

แบบจำลองของมอเตอร์ลูบเปอร์เพื่อการควบคุมแรงดึงในแท่นรีดของ
การรีดร้อนต่อเนื่อง



นายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-616-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A MOTOR LOOPER MODEL FOR TENSION CONTROL IN THE CONTINUOUS
HOT ROLLING MILL



Mr. Teerapong Harnwirojkun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2000

ISBN 974-346-616-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองของมอเตอร์ลูปเปอร์เพื่อการควบคุมแรงดึงในแท่นรีดของการ
รีดร้อนต่อเนื่อง

โดย นายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไสว ด่านชัยวิจิตร)

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อิทธิพล เตี้ยวณิษฐ์)

ธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล : แบบจำลองของมอเตอร์ลูบเปอร์เพื่อการควบคุมแรงดึง
ในแท่นรีดของการรีดร้อนต่อเนื่อง (A Motor Looper Model for Tension Control in The
Continuous Hot Rolling Mill) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ; 79 หน้า
ISBN 974-346-616-9

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการสร้างแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนา
มิกส์ ทั้งแบบที่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูบเปอร์ และแบบที่ไม่มีการควบ
คุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดของการรีด 7 แท่นรีด โดยใช้ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์หาวิธีการ
ปรับปรุงระบบการรีดให้ได้ผลการรีดที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากการลดขนาดของการเปลี่ยนแปลง
ความหนาขาออกของแผ่นเหล็กในแท่นรีดสุดท้ายเป็นหลัก

จากผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองนี้พบว่า การควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยใช้
มอเตอร์ลูบเปอร์สามารถช่วยลดขนาดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายซึ่ง
เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาขาเข้าแท่นรีดแรกได้ และทำให้ทราบว่าในระบบของการ
ควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด ควรควบคุมความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดสุดท้ายให้มีค่าคงที่เพื่อลด
ขนาดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายอันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของ
ความเร็วลูกรีด นอกจากนี้จากข้อมูลการรีดจริงและผลการวิเคราะห์ยังพบว่าเมื่อแผ่นเหล็กมีความ
หนาขาเข้าอยู่ระหว่าง 32-39 มม. ความหนาของแผ่นเหล็กที่แตกต่างกันไม่เกิน 2 มม. จะส่งผลให้
แรงที่ใช้ในการรีดมีการเปลี่ยนแปลงลดหลั่นกันเป็นลำดับตั้งแต่แท่นรีดแรกลงมาจนถึงแท่นรีดที่ 4
ส่วนในแท่นรีดที่ 5-7 จะไม่มีผลกระทบ เมื่อระยะห่างระหว่างแท่นรีดและความเค้นแรงดึงระหว่าง
แท่นรีดของแต่ละแท่นรีด มีค่าเท่าเดิม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2543.....

4070549921 : Major METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : DYNAMIC STATE, MOTOR LOOPER.

TEERAPONG HARNWIROJKUN : A MOTOR LOOPER MODEL FOR TENSION

CONTROL IN THE CONTINUOUS HOT ROLLING MILL THESIS ADVISOR :

ASST.PROF.PRASONK SRICHAROENCHAI (D.ENG) 79 p.p. ISBN 974-346-616-9

Dynamic simulation of 7 stands continuous hot rolling with interstand tension control by motor looper and no interstand tension control were investigated. This simulation have been analyzed from continuous rolling theory. Dynamic characteristics of hot rolling was considered for rolling process improvement. Main of this improvement is reducing of final thickness variation.

For dynamic simulation, result from analysis showed that interstand tension control by motor looper could reduce final thickness variation when inlet thickness variation occurred. Because of roll speed variation, changing of thickness would be occurred. Consequently, for interstand tension control, roll speed of final stand should be constant to reduce final thickness variation. In case of 32-39 mm inlet thickness, actual data and analysis result showed that difference of inlet thickness that not over 2 mm made rolling force of 1st-4th stand change reduce respectively but did not change that of 5th-7th stand when roll gap and interstand tension were constant.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Metallurgical Engineering..... Student's signature

Field of study ...Metallurgical Engineering..... Advisor's signature

Academic year ...2000..... Co-advisor's signature

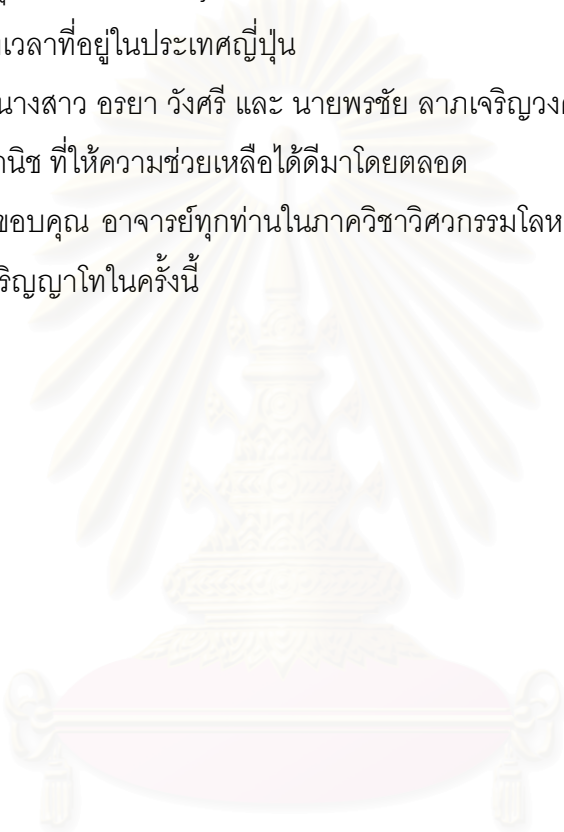
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ ดร.อิทธิพล เตี้ยวณิชย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง อาจารย์ไสว ด่านชัยวิจิตร

ขอขอบพระคุณ Dr. Fumio Fujita และวิศวกรในบริษัท NKK ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาที่อยู่ในประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบคุณ นางสาว อรยา วังศรี และ นายพรชัย ลากเจริญวงศา ที่ให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง นายอนุโรจน์ พานิช ที่ให้ความช่วยเหลือได้ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในครั้งนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(นายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล)
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ง
Abstract.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการรีดต่อเนื่อง.....	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 กระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง : ข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.2.2 ทฤษฎีการรีดร้อนต่อเนื่องแบบพลศาสตร์.....	5
2.2.2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด.....	5
2.2.2.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด.....	6
2.2.2.3 สมการ Forward slip.....	6
2.2.2.4 สมการ Backward slip.....	7
2.2.2.5 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด.....	7
2.2.2.6 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	7
2.2.2.7 สมการการเคลื่อนที่ของแกนลูปเปอร์.....	8
2.2.2.8 สมการการควบคุมความเร็วของลูกรีด.....	8
2.2.3 ทฤษฎีการรีดโดย Karman's equation.....	9
2.2.4 ทฤษฎีการรีดร้อนโดย Sim's equation.....	11
2.2.4.1 แรงในการรีด.....	11
2.2.4.2 Roll flattening.....	13
2.2.4.3 Forward slip.....	13
2.2.5 อนุพันธ์ขององค์ประกอบการรีด.....	14
บทที่ 3 ลักษณะและรายละเอียดของแบบจำลอง.....	17

3.1 แบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์.....	17
3.1.1 ตารางของการรีด.....	17
3.1.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	18
3.1.3 รายละเอียดของโปรแกรม.....	18
3.1.3.1 ตารางข้อมูล.....	18
3.1.3.2 แจกแจงสมการจากทฤษฎีการรีดร้อนต่อเนื่องแบบพลศาสตร์..	19
3.1.3.2.1 สมการความหนาของชิ้นงานรีด.....	19
3.1.3.2.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด.....	20
3.1.3.2.3 สมการ Forward slip.....	20
3.1.3.2.4 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด.....	21
3.1.3.2.5 หลักการอนุรักษ์มวลภายใน.....	21
3.1.3.2.6 สมการความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึง.....	22
3.1.3.2.7 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	22
3.1.3.3 ตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	22
3.2 แบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ซึ่งถูกควบคุม.....	24
แรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์	
3.2.1 ตารางการรีด.....	24
3.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	24
3.2.3 รายละเอียดของโปรแกรม.....	25
3.2.3.1 ตารางข้อมูล.....	25
3.2.3.2 แจกแจงสมการทั้งหมดของแบบจำลองนี้.....	26
3.2.3.2.1 สมการการเคลื่อนที่ของแกนลูปเปอร์.....	26
3.2.3.2.2 สมการควบคุมความเร็วของลูกรีด.....	27
3.2.3.3 ตารางการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	27
3.3 หน้าที่การทำงานของโปรแกรมต่าง ๆ.....	28
บทที่ 4 ผลการคำนวณ.....	30
4.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ 7 แท่นรีด...30	
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าแท่นรีดที่ 1.....	35
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลูกรีดในแท่นรีดที่ 1.....	35

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลูกรีดในแท่นรีดที่ 4.....	35
4.1.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลูกรีดในแท่นรีดที่ 7.....	36
4.2 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ที่ถูกควบคุมแรงดึงโดยมอเตอร์รูปเปอร์ 7 แท่นรีด	37
4.2.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงโดยมอเตอร์รูปเปอร์ 7 แท่นรีด (แบบ Vr1 คงที่)	38
4.2.2 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงโดยมอเตอร์รูปเปอร์ 7 แท่นรีด (แบบ Vr7 คงที่)	39
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผล.....	41
5.1 บทบาทของระบบที่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดและระบบที่ไม่มี	41
การควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้าย	
5.2 ผลของการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์รูปเปอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้าย	42
5.3 การเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการรีดจากแบบจำลองและจากข้อมูลของการรีดจริง	43
5.3.1 ความหนาที่ทางเข้าแท่นรีดที่ 1 ต่างกันแต่ปัจจัยอื่น ๆ คงเดิม.....	44
5.3.2 ค่า Roll gap ที่แท่นรีดสุดท้ายมีความแตกต่างกันแต่ปัจจัยอื่น ๆ คงเดิม..	45
5.3.3 ค่า Roll gap ที่แต่ละแท่นรีดมีความแตกต่างกันแต่ปัจจัยอื่น ๆ คงเดิม....	46
บทที่ 6 สรุปผล.....	49
รายการอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	79

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงตารางการรีดร้อน 7 แทนรีด.....	17
ตารางที่ 3.2 แสดงตารางข้อมูลของการรีดร้อน 7 แทนรีด.....	19
ตารางที่ 3.3 แสดงตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	23
ตารางที่ 3.4 แสดงตารางข้อมูลของการรีดร้อน 7 แทนรีด (ควบคุมแรงดึง).....	26
ตารางที่ 3.5 แสดงตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (ควบคุมแรงดึง).....	28
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ.....	30
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (ความหนาขาเข้าแตกต่างกัน).....	44
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (Roll gap แทนสุดท้ายต่างกัน).....	45
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (Roll gap ของแต่ละแทนรีดต่างกัน).....	46
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (Roll gap ของแต่ละแทนรีดต่างกัน).....	47



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	4
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนสภาวะการรีด.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงค่าแรงต่าง ๆ ของชิ้นงานใน Roll gap.....	9
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	18
รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (ควบคุมแรงดึง).....	25
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการทำงานของโปรแกรมต่าง ๆ.....	29
รูปที่ 4.1 แสดงผลกระทบเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H1=1\%$ (a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด	31
รูปที่ 4.2 แสดงผลกระทบเมื่อความเร็วลูกรีดของแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta Vr1=0.1\%$ (a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด	32
รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบเมื่อความเร็วลูกรีดของแท่นรีดที่ 4 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta Vr4=0.1\%$ (a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด	33
รูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบเมื่อความเร็วลูกรีดของแท่นรีดที่ 7 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta Vr7=0.1\%$ (a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด	34
รูปที่ 4.5 แสดงระบบการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด (a) ควบคุมความเร็วลูกรีด..... (b) ควบคุมความเร็วจานที่ 7 (แท่นสุดท้าย) ให้คงที่	37
รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H1=1\%$ ($Vr1$ คงที่) (a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด	38
รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H1=1\%$ ($Vr7$ คงที่) (a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด	39
รูปที่ 5.1 แสดงการรีดใน 1 แท่นรีด.....	41
รูปที่ 5.2 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H1=1\%$	42

รูป	หน้า
รูปที่ 5.3 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้าย.....	43
เมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H1=1\%$	
รูปที่ 5.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีดระหว่าง.....	45
แบบจำลองกับข้อมูลจริง (ความหนาขาเข้าแตกต่างกัน)	
รูปที่ 5.5 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีดระหว่าง.....	46
แบบจำลองกับข้อมูลจริง (Roll gap ของแท่นรีดสุดท้ายต่างกัน)	
รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีดระหว่าง.....	47
แบบจำลองกับข้อมูลจริง (Roll gap ของแต่ละแท่นรีดต่างกัน)	
รูปที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีดระหว่าง.....	47
แบบจำลองกับข้อมูลจริง (Roll gap ของแต่ละแท่นรีดต่างกัน)	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กแผ่นนับเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งอุตสาหกรรมหนึ่ง เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากอุตสาหกรรมนี้ไปใช้งานในการผลิตต่อเนื่องอีกมากมาย ทั้งเหล็กที่ผ่านการรีดร้อนและเหล็กที่ผ่านการรีดเย็น เช่น ตัวถังรถยนต์ , กล่องทรงภายนอกของเครื่องใช้ไฟฟ้า , ตู้คอนเทนเนอร์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและต้นทุนที่เหมาะสม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเหล็กแผ่นให้มีคุณภาพดีจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง คุณสมบัติของเหล็กแผ่นที่มักถูกพิจารณาเป็นลำดับต้นๆในการผลิตก็คือ ความเที่ยงตรงของความหนาของเหล็กแผ่นนั้นๆ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของสินค้าที่ผลิตเป็นอย่างมาก เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ , อุตสาหกรรมการผลิตกระป๋อง เป็นต้น

ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานรีดทั้งรีดร้อนและรีดเย็นโดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์ จึงมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะทดแทนข้อเสียซึ่งเกิดจากค่าใช้จ่ายที่สูงของการทดลองจริง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานรีดต่างๆจึงถูกสร้างขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะแบบจำลองการรีดที่เป็นการรีดต่อเนื่อง เพราะในงานรีดจริงเป็นการรีดแบบต่อเนื่องทั้งสิ้น แบบจำลองประเภทนี้อาศัยทฤษฎีที่เรียกว่า ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง (Continuous rolling theory) ซึ่งสามารถถูกใช้วิเคราะห์สภาวะต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการรีดจริง และมีความคล่องตัวสูงในการปรับเปลี่ยนข้อมูลต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง ทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์หาวิธีการในการปรับปรุงการรีดให้ได้ผลการรีดที่ดีขึ้น รวมทั้งยังสามารถใช้ในการช่วยการออกแบบระบบการรีด หรือ ช่วยในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานรีดด้วย เช่น ตัวมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper) สำหรับการรีดร้อน เป็นต้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์มีความเจริญเป็นอย่างยิ่ง ทำให้สามารถคำนวณและวิเคราะห์ระบบการรีดด้วยแบบจำลองนี้ได้โดยง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state)

1.2.2 สร้างแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper)

1.2.3 วิเคราะห์ผลของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) แบบต่างๆ จากแบบจำลอง โดยพิจารณาแรงดึงระหว่างแท่นรีดและความหนาขาออกเป็นหลัก

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) ของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง
- 1.3.2 วิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความหนาสุดท้ายของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state)
- 1.3.3 วิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper) ในการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 สามารถใช้แบบจำลองนี้ในการวิเคราะห์หาวิธีการปรับปรุงกระบวนการรีดให้ได้ผลที่ดีขึ้น
- 1.4.2 เพื่อเป็นงานวิจัยพื้นฐานและเป็นตัวอย่างในการใช้ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์หาลักษณะต่าง ๆ ของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

กระบวนการรีดต่อเนื่องสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. กระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง (Continuous hot rolling)
2. กระบวนการรีดเย็นต่อเนื่อง (Continuous cold rolling)

โดยกระบวนการรีดทั้ง 2 กระบวนการนี้มีลักษณะใหญ่ๆที่คล้ายคลึงกัน คือ เป็นการรีดต่อเนื่องในหลายๆแท่นรีดพร้อมๆกัน โดยโลหะแผ่นจะถูกลดความหนาลงเป็นลำดับในแต่ละแท่นรีด ในกรณีของการรีดร้อนต่อเนื่องโลหะแผ่นจะถูกทำให้ร้อนและถูกลดความหนาลงในอัตราส่วนที่มากกว่าการรีดเย็นต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีส่วนที่แตกต่างกันอย่างมาก คือ แรงดึงระหว่างแท่นรีด การรีดเย็นต่อเนื่องมีแรงดึงระหว่างแท่นรีดค่อนข้างสูงประมาณ 10-20 kg/mm² ขณะที่การรีดร้อนต่อเนื่องจะมีแรงดึงระหว่างแท่นรีดประมาณ 0.3-8 kg/mm² ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแผ่นเหล็กในแต่ละแท่นรีด

งานวิจัยทางด้านงานรีดนั้นมักมีผู้ทำการวิจัยมากมายด้วยวิธีที่แตกต่างกันโดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวกับการรีดต่อเนื่อง

Uetz Guenter ³ ทำการทดลองรีดเหล็กกล้าโดยการเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆของการรีดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของลูกรีด (Roll gap) กับความหนาของชิ้นงานสำเร็จที่สภาวะการรีดต่างๆโดยข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลอ้างอิงในการปฏิบัติงานจริง

R.A. Phillips ¹ เป็นบุคคลแรกซึ่งศึกษาถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของจุด Neutral point ของลูกรีดในสภาวะที่ถูกรบกวนระหว่างการรีด (Dynamic state) โดยใช้สมการอนุพันธ์ในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนตำแหน่งของจุด Neutral point เมื่อความหนาเข้าแท่นรีดของแผ่นเหล็กไม่คงที่

Hiromu Suzuki ² ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการรีดร้อนต่อเนื่อง 3 แท่นรีดที่ติดตั้งระบบควบคุมการรีดโดยใช้ Analogue computer

Claude Gomez ⁴ และคณะได้สร้างแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องโดยพิจารณาคุณสมบัติทางด้านการคืบ (creep) ของแผ่นเหล็กที่รีดร้อนด้วยโดยใช้ Analogue computer

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง : ข้อมูลเบื้องต้น

ในสภาวะของการรีดจริงนั้น สภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ค่าตัวแปรต่างๆของการรีดมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เช่น ความหนาของแผ่นเหล็กที่ทางออกของแต่ละแท่นรีด , แรงดึงระหว่างแท่นรีดของแต่ละแท่นรีด เป็นต้น ซึ่งความไม่คงที่ของตัวแปรเหล่านี้ส่งผลให้ความหนาของแผ่นเหล็กที่ทางออกของแต่ละแท่นรีดสุดท้ายมีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆของระบบการรีดเพื่อปรับปรุงให้ได้ผลของการรีดที่ดีขึ้น

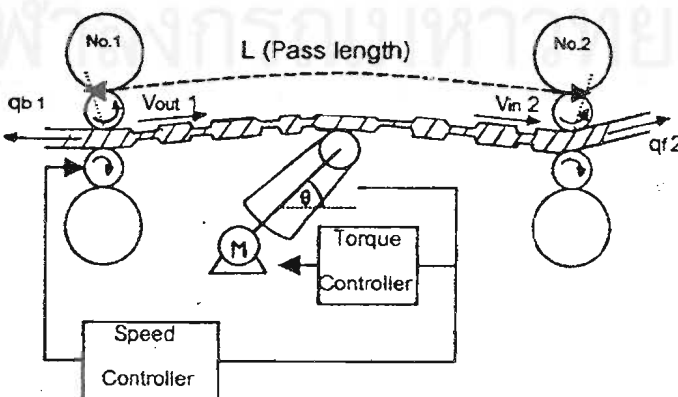
วิธีการในการวิเคราะห์ระบบของการรีดร้อนต่อเนื่องนั้น สามารถทำได้โดยการสร้างแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ทั้งแบบที่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดและแบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด ผลของการวิเคราะห์จากแบบจำลองเหล่านี้สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงระบบการรีดต่อไป

จากการศึกษาพบว่าค่าของแรงดึงระหว่างแท่นรีดเป็นปัจจัยซึ่งมีอิทธิพลต่อความหนาสุดท้ายมากที่สุดปัจจัยหนึ่ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดให้มีค่าคงที่มากที่สุดตลอดช่วงเวลาของการรีด เพื่อให้ได้ความหนาสุดท้ายแม่นยำมากขึ้น ในกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง อุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดก็คือ มอเตอร์ลูบเปอร์ (Motor looper) นั่นเอง

มอเตอร์ลูบเปอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ

1. มอเตอร์ (Motor) ซึ่งเป็นตัวส่งกำลังหลัก
2. ลูบเปอร์ (Looper) ซึ่งเป็นแขนต่อกับมอเตอร์

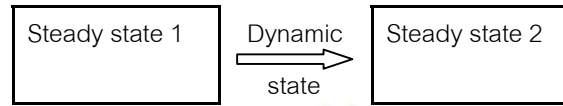
โดยแขนของลูบเปอร์จะเลื่อนขึ้นลงเพื่อรักษาค่าของแรงดึงระหว่างแท่นรีดเมื่อค่าแรงดึงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ตั้งไว้เมื่อเกิดสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ขึ้น



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด¹

2.2.2 ทฤษฎีการรีดร้อนต่อเนื่องแบบพลศาสตร์ (Dynamic continuous hot rolling theory)

การศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงเส้นทางการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆของการรีดร้อนต่อเนื่องในสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) เส้นทางการเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกคำนวณสัมพันธ์กับช่วงเวลาของสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) นั้น



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนสถานะการรีด

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆของการรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดต่างๆกันแสดงไว้ดังนี้

2.2.2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานรีดที่เกิดจากกระบวนการรีดภายในแท่นรีดว่าเกิดจากการกำหนดค่าระยะห่างระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll gap) รวมกับค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงเนื่องจากการรีด (Rolling force) โดยความสัมพันธ์นี้แสดงโดยสมการต่อไปนี้

$$h_i = G_i + \frac{P_i}{M_i}$$

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

$$\Delta h_i - \Delta G_i - \frac{\Delta P_i}{M_i} = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ h = ความหนาขาออกของชิ้นงาน (Outlet thickness ,mm)

G = ระยะห่างระหว่างลูกรีด (Roll gap ,mm)

P = แรงเนื่องจากการรีด (Rolling force ,kg)

M = ค่า Mill modulus (kg/mm)

i = แสดงตำแหน่งแท่นรีดของตัวแปร

สมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ในทุกแท่นรีดเนื่องจากทุกแท่นรีดมีการแสดงค่าความหนาขาออกจากค่า Roll gap ที่ตั้งไว้และค่า Rolling force ที่เกิดขึ้น

2.2.2.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด (Equation of Rolling force)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า Rolling force กับตัวแปรอื่นๆ สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ของ Rolling force กับตัวแปรอื่นๆ ได้ในรูปของฟังก์ชัน $P_i = P(H_i, h_i, qf_i, qb_i, Vr_i)$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial P_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i + \frac{\partial P_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i + \frac{\partial P_i}{\partial Vr_i} \Delta Vr_i$$

$$\Delta P_i - \frac{\partial P_i}{\partial H_i} \Delta H_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i - \frac{\partial P_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i - \frac{\partial P_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i - \frac{\partial P_i}{\partial Vr_i} \Delta Vr_i = 0 \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- H = ความหนาขาเข้าของชิ้นงาน (Inlet thickness ,mm)
 - h = ความหนาขาออกของชิ้นงาน (Outlet thickness ,mm)
 - qf = ความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension ,kg/mm²)
 - qb = ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด (Backward tension ,kg/mm²)
 - Vr = ความเร็วของลูกรีด (Roll speed , mm/s)

2.2.2.3 สมการ Forward slip (Equation of forward slip)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า Forward slip กับตัวแปรอื่นๆ สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ของ Forward slip กับตัวแปรอื่นๆ ได้ในรูปของฟังก์ชัน $f_i = f(H_i, h_i, qf_i, qb_i)$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta f_i = \frac{\partial f_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial f_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial f_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i + \frac{\partial f_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i$$

$$\Delta f_i - \frac{\partial f_i}{\partial H_i} \Delta H_i - \frac{\partial f_i}{\partial h_i} \Delta h_i - \frac{\partial f_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i - \frac{\partial f_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i = 0 \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- H = ความหนาขาเข้าของชิ้นงาน (Inlet thickness ,mm)
 - h = ความหนาขาออกของชิ้นงาน (Outlet thickness ,mm)
 - qf = ความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension ,kg/mm²)
 - qb = ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด (Backward tension ,kg/mm²)

สมการนี้เป็นสมการซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของชิ้นงานรีด นั่นเอง

2.2.2.4 สมการ Backward slip (Equation of Backward slip)

เช่นเดียวกับสมการความสัมพันธ์ของ Forward slip สามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชัน $\varepsilon_i = \varepsilon(H_i, h_i, qf_i, qb_i)$ โดยค่า $\varepsilon = (1+f)*h / H - 1$ เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\Delta\varepsilon_i - \frac{\partial\varepsilon_i}{\partial H_i} \Delta H_i - \frac{\partial\varepsilon_i}{\partial h_i} \Delta h_i - \frac{\partial\varepsilon_i}{\partial qf_i} \Delta qf_i - \frac{\partial\varepsilon_i}{\partial qb_i} \Delta qb_i = 0 \quad (2.4)$$

2.2.2.5 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Equation of material velocity)

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Strip velocity) กับความเร็วรอบของลูกรีด (Roll speed) โดยพิจารณาจากค่าของ Forward slip และ Backward slip สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{out,i} = (1 + f_i) V_{r_i}$$

$$V_{in,i} = (1 + \varepsilon_i) V_{r_i}$$

$$\Delta V_{out,i} - (1 + f_i) \Delta V_{r_i} - \Delta(1 + f_i) V_{r_i} = 0 \quad (2.5)$$

$$\Delta V_{in,i} - (1 + \varepsilon_i) \Delta V_{r_i} - \Delta(1 + \varepsilon_i) V_{r_i} = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ V_{out} = อัตราเร็วขาออกของชิ้นงาน (Outlet strip velocity ,mm/s)

V_{in} = อัตราเร็วขาเข้าของชิ้นงาน (Inlet strip velocity ,mm/s)

V_r = ความเร็วของลูกรีด (Roll speed , mm/s)

2.2.2.6 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of interstand tension)

สมการนี้เป็นสมการซึ่งแสดงความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่เวลาใดๆ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติการแปรรูปแบบ Elastic ของชิ้นงานรีดสัมพันธ์กับค่าของความเร็วของชิ้นงานรีดทั้งขาออกและขาเข้าแท่นรีด สามารถแสดงได้ดังนี้

$$qf_i = qb_{i+1}$$

$$\Delta qf_i = \Delta qb_{i+1} \quad (2.7)$$

$$qf_i = \frac{E}{L_0} \int_0^l (V_{in,i+1} - V_{out,i}) dt + \frac{E}{L_0} (L - L_0)$$

$$\Delta qf_i = \frac{E}{L_0} [(V_{in,i+1} + \Delta V_{in,i+1}) - (V_{out,i} + \Delta V_{out,i})] dt + \frac{E}{L_0} (\Delta L) \quad (2.8)$$

(พิสูจน์ในภาคผนวก ก.)

- เมื่อ E = ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานรีดร้อน (Elastic modulus of hot steel ,kg/mm²)
 L_0 = ระยะห่างระหว่างแท่นรีด (Pass length ,mm)
 L = ความยาวของชิ้นงานรีดที่เวลาใดๆ

2.2.2.7 สมการการเคลื่อนที่ของแขนลูปเปอร์ (Equation of looper motion)

สมการนี้เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนของแขนลูปเปอร์กับค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดของการรีดร้อนต่อเนื่องที่เวลาใดๆ โดยมีมอเตอร์เป็นตัวส่งกำลังหลักสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\Delta \theta_i + \frac{A_i}{I} r_i \sin \alpha_i \cos \theta_i dt^2 \Delta qf_i = \frac{A_i}{I} r_i \sin \alpha_i \cos \theta_i dt^2 (qf_{i0} - qf_i) + \omega_i dt \quad (2.9)$$

(พิสูจน์ในภาคผนวก ก.)

- เมื่อ A = พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงาน (Cross section area ,mm²)
 I = โมเมนต์ความเฉื่อยของแขนลูปเปอร์ (Moment of inertia,kg.m²)
 r = ความยาวแขนของลูปเปอร์ (mm)
 θ = มุมลูปเปอร์ (rad)
 α = มุมชิ้นงานที่ทำกับแท่นรีด (rad)
 qf_0 = ค่าความเค้นที่ต้องการ (kg/mm²)
 ω = ความเร็วเชิงมุมของแขนลูปเปอร์ (rad/s)

2.2.2.8 สมการการควบคุมความเร็วของลูกรีด (Equation of speed control)

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของลูกรีดโดยเลือกควบคุมความเร็วของลูกรีดตัวที่อยู่ทางด้านต้นของแนวการรีด เนื่องจากจะต้องรักษาความเร็วของลูกรีดทางด้านปลายให้คงที่เพื่อควบคุมความหนาที่ทางออกให้คงที่ สมการที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของลูกรีดนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบ ในที่นี้จะใช้สมการการควบคุมแบบ PI control สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Vr = Vr_0 + K_p \left[(\theta - \theta_0) + \frac{1}{K_t} \int_0^t (\theta - \theta_0) dt \right]$$

$$\Delta V_{r_i} = \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta \theta_i + \frac{K_p}{K_t} (\theta_i - \theta_o) dt \quad (2.10)$$

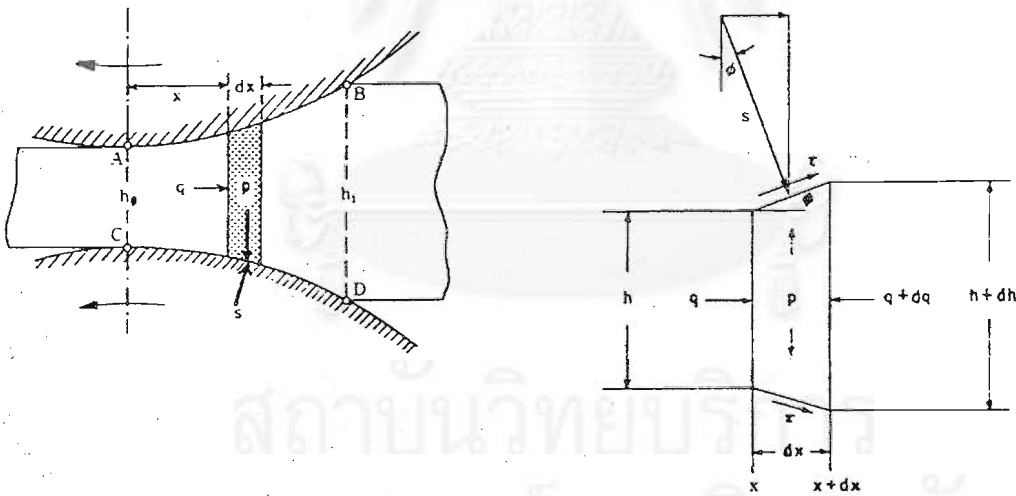
(พิสูจน์ในภาคผนวก ก.)

เมื่อ $\theta_o =$ มุมเป้าหมายของลูบเปอร์ (Target angle of looper, rad)

$K_p, K_t =$ Gain of looper ASR system

2.2.3 ทฤษฎีการรีดโดยคาร์มาน (Karman's equation¹)

สมการของคาร์มาน (Karman's equation) เป็นสมการที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางในฐานะที่เป็นสมการพื้นฐานของการรีดทั้งหมด แต่เนื่องจากสมการนี้เป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งยากแก่การหาคำตอบโดยวิธีธรรมดา จึงมีผู้ทำการประยุกต์สมการนี้ด้วยวิธีการต่างๆกัน และจัดรูปแบบให้ง่ายขึ้น ปัจจุบันสามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ได้อย่างไม่ยากและสามารถใช้คำตอบเหล่านั้นในการเปรียบเทียบ กับสมการของซิม (Sim's equation¹) ซึ่งเป็นสูตรที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้



รูปที่ 2.3 แสดงค่าแรงต่างๆของชิ้นงานใน Roll gap¹

พิจารณาความสมดุลของแรงในแนวระดับที่เกิดขึ้นในส่วนของชิ้นงานเล็กๆที่อยู่ในตำแหน่งระหว่างจุด Neutral point กับ ทางออก สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$qh - (q + dq)(h + dh) + 2r \cos \phi \frac{dx}{\cos \phi} + 2S \sin \phi \frac{dx}{\cos \phi} = 0 \quad (2.11)$$

$$d(hq) = 2\tau dx + 2S \tan \phi dx \quad (2.12)$$

จากรูปที่ 2.3 พิจารณาแรงในแนวตั้ง จะได้

$$p dx = S \cos \phi \frac{dx}{\cos \phi} - \tau \sin \phi \frac{dx}{\cos \phi}$$

$$p = S - \tau \tan \phi \quad (2.13)$$

แทนค่า S ของสมการ (2.13) ในสมการ (2.12) จะได้

$$\frac{d(hq)}{dx} = \frac{2\tau}{\cos^2 \phi} + 2p \tan \phi \quad (2.14)$$

มีค่าจำกัดสำหรับความเค้นเฉือน (Shearing stress, τ) เนื่องจากการขาดของชิ้นงานที่ผิวของลูกรีด

$$\tau \leq \frac{k}{2}$$

เมื่อ k = Deformation resistance (kg/mm²)

แต่เนื่องจากการรีดร้อนมีความเสียดทานแบบเกาะติด (Sticking friction) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau = \frac{k}{2}$$

แทนค่า τ ในสมการ (2.14) จะได้

$$\frac{d(hq)}{dx} = \frac{k}{\cos^2 \phi} + 2p \tan \phi \quad (2.15)$$

และสำหรับตำแหน่งระหว่างจุด Neutral point กับ ทางเข้า จะได้

$$\frac{d(hq)}{dx} = -\frac{k}{\cos^2 \phi} + 2p \tan \phi \quad (2.16)$$

จาก Yield criterion สำหรับ Plain strain จะได้

$$p - q = k$$

สมการ (2.15) และ (2.16) นี้ เรียกว่า Karman 's equation สำหรับการรีดร้อนซึ่งสามารถหาคำตอบของสมการนี้โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) นั้นเอง คำตอบที่หาได้จากสมการนี้เป็นค่าของแรงในการรีด (Rolling force) ที่แต่ละตำแหน่งใน Roll gap ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์แรงที่กระทำในแต่ละตำแหน่งของ Roll gap

2.2.4 ทฤษฎีการรีดร้อนโดย Sim' s Equation ¹

การคำนวณค่าองค์ประกอบของการรีดนั้นเป็นการคำนวณที่เป็นอิสระในแต่ละแทนรีด โดยหลักการของการคำนวณตั้งอยู่บนพื้นฐานของ Classical rolling theory ที่เหมาะสมซึ่งสมการของ Sim นั้น เป็นสมการที่ใช้คำนวณค่าองค์ประกอบของการรีดร้อนซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวาง โดยค่าองค์ประกอบต่างๆที่ถูกคำนวณมีดังนี้

2.2.4.1 แรงในการรีด (Rolling force)

สมการนี้พิจารณาแรงที่ใช้ในการรีดเมื่อมีความเค้นแรงดึงทางด้านหน้าและด้านหลังกระทำอยู่ด้วย สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P = (\sigma_c - \sigma_a)L_d Q_p \quad (2.17)$$

- เมื่อ
- P = แรงในการรีด (Rolling force ,kg)
 - σ_c = Deformation resistant (kg/mm²)
 - σ_a = ความเค้นแรงดึงเฉลี่ย (Average tensile stress ,kg/mm²)
 - L_d = Contact length (mm)
 - Q_p = Geometric factor

โดยค่าของความเค้นแรงดึงเฉลี่ยนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{\phi_n}{\alpha}\right)qb + \left(\frac{\phi_n}{\alpha}\right)qf \quad (2.18)$$

- เมื่อ
- ϕ_n = Neutral angle (rad)
 - α = Bite angle (rad)
 - qf = ความเค้นแรงดึงด้านหน้า (Forward tension ,kg/mm²)
 - qb = ความเค้นแรงดึงด้านหลัง (Backward tension ,kg/mm²)

จากสมการที่ (2.17) ค่าตัวแปรของ Q_p สามารถหาได้จาก

$$Q_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(1-r)}{r}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{(1-r)}} - \frac{\pi}{4} - \sqrt{\frac{R(1-r)}{rh}} \ln\left(\frac{h_n}{h} \sqrt{(1-r)}\right) \quad (2.19)$$

- เมื่อ
- r = reduction ratio
 - h_n = ความหนาของชิ้นงานที่จุด Neutral point (mm)
 - h = ความหนาขาออกของชิ้นงาน (Outlet thickness ,mm)
 - R = รัศมีของลูกรีด (Roll radius ,mm)

ค่าของ h_n สามารถหาได้จากสมการ

$$h_n = h + 2R(1 - \cos \phi_n) \quad (2.20)$$

และค่าของ ϕ_n เมื่อพิจารณาทั้งความเค้นแรงดึงด้านหน้าและด้านหลังแล้ว สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\phi_n = \sqrt{\frac{h}{R}} \tan \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{(1-r)}} - \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{h}{R}} \ln \left\{ \frac{H(1 - \frac{qf}{\sigma_c})}{h(1 - \frac{qb}{\sigma_c})} \right\} \right] \quad (2.21)$$

เมื่อ H = ความหนาขาเข้าของชิ้นงาน (Inlet thickness, mm)

และจากสมการที่ (2.17) เช่นเดียวกันค่าของ L_d สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_d = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (2.22)$$

เมื่อ Δh = ความหนาขาเข้า - ความหนาขาออก (H-h, mm)

สำหรับค่าของ Deformation resistant (σ_c) ในสมการที่ (2.17) สามารถหาได้จาก Misaka's formula² ดังสมการต่อไปนี้ (สำหรับ Low carbon steel)

$$\sigma_c = \exp\left(K + \frac{A}{T}\right) \varepsilon^{0.21} \dot{\varepsilon}^{0.13} \quad (2.23)$$

เมื่อ $K = 0.126 - 1.75C + 0.594C^2$ (C = % Carbon content)

$$A = 2851 + 2968C - 1120C^2$$

ε = strain

$\dot{\varepsilon}$ = strain rate (sec⁻¹)

N = ความเร็วของลูกรีด (rpm)

T = อุณหภูมิของชิ้นงานรีด (K)

ค่าของ strain และ strain rate แสดงได้ดังสมการ

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{(1-r)} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\pi N}{30} \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \ln \frac{1}{(1-r)} \quad (2.25)$$

นอกจากนี้ยังมีค่าของ Bite angle (α) ซึ่งพิจารณาจากมุมสัมผัสระหว่างลูกรีดและชิ้นงานรีด แสดงได้ดังสมการ

$$\alpha = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \quad (2.26)$$

2.2.4.2 Roll flattening

ปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งทำให้รัศมีของลูกรีดมีขนาดมากขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า Roll flattening เกิดจากชิ้นงานรีดและลูกรีดเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันและกันเป็นผลให้ชิ้นงานรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic deformation) แต่ลูกรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic ซึ่งเป็นผลให้ผิวลูกรีดบริเวณสัมผัสกับชิ้นงานแบนราบลงซึ่งสามารถเปรียบได้กับการที่รัศมีของลูกรีดมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังสมการ

$$R' = R \left(1 + \frac{C_o P}{w \Delta h} \right) \quad (2.27)$$

เมื่อ R' = รัศมีของลูกรีดที่แบนราบลง (mm)
 R = รัศมีของลูกรีด (mm)
 w = ความกว้างของชิ้นงานรีด (mm)
 P = แรงในการรีด (Rolling force ,kg/mm²)

ค่าของ C_o สามารถหาได้จากสมการ

$$C_o = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \quad (2.28)$$

เมื่อ E = Elastic modulus ของลูกรีด (kg/mm²)
 ν = Poisson ratio ของลูกรีด

2.2.4.3 Forward slip (f)

ค่า Forward slip สามารถหาได้จากสมการของ Bland & Ford³ ดังนี้

$$f = \frac{V_{out} - V_r}{V_r} \quad (2.29)$$

เมื่อ $V_{out} =$ อัตราเร็วขาออกของชิ้นงานรีด (mm/s)

$V_r =$ อัตราเร็วของลูกรีด (mm/s)

สมการ (2.29) สามารถแปลงเป็น

$$f = \frac{V_{out}}{V_r} - 1 \quad (2.30)$$

พิจารณาที่ตำแหน่ง Neutral point จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$hV_{out} = h_n V_r$$

$$\frac{V_{out}}{V_r} = \frac{h_n}{h} \quad (2.31)$$

นำสมการ (2.31) แทนในสมการ (2.30) จะได้

$$f = \frac{h_n}{h} - 1 \quad (2.32)$$

เมื่อ $h_n =$ ความหนาของชิ้นงานที่จุด neutral point (mm)

จะเห็นได้ว่าค่าของ Forward slip นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุด Neutral point นั้นเอง ในสภาวะของการรีดแบบไดนามิกส์ (Dynamic state) นั้น ตำแหน่งของจุด Neutral point จะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้ค่าของ Forward slip เปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของชิ้นงานที่ออกจากแต่ละแท่นรีดไม่คงที่ ส่งผลกระทบอย่างยิ่งต่อค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดสภาวะไดนามิกส์ขึ้นก็คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของจุด neutral point นั้นเอง

2.2.5 อนุพันธ์ขององค์ประกอบการรีด

ค่าอนุพันธ์ขององค์ประกอบการรีด โดยปกติแล้วสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ขององค์ประกอบนั้นเทียบกับตัวแปรที่ต้องการโดยใช้สูตรจาก Sim 's equation แต่เนื่องจากสูตรของการรีดนั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างยิ่งยากต่อการหาอนุพันธ์ด้วยวิธีทาง Calculus ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการพื้นฐานของอนุพันธ์ ดังต่อไปนี้

เมื่อ x และ Y เป็นค่าองค์ประกอบการรีดโดย $Y=Y(x)$ หรือ Y เป็นฟังก์ชันของ x สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ดังนี้

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

เมื่อ $x_1 = x + \Delta x$

$$x_2 = x - \Delta x$$

ค่าของ Δx ยิ่งมีค่าเล็กมากเท่าใดจะได้ค่าของอนุพันธ์ที่มีความถูกต้องมากขึ้น ค่าของอนุพันธ์ที่ต้องการหาค่ามีดังต่อไปนี้

1. อนุพันธ์ของ Rolling force เทียบกับ Inlet thickness

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

2. อนุพันธ์ของ Rolling force เทียบกับ Outlet thickness

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

3. อนุพันธ์ของ Rolling force เทียบกับ Forward tension

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

4. อนุพันธ์ของ Rolling force เทียบกับ Backward tension

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

5. อนุพันธ์ของ Rolling force เทียบกับ Roll speed

$$\frac{\partial P}{\partial Vr} = \frac{P(Vr_1) - P(Vr_2)}{Vr_1 - Vr_2}$$

6. อนุพันธ์ของ Forward slip เทียบกับ Inlet thickness

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

7. อนุพันธ์ของ Forward slip เทียบกับ Outlet thickness

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

8. อนุพันธ์ของ Forward slip เทียบกับ Forward tension

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

9. อนุพันธ์ของ Forward slip เทียบกับ Backward tension

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

ค่าของอนุพันธ์เหล่านี้จะเป็นอิสระไม่เกี่ยวข้องกันในแต่ละแท่นรีด จากทฤษฎีที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถนำมาประกอบกันเพื่อสร้างแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) และแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสถานะไดนามิกส์ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper) ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

บทที่ 3

ลักษณะและรายละเอียดของแบบจำลอง

แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ คือ Visual Basic on Excel 97 ซึ่งโปรแกรมนี้มีความสามารถสูงในการคำนวณ ทั้งยังสามารถใช้ Excel ในการเก็บข้อมูล และสร้างกราฟได้อีกด้วย โปรแกรมนี้เหมาะสำหรับงานวิจัยที่จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เป็นอย่างยิ่ง สำหรับการสร้างแบบจำลองของการศึกษานี้แยกพิจารณาเป็น 2 แบบ คือ

3.1 แบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state)

การศึกษานี้พิจารณากระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง 7 แท่นรีดของการรีดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ซึ่งมีปริมาณคาร์บอน 0.048% สภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ของการรีดถูกสมมติขึ้นในกรณีต่างๆกัน เช่น ความไม่คงที่ของความเร็วลูกรีด , การเปลี่ยนแปลงของ Roll gap ระหว่างการรีด , ความหนาขาเข้าแท่นรีดที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

3.1.1 ตารางของการรีด (Pass schedule)

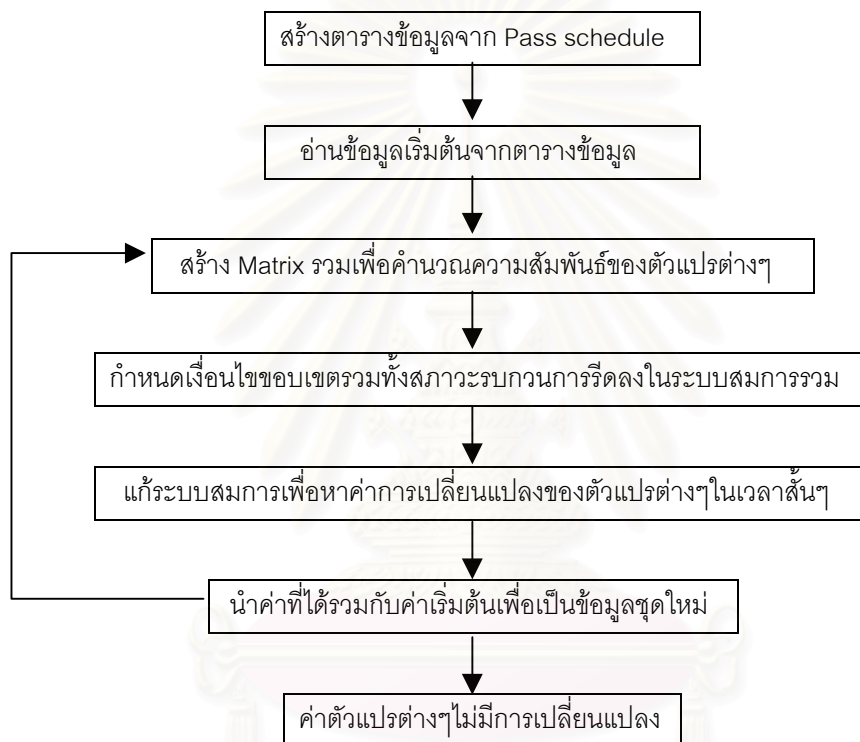
ใช้ข้อมูลจริงจากโรงรีดร้อนของบริษัท NKK คุณสมบัติของเหล็กรีดร้อนถูกวัดที่ทางเข้าของแท่นรีดที่ 1 และทางออกของแท่นรีดที่ 7 ส่วนความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดถูกวัดจากตัวของมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper) เอง ตัวอย่างของตารางการรีด (Pass schedule) แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงตารางการรีดร้อน 7 แท่นรีด

Grade	H1	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	T1	T2	ten1	ten2	ten3	ten4	ten5	ten6	F7	w
B20CBR	36	20.3	12.5	8.52	6.08	4.65	3.62	3.14	1039	888	0.31	0.39	1.04	1.89	4.71	7.8	559	1230
B20CBR	39	21.2	14	9.62	6.84	5.39	4.32	3.77	989	899	0.29	0.33	1.1	1.79	2.33	3.7	515	950
B20CBR	33	18.6	11.1	7.48	5.16	3.64	2.66	2.26	997	883	0.34	0.42	1.2	2.25	3.56	6.2	712	1225
B20CBR	35	19.9	12.7	8.44	5.64	4.21	3.21	2.8	987	868	0.3	0.36	1	1.73	3.74	9.9	622	1250
B20CBR	35	19.4	12.2	8.16	5.46	4.06	3.14	2.76	1005	887	0.32	0.35	1	1.84	3.05	3.7	628	1250
B20CBR	32	18.8	11.6	7.74	5	3.56	2.65	2.25	1003	871	0.32	0.38	1.01	2.28	3.56	6.2	679	1240
B20CBR	38	24.9	16.9	12.3	9.26	7.23	5.93	5.34	1025	878	0.35	0.37	0.82	1.29	1.97	2.7	400	1250
B20CBR	39	25.9	17.8	13.2	10.1	7.94	6.64	6	1033	895	0.35	0.35	0.83	1.28	1.58	2.3	370	1252
B20CBR	33	18.5	11	7.28	5.02	3.58	2.63	2.25	990	876	0.35	0.45	1.24	2.3	3.55	5.9	715	1230
B20CBR	38	24.9	16.8	12.6	9.26	7.23	5.93	5.34	1009	880	0.32	0.42	1.44	2.23	3.75	5.1	705	1220

3.1.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ทฤษฎีต่างๆที่กล่าวถึงในบทที่แล้วถูกนำมาคำนวณพร้อมๆกัน เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการวัดต่างๆในช่วงเวลาสั้นๆ ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้นี้เมื่อรวมกับค่าเริ่มต้นของตัวมันเองแล้ว จะได้ค่าตัวแปรของการวัดชุดใหม่ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆเหล่านี้ในเวลาถัดไป ทำการคำนวณจนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆเหล่านี้ ซึ่งแสดงว่าเกิดสภาวะสมดุล (Steady state) แล้วนั่นเอง สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

3.1.3 รายละเอียดของโปรแกรม

เนื้อหาของโปรแกรมนี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข. ส่วนรายละเอียดต่างๆสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1.3.1 ตารางข้อมูล (Data table)

ตารางข้อมูลนี้ถือได้ว่าเป็นปัจจัยหลักในการคำนวณ โดยข้อมูลที่อยู่ในตารางนี้ส่วนหนึ่งมาจากตารางของการวัด (Pass schedule) และข้อมูลอีกส่วนหนึ่งมาจากการคำนวณด้วย

โปรแกรม Add-data โดยโปรแกรม Add-data นั้นจะนำข้อมูลที่เป็นส่วนของตารางการรีด (Pass schedule) มาทำการคำนวณโดยใช้หลักการของสภาวะสมดุล (Steady state) ซึ่งเป็นสภาวะพื้นฐานก่อนเกิดสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ต่อไป รายละเอียดของโปรแกรม Add-data แสดงอยู่ในภาคผนวก ข.

ตารางข้อมูล (Data table) จะแสดงอยู่ในส่วนของ Excel ซึ่งมีความสะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงแก้ไขและง่ายต่อการแสดงค่าด้วย ตัวอย่างของตารางข้อมูล (Data table) แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงตารางข้อมูลของการรีดร้อน 7 แท่นรีด

Stand	1	2	3	4	5	6	7
Hin	36	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23
Hout	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23	2.78
Vr (mm/sec)	1281.26	2119.83	3195.738	4746.627	6344.308	8029.436	9500
back tension	0	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17
Front tension	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	0
Temp (K)	1313	1290	1255	1220	1191	1162	1143
Roll radius	380	380	380	380	380	380	380
Strip width	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
Mill Modulus	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05
pass length	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Forward slip	0.112172	0.097073	0.086953	0.089396	0.059972	0.05273	0.033799
Vinlet	758.4066	1424.981	2325.608	3473.618	5170.954	6724.788	8452.829
Voutlet	1424.981	2325.608	3473.618	5170.954	6724.788	8452.829	9821.093

3.1.3.2 แจกแจงสมการจากทฤษฎีการรีดร้อนต่อเนื่องแบบพลศาสตร์

สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ได้ถูกกล่าวถึงในบทที่แล้ว ในที่นี้จะทำการแจกแจงสมการทั้งหมดดังต่อไปนี้

3.1.3.2.1 สมการความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

$$\Delta h_1 - \Delta G_1 - \frac{\Delta P_1}{M_1} = 0$$

$$\Delta h_2 - \Delta G_2 - \frac{\Delta P_2}{M_2} = 0$$

$$\Delta h_3 - \Delta G_3 - \frac{\Delta P_3}{M_3} = 0$$

$$\Delta h_4 - \Delta G_4 - \frac{\Delta P_4}{M_4} = 0$$

$$\Delta h_5 - \Delta G_5 - \frac{\Delta P_5}{M_5} = 0$$

$$\Delta h_6 - \Delta G_6 - \frac{\Delta P_6}{M_6} = 0$$

$$\Delta h_7 - \Delta G_7 - \frac{\Delta P_7}{M_7} = 0$$

3.1.3.2.2 สมการแรงเนื่องจากการรูด (Equation of rolling force)

$$\Delta P_1 - \frac{\partial P_1}{\partial H_1} \Delta H_1 - \frac{\partial P_1}{\partial h_1} \Delta h_1 - \frac{\partial P_1}{\partial qf_1} \Delta qf_1 - \frac{\partial P_1}{\partial qb_1} \Delta qb_1 - \frac{\partial P_1}{\partial Vr_1} \Delta Vr_1 = 0$$

$$\Delta P_2 - \frac{\partial P_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial P_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial P_2}{\partial qf_2} \Delta qf_2 - \frac{\partial P_2}{\partial qb_2} \Delta qb_2 - \frac{\partial P_2}{\partial Vr_2} \Delta Vr_2 = 0$$

$$\Delta P_3 - \frac{\partial P_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial P_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial P_3}{\partial qf_3} \Delta qf_3 - \frac{\partial P_3}{\partial qb_3} \Delta qb_3 - \frac{\partial P_3}{\partial Vr_3} \Delta Vr_3 = 0$$

$$\Delta P_4 - \frac{\partial P_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial P_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial P_4}{\partial qf_4} \Delta qf_4 - \frac{\partial P_4}{\partial qb_4} \Delta qb_4 - \frac{\partial P_4}{\partial Vr_4} \Delta Vr_4 = 0$$

$$\Delta P_5 - \frac{\partial P_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial P_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial P_5}{\partial qf_5} \Delta qf_5 - \frac{\partial P_5}{\partial qb_5} \Delta qb_5 - \frac{\partial P_5}{\partial Vr_5} \Delta Vr_5 = 0$$

$$\Delta P_6 - \frac{\partial P_6}{\partial H_6} \Delta H_6 - \frac{\partial P_6}{\partial h_6} \Delta h_6 - \frac{\partial P_6}{\partial qf_6} \Delta qf_6 - \frac{\partial P_6}{\partial qb_6} \Delta qb_6 - \frac{\partial P_6}{\partial Vr_6} \Delta Vr_6 = 0$$

$$\Delta P_7 - \frac{\partial P_7}{\partial H_7} \Delta H_7 - \frac{\partial P_7}{\partial h_7} \Delta h_7 - \frac{\partial P_7}{\partial qf_7} \Delta qf_7 - \frac{\partial P_7}{\partial qb_7} \Delta qb_7 - \frac{\partial P_7}{\partial Vr_7} \Delta Vr_7 = 0$$

3.1.3.2.3 สมการ Forward slip (Equation of forward slip)

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

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

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

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

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

$$\Delta f_6 - \frac{\partial f_6}{\partial H_6} \Delta H_6 - \frac{\partial f_6}{\partial h_6} \Delta h_6 - \frac{\partial f_6}{\partial qf_6} \Delta qf_6 - \frac{\partial f_6}{\partial qb_6} \Delta qb_6 = 0$$

$$\Delta f_7 - \frac{\partial f_7}{\partial H_7} \Delta H_7 - \frac{\partial f_7}{\partial h_7} \Delta h_7 - \frac{\partial f_7}{\partial qf_7} \Delta qf_7 - \frac{\partial f_7}{\partial qb_7} \Delta qb_7 = 0$$

3.1.3.2.4 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Equation of material velocity)

$$\Delta V_{out,1} - (1 + f_1) \Delta V_{r1} - \Delta(1 + f_1) V_{r1} = 0$$

$$\Delta V_{out,2} - (1 + f_2) \Delta V_{r2} - \Delta(1 + f_2) V_{r2} = 0$$

$$\Delta V_{out,3} - (1 + f_3) \Delta V_{r3} - \Delta(1 + f_3) V_{r3} = 0$$

$$\Delta V_{out,4} - (1 + f_4) \Delta V_{r4} - \Delta(1 + f_4) V_{r4} = 0$$

$$\Delta V_{out,5} - (1 + f_5) \Delta V_{r5} - \Delta(1 + f_5) V_{r5} = 0$$

$$\Delta V_{out,6} - (1 + f_6) \Delta V_{r6} - \Delta(1 + f_6) V_{r6} = 0$$

$$\Delta V_{out,7} - (1 + f_7) \Delta V_{r7} - \Delta(1 + f_7) V_{r7} = 0$$

3.1.3.2.5 หลักการอนุรักษ์มวลภายใน Roll gap (Mass conservative law)

$$\Delta V_{in,1} H_1 + V_{in,1} \Delta H_1 - \Delta V_{out,1} h_1 - V_{out,1} \Delta h_1 = 0$$

$$\Delta V_{in,2} H_2 + V_{in,2} \Delta H_2 - \Delta V_{out,2} h_2 - V_{out,2} \Delta h_2 = 0$$

$$\Delta V_{in,3} H_3 + V_{in,3} \Delta H_3 - \Delta V_{out,3} h_3 - V_{out,3} \Delta h_3 = 0$$

$$\Delta V_{in,4} H_4 + V_{in,4} \Delta H_4 - \Delta V_{out,4} h_4 - V_{out,4} \Delta h_4 = 0$$

$$\Delta V_{in,5} H_5 + V_{in,5} \Delta H_5 - \Delta V_{out,5} h_5 - V_{out,5} \Delta h_5 = 0$$

$$\Delta V_{in,6} H_6 + V_{in,6} \Delta H_6 - \Delta V_{out,6} h_6 - V_{out,6} \Delta h_6 = 0$$

$$\Delta V_{in,7} H_7 + V_{in,7} \Delta H_7 - \Delta V_{out,7} h_7 - V_{out,7} \Delta h_7 = 0$$

3.1.3.2.6 สมการความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึง (Relation of interstand tension)

$$\Delta qf_1 - \Delta qb_2 = 0$$

$$\Delta qf_2 - \Delta qb_3 = 0$$

$$\Delta qf_3 - \Delta qb_4 = 0$$

$$\Delta qf_4 - \Delta qb_5 = 0$$

$$\Delta qf_5 - \Delta qb_6 = 0$$

$$\Delta qf_6 - \Delta qb_7 = 0$$

3.1.3.2.7 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of interstand tension)

$$\Delta qf_1 - \frac{E}{L_0} [(V_{in,2} + \Delta V_{in,2}) - (V_{out,1} + \Delta V_{out,1})] dt = 0$$

$$\Delta qf_2 - \frac{E}{L_0} [(V_{in,3} + \Delta V_{in,3}) - (V_{out,2} + \Delta V_{out,2})] dt = 0$$

$$\Delta qf_3 - \frac{E}{L_0} [(V_{in,4} + \Delta V_{in,4}) - (V_{out,3} + \Delta V_{out,3})] dt = 0$$

$$\Delta qf_4 - \frac{E}{L_0} [(V_{in,5} + \Delta V_{in,5}) - (V_{out,4} + \Delta V_{out,4})] dt = 0$$

$$\Delta qf_5 - \frac{E}{L_0} [(V_{in,6} + \Delta V_{in,6}) - (V_{out,5} + \Delta V_{out,5})] dt = 0$$

$$\Delta qf_6 - \frac{E}{L_0} [(V_{in,7} + \Delta V_{in,7}) - (V_{out,6} + \Delta V_{out,6})] dt = 0$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีสมการทั้งหมด 47 สมการและมีค่าตัวแปรที่ต้องหาค่าทั้งหมด 70 ตัวแปร นำสมการทั้งหมดมาประกอบรวมเป็นเมตริกซ์ ซึ่งจะได้เมตริกซ์ขนาด 47*70 จากนั้นจึงทำการกำหนดค่าขอบเขตซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

3.1.3.3 ตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition table)

เมื่อทำการอ่านข้อมูลจากตารางข้อมูล (Data table) และทำการสร้างเมตริกซ์ (Matrix) ของสมการรวมแล้ว จะได้เมตริกซ์ซึ่งไม่เป็นเมตริกซ์จัตุรัส นั้นแสดงว่าจะต้องมีตัวแปรบางตัว

ถูกกำหนดค่า โดยการนำค่าที่ต้องการกำหนดของตัวแปรนั้นๆ ใส่ลงไป ในตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยมีหลักการของการกำหนดค่าดังนี้

1. จำนวนตัวแปรที่ถูกกำหนดค่าต้องทำให้เมตริกซ์ที่เหลือเป็นเมตริกซ์จัตุรัสด้วย
2. การกำหนดค่าตัวแปรใดๆ ต้องพิจารณาถึงหลักความจริงของการรีดด้วย
3. จากหลักการพื้นฐานของการรีดต่อเนื่องจะได้ว่า $h_i(t) = H_{i+1}(t+\Delta t)$ ซึ่งจะต้องถูกใช้ในการกำหนดค่าเสมอ

สภาวะของการรบกวนการรีดนั้นจะถูกกำหนดรวมลงไปกับตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้วย ตัวอย่างของตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition table) แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

Stand	1	2	3	4	5	6	7
Δh							
ΔH	0.36	0	0	0	0	0	0
ΔP							
Δq_f							0
Δq_b	0						
Δf							
ΔV_{in}							
ΔV_{out}							
ΔG	0	0	0	0	0	0	0
ΔV_r	0	0	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 3.3 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจะเห็นได้ว่าค่าที่ถูกกำหนด ได้แก่

1. $\Delta G_i = 0$ หมายความว่าตลอดช่วงของสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ Roll gap ที่ทุกๆ แท่นรีด
2. $\Delta V_{r_i} = 0$ หมายความว่าตลอดช่วงของสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลูกรีด (Roll speed) ที่ทุกๆ แท่นรีด
3. $\Delta q_{b_1} = 0$ หมายความว่าตลอดช่วงของสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงด้านหลัง (Back tension) ที่แท่นรีดแท่นแรก

4. $\Delta qf_7 = 0$ หมายความว่าตลอดช่วงของสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงด้านหน้า (Forward tension) ที่แท่นรีดสุดท้าย
5. $\Delta H_1 = 0.36$ หมายความว่าความหนาเข้าของแท่นรีดแรกมีขนาดเพิ่มขึ้น 0.36 mm (ประมาณ 1%) ซึ่งข้อกำหนดนี้เป็นการรบกวนระบบการรีดให้เข้าสู่สภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) นั่นเอง
6. $\Delta H_{2..7} = 0$ เป็นการกำหนดค่าความสัมพันธ์ของการรีดต่อเนื่องซึ่ง $h_i(t) = H_{i+1}(t+\Delta t)$ เมื่อโปรแกรมทำงานค่าของ Δh_i จะถูกเก็บไว้และจะคำนวณเวลาที่ค่าของ Δh_i จะเคลื่อนที่ไปถึงแท่นรีดถัดไปจากนั้นค่าของ $\Delta H_{2..7}$ จะถูกกำหนดค่าโดยอัตโนมัติ

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเสร็จสิ้นจึงทำการแก้สมการโดยวิธีของ Gauss⁵ ค่าคำตอบที่ได้จะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆในช่วงเวลานั้นๆ จากนั้นนำคำตอบที่ได้บวกรวมกับค่าตั้งต้นของตัวมันเอง จะได้ค่าตัวแปรต่างๆเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาสั้นๆนั้น คำนวณซ้ำจนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรทุกตัว

3.2 แบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper)

การศึกษานี้พิจารณากระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง 7 แท่นรีด โดยได้ทำการติดตั้งมอเตอร์ลูปเปอร์เพื่อควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดให้คงที่เมื่อเกิดการรบกวนขึ้น ชนิดของเหล็กที่รีดคือ เหล็กกล้าคาร์บอน 0.048% แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะของมอเตอร์ลูปเปอร์และถูกใช้ในการเปรียบเทียบค่าของแรงในการรีด (Rolling force) ระหว่างผลของการคำนวณจากแบบจำลองและข้อมูลจริงจากโรงงาน

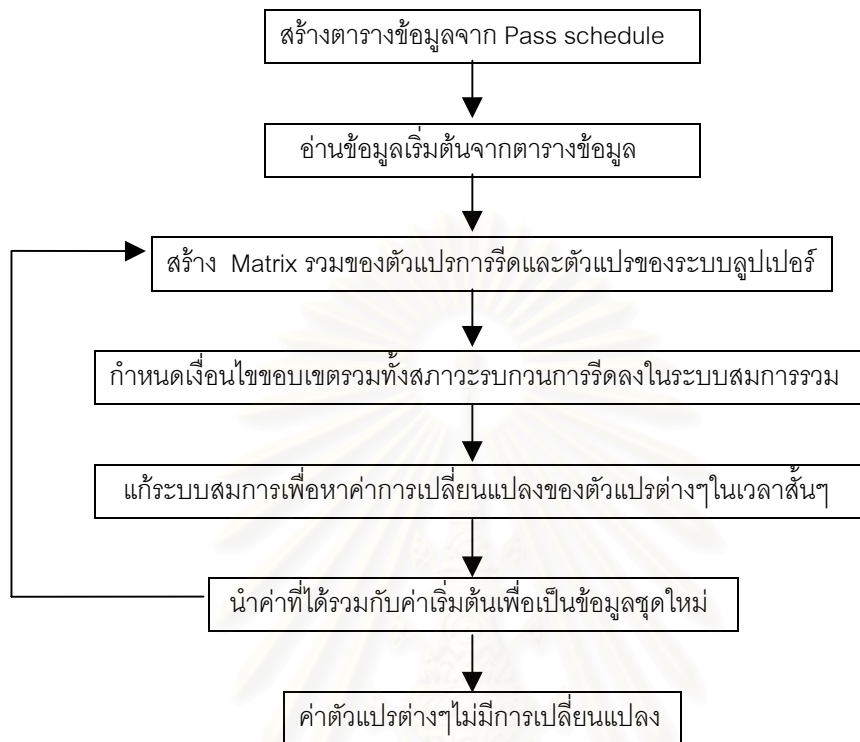
3.2.1 ตารางการรีด (Pass schedule)

ใช้ข้อมูลจากตารางการรีดจริง (Pass schedule) 7 แท่นรีด ค่าของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดถูกรักษาไว้ให้คงที่ด้วยมอเตอร์ลูปเปอร์ (Motor looper) แสดงตัวอย่างตารางการรีดไว้ในหัวข้อที่แล้ว

3.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองนี้มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ที่ได้กล่าวถึงแล้วข้างต้น แต่จะต้องนำสมการของมอเตอร์ลูปเปอร์และสม

การของการควบคุมความเร็วลูกกรีตรวมเข้าไปเพื่อทำการคำนวณพร้อมๆกัน สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

3.2.3 รายละเอียดของโปรแกรม

เนื้อหาของโปรแกรมนี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข. ส่วนรายละเอียดต่างๆสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 ตารางข้อมูล (Data table)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะใช้ข้อมูลจากตารางการรีด (Pass schedule) 7 แท่นรีด เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของตารางข้อมูล (Data table) และอีกส่วนหนึ่งจะทำการคำนวณโดยโปรแกรม Add-data นั้นเอง

ตารางข้อมูลนี้มีค่าตัวแปรต่างๆเพิ่มเติมจากเดิม เช่น มุมของลูบเปอร์, ความยาวของแขนลูบเปอร์, พื้นที่ภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กกรีต เป็นต้น ตัวอย่างของตารางข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงตารางข้อมูลของการรีดร้อน 7 แทนรีด (ควบคุมแรงดึง)

Stand	1	2	3	4	5	6	7
Hin	36	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23
Hout	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23	2.78
Vr (mm/sec)	1281.26	2119.83	3195.738	4746.627	6344.308	8029.436	9500
back tension	0	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17
front tension	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	0
Temp (K)	1313	1290	1255	1220	1191	1162	1143
Roll radius	380	380	380	380	380	380	380
Strip width	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
Mill Rigidity	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05
Looper ang	20	20	20	20	20	20	20
pass length	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Forward slip	0.112172	0.097073	0.086953	0.089396	0.059972	0.05273	0.033799
Vinlet	758.4066	1424.981	2325.608	3473.618	5170.954	6724.788	8452.829
Voutlet	1424.981	2325.608	3473.618	5170.954	6724.788	8452.829	9821.093
arm length	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
cross area	21459.2	13148.8	8803.2	5913.6	4547.2	3617.6	3113.6

3.2.3.2 แจกแจงสมการทั้งหมดของแบบจำลองนี้

สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ส่วนหนึ่งได้ถูกกล่าวถึงในบทที่แล้ว และอีกส่วนหนึ่งก็คือ สมการของระบบลูปเปอร์ นั่นเอง สามารถแจกแจงสมการของระบบลูปเปอร์ได้ดังต่อไปนี้

3.2.3.2.1 สมการการเคลื่อนที่ของแขนลูปเปอร์ (Equation of looper motion)

$$\Delta\theta_1 + \frac{A_1}{I} r_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1 dt^2 \Delta q f_1 - \frac{A_1}{I} r_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1 dt^2 (q f_{1o} - q f_1) - \omega_1 dt = 0$$

$$\Delta\theta_2 + \frac{A_2}{I} r_2 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 dt^2 \Delta q f_2 - \frac{A_2}{I} r_2 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 dt^2 (q f_{2o} - q f_2) - \omega_2 dt = 0$$

$$\Delta\theta_3 + \frac{A_3}{I} r_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3 dt^2 \Delta q f_3 - \frac{A_3}{I} r_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3 dt^2 (q f_{3o} - q f_3) - \omega_3 dt = 0$$

$$\Delta\theta_4 + \frac{A_4}{I} r_4 \sin \alpha_4 \cos \theta_4 dt^2 \Delta qf_4 - \frac{A_4}{I} r_4 \sin \alpha_4 \cos \theta_4 dt^2 (qf_{4o} - qf_4) - \omega_4 dt = 0$$

$$\Delta\theta_5 + \frac{A_5}{I} r_5 \sin \alpha_5 \cos \theta_5 dt^2 \Delta qf_5 - \frac{A_5}{I} r_5 \sin \alpha_5 \cos \theta_5 dt^2 (qf_{5o} - qf_5) - \omega_5 dt = 0$$

$$\Delta\theta_6 + \frac{A_6}{I} r_6 \sin \alpha_6 \cos \theta_6 dt^2 \Delta qf_6 - \frac{A_6}{I} r_6 \sin \alpha_6 \cos \theta_6 dt^2 (qf_{6o} - qf_6) - \omega_6 dt = 0$$

3.2.3.2 สมการการควบคุมความเร็วของลูกกรีด (Equation of speed control)

$$\Delta Vr_1 - \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta_1 - \frac{K_p}{K_t} (\theta_1 - \theta_o) dt = 0$$

$$\Delta Vr_2 - \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta_2 - \frac{K_p}{K_t} (\theta_2 - \theta_o) dt = 0$$

$$\Delta Vr_3 - \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta_3 - \frac{K_p}{K_t} (\theta_3 - \theta_o) dt = 0$$

$$\Delta Vr_4 - \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta_4 - \frac{K_p}{K_t} (\theta_4 - \theta_o) dt = 0$$

$$\Delta Vr_5 - \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta_5 - \frac{K_p}{K_t} (\theta_5 - \theta_o) dt = 0$$

$$\Delta Vr_6 - \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta_6 - \frac{K_p}{K_t} (\theta_6 - \theta_o) dt = 0$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีสมการทั้งหมด 59 สมการและมีค่าของตัวแปรที่ต้องทำการหาคำตอบ 76 ตัวแปร เมื่อทำการสร้างเมตริกซ์รวมแล้วจะได้เมตริกซ์ขนาด 59*76 แล้วจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่อไป

3.2.3.3 ตารางการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition table)

หลักการการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีลักษณะเหมือนกับหลักการที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ในกรณีนี้มีข้อแตกต่าง คือ ความเร็วลูกกรีดตัวต้นของการรีดจะถูกปรับความเร็วเพื่อควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด ลูกกรีดตัวปลายจะถูกกำหนดความเร็วให้มีค่าคงที่ ตัวอย่างของตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงตารางกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (ควบคุมแรงดึง)

Stand	1	2	3	4	5	6	7
Δh							
ΔH	0.36	0	0	0	0	0	0
ΔP							
Δq_f							0
Δq_b	0						
Δf							
ΔV_{in}							
ΔV_{out}							
ΔG	0	0	0	0	0	0	0
ΔV_r							0
$\Delta \theta$							

จากตารางที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ΔV_r ในแท่นรีดที่ 1-6 จะไม่ถูกกำหนดค่าเพราะจะต้องเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของมุมลูบเปอร์ ส่วนค่าอื่นๆสามารถอธิบายได้ดังที่กล่าวมาแล้ว

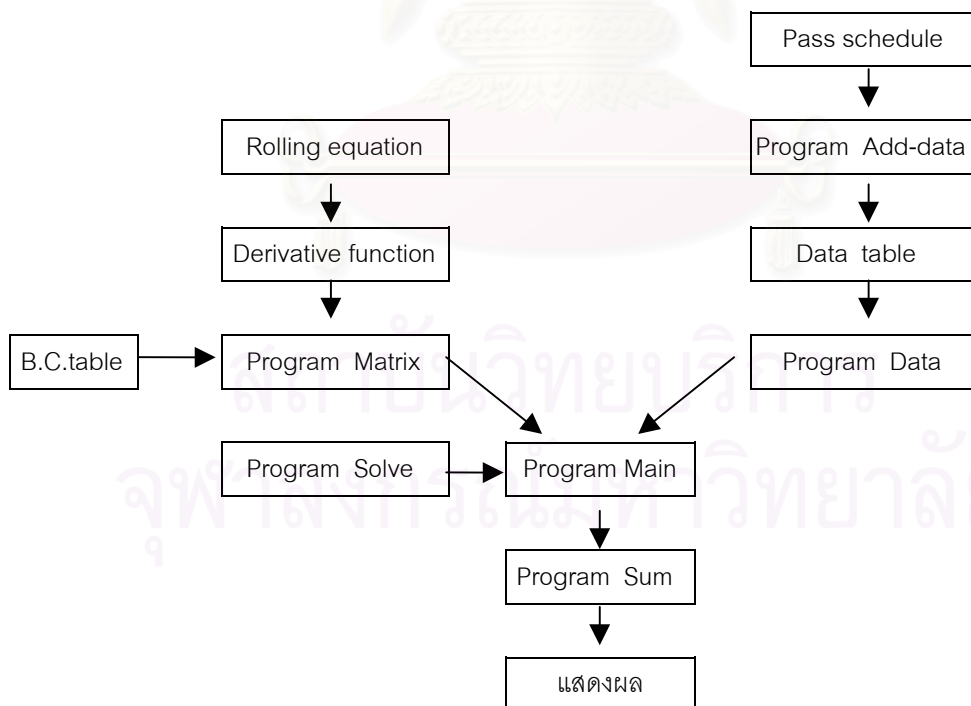
3.3 หน้าทีการทำงานของโปรแกรมต่างๆ

รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการทำงานที่ต่างๆ ของแบบจำลองทั้งสองนั้นมีความคล้ายคลึงกัน และสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. โปรแกรม Add-data มีหน้าที่ในการสร้างตารางข้อมูล (Data table) ให้มีความสมบูรณ์ โดยใช้ข้อมูลจากตารางการรีด (Pass schedule) มาทำการคำนวณ ดังได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น
2. โปรแกรม Data มีหน้าที่ในการอ่านข้อมูลทั้งหมดจากตารางข้อมูล (Data table) เข้าไปเก็บในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป
3. โปรแกรม Matrix มีหน้าที่ในการสร้างระบบสมการรวมหรือเมตริกซ์รวมนั่นเอง โดยโปรแกรมนี้จะทำการเรียกฟังก์ชันต่างๆเข้าไปเติมในระบบสมการรวม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณค่าอนุพันธ์ขององค์ประกอบการรีด เช่น $\partial P/\partial h$, $\partial P/\partial q_b$,

df/dqf เป็นต้น และยังมีหน้าที่ในการอ่านข้อมูลการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจากรางการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition table) ด้วย จากนั้นจะทำการลดขนาดเมตริกซ์เพื่อให้เป็นเมตริกซ์จัตุรัส

4. โปรแกรม Solve เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการโดยวิธีของ Gauss ซึ่งโปรแกรมนี้จะถูกเรียกจากโปรแกรม Matrix เมื่อเมตริกซ์กลายเป็นเมตริกซ์จัตุรัสแล้ว
5. โปรแกรม Main เป็นโปรแกรมหลักในการ Run แบบจำลอง ทุกครั้งที่ต้องการ Run แบบจำลองนี้จะต้องเข้ามาอยู่ในโปรแกรมนี้ก่อน โปรแกรมนี้จะเรียกโปรแกรม Data ก่อน จากนั้นจะทำการเรียกโปรแกรม Matrix ตามมาทำสลับกันไปเรื่อยๆจนกว่าจะเข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady state) โปรแกรมนี้ยังมีหน้าที่ในการคำนวณเวลาที่ความหนาของชั้นงานที่แท่นรีดตอนต้นจะถูกส่งถ่ายมาสู่แท่นรีดแท่นถัดไป เมื่อความหนาของชั้นงานถูกส่งมาถึงแท่นรีดถัดไป โปรแกรมนี้จะทำการเติมค่าความหนานั้นลงไปในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition table) ในช่องของ $\Delta H_{2..7}$ นั้นเอง
6. โปรแกรม Sum เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าสะสม (Accumulative value) ของคำตอบที่หาได้ เพื่อจะนำค่าเหล่านี้ไปสร้างกราฟโดยใช้ความสามารถของ Excel โปรแกรมนี้จะถูกเรียกโดยโปรแกรม Main เมื่อโปรแกรม Main สามารถหาคำตอบทั้งหมดได้แล้ว



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการทำงานของโปรแกรมต่างๆ

บทที่ 4

ผลการคำนวณ

การศึกษานี้พิจารณาระบบของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งมีทั้งแบบควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูบเปอร์และแบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด ดังนั้นผลของการคำนวณจึงสามารถถูกแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

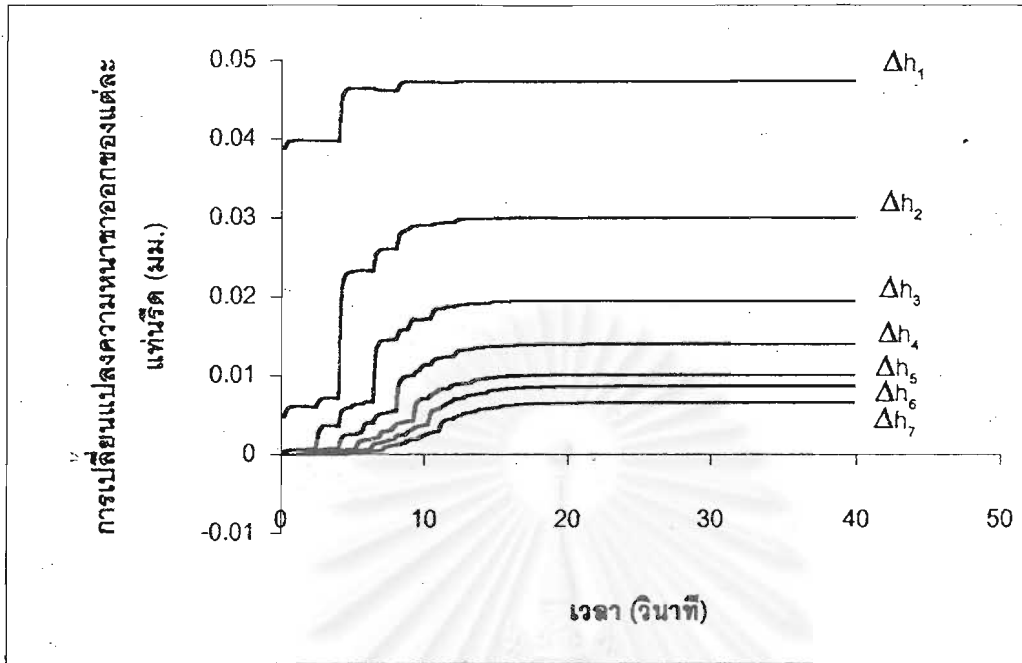
1. ผลการคำนวณจากแบบจำลองกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) 7 แท่นรีด
2. ผลการคำนวณจากแบบจำลองกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูบเปอร์ 7 แท่นรีด

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณนี้เป็นตัวอย่างหนึ่งของตารางการรีดจริงของบริษัท NKK ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

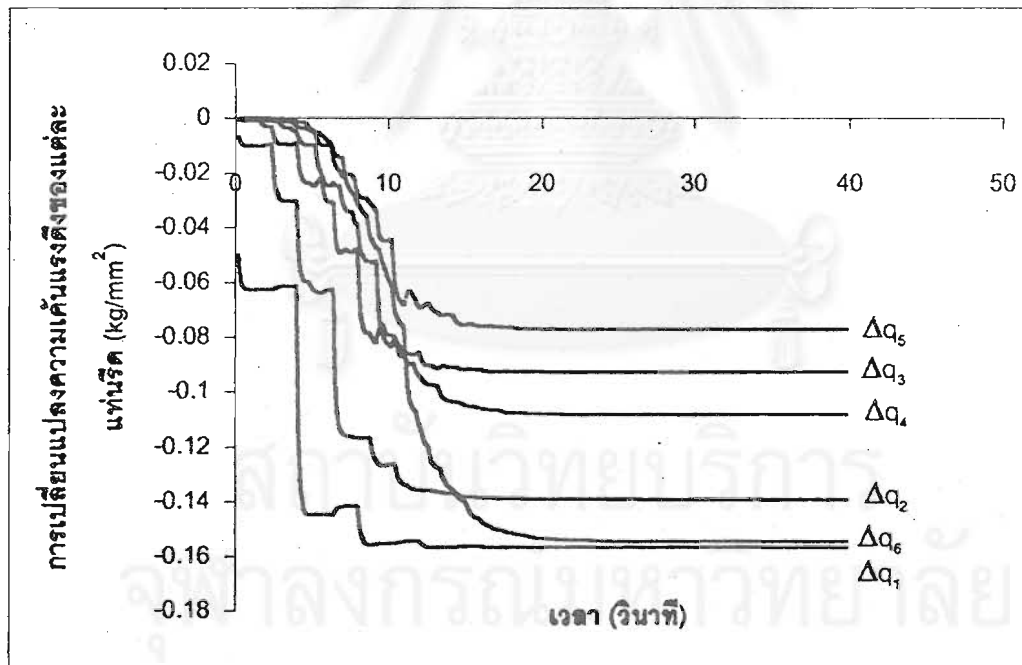
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

Stand	1	2	3	4	5	6	7
Hin	36	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23
Hout	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23	2.78
Vr (mm/sec)	1281	2119	3195	4746	6344	8029	9500
back tension	0	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17
front tension	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	0
Temp (K)	1313	1290	1255	1220	1191	1162	1143
Roll radius	380	380	380	380	380	380	380
Strip width	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
Mill Modulus	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05	5.00E+05
Looper ang	20	20	20	20	20	20	20
pass length	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500

4.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) 7 แท่นรีด



(a)



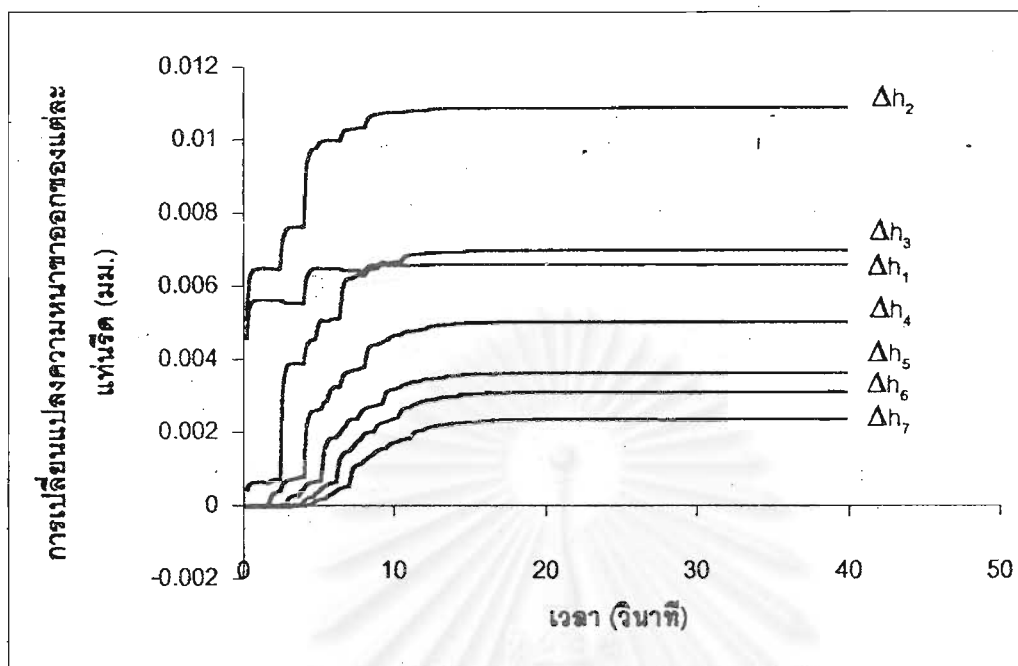
(b)

รูปที่ 4.1 แสดงผลกระทบบเมื่อความหนาผ่านเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง

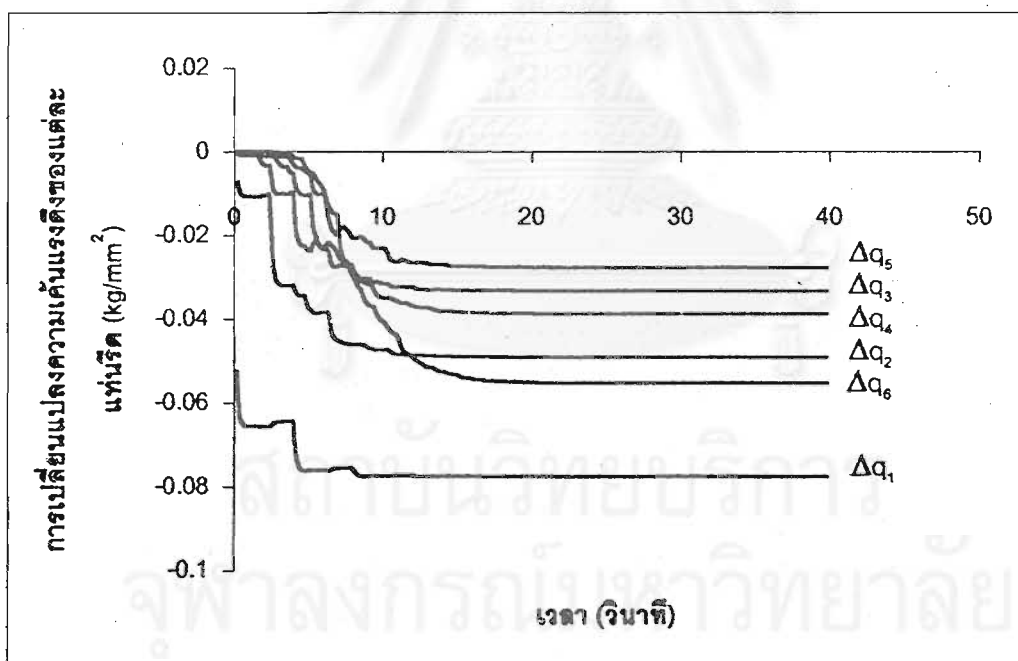
$$\Delta H_1 = 1\%$$

(a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด

(b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด



(a)



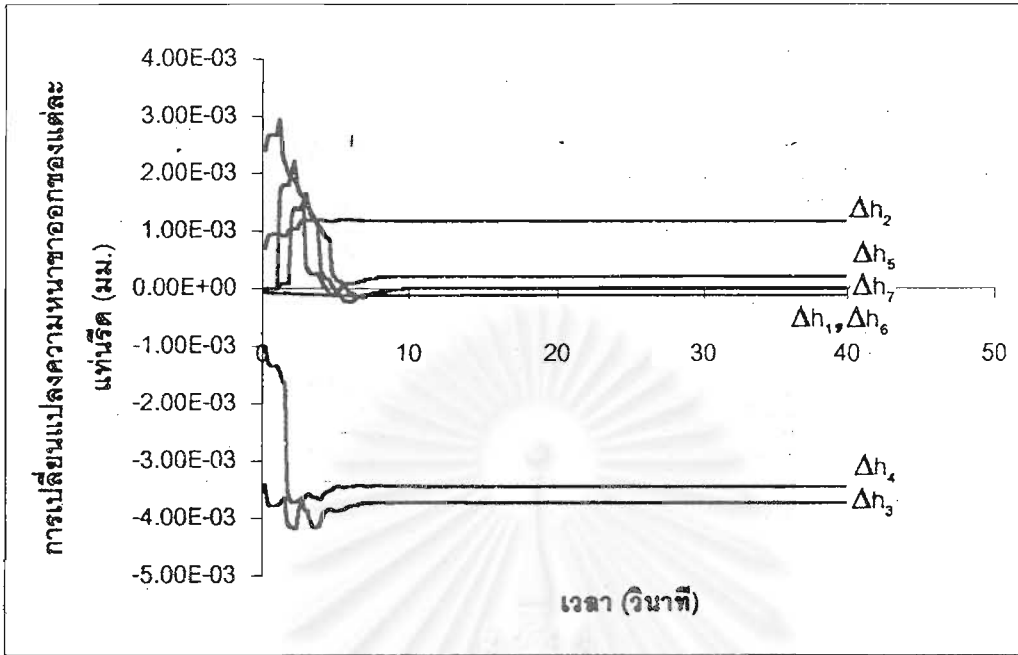
(b)

รูปที่ 4.2 แสดงผลกระทบเมื่อความเร็วลูกรีดของแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง

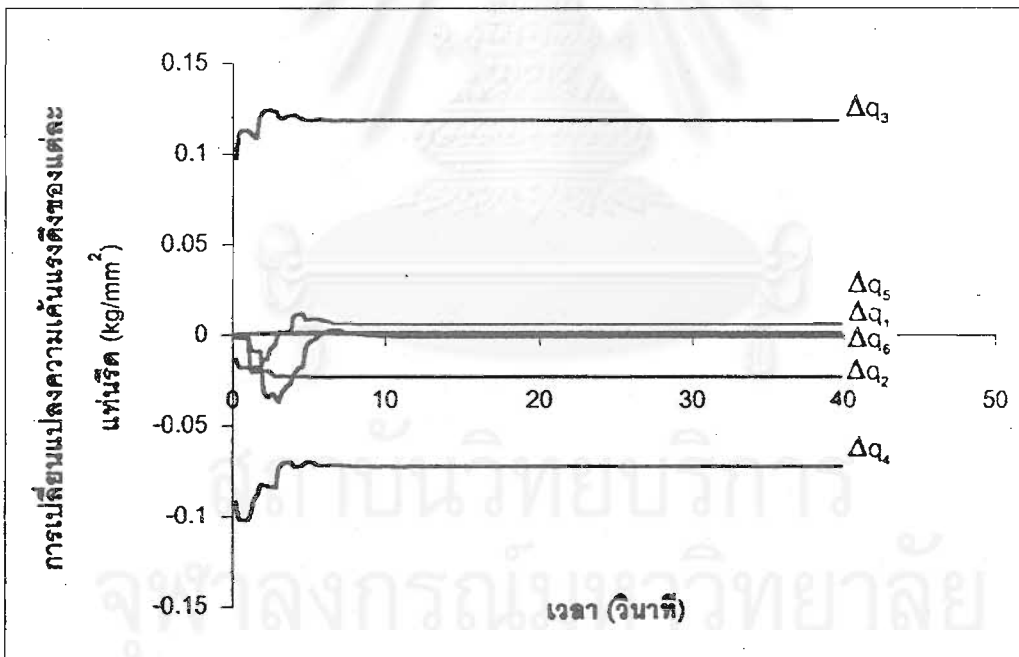
$$\Delta V_{r1} = 0.1\%$$

(a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด

(b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด



(a)



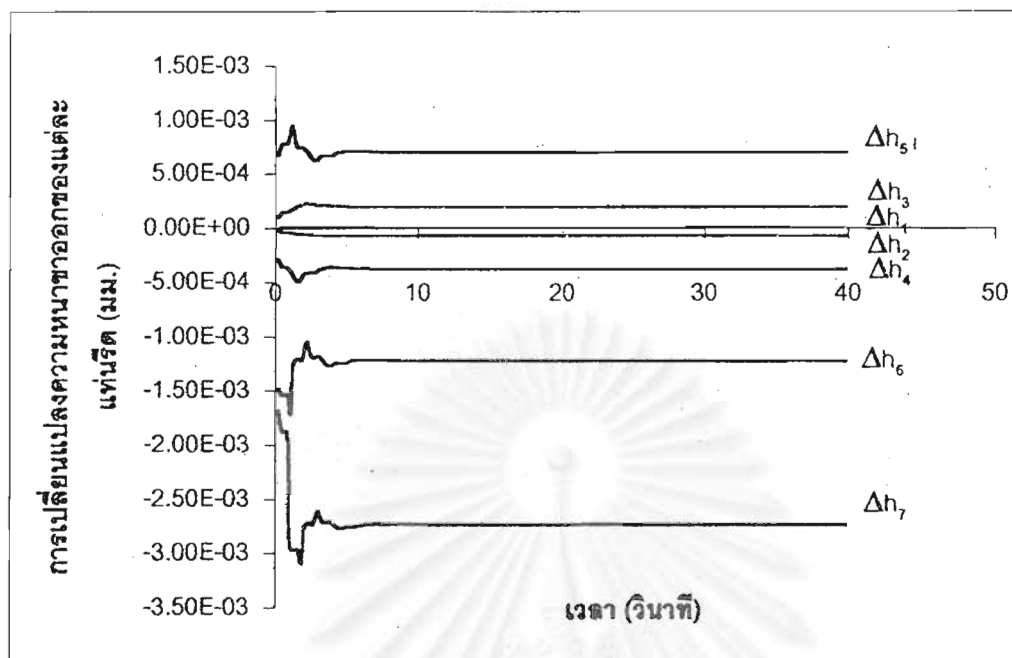
(b)

รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบเมื่อความเร็วลูกรีดของแท่นวัดที่ 4 เกิดการเปลี่ยนแปลง

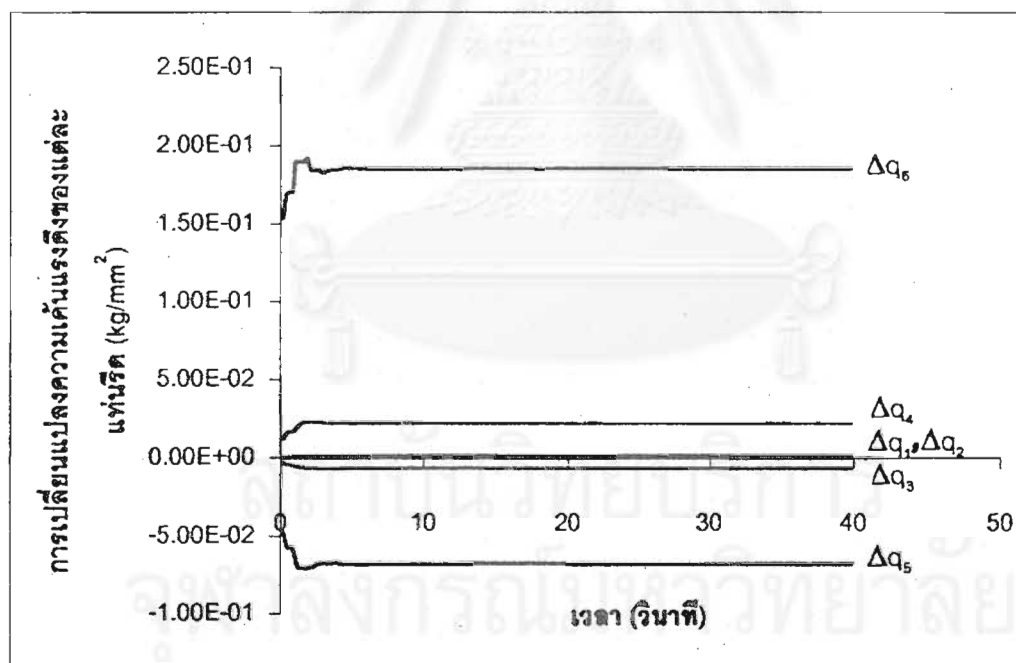
$$\Delta V_{t4} = 0.1\%$$

(a) การเปลี่ยนแปลงความหนาของของแต่ละแท่นวัด

(b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นวัด



(a)



(b)

รูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบเมื่อความเร็วลูกรีดของแท่นรีดที่ 7 เกิดการเปลี่ยนแปลง

$$\Delta V_{r7} = 0.1\%$$

(a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด

(b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรีด

สภาวะของการรบกวนระบบการวัดและผลกระทบซึ่งมีต่อความหนาขาออกของแต่ละแท่นวัดและความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดสามารถอธิบายจากผลการคำนวณได้ดังนี้

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาขาเข้าแท่นวัดที่ 1

เมื่อความหนาขาเข้าแท่นวัดที่ 1 ถูกสมมติให้มีความหนาเพิ่มขึ้น 0.36 มม. (1%) ความเร็วของแผ่นเหล็กที่ออกจากแท่นวัดที่ 1 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 1 และแท่นวัดที่ 2 มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อความเค้นแรงดึงนี้มีค่าลดลงจะส่งผลให้ความเร็วและความหนาขาออกของแท่นวัดที่ 2 มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วขาออกจากแท่นวัดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 2 และแท่นวัดที่ 3 มีค่าลดลง และจะส่งผลเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึงแท่นวัดสุดท้าย ซึ่งในที่สุดจะได้ว่าความหนาขาออกของแต่ละแท่นวัดจะมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดของแต่ละแท่นวัดจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกวัดในแท่นวัดที่ 1

เมื่อความเร็วของลูกวัดในแท่นวัดที่ 1 ถูกสมมติให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น 1.28 มม/วินาที (0.1%) ความเร็วของแผ่นเหล็กที่ออกจากแท่นวัดที่ 1 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 1 และแท่นวัดที่ 2 มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อความเค้นแรงดึงนี้มีค่าลดลงจะส่งผลให้ความเร็วและความหนาขาออกของแท่นวัดที่ 2 มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วขาออกจากแท่นวัดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 2 และแท่นวัดที่ 3 มีค่าลดลง และจะส่งผลเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึงแท่นวัดสุดท้าย ซึ่งในที่สุดจะได้ว่าความหนาขาออกของแต่ละแท่นวัดจะมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดของแต่ละแท่นวัดจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกวัดในแท่นวัดที่ 4

เมื่อความเร็วของลูกวัดในแท่นวัดที่ 4 ถูกสมมติให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น 4.75 มม/วินาที (0.1%) ความเร็วของแผ่นเหล็กที่ออกจากแท่นวัดที่ 4 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 4 และแท่นวัดที่ 5 มีค่าลดลง ในขณะที่เดียวกันความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 3 และแท่นวัดที่ 4 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความเค้นแรงดึงที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้ความหนาขาออกของแท่นวัดที่ 3 และแท่นวัดที่ 4 มีขนาดลดลง เมื่อความหนาขาออกของแท่นวัดที่ 4 ซึ่งมีขนาดลดลงเดินทางมาถึงแท่นวัดที่ 5 จะทำให้ความเร็วของแผ่นเหล็กที่ออกจากแท่นวัดที่ 5 มีค่าลดลง ส่งผลให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นวัดที่ 5 และแท่นวัดที่ 6 เพิ่มขึ้น และสืบเนื่องมาจากที่

ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 3 และแท่นรีดที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วของแผ่นเหล็กที่เข้าแท่นรีดที่ 3 มีค่าลดลง ซึ่งมีผลทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 2 และแท่นรีดที่ 3 มีค่าลดลง ดังนั้นความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 2 จึงมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่วนแท่นรีดอื่นๆที่อยู่ไกลจากแท่นรีดที่ 4 จะมีผลกระทบค่อนข้างน้อย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3

4.1.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 7

เมื่อความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 7 ถูกสมมติให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น 9.5 มม/วินาที (0.1%) จะทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 6 และแท่นรีดที่ 7 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 5 และแท่นรีดที่ 6 มีค่าลดลง ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 6 และแท่นรีดที่ 7 จะมีขนาดลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 6 และแท่นรีดที่ 7 นั้นเอง ส่วนความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 5 และแท่นรีดที่ 6 ที่มีค่าลดลงนี้ จะทำให้ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 5 มีขนาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 4 และแท่นรีดที่ 5 มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะเกิดสลับกันไปจนถึงแท่นรีดที่ 1 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4

สภาวะของการรบกวนระบบการรีดที่ทำการแสดงผลนี้เป็นสภาวะสมมติของการรบกวน โดยพิจารณาสาเหตุของการรบกวน 2 สาเหตุ คือ ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าของแท่นรีดที่ 1 และความไม่คงที่ของความเร็วลูกรีดในแท่นรีดที่ 1, แท่นรีดที่ 4, แท่นรีดที่ 7 โดยพิจารณาผลกระทบกับความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีด (โดยเฉพาะแท่นรีดสุดท้าย) และความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดเป็นหลัก

เนื่องจากกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องมีค่าของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดค่อนข้างต่ำ เป็นผลสืบเนื่องมาจากแผ่นเหล็กที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นขนาดของการรบกวนระบบการรีดจึงสมมติให้มีขนาดน้อยๆ เนื่องจากถ้ารบกวนด้วยขนาดที่มาก จะทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดมีค่าติดลบ ซึ่งจะทำให้แบบจำลองหยุดการทำงาน และในหลักการของความเป็จริงถ้าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดมีค่าติดลบ จะทำให้ระบบการรีดเกิดความเสียหายไม่สามารถทำการรีดต่อได้ เนื่องจากแผ่นเหล็กเกิดการหย่อนขึ้น แบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) นี้ไม่สามารถแสดงผลของความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีดและความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ในกรณีที่ระบบถูกรบกวนจนกระทั่งทำให้ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดติดลบ

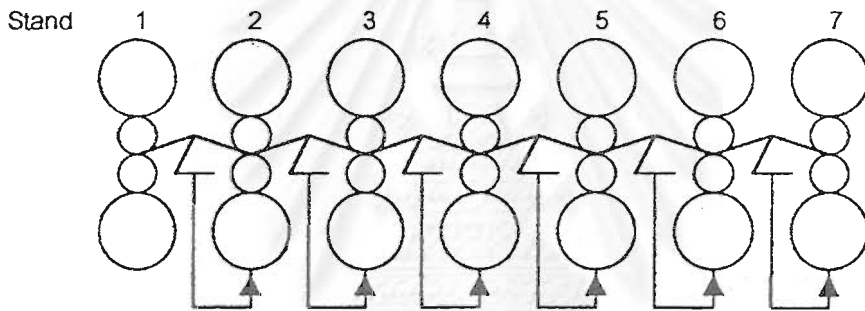
4.2 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรืดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรืดโดยมอเตอร์ลูบเปอร์ 7 แท่นรืด

เนื่องจากระบบของการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรืด 2 แท่นรืดนั้น จะต้องประกอบด้วยมอเตอร์ลูบเปอร์ 1 ตัว และจะต้องทำการปรับความเร็วของลูกรืด 1 แท่นรืดเพื่อรักษาค่าแรงดึงระหว่างแท่นรืดไว้ ดังรูปที่ 2.1

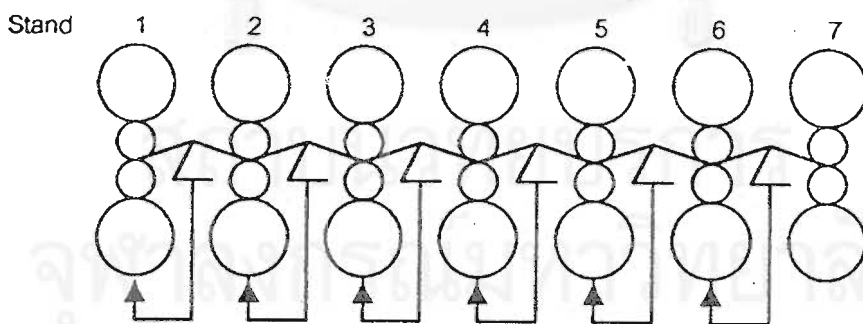
ดังนั้นระบบของการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรืด 7 แท่นรืด จึงแบ่งลักษณะออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. ความเร็วของลูกรืดแท่นรืดที่ 1 ถูกควบคุมให้มีความเร็วคงที่ ($V_r 7$ ไม่คงที่)
2. ความเร็วของลูกรืดแท่นรืดที่ 7 ถูกควบคุมให้มีความเร็วคงที่ ($V_r 7$ คงที่)

ทั้ง 2 ลักษณะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



(a)

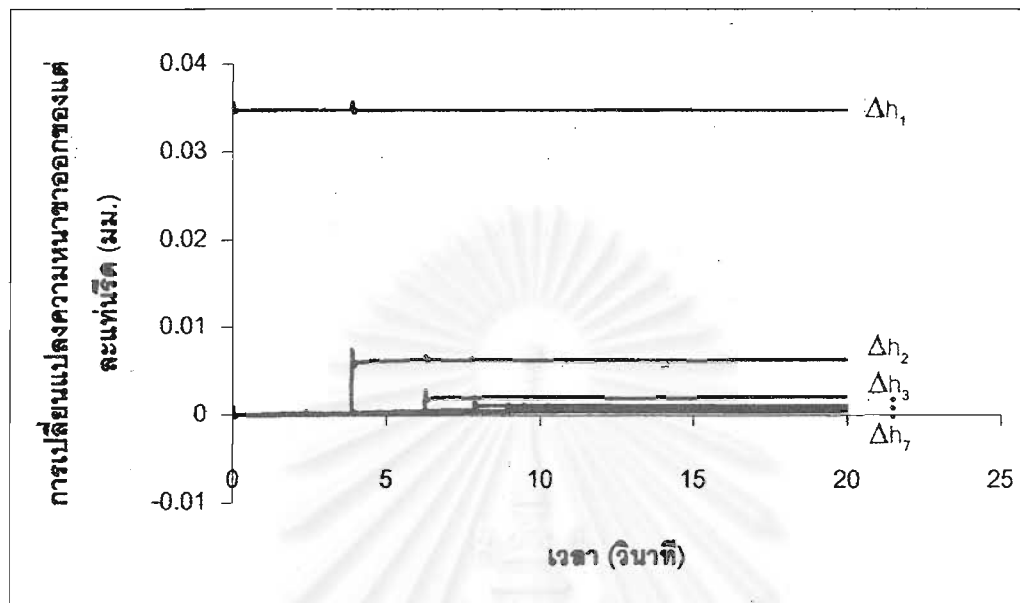


(b)

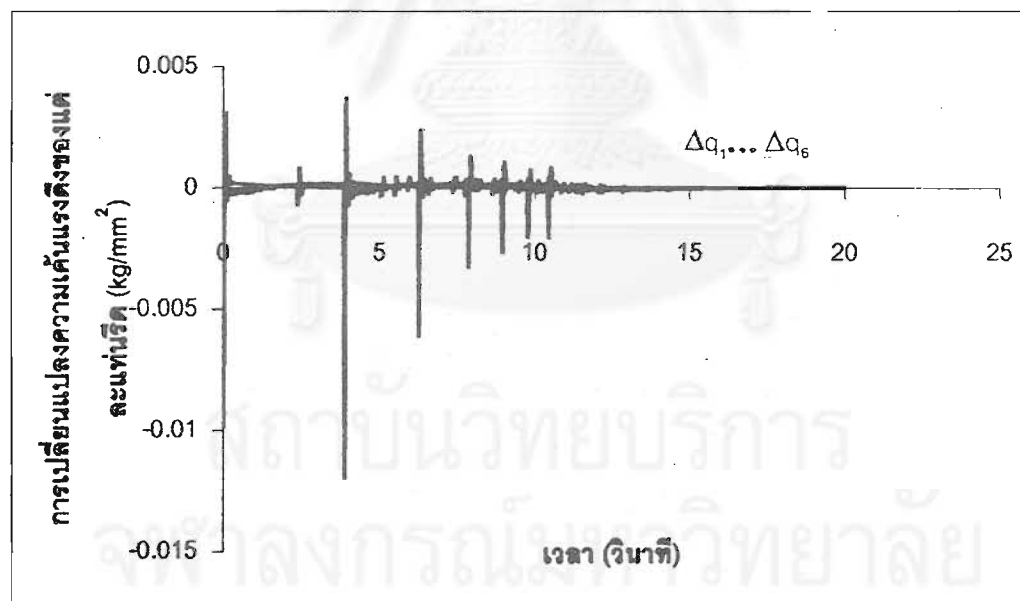
รูปที่ 4.5 แสดงระบบการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรืด

- (a) ควบคุมความเร็วลูกรืดแท่นที่ 1 ให้คงที่
- (b) ควบคุมความเร็วลูกรืดแท่นที่ 7 ให้คงที่

4.2.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรูดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรูด 7 แท่นรูด (แบบ V_{r1} คงที่)



(a)



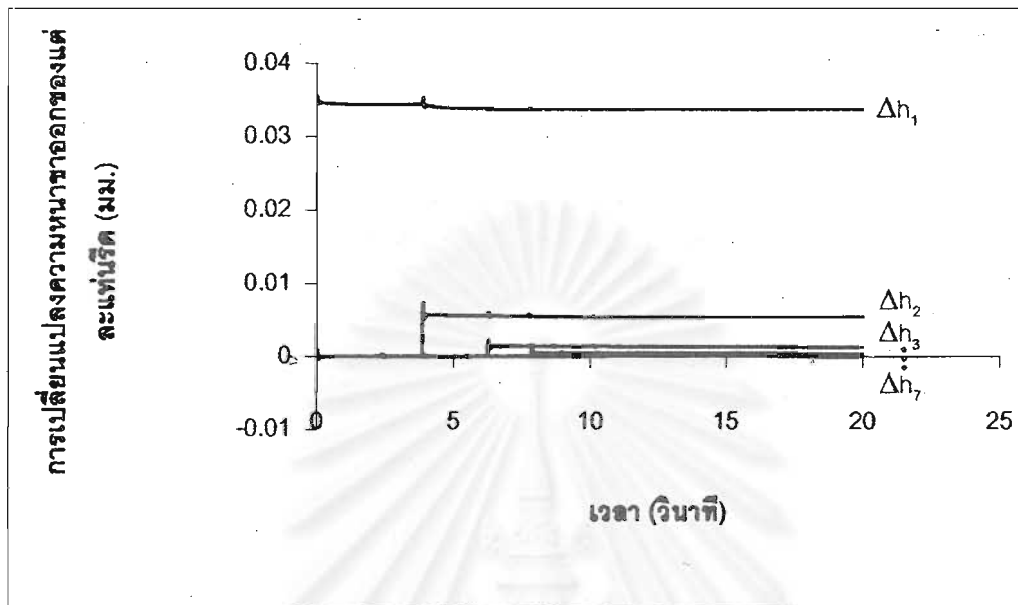
(b)

รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบบเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรูดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H_1=1\%$ (V_{r1} คงที่)

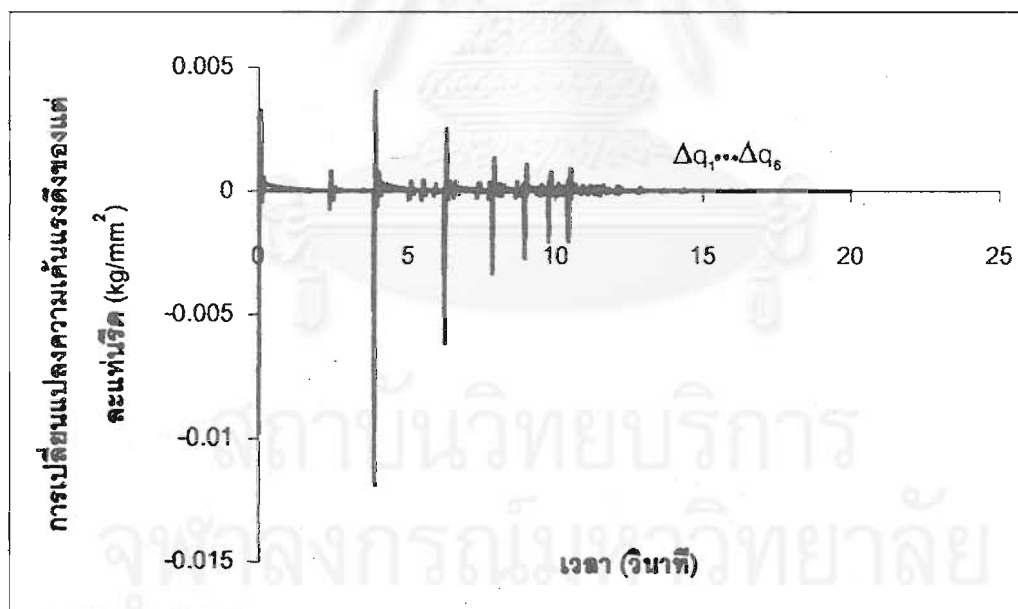
(a) การเปลี่ยนแปลงความหนาของท่อของแต่ละแท่นรูด

(b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรูด

4.2.2 ผลการคำนวณจากแบบจำลองการรื้อร่อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรืด 7 แท่นรืด (แบบ Vr7 คงที่)



(a)



(b)

รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรืดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง

$\Delta H_1=1\%$ (Vr7 คงที่)

(a) การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแต่ละแท่นรืด

(b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงของแต่ละแท่นรืด

เนื่องจากผลการคำนวณนี้เป็นผลการคำนวณจากแบบจำลองของกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่งถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูบเปอร์ 7 แท่นรีด ดังนั้นความเร็วของลูกรีดในแต่ละแท่นรีดจะถูกควบคุมให้คงที่ หรือไม่ก็ถูกปรับเพื่อรักษาค่าแรงดึงระหว่างแท่นรีด สภาวะของการรบกวนระบบการรีดจึงมีเฉพาะในกรณีที่ความหนาขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น

เมื่อความหนาขาเข้าแท่นรีดที่ 1 ถูกสมมติให้มีความหนาเพิ่มขึ้น 0.36 มม. (1%) และทำการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูบเปอร์ จะทำให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้ง 2 ระบบของการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด กล่าวคือ ความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีดจะมีขนาดเพิ่มขึ้นและมีความสม่ำเสมอของความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปมากขึ้น (เรียบขึ้น) สำหรับค่าของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดในทุกๆ แท่นรีด จะถูกควบคุมจนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทุกๆ แท่นรีด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



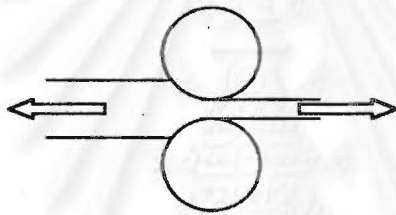
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผล

จากผลการคำนวณของแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องที่ได้แสดงในบทที่แล้ว สามารถทำการวิเคราะห์ลักษณะต่างๆของระบบการรีดร้อนต่อเนื่องโดยพิจารณาจากการลดขนาดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายเป็นหลัก สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

5.1 บทบาทของระบบที่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดและระบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้าย

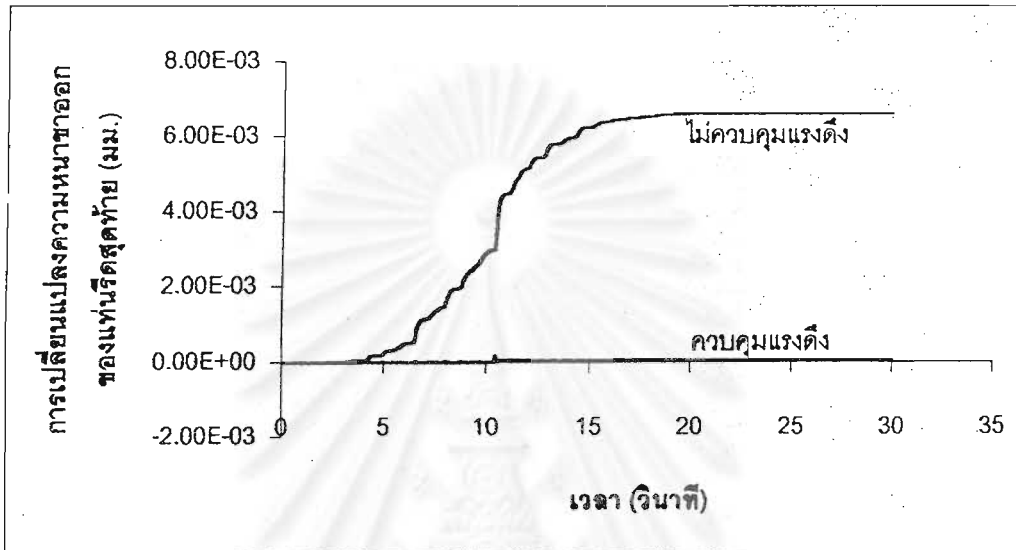
จากที่กล่าวมาแล้วว่าสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของจุด Neutral point นั้นเอง ถ้าพิจารณาการรีดที่มีเพียง 1 แท่นรีดดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการรีดใน 1 แท่นรีด

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อตำแหน่งของ Neutral point นั้น ได้แก่ ความหนาขาเข้า, ความหนาขาออก, รัศมีของลูกรีด, ความเค้นแรงดึงด้านหน้า (Forward tension), ความเค้นแรงดึงด้านหลัง (Backward tension) ซึ่งในระบบของการรีดจริงนั้นจะต้องทำการรีดในหลายๆแท่นรีดพร้อมๆกัน ปัจจัยที่เชื่อมต่อกันในแต่ละแท่นรีด ก็คือ ความเค้นแรงดึงด้านหน้าและด้านหลัง เมื่อเกิดความไม่คงที่ของระบบขึ้น เช่น ความหนาของแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 มีความไม่เรียบหรือมีขนาดความหนาไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ปกติที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ความไม่คงที่นี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของจุด Neutral point ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแผ่นเหล็กที่ทางเข้าและออกจากแท่นรีด เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแท่นรีดตามมา การที่ความเค้นแรงดึงเกิดการเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาอยู่ตลอดเวลาในช่วงช่วงสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) นั้น จะทำให้ความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแท่นรีดสุดท้าย เพราะจะกระทบกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำการ

พิจารณาระบบการรีดที่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดกับระบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดและนำค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายมาเปรียบเทียบกัน โดยการสมมติว่าความหนาของแผ่นเหล็กขาเข้าเกิดการเพิ่มขึ้น 0.36 มม.(1%) แสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.2



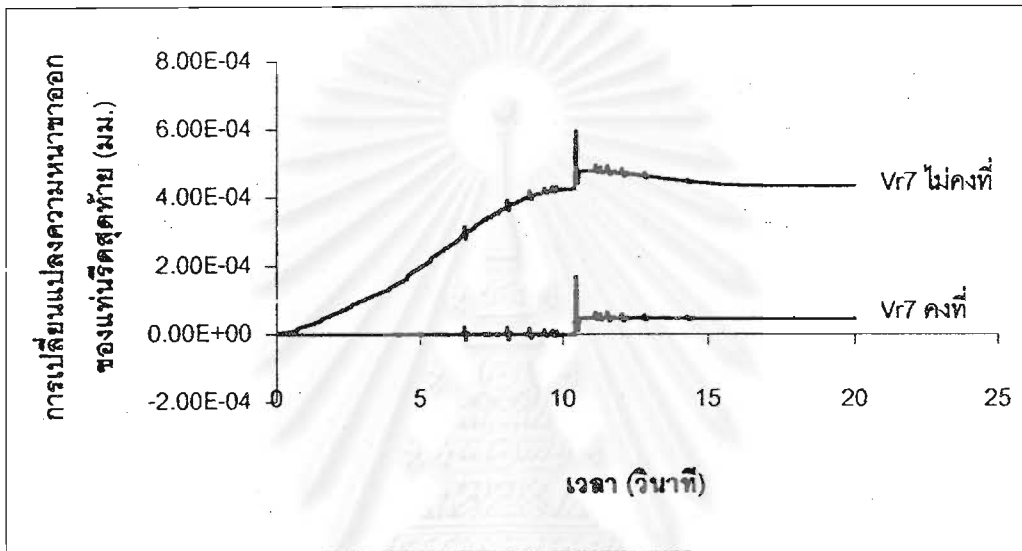
รูปที่ 5.2 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H_1 = 1\%$

จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบการรีดถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์ การเปลี่ยนแปลงความหนาสุดท้ายจะมีขนาดลดลงมากเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความหนาสุดท้ายได้

5.2 ผลของการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้าย

เนื่องจากการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์ลูปเปอร์มีหลักการคือ มีแกนลูปเปอร์เลื่อนขึ้นลงเพื่อรักษาค่าแรงดึงตามที่กำหนดไว้ และจะต้องทำการปรับความเร็วของลูกรีด 1 แท่นรีดเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้ ถ้าไม่ปรับความเร็วลูกรีดระบบจะไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้ ในการปรับความเร็วลูกรีดนั้นสามารถเลือกปรับได้ 2 แบบ คือ ปรับความเร็วของลูกรีดทางด้านต้นหรือปรับความเร็วของลูกรีดทางด้านปลายของการรีด ในระบบการรีดที่พิจารณา

นี่เป็นการรีด 7 แท่นรีด ดังนั้นระบบของการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ ระบบที่ความเร็วลูกรีดที่แท่นสุดท้ายจะถูกปรับเพื่อรักษาแรงดึงระหว่างแท่นรีด (V_{r7} ไม่คงที่) และระบบที่ความเร็วลูกรีดแท่นสุดท้ายจะไม่ถูกปรับเพื่อรักษาแรงดึงระหว่างแท่นรีด (V_{r7} คงที่) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 (a) และ 4.5 (b) จากลักษณะที่แตกต่างกันของความเร็วลูกรีดที่แท่นสุดท้ายนี้ จึงทำการพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างระบบควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดทั้ง 2 ระบบ แสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายเมื่อความหนาแผ่นเหล็กขาเข้าแท่นรีดที่ 1 เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta H_1 = 1\%$

จะได้อาการที่ความเร็วของลูกรีดในแท่นสุดท้ายมีค่าคงที่ หรือไม่ได้ถูกปรับความเร็วเพื่อรักษาแรงดึงระหว่างแท่นรีด มีผลให้การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นสุดท้ายมีขนาดน้อยกว่าในกรณีที่ถูปรับความเร็ว ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อความเร็วของลูกรีดที่แท่นสุดท้ายมีค่าไม่คงที่ ค่าของแรงที่ใช้ในการรีดจะมีค่าไม่สม่ำเสมอตามไปด้วย ดังนั้นความหนาที่ออกมาจึงมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในกรณีที่ความเร็วลูกรีดของแท่นสุดท้ายมีค่าคงที่

5.3 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีดจากแบบจำลองและจากข้อมูลของการรีดจริง

การวิเคราะห์นี้เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองของการรีดต่อเนื่องในสถานะไดนามิกส์ (Dynamic state) ซึ่ง

ถูกควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยมอเตอร์รูปแปดเหลี่ยม เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีดซึ่งได้จากข้อมูลจริงของการรีดจากบริษัท NKK ข้อมูลจริงของแรงที่ใช้ในการรีดที่กล่าวถึงนี้ เป็นค่าของแรงที่ใช้ในการรีดในสภาวะคงตัว (Steady state) ในสภาพเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

การคำนวณจากแบบจำลองการรีดร้อนต่อเนื่องในสภาวะไดนามิกส์นี้เป็นการคำนวณการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะคงตัวที่ 1 ไปสู่สภาวะคงตัวที่ 2 โดยใช้หลักการที่ว่า สภาวะคงตัวที่ 1 (1st Steady state) เมื่อถูกรบกวนขึ้นจะเข้าสู่สภาวะไดนามิกส์ (Dynamic state) และใช้เวลาอยู่ช่วงหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 2 (2nd Steady state) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 2 แล้วจึงนำผลต่างของแรงที่ใช้ในการรีดของ 2 สภาวะมาเปรียบเทียบกับผลต่างของแรงที่ใช้ในการรีดซึ่งได้จากสภาวะที่แตกต่างกัน 2 สภาวะของข้อมูลจริง

จากข้อมูลจริงที่มีอยู่มีข้อมูลบางส่วนที่สามารถถูกจับคู่เพื่อให้แบบจำลองนี้คำนวณเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 สภาวะได้ ซึ่งสามารถแยกออกเป็นกรณีต่างๆได้ดังนี้

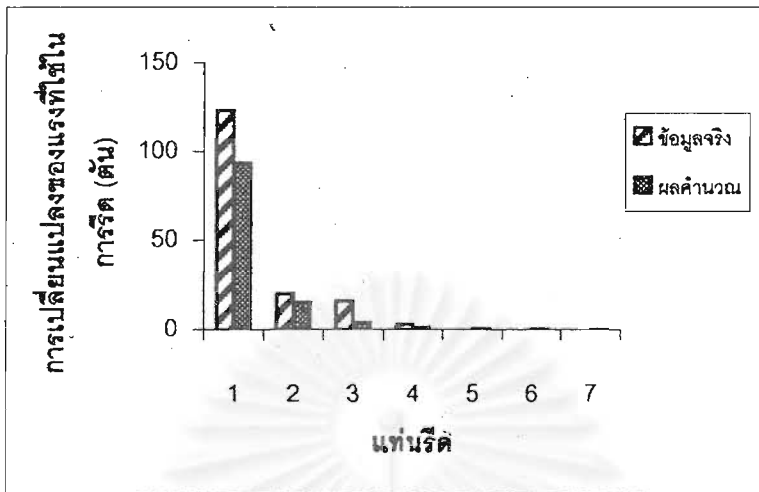
5.3.1 ความหนาที่ทางเข้าแท่นรีดที่ 1 ต่างกันแต่ปัจจัยอื่นๆคงเดิม

ข้อมูลที่มีลักษณะแบบนี้มีอยู่เป็นจำนวนมากที่สุดกล่าวคือ ค่า Roll gap ที่ทุกๆแท่นรีดมีขนาดเท่าเดิม, ค่าของความเค้นแรงดึงทุกๆแท่นรีดถูกตั้งให้มีขนาดเท่าเดิม, ค่าความกว้างของแผ่นเหล็กมีขนาดใกล้เคียงกันมาก ต่างกันที่ความหนาของแผ่นเหล็กที่เข้ามาในแท่นรีดที่ 1 ข้อมูลจำพวกนี้น่าจะเกิดจากการรีดในลำดับถัดๆกันของเหล็กชนิดเดียวกันที่ต้องการความหนาใกล้เคียงกันแต่ความหนาเข้าไม่เท่ากันเนื่องจากยากที่จะควบคุมในส่วนของการรีดหยาบ (Roughing mill)

จากข้อมูลจริงจะเห็นว่าเมื่อความหนาเข้าแท่นรีดที่ 1 มีขนาดแตกต่างกัน 2 มม. ส่วนปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด, Roll gap ของแต่ละแท่นรีดยังคงเดิม จะเห็นได้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีดอย่างเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่แท่นรีดที่ 1-4 ส่วนในแท่นรีดที่ 5-7 แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (ความหนาเข้าแตกต่างกัน)

		ข้อมูลชุดที่ 48								ข้อมูลชุดที่ 83							
stand		1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)		36	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23	2.78	38	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23	2.78
Tension (kg/mm ²)		0	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	0	0	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	0
Force (tons)		1782	1482	1412	1082	1078	990	652	-	1905	1502	1428	1085	1078	990	652	-



รูปที่ 5.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง (ความหนาเข้าแตกต่างกัน)

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริงของตัวอย่างข้อมูลอื่นๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ง.

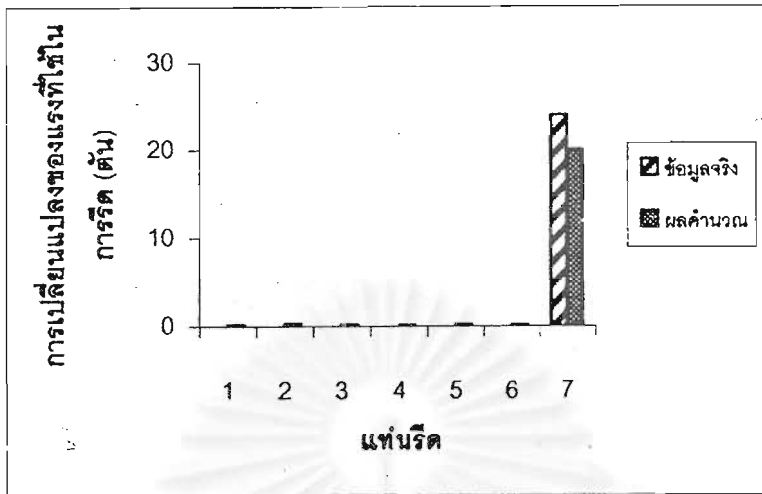
5.3.2 ค่า Roll gap ที่แท่นรีดสุดท้ายมีความแตกต่างกันแต่ปัจจัยอื่นๆคงเดิม

จากข้อมูลที่มีอยู่ข้อมูลลักษณะนี้ไม่มีเพียงข้อมูลเดียวเท่านั้น น่าจะเกิดจากการรีดในลำดับถัดกันแต่ต้องการความหนาสุดท้ายที่แตกต่างกันแต่แตกต่างกันไม่มากนัก จึงทำการปรับ Roll gap เฉพาะที่แท่นรีดสุดท้ายเท่านั้น

จากข้อมูลจริงจะได้ว่าเมื่อ Roll gap ที่แท่นรีดสุดท้ายเปลี่ยนแปลงจะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีดเฉพาะที่แท่นรีดสุดท้ายเท่านั้น ส่วนในแท่นรีดอื่นๆไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (Roll gap ของแท่นรีดสุดท้ายต่างกัน)

stand	ข้อมูลชุดที่ 16								ข้อมูลชุดที่ 108							
	1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)	36	19.24	11.71	7.79	5.25	4.08	3.28	2.79	36	19.24	11.71	7.79	5.25	4.08	3.28	2.65
Tension (kg/mm ²)	0	0.29	0.27	1.08	2.36	2.41	2.15	0	0	0.29	0.27	1.08	2.36	2.41	2.15	0
Force (tons)	1778	1489	1416	1084	1085	998	556	-	1778	1489	1416	1084	1085	998	580	-



รูปที่ 5.5 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง (Roll gap ของแท่นรีดสุดท้ายต่างกัน)

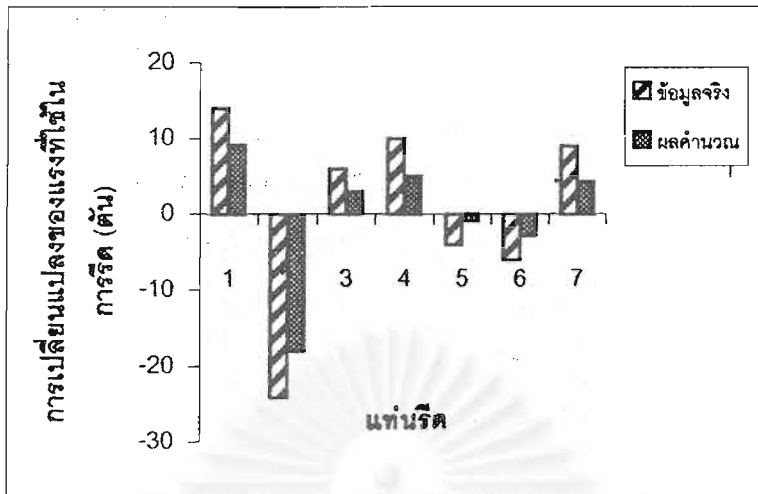
5.3.3 ค่า Roll gap ที่แต่ละแท่นรีดมีความแตกต่างกันแต่ปัจจัยอื่น ๆ คงเดิม

ข้อมูลแบบนี้มีลักษณะคือ ค่า Roll gap ที่แต่ละแท่นรีดถูกตั้งไว้ไม่เท่ากันแต่ค่าแรงดึงระหว่างแท่นรีดและค่าตัวแปรอื่นๆของการรีดมีค่าใกล้เคียงกันมาก มีข้อมูลลักษณะนี้จำนวน 2 ข้อมูลเท่านั้น

จากข้อมูลจริงจะเห็นว่าเมื่อความหนาเข้าแท่นรีดที่ 1 มีขนาดเท่าเดิม และความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดของแต่ละแท่นรีดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่า Roll gap ของแต่ละแท่นรีดถูกตั้งไว้มีขนาดที่ต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าของแรงที่ใช้ในการรีดของแต่ละแท่นรีดเกิดการเปลี่ยนแปลง มีทั้งแท่นรีดที่ต้องใช้แรงในการรีดเพิ่มขึ้น และแท่นรีดที่ต้องใช้แรงในการรีดลดลง แสดงดังตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (Roll gap ของแต่ละแท่นรีดต่างกัน)

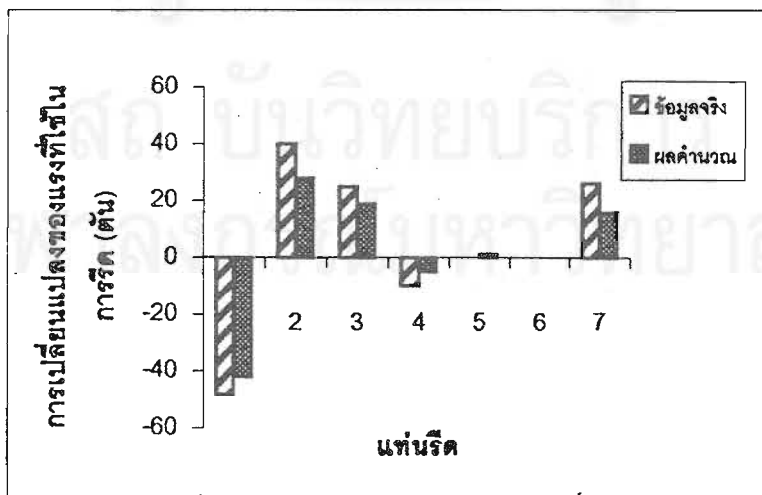
	ข้อมูลชุดที่ 3								ข้อมูลชุดที่ 107							
stand	1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)	39	21.18	13.95	9.62	6.84	5.39	4.32	3.77	39	21.02	14.05	9.64	6.83	5.4	4.34	3.76
Tension (kg/mm ²)	0	0.29	0.33	1.1	1.79	2.33	3.65	0	0	0.29	0.33	1.1	1.79	2.33	3.65	0
Force (tons)	1639	1172	1088	856	776	674	524	-	1653	1148	1094	866	772	668	533	-



รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง (Roll gap ของแต่ละแท่นรีดต่างกัน)

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล (Roll gap ของแต่ละแท่นรีดต่างกัน)

	ข้อมูลชุดที่ 1								ข้อมูลชุดที่ 2							
stand	1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)	38	24.94	16.88	12.26	9.26	7.23	5.93	5.34	38	25.52	16.95	12.21	9.28	7.23	5.93	5.28
Tension (kg/mm ²)	0	0.35	0.37	0.82	1.29	1.97	2.74	0	0	0.35	0.37	0.82	1.29	1.97	2.74	0
Force (tons)	1468	1362	1207	988	989	859	595	-	1420	1402	1232	978	989	859	621	-



รูปที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง (Roll gap ของแต่ละแท่นรีดต่างกัน)

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีดของกรณีทั้ง 3 กรณีนี้ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันระหว่างข้อมูลจริงกับผลการคำนวณซึ่งได้จากแบบจำลอง

สำหรับขนาดของการเปลี่ยนแปลงนั้นยังมีขนาดที่แตกต่างกันอยู่บ้างพอสมควร ทั้งนี้อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ อันได้แก่

1. อุณหภูมิของแผ่นเหล็กในแต่ละแท่นรีด เนื่องจากในการวัดอุณหภูมิของการรีดจริงนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าของแท่นรีดที่ 1 และที่ทางออกของแท่นรีดสุดท้ายเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิของแผ่นเหล็กในแต่ละแท่นรีดที่ใช้เป็นข้อมูลของการคำนวณนั้นจึงใช้วิธีการประมาณจากอุณหภูมิเข้าและออกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว
2. ความกว้างของแผ่นเหล็กในแต่ละแท่นรีด เนื่องจากแผ่นเหล็กที่ถูกรีดนั้นมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นในการรีดที่แต่ละแท่นรีดจึงมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดความกว้างของแผ่นเหล็ก จากข้อมูลจริงในภาคผนวก ค. จะเห็นได้ว่าความกว้างของแผ่นเหล็กที่แสดงจะมี 2 ค่า คือ ความกว้างก่อนทำการรีดและความกว้างหลังจากที่รีดเสร็จแล้ว ซึ่งความกว้างที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าประมาณ 1.5 % ความกว้างของแผ่นเหล็กที่ใช้คำนวณในแบบจำลองนี้ใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งเท่ากันในทุกๆแท่นรีด
3. หน่วยของแรงที่วัดได้จริง เนื่องจากแรงที่วัดได้จากข้อมูลจริงนั้นมีขนาดเป็นตัน ดังนั้นเมื่อแรงที่ใช้ในการรีดซึ่งมีเศษที่ไม่ถึง 1 ตันจะถูกตัดออกไปในการเก็บข้อมูล
4. สูตรที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากสูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าแต่ละค่า เช่น แรงในการรีด (Rolling force), Forward slip, ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด เป็นต้น ยังคงเป็นสูตรที่ใช้ในการประมาณ ซึ่งยังไม่สามารถใช้ประมาณค่าต่างๆได้อย่างแม่นยำนัก ซึ่งสาเหตุข้อนี้ น่าจะเป็นสาเหตุข้อใหญ่ที่สุดที่ทำให้ขนาดของการเปรียบเทียบเกิดความแตกต่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6 สรุปผล

ในกระบวนการรีดร้อนต่อเนื่อง 7 แท่นรีด สภาวะที่ความหนาขาเข้าแท่นรีดแรกมีความหนาไม่สม่ำเสมอเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงสามารถควบคุมได้ยาก การวิเคราะห์กระบวนการรีดร้อนต่อเนื่องในการศึกษานี้จึงให้ความสำคัญกับการลดขนาดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายในกรณีที่ความหนาขาเข้าแท่นรีดแรกมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยใช้มอเตอร์ลูปเปอร์สามารถลดขนาดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาขาเข้าแท่นรีดแรกได้
2. ในระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดสุดท้ายต้องมีค่าคงที่เพื่อลดขนาดการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของแท่นรีดสุดท้ายอันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของความเร็วลูกรีด
3. เมื่อความหนาขาเข้าของแผ่นเหล็กมีความหนาอยู่ระหว่าง 32-39 มม. ความหนาที่แตกต่างกันไม่เกิน 2 มม. จะทำให้แรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) มีการเปลี่ยนแปลงลดหลั่นกันเป็นลำดับตั้งแต่แท่นรีดแรกลงมาจนถึงแท่นรีดที่ 4 ส่วนในแท่นรีดที่ 5-7 จะไม่มีผลกระทบ เมื่อ Roll gap และความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดของแต่ละแท่นรีดมีค่าเท่าเดิม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

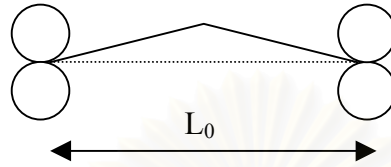
รายการอ้างอิง

1. F. Fujita, Continuous Rolling Theory, English version, NKK Corp, Chapter 5.
2. Hiromu Suzuki, Papers for the Conference of the Iron and Steel Institute of Japan, 1980, pp 80-86.
3. U. Guenter, Method for Determination of the Basic Stand Characteristic of Rolling mill, AEG Aktiengesellschaft, Berlin, West German, Steel Res V61 n8. 1990.
4. C. Gomez, P. Ratte and B. Petit, Papers for the Conference of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, pp 32.1-32.5.
5. J.H. Hitchcock: Am. Soc. Mech. Eng. Research Publication. 1930.
6. Roberts William L., Flat Processing of Steel, Marcel Dekkel Inc., 1988.
7. R. Hill: 'The Mathematical Theory of Plasticity', Oxford at the Clarendon Press, 1950.
8. E. Kreyszig, Advance Engineering Mathematics, 7th ed., John Wiley & Sons. Inc., 1993.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
 พิสูจน์สมการต่างๆในแบบจำลอง

1. สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of interstand tension)



รูปที่ ก.1 แสดงรูปร่างของเหล็กแผ่นระหว่างแท่นรีด

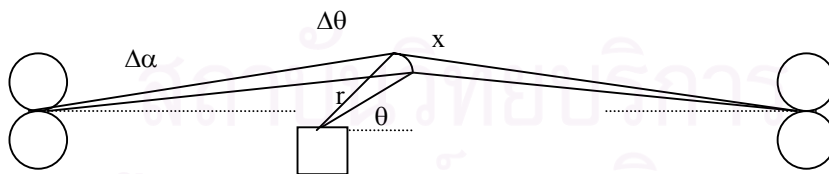
$$qf_i = \frac{E}{L_0} \int_0^l (V_{in,i+1} - V_{out,i}) dt + \frac{E}{L_0} (L - L_0)$$

$$\Delta qf_i = \frac{E}{L_0} [(V_{in,i+1} + \Delta V_{in,i+1}) - (V_{out,i} + \Delta V_{out,i})] dt + \frac{E}{L_0} (\Delta L')$$

จากรูปจะได้ $\Delta L = L_{ใดๆ} - L_{ตั้งต้น}$
 $= L_0 \sec \alpha - L_0$

ดังนั้น $\Delta L' = L_0 \sec \alpha \tan \alpha d\alpha$

หาความสัมพันธ์ของ $\Delta \alpha$ กับ $\Delta \theta$ จากรูป



รูปที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ของมุมต่างๆ

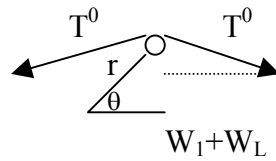
$$\Delta \theta = x/r$$

$$x = r \Delta \theta$$

$$\Delta \alpha = r \Delta \theta \cos(\theta - \alpha) / (L/2 \sec \alpha)$$

ดังนั้น $\Delta \theta = (L/2 \sec \alpha) \Delta \alpha / (r \cos(\theta - \alpha))$

2. สมการการเคลื่อนที่ของแขนลูปเปอร์ (Equation of looper motion)



รูปที่ ก.3 แสดงค่าแรงต่างๆที่เกิดที่แขนลูปเปอร์

$$\begin{aligned}
 I\theta'' &= r \times (2T_0 \sin \alpha + W_1 + W_L) - r \times (2T^0 \sin \alpha + W_1 + W_L) \\
 &= 2rT_0 \sin \alpha \cos \theta + (W_1 + W_L)r \cos \theta - 2rT^0 \sin \alpha \cos \theta - (W_1 + W_L)r \cos \theta \\
 &= 2r \sin \alpha \cos \theta (T_0 - T^0) \\
 &= 2rA \sin \alpha \cos \theta (q_0 - q^0)
 \end{aligned}$$

$$\theta'' = \frac{2A}{I} r \sin \alpha \cos \theta (q_0 - (q^0 + \Delta q))$$

$$\Delta \theta = \omega dt + \frac{1}{2} \theta'' dt^2$$

$$\Delta \theta + \frac{A}{I} r \sin \alpha \cos \theta dt^2 \Delta q = \frac{A}{I} dt^2 r \sin \alpha \cos \theta (q_0 - q^0) + \omega dt$$

3. สมการควบคุมความเร็วของลูกรีด (Equation of speed control, PI Control)

$$V_r = V_{r0} + K_p \left(\Delta \theta + \frac{1}{K_t} \int_0^t \Delta \theta dt \right)$$

$$V_{r1} = V_{r0} + K_p \left(\theta_1 - \theta_0 + \frac{1}{K_t} (\theta_1 - \theta_0) dt \right)$$

$$V_{r2} = V_{r0} + K_p \left(\theta_2 - \theta_0 + \frac{1}{K_t} [(\theta_2 - \theta_0) dt + (\theta_1 - \theta_0) dt] \right)$$

$$V_{r2} - V_{r1} = K_p \left(\theta_2 - \theta_1 + \frac{1}{K_t} (\theta_2 - \theta_0) dt \right)$$

$$\Delta Vr = K_p \left(\Delta\theta + \frac{1}{K_t} (\theta_1 - \theta_0 + \Delta\theta) dt \right)$$

$$\Delta Vr = \left(K_p + \frac{K_p}{K_t} dt \right) \Delta\theta + \frac{K_p}{K_t} (\theta - \theta_0) dt$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

Source code ของแบบจำลองการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์

โปรแกรม Sim' s equation

```

Option Explicit
Function deform(th0, th1, Rflat, temp, carbon, rpm)
    Dim k, a, reduct, stn, stnrate
    Const phi = 3.141592654
    k = 0.126 - 1.75 * carbon + 0.594 * carbon ^ 2
    a = 2851 + 2968 * carbon - 1120 * carbon ^ 2
    reduct = (th0 - th1) / th0
    stn = Log(1 / (1 - reduct))
    stnrate = phi * rpm / 30 * Sqr(Rflat / (th0 - th1)) * Log(1 / (1 - reduct))
    deform = Exp(k + a / temp) * stn ^ 0.21 * stnrate ^ 0.13
End Function

```

```

Function RollforcVr(stn, Vr, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)
    Dim DefR, stavg, Id, Qpget, k, a, PhaiN, alpha, reduct, vpm, stnrate
    Const pai = 3.141592654
    k = 0.126 - 1.75 * carbon + 0.594 * carbon ^ 2
    a = 2851 + 2968 * carbon - 1120 * carbon ^ 2
    alpha = Bitecalc(th0, th1, Rflat)
    reduct = (th0 - th1) / th0
    vpm = Vr * 60 / (2 * pai * Rflat)
    stnrate = (pai * vpm / 30) * Sqr(Rflat / (th0 - th1)) * Log(1 / (1 - reduct))
    DefR = Exp(k + a / temp) * stn ^ 0.21 * stnrate ^ 0.13
    PhaiN = Nangle(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
    stavg = ((1 - PhaiN / alpha) * tb + (PhaiN / alpha) * tf)
    Qpget = Qp(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
    Id = Sqr(Rflat * (th0 - th1) - ((th0 - th1) ^ 2) / 4)
    RollforcVr = (DefR - stavg) * Qpget * Id * w
End Function

```

```

Function Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)

```

Dim DefR, stavg, ld, Qpget, k, a, PhaiN, alpha, reduct

$k = 0.126 - 1.75 * \text{carbon} + 0.594 * \text{carbon}^2$

$a = 2851 + 2968 * \text{carbon} - 1120 * \text{carbon}^2$

$\alpha = \text{Bitecalc}(\text{th0}, \text{th1}, \text{Rflat})$

$\text{reduct} = (\text{th0} - \text{th1}) / \text{th0}$

$\text{DefR} = \text{Exp}(k + a / \text{temp}) * \text{stn}^{0.21} * \text{stnrate}^{0.13}$

$\text{PhaiN} = \text{Nangle}(\text{th0}, \text{th1}, \text{tf}, \text{tb}, \text{kf}, \text{kb}, \text{Rflat}, \text{temp})$

$\text{stavg} = ((1 - \text{PhaiN} / \alpha) * \text{tb} + (\text{PhaiN} / \alpha) * \text{tf})$

$\text{Qpget} = \text{Qp}(\text{th0}, \text{th1}, \text{tf}, \text{tb}, \text{kf}, \text{kb}, \text{Rflat}, \text{temp})$

$\text{ld} = \text{Sqr}(\text{Rflat} * (\text{th0} - \text{th1}) - ((\text{th0} - \text{th1})^2) / 4)$

$\text{Rollforc} = (\text{DefR} - \text{stavg}) * \text{Qpget} * \text{ld} * w$

End Function

Function Qp(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

Dim aa, hn, phiN, red, sqrr

Const phi = 3.141592654

$\text{red} = (\text{th0} - \text{th1}) / \text{th0}$

$\text{phiN} = \text{Nangle}(\text{th0}, \text{th1}, \text{tf}, \text{tb}, \text{kf}, \text{kb}, \text{Rflat}, \text{temp})$

$\text{sqrr} = \text{Sqr}((1 - \text{red}) / \text{red})$

$\text{hn} = \text{th1} * (1 + (\text{Tan}(0.5 * \text{Atn}(1 / \text{sqrr}) - \text{phi} / 8 * \text{Sqr}(\text{th0} / \text{Rflat}) * \text{Sqr}(1 - \text{red}) * \text{Log}(1 / (1 - \text{red}))))^2)$

$\text{Qp} = \text{phi} / 2 * \text{sqrr} * \text{Atn}(1 / \text{sqrr}) - \text{phi} / 4 - \text{sqrr} * \text{Sqr}(\text{Rflat} / \text{th1}) * \text{Log}(\text{hn} * (\text{Sqr}(1 - \text{red})) / \text{th1})$

If Qp <= 0 Then Stop

End Function

Function Bitecalc(th0, th1, Rflat)

$\text{Bitecalc} = \text{Arccos}(1 - (\text{th0} - \text{th1}) / (2 * \text{Rflat}))$

End Function

Function Arccos(x)

$\text{Arccos} = \text{Atn}(-x / \text{Sqr}(-x^2 + 1)) + 2 * \text{Atn}(1)$

End Function

Function Nangle(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

Dim alpha, yy, zz, kk, reduct

Const phi = 3.141592654

```

reduct = (th0 - th1) / th0
alpha = Bitecalc(th0, th1, Rflat)
Nangle = Sqr(th1 / Rflat) * Tan(1 / 2 * Atn(Sqr(reduct / (1 - reduct))) - phi / 8 * Sqr(th1 / Rflat) * Log
((th0 / th1) * (1 - tf / kf) / (1 - tb / kb)))
If Nangle <= 0 Then Stop
End Function

```

```

Function Fslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
Dim thn, piN
'Thn=thickness at neutral point
piN = Nangle(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
Fslip = piN ^ 2 * Rflat / th1
End Function

```

```

Function Bslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
Dim f
f = Fslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
Bslip = (1 + f) * th1 / th0 - 1
End Function

```

```

Function Rflat(P, R, th0, th1, v0, E, w)
Dim Co
Const phi = 3.141592654
'v0=poisson ratio
'E=elastic modulus
Co = 16 * (1 - v0 ^ 2) / (phi * E)
Rflat = R * (1 + Co * P / (th0 - th1))
End Function

```

```

Function NewtonR(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, R, temp, w, carbon, v0, E)
Dim i, n, P, Rf, M
M = R
n = 6
For i = 1 To n
P = Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, R, temp, w, carbon)

```

Rf = Rflat(P, M, th0, th1, v0, E, w)

R = Rf

Next i

NewtonR = R

End Function

โปรแกรมหาอนุพันธ์ (Derivative function)

Option Explicit

Function dPbydHin(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)

Dim NTh0

NTh0 = th0 + 0.001

th0 = th0 - 0.001

dPbydHin = (Rollforc(stn, stnrate, NTh0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon) - Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)) / (NTh0 - th0)

End Function

Function dPbydhout(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)

Dim NTh1

NTh1 = th1 + 0.001

th1 = th1 - 0.001

dPbydhout = (Rollforc(stn, stnrate, th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon) - Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)) / (NTh1 - th1)

End Function

Function dPbydtb(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)

Dim Ntb

Ntb = tb + 0.001

tb = tb - 0.001

dPbydtb = (Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, Ntb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon) - Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)) / (Ntb - tb)

End Function

Function dPbydtf(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)

Dim Ntf

Ntf = tf + 0.001

tf = tf - 0.001

dPbydtf = (Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, Ntf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon) - Rollforc(stn, stnrate, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)) / (Ntf - tf)

End Function

Function dPbydVr(stn, Vr, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)

Dim NVr

NVr = Vr + 0.001

Vr = Vr - 0.001

dPbydVr = (RollforcVr(stn, NVr, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon) - RollforcVr(stn, Vr, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp, w, carbon)) / (NVr - Vr)

End Function

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

Dim NTh0

Dim NFslip, OFslip

NTh0 = th0 + 0.001

th0 = th0 - 0.001

NFslip = Fslip(NTh0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

OFslip = Fslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

dfbydHin = (NFslip - OFslip) / (NTh0 - th0)

End Function

Function dfbydHout(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

Dim NTh1

Dim NFslip, OFslip

NTh1 = th1 + 0.001

th1 = th1 - 0.001

NFslip = Fslip(th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

OFslip = Fslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)

dfbydHout = (NFslip - OFslip) / (NTh1 - th1)

End Function

Function dfbydtb(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)


```

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

```

```

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

```

```

Function dfbydVr(Vr, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
Dim NVr
Dim NFslip, OFslip
NVr = Vr + 0.001
Vr = Vr - 0.001
NFslip = Fslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
OFslip = Fslip(th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, temp)
dfbydVr = (NFslip - OFslip) / (NVr - Vr)
End Function

```

โปรแกรม Add-data

```

Option Explicit
Sub add()
Dim th0(7), th1(7), Vr(7), tb(7), tf(7)
Dim temp(7), w(7), R(7), Rflatt(7), de(7)

```

```

Dim rpm, i, j
Const stand = 7
Const pai = 3.141592654
Worksheets("sheet2").Select
For j = 1 To 20
For i = 1 To stand
th0(i) = Cells(2, 9 + i)
th1(i) = Cells(3, 9 + i)
Vr(i) = Cells(4, 9 + i)
tb(i) = Cells(5, 9 + i)
tf(i) = Cells(6, 9 + i)
temp(i) = Cells(7, 9 + i)
R(i) = Cells(8, 9 + i)
Rflatt(i) = R(i)
If Vr(i) = 0 Then Vr(i) = 100
rpm = Vr(i) * 60 / (2 * pai * R(i))
de(i) = deform(th0(i), th1(i), R(i), temp(i), 0.048, rpm)
Cells(13, 9 + i) = Fslip(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
If i = stand Then
Cells(15, 9 + i) = (1 + Cells(13, 9 + i)) * Vr(i)
Cells(14, 9 + i) = Cells(15, 9 + i) * th1(i) / th0(i)
End If
Next i
For i = (stand - 1) To 1 Step (-1)
Cells(15, 9 + i) = Cells(14, 10 + i)
Cells(14, 9 + i) = Cells(15, 9 + i) * th1(i) / th0(i)
Cells(4, 9 + i) = Cells(15, 9 + i) / (1 + Cells(13, 9 + i))
Next i
Next j
End Sub

```

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
If a(n, n) = 0 Then
  MsgBox ("no unique solution exists")

```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

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

```

โปรแกรม Data

```

Option Explicit
Dim th0(7), th1(7), Vin(7), Vout(7), stn(7), Vr(7), tb(7), tf(7), forward(7), arm(7)
Dim temp(7), w(7), R(7), Lang(7), E(7), Rflatt(7), Mill(7), Length(7), stnrate(7), de(7)
Dim reduct, rpm, ll
Dim yy As Integer
Const pai = 3.141592654
Const stand = 7
Const dt = 0.2
Sub data()
Dim i As Integer
Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To stand
th0(i) = Cells(2, 9 + i)
th1(i) = Cells(3, 9 + i)
Vr(i) = Cells(4, 9 + i)
tb(i) = Cells(5, 9 + i)
tf(i) = Cells(6, 9 + i)
temp(i) = Cells(7, 9 + i)
R(i) = Cells(8, 9 + i)
w(i) = Cells(9, 9 + i)

```

```

Mill(i) = Cells(10, 9 + i)
Length(i) = Cells(12, 9 + i)
forward(i) = Cells(13, 9 + i)
Vin(i) = Cells(14, 9 + i)
Vout(i) = Cells(15, 9 + i)
Rflatt(i) = R(i)
reduct = (th0(i) - th1(i)) / th0(i)
rpm = Vr(i) * 60 / (2 * pai * R(i))
stn(i) = Log(1 / (1 - reduct))
stnrate(i) = (pai * rpm / 30) * Sqr(Rflatt(i) / (th0(i) - th1(i))) * Log(1 / (1 - reduct))
de(i) = deform(th0(i), th1(i), R(i), temp(i), 0.048, rpm)
E(i) = 5000
Next i
End Sub

```

โปรแกรม Matrix (No interstand tension control)

```

Sub matrix()
Dim n As Integer, i As Integer, j As Integer, c As Integer
Dim a(47, 71)
Dim x(47), xo(47)
Dim k
Dim M
Dim re(47, 71) As Boolean
For i = 1 To 47
  For j = 1 To 71
    a(i, j) = 0
    re(i, j) = False
  Next j
Next i
Next i
'dh eq1 to 8
For i = 1 To stand
  a(i, i) = 1

```

```

a(i + stand, i) = -1 * dPbydhout(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i), w
(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i) = -1 * dfbydHout(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
a(i + 4 * stand, i) = -1 * Vout(i)
If i <> stand Then a(i + 5 * stand, i) = tf(i)
Next i
'dH eq1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + stand) = -1 * dPbydHin(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i),
temp(i), w(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i + stand) = -1 * dfbydHin(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
a(i + 4 * stand, i + stand) = Vin(i)
If i <> stand Then a(i + 5 * stand, i + (stand + 1)) = -1 * tb(i + 1)
Next i
'dP eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 2 * stand) = -1 / Mill(i)
a(i + stand, i + 2 * stand) = 1
Next i
'dqfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + 3 * stand) = -1 * dPbydtf(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i),
temp(i), w(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i + 3 * stand) = -1 * dfbydtf(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
If i <> stand Then a(i + 5 * stand, i + 3 * stand) = th1(i)
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + 3 * stand) = 1
Next i
'dqbi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + 4 * stand) = -1 * dPbydtb(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i),
temp(i), w(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i + 4 * stand) = -1 * dfbydtb(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
If i <> stand Then a(i + 5 * stand, i + (4 * stand + 1)) = -1 * th0(i + 1)
Next i

```

```

'dfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 2 * stand, i + 5 * stand) = -1 * Vr(i)
a(i + 3 * stand, i + 5 * stand) = 1
Next i
'dVin i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 4 * stand, i + 6 * stand) = th0(i)
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + (6 * stand + 1)) = -1 * dt * E(i + 1) / Length(i + 1)
Next i
'dVout i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 2 * stand, i + 7 * stand) = 1
a(i + 4 * stand, i + 7 * stand) = -1 * th1(i)
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + 7 * stand) = dt * E(i) / Length(i)
Next i
'dG eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 8 * stand) = -1
Next i
'dVri eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + 9 * stand) = -1 * dPbydVr(stn(i), Vr(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp
(i), w(i), 0.048)
a(i + 2 * stand, i + 9 * stand) = -(1 + forward(i))
a(i + 3 * stand, i + 9 * stand) = -1 * dfbydVr(Vr(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
Next i
'value right hand
For i = 1 To stand
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), 71) = dt * E(i) * (Vin(i + 1) - Vout(i)) / Length(i)
Next i
'set value of result
Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To 10
For j = 1 To stand

```

```

If Cells(i + 1, j + 1) <> 4 Then
k = Cells(i + 1, j + 1)
For c = 1 To 47
a(c, 71) = a(c, 71) - 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 71
If re(1, i) = False Then
M = M + 1
For j = 1 To 47
a(j, M) = a(j, i)
Next j
End If
Next i
Call solve(a, xo, x, 47)
For i = 1 To stand
Worksheets("sheet5").Cells(yy, i).Value = x(i)
Worksheets("sheet6").Cells(yy, i).Value = x(i + 14)
Next i
Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To stand
Cells(3, 9 + i) = Cells(3, 9 + i) + x(i) 'hout
Cells(2, 9 + i) = Cells(2, 9 + i) + Cells(3, 1 + i) 'Hin
If i <> stand Then Cells(6, 9 + i) = Cells(6, 9 + i) + x(i + 14) 'qfi
If i = stand Then Cells(6, 9 + i) = Cells(6, 9 + i) + Cells(5, i + 1)
If i = 1 Then Cells(5, 9 + i) = Cells(5, 9 + i) + Cells(6, i + 1) 'qbi
If i <> 1 Then Cells(5, 9 + i) = Cells(5, 9 + i) + x(i + 19)
Cells(13, 9 + i) = Cells(13, 9 + i) + x(i + 26) 'forward
Cells(14, 9 + i) = Cells(14, 9 + i) + x(i + 33) 'Vin
Cells(15, 9 + i) = Cells(15, 9 + i) + x(i + 40) 'Vout

```



```

Cells(4, 9 + i) = Cells(4, 9 + i) + Cells(11, 1 + i) 'Vr
Next i
End Sub

```

โปรแกรม Matrix (Interstand tension control)

```

Sub matrix()
Dim n As Integer, i As Integer, j As Integer, c As Integer
Dim a(59, 77)
Dim x(59), xo(59)
Dim k
Dim Kp, Kt
Dim M
Dim re(59, 77) As Boolean
Kp = 250
Kt = 2.5
For i = 1 To 59
For j = 1 To 77
a(i, j) = 0
re(i, j) = False
Next j
Next i
'dh eq1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i) = 1
a(i + stand, i) = -1 * dPbydhout(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i), w
(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i) = -1 * dfbydhout(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
a(i + 4 * stand, i) = -1 * Vout(i)
Next i
'dH eq1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + stand) = -1 * dPbydHin(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i),
temp(i), w(i), 0.048)

```

```

a(i + 3 * stand, i + stand) = -1 * dfbydHin(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
a(i + 4 * stand, i + stand) = Vin(i)
Next i
'dP eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 2 * stand) = -1 / Mill(i)
a(i + stand, i + 2 * stand) = 1
Next i
'dqfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + 3 * stand) = -1 * dPbydtf(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i),
temp(i), w(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i + 3 * stand) = -1 * dfbydtf(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
If i <> stand Then a(i + 5 * stand, i + 3 * stand) = 1
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + 3 * stand) = 1
If i <> stand Then a(i + (7 * stand - 2), i + 3 * stand) = inert(i) * dt ^ 2 * arm(i) * Cos(ang(i)) * Sin(eng
(i))
Next i
'dqbi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + 4 * stand) = -1 * dPbydtb(stn(i), stnrate(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i),
temp(i), w(i), 0.048)
a(i + 3 * stand, i + 4 * stand) = -1 * dfbydtb(th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
If i <> stand Then a(i + 5 * stand, i + (4 * stand + 1)) = -1
Next i
'dfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 2 * stand, i + 5 * stand) = -1 * Vr(i)
a(i + 3 * stand, i + 5 * stand) = 1
Next i
'dVin i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 4 * stand, i + 6 * stand) = th0(i)
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + (6 * stand + 1)) = -1 * dt * E(i) / Length(i)
Next i

```

```

'dVout i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 2 * stand, i + 7 * stand) = 1
a(i + 4 * stand, i + 7 * stand) = -1 * th1(i)
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + 7 * stand) = dt * E(i) / Length(i)
Next i

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

'dVri eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + stand, i + 9 * stand) = -1 * dPbydVr(stn(i), Vr(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp
(i), w(i), 0.048)
a(i + 2 * stand, i + 9 * stand) = -(1 + forward(i))
a(i + 3 * stand, i + 9 * stand) = -1 * dfbydVr(Vr(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), de(i), de(i), Rflatt(i), temp(i))
If i <> stand Then a(i + (8 * stand - 3), i + (9 * stand)) = 1
If i <> stand Then a(i + (8 * stand - 3), i + (9 * stand) + 1) = -1
Next i

'dtheta eq 1 to 8
For i = 1 To stand
If i <> stand Then a(i + (7 * stand - 2), i + 10 * stand) = 1
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), i + 10 * stand) = -Sin(eng(i)) * E(i) / (Cos(eng(i)) ^ 2 * ratio(i))
If i <> stand Then a(i + (8 * stand - 3), i + 10 * stand) = Kp * Kp * dt / Kt
Next i

'value right hand of looper
For i = 1 To stand
If i <> stand Then a(i + (6 * stand - 1), 77) = E(i) * dt * (Vin(i + 1) - Vout(i)) / Length(i)
If i <> stand Then a(i + (7 * stand - 2), 77) = inert(i) * dt ^ 2 * arm(i) * (Ten(i) * Sin(eng(i)) * Cos(ang
(i)) - tension(i) * Cos(ang(i)) * Sin(eng(i))) + arm(i) * wlooper * dt ^ 2 / 2 * (Cos(ang(i)) - Cos(ang(i))) /
inertia + omega(i) * dt
If i <> stand Then a(i + (8 * stand - 3), 77) = -1 * Worksheets("sheet8").Cells(1, i) * Kp * dt / Kt
Next i

'set value of result
Worksheets("sheet2").Select

```

```

For i = 1 To 11
For j = 1 To stand
If Cells(i + 1, j + 1) <> 4 Then
k = Cells(i + 1, j + 1)
For c = 1 To 59
a(c, 77) = a(c, 77) - 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 77
If re(1, i) = False Then
M = M + 1
For j = 1 To 59
a(j, M) = a(j, i)
Next j
End If
Next i
Call solve(a, xo, x, 59)
For i = 1 To stand
Worksheets("sheet5").Cells(yy, i).Value = x(i)
If i <> stand Then Worksheets("sheet7").Cells(yy, i).Value = x(i + 53) * 180 / pai
Worksheets("sheet6").Cells(yy, i).Value = x(i + 14)
Worksheets("sheet4").Cells(yy, i).Value = x(i + 7)
Next i
Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To stand
Cells(3, 9 + i) = Cells(3, 9 + i) + x(i) 'hout
Cells(2, 9 + i) = Cells(2, 9 + i) + Cells(3, 1 + i) 'Hin
If i <> stand Then Cells(6, 9 + i) = Cells(6, 9 + i) + x(i + 14) 'qfi
If i = stand Then Cells(6, 9 + i) = Cells(6, 9 + i) + Cells(5, i + 1)
If i = 1 Then Cells(5, 9 + i) = Cells(5, 9 + i) + Cells(6, i + 1) 'qbi

```

```

If i <> 1 Then Cells(5, 9 + i) = Cells(5, 9 + i) + x(i + 19)
Cells(13, 9 + i) = Cells(13, 9 + i) + x(i + 26) 'forward
Cells(14, 9 + i) = Cells(14, 9 + i) + x(i + 33) 'Vin
Cells(15, 9 + i) = Cells(15, 9 + i) + x(i + 40) 'Vout
If i <> stand Then Cells(4, 9 + i) = Cells(4, 9 + i) + x(47 + i) 'Vr
If i <> stand Then Cells(11, 9 + i) = Cells(11, 9 + i) + x(i + 53) * 180 / pai 'dtheta
Next i
For i = 1 To (stand - 1)
tension(i) = Cells(6, 9 + i) 'tension(i) + x(i + 12)
ang(i) = ang(i) + x(i + 53)
eng(i) = eng(i) + x(i + 53) / ratio(i)
al(i) = (2 * inert(i)) * arm(i) * (Ten(i) * Sin(eng(i)) * Cos(ang(i)) - tension(i) * Cos(ang(i)) * Sin(eng(i))) +
arm(i) * wlooper * (Cos(ang(i)) - Cos(ang(i))) / inertia
omega(i) = omega(i) + al(i) * dt
dL(i) = Sin(eng(i)) * Length(i) / (Cos(eng(i)) ^ 2 * ratio(i)) * x(i + 53)
Cells(12, 9 + i) = Cells(12, 9 + i) + dL(i)
Worksheets("sheet8").Cells(1, i).Value = Worksheets("sheet8").Cells(1, i).Value + x(i + 53)
Next i
End Sub

```

โปรแกรม Main

```

Sub main()
Dim i, cu(7)
Dim sec
Dim time(7), L(7)
For i = 1 To (stand - 1)
cu(i) = 0
L(i) = Cells(12, 9 + i)
tension(i) = Cells(6, 9 + i)
omega(i) = 0
ang(i) = Cells(11, 9 + i) * pai / 180
eng(i) = 5 * pai / 180
dL(i) = 0

```

```

Ten(i) = tension(i)
Next i
sec = 0
For yy = 1 To 200
Call data
Cells(14, 8) = yy
For i = 1 To (stand - 1)
L(i) = L(i) - Vin(i + 1) * dt + dL(i)
Next i
Call matrix
sec = sec + dt
For i = 1 To (stand - 1)
If L(i) <= 0 Then
cu(i) = cu(i) + 1
Worksheets("sheet2").Cells(3, i + 2).Value = Worksheets("sheet5").Cells(cu(i), i).Value
End If
Next i
Worksheets("sheet2").Select
If sec > 0 Then Cells(3, 2) = 0
Next yy
End Sub

```

โปรแกรม Sum

```

Sub Sum()
For vv = 1 To 7
P = vv
Worksheets("sheet4").Select
Cells(1, P + 9) = Cells(1, P)
g=0
For i = 1 To 199
g = Cells(i, P) + g
Cells(i + 1, P + 9) = g + Cells(i + 1, P)
Cells(i, 9) = 0.02 * i
Next i

```

```

Next vv
For vv = 1 To 7
P = vv
Worksheets("sheet5").Select
Cells(1, P + 9) = Cells(1, P)
g = 0
For i = 1 To 199
g = Cells(i, P) + g
Cells(i + 1, P + 9) = g + Cells(i + 1, P)
Cells(i, 9) = 0.02 * i
Next i
Next vv
For vv = 1 To 6
P = vv
Worksheets("sheet6").Select
Cells(1, P + 9) = Cells(1, P)
g = 0
For i = 1 To 199
g = Cells(i, P) + g
Cells(i + 1, P + 9) = g + Cells(i + 1, P)
Cells(i, 9) = 0.02 * i
Next i
Next vv
For vv = 1 To 6
P = vv
Worksheets("sheet7").Select
Cells(1, P + 9) = Cells(1, P)
g = 0
For i = 1 To 199
g = Cells(i, P) + g
Cells(i + 1, P + 9) = g + Cells(i + 1, P)
Cells(i, 9) = 0.02 * i
Next i
Next vv
End Sub

```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลจริงของการวัดร้อนต่อเนื่อง 7 แท่นวัด (0.048 %C)

ข้อมูลจากบริษัท NKK ประเทศญี่ปุ่น

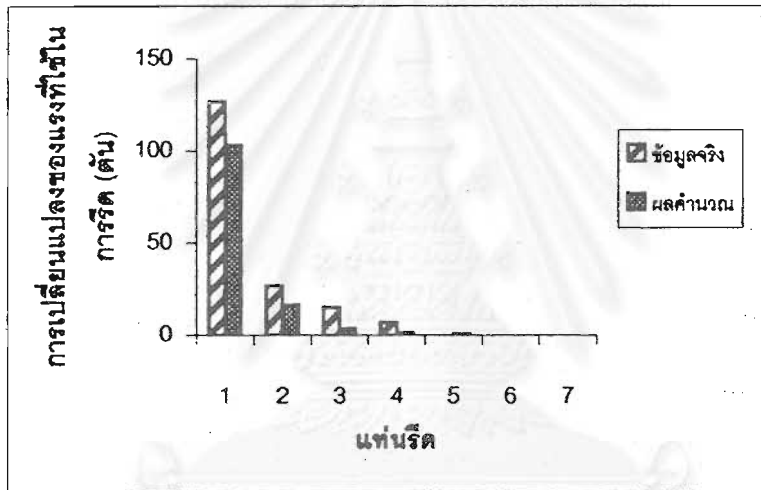
Date	Out width (mm)	In width (mm)	F7 speed (rot/min)	H1 (mm)	G1 (mm)	G2 (mm)	G3 (mm)	G4 (mm)	G5 (mm)	G6 (mm)	G7 (mm)	In Temp (C)	Out Temp (C)	Ten 1 (Degree)	Ten 2 (Degree)	Ten 3 (Degree)	Ten 4 (Degree)	Ten 5 (Degree)	Ten 6 (Degree)	LOAD1 (mm)	LOAD2 (mm)	LOAD3 (mm)	LOAD4 (mm)	LOAD5 (mm)	LOAD6 (mm)	LOAD7 (mm)
1	0	1185	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1241	1227	559	36	20.3	12.45	8.52	6.08	4.65	3.62	3.14	1039	888	0.31	0.39	1.04	1.89	4.71	7.75	1790	1642	1413	1126	1208	1030	546
3	956	946	515	39	21.18	13.95	9.62	6.84	5.39	4.32	3.77	989	899	0.29	0.33	1.1	1.79	2.33	3.65	1639	1172	1088	856	776	674	524
4	1164	1150	652	36	18.96	12.81	8.37	5.67	4.14	3.16	2.75	1028	881	0.31	0.36	1.2	2.05	3.76	4.28	1945	1298	1271	1212	1210	990	648
5	1110	1099	427	39	22.09	14.56	10.19	7.38	5.84	4.8	4.39	1038	892	0.33	0.33	1.08	1.68	2.04	1.24	1610	1243	1205	980	930	810	443
6	1261	1249	668	35	19.83	11.82	7.97	5.52	4.14	3.15	2.73	1022	888	0.34	0.4	1.15	2.14	3.77	5.56	1726	1623	1506	1358	1324	1178	801
7	1234	1222	707	33	18.6	11.07	7.41	5.1	3.6	2.63	2.23	1006	890	0.36	0.44	1.2	2.23	4.01	5.58	1717	1548	1486	1412	1389	1192	746
8	1255	1244	652	35	19.95	12.21	8	5.51	4.08	3.16	2.79	1003	876	0.32	0.41	0.96	1.61	2.27	4.34	1826	1782	1672	1345	1320	1106	773
9	1255	1244	631	35	20.26	12.55	8.26	5.6	4.11	3.19	2.8	993	872	0.32	0.38	0.9	1.59	2.44	4.27	1900	1764	1712	1418	1325	1090	724
10	1255	1244	698	35	19.88	12.3	8.18	5.56	4.07	3.13	2.73	1012	899	0.34	0.42	1.04	1.68	2.86	3.81	1912	1713	1644	1340	1292	1062	704
11	1255	1244	641	35	19.31	11.89	7.75	5.33	3.98	3.14	2.8	997	861	0.33	0.41	0.99	1.87	2.78	7.48	1973	1856	1723	1354	1346	1104	714
12	1256	1244	366	39	25.72	17.65	13.31	10.23	7.88	6.78	6.5	1023	899	0.36	0.36	0.85	1.28	1.56	2.33	1438	1308	1126	927	926	807	569
13	1256	1242	571	37	22.12	14.01	9.67	6.94	5.32	4.33	3.76	998	878	0.34	0.38	0.88	1.46	2.13	3.38	1613	1622	1496	1166	1152	988	619
14	1255	1244	523	37	21.43	13.45	9.38	6.77	5.28	4.09	3.77	1025	891	0.36	0.39	1.09	1.83	2.68	4.33	1844	1524	1388	1235	1123	981	655
15	1112	1097	421	39	22.02	14.53	10.24	7.43	5.87	4.86	4.43	1042	894	0.36	0.32	1.05	1.64	2.03	1.29	1613	1249	1207	973	938	817	444
16	1135	1120	568	36	19.24	11.71	7.79	5.25	4.08	3.28	2.73	1031	863	0.29	0.27	1.08	2.36	2.41	2.15	1778	1489	1418	1084	1065	998	556
17	1251	1236	679	35	19.85	12.08	8.24	5.77	4.13	3.16	2.86	1009	884	0.36	0.4	1.07	2.22	2.99	4.82	1977	1796	1535	1366	1341	1168	799
18	1251	1236	659	35	20.33	12.18	8.33	5.72	4.15	3.26	2.8	1003	878	0.34	0.37	1.06	2.72	2.77	5.63	1920	1806	1537	1419	1325	1153	781
19	1256	1243	525	37	21.6	13.44	9.4	6.71	5.19	4.16	3.73	1028	883	0.4	0.41	1.12	1.82	2.74	4.31	1836	1519	1384	1232	1126	974	654
20	1258	1244	474	37	22.98	14.44	10.13	7.25	5.62	4.48	3.93	1025	870	0.34	0.34	0.93	1.41	1.93	2.52	1665	1640	1384	1234	1142	1026	687
21	1141	1126	572	37	21.76	13.62	9.46	6.42	4.76	3.7	3.2	1039	895	0.32	0.42	1.18	1.84	2.75	4.83	1612	1444	1376	1190	1152	936	643
22	1253	1240	653	35	20.16	12.33	8.29	5.71	4.21	3.15	2.73	994	882	0.36	0.38	1.14	1.98	3.89	6.94	1905	1799	1536	1420	1322	1136	732
23	1253	1240	661	35	20.37	12.5	8.48	5.81	4.28	3.2	2.78	996	879	0.34	0.4	1.15	2.02	3.19	5.66	1925	1816	1641	1448	1337	1118	721
24	1252	1240	671	35	19.95	12.16	8.23	5.69	4.26	3.24	2.81	1006	879	0.34	0.4	1.05	2.13	2.95	4.81	1968	1792	1534	1369	1332	1161	797
25	1252	1240	656	35	20.19	12.32	8.36	5.73	4.26	3.23	2.81	997	873	0.34	0.36	1.09	2.06	2.68	5.77	1924	1812	1541	1427	1327	1156	784
26	1256	1243	596	36	20.88	12.97	8.75	6.18	4.65	3.66	3.24	1004	873	0.32	0.38	0.91	1.48	2.32	4.67	1875	1743	1575	1247	1241	1032	659
27	1252	1240	663	35	20.32	12.49	8.49	5.84	4.29	3.23	2.8	998	867	0.36	0.4	1.03	1.88	3.22	4.48	1864	1752	1611	1427	1315	1110	710
28	1256	1244	400	38	24.84	16.88	12.26	9.26	7.23	5.93	5.34	1025	878	0.35	0.37	0.82	1.29	1.97	2.74	1468	1362	1207	988	989	859	595
29	1258	1244	642	35	20.13	12.41	8.35	5.67	4.1	3.18	2.78	1009	889	0.32	0.41	0.97	1.58	2.36	3.31	1875	1741	1647	1436	1335	1078	688
30	1257	1244	633	35	20.42	12.6	8.45	5.72	4.15	3.22	2.83	985	872	0.32	0.41	0.91	1.56	2.06	3.07	1985	1808	1731	1452	1369	1094	724
31	1258	1244	628	35	19.38	12.24	8.16	5.48	4.08	3.14	2.76	1005	887	0.32	0.35	1	1.84	3.05	3.74	2008	1851	1601	1389	1283	1158	739
32	1257	1244	622	35	19.86	12.7	8.44	5.64	4.21	3.21	2.8	987	868	0.3	0.38	1.73	3.74	7.89		1983	1859	1612	1411	1298	1172	750
33	1263	1249	542	37	21.73	13.73	9.54	6.72	5.22	4.34	3.76	1006	892	0.36	0.33	0.91	1.53	2.36	3.98	1791	1633	1470	1166	1163	998	581
34	1247	1234	633	35	20.61	12.82	8.43	5.76	4.24	3.23	2.88	998	886	0.3	0.36	0.87	1.54	1.91	2.85	1870	1880	1691	1455	1389	1107	719
35	1242	1230	658	35	20.18	12.43	8.44	5.82	4.18	3.25	2.89	994	879	0.38	0.42	1.12	1.84	3.28	4.53	1877	1760	1622	1438	1308	1122	722
36	1254	1236	660	35	20.36	12.45	8.41	5.76	4.11	3.08	2.63	983	869	0.35	0.42	1.17	1.93	3.73	6.62	1878	1792	1644	1529	1346	1138	752
37	1260	1246	646	35	20.03	12.48	8.44	5.73	4.3	3.26	2.75	1006	879	0.33	0.4	0.89	1.57	2.34	3.38	1888	1746	1649	1439	1346	1075	699
38	1259	1246	642	35	20.26	12.6	8.43	5.68	4.22	3.2	2.71	988	880	0.3	0.4	0.92	1.58	2.03	3	1848	1800	1728	1457	1381	1095	728
39	1256	1242	577	38	22.09	14.06	9.65	6.89	5.27	4.21	3.8	996	882	0.33	0.36	0.9	1.48	2.17	3.36	1877	1693	1507	1162	1154	996	617
40	1256	1242	407	39	25.25	17.01	12.46	9.07	7.27	5.95	5.31	1025	889	0.37	0.36	0.97	1.54	1.75	2.14	1517	1425	1130	1054	885	808	549
41	1256	1242	413	39	23.13	14.91	10.89	7.81	6	4.92	4.39	1049	893	0.41	0.39	1.16	2.04	1.83	2.32	1612	1436	1208	1066	953	861	545
42	1257	1243	525	39	21.6	13.44	9.4	6.71	5.19	4.16	3.73	1028	885	0.4	0.41	1.12	1.82	2.74	4.31	1753	1550	1396	1236	1126	974	654
43	1253	1241	653	37	20.16	12.33	8.28	5.71	4.21	3.15	2.73	994	883	0.36	0.38	1.14	1.98	3.89	6.94	2026	1825	1544	1423	1322	1136	732
44	1252	1239	671	37	19.95	12.16	8.23	5.69	4.26	3.24	2.81	1006	881	0.34	0.4	1.05	2.13	2.95	4.81	2091	1815	1545	1374	1332	1161	797
45	1234	1224	707	35	18.8	11.07	7.41	5.1	3.6	2.63	2.23	1006	892	0.36	0.44	1.2	2.23	4.01	5.58	1841	1581	1497	1415	1389	1192	746
46	1237	1228	715	35	18.53	10.96	7.28	5.02	3.58	2.63	2.25	990	878	0.35	0.45	1.24	2.3	3.55	5.88	2075	1908	1790	1601	1467	1208	776
47	1250	1236	679	33	18.76	11.57	7.74	5	3.56	2.65	2.25	1003	873	0.32	0.38	1.01	2.28	3.56	6.22	1885	1725	1679	1404	1400	1280	859
48	1130	1116	570	36	19.16	11.74	7.86	5.26	4.06	3.23	2.78	1040	870	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	1782	1482	1412	1082	1078	980	652
49	1153	1140	616	37	19.15	12.1	8.02	5.56	4.05	3.11	2.7	1015	898	0.3	0.35	1.32	1.97	3.2	4.48	1986	1459	1423	1227	1210	986	622

50	1255	1242	407	36	25.25	17.01	12.46	9.07	7.27	5.95	5.31	1023	889	0.37	0.36	0.97	1.54	1.75	2.14	1455	1407	1124	1053	885	808	549
51	1258	1244	548	37	21.96	13.99	9.6	6.88	5.27	4.2	3.79	1013	885	0.34	0.38	0.92	1.56	2.4	3.97	1780	1635	1474	1168	1166	996	588
52	1238	1226	715	33	18.53	10.96	7.28	5.02	3.58	2.63	2.25	990	876	0.35	0.45	1.24	2.3	3.55	5.88	1957	1874	1780	1596	1467	1208	778
53	1263	1249	663	35	19.77	11.85	7.99	5.47	4.16	3.18	2.77	1025	892	0.38	0.38	1.13	2.06	3.77	5.62	1733	1625	1508	1362	1318	1185	804
54	1232	1218	712	33	18.34	11.22	7.33	5.21	3.58	2.72	2.32	1014	893	0.33	0.44	1.32	2.24	4.16	5.62	1741	1552	1481	1409	1385	1194	749
55	1245	1242	655	35	20.29	12.4	8.25	5.7	5.16	3.28	2.72	996	887	0.34	0.33	1.16	1.87	3.82	6.97	1896	1788	1533	1427	1326	1132	728
56	1105	1095	635	33	17.74	10.76	7.22	4.81	3.48	2.82	2.26	1033	857	0.22	0.34	1.17	2.26	2.33	1.46	1701	1488	1419	1283	1246	1055	778
57	1257	1244	622	35	20.22	12.3	8.31	5.61	4.11	3.26	2.78	999	889	0.32	0.36	1.06	1.77	2.73	3.83	1848	1730	1674	1383	1366	1122	777
58	1257	1244	625	35	20.23	12.41	8.2	5.53	4.12	3.21	2.78	1009	892	0.33	0.4	0.96	1.78	2.73	3.36	1890	1688	1605	1354	1299	1071	798
59	1257	1244	648	35	19.83	12.21	8.21	5.68	4.05	3.18	2.76	1000	877	0.35	0.43	0.98	1.62	2.33	4.37	1936	1788	1675	1356	1331	1107	780
60	1235	1222	580	38	20.98	12.92	8.93	6.32	4.81	3.72	3.22	1018	880	0.33	0.38	1.08	1.89	2.59	4.2	1838	1714	1440	1270	1210	1126	783
61	1257	1243	474	39	22.98	14.44	10.13	7.25	5.62	4.48	3.83	1023	872	0.34	0.34	0.93	1.41	1.93	2.52	1792	1687	1399	1241	1142	1028	687
62	1253	1239	681	36	20.37	12.5	8.48	5.81	4.28	3.2	2.78	986	878	0.34	0.4	1.15	2.02	3.19	5.86	1984	1833	1646	1450	1337	1118	721
63	1255	1244	641	36	19.31	11.69	7.75	5.33	3.98	3.14	2.8	997	863	0.33	0.41	0.99	1.87	2.78	7.48	2041	1876	1729	1356	1346	1104	714
64	1241	1227	559	37	20.3	12.45	8.52	6.08	4.65	3.62	3.14	1039	890	0.31	0.39	1.04	1.89	4.71	7.75	1853	1656	1418	1129	1208	1030	548
65	1235	1221	707	36	18.6	11.07	7.41	5.1	3.6	2.63	2.23	1008	892	0.36	0.44	1.2	2.23	4.01	5.58	1902	1583	1499	1418	1392	1182	746
66	1255	1242	577	37	22.09	14.06	9.65	6.89	5.27	4.21	3.8	998	884	0.33	0.36	0.9	1.48	2.17	3.26	1818	1680	1500	1160	1154	996	617
67	1235	1222	712	33	18.56	11.12	7.48	5.16	3.64	2.66	2.26	997	883	0.34	0.42	1.2	2.25	3.56	6.22	1923	1805	1740	1548	1430	1187	704
68	1104	1092	631	33	17.69	10.73	7.09	4.51	3.35	2.58	2.18	1034	855	0.28	0.36	1.15	2.19	2.28	1.41	1705	1483	1426	1286	1243	1052	770
69	1256	1242	413	38	23.13	14.91	10.89	7.61	6	4.92	4.39	1047	893	0.41	0.39	1.18	2.04	1.63	2.32	1547	1421	1202	1084	953	861	545
70	1255	1244	630	35	20.17	12.49	8.2	5.52	4.08	3.16	2.78	1002	880	0.33	0.39	1.01	1.78	2.69	3.75	1853	1720	1683	1376	1357	1114	768
71	1255	1244	630	35	20.11	12.51	8.23	5.56	4.1	3.18	2.78	1012	888	0.33	0.4	0.94	1.75	2.59	3.32	1894	1681	1620	1353	1280	1066	730
72	1255	1244	656	35	19.93	12.23	8.09	5.49	4.07	3.18	2.78	1013	886	0.31	0.38	0.96	1.59	2.65	4.3	1862	1728	1658	1320	1318	1095	780
73	1255	1244	644	35	20.35	12.6	8.35	5.59	4.09	3.18	2.81	985	871	0.33	0.42	0.98	1.58	2.18	3.68	1929	1798	1697	1385	1339	1099	753
74	1250	1236	676	32	18.74	11.5	7.67	4.96	3.54	2.64	2.23	991	862	0.31	0.37	1.05	2.59	3.65	1.14	1805	1764	1700	1455	1443	1308	848
75	1257	1243	477	37	22.87	14.56	10.28	7.33	5.29	4.24	3.99	1022	875	0.33	0.33	0.96	1.43	1.84	2.58	1672	1644	1389	1234	1146	1028	692
76	1142	1127	573	37	21.88	13.66	9.38	6.53	4.58	3.77	3.24	1036	890	0.3	0.41	1.12	1.96	2.73	4.99	1607	1448	1377	1198	1155	939	647
77	1258	1244	370	39	25.85	17.8	13.21	10.13	7.94	6.64	6	1033	895	0.35	0.35	0.83	1.28	1.58	2.34	1432	1312	1122	825	822	806	565
78	1234	1222	580	36	20.98	12.92	8.93	6.32	4.81	3.72	3.22	1018	878	0.33	0.38	1.08	1.89	2.59	4.2	1823	1688	1424	1265	1210	1126	783
79	1251	1236	679	32	18.76	11.57	7.74	5	3.56	2.65	2.25	1003	871	0.32	0.38	1.01	2.26	3.56	6.22	1824	1709	1675	1402	1400	1280	859
80	1259	1244	532	37	20.65	13.56	9.1	6.6	5.04	4.18	3.78	1043	895	0.34	0.38	0.94	1.89	2.4	3.23	1835	1562	1238	1052	1031	752	504
81	957	948	511	39	21.01	13.97	9.59	6.87	5.42	4.26	3.71	992	901	0.33	0.33	1.18	1.75	2.37	3.62	1645	1185	1083	854	772	672	528
82	1167	1146	646	36	18.76	12.79	8.43	5.65	4.1	3.11	2.78	1023	896	0.33	0.37	1.32	2.09	3.69	4.23	1960	1305	1276	1218	1216	995	650
83	1131	1117	570	38	19.16	11.74	7.86	5.28	4.06	3.23	2.78	1041	872	0.31	0.31	1.1	2.39	2.43	2.17	1905	1502	1428	1085	1078	990	652
84	1156	1137	618	37	19.22	12.07	8.05	5.54	4.09	3.06	2.76	1029	897	0.31	0.38	1.29	1.99	3.18	4.45	1980	1463	1420	1236	1206	989	628
85	1256	1242	409	38	25.32	17.08	12.47	9.03	7.28	5.96	5.37	1023	894	0.37	0.34	0.96	1.54	1.77	2.18	1448	1413	1129	1058	886	809	552
86	1252	1240	652	35	21.01	12.22	8.26	5.67	4.21	3.19	2.76	1005	877	0.34	0.4	1.17	1.89	3.82	6.31	1897	1776	1540	1354	1296	1184	773
87	1254	1240	686	35	20.44	12.57	8.54	5.84	4.29	3.25	2.82	985	879	0.35	0.4	1.01	1.76	2.43	5.11	1907	1786	1659	1488	1383	1154	745
88	1254	1240	686	35	20.29	12.38	8.41	5.79	4.23	3.18	2.74	998	885	0.35	0.41	1.15	1.87	3.62	6.55	1883	1785	1632	1525	1355	1140	740
89	1255	1244	688	36	19.88	12.3	8.18	5.56	4.07	3.13	2.73	1012	900	0.34	0.42	1.04	1.86	2.86	3.81	1978	1729	1650	1342	1292	1062	704
90	1234	1222	580	37	20.98	12.92	8.93	6.32	4.81	3.72	3.22	1016	880	0.33	0.38	1.08	1.89	2.59	4.2	1882	1702	1428	1286	1210	1126	783
91	1263	1254	415	38	24.72	16.71	12.14	9.23	7.22	5.92	5.18	1015	875	0.36	0.38	0.85	1.39	1.76	2.83	1482	1354	1203	994	992	863	583
92	1254	1239	680	35	20.32	12.63	8.71	5.63	4.18	3.11	2.82	988	869	0.35	0.4	1.03	1.78	2.46	5.2	1919	1789	1648	1483	1385	1159	736
93	1235	1225	559	36	20.52	12.54	8.63	6.13	4.71	3.69	3.23	1042	890	0.32	0.41	1.08	1.92	4.73	7.72	1775	1642	1405	1125	1207	1035	548
94	1236	1222	580	36	20.36	12.34	8.38	5.93	4.52	3.6	3.2	1022	884	0.33	0.37	1.1	2	3.09	5.57	1885	1729	1418	1228	1189	1020	682
95	1257	1244	638	35	20.52	12.76	8.51	5.81	4.23	3.25	2.85	994	878	0.31	0.38	0.85	1.56	1.99	2.88	1876	1754	1685	1440	1367	1104	714
96	1252	1239	591	38	20.62	12.82	8.83	6.2	4.73	3.74	3.21	1008	878	0.36	0.41	0.89	1.29	2.36	4.71	1920	1751	1581	1239	1235	1033	663
97	1231	1222	585	36	20.83	12.81	8.82	6.33	4.78	3.73	3.26	1017	879	0.37	0.38	1.06	1.86	2.56	4.32	1831	1680	1424	1288	1216	1128	788
98	1230	1217	588	36	20.46	12.33	8.21	5.72	4.53	3.61	3.23	1018	873	0.41	0.39	1.12	2.34	3.05	5.68	1880	1730	1438	1229	1196	1025	687
99	1252	1233	685	32	18.73	11.47	7.66	5.3	3.43	3.65	2.14	1006	880	0.33	0.43	1.08	2.33	3.86	6.32	1826	1705	1684	1409	1396	1287	652
100	1258	1244	633	37	20.42	12.6	8.45	5.72	4.15	3.22	2.83	985	870	0.32	0.41	0.91	1.56	2.08	3.07	2090	1839	1743	1457	1369	1094	724
101																										

ภาคผนวก ง
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการรีด

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล

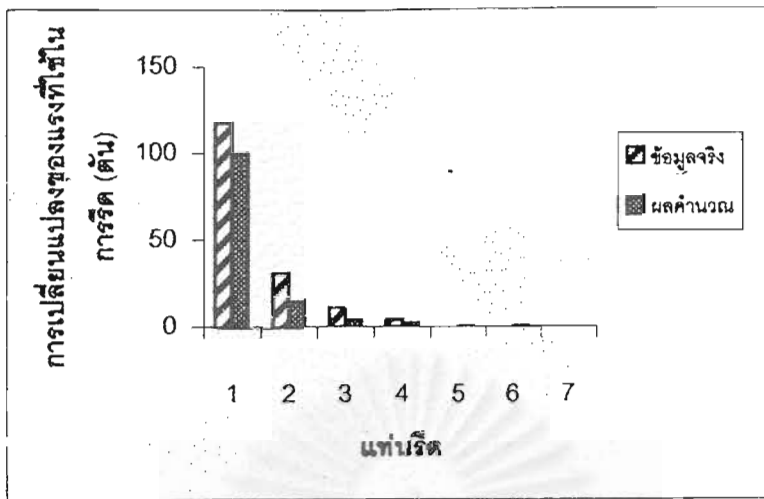
		ข้อมูลชุดที่ 20								ข้อมูลชุดที่ 61							
stand		1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)		37	22.98	14.44	10.13	7.25	5.62	4.48	3.93	39	22.98	14.44	10.13	7.25	5.62	4.48	3.93
Tension (kg/mm ²)		0	0.34	0.34	0.93	1.41	1.93	2.52	0	0	0.34	0.34	0.93	1.41	1.93	2.52	0
Force (tons)		1665	1640	1394	1234	1142	1026	687	-	1792	1667	1399	1241	1142	1026	687	-



รูปที่ ง.1 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล

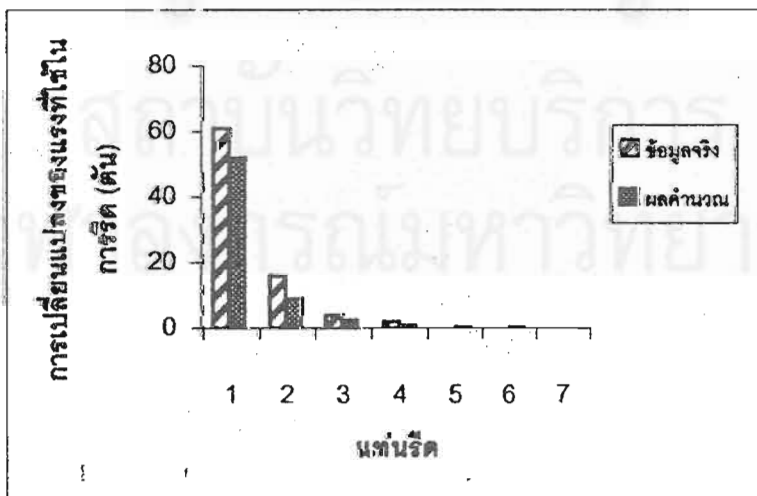
		ข้อมูลชุดที่ 19								ข้อมูลชุดที่ 42							
stand		1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)		37	21.6	13.44	9.4	6.71	5.19	4.16	3.73	39	21.6	13.44	9.4	6.71	5.19	4.16	3.73
Tension (kg/mm ²)		0	0.4	0.41	1.12	1.82	2.74	4.31	0	0	0.4	0.41	1.12	1.82	2.74	4.31	0
Force (tons)		1635	1519	1384	1232	1126	974	654	-	1753	1550	1395	1236	1126	974	654	-



รูปที่ ง.2 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง

ตารางที่ ง.3 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล

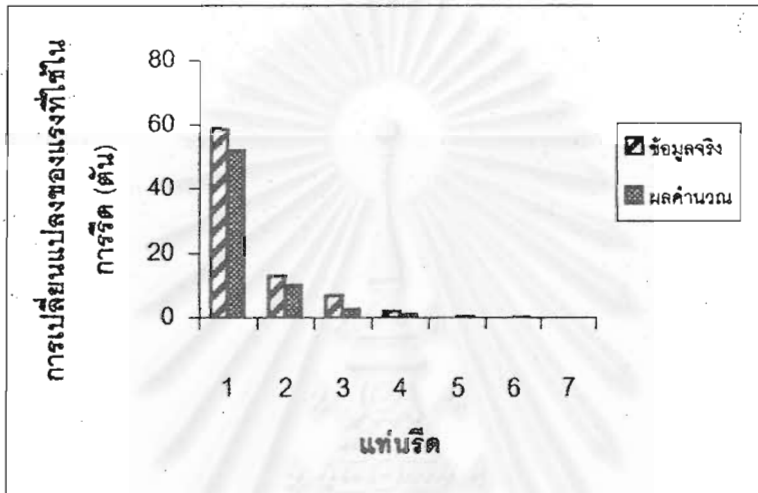
	ข้อมูลชุดที่ 79								ข้อมูลชุดที่ 47							
stand	1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)	32	18.76	11.57	7.74	5	3.56	2.65	2.25	33	18.76	11.57	7.74	5	3.56	2.65	2.25
Tension (kg/mm ²)	0	0.32	0.38	1.01	2.28	3.56	6.22	0	0	0.32	0.38	1.01	2.28	3.56	6.22	0
Force (tons)	1824	1709	1675	1402	1400	1290	859	-	1885	1725	1679	1404	1400	1290	859	-



รูปที่ ง.3 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง

ตารางที่ ง.4 แสดงค่าของแรงในการรีดของ 2 ชุดข้อมูล

		ข้อมูลชุดที่ 66							ข้อมูลชุดที่ 5								
stand		1	2	3	4	5	6	7	-	1	2	3	4	5	6	7	-
Thickness (mm)		37	22.09	14.06	9.65	6.89	5.27	4.21	3.8	38	22.09	14.06	9.65	6.89	5.27	4.21	3.8
Tension (kg/mm ²)		0	0.33	0.36	0.9	1.48	2.17	3.36	0	0	0.33	0.36	0.9	1.48	2.17	3.36	0
Force (tons)		1818	1680	1500	1160	1154	996	617	-	1877	1693	1507	1162	1154	996	617	-



รูปที่ ง.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าแรงที่ใช้ในการรีด (Rolling force) ระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง

ประวัติผู้เขียน

นาย อีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล

เกิดเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม พุทธศักราช 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

การศึกษา

- จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปัจจุบันเป็นนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย