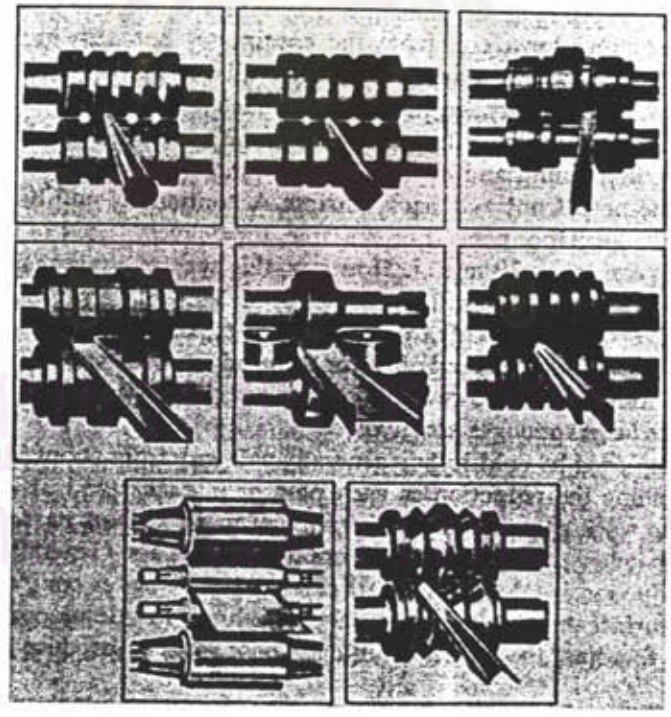
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การควบคุมความหนาของแผ่นโลหะแบบรีดเย็น

การรีดโลหะ (metal rolling) เป็นกระบวนการแปลงรูปโลหะ (plastic deforming) จากสภาพก้อน (ingot) ให้มีขนาดบางลง หรือมีรูปทรงตามต้องการด้วยการผ่านโลหะเริ่มต้นเข้าไปยังลูกรีด (rolls) ซึ่งขับเคลื่อนด้วยจักรกลกำลังที่มีแรงอัดหลายล้านนิวตัน แรงเค้นจากการอัดบนเนื้อโลหะและแรงเค้นแนวเฉือนบนผิวโลหะจะรีดโลหะออกมาในรูปของแท่งโลหะหรือแผ่นโลหะที่มีขนาดและความหนาต่าง ๆ กัน เช่น แผ่นโลหะหนากว่า 6 มิลลิเมตร (plate) แผ่นโลหะบางกว่า 6 มิลลิเมตร (sheet) และแถบโลหะที่มีหน้ากว้างไม่เกิน 600 มิลลิเมตร (strip)[2] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กระบวนการรีดโลหะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กระบวนการรีดโลหะขณะที่อุณหภูมิสูงเรียกว่า "การรีดร้อน (hot rolling) และกระบวนการรีดโลหะขณะเย็นตัว เรียกว่า "การรีดเย็น" (cold rolling)"



รูปที่ 2.1 การรีดโลหะรูปทรงต่าง ๆ และแผ่นโลหะ

กระบวนการรีดเย็นแถบโลหะ (metal strip) ใช้สำหรับการลดความหนาของแถบโลหะที่ผ่านกระบวนการรีดร้อนในขั้นต้นมาแล้วให้เป็นแผ่นบางมีผิวเรียบเป็นมันและมีความแข็งแกร่ง (strength) เพิ่มขึ้นจากผลของแรงเค้นจากลูกรีด ในการรีดเย็นนี้สามารถลดความหนาของแถบโลหะจากความหนาเดิมลงได้ 50 ถึง 90% คุณภาพของความสม่ำเสมอด้านความหนาและความเรียบของผิวขึ้นอยู่กับความแม่นยำของระบบกลเครื่องรีดโลหะ (rolling mill) รวมทั้งความเร็วในการรีด การที่จะควบคุมความหนาของแถบโลหะในกระบวนการรีดต่อเนื่องให้คงที่ ขณะที่เดินเครื่องด้วยความเร็วสูงจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์วัดความหนาที่มีเสถียรภาพสูงประกอบกับระบบควบคุมลูกรีดที่ตอบสนองการปรับแก้ระบบกลได้ทัน

2.1 <u>เครื่องรีดโลหะแบบรีดเย็น</u>

2.1.1 โครงสร้างของเครื่องรีดโลหะ

เครื่องรีดโลหะแบบรีดเย็น (cold rolling mill) ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญหลัก 5 ส่วน ดังแสดงในแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.2 ได้แก่ ลูกรีด (rolls) แบริง (bearing) โครงยึดลูกรีด (stand) ระบบขับเคลื่อนลูกรีด และระบบสกรูดาวน์ (screw-down) ลูกรีดสำหรับควบคุมความหนา อุปกรณ์ต่างๆ จะต้องสร้างอย่างละเอียดและประกอบกันอย่างมั่นคง เพื่อให้ระบบกลมีความแม่นยำในการรีดโลหะ การแบ่งชนิดของเครื่องรีดจะแบ่งตามการจัดระบบลูกรีดซึ่งโดยทั่วไปจะจัดไว้ 5 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ได้แก่

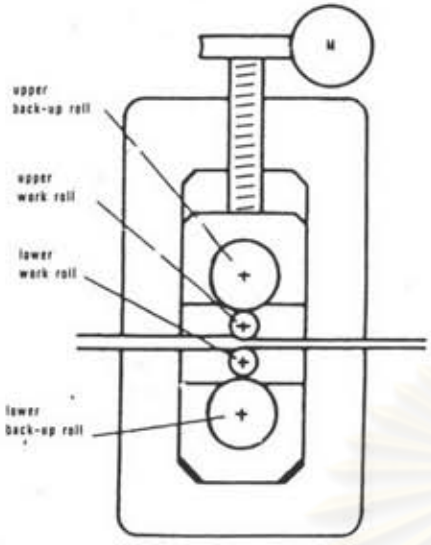
ก. two-high mill เป็นลูกรีดชนิดขับเคลื่อนทางเดียว

ข. two-high reversing mill เป็นลูกรีดชนิดขับเคลื่อน 2 ทิศทาง

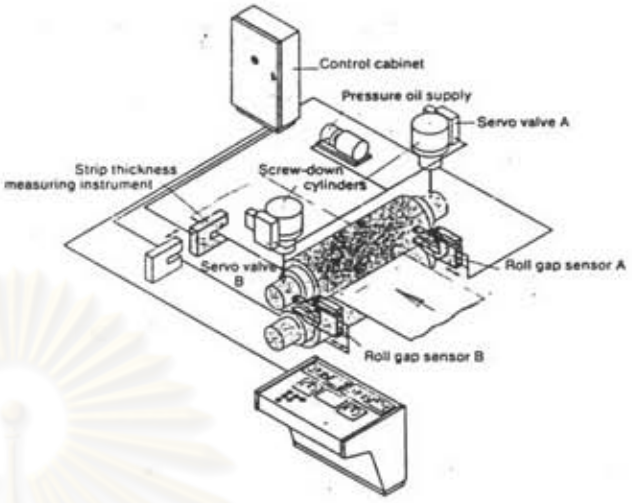
ค. three-high mill เป็นลูกรีด 2 ชั้น ขับเคลื่อนแผ่นโลหะสวนทางกัน

ง. four-high mill เป็นชนิดลูกรีดใหญ่ขับลูกรีดเล็กสำหรับรีดโลหะที่ต้องการให้บางมาก

จ. cluster mill เป็นชุดลูกรีดกำลังขับเคลื่อนสูงสำหรับรีดโลหะผสมที่มีความแข็งของเนื้อโลหะสูงให้มีความบางมาก

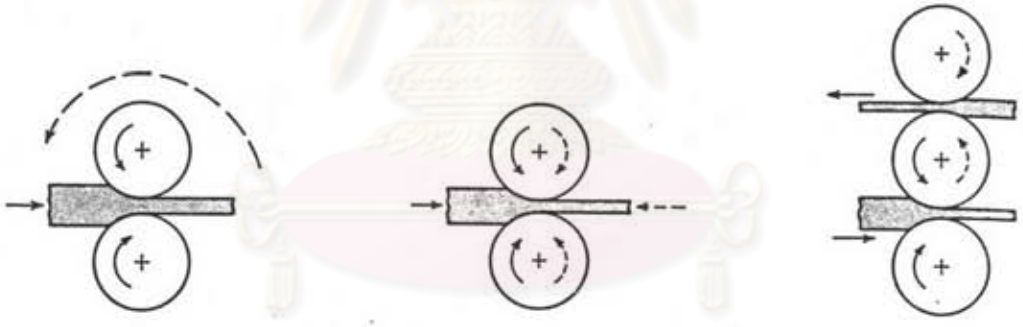


ก. แผนภาพของโครงยึดลูกรีด

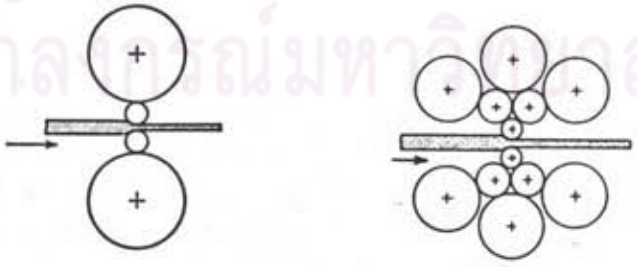


ข. แผนภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อน

รูปที่ 2.2 เครื่องรีดโลหะแบบรีดเย็น



ก. two-high mill ข. two-high reversing mill ค. three-high mill



ง. four-high mill จ. cluster mill

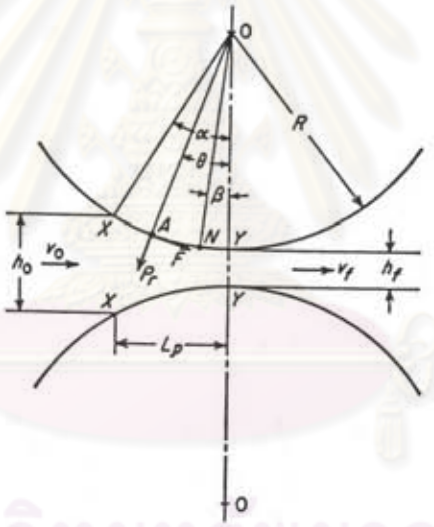
รูปที่ 2.3 การจัดระบบลูกรีดโลหะของเครื่องรีดชนิดต่างๆ

เมื่อโลหะถูกรีดด้วยระบบขับเคลื่อนผ่านชุดลูกรีดจะเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันระหว่างโลหะและเครื่องรีด 2 ส่วนคือ แรงต้านการแปลงรูปของเนื้อโลหะ (F_G) และแรงอัดจากลูกรีดที่ยึดกับโครงเครื่องรีด (F_W) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าแผ่นโลหะความหนาเริ่มต้น h_o เริ่มเคลื่อนเข้าสู่ลูกรีดบริเวณผิวสัมผัส xx ด้วยความเร็วเริ่มต้น v_oผ่านช่องห่างของลูกรีดที่บังคับให้ลดความหนาลงเป็น h_f บริเวณผิวสัมผัส yy แผ่นโลหะที่ถูกรีดจะยืดตัวออกด้วยความเร็ว v_f และถ้าไม่คิดการขยายตัวทางหน้ากว้างซึ่งเกิดขึ้นน้อย สมดุลของปริมาตรโลหะที่ถูกรีดนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$bh_ov_o = bhv = bh_fv_f \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ b = ความกว้างของแผ่นโลหะ

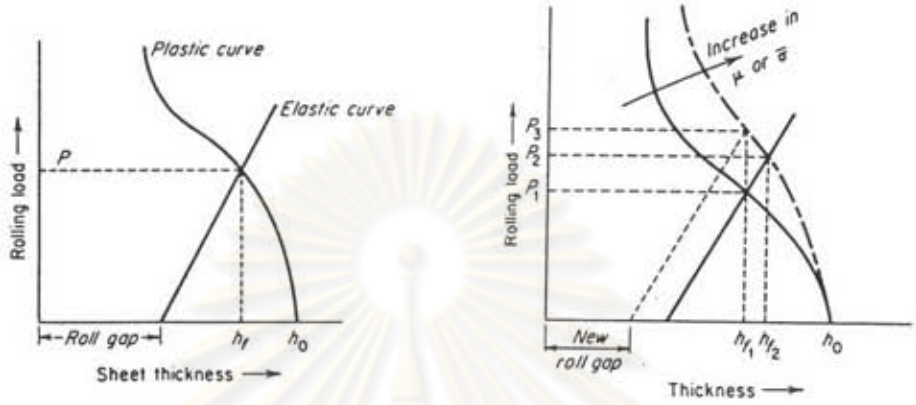
v = ความเร็วของการรีดโลหะที่ความหนา h ใด ๆ



รูปที่ 2.4 แรงกระทำระหว่างการรีดโลหะ

จากผลของแรงกระทำในการแปลงรูปโลหะในกระบวนการรีดเย็นสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงที่ป้อนให้ลูกรีดกับความหนาของแผ่นโลหะได้ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.5 n เรียกว่า "เส้นกราฟคุณลักษณะอิลาสติกและพลาสติกของการรีดโลหะ" ซึ่งจะประกอบด้วยเส้นกราฟ 2 ชุดบนระนาบเดียวกัน คือ เส้นกราฟความสัมพันธ์ของการแปรเปลี่ยนแรงต้านการแปลงรูป (F_G)ซึ่งลดความหนาของโลหะเริ่มต้นจาก h_oเรียกว่า "เส้นกราฟพลาสติก (plastic curve)"มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น และเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงอัด (F_W) ที่ประคองการหยุ่นตัวของโลหะผ่านลูกรีดเริ่มต้นจาก S_O เรียกว่า "เส้นกราฟอิลาสติก (elastic curve)"มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น เมื่อพิจารณาที่จุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองจะพบว่า โลหะที่ต้องการลดความหนาจาก h_o ถึง h_f นั้นต้อง

ป้อนแรงให้กับลูกรีดคงที่เท่ากับ P ณ จุดนี้ ถ้าโลหะที่รีดมีความหนาเริ่มต้นสม่ำเสมอมีเนื้อเดียวกันตลอด และระบบกลมีความแม่นยำสูงแล้ว ความหนาของโลหะที่รีดออกมาจะมีความหนาคงที่



ก. เนื้อโลหะเป็นเนื้อเดียวกัน ข. เนื้อโลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 2.5 เส้นกราฟคุณลักษณะอิลาสติกและพลาสติกของการรีดโลหะ

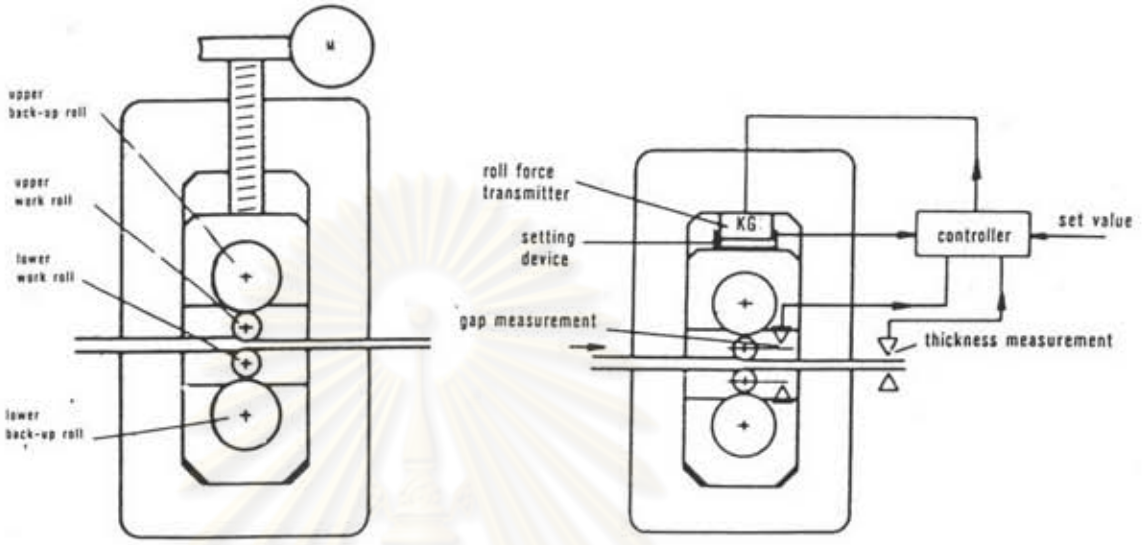
2.1.2 การควบคุมความหนาของแผ่นโลหะ

ในทางปฏิบัตินั้นโลหะเริ่มต้นก่อนรีดมักมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ส่วนประกอบของโลหะผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ และระบบกลมักจะมีความคลาดเคลื่อนบ้าง กระบวนการรีดโลหะจึงต้องมีการปรับแก้ช่องระหว่างลูกรีด (gap) ด้วยการขับระบบสกรูดาวน์ของลูกรีดเพื่อให้ได้สมดุลของเส้นกราฟจุดใหม่ดังในรูปที่ 2.5.ข และมีความหนาของแผ่นรีดออกมาคงที่ การปรับแก้นี้จำเป็นจะต้องมีเครื่องวัดความหนาซึ่งสามารถวัดได้ขณะที่แผ่นโลหะเคลื่อนที่ เครื่องวัดที่นิยมใช้กันได้แก่ ไมโครมิเตอร์แบบฟลายอิง (flying micrometer) และเกจวัดใช้รังสีเอกซ์(x-ray guage) [2]

ก. ระบบควบคุมความหนาอัตโนมัติ

จากโครงสร้างหลักของเครื่องรีดโลหะนั้นการปรับความหนาของแผ่นโลหะให้ได้ขนาดตามต้องการปรับได้จากระบบสกรูดาวน์ของลูกรีดซึ่งมีระบบกลกำลังสำหรับขับเคลื่อน ซึ่งอาจจะเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบมอเตอร์กำลังหรืออุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบไฮดรอลิก ในรูปที่ 2.6.ก เครื่องรีดโลหะที่ไม่มีการควบคุมระบบสกรูดาวน์แบบต่อเนื่อง คุณภาพของแถบโลหะที่รีดขึ้นกับความมั่นคงของโครงยึดลูกรีดและระบบลูกรีด การปรับแก้ความหนาของแผ่นโลหะให้สม่ำเสมออาศัยแรงงานคน (manual) คอยปรับแก้อุปกรณ์ควบคุมของระบบสกรูดาวน์ เมื่อตรวจพบความคลาดเคลื่อน

ของความหนาแถบโลหะจากการวัดด้วยอุปกรณ์วัดความหนาของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการรีด ทำให้การควบคุมคุณภาพของแถบโลหะจากกระบวนการผลิตทำได้ค่อนข้างยาก



ก. ระบบควบคุมแบบใช้แรงงานคน (manual)

ข. ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ (automatic)

รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมความหนาของเครื่องรีดโลหะ

ปัจจุบันการควบคุมความหนาของแถบโลหะกระทำแบบต่อเนื่องขณะที่เครื่องกำลังทำงานอยู่เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูง การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของจักรกลแบบต่อเนื่องนี้จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดและระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ปรับแก้อุปกรณ์กำลังของระบบสกรูดาวน์โดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6.ข การทำงานของระบบเป็นการตรวจวัดความหนาหรือระยะห่างของลูกรีด (gap) ด้วยอุปกรณ์วัดอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณจากการวัดความหนาของแถบโลหะที่ผ่านการรีดแล้วจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐานซึ่งอาจจะได้จากค่าศักดาไฟฟ้าของการปรับเทียบจากความหนา หรือ ค่าวัดจริงจากแผ่นโลหะอ้างอิงมาตรฐาน (self balance) ผลต่างของการเปรียบเทียบจะได้เป็นสัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) ป้อนกลับไปยังระบบควบคุมเพื่อปรับแก้ทิศทางและตำแหน่งของอุปกรณ์กำลังให้ควบคุมความหนาคงที่อย่างต่อเนื่อง การออกแบบระบบควบคุมความหนาด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์จะต้องคำนึงถึงความเร็วในการตอบสนองการปรับแก้ความหนาของระบบสกรูดาวน์ซึ่งได้รับการพัฒนาให้มีความเร็วขึ้นมาตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์กำลังที่ใช้กับระบบสกรูดาวน์

ตารางที่ 2.1 แสดงการพัฒนาความเร็วของระบบสกรูดาวน์ [3]

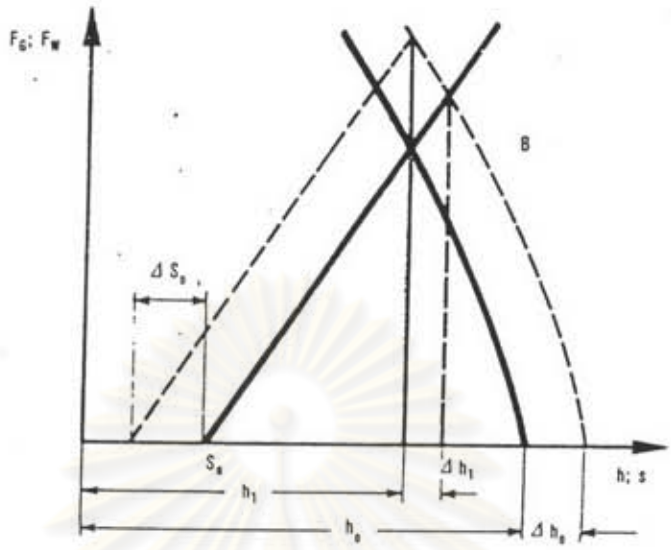
Types		Time for the equalization of a 0.100 mm nominal value increase, s	Maximal screw-down speed mm/min
worm screw-down	approx.1950	1.0	15
worm screw-down	approx.1955	0.7	20
planetary screw-down ...		0.5	24
mech. screw-down with mechanical feed-back	approx.1960	0.2	40
hydraulic screw-down with electrical feed-back	approx.1970	0.1	120
hydraulic screw-down with electrical feed-back	approx.1980	0.07	180

ข. ความคลาดเคลื่อนจากการรีดโลหะและการปรับแก้ด้วยระบบสกรูดาวน์

ความแม่นยำในการรีดโลหะของเครื่องรีดโลหะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการรีดโลหะ 3 ประการได้แก่ [3]

1. คุณภาพของแถบโลหะเริ่มต้น ได้แก่ ความสม่ำเสมอของความหนาและความแข็งของเนื้อโลหะ
2. คุณภาพของจักรกลของเครื่องรีดโลหะ ได้แก่ ความแข็งแรงของโครง ลูกรีด ศูนย์ของลูกรีด และระบบสกรูดาวน์
3. อุปกรณ์ตรวจวัดความหนา และระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่เลือกใช้

ข.1 ผลของความคลาดเคลื่อนเมื่อความหนาของโลหะเริ่มต้นไม่สม่ำเสมอในกรณีที่แถบโลหะเริ่มต้นไม่สม่ำเสมอ การเปลี่ยนแปลงความหนา (Δh_0) เพิ่มขึ้น ระบบสกรูดาวน์จะต้องออกแรงต้านการเพิ่มขึ้นของความหนาของโลหะที่จะรีดออกมา โดยแปรเปลี่ยนระยะสกรูดาวน์ (ΔS_0) ดังแสดงความสัมพันธ์ในเส้นกราฟคุณลักษณะอิลาสติกและพลาสติกของโลหะในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะได้สมการอัตราส่วนของแรงในการแปลงรูปโลหะและความหนาดังสมการที่ 2



รูปที่ 2.7 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของระยะสกรูดาวน์อันเนื่องมาจากความหนาของแถบโลหะเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง

$$\frac{\Delta S_0}{\Delta h_0} = \frac{C_m}{C_g} \qquad \text{..... (2)}$$

หรือ $$\Delta S_0 = \frac{C_m}{C_g}\Delta h_0 \qquad \text{..... (3)}$$

เมื่อ C_m คือ ค่าเพิ่มขึ้นของแรงอัดจากลูกรีด (F_W) เพื่อต้านกับความต้านการแปลงรูปของเนื้อโลหะ และ C_g คือค่าที่เพิ่มขึ้นของแรงต้านการแปลงรูป (F_G) เพื่อต้านแรงอัดจากจุดทำงานเดิม ดังนั้นจากสมการที่ 3 ความเร็วในการปรับแก้ความหนาของระบบสกรูดาวน์สามารถคำนวณได้จากแรงกระทำในการรีดโลหะและความคลาดเคลื่อนของความหนา ดังนี้

$$V_{zuo} = \frac{C_m}{C_g}\cdot\frac{\Delta h_0}{\Delta l}\cdot\frac{dl}{dt} \qquad \text{.....(4)}$$

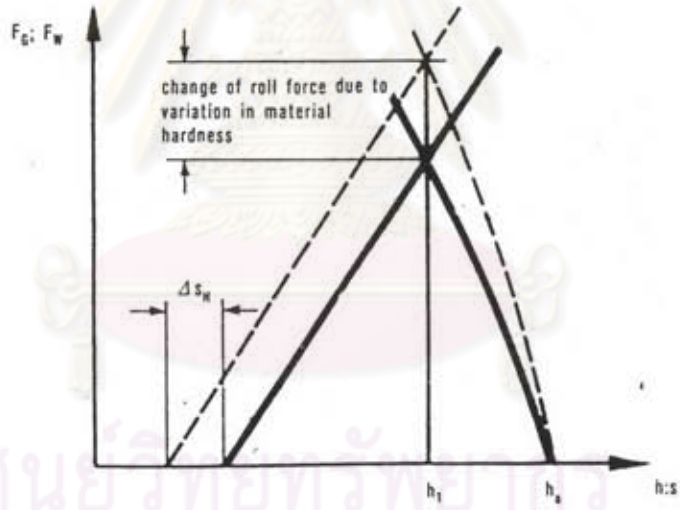
$$V_{zuo} = \frac{C_m}{C_g}\cdot\frac{\Delta h_0}{\Delta l}\cdot VO \qquad \text{.....(5)}$$

เมื่อ V_{ZUO} คือ ความเร็วของระยะสกรูดาวน์

$\frac{\Delta h_0}{\Delta l}$ คือ ค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนจากอัตราเปลี่ยนแปลงความหนา (gradient of thickness)

Vo คือ ความเร็วของแถบโลหะที่ป้อนเข้าเครื่องรีดโลหะ

ข.2 ผลของความคลาดเคลื่อนเมื่อความแข็งของเนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ ในทำนองเดียวกันถ้าความแข็งของเนื้อโลหะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นระบบสกรูดาวน์ จะต้องปรับระยะเอาชนะแรงต้านการแปลงรูปของเนื้อโลหะ ซึ่งความสัมพันธ์ของระยะสกรูดาวน์ (ΔS_H) และแรงกระทำของลูกรีดดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.8 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระยะสกรูดาวน์ และแรงอัดของลูกรีดรวมทั้งแรงต้านการแปลงรูปของเนื้อโลหะดังสมการที่ 6



รูปที่ 2.8 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของระยะสกรูดาวน์อันเนื่องมาจากความแข็งของเนื้อโลหะเปลี่ยนแปลง

$$\Delta S_H = \frac{F_W}{C_g} \cdot \frac{\Delta F_W}{F_W} \qquad \text{.....(6)}$$

จากสมการที่ 6 เมื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงอัดของลูกรีด $\frac{\Delta F_W}{F_W} = r$ สามารถพิจารณาความเร็วของระยะสกรูดาวน์ได้ดังนี้

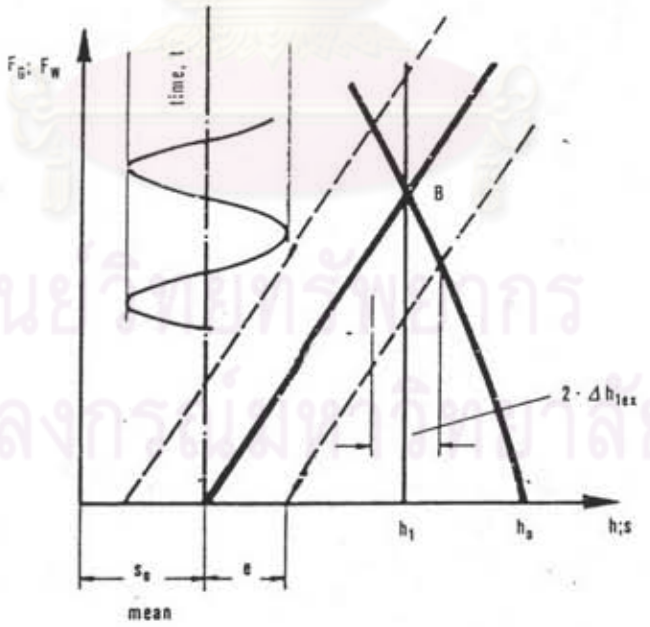
$$V_{zuo} = \frac{F_W}{C_g} \cdot \frac{r}{\Delta l} \cdot vo \qquad \text{.....(7)}$$

เมื่อ $\frac{r}{\Delta l}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงอัดลูกรีดอันเนื่องมาจากการเพิ่มของแรงต้านการแปลงรูปของเนื้อโลหะตามความยาวของแถบโลหะที่รีด

vo คือ ความเร็วของแถบโลหะที่ป้อนเข้าเครื่องรีดโลหะ

ข.3 ความคลาดเคลื่อนจากจักรกลการรีด

ความคลาดเคลื่อนของศูนย์กลางของลูกรีดเกิดจากการประกอบเครื่องจักร-กล การตั้งตำแหน่งแบริง หรือการบิดตัวของโครงขณะมีการเชื่อมประกอบ สิ่งเหล่านี้มีผลต่อการเยื้องศูนย์ของลูกรีด มีผลให้เกิดการแกว่งของลูกรีด ระยะห่างของลูกรีดจึงไม่คงที่ ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระยะสกรูดาวน์ (ΔS_{ex}) และแรงอัดของลูกรีดแสดงได้ดังเส้นกราฟรูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถเขียนในรูปสมการได้เป็น



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของระยะสกรูดาวน์อันเนื่องมาจากจักรกลการรีดไม่ได้ศูนย์

$$\Delta S_{ex} = 2e \qquad \text{.....(8)}$$

เมื่อ e คือ ระยะการแกว่งของลูกรีดจากศูนย์กลาง จากสมการที่ 8 สามารถคำนวณความเร็วของระยะสกรูดาวน์ได้ดังนี้

$$V_{ex} = 2.e.\omega \qquad \text{.....(9)}$$

เมื่อ ω เท่ากับความเร็วเชิงมุมของการแกว่งของลูกรีดจากผลของการเยื้องศูนย์

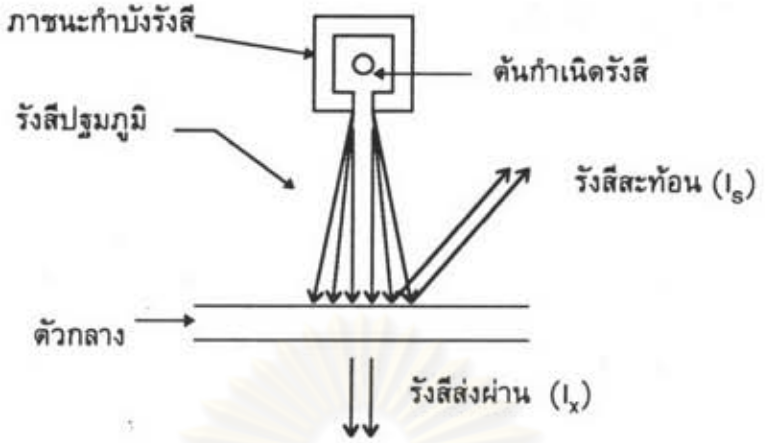
จากสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความหนาในการรีดโลหะดังกล่าวมาแล้วนั้น การปรับแก้ความหนาแบบต่อเนื่องของระบบสกรูดาวน์ จะต้องใช้ความเร็วในการป้อนแถบโลหะเริ่มต้นเข้ากระบวนการรีดและความเร็วของระยะสกรูดาวน์ที่เหมาะสมจึงจะสามารถควบคุมความหนาของแถบโลหะหลังการรีดได้ทัน

2.2 <u>การวัดและการควบคุมความหนาด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสี</u>

ระบบควบคุมความหนาของแถบโลหะรีดเย็นด้วยการปรับแก้ระยะสกรูดาวน์จะทำงานได้แม่นยำเพียงใดขึ้นกับอุปกรณ์วัดระยะห่างของลูกรีดหรืออุปกรณ์วัดความหนาของแผ่นโลหะ วิธีวัดความหนาของแผ่นโลหะด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีเป็นวิธีวัดที่นิยมใช้กับระบบควบคุมความหนาของเครื่องรีดโลหะที่ต้องการความแม่นยำสูงและทนทาน ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์วัดความหนาด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ชนิดนี้ไม่มีส่วนที่สัมผัสกับแถบโลหะรีดที่กำลังเคลื่อนที่ ไม่มีส่วนที่ต้องเคลื่อนไหวตามจักรกลซึ่งอาจทำให้เกิดการล้าหรือติดขัดและเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้ง่าย จึงทำให้เทคนิคการวัดด้วยวิธีส่งผ่านรังสีมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีวัดดั้งเดิม

2.2.1 หลักการวัดความหนาด้วยวิธีส่งผ่านรังสี

การวัดปริมาณรังสีจากอันตรกิริยาที่รังสีกระทำต่อตัวกลางเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีที่วัดได้กับปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น ความหนา ความหนาแน่น ความชื้น เป็นต้น เรียกว่า " การวัดโดยใช้รังสี (radiogauging)" โดยทั่วไปการวัดกระทำได้ 2 ลักษณะ คือ การวัดปริมาณรังสีส่งผ่าน และการวัดปริมาณรังสีสะท้อน ซึ่งเป็นผลของอันตรกิริยาหลักของการส่งรังสีปฐมภูมิให้ทำอันตรกิริยากับตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในทางปฏิบัติการที่จะเลือกวัดด้วยวิธีใดนั้นขึ้นกับผลการวัดปริมาณรังสีจากอันตรกิริยาแต่ละชนิดว่าวิธีใดให้ความไวในการแจกแจงปริมาณทางฟิสิกส์ที่ต้องการวัดได้ เด่นชัด สำหรับการวัดความหนาของโลหะเนื้อเดียวกันนิยมใช้การวัดด้วยวิธีส่งผ่านรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา เนื่องจากสามารถจัดรูปแบบอุปกรณ์วัดได้ง่ายและแปรผลได้สะดวกกว่า



รูปที่ 2.10 อันตรกิริยาของรังสีปฐมภูมิกับตัวกลางใด ๆ

รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเป็นรังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีสภาวะควอนตัมเป็นกลุ่มพลังงานที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่นำมาใช้ในกระบวนการวัดโดยใช้รังสีมักจะใช้ต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทปรังสีซึ่งมีรูปแบบการสลายตัวครึ่งชีวิต และระดับพลังงานต่าง ๆ กันไป ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา [1]

Isotope	Half life	gamma-ray energy keV.
Am-241	470 years	60 (40%)
Tm-170	127 days	84 (3%)
Cs-137	30 years	662 (95%)
Co-60	5.3 years	1,330(100%)
		1,170(100%)

เมื่อรังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวกลางจะทำอันตรกิริยากับตัวกลางโดยการชนกับอะตอมและถ่ายโอนพลังงานออกไปทำให้รังสีเหล่านี้สูญเสียพลังงานไป โอกาสของการทำอันตรกิริยาของโฟตอนแบ่งตามช่วงพลังงานจากต่ำไปหาสูง (0.01-10 MeV) สามารถเกิดได้ 3 ปรากฏการณ์ คือ อันตรกิริยาการสูญเสียพลังงานจากการเกิดโฟโตอิเล็กตริก (photoelectric) คอมพ์ตัน (compton) และแพร์โปรดักชัน (pair production) จากปรากฏการณ์ของการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบนั้น เมื่อพิจารณาจากพฤติกรรมของตัวกลางจะมีลักษณะของการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนและมีโอกาสเกิดขึ้นได้ตามค่าภาคตัดขวางซึ่งขึ้นกับระดับพลังงานของโฟตอน ในลักษณะผลรวมของการ

ดูดกลืนพลังงานทั้ง 3 รูปแบบ เป็นผลให้เกิดการลดทอนปริมาณรังสีที่ผ่านตัวกลาง ดังนั้นการวัดปริมาณรังสีส่งผ่านจึงเรียกโอกาสที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานนี้ว่า "สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสี (attenuation coefficient)" ใช้สัญญลักษณ์ μ ดังสมการ

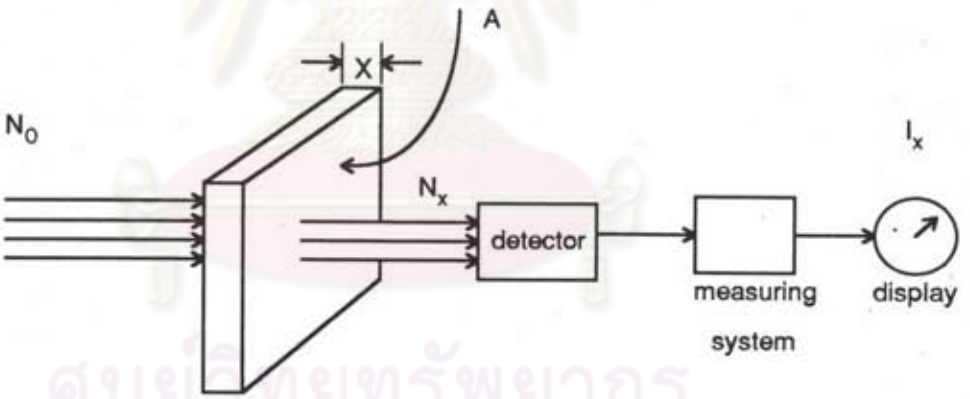
$$\mu = \mu_E + \mu_C + \mu_P \qquad \text{.....(10)}$$

เมื่อ μ_E = สัมประสิทธิ์การลดทอนจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กตริก

μ_C = สัมประสิทธิ์การลดทอนจากอันตรกิริยาคอมพ์ตัน

μ_P = สัมประสิทธิ์การลดทอนจากอันตรกิริยาแพร์โปรดักชัน

ดังนั้นเมื่อจัดระบบวัดปริมาณความเข้มรังสีแบบส่งผ่านรังสี ดังในรูปที่ 2.11โดยมีปริมาณรังสีปฐมภูมิ (N_0) ตกกระทบที่ตัวกลางซึ่งมีพื้นที่ A และมีความหนา X จะพบว่าปริมาณรังสีส่งผ่าน (N_x) จะถูกลดทอนตามคุณสมบัติของตัวกลาง เช่นเดียวกับการลดทอนปริมาณแสงที่ส่งผ่านตัวกลางโปร่งใส ตามสมการของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังสมการ



รูปที่ 2.11 การจัดระบบวัดปริมาณความเข้มรังสีแบบส่งผ่านรังสี

$$N_x = N_0 e^{-\mu x} \qquad \text{.....(11)}$$

เมื่อวัดปริมาณรังสีผ่านระบบวัดรังสี หัววัดรังสีจะวัดได้เฉพาะปริมาณรังสีที่ตกกระทบส่วนที่ไวต่อการวัดของหัววัดรังสีเท่านั้น ผลของการวัดปริมาณรังสีส่งผ่านจึงมีรูปสมการเป็น

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \qquad \text{.....(12)}$$

ความหนาของตัวกลางสามารถคำนวณจากผลการวัดอัตรานับรังสีได้ดังนี้

$$X = \frac{1}{\mu} \ln \frac{I_0}{I_X} \qquad \text{.....(13)}$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติปริมาณรังสีปฐมภูมิเมื่อกระทบกับตัวกลางจะมีการกระเจิงตามอันตรกิริยาคอมพ์ตัน ซึ่งปริมาณรังสีกระเจิงนี้สามารถกระเจิงเข้าสู่หัววัดรังสีทำให้ระบบวัดรังสีนับรังสีกระเจิงรวมกับผลการวัดรังสีส่งผ่านโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ ผลการวัดจะมากกว่าความเป็นจริง ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนนี้เรียกว่า " build up factor (B)" เขียนเป็นสมการได้ดังนี้[4]

$$B = 1 + \frac{\text{ปริมาณรังสีกระเจิง}}{\text{ปริมาณรังสีปฐมภูมิ}} \qquad \text{.....(14)}$$

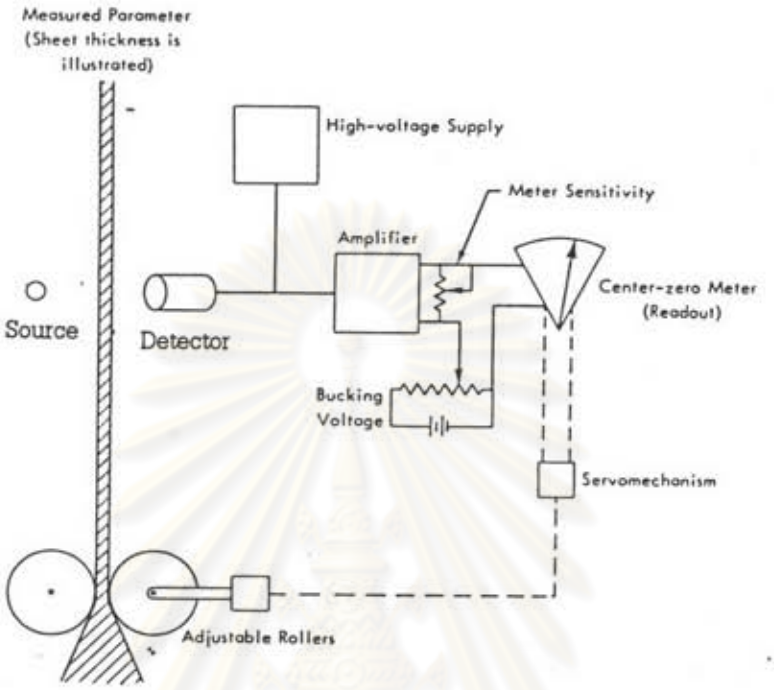
ดังนั้นสมการของการวัดปริมาณรังสีส่งผ่านที่มิได้มีการปรับแก้ปริมาณรังสีรบกวนจากการกระเจิงของรังสีในระบบวัดจึงมีรูปสมการ เช่น

$$I_x = B\,(I_0 e^{-\mu x}) \qquad \text{.....(15)}$$

การลดค่า build up factor สามารถกระทำได้โดยลดผลการรบกวนของรังสีกระเจิง ได้แก่ การบีบลำรังสีปฐมภูมิให้แคบพร้อมทั้งบังคับให้หัววัดรังสีรับรังสีเฉพาะช่องบังคับ (collimated beam) และตัดการวัดรังสีกระเจิงด้วยการวัดเฉพาะพลังงานของรังสีปฐมภูมิที่ผ่านตัวกลางด้วยการเลือกช่วงพลังงานจากอุปกรณ์วิเคราะห์แบบช่องเดียว(SCA)

2.2.2 การควบคุมความหนาด้วยอุปกรณ์วัดแบบส่งผ่านรังสี

การวัดปริมาณวัดรังสีส่งผ่านเพื่อนำไปใช้กับระบบควบคุมความหนาเป็นกระบวนการวัดแบบต่อเนื่อง มักจะแปรผลการวัดในรูปของศักดาไฟฟ้าที่สอดคล้องกับความหนา จากการวัดค่าเฉลี่ยปริมาณนับรังสีด้วยเรตมิเตอร์ (ratemeter) [1] โดยการจัดระบบวัดและควบคุมความหนาของเครื่องรีดโลหะดังในแผนภาพรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก 3 ส่วน คือ ระบบวัดรังสีเพื่อแปรผลความหนาของแผ่นโลหะ ระบบเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของความหนา ส่วนสุดท้ายเป็นระบบควบคุมทิศทางและตำแหน่งของระบบกลเพื่อปรับแก้ความหนาของแผ่นโลหะ



รูปที่ 2.12 แผนภาพของระบบควบคุมความหนาของเครื่องรีดโลหะ
ด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสี

กระบวนการควบคุมความหนาของเครื่องรีดทำงานแบบอัตโนมัติโดยนำความหนาในรูปของศักดาไฟฟ้าที่วัดได้จากเรดมิเตอร์ไปเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิง (set point) ซึ่งปรับเทียบค่าความหนามาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ผลต่างของปริมาณศักดาไฟฟ้าจากการวัดความหนาของแผ่นโลหะที่ผ่านลูกรีดกับค่าศักดาไฟฟ้าอ้างอิงความหนาที่ต้องการควบคุมจะส่งไปควบคุมระบบปรับทิศทางและตำแหน่งของอุปกรณ์กำลัง (servo mechanic system) ของระบบสกรูดาวน์ ในเครื่องรีดโลหะเพื่อปรับแก้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้เข้าสู่ค่าอ้างอิง ความคลาดเคลื่อนของความหนาอาจเกิดได้ทั้งจากคุณสมบัติของเนื้อโลหะก่อนรีดและความคลาดเคลื่อนของกลไกการรีดโลหะของเครื่องรีดเอง ระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้จะปรับตัวเองต่อเนื่องตลอดเวลาที่พบความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น จึงทำให้โลหะที่ผ่านกระบวนการรีดโลหะที่มีการควบคุมแบบต่อเนื่องมีความหนาสม่ำเสมอตลอดความยาวของการรีด

ก. คุณลักษณะของระบบวัดรังสีแบบต่อเนื่อง

ความแม่นยำของระบบควบคุมความหนาแบบต่อเนื่องนั้นขึ้นกับผลของต้นกำเนิดรังสีและระบบวัดรังสี ได้แก่ ความแปรปรวนของต้นกำเนิดรังสี ความสามารถในการแจกแจงความหนา และความแปรปรวนของการเฉลี่ยค่าปริมาณนับรังสีของเรตมิเตอร์รวมทั้งผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงค่าวัดของเรตมิเตอร์ ในส่วนของระบบวัดรังสีจะเห็นว่าความแม่นยำของระบบวัดแบบต่อเนื่องขึ้นกับเรตมิเตอร์โดยตรง การตอบสนองผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณนับรังสีจะเกิดล้าหลังกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงอันเป็นผลจากค่าคงที่เวลาของเรตมิเตอร์ ในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ของค่าที่อ่านได้และค่าคงที่ของเวลามีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 16

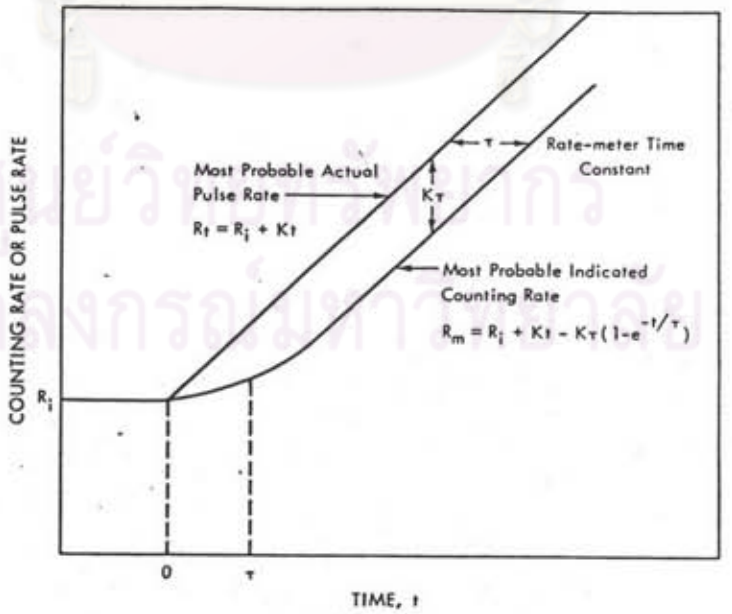
$$\frac{dR_m}{dt} = \frac{1}{\tau}(R_t - R_m) \qquad \text{.....(16)}$$

เมื่อ R_m คือ ค่าที่วัดได้จากเรตมิเตอร์

R_t คือ ค่าปริมาณนับที่เกิดขึ้นจริง

τ คือ ค่าคงที่ของเวลา (response of ratemeter)

การเปลี่ยนแปลงอัตรานับของเรตมิเตอร์ ในระบบวัดความหนาแบบต่อเนื่องจะมีลักษณะการเปลี่ยนแบบแรมพ์ (ramp change) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของอัตรานับจากเรตมิเตอร์และค่าที่เกิดจริงในการเปลี่ยนแปลงแบบแรมพ์

จากรูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของอัตรานับของค่าที่เกิดขึ้นจริง จะมีค่าดังนี้

$$R_t = R_i \text{ เมื่อ } t < 0 \qquad \text{.....(17)}$$

และ $R_t = R_i + kt$ เมื่อ $t > 0$ .....(18)

ซึ่ง k คือค่าคงที่

จากสมการที่ 16 อัตรานับรังสีที่อ่านได้จากเรตมิเตอร์ในรูปที่ 2.13 สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$R_m = R_i + kt - k\tau(1-e^{-t/\tau}) \qquad \text{.....(19)}$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 19 ด้วยสมการที่ 18 จะได้สมการของอัตรานับที่อ่านได้จากเรตมิเตอร์เมื่อเวลา $t > 0$

$$R_m = R_t - k\tau(1-e^{-t/\tau}) \qquad \text{.....(20)}$$

ในระบบวัดความหนาแบบส่งผ่าน เส้นกราฟปรับเทียบความสัมพันธ์ของอัตรานับปริมาณรังสีและความหนาจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตลอดย่านวัดที่ระบบสามารถแจกแจงความหนาได้ ดังสมการ

$$R_t = ax + b \qquad \text{.....(21)}$$

เมื่อ R_t คือ อัตราปริมาณรังสีที่เกิดที่หัววัดรังสีจริงและ x คือ ความหนาของแผ่นโลหะ ในขณะที่ a คือ ความชันของเส้นกราฟ และ b คือ y-intercept ซึ่งขึ้นกับความเข้มรังสีของต้นกำเนิดรังสี (source strength) ดังนั้นเพื่อให้สมการอิสระจากผลของความเข้มรังสีของต้นกำเนิดรังสี สมการที่ 21 จึงนอร์มอลไลซ์ ด้วยความเข้มรังสีของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้กับระบบวัดใด ๆ (s) เทอมของสมการที่ 21 จึงมีรูปเป็น

$$\frac{R_t}{S} = \frac{(ax+b)}{S} \qquad \text{.....(22)}$$

$$R_t = S(\alpha x+\beta) \qquad \text{.....(23)}$$

เมื่อ $\alpha = a/s$ และ $\beta = b/s$ และค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่ตลอดเส้นกราฟปรับเทียบความหนาจากสมการที่ (23) ปริมาณนับรังสีที่วัดได้สามารถคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของความหนาจากผลความแปรปรวนของการวัดรังสีได้ดังนี้

$$\sigma(x) = \frac{\partial x}{\partial R}\sigma(R) = \frac{\sigma(R)}{S\alpha} \qquad \text{.....(24)}$$

ซึ่ง $\frac{dR}{dx} = S\alpha$ = ความชันของเส้นกราฟหรือความไวของระบบ

จากสมการที่ 24 เมื่อพิจารณาการวัดต่อเนื่องของเรดมิเตอร์ซึ่งมีความแปรปรวน $\sigma R = \sqrt{\frac{R}{2\tau}}$ ความคลาดเคลื่อนของการวัดความหนาจะมีค่าเป็น

$$\sigma(x) = \frac{1}{S\alpha}\sqrt{\frac{R}{2\tau}} \qquad \text{.....(25)}$$

และความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าจริงและค่าวัดได้ในรูปลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแบบแรมพ์ในรูปที่ 2.13 มีการเปลี่ยนแปลงของ σ (R) ที่ R_t-R_m ของสมการที่ 5 ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของการวัดความหนาในสมการที่ 24 จะเป็น

$$\sigma(x) = \frac{k\tau(1-e^{-t/\tau})}{S\alpha} \qquad \text{.....(26)}$$

จากสัดส่วนความสัมพันธ์ของอัตรานับรังสีและค่าความหนาของแผ่นโลหะ สมการของการออกแบบระบบสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 25 และ 26 ดังนี้

$$\sqrt{\frac{Rt}{2\tau}} \le R_t - R_m \qquad \text{.....(27)}$$

จากสมการที่ 27 แทนค่า R_t ด้วยสมการที่ 23 และ R_t-R_m ด้วยสมการที่ 20

$$\frac{\sqrt{S(\alpha x+\beta)}}{2\tau} \leq k\tau\,(1-e^{-t/\tau}) \qquad \text{.....(28)}$$

ในกรณีที่เวลาของการวัดมากกว่า 5 เท่าของค่าคงที่เวลา (τ) สมการที่ 28 จะลดรูปเป็น

$$\frac{\sqrt{S(\alpha x+\beta)}}{2\tau} \leq k\tau \qquad \text{.....(29)}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 29 สามารถคำนวณหาสมการสำหรับพิจารณาการออกแบบระบบวัดความหนาแบบต่อเนื่องได้เป็น

$$\left.\begin{aligned} &\frac{2k^2\tau^3 - S\beta}{S\alpha} \geq x \text{ (เมื่อ } \alpha < 0) \\ \text{และ } &\frac{2k^2\tau^3 - S\beta}{S\alpha} \leq x \text{ (เมื่อ } \alpha > 0) \end{aligned}\right\} \qquad \text{.....(30)}$$

ข. การเลือกต้นกำเนิดรังสีสำหรับการวัดความหนาแบบส่งผ่านรังสี

องค์ประกอบที่มีผลต่อการเลือกต้นกำเนิดรังสี ได้แก่ ราคา ครึ่งชีวิต ความแรงรังสี พลังงาน และไอโซโทปของต้นกำเนิดที่สามารถหาได้ง่าย ในบรรดาองค์ประกอบเหล่านี้พลังงานของต้นกำเนิดรังสีเป็นสิ่งที่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำของระบบหรือความคลาดเคลื่อนของความหนาจากความสัมพันธ์ของระบบวัดในสมการที่ 24 และความแปรปรวนของเรดมิเตอร์

$$\sigma(x) = \frac{\partial x}{\partial R}\sqrt{\frac{R}{2\tau}} \qquad \text{.....(31)}$$

เมื่อแทนค่า $R = Ro\, e^{-\mu x}$ ในสมการที่ 31

$$\sigma(x) = \frac{-e^{\mu x/2}}{\mu\sqrt{2Ro\,\tau}} \qquad \text{.....(32)}$$

สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสี μ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการแจกแจงความหนาของแผ่นโลหะ ดังนั้นการหา μ ที่ทำให้ผลการวัดความหนาคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ทำได้โดยหาสมการอนุพันธ์ของ $d\,\sigma(x)/d\mu$ เท่ากับ 0

$$\frac{d\sigma(x)}{d\mu} = 0 = \frac{1}{\sqrt{2Ro\,\tau}}\left(\frac{x}{2\mu} - \frac{1}{\mu^2}\right) e^{\mu x/2} \qquad \text{.....(33)}$$

ซึ่งจะได้ $\mu x = 2$

ในกรณีที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนจากระบบวัด σ_i (x) ความคลาดเคลื่อนของการวัดความหนาในสมการ 31 จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_i(x) = \frac{\partial x}{\partial R}\sigma_i(R) \qquad \text{.....(34)}$$

ในภาวะที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนของระบบวัดเป็นหลัก σ_i (R) จะเป็นฟังก์ชันของ μ เมื่อแทนค่า R เช่นเดียวกับสมการที่ 32 จากนั้นหาอนุพันธ์ของ $\sigma_i(x)$ เทียบกับ μ จะได้ $\mu x = 1$ ดังนั้นในทางปฏิบัติการเลือกต้นกำเนิดรังสีที่นำมาใช้กับอุปกรณ์วัดความหนาของแผ่นโลหะจะพิจารณาจากพลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่ทำให้ค่า μx อยู่ระหว่าง 1 ถึง 2