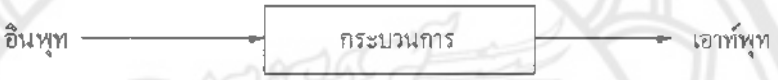
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1ระบบควบคุม

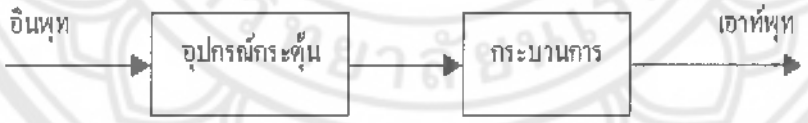
ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามที่ เราต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาท์พุทหรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (process) ที่เราต้องการที่จะควบคุม สามารถแทนด้วย บล็อก (block) ดังแสดงในรูป ส่วนอินพุทและเอาท์พุทของระบบมักจะแทนด้วยสัญญาณ โดยสัญญาณอินพุทจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาท์พุท



รูปที่ 2.1 แสดงการควบคุมระบบ

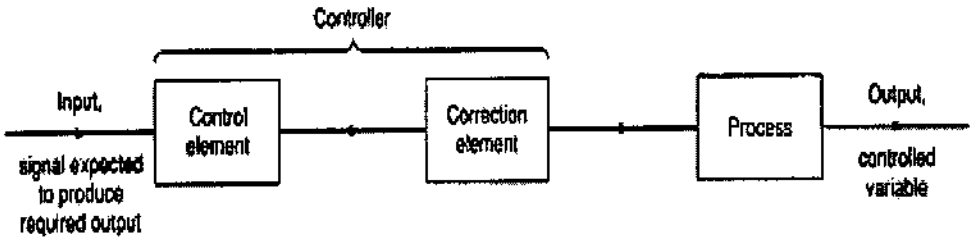
ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ

2.1.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System) เป็นการใช้อุปกรณ์ (Controller) หรือ อุปกรณ์ส่งกำลัง (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองตามที่เราต้องการ โดยไม่ต้องนำผลการตอบสนองของระบบเข้ามาสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูป



รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบเปิด



รูปที่2.3 แสดงส่วนประกอบย่อยของระบบ

ส่วนประกอบย่อยจะประกอบด้วย

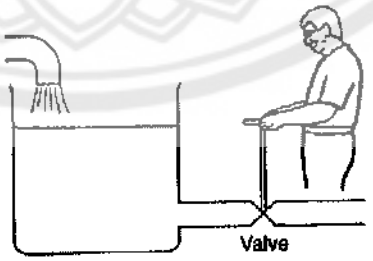
Control element ส่วนนี้จะพิจารณาว่าควรจะให้ระบบทำงานต่อไปอย่างไรเมื่อได้รับค่าส่งหรืออินพุท ของระบบควบคุม

Correction element ส่วนนี้จะตอบสนองต่ออินพุทที่ได้รับจากส่วนของ control element และนำไปปรับเปลี่ยนตัวแปรที่จะถูกควบคุมเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการ

Process หรืออาจเรียกว่า Plant ระบบจะเป็นส่วนปฏิบัติการเพื่อให้ได้ค่าเอาท์พุทที่เราต้องการออกมา

ส่วนประกอบสองส่วนแรกคือ Control Element และ Correction Element เมื่อรวมกันแล้วเราอาจเรียกรวมกันว่า Controller ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบเปิดก็เช่น การที่เราเปิดน้ำเข้าสู่ถังเก็บ โดยที่มีคนควบคุมคอยทำหน้าที่ปิด-เปิดน้ำให้ไหลออกไปจากถัง โดยที่ผู้ควบคุมนี้ไม่สามารถที่จะมองเห็นระดับน้ำในถังได้

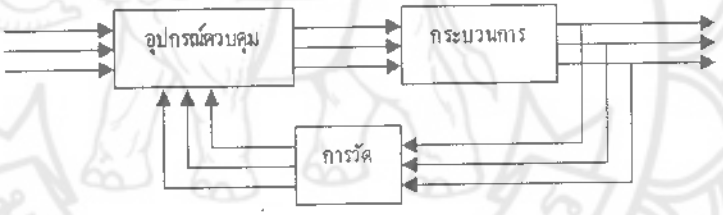
ในที่นี้ controlled variable ก็คือปริมาณน้ำที่ไหลออกจากท่อ หรืออัตราการไหลนั่นเอง สำหรับส่วนที่เป็น controlled element ก็คือผู้ที่ทำหน้าที่เปิด-ปิดน้ำ โดยอาศัยประสบการณ์ว่าการเปิดวาล์วน้ำไปประมาณเท่าที่กำหนดก็ควรจะทำให้มีน้ำไหลออกมาจากถัง และมีระดับน้ำเหลืออยู่ในถังในปริมาณที่เขาต้องการ สำหรับส่วนที่เป็น correction element คือวาล์วน้ำที่ปรับอัตราการไหลของน้ำ และสุดท้ายคือส่วนที่เป็น process ก็คือถังน้ำที่บรรจุน้ำที่มีอยู่ในถังนั้นเอง



รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างระบบควบคุมแบบเปิด การเปิดน้ำเข้าสู่ถัง

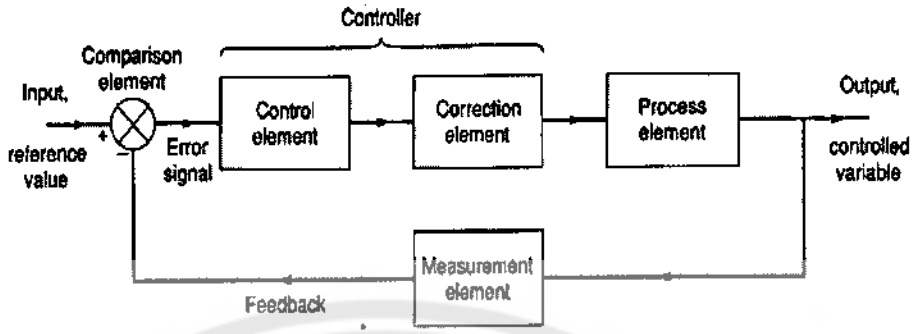
2.1.2ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System) **จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการกลับเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุทที่จะให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาท์พุทได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาท์พุท เมื่อเราทราบค่าเอาท์พุทแล้วเรามักจะนำค่าเอาท์พุทที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาท์พุทที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทที่ต้องการและเอาท์พุทที่แท้จริงจะได้รับการส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุทเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างของเอาท์พุทที่ต้องการและเอาท์พุทที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็จะได้ว่า ค่าเอาท์พุทของระบบเป็นไปตามต้องการ

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาท์พุท และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรตัวนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปข้างล่าง



รูป 2.5 แสดง ระบบควบคุมหลายตัวแปร

ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบเปิดที่เราเห็นกันทั่วไปในชีวิตประจำวันก็เช่น พัดลมไฟฟ้าที่เราใช้กันทั่วไป เราเลือกความแรงของพัดลม แล้วเราจะได้เอาท์พุทออกมาโดยที่ไม่มีการตรวจสอบหรือตรวจวัดค่าใดๆ ในทำนองกลับกันเครื่องปรับอากาศจะมีการตรวจสอบว่าอุณหภูมิของห้องเป็นเท่าใด เพื่อที่จะตรวจสอบว่าระบบปรับอากาศควรจะทำงานหรือไม่ ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะเป็นตัวอย่างของระบบควบคุมแบบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ และส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับมีดังนี้



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

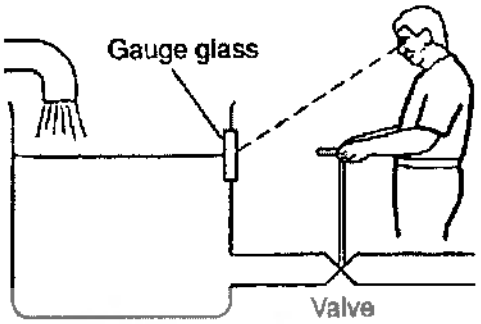
1. Comparison Element ส่วนนี้จะทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่เราต้องการออกมา ส่วนนี้จะให้สัญญาณ หรือค่าความผิดพลาดออกมา ซึ่งความผิดพลาดนี้จะบอกให้ทราบว่าขณะนี้ค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมนั้นมีค่าอยู่แตกต่าง จากค่าที่เราต้องการให้มันเป็นเท่าใด นั่นคือ ความผิดพลาด = ค่าสัญญาณอ้างอิง – ค่าสัญญาณที่วัดได้

2. Control Elemetเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าจะต้องทำอย่างไร เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาด เรามักจะใช้คำว่า controller เมื่อเราเรียกส่วนนี้รวมถึง correction element

3. Correction Element ส่วนนี้มีหน้าที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร เพื่อที่จะลดค่าความผิดพลาดให้น้อยลง เรามักเรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในส่วนนี้ว่า Actuator

4. Process Element กระบวนการ หรือ plant จะเป็นระบบซึ่งเราต้องการควบคุมค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัว

5. Measure Element ส่วนนี้จะเป็นส่วนของเครื่องมือวัด ซึ่งเครื่องมือวัดนี้จะให้สัญญาณที่แสดงถึงขนาดของตัวแปรที่เราต้องการที่จะควบคุม และเมื่อได้ค่าที่วัดแล้วก็จะมีการป้อนสัญญาณนั้นกลับเข้าสู่ส่วนเปรียบเทียบ (Comparison element) เพื่อให้ระบบพิจารณาว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบหรือไม่ การทำงานของระบบป้อนกลับนี้จะทำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่ามาตรฐาน และค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากัน นั่นคือระบบควบคุมของเราสามารถควบคุมให้ค่าตัวแปรที่เราต้องการมีค่าตามที่เรากำหนดได้เรียบร้อยแล้วนั่นเอง รูปที่ 2.6 นั้นจะเห็นว่าสัญญาณป้อนกลับจะนำเข้ามารวมกับสัญญาณมาตรฐานที่ comparison element โดย comparison element นี้นิยมจะเขียนเป็นวงกลมซึ่งมีกากบาทอยู่ตรงกลาง ซึ่งเป็นสัญลักษณ์มาตรฐานของการบวกสัญญาณ สำหรับในส่วนของ comparison element ของระบบป้อนกลับแบบลบ เราจะเห็นว่าค่าสัญญาณมาตรฐานจะถูกกำหนด**ด้วยเครื่องหมายบวก และค่าสัญญาณป้อนกลับจะกำหนดด้วยเครื่องหมายลบ ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาจะเป็นความแตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสอง ถ้าหากว่าการป้อนกลับเป็นการป้อนกลับแบบบวก เครื่องหมายกำหนดสัญญาณที่ comparison element ก็จะมีเครื่องหมายเป็นบวกด้วย**



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมการเปิดน้ำเข้าสู่ถังแบบปิด

เพื่อแสดงถึงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบควบคุมแบบปิด คือถ้าพิจารณาระบบควบคุมการใส่น้ำเข้าถังอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยในครั้งนี้ผู้ควบคุมการเปิดปิดน้ำสามารถมองเห็นระดับน้ำในถังได้โดยการมองผ่าน Gauge glass

2.2 คอนโทลเลอร์ (Controller)

เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งจะมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุทและมีเอาท์พุทเป็นอินพุทของ corrective element โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของคอนโทลเลอร์ เรานิยมเรียกว่า กฎการควบคุม

2.2.1 On-off control หรือ Two-position control

เป็นการควบคุมอย่างง่ายและราคาถูกซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ตัวคอนโทลเลอร์ ที่เป็นแบบ on-off control นี้จะให้ค่าเอาท์พุทออกมาเพียงสองตำแหน่งคือ เปิด กับ ปิด ตำแหน่งเอาท์พุทนี้จะอยู่ที่เปิด หรือ ปิด จะขึ้นอยู่กับปริมาณของสัญญาณ error (e)

2.2.2 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

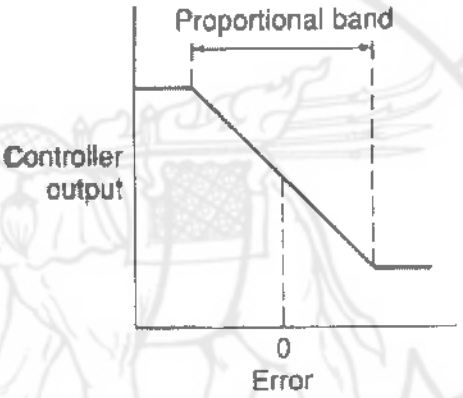
ในระบบควบคุมแบบสัดส่วน เราจะได้ว่า เอาท์พุทของคอนโทลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับอินพุทของคอนโทลเลอร์ และถ้าเรากำหนดสัญญาณอินพุทที่ให้กับคอนโทลเลอร์เป็น ค่าความผิดพลาด(e) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา เราจะได้

$$output = K_p e \tag{2.1}$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียก proportional gain เราจะพบว่าเอาท์พุทที่ออกจากคอนโทลเลอร์แบบ Proportional control จะขึ้นกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่เรากำลังพิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทลเลอร์ $G_c(s)$ จะมีค่าเป็น

$$G_c(s) = K_p \tag{2.2}$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยคอนโทลเลอร์แบบนี้ก็จะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิด พลาดเท่านั้น การที่เราได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง จะทำให้เกิดเอาท์พุทที่มีขนาดใหญ่จากคอนโทลเลอร์ในเวลานั้น อย่างไรก็ตามการที่เรากำหนดให้ gain คงที่นั้นในทางปฏิบัติเราอาจจะ กำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่า นั้น เราอาจกำหนดให้คอนโทลเลอร์ของเรามีค่าเอาท์พุทไม่น้อยกว่าค่าค่าหนึ่งและไม่มากเกินกว่าค่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุทจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 และการกำหนดเอาท์พุทแบบ proportional control ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ เราจะเรียกว่า proportional band.



รูปที่ 2.8 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุท

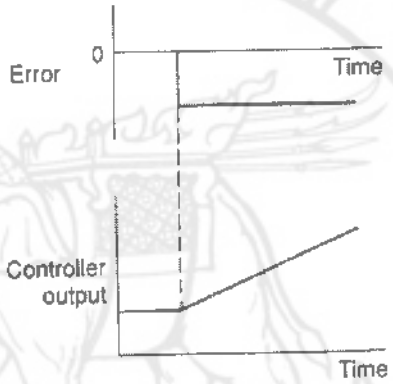
การกำหนด proportional band นี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาท์พุทมีค่าจำกัดไม่ไปสู่ค่าอนันต์ทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อคอนโทลเลอร์มีเอาท์พุทสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่งแล้ว เราก็นิยมที่จะกำหนดเอาท์พุทค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาท์พุทของคอนโทลเลอร์ 100% ก็หมายถึงว่าเอาท์พุทจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ในทางปฏิบัติ proportional control นี้ จะมีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คาน ก็ได้ ข้อเสียประการสำคัญของระบบควบคุมที่คอนโทลเลอร์คือ **ไม่ได้มีการเพิ่มเทอม 1/S (หรือการเพิ่มปริพันธ์)ในส่วน forward path ซึ่งหมายความว่า ถ้าระบบเป็นระบบ type 0 คอนโทลเลอร์จะไม่ได้เปลี่ยนแปลง type ของระบบ ทำให้ระบบเป็น type 0 เหมือนเดิม และทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว เนื่องจากคอนโทลเลอร์ไม่ได้ทำการเพิ่มโพลหรือศูนย์ใหม่ให้กับระบบเพียงแต่ เปลี่ยนตำแหน่งของโพลหรือศูนย์เท่านั้น**

2.2.3 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบปริพันธ์เอาท์พุทของคอนโทลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับปริพันธ์ของสัญญาณผิดพลาดเทียบกับเวลา หรือ

$$output = K_i \int_0^t edt \tag{2.3}$$

เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่เรียกว่า integral gain ซึ่งจะมีหน่วยเป็น 1/วินาที รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการตอบสนองของ integral control เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาดแบบ step ค่าปริพันธ์ระหว่างเวลา t และ 0 จะหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณความผิดพลาดจากเวลา 0 ถึง t ดังนั้นเนื่องจากเริ่มการมีสัญญาณความผิดพลาดแบบ step เอาท์พุทที่ออกจากคอลโทลเลอร์จะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้เอาท์พุทที่เวลาใดๆจะเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทลเลอร์แบบ integral control

เปลี่ยนรูปลาปลาสของสมการ (2.2) จะทำให้เราได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทลเลอร์เป็น

$$G_c(s) = \frac{output}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \tag{2.4}$$

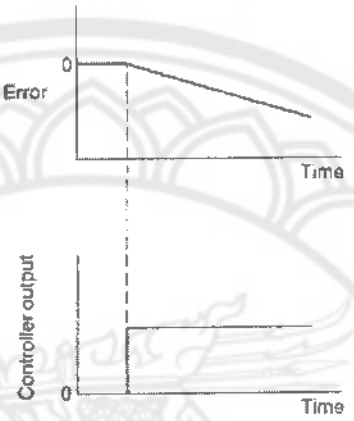
ระบบควบคุมแบบ integral control จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุมและเพิ่ม type ของระบบจาก type 0 เป็น type 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่อ step input อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ S = 0 และไม่มีการเพิ่มศูนย์ให้กับระบบควบคุม จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และจำนวนศูนย์ (m) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งจะมีผลให้ asymptote angles ของทางเดินรากลดลง และจุดตัดจะเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของ s-plane มากขึ้น มีผลทำให้ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

2.2.4 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมอีกแบบหนึ่งก็คือการควบคุมแบบอนุพันธ์ การควบคุมแบบนี้เอาท์พุทจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด เทียบต่อเวลา นั่นคือ

$$output = K_d \frac{de}{dt} \tag{2.5}$$

เมื่อ K_d คือ derivative gain และมีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 2.10 การตอบสนองของ Derivative Control

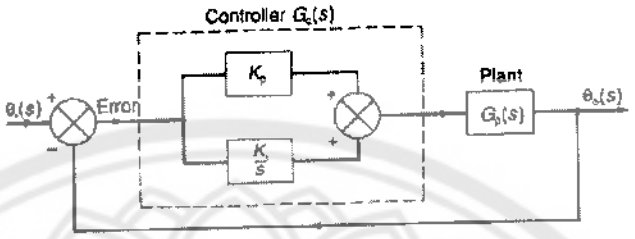
รูปที่ 2.10 แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณความผิดพลาดเป็นสัญญาณแบบ ramp เมื่อเริ่มได้รับสัญญาณความผิดพลาดและไม่ใช่ค่าของความผิดพลาดซึ่งทำให้เราได้สัญญาณส่งออกจากคอนโทลเลอร์มีค่ามากก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริงๆ อย่างไรก็ตามหากความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่า ค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ไม่อ่อนไหวต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือ เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งผลที่ตามมาการควบคุมแบบนี้จะไม่ใช้เพียงตัวเดียว แต่มักจะใช้ควบคุมร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เปลี่ยนรูปลาปลาสสมการ (2.5) เพื่อที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทลเลอร์ ซึ่งจะเป็น

$$G_c(s) = K_d s \tag{2.6}$$

ถ้าหากว่าระบบเป็นแบบ type 1 หรือสูงกว่าการควบคุมแบบอนุพันธ์จะลด Sในเทอมส่วนลงและลด type ของระบบลง 1 อย่างไรก็ตามเราได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้มักจะไม่ใช่เพียงลำพังแต่เราจะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อเราใช้การควบคุมแบบอนุพันธ์จะทำให้เราเพิ่มความเร็วในการตอบสนอง ของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติการนำกฎการควบคุมแบบอนุพันธ์ไปใช้นั้นค่อนข้างจะลำบาก ดังนั้นในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเป็นการประมาณการควบคุมแบบอนุพันธ์ โดยใช้ lead compensator

2.2.5 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control)

การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อเราใช้การควบคุมแบบปริพันธ์สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่งโดยการใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์(PI) ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมจะเป็นตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาท์พุทของคอนโทลเลอร์เป็น

$$output = K_p e + K_i \int_0 dt \tag{2.7}$$

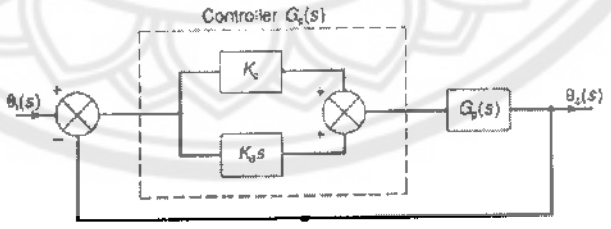
เปลี่ยนรูปลาปลาสของสมการ (2.7) เพื่อที่จะหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของคอนโทลเลอร์ จะได้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{2.8}$$

การลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้จะน้อยกว่าการที่เราใช้การควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียว ค่าของ K_P และ K_i จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของศูนย์และโพลของระบบ โดยตำแหน่งของศูนย์จะกำหนดด้วยค่า K_P ในขณะที่ K_i จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบปิด

2.2.6 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus Derivative Control)

ถ้าการควบคุมแบบอนุพันธ์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบสัดส่วน (PD) ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมจะเป็นตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย PD Control

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาท์พุทของคอนโทลเลอร์เป็น

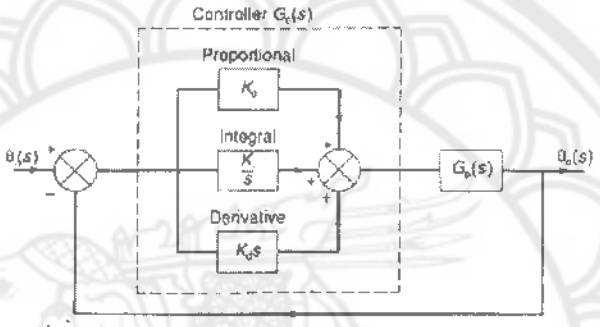
$$output = K_p + K_e \frac{de}{dt} \tag{2.9}$$

เปลี่ยนรูปลาปลาสของสมการ (2.14) เพื่อที่จะหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของคอนโทลเลอร์จะได้

$$G_c(s) = K_p + K_d s \tag{2.10}$$

2.4.7 การควบคุมโดยใช้แบบสัดส่วนรวมกับแบบปริพันธ์และรวมกับแบบอนุพันธ์ (PIDcontrol)

การควบคุมโดยใช้แบบสัดส่วนรวมกับแบบปริพันธ์และรวมกับแบบอนุพันธ์ หรือ ที่เรียกการควบคุมแบบ 3 เทอม ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Block diagram ที่ประกอบด้วย PID control

เอาท์พุทของคอนโทลเลอร์เมื่อรับอินพุทเป็นความผิดพลาด e ดังนี้

$$output = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \tag{2.11}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทลเลอร์ จะเป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{2.12}$$

การควบคุมแบบ PID controller จะเพิ่มจำนวนศูนย์ให้กับระบบเท่ากับ 2 และเพิ่มจำนวนโพล 1 โพล และทำให้ชนิด type ระบบเพิ่มขึ้น 1

2.3ระบบกลไก Manipulator

Manipulator ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นถูกใช้เพื่อเคลื่อนย้ายชิ้นส่วน หรือ เครื่องมือในอาณาเขตบริเวณที่ว่าง ซึ่งการเคลื่อนที่ของ Manipulator เหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

2.3.1 การเคลื่อนเพื่อเข้าถึงตำแหน่งสุดท้ายตามที่กำหนดไว้ซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายขั้นพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของ Manipulator ทุกตัว

2.3.2 การเคลื่อนที่แบบละเอียด (Fine motion) ซึ่งการเคลื่อนที่ประเภทนี้จะเป็นการเคลื่อนที่ในระหว่างที่ end-effector ของ สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งการเคลื่อนที่แบบที่ 2 นี้จะเป็นการ Manipulator เคลื่อนที่ที่เรียกว่า " Force control "

Force-control ซึ่งการควบคุมแรงนี้จะอาศัยข้อมูลของแรงสัมผัสที่ได้จาก Force sensor การเคลื่อนที่โดยอาศัย Force-control ในแบบที่ 2 นี้ ก็สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบ คือ

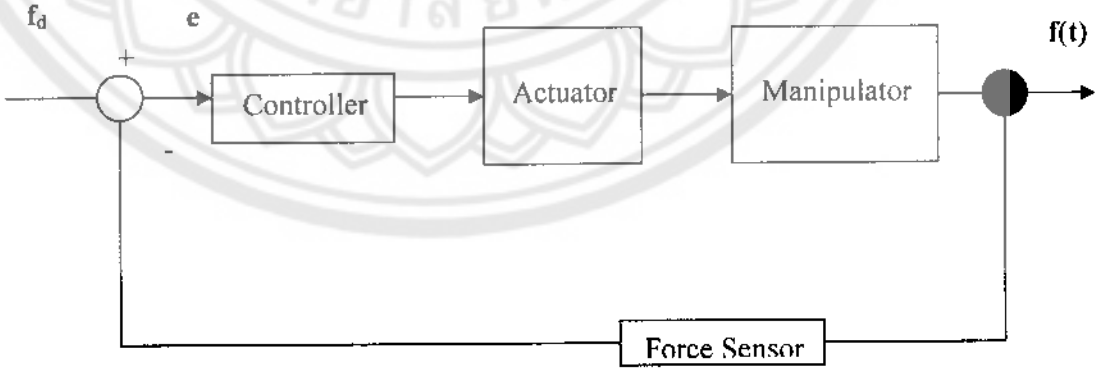
1.ระบบควบคุมแรงแบบแรกนี้เป็นระบบการควบคุมแรงที่เรียกว่า Logic branching ระบบควบคุมแรงประเภทนี้จะนำค่าแรงที่วัดได้จาก Froce Sensor มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขค่าแรงที่ตั้งไว้ ซึ่งระบบควบคุมแรงประเภทนี้ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่อันจะนำมาซึ่งเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงกระแทก

2. ระบบควบคุมแรงแบบที่สอง เป็นระบบควบคุมแรงที่มีรูปแบบเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกับโดยอาศัยค่าแรงที่วัดได้จาก Force Sensor ป้อนกลับเข้าสู่ Loop ควบคุม ระบบควบคุมแรงแบบที่ สอง นี้การนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายกว่าแบบแรกซึ่งงานที่ต้องใช้ระบบควบคุมแรงแบบที่ สอง สามารถแบ่งได้ 2 จำพวก

งานประเภทที่เกี่ยวข้องกับ การเจีย การขัด ซึ่งงานประเภทนี้ควบคุมแรงสัมผัสนั้นเป็นสิ่งสำคัญงานที่เกี่ยวข้องกับการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งงานประเภทนี้ Force sensor จะคอยตรวจวัดตำแหน่งเพื่อดูว่าชิ้นส่วนทั้ง 2 เข้ากันสนิทหรือยัง แต่อย่างไรก็ตามงานที่เกี่ยวข้องกับ Force-control ทั้งหมดนั้นจะมีประเด็นหรือจุดที่สำคัญอันเดียวกันคือ การควบคุมแรงสัมผัสระหว่าง Manipulator และ สิ่งแวดล้อม

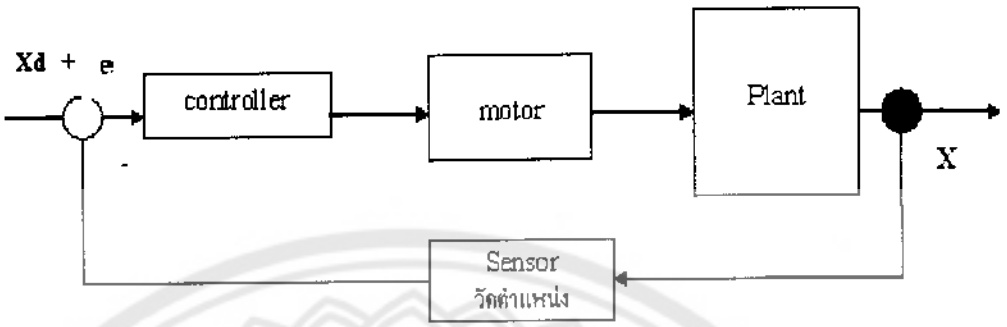
2.4ระบบควบคุมแรง(Explidit Force control) แบ่งได้ 2 ประเภท

2.4.1 Direct Force control มีส่วนประกอบดังนี้



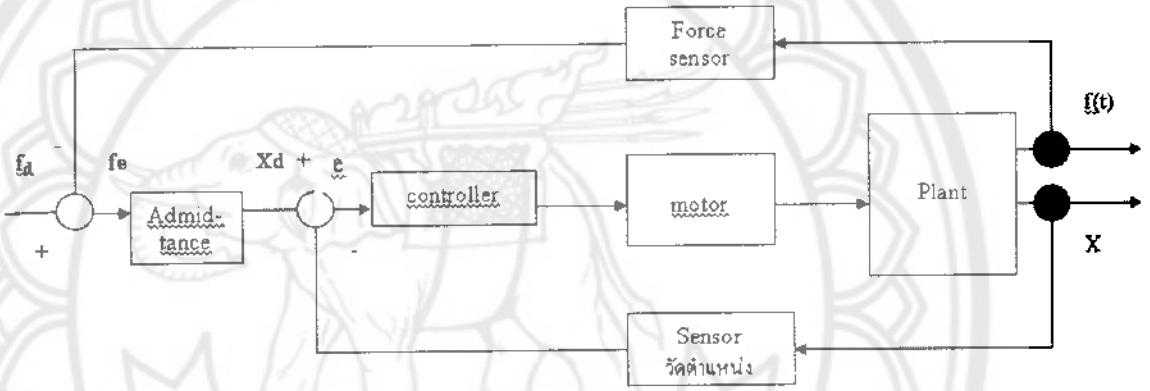
รูปที่ 2.14 Direct Force control

2.4.2Position base explicit ใช้ควบคุมตำแหน่งมีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 2.15 Position base explicit

และถ้าต้องการควบคุมแรงโดยอาศัย Position base explicit จะมีส่วนประกอบตามรูปด้านล่างนี้



รูปที่ 2.16 การควบคุมแรงโดยอาศัย Position base explicit