

แบบจำลองวิเคราะห์ความหนาของชั้นงานรีดโดยทฤษฎีการรีดเย็นต่อเนื่อง
แบบพลวัตสำหรับเหล็กแผ่น



นาย นุโรจน์ พานิช

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-617-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THICKNESS ANALYSIS SIMULATION BY DYNAMIC THEORY
OF CONTINUOUS COLD ROLLING FOR STEEL SHEET



Mr. Nurot Panich

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 974-346-617-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองวิเคราะห์ความหนาของชั้นงานรีดโดยทฤษฎีการรีดเย็นต่อเนื่อง
แบบพลวัตสำหรับเหล็กแผ่น

โดย นาย นุโรจน์ พานิช

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรของปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไสว ต่านชัยวิจิตร)

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

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อธิพัล เตียวณิชย์)

นุโรจน์ พานิช : แบบจำลองวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานรีดโดยทฤษฎีการรีดเยื้องแบบพลวัตสำหรับเหล็กแผ่น (Thickness Analysis Simulation by Dynamic Theory of Continuous Cold Rolling for Steel Sheet) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ; 95 หน้า ISBN974-346-617-7

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการรีดเยื้องชนิด 5 แท่นรีดในสภาวะพลศาสตร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติต่าง ๆ ของการรีดเยื้องแบบต่อเนื่องในสภาวะพลศาสตร์ซึ่งเป็นสภาวะการรีดจริง โดยการวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ในการรีดที่มีผลต่อความหนาออกคือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของวัตถุดิบ, การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกรีด และการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด

ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาออกคือการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัตถุดิบ, การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 1 กับแท่นรีดที่ 5 และการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีดของแท่นรีดที่ 1 ผลที่ได้นำไปออกแบบระบบการควบคุมความหนา และระบบการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีดในกระบวนการรีดจริงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

##4070550421 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : CONTINUOUS ROLLING THEORY / MATHEMATICAL SIMULATION / DYNAMIC THEORY

NUROT PANICH : THICKNESS ANALYSIS SIMULATION BY DYNAMIC THEORY OF

CONTINUOUS COLD ROLLING FOR STEEL SHEET. THESIS ADVISOR :

ASSIST.PROF.PRASONK SRICHAROENCHAI, (D.ENG.) 95 p.p. ISBN 974-346-617-7

This simulation model is defined as 5 stands continuous cold rolling mill in dynamic state model simulated characteristics of cold tandem mill on complicated dynamic behavior. The variations of interstand tensions, peripheral roll speeds, roll gap setting and thickness of raw material were analyzed.

The results of this simulation showed that main factor which influenced final thickness were change in thickness of raw material, peripheral roll speed of first and final stands and roll gap setting of first stand. This model will effectively support design of thickness control system and system of controlling tensions between stands in actual works.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

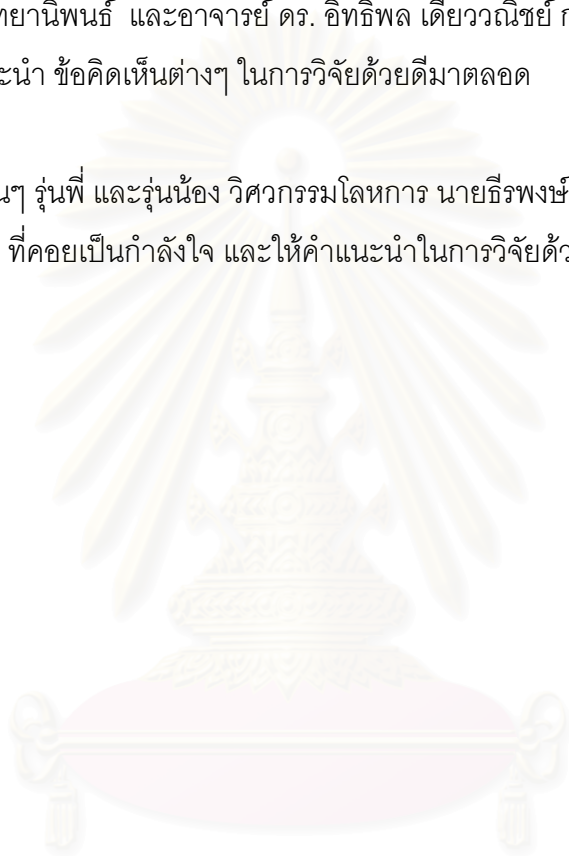
Field of study.... Metallurgical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year....2000.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ Dr. Fumio Fujita จาก NKK Corporation ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้ความรู้ความเข้าใจสำหรับการวิจัยนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. อธิพิล เตี้ยววงนิษฐ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง วิศวกรรมโลหการ นายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล และนาย เอกพจน์ ปัทมสัตยาสนธิ ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้คำแนะนำในการวิจัยด้วยดีมาตลอด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ในการวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีพลศาสตร์ของการรีดเย็นแบบต่อเนื่อง.....	3
2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นงานรีด.....	4
2.2 สมการอัตราเร็วของชั้นงานรีด.....	4
2.3 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	5
2.4 สมการเพิ่มเติม.....	7
3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานรีดจากทฤษฎีพลศาสตร์.....	16
3.1 ป้อนข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ.....	17
3.2 คำนวณข้อมูลเบื้องต้น.....	18
3.3 เลือกสมการหลักในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	19
3.4 Derivative ขององค์ประกอบการรีด.....	22
3.5 แปลงสมการหลักลงในเมตริกซ์.....	24
3.6 Continuousness.....	34
3.7 การตั้งเงื่อนไขขอบเขต.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 คำนวณค่า Deviation ของตัวแปรต่างๆในเวลา dt.....	35
4 ผลการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์ผลการคำนวณกับข้อมูลการรีดจริง.....	36
4.1 ตารางแสดงผลการคำนวณเบื้องต้น.....	36
4.2 เปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง.....	37
4.3 เปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง.....	43
4.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ความหนาโดยพิจารณาการรบกวนความหนาของวัตถุดิบ.....	48
4.5 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ความหนาโดยพิจารณาการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีด.....	50
4.6 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ความหนาโดยพิจารณาการรบกวนความเร็วของลูกรีด.....	55
5 การนำผลการคำนวณไปออกแบบระบบการควบคุมความหนาและระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	63
5.1 ระบบการควบคุมความหนา.....	63
5.2 ระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	67
6 สรุปผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง.....	69
7 รายการอ้างอิง.....	70
8 ภาคผนวก.....	71
• โปรแกรมคำนวณสูตรต่างๆสำหรับ Rolling Theory.....	72
• โปรแกรมคำนวณค่า Derivative.....	74
• โปรแกรมคำนวณค่า Rolling force โดย Hill's Equation.....	76
• โปรแกรมคำนวณค่า Rolling force โดย Karman's Equation.....	78
• โปรแกรมคำนวณ Gauss's Elimination.....	81

- โปรแกรมคำนวณ Dynamic Simulation.....82
- โปรแกรมคำนวณ Thickness Control.....86
- โปรแกรมคำนวณ Tension Control (PI Control).....89
- Data Table (NKK Corporation).....92

9 ประวัติผู้ทำวิทยานิพนธ์.....95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาวะการรีดจากสภาวะคงที่หนึ่งสู่สภาวะคงที่ถัดไป.....	3
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของลูกรีดและวัสดุ.....	4
2.3 แสดงการกระจายความหนาของวัสดุระหว่างแท่นรีด.....	7
2.4 แสดง Infinitesimal flat plate element	9
2.5 แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำบน element เล็ก ๆ ระหว่างการรีด.....	9
2.6 แสดงปรากฏการณ์ Roll deformation	14
2.7 แสดง Contact length.....	15
3.1 แสดง Flow chart ของขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	16
3.2 แสดง Flow chart ในการคำนวณ Rolling force ด้วยสมการของ Hill.....	18
3.3 แสดง Flow chart ในการคำนวณ Rolling force ด้วยสมการของ Karman	18
3.4 แสดง Flow chart ในการคำนวณ Roll deformation.....	19
4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1 กับผลการคำนวณ.....	37
4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 2 กับผลการคำนวณ.....	38
4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 3 กับผลการคำนวณ.....	39
4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 4 กับผลการคำนวณ.....	40
4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 5 กับผลการคำนวณ.....	41
4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริง กับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 1	44
4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริง กับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 2	45

4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการวัดจริง กับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 3	47
4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวน 5 %ของความหนาของวัตุดิบ.....	48
4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวน 5%ของความหนาของวัตุดิบ.....	49
4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 5% ของ S_1	50
4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 5% ของ S_1	51
4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 5% ของ S_5	53
4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 5% ของ S_5	53
4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 1% ของ Vr_1	55
4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 1% ของ Vr_1	56
4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 โดยรบกวน 1% ของ Vr_3	58
4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 โดยรบกวน 1% ของ Vr_3	58
4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 1% ของ Vr_5	60
4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 1% ของ Vr_5	61
5.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ Gain factor ที่มีผลต่อ Thickness deviation.....	65
5.2 แสดง Block diagram ของระบบ PI Control.....	66
5.3 แสดงผลการคำนวณการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด.....	67
5.4 แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดจากข้อมูลการวัดจริง กับการคำนวณ.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ.....	17
3.2 แสดงการตั้งเงื่อนไขของการคำนวณ.....	34
4.1 แสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณเบื้องต้น.....	36
4.2 แสดงผลการคำนวณเบื้องต้น	36
4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force/Width ระหว่างค่าจากข้อมูลการรีดจริง กับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Hill และ Karman.....	42
4.4 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรของข้อมูลการรีดจริง 2 ชุดข้อมูล.....	43
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคำนวณค่าผลต่างของ Rolling force.....	47
4.6 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 5% ของความหนาของวัตถุดิบ.....	49
4.7 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 5% ระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 1.....	52
4.8 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 5% ระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 5.....	54
4.9 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 1% ความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1.....	57
4.10 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 1% ความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3.....	59
4.11 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 1% ความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5.....	62
5.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ Gain factor ที่มีผลต่อ Thickness deviation.....	65

สัญลักษณ์ที่ใช้

H_i	=	ความหนาของวัสดุที่ทางเข้าในแท่นรีดที่ i (mm)
H_1	=	ความหนาของวัตถุดิบ (mm)
h	=	ความหนาของวัสดุที่ทางออก (mm)
P	=	Rolling force (kg)
E_o	=	Young 's Modulus (kg/mm ²)
R	=	Roll radius (mm)
R'	=	Roll flattening (mm)
f	=	Forward slip
b	=	Backward slip
μ	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
V_F	=	ความเร็วของลูกรีด (mm/s)
k	=	Deformation resistance (kg/mm ²)
k_f	=	Deformation resistance ที่ทางออกจากแท่นรีด (kg/mm ²)
k_b	=	Deformation resistance ที่ทางเข้าแท่นรีด (kg/mm ²)
V_{in}	=	ความเร็วของชิ้นงานขาเข้าแท่นรีด (mm/s)
V_{out}	=	ความเร็วของชิ้นงานขาออกจากแท่นรีด (mm/s)
S	=	ระยะห่างระหว่างลูกรีด (Roll gap) (mm)
M	=	ค่ามอดูลัสความแข็งเกร็งของแท่นรีด (kg/mm)
q_f	=	Front tension (kg/mm ²)
q_b	=	Back tension (kg/mm ²)
t	=	เวลา (sec)
w	=	Material width (mm)
ϕ_n	=	Neutral angle (radian)
ϕ_l	=	Bite angle (radian)
ε	=	Strain
r	=	Reduction ratio

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมของสภาวะพลวัต (Dynamic state) สำหรับการรีดเหล็กแผ่นแบบรีดเย็นต่อเนื่อง นั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นและมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับระบบการควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) เพื่อควบคุมความหนา (Thickness) ของเหล็กแผ่นให้ได้ตามที่ต้องการส่งผลให้มีกำไรมากขึ้นในอุตสาหกรรมการรีดเหล็กแผ่นแบบรีดเย็นต่อเนื่องและในปัจจุบันนี้กระบวนการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Simulation) เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการทำนายผลลัพธ์ต่าง ๆ เมื่อผลลัพธ์ (Output) ที่ต้องการหา และค่าที่ใส่ (Input) เป็นฟังก์ชันของกันและกัน

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติต่าง ๆ ของการรีดเย็นแบบต่อเนื่องในสภาวะพลวัต (เป็นสภาวะในการรีดจริง) ซึ่งสภาวะพลวัตนั้นเป็นสภาวะที่ซับซ้อนและยากในการพิจารณา เพราะได้ขยายขอบเขตการศึกษาจากสภาวะสถิตยศาสตร์หรือสภาวะคงที่ (Steady state) ซึ่งในลักษณะความแตกต่างของการศึกษาสภาวะพลวัตกับสภาวะสถิตยศาสตร์นั้นคือ การศึกษาสภาวะพลวัตจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในการรีดต่าง ๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (Time increment) แต่การศึกษาสภาวะสถิตยศาสตร์นั้นจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในการรีดโดยไม่นับเวลามาเกี่ยวข้องในการคำนวณ

ในการวิจัยนี้ได้ปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการรีดเย็นแบบต่อเนื่องชนิด 5 แท่นรีดโดยอาศัยข้อมูลจากการรีดจริงและใช้ทฤษฎีพลวัต (Dynamic Theory) ในการคำนวณ โดยการวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ในการรีดคือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของวัตถุดิบ (Raw material), การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกรีด (Peripheral roll speed) และการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีด (Roll gap) เพื่อที่จะทำนายผลและหาแนวโน้ม (Tendency) ของการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อความหนาของวัสดุที่แท่นรีดสุดท้าย (Final thickness) และนำผลที่ได้ไปออกแบบระบบการควบคุมความหนา (Gage Control System) และระบบการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด (A System of Controlling Tensions between Stands) ซึ่งในปัจจุบันสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยใช้ความสามารถและความก้าวหน้าของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้ลดเวลาในการคำนวณให้น้อยลงและมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงและเส้นทางการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชิ้นงานรีดในแต่ละแท่นรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดในกระบวนการรีด

1.2.2 เขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงและเส้นทางการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของลูกรีดในแต่ละแท่นรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดในกระบวนการรีด

1.2.3 เขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงและเส้นทางการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีดในแต่ละแท่นรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดในกระบวนการรีด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 หาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดหลังจากออกจากกระบวนการรีดเมื่อองค์ประกอบของงานรีดได้แก่ ความหนาของชิ้นงานที่แต่ละตำแหน่งของแท่นรีด, ความเร็วของชิ้นงานรีด และระยะห่างระหว่างลูกรีด เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลวัต (Dynamic Continuous Rolling Theory)

1.3.2 วิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความหนาสุดท้ายของกระบวนการรีดเย็นต่อเนื่องในสภาวะพลวัต

1.4 ประโยชน์ในการวิจัย

1.4.1 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ชิ้นงานในการรีดเพื่อลดขั้นตอนการทดลองรีดจริงซึ่งลดการสิ้นเปลืองงบประมาณและเวลาได้

1.4.2 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์ความหนาของงานรีดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการรีดต่างๆ

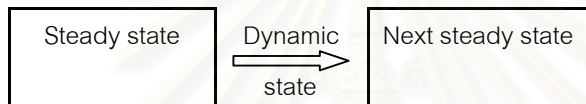
1.4.3 เพื่อเป็นงานวิจัยเบื้องต้นสำหรับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรีดเย็นแบบต่อเนื่องเพื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบระบบการควบคุมความหนาและระบบการควบคุมแรงดึงระหว่างแท่นรีด

บทที่ 2

ทฤษฎีพลวัตของการรีดเย็นแบบต่อเนื่อง

(Dynamic Theory of Continuous Cold Rolling Mill)

ทฤษฎีพลวัตของการรีดเย็นแบบต่อเนื่องหรือเรียกว่าวิธีการศึกษาคุณสมบัติทางพลวัต (Dynamic characteristic analysis method) เป็นวิธีที่ศึกษาคุณสมบัติต่างๆระหว่างคาบ(Period) การเปลี่ยนแปลงหลังจากสภาวะคงที่ (Steady state) โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มาจากการรบกวนตัวแปรในการรีดหรือเกิดในขณะการทำงาน จนกระทั่งระบบกลับเข้าสู่สภาวะคงที่ถัดไป ซึ่งคาบการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่าสภาวะพลวัต (Dynamic state) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาวะการรีดจากสภาวะคงที่หนึ่งสู่สภาวะคงที่ถัดไป

สาเหตุของการรบกวนนี้มาจาก

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

R.A. Philips ¹ ได้เป็นผู้ริเริ่มในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาคุณสมบัติต่างๆในสภาวะพลวัตโดยได้สนใจที่ neutral point ในส่วนโค้งสัมผัส (Contact length) ระหว่างลูกรีดและวัสดุในสภาวะที่ถูกรบกวนระหว่างการรีด (Dynamic state) โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First-order equations) ในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนตำแหน่งของจุด neutral point เมื่อความหนาเข้าแท่นรีดของแผ่นเหล็กไม่คงที่

M.R. Sekulic and J.M. Alexander ² ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาคุณสมบัติทางพลวัตของการรีดเย็นต่อเนื่อง 4 แท่นรีดโดยใช้ Analog computer และนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ระบบควบคุมความหนา (Gage control)

T. Araimura, M. Kamata and M. Saito ³ ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาคุณสมบัติทางพลวัตของการรีดเย็นต่อเนื่อง 5 แท่นรีดโดยใช้ Digital computer และศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความหนาสุดท้าย (Final thickness) เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ระบบควบคุมความหนาอัตโนมัติ (Automatic Gage Control)

โดยทฤษฎีพลวัตของการรีดเย็นแบบต่อเนื่อง⁴มีสมการหลักอยู่ 3 สมการคือ

2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

2.2 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Equation of strip velocity)

2.3 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of tension between stands)

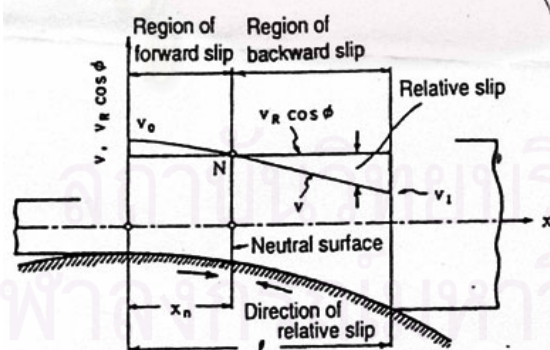
2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

ความหนาขาออกของวัสดุสามารถหาได้จากผลบวกของระยะห่างระหว่างลูกรีดในสภาวะที่ไม่มีภาระ(Load) กับ Rolling force ซึ่งหารด้วย Mill rigidity ดังสมการที่ 1

$$h_i = S_i + \frac{P_i}{M_i} \quad (1)$$

โดย P = Rolling force (kg) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hill

2.2 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Equation of strip velocity)



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของลูกรีดและวัสดุ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.2 จะได้ว่าความเร็วของวัสดุที่ทางเข้าจะช้ากว่าความเร็วของลูกรีดและความเร็วของวัสดุที่ทางออกจากแท่นรีดมีความเร็วมากกว่าความเร็วของลูกรีด ซึ่งสามารถเขียนเป็นความ

สัมพัทธ์ดังสมการที่(2)และ(3)ทั้งนี้ไม่พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความเร็วในมอเตอร์ (Drooping of motor) เนื่องจากมีค่าน้อยมาก

$$b = \frac{V_R - V_{in}}{V_R} \quad (2)$$

$$f = \frac{V_{out} - V_R}{V_R} \quad (3)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$V_{out} = (1 + f) \cdot V_R \quad (4)$$

$$V_{in} = (1 - b) \cdot V_R \quad (5)$$

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Forward slip และ Backward slip ได้โดยนำสมการที่(4)หารสมการที่(5)ดังนี้

$$\frac{(1 - b) \cdot V_R}{(1 + f) \cdot V_R} = \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

จากสมการ Constancy of mass

$$V_{in} \cdot H_{in} = V_{out} \cdot h_{out} \quad (6)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{(1 - b) \cdot V_R}{(1 + f) \cdot V_R} = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{h_{out}}{H_{in}} = 1 - r$$

$$(1 - b) = (1 - r) \cdot (1 + f)$$

$$V_{in} \cdot H_{in} = V_{out} \cdot h_{out} \quad (7)$$

2.3 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of tension between stands)

วิธีหาสมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดนั้นมี 2 วิธีได้แก่

2.3.1 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดอย่างง่าย (The most simplified model)

การเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุในทิศทางการรีด (ΔL) หาได้โดยการอินทิเกรตผลต่างของความเร็วระหว่างแท่นรีดในด้านทางออกของแท่นรีดและด้านทางเข้าของแท่นรีดแทนต่อไปดังนี้

$$\Delta L = \int (V_{in,i+1} - V_{out,i}) dt. \quad (8)$$

ซึ่งสามารถหาค่าของ Front tension ได้จากสมการของความเค้นและความเครียดดังสมการที่(9)

$$qf_i = \frac{E}{L} \int (V_{in,i+1} - V_{out,i}) dt \quad (9)$$

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Front tension และ Back tension ได้โดยพิจารณาความสมดุลของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equilibrium of tension between stands) ดังสมการที่(10)

$$H_{i+1} \cdot qb_{i+1} = h_i \cdot qf_i. \quad (10)$$

จากสมการที่(10)สามารถหา Back tension ได้ดังนี้

$$qb_{i+1} = \left(\frac{h_{out,i}}{H_{in,i+1}} \right) \cdot qf_i \quad (10)$$

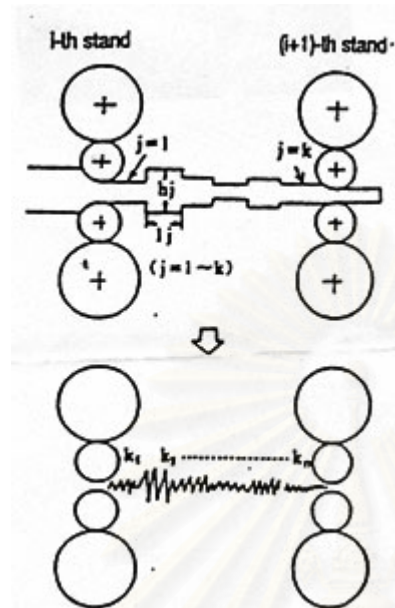
2.3.2 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดโดยรวมการกระจายความหนาของวัสดุ (A model taking into account the distribution of thickness between stands)

หาได้โดยการอินทิเกรตผลต่างของความเร็วระหว่างแท่นรีดในด้านทางออกของแท่นรีดและด้านทางเข้าของแท่นรีดแทนต่อไปซึ่งจะได้ค่าแรงดึงรวม T_i° (Total tension) ดังสมการที่(12) และสมการที่ (13) โดยสมมติให้การกระจายความหนาของวัสดุระหว่างแท่นรีดแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งสามารถหาค่าของ Front tension และ Back tension ได้จากสมการที่ (14) และสมการที่(15)

$$T_i^\circ = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^{j=k} \frac{1}{K_j} \right)} \int_0^t (V_{in,i+1} - V_{out,i}) dt \quad (12)$$

$$K_j = \frac{E \cdot b \cdot h_j}{l_j} \quad (13)$$

ค่า h_j และ l_j สามารถพิจารณาจากรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายความหนาของวัสดุระหว่างแท่นรีด

$$qf_i = \frac{T_i^\circ}{(b \cdot h_i)} \quad (14)$$

$$qf_{i+1} = \frac{T_i^\circ}{(b \cdot h_{i+1})} \quad (15)$$

สมการเพิ่มเติม

(ก) สมการคำนวณหา Rolling force

ก.1) Hill's Equation

สมการของ Hill⁵ เป็นสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณหาค่า Rolling force เนื่องจากเป็นสมการที่สำเร็จรูปและสะดวกเมื่อนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยมีสมการดังนี้

$$P = k \cdot Q_p \cdot l_d \cdot w \cdot \eta \quad (16)$$

โดย

$$\eta = 1 - \frac{\left\{ \frac{\phi_n}{\phi_b} qf + \left[1 - \frac{\phi_n}{\phi_b} \right] \frac{qb}{(1-r)} \right\}}{k} \quad (17)$$

$$Q_p = 1.08 + 1.79r \frac{\mu}{\phi_B} \sqrt{r} - 0.85r. \quad (18)$$

$$r = \frac{\Delta h}{H_{in}}$$

k = Deformation resistance (kg/mm²)

w = Material width (mm)

ld = Contact length (mm)

Neutral angle (ϕ_n) สามารถหาได้จากสมการของ Bland and Ford's Equation ดังนี้

$$\phi_n = \tan \left[\frac{H_n}{2 \sqrt{\frac{R'}{h_{out}}}} \right] \frac{1}{\sqrt{\frac{R'}{h_{out}}}}. \quad (19)$$

โดยค่า H_n หาได้จากสมการดังนี้

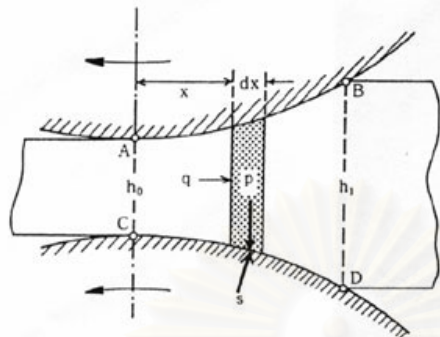
$$H_n = \frac{H}{2} - \frac{1}{2\mu} \ln \left[\frac{H_{in} \left(1 - \frac{qf}{kf} \right)}{h_{out} \left(1 - \frac{qb}{kb} \right)} \right]. \quad (20)$$

$$H = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_{out}}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{R'}{h_{out}}} \phi_B \right]. \quad (21)$$

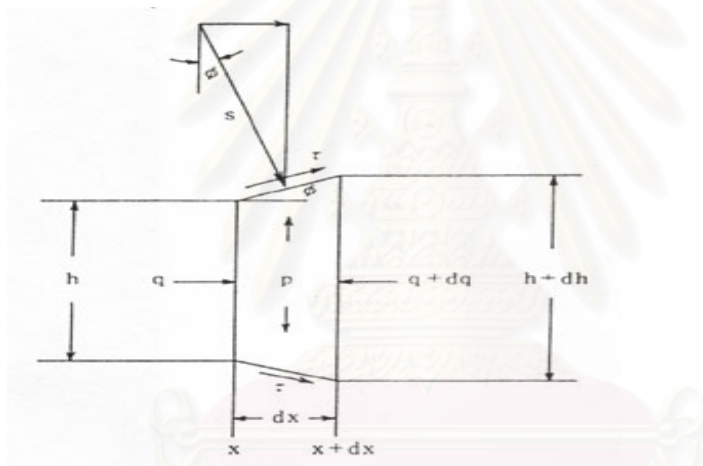
$$\phi_B = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \quad (22)$$

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า Rolling force ได้

ก.2) Karman's Equation ⁶

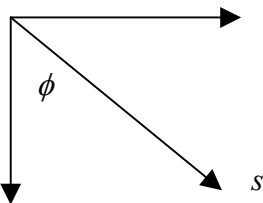


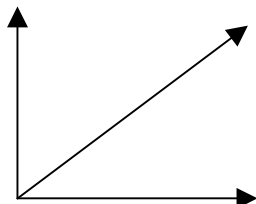
รูปที่ 2.4 แสดง Infinitesimal flat plate element



รูปที่ 2.5 แสดงแรงต่างๆที่มากระทำบน Element เล็กๆระหว่างการรีด

พิจารณา ที่ section x แรงที่กระทำบนวัสดุคือ $q(x) \cdot h(x)$
 ที่ section $x+dx$ แรงที่กระทำบนวัสดุคือ $-q(x+dx) \cdot h(x+dx)$
 $-q(x+dx) \cdot h(x+dx) = -(q+dq) \cdot (h+dh)$
 $= -qh - q \cdot dh - dq \cdot h - dq \cdot dh$
 $= -qh - d(q \cdot h)$

$$s \sin \phi \frac{dx}{\cos \phi} = s \tan \phi \cdot dx$$


$$s \cdot \cos \phi \frac{dx}{\cos \phi} = s \cdot dx$$


$$\tau \sin \phi \frac{dx}{\cos \phi} = \tau \tan \phi \cdot dx$$

$$\tau \cdot \cos \phi \frac{dx}{\cos \phi} = \tau \cdot dx$$

พิจารณาแรงสมมูลในแกน y ;

เนื่องจากมีแรงกระทำทั้ง 2 ด้าน (สมมาตร) จะได้

$$2p \cdot dx + 2\tau \tan \phi \cdot dx = 2s \cdot dx$$

ดังนั้น

$$s = p + \tau \tan \phi \quad (23)$$

พิจารณาแรงสมมูลในแกน x ;

เนื่องจากมีแรงกระทำทั้ง 2 ด้าน (สมมาตร) จะได้

$$2s \cdot \tan \phi \cdot dx + 2\tau \cdot dx + q \cdot h = q \cdot h + d(q \cdot h)$$

$$\therefore \frac{d(q \cdot h)}{dx} = 2\tau + 2s \cdot \tan \phi \quad (24)$$

แทนค่าสมการ (23) ลงในสมการ (24) จะได้

$$\frac{d(q \cdot h)}{dx} = 2\tau + 2(p + \tau \tan \phi) \tan \phi$$

$$= 2\tau + 2p \cdot \tan \phi + 2\tau \cdot \tan^2 \phi$$

$$= 2\tau(1 + \tan^2 \phi) + 2p \cdot \tan \phi$$

$$\therefore \frac{d(q \cdot h)}{dx} = \frac{2\tau}{\cos^2 \phi} + 2p \cdot \tan \phi \quad (25)$$

จาก Coulomb 's Law of Friction

$$\tau = \pm \mu \cdot s \quad (26)$$

เครื่องหมาย + หมายถึงพิจารณาจากด้านทางเข้าถึงจุด Neutral point

เครื่องหมาย - หมายถึงพิจารณาจากจุด Neutral point ถึงด้านทางออก

แทนค่าสมการ (23) ลงในสมการ (26) จะได้

$$\tau = \pm \mu [p + \tau \tan \phi]$$

$$\tau = \pm \mu \cdot p \pm \mu \cdot \tau \cdot \tan \phi$$

$$\tau \mp \mu \cdot \tau \cdot \tan \phi = \pm \mu \cdot p$$

$$\therefore \tau = \frac{\pm \mu \cdot p}{1 \mp \mu \cdot \tan \phi} \quad (27)$$

แทนค่าสมการ (27) ลงในสมการ (25) จะได้

$$\frac{d(q \cdot h)}{dx} = \frac{2(\pm \mu p)}{(1 \mp \mu \tan \phi) \cos^2 \phi} + 2p \cdot \tan \phi \quad (28)$$

เนื่องจาก ϕ เป็นมุมเล็กๆ จึงได้ $\sin \phi \approx \phi$ และ $\cos \phi \approx 1$

ดังนั้นจะทำให้

$$(1 \mp \mu \cdot \tan \phi) \cdot \cos^2 \phi \approx 1$$

จัดรูปสมการที่ (28) ใหม่จะได้

$$\frac{d(q \cdot h)}{dx} = 2p(\pm \mu + \tan \phi) \quad (29)$$

$$h \cdot dq + q \cdot dh = 2p(\pm \mu + \tan \phi) \cdot dx$$

เนื่องจาก dh มีค่าน้อยมากๆ ≈ 0

$$\Delta q = 2p \left(\pm \mu \frac{\Delta x}{h} + \tan \phi + \tan \phi \frac{\Delta x}{h} \right) \quad (30)$$

เครื่องหมาย + หมายถึงพิจารณาจากด้านทางเข้าถึงจุด Neutral point

เครื่องหมาย - หมายถึงพิจารณาจากจุด Neutral point ถึงด้านทางออก

นำสมการที่ (30) มาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ภาคผนวก) โดยใช้สมการการรวมในแต่ละ Element ดังนี้

$$q_{i+1} = q_i + \Delta q_i \quad (31)$$

ค่า Rolling force หาได้จากสมการจาก Yield criterion สำหรับ Plain strain จะได้ดังนี้

$$p = k + q \quad (32)$$

โดย p = Rolling force (ในหน่วยของ kg/mm^2)

ข) Forward slip (f)

ค่า Forward slip สามารถหาได้จากสมการของ Bland & Ford⁷ ดังนี้

เขียนสมการที่ (2) ใหม่ดังนี้

$$f = \frac{V_{out}}{V_R} - 1 \quad (33)$$

พิจารณาที่ตำแหน่ง Neutral point จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_{out} \cdot V_{out} = h_n \cdot V_R$$

$$\frac{V_{out}}{V_R} = \frac{h_n}{h_{out}} \quad (34)$$

โดย h_n = ความหนาของวัสดุที่จุด Neutral point (mm)

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

นำสมการที่(34) แทนในสมการที่ (33) จะได้

$$f = \frac{h_n}{h_{out}} - 1 \quad (35)$$

จะเห็นได้ว่าค่าของ Forward slip นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุด Neutral point นั้นเอง ในสภาวะของการรีดแบบพลวัตนั้น ตำแหน่งของจุด Neutral point จะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้ค่าของ Forward slip เปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของชิ้นงานที่ออกจากแต่ละแท่นรีดไม่คงที่ ส่งผลกระทบบ่อยอย่างยิ่งต่อค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดสภาวะพลศาสตร์ขึ้นก็คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของจุด Neutral point นั้นเอง

ค) Deformation resistance (k)

หาได้ 2 แบบคือ

(ค.1) หาจากสมการ Constitutive equation

$$k = a (\varepsilon + \varepsilon_0)^n$$

โดยที่ค่า a , ε_0 และ n คือค่าคงที่ซึ่งหาค่าได้โดยคำนวณผลจากการทดสอบ Plane Strain Compressive Test จะได้ค่า a , ε_0 และ n เท่ากับ 84.6 , 0.00817 และ 0.2 ตามลำดับโดยค่า ε หาได้จาก

(ค.1.1) การหาค่า Strain พื้นฐาน

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{H}$$

(ค.1.2) คำนวณจากการหาความแตกต่างระหว่างความหนาที่แทนรีดใดๆ เทียบกับแทนรีดที่ 1

$$\varepsilon_i = \frac{-\left(\ln \frac{H_i}{H_1} + 2 \ln \frac{h_i}{H_i}\right)}{3}$$

(ค.2) คำนวณจากสมการการหาค่า Deformation resistant จากการ Integrate จาก ε_1 ถึง ε_2

$$k_m = \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} a(\varepsilon + \varepsilon_0)^n d\varepsilon$$

$$k_m = \frac{a}{n+1} \frac{\left\{(\varepsilon_2 + \varepsilon_0)^{n+1} - (\varepsilon_1 + \varepsilon_0)^{n+1}\right\}}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$$

โดยในแต่ละแบบนี้จะมีความละเอียดของค่าที่คำนวณได้ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งแบบที่(ค.2) จะให้ค่าที่คำนวณได้ที่แม่นยำกว่าแบบที่ (ค.1)

ง) Roll deformation

ปรากฏการณ์หนึ่งในขณะการรีดซึ่งทำให้รัศมีของลูกรีดมีขนาดมากขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Roll flattening เกิดจากวัสดุชิ้นงานรีดและลูกรีดเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันและกันเป็นผลให้ชิ้นงานรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คืนรูป (Plastic deformation) แต่ลูกรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคืนรูป (Elastic deformation) ซึ่งเป็นผลให้ผิวลูกรีดบริเวณสัมผัสกับชิ้นงานแบนราบลงซึ่งสามารถเปรียบได้กับการที่รัศมีของลูกรีดมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วยค่า R' ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.6 และหาค่าได้จากสมการของ Hitchcock's Equation ⁸ ดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดงปรากฏการณ์ Roll deformation

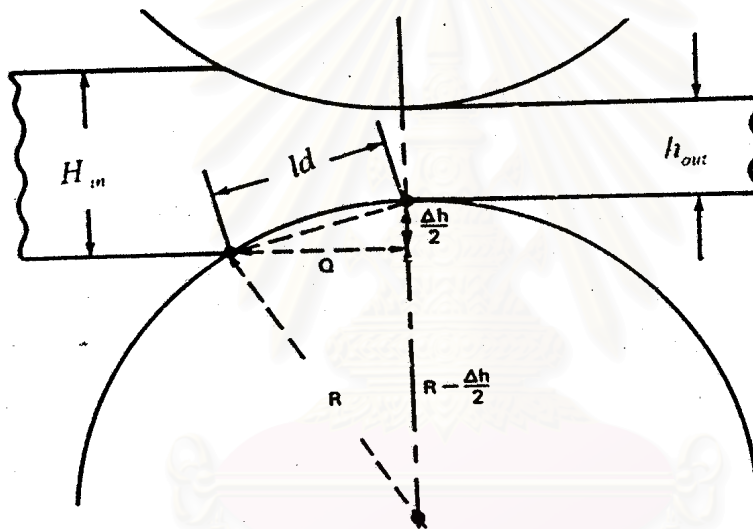
$$R' = \left(1 + \frac{c_0 P}{b \cdot \Delta h}\right) \cdot R \quad (36)$$

ค่าของ C_0 สามารถหาได้จากสมการ

$$c_0 = \frac{16 \cdot (1 - \nu_0^2)}{\pi \cdot E} \quad (37)$$

สำหรับ Low carbon steel ค่า $E = 200 \text{ Gpa} = 21,000 \text{ kg/mm}^2$, $\nu_0 = \text{Poisson's ratio} = 0.3$

จ) Contact length ⁹



รูปที่ 2.7 แสดง Contact length

ld = Contact length (mm) สามารถคำนวณจาก

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

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

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

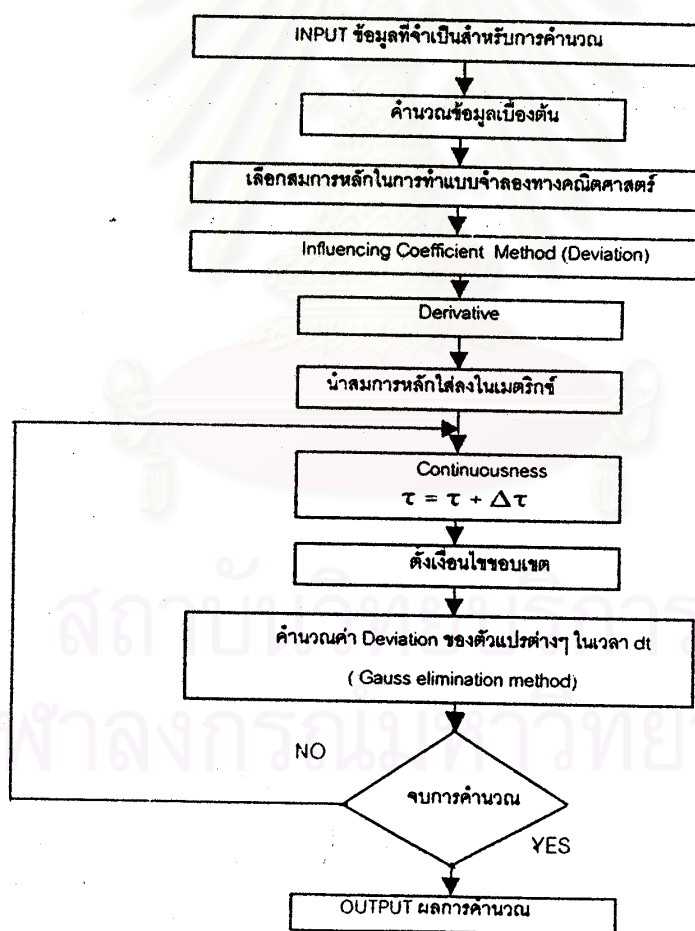
เมื่อ

Δh = ผลต่างระหว่างความหนาขาเข้ากับความหนาขาออก (mm)

บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานรีดจากทฤษฎีพลวัต

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลวัตนี้เป็นการนำความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบงานรีดทุกตัวที่ทำกรพิจารณาในระบบงานรีดและตัวแปรที่ทำการคำนวณจากทฤษฎีการรีดแล้วมาทำการคำนวณความสัมพันธ์พร้อมกันทำให้ปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและข้อมูลที่ต้องการหาค่ามีจำนวนมากจนยากที่จะทำการคำนวณด้วยวิธีปกติ การศึกษาจึงทำการคำนวณโดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรมที่ใช้คือ Macro (Visual Basic) ใน Excel ซึ่งมีความสะดวกในการดึงข้อมูลจาก Worksheet ใน Excel มาคำนวณและประมวลผล โดยมี Flow chart ของขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสังเขปดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดง Flow chart ของขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 ป้อน (Input) ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการคำนวณมีดังนี้

- 3.1.1 ความหนาของวัสดุที่ทางเข้าแท่นรีด
- 3.1.2 ความหนาของวัสดุที่ทางออกจากแท่นรีด
- 3.1.3 ความเร็วของลูกรีด
- 3.1.4 รัศมีของลูกรีด
- 3.1.5 Front tension และ Back tension
- 3.1.6 Material width
- 3.1.7 ค่ามอดูลัสความแข็งแรงของแท่นรีด
- 3.1.8 ระยะห่างระหว่างแท่นรีด (Pass length)

ข้อมูลพื้นฐานต่างๆเหล่านี้เรียกว่า ค่าพารามิเตอร์ของการรีด (Rolling parameter) สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามความเหมาะสม โดยมีข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการคำนวณที่มาจากกรรรีดจริงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ

แท่นรีดที่	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
ความหนาขาเข้า(mm)	3.20	2.59	1.99	1.56	1.23
ความหนาขาออก(mm)	2.59	1.99	1.56	1.23	1.17
ความเร็วของลูกรีด (mm/s)	4673	5971	7838	9924	10566
qf (kg/mm ²)	16.6	16.5	15.9	15.7	5.4
qb (kg/mm ²)	5.2	16.6	16.5	15.9	15.7
Material width(mm)	1385	1385	1385	1385	1385
รัศมีของลูกรีด (mm)	300	300	300	300	300
Rigidity of mill (ton/mm)	500	500	500	500	500

ระยะห่างระหว่างแท่นรีด = 4600 mm

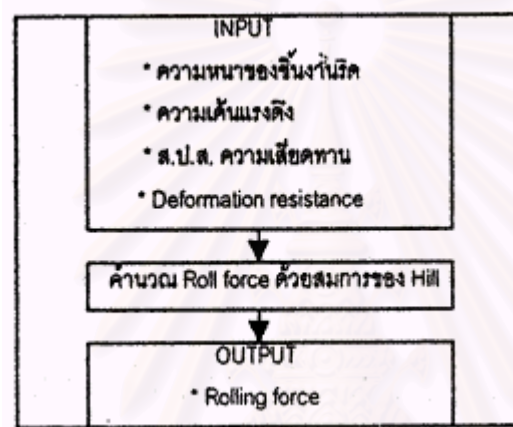
3.2 คำนวณข้อมูลเบื้องต้น

จากตารางที่ 3.1 สามารถนำข้อมูลพื้นฐานเหล่านี้มาคำนวณเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นเพื่อนำข้อมูลเบื้องต้นนี้ไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งต้องการข้อมูลเบื้องต้นดังต่อไปนี้

3.2.1 Rolling force

3.2.1.1 Hill's Equation

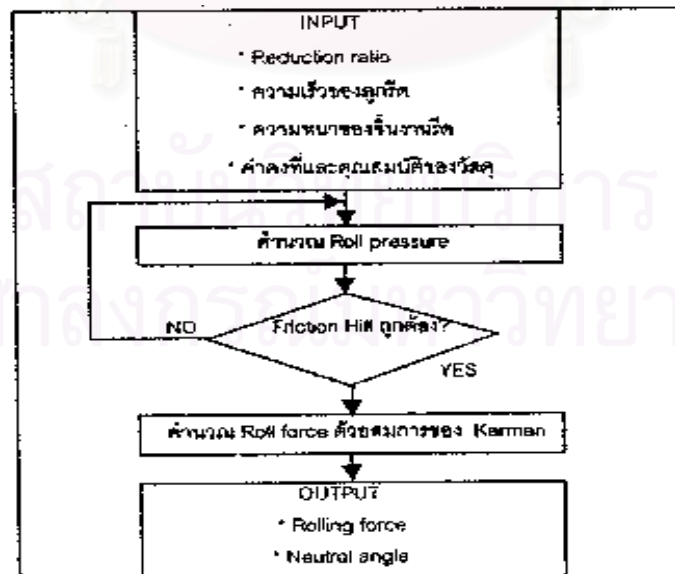
การคำนวณหา Rolling force จาก Hill's Equation มี Flow chart ดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดง Flow chart ในการคำนวณ Rolling force ด้วยสมการของ Hill

3.2.1.2 Karman's Equation

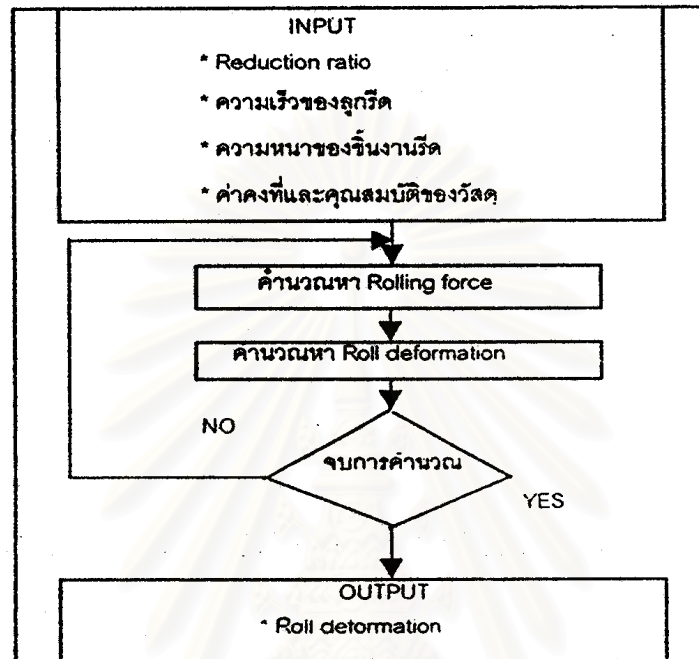
การคำนวณหา Rolling force จาก Karman's Equation มี Flow chart ดังนี้



รูปที่ 3.3 แสดง Flow chart ในการคำนวณ Rolling force ด้วยสมการของ Karman

3.2.2 Roll deformation

การคำนวณหา Roll deformation จาก Hitchcock's Equation มี Flow chart ดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดง Flow chart ในการคำนวณ Roll deformation

3.3 เลือกสมการหลักในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรีดเย็นในสภาวะพลวัตมีทั้งสิ้น 7 สมการดังต่อไปนี้

3.3.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานรีดที่เกิดจากกระบวนการรีดภายในแท่นรีดว่าเกิดจากการกำหนดค่าระยะห่างระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll gap) รวมกับค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงเนื่องจากการรีด (Rolling force) โดยความสัมพันธ์นี้แสดงโดยสมการที่ (1) ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 ดังนี้

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

Influencing method จะได้

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

$$\Delta h_i - \Delta S_i - \frac{\Delta P_i}{M_i} = 0$$

3.3.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด (Equation of rolling force)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า Rolling force กับตัวแปรอื่นๆ สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ของ Rolling force กับตัวแปรอื่นๆได้ในรูปของฟังก์ชัน $P_i = P(H_i, h_i, qf_i, qb_i, k_i, \mu_i)$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

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

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

3.3.3 สมการ Forward slip (Equation of forward slip)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า Forward slip กับตัวแปรอื่นๆ สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ของ Forward slip กับตัวแปรอื่นๆได้ในรูปของฟังก์ชัน $f_i = f(H_i, h_i, qf_i, qb_i, k_i, \mu_i)$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

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

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

3.3.4 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Equation of material velocity)

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

$$V_{out,i} = (1 + f_i) \cdot V_{Ri}$$

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

3.3.5 กฎความคงที่ของอัตราเร็วเชิงปริมาตร (Condition for volumetric velocity constancy)

ความสัมพันธ์นี้เกิดมาจากหลักการที่ว่าอัตราเร็วของปริมาตรวัสดุงานรีดที่ออกจากแท่นรีดแต่แท่นภายในกระบวนการรีดต่อเนื่องเดียวกันหรือเป็นระบบเดียวกันโดยไม่มีกรหยุดพักชิ้นงานรีดระหว่างแท่นรีด อัตราเร็วของปริมาตรวัสดุงานรีดเหล่านั้นจะมีค่าเท่ากันและมีค่าคงที่เสมอ จะได้ความสัมพันธ์

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

ในกระบวนการรีดปกติการลดขนาดความหนาของชิ้นงานรีดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านความกว้างของชิ้นงานรีดมีผลกระทบน้อยมากเพราะมีการควบคุมอยู่ (Width control) จึงสามารถให้ความกว้างของชิ้นงานรีดทั้งระบบการรีดมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งระบบการรีดได้ ($dw = 0$) โดยการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วเชิงปริมาตรจึงสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

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

$$\Delta H_{in} v_{in} + H_{in} \Delta v_{in} = \Delta h_{out} v_{out} + h_{out} \Delta v_{out}$$

$$\Delta H_{in} v_{in} + H_{in} \Delta v_{in} - \Delta h_{out} v_{out} - h_{out} \Delta v_{out} = 0$$

3.3.6 สมการความสมดุลของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equilibrium of tension between stands)

ความสัมพันธ์นี้เกิดมาจากหลักการที่ว่า ในระบบการรีดต่อเนื่องสภาวะพลศาสตร์ใดๆ ความหนาขาออกของแท่นรีดใดๆก็ดูกับความเค้นแรงดึงของแท่นรีดใดๆจะมีขนาดเท่ากับความหนาขาเข้าของแท่นรีดตัวถัดไปก็ดูกับความเค้นแรงดึงของแท่นรีดตัวถัดไปเสมอ(ซึ่งต่างจากสภาพสถิตยศาสตร์) ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ดังนี้

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

Influencing method จะได้

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

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

3.3.7 สมการความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of interstand tension)

สมการนี้เป็นสมการซึ่งแสดงความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่เวลาใดๆ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติการแปรรูปแบบ Elastic ของชิ้นงานรีดสัมพันธ์กับค่าของความเร็วของชิ้นงานรีดทั้งขาออกและขาเข้าแท่นรีด สามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

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

3.4 Derivative ขององค์ประกอบการรีด

ค่า Derivative ขององค์ประกอบการรีดสามารถคำนวณโดยการหาอนุพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบการรีดทั้ง 2 ตัว โดยจำเป็นต้องมีค่าองค์ประกอบการรีดตัวหนึ่งเป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบการรีดอีกตัวหนึ่ง โดยตัวแปรอื่นๆในฟังก์ชันนั้นต้องกำหนดให้เป็นค่าคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ค่าอนุพันธ์ที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบการรีดเพียงสองตัวเท่านั้น การหา Derivative ขององค์ประกอบการรีดสามารถหาได้จากหลักการดังต่อไปนี้

เมื่อ x และ Y เป็นค่าองค์ประกอบการรีดโดย Y=Y(x) หรือ Y เป็นฟังก์ชันของ x สามารถหาค่า Derivative ได้ดังนี้

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

เมื่อ $x_1 = x + \Delta x$

$x_2 = x - \Delta x$ และ Δx คือค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ x โดยสามารถปรับเปลี่ยนตาม การทดลองการรีดเพื่อให้ค่าที่คำนวณได้เกิดความเที่ยงตรงโดยค่า Derivative ที่จำเป็นต้องหามีดังต่อไปนี้

3.4.1 Derivative ของ Rolling force เทียบกับความหนาขาเข้า (H)

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

3.4.2 Derivative ของ Rolling force เทียบกับความหนาขาออก (h)

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

3.4.3 Derivative ของ Rolling force เทียบกับ Front tension (q_f)

$$\frac{\partial P}{\partial q_f} = \frac{P(q_{f1}) - P(q_{f2})}{q_{f1} - q_{f2}}$$

3.4.4 Derivative ของ Rolling force เทียบกับ Back tension (q_b)

$$\frac{\partial P}{\partial q_b} = \frac{P(q_{b1}) - P(q_{b2})}{q_{b1} - q_{b2}}$$

3.4.5 Derivative ของ Forward slip เทียบกับความหนาขาเข้า (H)

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

3.4.6 Derivative ของ Forward slip เทียบกับความหนาขาออก (h)

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

3.4.7 Derivative ของ Forward slip เทียบกับ Front tension (q_f)

$$\frac{\partial f}{\partial q_f} = \frac{f(q_{f1}) - f(q_{f2})}{q_{f1} - q_{f2}}$$

3.4.8 Derivative ของ Forward slip เทียบกับ Back tension (q_b)

$$\frac{\partial f}{\partial q_b} = \frac{f(q_{b1}) - f(q_{b2})}{q_{b1} - q_{b2}}$$

การหาค่า Derivative ที่จำเป็นระหว่างองค์ประกอบในกระบวนการรีดนี้ จะหาแบบอิสระไม่เกี่ยวข้องกันในแต่ละแท่นรีด ดังนั้นค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบเดียวกันในกระบวนการรีดระบบเดียวกัน แต่คำนวณที่ตำแหน่งแท่นรีดต่างกันก็จะมีค่าแตกต่างกันด้วย

3.5 แปลงสมการหลักลงใน Matrix

ในระบบการรีดในแบบจำลองนี้เป็นการสร้างแบบจำลองของระบบการรีดที่มีแท่นรีดจำนวน 5 แท่นรีดโดยแต่ละแท่นรีดมีค่าองค์ประกอบการรีดที่มีผลการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวเนื่องกันตามทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลวัตดังนั้นในแต่ละสมการหลักจะสามารถแจกแจงเป็นสมการย่อยได้ดังต่อไปนี้

3.5.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta h_1 - \Delta S_1 - \frac{\Delta P_1}{M_1} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta h_2 - \Delta S_2 - \frac{\Delta P_2}{M_2} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta h_3 - \Delta S_3 - \frac{\Delta P_3}{M_3} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta h_4 - \Delta S_4 - \frac{\Delta P_4}{M_4} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta h_5 - \Delta S_5 - \frac{\Delta P_5}{M_5} = 0$$

3.5.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด (Equation of rolling force)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta P_1 - \frac{\partial P_1}{\partial H_1} \Delta H_1 - \frac{\partial P_1}{\partial h_1} \Delta h_1 - \frac{\partial P_1}{\partial q_{b1}} \Delta q_{b1} - \frac{\partial P_1}{\partial q_{f1}} \Delta q_{f1} - \frac{\partial P_1}{\partial \mu_1} \Delta \mu_1 - \frac{\partial P_1}{\partial k_1} \Delta k_1 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta P_2 - \frac{\partial P_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial P_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial P_2}{\partial q_{b2}} \Delta q_{b2} - \frac{\partial P_2}{\partial q_{f2}} \Delta q_{f2} - \frac{\partial P_2}{\partial \mu_2} \Delta \mu_2 - \frac{\partial P_2}{\partial k_2} \Delta k_2 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta P_3 - \frac{\partial P_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial P_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial P_3}{\partial q_{b3}} \Delta q_{b3} - \frac{\partial P_3}{\partial q_{f3}} \Delta q_{f3} - \frac{\partial P_3}{\partial \mu_3} \Delta \mu_3 - \frac{\partial P_3}{\partial k_3} \Delta k_3 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta P_4 - \frac{\partial P_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial P_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial P_4}{\partial q_{b4}} \Delta q_{b4} - \frac{\partial P_4}{\partial q_{f4}} \Delta q_{f4} - \frac{\partial P_4}{\partial \mu_4} \Delta \mu_4 - \frac{\partial P_4}{\partial k_4} \Delta k_4 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta P_5 - \frac{\partial P_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial P_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial P_5}{\partial q_{b5}} \Delta q_{b5} - \frac{\partial P_5}{\partial q_{f5}} \Delta q_{f5} - \frac{\partial P_5}{\partial \mu_5} \Delta \mu_5 - \frac{\partial P_5}{\partial k_5} \Delta k_5 = 0$$

3.5.3 สมการ Forward slip (Forward slip equation)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta f_1 - \frac{\partial f_1}{\partial H_1} \Delta H_1 - \frac{\partial f_1}{\partial h_1} \Delta h_1 - \frac{\partial f_1}{\partial q_{b1}} \Delta q_{b1} - \frac{\partial f_1}{\partial q_{f1}} \Delta q_{f1} - \frac{\partial f_1}{\partial \mu_1} \Delta \mu_1 - \frac{\partial f_1}{\partial k_1} \Delta k_1 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta f_2 - \frac{\partial f_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial f_2}{\partial q_{b2}} \Delta q_{b2} - \frac{\partial f_2}{\partial q_{f2}} \Delta q_{f2} - \frac{\partial f_2}{\partial \mu_2} \Delta \mu_2 - \frac{\partial f_2}{\partial k_2} \Delta k_2 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta f_3 - \frac{\partial f_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial f_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial f_3}{\partial q_{b3}} \Delta q_{b3} - \frac{\partial f_3}{\partial q_{f3}} \Delta q_{f3} - \frac{\partial f_3}{\partial \mu_3} \Delta \mu_3 - \frac{\partial f_3}{\partial k_3} \Delta k_3 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta f_4 - \frac{\partial f_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial f_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial f_4}{\partial q_{b4}} \Delta q_{b4} - \frac{\partial f_4}{\partial q_{f4}} \Delta q_{f4} - \frac{\partial f_4}{\partial \mu_4} \Delta \mu_4 - \frac{\partial f_4}{\partial k_4} \Delta k_4 = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta f_5 - \frac{\partial f_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial f_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial f_5}{\partial q_{b5}} \Delta q_{b5} - \frac{\partial f_5}{\partial q_{f5}} \Delta q_{f5} - \frac{\partial f_5}{\partial \mu_5} \Delta \mu_5 - \frac{\partial f_5}{\partial k_5} \Delta k_5 = 0$$

3.5.4 สมการอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Equation of material velocity)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta v_1 - \Delta f_1 \cdot v_{R1} - (1 + f_1) \cdot \Delta v_{R1} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta v_2 - \Delta f_2 \cdot v_{R2} - (1 + f_2) \cdot \Delta v_{R2} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta v_3 - \Delta f_3 \cdot v_{R3} - (1 + f_3) \cdot \Delta v_{R3} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta v_4 - \Delta f_4 \cdot v_{R4} - (1 + f_4) \cdot \Delta v_{R4} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta v_5 - \Delta f_5 \cdot v_{R5} - (1 + f_5) \cdot \Delta v_{R5} = 0$$

3.5.5 กฎความคงที่ของอัตราเร็วเชิงปริมาตร (Condition for volumetric velocity constancy)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta H_{in,1} v_{in,1} + H_{in,1} \Delta v_{in,1} - \Delta h_{out,1} v_{out,1} - h_{out,1} \Delta v_{out,1} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta H_{in,2} v_{in,2} + H_{in,2} \Delta v_{in,2} - \Delta h_{out,2} v_{out,2} - h_{out,2} \Delta v_{out,2} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta H_{in,3}v_{in,3} + H_{in,3}\Delta v_{in,3} - \Delta h_{out,3}v_{out,3} - h_{out,3}\Delta v_{out,3} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta H_{in,4}v_{in,4} + H_{in,4}\Delta v_{in,4} - \Delta h_{out,4}v_{out,4} - h_{out,4}\Delta v_{out,4} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta H_{in,5}v_{in,5} + H_{in,5}\Delta v_{in,5} - \Delta h_{out,5}v_{out,5} - h_{out,5}\Delta v_{out,5} = 0$$

3.5.6 สมการความสมดุลของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equilibrium of tension between stands)

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

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

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

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

3.5.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of tension)

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

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

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

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

จะเห็นได้ว่ามีสมการที่ได้จากการแจกแจงทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์ 33 สมการโดยมีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Unknown) คือค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดต่างๆที่แสดงในสมการแต่ละแท่นรีด (ได้แก่พวกที่ติดค่า Δ ต่างๆ) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรได้แก่ ค่าองค์ประกอบการรีดที่สามารถทำการคำนวณค่าได้และค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรีดที่สามารถคำนวณค่าได้เช่นกัน

เนื่องจากการคำนวณแบบจำลองด้วยทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์ เป็นการคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่า(ซึ่งในที่นี้คือการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดต่างๆ)ทั้งระบบการรีดแบบพร้อมกัน ทำให้การคำนวณมีตัวแปรและสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณมากมาย จึงนำสมการของทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์ที่ทำการแจกแจงในทุกแท่นรีดมาแปลงอยู่ใน

รูปแบบของ Matrix โดย Matrix หลักที่ทำการแปลงมาได้มีขนาด Matrix ที่ใหญ่มากจนเป็นการยากที่จะแสดงในหน้ากระดาษปกติได้ แต่สามารถแสดงในรูปแบบย่อได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{matrix}
 \text{คอลัมน์ที่} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10
 \end{matrix}
 \begin{bmatrix}
 \langle 1 \rangle & 0 & \left\langle \frac{1}{M_i} \right\rangle & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle -1 \rangle & 0 \\
 \left\langle -\frac{\partial P}{\partial h} \right\rangle_i & \left\langle -\frac{\partial P}{\partial H} \right\rangle_i & \langle 1 \rangle & \left\langle -\frac{\partial P}{\partial qf} \right\rangle_i & \left\langle -\frac{\partial P}{\partial qb} \right\rangle_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle -V_{R_i} \rangle & 0 & \langle 1 \rangle & 0 & \langle -(1+f_i) \rangle & 0 \\
 \left\langle -\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial h} \right\rangle_i & \left\langle -\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial H} \right\rangle_i & 0 & \left\langle -\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial qf} \right\rangle_i & \left\langle -\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial qb} \right\rangle_i & \langle 1 \rangle & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \langle -V_{out_i} \rangle & \langle V_{in_i} \rangle & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle H_i \rangle & \langle -h_i \rangle & 0 & 0 & 0 \\
 \langle qf_i \rangle & \langle -qb_{i+1} \rangle & 0 & \langle h_{i-1} \rangle & \langle -H_{i+1} \rangle & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \left\langle \frac{L}{E \cdot dt} \right\rangle & 0 & 0 & \langle -1 \rangle & \langle 1 \rangle & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \Delta h \\
 \Delta H \\
 \Delta P \\
 \Delta qf \\
 \Delta qb \\
 \mathcal{G} \\
 \Delta V_{in} \\
 \Delta V_{out} \\
 \Delta S \\
 \Delta V_R
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \langle \Delta V \rangle
 \end{bmatrix}$$

เมื่อแต่ละคอลัมน์ของ Matrix จะแสดงตำแหน่งของตัวแปรไม่ทราบค่าหรือค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการวัดในแต่ละแท่นวัดโดยแต่ละคอลัมน์ทำการแสดงสัมประสิทธิ์ของตัวแปรดังต่อไปนี้โดย 1 คอลัมน์หลักเป็นตัวแทนของ 5 คอลัมน์ย่อยของแต่ละแท่นวัด

คอลัมน์ที่ 1 (Δh)

การเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออก (Δh)				
แท่นวัดที่ 1	แท่นวัดที่ 2	แท่นวัดที่ 3	แท่นวัดที่ 4	แท่นวัดที่ 5

คอลัมน์ที่ 2 (ΔH)

การเปลี่ยนแปลงของความหนาขาเข้า (ΔH)				
แท่นวัดที่ 1	แท่นวัดที่ 2	แท่นวัดที่ 3	แท่นวัดที่ 4	แท่นวัดที่ 5

คอลัมน์ที่ 3 (ΔP)

การเปลี่ยนแปลงของ Rolling force (ΔP)				
แท่นวัดที่ 1	แท่นวัดที่ 2	แท่นวัดที่ 3	แท่นวัดที่ 4	แท่นวัดที่ 5

คอลัมน์ที่ 4 (Δq_f)

การเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด (Δq_f)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 5 (Δq_b)

การเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด (Δq_b)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 6 (Δf)

การเปลี่ยนแปลงของ Forward slip (Δf)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 7 (Δv_{in})

การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Δv_{in})				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 8 (Δv_{out})

การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของลูกรีด (Δv_{out})				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 9 (ΔS)

การเปลี่ยนแปลงของ Roll Gap (ΔS)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 10 (Δv_R)

การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีด (ΔV_R)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

โดยแถวแต่ละแถวของ matrix แบบย่อจะแทนตำแหน่งแท่นรีดตั้งแต่แท่นรีดที่ 1 ถึงแท่นรีดที่ 5 ทุกแถวตั้งแต่แถวแรกถึงแถวที่ 7 โดยสมาชิกตำแหน่งต่างๆของMatrixหลักแบบย่อจะเป็นสัญลักษณ์แทน Matrix ต่อไปนี้

สัญลักษณ์	ความหมาย
0	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$\langle 1 \rangle$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$\langle -1 \rangle$	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
$\left\langle \begin{matrix} 1 \\ -\frac{1}{M_i} \end{matrix} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{M_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{M_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{M_5} \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial H} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial H_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial H_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial H_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial H_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial h} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial h_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial h_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial h_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial h_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial h_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial q_b} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial q_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial q_{b2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial q_{b3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial q_{b4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial q_{b5}} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial q_f} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial q_{f1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial q_{f2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial q_{f3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial q_{f4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial q_{f5}} \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\left\langle -\frac{\partial f}{\partial H} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial H_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial H_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial H_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial H_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial f}{\partial h} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial h_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial h_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial h_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial h_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial h_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial f}{\partial q_b} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial q_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial q_{b2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial q_{b3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial q_{b4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial q_{b5}} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial f}{\partial q_f} \right\rangle_i$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial q_{f1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial q_{f2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial q_{f3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial q_{f4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial q_{f5}} \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\langle -(1+f_i) \rangle$	$\begin{pmatrix} -(1+f_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(1+f_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1+f_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1+f_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(1+f_5) \end{pmatrix}$
$\langle V_{in,i} \rangle$	$\begin{pmatrix} V_{in,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{in,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{in,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_{in,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_{in,5} \end{pmatrix}$
$\langle -V_R \rangle_i$	$\begin{pmatrix} -V_{R1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -V_{R2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -V_{R3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V_{R4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -V_{R5} \end{pmatrix}$
$\langle q f_i \rangle$	$\begin{pmatrix} q f_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q f_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q f_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q f_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q f_5 \end{pmatrix}$
$\langle -V_{out,i} \rangle$	$\begin{pmatrix} -V_{out,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -V_{out,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -V_{out,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V_{out,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -V_{out,5} \end{pmatrix}$
$\langle -h_i \rangle$	$\begin{pmatrix} -h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -h_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -h_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -h_5 \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\langle -H_{i+1} \rangle$	$\begin{pmatrix} 0 & -H_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -H_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -H_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -H_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$\langle -V_R \rangle_i$	$\begin{pmatrix} -V_{R1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -V_{R2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -V_{R3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V_{R4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -V_{R5} \end{pmatrix}$
$\langle -q_{b_{i+1}} \rangle$	$\begin{pmatrix} 0 & -q_{b2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q_{b3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -q_{b4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -q_{b5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$\langle h_{i-1} \rangle$	$\begin{pmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_4 & 0 \end{pmatrix}$
$\langle H_i \rangle$	$\begin{pmatrix} H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_5 \end{pmatrix}$

3.6 Continuousness

เนื่องจากการวัดในสภาวะพลวัตนี้เป็นการวัดที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในการวัดต่างๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเวลาจึงเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่เป็นความสัมพันธ์กันระหว่างความหนาของวัสดุที่แท่นวัดหนึ่งกับแท่นวัดแทนถัดไปในกระบวนการการวัด ดังนี้

$$h_i(t) = H_{i+1}(t + \Delta t) \quad (38)$$

3.7 การตั้งเงื่อนไขขอบเขต (Set boundary condition)

แบบจำลองการวัดต่อเนื่องจากทฤษฎีการวัดต่อเนื่องแบบพลวัตที่ทำการศึกษานี้จะสร้างให้มีรูปแบบการกำหนดค่าแปรให้เป็นตัวแปรทราบค่าหรือไม่ทราบค่าโดยอาศัยตารางนี้เพื่อการรับค่าเหล่านี้เข้าไปในแบบจำลองโดยส่งผลให้เกิดการลดทอนเมตริกซ์หลักให้เป็นเมตริกซ์จัตุรัส และเป็นตารางที่ใช้กำหนดการรวมตัวแปรต่างๆ โดยตารางการตั้งเงื่อนไขขอบเขตสามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 การตั้งเงื่อนไขขอบเขต

แท่นวัดที่	1	2	3	4	5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0.16	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0
ΔV_r	0	0	0	0	0

โดย

ตัวเลข 0 หมายถึงการกำหนดให้เป็นตัวแปรที่ทราบค่าและมีค่าการเปลี่ยนแปลงเท่ากับศูนย์

ตัวเลข 1 หมายถึงการกำหนดเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงจะถูกคำนวณในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

ตัวเลข 0.16 หมายถึงการรบกวนความหนาของวัตถุบิ (ΔH_1) ขนาด 0.16 มิลลิเมตร (เป็นตัวแปรที่ทราบค่า) ซึ่งหมายความว่า ในกระบวนการรีดที่มีความหนาของวัตถุบิเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตรในสภาวะปกติแต่เมื่อถูกรบกวนความหนาของวัตถุบิซึ่งมาจากสาเหตุที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของวัตถุบิ จึงทำให้ความหนาของวัตถุบิมีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ $3.2 + 0.16 = 3.36$ มิลลิเมตร

3.8 คำนวณค่า Deviation ของตัวแปรต่างๆในเวลา dt (Gauss's Elimination Method)

เมื่อมีการกำหนดตัวแปรทราบค่าครบ 17 ตัว (พิจารณาตารางที่ 3.2) โดยทำให้ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะเหลือ $50 - 17 = 33$ ตัวแปร โดยที่มีสมการการรีดทั้งสิ้น 33 สมการ จะทำให้ Main matrix มีขนาดเป็นเมตริกซ์จัตุรัส 33×33 (Square matrix) หรือเป็น Matrix ที่มีขนาดเท่ากันทั้งแถวและหลักซึ่ง Square matrix นี้เป็นเมตริกซ์ที่สามารถหาค่าได้ตาม Gauss's Eliminate Method¹⁰ ได้โดยสามารถศึกษาโปรแกรม Gauss's Eliminate Method ได้จากภาคผนวก

บทที่ 4

ผลการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์ผลการคำนวณ กับข้อมูลการรีดจริง

4.1 ผลการคำนวณเบื้องต้น

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณเบื้องต้น

Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.28	1.46	0.95	0.64
hout (mm)	2.28	1.46	0.95	0.64	0.63
qf (kg/mm ²)	16.3	15.2	15.8	16.0	4.9
qb (kg/mm ²)	4.8	16.3	15.2	15.8	16.0
w (mm)	1430	1430	1430	1430	1430
Roll radius (mm)	305	305	305	305	305
M (ton/mm)	500	500	500	500	500

ระยะห่างระหว่างแท่นรีด = 4600 mm

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณเบื้องต้น

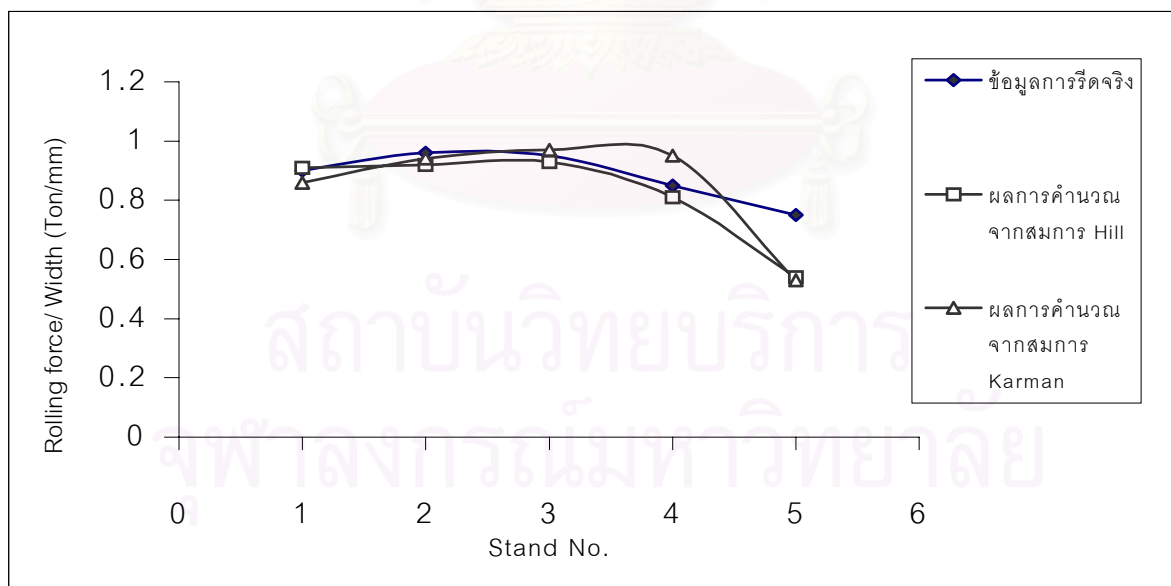
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Reduction (%)	28.7	35.9	34.9	32.6	1.5
Vr (mm/s)	2465	4114	6197	9111	9633
Friction coefficient	0.0467	0.0448	0.0434	0.0423	0.0413
Forward slip	0.0824	0.0129	0.0334	0.0435	0.0026
Backward slip	-0.2288	-0.3513	-0.3275	-0.2970	-0.0130
Neutral angle (radian)	0.0243	0.0077	0.0097	0.0088	0.0005
Roll flattening(mm)	316	319	333	356	380
Vin (mm/s)	1901	2668	4167	6405	9507
Vout (mm/s)	2668	4167	6405	9507	9658

4.2 เปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง

ค่า Rolling force ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองสามารถคำนวณได้ 2 แบบคือจากสมการของ Hill และจากสมการของ Karman โดยแสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงจำนวน 5 ชุดข้อมูลกับผลการคำนวณจากแบบจำลองดังต่อไปนี้

ข้อมูลชุดที่ 1

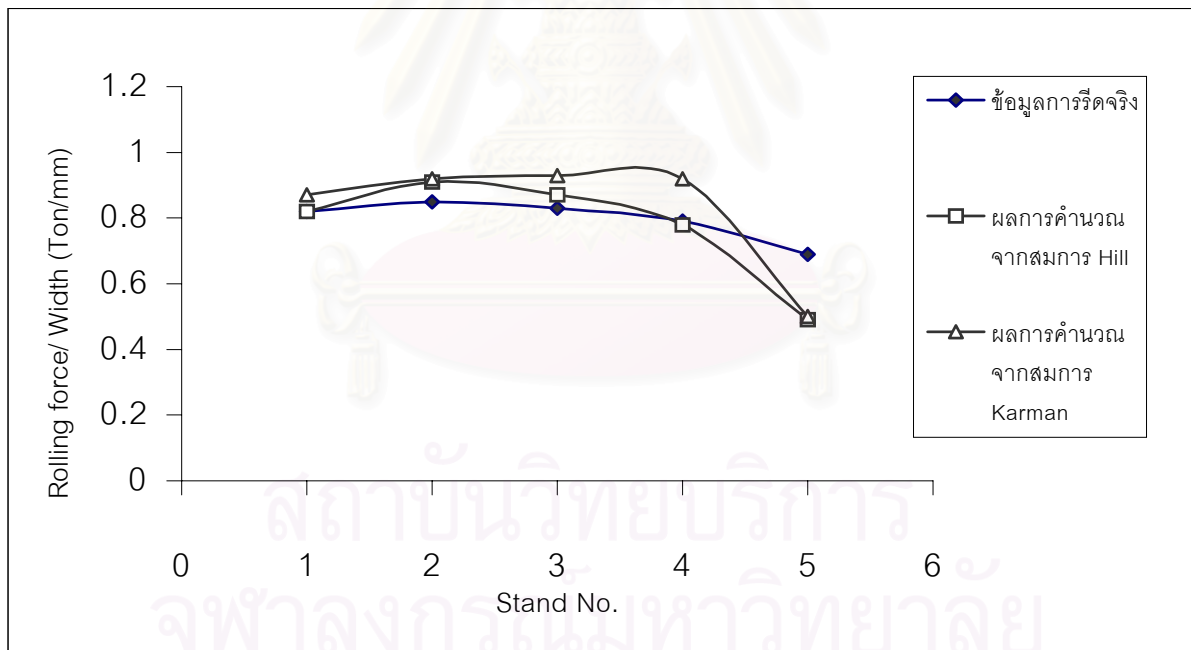
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.28	1.46	0.95	0.64
hout (mm)	2.28	1.46	0.95	0.64	0.63
Reduction (%)	28.7	35.9	34.9	32.6	1.5
Vr (mm/s)	2465	4114	6197	9111	9633
qf (kg/mm ²)	16.3	15.2	15.8	16.0	4.9
qb (kg/mm ²)	4.8	16.3	15.2	15.8	16.0
w (mm)	1430	1430	1430	1430	1430
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1 กับผลการคำนวณ

ข้อมูลชุดที่ 2

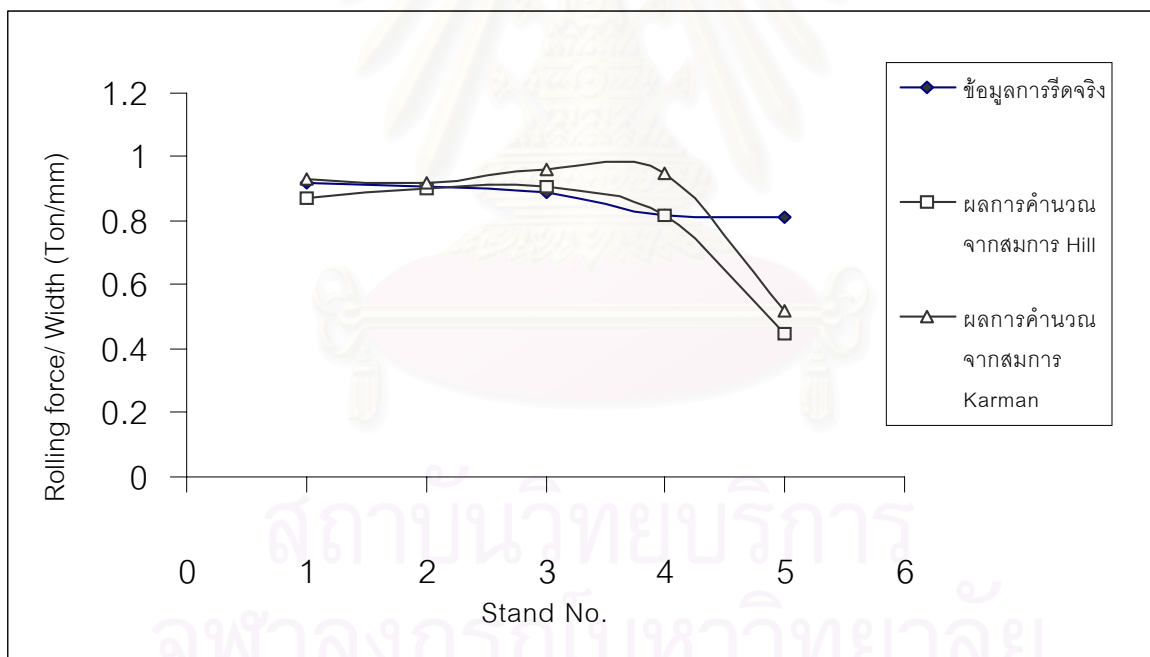
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.42	1.62	1.14	0.81
hout (mm)	2.42	1.62	1.14	0.81	0.80
Reduction (%)	24.3	33.0	29.6	28.9	1.2
Vr (mm/s)	3529	5589	7827	10936	11450
qf (kg/mm ²)	14.3	14.3	15.0	15.1	4.7
qb (kg/mm ²)	4.7	14.3	14.3	15.0	15.1
w (mm)	1709	1709	1709	1709	1709
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 2 กับผลการคำนวณ

ข้อมูลชุดที่ 3

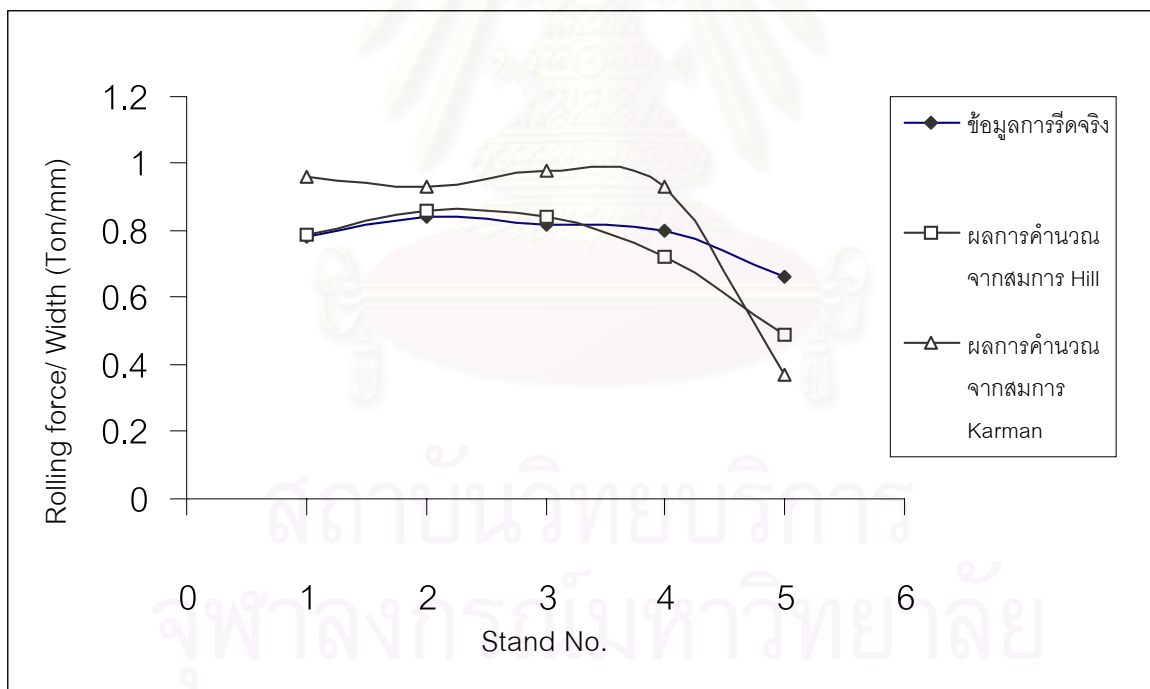
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.32	1.50	0.99	0.66
hout (mm)	2.32	1.50	0.99	0.66	0.64
Reduction (%)	27.5	35.3	34.0	33.3	3.0
Vr (mm/s)	2959	4915	7294	10834	11600
qf (kg/mm ²)	16.6	15.0	15.8	15.9	5.1
qb (kg/mm ²)	5.2	16.6	15.0	15.8	15.9
w (mm)	1430	1430	1430	1430	1430
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 3 กับผลการคำนวณ

ข้อมูลชุดที่ 4

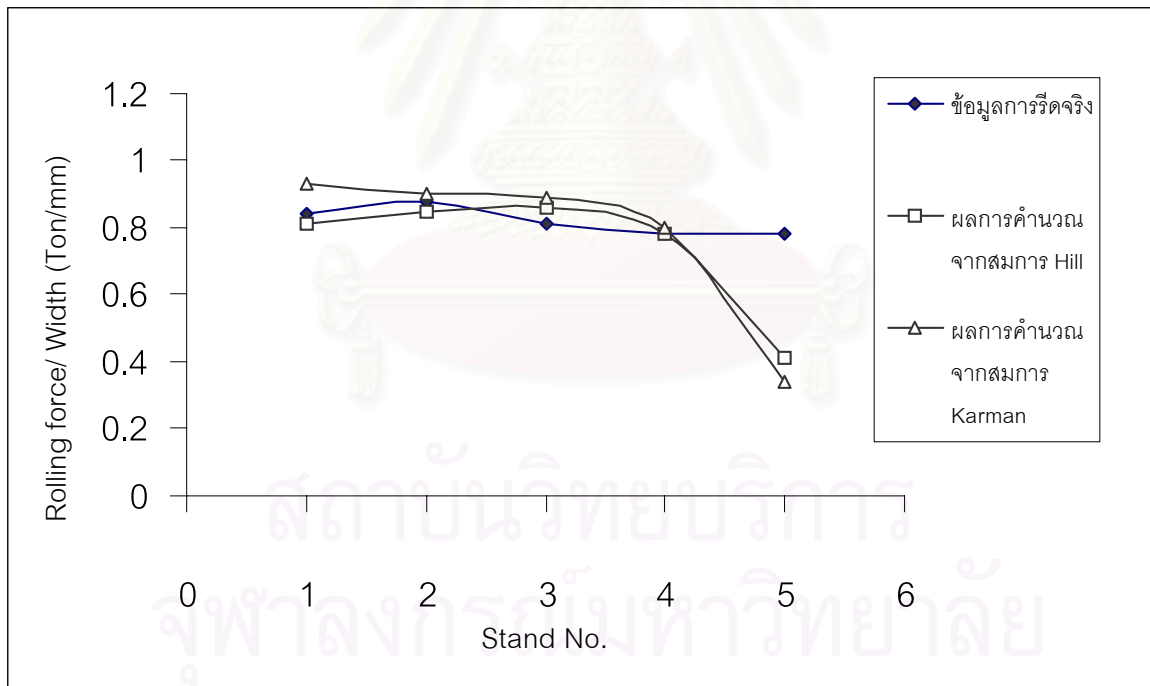
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	2.80	2.10	1.42	0.98	0.71
hout (mm)	2.10	1.42	0.98	0.71	0.70
Reduction (%)	25.0	32.3	30.9	27.5	1.4
Vr (mm/s)	3080	4827	6887	9463	9933
qf (kg/mm ²)	14.9	15.0	15.9	15.6	5.3
qb (kg/mm ²)	4.4	14.9	15.0	15.9	15.6
w (mm)	1225	1225	1225	1225	1225
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 4 กับผลการคำนวณ

ข้อมูลชุดที่ 5

Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.40	1.66	1.18	0.84
hout (mm)	2.40	1.66	1.18	0.84	0.80
Reduction (%)	25.0	30.8	28.9	28.8	4.7
Vr (mm/s)	2651	4137	5725	7958	8616
qf (kg/mm ²)	16.5	14.5	14.2	15.2	5.1
qb (kg/mm ²)	4.7	16.5	14.5	14.2	15.2
w (mm)	1709	1709	1709	1709	1709
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 5 กับผลการคำนวณ

วิเคราะห์ผลการคำนวณกับข้อมูลการรีดจริง

1. เมื่อพิจารณารูปแสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงทั้ง 5 ชุดกับผลการคำนวณ จะเห็นว่าค่า Rolling force ของผลการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงยกเว้นในแท่นรีดสุดท้ายที่มีค่าที่แตกต่างกันโดยมีสาเหตุคือ

1.1 เนื่องจากที่แท่นรีดสุดท้ายมีผลต่างของความหนา (Δh) น้อยมากจึงส่งผลทำให้ค่า Roll flattening ของการคำนวณมีค่ามากทำให้ผลการคำนวณผิดพลาดได้

1.2 ชิ้นงานที่แท่นรีดสุดท้ายจะมีความเร็วสูงสุดจนทำให้ชิ้นงานมีผิวที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ค่าส.ป.ส. ความเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับลูกรีดมีค่ามาก ส่งผลทำให้ค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงมีค่ามากตามไปด้วย

2. ผลการคำนวณค่า Rolling force จากสมการของ Hill จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงมากกว่าจากสมการของ Karman โดยสรุปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force/width ระหว่างค่าจากข้อมูลการรีดจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Hill และ Karman

ข้อมูลชุดที่	Rolling force / Width (Ton/mm)														
	ข้อมูลการรีดจริง					Hill's Equation					Karman's Equation				
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
1	0.91	0.96	0.95	0.85	0.75	0.91	0.92	0.93	0.81	0.54	0.86	0.94	0.97	0.95	0.53
2	0.82	0.85	0.83	0.79	0.69	0.82	0.91	0.87	0.78	0.49	0.87	0.92	0.93	0.92	0.51
3	0.92	0.91	0.89	0.82	0.81	0.87	0.91	0.91	0.82	0.45	0.93	0.96	0.95	0.95	0.52
4	0.78	0.84	0.82	0.79	0.66	0.79	0.86	0.84	0.72	0.49	0.96	0.93	0.98	0.93	0.37
5	0.84	0.88	0.81	0.78	0.78	0.81	0.85	0.86	0.78	0.41	0.93	0.89	0.89	0.79	0.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 เปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง

ในกระบวนการทำแบบจำลองสามารถเปรียบเทียบผลต่างของค่า Rolling force (ΔP) กับข้อมูลการรีดจริงได้ โดยอาศัยการพิจารณาข้อมูลการรีดจริง 2 ชุดข้อมูลที่มีตัวแปรเหมือนกัน หรือใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรของข้อมูลการรีดจริง 2 ชุดข้อมูล

สิ่งที่แตกต่างกัน	สิ่งที่เหมือนกัน
1. ความหนาของวัตถุดิบ	1. ความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีด 2. ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด 3. ความกว้างของวัสดุ 4. ความเร็วของลูกรีด 5. รัศมีของลูกรีด

โดยเสมือนว่าข้อมูลการรีดจริง ในแต่ละชุดข้อมูลเป็นข้อมูลที่วัดในช่วงสภาวะคงที่ในการรีด (Steady State) ดังนั้นข้อมูลของการรีดจริง 2 ชุดข้อมูลจึงเปรียบเสมือนเป็นชุดของข้อมูลในช่วงสภาวะคงที่ 2 สภาวะและเนื่องจากมีตัวแปรในการรีดที่เหมือนกัน จึงสามารถนำมาคำนวณหาผลต่างของค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงทั้ง 2 ชุดนั้น แล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลในการรีดจริง ถ้าผลต่างของค่า Rolling force จากข้อมูลในการรีดจริงและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันนั้นแสดงว่า แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณนี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สภาวะพลศาสตร์ในการรีดได้ โดยได้เปรียบเทียบและแสดงผลของผลต่างของค่า Rolling force จากข้อมูลการรีดจริง และจากการคำนวณในรูปที่ 4.6 ซึ่งเปรียบเทียบผลต่างของค่า Rolling force ที่ข้อมูล 2 ชุดมีความหนาของวัตถุดิบต่างกัน 0.1 มิลลิเมตร , รูปที่ 4.7 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลต่างของค่า Rolling force ซึ่งมีผลต่างของความหนาของวัตถุดิบ 0.2 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.8 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลต่างของค่า Rolling force ซึ่งมีผลต่างของความหนาของวัตถุดิบ 0.3 มิลลิเมตร ดังต่อไปนี้

44 เปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 1

ข้อมูลชุดที่	H1 (mm)	Outlet thickness (mm)					Width (mm)	Vr5 (m/min)	qb1 (kg/mm ²)	Tension (kg/mm ²)					qf5 (kg/mm ²)	Rolling force / width (ton/mm)				
		#1	#2	#3	#4	#5				#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#1		#2	#3	#4	#5	
1	3.20	2.64	2.10	2.67	1.34	1.20	930	425	4.7	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3	0.84	0.85	0.82	0.83	0.69	
2	3.30	2.64	2.10	2.65	1.34	1.20	930	420	4.7	15.3	20.3	22.0	19.3	6.4	0.87	0.87	0.83	0.83	0.69	

Stand No.	ผลต่างของค่า Rolling force (Ton/mm)	
	จากข้อมูลการรีดจริง	จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง
1	0.0300	0.0256
2	0.0200	0.0166
3	0.0100	0.0050
4	0	0
5	0	0

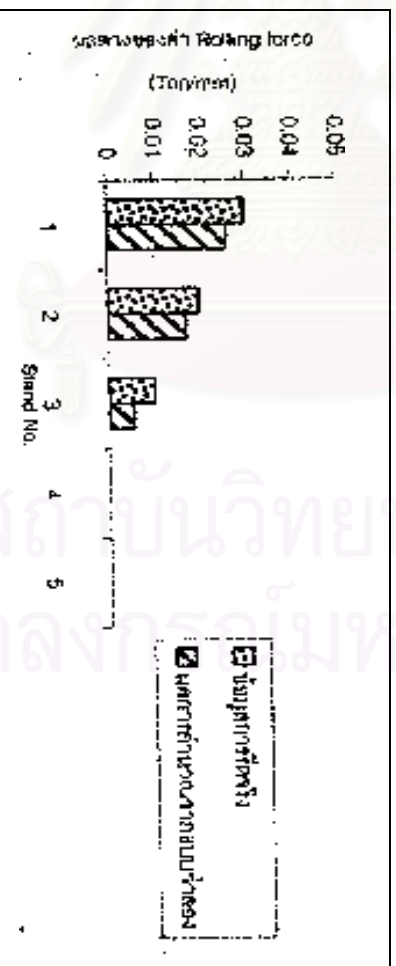


รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 1

เปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 2

ข้อมูลชุดที่	H1 (mm)	Outlet thickness (mm)					Width (mm)	Vr5 (m/min)	qb1 (kg/mm ²)	Tension (kg/mm ²)					qf5 (kg/mm ²)	Rolling force / width (ton/mm)				
		#1	#2	#3	#4	#5				#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#1		#2	#3	#4	#5	
1	2.60	2.12	1.50	1.07	0.79	0.75	1545	907	4.8	16.6	15.3	15.5	15.7	4.9	0.83	0.79	0.81	0.77	0.69	
2	2.80	2.10	1.50	1.05	0.78	0.75	1540	905	4.8	16.6	15.3	15.5	15.6	4.9	0.86	0.81	0.82	0.77	0.69	

Stand No.	ผลต่างของค่า Rolling force (Ton/mm)	
	จากข้อมูลการรีดจริง	จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง
1	0.0300	0.0266
2	0.0200	0.0175
3	0.0100	0.0054
4	0	0
5	0	0

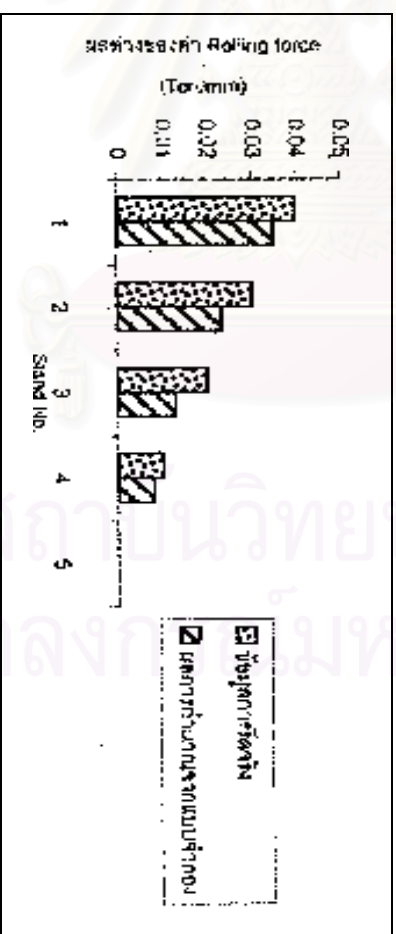


รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 2

เปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 3

ข้อมูลชุดที่	H1 (mm)	Outlet thickness (mm)					Width (mm)	Vr5 (m/min)	qb1 (kg/mm ²)	Tension (kg/mm ²)					qf5 (kg/mm ²)	Rolling force / width (ton/mm)				
		#1	#2	#3	#4	#5				#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#1		#2	#3	#4	#5	
1	3.60	3.00	2.44	1.99	1.67	1.60	1165	209	5.4	16.9	17.1	17.6	16.5	4.7	0.85	0.88	0.89	0.83	0.75	
2	3.80	3.01	2.45	2.00	1.67	1.60	1160	209	5.4	17	17.1	17.6	16.5	4.7	0.89	0.91	0.91	0.84	0.75	

Stand No.	ผลต่างของค่า Rolling force (Ton/mm)	
	จากข้อมูลการรีดจริง	จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง
1	0.0400	0.0502
2	0.0300	0.0237
3	0.0200	0.0135
4	0.0100	0.0855
5	0	0



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลต่างของ Rolling force (ΔP) ของข้อมูลการรีดจริงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองครั้งที่ 3

วิเคราะห์ผลการคำนวณค่าผลต่างของ Rolling force กับข้อมูลการรีดจริง

เมื่อพิจารณารูปแสดงการเปรียบเทียบผลต่างของค่า Rolling force ของข้อมูลการรีดจริงกับการคำนวณทั้ง 3 รูปแล้ว จะเห็นได้ว่าค่าผลต่างของ Rolling force ของการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลการรีดจริงโดยค่าสรุปเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคำนวณค่าผลต่างของ Rolling force

ครั้งที่	ΔH_1	แท่นรีดที่	ค่า ΔP จากข้อมูลการรีดจริง	ค่า ΔP จากการคำนวณ	เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ
1	0.1	#1	0.03	0.025	84%
		#2	0.02	0.016	80%
		#3	0.01	0.004	40%
		#4	0	0	100%
		#5	0	0	100%
2	0.2	#1	0.03	0.026	87%
		#2	0.02	0.017	85%
		#3	0.01	0.005	50%
		#4	0	0	100%
		#5	0	0	100%
3	0.3	#1	0.04	0.035	88%
		#2	0.03	0.023	78%
		#3	0.02	0.013	65%
		#4	0.01	0.008	82%
		#5	0	0	100%

กรณีความหนาขาเข้ามี ΔH_1 ไม่เกิน 0.2 mm ให้ค่า ΔP มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตั้งแต่แท่นรีดแรก จนถึงแท่นรีดที่ 3 ส่วนแท่นรีดที่ 4 และแท่นรีดที่ 5 ไม่ได้รับผลกระทบส่วนกรณีความหนาขาเข้ามี ΔH_1 เท่ากับ 0.3 mm ทำให้ ΔP มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตั้งแต่แท่นรีดแรก จนถึงแท่นรีดที่ 4 ส่วนแท่นรีดที่ 5 ไม่ได้รับผลกระทบเมื่อระยะห่างระหว่างลูกรีดและความเค้นแรงดึงมีค่าคงที่

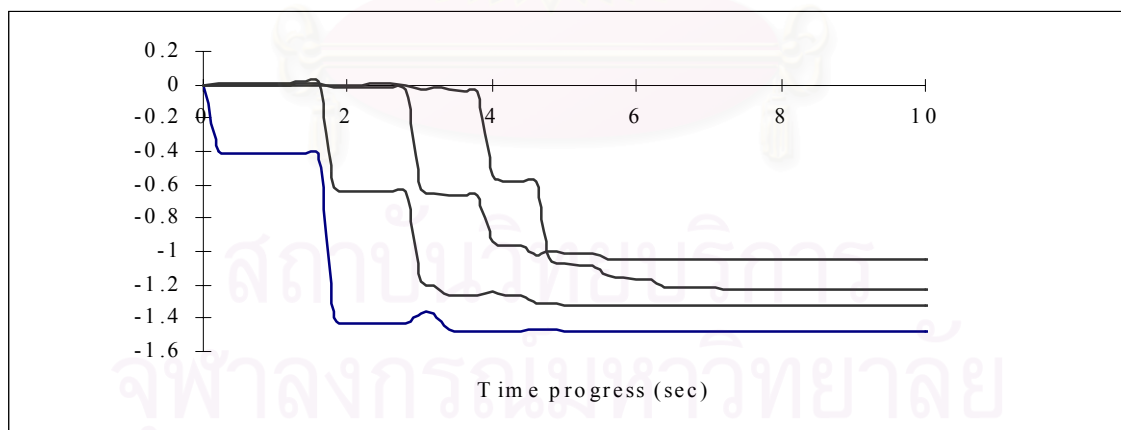
4.4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ความหนาโดยพิจารณาการรบกวนความหนาของวัตถุดิบ

ตารางข้อมูล

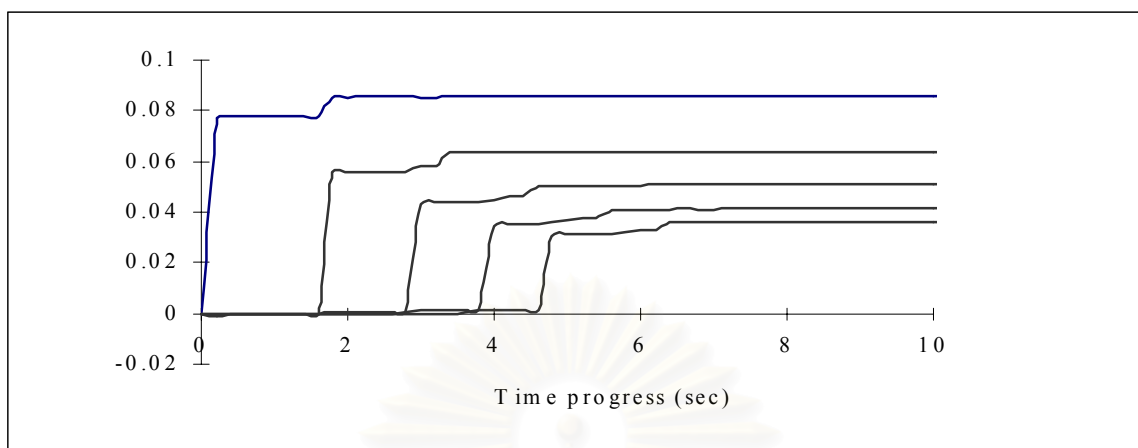
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0.16	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0
ΔV_r	0	0	0	0	0



รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความหนาของวัตถุดิบ 5 %



รูปที่ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวน 5% ของความหนาของวัตถุบิด

รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของแท่นรีดต่างๆที่รบกวน 5% ของความหนาของวัตถุบิด นั่นคือที่ทางเข้าแท่นรีดที่ 1 วัตถุบิดมีความหนา 3.2 มิลลิเมตร แต่เมื่อมีการรบกวนความหนา 5% แสดงว่าความหนาของวัตถุบิดเปลี่ยนไปจาก 3.2 มิลลิเมตร เพิ่มอีก 5% จะได้ $3.2 + 0.16 = 3.36$ มิลลิเมตร โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของวัตถุบิดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 1 มีค่าความหนาขาออกเพิ่มขึ้นมากที่สุด (Δh_1) คือเพิ่ม 0.0857 มิลลิเมตร และส่งผลให้ความหนาขาออกเพิ่มขึ้นในทุกแท่นรีดดังแสดงในตารางที่ 4.6 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดทุกแท่นรีดมีค่าลดลงโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.6 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 5% ของความหนาของวัตถุบิด

แท่นรีดที่	ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)		ผลต่าง (มิลลิเมตร)
	ที่ตั้งค่าไว้ (Roll gap setting)	ความหนาขาออกที่ได้หลังการรบกวน	
1	2.64	2.7275	+ 0.0875
2	2.10	2.2240	+ 0.0640
3	1.67	1.7208	+ 0.0508
4	1.34	1.3814	+ 0.0414
5	1.20	1.2363	+ 0.0363

4.5 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ความหนาโดยพิจารณาการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีด

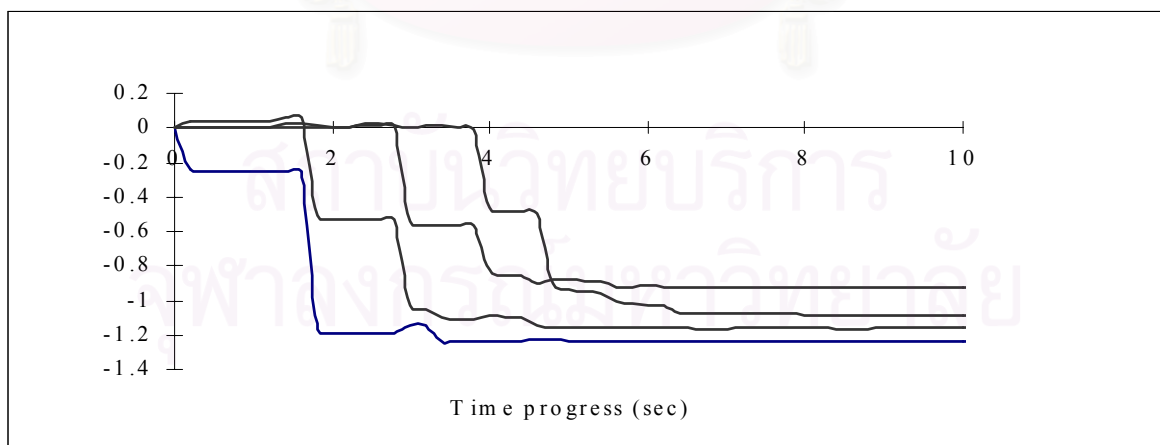
4.5.1 แท่นรีดที่ 1

ตารางข้อมูล

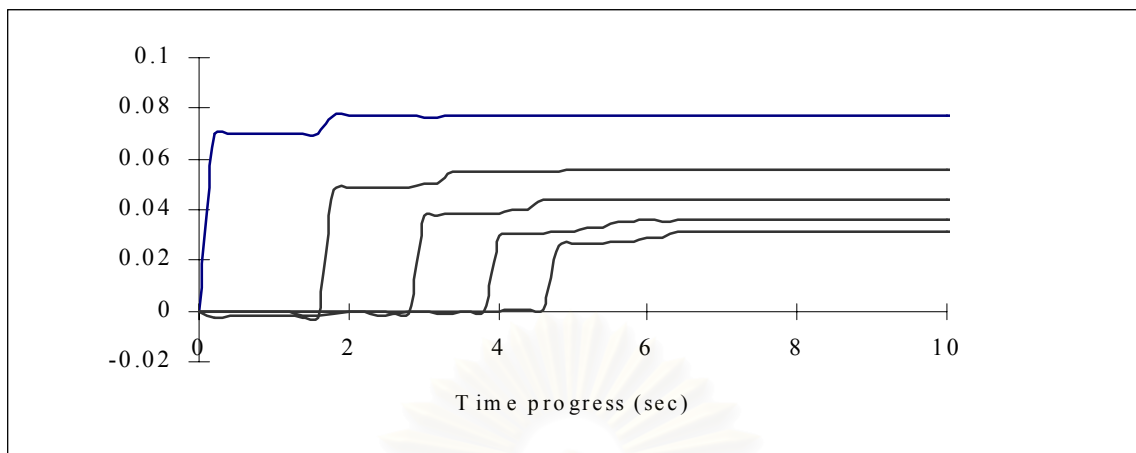
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0.132	0	0	0	0
ΔV_r	0	0	0	0	0



รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 5 % ของ S_1



รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีดแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 5 % ของ S_1

รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของแท่นรีดต่างๆที่รบกวน 5% ของระยะห่างระหว่างลูกรีดที่แท่นรีดที่ 1 นั่นคือที่แท่นรีดที่ 1 มีระยะห่างระหว่างลูกรีด 2.67 มิลลิเมตร แต่เมื่อมีการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกรีด 5% แสดงว่าระยะห่างระหว่างลูกรีดเปลี่ยนไปจาก 2.67 มิลลิเมตร เพิ่มอีก 5% จะได้ $2.64 + 0.132 = 2.772$ มิลลิเมตร โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลูกรีดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 1 มีค่าความหนาขาออกเพิ่มขึ้นมากที่สุด (Δh_1) คือเพิ่ม 0.0772 มิลลิเมตร และส่งผลให้ความหนาขาออกเพิ่มขึ้นในทุกแท่นรีดดังแสดงในตารางที่ 4.7 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดทุกแท่นรีดมีค่าลดลงโดยพิจารณาจากรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.7 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 5% ของระยะห่างระหว่างลูกรีดในแท่นรีดที่ 1

แท่นรีดที่	ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)		ผลต่าง (มิลลิเมตร)
	ที่ตั้งค่าไว้ (Roll gap setting)	ความหนาขาออกที่ได้หลังการรบกวน	
1	2.64	2.7172	+ 0.0772
2	2.10	2.1551	+ 0.0551
3	1.67	1.7141	+ 0.0441
4	1.34	1.3760	+ 0.0360
5	1.20	1.2315	+ 0.0315

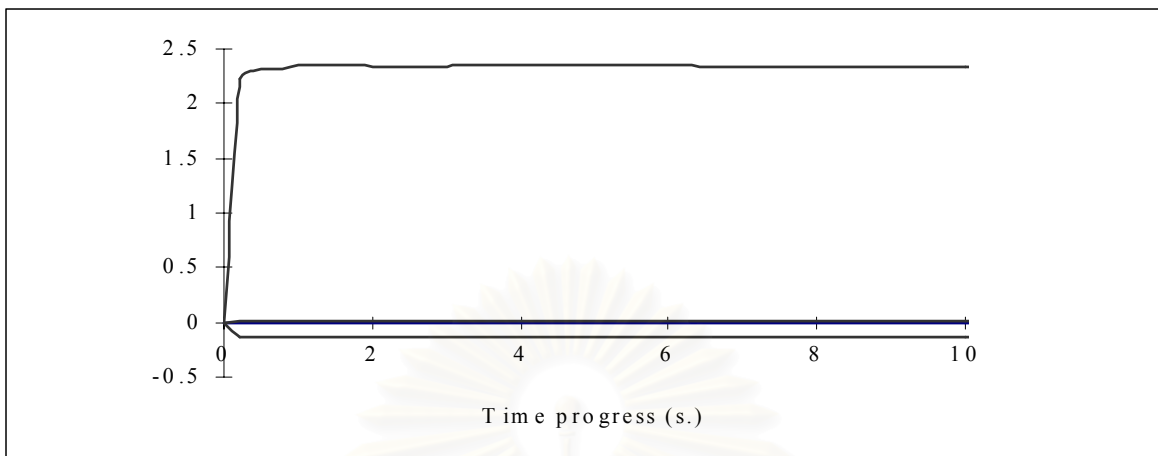
4.5.2 แท่นรีดที่ 5

ตารางข้อมูล

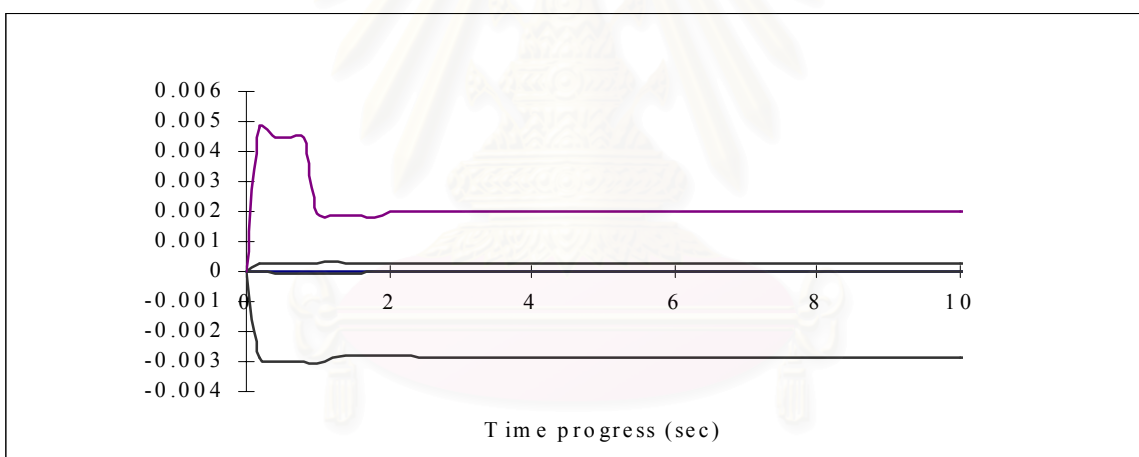
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0.06
ΔV_r	0	0	0	0	0



รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกกรีดแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 5 % ของ S_5



รูปที่ 4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกกรีดแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 5 % ของ S_5

รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของแท่นรีดต่างๆที่รบกวน 5% ของระยะห่างระหว่างลูกกรีดที่แท่นรีดที่ 5 นั่นคือที่แท่นรีดที่ 5 มีระยะห่างระหว่างลูกกรีด 1.2 มิลลิเมตร แต่เมื่อมีการรบกวนระยะห่างระหว่างลูกกรีด 5% แสดงว่าระยะห่างระหว่างลูกกรีด เปลี่ยนไปจาก 1.2 มิลลิเมตร เพิ่มอีก 5% จะได้ $1.20 + 0.06 = 1.26$ มิลลิเมตร โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลูกกรีดที่แท่นรีดที่ 5 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 (Δh_5) มีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่าง

ทันทีทันใดเพราะค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 4 และที่ 5 ($\Delta\sigma_4$) มีค่าเพิ่มขึ้น (พิจารณารูปที่ 4.14) แต่ในที่สุดความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 จะลดลงจนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาน้อยมากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและความหนาขาออกได้มีการเปลี่ยนแปลงในทุกแท่นรีดดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 5% ของระยะห่างระหว่างลูกรีดในแท่นรีดที่ 5

แท่นรีดที่	ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)		ผลต่าง (มิลลิเมตร)
	ที่ตั้งค่าไว้ (Roll gap setting)	ความหนาขาออกที่ได้หลังการรบกวน	
1	2.64	2.6400	0
2	2.10	2.1000	0
3	1.67	1.6705	+ 0.0005
4	1.34	1.3372	-0.0028
5	1.20	1.2021	+ 0.0021

4.6 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ความหนาโดยพิจารณาการรบกวนความเร็วของลูกกรีด

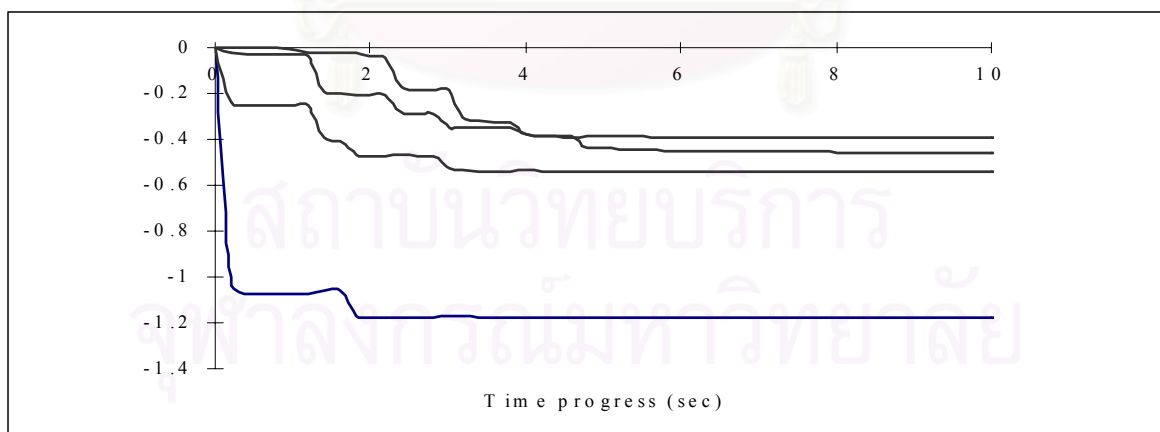
4.6.1 แท่นรีดที่ 1

ตารางข้อมูล

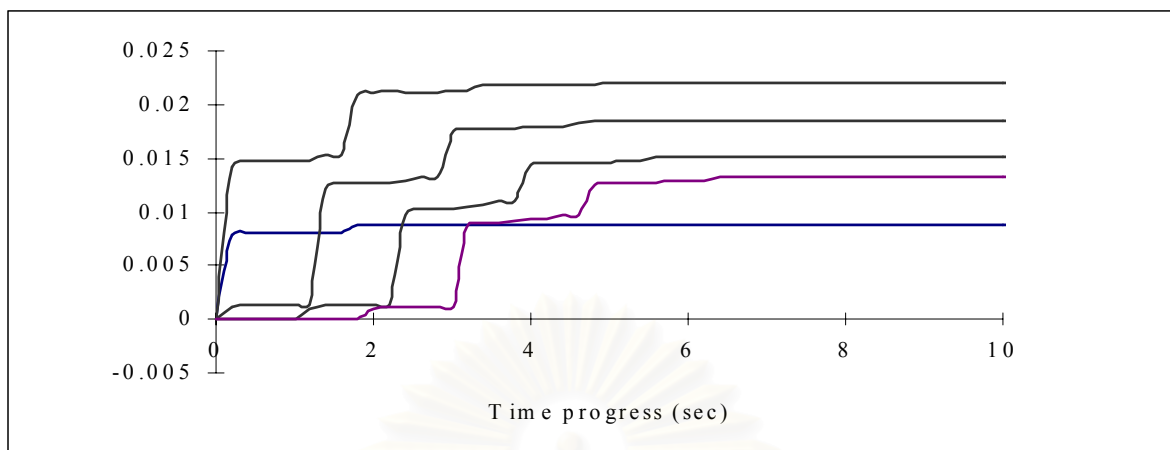
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305
Vr (mm/s)	3000	4000	5000	6000	7000

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0
ΔV_r	30	0	0	0	0



รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความเร็วของลูกกรีดในแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 1 % ของ V_{r1}



รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 1 โดยรบกวน 1 % ของ Vr_1

รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของแท่นรีดต่างๆที่รบกวน 1% ของความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 1 นั่นคือที่แท่นรีดที่ 1 มีความเร็วของลูกรีด 3000 มิลลิเมตร/วินาที แต่เมื่อมีการรบกวนความเร็วของลูกรีด 1% แสดงว่าความเร็วของลูกรีดเปลี่ยนไปจาก 3000 มิลลิเมตร/วินาที เพิ่มอีก 1% จะได้ $3000 + 30 = 3030$ มิลลิเมตร/วินาที โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 1 (Δh_1) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือเพิ่ม 0.0088 มิลลิเมตร และส่งผลให้ความหนาขาออกเพิ่มขึ้นในทุกแท่นรีดโดยเฉพาะที่ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 2 มีค่าความหนาขาออก (Δh_2) เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือเพิ่ม 0.0219 มิลลิเมตร เพราะค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 1 และที่ 2 (Δq_1) มีค่าลดลงมากที่สุด (พิจารณารูปที่ 4.16) และส่งผลให้ความหนาขาออกเพิ่มขึ้นในทุกแท่นรีดดังแสดงในตารางที่ 4.9 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดทุกแท่นรีดมีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 1% ของความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 1

แท่นรีดที่	ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)		ผลต่าง (มิลลิเมตร)
	ที่ตั้งค่าไว้ (Roll gap setting)	ความหนาขาออกที่ได้หลังการรบกวน	
1	2.64	2.6488	+ 0.0088
2	2.10	2.1219	+ 0.0219
3	1.67	1.6884	+ 0.0184
4	1.34	1.3551	+ 0.0151
5	1.20	1.2132	+ 0.0132

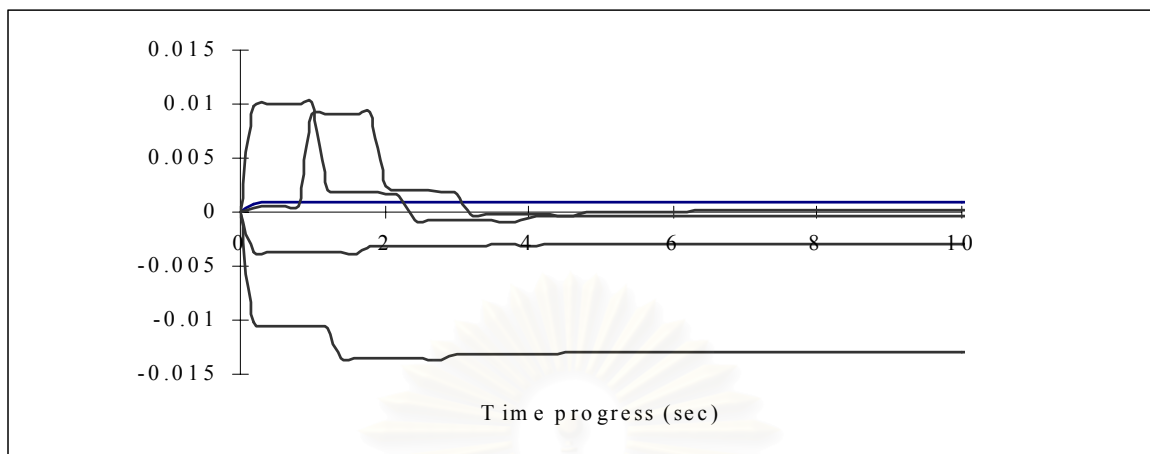
4.6.2 แท่นรีดที่ 3

ตารางข้อมูล

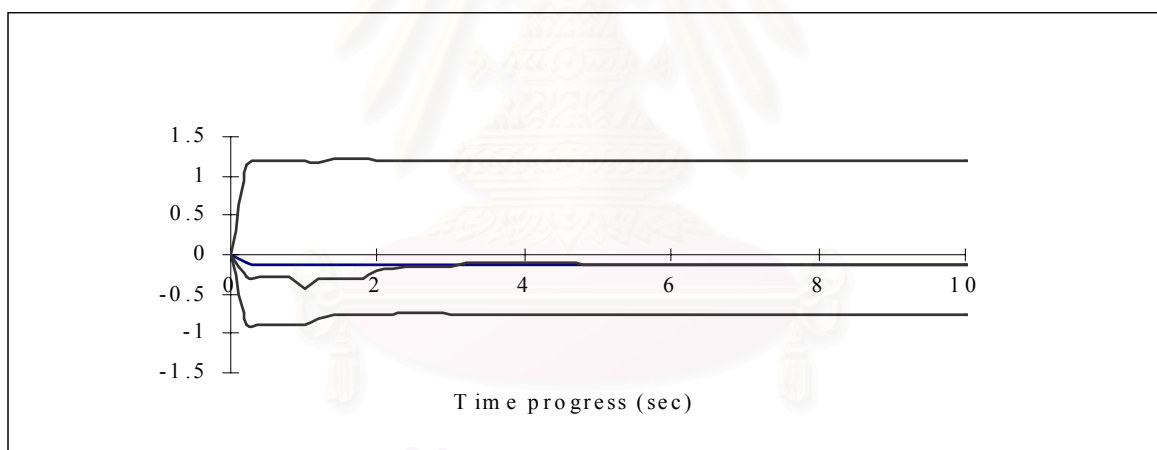
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305
Vr (mm/s)	3000	4000	5000	6000	7000

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0
ΔV_r	0	0	50	0	0



รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 โดยรบกวน 1 % ของ Vr_3



รูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 3 โดยรบกวน 1 % ของ Vr_3

รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของแท่นรีดต่างๆที่รบกวน 1% ของความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 3 นั่นคือที่แท่นรีดที่ 3 มีความเร็วของลูกรีด 5000 มิลลิเมตร/วินาที แต่เมื่อมีการรบกวนความเร็วของลูกรีด 1% แสดงว่าความเร็วของลูกรีดเปลี่ยนไปจาก 5000 มิลลิเมตร/วินาที เพิ่มอีก 1% จะได้ $5000 + 50 = 5050$ มิลลิเมตร/วินาที โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 3 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ส่งผลให้ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 3 (Δh_3) มี

ค่าลดลง คือลดลง 0.013 มิลลิเมตรเพราะค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 2 และที่ 3 (Δq_2) มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด (พิจารณารูปที่ 4.18) และส่งผลให้ความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเพราะค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 3 และที่ 4 (Δq_3) มีค่าลดลง แต่ในที่สุดความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 5 (Δh_5) จะลดลงจนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาน้อยมากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความหนาขาออกเปลี่ยนแปลงในทุกแท่นรีดดังแสดงในตารางที่ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดทุกแท่นรีดมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.10 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 1% ของความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 3

แท่นรีดที่	ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)		ผลต่าง (มิลลิเมตร)
	ที่ตั้งค่าไว้ (Roll gap setting)	ความหนาขาออกที่ได้หลังการรบกวน	
1	2.64	2.6410	+ 0.0010
2	2.10	2.0970	- 0.0030
3	1.67	1.6570	- 0.0130
4	1.34	1.3397	- 0.0003
5	1.20	1.2001	+ 0.0001

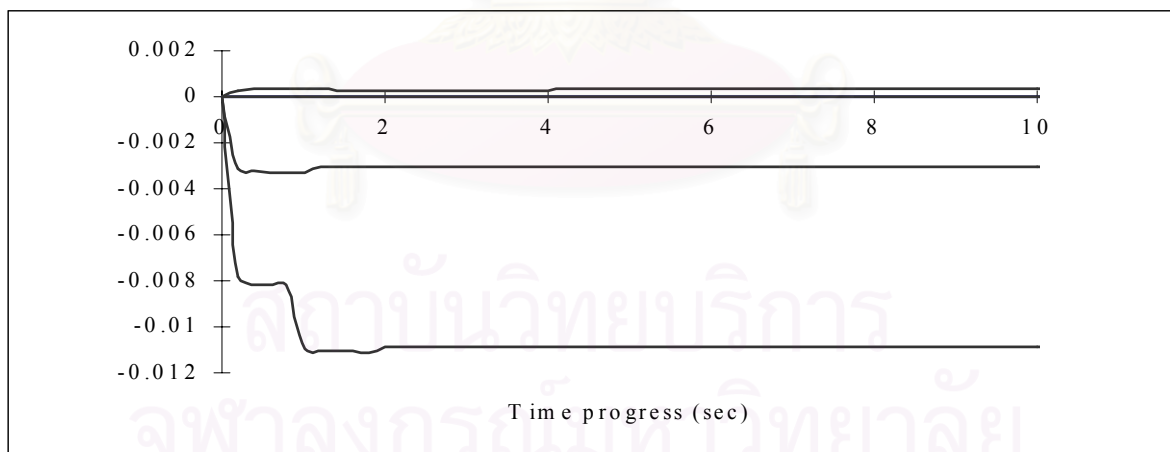
4.6.3 แท่นรีดที่ 5

ตารางข้อมูล

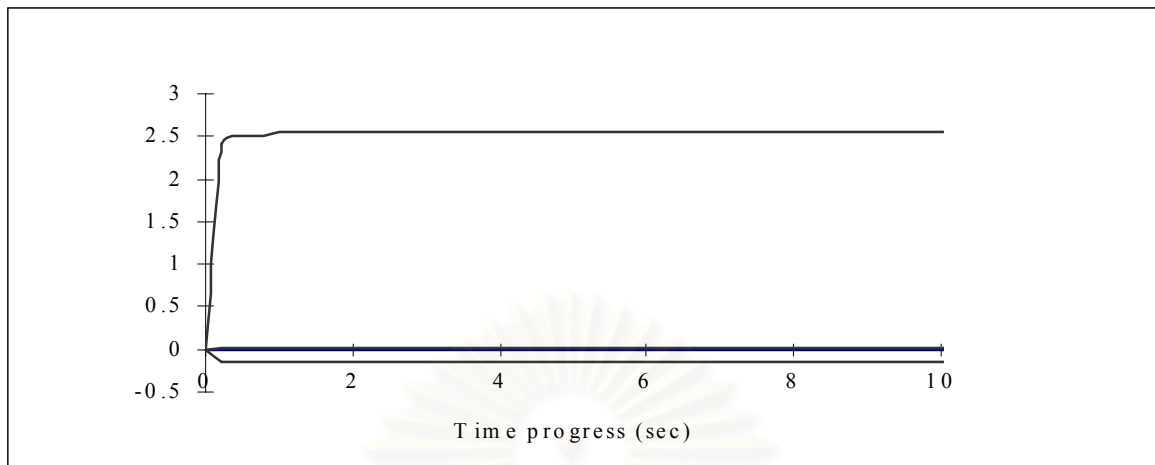
Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305
Vr (mm/s)	3000	4000	5000	6000	7000

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
ΔV_{in}	1	1	1	1	1
ΔV_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0
ΔV_r	0	0	0	0	70



รูปที่ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่นรีดที่ 5 โดยรบกวน 1 % ของ V_{r5}



รูปที่ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นดึงโดยการรบกวนความเร็วของลูกรีดในแท่น รีด ที่ 5 โดยรบกวน 1 % ของ Vr_5

รูปที่ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของแท่นรีดต่างๆที่รบกวน 1% ของความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 5 นั่นคือที่แท่นรีดที่ 5 มีความเร็วของลูกรีด 7000 มิลลิเมตร/วินาที แต่เมื่อมีการรบกวนความเร็วของลูกรีด 1% แสดงว่าความเร็วของลูกรีดเปลี่ยนไปจาก 7000 มิลลิเมตร/วินาที เพิ่มอีก 1% จะได้ $7000 + 70 = 7070$ มิลลิเมตร/วินาที โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 5 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ส่งผลให้ความหนาขาออกของแท่นรีดที่ 5 (Δh_5) มีค่าลดลง คือลดลง 0.0108 มิลลิเมตรเพราะค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่ 4 และที่ 5 ($\Delta \sigma_4$) มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด (พิจารณารูปที่ 4.20) และส่งผลให้ความหนาขาออกที่แท่นรีดที่ 4 (Δh_4) ลดลงด้วย และความหนาขาออกเปลี่ยนแปลงในทุกแท่นรีดดังแสดงในตารางที่ 4.11

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 แสดงผลต่างของความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีดเนื่องจากการรบกวน 1% ของความเร็วของลูกรีดที่แท่นรีดที่ 5

แท่นรีดที่	ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)		ผลต่าง (มิลลิเมตร)
	ที่ตั้งค่าไว้ (Roll gap setting)	ความหนาขาออกที่ได้หลังการรบกวน	
1	2.64	2.6400	0
2	2.10	2.1000	0
3	1.67	1.6703	+ 0.0003
4	1.34	1.3397	- 0.0003
5	1.20	1.1892	- 0.0108

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การออกแบบระบบการควบคุมความหนาและระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด

5.1 ระบบการควบคุมความหนา

ระบบการควบคุมความหนา (Thickness control) เป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับกระบวนการรีด เพื่อเป็นการให้ได้ผลผลิตที่มากที่สุดโดยใช้วัตถุดิบในปริมาณเท่าเดิม อีกทั้งยังได้ความหนาของวัสดุตามที่ต้องการมากที่สุด โดยการที่จะสร้างระบบการควบคุมความหนานั้นจำเป็นต้องพิจารณากระบวนการรีดในสภาวะพลศาสตร์ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์เพื่อสำหรับการออกแบบระบบการควบคุมความหนา โดยเพิ่มสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับความเร็วของลูกรีดลงไปในรูปแบบจำลองดังนี้

$$Vr = K * (h_{out} * qf - H_{in} * qb) * w$$

$$\Delta Vr - K * w (h_{out} * \Delta qf + qf * \Delta h_{out} - H_{in} * \Delta qb - qb * \Delta H_{in}) = 0$$

โดย K = ค่า Gain factor

เมื่อเพิ่มสมการการควบคุมความหนาทำให้สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นเป็น 8 สมการและเมตริกซ์หลักเพิ่มขึ้นจาก $33 * 50$ เป็น $38 * 50$ โดยรายละเอียดของโปรแกรมอยู่ที่ภาคผนวก โดยตารางข้อมูลในการคำนวณและตารางการตั้งเงื่อนไขขอบเขตมีดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางข้อมูล

Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.20	2.64	2.10	1.67	1.34
hout (mm)	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20
qf (kg/mm ²)	0	15.3	20.3	22.5	19.3
qb (kg/mm ²)	15.3	20.3	22.5	19.3	6.3
w (mm)	930	930	930	930	930
Roll radius(mm)	305	305	305	305	305

ตั้งเงื่อนไขขอบเขต

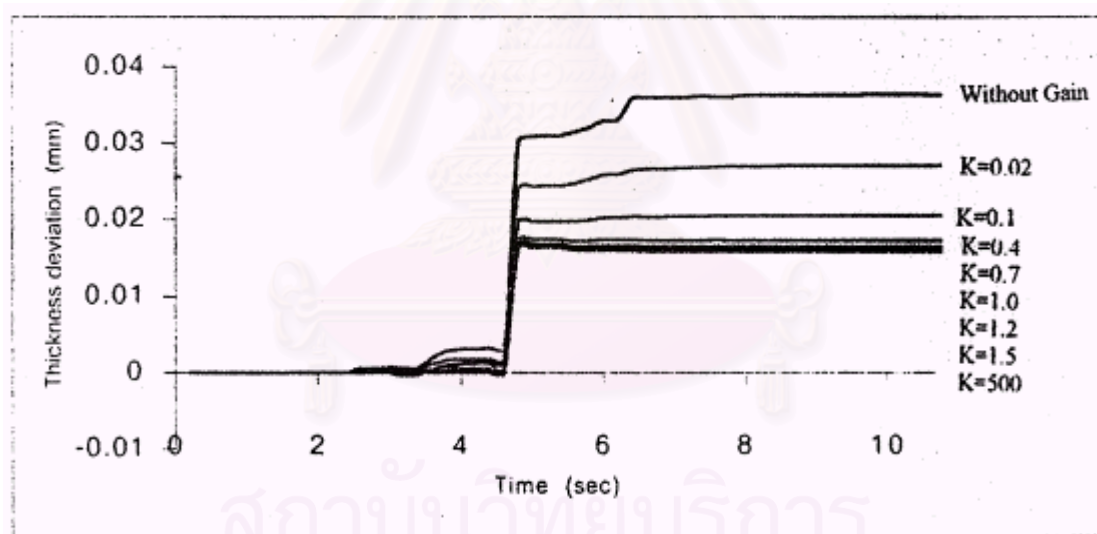
StandNo.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Δh	1	1	1	1	1
ΔH	0.16	0	0	0	0
ΔP	1	1	1	1	1
Δqf	1	1	1	1	0
Δqb	0	1	1	1	1
Δf	1	1	1	1	1
Δv_{in}	1	1	1	1	1
Δv_{out}	1	1	1	1	1
ΔS	0	0	0	0	0
ΔV_r	1	1	1	1	1

เมื่อพิจารณาที่ความหนาที่แทนริดสุดท้าย (Final thickness) จะพบว่าในกรณีที่ยังไม่มีการควบคุมความหนา ค่า $\Delta h_5 = 0.0363$ มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.4) แต่เมื่อมีการควบคุมความหนาทำให้ค่า Δh_5 ลดลง นั่นคือช่วยลด Thickness deviation ที่แทนริดสุดท้ายได้โดย ขนาดของ Gain factor ก็มีส่วนในการลด Thickness deviation ด้วย ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ Gain factor ที่มีผลต่อ Thickness deviation

Value of Gain factor	Thickness deviation (mm)
No Gain	0.0363
0.02	0.0271
0.10	0.0205
0.40	0.0172
0.70	0.0166
1.00	0.0164
1.20	0.0163
1.50	0.0162
500.00	0.0157



รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ Gain factor ที่มีผลต่อ Thickness deviation

จากรูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ Gain factor ที่มีผลต่อ Thickness deviation จะเห็นได้ว่าค่า Gain factor ที่เหมาะสมสำหรับระบบการควบคุมความหนาอยู่ในช่วง 1.0 – 1.5 และเห็นได้ว่าการควบคุมความหนาทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกที่แท่นรีดสุดท้ายมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลดีสำหรับงานรีด

5.2 ระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด

ระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Tension control between stands) เป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากสำหรับกระบวนการรีดเช่นกัน เพราะในกระบวนการรีดมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดมีค่าคงที่จากที่ตั้งค่าไว้เพื่อให้องค์ประกอบการรีดมีค่าคงที่เช่นค่า Rolling force เป็นต้น

โดยการที่จะสร้างระบบการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด นั้นจำเป็นต้องพิจารณากระบวนการรีดในสภาวะพลศาสตร์เช่นเดียวกับระบบการควบคุมความหนา โดยใช้การควบคุมแบบ Proportional Integral หรือ PI Control นั้นเอง

Proportional Integral Control ¹¹

เป็นระบบในการควบคุมอย่างหนึ่งที่มีความนิยมในการนำมาใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์ (Servosystem) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Reset Controller โดยมีรูปแบบของสมการและ Block diagram ดังนี้

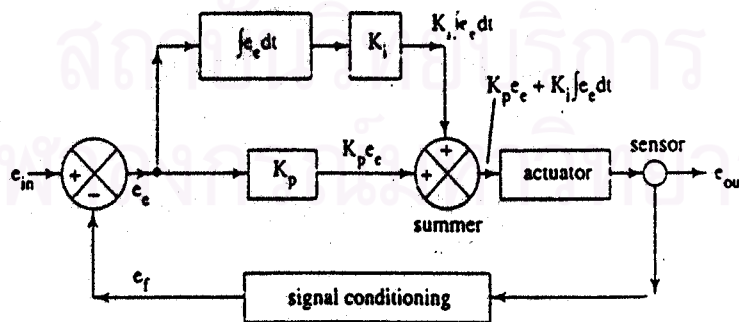
$$e_{out} = K_p * e_e + K_I \int e_e dt$$

โดยที่

K_p = Proportional gain

K_I = Integral gain

$\int e_e dt$ = ผลรวมของค่า Error ในเวลาที่พิจารณา



รูปที่ 5.2 แสดง Block diagram ของระบบ PI Control

โดยสมการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดมีดังนี้

$$V_r = K_p \cdot \Delta qf + K_I \int \Delta q \cdot dt$$

$$V_r @ 1\text{sec} = K_p \cdot \Delta q + K_I(qf1 - qf0) \cdot dt$$

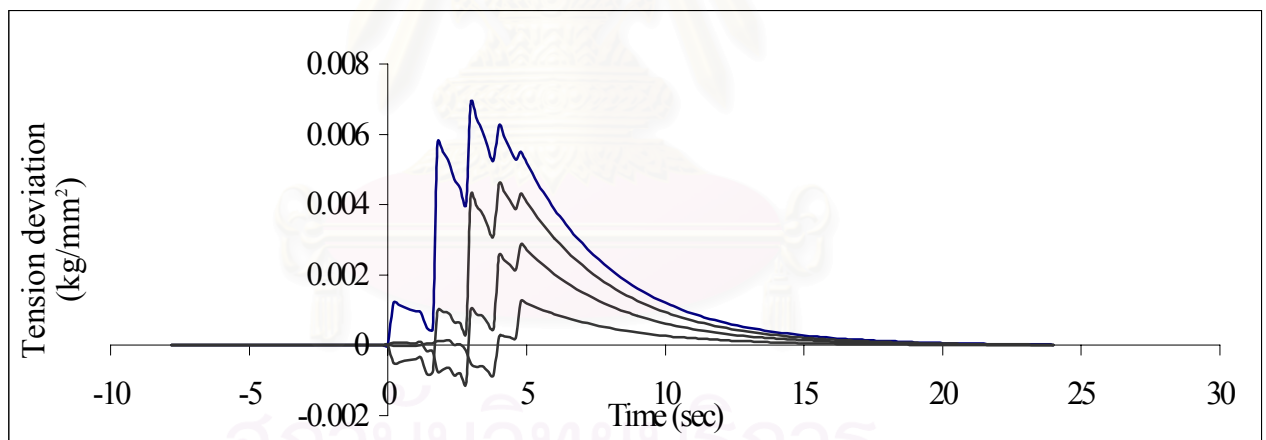
$$V_r @ 2\text{sec} = K_p \cdot \Delta q + K_I(qf2 - qf0) \cdot dt + V_r @ 1\text{sec}$$

$$\therefore V_r @ 2\text{sec} - V_r @ 1\text{sec} = \Delta V_{r2-1} = K_p \cdot \Delta q + K_I(qf2 - qf0) \cdot dt$$

$$\Delta V_{r2-1} = K_p \cdot \Delta q + K_I(qf1 + \Delta q - qf0) \cdot dt$$

$$\therefore \Delta V_r = (K_p + K_I \cdot dt) \cdot \Delta qf + (qf1 - qf0) \cdot K_I \cdot dt$$

เมื่อเพิ่มสมการการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดทำให้สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นเป็น 8 สมการและเมตริกซ์หลักเพิ่มขึ้นจาก 33×50 เป็น 38×50 โดยรายละเอียดของโปรแกรมอยู่ที่ภาคผนวก และได้ผลการคำนวณดังนี้

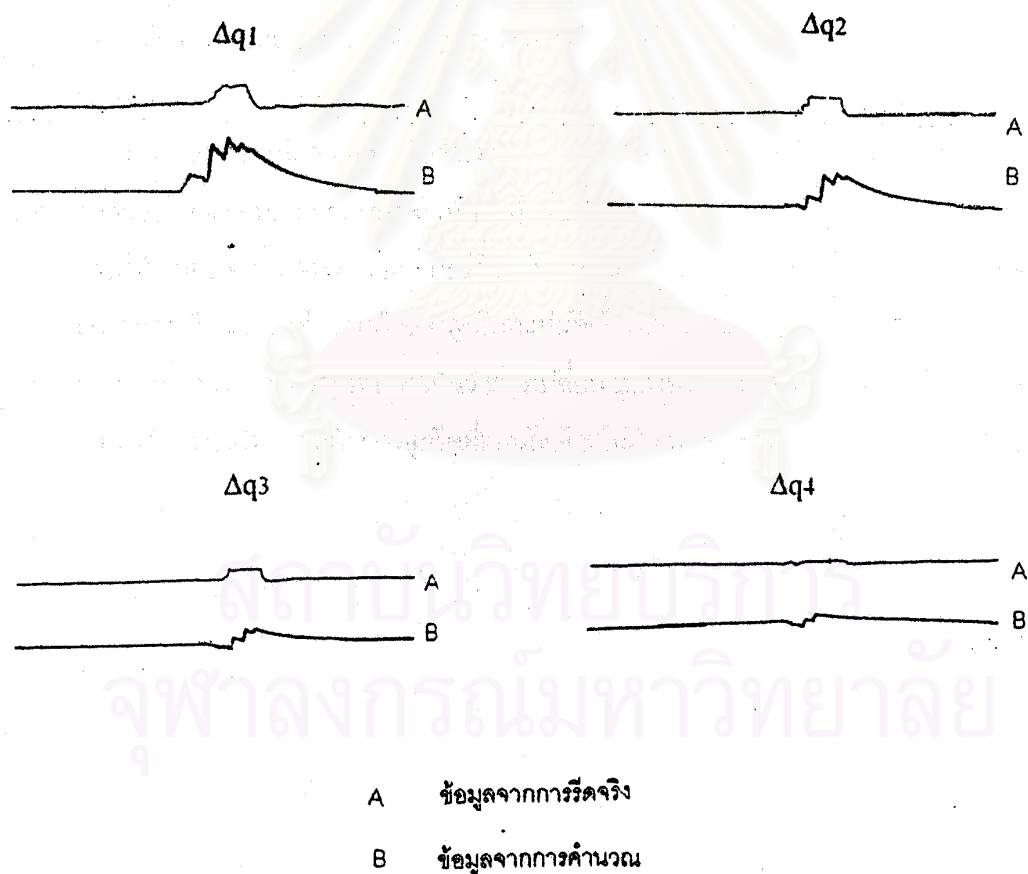


รูปที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณการควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด

การเปรียบเทียบระบบควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดจากข้อมูลการรีดจริงกับการคำนวณ

ตารางข้อมูลเบื้องต้น (ข้อมูลจาก NKK Corporation)

Stand No.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Hin (mm)	3.80	2.67	1.66	1.04	0.69
hout (mm)	2.67	1.66	1.04	0.69	0.69
qf (kg/mm ²)	14.8	14.3	14.8	16.2	4.8
qb (kg/mm ²)	4.9	14.8	14.3	14.8	16.2
w (mm)	1488	1488	1488	1488	1488



รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดจากข้อมูลการรีดจริงกับการคำนวณ

บทที่ 6

สรุปผล

ในกระบวนการการรีดเย็นต่อเนื่องชนิด 5 แทนรีด สภาวะที่ความหนาของวัตตุดิบ, ความเร็วของลูกรีด และระยะห่างระหว่างลูกรีด มีการเปลี่ยนแปลง เช่น ความหนาของวัตตุดิบที่เข้าแทนรีดแรกมีค่าไม่สม่ำเสมอ เหล่านี้เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการการรีดซึ่งควบคุมได้ยาก ดังนั้นผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองจึงมีความจำเป็นเพื่อวิเคราะห์และหาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกซึ่งจากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1 ค่า Rolling force ที่คำนวณจากสมการของ Hill มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการรีดจริงซึ่งแม่นยำกว่าค่าที่คำนวณจากสมการของ Karman
- 2 สำหรับความหนาขาเข้าของเหล็กแผ่นที่มีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร จะทำให้ค่า Rolling force มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตั้งแต่แทนแรกจนถึงแทนรีดที่ 3 ส่วนแทนรีดที่ 4 และแทนรีดที่ 5 ไม่มีผลกระทบ
- 3 จากผลการวิเคราะห์ความหนาจะเห็นว่าความหนาขาออกจะเพิ่มมากที่สุดที่แทนรีดที่มีการรบกวน
- 4 จากผลการวิเคราะห์ความหนาจะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกคือการเปลี่ยนแปลงที่ความหนาของวัตตุดิบ, การเปลี่ยนแปลงที่ระยะห่างระหว่างลูกรีดที่แทนรีดที่ 1 และการเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วของลูกรีดที่แทนรีดที่ 1 และแทนรีดที่ 5
- 5 จากผลการวิเคราะห์ความหนาจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงที่ระยะห่างระหว่างลูกรีดที่แทนรีดที่ 5 และการเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วของลูกรีดที่แทนรีดที่ 3 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออก

รายการอ้างอิง

1. R.A. Phillips. Amer. Inst. Elect. Eng. (1957-1) : 335.
2. M.R. Sekulic and J.M. Alexander. J. Mech. Engng. Sci. 4-4 (1962) : 301.
3. T. Araimura, M. Kamata and M. Saito. Proceedings Suppl. Trans. ISIJ. 11(1971) : 777 – 781.
4. F. Fujita and M. Kamata. Continuous Rolling Theory NKK Corporation, (1998) : 5-1 - 5-52.
5. R. Hill. The Mathematical Theory of Plasticity'. Oxford at the Clarendon Press, (1950).
6. T. Von. Karman. ZAMM, 5(1925):139.
7. D.R. Bland and Ford. Proc. Inst. Mech. Engrs. (London), 159(1948) : 144 –163.
8. J.H. Hitchcock. Am. Soc. Mech. Eng. Research Publication, (1930).
9. W.F. Hosford and R.M. Caddell. Metal Forming Mechanics and Metallurgy. Prentice-Hall International Editions, (1983): 129 –133.
10. E. Kreyszig. Advance Engineering Mathematics. 7th ed.(1993).
11. S. Brian Morriss. Automated Manufacturing systems,(1995) : 173-174.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมคำนวณสูตรต่างๆ สำหรับ Rolling Theory

```

Option Explicit
Function forc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf, kb,
Rflat, frico, w)
Dim DefR, STavg, Id, Qpget, NAget, BAget,
reduct
Const a = 84.6
Const E0 = 0.00817
Const n = 0.2
reduct = (th0 - th1) / th0
DefR = (a / (n + 1)) * (((stn2 + E0) ^ (n + 1)) -
((stn1 + E0) ^ (n + 1))) / (stn2 - stn1)
NAget = Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb,
Rflat)
BAget = Bitecalc(th0, th1, Rflat)
STavg = ((1 - (NAget / BAget)) / (1 - reduct) * tb
+ (NAget / BAget) * tf)
Qpget = Qp(frico, th0, th1, Rflat)
Id = Sqr(Rflat * (th0 - th1) - ((th0 - th1) ^ 2) / 4)
Rollforc = (DefR - STavg) * Qpget * Id * w
End Function
-----
Function DeformR(stn)
Dim a, E0, n
a = 84.6
E0 = 0.00817
n = 0.2
DeformR = a * (stn + E0) ^ n
End Function
-----
Function Qp(frico, th0, th1, R)
Dim ReRt, Bang
ReRt = (th0 - th1) / th0
Bang = Bitecalc(th0, th1, R)
Qp = 1.08 + 1.79 * ReRt * (frico / Bang) * Sqr
(ReRt) - 1.02 * ReRt
End Function
-----
Function Bitecalc(th0, th1, R)
Bitecalc = Arccos(1 - (th0 - th1) / (2 * R))
End Function
-----
Function Rollforc(stn1, stn2, th0, th1, tf, tb, kf,
kb, Rflat, frico, w)
Dim DefR, STavg, Id, Qpget, NAget, BAget,
reduct
Const a = 84.6
Const E0 = 0.00817
Const n = 0.2
reduct = (th0 - th1) / th0
DefR = (a / (n + 1)) * (((stn2 + E0) ^ (n + 1)) -
((stn1 + E0) ^ (n + 1))) / (stn2 - stn1)
NAget = Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb,
Rflat)
BAget = Bitecalc(th0, th1, Rflat)
STavg = ((1 - (NAget / BAget)) / (1 - reduct) * tb
+ (NAget / BAget) * tf)
Qpget = Qp(frico, th0, th1, Rflat)
Id = Sqr(Rflat * (th0 - th1) - ((th0 - th1) ^ 2) / 4)
forc = (DefR - STavg) * Qpget * Id * w
End Function

```

Function Arccos(x)

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

End Function

Function Nangle(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb,

Rflat)

Dim Hnget, Rt

*Nangle=angle at neutral point

Rt = $th1 / Rflat$

Hnget = $Hn(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb, Rflat)$

Nangle = $\text{Sqr}(Rt) * \text{Tan}(\text{Sqr}(Rt) * Hnget / 2)$

End Function

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

Dim H1

H1 = $H1calc(th0, th1, Rflat)$

Hn = $(H1 / 2) - (1 / (2 * frico)) * \text{Log}((th0 / th1) * ((1 - tf / kf) / (1 - tb / kb)))$

End Function

Function H1calc(th0, th1, Rflat)

Dim Rt, Bang

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

Rt = $th1 / Rflat$

H1calc = $(2 / \text{Sqr}(Rt)) * \text{Atn}(Bang / \text{Sqr}(Rt))$

End Function

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

Dim angle

Dim thn

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

thn = $th1 + 2 * Rflat * (1 - \text{Cos}(angle))$

Fslip = $(thn / th1) - 1$

End Function

Function Bslip(Fslip, th0, th1)

Dim bRt

bRt = $1 - (th1 / th0)$

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

End Function

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมคำนวณค่า Derivative

Option Explicit

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

Dim NTh0

NTh0 = th0 + 0.001

th0 = th0 - 0.001

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

End Function

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

Dim NTh1

NTh1 = th1 + 0.001

th1 = th1 - 0.001

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

End Function

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

Dim Ntb

Ntb = tb + 0.01

tb = tb - 0.01

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

End Function

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

Dim Ntf

Ntf = tf + 0.01

tf = tf - 0.01

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

End Function

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

Dim NTh0

Dim NFslip, OFslip

NTh0 = th0 + 0.001

th0 = th0 - 0.001

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

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

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

End Function

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

Dim NTh1

Dim NFslip, OFslip

NTh1 = th1 + 0.001

th1 = th1 - 0.001

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

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

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

End Function

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

Dim Ntb

Dim NFslip, OFslip

Ntb = tb + 0.001

tb = tb - 0.001

NFslip = Fslip(frico, th0, th1, tf, Ntb, kf, kb, Rflat)

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

dfbydtb = (NFslip - OFslip) / (Ntb - tb)

End Function

Function dfbydtf(frico, th0, th1, tf, tb, kf, kb,

Rflat)

Dim Ntf

Dim NFslip, OFslip

Ntf = tf + 0.001

tf = tf - 0.001

NFslip = Fslip(frico, th0, th1, Ntf, tb, kf, kb, Rflat)

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

dfbydtf = (NFslip - OFslip) / (Ntf - tf)

End Function

โปรแกรมคำนวณค่า Rolling force โดย Hill's Equation

Option Explicit 'THE DATATABLE FOR
CALCULATION HILL'S EQUATION

Dim th0(5), th1(5), Vin(5), Vout(5), stn(5), Vr(5),
tb(5), tf(5), forward(5)

Dim fric(5), w(5), R(6), v0(5), E(5), Rflatt(6), Mill
(5), Length(5), Defor(5)

Dim qf(5), RR(5), deff, def(6), RF(5), st(5), kk(6),
qb(5), FF(5), BB(5)

Dim a, E0, N

Sub datatable()

Dim i, j As Integer

Const a = 84.6

Const E0 = 0.00817

Const N = 0.2

Const stand = 5

Worksheets("sheet1").Select

For i = 1 To stand

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

th1(i) = Cells(3, 2 + i)

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

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

Vr(5) = Cells(5, 7)

fric(i) = Cells(6, 2 + i)

'fric(i) = 0.001 * Exp(4.9 * (3.28 * Vr(i) * 60 /
1000) ^ (-0.038)) 'Cells(6, 2 + i)

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

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

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

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

v0(i) = 0.3 'poison ratio

Next i

'Calculation k for find kf and kb

For i = 1 To stand

def(i) = DeformR(stn(i - 1), stn(i))

deff = Deform(0)

For j = 1 To 6

kk(1) = deff

If j <> 1 Then

kk(j) = def(j - 1)

End If

Next j

Cells(19, 2 + i) = kk(i) * kb

Cells(20, 2 + i) = kk(i + 1) * kf

Defor(i) = (a / (N + 1)) * (((stn(i) + E0) ^ (N + 1))
- ((stn(i - 1) + E0) ^ (N + 1))) / (stn(i) - stn(i - 1))

'Calculation Roll flattening

For j = 1 To 5

RF(j) = forc(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), qf(i),

qb(i), kk(i + 1), kk(i), R(j), fric(i), w(i))

Rflatt(j) = Rflatt(RF(j), R(j), th0(i), th1(i), v0(i), E
(i), w(i))

R(j + 1) = Rflatt(j)

Rflatt(i) = Rflatt(j)

Next j

'Calculation tension

For j = 2 To 5

qb(j) = (th1(j - 1) / th0(j)) * qf(j - 1)

```

Cells(8, 2 + j) = qb(j)
Next j
Worksheets("sheet1").Cells(16, 2 + i) = Rflatt(i)
Worksheets("sheet1").Cells(14, 2 + i) = Nangle
(fric(i), th0(i), th1(i), qf(i), qb(i), kk(i + 1), kk(i),
Rflatt(i))
Worksheets("sheet1").Cells(4, 2 + i).Value = (th0
(i) - th1(i)) / th0(i) * 100
Worksheets("sheet1").Cells(9, 2 + i).Value =
Rollforc(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), qf(i), qb(i),
kk(i + 1), kk(i), Rflatt(i), fric(i), w(i)) / 1000 / w(i)
Worksheets("sheet1").Cells(11, 2 + i).Value = F
(fric(i), th0(i), th1(i), qf(i), qb(i), kk(i + 1), kk(i),
Rflatt(i))
FF(i) = Cells(11, 2 + i)
Worksheets("sheet1").Cells(12, 2 + i).Value =
Bslip(Cells(11, 2 + i), th0(i), th1(i))
BB(i) = Cells(12, 2 + i)
Next i

'Calculation roll and strip velocity when know
Last stand
Vout(5) = (1 + FF(5)) * Vr(5)
Vr(5) = (1 + BB(5)) * Vr(5)
Vout(4) = Vin(5)
Vr(4) = Vout(4) / (1 + FF(4))
Vin(4) = (1 + BB(4)) * Vr(4)
Vout(3) = Vin(4)
Vr(3) = Vout(3) / (1 + FF(3))
Vin(3) = (1 + BB(3)) * Vr(3)
Vout(2) = Vin(3)
Vr(2) = Vout(2) / (1 + FF(2))
Vin(2) = (1 + BB(2)) * Vr(2)
Vout(1) = Vin(2)
For i = 1 To 1
Vr(i) = Vout(i) / (1 + FF(i))
Vin(i) = (1 + BB(i)) * Vr(i)
Next i

For i = 1 To 5
If i <> 5 Then Cells(5, 2 + i) = Vr(i)
Cells(17, 2 + i) = Vin(i)
Cells(18, 2 + i) = Vout(i)
Next i

End Sub

```

โปรแกรมคำนวณค่า Rolling force โดย Karman's Equation

```

Option Explicit ' KARMAN'S CALCULATION
E0 = 0.00817
N = 0.2
Sub Karman1() ' For calculation ROLLING
FORCE AND FORWARD SLIP
stn1 = 0
stn2 = 0.192
Dim th0, th1, Vin, Vout, Vr, tb, tf, DeformR, kf, kb,
forc, phli, zetra, FF, F
DeformR = (a / (N + 1)) * (((stn2 + E0) ^ (N + 1))
- ((stn1 + E0) ^ (N + 1))) / (stn2 - stn1)
Dim fric, w, R, v0, E, Rflatten, stn1, stn0, bite,
k = DeformR
Nang, delta, NA, thx, thh, aaa, aaaa
delta = 10 / G
Dim ld, Z, ZZ, thn, dx, q, qq, deltaq, deltaqq, p,
th0 = Cells(3, 2)
pp, k, a, E0, N, stn2, stn, h
th1 = Cells(3, 3)
Dim M(1000), MM(1000), aa, vv, zeta, dxx, thxx,
kf = Cells(12, 1)
jj, NeutralA, nn, nnn, zetazz, ZZZ
kb = Cells(12, 2)
Dim qqz, dxxz, zetaz, thxxz, deltaqqz, ppz,
tf = Cells(9, 2)
qqzz, dxxzz, zetz, thxxzz, deltaqqzz, ppzz
tb = Cells(9, 3)
Dim i, j, b As Integer
fric = Cells(6, 2)
Dim G, GG, GGG As Integer
w = Cells(3, 5)
R = Cells(3, 4)
Worksheets("sheet3").Select
v0 = 0.3
G = Cells(8, 6)
E = 21000
GG = G + 3
Rflatten = Cells(4, 4)
GGG = G + 1
ld = Sqr(Rflatten * (th0 - th1) - ((th0 - th1) ^ 2) / 4)
if G > 200 Then
bite = Bitecalc(th0, th1, R)
'MsgBox "Hello! ,This program using the long
phli = 0
times,(If OK! pls click OK ,and delete stop)"
q = -1 * tb
'Stop
Worksheets("sheet3").Cells(6, 2) = bite
'For i = 1 To 13
Worksheets("sheet3").Cells(6, 4) = ld
'For j = 1 To 1003
dx = 0
'Cells(2 + j, 7 + i).Clear
Z = 0
'Next j
ZZ = 0
'Next i
zeta = 0
a = 84.6
p = 0

```

For i = 1 To G

zetra = bite - phli

dx = dx + delta

thx = th1 + 2 * R * (1 - Cos(zetra))

deltaq = ((2 * fric * p) + (2 * p * Tan(zetra))) *

delta / thx

p = k + q

q = q + deltaq

phli = phli + delta / Cos(zetra) / R

M(i) = q

Worksheets("sheet3").Cells(2 + i, 8).Value = dx

Worksheets("sheet3").Cells(2 + i, 9).Value = q

Next i

pp = 0

qq = -1 * tf

dxx = 0

zeta = 0

For i = 1 To G

dxx = dxx + delta

thxx = th1 + 2 * R * (1 - Cos(zeta))

deltaqq = ((2 * fric * pp) + (2 * pp * Tan(zeta))) *

delta / thxx

pp = k + qq

qq = qq + deltaqq

zeta = zeta + delta / Cos(zeta) / R

MM(i) = qq

Worksheets("sheet3").Cells(GG - i, 10).Value =

qq

Next i

For i = 1 To G

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

Cells(GG - i, 15) = MM(i)

Next i

For i = 1 To G

aa = Cells(2 + i, 14) - Cells(2 + i, 15)

Cells(2 + i, 16) = aa

Next i

For i = 1 To G

For j = 1 To G

Worksheets("sheet3").Cells(2 + j, 19).Value =

Cells(2 + j, 14)

If Cells(2 + j, 16) >= 0 Then

nnn = j * delta

Exit For

End If

Next j

Worksheets("sheet3").Cells(GG - i, 20).Value =

Cells(GG - i, 15)

If i = GGG - (nnn / delta) Then

Exit For

End If

Next i

For i = 1 To G

Worksheets("sheet3").Cells(2 + i, 18).Value =

Cells(2 + i, 8)

Next i

```
Worksheets("sheet3").Cells(3, 17) = nnn
nn = ld - nnn
jj = Sqr((Rflatten ^ 2) - (nn ^ 2)) / Rflatten
NeutralA = Arccos(jj)
Worksheets("sheet3").Cells(3, 7) = NeutralA
```

```
' find rolling force
```

```
ZZ = 0
zetaz = 0
qqz = -1 * tf
dxxz = 0
For i = 1 To G
zetaz = zetaz + delta / Cos(zetaz) / R
dxxz = dxxz + delta
thxxz = th1 + 2 * R * (1 - Cos(zetaz))
If zetaz <= 0.02708 Then deltaqqz = ((2 * fric *
ppz) + (2 * ppz * Tan(zetaz))) * delta / thxxz
If dxxz <= ld - nnn Then ppz = k + qqz
F = F + ppz * delta
qqz = qqz + deltaqqz
Next i
ZZ = F

ZZZ = 0
zetz = 0
ppzz = 0
qqzz = -1 * tb
dxxzz = 0
For i = 1 To G
zetazz = bité - zetz
dxxzz = dxxzz + delta
```

```
thxzz = th1 + 2 * R * (1 - Cos(zetazz))
```

```
If zetz > 0.02708 Then deltaqqzz = ((2 * fric *
ppzz) - (2 * ppzz * Tan(zetazz))) * delta / thxzz
If dxzz <= nnn Then ppzz = k + qqzz
FF = FF + ppzz * delta
qqzz = qqzz + deltaqqzz
zetz = zetz + delta / Cos(zetazz) / R
Next i
ZZZ = FF
Worksheets("sheet3").Cells(3, 6) = (ZZ + ZZZ) /
ld
aaa = Cells(3, 7)
aaaa = (aaa ^ 2) * 308 / th1
Cells(9, 4) = aaa

End Sub
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมคำนวณ Gauss's Elimination

```

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
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")
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

```

โปรแกรมคำนวณ Dynamic Simulation

Option Explicit

Dim th0(5), th1(5), Vin(5), Vout(5), stn(5), Vr(5).

tb(5), tf(5), forward(5)

Dim fric(5), w(5), R(5), v0(5), E(5), Rflatt(5), Mill

(5), Length(5), kf(5), kb(5)

Dim nu As Integer

Const stand = 5

Const dt = 0.2

Sub data()

Dim i As Integer

Worksheets("sheet2").Select

For i = 1 To 5

th0(i) = Cells(4, 10 + i)

th1(i) = Cells(5, 10 + i)

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

Vr(i) = Cells(19, 10 + i)

tb(i) = Cells(6, 10 + i)

tf(i) = Cells(7, 10 + i)

'fric(i) = 0.001 * Exp(4.9 * (3.28 * Vr(i) * 60 /
1000) ^ (-0.038))

fric(i) = Cells(20, 10 + i)

R(i) = Cells(25, 10 + i)

w(i) = Cells(21, 10 + i)

E(i) = Cells(22, 10 + i)

v0(i) = Cells(23, 10 + i)

Length(i) = Cells(24, 10 + i)

forward(i) = Cells(16, 10 + i)

Vin(i) = Cells(17, 10 + i)

Vout(i) = Cells(18, 10 + i)

Rflatt(i) = Cells(26, 10 + i)

Mill(i) = Cells(27, 10 + i)

kb(i) = 110 * Cells(28, 10 + i)

kf(i) = 130 * Cells(29, 10 + i)

Next i

For i = 1 To 5

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

Next i

End Sub

Sub matrix()

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

Integer

Dim a(33, 51)

Dim x(33), xo(33)

Dim k

Dim M

Dim re(33, 51) As Boolean

For i = 1 To 33

For j = 1 To 51

a(i, j) = 0

re(i, j) = False

Next j

Next i

'Input the value into the main matrix

'dh eq1 to 8

For i = 1 To stand

a(i, i) = 1

```

a(i + 5, i) = -1 * dPbydhout(stn(i - 1), stn(i), th0
(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w
(i))
a(i + 15, i) = -1 * dfbydhout(fric(i), th0(i), th1(i), tf
(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
a(i + 20, i) = -1 * Vout(i)
If i <> stand Then a(i + 25, i) = tf(i)
Next i

```

```

'dH eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 5, i + 5) = -1 * dPbydHin(stn(i - 1), stn(i),
th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i),
w(i))
a(i + 15, i + 5) = -1 * dfbydHin(fric(i), th0(i), th1
(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
a(i + 20, i + 5) = Vin(i)
If i <> stand Then a(i + 25, i + 6) = -1 * tb(i + 1)
Next i

```

```

'dP eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 10) = -1 / Mill(i)
a(i + 5, i + 10) = 1
Next i

```

```

'dqfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 5, i + 15) = -1 * dPbydtf(stn(i - 1), stn(i),
th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i),
w(i))
a(i + 15, i + 15) = -1 * dfbydtf(fric(i), th0(i), th1
(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))

```

```

If i <> stand Then a(i + 25, i + 15) = th1(i)
If i <> stand Then a(i + 29, i + 15) = 1
Next i
End
'right hand side
For i = 1 To stand
If i <> stand Then a(i + 29, 51) = E(i) * dt * (Vin(i
+ 1) - Vout(i)) / Length(i)
Next i

```

```

'dqbi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 5, i + 20) = -1 * dPbydtb(stn(i - 1), stn(i),
th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i),
w(i))
a(i + 15, i + 20) = -1 * dfbydtb(fric(i), th0(i), th1
(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
If i <> stand Then a(i + 25, i + 21) = -1 * th0(i +
1)
Next i

```

```

'dfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 10, i + 25) = -1 * Vr(i)
a(i + 15, i + 25) = 1
Next i

```

```

'dVin i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 20, i + 30) = th0(i)
If i <> stand Then a(i + 29, i + 31) = -1 * dt * E(i
+ 1) / Length(i + 1)
Next i

```



```

'dVout i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 10, i + 35) = 1
a(i + 20, i + 35) = -1 * th1(i)
If i <> stand Then a(i + 29, i + 35) = dt * E(i) /
Length(i)
Next i

'dS eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 40) = -1
Next i

'dVri eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 10, i + 45) = -(1 + forward(i))
Next i

'Worksheets("sheet1").Select
'For i = 1 To 33
'For j = 1 To 51
'Cells(i, j) = a(i, j)
'Next j
'Next i
'stop

'set boundary condition
Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To 10
For j = 1 To 5
If Cells(i + 3, j + 2) <> 1 Then
k = Cells(i + 3, j + 2)
For c = 1 To 33
a(c, 51) = a(c, 51) - k * a(c, ((i - 1) * 5 + j))
Next c
re(1, ((i - 1) * 5 + j)) = True
End If
Next j
Next i

'reduce matrix dimension
M = 0
For i = 1 To 51
If re(1, i) = False Then
M = M + 1
For j = 1 To 33
a(j, M) = a(j, i)
Next j
End If
Next i

Call solve(a, xo, x, 33)
'For i = 1 To 33
'Worksheets("sheet3").Cells(i, 4).Value = x(i)
'Next i
For i = 1 To 5
Worksheets("sheet5").Cells(nu, i).Value = x(i)
Worksheets("sheet6").Cells(nu, i).Value = x(i +
10)
Next i

Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To 5
Cells(5, 10 + i) = Cells(5, 10 + i) + x(i) 'hout
Cells(4, 10 + i) = Cells(4, 10 + i) + Cells(5, 2 + i) '
'Hin

```

```

If i <> 5 Then Cells(7, 10 + i) = Cells(7, 10 + i) +
x(i + 10) 'qfi
If i = 5 Then Cells(7, 10 + i) = Cells(7, 10 + i) +
Cells(7, i + 2)
If i <> 1 Then Cells(6, 10 + i) = Cells(6, 10 + i) +
x(i + 13) 'qbi
If i = 1 Then Cells(6, 10 + i) = Cells(6, 10 + i) +
Cells(8, i + 2)
Cells(16, 10 + i) = Cells(16, 10 + i) + x(i + 18)
'forward
Cells(17, 10 + i) = Cells(17, 10 + i) + x(i + 23)
'Vin
Cells(18, 10 + i) = Cells(18, 10 + i) + x(i + 28)
'Vout
Cells(19, 10 + i) = Cells(19, 10 + i) + Cells(13, 2
+ i) 'Vr
Next i
End Sub

```

```

Sub main()
Dim i, mu(5)
Dim sec
Dim time(5), PL(5)
Dim Round
For i = 1 To 5
mu(i) = 0
PL(i) = 4600 'mm.
Next i

```

```

sec = 0
Round = 45

```

```

For nu = 1 To Round

```

```

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

```

```

Call matrix
sec = sec + dt
For i = 1 To (stand - 1)
If PL(i) <= 0 Then
mu(i) = mu(i) + 1
'Continuousness
Worksheets("sheet2").Cells(5, i + 3).Value =
Worksheets("sheet5").Cells(mu(i), i).Value
End If
Next i
Worksheets("sheet2").Select

```

```

'If sec > 0 Then Cells(12, 3) = 0
'If sec > 0 Then Cells(12, 5) = 0
'If sec > 0 Then Cells(12, 7) = 0

```

```

'If sec > 0 Then Cells(5, 3) = 0
'If sec > 0 Then Cells(5, 5) = 0
'If sec > 0 Then Cells(5, 7) = 0

```

```

'If sec > 0 Then Cells(13, 3) = 0
'If sec > 0 Then Cells(13, 5) = 0
'If sec > 0 Then Cells(13, 7) = 0

```

```

Worksheets("sheet2").Cells(21, 7) = Round - nu

```

```

Next nu
End Sub

```

โปรแกรมคำนวณ Thickness Control

โปรแกรมหลักเหมือนโปรแกรม Dynamic Simulation แต่เปลี่ยน Sub Matrix() เป็นดังต่อไปนี้

```

Sub matrix()
    'dH eq1 to 8
    Dim n As Integer, i As Integer, j As Integer, c As
    Integer
    Dim a(38, 51)
    Dim x(38), xo(38)
    Dim k
    Dim M
    Dim re(38, 51) As Boolean

    For i = 1 To 38
        For j = 1 To 51
            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 + 5, i) = -1 * dPbydhout(stn(i - 1), stn(i), th0
        (i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w
        (i))
        a(i + 15, i) = -1 * dfbydhout(fric(i), th0(i), th1(i), tf
        (i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
        a(i + 20, i) = -1 * Vout(i)
        If i <> stand Then a(i + 25, i) = tf(i)

        a(i + 33, i) = -1 * kk(i) * w(i) * tf(i)
    Next i

    'dP eq 1 to 8
    For i = 1 To stand
        a(i, i + 10) = -1 / Mill(i)
        a(i + 5, i + 10) = 1
    Next i

    'dqfi eq 1 to 8
    For i = 1 To stand
        a(i + 5, i + 15) = -1 * dPbydtf(stn(i - 1), stn(i),
        th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i),
        w(i))
        a(i + 15, i + 15) = -1 * dfbydtf(fric(i), th0(i), th1
        (i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
        If i <> stand Then a(i + 25, i + 15) = th1(i)
        If i <> stand Then a(i + 29, i + 15) = 1
        a(i + 33, i + 15) = -1 * kk(i) * w(i) * th1(i)
    Next i

```

```
'dqbi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 5, i + 20) = -1 * dPbydtb(stn(i - 1), stn(i),
th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i),
w(i))
a(i + 15, i + 20) = -1 * dfbydtb(fric(i), th0(i), th1
(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
If i <> stand Then a(i + 25, i + 21) = -1 * th0(i +
1)
a(i + 33, i + 20) = kk(i) * w(i) * th0(i)
Next i
```

```
'dfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 10, i + 25) = -1 * Vr(i)
a(i + 15, i + 25) = 1
Next i
```

```
'dVin i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 20, i + 30) = th0(i)
If i <> stand Then a(i + 29, i + 31) = -1 * dt * E(i
+ 1) / Length(i + 1)
Next i
```

```
'dVout i eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 10, i + 35) = 1
a(i + 20, i + 35) = -1 * th1(i)
If i <> stand Then a(i + 29, i + 35) = dt * E(i) /
Length(i)
Next i
```

```
'dS eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 40) = -1
Next i

'dVri eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 10, i + 45) = -(1 + forward(i))
a(i + 33, i + 45) = 1
Next i
```

```
'right hand side
For i = 1 To stand
If i <> stand Then a(i + 29, 51) = dt * E(i) /
Length(i) * (Vin(i + 1) - Vout(i))
Next i
```

```
'Worksheets("sheet1").Select
For i = 1 To 38
For j = 1 To 51
Cells(i, j) = a(i, j)
Next j
Next i
Stop
```

```
'set value of result
Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To 10
For j = 1 To 5
If Cells(j + 1, j + 1) <> 4 Then
k = Cells(i + 1, j + 1)
For c = 1 To 38
```

```
a(c, 51) = a(c, 51) - k * a(c, ((i - 1) * 5 + j))
```

```
Next c
```

```
re(1, ((i - 1) * 5 + j)) = True
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
'reduce matrix dimension
```

```
M = 0
```

```
For i = 1 To 51
```

```
If re(1, i) = False Then
```

```
M = M + 1
```

```
For j = 1 To 38
```

```
a(j, M) = a(j, i)
```

```
Next j
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
Call solve(a, xo, x, 38)
```

```
For i = 1 To 5
```

```
Worksheets("sheet5").Cells(nu, i).Value = x(i)
```

```
Worksheets("sheet6").Cells(nu, i).Value = x(i +
```

```
10)
```

```
Next i
```

```
Worksheets("sheet2").Select
```

```
For i = 1 To 5
```

```
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 <> 5 Then Cells(6, 9 + i) = Cells(6, 9 + i) + x
```

```
(i + 10) 'qfi
```

```
If i = 5 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) + x
```

```
(i + 13) 'qbi
```

```
If i = 1 Then Cells(5, 9 + i) = Cells(5, 9 + i) +
```

```
Cells(6, i + 1)
```

```
Cells(13, 9 + i) = Cells(13, 9 + i) + x(i + 18)
```

```
'forward
```

```
Cells(14, 9 + i) = Cells(14, 9 + i) + x(i + 23)
```

```
'in
```

```
Cells(15, 9 + i) = Cells(15, 9 + i) + x(i + 28)
```

```
'out
```

```
Cells(4, 9 + i) = Cells(4, 9 + i) + Cells(11, 1 + i)
```

```
'Vrx(i + 33)'
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

โปรแกรมคำนวณ Tension Control (PI Control)

โปรแกรมหลักเหมือนโปรแกรม Dynamic Simulation แต่เปลี่ยน Sub Matrix() เป็นดังต่อไปนี้

```

Sub matrix()
Dim n As Integer, i As Integer, j As Integer, c As Integer
Dim a(37, 51)
Dim x(37), xo(37)
Dim k
Dim M
Dim re(37, 51) As Boolean

For i = 1 To 37
For j = 1 To 51
a(i, j) = 0
re(i, j) = False
Next j
Next i

'Input the value into the main matrix

'dh eq1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i) = 1
a(i + 5, i) = -1 * dPbydhout(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w(i))
a(i + 15, i) = -1 * dfbydhout(fric(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
a(i + 20, i) = -1 * Vout(i)
If i <> stand Then a(i + 25, i) = tf(i)
Next i

'dH eq1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 5, i + 5) = -1 * dPbydHin(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w(i))
a(i + 15, i + 5) = -1 * dfbydHin(fric(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
a(i + 20, i + 5) = Vin(i)
If i <> stand Then a(i + 25, i + 6) = -1 * tb(i + 1)
Next i

'dqf eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i, i + 10) = -1 / Mill(i)
a(i + 5, i + 10) = 1
Next i

'dqfi eq 1 to 8
For i = 1 To stand
a(i + 5, i + 15) = -1 * dPbydtf(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w(i))
a(i + 15, i + 15) = -1 * dfbydtf(fric(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))
If i <> stand Then a(i + 25, i + 15) = th1(i)
If i <> stand Then a(i + 29, i + 15) = 1
If i <> stand Then a(i + 33, i + 15) = -1 * (kp(i) + (kp(i) / kt(i)))
Next i

```

'right hand side

For i = 1 To stand

If i <> stand Then a(i + 29, 51) = E(i) * dt * (Vin(i) + 1) - Vout(i) / Length(i)

If i <> stand Then a(i + 33, 51) = Worksheets

("sheet9").Cells(1, i) * dt * kp(i) / kt(i)

Next i

'dqbi eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i + 5, i + 20) = -1 * dPbydtb(stn(i - 1), stn(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i), fric(i), w(i))

a(i + 15, i + 20) = -1 * dfbydtb(fric(i), th0(i), th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rflatt(i))

If i <> stand Then a(i + 25, i + 21) = -1 * th0(i + 1)

Next i

'dfi eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i + 10, i + 25) = -1 * Vr(i)

a(i + 15, i + 25) = 1

Next i

'dVin i eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i + 20, i + 30) = th0(i)

If i <> stand Then a(i + 29, i + 31) = -1 * dt * E(i + 1) / Length(i + 1)

Next i

'dVout i eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i + 10, i + 35) = 1

a(i + 20, i + 35) = -1 * th1(i)

If i <> stand Then a(i + 29, i + 35) = dt * E(i) /

Length(i)

Next i

'dS eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i, i + 40) = -1

Next i

'dVri eq 1 to 8

For i = 1 To stand

a(i + 10, i + 45) = -(1 + forward(i))

If i <> stand Then a(i + 33, i + 45) = 1

Next i

'set boundary condition

Worksheets("sheet2").Select

For i = 1 To 10

For j = 1 To 5

If Cells(i + 3, j + 2) <> 1 Then

k = Cells(i + 3, j + 2)

For c = 1 To 37

a(c, 51) = a(c, 51) - k * a(c, ((i - 1) * 5 + j))

Next c

re(1, ((i - 1) * 5 + j)) = True

End If

Next j

Next i

'reduce matrix dimension

```

M = 0
For i = 1 To 51
  If re(1, i) = False Then
    M = M + 1
  For j = 1 To 37
    a(j, M) = a(j, i)
  Next j
End If
Next i

Call solve(a, xo, x, 37)

For i = 1 To 5
  Worksheets("sheet5").Cells(nu, i).Value = x(i)
  Worksheets("sheet6").Cells(nu, i).Value = x(i +
  10)

Next i

Worksheets("sheet2").Select
For i = 1 To 5
  Cells(5, 10 + i) = Cells(5, 10 + i) + x(i) 'hout
  Cells(4, 10 + i) = Cells(4, 10 + i) + Cells(5, 2 + i)
'Hin

```

```

If i <> 5 Then Cells(7, 10 + i) = Cells(7, 10 + i) +
x(i + 10) 'qfi
If i = 5 Then Cells(7, 10 + i) = Cells(7, 10 + i) +
Cells(7, i + 2)
If i <> 1 Then Cells(6, 10 + i) = Cells(6, 10 + i) +
x(i + 13) 'qbi
If i = 1 Then Cells(6, 10 + i) = Cells(6, 10 + i) +
Cells(8, i + 2)
Cells(16, 10 + i) = Cells(16, 10 + i) + x(i + 18)
'forward
Cells(17, 10 + i) = Cells(17, 10 + i) + x(i + 23)
'Vin
Cells(18, 10 + i) = Cells(18, 10 + i) + x(i + 28)
'Vout
If i <> stand Then Cells(19, 10 + i) = Cells(19,
10 + i) + x(i + 33) 'Cells(13, 2 + i) 'Vr
Next i
For i = 1 To 4
  Worksheets("sheet9").Cells(1, i).Value =
  Worksheets("sheet9").Cells(1, i).Value + x(i +
  10)
Next i
End Sub

```


Data Table (NKK Corporation)

No.	H1 (mm)	Outlet thickness (mm)					Width (mm)	Reduction(%)					Vr5 (m/min)	qb1 (kg/mm ²)	Tension (kg/mm ²)					qf5 (kg/mm ²)	Rolling force / width (ton/mm)				
		#1	#2	#3	#4	#5		#1	#2	#3	#4	#5			#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#1		#2	#3	#4	#5	
1	2.60	1.85	1.13	0.73	0.49	0.49	1229	28.6	38.6	35.2	32.4	0	658	4.1	14.7	15.3	15.9	16.7	4.6	0.79	0.88	0.88	0.82	0.67	
2	3.20	2.28	1.46	0.95	0.64	0.63	1430	28.7	36.0	34.4	33.1	0.2	578	4.8	16.3	15.2	15.8	16	4.9	0.90	0.96	0.95	0.85	0.75	
3	3.20	2.36	1.44	0.96	0.67	0.66	1073	26.1	38.9	33.0	31.2	0.8	386	4.6	15.0	15.7	16.1	15.6	5.3	0.85	0.89	0.92	0.91	0.75	
4	3.20	2.39	1.50	1.01	0.70	0.69	1563	25.3	37.0	32.7	31.4	0.6	478	4.7	14.4	15.0	15.1	16.4	5.1	0.79	0.89	0.87	0.80	0.67	
5	2.80	2.10	1.42	0.98	0.71	0.70	1225	25.3	32.0	30.7	28.6	0.5	596	4.4	14.9	15.0	15.9	15.6	5.3	0.78	0.84	0.82	0.80	0.66	
6	3.80	3.01	2.45	2.00	1.67	1.60	1160	16.6	18.5	18.3	16.1	4.6	209	5.4	17.0	17.1	17.6	16.5	4.7	0.90	0.92	0.93	0.86	0.78	
7	2.60	2.02	1.43	1.03	0.75	0.74	1310	22.3	29.2	27.3	27.2	0.6	480	4.3	15.3	15.0	15.5	16.6	4.9	0.89	0.89	0.91	0.90	0.78	
8	3.20	2.42	1.62	1.14	0.81	0.80	1709	24.3	32.9	29.6	29.2	0.3	687	4.7	14.3	14.3	15.0	15.1	4.7	0.82	0.85	0.83	0.79	0.69	
9	2.80	2.23	1.68	1.30	1.00	0.99	878	20.1	24.6	22.5	23.3	0.1	255	4.7	16.0	16.6	16.5	17.4	5.1	1.06	1.04	1.10	1.07	0.82	
10	3.20	2.61	1.98	1.52	1.19	1.16	1385	18.4	23.9	23.4	21.6	2.1	383	5.2	16.4	15.1	16.3	16.2	5.1	0.83	0.85	0.89	0.86	0.81	
11	4.50	3.55	2.62	2.01	1.58	1.50	1680	21.0	26.3	23	21.5	4.7	392	5.0	14.1	13.9	14.0	13.8	3.9	0.83	0.84	0.84	0.77	0.70	
12	3.60	3.00	2.43	1.98	1.65	1.60	1165	16.4	19.0	18.4	16.9	3.2	351	5.3	15.1	14.9	15.0	15.4	4.5	0.79	0.82	0.84	0.82	0.73	
13	4.50	3.58	2.67	2.06	1.65	1.59	1021	20.4	25.3	23	19.5	3.7	529	6.1	14.1	14.2	14.6	14.4	5.0	0.85	0.84	0.84	0.79	0.69	
14	6.00	4.86	3.71	2.97	2.43	2.33	1225	19.0	23.6	19.9	18.2	4.1	341	6.4	13.8	13.8	13.8	13.3	3.8	0.86	0.93	0.89	0.82	0.73	
15	2.60	1.85	1.19	0.76	0.51	0.49	1229	28.7	35.6	35.8	32.4	3.5	990	4.7	15.7	15.4	15.3	15.9	4.2	0.87	0.87	0.85	0.82	0.72	
16	2.60	1.85	1.18	0.76	0.51	0.49	1229	28.6	36.0	35.7	32.7	3.1	991	4.6	15.7	15.1	15.6	15.5	4.5	0.88	0.89	0.85	0.81	0.69	

No.	H1 (mm)	Outlet thickness (mm)					Width (mm)	Reduction(%)					Vr5 (m/min)	qb1 (kg/mm ²)	Tension (kg/mm ²)					qf5 (kg/mm ²)	Rolling force / width (ton/mm)				
		#1	#2	#3	#4	#5		#1	#2	#3	#4	#5			#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#1		#2	#3	#4	#5	
17	3.20	2.32	1.50	0.99	0.66	0.64	1430	27.5	35.1	34.1	34.3	30	696	5.2	16.6	15.0	15.8	15.9	5.1	0.92	0.91	0.89	0.82	0.81	
18	2.80	2.08	1.41	0.97	0.65	0.65	1420	25.7	32.2	31.2	31	593	4.7	17.4	15.1	15.6	16.3	5.5	0.84	0.93	0.86	0.82	0.73		
19	2.80	2.07	1.39	0.97	0.68	0.66	1612	26.0	32.5	30.0	30.3	3.2	575	4.6	15.6	15.0	15.5	15.9	5.1	0.84	0.90	0.80	0.78	0.70	
20	3.20	2.33	1.49	0.97	0.65	0.65	1073	27.0	35.9	35.0	28.8	5.1	787	5.0	15.7	15.7	14.8	14.7	5.1	0.93	0.87	0.87	0.84	0.75	
21	3.20	2.34	1.56	1.07	0.72	0.69	1563	26.7	33.3	31.6	32.3	4.0	705	5.0	15.7	15.0	15.4	15.7	5.2	0.91	0.94	0.84	0.81	0.71	
22	2.80	2.10	1.45	1.00	0.72	0.69	1225	24.7	30.9	31.2	27.2	4.3	991	4.7	14.8	14.9	14.9	14.7	5.0	0.84	0.75	0.75	0.76	0.66	
23	3.20	2.35	1.57	1.07	0.74	0.70	1509	26.5	32.0	30.8	4.6	790	5.1	16.4	15.3	15.4	15.5	5.1	0.9	0.89	0.83	0.78	0.70		
24	2.80	2.12	1.50	1.07	0.75	0.75	1545	24.0	29.3	28.4	26.3	5.3	907	4.8	16.6	15.3	15.5	15.7	4.9	0.83	0.79	0.81	0.77	0.69	
25	2.60	2.00	1.44	1.04	0.77	0.75	1310	22.9	27.8	27.6	26.2	2.8	579	4.7	16.9	17.0	16.3	16.5	5.5	0.96	1.02	0.95	0.92	0.72	
26	2.80	2.20	1.52	1.13	0.82	0.79	1044	21.1	30.8	25.5	27.2	3.6	221	4.7	16.7	15.7	14.8	15.4	5.2	0.74	0.82	0.79	0.81	0.63	
27	2.80	2.20	1.57	1.13	0.82	0.79	1413	21.2	28.7	27.6	27.5	3.3	226	4.4	16.4	16.4	15.1	15.8	5.1	0.70	0.80	0.79	0.79	0.70	
28	2.80	2.13	1.54	1.11	0.84	0.79	1146	23.7	27.7	28.0	24.0	5.4	640	4.2	14.2	13.6	14.0	13.1	4.9	0.84	0.77	0.78	0.75	0.71	
29	3.20	2.40	1.66	1.18	0.84	0.80	1709	24.8	31.0	28.9	28.5	4.4	517	4.7	16.5	14.5	14.2	15.2	5.1	0.84	0.88	0.81	0.78	0.78	
30	3.20	2.44	1.67	1.18	0.84	0.80	1845	23.7	31.3	29.3	28.8	4.6	301	4.5	17.0	16.3	15.9	16.4	5.2	0.78	0.86	0.79	0.76	0.77	
31	2.80	2.22	1.67	1.27	1.02	0.99	878	20.5	24.6	23.9	19.8	2.5	429	4.9	16.2	16.3	15.2	15.6	5.5	1.17	1.09	1.09	1.12	0.87	
32	3.20	2.59	1.99	1.56	1.23	1.16	1385	19.0	22.9	21.7	21.3	5.2	634	5.2	16.6	16.5	19.9	15.7	5.4	0.92	0.95	0.91	0.90	0.75	
33	3.80	3.01	2.19	1.64	1.30	1.22	932	20.6	27.1	25.2	20.5	6.4	645	5.6	14.5	13.9	13.7	15.7	5.9	0.65	0.86	0.82	0.81	0.71	
34	4.50	3.59	2.68	2.05	1.59	1.48	1680	20.2	25.3	23.5	22.2	7.1	243	5.2	15.2	15.1	14.5	14.0	3.5	0.84	0.85	0.82	0.81	0.71	

No.	H1 (mm)	Outlet thickness (mm)					Width (mm)	Reduction(%)					Vf5 (m/min)	qb1 (kg/mm ²)	Tension (kg/mm ²)					qf5 (kg/mm ²)	Rolling force / width (ton/mm)				
		#1	#2	#3	#4	#5		#1	#2	#3	#4	#5			#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#1		#2	#3	#4	#5	
35	3.60	3.00	2.44	1.99	1.67	1.60	1165	16.6	18.5	18.3	16.1	4.6	209	5.4	16.9	17.1	17.6	16.5	4.7	0.85	0.88	0.89	0.83	0.75	
36	4.50	3.68	2.77	2.10	1.68	1.59	1021	18.2	24.7	24.0	19.9	5.6	300	5.9	13.6	13.3	13.5	13.4	5.5	0.81	0.85	0.87	0.81	0.69	
37	4.50	3.69	2.77	2.13	1.72	1.62	906	17.9	24.8	23.2	19.1	6.1	473	5.8	13.5	13.5	14.4	13.3	5.2	0.82	0.86	0.85	0.83	0.69	
38	6.90	4.90	3.85	3.07	2.45	2.33	1225	18.2	21.4	20.4	20.0	5.0	293	6.8	13.0	12.4	12.6	12.4	3.3	0.91	0.90	0.91	0.88	0.66	
39	2.80	2.10	1.50	1.05	0.78	0.75	1540	24.0	29.3	28.4	26.3	5.3	907	4.8	16.6	15.3	15.5	15.6	4.9	0.83	0.79	0.81	0.77	0.69	
40	3.30	2.32	1.50	0.99	0.66	0.64	1430	27.5	35.1	34.1	32.8	3.6	699	5.2	1.6.6	15.0	15.8	15.9	5.1	0.92	0.91	0.89	0.82	0.81	
41	2.90	2.08	1.41	0.97	0.67	0.65	1420	25.7	32.2	31.2	31.0	2.8	599	4.7	17.4	15.1	15.6	16.3	5.5	0.84	0.93	0.86	0.82	0.73	
42	3.30	2.64	2.10	1.67	1.34	1.20	420	25.7	32.2	31.2	31.0	2.8	420	4.7	15.3	20.3	22.0	19.3	6.4	0.88	0.88	0.84	0.85	0.71	
43	3.20	2.35	1.51	1.01	0.71	0.70	1509	26.5	35.7	32.8	30.0	0.2	680	4.7	14.5	14.7	15.0	15.8	4.8	0.85	0.84	0.85	0.78	0.70	
44	2.60	2.12	1.50	1.07	0.79	0.75	1545	24.0	29.3	28.4	26.3	5.3	907	4.8	16.6	15.3	15.5	15.7	4.9	0.83	0.79	0.81	0.77	0.69	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนุโรจน์ พานิช เกิดวันที่ 7 กันยายน 2518 ที่อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย