บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 แนวคิดกระบวนการและองค์ประกอบหลักในการควบคุม

2.1.1 กระบวนการ (Process)

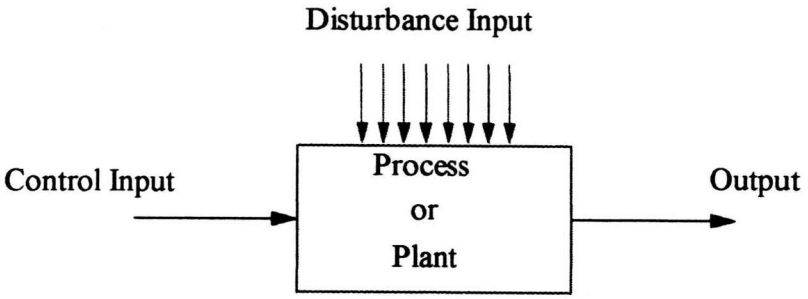
จากมุมมองของวิศวกรฝ่ายผลิต

กระบวนการ คือ ที่ซึ่งวัสดุต่างๆ มารวมกัน และส่วนใหญ่จะมีพลังงานเข้ามาร่วมด้วย เพื่อทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นมา

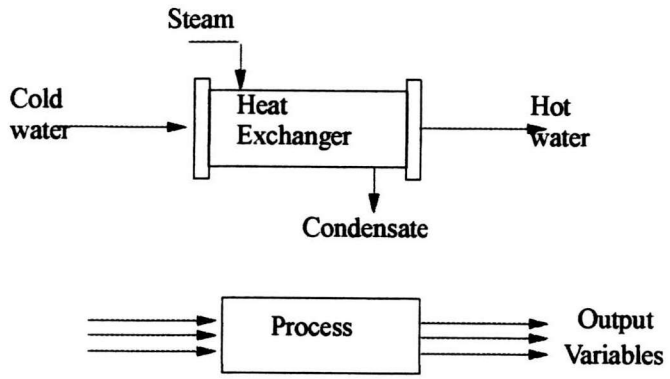
จากมุมมองของวิศวกรควบคุม

กระบวนการ จะมีตัวแปรหนึ่งตัวหรือหลายตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นค่าทางฟิสิกส์ที่เราต้องการควบคุมให้มีสภาวะตามต้องการ มีความสำคัญที่จะต้องทราบค่าและต้องควบคุมหรือรักษาค่าของตัวแปรเหล่านี้ให้ได้ตามค่าที่ตั้งไว้ ขณะที่สภาวะการทำงาน หรือ/และ สภาพแวดล้อมอาจจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ตัวแปรทางฟิสิกส์ ซึ่งแสดงสภาวะทางฟิสิกส์ของกระบวนการเราเรียกว่า ตัวแปรปรับ (Manipulated Variable) ซึ่งได้แก่อัตราการไหลของไอน้ำ



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงตัวแปรขาเข้าและขาออกของกระบวนการ



รูปที่ 2.2 แบบจำลองแสดงสภาวะทางฟิสิกส์ของกระบวนการ

นอกจากนี้ ค่าตัวแปรปรับจะเปลี่ยนแปลงไปถ้าเกิด สิ่งรบกวนกระบวนการ (Process Disturbance) ซึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมของกระบวนการ เราสามารถจำแนกสิ่งรบกวนกระบวนการได้เป็น 2 ประเภท คือ

-สิ่งรบกวนกระบวนการแบบซัพพลาย การเปลี่ยนแปลงของพลังงานขาเข้า หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพ อุณหภูมิ ความดันของไอน้ำร้อนขาเข้า

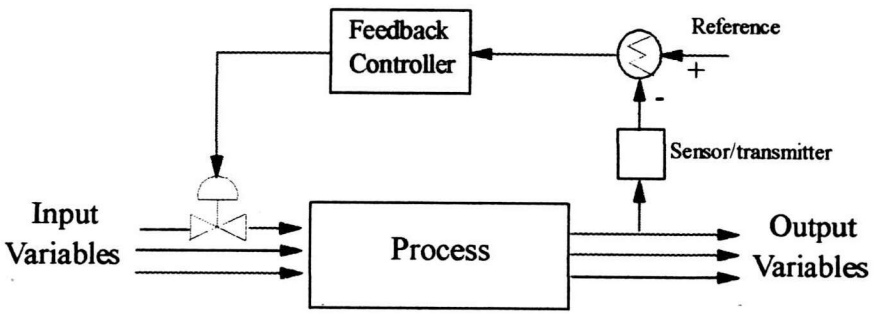
-สิ่งรบกวนกระบวนการแบบดีมานด์ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานขาเข้า หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อัตราการไหลของน้ำเย็น รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียพลังงานความร้อนที่ท่อและถัง

2.1.2 อุปกรณ์การวัด (Measuring Device)

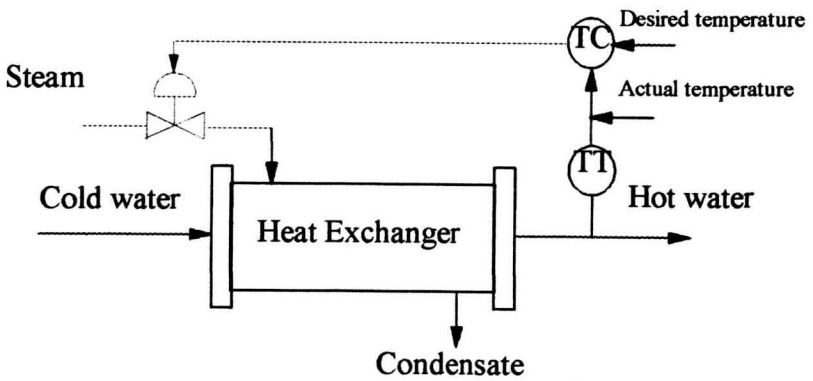
เป็นอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณขาออก ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับขนาดตัวแปรทางฟิสิกส์ของสิ่งที่เราต้องการวัด โดยทั่วไปแล้วเราต้องการให้ความสัมพันธ์ดังกล่าว เป็นสมการเชิงเส้น

2.1.3 ตัวควบคุม (Controller)

หมายถึง สิ่งที่ทำหน้าที่ออกคำสั่ง หรือกำเนิดสัญญาณควบคุมตามกฎเกณฑ์ของการควบคุมที่ถูกกำหนดได้ล่วงหน้าคำสั่ง หรือสัญญาณควบคุมนี้อาจจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา หรือฟังก์ชันกับสัญญาณขาเข้าที่ได้รับจากอุปกรณ์วัด ซึ่งลักษณะหลักของการควบคุมคือ การดูแลกำกับส่วนต่างๆ ของกระบวน เพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.3 ก.บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแบบป้อนกลับ



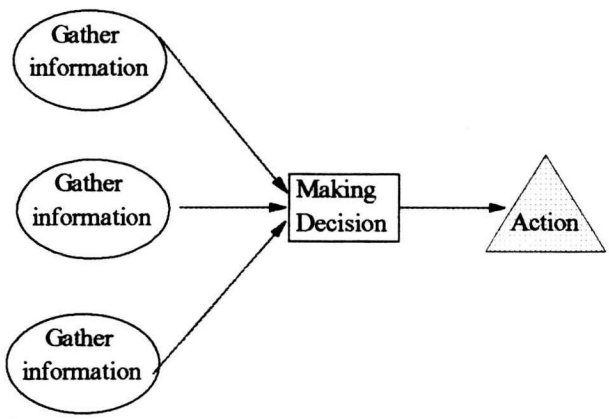
รูปที่ 2.3 ข. บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแบบป้อนกลับ

การควบคุมประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน

ก. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ข. ทำการตัดสินใจซึ่งขึ้นกับข้อมูลที่รวบรวมมา

ค. ลงมือกระทำตามผลของการตัดสินใจ



รูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมขั้นตอนของการควบคุม

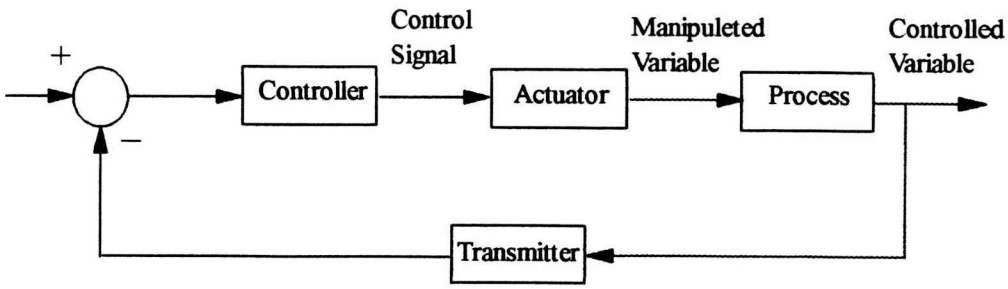
การควบคุม คือ การทำขั้นตอน 3 ขั้นตอนนี้อย่างต่อเนื่อง เพื่อ

ก.ทำให้ระบบทำงานที่จุดที่มีประสิทธิภาพที่สุด

ข.ช่วยให้พนักงานติดตามกระบวนการผลิต และหาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว และถูกต้อง

ในการควบคุมแบบแมนวล ตัวควบคุมได้แก่พนักงานซึ่งจะทำหน้าที่อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำร้อน คำนวณตำแหน่งของวาล์วมือที่เหมาะสมโดยอาศัยประสบการณ์ที่สะสมได้ (กฎเกณฑ์การควบคุมที่ถูกกำหนดได้ล่วงหน้า) แล้วปรับวาล์วมือ (ออกคำสั่ง) ตามผลการคำนวณ สำหรับการควบคุม

อัตโนมัติ ตัวควบคุมได้แก่ เครื่องควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Controller) ซึ่งจะรับสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์ที่ได้รับการ กำหนดล่วงหน้า แล้วส่งสัญญาณไปยังวาล์ว



รูปที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบชุดควบคุมแบบป้อนกลับ

2.1.4 อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับ (Manipulated Variable) ตามคำสั่ง หรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับ

ในการควบคุมส่วนใหญ่ คำสั่งหรือสัญญาณควบคุมจะมีขนาด หรือพลังงานน้อยๆ ส่วนตัวแปรปรับจะมีขนาด หรือพลังงานมาก

ไม่ว่าการควบคุมจะเป็นแบบแมนวล หรือแบบอัตโนมัติจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญหลักคล้ายคลึงกัน โดยหลักการแล้วความแตกต่างของการควบคุมทั้งสองอยู่ที่ แบบแรกใช้คนเป็นตัวควบคุม ส่วนแบบที่สองใช้เครื่องเป็นตัวควบคุม ปัจจุบันเทคโนโลยีโดยเฉพาะทางด้านอิเลคทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาอย่างมากมาย ทำให้เครื่องควบคุมอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงกว่ามนุษย์มาก

2.2 ชนิดของการควบคุมอัตโนมัติ

หลักการพื้นฐานในการปรับค่าตัวแปรปรับกระบวนการมีสองประเภท คือ หลักการป้อนกลับ (Feedback) และ หลักการป้อนล่วงหน้า (Feedforward) ดังนั้น ชนิดของการควบคุมจึงแบ่งได้เป็นสองชนิด ดังนี้

2.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

ตัวแปรปรับ (Manipulated Variable) ถูกกำหนดโดยตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) ที่เราต้องการควบคุม

หลักสำคัญของการควบคุมแบบนี้ เริ่มจากการวัดหาค่าตัวแปรกระบวนการนำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย หรือเซ็ทพอยท์ ระบบจะเริ่มทำงานก็ต่อเมื่อค่าตัวแปรกระบวนการที่วัดได้มีค่าต่างจากค่าเป้าหมาย โดยที่ผลต่างของการเปรียบเทียบ (Deviation) หรือความคลาดเคลื่อน (ความผิดพลาด) จะถูกนำไปคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมป้อนกลับ ไปปรับกระบวนการ การทำงานจะกระทำซ้ำๆ จนตัวแปรกระบวนการมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมาย การควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นแบบที่เราพบบ่อยที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม (มากกว่า 80 %) ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมเป็นแบบ การควบคุมแบบเปิด-ปิด หรือ การควบคุมแบบ พี อาย ดี

2.2.2 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control)

ตัวแปรปรับไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรกระบวนการ แต่จะถูกกำหนดด้วยสิ่งรบกวนกระบวนการ (Process Disturbance) หลักสำคัญของการควบคุมแบบนี้ เริ่มจากการวัดหาค่าสิ่งรบกวนกระบวนการ แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมป้อนล่วงหน้าไปปรับกระบวนการต้านกับสิ่งรบกวน ก่อนที่ตัวกระบวนการจะเปลี่ยนแปลงไป

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า เราจำเป็นต้องทราบอย่างชัดเจนว่าด้วยตัวแปรกระบวนการสัมพันธ์อย่างไรกับสิ่งรบกวนกระบวนการ, ค่าเป้าหมายและสัญญาณวัด โดยปกติเรามักจะทราบเพียงความสัมพันธ์คร่าว ๆ เท่านั้นเอง ในทางปฏิบัติระบบควบคุมป้อนล่วงหน้ามักจะใช้งานร่วมกับระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นระบบควบคุมแบบผสม (Combinational control)

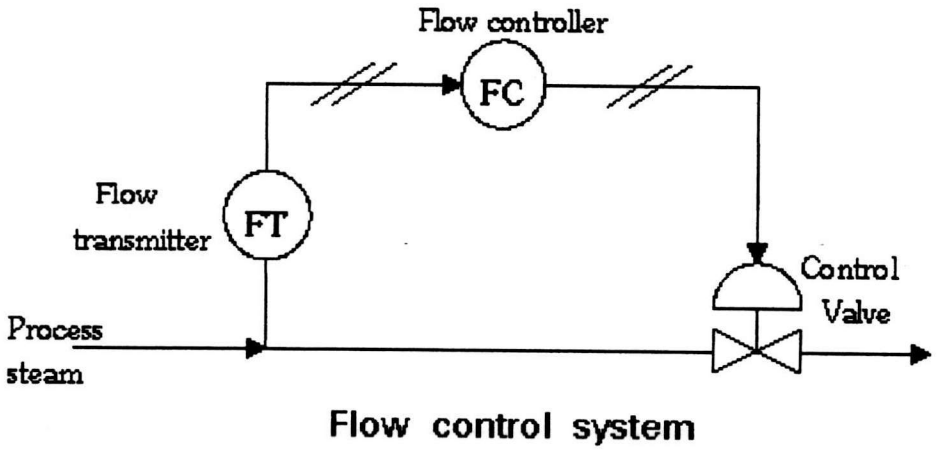
2.3 ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี และการนำไปใช้งาน

การออกแบบระบบควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม (Industrial Control) เป็นงานที่ค่อนข้างจะยุ่งยากซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถสรุปการออกแบบระบบควบคุมได้ด้วยคำถามสองข้อหลัก คือ เป้าหมายหลักของการควบคุมคืออะไร และเราจะดำเนินการอย่างไรเพื่อบรรลุเป้าหมายดังกล่าว เป็นการยากที่จะตอบคำถามทั้งสองข้อให้ครอบคลุมงานทุกประเภท เราเพียงจะกล่าวในที่นี้ได้ว่าการควบคุมเพื่อบรรรลุผลตามเป้าหมายหลักนั้นมักจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการย่อยหลายๆกระบวนการ ดังนั้นการควบคุมให้ได้ผลจึงประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยที่เหมาะสม

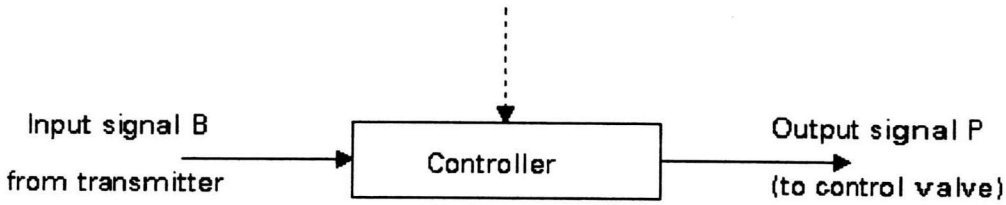
ระบบควบคุมย่อยโดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบควบคุมแบบง่ายๆ ที่ใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ และโดยทั่วไปตัวควบคุมที่ใช้มักจะเป็นแบบ พี อาย ดี ระบบควบคุมย่อยส่วนน้อยที่จำเป็นต้องใช้หลักการควบคุมแบบซับซ้อน เราอาจกล่าวได้อีกนัยว่าในการกำหนดแบบของการควบคุม เราจะพยายามใช้การควบคุมแบบง่ายๆก่อน ต่อเมื่อการควบคุมแบบง่ายๆใช้ไม่ได้ผล เราจึงจะใช้การควบคุมแบบซับซ้อน การศึกษาให้เข้าใจการควบคุมแบบง่ายๆ ซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี จึงเป็นความจำเป็นพื้นฐานในการควบคุมทางอุตสาหกรรม

2.4 หลักการพื้นฐานของ พี อาย ดี

ในปีค.ศ. 1930 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งประกอบด้วย สัดส่วน, อินทีกรัล และดีไรเวทีฟ (พี อาย ดี) เข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมอย่างมาก ปีค.ศ. 1940 ทฤษฎีแรกที่เป็นที่รู้จักกันดี และเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรม คือตัวควบคุมแบบนูแมติก พี อาย ดี ส่วนอิเล็กทรอนิก เคาน์เตอร์พาร์ท เข้าสู่ตลาดในปีค.ศ. 1950 และระบบการควบคุมการบวนการด้วยคอมพิวเตอร์เข้ามาสู่วงการอุตสาหกรรมในระหว่างปลายปี 1950 ถึงต้นปี 1960 หลังจากนั้นมา 20 ปี คอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์แบบดิจิตัลก็เข้ามามีบทบาทอย่างมากจนกลายเป็นพื้นฐานในระบบการควบคุม



รูปที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมการไหล



Schematec diagram of a feedback controller

รูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบป้อนกลับ

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 ในขณะที่มีของไหลในกระบวนการก็จะถูกวัดปริมาณของการไหลขาเข้า และส่งสัญญาณ โดยตัวส่งสัญญาณการไหลไปที่ตัวควบคุมการไหล จากนั้นตัวควบคุมการไหลก็จะเปรียบ เทียบสัญญาณที่ได้กับเซ็ทพอยท์ ถ้าสัญญาณที่เปรียบเทียบได้ดังกล่าวมีความแตกต่างกันก็จะส่งสัญญาณไปเปิด - ปิดวาล์วควบคุมตามขนาดของสัญญาณที่แตกต่างกัน

ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี (PID-controller) ประกอบด้วย

- P (สัดส่วน) (Proportional)
- I (อินทีกรัล) (Intergal)
- D (ดีไรเวทีฟ) (Derivative)

2.4.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller)

ระบบจะทำงานโดยปรับสัญญาณที่แตกต่างให้น้อยลงหรือเข้าใกล้ 0

$$e(t) = R(t) - B(t) \qquad (2.1)$$

R(t) = เซ็ทพอยท์

B(t) = ค่าที่วัดได้ของตัวแปรควบคุม

$e(t)$ = ความแตกต่างของสัญญาณ

$$p(t) = \bar{p} + K_C e(t) \qquad (2.2)$$

$p(t)$ = เอาท์พุทตัวควบคุม

$\bar{P}(t)$ = ค่าไบแอส

K_C = เกนตัวควบคุม (โดยปกติจะเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย)

หลักการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนมีดังนี้

ก. เกนตัวควบคุมสามารถปรับได้เป็นผลทำให้เอาท์พุทของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงไป ความว่องไวขึ้นอยู่กับสัญญาณระหว่างเซ็ทพอยท์ และ ตัวแปรควบคุมว่ามีความแตกต่างกันเพียงใด

ข. พารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมมี 1 ตัว คือ เกนตัวควบคุม หรือ แบนด์สัดส่วน

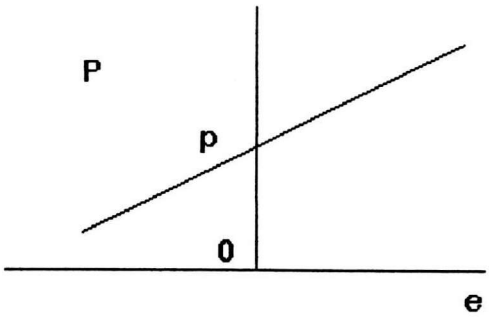
ค. ค่า K_C สามารถเลือกใช้ค่าได้ ซึ่งจะส่งผลให้ เอาท์พุทของตัวควบคุมเพิ่มขึ้น หรือ ลดลง

ง. สัญญาณควบคุมที่ออกจากเครื่องคุมจะเป็น สัดส่วนของความผิดพลาด

จ. เมื่อมีการสมดุลย์กันระหว่างโหลดกับเอาท์พุทจากเครื่องควบคุม ก็จะเกิดออฟเซ็ทหรือการเบี่ยงเบนจากสถานะคงตัวบางเครื่องควบคุมโดยเฉพาะระบบเก่าๆจะใช้แบนด์สัดส่วนซึ่งลักษณะคล้ายๆกับความผิดพลาด ซึ่งหมายถึงช่วงของความผิดพลาด ที่ทำให้เอาท์พุทเปลี่ยนจาก 0 ถึง 100 เปอเซ็นต์

$$PB = \frac{100\%}{K_C} \qquad (2.3)$$

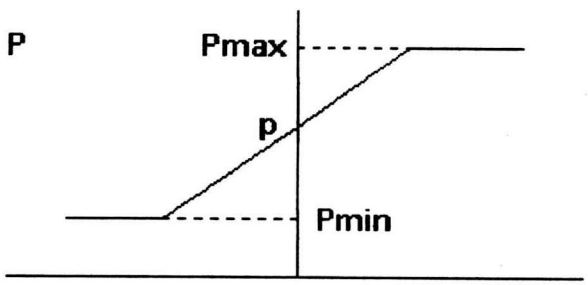
โดยที่ K_C เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยจากสมการจะเห็นว่าถ้าเกนตัวควบคุมมีค่าน้อย แบนด์สัดส่วนก็จะมีค่าใหญ่มาก สำหรับตัวควบคุมแบบสัดส่วนในอุดมคติจะเป็นกราฟดังต่อไปนี้



Proportional control : ideal behavior (slope of line = Kc)

รูปที่ 2.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนในอุดมคติ

แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีข้อจำกัดของเอาท์พุทตัวควบคุม กราฟที่ได้จึงเป็นดังต่อไปนี้



Proportional control :actual behavior

รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของพฤติกรรมที่แท้จริงของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

P_{min} ,P_{max} เรียกว่า ความอิ่มตัวของตัวควบคุมซึ่งเกิดจากข้อจำกัดทางกายภาพของเอาท์พุทตัวควบคุม

2.4.2 ตัวควบคุมแบบอินทีกรัล (Integral controller)

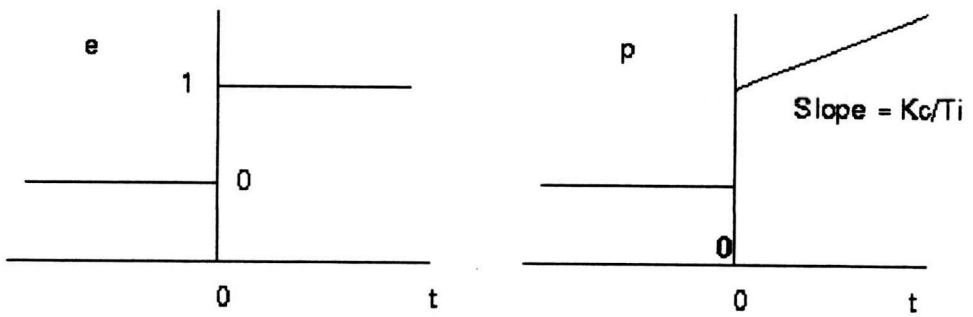
เครื่องควบคุมชนิดนี้ทำงานขึ้นอยู่กับขนาด ความผิดพลาด และเวลาที่ความผิดพลาดนั้นสะสม เราจะใช้การกระทำการแบบอินทีกรัลควบคู่กับการกระทำการแบบสัดส่วนเพื่อขจัด ออฟเซ็ท ในกระบวนการที่ไม่สามารถให้มีออฟเซ็ทเกิดขึ้นได้

$$p(t) = \bar{p} + \frac{1}{\tau_I}\int e(t)dt \qquad (2.4)$$

ค่า τ_I เป็นค่าคงที่ คือ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนเอาท์พุทของเครื่องควบคุมโดยการกระทำการแบบอินทีกรัลโดยให้ค่าของเอาท์พุทนี้มีค่าเท่ากับค่าเอาท์พุทที่เกิดจากการกระทำการแบบสัดส่วนเพียงอย่างเดียว และสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ มีหน่วยเป็นเวลา ข้อเสียของอินทีกรัลจะสร้างแล็กขึ้นมาในเครื่องควบคุมคือ คาบของการแกว่งขึ้นลงจะยาวขึ้นมากกว่าประมาณ 50 %

เมื่อเรารวมกันระหว่าง พี กับ อาย ก็จะได้เครื่องควบคุมแบบ พี อาย

$$p(t) = \bar{p} + K_C\left[e(t) + \frac{1}{\tau_I}\int e(t)dt\right] \qquad (2.5)$$



Response of proportional - integral controller to unit step change in e(t)

รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ พี อาย ในขณะที่ทำการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็พ

2.4.3 ตัวควบคุมแบบดีไรเวทีฟ (Derivative controller)

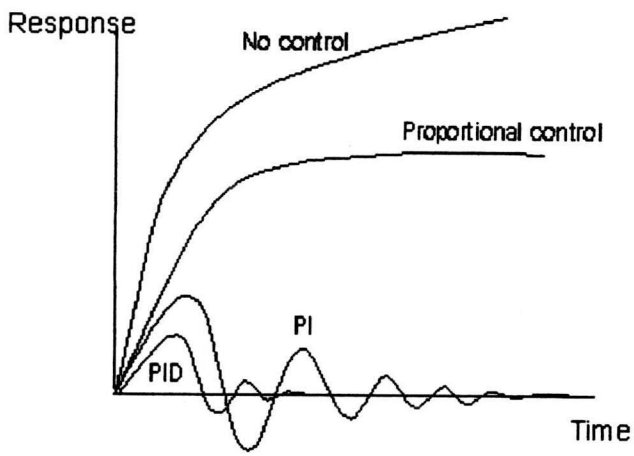
ระบบตัวควบคุมแบบดีไรเวทีฟ จะเป็นระบบที่คอยคาดการล่วงหน้าและปรับเปลี่ยนระบบโดยดูจากแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของระบบ การทำงานจะทำงานโดยพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความผิดพลาดในช่วงนั้นๆ ข้อเสียของสัดส่วนและอินทีกรัล คือ ความผิดพลาดต้องมีขนาดมากพอสมควร จึงจะส่งผลการทำงานแก่เครื่องควบคุม แต่ขนาดของเอาท์พุทของเครื่องควบคุมในส่วนของการกระทำการดีไรเวทีฟจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนของความผิดพลาด แม้ว่าขนาดของความผิดพลาดจะน้อยอยู่ก็ตาม

$$p(t) = \bar{p} + \tau_D \frac{de}{dt} \tag{2.6}$$

เมื่อรวมทั้งสามระบบ ก็จะได้ การควบคุมแบบ พี อาย ดี

$$p(t) = \bar{p} + K_C\left[e(t) + \frac{1}{\tau_I}\int e(t)dt + \tau_D \frac{de}{dt}\right] \tag{2.7}$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมที่กล่าวมาได้ดังต่อไปนี้



Typical process responses with feed back control

รูปที่ 2.11 แสดงบล็อกไดอะแกรมชนิดของการสนองตอบของการะบวนการควบคุมแบบป้อนกลับ

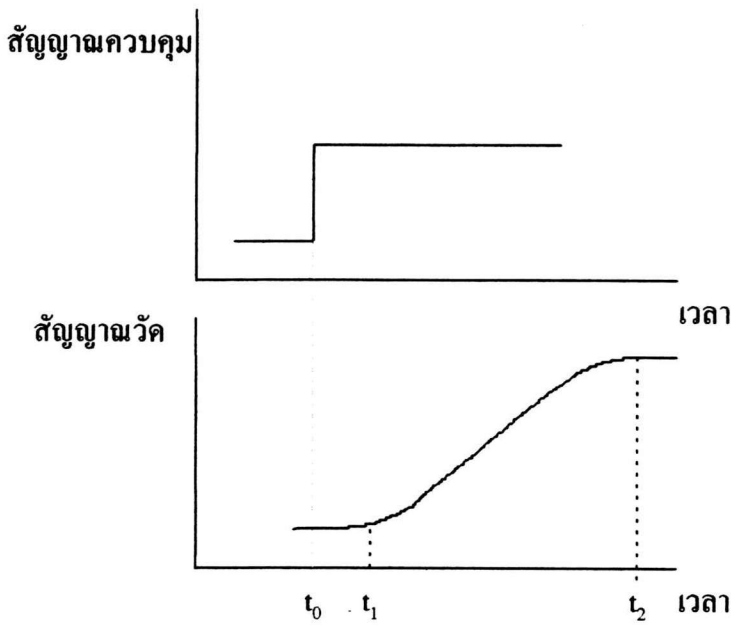
เมื่อใช้การควบคุมแบบป้อนกลับจะมีการแกว่งขึ้นลงของตัวแปรที่ถูกควบคุม ซึ่งเกิดจากแล็กในกระบวนการผลิต การแกว่งขึ้นลงคือ การตอบสนองแบบธรรมชาติของระบบต่อการเปลี่ยนของโหลด เราสามารถพิจารณาสมรรถนะของลูพควบคุมโดยดูจากลักษณะของการแกว่งขึ้นลง และรูปร่างของการแกว่งขึ้นลง ในแต่ละลูพขึ้นอยู่กับค่าของ สัดส่วน, อินทีกรัล และ ดีไรเวทีฟ ที่ตั้งไว้ในเครื่องควบคุม การควบคุมที่ดีสัญญาณที่วัดได้ควรจะแกว่งขึ้นลงน้อยลง (สัญญาณการแกว่งลดลง) เกณฑ์ที่วัดว่าการควบคุมดีหรือไม่ ดูที่สัญญาณการแกว่งว่าลดลงไป 1/4 เท่าหรือไม่ (quater damping ratio)

2.5 ลักษณะสมบัติของกระบวนการ (Process Characteristic)

ไม่ว่าเราจะควบคุมสิ่งใด มีชีวิตหรือไม่ก็ตาม เราจำเป็นต้องทราบถึง ธรรมชาติ ของสิ่งนั้นว่าตอบสนองอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงของการกระทำจากภายนอก ในการควบคุมกระบวนการเราจึงควรทำการศึกษาให้เข้าใจลักษณะสมบัติของกระบวนการเสียก่อนโดยทั่วๆไปแล้ว การศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการจะเป็นการศึกษาว่าตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อสัญญาณควบคุม สภาวะการทำงาน หรือสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไป แต่เพื่อจะลดความยุ่งยาก ในที่นี้เราจะศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการเมื่อสัญญาณควบคุมเปลี่ยนไปเพียงอย่างเดียว ขณะที่สภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมมีค่าคงที่ใกล้เคียงกับขณะปฏิบัติงานจริง ๆ

ในการศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการสัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ปรับกระบวนการจะไม่สัมพันธ์กับสัญญาณวัด อุปกรณ์ปรับกระบวนการจะรับสัญญาณจากแหล่งจ่ายสัญญาณแบบขั้นบันไดแทน แหล่งจ่ายสัญญาณดังกล่าวอาจจะเป็นตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ก็ได้

สมมติว่าระบบอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State) สัญญาณควบคุม สัญญาณวัดมีขนาดคงที่ ขณะใดขณะหนึ่งเราทำการเพิ่มสัญญาณควบคุมอย่างทันทีทันใด ทำให้วาล์วเปิดกว้างขึ้นไอน้ำไหลผ่านวาล์วสู่ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น ต่อมาอุณหภูมิของน้ำร้อนขาออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่ที่สถานะคงตัวใหม่ สัญญาณควบคุมและสัญญาณวัดที่ถูกบันทึกไว้ที่เครื่องบันทึกแสดงได้ด้วยรูป 2.12



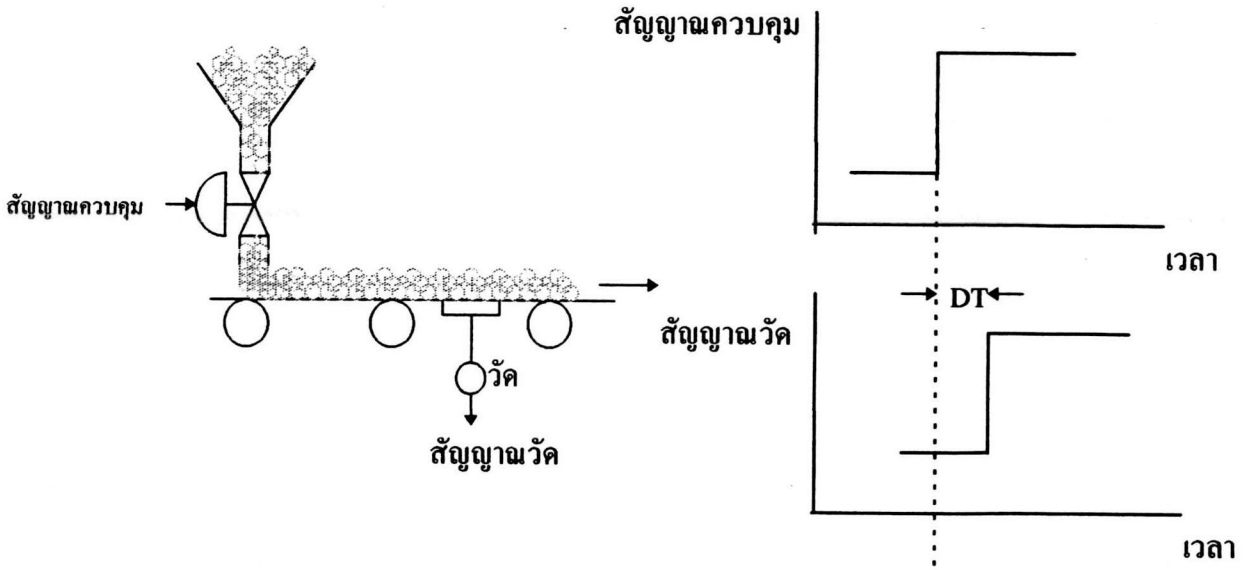
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.5.1 ความช้าในการตอบสนอง (Process Time Lag)

เราพบว่าเมื่อสัญญาณควบคุมเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่เวลา $t = t_0$ สัญญาณวัดของตัวแปรกระบวนการซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของน้ำร้อนจะมีค่าคงเดิมจนถึงเวลา t_1 ตัวแปรกระบวนการจึงค่อย ๆ เปลี่ยนไปจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่เวลา t_2 ลักษณะเช่นนี้แสดงว่ากระบวนการมีความช้าในการตอบสนอง (Process Time Lag) ซึ่งอาจพอแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ เดดไทม์ และ ความจุแล็ก

2.5.2 เดดไทม์ (Deadtime)

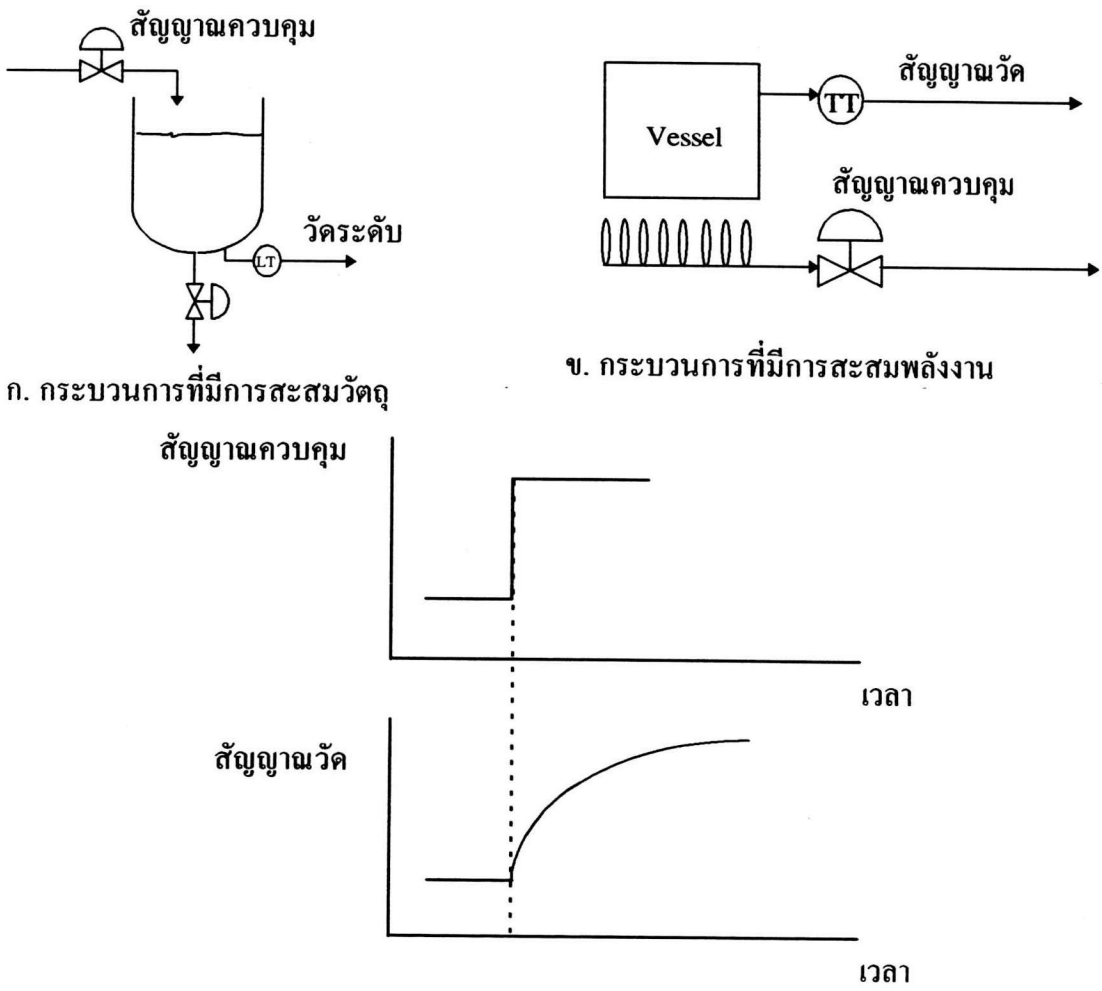
คือ ช่วงเวลาที่นับจากขณะที่สัญญาณควบคุมเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งสัญญาณวัดของตัวแปรกระบวนการ เริ่มเปลี่ยนแปลง ในรูป 2.12 เดดไทม์ มีค่าเท่ากับ t_1 - t_2 โดยทั่วไปแล้ว เดดไทม์มักจะเกิดจากการที่วัตถุต้องเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่ง ทำให้ขนาดของเดดไทม์ขึ้นอยู่กับความเร็วและระยะทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น เราอาจเรียกเดดไทม์ได้ว่าเป็น Distance - Velocity Lag หรือ Transportation Lag ในบางกระบวนการความช้าในการตอบสนอง (Time Lag) อาจจะเป็นแบบเดดไทม์เพียงอย่างเดียว ในระบบควบคุม เดดไทม์จะเป็นเวลาที่ตัวควบคุมจะต้องคอยเพื่อที่จะทราบผลของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมที่ตัวควบคุมได้ส่งออกไปแล้ว ยิ่งเดดไทม์มีค่ามากตัวควบคุมยิ่งต้องคอยนานขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่า เดดไทม์ทำให้การควบคุมยากขึ้นในการออกแบบกระบวนการที่ดีเราต้องพยายามลดค่าเดดไทม์ โดยการกำหนดจุดวัดขนาดของภาชนะ ฯลฯ เพื่อที่จะลดระยะทางในการส่งวัตถุหรือสัญญาณให้สั้นที่สุด



รูปที่ 2.13 กระบวนการที่แสดงความล่าช้าในการตอบสนองเป็นแบบเดดไทม์อย่างเดียว

2.5.3 ความจุแล็ก (Capacity Lag)

ความช้าในการตอบสนองประเภทนี้จะเป็นตัวจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณวัดไม่ให้มีค่ามากเกินไป ยิ่งความจุแล็กมีค่ามาก อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสัญญาณวัดยิ่งมีค่าน้อย ช่วงเวลาที่สัญญาณวัดเปลี่ยนแปลงจากสถานะคงตัวเดิมไปสู่สถานะคงตัวใหม่จะนานขึ้น ความจุแล็ก จะพบในกระบวนการที่มีการกักเก็บพลังงานหรือวัตถุซึ่งจะถูกถ่ายเทเข้าออกจากกระบวนการไปสู่ที่อื่น เราอาจเรียกความจุแล็กได้อีกอย่างว่าแล็กถ่ายเท ตัวอย่างของกระบวนการที่มีความช้าในการตอบสนองแบบความจุแล็กเพียงอย่างเดียว แสดงได้ด้วยรูป 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงกระบวนการที่ความช้าในการตอบสนองเป็นแบบ ความจุแล็ก

ความจุแล็ก ของกระบวนการในรูป 2.14 ก. และ 2.14 ข. เป็นชนิดกระบวนการอันดับหนึ่งซึ่งเราอาจจะแสดงค่าโดยค่าคงที่ของเวลา (τ) โดยทั่วไปความจุแล็กที่เราพบบ่อยๆ อาจจะเป็นชนิด กระบวนการอันดับสอง, กระบวนการอันดับสาม หรือมากกว่า

โดยสรุปแล้ว ในการควบคุมถ้ากระบวนการมีค่าความจุแล็กยิ่งมากสัญญาณวัดยิ่งเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณควบคุมไปต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณวัดได้ง่ายยิ่งขึ้น ทำให้การควบคุมง่ายขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความจุแล็กทำให้การควบคุมง่ายขึ้น การศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการในที่นี้ ก็เพื่อที่เราจะได้ทราบขนาดของเดดไทม์ และ ความจุแล็กของกระบวนการ ค่าไทม์แล็กทั้งสองจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความยากง่ายของการควบคุม ในทางปฏิบัติเราอาจจะใช้ขนาดของเดดไทม์ และความจุแล็ก เป็นตัวกำหนดแบบของการควบคุม

2.6 แบบต่าง ๆ ของการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control Modes)

แบบของการควบคุมแบบป้อนกลับถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) กับสัญญาณขาเข้า (PV) ของตัวควบคุม ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การควบคุม ที่พนักงาน เป็นผู้ปรับตั้งไว้ล่วงหน้า

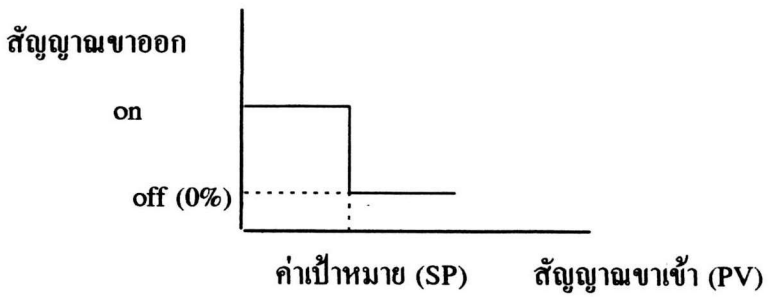
แบบของการควบคุมแบบป้อนกลับมีหลายแบบด้วยกันแต่ที่สำคัญได้แก่ เปิด - ปิด, พี, พี อาย, พี ดี และ พี อาย ดี ตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นแบบเปิดปิด หรือ ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี กรณีตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี กฎเกณฑ์การควบคุมพื้นฐานมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ สัดส่วน, อินทีกรัล และ ดีไรเวทีฟ

2.6.1 ตัวควบคุมแบบ เปิด-ปิด (On- Off Controller)

เป็นแบบการควบคุมที่ง่ายที่สุดของการควบคุมแบบป้อนกลับ เหมาะสำหรับการควบคุมที่ราคาถูกแต่ผลการควบคุมไม่ดีนัก เรามักจะพบการควบคุมแบบนี้ในเครื่องใช้ภายในบ้าน เช่น เตารีด ตู้เย็น ตู้อบ เป็นต้น สัญญาณขาออกของตัวควบคุมมีเพียงสองสถานะคือ เปิด กับ ปิด สัญญาณนี้จะทำให้ส่วนควบคุมสุดท้ายทำงานเต็มที่หรือหยุดทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) กับสัญญาณขาเข้า (PV) ที่ค่าเป้าหมาย (SP) ค่าหนึ่งค่าใด แสดงได้ดังนี้

MV = เปิด เมื่อ PV < SP

MV = ปิด เมื่อ PV > SP



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออก กับ สัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (กรณี ลูพเปิด)

ในการนำตัวควบคุมแบบเปิด-ปิดไปใช้งาน ความเที่ยงตรงจะไม่ดีนักตัวแปรกระบวนการจะแกว่งรอบค่าเป้าหมายโดยมีคาบเวลาของการแกว่งขึ้นอยู่กับค่าเดดไทม์ของกระบวนการ ยิ่งเดดไทม์มีค่ามากคาบเวลาของการแกว่งยิ่งจะมีค่ามาก ส่วนขนาดของการแกว่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเดดไทม์/ความจุแล็ก ยิ่งอัตราส่วน เดดไทม์/ความจุแล็ก มีค่ามากขนาดของการแกว่งยิ่งจะมีค่ามาก

ข้อสังเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือตัวปรับกระบวนการจะทำงานปิดเปิดบ่อยครั้ง โดยมีความถี่ในการปิดเปิดเท่ากับความถี่ (1/คาบเวลา) ของการแกว่ง ในทางปฏิบัติเราจะใช้ตัวควบคุมแบบเปิด-ปิดได้ในกระบวนการที่มีค่าความจุเล็กมากๆ และค่าเดดไทม์ปานกลาง หรือการควบคุมแบบง่ายๆ การรบกวนไม่โตนักเพื่อความผิดพลาด (ขนาดของการแกว่ง) จะไม่มากเกินไป และตัวปรับกระบวนการจะได้ทำงานไม่บ่อยครั้งเกินไปด้วย (ลดความสึกหรอ)

ในบางกระบวนการที่ความจุเล็กมีขนาดโต แต่เดดไทม์มีขนาดเล็กมาก เราอาจจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด แบบ Differential Gap Control ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมกับสัญญาณวัด ตัวอย่างการควบคุม และผลการควบคุมดังรูป 2.15

2.6.2 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

ข้อเสียของการควบคุมแบบตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด คือมีการแกว่งของค่าตัวแปรกระบวนการรอบค่าเป้าหมาย เนื่องจากสัญญาณควบคุมมีแค่สองค่า (เปิด หรือ ปิด) ขณะที่สัญญาณวัดมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย สัญญาณควบคุมจะมีค่ามากหรือน้อยเกินไปไม่สมดุลย์กับค่าความผิดพลาด เพื่อจะกำจัดการแกว่งเราจึงควรจะกำหนดให้สัญญาณควบคุมมีขนาดเป็นสัดส่วนเหมาะสมกับขนาดของความผิดพลาด ขณะที่สัญญาณวัดมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย การควบคุมที่ใช้หลักการนี้เราเรียกว่า การควบคุมแบบสัดส่วน เราจะพบการควบคุมแบบสัดส่วนในงานควบคุมระดับน้ำในถังเก็บ การควบคุมแรงดันของก๊าซในถังฯลฯ ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) สัญญาณขาเข้า (PV) ของการควบคุมแบบสัดส่วนที่ค่าเป้าหมาย (SP) ใด ๆ แสดงได้ดังนี้

$$MV = \frac{100}{PB}(SP - PV) + b \qquad (2.8)$$

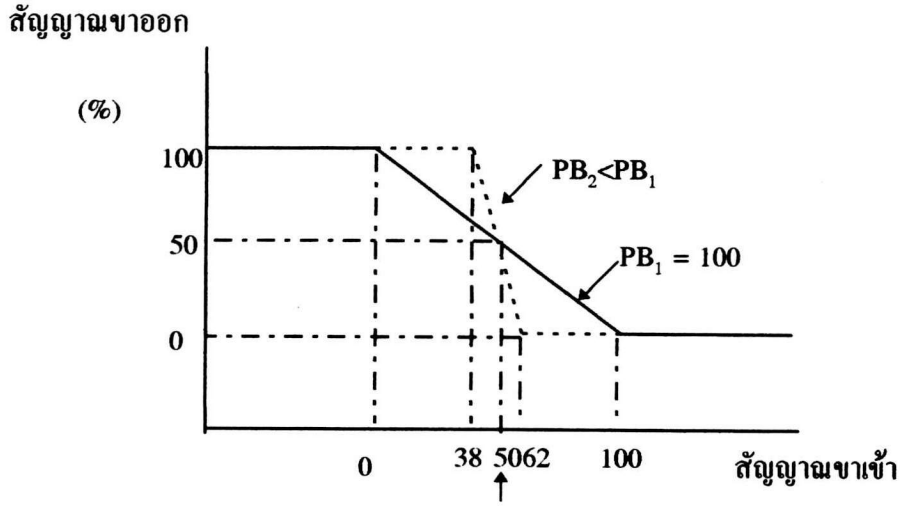
MV = สัญญาณขาออก

SP = ค่าเป้าหมาย

PV = สัญญาณขาเข้า

b = ค่าไบแอส (Bias) เป็นค่าสัญญาณควบคุมขณะที่ไม่มีความผิดพลาด (SP=PV)

PB = แบนด์สัดส่วน มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ (%)



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออก กับ สัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (กรณี ลูพเปิด)

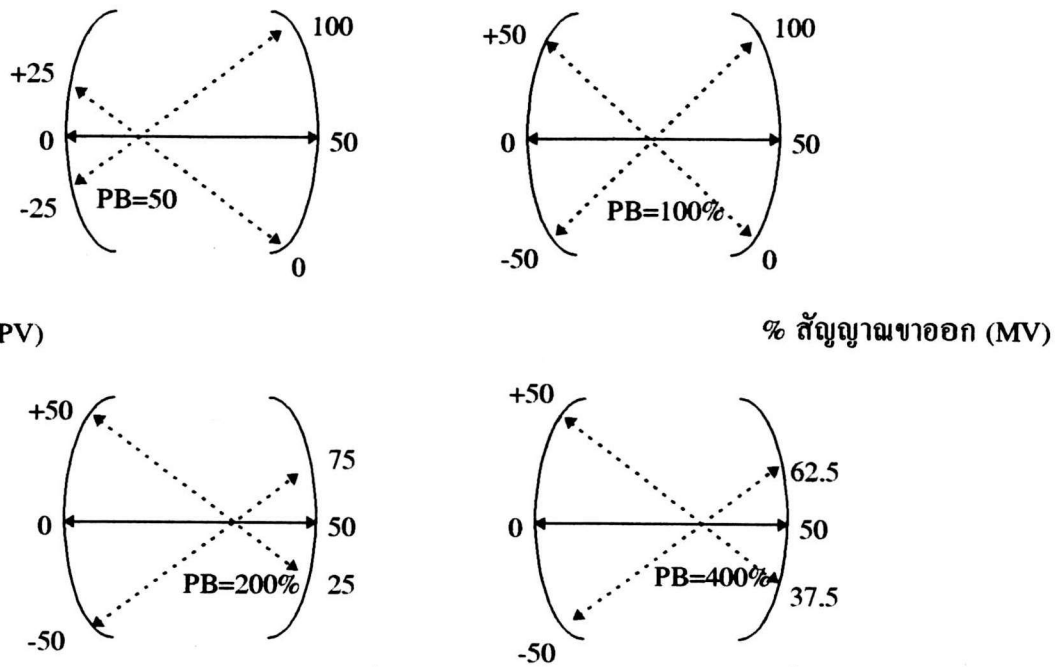
อัตราการตอบสนองต่อความผิดพลาดของการควบคุมแบบสัดส่วน ถูกกำหนดด้วยค่าแบนด์สัดส่วน เราให้คำจำกัดความของแบนด์สัดส่วน ว่าเป็นเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้า (กรณีค่าเป้าหมายคงที่) ที่ทำให้สัญญาณขาออกเปลี่ยนแปลงไป 100 % บางครั้งเราอาจจะพบคำว่าเกนสัดส่วน (K) แทนคำว่าแบนด์สัดส่วนโดยสมการที่ (2.8) จะกลายเป็น

$$MV = K(SP - PV) + b \qquad (2.9)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างเกนสัดส่วน กับ แบนด์สัดส่วนแสดงได้ด้วยสมการ

$$K = \frac{100}{PB} \qquad (2.10)$$

ส่วนใหญ่ความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกขาเข้าของตัวควบคุมแบบสัดส่วนมักแสดงในรูปของสมการที่ (2.8) แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่า PB กรณีที่ค่าเป้าหมายและค่าไบแอสมีค่า 50 %



รูปที่ 2.17 ผลของการปรับค่า PB กรณีใช้การควบคุมแบบสัดส่วน

โดยส่วนมากค่าไบแอส (b) ในสมการ (2.8) และ (2.9) มักจะถูกปรับตั้งที่โรงงานให้มีค่าคงที่ 50 % แต่ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี บางตัวอาจจะมีปุ่มให้ปรับค่าไบแอสได้ในการควบคุมแบบสัดส่วน โดยทั่วไปสัญญาณวัดของตัวแปรกระบวนการ จะมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายที่สภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น (ในรูป 2.17 คือ ขณะที่อัตราไหลของน้ำขาออก 50 %) ถ้าสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปจากค่านี้ (เกิดDisturbance) สัญญาณวัดจะมีค่าต่างไปจากค่าเป้าหมายที่สถานะคงตัวใหม่ ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณวัด กับค่าเป้าหมายที่

สถานะคงตัวเราเรียกว่าออฟเซ็ท ขนาดของออฟเซ็ทจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของการรบกวน และค่า PB ยิ่ง PB มีค่ามาก ออฟเซ็ทยิ่งมีค่ามาก ในทางกลับกันถ้า PB มีค่าน้อยลง ออฟเซ็ทจะมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ดีถ้าค่า PB มีค่าน้อยไปเช่น PB = 0 สัญญาณวัดจะเกิดการแกว่งเนื่องจาก กรณีนี้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะทำงานเหมือนเป็นตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด ซึ่งอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ข้อดีของตัวควบคุมแบบสัดส่วนเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด คือ ตัวแปรกระบวนการจะมีเสถียรภาพดีกว่า (ไม่แกว่ง) ถ้าเราปรับค่า PB ได้เหมาะสม แต่มีข้อเสียคือเกิดออฟเซ็ท การควบคุมแบบนี้จะเหมาะกับกระบวนการที่มีการรบกวนมีขนาดไม่โตนัก เดดไทม์มีค่าเล็ก และความจุแล็กมีขนาดปานกลาง

การกำจัดออฟเซ็ทอาจกระทำได้โดย

ก. ปรับปุ่ม SP ของตัวควบคุมจนสัญญาณวัดมีค่าเท่ากับค่าที่เราต้องการ (ค่าเป้าหมายของตัวควบคุมต่างจากค่าเป้าหมายที่เราต้องการ)

ข. ปรับเปลี่ยนค่าไบแอสเราเรียกการกระทำเช่นนี้ว่าเป็นการรีเซ็ท

- รีเซ็ทแบบแมนวล เป็นการปรับเปลี่ยนค่าไบแอสด้วยมือ (ถ้าตัวควบคุมมีปุ่มปรับไบแอส)

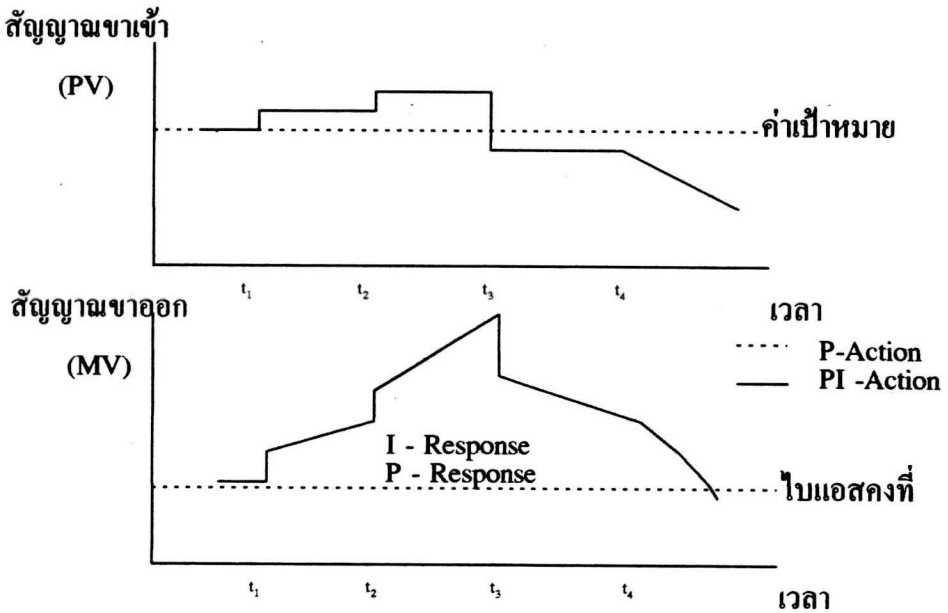
- รีเซ็ทแบบอัตโนมัติ เป็นการเปลี่ยนค่าไบแอสแบบอัตโนมัติโดยตัวควบคุมกรณีแบบนี้การควบคุมจะเป็นแบบสัดส่วนอินทีกรัลซึ่งเราจะกล่าวในส่วนถัดไป

2.6.3 การควบคุมแบบสัดส่วน อินทีกรัล (PI - Control)

ในทางอุตสาหกรรมเรามักจะเรียกว่า การควบคุมแบบสัดส่วนรีเซ็ท ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การควบคุมแบบสัดส่วนจะมีออฟเซ็ท ถ้าเกิดมีสิ่งรบกวนกระบวนการ เพื่อกำจัดค่าออฟเซ็ท โดยพนักงานไม่จำเป็นต้องคอยปรับตั้งตัวควบคุมบ่อยๆ เราจำเป็นต้องทำให้ตัวควบคุมสามารถปรับค่าไบแอสโดยอัตโนมัติ ตัวควบคุมดังกล่าวได้แก่ตัวควบคุมแบบ พี อาย ซึ่งมี การกระทำการแบบอินทีกรัล เพิ่มเติมจากเดิม ระบบควบคุมส่วนมากมักจะเป็นการควบคุมแบบ พี อาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการควบคุมอัตราการไหล และการควบคุมแรงดันของของเหลว ฯลฯ ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบ พี อาย แสดงได้ดังนี้

$$MV = \frac{100}{PB} * [(SP - PV) + \frac{1}{\tau_I} \int (SP - PV) * dt] + b \qquad (2.11)$$

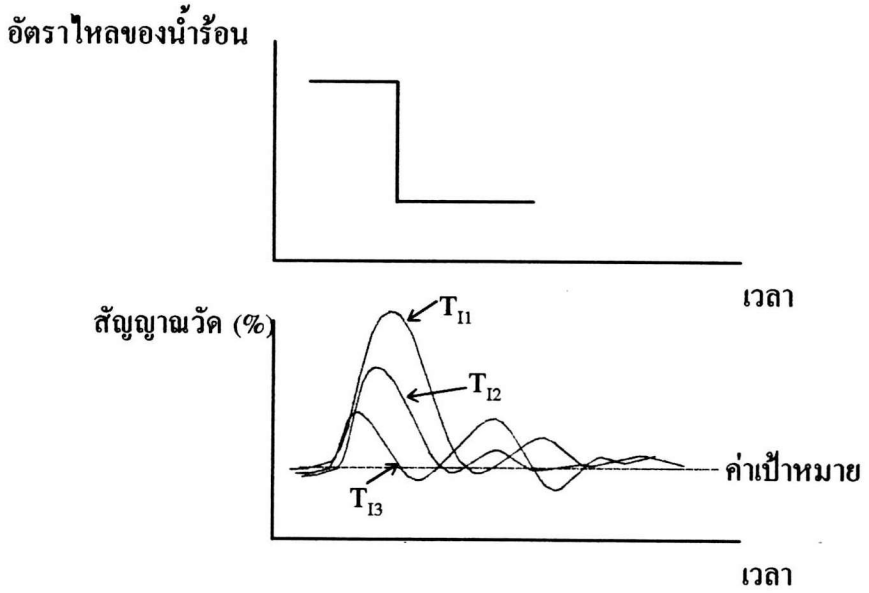
จากสมการ (2.11) ส่วนที่เป็น การกระทำการแบบอินทีกรัล คือ $\frac{1}{\tau_I} * (SP - PV)\, dt$



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบ พี อายในขณะลูพเปิด

ขนาดของการกระทำการแบบอินทีกรัล ขณะใดขณะหนึ่งจะไม่สัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดขณะนั้น แต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสม $[\int(SP - PV) * dt]$ ผลของการกระทำการแบบอินทีกรัล จะเหมือนการปรับค่าไบแอสจนกระทั่งค่าความผิดพลาดหมดไป

อัตราส่วนการตอบสนองของการกระทำการแบบอินทีกรัล ขึ้นอยู่กับการปรับค่า τ_I ยิ่ง τ_I มีค่าน้อยลง การตอบสนองยิ่งจะมีค่ามาก

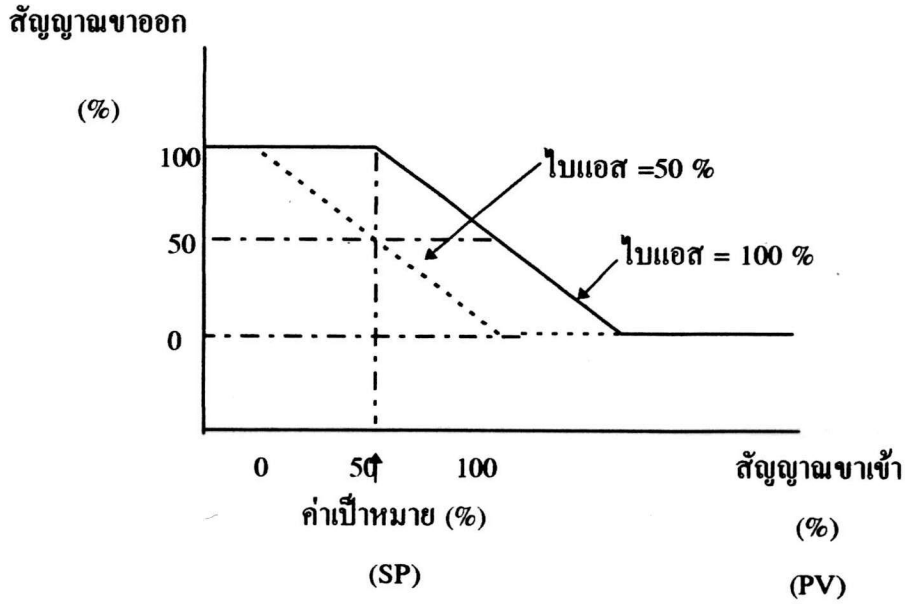


รูปที่ 2.19 แสดงผลของการควบคุมที่ค่า τ_I ต่างๆ กรณี PB มีค่าคงที่

ที่ (τ_{I1}, τ_{I2}, τ_{I2})

ตัวอย่างการควบคุมแบบ พี อาย แสดงได้ด้วยรูป 2.19 ผลของการควบคุมแสดงที่ค่า τ_I ต่าง ๆ (กรณี PB มีค่าคงที่) แสดงได้ด้วยรูป 2.19 เราจะพบว่าการกระทำการแบบอินทีกรัล สามารถกำจัด ออฟเซ็ท ให้หมดไป โดยมีความไวในการกำจัดค่าออฟเซ็ท ขึ้นอยู่กับ ค่า τ_I ยิ่ง τ_I มีค่าน้อย การกำจัดออฟเซ็ท ยิ่งกระทำได้รวดเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าค่า τ_I น้อยเกินไปตัวแปรกระบวน

การจะเกิดการแกว่ง ค่า τ_I ที่เหมาะสมควรจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า τ_{I2} ข้อดีของการเพิ่มการกระทำการแบบอินทีกรัล เข้าไปในระบบควบคุมคือ ออฟเซ็ทถูกกำจัดไป แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่ม การกระทำการแบบอินทีกรัลจะเสมือนเป็นการเพิ่มความจุแล็กเข้าไปในระบบควบคุม ตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ช้าลง ระบบการควบคุมแบบ พี อาย จึงเหมาะสมกับกระบวนการที่ค่อนข้างไวอยู่แล้วคือ ทั้งเดดไทม์ และความจุแล็กมีขนาดเล็ก ข้อควรระวังในการเพิ่มการกระทำการแบบอินทีกรัลเข้าไปในระบบควบคุมคือ ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า อินทีกรัลวายด์อัพ หรือ รีเซ็ทวายด์อัพ คำอธิบายคร่าวๆ ของปรากฏการณ์นี้ให้ย้อนไปดูรูป 2.16 สมมติว่า PB มีค่าคงที่ PB = 100 %ถ้าเราเพิ่มค่าไบแอสจากเดิม 50 %ไปเป็น 100 % เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป ดังรูป 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าเมื่อไบแอสเปลี่ยนไป

ในระหว่างปฏิบัติงาน สมมติว่าที่ค่าไบแอสเท่ากับ 50 % เราปรับค่า PB = 100 % ทำให้สัญญาณควบคุมเป็นอัตราส่วนเหมาะสมกับค่าความผิดพลาด ขณะที่สัญญาณวัดที่ค่าเข้าใกล้ค่าเป้า

หมาย การที่เราเพิ่มการกระทำการแบบอินทีกรัลเข้าไปทำให้ค่าไบแอสเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดและช่วงเวลาของค่าความผิดพลาด ถ้ามีเหตุการณ์บางอย่างที่ทำให้ค่าไบแอสเพิ่มขึ้นไป จนกลายเป็น 100% สัญญาณควบคุมจะมีค่าคงที่ที่ 100 % เสมอ ตราบใดที่สัญญาณวัดมีค่าน้อยกว่าค่าเป้าหมาย ขณะที่สัญญาณวัดมีค่าเพิ่มเข้าใกล้ค่าเป้าหมายสัญญาณควบคุมจะมีขนาดโตเกินไปไม่เหมาะสมกับค่าความผิดพลาด เป็นผลทำให้สัญญาณวัดเพิ่มอย่างรวดเร็วเกิดโอเวอร์ชูต ปรากฏการณ์ อินทีกรัล วายด์อัพ นี้เราอาจจะพบระบบควบคุมที่มีการกระทำการแบบอินทีกรัล ขณะเริ่มเดินระบบ (Start - up) ในการควบคุมแบบคาสเคด หรือในการควบคุมแบบโอเวอร์ไรด์ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี บางเครื่อง (โดยเฉพาะตัวควบคุมแบบดิจิตัล) จะมีแบทว์สวิทช์ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิด อินทีกรัล วายด์อัพ

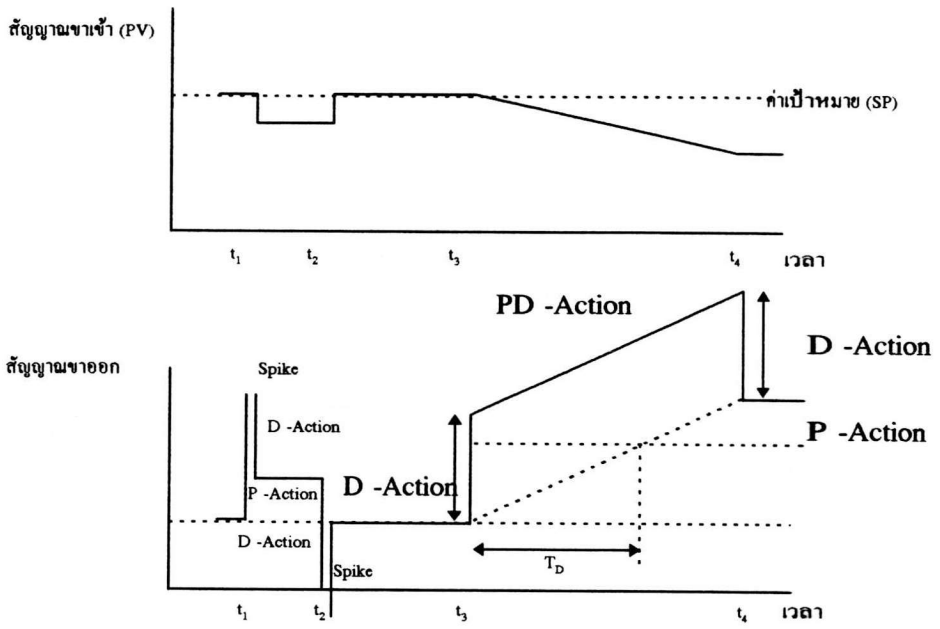
2.6.4 การควบคุมแบบสัดส่วน อินทีกรัล ดีไรเวทีฟ (PID Control)

ในทางอุตสาหกรรมเรามักจะเรียกว่า การควบคุมแบบสัดส่วน รีเซ็ท อัตราเร็ว ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การกระทำการแบบอินทีกรัลในการควบคุมแบบ พี อาย จะทำให้ตัวควบคุมตอบสนองต่อความผิดพลาดช้าลง กรณีที่กระบวนการช้าอยู่แล้วเราอาจจำเป็นต้องเพิ่มการกระทำการแบบดีไรเวทีฟ เพื่อลดความช้าของระบบควบคุม การควบคุมแบบนี้เราเรียกว่า การควบคุมแบบ พี อาย ดี เราจะพบการควบคุมแบบ พี อาย ดี ในงานควบคุมอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) กับสัญญาณขาเข้า (PV) ของตัวควบคุมแบบ พี อาย ดีที่ค่าเป้าหมาย (SP) ใดๆ แสดงได้ดังนี้

$$MV = \frac{100}{PB}\left[(SP - PV) + \frac{1}{\tau_I} * \int (SP - PV)dt + \tau_D * \frac{d}{dt}(SP - PV)\right] + b \quad (2.12)$$

τ_D = ดีไรเวทีฟไทม์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ MV กับ PV ในสมการ (2.12) จะยุ่งยากซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการอธิบายการกระทำการแบบอินทีกรัล รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ของ MV กับ PV ของตัวควบคุมแบบแบบอินทีกรัลกรณีเปิดลูพ ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจ การกระทำการแบบดีไรเวทีฟ



รูปที่ 2.21 แสดงผลของการกระทำการแบบดีไรเวทีฟในตัวควบคุมแบบ พี ดี ขณะเปิดลูพ

ผลตอบสนองของการกระทำการแบบอินทีกรัล จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (SP - PV) กรณีที่ค่าเป้าหมายมีค่าคงที่ ตราบใดที่สัญญาณขาเข้าไม่เปลี่ยนแปลงการกระทำการแบบอินทีกรัลจะไม่มีผล ต่อเมื่อสัญญาณขาเข้าเกิดเปลี่ยนแปลง การกระทำการแบบอินทีกรัลจะเพิ่มหรือลดสัญญาณขาออกตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้าจากรูป 2.21 ขณะเวลา $t_3 < t < t_4$ สัญญาณขาเข้าเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราคงที่ การกระทำการแบบอินทีกรัลจะทำงานคล้ายกับเป็นการทำให้ผลตอบสนองของการกระทำการแบบสัดส่วน เร็วกว่าเดิม

เวลา τ_D นาที บางท่านอาจจะกล่าวว่าการกระทำการแบบอินทีกรัล จะปรับสัญญาณขาออกไปต้านทานความผิดพลาดล่วงหน้า ก่อนที่ขนาดของความผิดพลาดจะมีค่ามาก คำกล่าวนี้แม้จะไม่ถูกต้องนักแต่ก็อนุโลมจำเป็นหลักการได้ การเพิ่มการกระทำการแบบอินทีกรัลเข้าไปในการควบคุมแบบ พี อาย จะทำให้ผลตอบสนองของระบบต่อสิ่งรบกวนไวขึ้น สัญญาณวัดเปลี่ยนแปลงสู่ค่าเป้าหมายไวขึ้น เราจะพบว่ายิ่ง τ_D มีค่ามากสัญญาณวัดยิ่งเปลี่ยนแปลงกลับสู่ค่าเป้าหมายไวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเราปรับตั้งค่า τ_D มากเกินไปสัญญาณวัดอาจเกิดการแกว่งได้ (กรณี $\tau_D = \tau_{D_3}$) ปกติเรามักปรับค่า τ_D ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่า τ_{D_2} กล่าวโดยสรุป ข้อดีของการควบคุมแบบ พี อาย ดี คือ ระบบควบคุมจะตอบสนองต่อสิ่งรบกวนไวขึ้น ทำให้เสถียรภาพในการควบคุมดีขึ้นกว่าการควบคุมแบบ พี อาย สำหรับกระบวนการที่ตอบสนองช้า การควบคุมแบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่ความจุเล็กโตๆ และ เดดไทม์ขนาดไม่โตนัก ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิ ในระบบควบคุมที่สัญญาณวัดมีสัญญาณรบกวน เราไม่ควรจะใช้การกระทำการแบบอินทีกรัล แม้ว่าสัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่มักจะมีค่าสูง การกระทำการแบบอินทีกรัลซึ่งมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลง อาจจะทำให้สัญญาณขาออกผิดพลาดไปอย่างมากมาย เพื่อจะแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน ในทางปฏิบัติจึงมักจะเพิ่มการกรองความถี่ ด้วยค่าคงที่เวลา = $\frac{\tau_b}{N}$ (N มีค่าเท่ากับ 3 - 10) ในการกระทำการแบบอินทีกรัล

2.6.5 การควบคุมแบบสัดส่วน ดีไรเวทีฟ (PD - Control)

ในทางอุตสาหกรรมเรามักจะเรียกว่า การควบคุมแบบสัดส่วน อัตราเร็ว ลักษณะความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบ พี ดี ได้แสดงแล้วในรูป 2.21 ซึ่งมีสมการดังนี้

I20500003

$$MV = \frac{100}{PB}\left[(SP - PV) + \tau_D * \frac{d}{dt}(SP - PV)\right] + b \qquad (2.13)$$

การควบคุมแบบ พี ดี จะใช้ในการควบคุมกระบวนการจำพวกเดียวกับการควบคุมแบบสัดส่วน โดยการควบคุมแบบ พี ดี จะให้ค่าออฟเซ็ทน้อยกว่าการควบคุมแบบสัดส่วน

2.7 ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี และส่วนประกอบในการใช้งาน

ตัวควบคุมไม่ว่าจะเป็นแบบใดชนิดใดจะมีหน้าที่หลักคือการปรับสัญญาณขาออกให้สัมพันธ์กับสัญญาณขาเข้าและค่าเป้าหมายตามกฎเกณฑ์การควบคุมที่มนุษย์เป็นผู้กำหนดไว้ ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี เป็นตัวควบคุมที่เราสามารถกำหนดกฎเกณฑ์การควบคุมใ ห้เป็นแบบ พี, พี อาย, พี อาย ดี หรือ พี ดี ได้โดยการปรับตั้งค่า PB τ_I และ τ_D

2.7.1 ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ชนิดต่าง ๆ

เราอาจจะแบ่งตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ได้เป็น 3 ชนิด คือ

- ตัวควบคุมแบบนูแมติก พี อาย ดี
- ตัวควบคุมแบบอะนาล็อก พี อาย ดี
- ตัวควบคุมแบบดิจิตัล พี อาย ดี

สัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบนูแมติก พี อาย ดี จะเป็นแรงดันลม (หรือ3 - 15 Psi) ส่วนตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ชนิดอื่น สัญญาณจะเป็นกระแสไฟตรง 4 - 20 mA ตัวควบคุมแบบนูแมติก พี อาย ดี เป็นตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ที่ถูกนำมาใช้ในยุคเริ่มแรกต่อมาราวปี คศ. 1950 ได้มีการนำเอาตัวควบคุมแบบอะนาล็อก พี อาย ดี ซึ่งประกอบด้วยหลอดสูญญากาศและวงจรขยายแบบแม่เหล็ก (Magnetic Amplifier)มาใช้ในงานควบคุมในยุคต่อมายุคอิเล็คทรอนิคส์

พนักงานเป็นผู้ปรับตั้งสัญญาณค่าเป้าหมาย สัญญาณค่าเป้าหมายจะเป็นแบบท้องถิ่น ถ้าการควบคุมเป็นแบบซับซ้อน สัญญาณค่าเป้าหมายจะเป็นแบบรีโมท ซึ่งได้รับมาจากอุปกรณ์อื่นตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี จะมีสวิทซ์ Remote/Local เพื่อเลือกแบบของสัญญาณค่าเป้าหมาย

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรกระบวนการจะตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมได้สองลักษณะ คือ ตัวแปรกระบวนการมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นขณะสัญญาณควบคุมมีขนาดเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี จึงต้องมีสวิทซ์ Direct/Reverse (หรือ Increase/Decrease) ซึ่งมีตำแหน่งให้เราเลือกได้สองตำแหน่งคือ Direct กับ Reverse ที่ตำแหน่ง Direct สัญญาณขาออกของตัวควบคุมจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณขาเข้าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามที่ตำแหน่ง Reverse สัญญาณขาออกจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณขาเข้าเพิ่มขึ้น เพื่อให้ระบบควบคุมป้อนกลับทำงานอย่างถูกต้องเราจำเป็นต้องเลือกตำแหน่งของสวิทซ์ดังกล่าวให้เหมาะสมกับลักษณะการตอบสนองของตัวแปรกระบวนการต่อสัญญาณควบคุม กล่าวคือการป้อนกลับของระบบควบคุมต้องเป็นแบบป้อนกลับ เมื่อเราปรับตำแหน่งของสวิทซ์ Local/Remote และ Direct/Reverse ได้ถูกต้องแล้ว สัญญาณขาออกของตัวควบคุมจะเหมาะสมกับสัญญาณขาเข้าและสัญญาณค่าเป้าหมายหรือไม่ขึ้นอยู่กับการปรับตั้งค่า PB, τ_I และ τ_D ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี จะมีปุ่มปรับให้พนักงานปรับตั้งค่าทั้งสามดังกล่าว ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี บางตัว (ตัวควบคุมแบบ ดิจิตัล) อาจจะปรับตั้งค่า PB, τ_I และ τ_D ได้โดยการป้อนสัญญาณจากภายนอก

ขณะที่ระบบควบคุมทำงานสัญญาณขาออกของตัวควบคุมจะมีค่าขึ้นอยู่กับสัญญาณขาเข้าและสัญญาณค่าเป้าหมาย การทำงานลักษณะนี้เราเรียกว่า การควบคุมอัตโนมัติแบบลูพปิดแต่บางขณะเช่นขณะเริ่มเดินระบบ หรือขณะศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการ พนักงานอาจต้องปรับเปลี่ยนค่าสัญญาณขาออกโดยไม่สัมพันธ์กับสัญญาณขาเข้าและค่าเป้าหมาย ลักษณะการทำงานแบบ

นี้เราเรียกว่า การควบคุมด้วยมือแบบลูพเปิด ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี จำเป็นต้องมีส่วนประกอบพื้นฐานอีกสองส่วน คือ สวิทช์ Auto/Man และปุ่มปรับขาออกแบบแมนวล

อนึ่งในการเปลี่ยนตำแหน่งของสวิทช์ Auto/Man สัญญาณขาออกอาจจะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่า เกิดการบัมพ์ การป้องกันการบัมพ์ อาจจะทำได้โดยการทำให้สัญญาณขาออกที่ตำแหน่ง Auto และ Man มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด (เราเรียกว่าการดุลภาค) ก่อนที่เราจะเปลี่ยนตำแหน่งสวิทช์ Auto/Man ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี บางตัวสามารถเปลี่ยนตำแหน่งสวิทช์ดังกล่าวได้โดยจะไม่เกิดการบัมพ์ และเราไม่จำเป็นต้องทำให้ดุลภาคเลย บางเครื่องต้องทำให้ดุลภาคก่อน บางเครื่องการบัมพ์ เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ฯลฯ

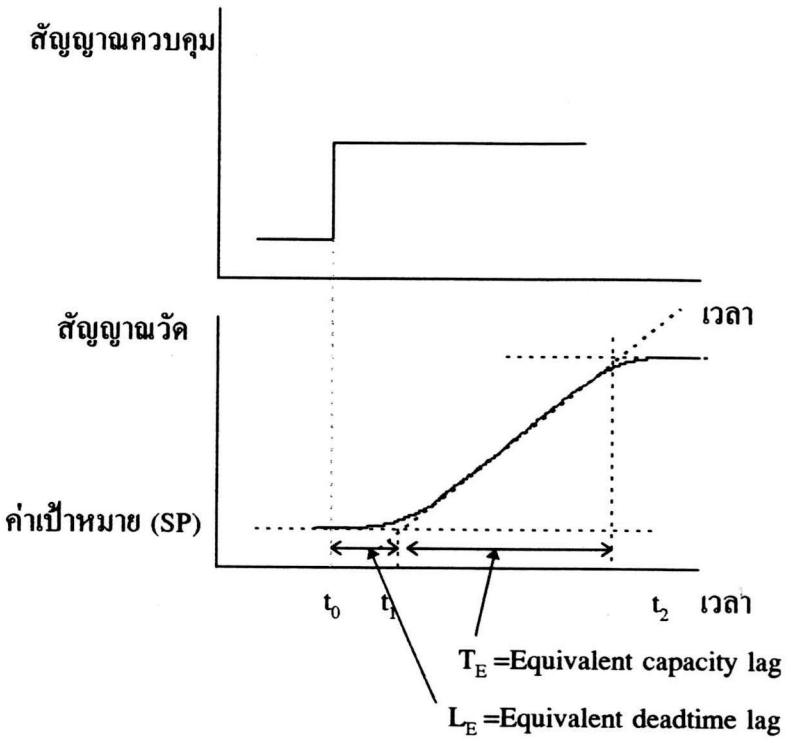
2.8 การนำตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ไปใช้งาน (PID Controller Utilization)

ในการนำเอาการนำตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี ไปควบคุมกระบวนการใดก็ตามเราควรแน่ใจก่อนว่าตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี สามารถควบคุมกระบวนการนั้นได้ จากนั้นเราจะต้องทราบว่าควรจะกำหนดให้ตัวควบคุมแบบ พี อาย ดี เป็นแบบ พี, พี อาย, พี ดี หรือ พี อาย ดี และ PB, τ_I, τ_D ควรจะมีค่าเท่าใดจึงจะเหมาะสมเพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้ดังที่เราต้องการ

2.8.1 การกำหนดแบบการควบคุม (Control Mode Selection)

รูปแบบของการควบคุมที่เหมาะสมพิจารณาจากขนาดของสิ่งรบกวนและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการเมื่อสัญญาณควบคุมเปลี่ยนไปหรือเมื่อเกิดสิ่งรบกวนขึ้น การพิจารณาแบบนี้ยุ่งยากและเสียเวลามาก ในทางปฏิบัติเราอาจจะกำหนดรูปแบบของการควบคุมได้อย่างคร่าวๆ โดยการศึกษาลักษณะสมบัติของกระบวนการดังรูป 2.22 ตัวอย่างการศึกษาลักษณะสมบัติแสดงได้

ดังรูป 2.22 ระบบควบคุมขณะนั้นจะเป็นแบบลูพเปิดโดยการตั้งสวิทซ์ Auto/Man ไปที่ตำแหน่ง Man แล้วปรับสัญญาณขาออกของตัวควบคุมด้วยปุ่มปรับเอาท์พุทแบบแมนวล ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ



รูปที่ 2.22 แสดงวิธีการเบื้องต้นในการหาค่าความจุแล็ก และ เดดไทม์

ขณะเริ่มศึกษาเราต้องปรับปุ่มเอาท์พุทแบบแมนวล จนสัญญาณวัดมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมาย (ปกติเท่ากับ 50 %) หลังจากนั้นจึงเพิ่มสัญญาณควบคุมอย่างทันทีทันใด ขนาดของสัญญาณควบคุมที่เพิ่มขึ้นต้องพอที่จะทำให้สัญญาณวัดเปลี่ยนแปลงแต่ต้องไม่โตเกินไป กรณีที่อุปกรณ์ปรับกระบวนการเป็นวาล์วสัญญาณควบคุมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ตำแหน่งก้านวาล์วเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 2 - 5 % การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณวัดที่เราบันทึกไว้ (เรียกว่า Process Reaction Curve) สามารถนำไปหาค่าเดดไทม์ และความจุแล็ก ได้ปกติ ความจุแล็กมักจะเป็นชนิดมากกว่ากระบวนการอันดับสอง ซึ่งเราอาจจะหาค่า Equivalent Deadtime (L_E) และ Equivalent Capacity Lag (T_E) ได้ดังรูป 2.22

การหาค่า L_E และ T_E แบบนี้จะเป็นการประมาณโดยใช้แบบจำลองชนิดกระบวนการอันดับหนึ่ง เราอาจจะนำค่า L_E และ T_E ไปกำหนดแบบการควบคุมอย่างคร่าว ๆ ได้ตามตาราง 2.1

การที่เราจะกำหนดให้แน่นอนตายตัวว่าแบบการควบคุมควรจะเป็นแบบใด ดูเหมือนจะเป็นสิ่งที่ยากที่สุดในการออกแบบระบบควบคุม ปกติมักจะอาศัยประสบการณ์เป็นเครื่องตัดสินใจ โดยพิจารณาจากการควบคุมของระบบเดิม นอกจากนั้นเรายังจะต้องระวังไม่ออกแบบระบบควบคุมแบบ Over - Instrumentation

ตารางที่ 2.1 การกำหนดแบบการควบคุมที่เหมาะสมอย่างหยาบๆ

เคดไทม์/ ความจุแล็ก	แบบการควบคุมที่เหมาะสม (อย่างคร่าว ๆ)
$L_E/T_E < 0.2$	เปิด ปิด, พี, พี ดี หรือ พี อาย
$0.2 < L_E/T_E < 1.0$	พี อาย หรือ พี อาย ดี
$L_E/T_E > 1.0$	พี อาย ดี แบบทดแทนค่าเดดไทม์
	การควบคุมแบบป้อนหน้า หรือใช้คอมพิวเตอร์

การควบคุมแรงดัน ระดับ การไหล และอุณหภูมิ เป็นการควบคุมที่เราพบบ่อยๆ ในอุตสาหกรรรม จากประสบการณ์เราอาจกำหนดแบบการควบคุมได้ค่อนข้างแน่นอนดังตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 การกำหนดแบบการควบคุมของระดับ อัตราไหล แรงดัน และอุณหภูมิ

ชนิดของกระบวนการ	P	I	D
แรงดันของแกส	PB มีค่า 0-5 %	ไม่จำเป็น	ไม่จำเป็น
ระดับของเหลว	PB มีค่า 5-50 %	อาจจะจำเป็น	ไม่จำเป็น
แรงดันของของเหลวและการไหล	PB มีค่า 2-500 %	จำเป็น	ไม่จำเป็น
อุณหภูมิ	PB มีค่า 10-100 %	จำเป็น	จำเป็น

2.9 ลักษณะและพฤติกรรมของกระบวนการ อันดับหนึ่ง และอันดับสอง ต่อการเปลี่ยนแปลงสายป้อน

การเปลี่ยนแปลงของสายออก (out put) จะมีได้ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสายป้อน (Input) โดยทั่วไป สามารถแบ่งชนิดของการเปลี่ยนแปลงของสายป้อนได้ 2 ลักษณะ

- เปลี่ยนตัวที่ใช้ปรับค่าในกระบวนการควบคุม

- ความไม่สม่ำเสมอของปริมาณ, คุณภาพของสายป้อน กระบวนการต่างๆ สามารถแสดงได้ โดยใช้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$Y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} X(s) \qquad \text{First order Transferfunction} \qquad (2.14)$$

$Y(s)$ = Response

$X(s)$ = Inlet manipulated Variable

K = Gain

τ = Constant Variable

2.9.1 เราสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรปรับ (manipulated Variable) ได้ 6 ชนิดที่สำคัญ ได้ดังนี้

ก. อินพุทแบบสเต็พ เป็นการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงสายป้อนแล้วปริมาณของการเปลี่ยนแปลงของสายป้อน (input) คงที่

แสดงการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$X(s) = \frac{M}{S} \tag{2.15}$$

M = ปริมาณสายป้อนที่เพิ่มขึ้น

ข. อินพุทแบบแรมพ์ คือการเปลี่ยนแปลงสายป้อน โดยวิธีเพิ่ม หรือ ลดขนาดของสายป้อนอย่างช้าๆ โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่

แสดงการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$X(s) = \frac{a}{s^2} \tag{2.16}$$

a = slope

ค. พัลส์รูปสี่เหลี่ยม คือการเปลี่ยนแปลงในขณะที่สายป้อนคงที่ช่วงใดช่วงหนึ่ง และหยุดป้อนสายป้อนทันทีทันใด หรือ ป้อนสารเฉื่อยอื่นๆ ที่ไม่มีผลต่อระบบเข้าไปในระบบ

แสดงการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$X_{RP}(s) = \frac{A\varpi}{s^2 + \varpi^2} \tag{2.17}$$

$$X_{RP}(t) = h \quad \begin{cases} t < o \\ o \le t < t_w \\ t \ge t_w \end{cases}$$

ง. อินพุทแบบซินนูซอยด์ เป็นการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงสลับกันไปคล้ายฟังก์ชันคลื่นเช่น ภายใน 1 วัน (24 ชั่วโมง) อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงขึ้นลงคล้ายฟังก์ชันคลื่น

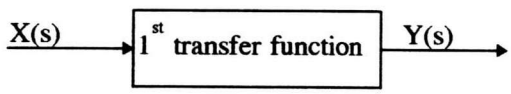
แสดงการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$X_{sin}(s) = \frac{A\varpi}{s^2 + \varpi^2} \tag{2.18}$$

จ. อินพุทแบบอิมพัลส์ เป็นการเปลี่ยนแปลงสายป้อนอย่างรวดเร็วในเวลาสั้น และขนาดของสายป้อนก็กลับมาอยู่ในขนาดเท่าเดิม ทรานส์เฟอร์ฟังกชัน มีค่า = 1

ฉ. อินพุทแบบไม่แน่นอน เป็นการเปลี่ยนแปลงที่สายป้อน มีขนาดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอย่างไม่แน่นอน ไม่มีฟังก์ชันที่แน่นอน

ตัวอย่าง ตัวอย่างการตอบสนองของกระบวนการอันดับหนึ่ง



รูปแบบโดยทั่วไปของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน อันดับหนึ่ง คือ

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)} \tag{2.19}$$

เมื่อสายป้อนเป็นอินพุทแบบสเต็พ จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันใหม่คือ

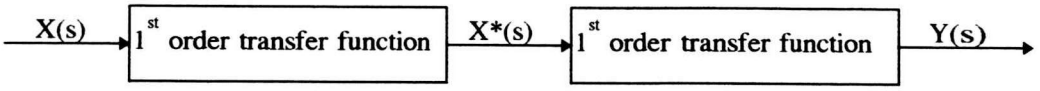
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{KM}{s(\tau s + 1)} \tag{2.20}$$

เมื่อแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของเวลาจะได้

$$Y(s) = KM\left(1 - e^{\frac{1}{\tau}}\right) \tag{2.21}$$

สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ โดยรูปที่ 2.14

ตัวอย่างการตอบสนองของกระบวนการอันดับสอง



รูปแบบโดยทั่วไปของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน อันดับสอง คือ

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_1K_2}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)} = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s+1} \tag{2.22}$$

เมื่อ สายป้อนเป็นอินพุทแบบสเต็พ จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันใหม่คือ

$$Y(s) = \frac{K}{s(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s+1)} \tag{2.23}$$

เราสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ 3 ลักษณะ

$$\text{case a } (\zeta > 1) Y(t) = KM\left(1 - \frac{\tau_1 e^{\frac{1}{\tau_1}} - \tau_2 e^{\frac{1}{\tau_2}}}{\tau_1 - \tau_2}\right) \tag{2.24}$$

$$\text{case b } (\zeta = 1) Y(t) = KM\left(1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) e^{-\frac{1}{\tau}}\right) \tag{2.25}$$

$$\text{case c } (0 \le \zeta < 1) Y(t) = KM\left(1 - e^{-\zeta\frac{1}{\tau}}\left(\cos\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\tau}\right) + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\tau}\right)\right)\right) \tag{2.26}$$

เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าต่าง ๆ จะพบว่า

ก. ถ้า ζ มีค่าน้อยๆ การตอบสนองจะเกิดการแกว่งขึ้นลงและโอเวอร์ชูต

ข. ถ้า ζ มีค่ามากๆ การตอบสนองจะเข้าสู่เซ็ทพอยท์ช้า

ค. ถ้า ζ = 1 การตอบสนองจะเข้าสู่เซ็ทพอยท์เร็วที่สุด และไม่เกิดโอเวอร์ชูต

2.10 วิธีหาแบบจำลองของกระบวนการ โดยการฟิตกราฟหลังจากการทดสอบสเต็พ

การตอบสนองสัญญาณขาออกของกระบวนการหลังจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้าแบบสเต็พ และนำค่าสัญญาณขาออกที่ได้มาเขียนกราฟ ซึ่งเราเรียกวิธีการดังกล่าวว่า วิธีการเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process reaction curve)

2.10.1 แบบจำลองของกระบวนการอันดับหนึ่ง

จากกราฟที่แสดงดังรูป 2.23 เราลากเส้นสัมผัสโค้งและ สามารถคำนวนหาค่าคงที่เวลาได้จากกราฟการตอบสนองแบบสเต็พ ได้ 2 วิธีง่ายๆ

ก. หาค่าของ t ที่การตอบสนองเป็นค่า 63.2 % ของเส้นโค้งของสถานะคงตัว

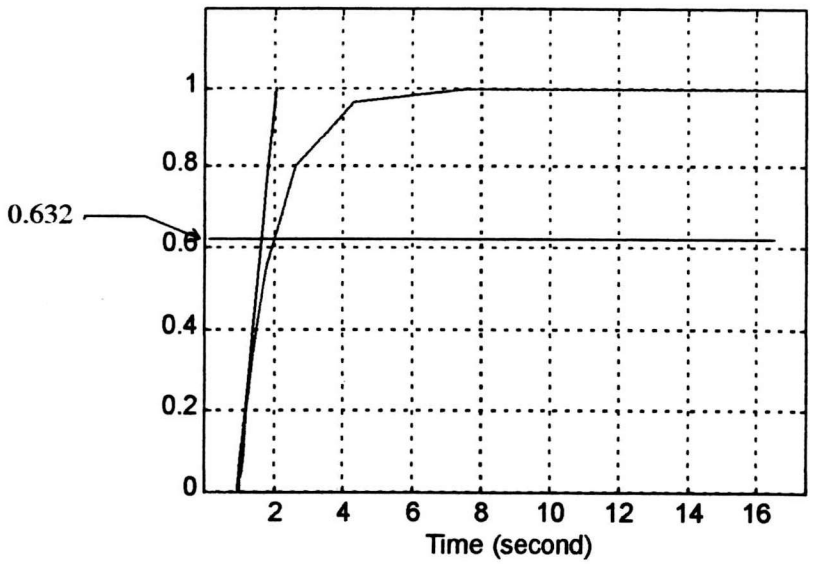
ข. ลากเส้นสัมผัสโค้งจากจุดเริ่มต้นที่มีความชันที่สุด ไปตัดกับเส้นสัมผัสโค้งที่ค่าสถานะคงตัวสุดท้าย เมื่อได้จุดตัดดังกล่าวให้ลากเส้นตรงขนานกับแกน y มาตัดกับเส้นกับแกน x

วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการอันดับหนึ่งนี้ สามารถรวมเทอมของไทม์ดีเลย์เขาไปด้วย เราก็จะได้สมการแบบจำลองของกระบวนการดับหนึ่ง แสดงได้ด้วยทรานส์เฟอฟังก์ชัน

$$\frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau s+1)} \tag{2.27}$$

- ค่าเกนของการะบวนการ K หาได้จากการคำนวนอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงที่ค่าสถานะคงตัวของ yต่อการเปลี่ยนแปลงของ x

- ไทม์ดีเลย์ (θ) คือ ช่วงระหว่างจุดเริ่มต้นทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้าถึงเส้นสัมผัสโค้งของกราฟ



รูปที่ 2.23 แสดงวิธีการหาค่าไทม์ดีเลย์ และ ค่าคงที่เวลาจากกราฟการตอบสนอง

2.10.2 แบบจำลองของกระบวนการอันดับสอง

เราสามารถเขียนแบบจำลองกระบวนการที่รวมเทอมของไทม์ดีเลย์เขาไปด้วย จะได้สมการแบบจำลองกระบวนการอันดับสองซึ่งแสดงได้ด้วยทรานส์เฟอฟังก์ชัน

$$\frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s+1} \qquad (2.28)$$

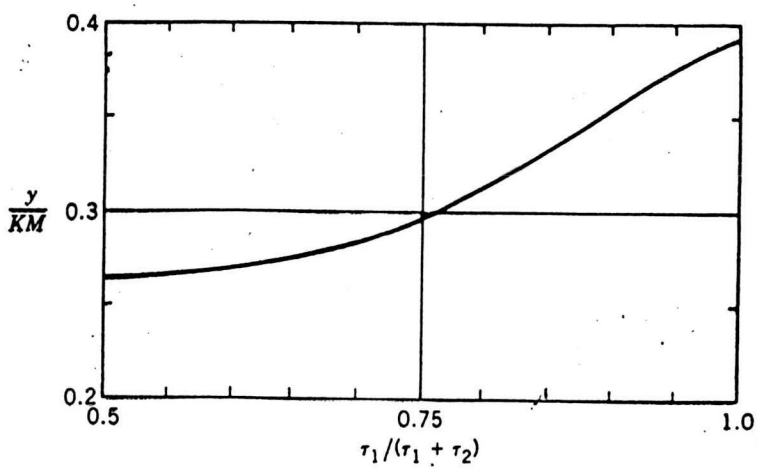
เราสามารถหาค่าตัวแปรต่างๆ จากการทดลองได้ด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

ก. วิธีการของ แฮริออท (Harriott Mothod)

วิธีการของแฮริออท แสดงเศษส่วนของการตอบสนองของกระบวนการอันดับสอง (ปราศจากไทม์ดีเลย์) เทียบกับ $\frac{t}{(\tau_1+\tau_2)}$ สำหรับค่าอัตราส่วนของ $\frac{\tau_2}{\tau_1}$ ซึ่งมีการพบว่าเส้นโค้งตัดกันที่ 73% ของค่าสุดท้ายของสถานะคงตังที่ $\frac{t}{(\tau_1+\tau_2)} = 1.3$ ซึ่งแสดงได้ดังรูป 2.24 ช่วงที่แท้จริงคือ

$0.7275 < y < 0.7326$ ด้วยเหตุนี้การวัดเวลาที่ต้องการของระบบที่ 73 % ของค่าสุดท้าย t_{73} ผลรวมของค่าคงที่ของเวลาทั้งสองค่าสามารถคำนวนได้จาก $\tau_1 + \tau_2 = t_{73} / 1.3$

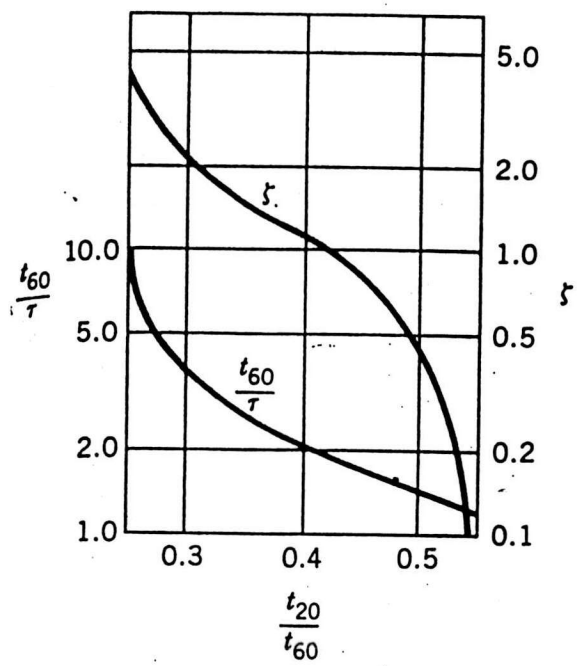
ดังนั้นในการพลอตแฮริออท เศษส่วนของการตอบสนองที่ $\frac{t}{(\tau_1 + \tau_2)} = 0.5$ เทียบกับ $\frac{t}{(\tau_1 + \tau_2)}$ ตั้งแต่เส้นโค้งในรูป 2.24 แสดงการเบี่ยงเบนขนาดใหญ่ในจุดนี้เมื่อ $t = 0.5\ (\tau_1 + \tau_2)$ สามารถกำจัดลงไปจากข้อมูลของการทดลอง และค่า $\frac{t}{(\tau_1 + \tau_2)}$ สามารถอ่านได้จากรูป 2.24 ถ้าเศษส่วนของการสนองตอบน้อยกว่า 0.26 หรือ มากกว่า 0.39 ที่จุดนี้วิธีการนี้จะไม่สามารถใช้ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการต้องการแบบจำลองที่มีอันดับสูงกว่าอันดับสอง หรือเป็นชนิดแดมพ์ขาด วิธีการแฮริออท โดยทั่วไปเหมาะสมกับความแม่นยำน้อย ๆ โดยที่ $\frac{\tau_2}{\tau_1}$ มีค่าเข้าใกล้ 1 และ τ_1และ τ_2 มีความไวชัดเจนเพียงพอที่จะประมาณค่า K (ได้มาจากการหาการตอบสนองที่สถานะคงตัว)



รูปที่ 2.24 วิธีแฮริออท แสดงลักษณะส่วนหนึ่งของการตอบสนองกระบวนการอันดับสองชนิดแดมพ์เกิน ที่ $t/((\tau_1 + \tau_2) = 0.5$

ข. วิธีการของสมิธ (Smith 's Method)

สมิธมีรายงานวิธีการหาแบบจำลอง ในสมการ $G(s)=\frac{Ke^{-\theta S}}{\tau^2 S^2+2\zeta\tau S+1}$ โดยใช้พื้นฐานที่ว่าสองจุดของเศษส่วนการตอบสนองของระบบที่ 20 % และ 60% ของค่าสุดท้ายวิธีของสมิธต้องการเวลา(ไม่รวมไทม์ดีเลย์) ซึ่งแปลงให้เป็นค่ามาตรฐาน ของการตอบสนองในขอบเขต 20 % และ 60% ความสัมพันธ์แสดงดังรูป 2.25 อัตราส่วนของ t_{20}/t_{60} ซึ่งให้ค่า ζ ประมาณค่า τ โดยการ plot t_{60}/τ Vs t_{20}/t_{60} วิธีการนี้ใช้ได้กับกระบวนการที่เป็นแดมขาดและแดมเกิน



รูปที่ 2.25 วิธีของสมิธ แสดงความสัมพันธ์ของ ζ และ τ ที่ t_{20} และ t_{60}

2.11 การจูนตัวควบคุม (Controller Tuning)

ในการจูนค่า พีอายดี ของตัวควบคุมกระบวนการจะแบ่งตามรูปแบบของตัวชดเชยเดดไทม์ คือ จะใช้วิธีของ "ซีเกลอร์-นิโคลส์" (Ziegler-Nichols) ในรูปแบบของวิธีการไซเคิลแบบต่อเนื่อง ซึ่งการควบคุมชนิดนี้มีพื้นฐานมาจากการจูนแบบลองผิดลองถูก ในการจูนตัวควบคุมกระบวนการนี้

จะทำในโปรแกรมซิมูลิงค์ที่ได้จัด บล็อกไดอะแกรม ของกระบวนการไว้แล้วและสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

2.11.1 ขั้นที่ 1 การจูนตัวควบคุมแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error Tuning)

เป็นการจูนตัวควบคุมเพื่อหาค่า K_c ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยได้ดังนี้

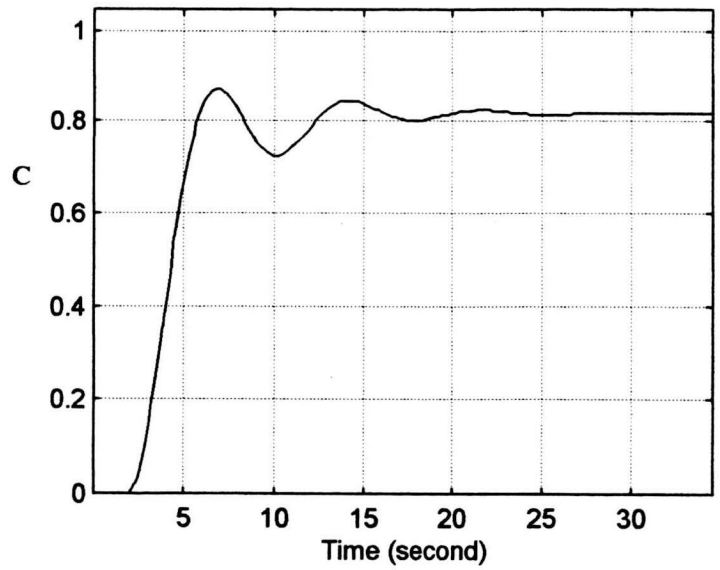
ก. กำจัดค่าอินทีกรัล และดีไรเวทีฟออก โดยการตั้งค่า τ_I ให้มีค่าสูงที่สุด และค่า τ_D ให้มีค่าต่ำที่สุด

ข. สุ่มค่า K_c ขึ้นมาหนึ่งค่า (เริ่มที่ค่า K_c ต่ำๆ ก่อน) จากนั้นก็ปล่อยให้โปรแกรมซิมูลิงค์ทำงานไป แบบอัตโนมัติ

ค. สังเกตดูลักษณะของกราฟของการตอบสนองที่ได้ ถ้าเกิดโอเวอร์ชูต แสดงว่าจะต้องลดค่า K_c ลงและถ้ากราฟการตอบสนองมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าเซ็ทพอยท์ แสดงว่าจะต้องเพิ่มค่า K_c ให้มากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มหรือลดค่า K_c จะทำจนกระทั่งกราฟของการตอบสนองที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟคงที่(Uniform)คือกราฟที่ได้จะมีแอมพลิจูด และเวลา ที่เท่ากันโดยตลอด วิธีการตอบสนองแบบนี้เราจะเรียกว่า วิธีการไซเคิลแบบต่อเนื่อง ค่า K_c ที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่า K_{cu} ซึ่งค่า K_{cu} นี้เราจะนำไปใช้ใน การหาค่าการควบคุมสัดส่วนของค่าพีอายดี โดยวิธีของ "ซีเกลอร์-นิโคลส์"

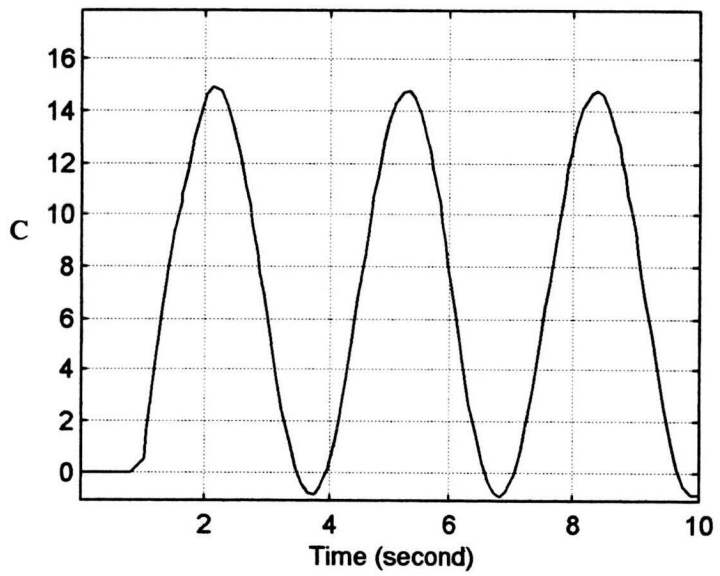
นิยามของ K_{cu} ค่า K_c หรือเรียกอีกชื่อว่า เกนสุดยอด "Ultimate gain" คือ ค่า K_c ที่มากที่สุดของตัว ควบคุมกระบวนการที่ทำให้กระบวนการแบบวงจรปิดมีเสถียรภาพที่ดีเมื่อใช้ค่าสัดส่วนในการควบคุมกระบวนการเพียงอย่างเดียว

จากรูปจะแสดงถึงลักษณะของการตอบสนองที่ค่า K_{cu} ต่างๆ กัน



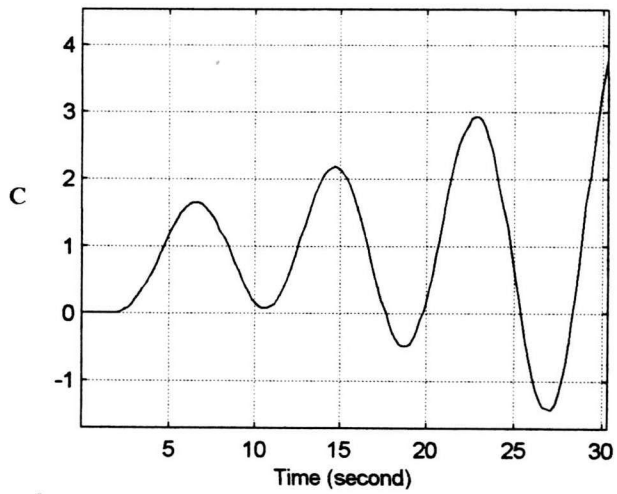
รูปที่ 2.26 แสดงการตอบสนองที่ $K_C > K_{CU}$

$K_c < K_{cu}$ ในกรณีที่การตอบสนองเกิดแบบแดมพ์เกิน และค่า K_c น้อยกว่าค่า K_{cu} มากๆ การตอบสนองจะเกิดการแกว่ง แก้ไขโดยเพิ่มค่า K_c จนได้การตอบสนองเป็นแบบไซเคิลแบบต่อเนื่อง



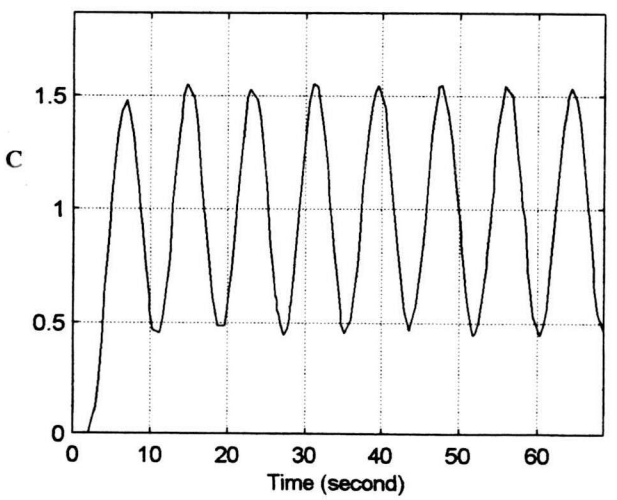
รูปที่ 2.27 แสดงการตอบสนองที่ $K_C = K_{CU}$

$K_C = K_{cu}$ ในกรณีนี้การตอบสนองจะมีค่าแอมพลิจูดและคาบเวลาที่คงที่ ในลักษณะนี้เราเรียกว่าการไซเคิลแบบต่อเนื่อง ค่า K_C ที่ได้จะมีค่าสูงสุด



รูปที่ 2.28 แสดงการตอบสนองที่ $K_C > K_{CU}$ (without saturation)

$K_C > K_{cu}$ (w/o saturation) ในกรณีนี้กระบวนการจะไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจาก ไม่ได้คำนึงถึงค่า saturation การตอบสนองที่ได้จะเป็นแคมพ์ขาด



รูปที่ 2.29 แสดงการตอบสนองที่ $K_C > K_{CU}$ (with saturation)

$K_c > K_{cu}$ (with saturation) ในกรณีนี้กระบวนการจะมีเสถียรภาพดีกว่าแต่ค่า K_{cu} ที่ได้จะมีค่า มากจนเกินไป จนมีผลทำให้การควบคุมกระบวนการทำได้ไม่ดีนัก

จากการตอบสนองของ $K_c = K_{cu}$ เวลาที่ได้จากการตอบสนอง 1 ช่วงคลื่นก็คือ ค่า P_u ซึ่งทั้งค่า K_{cu} และ P_u ที่ได้นี้จะนำไปหาค่าพีอายดี โดยใช้วิธีการของ"ซีเกลอร์-นิโคลส์" ต่อไป

2.11.2 ขั้นที่ 2 วิธีการควบคุมแบบการไซเคิลแบบต่อเนื่อง (Continuous Cycling Method)

วิธีการควบคุมแบบการไซเคิลแบบต่อเนื่องนี้ซีเกลอร์และนิโคลส์ ได้เป็นผู้นำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ.1942 โดยการนำค่า K_{cu} ที่ได้จากการทำลองผิดลองถูก มาหาค่าพีอายดี ได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.3 แสดงการตั้งค่าของตัวควบคุมแบบไซเคิลแบบต่อเนื่องของซีเกลอร์และนิโคลส์

Controller	K_c	τ_I	τ_D
P	$0.5\ K_{cu}$	-	-
PI	$0.45\ K_{cu}$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6\ K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$

ค่าพีอายดี ที่ได้ก็จะนำไปแทนค่าลงในตัวควบคุมกระบวนการต่อไป