

การจำลองผลของการเชื่อมโยงของลูกคิดต่อความหนาของชิ้นงานรีด



นายไพศาล วิศิษฎ์วัฒนกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0109-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF EFFECT OF ROLL ECCENTRICITY ON ROLLED-MATERIAL  
THICKNESS



Mr. Paisan Visitvattanakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering  
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0109-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การจำลองผลกระทบของการเชื่อมศูนย์ของลูกกริดต่อความหนาของชิ้นงานรีด  
โดย                              นายไพศาล วิศิษฎ์วัฒนกุล  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ไสว ดำนชัยวิจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิพิณ เตี่ยวณิชย์)

ไพศาล วิศิษฐ์วัฒนกุล : การจำลองผลกระทบของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดต่อความหนาของ  
ชิ้นงานรีด (SIMULATION OF EFFECT OF ROLL ECCENTRICITY ON ROLLED-  
MATERIAL THICKNESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย  
93 หน้า. ISBN 974 – 17 – 0109 - 8

การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดเป็นสาเหตุหนึ่งของความแปรผันของระยะห่างระหว่างลูกรีดซึ่งส่งผล  
กระทบต่อความหนาของชิ้นงานรีด วัดการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดได้โดยการบันทึกค่าความแปร  
ผันของความหนาขาออกและแรงรีด ในระหว่างการรีด การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าของวัตถุดิบ  
และ การเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกและแรงรีดด้วย  
อย่างไรก็ตาม ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความหนายังคงขึ้นกับความถี่รอบการหมุนของลูกรีดเป็น  
สำคัญ ความแปรผันของความหนาซึ่งเกิดจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดมีลักษณะเป็นแบบ Sinusoidal และ  
ขนาดการเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่าน้อยกว่าระยะการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ขนาดการเปลี่ยนแปลงความ  
หนาสูงสุดยังแปรตามขนาดของระยะการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วย การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1  
จากแท่นรีด 5 แท่นส่งผลต่อความแปรผันแบบเป็นคาบของความหนาขาออกมากที่สุด ในขณะที่ผล  
กระทบของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดอื่นมีค่าน้อยกว่ามาก การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดซึ่งมีพร้อม  
กันในแท่นรีดที่ 1 และ 2 ทั้งคู่ทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาแต่ละแท่นรีดไม่เป็นแบบ Sinusoidal

ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีควบคุมระยะห่างระหว่างลูกรีดเป็นวิธีชดเชยการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด วิธีนี้  
เป็นการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงรีดและการปรับค่าระยะห่างระหว่างลูกรีด เมื่อแรงรีดเปลี่ยนเนื่อง  
จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ระยะห่างระหว่างลูกรีดจะถูกปรับเปลี่ยนและขนาดของการปรับเปลี่ยน  
ระยะห่างระหว่างลูกรีดขึ้นกับขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงรีด วิธีนี้ให้ผลในการชดเชยผลกระทบจาก  
การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดได้เป็นอย่างดี

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

##4270471721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : ROLL ECCENTRICITY / ROLLING SIMULATION

PAISAN VISITVATTANAKUL : SIMULATION OF EFFECT OF ROLL  
ECCENTRICITY ON ROLLED MATERIAL THICKNESS THESIS ADVISOR :  
PRASONK SRICHAROENCHAI, 92 pp. ISBN 974 – 17 – 0109 - 8

Roll eccentricity is a cause of roll gap variation which affects rolled material thickness. Roll eccentricity is observed in a mill stand by recording variations of thickness and roll force. During rolling, exit thickness and roll force changes are affected by changes of raw material thickness as well as by variations of strip tension. However, the main frequency of thickness change depends on the frequency of the rotation of work rolls. Rolled material thickness variation due to roll eccentricity is sinusoidal and its maximum amplitude is less than magnitude of roll eccentricity. Maximum magnitude of thickness change also depends on magnitude of roll eccentricity. Roll eccentricity at stand no.1 of a 5-stand tandem mill has a major effect on periodic variations of exit gauge, whereas effect of roll eccentricity at other stands is insignificant. Roll eccentricity that exists at both stand no. 1 and 2 makes thickness change at each stand is not sinusoidal.

In this paper, method of roll eccentricity compensation is roll gap control. This method involves the detection of roll force change and roll gap adjustment. When roll force is changed due to roll eccentricity, roll gap is adjusted and magnitude of adjusted roll gap depends on magnitude of roll force change. This method can compensate effect of roll eccentricity effectively.

Department Metallurgical Engineering

Student's signature.....

Field of study Metallurgical Engineering

Advisor's signature.....

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ไสว คำนชัย วิจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิธิพล เดี่ยวฉนิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณ Dr. Fumio Fujita และวิศวกร ในบริษัท NKK ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาทั้งในการทำงานและการดำรงชีวิตตลอดช่วงเวลาที่อาศัยอยู่ในประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการ นายยอดชาย อภิปัญญาโสภณ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้ความรู้และโอกาสในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทนี้

(นายไพศาล วิศิษฎ์วัฒนกุล)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
- ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
- วัตถุประสงค์.....	1
- ขอบเขตการศึกษา.....	2
- ประโยชน์ของงานวิจัย.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
- สาเหตุของการเชื่อมศูนย์ของลูกรีด.....	4
- ผลของการเชื่อมศูนย์ของลูกรีดต่อระยะห่างระหว่างลูกรีด.....	4
- ผลของการเชื่อมศูนย์ของลูกรีดต่อแรงรีด.....	5
- ผลของการเชื่อมศูนย์ของลูกรีดต่อความหนาขาออกของวัสดุ.....	5
- ทฤษฎีพลวัตของการรีดเย็นแบบต่อเนื่อง.....	8
3. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
- ข้อมูลพื้นฐานในการรีด.....	20
- สมการจากทฤษฎีการรีดเย็นต่อเนื่อง.....	21
- ขั้นตอนการเขียน โปรแกรม.....	26
- การคำนวณและวิเคราะห์ผล.....	28
- วิธีลดผลกระทบการเชื่อมศูนย์.....	28
4. ผลการคำนวณ.....	29
- ผลการเชื่อมศูนย์ของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ต่อความหนาขาออกของแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 1, 3 และ 5.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

- ผลการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดการเอียงศูนย์ของลูกรีดใน แท่นรีดเดียวกันต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแผ่นเหล็ก.....	39
- ผลของการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแท่นรีดต่างแท่นกันต่อการเปลี่ยนแปลง ความหนาขาออกในแท่นรีดที่มีการเอียงศูนย์ของลูกรีด.....	41
- ผลของการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแท่นรีดต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงความ หนาขาออกสุดท้าย.....	44
- ผลกระทบจากการมีการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 และ 2 ต่อความ หนาขาออกของแผ่น เหล็กที่ผ่านการรีดจากแท่นรีดทั้ง 5 แท่น.....	44
- ผลการคำนวณจากแบบจำลองและผลจากการรีดจริงของการเปลี่ยนแปลง ความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1.....	47
- การลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดเพื่อการควบคุมความหนา ของชิ้นงานรีด.....	47
- PI control.....	48
- การปรับค่า Mill Modulus.....	50
- Roll Gap Control. ....	52
5. บทสรุป. ....	54
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	57
- ภาคผนวก ก.....	57
- ภาคผนวก ข.....	57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	57



## สารบัญญภาพ

รูปที่		
2.1	แสดงระยะเชิงศูนย์กลาง ( $e$ ) ของลูกกริด.....	4
2.2	แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดกับเวลา.....	5
2.3	เส้นโค้ง Mill Modulus.....	6
2.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเชิงศูนย์กลางของลูกกริด แรงรีด และความหนาของชิ้นงานรีด.....	6
2.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของลูกกริดและวัสดุ.....	12
2.6	แสดงการกระจายความหนาของวัสดุระหว่างแท่นรีด.....	15
2.7	แสดงสภาวะ Roll Deformation.....	17
2.8	แสดง Contact Length.....	18
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	27
4.1.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเชิงศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1.....	31
4.1.2	แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเชิงศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1.....	31
4.1.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีด 1, 3 และ 5 โดยการปรับกวนระยะห่างระหว่างลูกกริดของแท่นรีดที่ 1 ขนาด 0.01 มม.....	31
4.2.1	แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 1 ซึ่งมีการเชิงศูนย์กลางขนาด 0.005, 0.01 และ 0.03 มม.....	34
4.2.2	แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 ซึ่งมีการเชิงศูนย์กลางขนาด 0.005, 0.01 และ 0.03 มม.....	34
4.2.3	แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 1 และ 2 ซึ่งมีเชิงศูนย์กลางขนาด 0.005, 0.01 และ 0.03 มม.....	34
4.3.1	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5 เนื่องจากมีการเชิงศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1, 3 และ 5 ตามลำดับ.....	37
4.3.2	การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 3 เนื่องจากมีการเชิงศูนย์กลาง 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 3 ตามลำดับ.....	37
4.3.3	การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 5 เนื่องจากมีการเชิงศูนย์กลาง 0.01 มม.ที่แท่นรีด 5.....	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

4.3.4	การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 5 เนื่องจากการเอียงศูนย์ ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 5.....	38
4.4.1	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากการ เอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1, 3 และ 5.....	41
4.4.2	การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากการเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 3.....	41
4.4.3	การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 5 เนื่องจากการเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 5.....	42
4.4.4	การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากการเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 5.....	42
4.5.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นผลจาก การเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2.....	44
4.5.2	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นผล จากการเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2.....	44
4.5.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นผลจากการเอียง ศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2.....	45
4.5.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเอียง ศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2.....	45
4.5.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีด ซึ่งเป็นผลจากการเอียงศูนย์ ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2.....	45
4.6.1	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง.....	48
4.6.2	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากการคำนวณเมื่อมีการ รบกวนการรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าเท่านั้น.....	48
4.6.3	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากการคำนวณเมื่อมีการ รบกวนการรีดจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดเท่านั้น.....	48
4.6.4	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากการคำนวณเมื่อมีการรบกวน การรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าและการเอียงศูนย์ของลูกรีด.....	49
4.6.5	การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากผลการรีดจริง.....	49
4.6.6	ผลต่างค่าความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 ระหว่างผลการคำนวณและผลการรีดจริง.....	49

## สารบัญภาพ (ต่อ)

4.7.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผล กระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี PI Control เปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม.....	52
4.7.2	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 1 และ 2 เมื่อมีการลดผล กระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี PI Control เปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม.....	52
4.7.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผลกระทบจาก การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี PI Control เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลง เมื่อไม่มีการควบคุม.....	52
4.7.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 จากการเอียงศูนย์กลาง ของลูกรีดขนาด 0.01 มม. เมื่อแท่นรีดมีค่า Mill Modulus เท่ากับ 200000 และ 500000 กก./มม.....	54
4.7.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดแท่นรีดที่ 1 จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ขนาด 0.01 มม. เมื่อแท่นรีดมีค่า Mill Modulus เท่ากับ 200000 และ 500000 กก./มม. ....	54
4.7.6	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 เมื่อแท่นรีด มีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. และความหนาขาเข้าเปลี่ยน แปลง 0.1 มม. เปรียบเทียบระหว่าง ค่า Mill Modulus เท่ากับ 200000 และ 500000 กก./มม. ....	55
4.7.7	แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผล กระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี Roll Gap Control เปรียบเทียบ กับการเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม.....	56
4.7.8	แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผลกระทบจาก การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี Roll Gap Control เปรียบเทียบกับการ เปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม .....	56

## สารบัญตาราง

ตารางที่		
2.1	แหล่งที่มาซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของวัสดุ.....	8
3.1	ตารางข้อมูลการรีดเริ่มต้น.....	21
3.2	ตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	26



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$e$  = ขนาดการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุม

$\phi$  = มุมเริ่มต้นของลูกรีด

$t$  = เวลา

$H_1$  = ความหนาขาเข้าของวัตุดิบ (มม.)

$H$  = ความหนาขาเข้า (มม.)

$h$  = ความหนาขาออก (มม.)

$P$  = แรงรีด (กก.)

$S$  = ระยะห่างระหว่างลูกรีด (มม.)

$M$  = Mill modulus (กก./มม.)

$q_f$  = front tension ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$q_b$  = back tension ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$k$  = deformation resistance ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$f$  = forward slip of material

$b$  = backward slip of material

$V_R$  = ความเร็วของลูกรีด (มม./วินาที)

$V_{in}$  = ความเร็วที่ทางเข้าแทนรีดของวัสดุ (มม./วินาที)

$V_{out}$  = ความเร็วที่ทางออกแทนรีดของวัสดุ (มม./วินาที)

$E$  = Young's modulus ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$L$  = ระยะห่างระหว่างแทนรีด (มม.)

$i$  = ลำดับแทนรีด

$\Delta$  = ค่าผลต่างหรือการเปลี่ยนแปลง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดเบื้องต้นของงานวิจัย

ในอุตสาหกรรมการรีดโลหะแผ่นมีความต้องการให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี ความหนาของชิ้นงานรีดสุดท้ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องควบคุมให้มีความสม่ำเสมอ ตัวแปรที่มีผลต่อความหนาของชิ้นงานรีดมีด้วยกันหลายตัวแปร เช่นความหนาขาเข้าของวัสดุ ระยะห่างระหว่างลูกรีด เป็นต้น การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดเป็นอีกตัวแปรหนึ่งส่งผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงานรีดที่ต้องการขนาดที่มีความแม่นยำสูง จำเป็นต้องควบคุมการรีดเพื่อลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดนี้ ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยี ทางคอมพิวเตอร์ ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ สำหรับการรีด มีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูลคุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานรีด โดยประยุกต์ใช้กับทฤษฎีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และวิศวกรรมที่เรียกว่า ทฤษฎีการรีดเย็นต่อเนื่อง มาใช้วิเคราะห์มากขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงน้อย และมีความคล่องตัวสูงในการปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับการรีดจริง โดยมีจุดประสงค์เพื่อนำผลที่ได้มาปรับปรุง และพัฒนากระบวนการรีดให้ดียิ่งขึ้นไป ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการมุ่งเน้นไปที่การนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดต่อคุณสมบัติของชิ้นงานรีด โดยเฉพาะความหนาของชิ้นงานรีดในกระบวนการรีดเย็น เพื่อที่จะสามารถทำการวิเคราะห์ปัญหาได้ละเอียดถูกต้อง รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย ก่อนนำผลที่ได้ไปปรับเปลี่ยนการรีดจริง

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดต่อความหนาของชิ้นงานรีดระหว่างการจำลองกับการรีดจริง
- 1.2.2 เพื่อหาแนวทางปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการรีดจริงมากที่สุด และเพื่อควบคุมผลกระทบของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดต่อความหนาของชิ้นงานรีดให้น้อยที่สุด

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ทำการวิเคราะห์งานวิจัยนี้ใน 2 มิติ คือ ด้านความหนา และ ด้านยาว ของชิ้นงาน โดยมีสมมติฐานว่า การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเป็นแบบ plain strain (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในดัดกว้างของชิ้นงาน)
- 1.3.2 ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยทฤษฎีการรีดต่อเนื่องและหลักการเชิงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยภาษา visual basic ในโปรแกรม microsoft excel
- 1.3.2 กำหนดค่าความหนาของชิ้นงานรีดเมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อความหนาของชิ้นงานรีด เช่น ระยะเชิงศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างลูกรีด ความเร็วของลูกรีด เป็นต้น แล้วแสดงผลด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานรีดและตัวแปรแต่ละตัว
- 1.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างชุดข้อมูล และกราฟแสดงผลที่ได้จากการทำแบบจำลองกับชุดข้อมูลและกราฟแสดงผลจากการรีดจริง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถทราบถึงผลกระทบของการเชิงศูนย์กลางของลูกรีดต่อความหนาของชิ้นงานรีด
- 1.4.2 สามารถทำนายความหนาของชิ้นงานรีดสุดท้ายได้เมื่อเราเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ในการรีด
- 1.4.3 สามารถนำผลการวิจัยนี้ไปปรับปรุงระบบ AGC ( Automatic Gage Control ) ให้ได้ค่าความหนาโดยระบบควบคุมอัตโนมัติตามต้องการ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของชิ้นงานรีดมีสาเหตุจากหลายปัจจัยด้วยกัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทแหล่งที่มา คือ

1. เกิดจากความบกพร่องหรือการเปลี่ยนแปลงของชุดอุปกรณ์รีด ได้แก่

- 1.1 การสึกหรอของลูกรีด
- 1.2 การเยื้องศูนย์กลางของลูกรีด
- 1.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารหล่อลื่น
- 1.4 การสั่นของแท่นรีด
- 1.5 การยืดหรือหดตัวของลูกรีด
- 1.6 ลูกรีดเกิด crown

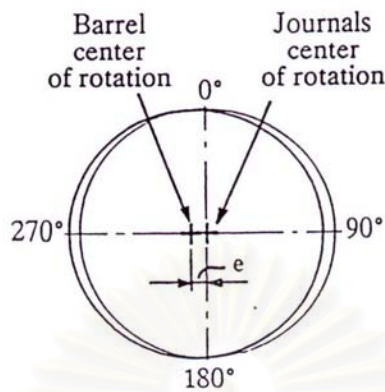
2. เกิดจากการรบกวนระบบควบคุมขั้นตอนการรีด ได้แก่

- 2.1 การเปลี่ยนแปลงของความหนาขาเข้าของวัสดุ
- 2.2 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วของลูกรีด
- 2.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงรีด
- 2.4 การเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีด

ที่มา : V. B. Ginzburg<sup>1</sup>

การเยื้องศูนย์กลางของลูกรีด (roll eccentricity) เป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ความหนาของชิ้นงานรีดสุดท้ายเปลี่ยนแปลงไปโดยมีผลต่อระยะห่างระหว่างลูกรีดซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ทำให้ความหนาของชิ้นงานรีดเปลี่ยนแปลงเช่นกัน การเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดมีลักษณะดังนี้คือ จุดศูนย์กลางการหมุนของลูกรีดและจุดศูนย์กลางของลูกรีดไม่อยู่ที่จุดเดียวกัน ทำให้เมื่อมีการหมุนของลูกรีดแล้วระยะห่างระหว่างลูกรีดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นวัฏจักร ลักษณะและระยะการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดแสดงในรูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 แสดงระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) ของลูกกรีด

**สาเหตุ**

- 1 การเยื้องศูนย์กลางของลูกกรีดเนื่องจากตัวลูกกรีดเอง
- 2 การที่ลูกกรีด ไม่สามารถคงสภาพเป็นวงกลม
- 3 การเยื้องศูนย์กลางของแบร็งลูกกรีดเนื่องจากเพลาลูกกรีด
- 4 ความไม่สม่ำเสมอของตัวลูกกรีดรอบเส้นรอบวง
- 5 ความไม่สม่ำเสมอของเพลารอบเส้นรอบวง
- 6 ความไม่สม่ำเสมอของเส้นรอบวงแบร็ง
- 7 ความไม่สม่ำเสมอของลูกกรีดในแบร็ง

**ผลของการเยื้องศูนย์กลางของลูกกรีดต่อระยะห่างระหว่างลูกกรีด**

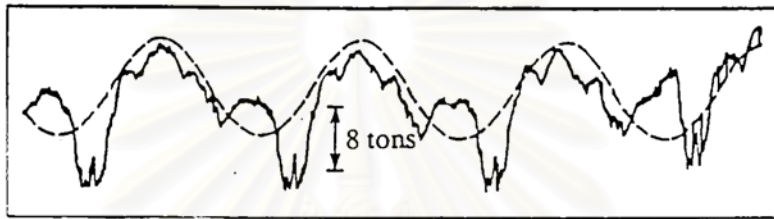
เนื่องจากการเยื้องศูนย์กลางของลูกกรีดทำให้ลูกกรีดเคลื่อนที่ขึ้นลงรอบจุดหมุน ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างลูกกรีดเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไป โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกกรีดและระยะเยื้องศูนย์กลางของลูกกรีดต่อเวลาในรูปของฟังก์ชัน Sine ดังนี้

$$\Delta S = e \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \tag{1}$$

- โดยที่
- $\Delta S$  = การเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกกรีด
  - $e$  = ระยะเยื้องศูนย์กลางของลูกกรีด
  - $\omega$  = อัตราเร็วเชิงมุมของลูกกรีด
  - $\phi$  = มุมเริ่มต้นของลูกกรีด

### ผลของการเอียงศูนย์ของลูกรีดต่อแรงรีด

ถ้าลูกรีดมีการเอียงศูนย์และความคมไม่ทำให้มีการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีด (roll gap) โดยตัวแปรอื่นเช่น การเปลี่ยนแปลงความหนาเข้าของวัสดุ ระยะห่างระหว่างลูกรีดจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งมุมของรอบการรีด การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นฟังก์ชันของระยะเอียงศูนย์ และเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด จากการศึกษาของ V.B. Ginzburg<sup>1</sup> การเปลี่ยนแปลงของแรงรีดมีลักษณะเป็นคาบดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงความสัณฐานของการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดกับเวลา

ระหว่างการรีดจริง รูปร่างของกราฟซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด จะได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาของวัสดุที่เข้าสู่แท่นรีด และ แรงดึงด้วย อย่างไรก็ตาม ความถี่หลักจะยังคงขึ้นอยู่กับความถี่ของการหมุนของลูกรีดเป็นสำคัญ โดยมีลักษณะเป็นคาบ

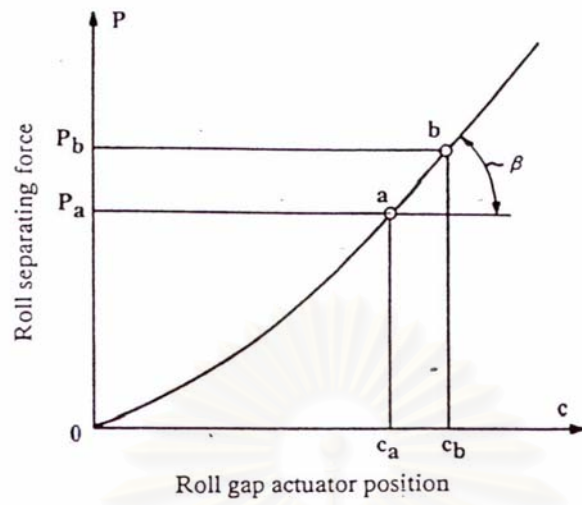
### ผลของการเอียงศูนย์ของลูกรีดต่อความหนาออกของวัสดุ

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด ทำให้แรงรีดเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยถ้าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด เกิดขึ้นเนื่องจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดเพียงอย่างเดียวแล้ว การเปลี่ยนแปลงของแรงรีด จากการเอียงศูนย์ของลูกรีด เท่ากับ

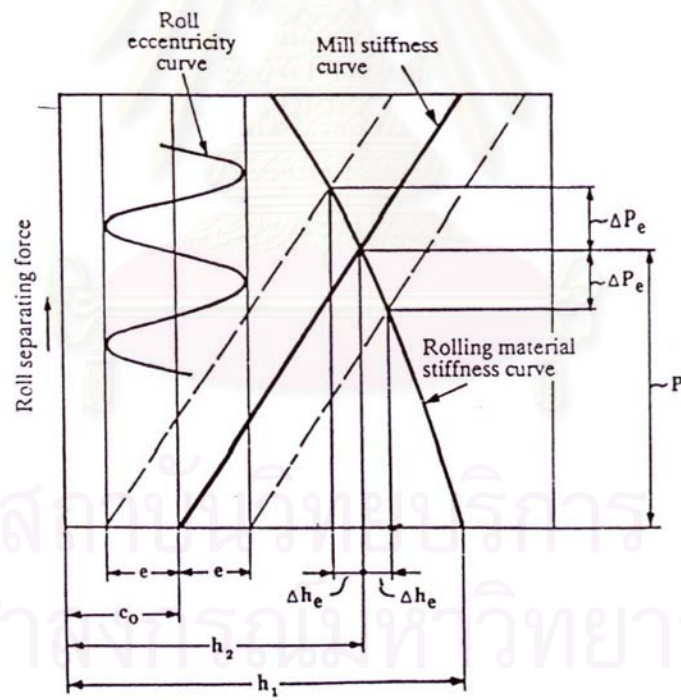
$$\Delta P_e = P_a - P_b \quad (2)$$

เมื่อ  $\Delta P_e$  คือการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดจากการเอียงศูนย์ของลูกรีด

$P_a, P_b$  คือแรงรีดที่จุด a และ b ของเส้นโค้ง mill modulus ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นโค้ง Mill Modulus



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด แรงรีด และความหนาของชิ้นงานรีด จากการศึกษาของ Wiedemer, et al<sup>2</sup>

แรงรีดที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta P_e$ ) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด ( $\Delta S_e$ ) และการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชิ้นงานรีด ( $\Delta h_e$ ) โดย

$$\Delta S_e = \frac{\Delta P_e}{K_s} \quad (3)$$

$$\Delta h_e = \frac{\Delta P_e}{K_m} \quad (4)$$

เมื่อ  $K_s$  = ค่าความแข็งแรงของลูกรีด (mill stiffness)

$K_m$  = ค่าความแข็งแรงของวัสดุ (material stiffness)

ในการพิจารณาปัญหาการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดตั้งอยู่บนสมมติฐานดังนี้คือ ชิ้นงานรีดได้รับแรงรีดสูงทำให้สมบัติของชิ้นงานรีดอยู่ในช่วงพลาสติก ดังนั้นชิ้นงานรีดจะไม่คืนตัวเมื่อออกจากแท่นรีด

พิจารณาจากรูปที่ 2.4 ค่าระยะเยื้องศูนย์กลาง ( $e$ ) เท่ากับผลรวมของระยะห่างระหว่างลูกรีดและความหนาของชิ้นงานรีดที่เปลี่ยนแปลงไป

$$e = \Delta h_e + \Delta S_e \quad (5)$$

เมื่อแทนค่า  $\Delta S_e$  และ  $\Delta h_e$  ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$e = \frac{\Delta P_e}{K_m} + \frac{\Delta P_e}{K_s} \quad (6)$$

จัดรูปสมการสำหรับค่า  $\Delta P_e$  ได้

$$\Delta P_e = e \cdot \frac{K_m \cdot K_s}{K_m + K_s} \quad (7)$$

จากสมการ (3) และ (6) จะได้

$$\frac{\Delta h_e}{e} = \frac{1}{1 + \frac{K_m}{K_s}} \quad (8)$$

เรียก  $\frac{\Delta h_e}{e}$  ว่า Roll Eccentricity Imprint Ratio

จากการศึกษาของ Tajima, et al.<sup>3</sup> ผลการศึกษาแสดงว่า การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของวัสดุ มากกว่าผลของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่เหลือ ซึ่งมีผลกระทบน้อยกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1

### ตารางที่ 2.1 แหล่งที่มาซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของวัสดุ<sup>3</sup>

สาเหตุ	% (เปอร์เซ็นต์)
การเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยอื่น เช่น ความหนาขาเข้า	30 - 40
การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1	14 - 45
การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีด 2-5	6 - 45

### ทฤษฎีพลวัตของการรีดเย็นแบบต่อเนื่อง ( Dynamic Theory of Continuous Cold Rolling Mill )

ทฤษฎีพลวัตของการรีดเย็นแบบต่อเนื่องหรือเรียกว่าวิธีการศึกษาคุณสมบัติทางพลวัต (dynamic characteristic analysis method ) เป็นวิธีที่ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่างคาบ ( period ) การเปลี่ยนแปลงหลังจากสภาวะคงที่ ( steady state ) โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มาจากการรบกวนตัวแปรในการรีดหรือเกิดในขณะการทำงาน จนกระทั่งระบบกลับเข้าสู่สภาวะคงที่ถัดไป ซึ่งคาบการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่าสภาวะพลวัต ( dynamic state )

สาเหตุการรบกวนนี้มาจาก

1. การเกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างการรีด
2. ความไม่สม่ำเสมอของความหนาของชั้นน้ำมันหล่อลื่น ( oil film thickness )
3. ความไม่สม่ำเสมอของความหนาของวัตถุดิบ เป็นต้น

R.A Philips <sup>4</sup> เป็นผู้ริเริ่มในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ในสภาวะพลวัตโดยสนใจที่ neutral point ในส่วนโค้งสัมผัส ( contact length ) ระหว่างลูกกรีดและวัสดุในสภาวะที่ถูกรบกวนระหว่างการรีด ( dynamic state ) โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ( first-order equations ) ในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุด neutral point เมื่อความหนาเข้าแทนที่รีดของแผ่นเหล็กไม่คงที่

M.R. Sekulic and J.M. Alexander <sup>5</sup> ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาคุณสมบัติทางพลวัตของการรีดต่อเนื่อง 4 แทนรีดโดยใช้ analog computer และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ระบบควบคุมความหนา ( gage control )

T. Araimura, M. Kamata and M. Saito <sup>6</sup> ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาคุณสมบัติทางพลวัตของการรีดต่อเนื่อง 5 แทนรีดโดยใช้ digital computer และศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสุดท้าย ( final thickness ) เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ระบบควบคุมความหนาอัตโนมัติ ( Automatic Gage Control )

Nurot Panich, et al <sup>7</sup> สร้างแบบจำลองวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานรีดโดยทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลวัตสำหรับเหล็กแผ่น ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาเข้าที่แทนรีดที่ 1 ความเร็วของลูกกรีด และ ระยะห่างระหว่างลูกกรีด ที่แทนรีด 1, 3 และ 5 พร้อมทั้งเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลจากการรีดจริงของแรงรีด ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และเป็นงานวิจัยต้นแบบของแบบจำลองการวิเคราะห์ผลกระทบการเชื่อมศูนย์นี้

โดยรายละเอียดของทฤษฎีพลวัตของการรีดต่อเนื่องมีสมการหลักอยู่ 3 สมการคือ

- สมการความหนาของชิ้นงานรีด ( Equation of strip thickness )
- สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด ( Equation of strip velocity )
- สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแทนรีด ( Equation of tension between stands )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

ความหนาขาออกของวัสดุสามารถหาได้จากผลบวกของระยะห่างระหว่างลูกรีดในสภาวะที่ไม่มีโหลด (load) กับ rolling force ซึ่งหารด้วย mill rigidity ดังสมการที่ 8

$$h_i = S_i + \frac{P_i}{M_i} \quad (9)$$

$$\Delta h_i = \Delta S_i + \frac{\Delta P_i}{M_i} \quad (10)$$

โดย  $P$  = แรงรีด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Hill <sup>8</sup>

$S$  = ระยะห่างระหว่างลูกรีดที่ตั้งค่าไว้ขณะยังไม่รีด

### Hill's Equation

สมการของ Hill เป็นสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณหาค่าแรงรีด เนื่องจากเป็นสมการที่สำเร็จรูปและสะดวกเมื่อนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีสมการดังนี้

$$P = k \cdot Q_p \cdot ld \cdot w \cdot \eta \quad (11)$$

โดย

$$\eta = 1 - \frac{\left\{ \frac{\phi_n}{\phi_b} qf + \left[ 1 - \frac{\phi_n}{\phi_b} \right] \frac{qb}{(1-r)} \right\}}{k} \quad (12)$$

$$Q_p = 1.08 + 1.79r \frac{\mu}{\phi_b} \sqrt{r} - 0.85r \quad (13)$$

$$r = \frac{\Delta h}{H_{in}} \quad (14)$$

$k$  = deformation resistance ( $\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^3$ )

$w$  = material width (m)

$ld$  = contact length (m)

Neutral angle ( $\phi_n$ ) สามารถหาได้จากสมการของ Bland and Ford's Equation <sup>9</sup> ดังนี้

$$\phi_n = \tan \left[ \frac{H_n}{2\sqrt{\frac{R'}{h_{out}}}} \right] \frac{1}{\sqrt{\frac{R'}{h_{out}}}} \quad (15)$$

$$H_n = \frac{H}{2} - \frac{1}{2\mu} \ln \left[ \frac{H_{in} \left( 1 - \frac{qf}{kf} \right)}{h_{out} \left( 1 - \frac{qb}{kb} \right)} \right] \quad (16)$$

kf = deformation resistance ที่ทางออกจากแท่นรีด

kb = deformation resistance ที่ทางเข้าแท่นรีด

ค่า  $H_n$  หาได้จากสมการดังนี้

$$H = 2\sqrt{\frac{R'}{h_{out}}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{R'}{h_{out}}} \phi_B \right] \quad (17)$$

$$\phi_B = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \quad (18)$$

โดย R = รัศมีของลูกรีด

R' = รัศมีใหม่ของลูกรีดซึ่งเกิดจาก roll flattening

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาแรงรีดได้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงรีดกับตัวแปรอื่นๆ สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ได้ในรูปของฟังก์ชัน

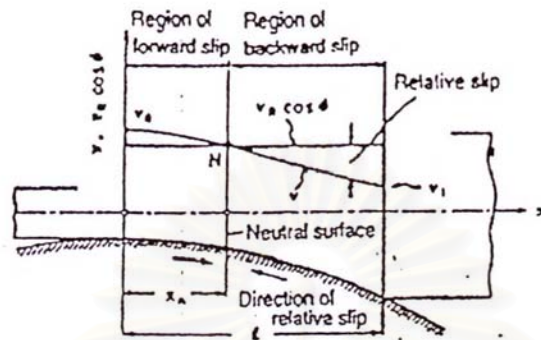
$$P_i = P(H_i, h_i, qf_i, qb_i, k, \mu) \quad (19)$$

ทำการกระจายความสัมพันธ์เหล่านี้ในรูปของ  $\Delta P$  ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial P_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i + \frac{\partial P_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i + \frac{\partial P_i}{\partial k_i} \Delta k_i + \frac{\partial P_i}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i \quad (20)$$



2.2 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด ( Equation of strip velocity )



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของลูกรีดและวัสดุ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.5 จะได้ว่าความเร็วของวัสดุที่ทางเข้าจะช้ากว่าความเร็วของลูกรีดและความเร็วของวัสดุที่ทางออกจากแท่นรีดมีความเร็วมากกว่าความเร็วของลูกรีด ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 21 และ 22 ทั้งนี้ไม่พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความเร็วในมอเตอร์ ( Drooping of motor ) เนื่องจากมีค่าน้อยมาก

$$b = \frac{v_R - v_{in}}{v_R} \quad (21)$$

$$f = \frac{v_{out} - v_R}{v_R} \quad (22)$$

โดย  $v_R$  = ความเร็วของลูกรีด  
 $v_{in}, v_{out}$  = ความเร็วของชิ้นงานขาเข้าและขาออกจากแท่นรีดตามลำดับ

จัดรูปใหม่จะได้

$$v_{out} = (1 + f) \cdot v_R \quad (23)$$

$$v_{in} = (1 - b) \cdot v_R \quad (24)$$

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Forward slip และ Backward slip ได้โดยนำสมการที่ 24 หารสมการที่ 23 ดังนี้

$$\frac{(1-b) \cdot v_R}{(1+f) \cdot v_R} = \frac{v_{in}}{v_{out}} \quad (25)$$

จากสมการกฎทรงที่ของมวล

$$v_{in} \cdot H_{in} = v_{out} \cdot h_{out}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{(1-b)}{(1+f)} = \frac{v_{in}}{v_{out}} = \frac{h_{out}}{H_{in}} \quad (26)$$

### 2.3 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ( Equation of tension between stands )

วิธีหาสมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดนั้นมี 2 วิธี ได้แก่

#### 2.3.1 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดอย่างง่าย ( The most simplified model )

การเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุในทิศทางการรีด ( $\Delta L$ ) หาได้โดยการอินทิเกรตผลต่างของความเร็วระหว่างแท่นรีดในด้านทางออกของแท่นรีดและด้านทางเข้าของแท่นรีดแทนต่อไปนี้

$$\Delta L = \int (v_{in,i+1} - v_{out,i}) dt$$

ซึ่งสามารถหาค่าของ Front tension ( qf ) ได้จากสมการของความเค้นและความเครียดดังสมการที่ 27

$$qf_i = \frac{E}{L} \int (v_{in,i+1} - v_{out,i}) dt \quad (27)$$

$$\frac{\Delta qf_i \cdot L}{E \cdot dt} = (v_{in,i+1} + \Delta v_{in,i+1}) - (v_{out,i} + \Delta v_{out,i}) \quad (28)$$

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Front tension ( qf ) และ Back tension ( qb ) ได้โดยพิจารณาความสมดุลของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ( Equilibrium of tension between stands ) ดังสมการที่ 29

$$H_{i+1} \cdot qb_{i+1} = h_i \cdot qf_i \quad (30)$$

$$h_i \cdot \Delta qf_i + qf_i \cdot \Delta h_i = H_{i+1} \cdot \Delta qb_{i+1} + \Delta H_{i+1} \cdot qb_{i+1} \quad (31)$$

จากสมการที่ 30 สามารถหา Back tension ได้ดังนี้

$$qb_{i+1} = \frac{h_{out,i}}{H_{in,i+1}} \cdot qf_i \quad (32)$$

2.3.2 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยรวมการกระจายความหนาของวัสดุ

( A model taking into account the distribution of thickness between stands )

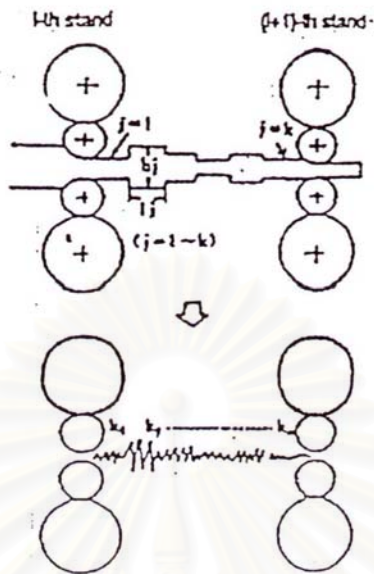
หาได้โดยการอินทิเกรตผลต่างของความเร็วระหว่างแท่นรีดในเส้นทางออกของแท่นรีดและเส้นทางเข้าของแท่นรีดแทนต่อไปซึ่งจะได้ค่าแรงดึงรวม  $T_i^0$  ( Total tension ) ดังสมการที่ 33 และสมการที่ 34 โดยสมมติให้การกระจายความหนาของวัสดุระหว่างแท่นรีดแสดงรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถหาค่าของ Front tension และ Back tension ได้จากสมการที่ 35 และสมการที่ 36

$$T_i^0 = \frac{1}{\left( \sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{K_j} \right)} \int_0^i (v_{in,i+1} - v_{out,i}) dt \quad (33)$$

$$K_j = \frac{E \cdot b \cdot h_j}{l_j} \quad (34)$$

ค่า  $h_j$  และ  $l_j$  สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.6 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายความหนาของวัสดุระหว่างแท่นรีด

$$qf_i = \frac{T_i^0}{(b \cdot h_i)} \quad (35)$$

$$qf_{i+1} = \frac{T_i^0}{(b \cdot h_{i+1})} \quad (36)$$

Forward slip ( f )

ค่า Forward slip สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชัน

$$f_i = f(H_i, h_i, qf_i, qb_i, k_i, \mu_i) \quad (37)$$

$$\Delta f_i = \frac{\partial f_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial f_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial f_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i + \frac{\partial f_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i + \frac{\partial f_i}{\partial k_i} \Delta k_i + \frac{\partial f_i}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i \quad (38)$$

และหาค่าอัตราเร็วขาออกจาแท่นรีดด้วยสมการของ Bland & Ford<sup>9</sup> ดังนี้

$$f_i = \frac{v_{out,i}}{v_{R,i}} - 1 \quad (39)$$

$$\Delta v_{out,i} = (1 + f_i) \cdot \Delta v_{R,i} + \Delta f_i \cdot v_{R,i} \quad (40)$$

พิจารณาที่ตำแหน่ง Neutral point จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_{out} \cdot v_{out} = h_n \cdot v_R \quad (41)$$

โดย  $h_n$  = ความหนาของวัสดุที่จุด Neutral point ( mm )

$$h_n = h_{out} + 2R'(1 - \cos \phi_n) \quad (42)$$

นำสมการที่ 41 แทนในสมการที่ 39 จะได้

$$f = \frac{h_n}{h_{out}} - 1 \quad (43)$$

จะเห็นได้ว่าค่าของ forward slip นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุด neutral point นั้นเอง ในสถานะของการรีดแบบพลวัตนั้น ตำแหน่งของจุด neutral point จะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้ค่าของ forward Slip เปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของชิ้นงานที่ออกจากแต่ละแท่นรีดไม่คงที่ ส่งผลกระทบอย่างยิ่งต่อค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดสภาวะพลาสติกขึ้นก็คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของจุด neutral point นั้นเอง

กฎมวลคงที่

มวลของวัสดุที่ทางเข้าแท่นรีดต้องเท่ากับมวลของวัสดุที่ทางออกแท่นรีด ดังนั้น

$$H_i \cdot v_{in,i} \cdot w \cdot \rho = h_i \cdot v_{out,i} \cdot w \cdot \rho \quad (44)$$

$$H_i \cdot v_{in,i} = h_i \cdot v_{out,i} \quad (45)$$

$$\Delta H_i \cdot v_{in,i} + H_i \cdot \Delta v_{in,i} = \Delta h_i \cdot v_{out,i} + h_i \cdot \Delta v_{out,i} \quad (46)$$

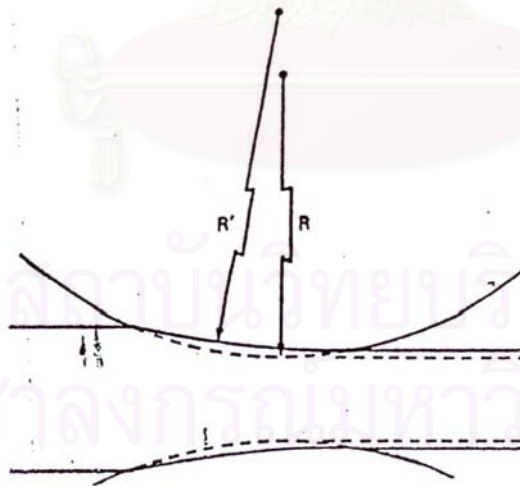
### Roll deformation

ปรากฏการณ์หนึ่งในขณะการรีดซึ่งทำให้รัศมีของลูกรีดมีขนาดมากขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า roll flattening เกิดจากวัสดุชิ้นงานรีดและลูกรีดเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันเป็นผลให้ชิ้นงานรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คืนรูป ( plastic deformation ) แต่ลูกรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคืนรูป ( elastic deformation ) ซึ่งเป็นผลให้ผิวลูกรีดบริเวณสัมผัสกับชิ้นงานแบนราบลงซึ่งสามารถเปรียบได้กับการที่รัศมีของลูกรีดมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วยค่า  $R'$  ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.7 และหาค่าได้จากสมการของ Hitchcock's Equation <sup>10</sup> ดังนี้

$$R' = \left( 1 + \frac{c_0 \cdot P}{b \cdot \Delta h} \right) \cdot R \quad (47)$$

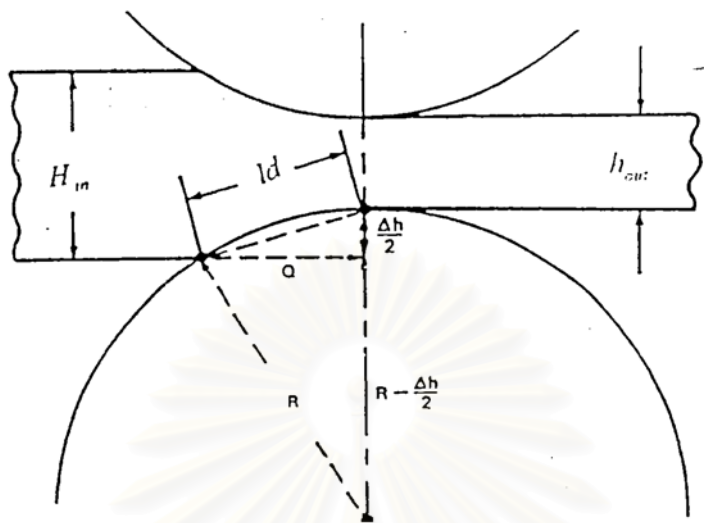
ค่าของ  $C_0$  สามารถหาได้จากสมการ

$$c_0 = \frac{16 \cdot (1 - \nu_0^2)}{\pi \cdot E} \quad (48)$$



รูปที่ 2.7 แสดงสภาวะ Roll Deformation

Contact length



รูปที่ 2.8 แสดง Contact Length

$l_d$  = Contact length สามารถคำนวณจาก

$$l_d^2 = Q^2 + \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2$$

$$Q^2 = R'^2 - \left(R' - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = R' \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2$$

$$l_d = \sqrt{R' \Delta h}$$

(49)

เมื่อ  $\Delta h$  = ผลต่างระหว่างความหนาขาเข้ากับความหนาขาออก

อนุพันธ์ขององค์ประกอบการรีด

ในงานวิจัยนี้ ใช้หลักการพื้นฐานอนุพันธ์ ดังต่อไปนี้

เมื่อ  $x$  และ  $Y$  เป็นค่าองค์ประกอบการรีด โดย  $Y = Y(x)$  หรือ  $Y$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$  สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = \frac{Y(x_1) - Y(x_2)}{x_1 - x_2}$$

เมื่อ  $x_1 = x + \Delta x$

$$x_2 = x - \Delta x$$

ถ้าให้ค่าของ  $\Delta x$  มีค่าน้อยมากๆ ค่าของอนุพันธ์จะมีความถูกต้องมาก ค่าอนุพันธ์ที่ต้องทำการหาค่ามีดังต่อไปนี้

$$1 \quad \frac{\partial P}{\partial H} = \frac{P(H_1) - P(H_2)}{H_1 - H_2}$$

$$2 \quad \frac{\partial P}{\partial h} = \frac{P(h_1) - P(h_2)}{h_1 - h_2}$$

$$3 \quad \frac{\partial P}{\partial qf} = \frac{P(qf_1) - P(qf_2)}{qf_1 - qf_2}$$

$$4 \quad \frac{\partial P}{\partial qb} = \frac{P(qb_1) - P(qb_2)}{qb_1 - qb_2}$$

$$5 \quad \frac{\partial f}{\partial H} = \frac{f(H_1) - f(H_2)}{H_1 - H_2}$$

$$6 \quad \frac{\partial f}{\partial h} = \frac{f(h_1) - f(h_2)}{h_1 - h_2}$$

$$7 \quad \frac{\partial f}{\partial qf} = \frac{f(qf_1) - f(qf_2)}{qf_1 - qf_2}$$

$$8 \quad \frac{\partial f}{\partial qb} = \frac{f(qb_1) - f(qb_2)}{qb_1 - qb_2}$$

ค่าอนุพันธ์เหล่านี้เป็นอิสระไม่เท่ากันในแต่ละแทนรีด ดังนั้นต้องคำนวณหาค่าทุกแทนรีด



## บทที่ 3

### ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองนี้มีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

- 1 รวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการคิดและทำเป็นตารางข้อมูลเริ่มต้น
- 2 เลือกสมการหลักในการทำแบบจำลอง
- 3 เขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic for Applications ใน Microsoft Excel 97
- 4 ทำการคำนวณและวิเคราะห์ผล
- 5 หาวิธีลดผลกระทบจากการเชิงศูนย์

#### 1 ข้อมูลพื้นฐานในการคิด

ได้แก่

- 1.1 ความหนาของแผ่นเหล็กที่ทางเข้าของแต่ละแท่นรีด
- 1.2 ความหนาของแผ่นเหล็กที่ทางออกของแต่ละแท่นรีด
- 1.3 ความกว้างของแผ่นเหล็ก
- 1.4 แรงดึงระหว่างแท่นรีด
- 1.5 แรงรีดของแต่ละแท่นรีด
- 1.6 ความเร็วของลูกรีดของแต่ละแท่นรีด
- 1.7 ค่า Forward slip
- 1.8 ระยะห่างระหว่างลูกรีดของแต่ละแท่นรีด
- 1.9 ขนาดของลูกรีดทั้ง Backup Roll และ Work Roll
- 1.10 ระยะห่างระหว่างแท่นรีดแต่ละแท่น

สามารถหาและเก็บรวบรวมข้อมูลเหล่านี้ได้จาก ตารางการรีด และ บันทึกการรีดของการรีดจริงในโรงงาน ซึ่งโรงงานได้เก็บข้อมูลนี้ไว้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลในข้อ 1.1 – 1.8 เรียกว่า องค์ประกอบการรีด ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเป็นข้อมูลจริงจากโรงงานเหล็กแผ่นรีดเย็นไทย

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.00	1.28	0.71	0.41	0.26
hout (mm.)	1.28	0.71	0.41	0.26	0.19
Back tension (kg/mm2)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
Front tension (kg/mm2)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
Forward slip	0.074555	0.013152	0.019218	0.0585163	0.0041513
Vr (mm./s)	2133	4000	7083	10917	15250
Strip width (mm.)	930	930	930	930	930
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000
Backup roll radius (mm.)	700	700	700	700	700

ตารางที่ 3.1 ตารางข้อมูลการรีดเริ่มต้น

2 สมการจากทฤษฎีการรีดยื่นต่อเนื่อง

สมการเกี่ยวกับการรีดซึ่งนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีด้วยกัน 7 สมการหลัก ดังต่อไปนี้

2.1 สมการความหนาของชิ้นงานรีด

$$\Delta h_i = \Delta S_i + \frac{\Delta P_i}{M_i}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะสร้างนี้เป็นการจำลอง 5 แท่นรีด ดังนั้นจะได้

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta h_1 = \Delta S_1 + \frac{\Delta P_1}{M_1}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta h_2 = \Delta S_2 + \frac{\Delta P_2}{M_2}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta h_3 = \Delta S_3 + \frac{\Delta P_3}{M_3}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta h_4 = \Delta S_4 + \frac{\Delta P_4}{M_4}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta h_5 = \Delta S_5 + \frac{\Delta P_5}{M_5}$$

2.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด

$$\Delta P_i - \frac{\partial P_i}{\partial H_i} \Delta H_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i - \frac{\partial P_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i - \frac{\partial P_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i - \frac{\partial P_i}{\partial k_i} \Delta k_i - \frac{\partial P_i}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i = 0$$

แทนรีดที่ 1

$$\Delta P_1 - \frac{\partial P_1}{\partial H_1} \Delta H_1 - \frac{\partial P_1}{\partial h_1} \Delta h_1 - \frac{\partial P_1}{\partial qf_1} \Delta qf_1 - \frac{\partial P_1}{\partial qb_1} \Delta qb_1 - \frac{\partial P_1}{\partial k_1} \Delta k_1 - \frac{\partial P_1}{\partial \mu_1} \Delta \mu_1 = 0$$

แทนรีดที่ 2

$$\Delta P_2 - \frac{\partial P_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial P_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial P_2}{\partial qf_2} \Delta qf_2 - \frac{\partial P_2}{\partial qb_2} \Delta qb_2 - \frac{\partial P_2}{\partial k_2} \Delta k_2 - \frac{\partial P_2}{\partial \mu_2} \Delta \mu_2 = 0$$

แทนรีดที่ 3

$$\Delta P_3 - \frac{\partial P_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial P_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial P_3}{\partial qf_3} \Delta qf_3 - \frac{\partial P_3}{\partial qb_3} \Delta qb_3 - \frac{\partial P_3}{\partial k_3} \Delta k_3 - \frac{\partial P_3}{\partial \mu_3} \Delta \mu_3 = 0$$

แทนรีดที่ 4

$$\Delta P_4 - \frac{\partial P_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial P_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial P_4}{\partial qf_4} \Delta qf_4 - \frac{\partial P_4}{\partial qb_4} \Delta qb_4 - \frac{\partial P_4}{\partial k_4} \Delta k_4 - \frac{\partial P_4}{\partial \mu_4} \Delta \mu_4 = 0$$

แทนรีดที่ 5

$$\Delta P_5 - \frac{\partial P_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial P_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial P_5}{\partial qf_5} \Delta qf_5 - \frac{\partial P_5}{\partial qb_5} \Delta qb_5 - \frac{\partial P_5}{\partial k_5} \Delta k_5 - \frac{\partial P_5}{\partial \mu_5} \Delta \mu_5 = 0$$

### 2.3 สมการ Forward slip

$$\Delta f_i - \frac{\partial f_i}{\partial H_i} \Delta H_i - \frac{\partial f_i}{\partial h_i} \Delta h_i - \frac{\partial f_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i - \frac{\partial f_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i - \frac{\partial f_i}{\partial k_i} \Delta k_i - \frac{\partial f_i}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i = 0$$

แทนรีดที่ 1

$$\Delta f_1 - \frac{\partial f_1}{\partial H_1} \Delta H_1 - \frac{\partial f_1}{\partial h_1} \Delta h_1 - \frac{\partial f_1}{\partial qf_1} \Delta qf_1 - \frac{\partial f_1}{\partial qb_1} \Delta qb_1 - \frac{\partial f_1}{\partial k_1} \Delta k_1 - \frac{\partial f_1}{\partial \mu_1} \Delta \mu_1 = 0$$

แทนรีดที่ 2

$$\Delta f_2 - \frac{\partial f_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial f_2}{\partial qf_2} \Delta qf_2 - \frac{\partial f_2}{\partial qb_2} \Delta qb_2 - \frac{\partial f_2}{\partial k_2} \Delta k_2 - \frac{\partial f_2}{\partial \mu_2} \Delta \mu_2 = 0$$

แทนรีดที่ 3

$$\Delta f_3 - \frac{\partial f_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial f_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial f_3}{\partial qf_3} \Delta qf_3 - \frac{\partial f_3}{\partial qb_3} \Delta qb_3 - \frac{\partial f_3}{\partial k_3} \Delta k_3 - \frac{\partial f_3}{\partial \mu_3} \Delta \mu_3 = 0$$

แทนรีดที่ 4

$$\Delta f_4 - \frac{\partial f_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial f_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial f_4}{\partial qf_4} \Delta qf_4 - \frac{\partial f_4}{\partial qb_4} \Delta qb_4 - \frac{\partial f_4}{\partial k_4} \Delta k_4 - \frac{\partial f_4}{\partial \mu_4} \Delta \mu_4 = 0$$

แทนรีดที่ 5

$$\Delta f_5 - \frac{\partial f_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial f_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial f_5}{\partial qf_5} \Delta qf_5 - \frac{\partial f_5}{\partial qb_5} \Delta qb_5 - \frac{\partial f_5}{\partial k_5} \Delta k_5 - \frac{\partial f_5}{\partial \mu_5} \Delta \mu_5 = 0$$

### 2.4 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด

$$\Delta v_{out,i} - (1 + f_i) \cdot \Delta v_{R,i} - \Delta f_i \cdot v_{R,i} = 0$$

แทนรีดที่ 1  $\Delta v_{out,1} - (1 + f_1) \cdot \Delta v_{R,1} - \Delta f_1 \cdot v_{R,1} = 0$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta v_{out,2} - (1 + f_2) \cdot \Delta v_{R,2} - \Delta f_2 \cdot v_{R,2} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta v_{out,3} - (1 + f_3) \cdot \Delta v_{R,3} - \Delta f_3 \cdot v_{R,3} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta v_{out,4} - (1 + f_4) \cdot \Delta v_{R,4} - \Delta f_4 \cdot v_{R,4} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta v_{out,5} - (1 + f_5) \cdot \Delta v_{R,5} - \Delta f_5 \cdot v_{R,5} = 0$$

## 2.5 สมการกฏทรงมวล

$$\Delta H_i \cdot v_{in,i} + H_i \cdot \Delta v_{in,i} - \Delta h_i \cdot v_{out,i} - h_i \cdot \Delta v_{out,i} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta H_1 \cdot v_{in,1} + H_1 \cdot \Delta v_{in,1} - \Delta h_1 \cdot v_{out,1} - h_1 \cdot \Delta v_{out,1} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta H_2 \cdot v_{in,2} + H_2 \cdot \Delta v_{in,2} - \Delta h_2 \cdot v_{out,2} - h_2 \cdot \Delta v_{out,2} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta H_3 \cdot v_{in,3} + H_3 \cdot \Delta v_{in,3} - \Delta h_3 \cdot v_{out,3} - h_3 \cdot \Delta v_{out,3} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta H_4 \cdot v_{in,4} + H_4 \cdot \Delta v_{in,4} - \Delta h_4 \cdot v_{out,4} - h_4 \cdot \Delta v_{out,4} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta H_5 \cdot v_{in,5} + H_5 \cdot \Delta v_{in,5} - \Delta h_5 \cdot v_{out,5} - h_5 \cdot \Delta v_{out,5} = 0$$

## 2.6 สมการความสมดุลของพลังงานคั้งระหว่างแท่นรีด

$$h_i \cdot \Delta qf_i + qf_i \cdot \Delta h_i - H_{i+1} \cdot \Delta qb_{i+1} - \Delta H_{i+1} \cdot qb_{i+1} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad h_1 \cdot \Delta qf_1 + qf_1 \cdot \Delta h_1 - H_2 \cdot \Delta qb_2 - \Delta H_2 \cdot qb_2 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad h_2 \cdot \Delta qf_2 + qf_2 \cdot \Delta h_2 - H_3 \cdot \Delta qb_3 - \Delta H_3 \cdot qb_3 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad h_3 \cdot \Delta qf_3 + qf_3 \cdot \Delta h_3 - H_4 \cdot \Delta qb_4 - \Delta H_4 \cdot qb_4 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad h_4 \cdot \Delta qf_4 + qf_4 \cdot \Delta h_4 - H_5 \cdot \Delta qb_5 - \Delta H_5 \cdot qb_5 = 0$$

## 2.7 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด

$$\frac{\Delta qf_i \cdot L}{E \cdot dt} - \Delta v_{in,i+1} - \Delta v_{out,i} = v_{in,i+1} - v_{out,i}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \frac{\Delta qf_1 \cdot L}{E \cdot dt} - \Delta v_{in,2} - \Delta v_{out,1} = v_{in,2} - v_{out,1}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \frac{\Delta qf_2 \cdot L}{E \cdot dt} - \Delta v_{in,3} - \Delta v_{out,2} = v_{in,3} - v_{out,2}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \frac{\Delta qf_3 \cdot L}{E \cdot dt} - \Delta v_{in,4} - \Delta v_{out,3} = v_{in,4} - v_{out,3}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \frac{\Delta qf_4 \cdot L}{E \cdot dt} - \Delta v_{in,5} - \Delta v_{out,4} = v_{in,5} - v_{out,4}$$

สมการที่ได้จากการแจกแจงทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์มีทั้งสิ้น 33 สมการ โดยมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (ได้แก่พวกที่ติดค่า  $\Delta$  ต่างๆ) จำนวน 50 ตัวแปร ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรได้แก่ค่าองค์ประกอบการรีดที่สามารถคำนวณและหาค่าได้ รวมทั้งค่า Derivative ของค่าองค์ประกอบการรีด

ในการคำนวณแก้สมการหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเหล่านี้ จำเป็นต้องแก้สมการทั้งหมดพร้อมกัน โดยใช้เมตริกซ์ช่วยแก้สมการหาค่าตัวแปร แต่การแก้สมการนั้นจำนวนสมการต้องไม่น้อยกว่าจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะกำหนดค่าตัวแปรไม่ทราบค่า 17 ตัว ทำให้เหลือตัวแปรไม่ทราบค่าเพียง 33 ตัว เท่ากับ จำนวนสมการพอดี

## ตารางที่ 3.2 ตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

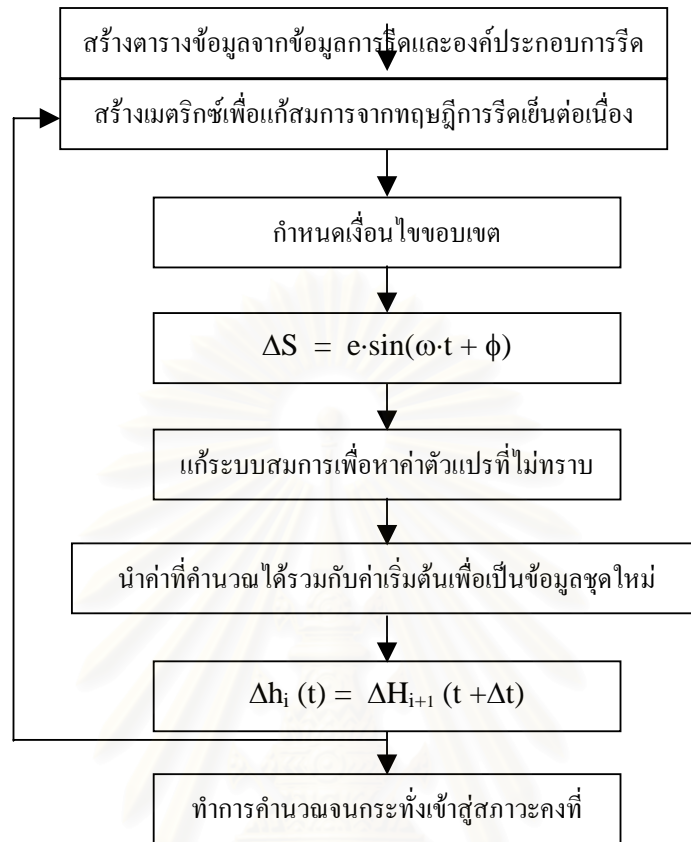
stand	1	2	3	4	5
$\Delta h$	1	1	1	1	1
$\Delta H$	0	0	0	0	0
$\Delta P$	1	1	1	1	1
$\Delta qf$	1	1	1	1	0
$\Delta qb$	0	1	1	1	1
$\Delta f$	1	1	1	1	1
$\Delta V_{in}$	1	1	1	1	1
$\Delta V_{out}$	1	1	1	1	1
$\Delta S$	0	0	0	0	0
$\Delta V_r$	0	0	0	0	0

เลข 0 เป็น ตัวแปรที่กำหนดค่าให้เท่ากับ 0 หรือหมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีทั้งสิ้น 17 ตัวแปร  
เลข 1 เป็น ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าซึ่งจะถูกแก้สมการหาค่าด้วยเมตริกซ์ มีทั้งสิ้น 33 ตัวแปร

### 3 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการจำลองแท่นรีด 5 แท่นรีด จากสมการและทฤษฎีต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว นำมาเขียนโปรแกรมเพื่อที่จะคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการรีดต่างๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้นี้เมื่อรวมกับค่าเริ่มต้นของตัวเองแล้ว จะได้ค่าองค์ประกอบการรีดชุดใหม่ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเหล่านี้ในช่วงเวลาถัดไป จากนั้นทำการคำนวณซ้ำโดยใช้ข้อมูลชุดใหม่จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่สามารถแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก โดยมีโปรแกรมหลักดังนี้

3.1 โปรแกรม Main เป็นโปรแกรมหลักในการคำนวณ โดยจะไปเรียกโปรแกรม Data เพื่ออ่านข้อมูลแล้วนำไปสร้างเมทริกซ์ด้วยการเรียกโปรแกรม Matrix และจะคำนวณจำนวนรอบหรือเวลาที่ตั้งไว้

3.2 โปรแกรม Data เป็นโปรแกรมอ่านข้อมูลเริ่มต้นและข้อมูลชุดใหม่หลังจากรวมผลการคำนวณแต่ละรอบเข้าสู่หน่วยความจำ

3.3 โปรแกรม Matrix เป็นโปรแกรมสร้างเมทริกซ์จากข้อมูลองค์ประกอบการวัดที่อ่านจากโปรแกรม Data โดยตรงและที่คำนวณได้ โดยจะอ่านค่าเงื่อนไขขอบเขตและเรียกโปรแกรม Solve เพื่อแก้สมการ

3.4 โปรแกรม Solve เป็นโปรแกรมแก้สมการหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าด้วยหลักการแก้สมการด้วยวิธีเมทริกซ์



#### 4 การคำนวณและวิเคราะห์ผล

4.1 ทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1, 2, 3,4 และ 5 ซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1

4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 ซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.005, 0.01 และ 0.03 มม. ที่แท่นรีดที่ 1

4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1, 2, 3,4 และ 5 ซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1, 2, 3,4 และ 5 ตามลำดับ

4.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 5 อันแท่นรีดสุดท้าย ซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5

4.5 ทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1, 2, 3,4 และ 5 ซึ่งเป็นผลกระทบจากค่าระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2

4.6 ทำการคำนวณโดยใช้สภาพเงื่อนไขสอดคล้องกับการรีดจริงให้มากที่สุด แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก

#### 5 วิธีลดผลกระทบการเยื้องศูนย์กลาง

ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีลดผลกระทบจากการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธีดังต่อไปนี้

5.1 วิธี PI Control

5.2 วิธีปรับค่า Mill Modulus

5.3 วิธี Roll Gap Control

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการคำนวณและอภิปราย

#### 4.1 ผลของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ต่อความหนาขาออกของแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 1, 3 และ 5

จากแบบจำลอง เมื่อแท่นรีดที่ 1 มีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 1 มีลักษณะเป็นคาบดังแสดงในรูปที่ 4.1.1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนามากที่สุด  $\pm 0.004$  มม. เมื่อแผ่นเหล็กผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 3 และ 5 การเปลี่ยนแปลงความหนาสูงสุดมีค่าน้อยลง โดยมีค่าสูงสุดประมาณ  $\pm 0.0014$  มม. และ  $\pm 0.0006$  มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็ก ซึ่งเกิดจากการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดของแท่นรีดที่ 1 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1.3 การเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 มีลักษณะเป็นคาบเช่นเดียวกันและเปลี่ยนแปลงในลักษณะตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก กล่าวคือแรงรีดลดลงเมื่อความหนาขาออกเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาขาออกลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงรีดมากที่สุด  $\pm 3000$  กก. เมื่อแผ่นเหล็กผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 3 และ 5 การเปลี่ยนแปลงแรงรีดสูงสุดมีค่าน้อยลง โดยมีค่าสูงสุดประมาณ  $\pm 600$  กก. และ  $\pm 400$  กก. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1.1

ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด ขณะทำการรีด ระยะห่างระหว่างลูกรีดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากแท่นรีดมีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.01 มม. แต่การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมีค่ามากที่สุด  $\pm 0.004$  มม. ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดมีลักษณะตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด กล่าวคือเมื่อระยะห่างระหว่างลูกรีดเพิ่มขึ้น (การเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีดมีค่าเป็นบวก) แรงรีดจะลดลง (การเปลี่ยนแปลงของแรงรีดมีค่าเป็นลบ) ทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกรีดดังแสดงในรูปที่ 4.1.1 และ 4.1.2 และเนื่องจากการรีดจริง มีระยะห่างระหว่างแท่นรีดแต่ละแท่น ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาที่แผ่นเหล็กเคลื่อนที่จากแท่นหนึ่งไปสู่อีกแท่นหนึ่ง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 1 จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาที่แท่นรีดที่ 2, 3, 4 และ 5 ทั้งนี้เมื่อแผ่นเหล็กที่มีความหนาเปลี่ยนไปนี้มาถึงแท่นรีดที่ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าที่แท่นรีดที่ 3 ส่งผลต่อเนื่องไปยังการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกและการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดของแท่นรีดที่ 3 กล่าวคือเมื่อความหนาขาเข้าที่แท่นรีดที่ 3 เพิ่มขึ้น (การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้ามีค่าเป็นบวก) ทำให้ความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 3 เพิ่มขึ้นด้วย (การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมีค่าเป็นบวก) เมื่อความหนาขาเข้าที่แท่นรีดที่ 3 ลดลง (การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้ามีค่าเป็นลบ) ทำให้

ความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 3 ลดลงด้วย (การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมีค่าเป็นลบ) ดังแสดงในรูปที่ 4.1.1 และ 4.1.2 สำหรับผลที่เกิดขึ้นที่แท่นรีดที่ 5 สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน

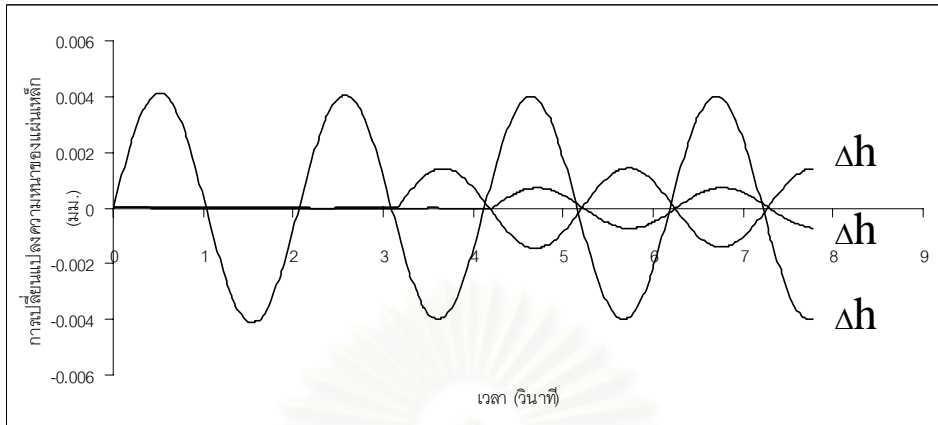
ตารางข้อมูลการรีด

stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.274	0.643	0.354	0.232
hout (mm.)	1.274	0.643	0.354	0.232	0.160
Back tension (kg/sq.mm.)	4.0	15.5	14.5	14.0	12.5
Front tension (kg/sq.mm.)	15.5	14.5	14.0	12.5	6.8
Vr (mm./s)	3033	5667	10150	16067	24967
Strip width (mm.)	928	928	928	928	928
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

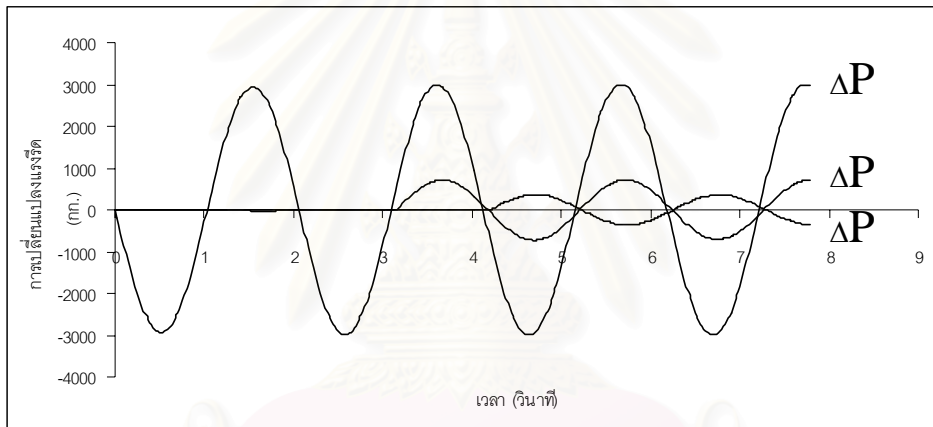
<i>stand</i>	1	2	3	4	5
eccentricity	0.01	0	0	0	0

เลข 0.01 ในช่อง Stand ที่ 1 หมายถึง มีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ขนาด 0.01 มม.

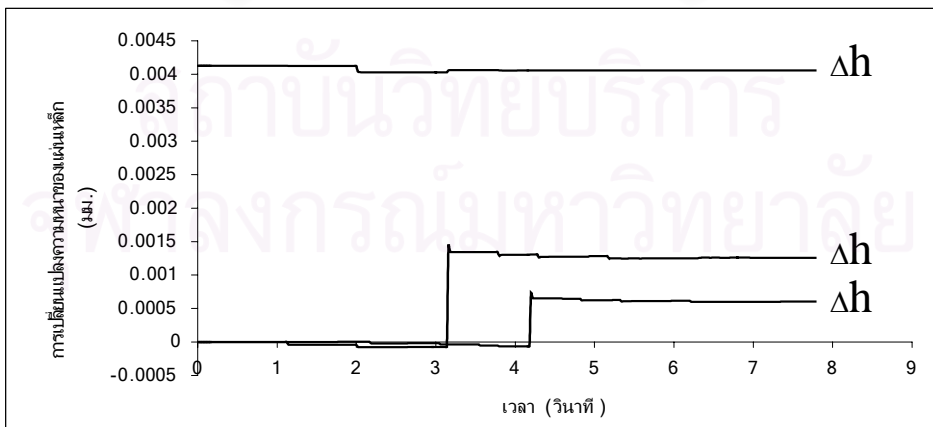
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1



รูปที่ 4.1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเอียงศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1



รูปที่ 4.1.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีด 1, 3 และ 5 โดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดของแท่นรีดที่ 1 ขนาด 0.01 มม.

#### 4.2 ผลการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดเดียวกันต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแผ่นเหล็ก

การเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ขนาด 0.005, 0.01 และ 0.03 มม. ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมากที่สุด  $\pm 0.002$ ,  $\pm 0.004$  และ  $\pm 0.012$  มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2.1 เห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาที่เกิดขึ้นเพิ่มตามสัดส่วนของขนาดการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีด โดยเมื่อขนาดการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดเพิ่มเป็น 2 เท่าจาก 0.005 มม. เป็น 0.01 มม. การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมากที่สุดเพิ่มเป็น 2 เท่า จาก  $\pm 0.002$  มม. เป็น  $\pm 0.004$  มม. ด้วย และเมื่อเพิ่มขนาดการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดเป็น 3 เท่าจาก 0.01 มม. เป็น 0.03 มม. การเปลี่ยนแปลงความหนาเพิ่มเป็น 3 เท่าด้วยเช่นกันจาก  $\pm 0.004$  เป็น  $\pm 0.012$  มม. ผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดและแรงดึงระหว่างแท่นรีดเป็นเช่นเดียวกับผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก กล่าวคือ เมื่อการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ขนาด 0.005, 0.01 และ 0.03 มม. ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดมากที่สุด  $\pm 1500$ ,  $\pm 3000$  และ  $\pm 9000$  กก. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2.2 และ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดมากที่สุด  $\pm 0.015$ ,  $\pm 0.03$  และ  $\pm 0.09$  กก./ตร.ม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3.3

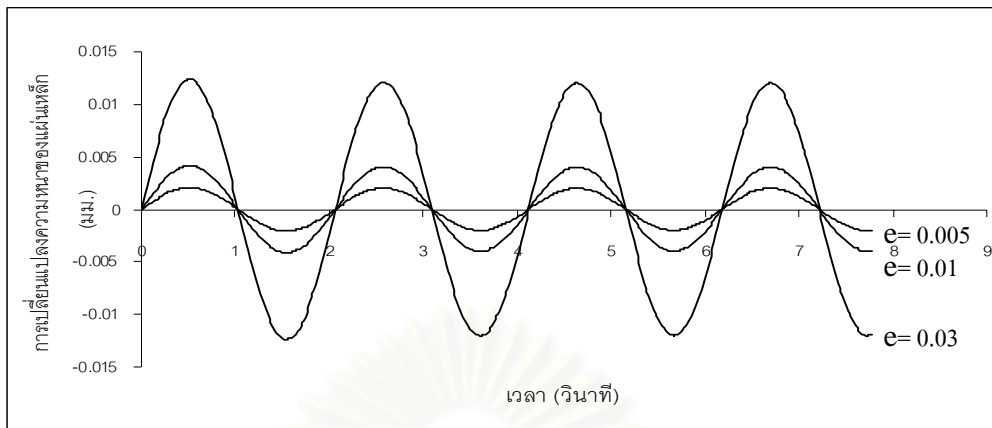
สาเหตุที่เกิดผลเช่นนี้ อธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดและการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีด จากรูปที่ 4.2.2 และ 4.2.3 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดที่เกิดจากขนาดการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดต่างกัน จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดมากที่สุดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับขนาดการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีด สำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีด มีลักษณะเดียวกัน คือ มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับขนาดของการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีด แต่ในช่วง 2 วินาทีแรก การเปลี่ยนแปลงจะน้อยและเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เพราะในช่วงแรกนั้นแผ่นเหล็กที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ยังมาไม่ถึงแท่นรีดที่ 2 ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบการรีด (กล่าวไว้ใน หัวข้อ 3.1) บางตัวเช่น ระยะห่างระหว่างลูกรีด แรงรีด แรงดึงระหว่างแท่นรีด และ ความหนาขาออก เกิดเฉพาะในแท่นรีดที่ 1 จึงมีการเปลี่ยนแปลงแรงดึงน้อย เมื่อแผ่นเหล็กที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงนี้มาถึงแท่นรีดที่ 2 (หลังจากเวลาผ่านไป 2 วินาทีในรูปที่ 4.2.3) เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าของแท่นรีดที่ 2 ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดเพิ่มขึ้นโดยขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก  $\pm 0.01$  เป็น  $\pm 0.07$  กก./ตร.ม. และเมื่อแผ่นเหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 2 นี้มาถึงแท่นรีดที่ 3 (หลังจากเวลาผ่านไป 3 วินาทีในรูปที่ 4.2.3) เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าของแท่นรีดที่ 3 ทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก  $\pm 0.07$  เป็น  $\pm 0.09$  กก./ตร.ม.

ตารางข้อมูลการรีด

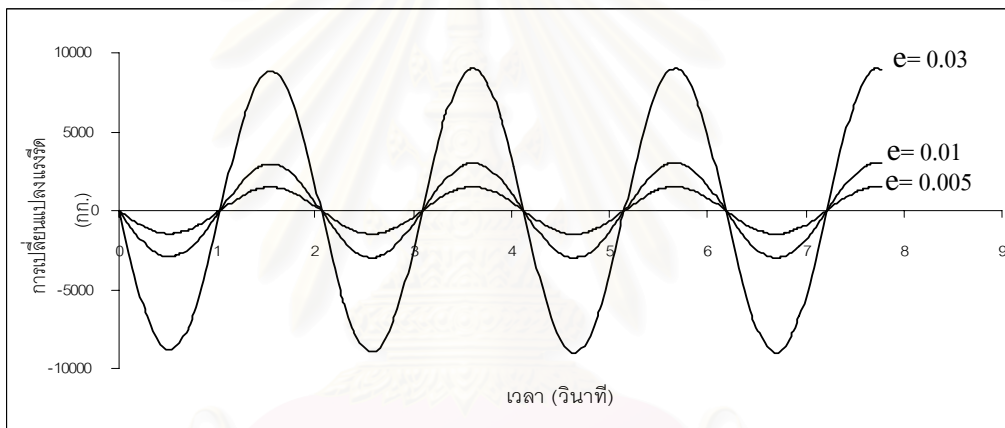
stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.274	0.643	0.354	0.232
hout (mm.)	1.274	0.643	0.354	0.232	0.160
Back tension (kg/sq.mm.)	4.0	15.5	14.5	14.0	12.5
Front tension (kg/sq.mm.)	15.5	14.5	14.0	12.5	6.8
Vr (mm./s)	3033	5667	10150	16067	24967
Strip width (mm.)	928	928	928	928	928
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

<i>stand</i>	1	2	3	4	5
e = 0.005	0.005	0	0	0	0
e = 0.01	0.01	0	0	0	0
e = 0.03	0.03	0	0	0	0

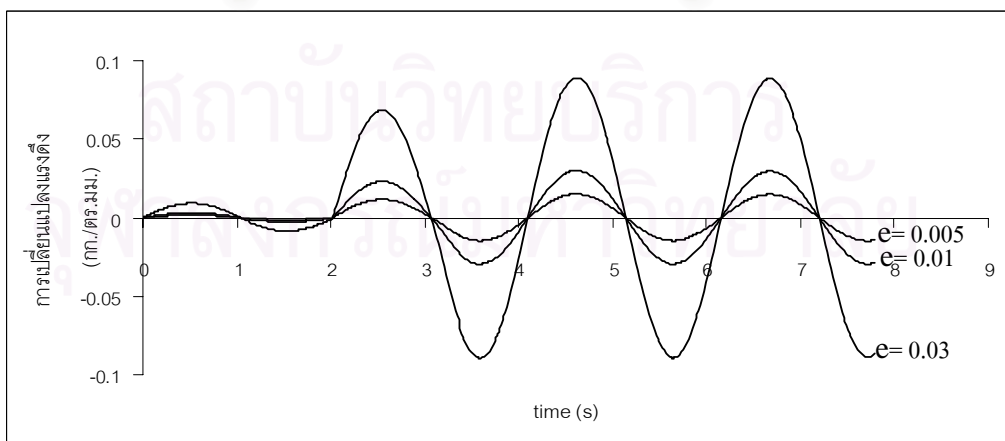
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2.1 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเปลือกที่แท่นรีดที่ 1 ซึ่งมีการเอียงศูนย์กลาง 0.005, 0.01 และ 0.03 มม.



รูปที่ 4.2.2 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 ซึ่งมีการเอียงศูนย์กลาง 0.005, 0.01 และ 0.03 มม.



รูปที่ 4.2.3 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 1 และ 2 ซึ่งมีการเอียงศูนย์กลาง 0.005, 0.01 และ 0.03 มม.

#### 4.3 ผลของการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดต่างแท่นกันต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกในแท่นรีดที่มีการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริด

การเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดต่างแท่นกัน แม้ว่ามิขนาดเท่ากัน แต่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3.1 และ 4.3.2 การเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดขนาด 0.01 มม. ในแท่นรีดที่ 1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดตัวมันเองมากที่สุด ในขณะที่การเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดขนาดเดียวกันในแท่นรีดที่ 2, 3, 4 และ 5 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 2, 3, 4 และ 5 น้อยกว่ามาก โดยการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 1 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 มากที่สุด  $\pm 0.004$  มม. การเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 2 และ 3 มากที่สุด  $\pm 0.0003$  มม. และการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 5 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 4 และ 5 มากที่สุด  $\pm 0.0002$  มม. ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tajima, et al<sup>1</sup> ซึ่งกล่าวไว้ว่าผลกระทบจากการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 1 ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนามีค่ามากกว่าผลกระทบจากการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 2 - 5 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดนั้น การเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 1 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 มากที่สุด  $\pm 3000$  กก. การเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 3 มากที่สุด  $\pm 5000$  กก. และการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริดในแท่นรีดที่ 5 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 5000$  กก.

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด จากรูปที่ 4.3.3 และ 4.3.4 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 3 และ 5 เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 และมีลักษณะตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกริด ทำให้ลดผลจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกริดเนื่องจากการเชื่อมศูนย์กลางของลูกริด กล่าวคือ ในขณะที่ระยะห่างระหว่างลูกริดเพิ่มขึ้น (การเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นบวก) แรงรีดจะลดลง (การเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นลบ) แต่ผลจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกริดมีมากกว่า ดังนั้นความหนาขาออกจึงเพิ่มขึ้น (การเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นบวก) ยิ่งแรงรีดลดลงมาก ความหนาขาออกยิ่งเพิ่มขึ้นน้อย

อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากการเชื่อมศูนย์กลางในแท่นรีดที่ 3 และ 5 เกิดขึ้นน้อยกว่าผลจากการเชื่อมศูนย์กลางในแท่นรีดที่ 1 คือ แท่นรีดที่ 3 และ 5 มีการกระจายผลกระทบไปสู่แท่นรีดก่อนหน้าผ่านทางแรงดึงระหว่างแท่นรีด กล่าวคือ ในกรณีการเชื่อมศูนย์กลางในแท่นรีดที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกริด และการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด ในแท่นรีดที่ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีด 2 และ 3 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบการรีดในแท่นรีดที่ 2 ด้วย โดยเมื่อแรงดึงระหว่างแท่นรีด 2 และ 3 เพิ่มขึ้น (การเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นบวก) ความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 2 และ 3 มีค่าลดลง และเมื่อแรงดึงระหว่างแท่นรีด 2 และ 3 ลดลง ความหนา

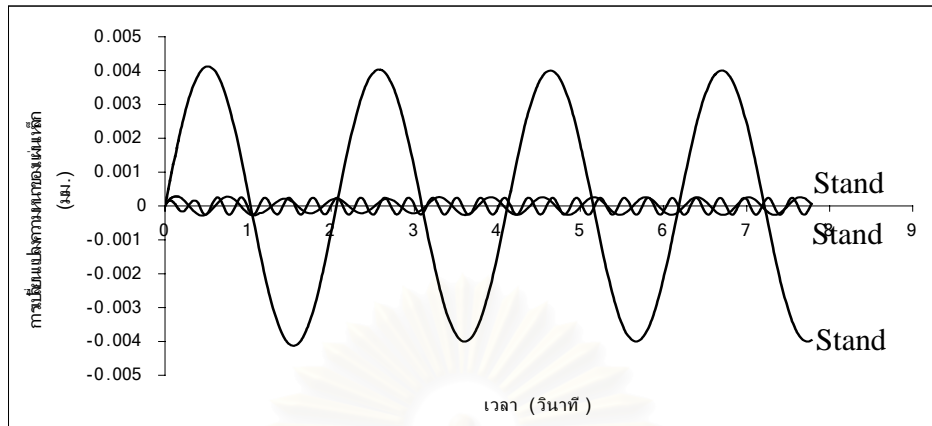


ขาออกจากแท่นรีดที่ 2 และ 3 มีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นผลจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดในแท่นรีดที่ 2 จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดในแท่นรีดที่ 1 สำหรับกรณีการเยื้องศูนย์ในแท่นรีดที่ 5 มีเหตุผลเดียวกัน คือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดในแท่นรีดที่ 5 จะส่งผลกระทบต่อการทำงานขององค์ประกอบการรีดในแท่นรีดที่ 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ

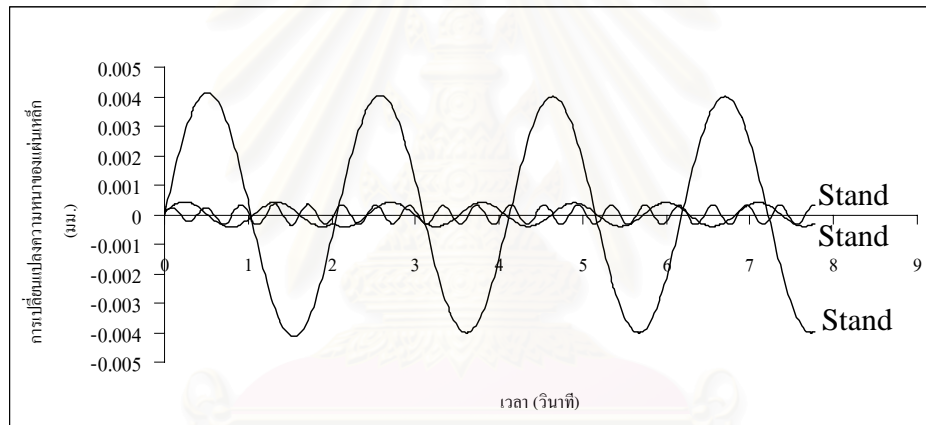
ตารางข้อมูลการรีด

stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.274	0.643	0.354	0.232
hout (mm.)	1.274	0.643	0.354	0.232	0.160
Back tension (kg/sq.mm.)	4.0	15.5	14.5	14.0	12.5
Front tension (kg/sq.mm.)	15.5	14.5	14.0	12.5	6.8
Vr (mm./s)	3033	5667	10150	16067	24967
Strip width (mm.)	928	928	928	928	928
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

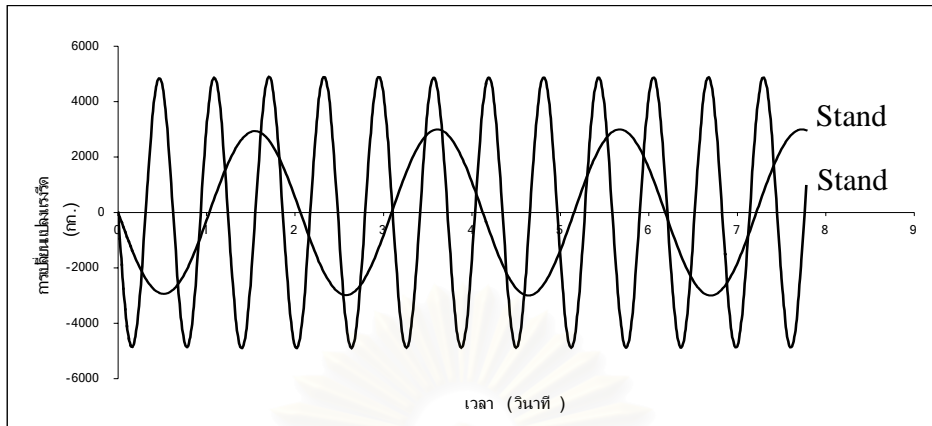
<i>stand</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Stand 1	0.01	0	0	0	0
Stand 2	0	0.01	0	0	0
Stand 3	0	0	0.01	0	0
Stand 1	0	0	0	0.01	0
Stand 5	0	0	0	0	0.01



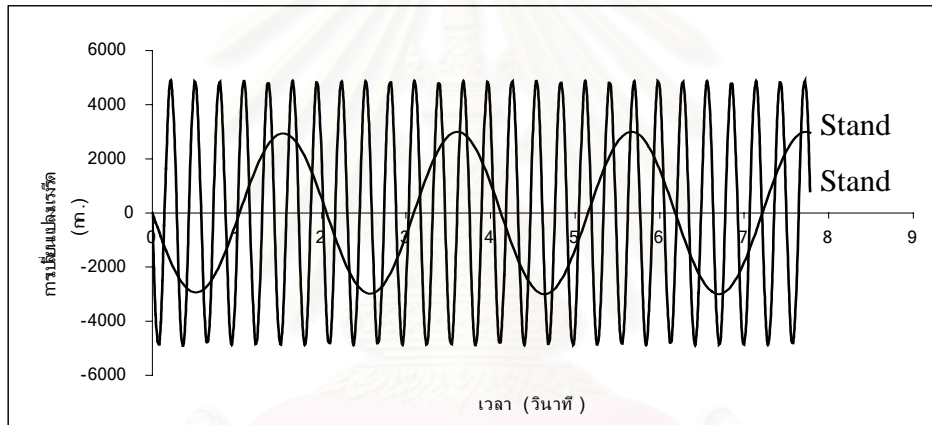
รูปที่ 4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาออกของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 1, 3 และ 5 เนื่องจากมีการเชื่อม  
ศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1, 3 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาออกของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 1, 2 และ 4 เนื่องจากมีการเชื่อม  
ศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1, 2 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3.3 การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 3 เนื่องจากการเยื้องศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3.4 การเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 1 และ 5 เนื่องจากการเยื้องศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกสุดท้าย

รูปที่ 4.4.1 และ 4.4.2 แสดงการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. ในแท่นรีดที่ 1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 5 มากที่สุด ในขณะที่การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาดเดียวกันในแท่นรีดที่ 2, 3, 4 และ 5 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 5 น้อยกว่า โดยการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 0.0007$  มม. การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 2 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 0.00018$  มม. การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 0.0001$  มม. การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 4 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 0.0002$  มม. และการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 0.0003$  มม. สำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดนั้น การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 350$  กก. การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 30$  กก. และการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดที่แท่นรีดที่ 5 มากที่สุด  $\pm 5000$  กก

ผลของการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาดเดียวกันแต่แท่นรีดต่างแท่นกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 ซึ่งเป็นแท่นสุดท้ายของแบบจำลอง ไม่เท่ากัน ในแบบจำลองนี้ เป็นการจำลอง 5 แท่นรีด ดังนั้นความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 จึงเป็นความหนาขาออกสุดท้าย การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดสุดท้ายมากที่สุด และผลจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 มีค่ามากกว่าผลจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดในแท่นรีดที่ 5 ทั้ง 3 กรณี ในรูปที่ 4.4.3 และ 4.4.4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดในแท่นรีดที่ 5 ซึ่งเกิดจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในขณะที่การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 และ 3 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 5 น้อยกว่า การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกรีดและแรงรีด มีผลให้ความหนาขาออกจากแท่นรีดนั้นเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 จะลดลงเมื่อผ่านแท่นรีดที่เหลือ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 มีค่ามากกว่าอีก 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 4.4.1 และไม่มีแท่นรีดก่อนหน้าที่สามารถแบ่งรับผลกระทบผ่านแรงดึงระหว่างแท่นรีดได้ จึงมีการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดสุดท้ายมากที่สุด ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 3 จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 และ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 5 จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 มีขนาดสูงสุดเท่ากัน และมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 1 จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.4.1 รวม

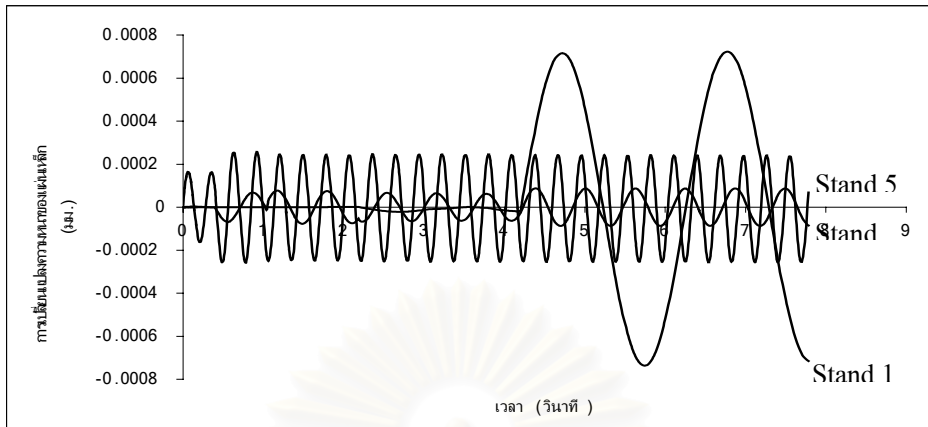
ทั้งยังมีแท่นรีดก่อนหน้าที่จะสามารถแบ่งรับผลกระทบผ่านแรงดึงระหว่างแท่นรีด โดยเฉพาะแท่นรีดที่ 3 มีทั้งแท่นรีดก่อนหน้าและแท่นรีดถัดไปอีก 2 แท่นที่ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกผ่านแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 2 และ 3 กับ แรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 3 และ 4 ที่เพิ่มขึ้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกรีดมีค่าเป็นบวก และลดลงเมื่อการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกรีดมีค่าเป็นลบ จึงมีการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดสุดท้ายน้อยที่สุด สำหรับการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 ไม่มีแท่นรีดถัดไปที่จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก จึงมีการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมากกว่าผลจากการเอียงศูนย์ในแท่นรีดที่ 3

#### ตารางข้อมูลการรีด

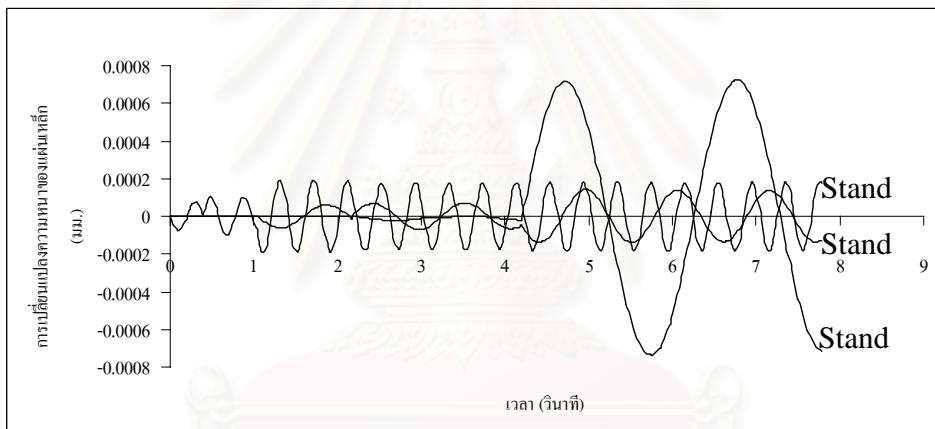
stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.274	0.643	0.354	0.232
hout (mm.)	1.274	0.643	0.354	0.232	0.160
Back tension (kg/sq.mm.)	4.0	15.5	14.5	14.0	12.5
Front tension (kg/sq.mm.)	15.5	14.5	14.0	12.5	6.8
Vr (mm./s)	3033	5667	10150	16067	24967
Strip width (mm.)	928	928	928	928	928
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

stand	1	2	3	4	5
Stand 1	0.01	0	0	0	0
Stand 2	0	0.01	0	0	0
Stand 3	0	0	0.01	0	0
Stand 4	0	0	0	0.01	0
Stand 5	0	0	0	0	0.01

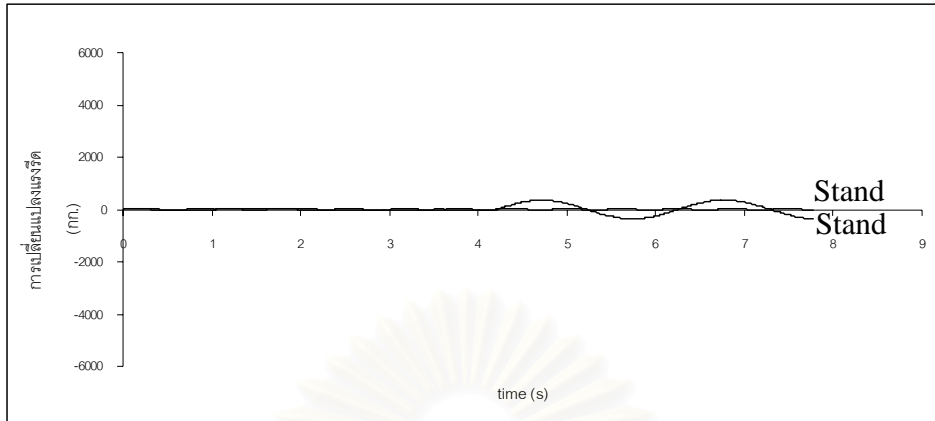




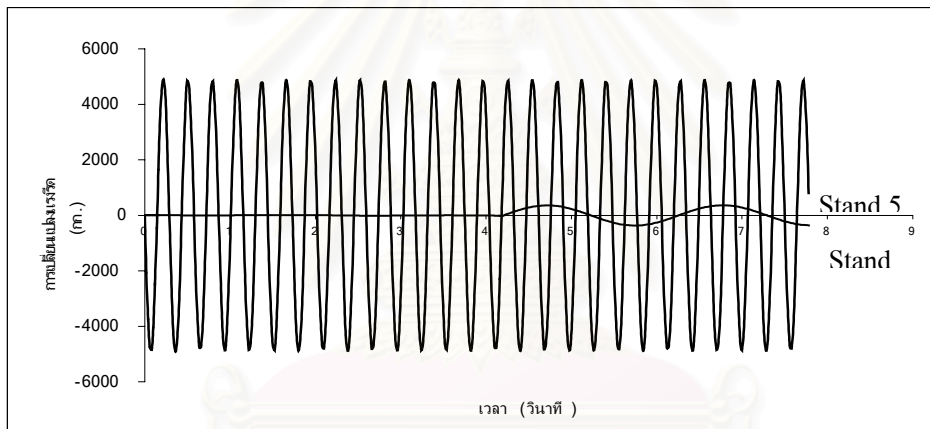
รูปที่ 4.4.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากการเข็งศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1, 3 และ 5



รูปที่ 4.4.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากการเข็งศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1, 2 และ 4



รูปที่ 4.4.3 การเปลี่ยนแปลงแรงเร่งที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากมีการเข็งศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีด 1 และ 3



รูปที่ 4.4.4 การเปลี่ยนแปลงแรงเร่งที่แท่นรีดที่ 5 เนื่องจากมีการเข็งศูนย์ขนาด 0.01 มม.ที่แท่นรีด 1 และ 5



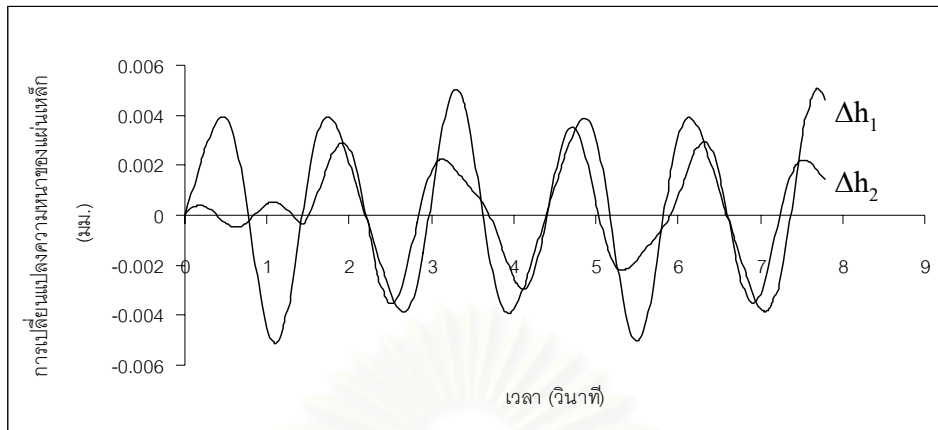
4.5 ผลกระทบจากการมีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 และ 2 ต่อความหนาขาออกของแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดจากแท่นรีดทั้ง 5 แท่น

เมื่อแท่นรีดที่ 1 และ 2 มีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. ทำให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 1 และ 2 มีลักษณะเป็นคานดั่งแสดงในรูปที่ 4.5.1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 และ 2 มากที่สุดไม่คงที่โดยมีค่าเท่ากับ  $\pm 0.0045$  มม. และ  $\pm 0.0035$  ตามลำดับ เมื่อแผ่นเหล็กผ่านการรีดจากแท่นรีดที่ 3, 4 และ 5 การเปลี่ยนแปลงความหนาสูงสุดมีค่าน้อยลงและไม่คงที่เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 และ 2 โดยมีค่าสูงสุดประมาณ  $\pm 0.0022$  มม. ,  $\pm 0.0015$  มม. และ  $\pm 0.0012$  มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5.2 การเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 มีลักษณะเป็นคานและค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดไม่คงที่เช่นเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงรีดสูงสุดที่แท่นรีดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เท่ากับ  $\pm 5800$ ,  $\pm 3100$ ,  $\pm 1100$ ,  $\pm 770$  และ  $\pm 580$  กก. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5.3 และ 4.5.4 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 และ 2 ต่างส่งผลกระทบซึ่งกันและกันผ่านแรงดึงระหว่างแท่นรีดดังแสดงในรูปที่ 4.5.5 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่

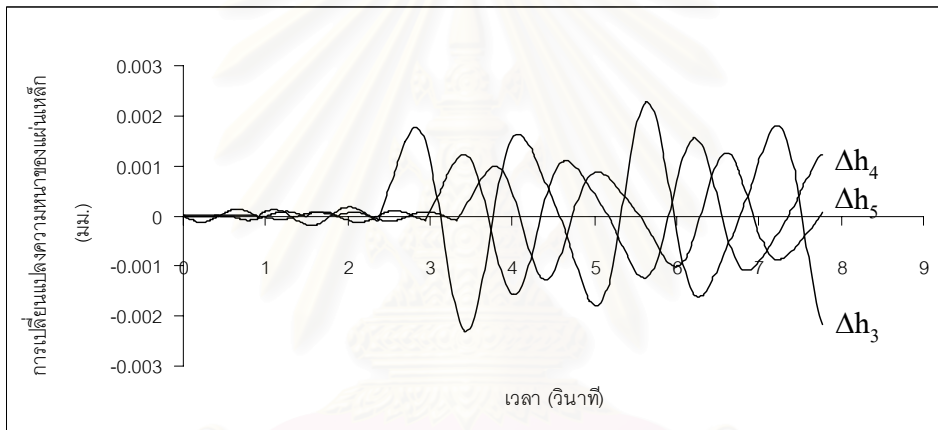
ตารางข้อมูลการรีด

stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.274	0.643	0.354	0.232
hout (mm.)	1.274	0.643	0.354	0.232	0.160
Back tension (kg/sq.mm.)	4.0	15.5	14.5	14.0	12.5
Front tension (kg/sq.mm.)	15.5	14.5	14.0	12.5	6.8
Vr (mm./s)	3033	5667	10150	16067	24967
Strip width (mm.)	928	928	928	928	928
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

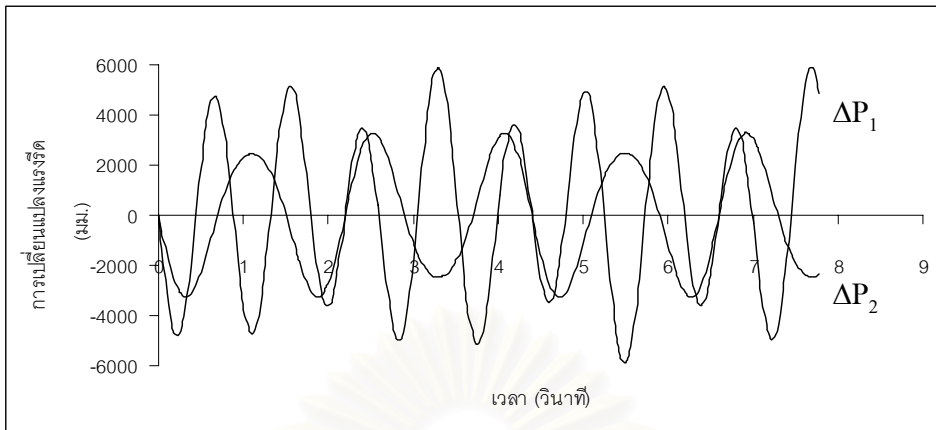
stand	1	2	3	4	5
eccentricity	0.01	0.01	0	0	0



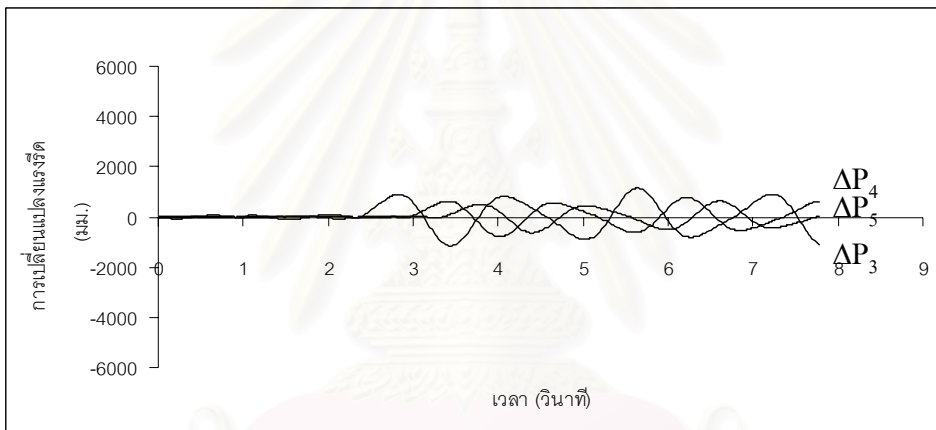
รูปที่ 4.5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นวัดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นผลจากการเข็งศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นวัดที่ 1 และ 2



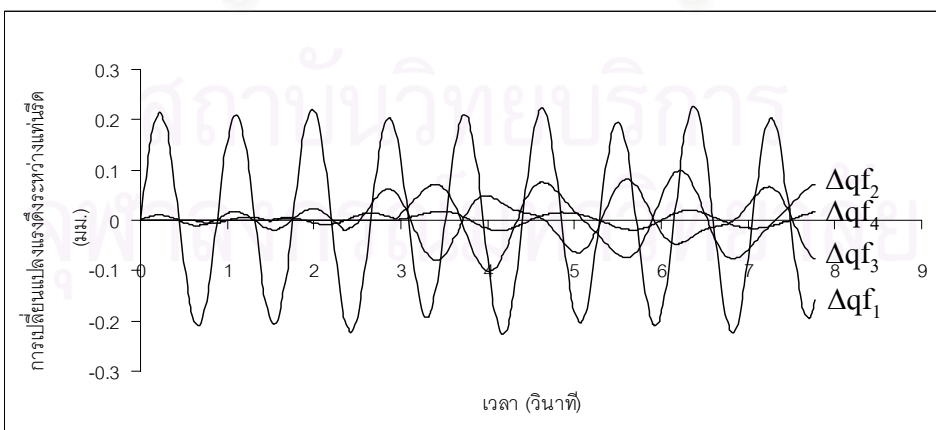
รูปที่ 4.5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นวัดที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเข็งศูนย์ขนาด 0.01 มม. ที่แท่นวัดที่ 1 และ 2



รูปที่ 4.5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แท่นรีดที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นผลจากการเอียงศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2



รูปที่ 4.5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แท่นรีดที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นผลจากการเอียงศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2



รูปที่ 4.5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่างแท่นรีด ซึ่งเป็นผลจากการเอียงศูนย์กลางขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 และ 2

#### 4.6 ผลการคำนวณจากแบบจำลองและผลจากการวัดจริงของการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1

ผลจากการวัดจริงซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเป็นข้อมูลที่ได้รับความสะดวกจากโรงงานเหล็กแผ่นรีดเย็นไทย การคำนวณใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าที่แท่นรีดที่ 1, เงื่อนไขและตารางการวัดของการวัดจริงมาคำนวณในแบบจำลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6.1 ตารางข้อมูลในแต่ละชุดข้อมูลสามารถปรับเปลี่ยนตามสภาวะการรีดและคุณสมบัติของวัสดุได้ ซึ่งในการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก จากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองนี้ เก็บในลักษณะ หนึ่งชุดข้อมูลต่อหนึ่งขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะแสดงเป็นตัวอย่างในบทที่ 1 ชุดข้อมูล และแสดงผลของชุดข้อมูลอีก 8 ชุดในภาคผนวก ข

ผลการคำนวณจากแบบจำลองถูกแสดงใน 3 กรณี คือ

1. เมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าเท่านั้น โดยตัวแปรอื่นคงที่
2. เมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดเท่านั้น โดยตัวแปรอื่นคงที่
3. เมื่อมีทั้งการรบกวนการรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าและการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด โดยตัวแปรอื่นคงที่

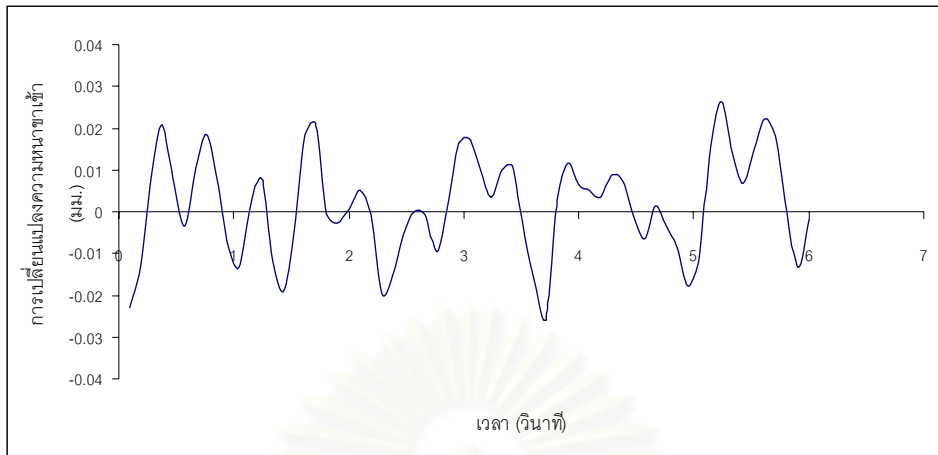
ผลจากการคำนวณเมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าเท่านั้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6.2 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6.1 แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่คำนวณได้จะมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้า ผลจากการคำนวณเมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดเท่านั้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6.3 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบ sinusoidal มีคาบที่แน่นอน และการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากการคำนวณเมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าและการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6.4 แสดงให้เห็นถึงผลที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับผลการวัดจริงซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6.5 เนื่องจากมีผลกระทบจากความหนาขาเข้าที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถแสดงผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบวัฏจักร และมีคาบเดียวกัน ได้อย่างชัดเจน เพราะในการวัดจริงของโรงงานอุตสาหกรรม ความหนาขาเข้าของวัตถุดิบไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดไม่มากนัก และเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองและผลจากการวัดจริงในรูปที่ 4.6.4 และ 4.6.5 แสดงให้เห็นถึงผลของการคำนวณที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับผลการวัดจริง แต่ยังคงมีความแตกต่างของขนาดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.6.6 ซึ่งมีสาเหตุจากหลายส่วนด้วยกัน คือ

1. การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าจากข้อมูลการรีดจริงซึ่งเป็นกราฟมีความคลาดเคลื่อน เมื่อนำไปป้อนค่าเพื่อทำการคำนวณในแบบจำลอง จึงได้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนด้วย
2. การสึกของลูกรีด ทำให้ผิวของลูกรีดไม่เรียบ ทำให้ค่าแรงเสียดทานเปลี่ยนแปลง
3. การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารหล่อลื่นเป็นผลให้ค่าแรงเสียดทานเปลี่ยนแปลง ทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากผลรีดจริง

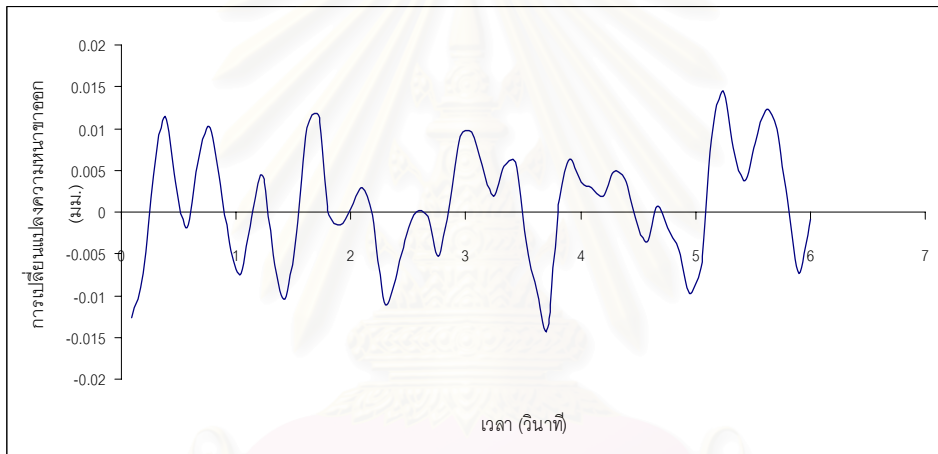
ตารางข้อมูล

stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	3.800	2.849	2.185	1.665	1.260
hout (mm.)	2.849	2.185	1.665	1.260	1.197
Back tension (kg/sq.mm.)	2.9	15.9	15.4	14.0	12.9
Front tension (kg/sq.mm.)	15.9	15.4	14.0	12.9	3.9
Vr (mm./s)	3683	5067	6617	8983	11650
Strip width (mm.)	1236	1236	1236	1236	1236
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

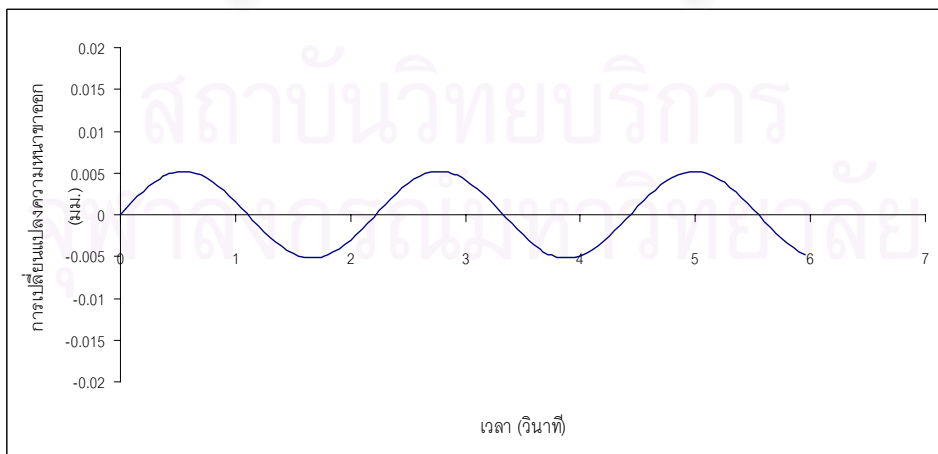
ระยะเยื้องศูนย์ = 0.013 มม.



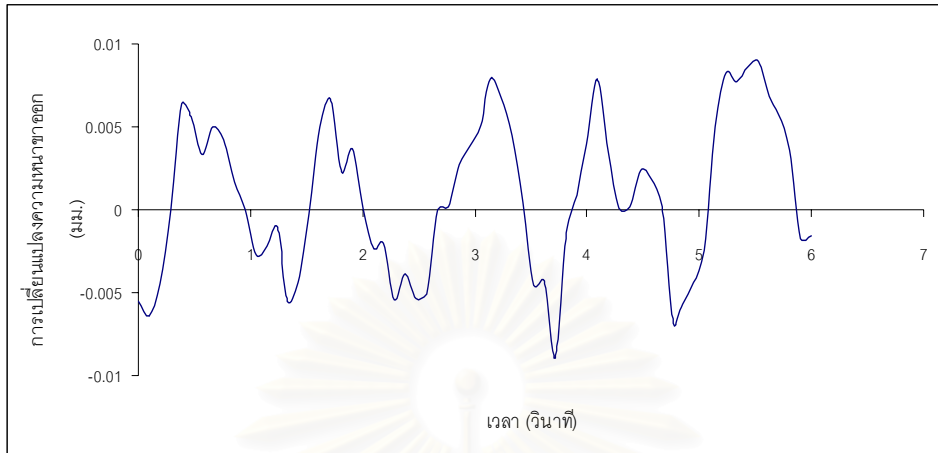
รูปที่ 4.6.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง



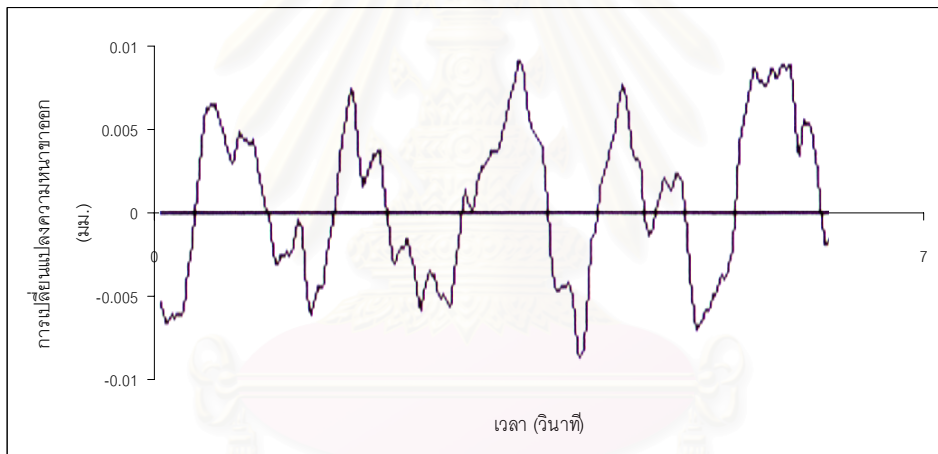
รูปที่ 4.6.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากการคำนวณเมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าเท่านั้น



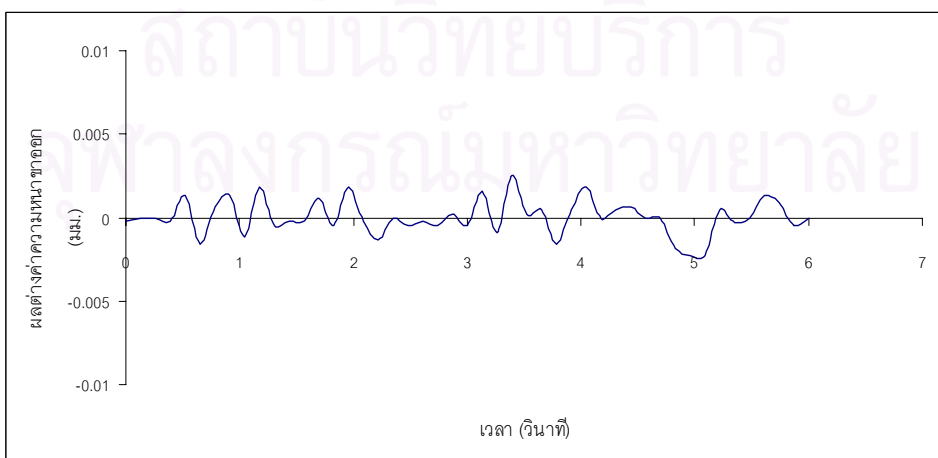
รูปที่ 4.6.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากการคำนวณเมื่อมีการรบกวนการรีดจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดเท่านั้น



รูปที่ 4.6.4 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากการคำนวณเมื่อมีการรบกวนการรีด จากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าและการเอียงศูนย์ของลูกรีด



รูปที่ 4.6.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากผลการรีดจริง



รูปที่ 4.6.6 ผลต่างค่าความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 ระหว่างผลการคำนวณและผลการรีดจริง

#### 4.7 การลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดต่อความหนาของชิ้นงานรีด

สามารถทำได้หลายวิธี โดยงานวิจัยนี้ใช้ 3 วิธี ได้แก่

- 1 PI control โดยตรวจวัดจากค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีด แล้วปรับค่าระยะห่างระหว่างลูกรีด
- 2 ปรับค่า Mill Modulus ให้น้อยลง
- 3 Roll Gap control โดยตรวจวัดจากค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด แล้วปรับค่าระยะห่างระหว่างลูกรีด

จากสมการ 
$$\Delta h_{out} = \Delta S + \frac{\Delta P}{M}$$

จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด และ แรงรีด รวมทั้งค่า Mill Modulus การเอียงศูนย์ของลูกรีดเป็นตัวทำให้ระยะห่างระหว่างลูกรีดเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก ดังนั้นการแก้ไขเพื่อลดผลกระทบจึงควรเป็นการปรับค่าระยะห่างระหว่างลูกรีดเป็นสำคัญ

ในวิธีที่ 1 และ 3 ตรวจวัดแรงดึงระหว่างแท่นรีด และ แรงรีด เพราะทั้งสองพารามิเตอร์สามารถตรวจวัดด้วยได้ทันทีที่เกิดการเปลี่ยนแปลง tensiometer และ load cell ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงดึงระหว่างแท่นรีดและแรงรีดตามลำดับ แต่ถ้าหากใช้ความหนาขาออกเป็นตัวตรวจวัด จะมีปัญหาเกี่ยวกับเวลาในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานจากแท่นรีดถึงเครื่องตรวจวัด ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ การลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดสามารถกระทำได้ทุกแท่นรีด โดยเฉพาะที่แท่นรีดที่ 1 ซึ่งเป็นแท่นที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความหนามากที่สุด เป็นแท่นที่ต้องมีการแก้ไขเป็นอันดับแรก



#### 4.7.1 PI control

วิธีนี้ใช้ การตรวจวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ได้อีกก่อนหน้า แล้วนำค่าไปคำนวณในสมการ PI control ดังนี้

$$\Delta S = K_p \cdot \Delta q_f + \int K_I \cdot \Delta q_f \cdot dt$$

โดย  $\Delta S$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกรีดที่ต้องถูกปรับค่า

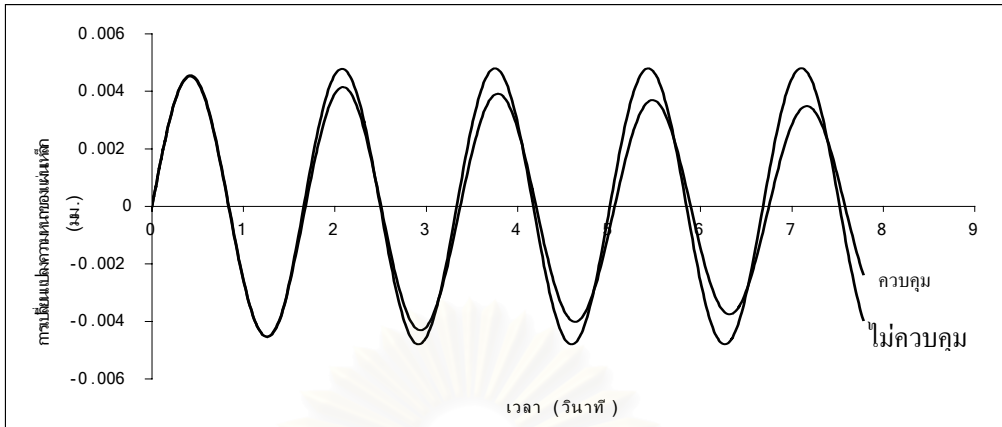
$\Delta q_f$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ถูกตรวจวัด

$K_p, K_I$  = ค่า Proportional Gain และ Integral Gain ตามลำดับ

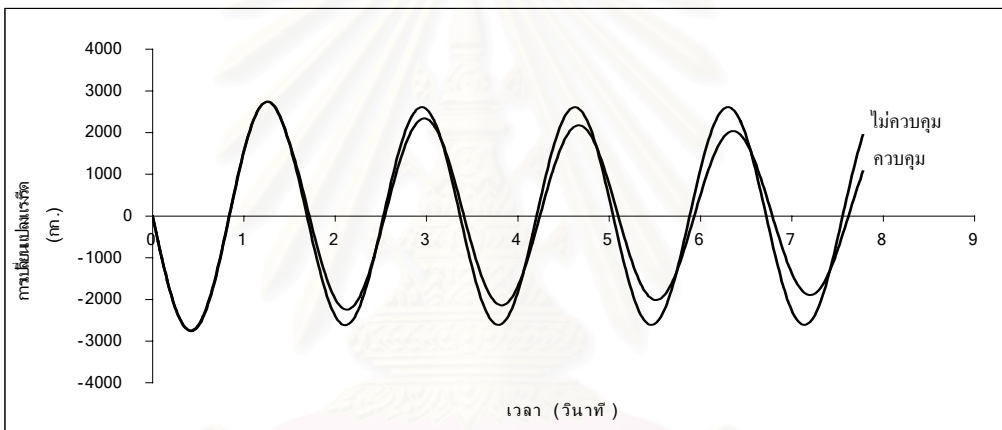
ผลจากการคำนวณ

ด้วยวิธีนี้ สามารถลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงานรีดได้ แต่ใช้เวลานาน ดังแสดงในรูปที่ 4.7.1 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของแท่นรีดที่ 1 มีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงระหว่างแท่นรีดและการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดมีขนาดลดลงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7.2 และ 4.7.3 ตามลำดับ

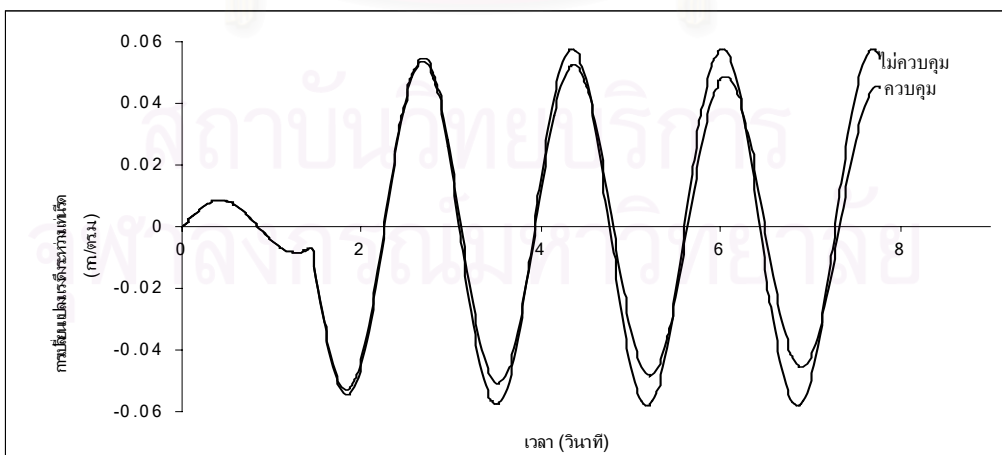
การปรับค่า  $K_p$  และ  $K_I$  มีผลต่อการลดผลกระทบ โดยต้องปรับค่าให้เหมาะสม ถ้าทั้งสองตัวมีค่ามากเกินไป ถึงแม้จะสามารถลดขนาดการเปลี่ยนแปลงได้เร็ว แต่เสี่ยงต่อการไม่เสถียรและจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นในท้ายที่สุด ถ้าทั้งคู่มีค่าน้อยเกินไปจะลดขนาดการเปลี่ยนแปลงได้ช้า ซึ่งไม่สามารถใช้ในการควบคุมการรีดจริงได้



รูปที่ 4.7.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี PI Control เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม



รูปที่ 4.7.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 1 และ 2 เมื่อมีการลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี PI Control เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม



รูปที่ 4.7.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดด้วยวิธี PI Control เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม

#### 4.7.2 การปรับค่า Mill Modulus

แนวคิดของการปรับค่า Mill Modulus มาจาก 2 เหตุผล คือ

##### 1. ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\Delta h_{out} = \Delta S + \frac{\Delta P}{M}$$

เมื่อระยะห่างระหว่างลูกรีดเปลี่ยนแปลงจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ทำให้แรงรีดเปลี่ยนแปลงด้วย และการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดนี้มีลักษณะตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด จึงลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด ทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีดซึ่งเกิดจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีด ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1 ค่า Mill Modulus มีส่วนในการทำให้ค่า  $\frac{\Delta P}{M}$  มากขึ้นหรือน้อยลง ถ้าหากค่า Mill Modulus น้อยลง ค่า  $\frac{\Delta P}{M}$  จะมากขึ้น ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดได้มากขึ้น

2. ปัจจุบัน การปรับเปลี่ยนค่า Mill Modulus สามารถทำได้ในการรีดจริง โดยการเพิ่มหรือลดของไหลใน Hydraulic Actuator เพื่อปรับค่า Modulus

##### 1. M = 500000

stand	1	2	3	4	5
eccentricity	0.01	0	0	0	0
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

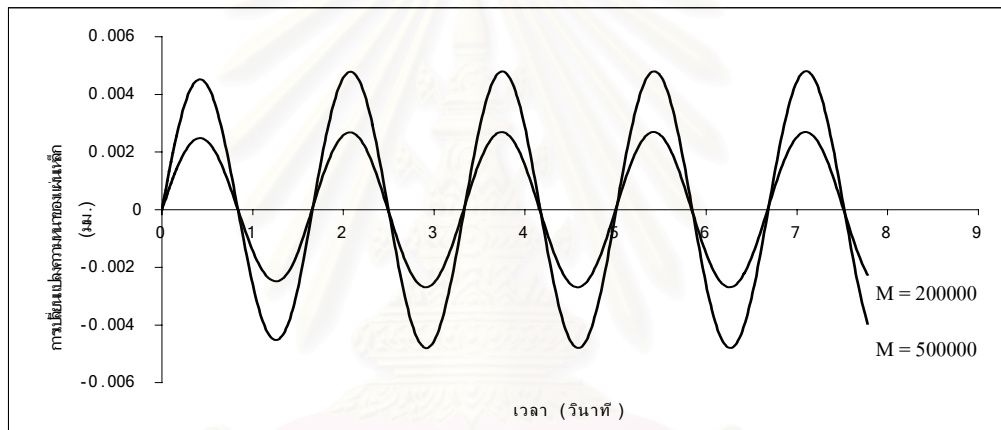
##### 2. M = 200000

stand	1	2	3	4	5
eccentricity	0.01	0	0	0	0
Mill Modulus (kg/mm.)	200000	500000	500000	500000	500000

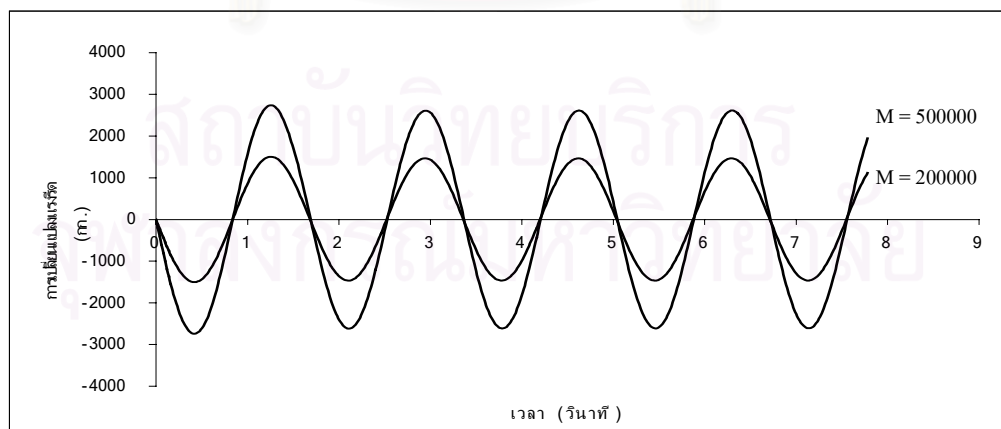
### ผลการคำนวณ

จากรูปที่ 4.7.4 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 ซึ่งเกิดจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. ที่แท่นรีดที่ 1 มีค่าสูงสุดลดลงจาก  $\pm 0.0046$  มม. เป็น  $\pm 0.0025$  มม. เมื่อเปลี่ยนค่า Mill Modulus ของแท่นรีดที่ 1 จาก 500000 กก./มม. เป็น 200000 กก./มม. ตามลำดับ และส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงแรงรีดลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.7.5

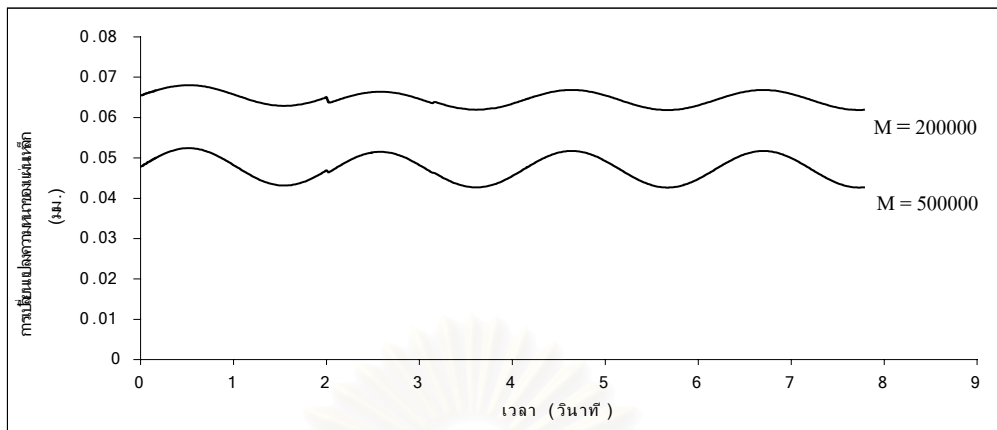
ในทางกลับกัน แม้ว่าการลดค่า Mill Modulus สามารถช่วยลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดได้ แต่ถ้าหากความหนาขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง ค่า Mill Modulus ที่ต่ำจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมากกว่า ค่า Mill Modulus ที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.7.6 ดังนั้นการใช้วิธีนี้ลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์กลาง ชิ้นงานที่นำมารีด ต้องมีขนาดรูปร่างที่แม่นยำ ไม่คลาดเคลื่อนมาก



รูปที่ 4.7.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. เมื่อแท่นรีดมีค่า Mill Modulus เท่ากับ 200000 และ 500000 กก./มม.



รูปที่ 4.7.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดแท่นรีดที่ 1 จากการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. เมื่อแท่นรีดมีค่า Mill Modulus เท่ากับ 200000 และ 500000 กก./มม.



รูปที่ 4.7.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กจากแท่นรีดที่ 1 เมื่อแท่นรีดมีการเอียงศูนย์กลางของลูกรีดขนาด 0.01 มม. และความหนาของแผ่นเหล็กเปลี่ยนแปลง 0.1 มม. เปรียบเทียบระหว่างค่า Mill Modulus เท่ากับ 200000 และ 500000 กก./มม.

#### 4.7.3 Roll Gap Control

แนวคิดของวิธีนี้ได้มาจากความสัมพันธ์ตามสมการ  $\Delta h_{out} = \Delta S + \frac{\Delta P}{M}$

การเอียงศูนย์กลางของลูกรีดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด และการเปลี่ยนแปลงของแรงรีด ดังนั้นในการรีดจริงซึ่งต้องการค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเหล็กเป็นศูนย์ ค่าระยะห่างระหว่างลูกรีดซึ่งต้องถูกปรับเปลี่ยนจะเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดหารด้วยค่า Mill Modulus

$$\Delta h_{out} = \Delta S + \frac{\Delta P}{M}$$

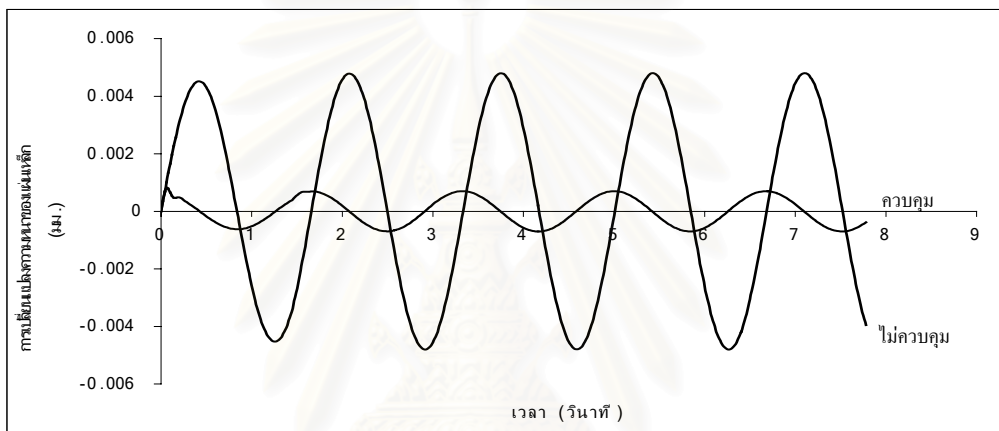
$$0 = \Delta S + \frac{\Delta P}{M}$$

$$\Delta S = \frac{-\Delta P}{M}$$

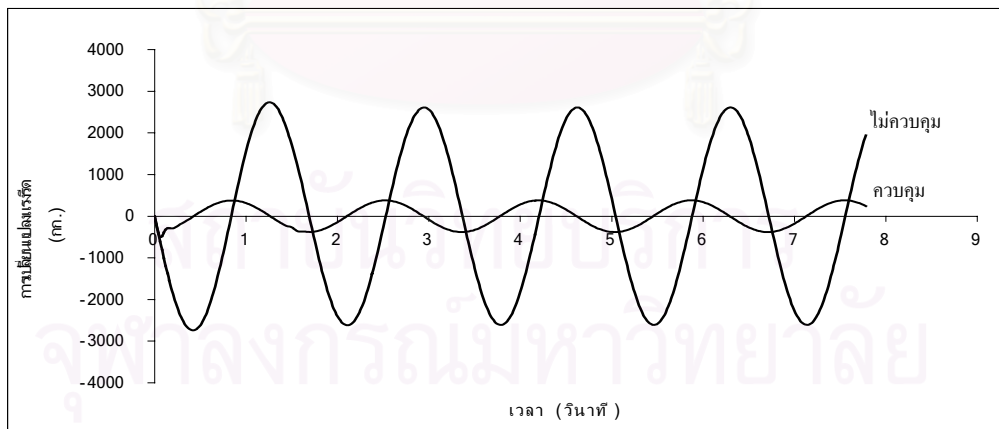
ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงรีดตรวจวัดได้ที่ Load Cell ซึ่งปกติจะมีการวัดและบันทึกค่านี้ในการรีดจริงอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม

### ผลการคำนวณ

การลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดด้วยวิธี Roll Gap Control สามารถลดขนาดการเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ต้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ไม่มีควบคุมและเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 วินาที โดยลดค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกมากที่สุดจาก  $\pm 0.0048$  มม. เป็น  $\pm 0.0008$  มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.7.7 วิธีนี้ให้ผลไม่เหมือนกับวิธี PI Control ซึ่งขนาดการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นใช้เวลามากกว่า การเปลี่ยนแปลงแรงรีดเป็นเช่นเดียวกัน คือมีขนาดการเปลี่ยนแปลงลดลงตั้งแต่ต้น และเข้าสู่สภาวะคงที่โดยใช้เวลาไม่นาน ดังแสดงในรูปที่ 4.7.8



รูปที่ 4.7.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกจากแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดด้วยวิธี Roll Gap Control เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม



รูปที่ 4.7.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงรีดของแท่นรีดที่ 1 เมื่อมีการลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดด้วยวิธี Roll Gap Control เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเมื่อไม่มีการควบคุม

## บทที่ 5

### สรุป

ในงานวิจัยนี้ ทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลกระทบของการเอียงศูนย์ของลูกรีดต่อความหนาขาออก และสรุปผลได้ดังนี้

1. ผลของขนาดการเอียงศูนย์ของลูกรีด 0.005, 0.01 และ 0.03 มม. ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก การเอียงศูนย์ของลูกรีดขนาด 0.03 มม. ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แทนสุดท้ายมากที่สุด และการเอียงศูนย์ของลูกรีดขนาด 0.005 มม. ส่งต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แทนสุดท้ายน้อยที่สุด กล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับขนาดการเอียงศูนย์ของลูกรีด นั่นคือ ยิ่งขนาดการเอียงศูนย์ของลูกรีดมาก การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกยิ่งเกิดขึ้นมาก

2. ผลของลำดับแทนรีดที่มีการเอียงศูนย์ของลูกรีด ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออก สรุปได้ว่าการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 1 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แทนรีดที่มีการเอียงศูนย์มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับมีการเอียงศูนย์ของลูกรีดขนาดเดียวกันแต่แทนรีดต่างกัน และการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 2, 3, 4 และ 5 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แทนรีดที่มีการเอียงศูนย์น้อยกว่าการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 1 มาก

3. การเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 1 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกแทนสุดท้ายมากที่สุด และการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 2, 3, 4 และ 5 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกแทนสุดท้ายน้อยกว่าการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 1

4. การเอียงศูนย์ของลูกรีดซึ่งมีในแทนรีดที่ 1 และ 2 พร้อมกันส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแทนรีดที่ 1 และ 2 ไม่เป็น sinusoidal อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแทนรีดที่ 1 และ 2 ก็ยังเปลี่ยนในลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน

5. ผลของการคำนวณจากแบบจำลองในสภาวะพลวัตมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับผลการรีดจริงและมีความแตกต่างของขนาดเพียงเล็กน้อย โดยผลต่างของทั้งสองค่าเกิดจากตัวแปรอื่นซึ่งส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อย ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าที่แทนรีดที่ 1 มีนัยสำคัญไม่น้อยกว่าผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดในแทนรีดที่ 1

6. การลดผลกระทบจากการเอียงศูนย์ของลูกรีดโดยวิธีควบคุมระยะห่างระหว่างลูกรีดมีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PI control และ วิธีลดค่า Mill Modulus โดยวิธีควบคุมระยะห่างระหว่างลูกรีด สามารถลดผลกระทบ 83.33 % และเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 1 วินาที

ในขณะที่วิธี PI control ลดผลกระทบได้ช้า ใช้เวลานาน ส่วนวิธีลดค่า Mill Modulusสามารถลดผลกระทบได้เป็นอย่างดี แต่มีปัญหาเรื่องความหนาของวัตถุดิบต้องมีความหนาที่สม่ำเสมอและแม่นยำมาก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

1. V.B. Ginzburg, Dynamic Characteristics of Automatic Gauge Control System with Hydraulic Actuators, AISE Year Book, pp. 75-83, 1984.
2. K. Wiedemer, et al, Cold Rolling with Direct Hydraulic Roll Screw-Down and Roll Gap Measuring and Regulating System, Metallurgical Plant and Technology, pp. 70-81, 1983.
3. S. Tajima, et al, Development of a New Type AGC System for a Tandem Cold Mill, AISE Year Book, pp. 240-245, 1981.
4. R.A. Phillips. Amer. Inst. Elect. Eng. (1957-1) : 335
5. M.R. Sekulic and J.M. Alexander. J.Mech. Eng. Sci. pp. 301, 1962
6. T.Araimura, M. Kamata and M.Saito. Proceeding Suppl. Trans. ISIJ. 11 pp. 777-781, 1971
7. Nurot Panich, et al , Thickness Analysis Simulation by Dynamic Theory of Cold Rolling for Steel Sheet, Thesis, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2000.
8. R.Hill. The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford at the Clarendon Press, 1950.
9. D.R.Bland and Ford. Proc. Inst. Mech. Engrs. pp. 144-163, London, 1948
10. J.H.Hitchcock. Am. Soc. Mech. Eng. Research Publication, 1930
11. F.Fujita and M.Kamata. Continuous Rolling Theory NKK Corporation, 1998

## ภาคผนวก ก

### Source code ของแบบจำลองการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์

โปรแกรม Sim's equation

---

Option Explicit

```
Function forc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)
Dim DefR, STavg, ld, Qpget, NAget, BAget, reduct
Const a = 84.6
Const E0 = 0.00817
Const n = 0.2
reduct = (th0 - th1) / th0
DefR = (a / (n + 1)) * (((stn2 + E0) ^ (n + 1)) - ((stn1 + E0) ^ (n + 1))) / (stn2 - stn1)
NAget = Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)
BAget = Bitecalc(th0, th1, Rflat)
STavg = ((1 - (NAget / BAget)) / (1 - reduct) * tb + (NAget / BAget) * tf)
Qpget = Qp(frico, th0, th1, Rflat)
ld = Sqr(Rflat * (th0 - th1) - ((th0 - th1) ^ 2) / 4)
forc = (DefR - STavg) * Qpget / w
End Function

Function Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)
Dim DefR, STavg, ld, Qpget, NAget, BAget, reduct
Const a = 84.6
Const E0 = 0.00817
Const n = 0.2
reduct = (th0 - th1) / th0
DefR = (a / (n + 1)) * (((stn2 + E0) ^ (n + 1)) - ((stn1 + E0) ^ (n + 1))) / (stn2 - stn1)
NAget = Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)
BAget = Bitecalc(th0, th1, Rflat)
STavg = ((1 - (NAget / BAget)) / (1 - reduct) * tb + (NAget / BAget) * tf)
Qpget = Qp(frico, th0, th1, Rflat)
ld = Sqr(Rflat * (th0 - th1) - ((th0 - th1) ^ 2) / 4)
Rollforc = (DefR - STavg) * Qpget * ld * w
End Function

Function DeformR(stn)
Dim a, E0, n
a = 84.6
E0 = 0.00817
n = 0.2
DeformR = a * (stn + E0) ^ n
End Function
```

Function Qp(frico, th0, th1, R)  
Dim ReRt, Bang  
ReRt = (th0 - th1) / th0  
Bang = Bitecalc(th0, th1, R)  
Qp = 1.08 + 1.79 \* ReRt \* (frico / Bang) \* Sqr(ReRt) - 1.02 \* ReRt

End Function

---

Function Bitecalc(th0, th1, R)  
Bitecalc = Arccos(1 - (th0 - th1) / (2 \* R))

End Function

Function Arccos(x)  
Arccos = Atn(Sqr(1 - x \* x) / x)

End Function

---

Function Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
Dim Hnget, Rt  
'Nangle=angle at neutral point

Rt = th1 / Rflat  
Hnget = Hn(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
Nangle = Sqr(Rt) \* Tan(Sqr(Rt) \* Hnget / 2)

End Function

---

Function Hn(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
Dim H1  
H1 = H1calc(th0, th1, Rflat)  
Hn = (H1 / 2) - (1 / (2 \* frico)) \* Log(((th0 / th1) \* ((1 - tf / kf) / (1 - tb / kb))))

End Function

---

Function H1calc(th0, th1, Rflat)  
Dim Rt, Bang  
Bang = Bitecalc(th0, th1, Rflat)  
Rt = th1 / Rflat  
H1calc = (2 / Sqr(Rt)) \* Atn(Bang / Sqr(Rt))

End Function

---

Function Fslip(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)

Dim angle

Dim thn

angle = Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)

thn = th1 + 2 \* Rflat \* (1 - Cos(angle))

Fslip = (thn / th1) - 1

End Function

---

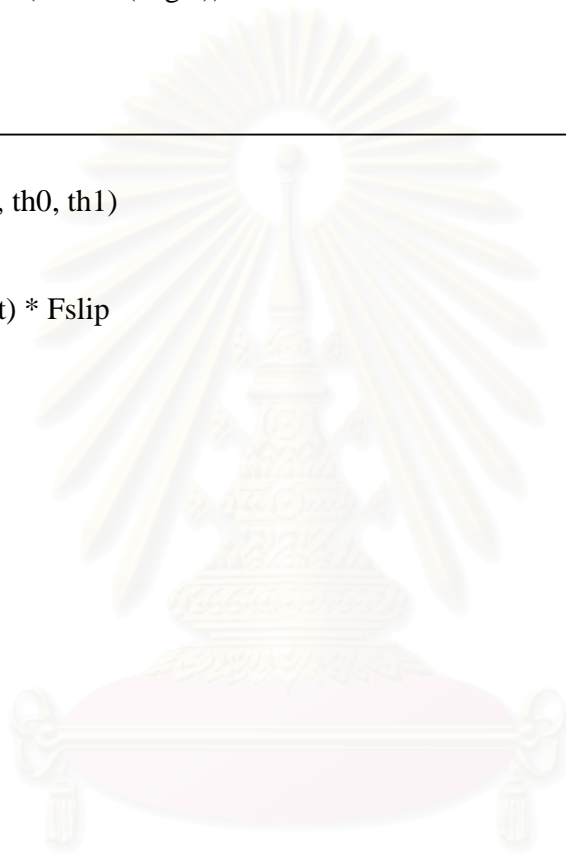
Function Bslip(Fslip, th0, th1)

Dim bRt

bRt = 1 - (th1 / th0)

Bslip = bRt - (1 - bRt) \* Fslip

End Function



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## โปรแกรมหาอนุพันธ์

---

### Option Explicit

Function dPbydHin(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)

Dim NTh0

NTh0 = th0 + 0.001

th0 = th0 - 0.001

dPbydHin = (Rollforc(stn1, stn2, NTh0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w) - Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (NTh0 - th0)

End Function

---

Function dPbydhout(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)

Dim NTh1

NTh1 = th1 + 0.001

th1 = th1 - 0.001

dPbydhout = (Rollforc(stn1, stn2, th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w) - Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (NTh1 - th1)

End Function

---

Function dPbydtb(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)

Dim Ntb

Ntb = tb + 0.01

tb = tb - 0.01

dPbydtb = (Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, Ntb, kf, kb, Rflat, frico, w) - Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (Ntb - tb)

End Function

---

Function dPbydtf(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)

Dim Ntf

Ntf = tf + 0.01

tf = tf - 0.01

dPbydtf = (Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, Ntf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w) - Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (Ntf - tf)

End Function

---

Function dfbydHin(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)

Dim NTh0  
Dim NFslip, OFslip  
NTh0 = th0 + 0.001  
th0 = th0 - 0.001  
NFslip = Fslip(frico, NTh0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
OFslip = Fslip(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
dfbydHin = (NFslip - OFslip) / (NTh0 - th0)

End Function

---

Function dfbydhout(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
Dim NTh1  
Dim NFslip, OFslip  
NTh1 = th1 + 0.001  
th1 = th1 - 0.001  
NFslip = Fslip(frico, th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
OFslip = Fslip(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
dfbydhout = (NFslip - OFslip) / (NTh1 - th1)

End Function

---

Function dfbydtb(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
Dim Ntb  
Dim NFslip, OFslip  
Ntb = tb + 0.001  
tb = tb - 0.001  
NFslip = Fslip(frico, th0, th1, tf, Ntb, kf, kb, Rflat)  
OFslip = Fslip(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
dfbydtb = (NFslip - OFslip) / (Ntb - tb)

End Function

---

Function dfbydtf(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
Dim Ntf  
Dim NFslip, OFslip  
Ntf = tf + 0.001  
tf = tf - 0.001  
NFslip = Fslip(frico, th0, th1, Ntf, tb, kf, kb, Rflat)  
OFslip = Fslip(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)  
dfbydtf = (NFslip - OFslip) / (Ntf - tf)

End Function

## โปรแกรม Solve

---

### Option Explicit

```
Sub solve(a, m, x, n)
Dim p, i, j, c, k, g As Integer
Dim t, sum As Double
Dim re As Boolean
Dim npoin As Integer

For k = 1 To n - 1
If a(k, k) = 0 Then

For g = k + 1 To n
If a(g, k) <> 0 Then
re = True

For c = 1 To n + 1
t = a(k, c)
a(k, c) = a(g, c)
a(g, c) = t
Next c
Exit For

Else
re = False
End If
Next g

If Not re Then
MsgBox "error"
Stop
End If

End If
If a(k, k) <> 0 Then
For j = k + 1 To n
m(j) = a(j, k) / a(k, k)
For p = k + 1 To n + 1
a(j, p) = a(j, p) - m(j) * a(k, p)
Next p
Next j
End If
Next k
```



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
If a(n, n) = 0 Then
MsgBox ("no unique solution exists")
Stop
Else
x(n) = a(n, n + 1) / a(n, n) 'start back substitution
End If
```

```
For i = n - 1 To 1 Step (-1)
sum = 0
For j = i + 1 To n
sum = sum + a(i, j) * x(j)
Next j
x(i) = 1 / a(i, i) * (a(i, n + 1) - sum)
Next i
```

```
End Sub
```

---



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Option Explicit

Sub data()

Dim i As Integer

Worksheets("sheet3").Select

For i = 1 To stand

th0(i) = Cells(4, 2 + i)

th1(i) = Cells(5, 2 + i)

stn(i) = Abs(Log(th1(i) / th0(i)))

Vr(i) = Cells(12, 2 + i)

tb(i) = Cells(7, 2 + i)

tf(i) = Cells(8, 2 + i)

fric(i) = Cells(13, 2 + i)

R(i) = Cells(18, 2 + i)

w(i) = Cells(14, 2 + i)

e(i) = Cells(15, 2 + i)

v0(i) = Cells(16, 2 + i)

Length(i) = Cells(17, 2 + i)

forward(i) = Cells(9, 2 + i)

Vin(i) = Cells(10, 2 + i)

Vout(i) = Cells(11, 2 + i)

Rflatt(i) = Cells(19, 2 + i)

Mill(i) = Cells(20, 2 + i)

kb(i) = 110

kf(i) = 130

Next i

For i = 1 To stand

stn(i) = stn(i - 1) + stn(i)

Next i

'Worksheets("sheet5").Select

'For i = 1 To 2

'Cells(10 \* (No - 1) + 1, i) = th0(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 2, i) = th1(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 3, i) = stn(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 4, i) = Vr(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 5, i) = tb(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 6, i) = tf(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 7, i) = forward(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 8, i) = Vin(i)

'Cells(10 \* (No - 1) + 9, i) = Vout(i)

'Next i

End Sub

## โปรแกรม Matrix

---

### Option Explicit

Sub matrix()

Dim n As Integer, i As Integer, j As Integer, c As Integer

Dim a(12 + 7 \* (stand - 2), stand \* 10 + 1)

Dim x(12 + 7 \* (stand - 2)), xo(12 + 7 \* (stand - 2))

Dim k

Dim m

Dim re(12 + 7 \* (stand - 2), stand \* 10 + 1) As Boolean

For i = 1 To 12 + 7 \* (stand - 2)

For j = 1 To stand \* 10 + 1

a(i, j) = 0

re(i, j) = False

Next j

Next i

'Input the value into the main matrix

'dh eq1 to 8

For i = 1 To stand

a(i, i) = 1

a(i + stand, i) = -1 \* dPbydhout(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w(i))

a(i + stand \* 3, i) = -1 \* dfbydhout(fric(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))

a(i + stand \* 4, i) = -1 \* Vout(i)

If i <> stand Then a(i + 10, i) = tf(i)

Next i

'dH eq1 to 8

For i = 1 To stand

a(i + stand, i + stand) = -1 \* dPbydHin(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w(i))

a(i + stand \* 3, i + stand) = -1 \* dfbydHin(fric(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))

a(i + stand \* 4, i + stand) = Vin(i)

If i <> stand Then a(i + stand \* 5, i + stand + 1) = -1 \* tb(i + 1)

Next i

'dP eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i, i + stand \* 2) = -1 / Mill(i)

$a(i + \text{stand}, i + \text{stand} * 2) = 1$   
Next i

'dqfi eq 1 to 8

For i = 1 To stand

$a(i + \text{stand}, i + \text{stand} * 3) = -1 * \text{dPbydtf}(\text{stn}(i - 1), \text{stn}(i), \text{th0}(i), \text{th1}(i), \text{tf}(i), \text{tb}(i), \text{kf}(i), \text{kb}(i), \text{Rflatt}(i), \text{fric}(i), \text{w}(i))$

$a(i + \text{stand} * 3, i + \text{stand} * 3) = -1 * \text{dfbydtf}(\text{fric}(i), \text{th0}(i), \text{th1}(i), \text{tf}(i), \text{tb}(i), \text{kf}(i), \text{kb}(i), \text{Rflatt}(i))$

If i <> stand Then  $a(i + \text{stand} * 5, i + \text{stand} * 3) = \text{th1}(i)$

If i <> stand Then  $a(i + \text{stand} * 6 - 1, i + \text{stand} * 3) = 1$

Next i

'right hand side

For i = 1 To stand

If i <> stand Then  $a(i + \text{stand} * 6 - 1, \text{stand} * 10 + 1) = e(i) * dt * (\text{Vin}(i + 1) - \text{Vout}(i)) / \text{Length}(i)$

Next i

'dqbi eq 1 to 8

For i = 1 To stand

$a(i + \text{stand}, i + \text{stand} * 4) = -1 * \text{dPbydtb}(\text{stn}(i - 1), \text{stn}(i), \text{th0}(i), \text{th1}(i), \text{tf}(i), \text{tb}(i), \text{kf}(i), \text{kb}(i), \text{Rflatt}(i), \text{fric}(i), \text{w}(i))$

$a(i + \text{stand} * 3, i + \text{stand} * 4) = -1 * \text{dfbydtb}(\text{fric}(i), \text{th0}(i), \text{th1}(i), \text{tf}(i), \text{tb}(i), \text{kf}(i), \text{kb}(i), \text{Rflatt}(i))$

If i <> stand Then  $a(i + \text{stand} * 5, i + \text{stand} * 4 + 1) = -1 * \text{th0}(i + 1)$

Next i

'dfi eq 1 to 8

For i = 1 To stand

$a(i + \text{stand} * 2, i + \text{stand} * 5) = -1 * \text{Vr}(i)$

$a(i + \text{stand} * 3, i + \text{stand} * 5) = 1$

Next i

'dVin i eq 1 to 8

For i = 1 To stand

$a(i + \text{stand} * 4, i + \text{stand} * 6) = \text{th0}(i)$

If i <> stand Then  $a(i + \text{stand} * 6 - 1, i + \text{stand} * 6 + 1) = -1 * dt * e(i + 1) / \text{Length}(i + 1)$

Next i

'dVout i eq 1 to 8

For i = 1 To stand

$a(i + \text{stand} * 2, i + \text{stand} * 7) = 1$

$a(i + \text{stand} * 4, i + \text{stand} * 7) = -1 * \text{th1}(i)$

If i <> stand Then  $a(i + \text{stand} * 6 - 1, i + \text{stand} * 7) = dt * e(i) / \text{Length}(i)$

Next i

```
'dS eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + stand * 8) = -1
Next i
```

```
'dVri eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand * 2, i + stand * 9) = -(1 + forward(i))
Next i
```

```
'set boundary condition
Worksheets("sheet3").Select
For i = 1 To 10
For j = 1 To stand
If Cells(i + 3, j + 9) <> 1 Then
k = Cells(i + 3, j + 9)
For c = 1 To 12 + (stand - 2) * 7
a(c, stand * 10 + 1) = a(c, stand * 10 + 1) - k * a(c, ((i - 1) * stand + j))
Next c
re(1, ((i - 1) * stand + j)) = True
End If
Next j
Next i
```

```
'reduce matrix dimension
m = 0
For i = 1 To stand * 10 + 1
If re(1, i) = False Then
m = m + 1
For j = 1 To 12 + (stand - 2) * 7
a(j, m) = a(j, i)
Next j
End If
Next i
```

```
Call solve(a, xo, x, 12 + 7 * (stand - 2))
'For i = 1 To 12
'Worksheets("sheet6").Cells(20 + i, 4).Value = x(i)
'Next i
'Stop
```

```
For i = 1 To 12 + 7 * (stand - 2)
Worksheets("sheet4").Cells(No + 10, i + 1).Value = x(i)
```

```
Next i
'For i = 1 To 12
'Worksheets("sheet6").Cells((No - 1) * 20 + i, 1).Value = x(i)
'Next i
```

```
Worksheets("sheet3").Select
For i = 1 To stand
Cells(5, 2 + i) = Cells(5, 2 + i) + x(i) 'hout
Cells(4, 2 + i) = Cells(4, 2 + i) + Cells(5, 9 + i) 'Hin
If i <> stand Then Cells(8, 2 + i) = Cells(8, 2 + i) + x(i + 10) 'qfi
If i = stand Then Cells(8, 2 + i) = Cells(8, 2 + i) + Cells(7, i + 9)
If i <> 1 Then Cells(7, 2 + i) = Cells(7, 2 + i) + x(i + 13) 'qbi
If i = 1 Then Cells(7, 2 + i) = Cells(7, 2 + i) + Cells(8, i + 9)
Cells(9, 2 + i) = Cells(9, 2 + i) + x(i + 18) 'forward
Cells(10, 2 + i) = Cells(10, 2 + i) + x(i + 23) 'Vin
Cells(11, 2 + i) = Cells(11, 2 + i) + x(i + 28) 'Vout
Cells(12, 2 + i) = Cells(12, 2 + i) + Cells(13, 9 + i) 'Vr
Next i
```

```
End Sub
```

---



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Option Explicit

Public Const stand = 5

Public th0(stand), th1(stand), Vin(stand), Vout(stand), stn(stand), Vr(stand), tb(stand),  
tf(stand), forward(stand)

Public fric(stand), w(stand), R(stand), v0(stand), e(stand), Rflatt(stand), Mill(stand),  
Length(stand), kf(stand), kb(stand)

Public No As Integer

Public Const dt = 0.02

Sub main()

Dim i, j, n, round As Integer

Dim m(stand), PL(stand)

Dim sec

Dim e1, e2, dqf1, dqf0, dSq

For i = 1 To stand

m(i) = 0

PL(i) = 4600 'mm.

Next i

sec = 0

round = 400

For i = 1 To stand

For j = 1 To 17

Worksheets("sheet3").Cells(3 + j, 2 + i).Value = Worksheets("sheet1").Cells(3 + j, 2 +  
i).Value

Next j

Next i

For i = 1 To stand

For j = 1 To 10

Worksheets("sheet3").Cells(3 + j, 9 + i).Value = Worksheets("sheet2").Cells(2 + j, 2 +  
i).Value

Next j

Next i

Sheets("Sheet4").Select

Range("B3:AJ400").Select

```
Selection.ClearContents  
Sheets("Sheet3").Select
```

```
For No = 1 To round
```

```
Worksheets("sheet4").Cells(10 + No, 36).Value = sec
```

```
Call data
```

```
For i = 1 To (stand - 1)  
PL(i) = PL(i) - Vin(i + 1) * dt  
Next i
```

```
Call matrix
```

```
sec = sec + dt
```

```
For i = 1 To (stand - 1)  
If PL(i) <= 0 Then  
m(i) = m(i) + 1  
'Continuousness  
Worksheets("sheet3").Cells(5, 10 + i).Value = Worksheets("sheet4").Cells(m(i) + 10, 1 +  
i).Value  
End If  
Next i
```

```
Worksheets("sheet3").Select  
n = Cells(22, 10)  
e1 = Cells(23, 10) * (Sin(Cells(12, 2 + n) * sec / Cells(21, 2 + n) + Cells(24, 10)) -  
(Sin(Cells(12, 2 + n) * (sec - dt) / Cells(21, 2 + n) + Cells(24, 10))))  
e2 = Cells(23, 10) * (Sin(Cells(12, 2 + 2) * sec / Cells(21, 2 + 2) + Cells(24, 10)) -  
(Sin(Cells(12, 2 + 2) * (sec - dt) / Cells(21, 2 + 2) + Cells(24, 10))))  
If sec > 0 Then Cells(12, 9 + n) = e1 + dSq  
If sec > 0 Then Cells(12, 9 + 2) = e2 + dSq  
'Worksheets("sheet4").Cells(No + 10, 30).Value = Cells(12, 7)
```

```
If sec > 0 Then Cells(5, 10) = 0
```

```
'Worksheets("sheet5").Select  
'For i = 1 To stand  
'Cells(3, 2 + i) = Worksheets("sheet4").Cells(No + 1, 15 + i).Value 'hout  
'Cells(5, 2 + i) = Worksheets("sheet4").Cells(No + 1, 17 + i).Value 'P  
'If i <> stand Then Cells(6, i + 2) = -1 * Worksheets("sheet4").Cells(No + 1, 19 +  
i).Value 'qf  
'If i <> 1 Then Cells(7, i + 2) = Worksheets("sheet4").Cells(No + 1, 19 + i).Value 'qb  
'Next i
```

```
dqf1 = Worksheets("sheet4").Cells(No + 10, 47).Value
dqf0 = Worksheets("sheet4").Cells(No + 9, 47).Value
'dP = Worksheets("sheet4").Cells(No + 10, 47).Value
If Worksheets("sheet4").Cells(No + 10, 47).Value <> 0 Then
```

```
dSq = Cells(28, 10) * dqf1 + Cells(29, 10) * (dqf1 * sec - dqf0 * (sec - dt)) + Cells(30,
10) * (dqf1 - dqf0) / dt
```

```
End If
```

```
'Worksheets("sheet2").Cells(21, 7) = Round - nu
For i = 1 To stand
Worksheets("sheet3").Select
Cells(6, 2 + i) = (Cells(4, 2 + i) - Cells(5, 2 + i)) / Cells(4, 2 + i) * 100
Next i

Next No

End Sub
```



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## โปรแกรม Clear

---

Sub clear()

For i = 1 To stand

For j = 1 To 17

Worksheets("sheet3").Cells(3 + j, 2 + i).Value = Worksheets("sheet1").Cells(3 + j, 2 + i).Value

Next j

Next i

For i = 1 To stand

For j = 1 To 10

Worksheets("sheet3").Cells(3 + j, 9 + i).Value = Worksheets("sheet2").Cells(2 + j, 2 + i).Value

Next j

Next i

Sheets("Sheet4").Select  
Range("B3:AJ400").Select  
Selection.ClearContents  
Sheets("Sheet3").Select

End Sub

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ข**  
**ผลการคำนวณและผลการรีดจริง**

ชุดที่ 1

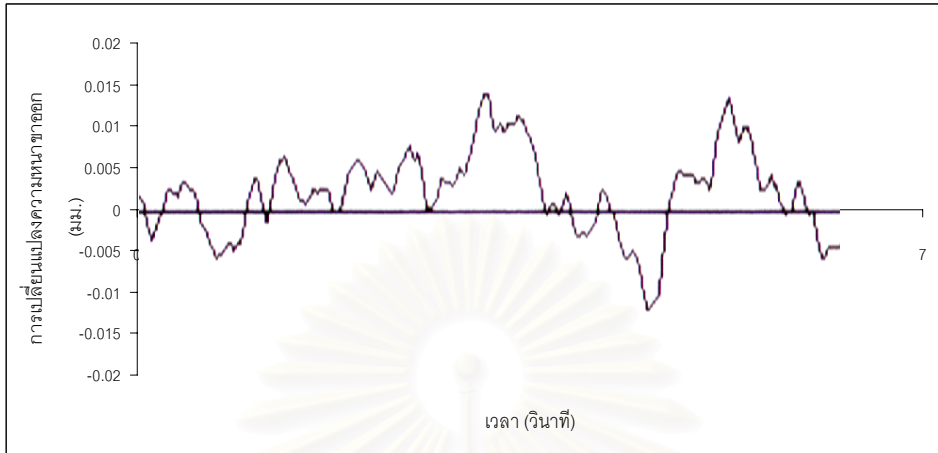
ตารางข้อมูล

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.274	0.643	0.354	0.232
hout (mm.)	1.274	0.643	0.354	0.232	0.160
Back tension (kg/sq.mm.)	4.0	15.5	14.5	14.0	12.5
Front tension (kg/sq.mm.)	15.5	14.5	14.0	12.5	6.8
Vr (mm./s)	3033	5667	10150	16067	24967
Strip width (mm.)	928	928	928	928	928
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์ = 0.013 มม.

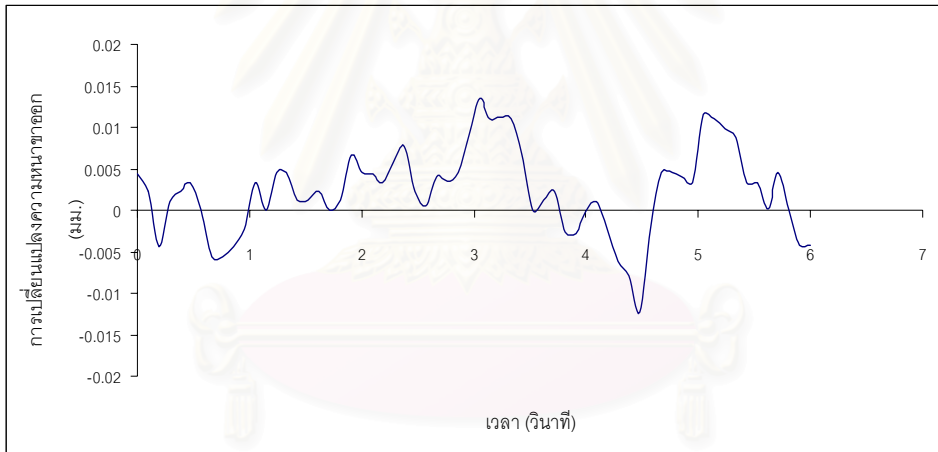
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลการรีดจริง



รูปที่ ข 1 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ข 2 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ชุดที่ 2

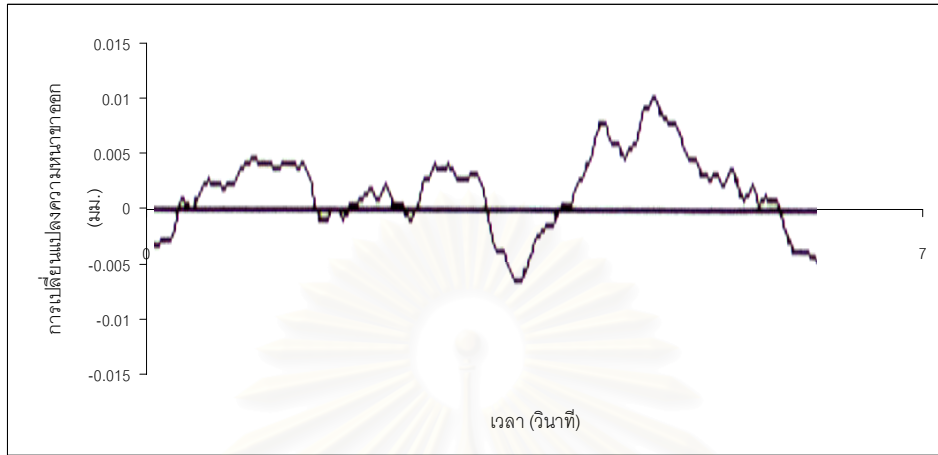
### ตารางข้อมูล

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.294	0.691	0.384	0.237
hout (mm.)	1.294	0.691	0.384	0.237	0.173
Back tension (kg/sq.mm.)	3.9	15.7	14.9	14.0	12.9
Front tension (kg/sq.mm.)	15.7	14.9	14.0	12.9	7.4
Vr (mm./s)	1550	3067	5833	9000	11800
Strip width (mm.)	773	773	773	773	773
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์กลาง = 0.013 มม.

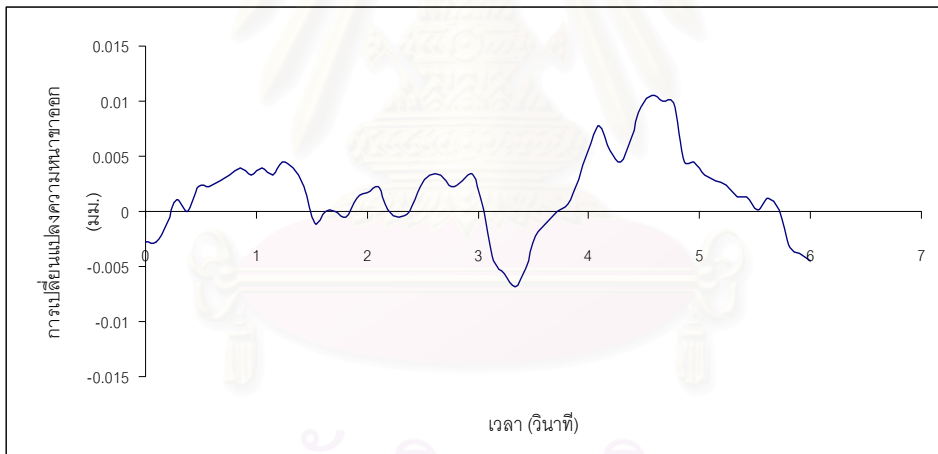
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลการรีดจริง



รูปที่ ๓ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ๔ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

### ชุดที่ 3

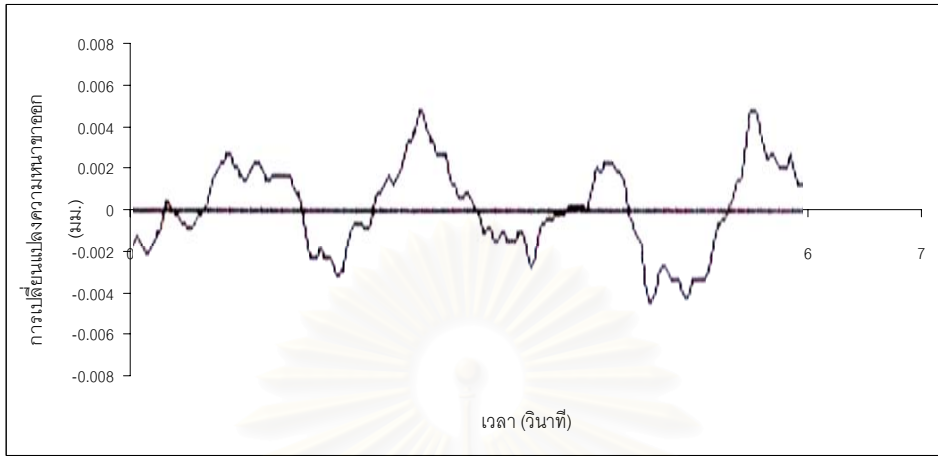
#### ตารางข้อมูล

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	4.500	3.484	2.728	2.146	1.665
hout (mm.)	3.484	2.728	2.146	1.665	1.598
Back tension (kg/sq.mm.)	2.9	15.9	15.4	14.5	15.9
Front tension (kg/sq.mm.)	15.9	15.4	14.5	15.9	3.9
Vr (mm./s)	2350	3183	4067	5067	5250
Strip width (mm.)	1236	1236	1236	1236	1236
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์ = 0.013 มม.

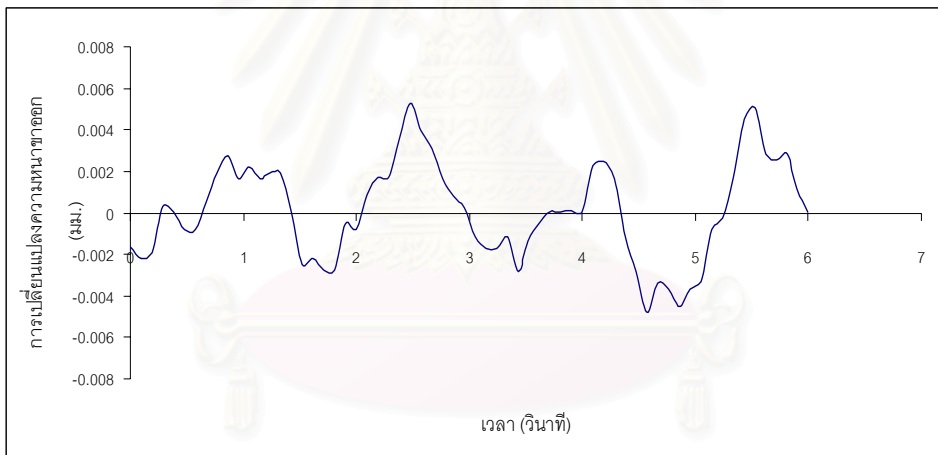
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลการรีดจริง



รูปที่ ๕ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ๖ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ชุดที่ 4

#### ตารางข้อมูล

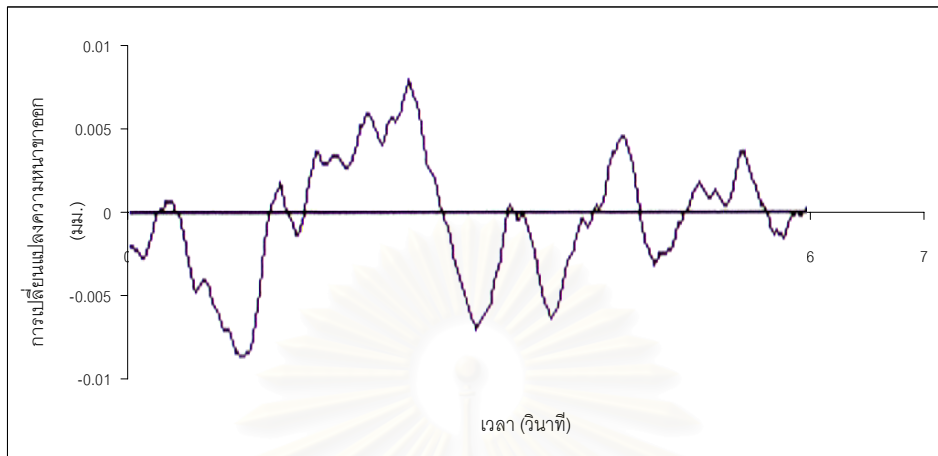
Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	2.000	1.284	0.711	0.406	0.262
hout (mm.)	1.284	0.711	0.406	0.262	0.186
Back tension (kg/sqr.mm.)	3.9	15.4	14.5	13.4	12.4
Front tension (kg/sq.mm.)	15.4	14.5	13.4	12.4	6.3
Vr (mm./s)	2133	4000	7083	10917	15250
Strip width (mm.)	773	773	773	773	773
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์กลาง = 0.015 มม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

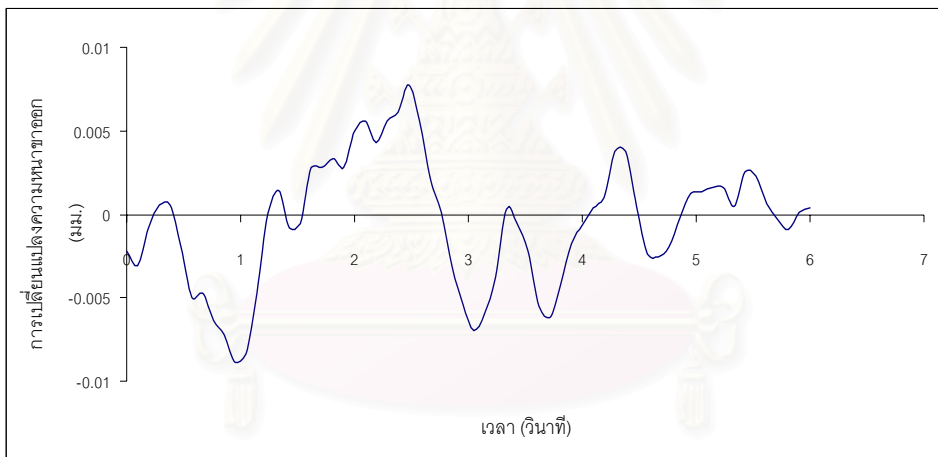


### ผลการรีดจริง



รูปที่ ๗ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ๘ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

## ชุดที่ 5

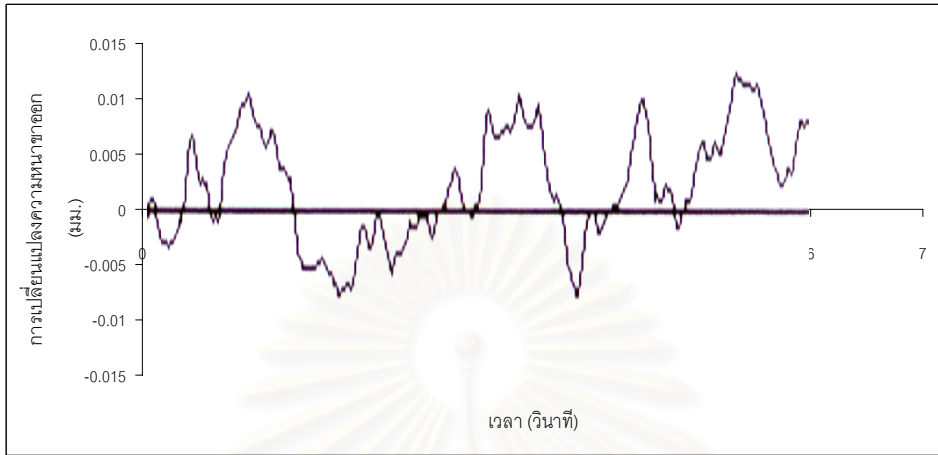
### ตารางข้อมูล

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	4.500	3.616	3.063	2.628	2.142
hout (mm.)	3.616	3.063	2.628	2.142	2.067
Back tension (kg/sq.mm.)	2.9	15.9	15.4	13.9	15.9
Front tension (kg/sq.mm.)	15.9	15.4	13.9	15.9	3.5
Vr (mm./s)	2033	2533	2967	3517	3667
Strip width (mm.)	773	773	773	773	773
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์กลาง = 0.015 มม.

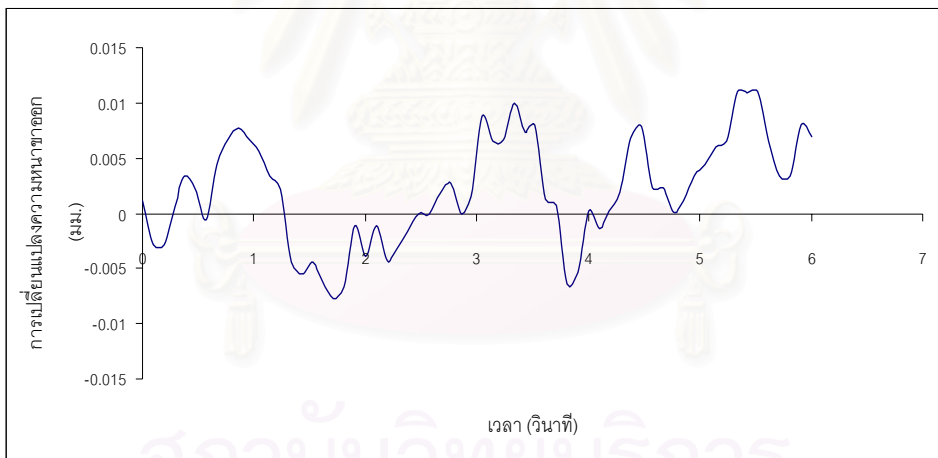
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลการรีดจริง



รูปที่ ๙ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ๑๐ การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

## ชุดที่ 6

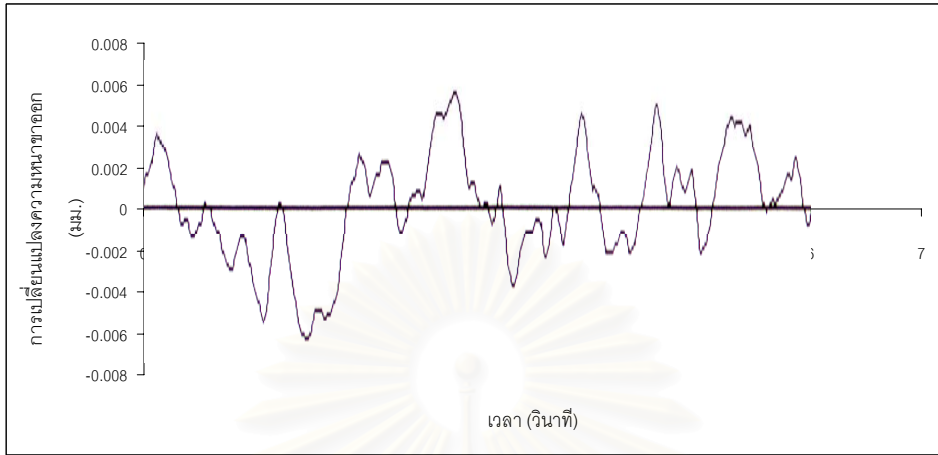
### ตารางข้อมูล

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	3.200	2.398	1.833	1.397	1.081
hout (mm.)	2.398	1.833	1.397	1.081	1.027
Back tension (kg/sq.mm.)	2.9	15.9	14.9	14.5	15.4
Front tension (kg/sq.mm.)	15.9	14.9	14.5	15.4	3.9
Vr (mm./s)	4717	6467	8617	11167	11583
Strip width (mm.)	773	773	773	773	773
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์กลาง = 0.015 มม.

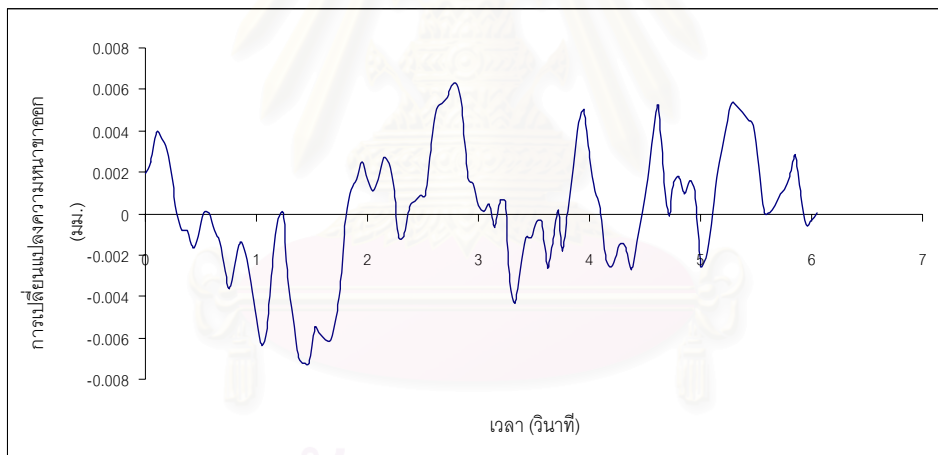
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลการรีดจริง



รูปที่ ข 11 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ข 12 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

สถาบันวิจัยบรการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ชุดที่ 7

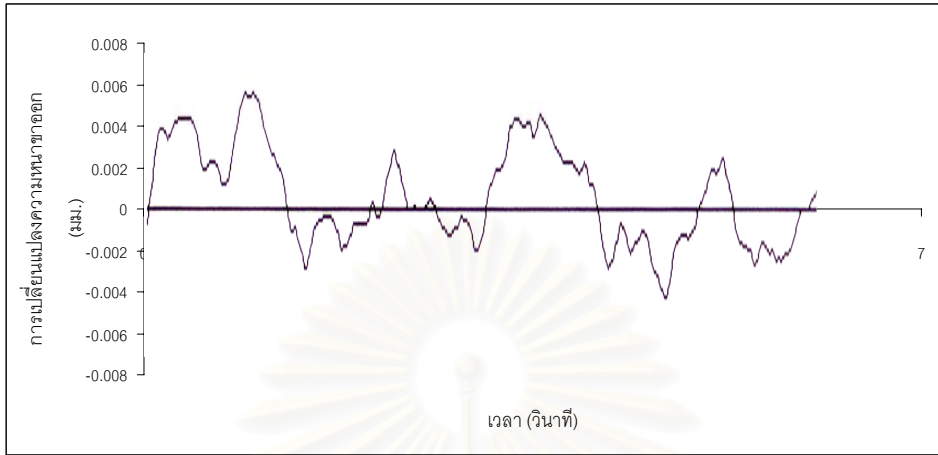
### ตารางข้อมูล

Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	4.500	3.484	2.728	2.146	1.665
hout (mm.)	3.484	2.728	2.146	1.665	1.598
Back tension (kg/sq.mm.)	2.9	15.9	15.4	14.5	15.8
Front tension (kg/sq.mm.)	15.9	15.4	14.5	15.8	3.9
Vr (mm./s)	2350	3183	4067	5067	5250
Strip width (mm.)	773	773	773	773	773
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์กลาง = 0.015 มม.

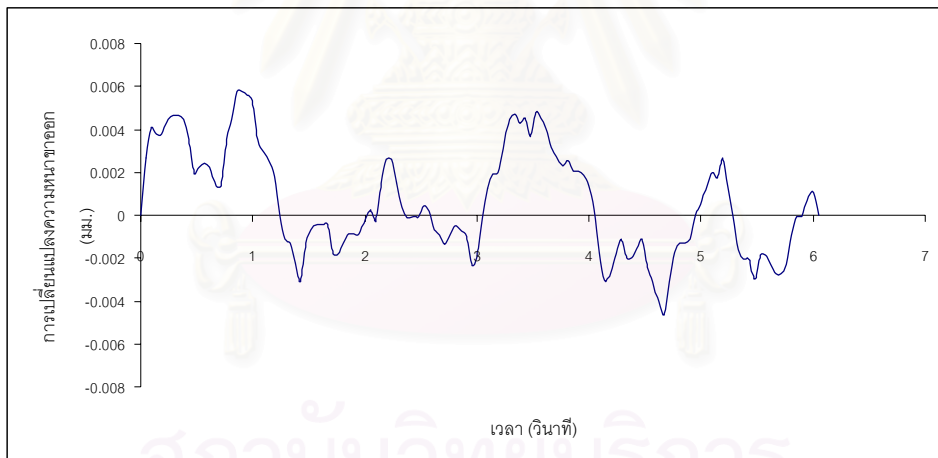
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลการรีดจริง



รูปที่ ข 13 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการรีดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ข 14 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

## ชุดที่ 8

### ตารางข้อมูล

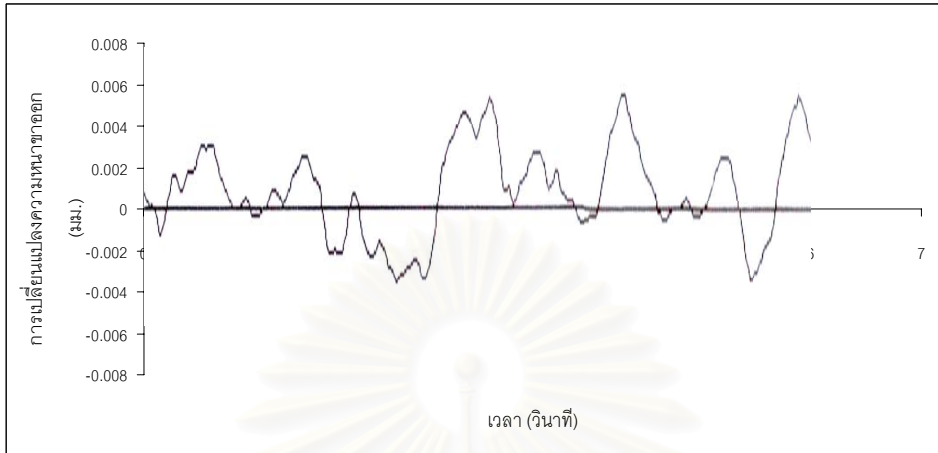
Stand	1	2	3	4	5
Hin (mm.)	4.500	3.484	2.728	2.146	1.665
hout (mm.)	3.484	2.728	2.146	1.665	1.598
Back tension (kg/sq.mm.)	2.9	15.9	15.4	14.5	15.8
Front tension (kg/sq.mm.)	15.9	15.4	14.5	15.8	3.9
Vr (mm./s)	2350	3183	4067	5067	5250
Strip width (mm.)	773	773	773	773	773
Elastic modulus (kg/sq.mm.)	21000	21000	21000	21000	21000
Pass length (mm.)	4600	4600	4600	4600	4600
Work roll radius (mm.)	260	260	265	240	200
Mill Modulus (kg/mm.)	500000	500000	500000	500000	500000

ระยะเยื้องศูนย์กลาง = 0.015 มม.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

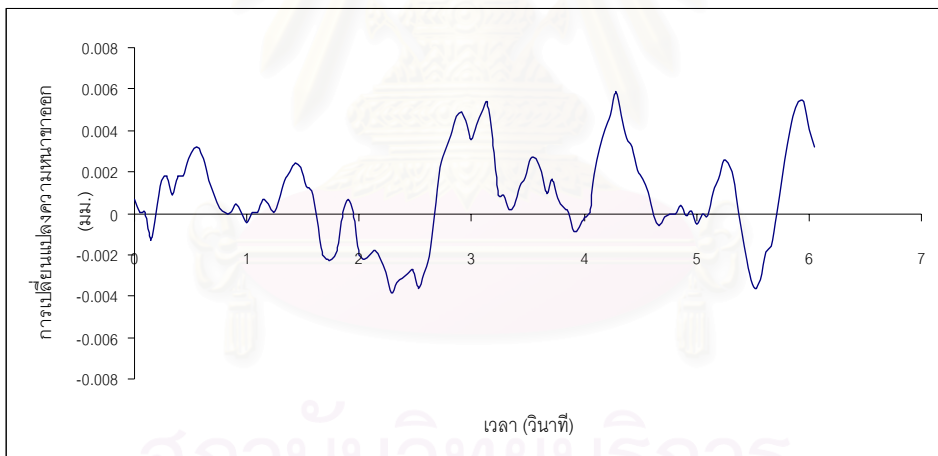


### ผลการวัดจริง



รูปที่ ข 15 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 จากข้อมูลการวัดจริง

### ผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ ข 16 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 1 คำนวณจากแบบจำลอง

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพศาล วิศิษฎ์วัฒนกุล เกิดเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2540 และ  
เข้าศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.  
2542