

การประยุกต์วิธีการควบคุมการป้องกันตัวแปรสถานะ ใช้ในกระบวนการหมัก

พิพัฒน์ อธิพานิช¹ และ เอก ไชยสวัสดิ์²
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

วิธีการควบคุมแบบพีไอดีใช้การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด และการออกแบบตัวชดเชยป้องกัน การใช้วิธีการนี้ทำได้ยากกับการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเปลี่ยนแปลงตามเวลา ต่อมาวิธีการควบคุมสมัยใหม่ได้ใช้วิธีกำหนดรากสมการคุณลักษณะของวงปิด ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย สำหรับการควบคุมการป้องกันตัวแปรสถานะ

บทความนี้นำเสนอ การประยุกต์วิธีการควบคุมการป้องกันตัวแปรสถานะใช้ในกระบวนการหมัก โดยนำตัวประมวลผลสัญญาณทำการออกแบบและสร้างชุดควบคุมเชิงเลข เพื่อควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังที่ใช้กากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ ชุดควบคุมรับค่าตัวแปรสถานะจากเครื่องมือวัดมาจัดอยู่ในรูปของเมตริกซ์ หลังจากนั้นวิธีการประมาณค่าสถานะถูกนำมาใช้คำนวณหาตัวอัตราขยายของระบบควบคุม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชุดควบคุมนี้สามารถวัดคุมตัวแปรหลายตัวพร้อมกัน และสามารถควบคุมให้เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ได้ถูกต้อง และสามารถส่งข้อมูลการทดลองผ่านช่องสื่อสารอนุกรมของชุดควบคุมเชิงเลข ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำข้อมูลการทดลองไปทำการวิเคราะห์ อีกทั้งยังมุ่งเน้นให้ความสะดวกในการป้องกันค่า แสดงผลการควบคุมโดยผ่านทางจอภาพ หรือทางเครื่องพิมพ์ได้อีกด้วย และเป็นการเพิ่มการควบคุมคุณภาพของกระบวนการ

¹ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด

The Application of State Variable Feedback Control to Fermentation Process

Pipat Titapand ¹ and Ake Chaisawadi ²

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

Abstract

The PID control technique uses open loop transfer function analysis and feedback compensator design. By using this technique, it is difficult to control non-linear and time varying systems, then a closed loop pole placement technique has been introduced in modern control process and it is widely used in the state variable feedback control.

The application of state variable feedback control to the fermentation process is proposed in this paper. A microprocessor based state variable feedback controller has been designed and constructed for controlling a baker yeast fermentation process system fed by molasses. The controller receives state variables from a sensor and the variables are provided in matrix form. This paper also includes state observer method for calculate the gain of the controller.

The experimental results show that this controller can control multivariable at the same time, ensure the accuracy of set point value, and transmit data to computer for analysis by serial port of controller. This design emphasizes on easy data entering. The results can be shown by LCD display or printer. This method also increases quality control for the process.

¹ Graduate Student, Department of Electrical Engineering

² Associate Professor, Department of Control System and Instrumentation Engineering

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ระบบการควบคุมในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มีการพัฒนาเทคโนโลยีงานเครื่องมือวัดและระบบควบคุม และใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่เป็นการผลิตอย่างต่อเนื่อง เช่น โรงงานเคมีและปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานผลิตอาหาร เป็นต้น เพื่อต้องการเฝ้าดูขั้นตอนการผลิต เก็บข้อมูลในสายการผลิต ควบคุมคุณภาพของการผลิต ซึ่งส่วนใหญ่การออกแบบและผลิตมีการพัฒนามาจากต่างประเทศ โดยแต่ละส่วนของชุดควบคุมเป็นอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง และมีการทำงานสลับซับซ้อน และเป็นระบบที่มีราคาแพง อีกทั้งผู้ใช้จะต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญที่ผ่านการฝึกหัดเป็นอย่างดี โดยมุ่งใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และเฉพาะด้านเท่านั้น ดังนั้นการลงทุนในการใช้ทรัพยากรเพื่อการพัฒนาจึงมีราคาสูง จึงไม่เหมาะสมในแง่เศรษฐศาสตร์การลงทุน แต่ยังมีอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท ที่มีกระบวนการผลิตขนาดไม่ใหญ่มากนัก แต่ต้องการเฝ้าดูขั้นตอนการผลิต และควบคุมคุณภาพของการผลิตให้ดี อีกทั้งมีความจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูล และควบคุมตัวแปรในกระบวนการผลิตหลายตัวในแต่ละช่วงเวลาต่างๆ ตลอดกระบวนการ เช่น กระบวนการหมัก ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพ และเป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อม ซึ่งเทคโนโลยีการวัดคุมของการหมักยังไม่พัฒนามากนัก จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจที่จะทำการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับงานทางด้านนี้ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะทำการพัฒนาออกแบบระบบชุดควบคุมเชิงเลข ที่เหมาะสมกับงานเฉพาะด้านนี้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการหมักอีกด้วย

วิธีการควบคุมงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติแบบเดิม (Classical Automatic Control) จะใช้พื้นฐานของการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (Open Loop Transfer Function) และใช้การออกแบบตัวชดเชยในเส้นทางควบคุม (Feedback Compensator) มาควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะ (Performance) ของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ ต่อมามีการนำเสนอแนวคิดการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสมัยใหม่ (Modern Automatic Control) ประกอบกับความก้าวหน้าการพัฒนาของชุดตัวประมวลผลสัญญาณ (Microprocessor) โดยจะใช้การแทนระบบที่จะควบคุมด้วยสมการสถานะ (State Equation) และใช้ตัวแปรสถานะ (State Variables) ทุกตัวป้อนกลับมา เพื่อสร้างให้เกิดสมรรถนะของระบบตามที่ต้องการ โดยใช้วิธีกำหนดรากสมการคุณลักษณะของวงปิด (Closed Loop Transfer Function) ซึ่งเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับวิธีการนี้คือ จะต้องรู้ค่าของตัวแปรสถานะทุกตัว แต่ในทางปฏิบัติของระบบกายภาพ มักจะเป็นไปไม่ได้ที่จะวัดค่าตัวแปรสถานะทุกตัว หรือถ้าจะเป็นไปได้ก็ต้องใช้เครื่องมือวัดจำนวนมาก ซึ่งทำให้ต้นทุนในการวัดคุมมีมูลค่าสูง ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาคือ นำวิธีการตัวตรวจสอบ เป็นตัวสร้างตัวแปรสถานะขึ้นมาใหม่ จากค่าของตัวแปรสถานะบางตัวที่สามารถวัดได้ ซึ่งโดยเฉพาะในกระบวนการหมักนั้น เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีความต้องการทราบว่าจุลินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการหมักแต่ละชนิดของผลิตภัณฑ์ และต้องการทราบค่าตัวแปรสถานะของกระบวนการภายในช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น ในระยะเวลาต่างๆ และงานวิจัยของกระบวนการหมักที่ผ่านมา นั้น ได้มีการพัฒนาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำคอมพิวเตอร์มาเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการควบคุม แต่ยังคงมีข้อจำกัดอยู่ที่ว่าขาดเครื่องมือวัด ที่จะสามารถวัดค่าตัวแปรได้ทุกค่า และมีความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [1]-[5]

บทความนี้จะมุ่งเน้นถึงความถูกต้องและเชื่อถือได้ในการควบคุม ความสะดวกในการใช้งาน สามารถทำการปรับปรุง และบำรุงรักษาชุดควบคุมเชิงเลขนี้ได้ง่าย อีกทั้งสามารถส่งผ่านข้อมูลไปเก็บที่คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ต่อไป พร้อมทั้งสามารถแสดงผลผ่านเครื่องพิมพ์ และจอภาพ โดยจัดทำชุดควบคุมเชิงเลขที่ใช้ชุดตัวประมวลสัญญาณเชิงเลข ที่เป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต และใช้เทคนิคการเขียนโปรแกรมควบคุม แบ่งออกเป็นส่วนๆ เพื่อสะดวกในการแก้ไขปรับปรุงต่อไป เพิ่มความยืดหยุ่นและความรวดเร็วในการควบคุม โดยนำวิธีการป้อนกลับตัวแปรสถานะโดยใช้ตัวตรวจสอบมาทำการควบคุม ซึ่งเหมาะสมกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถทำการคำนวณค่าวัดคุมจำนวนตัวแปรหลายตัวในเวลาเดียวกัน โดยตัวตรวจสอบจะหน้าที่คาดคะเนให้ทราบถึงสภาวะของตัวแปรสถานะและสมรรถนะของระบบได้ตามต้องการ อีกทั้งให้ค่าผลตอบสนองต่อเวลาที่รวดเร็ว โดยจะทำการควบคุมเฉพาะตัวแปรสถานะที่สำคัญของกระบวนการหมัก

2. ทฤษฎี

2.1 ความหมายของกระบวนการหมัก (fermentation) หมายถึงขบวนการทางชีวเคมี ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์สาร ซึ่งเกิดขึ้นจากการทำงานของเอ็นไซม์ที่สร้างขึ้นโดยจุลินทรีย์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้น ทั้งนี้การหมักอาจเกิดขึ้นในสภาวะที่มีการให้อากาศเต็มที่ หรือให้อากาศเพียงเล็กน้อย หรือปราศจากอากาศ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดจากการสังเคราะห์ หรือการย่อยสลายทางชีวเคมี

2.2 วิธีการการออกแบบชุดควบคุมเชิงเลข แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

- การออกแบบบนพื้นฐานของตัวควบคุมแบบแวนะลอก ซึ่งเป็นการทำการแปลงค่าจากชุดควบคุมแบบแวนะลอกไปสู่ชุดควบคุมเชิงเลข ซึ่งเป็นการทำจาก s-plane สู่ z-plane ซึ่งพบว่าข้อเสียของวิธีการออกแบบลักษณะนี้คือ discrete component เป็นการประมาณค่าของชุดต้นแบบแวนะลอก ซึ่งต้องทำจากการลองผิดลองถูก (trial and error)

- การออกแบบโดยวิธีการเชิงเลขโดยตรงเป็นการใช้วิธีการกำหนดโพลและซีโร และเทคนิคการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของโพลและซีโรของระบบ ซึ่งกระทำบน z-domain เพื่อแสดงสมรรถนะของระบบ แต่พบว่าเป็นการยากที่จะได้ผลของสมรรถนะที่เกิดจากตำแหน่งโพล และซีโร ที่ใช้จริงให้ดีเหมือนกับที่คำนวณได้ทางทฤษฎี แต่ต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างมาก

- การออกแบบโดยใช้ตัวแปรสถานะ เป็นการนำสมการอนุพันธ์ของระบบมาทำเป็นสมการสถานะ โดยจะทำการวัดค่าตัวแปรที่สภาวะขณะนั้น และทำการคำนวณหาค่าอัตราการขยายเพื่อควบคุมระบบ และสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปเมทริก ซึ่งสามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าการสุ่มเวลาได้สะดวก และนำไปใช้กับระบบที่มีค่าตัวแปรเดียวหรือหลายตัว อีกทั้งยังใช้กับระบบไม่เป็นเชิงเส้น และงานระบบประเภทที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [6]-[9]

3. การควบคุมโดยกำหนดรากสมการคุณลักษณะของระบบวงปิด (Pole Placement Method) และการประมาณตัวแปรด้วยตัวตรวจสอบ (Observer)

การควบคุมโดยกำหนดรากของระบบวงปิด จะใช้พื้นฐานมาจากสมการตัวแปรสถานะ โดยจะนำสัญญาณตัวแปรของระบบมาผ่านชุดอัตราขยาย และสร้างเป็นสัญญาณควบคุมขึ้นมา รากของระบบวงปิดจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของระบบ และอัตราขยายที่ใช้ในการป้อนกลับ ซึ่งจะหาได้จาก [10]

$$X = AX + BU \quad (3.1)$$

$$U = -GX \quad (3.2)$$

เมื่อ G คือ เมทริกของชุดอัตราขยาย

$$\dot{X} = [A - BG]X \quad (3.3.a)$$

$$X(s) = [SI - A + BG]^{-1} X(0) \quad (3.3.b)$$

รากของระบบวงปิดจะหาได้จากการแก้สมการคุณลักษณะของระบบคือ

$$\det[SI - A + BG] = S^k + \bar{a}_1 S^{k-1} + \bar{a}_2 S^{k-2} + \dots + \bar{a}_{k-1} S + \bar{a}_k = 0 \quad (3.4)$$

จากสมการข้างต้นพบว่า จะสามารถเปลี่ยนค่าของ \bar{a}_1 เพื่อเปลี่ยนสมการคุณลักษณะของระบบ ได้จากการกำหนดเมทริกของชุดอัตราขยาย (G) โดยค่าเมทริก A และ B คือค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เป็นค่าคงที่ ส่วนค่า \bar{a}_1 คือค่าที่หาได้จากคุณลักษณะของระบบวงปิดที่ถูกกำหนดขึ้น การหาค่า G จะทำได้จากการเทียบสัมประสิทธิ์ของเลขยกกำลัง และการแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นหลายตัวแปร ซึ่งไม่สะดวกและยุ่งยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้เมทริกที่เกี่ยวข้องทั้งหมดถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบ Companion form เพื่อให้หาค่านวนค่าเมทริก G ได้ง่ายขึ้น โดยเมทริกที่ใช้ในการแปลง (Transformation Matrix, T) จะเปลี่ยนสมการตัวแปรสถานะของระบบจากเดิมให้กลายเป็น

$$\dot{\bar{X}} = \bar{A} \bar{X} + \bar{B} U \quad (3.5)$$

เมื่อ \bar{X} คือ เมทริกของตัวแปรในระบบหลังจากถูกแปลง

\bar{A} และ \bar{B} คือ เมทริกของพารามิเตอร์ของระบบที่ถูกแปลงโดย เมทริก T ให้อยู่ในรูปของ Companion form โดยที่

$$\bar{X} = TX \quad (3.6.a)$$

$$\bar{A} = TAT^{-1} \quad (3.6.b)$$

$$\bar{B} = TB \quad (3.6.c)$$

$$T = [I - VI - \quad \quad \quad] \quad (3.6.d)$$

Q คือ Controllability Matrix

$$Q = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{k-1}B] \quad (3.6.e)$$

W คือ Triangular Toeplitz Matrix

$$W = \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & \dots & a_{k-1} \\ 0 & 1 & a_1 & \dots & a_{k-2} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Transformation Matrix จะทำให้เมทริก \bar{A} อยู่ในรูป Companion form คือ

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & \dots & -a_k \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

เมื่อ a_1, a_2, \dots, a_k คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบและ

$$\bar{B} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{vmatrix} \quad (3.9)$$

ถ้าเมทริกซ์ของอัตราขยาย G ถูกคูณด้วย Transformation Matrix และอยู่ในรูปของ G จะพบว่า

$$\bar{B} G = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} \bar{g}_1, \bar{g}_2, \dots, \bar{g}_k \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \bar{g}_1, \bar{g}_2, \dots, \bar{g}_k \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & \cdot \end{vmatrix} \quad (3.10)$$

และ

$$\bar{A} - \bar{B}\bar{G} = \begin{vmatrix} -a_1 - \bar{g}_1 & -a_2 - \bar{g}_2 & \dots & -a_k & -\bar{g}_k \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \cdot \\ 0 & 1 & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

เมื่อเทียบกับเมทริกซ์ \bar{A} จะพบว่าค่า $a_1 + \bar{g}_1, a_2 + \bar{g}_2, \dots, a_k + \bar{g}_k$ ก็คือว่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบวงปิดที่มีชุดอัตราขยาย, G ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมรวมอยู่ด้วยนั่นเอง ดังนั้นจะกำหนดรากของระบบวงปิดให้อยู่ที่จุดใดก็ได้ จากการกำหนดค่าอัตราขยาย

$$\bar{g}_1 = \bar{a}_1 - a_1 \quad (3.12.a)$$

และจาก

$$U = -GX = -GT^{-1}(\bar{x}) = -\bar{G} \bar{X} \quad (3.12.b)$$

ดังนั้น

$$G^t = T^t \bar{G}^t = T^t(\bar{a} - a) \quad (3.12.c)$$

$$G' = [(QW)^t]^{-1} (\bar{a} - a) \quad (3.12.d)$$

การประมาณค่าตัวแปรสถานะในบทความนี้จะกล่าวถึงวิธี Reduced Observer โดยพิจารณาจากสมการของ Luenburger ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ประมาณค่าตัวแปรสถานะได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \dots \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}:A_{12} \\ \dots \\ A_{21}:A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \dots \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ \dots \\ B_2 \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} K_1 \\ \dots \\ K_2 \end{bmatrix} [y - C_1 \hat{X}_1] \quad (3.13)$$

เมื่อ $y = C_1 X_1$

X_1 คือ ตัวแปรส่วนที่วัดค่าออกมาได้

X_2 คือ ตัวแปรส่วนที่ต้องประมาณค่า

วิธีการ Reduced Order Observer จะกำหนดให้

$$\hat{X}_2 = Ly + Z \quad (3.14)$$

และ $\dot{Z} = FZ + \bar{G}y + HU \quad (3.15)$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 - \hat{X}_1 \\ \dots \\ X_2 - \hat{X}_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

เมื่อ $\hat{X}_1 = X_1$, จะพบว่า $e_1 = 0$ และ

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & Fe_2 + (A_{11} - LC_1A_{11} - \bar{G}_1C_1 + FLC_1)X_1 + (A_{22} - LC_1A_{12} - F)X_2 \\ & + (B_2 - LC_1B_1 - H)U \end{aligned} \quad (3.17.a)$$

จากสมการ (2.17) เมื่อต้องการให้ค่าผิดพลาดที่ภาวะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ และไม่ขึ้นกับค่าของ X และ U จะต้องกำหนดค่าต่างๆ คือ

$$\bar{G} = [A_{11} - LC_1A_{11} + FLC_1]C_1^{-1} \quad (3.17.b)$$

$$H = B_2 - LC_1B_1 \quad (3.17.c)$$

$$F = A_{22} - LC_1A_{12} \quad (3.17.d)$$

ซึ่งสมการ (3.17.a) จะกลายเป็น

$$e_2 = Fe_2 \quad (3.18)$$

จากสมการ (2.18) พบว่าค่า eigen ของเมทริก F ขึ้นอยู่กับค่าของเมทริก L ซึ่งจะเลือก L เพื่อกำหนดค่า eigen ของเมทริก F ได้ ถ้า rank ของ Observability Matrix N_1 เท่ากับ $k-1$

$$\text{เมื่อ } N_1 = \begin{bmatrix} (A_{12})^T C_1^T & A_{22}^T A_{12} C_1^T & \dots & (A_{22}^T)^{k-1} A_{12}^T C_1^T \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

k คือ จำนวนอันดับของระบบและ l คือ จำนวนอันดับของตัวแปรที่วัดค่าได้ในที่สุดจะพบว่า

$$\dot{Z} = F\hat{X}_2 + (A_{21} - LC_1A_{11})C_1^{-1}y + HU \quad (3.20.a)$$

$$\hat{X}_2 = Ly + Z \quad (3.20.b)$$

จากการใช้การประมาณค่าตัวแปรที่วัดไม่ได้โดยตรง ทำให้รากของระบบวงปิดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เกิดจากเมทริกของชุดอัตราขยาย และส่วนที่เกิดจากการประมาณค่าตัวแปรซึ่งหาได้จากสมการ

$$\dot{X} = [A - BG]X \quad (3.21)$$

$$\hat{X} = LY + Z \quad (3.22)$$

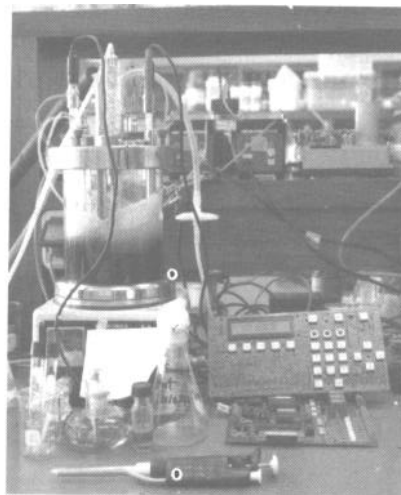
$$\dot{Z} = FZ + GY + HU \quad (3.23)$$

ดังนั้น สมการคุณลักษณะของระบบคือ

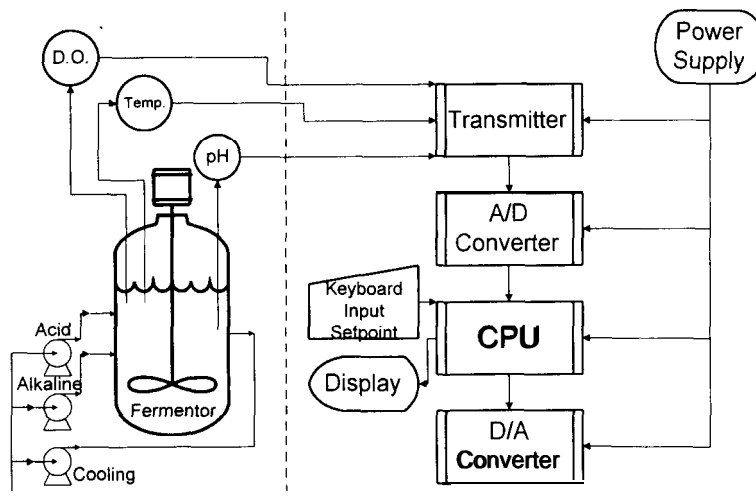
$$\det[SI - A + BG] = \det[SI - F] = 0 \quad (3.24)$$

4. ลักษณะเครื่องควบคุมที่สร้างขึ้นและการทำงาน

ลักษณะของเครื่องควบคุมที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยมีโครงสร้างของระบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ ที่มีส่วนประกอบและการทำงานดังนี้คือ เมื่อเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิ ค่าปริมาณการละลายออกซิเจน (Dissolved Oxygen) ค่าความเป็นกรดหรือด่าง(pH) ผ่านชุดเซนเซอร์ จะแปลงค่าเป็นค่าสัญญาณมาตรฐาน โดยชุดส่งสัญญาณ (Transmitte) ซึ่งจะประกอบด้วยภาค Zero-Span Adjust และภาค Condition ทำการปรับแต่งค่าที่วัดได้ และทำการแปลงผันค่าจากค่าแอนะล็อกเป็นค่าเชิงเลข และมีส่วนที่สามารถรับค่าสัญญาณเชิงเลขได้โดยตรงอีกด้วย เพื่อส่งไปยังชุดประมวลผลสัญญาณเพื่อทำการประมวลผล และสั่งการการทำงานของชุดควบคุม พร้อมทั้งทำคำนวณขั้นตอนการควบคุม และส่งผ่านค่าสัญญาณขาออกผ่านชุดแปลงผันสัญญาณเชิงเลขเป็นแอนะล็อกเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อสามารถนำค่าป้อนกลับไปควบคุมกระบวนการหมัก เพื่อให้ได้คุณภาพและสมรรถนะของกระบวนการหมักเป็นตามต้องการ โดยวิธีการควบคุมตัวแปรสถานะนี้ จะทำหน้าที่เป็นประมาณค่าสถานะ (State Observer) ถึงสถานะตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการหมักตามสภาวะที่ต้องการควบคุม โดยการป้อนค่าสามารถทำการป้อนทางคีย์บอร์ด และการแสดงผลการควบคุมสามารถเฝ้าดูขั้นตอนการผลิต ได้จากจอภาพ LCD หรือ ส่งผ่านทางเครื่องพิมพ์ชนิด Dot Matrix แคร่สันได้อีกด้วย และยังมีช่องติดต่อสื่อสารอนุกรมเพื่อส่งผ่านข้อมูลไปเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์ได้ด้วย [11]-[13]



รูปที่ 1 ลักษณะเครื่องควบคุมที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2 โครงสร้างของฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมการป้อนกลับตัวแปรสถานะใช้ในกระบวนการหมัก

ซึ่งส่วนของชุดควบคุมเชิงเลขที่ใช้ในการทดลองนั้น ทำการสร้างเป็น 3 แผงวงจรคือ

1. ส่วนแผงวงจรแสดงผลด้านหน้า (Front Panel Display Board) ซึ่งวงจรชุดนี้ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลกลาง ทำหน้าที่ควบคุมคำสั่งการทำงานของชุดควบคุมเชิงเลข ส่วนหน่วยความจำ ส่วนของคีย์บอร์ดใช้สำหรับป้อนค่า ส่วนแสดงผล และส่วนช่องการสื่อสารแบบอนุกรม (RS 232)

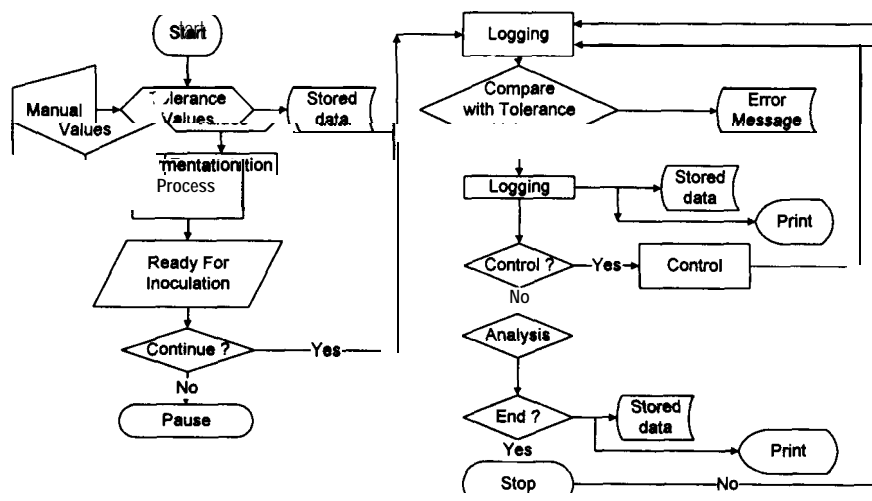
2. ส่วนแผงวงจรควบคุมหลัก (Main Control Board) แผงวงจรชุดนี้ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลกลาง ทำหน้าที่ควบคุมการคำนวณสมการตัวแปรสถานะของระบบและยังมีส่วนเชื่อมต่อกับเครื่องพิมพ์ ชุดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณเชิงเลขซึ่งใช้ขนาด 8 บิต 2 ช่องสัญญาณ ทำหน้าที่แปลงสัญญาณของค่าตัวแปรที่ทำการวัดคุมจากเซนเซอร์ เป็นสัญญาณกระแสมาตรฐานของค่าตัวแปรที่วัดคุมคือ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าอุณหภูมิ ค่าปริมาณการละลายออกซิเจนซึ่งประกอบไปด้วยภาค Pre Amplifier ภาค Zero-Span และภาค Conditioner เพื่อทำการปรับและตั้งค่าช่วงในการวัดคุม และมีส่วนรับสัญญาณขาเข้าแบบเชิงเลขซึ่งจะออกแบบให้ทำงานลักษณะแยกโดด เพื่อป้องกันการรบกวนระบบภายใน ซึ่งรวมทั้งส่วนส่งสัญญาณขาออกแบบเชิงเลข

3. ส่วนจ่ายกำลัง (Power Supply) ประกอบไปด้วย หม้อแปลง และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟให้ทุกแผงวงจรข้างต้นในอัตราที่เหมาะสม และมีเสถียรภาพ

5. โครงสร้างของโปรแกรมควบคุม

วิธีการเขียนโปรแกรมควบคุมในงานวิจัยนี้ทำการแบ่งการทำงานของชุดประมวลผลสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนแก้ไขโปรแกรมหากมีการเขียนโปรแกรมการทำงานการควบคุมจึงแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

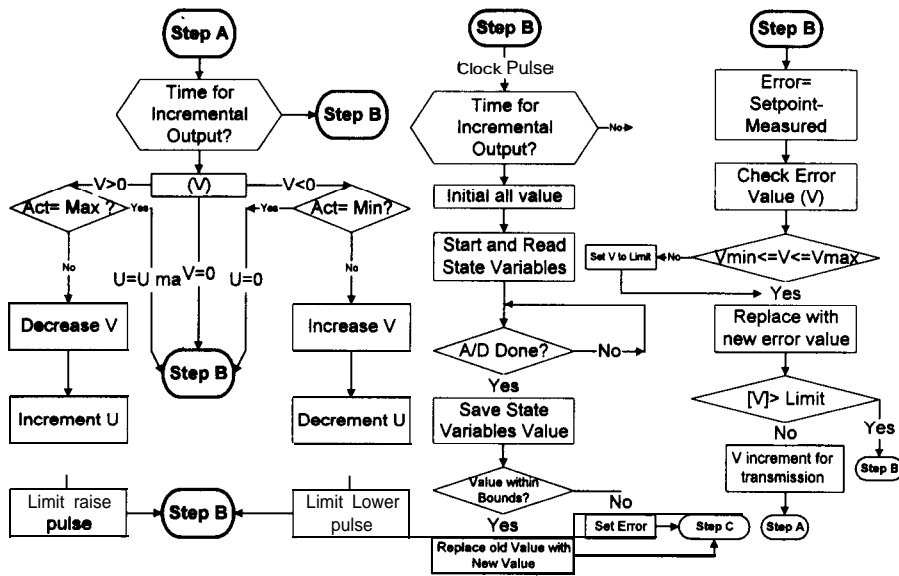
5.1 โปรแกรมที่ควบคุมการทำงานของส่วน Front Panel Board แสดงลำดับขั้นตอนไว้ในรูปที่ 3 จะประกอบไปด้วย Main Program ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่อง ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำงานเพียงครั้งเดียวขณะเปิดเครื่อง Subroutine Program ทำหน้าที่รับค่าจากแป้นพิมพ์ การแสดงผลการพิมพ์ ตรวจสอบหน่วยความจำซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำงานวนรอบและ Link Program ทำหน้าที่เชื่อมการทำงานของ main และ subroutine และทำการตรวจสอบการผิดพลาดในการทำงานโครงสร้างของโปรแกรมควบคุม



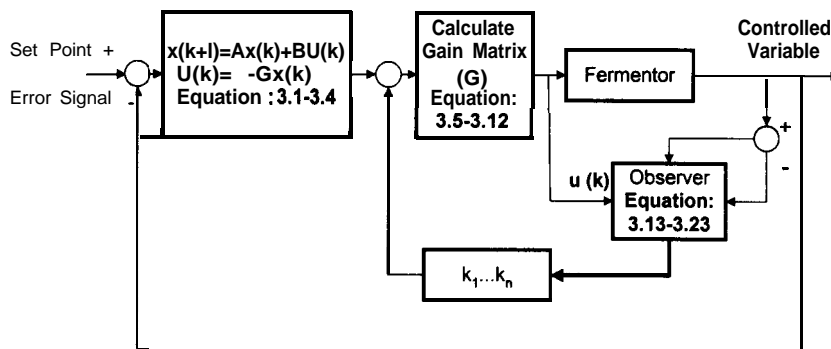
รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมของส่วน Front Panel Display Board

5.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของส่วน Main Control Board แสดงลำดับขั้นตอนไว้ในรูปที่ 4 แบ่งออกเป็น Main Program ทำหน้าที่ควบคุมทั่วไปของตัวควบคุมตรวจสอบค่าเริ่มต้นของการวัดคุม กำหนดรูปแบบการทำงาน ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำงานเพียงครั้งเดียวขณะเปิดเครื่อง Subroutine Program ทำหน้าที่คำนวณและสภาวะการวัดคุม ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำงานวนรอบ Link Program ทำหน้าที่เชื่อมการทำงานของ main และ subroutine และทำการตรวจสอบการผิดพลาดในการทำงาน [14]

โดยส่วนขั้นตอนการคำนวณของสมการตัวแปรสถานะและวิธีการตรวจสอบนั้นแสดงโครงสร้างและขั้นตอนการคำนวณไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมของส่วน Main Control Board



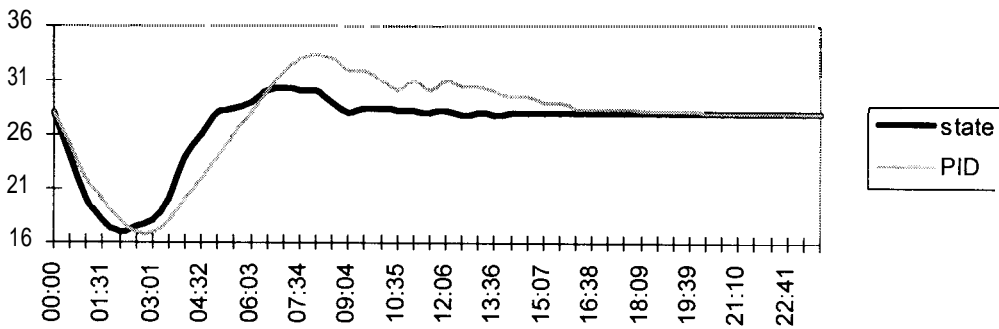
รูปที่ 5 ลำดับขั้นตอนการทำงานของส่วน โปรแกรมการคำนวณตัวแปรสถานะ

6. ผลการทดสอบ

6.1 การทดสอบผลของชุดควบคุมเชิงเลข ในการทดสอบส่วนนี้ทำเพื่อเปรียบเทียบการเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ของการวัดคุม โดยใช้วิธีการควบคุมการป้อนกลับแบบพีไอดี และวิธีการควบคุมการป้อนกลับตัวแปรสถานะ เพื่อที่จะทดสอบระยะเวลาการสู่ค่าที่ตั้งไว้ และเป็นการทดสอบขั้นตอนการคำนวณของทั้งสองวิธี เพื่อแสดงถึงความถูกต้องของอัลกอริทึม เพื่อที่จะนำไปโปรแกรมที่ออกแบบถูกต้องแล้วนั้นไปทำการบันทึกโปรแกรมลงใน EPROM เพื่อให้ตัวประมวลผลสัญญาณ และชุดควบคุมเชิงเลขทำการวัดคุมถูกต้องกับกระบวนการ โดยทำการปรับเทียบค่าเครื่องมือวัดมาตรฐานกับชุดวงจรที่ใช้ในการทดลอง โดยเริ่มจากชุดวัดอุณหภูมิ โดยทำการจำลองสถานการณ์ที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง และใช้เตาอุ่นขนาดเล็กที่มีชุดทำความร้อนเป็นตัวปรับอุณหภูมิ โดยต่อชุดเปิดปิดของวงจรทำความร้อนเข้ากับชุดค่าสัญญาณขาออก โดยในการทดสอบใช้น้ำแข็งจำนวน 500 กรัมใส่ลง

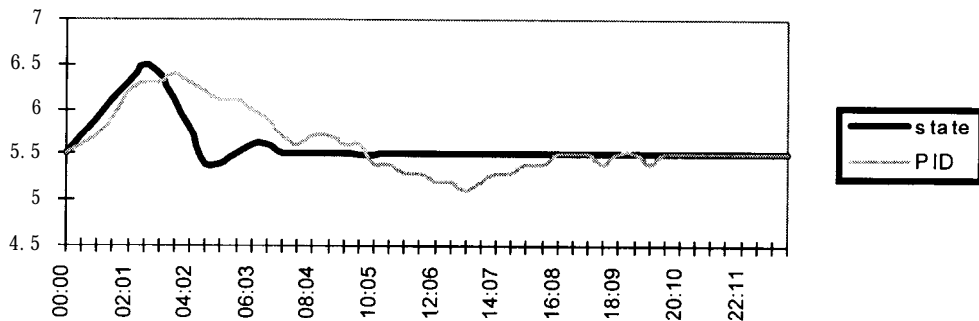
ภาชนะแก้วที่น้ำปริมาตร 1 ลิตร โดยในภาชนะใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดค่าอุณหภูมิ พร้อมกับชุดเทอร์โม-
 คับเปิล เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการทำงานของชุดแปลงสัญญาณกับเครื่องมือวัดและทำการเชื่อมต่อกับ
 คอมพิวเตอร์เพื่อทำการ Load โปรแกรม ที่เขียนโปรแกรมของวิธีการควบคุมแบบพีไอดีและวิธีสมการ
 ตัวแปรสถานะ เพื่อบันทึกค่าผลการทดลองทั้งสองวิธีการ ทำการเปรียบเทียบกันโดยค่าที่ตั้งไว้เป็นค่า
 เท่ากับ 28 องศาเซลเซียสพบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6 เมื่อแกนตั้ง แสดงถึงค่าอุณหภูมิ หน่วย
 องศาเซลเซียส แกนนอน เป็นเวลา หน่วย นาที : วินาที

State หรือ วิธีการตัวแปรสถานะ คือขั้นตอนการคำนวณวิธีการป้อนกลับตัวแปรสถานะ
 PID หรือ วิธีการแบบพีไอดี คือวิธีการควบคุมคำนวณหาค่าคงที่ในการปรับค่าให้เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้



รูปที่ 6 การวัดคุมอุณหภูมิเปรียบเทียบกันของวิธีการตัวแปรสถานะและวิธีการแบบพีไอดี

ผลการทดสอบเพื่อทดสอบชุดวัดคุมเชิงเลขกับชุดควบคุมความเป็นกรดหรือด่าง ซึ่งทำการ
 ปรับเทียบค่า pH ของชุดควบคุมเชิงเลขกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Model PH 81 ของ YOKOGAWA โดยมี
 ชุด Micro Tubing Pump เป็นตัวกำหนดการไหลของชุดกรด และ ชุดด่าง โดยใช้สารละลายที่มีความ
 เป็นด่างเท่ากับ 8 ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงถึงหมักที่ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 5.5 ปริมาตร
 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้แท่งแก้วคนและทำการเปรียบเทียบค่าการทำงานของชุดแปลงสัญญาณ
 กับเครื่องมือวัดโดยใช้โปรแกรมการคำนวณ ทั้งสองวิธีการเปรียบเทียบกันโดยค่าที่ตั้งไว้เป็นค่าเท่ากับ
 5.5 พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7 โดยแกนตั้ง แสดงถึง ค่าความเป็นกรดหรือด่าง แกนนอน แสดงถึง
 หน่วย เวลาเป็นนาที : วินาที



รูปที่ 7 การวัดคุมค่าความเป็นกรดหรือด่างเปรียบเทียบกันของวิธีการตัวแปรสถานะและวิธีการแบบพีไอดี

จากการทำการทดลองรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ของค่าอุณหภูมิ ของสองวิธีการ สังเกตได้ว่าวิธีการตัวแปรสถานะสามารถปรับค่าเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้โดยใช้เวลานั้นกว่าวิธีการแบบพีไอดี ซึ่งระยะเวลาการเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ ของวิธีการตัวแปรสถานะใช้เวลานั้นน้อยกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7 นาที ส่วนกราฟรูปที่ 7 แสดงการเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ของค่า pH ของทั้งสองวิธีการ สังเกตได้ว่าวิธีการตัวแปรสถานะสามารถปรับค่าเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ โดยใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการแบบ พีไอดี ซึ่งระยะเวลาการเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ของวิธีการตัวแปรสถานะ ใช้เวลานั้นกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 6 นาที 30 วินาที

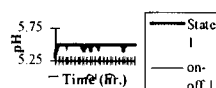
6.2 การทดสอบเปรียบเทียบในกระบวนการหมักกับถังหมักขนาด 5 ลิตร การทดลองเพื่อทดสอบการควบคุมโดยชุดควบคุมเชิงเลขกับถังหมักขนาด 5 ลิตร ของ บริษัท B. Braun Biotech International เมื่อชุดควบคุมเชิงเลขรับค่าข้อมูลจากเครื่องมือวัดแล้ว จะทำการแปลงสัญญาณเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า และชุดควบคุมเชิงเลขจะทำงานตามโปรแกรมควบคุม โดยจะทำการอ่านค่าและวัดคุมให้อยู่ในค่าที่ต้องการ ซึ่งในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง จะทำการวัดคุมเฉพาะค่าความเป็นกรดหรือด่าง และค่าอุณหภูมิ ส่วนค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะทำเพียงวัดค่าอย่างเดียว โดยที่ค่าอุณหภูมิทำการวัดค่าโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ส่วนค่าความเป็นกรดหรือด่างใช้เซนเซอร์เป็นชนิด Glass Combination Electrode ส่วนค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ใช้เซนเซอร์ชนิด Galvanic Electrode

การควบคุมค่าความเป็นกรดหรือด่าง จะควบคุมการทำงานของปั๊มเพื่อการป้อนสารแอมโมเนีย ในกรณีที่ค่าความเป็นกรดหรือด่างต่ำกว่าค่าที่ต้องการวัดคุม และทำการป้อนกรดซัลฟูริกในกรณีที่ค่าความเป็นกรดหรือด่าง สูงกว่าค่าที่ต้องการขึ้นอยู่กับสภาวะการหมักในแต่ละครั้ง ส่วนการควบคุมค่าอุณหภูมิ จะควบคุมการป้อนน้ำหล่อเย็นรอบถังหมัก ให้ค่าอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงค่าที่ต้องการควบคุม

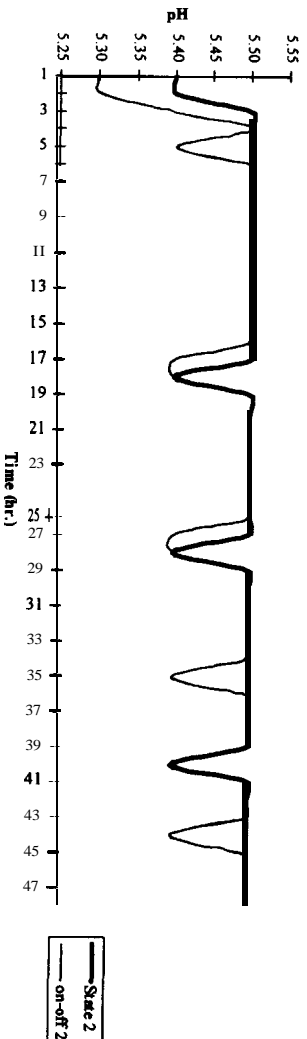
State หรือ วิธีการตัวแปรสถานะ คือ ขั้นตอนการคำนวณวิธีการป้อนกลับตัวแปรสถานะ

On-Off คือ ข้อมูลการทดลองที่ได้จากการทดลองควบคุมของถังหมักขนาด 5 ลิตร

Uncontrol คือ ข้อมูลการทดลองที่ไม่มีการควบคุมในกระบวนการหมักของถังขนาด 5 ลิตร



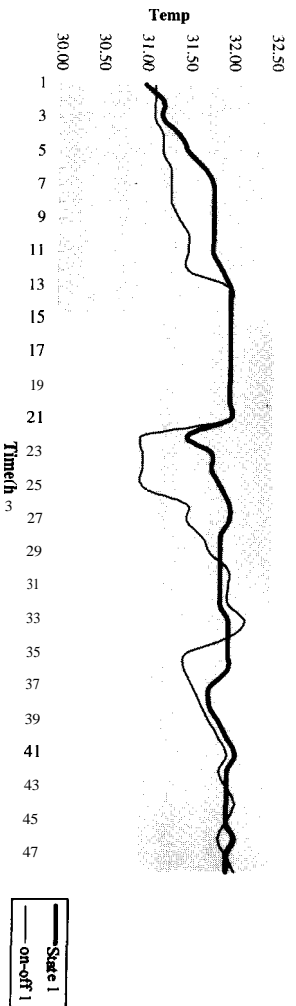
รูปที่ 8 การวัดคุมค่าความเป็นกรดหรือด่าง เมื่อทำการหมักยีสต์ขนมปังด้วยกากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อครั้งที่ 1



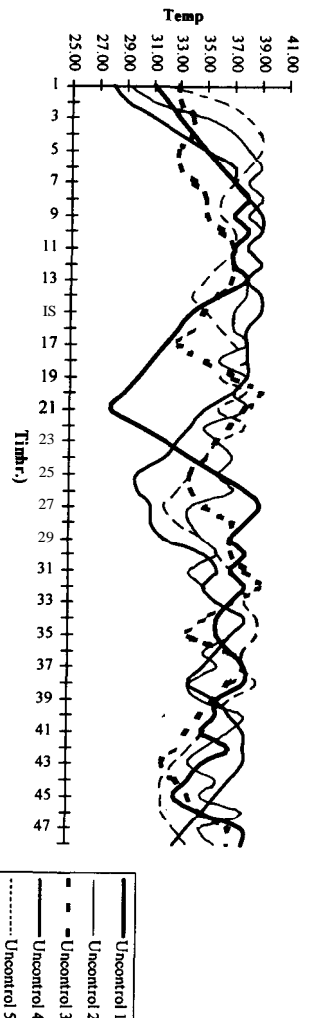
รูปที่ 9 การวัดอุณหภูมิค่าความเป็นกรดหรือด่าง เมื่อทำการหมักยีสต์ขนมปังด้วยกากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ ครั้งที่ 2



รูปที่ 10 ค่าความเป็นกรดหรือด่าง ในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยกากน้ำตาล เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยไม่มีการควบคุม



รูปที่ 11 ค่าการวัดอุณหภูมิ เมื่อทำการหมักยีสต์ขนมปังด้วยกากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ ครั้งที่ 1



รูปที่ 12 แสดงค่าอุณหภูมิในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยกากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อโดยไม่มี การวัดอุณหภูมิ

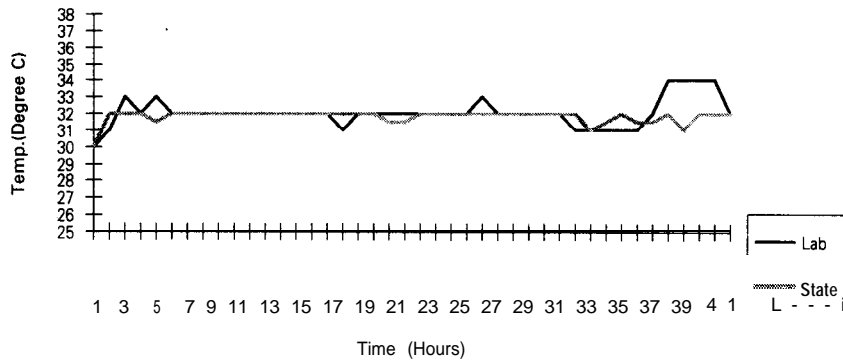


รูปที่ 13 แสดงการวัดค่าปริมาณการละลายออกซิเจนของกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยกากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ

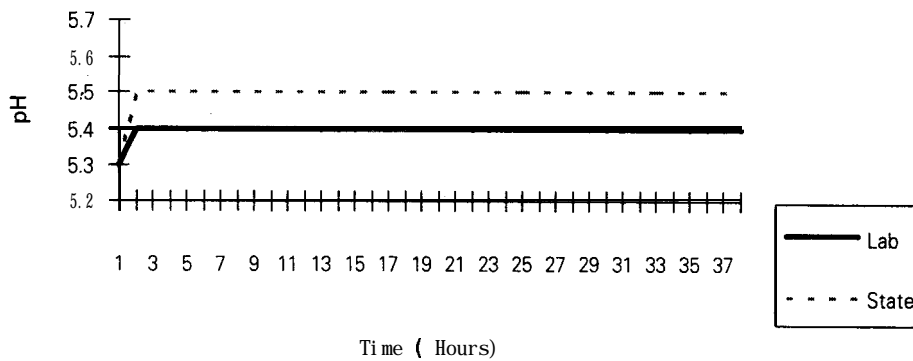
ผลการทดสอบกับกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังที่ใช้กากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งทำการควบคุมเฉพาะค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าอุณหภูมิเท่านั้น โดยกำหนดค่า set point ดังนี้คือ pH = 5.5 อุณหภูมิ = 32 องศาเซลเซียส ค่าความเร็วใบกวน = 550 rpm. เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง โดยทดลองกับชุดถังหมักขนาด 5 ลิตร ของ บริษัท B. Braun Biotech International โดยมีผลเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ออกแบบกับผลการทดลองที่มีเงื่อนไขการทดลองเดียวกัน จากผลการทดลอง ตามกราฟรูปที่ 8-9, 11, 13 แสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถควบคุมค่าตัวแปรสถานะของกระบวนการหมักทั้งค่าอุณหภูมิและความเป็นกรดหรือด่าง ได้ถูกต้องตามเครื่องวัดมาตรฐานที่ใช้ในห้องทดลอง และค่าที่วัดคุมมีค่าที่ถูกต้องและใกล้เคียงกัน ซึ่งในส่วนกราฟรูปที่ 10 และ 12 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักนั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร เป็นลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมการป้อนกลับตัวแปรสถานะนี้สามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม แสดงให้เห็นว่าชุดวงจรแปลงสัญญาณวัดค่าตัวแปรของระบบ สามารถทำงานได้ถูกต้อง อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานตลอดกระบวนการประมาณ 48 ชั่วโมง และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการ ซึ่งต้องการวิธีการควบคุมคุณภาพที่ดีเพื่อให้กระบวนการหมักสร้างผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและมีปริมาณเท่าที่ต้องการ

6.3 การทดสอบเปรียบเทียบในกระบวนการหมักกับถังหมักขนาด 2 ลิตร การทดลองการควบคุมโดยใช้ชุดควบคุมเชิงเลขในกระบวนการหมักกับถังหมักขนาด 2 ลิตร ของ บริษัท Tokyo Rikakikai Co., Ltd.

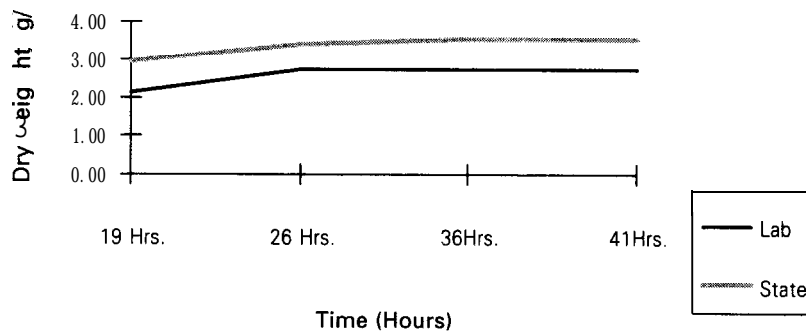
ผลการทดลองเพื่อทำการวัดคุมค่า ค่าความเป็นกรดหรือด่าง และค่าอุณหภูมิในกระบวนการหมัก โดยทำการเตรียมเชื้อยีสต์พร้อมกัน และนำมาควบคุมค่า ค่าความเป็นกรดหรือด่าง และค่าอุณหภูมิพร้อมกัน กับชุดควบคุมของห้องทดลองทำพร้อมกันทั้งสองถัง และหาน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมของงานวิจัยมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมของห้องทดลอง ทำการควบคุมค่าความเป็นกรดหรือด่าง และค่าอุณหภูมิพร้อมกันพบว่าได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 14-16



รูปที่ 14 การวัดอุณหภูมิของวิธีการตัวแปรสถานะกับถังขนาด 2 ลิตร ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับชุดควบคุมของห้องทดลอง



รูปที่ 15 การวัดค่า ค่าความเป็นกรดหรือด่าง ของวิธีการตัวแปรสถานะกับถังขนาด 2 ลิตร ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับชุดควบคุมของห้องทดลอง



รูปที่ 16 ค่าน้ำหนักแห้งของยีสต์ของถังหมักที่ควบคุมโดยวิธีการตัวแปรสถานะกับถังหมักที่ควบคุมด้วยชุดควบคุมของห้องทดลอง

ผลการทดลองในกระบวนการหมักกับถังขนาด 2 ลิตร จะพบว่าชุดควบคุมเชิงเลขที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมค่าตัวแปรสถานะทั้งอุณหภูมิและค่าความเป็นกรดหรือด่างได้ทั้งสองค่าพร้อมกัน อีกทั้งให้ผลการทดลองถูกต้องอยู่ในค่าที่ต้องการควบคุมตลอดเวลาของกระบวนการหมักทั้งค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรดหรือด่าง ดังแสดงในรูปที่ 14-15 และเมื่อทำการคำนวณหาค่าน้ำหนักแห้งของยีสต์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการหมัก ดังรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมคุณภาพของกระบวนการหมักได้เป็นอย่างดี

6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของชุดควบคุมเชิงเลข ที่ใช้วิธีการควบคุมการป้อนกลับตัวแปรสถานะใช้ในกระบวนการหมัก จากผลการทดลองดังรูปที่ 8 ถึง 13 ซึ่งทำการทดลองกับถังหมักขนาด 5 ลิตร แสดงให้เห็นว่าวิธีการวัดคุมแบบการป้อนกลับตัวแปรสถานะ สามารถปรับเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ได้รวดเร็วกว่าวิธีการวัดคุมแบบพีไอดี และแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของกระบวนการหมักนั้น ชุดควบคุมที่ทำขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่วัดคุมช้ากว่า และสามารถปรับให้ค่าเข้าสู่สภาวะที่ต้องการได้เร็วกว่า ส่วนในรูปที่ 10 และ 12 แสดงให้ทราบว่ากระบวนการหมักยีสต์ขนมปังที่ไม่มีการควบคุมจะมีลักษณะเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่วนรูปที่ 13 นั้น แสดงให้เห็นอีกว่า ชุดควบคุมสามารถวัดค่าปริมาณการละลายของออกซิเจนของกระบวนการหมักได้ตลอดกระบวนการ ส่วนในรูปที่ 14-15 แสดงให้ทราบว่าชุดควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถวัดคุมค่าตัวแปรได้หลายตัวพร้อมกัน และสามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ดีดังแสดงในรูปที่ 16 อันเนื่องมาจากลักษณะเฉพาะของเทคนิควิธีการคำนวณที่ใช้ในงานนี้ แบ่งส่วนควบคุมออกเป็น ส่วนควบคุมสภาวะการทำงานของชุดควบคุมเชิงเลขต่างๆ และอีกชุดหนึ่งทำการคำนวณค่าการวัดคุมที่ใช้วิธีการเก็บค่าตัวแปรเป็นแบบเมตริกซ์ ซึ่งทำให้สะดวกและรวดเร็วในการคำนวณด้วยชุดประมวลผลสัญญาณ อีกทั้งใช้วิธีการประมาณค่าอัตราการขยายที่ควบคุมค่าตัวแปรสถานะ โดยวิธีการตัวตรวจสอบเพื่อให้ค่าตัวแปรสถานะที่ทำการวัดคุม สามารถปรับค่าเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ดีชุดควบคุมที่สร้างขึ้นนี้จะถูกจำกัดที่จำนวนตัวแปรของการวัดคุม เพราะความสามารถของตัวประมวลผลและหน่วยความจำ ซึ่งในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังที่ใช้กากน้ำตาลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อนั้นจะควบคุมเฉพาะค่าอุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดหรือด่าง ซึ่งจะพบได้ว่าชุดควบคุมเชิงเลขที่สร้างขึ้น สามารถแสดงค่าวัดได้ตรงเท่ากับเครื่องมือวัดที่ใช้เป็นมาตรฐานในห้องทดลองจริง

7. สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

1. จากผลการทดลองชุดควบคุมเชิงเลขของบทความนี้กับชุดถังหมักในห้องทดลอง พบว่าชุดวงจรที่ออกแบบและสร้างขึ้นทำงานได้ถูกต้อง ตามค่าที่ต้องการวัดคุมตลอดกระบวนการ
2. เมื่อค่าที่วัดคุมเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้แล้ว จะเปลี่ยนแปลงค่าช้ากว่าชุดควบคุมของห้องทดลอง
3. ชุดควบคุมเชิงเลขที่ใช้ในบทความนี้ สามารถใช้งานควบคุมตัวแปรจำนวนหลายตัวได้พร้อมกัน และถูกต้องตามค่าที่ต้องการควบคุม
4. ชุดควบคุมที่ใช้ในบทความนี้ ใช้เทคนิคพิเศษการออกแบบการทำงานของชุดตัวประมวลผลสัญญาณ โดยทำการแบ่งการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณ ออกเป็น 2 ชุด ส่วนอีกชุดหนึ่งทำการคำนวณค่าอัตราการวัดคุมโดยเฉพาะ โดยชุดหนึ่งทำการควบคุมการทำงานของระบบ เพื่อเป็นการแบ่งภาระในการทำงานของหน่วยประมวลผลสัญญาณ และเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม นอกจากนี้จะทำให้มีความสะดวกในการบำรุงรักษาและปรับปรุงต่อไป
5. ในการเขียนโปรแกรมควบคุมนั้น ใช้เทคนิคการเขียนโปรแกรมที่จะเพิ่มความยืดหยุ่น และสะดวกในการแก้ไข โดยแบ่งโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย โปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย และโปรแกรมเชื่อมระหว่างโปรแกรมหลัก และโปรแกรมย่อย ซึ่งสามารถเชื่อมโยงและตรวจสอบค่าได้ง่าย

6. โปรแกรมการคำนวณค่าการควบคุมนั้นเป็นวิธีการควบคุมสมัยใหม่ที่น่าเสนอวิธีการประมาณค่าตัวแปรสถานะมาใช้งาน ซึ่งสามารถควบคุมค่าตัวแปรสถานะที่ต้องการควบคุมได้หลายตัวพร้อมกัน อีกทั้งยืนยันได้ว่าสามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้อย่างดี

7. ชุดควบคุมนี้ยังได้ออกแบบให้สามารถส่งข้อมูลไปสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นไปทำการวิเคราะห์ต่อไป และการแสดงผลสามารถแสดงผลผ่านจอภาพและเครื่องพิมพ์อีกด้วย

8. การพัฒนาชุดควบคุมเชิงเลข เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ที่เป็นทั้งกระบวนการผลิตที่ค่าต้องการควบคุมของระบบเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น รวมทั้งระบบที่ค่าต้องการควบคุมเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถทำได้โดยการออกแบบส่วนส่งสัญญาณของค่าที่ต้องการควบคุมนั้นขึ้นมา

REFERENCES .

1. Auslunder, D.M., Takahashi, Y., and Mizuka, M., 1980, "Direct Digital Process Control: Practical and Algorithms for Microprocessor Application." *Proc.IEEE.*, Vol. 6, No.2, pp.199-208.
2. Chiu, K.C., Corripio, A.B., and Smith, C.L.. 1973, "Digital Control Algorithms Part I: Dahlin Algorithms." *Instrument and Control System*, Vol.10, pp. 57-59.
3. Chiu, K.C., Corripio, A.B., and Smith, C.L.. 1973. "Digital Control Algorithms Part II: Kalman Algorithms." *Instrument and Control System*, Vol.11, pp. 57-58.
4. Chiu, K.C., Corripio, A.B., and Smith, C.L., 1973. "Digital Control Algorithms Part III: Tuning PI and P Controllers." *Instrument and Control System Vol.12*. pp. 41-43.
5. Chu, W.B.Z., and Constantinides, A., 1988, "Modelling Optimization and Computer Control of Cephalosporin Fermentation Process." *Biotech. Bioeng*, Vol. 32. pp. 277.
6. Derusso. P.M., and Roy, R.J., 1965. *State Variable for Engineers*, John Wiley & Sons. New York
7. Franklin, G.F., 1980, *Digital Control of Dynamic System*, Addison-Wesley, New York.
8. Jacquest, R.G.. 1981. *Modern Digital Control System*, Maral dekker, New York.
9. Jones, K.A.. 1987. "The Digital Controller : Algorithm Adjustments and Application." *Process Control Reference Paper, Vol.13*. pp. 63-74.
10. Kuo, B.C., 1980. *Digital Control Systems*, Holt-Rinehart and Winston., New York
11. Liao, J.C.. 1989, "Fermentation Data Analysis and State Estimation in the Presence of Incomplete Mass Balance." *Biotech. Bioeng.*, Vol.33. pp. 613.
12. Mcneil, B.. and Harvay. L.M., 1990, *Fermentation a Practicle Approach*, Oxford University Press., New York.
13. Pons., M.. 1991. *Bioprocess Monitoring and Control*, Oxford University Press. New York.
14. Williams, B.J.. 1967. "The Design of Digital Controller Algorithm" *Measurement and Control*. Vol. 2, No.7, pp. 85-91.