บทที่ 2

ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID

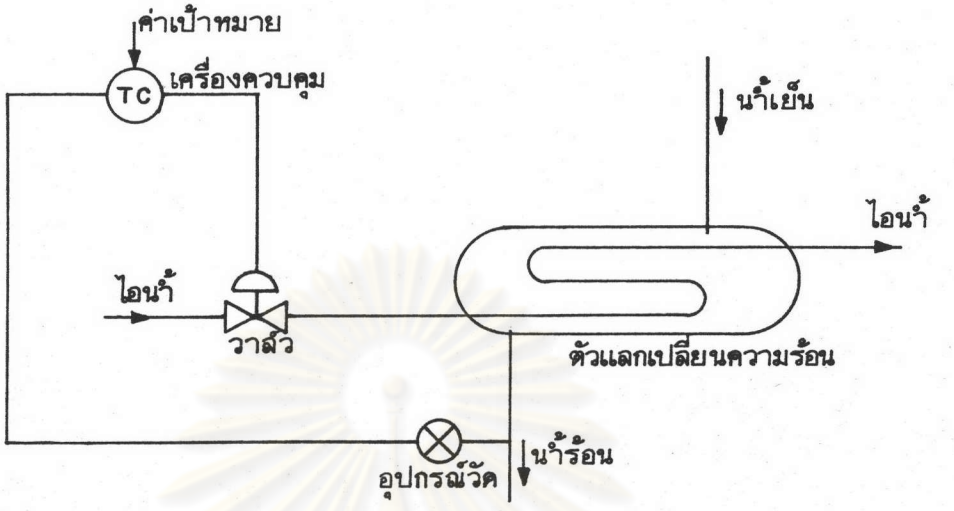
ในกระบวนการผลิตที่ทำงานโดยอัตโนมัติทั่วไป จำเป็นต้องมีตัวควบคุมกระบวนการ ซึ่งการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ก็มีมากมายหลายแบบ ตั้งแต่การควบคุมกระบวนการแบบง่าย ๆ (Single-Loop Control) จนถึงการควบคุมกระบวนการแบบซับซ้อน แต่ถ้ามองลงไปยังส่วนย่อยของตัวควบคุมกระบวนการแล้ว มักพบว่าประกอบไปด้วยตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID แทบทั้งสิ้น น้อยครั้งที่จะพบการควบคุมกระบวนการแบบอื่น ๆ ในบทนี้จะขอกล่าวถึงตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID รวมทั้งการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน

2.1 องค์ประกอบของการควบคุม

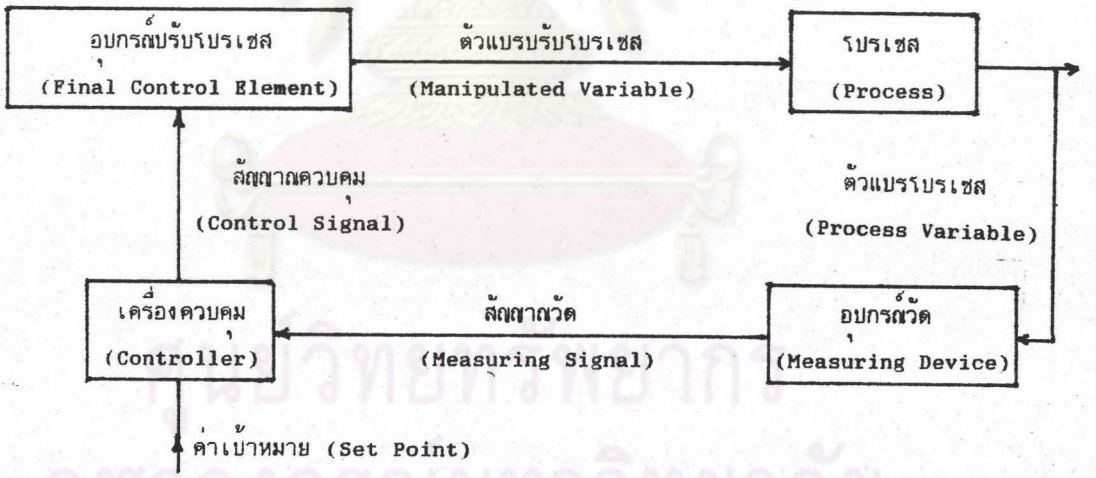
ก่อนที่จะกล่าวถึงตัวควบคุมและการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จำเป็นที่จะต้องกล่าวถึงองค์ประกอบของการควบคุมแบบง่าย ๆ เพื่อนิยามคำบางคำของการควบคุม โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างของระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมของการควบคุมได้ตามรูปที่ 2.2 กระบวนการนี้ต้องการควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ทางออกให้มีอุณหภูมิตามที่ตั้งไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)



รูปที่ 2.2 บล็อคไดอะแกรมของระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วน คือ

(1) กระบวนการ (Process) หมายถึง กระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะตามต้องการ สถานะของกระบวนการ แสดงด้วยตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) การควบคุมสถานะของกระบวนการ ทำได้โดยการปรับหรือเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Variable) ในทิศทางที่ทำให้ตัวแปรกระบวนการมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ ตามรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 กระบวนการที่กล่าวถึงคือตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้าโดยการรับพลังงานความร้อนจากไอน้ำ เพื่อให้กลายเป็นน้ำร้อนขาออก ตัวแปรกระบวนการในที่นี้จะหมายถึงอุณหภูมิน้ำร้อนขาออก

(2) อุปกรณ์วัด (Measuring Device) เป็นอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณขาออกหรือสัญญาณวัด (Measuring Signal) ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับตัวแปรทางฟิสิกส์ที่ต้องการวัดหรือตัวแปรกระบวนการ โดยทั่วไป สัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดจะเป็นสัญญาณมาตราฐาน 4-20 $mA_{dc.}$ 1-5 $V_{dc.}$ หรือสัญญาณลมขนาด 3-15 psi.

(3) เครื่องควบคุมหรือตัวควบคุม (Controller) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คำนวนหาสัญญาณขาออกหรือสัญญาณควบคุม (Control Signal) จากสัญญาณขาเข้า ที่ได้แก่สัญญาณวัดและจุดปรับตั้ง (Set Point) ตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control Law) ที่ถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าแล้ว

(4) อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ตามคำสั่ง หรือสัญญาณควบคุม ที่ได้รับจากตัวควบคุม

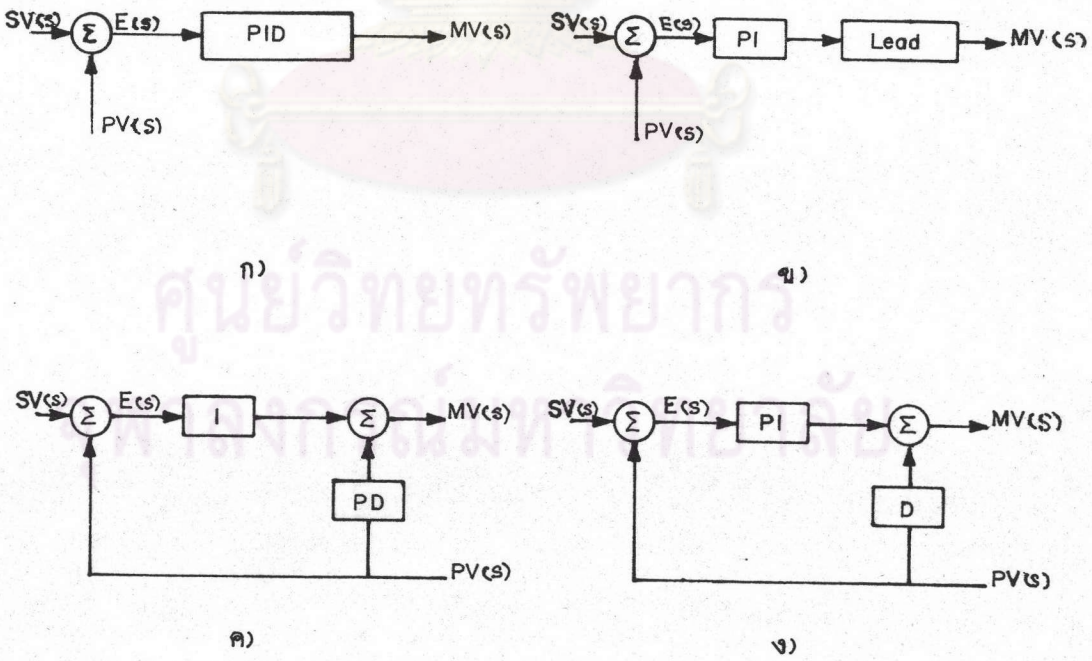
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ตัวควบคุมแบบ PID คืออะไร

ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID คือ ตัวควบคุมชนิดหนึ่งในการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ทำหน้าที่นำสัญญาณเอาท์พุทของกระบวนการมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจุดปรับตั้งที่กำหนด และคำนวนตามกฎเกณฑ์การควบคุมแบบ PID ซึ่งประกอบด้วยการคำนวน 3 ส่วน คือ Proportional, Integral และ Derivative สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID ก็คือ ผลรวมของการคำนวนทั้ง 3 ส่วน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั่นเอง

2.3 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบ PID พอจะแบ่งรูปแบบของตัวควบคุมตามกฎเกณฑ์ของการควบคุมออกได้เป็น 4 แบบ [9] ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID

SV(s) - จุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value)

PV(s) - สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

E(s) - ผลต่างระหว่างจุดปรับตั้งและสัญญาณป้อนกลับ มีค่าเท่ากับ SV(s) - PV(s) หรือ PV(s) - SV(s)

MV(s) - สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Signal)

รูปแบบตามรูปที่ 2.3 ก. เป็นรูปแบบที่ใช้มากในการอธิบายเพื่อความเข้าใจตามหนังสือต่าง ๆ แต่เป็นรูปแบบที่ไม่ค่อยได้ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตจริง ๆ พารามิเตอร์แต่ละตัวจะไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้น การปรับค่าพารามิเตอร์ตัวใด จะไม่มีผลของพารามิเตอร์ตัวอื่นไปเกี่ยวข้องด้วย สมการของการควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.1

$$MV(s) = (100/PB)*(1 + 1/T_i s + T_d s)*E(s) \text{ ---------- } [2.1]$$

รูปแบบตามรูปที่ 2.3 ข. เป็นรูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในตัวควบคุม PID แบบเชิงอุปมาน (Analog) ทั้งนี้เนื่องจากง่ายในการออกแบบวงจรอิเลคทรอนิคส์ แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยได้พบเห็นกันมากนัก เนื่องจากการปรับค่า PB, T_i และ T_d นั้น จะมีผลกระทบต่อกัน (Mutual Interference) สมการของการควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.2

$$MV = (100/PB)*(1 + 1/T_i s)*(1 + T_d s)*E(s)/(1 + T_d s/N) \text{ ------- } [2.2]$$

สำหรับตัวควบคุมแบบ PID ตามรูปที่ 2.3 ค. และรูปที่ 2.3 ง. นั้น เป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในเครื่องควบคุม PID ชนิดเชิงเลข (Digital PID Controller) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สำหรับรูปแบบตามรูปที่ 2.3 ค. นั้น เป็นรูปแบบที่เหมาะสำหรับการควบคุมที่กระบวนการมีการรบกวนจากภายนอก (Load หรือ Supply Disturbance) แต่กระบวนการจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของจุดปรับตั้ง ทั้งนี้เนื่องจากค่า Proportional Band มีผลกับสัญญาณตัวแปรกระบวนการ ส่วนรูปแบบที่ 2.3 ง. นั้น เป็นรูปแบบที่เหมาะสำหรับการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ควบคุมที่มีการเปลี่ยนค่าจุดปรับตั้งแต่กระบวนการจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีถ้ามีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทั้งนี้เนื่องจากค่า Proportional Band นั้น มีผลกับค่าผลต่างระหว่างค่าจุดปรับตั้งกับตัวแปรกระบวนการ สำหรับรูปแบบทั้งสองที่กล่าวมานี้นั้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Derivative Term นั้นจะมีผลเฉพาะค่าตัวแปรกระบวนการ ทั้งนี้ มีข้อดีคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าจุดปรับตั้งอย่างทันทีทันใดจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของกระบวนการ สมการคณิตศาสตร์ใน s-Domain ของรูปแบบที่ 2.3 ค. แสดงได้ตามสมการที่ 2.3 ส่วนสมการคณิตศาสตร์ใน s-Domain ของรูปแบบที่ 2.3 ง. แสดงได้ตามสมการที่ 2.4

$$MV = 100/PB\ [PV(s) + E(s)/T_i s + T_d s*PV(s)/(1+T_d s/n)] \text{ ------- } [2.3]$$

$$MV = 100/PB\ [E(s) + E(s)/T_i s + T_d s*PV(s)/(1+T_d s/n)] \text{ ------- } [2.4]$$

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะสนใจในรูปแบบของตัวควบคุมตามสมการที่ 2.4 เป็นพิเศษ

2.4 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID กับกระบวนการ

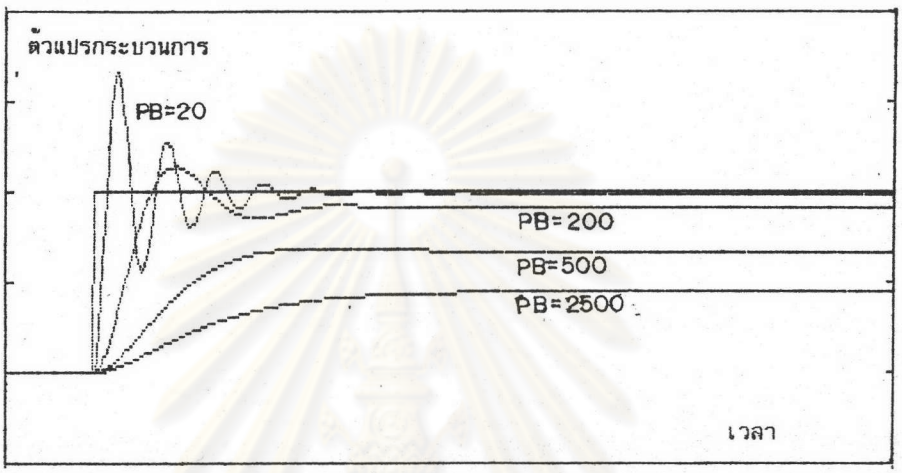
2.4.1 ผลของ Proportional Band กับกระบวนการ

Proportional Band กับการควบคุมกระบวนการนั้น Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 2.5

$$Gain = 100/PB \text{ ---------- } [2.5]$$

สำหรับผลของ Proportional Band กับการควบคุมแบบ P-Control นั้น Proportional Band จะมีผลกับขนาดของผลตอบรวมถึงความไว (Sensitivity) และออฟเซต (Offset) หรือค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state Error) ของผลตอบ

ค่า Proportional Band ที่มากเกินไป จะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมากขึ้น และทำให้ความไวของผลตอบลดลง ในทางตรงกันข้าม ค่าของ Proportional Band ที่น้อยเกินไปจะทำให้กระบวนการเกิดการแกว่งหรือเข้าใกล้จุดไร้เสถียรภาพมากขึ้น รูปที่ 2.4 แสดงผลของการเพิ่มหรือลดค่า Proportional Band ต่อกระบวนการกำลังสอง

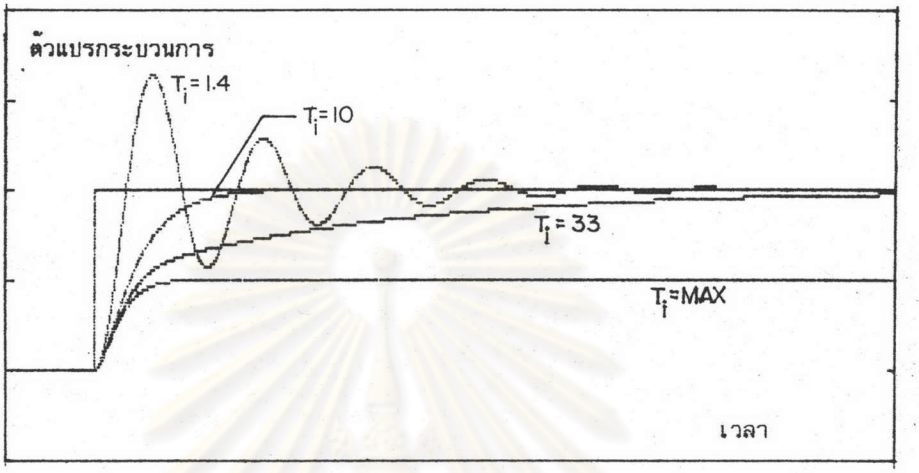


รูปที่ 2.4 ผลของ Proportional Band ต่อกระบวนการ

2.4.2 ผลของ Integral Time กับกระบวนการ

สำหรับ Integral Action นั้น จะมีผลกับผลตอบในลักษณะของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time จะมีผลทำให้ออฟเซต หรือค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้ เนื่องจาก Integral Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบ แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้กระบวนการนั้นมีค่าน้อยเกินไป (Integral Action มากไป) ก็จะทำให้ผลตอบของกระบวนการเกิดการแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวนานขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของผลตอบของกระบวนการ ถ้าผลตอบของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบที่มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่ง หรือการพุ่งเกินของผลตอบของกระบวนการ ในกรณีที่กระบวนการนั้นมีค่า Integral Time เดิมน้อยเกินไป เมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องอย่างอัตโนมัติ (Automatic Start) ด้วยการควบคุม

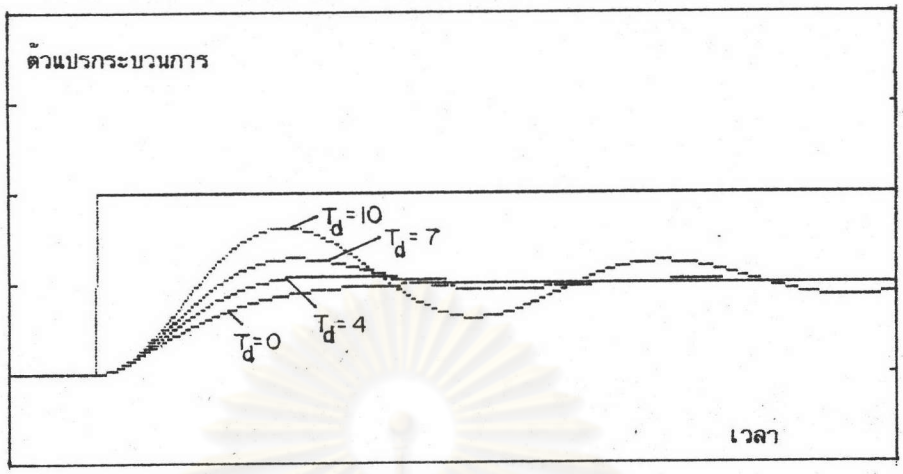
ของตัวควบคุม PID Integral Action จะทำให้เกิด Integral Windup เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่อง ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ทำให้เทอมของ Integral มีค่าเกิน 100 % รูปที่ 2.5 แสดงผลของการเพิ่มหรือลดค่า Integral time ในการควบคุมแบบ PI



รูปที่ 2.5 แสดงผล Integral time ที่มีต่อผลตอบของกระบวนการในการควบคุมแบบ PI

2.4.3 ผลของ Derivative time กับผลตอบของกระบวนการ

ผลของ Derivative Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า ซึ่งมีผลทำให้กระบวนการสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น สำหรับตัวควบคุมแบบ PID ที่มีรูปแบบตามสมการที่ 2.3 และ 2.4 นั้น Derivative Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการ โดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ Derivative Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าจุดปรับตั้งแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม Derivative Action จะมีผลเสียในการควบคุมกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนมาก ทั้งนี้เนื่องจาก Derivative Action จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าอย่างมาก ดังนั้น กระบวนการที่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างเช่น กระบวนการควบคุมอัตราไหล หรือกระบวนการควบคุมความดัน Derivative Control อาจมีผลทำให้กระบวนการไม่มีเสถียรภาพได้ รูปที่ 2.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของ Derivative Action ต่อการควบคุมแบบ PD



รูปที่ 2.6 แสดงผลของ Derivative Action ที่มีต่อผลตอบของกระบวนการในการควบคุมแบบ PD

สำหรับผลของพารามิเตอร์ทั้งสามตัวที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เป็นการพิจารณาผลตอบของกระบวนการอย่างไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน หรือเป็นการพิจารณาทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้ว ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามกับผลตอบของกระบวนการ ยังเกี่ยวพันธ์กับสิ่งอื่น ๆ เช่น รูปแบบของตัวควบคุม รูปแบบของการควบคุม การใช้ตัวควบคุมในลักษณะใด และเกี่ยวพันธ์กับสภาพแวดล้อม สัญญาณรบกวนที่กระบวนการได้รับอีกด้วย ดังนั้น ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยปรกติต้องอาศัยความคุ้นเคยและความชำนาญกับกระบวนการหรือตัวควบคุมแบบนั้น ๆ เป็นอย่างมาก

2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มักจะใช้วิธีลองผิดลองถูก ซึ่งการปรับค่าด้วยวิธีนี้นั้น จำเป็นอย่างมากที่ต้องอาศัยความชำนาญ ประสบการณ์และความคุ้นเคยกับกระบวนการเป็นอย่างสูง ซึ่งบุคคลประเภทนี้ เป็นบุคคลที่หาได้อย่างยากยิ่งในประเทศของเรา อย่างไรก็ตาม ก็มีการวิจัยหาวิธีที่จะช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ ถึงแม้วิธีเหล่านี้จะปฏิบัติได้อย่างค่อนข้างลำบากในกระบวนการที่แท้จริงก็ตาม ในบทนี้

จะกล่าวถึงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID ที่เป็นที่นิยมและคุ้นเคยกันเป็นอย่างมากสำหรับผู้ที่อยู่ในวงการนี้ วิธีที่กล่าวถึงได้แก่วิธีที่นำเสนอโดย J. G. Ziegler และ N. B. Nichols

J. G. Ziegler และ N. B. Nichols เสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุมแบบ PID [3] โดยได้ศึกษาผลของ Proportional Band, Integral time และ Derivative time ที่มีผลต่อการควบคุมกระบวนการ และเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุมแบบ PI และแบบ PID ไว้ โดยเสนอทั้งวิธีการหาจากผลตอบแบบวงรอบเปิดและการหาค่าพารามิเตอร์จากผลตอบแบบวงรอบปิด ซึ่งจะขอสรุปวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols ไว้โดยย่อดังนี้

- วิธีวงรอบปิด (Closed-Loop Method)

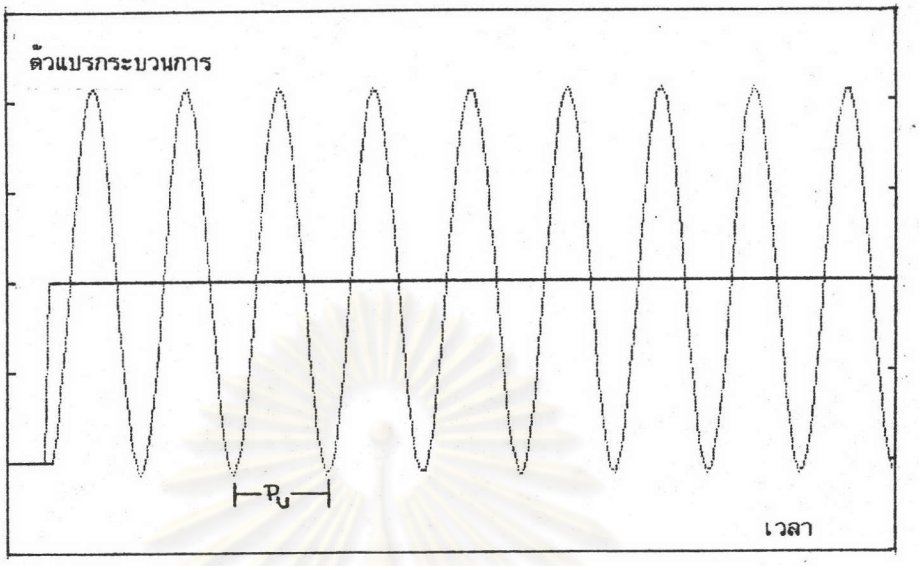
ในการหาค่าพารามิเตอร์แบบวงรอบปิดของ Ziegler และ Nichols นั้น จะขอนิยามคำจำกัดความของตัวแปรที่ต้องหาก่อนการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 2 ตัว ดังนี้

S_u (Ultimate Sensitivity) คือค่าของ Proportional Band ที่ทำให้ผลตอบในขณะวงรอบปิดแกว่งจนกระทั่งค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude Ratio) ของผลตอบนั้น มีค่าเท่ากับ 1

P_u (Period of Oscillation) คือคาบของสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดเท่ากับ 1

ลักษณะของสัญญาณที่มีอัตราส่วนของแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และ คาบของสัญญาณแสดงตามรูปที่ 2.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 แสดงสัญญาณที่มีอัตราส่วนของแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และคาบของสัญญาณกำหนดตาม Ziegler และ Nichols

สำหรับการควบคุมแบบ PI ที่จุดที่เหมาะสมที่สุดนั้น Ziegler และ Nichols กำหนดว่า ค่า Proportional Band มีค่าเท่ากับ $2.2*S_u$ และค่าของ Integral time มีค่าเท่ากับ $P_u/1.2$

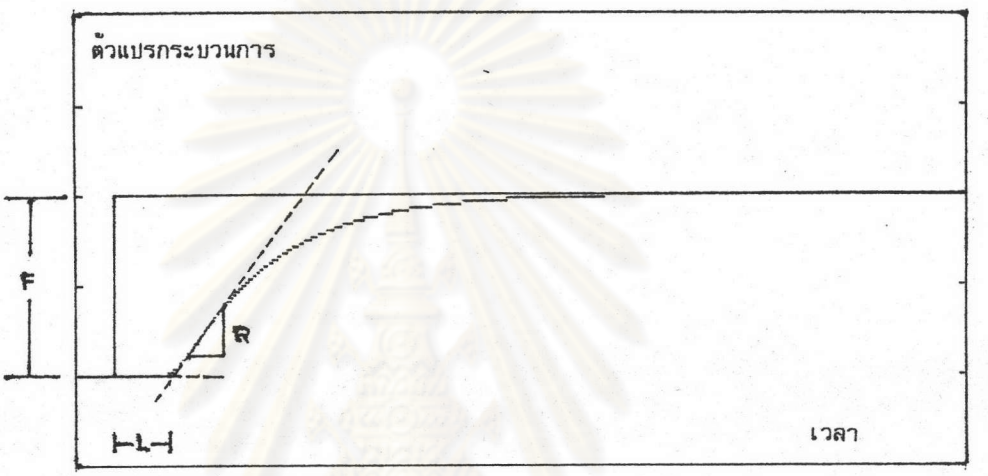
สำหรับการควบคุมแบบ PID Ziegler และ Nichols กำหนดว่า ที่จุดที่เหมาะสมที่สุด ค่า Proportional Band มีค่าเท่ากับ $1.66*S_u$ ค่าของ Integral time มีค่าเท่ากับ $0.5*P_u$ และค่า Derivative time มีค่าเท่ากับ $P_u/8$

จะเห็นว่าในการหาค่าของ Ziegler และ Nichols ที่นำเสนอนั้นเป็นการหาค่าโดยประมาณและจะเห็นว่าไม่มีการกล่าวถึงรูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งปัจจุบันมีรูปแบบในการคำนวนมากมาย

018494

- วิธีวงรอบเปิด (Open-Loop Method)

ในการหาค่าด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Ziegler และ Nichols นั้น จะหาค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมจาก Process Reaction Curve โดยจะกำหนดนิยามของพารามิเตอร์ 3 ตัวได้แก่ พารามิเตอร์ L, พารามิเตอร์ R และ F โดยค่าทั้ง 3 ได้แสดงดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงพารามิเตอร์ที่หาจาก Process Reaction Curve

F :- ขนาดการเปลี่ยนแปลงของจุดปรับตั้ง

R :- ความชันมากที่สุด (Maximum Slope) ของผลตอบ

L :- ค่าการประวิงเวลาของผลตอบ

จากค่าที่กำหนด Ziegler และ Nichols กำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุมโดย

การควบคุมแบบ PI

$$\text{Proportional Band} = 0.9/R_1L$$

$$\text{Integral time} = 3.33L$$

การควบคุมแบบ PID

Proportional Band = $1.2/LR_1$ to $2/LR_1$

Integral time = 2L

Derivative time = 0.5L

โดย $R_1 = R/F$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย