frac{dt}{AX(1,i)} [q_a(C_{Ha} - X(2,i)) + q_w(C_{Hw} - X(2,i)) - U(1,i)(C_{OH} + X(2,i))] \quad \text{ค.4}$$

แก้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งโดยระเบียบวิธีของวิธีรังกัดตา ที่อยู่ในรูปแบบ explicit ได้ดังนี้

$$k_1(i) = \frac{dt}{A}(q_a + q_b + U(1,i) - U(2,i))$$

$$l_1(i) = \frac{dt}{AX(1,i)} [q_a(C_{Ha} - X(2,i)) + q_w(C_{Hw} - X(2,i)) - U(1,i)(C_{OH} + X(2,i))]$$

$$k_2(i) = \frac{dt}{A}(q_a + q_w + U(1,i) - U(2,i)) = k_1(i)$$

$$l_2(i) = \frac{dt}{A(X(1,i) + \frac{k_1(i)}{2})} \{q_a[C_{Ha} - (X(2,i) + \frac{l_1(i)}{2})] + q_w[C_{Hw} - (X(2,i) + \frac{l_1(i)}{2})]$$

$$- U(1,i)[C_{OH} + (X(2,i) + \frac{l_1(i)}{2})]\}$$

$$k_3(i) = \frac{dt}{A}(q_a + q_w + U(1,i) - U(2,i)) = k_2(i)$$

$$l_3(i) = \frac{dt}{A(X(1,i) + \frac{k_2(i)}{2})} \{q_a[C_{Ha} - (X(2,i) + \frac{l_2(i)}{2})] + q_w[C_{Hw} - (X(2,i) + \frac{l_2(i)}{2})] - U(1,i)[C_{OH} + (X(2,i) + \frac{l_2(i)}{2})]\}$$

$$k_4(i) = \frac{dt}{A}(q_a + q_b + U(1,i) - U(2,i)) = k_4(i)$$

$$l_4(i) = \frac{dt}{A(X(1,i) + k_4(i))} \{q_a[C_{Ha} - (X(2,i) + l_3(i))] + q_w[C_{Hw} - (X(2,i) + l_3(i))] - U(1,i)[C_{OH} + (X(2,i) + \frac{l_3(i)}{2})]\}$$

จะได้สมการการแก่อนุพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} X(1,i+1) &= X(1,i) + \frac{1}{6}(k_1(i) + 2k_2(i) + 2k_3(i) + k_4(i)) \\ &= X(1,i) + \frac{1}{6}(6k_1(i)) \end{aligned}$$

$$X(1,i+1) = X(1,i) + \frac{dt}{A}(q_a + q_b + U(1,i) - U(2,i)) \quad \text{ค.5}$$

และ
$$X(2,i+1) = X(2,i) + \frac{1}{6}(l_1(i) + 2l_2(i) + 2l_3(i) + l_4(i)) \quad \text{ค.6}$$

เมื่อ dt คือ ความกว้างช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Step time)

- ส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ ที่ใช้ในการทุกโปรแกรมจึงอยู่ในรูป

$$X(1,i+1) = X(1,i) + \frac{dt}{A}(q_a + q_b + U(1,i) - U(2,i)) \quad \text{ค.5}$$

$$X(2,i+1) = X(2,i) + \frac{1}{6}(l_1(i) + 2l_2(i) + 2l_3(i) + l_4(i)) \quad \text{ค.6}$$

- สำหรับการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม จะใช้เกณฑ์ของการอินทิกรัลของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด ซึ่งมีสมการดังนี้

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad \text{ค.7}$$

เมื่อ $e(t) = sp(t) - x(t)$

- การควบคุมแบบป้อนกลับสแตต

ในการเขียนโปรแกรม สมการตัวควบคุมจะจัดอยู่ในรูปเวโลซิตี ดังนี้

$$U(:,i) = U(:,i-1) - K_p[X(:,i) - X(:,i-1)] - K_i \Delta t [X(:,i) - X(:,1)] \quad \text{ค.8}$$

เมื่อ K_p = ค่าอัตราขยายของการป้อนกลับสแตต

K_i = ค่าอัตราขยายของการป้อนกลับสแตตร่วมกับอินทิกรัลคอนโทรล

- การควบคุมแบบป้อนกลับสแตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

ตัวควบคุมที่ใช้ยังคงเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต เพียงแต่เพิ่มเติมส่วนของการประมาณค่าเข้าไป โดยนำค่าที่ได้จากการประมาณ (\hat{X}) แทนเข้าไปในส่วนของตัวแปรสแตต จะได้ส่วนของสมการตัวควบคุมใหม่ดังนี้

$$U(:,i) = U(:,i-1) - K_p[\hat{X}(:,i) - \hat{X}(:,i-1)] - K_i \Delta t [\hat{X}(:,i) - \hat{X}(:,1)] \quad \text{ค.9}$$

- การควบคุมแบบพีไอดี

ในการเขียนโปรแกรม สมการตัวควบคุมจะจัดอยู่ในรูปเวโลซิตี เช่นเดียวกัน

สำหรับการควบคุมความสูงของระดับน้ำในถัง

$$U(2,i) = U(2,i-1) + K_{c1}[\Delta e(1,i) + \frac{\Delta t}{T_{d1}} e(1,i) + \frac{T_{i2}}{\Delta t} (e(1,i) - 2(e(1,i-1)) + e(1,i-2))] \quad \text{ค.10}$$

$$\Delta e(1,i) = e(1,i) - e(1,i-1)$$

$$e(1,i) = X(1,1) - X(1,i)$$

สำหรับการควบคุมค่าพีเอช

$$U(1,i) = U(1,i-1) + K_{c2} \left[\Delta e(2,i) + \frac{\Delta t}{\tau_{i2}} e(2,i) + \frac{\tau_{d2}}{\Delta t} (e(2,i) - 2(e(2,i-1)) + e(2,i-2)) \right] \quad \text{ค.11}$$

$$\Delta e(1,i) = e(1,i) - e(1,i-1)$$

$$e(2,i) = X(2,1) - X(2,i)$$

เมื่อ

K_{c1}, K_{c2} = ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการควบคุมความสูงของระดับน้ำและการควบคุมค่าพีเอชตามลำดับ

τ_{i1}, τ_{i2} = ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมแบบพีไอดี สำหรับการควบคุมความสูงของระดับน้ำและการควบคุมค่าพีเอชตามลำดับ

τ_{d1}, τ_{d2} = ค่าคงที่เวลาอนุพันธ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี สำหรับการควบคุมความสูงของระดับน้ำและการควบคุมค่าพีเอชตามลำดับ

ตัวอย่างโปรแกรม สำหรับควบคุมค่าพีเอชและความสูงระดับน้ำของถัง

- กำหนดค่าเริ่มต้นของกระบวนการ

```

%%%%%%%%%%%%%%
%***** Initial condition *****%
%%%%%%%%%%%%%%

clear all

clc

to=0;

qa = 3.156*10^(-3); % input (' flow rate of waste acid (m^3/min) = ');
qw = 296.4*10^(-3); %input (' flow rate of waste water (m^3/min) = ');
CHa = 0.93*1000; %input (' Concentration of waste acid (g/m^3) = ');
CoH = 2.16*1000; %input(' Concentration of base (g/m^3) = ');
CHw = 0.004*1000; %input(' Concentration of waste water (g/m^3) = ');
A = 13; %cross-section area -m-
```

```

U(1,1)=1.907*10^(-3);           %input (' flow rate of base (m^3/min) = ');
U(2,1)=301.46*10^(-3);         %input (' flow rate of output stream (m^3/min) = ')
X(2,1)=10^(-7)*1000;           %concentration of aid in tank - g/m^3 -
X(1,1)=2;                       %level height - m -
pH(1,1)=7;                      %pH value in tank

```

```
%      Setpoint
```

```
to=0;
```

```
X1sp=2*ones(1,nT);
```

```
pHsp=7*ones(1,nT);
```

```
%      Initial IAE
```

```
IAE1=0;
```

```
IAE2 =0;
```

● **คำนวณหาค่าระดับความสูงและค่าพีเอชโดยวิธีรังกัดตาอันดับ 4**

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
T = 60;                          %input (' running time (min) = ');
```

```
dt =0.02;                        %input (' sampling time (min) = ');
```

```
nT = T/dt+1;
```

```
t = linspace(0,T,nT);
```

```
for i=2:nT
```

```
k1(i)=(dt/A)*(qa+qw+U(1,i)-U(2,i));
```

```
I1(i)=(dt/A*X(1,i))*(qa*(CHa-X(2,i))+qw*(CHw-X(2,i))-U(1,i)*(CoH+X(2,i)));
```

```
k2(i)=k1(i);
```

```
I2(i)=(dt/A*(X(1,i)+k1(i)/2))*(qa*(CHa-(X(2,i)+I1(i)/2))+qw*(CHw-(X(2,i)+I1(i)/2))-
U(1,i)*(CoH+(X(2,i)+I1(i)/2)));
```

```
k3(i)=k2(i);
```

```
I3(i)=(dt/A*(X(1,i)+k2(i)/2))*(qa*(CHa-(X(2,i)+I2(i)/2))+qw*(CHw-(X(2,i)+I2(i)/2))-
U(1,i)*(CoH+(X(2,i)+I2(i)/2)));
```

```
k4(i)=k3(i);
```

```
I4(i)=(dt/A*(X(1,i)+k3(i)))*(qa*(CHa-(X(2,i)+I3(i)))+qw*(CHw-(X(2,i)+I3(i)))-
U(1,i)*(CoH+(X(2,i)+I3(i))));
```

```
X(1,i+1)=X(1,i)+(dt/A)*(qa+qw+U(1,i)-U(2,i));
```

```
X(2,i+1)=X(2,i)+(1/6)*(I1(i)+2*I2(i)+2*I3(i)+I4(i));
```

```
pH(1,i)=-log10(X(2,i)/1000);
```

- การคำนวณหาค่า IAE1 และ IAE2

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
error(1,i)=abs(2-X(1,i));
```

```
error(2,i)=abs(7-pH(1,i));
```

```
IAE1=IAE1+(error(1,i)*dt);
```

```
IAE2=IAE2+(error(2,i)*dt);
```

```
end
```

```
IAE1
```

```
IAE2
```

- การแสดงผลการตอบสนองของการควบคุมค่าพีเอชและความสูงของระดับน้ำในถัง
ในรูปแบบกราฟแกน x-y

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
figure
```

```
subplot(2,1,1)
```

```
plot(t,X(1,:),'g',t,X1sp,'-r')
```

```
legend('h','hsp')
```

```
ylabel('h (m)')
```

```

xlabel ('TIME (min)')
title ('Level Control')
axis([0 60 1.9 2.1])
subplot(2,1,2)
plot (t,U(2,:),'g')
ylabel ('q (m^3/min)')
xlabel ('TIME (min)')
axis([0 60 0 0.5])
figure
subplot(2,1,1)
plot (t,pH(1,:),'g',t,pHsp,'-r')
legend('pH','pHsp')
ylabel ('pH')
xlabel ('TIME (min)')
title ('pH Control ')
axis([0 60 5 9])

subplot(2,1,2)
plot (t,U(1,:),'g')
ylabel ('qb,(m^3/min)')
xlabel ('TIME (min)')
axis([0 60 0.001906 1.909*10^(-3)])

```

- ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต

```

%%%%%%%%%%
%*****State feedback control*****%
%%%%%%%%%%

```



```

% Choose closed-loop pole
cp=[-1.5 -24];
% Locally linearization
a11(i)=0;
a12(i)=0;
a21(i)=(-1/((X(1,i)^(2))))*((a3-a1*X(2,i))+(a4-a2*X(2,i))-(U(1,i-1)*(a5+a6*X(2,i))));
a22(i)=(1/(X(1,i)))*(-a1-a2-a6*U(1,i-1));
b11(i)=1/A;                b12(i)=-1/A;
b21(i)=(-1/A*X(1,i))*(CoH+X(2,i));    b22(i)=0;

a=[a11(i) a12(i);a21(i) a22(i)];
b=[b11(i) b12(i);b21(i) b22(i)];
% Calculation Kp by use "place toolbox"
Kp=place(a,b,cp);
Ki=1/3*Kp;
% State feedback algorithm
U(1:2,i)=U(1:2,i-1)-Kp*(X(1:2,i)-X(1:2,i-1))-Ki*dt*(X(1:2,i)-X(1:2,1));

```

• ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%*****State feedback controller with Kalman filter*****
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parameter Tuning of Kalman
P11=100 ;                %input('P11=');
P22=10;                  %input('P22=');
P=[P11 0; 0 P22];
Q1=1e+06;                %input('Q1=');
Q2=1e+08;                %input('Q2=');

```



```

% Parameter tuning of PID controller
Kc=20; %input('Kc=');
Ki= 3.07; %input('Ki=');
Kcc=0.00004; %input('Kcc=');
Kii=7.05; %input('Kii=');
Kdd=0.002; %input('Kdd=');

% PID Controller
e(1,i)=X(1,i)-X(1,1);
U(2,i)=U(2,i-1)+Kc*((e(1,i)-e(1,i-1))+(dt/Ki)*e(1,i));

e(2,i)=7-pH(1,i);
U(1,i)=U(1,i-1)+Kcc*((e(2,i)-e(2,i-1))+(dt/Kii)*e(2,i)+(Kdd/dt)*
(e(2,i)-2*e(2,i-1)+e(2,i-2)));

end

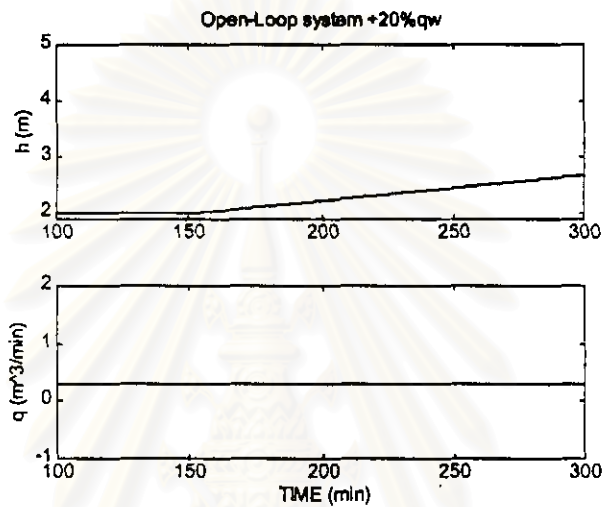
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

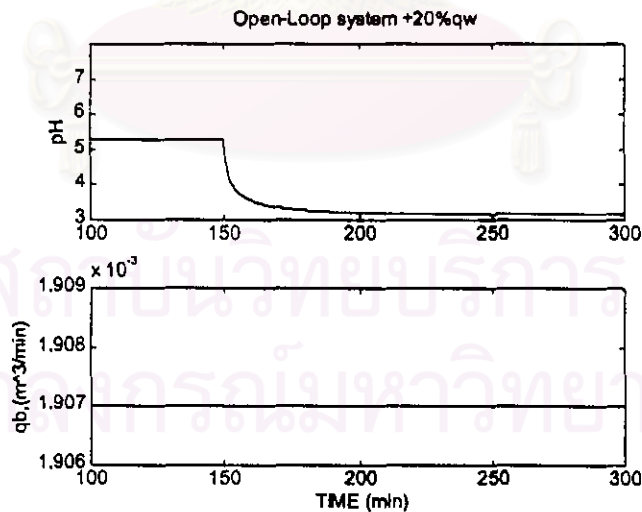
ภาคผนวก ง

ข้อมูลและรายละเอียดจากการทดลอง

ง.1 กรณีเมื่อไม่มีการควบคุม (Open-loop system)



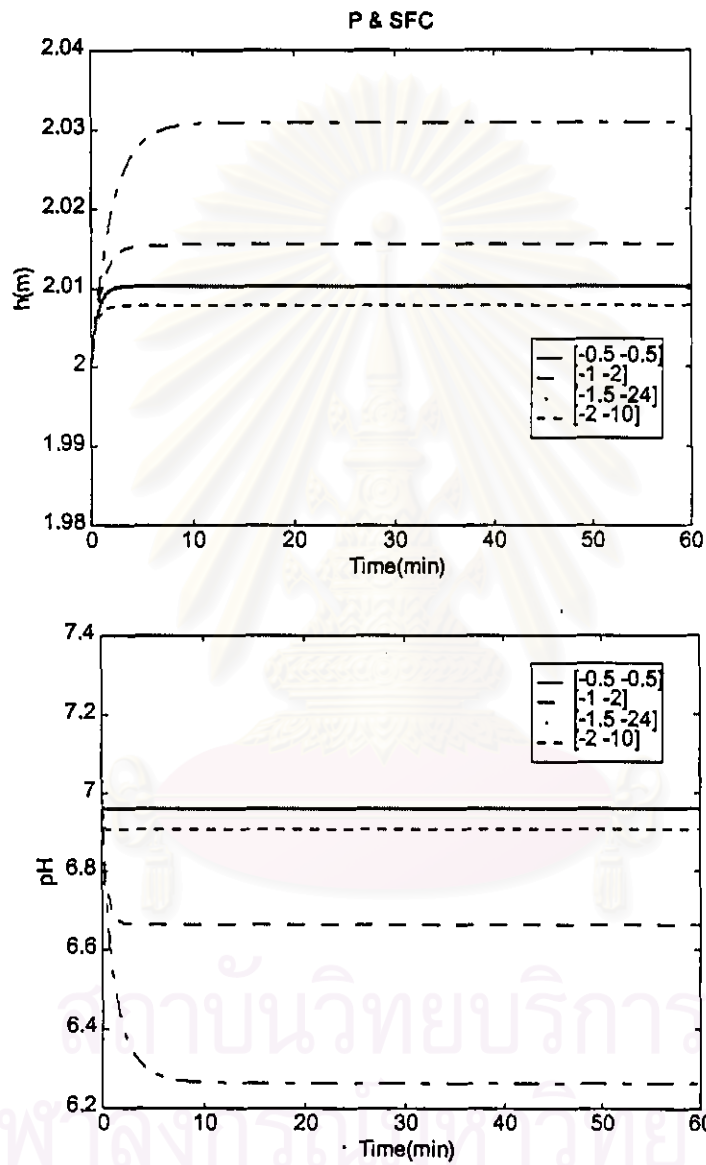
รูปที่ ง.1 a) แสดงกราฟการตอบสนองของกระบวนการควบคุมความสูงของระดับน้ำในถังเมื่อไม่มีตัวควบคุม และมี q_w เพิ่มขึ้น 20 % ที่ 150 นาที, $\text{pole} = 0$



รูปที่ ง.1 b) แสดงกราฟการตอบสนองของกระบวนการควบคุมค่าพีเอชเมื่อไม่มีตัวควบคุม และมี q_w เพิ่มขึ้น 20 % ที่ 150 นาที, $\text{pole} = -0.017$

ง.2 การควบคุมแบบป้อนกลับสแตต

- การจูนค่าอัตราขยายการป้อนกลับสแตต (K_p)



รูป ง.2.1 แสดงค่าclosed - loop poles กับการควบคุม Level (รูปบน) และการควบคุม pH (รูปล่าง) ด้วยตัวควบคุมแบบ พี-ป้อนกลับสแตต

ตารางที่ ง.1 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบพี-ป้อนกลับสเตต เมื่อมี ค่าclosed- loop polesต่าง ๆ (cp1 = closed-loop pole of level control ,cp2 =closed-loop pole of pH control)

Cp 1	Cp 2	IAE	
		level	PH
-0.5	-0.5	0.5569	11.2637
-0.5	-1	0.5569	14.0805
-0.5	-1.5	0.5569	7.2795
-0.5	-2	0.5569	6.1684
-0.5	-2.5	0.5569	5.352
-0.5	-3	0.5569	4.7273
-0.5	-3.5	0.5569	4.2338
-0.5	-4	0.5569	3.8341
-0.5	-4.5	0.5569	3.5037
-0.5	-5	0.5569	3.226
-0.5	-6	0.5569	2.7849
-0.5	-8	0.5569	2.1874
-0.5	-10	0.5569	1.8014
-0.5	-15	0.5569	1.2502
-0.5	-17	0.5569	1.1139
-0.5	-20	0.5569	0.9574
-0.5	-23	0.5569	0.8395
-0.5	-26	0.5569	0.7474
-0.5	-30	0.5569	0.6521
-0.5	-35	0.5569	0.5624
-0.5	-40	0.5569	0.4944
-0.5	-50	0.5569	0.3982

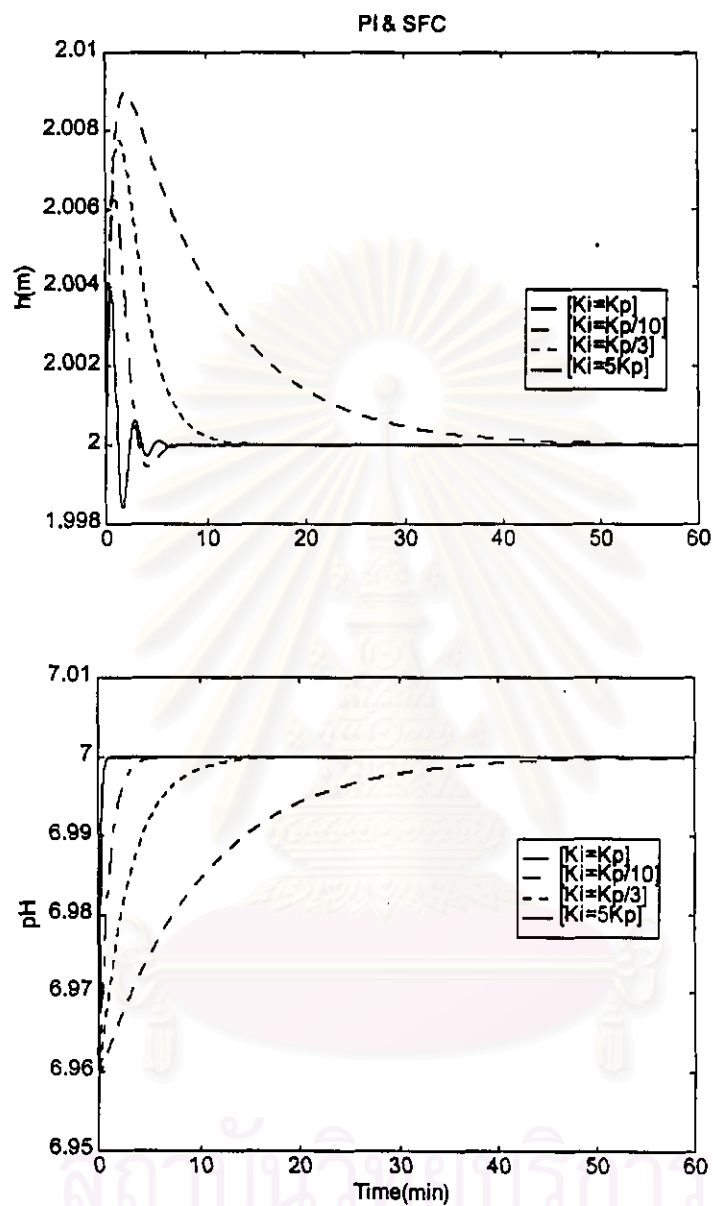
Cp 1	Cp 2	IAE	
		level	pH
-0.5	-0.5	0.5569	11.2637
-1	-0.5	0.2939	11.259
-1.5	-0.5	0.1994	11.2568
-2	-0.5	0.1508	11.2554
-2.5	-0.5	0.1213	11.2546
-3	-0.5	0.1014	11.254
-3.5	-0.5	0.0871	11.2535
-4	-0.5	0.0764	11.2532
-4.5	-0.5	0.068	11.2529
-5	-0.5	0.0613	11.2527
-6	-0.5	0.0511	11.2523
-8	-0.5	0.0384	11.2519
-10	-0.5	0.0308	11.2516
-15	-0.5	0.0206	11.2513
-17	-0.5	0.0181	11.2512
-20	-0.5	0.0154	11.2511
-23	-0.5	0.0134	11.251
-26	-0.5	0.0119	11.251
-30	-0.5	0.0103	11.2509
-35	-0.5	0.0088	11.2508
-40	-0.5	0.0077	11.2508
-50	-0.5	0.0066	11.2507

ตารางที่ ๓.1 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบพี-ป้อนกลับสเตต เมื่อมี ค่าclosed- loop polesต่าง ๆ (ต่อ)

Cp 1	Cp 2	IAE	
		level	pH
-0.5	-60	0.5569	0.3332
-0.5	-65	0.5569	0.3081
-0.5	-70	0.5569	0.2866
-0.5	-80	0.5569	0.2514
-0.5	-100	0.5569	0.2018
-0.5	-110	0.5569	0.1836
-0.5	-120	0.5569	0.1685
-0.5	-150	0.5569	0.1351
-0.5	-180	0.5569	0.1128
-0.5	-200	0.5569	0.1016
-1	-0.5	0.2939	11.259
-1	-1	0.2939	8.8572
-1	-1.5	0.2939	7.2681
-1	-2	0.2939	6.1589
-1	-2.5	0.2939	5.3442
-1	-3	0.2939	4.721
-1	-3.5	0.2939	4.2288
-1	-4	0.2939	3.8300
-1	-5	0.2939	3.2231
-1	-6	0.2939	2.7828
-1	-8	0.2939	2.1863
-1	-10	0.2939	1.8007
-1	-13	0.2939	1.4242
-1	-16	0.2939	1.1779

Cp 1	Cp 2	IAE	
		level	pH
-60	-0.5	0.0052	11.2507
-65	-0.5	0.0048	11.2507
-70	-0.5	0.0044	11.2507
-80	-0.5	0.0039	11.2507
-100	-0.5	0.0031	11.2506
-110	-0.5	0.0028	11.2506
-120	-0.5	0.0026	11.2506
-150	-0.5	0.0021	11.2506
-180	-0.5	0.0017	11.2506
-200	-0.5	0.0015	11.2506
-0.5	-1	0.5569	14.0805
-1	-1	0.2939	8.8572
-1.5	-1	0.1994	8.8517
-2	-1	0.1508	8.8485
-2.5	-1	0.1213	8.8464
-3	-1	0.1014	8.8449
-3.5	-1	0.0871	8.8438
-4	-1	0.0764	8.8429
-5	-1	0.0613	8.8417
-6	-1	0.511	8.8409
-8	-1	0.0384	8.8398
-10	-1	0.0308	8.8391
-13	-1	0.0237	8.8385
-16	-1	0.0193	8.8381

- การรูนค่าอัตราขยายการป้อนกลับสเตตกับอินทีกรัลคอลลโทรล(K_i)



รูป ง.2.2 การควบคุมค่าความสูง(รูปบน)การควบคุมpH(รูปล่าง) ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ-ป้อนกลับสเตต โดยมีค่า closed-loop poles = [-1.5,-24] แต่มี K_i ต่าง ๆ กัน

ตารางที่ ง.2 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบพีไอ-ป้อนกลับสแตตเมื่อมีค่าKi ต่างๆ

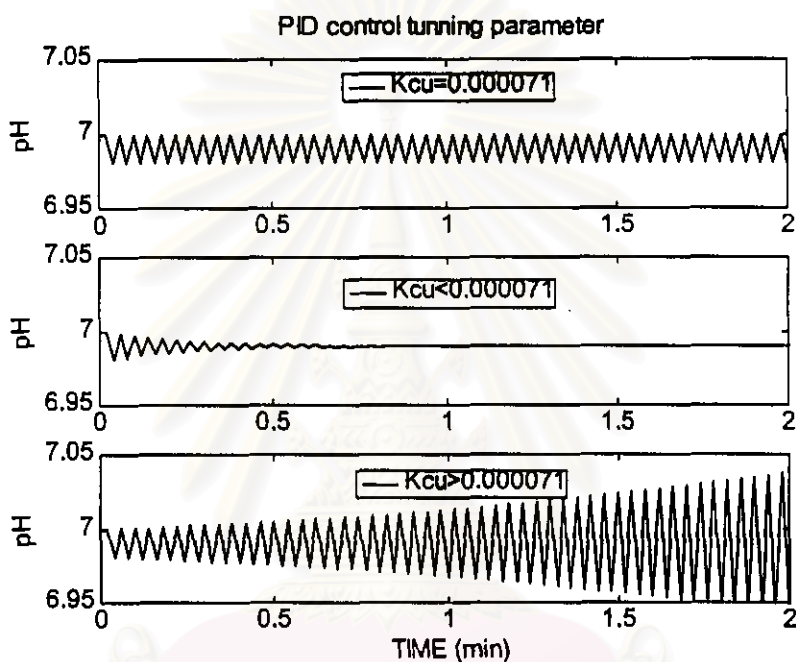
cp1	cp2	Ki=1/n*kp	IAE		Ki=n*kp	IAE	
		n	Level	pH	n	Level	pH
-1.5	-15	1	0.0123	0.0658	1	0.0123	0.0658
-1.5	-15	2	0.0208	0.1316	2	0.0081	0.0364
-1.5	-15	3	0.0309	0.1973	3	0.0064	0.0279
-1.5	-15	4	0.0411	0.2618	4	0.0055	0.0235
-1.5	-15	5	0.051	0.3237	5	0.0049	0.0207
-1.5	-15	6	0.0602	0.3817	6	0.0044	0.0188
-1.5	-15	7	0.0688	0.435	7	0.0041	0.0173
-1.5	-15	8	0.0766	0.4837	8	0.0038	0.0161
-1.5	-15	9	0.0837	0.528	9	0.0036	0.0151
-1.5	-15	10	0.0901	0.5681	10	0.0034	0.0143
-1.5	-15	15	0.1145	0.7204	15	0.0028	0.0116
-1.5	-15	20	0.1303	0.8193	20	0.0024	0.0100
-1.5	-10	1	0.0123	0.1003	1	0.0123	0.1003
-1.5	-10	2	0.0208	0.1941	2	0.0081	0.0621
-1.5	-10	3	0.0309	0.2911	3	0.0064	0.0491
-1.5	-10	4	0.0411	0.3866	4	0.0055	0.0419
-1.5	-10	5	0.051	0.4782	5	0.0049	0.0372
-1.5	-10	6	0.0602	0.5639	6	0.0044	0.0338
-1.5	-10	7	0.0688	0.6426	7	0.0041	0.0312
-1.5	-10	8	0.0766	0.7142	8	0.0038	0.0291
-1.5	-10	9	0.0836	0.7791	9	0.0036	0.0274
-1.5	-10	10	0.0901	0.8377	10	0.0034	0.026
-1.5	-10	15	0.1145	1.0584	15	0.0028	0.0212
-1.5	-10	20	0.1303	1.2	20	0.0024	0.0183

ตารางที่ ๓.2 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบพีไอ-ป้อนกลับสแตตเมื่อมีค่าKi ต่างๆ (ต่อ)

cp1	cp2	Ki=1/n*kp	IAE		Ki=n*kp	IAE	
		n	Level	pH	n	level	pH
-1.0	-15	1	0.0214	0.0658	1	0.0214	0.0658
-1.0	-15	2	0.0337	0.1316	2	0.0145	0.0364
-1.0	-15	3	0.0468	0.1973	3	0.0117	0.028
-1.0	-15	4	0.0618	0.2619	4	0.01	0.0236
-1.0	-15	5	0.0768	0.3238	5	0.0089	0.0208
-1.0	-15	6	0.0909	0.3817	6	0.0081	0.0188
-1.0	-15	7	0.1039	0.4351	7	0.0075	0.0173
-1.0	-15	8	0.1157	0.4838	8	0.007	0.0161
-1.0	-15	9	0.1264	0.5281	9	0.0066	0.0151
-1.0	-15	10	0.136	0.5682	10	0.0063	0.0143
-1.0	-15	15	0.1722	0.7205	15	0.0051	0.0116
-1.0	-15	20	0.1953	0.8195	20	0.0044	0.01
-1.5	-24	1	0.0122	0.0416	1	0.0122	0.0416
-1.5	-24	2	0.208	0.0832	2	0.0080	0.0208
-1.5	-24	3	0.309	0.1247	3	0.0064	0.0139
-1.5	-24	4	0.0411	0.1654	4	0.0055	0.0104
-1.5	-24	5	0.0510	0.2024	5	0.0049	0.0083
-1.5	-24	6	0.0602	0.2407	6	0.0044	0.0069
-1.5	-24	7	0.0688	0.2743	7	0.0041	0.0059
-1.5	-24	8	0.0766	0.3051	8	0.0038	0.0052
-1.5	-24	9	0.0837	0.3332	9	0.0036	0.0046
-1.5	-24	10	0.0901	0.3587	10	0.0034	0.0042
-1.5	-24	15	0.1145	0.4567	15	0.0028	0.0030
-1.5	-24	20	0.1303	0.5212	20	0.0024	0.0024

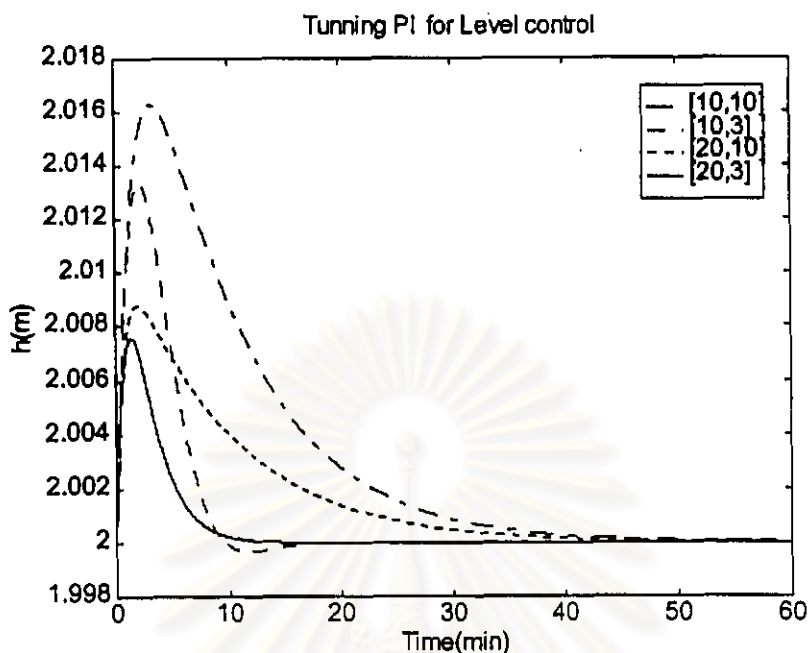
ง.3 การควบคุมแบบพีไอดี

- ใช้วิธี Ziegler- Nichols โดย Continuous Cycling Method ในการหาค่า K_c , τ_I , และ τ_D สำหรับการควบคุมค่า pH สำหรับการควบคุมระดับน้ำในถัง ใช้วิธี trial and error



รูปที่ ง.3.1 แสดงการหาค่าตัวจูนพารามิเตอร์พีไอดี โดยวิธี Continuous Cycling Method ของ Ziegler-Nichols Method ในการควบคุมค่าพีเอช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3.2 แสดงการหาค่า K_c และ τ_i ของการควบคุมแบบพีไอดี สำหรับการควบคุมระดับน้ำโดยวิธี Trial and Error (ค่าแรกเป็น K_c และค่าที่สองเป็น τ_i)

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่า IAE ของการควบคุม level และ pH ต่อการจูนค่า K_c และ τ_i

K_c	τ_i	IAE	
		Level	pH
20	10	0.1747	0.1235
10	10	0.1988	0.1235
5	10	0.4010	0.1235
1	10	2.4434	0.1235
0.1	10	10.1084	0.1235
10	25	0.4042	0.1235
5	25	0.8156	0.1235
2	25	2.0830	0.1235
1	25	4.0166	0.1235
10	50	0.5506	0.1235
5	50	1.0944	0.1235
2	50	2.6449	0.1235

ตารางที่ ๔.3 ตารางแสดงค่า IAE ของการควบคุม level และ pH ต่อการจูนค่า Kc และ τ_i (ต่อ)

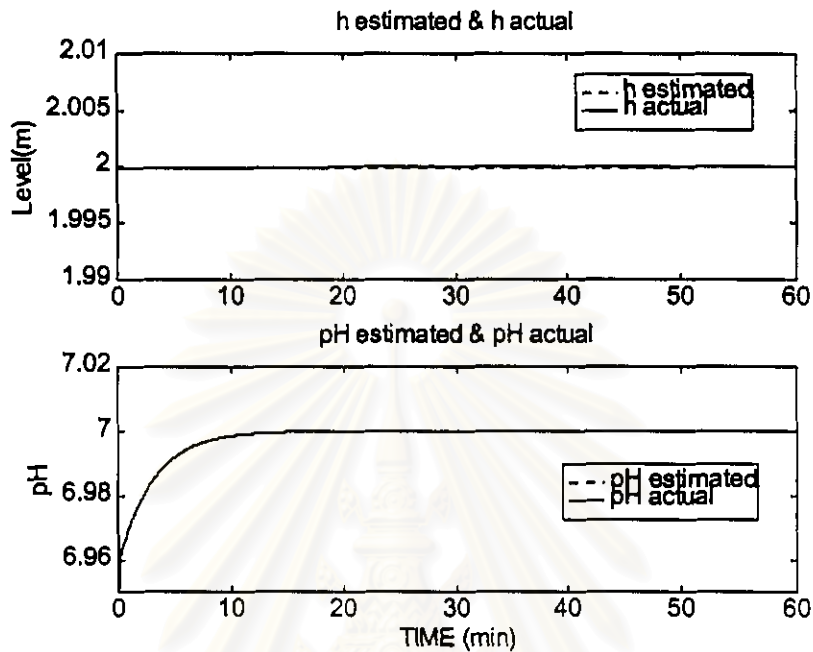
Kc	τ_i	IAE	
		level	pH
20	0.1	0.0033	0.1235
10	0.1	0.0093	0.1235
5	0.1	0.0261	0.1235
1	0.1	0.2284	0.1235
0.1	0.1	1.3209	0.1235
20	1	0.0118	0.1235
10	1	0.0311	0.1235
5	1	0.0850	0.1235
1	1	0.7275	0.1235
0.1	1	3.8734	0.1235
20	2	0.0202	0.1235
10	2	0.0474	0.1235
5	2	0.1244	0.1235
1	2	1.0286	0.1235
0.1	2	6.5967	0.1235
20	3	0.0301	0.1235
10	3	0.0633	0.1235
5	3	0.1580	0.1235
1	3	1.2840	0.1235
0.1	3	7.91158	0.1235
20	5	0.0502	0.1235
10	5	0.1005	0.1235
5	5	0.2212	0.1235
1	5	1.6566	0.1235
0.1	5	9.1158	0.1235

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่า IAE ของการควบคุม level และ pH ต่อการรบกวนค่า Kc และ τ , (ต่อ)

Kc	τ	IAE	
		Level	pH
1	100	5.1207	0.1235
1	50	4.7250	0.1235
1	25	4.0166	0.1235
1	10	2.4434	0.1235
1	5	1.6566	0.1235
1	4	1.5121	0.1235
1	3	1.2840	0.1235
1	2	1.0286	0.1235
1	1.2	0.7880	0.1235
1	1.1	0.7557	0.1235
1	1	0.7275	0.1235
1	0.1	0.2284	0.1235
1	0.01	0.0724	0.1235
5	20	0.7113	0.1235
5	10	.4010	0.1235
5	5	0.2212	0.1235
5	1	0.0850	0.1235
5	0.1	0.0261	0.1235
5	0.01	0.0083	0.1235
10	20	0.3513	0.1235
10	10	0.1988	0.1235
10	5	0.1005	0.1235
10	1	0.0311	0.1235
10	0.1	0.0093	0.1235
10	0.01	0.0029	0.1235
20	20	0.1747	0.1235
20	10	0.0990	0.1235

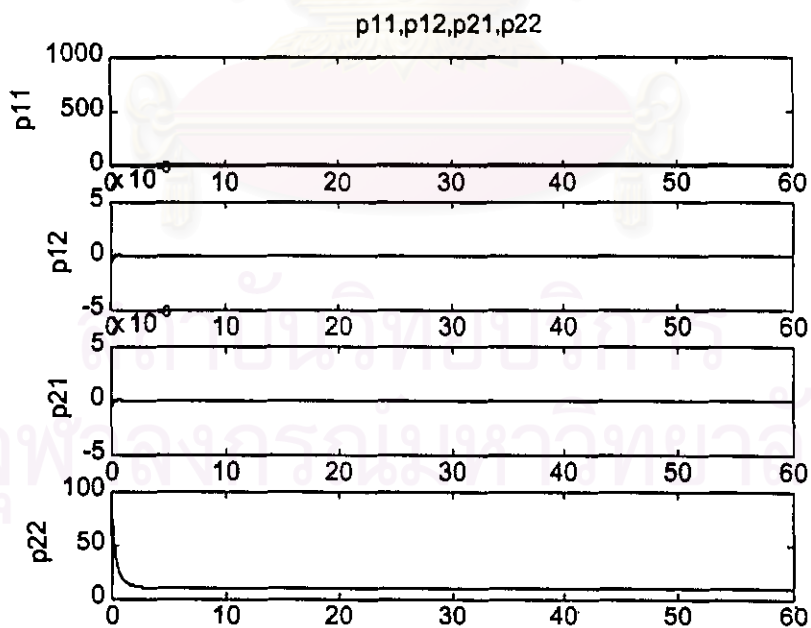
ง.4 การควบคุมแบบป้อนกลับสเตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์

- ตัวอย่าง การจูนค่า P, Q, R กรณีสภาวะคงที่



รูป ง.4.1 แสดงค่าประมาณและค่าจริงของค่าแปรสแตต เมื่อ $P_0 = [100 \ 0 \ ; \ 0 \ 10 \]$,

$$Q = [1+06 \ 0 \ ; \ 0 \ 1e+08 \] \quad R = [1.2 \ 0 \ ; \ 0 \ 100 \]$$



รูป ง.4.2 แสดงค่าความแปรปรวนร่วมของความผิดพลาดจากการประมาณ (P)

ตารางที่ ง.4 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับเสถียรร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์
เมื่อมีค่า P, Q และ R ต่างๆ กรณี สภาวะเริ่มต้น

P11	P22	Q11	Q22	R1	R2	IAE1	IAE2
100	10	100	0.1	10	1000	0.0309	0.3496
100	100	100	0.1	10	1000	0.0309	0.2036
1000	10	100	0.1	10	1000	0.0310	0.3866
1000	100	100	0.1	10	1000	0.0309	0.2520
1000	100	0.1	0.01	10	1000	0.0308	0.2490
1000	100	0.1	0.1	10	1000	0.0308	0.2809
1000	100	0.1	1.0	10	1000	0.0308	0.3943
1000	100	0.1	10	10	1000	0.0308	0.5782
1000	100	1.0	0.01	10	1000	0.0309	0.2219
1000	100	1.0	0.1	10	1000	0.0309	0.2804
1000	100	1.0	1.0	10	1000	0.0309	0.3576
1000	100	1.0	10	10	1000	0.0309	0.5782
1000	100	10	0.01	10	1000	0.0309	0.2305
1000	100	10	0.1	10	1000	0.0309	0.2651
1000	100	10	1.0	10	1000	0.0309	0.3927
1000	100	10	10	10	1000	0.0309	0.5861
1000	100	100	0.01	10	1000	0.0309	0.2512
1000	100	100	0.1	10	1000	0.0309	0.2532
1000	100	100	1.0	10	1000	0.0309	0.3904
1000	100	100	10	10	1000	0.0309	0.5804
1000	100	1000	0.01	10	1000	0.0309	0.2909
1000	100	1000	0.1	10	1000	0.0309	0.2662
1000	100	1000	1.0	10	1000	0.0309	0.3852
1000	100	1000	10	10	1000	0.0309	0.5768

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่า IAE เมื่อมีการควบคุมแบบป้อนกลับสแตตร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์
เมื่อมีค่า P, Q และ R ต่างๆ (ต่อ)

P11	P22	Q11	Q22	R1	R2	IAE1	IAE2
1000	100	100	0.1	0.1	1	0.0309	0.7411
1000	100	100	0.1	0.1	10	0.0310	0.5873
1000	100	100	0.1	0.1	100	0.0309	0.3270
1000	100	100	0.1	0.1	1000	0.0309	0.2558
1000	100	100	0.1	1.0	1	0.0309	0.7436
1000	100	100	0.1	1.0	10	0.0309	0.5600
1000	100	100	0.1	1.0	100	0.0310	0.4313
1000	100	100	0.1	1.0	1000	0.0309	0.2693
1000	100	100	0.1	10	1	0.0309	0.7402
1000	100	100	0.1	10	10	0.0309	0.5746
1000	100	100	0.1	10	100	0.0309	0.3746
1000	100	100	0.1	10	1000	0.0309	0.2675

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นางสาววนารัตน์ ดวงวัง เกิดวันที่ 17 เมษายน พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม จาก มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2538 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย