

การวิเคราะห์ความหนาของเหล็กกล้าแผ่นบางจากการผลิตแบบรีดเย็นโดยกระบวนการแบบ
จำลองจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง



นาย เอกพจน์ ปัทมสัตยาสนธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-449-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THICKNESS ANALYSIS OF STEEL SHEET COLD ROLLING USING THE
CONTINUOUS ROLLING THEORY MODELING



Mr. Akapoch Puttamasuttayasonti

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 974-346-449-2

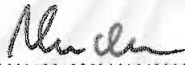
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ความหนาของเหล็กกล้าแผ่นบางจากการผลิตแบบปรีด
เย็นโดยกระบวนการแบบจำลองจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง

โดย นายเอกพจน์ ปัทมสัตยาสนธิ


สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

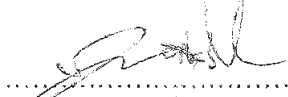
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปิบุญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อธิพิพล เดี่ยววานิช)

นายเอกพจน์ ปัทมสัตยาสนธิ: การวิเคราะห์ความหนาของเหล็กกล้าแผ่นบางจากการผลิตแบบรีดเย็นโดยกระบวนการแบบจำลองจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง (THICKNESS ANALYSIS OF STEEL SHEET COLD ROLLING USING THE CONTINUOUS ROLLING THEORY MODELING) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, 94 หน้า


งานวิจัยนี้ได้ศึกษาบทบาทของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดในแต่ละแท่นรีดอันได้แก่ รัศมีลูกรีด, ความหนาขาเข้าและความหนาขาออกของชิ้นงานและความเร็วของชิ้นงานรีดต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีด การศึกษานี้ทำการศึกษาระบวนการรีดเย็นต่อเนื่องแบบ 5 แท่นรีดในภาวะการรีดแบบสถิตศาสตร์โดยอาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์ (Static Continuous Rolling Theory) การคำนวณองค์ประกอบการรีดที่จำเป็นในการคำนวณโดยแบบจำลองทำการคำนวณโดย Classical Rolling Theory การศึกษานี้ทำการทดลองหาค่าคงที่ซึ่งแสดงคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบ 2 การทดลองได้แก่การทดลองแบบ Plane Strain Compressive Test และการทดลองเพื่อหาค่า Derivative ของการเปลี่ยนแปลงระหว่างองค์ประกอบการรีดในแต่ละแท่นรีดที่จำเป็นในแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองจำลองกระบวนการรีดต่อเนื่องด้วยแท่นรีดเดี่ยว เพื่อทำการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบการคำนวณจนกว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองสอดคล้องกับกระบวนการรีดจริง

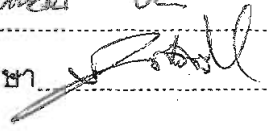
ผลจากการคำนวณโดยแบบจำลองการรีดต่อเนื่องพบว่า การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดต่างๆ มีแนวโน้มจะเกิดมากที่สุดที่ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 ของระบบการรีดเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ก็ขององค์ประกอบการรีด ส่วนการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดนั้นเพิ่มขึ้นตามขนาดของรัศมีของลูกรีดในแต่ละแท่นรีด โดยรัศมีของแท่นรีดสุดท้ายในกระบวนการรีดต่อเนื่องมีบทบาทมากที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลง การลดขนาดของชิ้นงานรีดที่แท่นรีดที่ 4 กับแท่นรีดที่ 5 ของกระบวนการรีดทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดมีขนาดเล็กกว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการลดขนาดของชิ้นงานรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 กับแท่นรีดที่ 2 ของกระบวนการรีด และการเพิ่มความเร็วของชิ้นงานรีดส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานมีขนาดลดลง

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

4070519021 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: ROLLING FACTOR / CONTINUOUS ROLLING THEORY / SIMULATION MODEL / CLASSICAL ROLLING THEORY

AKAPOCH PUTTAMASUTTAYASONTI : THICKNESS ANALYSIS OF STEEL SHEET COLD ROLLING USING THE CONTINUOUS ROLLING THEORY MODELING. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PRASONK SRICHAROENCHAI, (D.ENG.) 94 pp.

This research aims to investigate role of rolling factors: roll radius, inlet thickness and outlet thickness and sheet velocity of each rolling stands on the final outlet thickness. In the present study, thickness of the final product is analyzed by computer simulation model, which base upon the static continuous rolling theory. This simulation model is defined as 5 stands continuous cold rolling mill. Rolling factors of each stand could be generated from the classical rolling theory. There were two experiments in this research. First one is plane strain compressive test for deformation resistant constant estimation. The second one is cold rolling experiment in single stand to obtain derivative of each factor. Calculations for rolling factor might be adjusted until they correspond to both experimental methods.

Results of continuous rolling model indicated that change of all rolling factors at the first stand has the most influent when there was a change of rolling factor. Change of the final outlet thickness increased with roll diameter of each stand, especially stand No.5 has the most influent. Work piece thickness reduction at the stand No.4 and No.5 make change of the final outlet thickness decreases less than that at the stand No.1 and No.2. Increasing of rolling speed makes change of the final outlet thickness decreases.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

Academic year...2000.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ Dr. Fumio Fujita จาก NKK Corporation ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากโครงการของ UNESCO จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาต่างๆ นางสาวอดิگانต์ ทองสะอาด เพื่อนที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาข้อเสนอแนะ และแนวทางต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ นางสาวทอง ทอง จรัสสิงห์ พี่ตุ๊กการที่ช่วยให้ความสะดวกในการค้นหาข้อมูลของห้องสมุด พนักงานแผนกวิจัยการรีด เมืองพุกยามา ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกรรมวิธีการรีดเหล็ก นายเอกรินทร์ แสงธรรมรัตน์ ที่ให้กำลังใจ, ความบันเทิงและคำแนะนำด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล และ นายบุญโรจน์ พานิช สำหรับความเป็นเพื่อนร่วมทุกข์ร่วมสุขในงานวิจัย นายพิพัฒน์ เนาวัฒน์กุลชัย ที่ให้ข้อคิดหลักการในการทำงาน และรวมถึงทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแต่ไม่สามารถกล่าวถึง ณ ที่นี้ได้ทั้งหมด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่ชาย น้องชาย และน้องสาว ซึ่งสนับสนุนในทุกๆ ด้านและเป็นกำลังใจอย่างดียิ่งแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	3
2.1 ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง	3
2.2 ทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์ (Static continuous rolling theory)	6
3 การสร้างแบบจำลองงานรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์	11
3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยสังเขป	11
3.2 คำนวณองค์ประกอบการรีดจากทฤษฎีการรีด	12
3.3 Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรีดที่จำเป็นในการคำนวณของแบบจำลอง	16
3.4 แจกแจงสมการจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์	18
3.5 แปลงสมการจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์เป็น Matrix	20
3.6 การกำหนดตัวแปรทราบค่าและไม่ทราบค่าของแบบจำลอง	27
3.7 แปลง Main matrix ของแบบจำลองให้สามารถคำนวณด้วย Gauss's method	31
3.8 สมการรวมของแบบจำลองการรีดต่อเนื่อง	34
4 กระบวนการทดลอง	35
4.1 การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริง	35
4.2 การทดลอง Plane strain compressive test	38

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

5 ผลการทดลองและการคำนวณเพื่อหาค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง	41
5.1 ผลการทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริง	42
5.2 ผลการทดลอง Plane strain compressive test	43
6 ผลการคำนวณโดยแบบจำลองและวิเคราะห์ผลการคำนวณ	45
6.1 ผลการคำนวณองค์ประกอบการรีด	45
6.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรัศมีลูกรีดต่อความหนาสุดท้าย	49
6.3 การวิเคราะห์บทบาทของความหนาขาเข้าและขาออกต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีด	52
6.4 การวิเคราะห์บทบาทของอัตราเร็วของชิ้นงานรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีด	56
6.5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า Rolling force จากแบบจำลองกับกระบวนการรีดจริง	57
7 สรุปผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง	62
รายการอ้างอิง	63
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก	65
ภาคผนวก ข	92
ประวัติผู้วิจัย	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	กำหนดค่าตัวแปร 30
ตารางที่ 4.1	ลำดับการทดลองด้วยเครื่องจำลองการรีด 37
ตารางที่ 4.2	คุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบการรีด 38
ตารางที่ 4.3	การทดลอง Plane strain compressive test 39
ตารางที่ 4.4	คุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบ Plane strain compressive test 40
ตารางที่ 5.1	ค่าองค์ประกอบการรีดโดยวัดจากการจำลองกระบวนการรีดจริง 41
	เมื่อความหนาขาเข้าเป็น 1.2 มิลลิเมตร
ตารางที่ 5.2	ค่าองค์ประกอบการรีดโดยวัดจากการจำลองกระบวนการรีดจริง 42
	เมื่อความหนาขาเข้าเป็น 1.0 มิลลิเมตร
ตารางที่ 5.3	ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมเพื่อคำนวณหาค่า Derivative 43
	ของที่ประกอบการรีดที่จำเป็นต่อการทำแบบจำลองการรีดต่อเนื่อง
ตารางที่ 5.4	ผลการทดลอง Plane strain compressive test 43
ตารางที่ 6.1	กำหนดข้อมูลค่าองค์ประกอบการรีดเพื่อการคำนวณจากแบบจำลอง 45
ตารางที่ 6.2	แสดงผลการคำนวณองค์ประกอบการรีดของแต่ละแท่นรีด 46
	จากแบบจำลอง
ตารางที่ 6.3	Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรีด 46
ตารางที่ 6.4	แทนค่ารีดมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดเพื่อหาอิทธิพลของรีดมีลูกรีด 49
	ในแต่ละตำแหน่งแท่นรีดต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกสุดท้าย
ตารางที่ 6.5	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้าย 54
	จากรูปแบบการลดขนาดที่ต่างกัน
ตารางที่ 6.6	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้าย 56
	จากอัตราเร็วของชิ้นงานรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้าย
	ที่มีขนาดแตกต่างกันจากการคำนวณของแบบจำลอง
ตารางที่ 6.7	แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force 58
	ระหว่างผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1
ตารางที่ 6.8	แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force 59
	ระหว่างผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 2
ตารางที่ 6.9	แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force 60
	ระหว่างผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 3

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของสภาวะงานรีด	4
รูปที่ 2.2 Control Looper	6
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทาง Computer	11
จากทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง	
รูปที่ 4.1 แผนผังของแท่นรีดจำลอง	35
รูปที่ 4.2 การแทนระบบรีดต่อเนื่องด้วยแท่นรีดเดี่ยว	36
รูปที่ 4.3 Hydraulic Testing Machine	38
รูปที่ 4.4 การทดสอบชิ้นงานด้วย Plane strain compressive test	39
รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีด	47
จากแบบจำลอง	
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงรัศมีลูกรีด	51
รูปที่ 6.3 รูปแบบการขนาดชิ้นงานในแต่ละแท่นรีด	52
รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้าย	54
ในแต่ละรูปแบบ	
รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้าย	56
ในแต่ละขนาดอัตราเร็วของชิ้นงานที่ตำแหน่งแท่นรีดแทนสุดท้าย	
รูปที่ 6.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่าง	58
ผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1	
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่าง	59
ผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 2	
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่าง	60
ผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 3	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมการรีดเหล็กนับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งอุตสาหกรรมหนึ่ง เนื่องจากจากผลผลิตที่ได้จากอุตสาหกรรมนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการผลิตต่อเนื่องมากมาย ไม่ว่าจะเป็นแผ่นเหล็กกล้าที่ได้จากการรีดร้อนซึ่งสามารถนำไปเข้ากระบวนการผลิตต่อเนื่องในงานรีดเย็น หรือแผ่นเหล็กกล้าแบบแผ่นบางจากงานรีดเย็นซึ่งนำไปใช้ในการผลิตสินค้าอื่นๆเช่น กล้องทรงภายนอกของเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่างๆ, ตัวถังรถยนต์ เป็นต้น คุณสมบัติของแผ่นเหล็กกล้าบางที่มักจะถูกพิจารณาเป็นลำดับต้นๆในการเลือกใช้ผลิตสินค้าได้แก่ ความเที่ยงตรงของขนาดความหนาของแผ่นเหล็กกล้าบางนั้นๆ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของสินค้าที่ผลิตเป็นอย่างมากเช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ การที่แผ่นเหล็กกล้าบางซึ่งนำไปผลิตตัวถังมีขนาดหนามากกว่ามาตรฐานที่กำหนดจากกระบวนการผลิต จะทำให้รถยนต์ที่ผลิตออกมามีน้ำหนักมากกว่าที่กำหนดไว้ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของรถยนต์ลดลง ในขณะที่เดียวกันแผ่นเหล็กบางที่บางกว่ามาตรฐานที่กำหนดจะส่งผลให้รถยนต์ที่ผลิตออกมามีปัญหาทางด้านความแข็งแรงที่บริเวณตัวถัง ฉะนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีและมีต้นทุนที่เหมาะสม การวิเคราะห์กระบวนการรีดและชิ้นงานที่ได้ออกมาจึงมีความสำคัญมาก

เดิมทีการวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆของชิ้นงานรีดได้ทำการวิเคราะห์โดยทำการทดลองและใช้กระบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์หรือวิศวกรรม คำนวณจากสมการ, ข้อกำหนดหรือข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งแต่ละวิธีล้วนมีข้อดีและข้อเสียของตัวเองทั้งสิ้นเช่น การทดลองจะเสียค่าใช้จ่ายสูงในการสร้างเครื่องมืออุปกรณ์และใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนาน แต่ผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้จะมีความน่าเชื่อถือสูง ส่วนการคำนวณ(เช่นการทำ Slab Analysis)จะมีความยากลำบากในการคำนวณเนื่องจากต้องใช้ผู้วิเคราะห์ที่มีความรู้ความสามารถสูง และเมื่ออยู่ในกระบวนการผลิตจริงที่มีแท่นรีด (Stand) ที่ใช้ในการรีดจำนวนหลายแท่น ความยากในการคำนวณจะมีมากขึ้นเป็นทวีคูณ นอกจากนี้ยังพบข้อจำกัดในการคำนวณมากมายที่ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงจนไม่สามารถยอมรับได้ ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เรียกว่า ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง (Continuous rolling theory) เข้ามาวิเคราะห์งานรีด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงน้อย และมีความคล่องตัวสูงในการปรับเปลี่ยนกระบวนการและวิธีการคำนวณให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงหรือผลการทดลอง นับวันเทคโนโลยีทางด้านการคำนวณเชิงตัวเลขและคอมพิวเตอร์ยิ่งถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำและสะดวกมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงรัศมีลูกรีดของแต่ละแท่นรีดต่อความหนาของชิ้นงานรีดเมื่อออกจากกระบวนการรีด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานรีดในตำแหน่งเข้าและออกจากแท่นรีดแต่ละแท่นรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดเมื่อออกจากกระบวนการรีด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของชิ้นงานรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดเมื่อออกจากกระบวนการรีด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 หาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดหลังจากออกจากกระบวนการรีดเมื่อองค์ประกอบของงานรีดได้แก่ รัศมีลูกรีด, ความหนาของชิ้นงานที่แต่ละตำแหน่งของแท่นรีด และความเร็วของชิ้นงานรีด เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการใช้แบบจำลองทาง Computer จากทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง (Continuous rolling theory)
- 1.3.2 วิเคราะห์และสรุปผลขององค์ประกอบของงานรีดได้แก่ รัศมีลูกรีด, ความหนาของชิ้นงานที่แต่ละตำแหน่งของแท่นรีด และความเร็วของชิ้นงานรีด ต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดเมื่อออกจากกระบวนการรีด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงผลของการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของงานรีดได้แก่ รัศมีลูกรีด, ความหนาของชิ้นงานที่แต่ละตำแหน่งของแท่นรีด และความเร็วของชิ้นงานรีด ต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดเมื่อออกจากกระบวนการรีด
- 1.4.2 เป็นงานวิจัยพื้นฐานและเป็นตัวอย่างในการใช้กระบวนการแบบจำลองจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์งานรีดเหล็กกล้าและงานรีดที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน รวมทั้งเป็นข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์หาข้อผิดพลาดในการสร้างแบบจำลองลักษณะอื่น เพื่อการศึกษาแบบจำลองในภาวะการรีดอื่นต่อไป

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

กระบวนการรีดต่อเนื่องนี้มีผู้ทำการวิจัยด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกันเช่น Wen S.W. และคณะ¹ ได้ทำการวิเคราะห์หัตถ์ด้วยกรรมวิธี Finite-element โดยการทำให้แบบจำลองทาง Computer จากกระบวนการ Elastic-plastic finite-element ซึ่งวิเคราะห์งานรีดต่อเนื่องของลูกรีดจำนวน 4 แท่นรีด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของบริเวณที่ถูกรีดในระบบการรีดต่อเนื่องนั้นและนอกจากนี้ยังแสดงการกระจายของความเค้นภายในชิ้นงานและสภาพของ Plastic strain ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์การรีดต่อเนื่องที่แรงซึ่งมากระทำต่อชิ้นงานระหว่างการรีด เพื่อนำผลที่ได้ปรับปรุงกระบวนการรีดให้เหมาะสมต่อไป

นอกจากนี้ยังมีการทดลองเพื่อหาสภาวะและองค์ประกอบที่เหมาะสมเพื่อให้ความหนาของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดต่อเนื่องมีความเที่ยงตรงมากที่สุด โดยการทดลองของ Uetz Guenter² ที่ทำการทดลองรีดเหล็กกล้าจริงโดยการเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆของการรีดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Roll gap กับความหนาของชิ้นงานสำเร็จที่สภาวะการรีดต่างๆโดยข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลอ้างอิงในการปฏิบัติงานรีดจริง

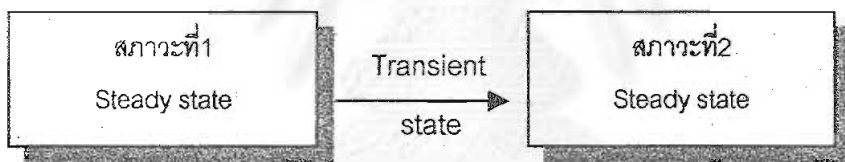
จะเห็นได้ว่าการทดลองและการวิเคราะห์งานรีดที่กล่าวมาเป็นการวิเคราะห์โดยการทำงานทดลองจริงและการทำให้แบบจำลองทาง Finite-element ยังมีแบบจำลองอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์งานรีดต่อเนื่องได้โดยมีความยุ่งยากน้อยกว่าและสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองรีดจริง ได้แก่การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแท่นรีดในกระบวนการรีดต่อเนื่องแต่ละแท่นซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง (Continuous rolling theory)³

2.1 ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง

การรีดต่อเนื่องคือกระบวนการที่ทำการรีดวัสดุโดยแท่นรีด (Stand) เพื่อทำการลดขนาดความหนาของชิ้นงาน โดยต้องมีจำนวนแท่นรีดตั้งแต่ 2 แท่นรีดขึ้นไปและทำการรีดอย่างพร้อมเพียงและต่อเนื่องตามกันในทุกแท่นรีด สาเหตุที่ต้องมีการวิเคราะห์เนื่องจากองค์ประกอบทั้งหลายในระบบการรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดแต่ละแท่นที่มีผลต่อกันและกันโดยผ่านทางความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดของระบบงานรีดนั้นๆ ซึ่งถ้าสามารถเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเหล่านี้แล้วจะทำให้สามารถควบคุมขนาดและคุณสมบัติของงานรีดให้เกิดการเบี่ยงเบนน้อยที่สุดได้ ยกตัวอย่างเช่นการที่เปลี่ยนแปลงขนาดของ Roll gap ที่แท่นรีดแท่นที่ 1 จะมีผลต่อขนาดความหนาสุดท้ายของชิ้นงานสำเร็จมากกว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Roll gap ที่แท่นลูกรีดแท่นสุดท้ายของระบบการรีดต่อเนื่องนั้น แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบต่างๆของแท่นรีดแต่ละแท่นจะมีผลต่อองค์ประกอบอื่นแต่ละตัวในระบบการรีดต่อเนื่องนั้นๆไม่เท่ากัน

นอกจาก Roll gap แล้วยังมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกันภายในระบบงานรีดต่อเนื่องและส่งผลกระทบต่องานรีดอีกหลายสิบตัวที่มีความสำคัญแตกต่างกันไป

จากตัวอย่างที่กล่าวมาถ้าต้องการให้การคำนวณงานรีดออกมาเที่ยงตรงจึงควรที่จะพิจารณาแทนรีดภายในงานรีดต่อเนื่องให้เป็นระบบเดียวกัน โดยนำองค์ประกอบต่างๆของแทนรีดทุกแทนในระบบตั้งแต่แทนรีดแรกจนแทนรีดสุดท้ายมาพิจารณาและคำนวณร่วมกัน รวมทั้งพิจารณาเงื่อนไขในผลกระทบต่างๆที่มีต่อกันด้วย ซึ่งทฤษฎีที่กำหนดความเกี่ยวข้องกัน การพิจารณาและการคำนวณ คุณลักษณะชุดแทนรีดต่อเนื่องทั้งระบบนี้เรียกว่า ทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง (Continuous rolling theory) โดยทั่วไปแล้วการที่จะพิจารณากระบวนการรีดต่อเนื่องมักจะทำการพิจารณาในสภาวะที่ระบบมีเสถียรภาพ (Steady State) เช่น เมื่อพิจารณาที่อัตราเร็วของปริมาตร (Volumetric Speed) ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณความกว้าง, ความหนาและความเร็วของแผ่นชิ้นงาน (Strip) อัตราเร็วของปริมาตรจะคงที่ในทุกตำแหน่งของระบบการรีดแต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของการรีดเช่น Roll Gap หรือความเร็วในการหมุนของลูกรีดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งความหนา,แรงดึงและอีกหลายองค์ประกอบในการรีด เห็นได้ว่าระบบของการรีดต่อเนื่องนี้ได้จะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระบบที่อยู่ตัวระบบใหม่ (New steady state) จากการพิจารณาข้างต้นสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 2 ช่วง



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของสภาวะงานรีด

จากการที่การรีดต่อเนื่องมีระบบให้พิจารณาอยู่ 2 แบบคือ Steady state และ Transient State ทำให้สามารถแบ่งทฤษฎีที่ทำการพิจารณาระบบได้ 2 แบบเช่นกันคือ

1. ทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์ (Static theory of continuous rolling mill) ใช้พิจารณาระบบที่อยู่ในช่วง Steady state ค่าองค์ประกอบต่างๆในการรีดจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในสภาวะนี้ โดยการศึกษาจะเป็นการวิเคราะห์งานรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์
2. ทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบพลศาสตร์ (Dynamic theory of continuous rolling mill) ใช้พิจารณาระบบที่อยู่ในช่วง Transient state ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะหนึ่งไปเป็นการรีดที่สภาวะอื่นที่มีความแตกต่างกันในค่าขององค์ประกอบการรีด

การศึกษานี้เป็นการศึกษากระบวนการรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษาต้องการหาผลกระทบขององค์ประกอบการรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้น

งานเมื่อสิ้นสุดกระบวนการรีดแล้ว การทำแบบจำลองจะสามารถทำการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายได้จากการกำหนดค่าองค์ประกอบการรีดต่างๆอันได้แก่

1. ความหนาขาเข้า (Inlet thickness) ของแต่ละแท่นรีด
2. ความหนาขาออก (Outlet thickness) ของแต่ละแท่นรีด
3. รัศมีลูกรีด (Roll radius) ของแต่ละแท่นรีด
4. สัมประสิทธิ์เสียดทานระหว่างลูกรีดและชิ้นงานรีด (Friction coefficient) ของแต่ละแท่นรีด
5. ค่า Young modulus ของชิ้นงานรีด
6. อัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Sheet velocity)
7. ค่าความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Backward tension และ Forward tension) ที่ตำแหน่งต่างๆของระบบงานรีด (Rolling system)

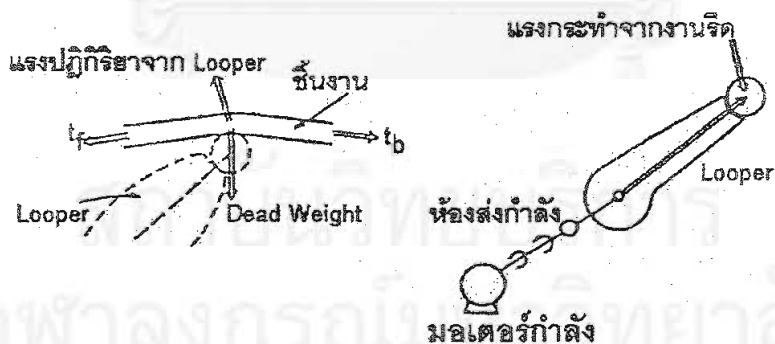
จากองค์ประกอบเบื้องต้นของงานรีดทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นองค์ประกอบที่สามารถหาค่าได้จากมาตรฐานขององค์ประกอบนั้นเช่น ค่า Young modulus ของเหล็กกล้าที่กำหนดเป็นชิ้นงาน ส่วนองค์ประกอบอื่นสามารถกำหนดขึ้นมาได้จากการติดตั้งระบบงานรีด หรืออีกนัยหนึ่งคือการติดตั้งระบบเครื่องจักรนั่นเองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ความหนาขาเข้าและความหนาขาออกของชิ้นงานรีดสามารถทำการกำหนดได้จากการตั้งค่าความห่างระหว่างลูกรีดในแท่นรีดโดยทั่วไปเรียกระยะห่างระหว่างลูกรีดนี้ว่า Roll gap โดยจะสังเกตได้ว่าค่าความหนาขาออกของแต่ละแท่นรีดจะกลายเป็นความหนาขาเข้าของแท่นรีดถัดไปเสมอ ความหนาขาเข้าของแท่นรีดแรกในระบบงานรีดจะเป็นความหนาดั้งเดิมของวัตถุดิบนั้นๆ และความหนาขาออกของแท่นรีดแท่นสุดท้ายและเป็นความหนาของผลิตภัณฑ์จากงานรีดนั้นๆ ส่วนอัตราเร็วของชิ้นงานรีดสามารถควบคุมได้โดยการตั้งมอเตอร์ (Motor) ที่เป็นตัวส่งกำลังการขับเคลื่อนไปให้ลูกรีดในแท่นรีด โดยทั่วไปงานรีดมักมีมอเตอร์ที่ให้กำลังที่สูงจนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วรอบของลูกรีดหรืออัตราเร็วของชิ้นงานรีด ทำให้อัตราเร็วของชิ้นงานรีดสามารถกำหนดค่าที่แน่นอนได้

ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่กล่าวมาเป็นค่าที่กำหนดให้แน่นอนได้ยาก เนื่องจากต้องพิจารณาจากภาวะต่างๆระหว่างการรีดนั้นๆ⁴ เช่นที่ตำแหน่งหน้าสัมผัสระหว่างชิ้นงานและลูกรีดมีสารหล่อลื่น (Lubricant) ชนิดใดและมีปริมาณหรือความเข้มข้นมากน้อยเท่าใด นอกจากนี้อัตราเร็วของชิ้นงานและ Percent reduction (ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างความหนาขาเข้าและความหนาขาออก) ก็ล้วนมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั้งสิ้น ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการทดลองที่มีภาวะใกล้เคียงกับแบบจำลองการรีดเนื่องซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จะมีค่าเบี่ยงเบนไปจากความเป็นจริงน้อยมากจนยอมรับได้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทฤษฎีการรีดแบบสถิตศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนี้จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยทฤษฎีการรีดแบบพลศาสตร์ ดังนั้นการ

เปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบนี้จึงถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงเบื้องต้นของการทำแบบจำลอง

ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดที่เกิดขึ้นงานรีดสามารถทำการวัดได้ในกระบวนการรีดเพื่อการผลิตโดยการใช้ Control looper ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแขนที่คอยเสริมความหย่อนตึงของชิ้นงานรีด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการควบคุมไม่ให้ค่าความเค้นแรงดึงในแท่นรีดไม่ให้มากหรือน้อยเกินไปอีกทั้งยังเป็นตัวบอกค่าความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งดังกล่าวด้วย ในแบบจำลองงานรีดสามารถกำหนดค่าความเค้นแรงดึงในลักษณะต่างๆ เพื่อทดสอบผลกระทบของความเค้นแรงดึงต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาขาออกของชิ้นงานที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้ายได้โดยต้องรักษาข้อบังคับบางประการของระบบงานรีดไว้เช่นความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดต้องมีค่าไม่สูงจนเกินไป เป็นต้น จะสังเกตได้ว่า ความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งด้านหน้า (Forward tension) ของแท่นรีดใดๆ จะมีค่าเท่ากับความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งด้านหลัง (Backward tension) ของแท่นรีดถัดไปเสมอเนื่องจากเป็นค่าความเค้นแรงดึงที่ปรากฏบนชิ้นงานรีดในชิ้นเดียวกัน ขนาดเท่ากัน และภาวะเดียวกัน ส่วนที่ตำแหน่งแท่นรีดแท่นแรก Backward tension จะมีค่าน้อยสามารถกำหนดได้เนื่องจากเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่าง Slab coil และแท่นรีด ส่วน Forward tension ที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้ายก็เป็นลักษณะเดียวกัน เนื่องจากการม้วนชิ้นงานสำเร็จเก็บเข้าไปใน Product coil ในแบบจำลองจะตั้งค่านีไว้ให้ขนาดต่ำและการเปลี่ยนแปลงของ Forward tension ที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้ายและ Backward tension ที่ตำแหน่งแท่นรีดแท่นแรกจะตั้งค่าเป็นศูนย์หรือไม่มีค่าการเปลี่ยนแปลงเสมอ



รูปที่ 2.2 Control Looper

2.2 ทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์ (Static continuous rolling theory)

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดกับการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบงานรีดอื่นๆ โดยใช้ทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์ ซึ่งพิจารณาห้องค้ประกอบงานรีดต่างๆ ที่แสดงค่าไว้ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสภาวะเริ่มต้น (Initial

state) และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับทุกๆ องค์ประกอบการรีดหลังจากการเปลี่ยนแปลงถือว่าเป็นสถานะสุดท้าย (Final state) โดยระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งถือว่าเป็นการพิจารณาสถานะที่เป็นแบบพลศาสตร์ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษานี้ จะเห็นได้ว่าถ้านำค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบงานรีดแต่ละตัวจากแบบจำลองรวมเข้ากับขนาดขององค์ประกอบการรีดนั้นๆ ในสถานะการรีดแรกจะทำให้ได้ขนาดขององค์ประกอบงานรีดต่างๆ ในสถานะสุดท้ายด้วย

โดยทฤษฎีการรีดต่อเนื่องได้แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ของงานรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดต่างๆ กันไว้ดังนี้

2.2.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานรีดที่เกิดจากกระบวนการรีดภายในแท่นรีดว่าเกิดจากการกำหนดค่าระยะห่างระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll gap) รวมกับค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงเนื่องจากการรีด (Rolling force) โดยความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงโดยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} h_i &= G_i + \frac{P_i}{M_i} \\ \Delta h_i &= \Delta G_i + \frac{\Delta P_i}{M_i} \\ \Delta h_i - \Delta G_i - \frac{\Delta P_i}{M_i} &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ h = ความหนาขาออกของชิ้นงานรีด (Outlet thickness, mm)

G = ระยะห่างระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll gap, mm)

P = แรงเนื่องจากการรีด (Rolling force, kg/mm)

M = ค่า Mill modulus, kg/mm²

i = แสดงตำแหน่งแท่นรีดของตัวแปร

สมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ในทุกแท่นรีดเนื่องจากทุกแท่นรีดมีการแสดงค่าความหนาขาออกการตั้งค่า Roll gap และการเกิด Rolling force ในทุกแท่นรีด

2.2.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด (Equation of rolling force)

เมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่า Rolling force โดยทฤษฎีการรีด Classical rolling theory จะเห็นได้ว่าค่า Rolling force เป็นฟังก์ชันของตัวแปรดังต่อไปนี้

1. ความหนาของชิ้นงานรีดขาออกจากแท่นรีด (Inlet thickness, H)
2. ความหนาของชิ้นงานรีดขาเข้าจากแท่นรีด (Outlet thickness, h)

3. ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด (Backward tension, t_b)
4. ความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension, t_f)
5. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างลูกรีดและชิ้นงานรีด (Friction coefficient, μ)

โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงในรูปสมการ $P_i = P(H_i, h_i, t_{b_i}, t_{f_i}, \mu_i)$ เห็นได้ว่าสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของ Rolling force และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial P_i}{\partial t_{b_i}} \Delta t_{b_i} + \frac{\partial P_i}{\partial t_{f_i}} \Delta t_{f_i} + \frac{\partial P_i}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i$$

$$\Delta P_i - \frac{\partial P_i}{\partial H_i} \Delta H_i - \frac{\partial P_i}{\partial h_i} \Delta h_i - \frac{\partial P_i}{\partial t_{b_i}} \Delta t_{b_i} - \frac{\partial P_i}{\partial t_{f_i}} \Delta t_{f_i} - \frac{\partial P_i}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i = 0 \quad (2.2)$$

2.2.3 สมการ Forward slip (Forward slip equation)

เมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่า Forward slip โดยทฤษฎีของ Bland and Ford equation⁵ จะเห็นได้ว่าค่า Forward slip เป็นฟังก์ชันของตัวแปรดังต่อไปนี้

1. ความหนาของชิ้นงานรีดขาออกจากแท่นรีด (Inlet thickness, H)
2. ความหนาของชิ้นงานรีดขาเข้าจากแท่นรีด (Outlet thickness, h)
3. ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด (Backward tension, t_b)
4. ความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension, t_f)

โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงในรูปสมการ $f_i = f(H_i, h_i, t_{b_i}, t_{f_i})$ เห็นได้ว่าสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของ Forward slip และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\Delta f_i = \frac{\partial f_i}{\partial H_i} \Delta H_i + \frac{\partial f_i}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial f_i}{\partial t_{b_i}} \Delta t_{b_i} + \frac{\partial f_i}{\partial t_{f_i}} \Delta t_{f_i}$$

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

2.2.4 สมการอัตราเร็วของวัสดุงานรีด (Equation of material velocity)

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัสดุงานรีด (Strip velocity) และความเร็วยกของลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll velocity) โดยคำนวณจากการเกิด Forward slip สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_i = (1 + f_i)v_{Ri}$$

$$\Delta v_i = \Delta(1 + f_i) \cdot v_{Ri} + (1 + f_i) \cdot \Delta v_{Ri}$$

$$\Delta v_i - \Delta(1 + f_i) \cdot v_{Ri} - (1 + f_i) \cdot \Delta v_{Ri} = 0 \quad (2.4)$$

เมื่อ v = อัตราเร็วของวัสดุงานรีด (Strip velocity, m/min)

v_R = ความเร็วรอบของลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll velocity, m/min)

2.2.5 กฎความคงที่ของอัตราเร็วเชิงปริมาตร (Condition for volumetric velocity constancy)

ความสัมพัทธ์นี้เกิดมาจากหลักการที่ว่าอัตราเร็วของปริมาตรวัสดุงานรีดที่ออกจากแท่นรีดแต่แท่นภายในกระบวนการรีดต่อเนื่องเดียวกันหรือเป็นระบบเดียวกันโดยไม่มีการหยุดพักชิ้นงานรีดระหว่างแท่นรีด อัตราเร็วของปริมาตรวัสดุงานรีดเหล่านั้นจะมีค่าเท่ากันและมีค่าคงที่เสมอ จะได้ความสัมพัทธ์

$$h_i \cdot v_i \cdot w = h_{i+1} \cdot v_{i+1} \cdot w$$

เมื่อ w = ความกว้างของชิ้นงานรีด (Work piece width, mm)

$i+1$ = ลำดับแท่นรีดแทนต่อไปของแท่นรีดที่ i

ในกระบวนการรีดปกติการลดขนาดความหนาของชิ้นงานรีดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านความกว้างของชิ้นงานรีดมีผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อความกว้างของชิ้นงานรีด จึงสามารถอนุมานให้ความกว้างของชิ้นงานรีดทั้งระบบการรีดให้มีขนาดเท่ากันตลอดทั้งระบบได้ การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วเชิงปริมาตรจึงสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$h_i v_i = h_{i+1} v_{i+1}$$

$$\Delta h_i v_i + h_i \Delta v_i = \Delta h_{i+1} v_{i+1} + h_{i+1} \Delta v_{i+1}$$

$$\Delta h_i v_i + h_i \Delta v_i - \Delta h_{i+1} v_{i+1} - h_{i+1} \Delta v_{i+1} = 0 \quad (2.5)$$

2.2.6 กฎความคงที่ของความหนาชิ้นงานรีด (Condition for thickness constancy)

ความสัมพัทธ์นี้เกิดมาจากหลักการที่ว่า ในระบบการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์ใดๆ ความหนาขาออกของแท่นรีดใดๆจะมีขนาดเท่ากับความหนาขาเข้าของแท่นรีดตัวถัดไปเสมอ ซึ่งสมการแสดงความสัมพัทธ์ของการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$h_i = H_{i+1}$$

$$\Delta h_i = \Delta H_{i+1} \Rightarrow \Delta h_i - \Delta H_{i+1} = 0 \quad (2.6)$$

2.2.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (Equation of tension)

ความสัมพันธ์นี้เกิดมาจากหลักการที่ว่า ความเค้นแรงดึงที่เกิดบนชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัดเดียวกันบนระบบการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์เดียวกันจะมีค่าเท่ากันเสมอหรือสามารถกล่าวได้ว่า ความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension) ใดๆจะมีขนาดเท่ากับความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งด้านหลังแท่นรีด (Backward tension) ของแท่นรีดตัวถัดไปเสมอ แต่เนื่องจากการอนุมานว่าความกว้างของชิ้นงานเท่ากันตลอดระบบการรีด ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีดจึงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$t_{f_i} \cdot h_i = t_{b_{i+1}} \cdot H_{i+1}$$

$$\Delta t_{f_i} \cdot h_i + t_{f_i} \cdot \Delta h_i = \Delta t_{b_{i+1}} \cdot H_{i+1} + t_{b_{i+1}} \Delta H_{i+1}$$

$$\Delta t_{f_i} \cdot h_i + t_{f_i} \cdot \Delta h_i - \Delta t_{b_{i+1}} \cdot H_{i+1} - t_{b_{i+1}} \Delta H_{i+1} = 0 \quad (2.7)$$

บทที่ 3

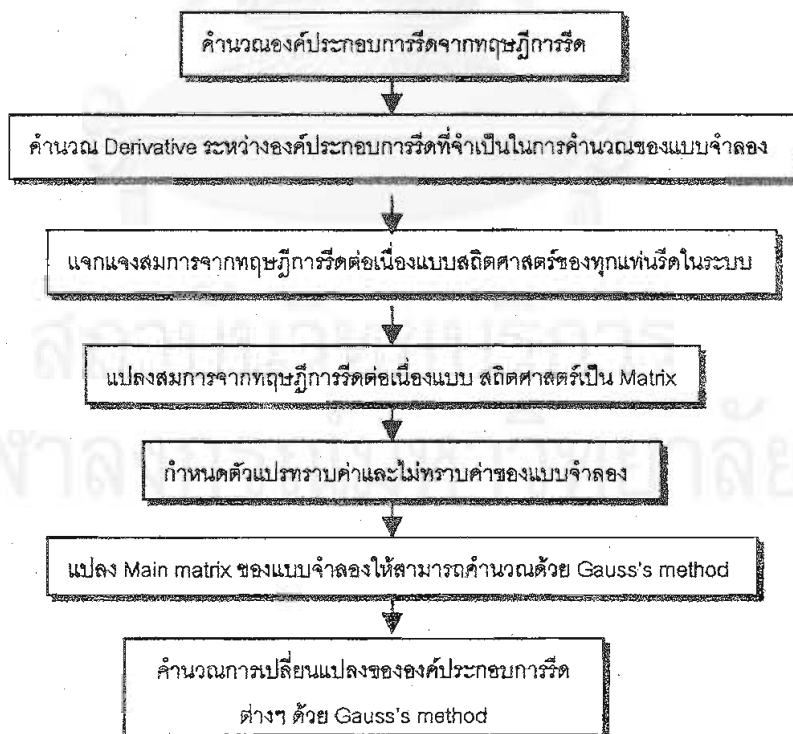
การสร้างแบบจำลองงานรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์

การสร้างแบบจำลองงานรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์นี้เป็นการนำความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบงานรีดทุกตัวที่ทำการพิจารณาในระบบงานรีดและตัวแปรที่ทำการคำนวณจากทฤษฎีการรีดแล้วมาทำการคำนวณความสัมพันธ์พร้อมกันทำให้ปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและข้อมูลที่ต้องการหาค่ามีจำนวนมากจนยากที่จะทำการคำนวณด้วยวิธีปกติ การศึกษานี้จึงทำการคำนวณโดยการใช้แบบจำลองทาง Computer มาใช้ โดยโปรแกรมที่ใช้ในการแปลง Source code คือ Visual Basic version 6 Professional Edition

ตัวอย่าง Source code ก่อนทำการแปลงได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยแสดงเฉพาะส่วนที่เป็น Module ของการคำนวณค่าองค์ประกอบการรีดต่างๆจากทฤษฎีการรีด, Module ของการหา Derivative ของความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบการรีด และ Procedure ของการคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดภายในแบบจำลองเท่านั้น

3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยสังเขป

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยสังเขปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทาง Computer จากทฤษฎีการรีดต่อเนื่อง

3.2 คำวณองค์ประกอบการรีดจากทฤษฎีการรีด

การคำนวณองค์ประกอบการรีดจากทฤษฎีการรีดเป็นการคำนวณที่เป็นอิสระในแต่ละแท่นรีด โดยการคำนวณจะอยู่บนพื้นฐานของ Classical rolling theory ที่เหมาะสมกับกระบวนการรีดเย็นแบบต่อเนื่องและในขั้นตอนเช่นการคำนวณหาค่า Rolling force และ Roll fattening ได้มีการนำเอากระบวนการทางคณิตศาสตร์ Newton-Raphson method⁸ มาร่วมกระบวนการคำนวณเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงด้วย

3.2.1 Rolling force

การศึกษาหาคำนวณค่า Rolling force จากการคำนวณการรีดเย็นของ Hill's equation⁴ โดยมีสมการคำนวณดังนี้

$$P = (\sigma_c - \sigma_a)L_d Q_p \quad (3.1)$$

เมื่อ P = Rolling force (kg/mm)

σ_c = Deformation resistant (kg/mm²)

σ_a = ความเค้นแรงดึงเฉลี่ย (Average tensile stress, kg/mm²)

L_d = Contact length (mm)

โดยทำการคำนวณค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยจากสมการ

$$\sigma_a = \frac{(t_f + t_b)}{2} \quad (3.2)$$

เมื่อ t_f = Forward tension (kg/mm²)

t_b = Backward tension (kg/mm²)

จากสมการที่ (3.1) ค่าตัวแปร Q_p สามารถหาได้จาก Bland & Ford equation ดังนี้

$$Q_p = 1.08 + 1.79r \frac{\mu}{\phi} \sqrt{r} - 1.02r \quad (3.3)$$

เมื่อ r = Reduction ratio

μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีด (Friction coefficient)

ϕ = Bite angle (radian) ซึ่งสามารถทำการคำนวณจากระยะสัมผัสระหว่างลูกรีดและชิ้นงานรีด

ในแต่ละแท่นรีดที่ขนานไปกับแกน x (Contact length, mm)

$$L_d = \sqrt{\frac{R\Delta h - \Delta h^2}{2}} \quad (3.4)$$

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

R = รัศมีลูกรีด (Roll radius, mm)

3.2.2 Deformation resistance

ค่าความเครียด (Strain, ϵ) ของวัสดุที่ตำแหน่งแทนรีดต่างๆสามารถคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\epsilon_i = \frac{-(\ln \frac{H_i}{H_1} + 2 \ln \frac{h_i}{H_i})}{3} \quad (3.5)$$

เมื่อ H_i = ความหนาขาเข้าของแทนรีดแทนที่ i (Inlet thickness of stand No.i)

H_1 = ความหนาขาเข้าของแทนรีดแทนที่ 1 (Inlet thickness of stand No.1)

h_i = ความหนาขาออกของแทนรีดแทนที่ i (Outlet thickness of stand No.i)

h_1 = ความหนาขาออกของแทนรีดแทนที่ 1 (Outlet thickness of stand No.1)

จากนั้นนำค่าความเครียด (Strain) ที่ได้มาคำนวณในสมการหาค่า Deformation resistant ในแต่ละแทนรีดตามสมการดังต่อไปนี้

$$k_m = \frac{1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} a(\epsilon + \epsilon_0)^n d\epsilon$$

$$k_m = \frac{a}{n+1} \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)^{n+1} - (\epsilon_1 + \epsilon_0)^{n+1}}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (3.6)$$

เมื่อ a , ϵ_0 และ n เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลการทดลอง Plane strain compressive test⁵

จากสมการที่ (3.2) เป็นการคำนวณค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยของแต่ละแทนรีดซึ่งสามารถทำการดัดแปลง Bland & Ford equation⁶ ดังต่อไปนี้

$$k_{meq} = k - \left\{ \frac{\phi_n}{\phi_1} \sigma_0 + (1 - \frac{\phi_n}{\phi_1}) \frac{\sigma_1}{1-r} \right\}$$

จากสมการข้างต้นสามารถแปลงรูปเป็นสมการหาค่า Deformation resistance สำหรับแบบจำลองการรีดนี้ได้ว่า

$$k = k_m - \left\{ \frac{\phi_n}{\alpha} t_f + (1 - \frac{\phi_n}{\alpha}) \frac{t_b}{1-r} \right\} \quad (3.7)$$

เมื่อ α และ ϕ_1 = Bite angle (radian)

ϕ_0 = Neutral point angle (radian)

3.2.3 Roll Flattening

ในกระบวนการรีดนั้น มีปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นที่ทำให้รัศมีของลูกรีดมีขนาดมากขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีดที่ทำการรีด เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Roll Flattening เกิดจากชิ้นงานรีดและลูกรีดที่ทำการรีดเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันเป็นผลให้ชิ้นงานรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบ Plastic deformation แต่ลูกรีดที่ทำการรีดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic deformation ซึ่งเป็นผลให้ผิวของลูกรีดบริเวณที่สัมผัสกับชิ้นงานรีดเกิดการแบนราบลงและจะคืนตัวเมื่อพ้นช่วงนั้นมาแล้ว การที่ลูกรีดบริเวณที่สัมผัสกับชิ้นงานแบนราบลงนี้เปรียบได้กับการที่รัศมีลูกรีดที่บริเวณนั้นมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณค่า Rolling force และองค์ประกอบการรีดอื่นๆ จึงมีการนำปรากฏการณ์นี้มาพิจารณาในการคำนวณด้วย

$$R' = R \left(1 + \frac{C_o P}{w \Delta h} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อ R' = Roll flattening radius (mm)

R = Primary roll radius (mm)

w = ความกว้างของชิ้นงานรีด (Work piece width, mm)

P = Rolling force (kg/mm)

ค่าตัวแปร C_o สามารถทำการคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_o = \frac{16(1 - \nu^2)}{\pi E} \quad (3.9)$$

เมื่อ E = Elastic modulus

ν = Poisson's ratio

ค่า Neutral angle (ϕ_n , radian) สามารถคำนวณโดยใช้ Orowan's equation ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi_n = \sqrt{\zeta} \tan\left(\frac{\sqrt{\zeta}}{2} H_n\right) \quad (3.10)$$

ตัวแปร H_n และ ζ สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$H_n = \frac{H_1}{2} - \frac{1}{2\mu} \ln \left\{ \frac{h_1 \left(\frac{1 - \sigma_0/k_0}{1 - \sigma_1/k_1} \right)}{h_0} \right\} \quad (3.11)$$

เมื่อ μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานและลูกรีด Friction coefficient

h_1 = ความหนาขาออก (Outlet thickness, mm)

h_0 = ความหนาขาเข้า (Inlet thickness, mm)

σ_0 = ความเค้นแรงดึงที่ด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension, kg/mm²)

σ_1 = ความเค้นแรงดึงที่ด้านหน้าแท่นรีด (Forward tension, kg/mm^2)

k_0 = Inlet deformation resistance (kg/mm^2)

k_1 = Outlet deformation resistance (kg/mm^2)

ตัวแปร H สามารถหาได้จากสมการ

$$H = \frac{2}{\sqrt{S}} \tan^{-1} \left(\frac{\phi}{\sqrt{S}} \right) \quad (3.12)$$

เมื่อ ϕ = Bite angle (radian)

ตัวแปร S สามารถหาได้จากสมการ

$$S = \frac{h_0}{R'} \quad (3.13)$$

3.2.4 Forward slip (f_s)

ค่า Forward slip สามารถหาได้จากสมการของ Bland & Ford ดังนี้

$$f_s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad (3.14)$$

เมื่อ v_f = อัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Work piece velocity, mm/s)

v_r = อัตราเร็วของลูกรีด (Roll velocity, mm/s)

สมการสามารถแปลงเป็น

$$f_s = \frac{v_f}{v_r} - 1 \quad (3.15)$$

ที่ตำแหน่ง Neutral Point

$$h_0 v_0 = h_n v_r$$

$$\frac{h_0}{h_n} = \frac{v_r}{v_0} \rightarrow \frac{h_n}{h_0} = \frac{v_0}{v_r} \quad (3.16)$$

นำสมการ (3.15) แทนในสมการ (3.15) จะได้

$$S_f = \frac{h_n}{h_0} - 1 \quad (3.17)$$

เมื่อ h_n = Neutral point thickness (mm)

ค่า h_n สามารถหาค่าโดยการแทนค่ามุม ϕ ในระบบ Radian ที่ตำแหน่ง Neutral point เข้าไปในสมการที่ (3.18) จะได้

$$h(x) = h(\phi) = h_0 + 2R'(1 - \cos \phi) \quad (3.18)$$

ส่วนค่า Backward slip สามารถหาได้จากขั้นตอนต่อไปนี

$$f_s = \frac{v_0 - v_r}{v_r}$$

$$f_b = \frac{v_r - v_1}{v_r}$$

จากสมการด้านบนสามารถแปลงรูปเป็นความสัมพันธ์ต่อไปนี

$$\begin{aligned} v_0 &= (1 + f_s)v_r \\ v_1 &= (1 - f_b)v_r \\ \frac{1 - f_b}{1 + f_s} &= \frac{v_1}{v_0} = \frac{h_0}{h_1} = 1 - r \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$f_b = r - (1 - r)f_s$$

เมื่อ f_s = Forward slip

f_b = Backward slip

h_0 = ความหนาขาเข้า (Inlet thickness, mm)

v_0 = อัตราเร็วขาเข้า (Inlet velocity, mm/s)

h_1 = ความหนาขาออก (Outlet thickness, mm)

v_1 = อัตราเร็วขาออก (Outlet velocity, mm/s)

องค์ประกอบการรืดทุกตัวที่ทำการคำนวณจะคำนวณแบบแทนที่รืดต่อแทนที่รืดโดยไม่เกี่ยวข้องกัน ยกเว้นการคำนวณค่าความเครียดของชิ้นงานรืดที่ทำการคำนวณโดยใช้ฐานข้อมูลของความหนาชิ้นงานขาเข้าตั้งต้นที่แทนที่รืดแทนแรกเสมอ เพื่อความถูกต้องในการคำนวณค่าความเครียดที่มากกว่าการใช้ข้อมูลความหนาขาเข้าแบบแทนที่รืดต่อแทน ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณค่าองค์ประกอบงานรืดอื่นๆที่นำค่าความเครียดไปใช้ในการคำนวณมีค่าเที่ยงตรงมากขึ้นตามไปด้วย

3.3 Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรืดที่จำเป็นในการคำนวณของแบบจำลอง

ค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรืดสามารถคำนวณโดยการหาอนุพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบการรืดทั้ง 2 ตัว โดยจำเป็นต้องมีค่าองค์ประกอบการรืดตัวหนึ่งเป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบการรืดอีกตัวหนึ่ง โดยตัวแปรอื่นๆในฟังก์ชันนั้นต้องกำหนดให้เป็นค่าคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ค่าอนุพันธ์ที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบการรืดเพียงสองตัวเท่านั้น การหา Derivative ขององค์ประกอบการรืดสามารถหาได้จากหลักการดังต่อไปนี้

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 โดยสามารถปรับเปลี่ยนตามการทดลองการรีดเพื่อให้ค่าที่คำนวณได้เกิดความเที่ยงตรงโดยค่า Derivative ที่จำเป็นต้องการมีดังต่อไปนี้

3.3.1 Derivative ของ Rolling force เทียบ Inlet thickness

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

3.3.2 Derivative ของ Rolling force เทียบ Outlet thickness

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

3.3.3 Derivative ของ Rolling force เทียบ Forward tension

$$\frac{\partial P}{\partial t_f} = \frac{P(t_{f1}) - P(t_{f2})}{t_{f1} - t_{f2}}$$

3.3.4 Derivative ของ Rolling force เทียบ Backward tension

$$\frac{\partial P}{\partial t_b} = \frac{P(t_{b1}) - P(t_{b2})}{t_{b1} - t_{b2}}$$

3.3.5 Derivative ของ Forward slip เทียบ Inlet thickness

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

3.3.6 Derivative ของ Forward slip เทียบ Outlet thickness

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

3.3.7 Derivative ของ Forward slip เทียบ Forward tension

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

3.3.8 Derivative ของ Forward slip เทียบ Backward tension

$$\frac{\partial}{\partial b} = \frac{f(t_{b1}) - f(t_{b2})}{t_{b1} - t_{b2}}$$

การหาค่า Derivative ที่จำเป็นระหว่างองค์ประกอบในกระบวนการรีดนี้ จะหาแบบอิสระไม่เกี่ยวข้องกันในแต่ละแท่นรีด ดังนั้นค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบเดียวกันในกระบวนการรีดระบบเดียวกัน แต่คำนวณที่ตำแหน่งแท่นรีดต่างกันก็จะมีค่าแตกต่างกันด้วย

3.4 แจกแจงสมการจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์

ในระบบการรีดที่ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองขึ้นมาเป็นการสร้างแบบจำลองของระบบการรีดที่มีแท่นรีดจำนวน 5 แท่นรีดโดยแต่ละแท่นรีดมีค่าองค์ประกอบการรีดที่มีผลการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวเนื่องกันตามทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์

3.4.1 สมการความสัมพันธ์ของความหนาของชิ้นงานรีด (Equation of strip thickness)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad \Delta h_1 - \Delta G_1 - \frac{\Delta P_1}{M_1} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad \Delta h_2 - \Delta G_2 - \frac{\Delta P_2}{M_2} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad \Delta h_3 - \Delta G_3 - \frac{\Delta P_3}{M_3} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad \Delta h_4 - \Delta G_4 - \frac{\Delta P_4}{M_4} = 0$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad \Delta h_5 - \Delta G_5 - \frac{\Delta P_5}{M_5} = 0$$

3.4.2 สมการแรงเนื่องจากการรีด (Equation of rolling force)

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

แทนรีดที่ 2
$$\Delta P_2 - \frac{\partial P_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial P_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial P_2}{\partial t_{b2}} \Delta t_{b2} - \frac{\partial P_2}{\partial t_{f2}} \Delta t_{f2} - \frac{\partial P_2}{\partial \mu_2} \Delta \mu_2 = 0$$

แทนรีดที่ 3
$$\Delta P_3 - \frac{\partial P_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial P_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial P_3}{\partial t_{b3}} \Delta t_{b3} - \frac{\partial P_3}{\partial t_{f3}} \Delta t_{f3} - \frac{\partial P_3}{\partial \mu_3} \Delta \mu_3 = 0$$

แทนรีดที่ 4
$$\Delta P_4 - \frac{\partial P_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial P_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial P_4}{\partial t_{b4}} \Delta t_{b4} - \frac{\partial P_4}{\partial t_{f4}} \Delta t_{f4} - \frac{\partial P_4}{\partial \mu_4} \Delta \mu_4 = 0$$

แทนรีดที่ 5
$$\Delta P_5 - \frac{\partial P_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial P_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial P_5}{\partial t_{b5}} \Delta t_{b5} - \frac{\partial P_5}{\partial t_{f5}} \Delta t_{f5} - \frac{\partial P_5}{\partial \mu_5} \Delta \mu_5 = 0$$

3.4.3 สมการ Forward slip (Forward slip equation)

แทนรีดที่ 1
$$\Delta f_1 - \frac{\partial f_1}{\partial H_1} \Delta H_1 - \frac{\partial f_1}{\partial h_1} \Delta h_1 - \frac{\partial f_1}{\partial t_{b1}} \Delta t_{b1} - \frac{\partial f_1}{\partial t_{f1}} \Delta t_{f1} = 0$$

แทนรีดที่ 2
$$\Delta f_2 - \frac{\partial f_2}{\partial H_2} \Delta H_2 - \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \Delta h_2 - \frac{\partial f_2}{\partial t_{b2}} \Delta t_{b2} - \frac{\partial f_2}{\partial t_{f2}} \Delta t_{f2} = 0$$

แทนรีดที่ 3
$$\Delta f_3 - \frac{\partial f_3}{\partial H_3} \Delta H_3 - \frac{\partial f_3}{\partial h_3} \Delta h_3 - \frac{\partial f_3}{\partial t_{b3}} \Delta t_{b3} - \frac{\partial f_3}{\partial t_{f3}} \Delta t_{f3} = 0$$

แทนรีดที่ 4
$$\Delta f_4 - \frac{\partial f_4}{\partial H_4} \Delta H_4 - \frac{\partial f_4}{\partial h_4} \Delta h_4 - \frac{\partial f_4}{\partial t_{b4}} \Delta t_{b4} - \frac{\partial f_4}{\partial t_{f4}} \Delta t_{f4} = 0$$

แทนรีดที่ 5
$$\Delta f_5 - \frac{\partial f_5}{\partial H_5} \Delta H_5 - \frac{\partial f_5}{\partial h_5} \Delta h_5 - \frac{\partial f_5}{\partial t_{b5}} \Delta t_{b5} - \frac{\partial f_5}{\partial t_{f5}} \Delta t_{f5} = 0$$

3.4.4 สมการอัตราเร็วของวัสดุงานรีด (Equation of material velocity)

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

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

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

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

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

3.4.5 กฎความคงที่ของอัตราเร็วเชิงปริมาตร (Condition for volumetric velocity constancy)

$$\text{แทนรีดที่ 1} \quad \Delta h_1 v_1 + h_1 \Delta v_1 - \Delta h_2 v_2 - h_2 \Delta v_2 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 2} \quad \Delta h_2 v_2 + h_2 \Delta v_2 - \Delta h_3 v_3 - h_3 \Delta v_3 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 3} \quad \Delta h_3 v_3 + h_3 \Delta v_3 - \Delta h_4 v_4 - h_4 \Delta v_4 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 4} \quad \Delta h_4 v_4 + h_4 \Delta v_4 - \Delta h_5 v_5 - h_5 \Delta v_5 = 0$$

3.4.6 กฎความคงที่ของความหนาขึ้นงานรีด (Condition for thickness constancy)

$$\text{แทนรีดที่ 1} \quad \Delta h_1 - \Delta H_2 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 2} \quad \Delta h_2 - \Delta H_3 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 3} \quad \Delta h_3 - \Delta H_4 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 4} \quad \Delta h_4 - \Delta H_5 = 0$$

3.4.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงระหว่างแทนรีด (Equation of tension)

$$\text{แทนรีดที่ 1} \quad \Delta t_{f1} \cdot h_1 + t_{f1} \cdot \Delta h_1 - \Delta t_{b2} \cdot H_2 - t_{b2} \Delta H_2 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 2} \quad \Delta t_{f2} \cdot h_2 + t_{f2} \cdot \Delta h_2 - \Delta t_{b3} \cdot H_3 - t_{b3} \Delta H_3 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 3} \quad \Delta t_{f3} \cdot h_3 + t_{f3} \cdot \Delta h_3 - \Delta t_{b4} \cdot H_4 - t_{b4} \Delta H_4 = 0$$

$$\text{แทนรีดที่ 4} \quad \Delta t_{f4} \cdot h_4 + t_{f4} \cdot \Delta h_4 - \Delta t_{b5} \cdot H_5 - t_{b5} \Delta H_5 = 0$$

เห็นได้ว่ามีสมการทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์อยู่ 3 สมการที่ไม่ได้แจกแจงในแทนรีดสุดท้ายได้แก่ กฎความคงที่ของอัตราเร็วเชิงปริมาตร, กฎความคงที่ของความหนาขึ้นงานรีดและสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงระหว่างแทนรีด เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ที่อ้างอิงถึงลำดับของแทนรีดปัจจุบัน (i) และแทนรีดในลำดับถัดไป (i+1) ทำให้ไม่สามารถทำการแจกแจงสมการที่ตำแหน่งแทนสุดท้ายได้

3.5 แปลงสมการจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์เป็น Matrix

สมการที่ได้จากการแจกแจงทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Unknown) คือค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดต่างๆที่แสดงในสมการแต่ละแทนรีด ส่วนค่า

สัมประสิทธิ์ของตัวแปรได้แก่ ค่าองค์ประกอบการรีดที่สามารถทำการคำนวณค่าได้และค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรีดที่สามารถคำนวณค่าได้เช่นกัน

เนื่องจากการคำนวณแบบจำลองด้วยทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์ เป็นการคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่า(ซึ่งในที่นี้คือการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดต่างๆ)ทั้งระบบการรีดแบบพร้อมกัน ทำให้การคำนวณมีตัวแปรและสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณมากมาย จึงนำสมการของทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์ที่ทำการแจกแจงในทุกแท่นรีดมาแปลงอยู่ในรูปแบบของ Matrix โดย Main matrix model ที่ทำการแปลงมาได้มีขนาด Matrix ที่ใหญ่มากจนเป็นการยากที่จะแสดงในหน้ากระดาษปกติได้ แต่สามารถแสดงในรูปแบบย่อได้ดังนี้

$$\text{คอลัมน์ที่ } \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{M_i}\right) & 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-1) & 0 \\ (1) & \left(\frac{\partial^2}{\partial H^2}\right) & \left(\frac{\partial^2}{\partial h^2}\right) & \left(\frac{\partial^2}{\partial h^2}\right) & \left(\frac{\partial^2}{\partial f^2}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{\partial^2}{\partial h^2}\right) \\ 0 & \left(\frac{\partial}{\partial H}\right) & \left(\frac{\partial}{\partial h}\right) & \left(\frac{\partial}{\partial h}\right) & \left(\frac{\partial}{\partial f}\right) & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-v_{n,i}) & (1) & (-1+f) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (v_i) \downarrow (-v_{n,i}) & 0 & 0 & 0 & (h_i) \downarrow (-h_{n,i}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [-1] & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [-v_{n,i}] & (f_i) & [-H_{n,i}] & (h_i) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อแต่ละคอลัมน์ของ Matrix จะแสดงตำแหน่งของตัวแปรไม่ทราบค่าหรือค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดในแต่ละแท่นรีดโดยแต่ละคอลัมน์ทำการแสดงสัมประสิทธิ์ของตัวแปรดังต่อไปนี้ โดย 1 คอลัมน์หลักเป็นตัวแทนของ 5 คอลัมน์ย่อยของแต่ละแท่นรีด

คอลัมน์ที่ 1

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

คอลัมน์ที่ 2

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

คอลัมน์ที่ 3

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

คอลัมน์ที่ 4

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

คอลัมน์ที่ 5

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

คอลัมน์ที่ 6

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

คอลัมน์ที่ 7

การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของชิ้นงานรีด (Δv)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 8

การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของลูกรีด (Δv_r)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

คอลัมน์ที่ 9

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

คอลัมน์ที่ 10

การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีด ($\Delta \mu$)				
แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5

โดยแถวแต่ละแถวของ Main matrix model แบบย่อจะแทนตำแหน่งแท่นรีดตั้งแต่แท่นรีดที่ 1 ถึงแท่นรีดที่ 5 ทุกแถวตั้งแต่แถวแรกถึงแถวที่ 7 โดยสมาชิกตำแหน่งต่างๆของ Main matrix model แบบย่อจะเป็นสัญลักษณ์แทน 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	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & 1 & 0 & \vdots \\ \vdots & & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}$
\langle -1 \rangle	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & -1 & 0 & \vdots \\ \vdots & & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & -1 \end{pmatrix}$
[-1]	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \vdots & & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix}$
\left\langle \frac{1}{M_i} \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
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial H} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial H_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial H_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial H_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial H_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial h} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial h_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial h_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial h_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial h_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial h_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial t_s} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial t_{s,1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial t_{s,2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial t_{s,3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial t_{s,4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial t_{s,5}} \end{pmatrix}$
$\left\langle -\frac{\partial P}{\partial t_f} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial t_{f,1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial t_{f,2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial t_{f,3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial t_{f,4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial t_{f,5}} \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\left\langle \frac{\partial P}{\partial \mu} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial P_1}{\partial \mu_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial P_2}{\partial \mu_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial P_3}{\partial \mu_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_4}{\partial \mu_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial P_5}{\partial \mu_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle \frac{\partial f}{\partial H} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial H_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial H_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial H_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial H_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle \frac{\partial f}{\partial h} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial h_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial h_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial h_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial h_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial h_5} \end{pmatrix}$
$\left\langle \frac{\partial f}{\partial t_b} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial t_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial t_{b2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial t_{b3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial t_{b4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial t_{b5}} \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\left\langle \frac{\partial f}{\partial t_f} \right\rangle$	$\begin{pmatrix} -\frac{\partial f_1}{\partial t_{f_1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial t_{f_2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial f_3}{\partial t_{f_3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_4}{\partial t_{f_4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_5}{\partial t_{f_5}} \end{pmatrix}$
$\langle -v_{R_i} \rangle$	$\begin{pmatrix} -v_{R_1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -v_{R_2} & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & -v_{R_3} & 0 & \vdots \\ \vdots & & 0 & -v_{R_4} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -v_{R_5} \end{pmatrix}$
$\langle -(1+f_i) \rangle$	$\begin{pmatrix} -(1+f_1) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -(1+f_2) & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & -(1+f_3) & 0 & \vdots \\ \vdots & & 0 & -(1+f_4) & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -(1+f_5) \end{pmatrix}$
$\begin{aligned} \langle v_i \rangle \cup [-v_{i+1}] \\ = \\ \langle v_i \rangle + [-v_{i+1}] \end{aligned}$	$\begin{pmatrix} v_1 & -v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & -v_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & -v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 & -v_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_5 \end{pmatrix}$
$\begin{aligned} \langle h_i \rangle \cup [-h_{i+1}] \\ = \\ \langle h_i \rangle + [-h_{i+1}] \end{aligned}$	$\begin{pmatrix} h_1 & -h_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 & -h_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & -h_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_4 & -h_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_5 \end{pmatrix}$

สัญลักษณ์	ความหมาย
$[-t_{i+1}]$	$\begin{pmatrix} 0 & -t_{b_2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & -t_{b_3} & 0 & 0 \\ \vdots & & 0 & -t_{b_4} & 0 \\ \vdots & & & 0 & -t_{b_5} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$
$\langle t_{f_i} \rangle$	$\begin{pmatrix} t_{f_1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & t_{f_2} & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & t_{f_3} & 0 & \vdots \\ \vdots & & 0 & t_{f_4} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & t_{f_5} \end{pmatrix}$
$[-H_{i+1}]$	$\begin{pmatrix} 0 & -H_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & -H_3 & 0 & 0 \\ \vdots & & 0 & -H_4 & 0 \\ \vdots & & & 0 & -H_5 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$
$\langle h_i \rangle$	$\begin{pmatrix} h_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & h_2 & 0 & & \vdots \\ \vdots & 0 & h_3 & 0 & \vdots \\ \vdots & & 0 & h_4 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & h_5 \end{pmatrix}$

3.6 การกำหนดตัวแปรทราบค่าและไม่ทราบค่าของแบบจำลอง

จาก Main matrix model จะพบว่าค่าตัวแปรไม่ทราบค่าของสมการโดยทั้งหมดเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดต่างๆที่ตำแหน่งแท่นรีดต่างๆทั้งหมดมีจำนวน 50 ตัวแปร แต่สมการจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิติศาสตร์ที่จะนำมาแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรที่กล่าวมามีเพียง 32 สมการ

เท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการกำหนดตัวแปรไม่ทราบค่าให้เป็นตัวแปรทราบค่าเพื่อให้สมการ จากทฤษฎีการรืดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์สามารถแก้สมการได้ โดยการกำหนดค่าของตัวแปรไม่ทราบ ค่าของสมการทั้งหมดนั้นต้องกำหนด 18 ตัวแปร เพื่อให้เหลือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าการเปลี่ยนแปลง 32 ตัวแปรเท่ากับจำนวนสมการ ทำให้ Main matrix model มีขนาด Matrix เป็น 32×32 ซึ่งสามารถทำการ แก้สมการโดยใช้กระบวนการทาง Numerical ของ Gauss eliminate method^o ได้

3.6.1 ตัวแปรไม่ทราบค่า

ค่าตัวแปรไม่ทราบค่าของสมการทั้งหมดเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรืดต่างๆที่ ตำแหน่งแท่นรืดทั้ง 5 แท่นรืดมีจำนวน 50 ตัวแปรได้แก่

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Rolling force

ตำแหน่งแท่นรืดที่ 1	ΔP_1
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 2	ΔP_2
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 3	ΔP_3
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 4	ΔP_4
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 5	ΔP_5

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของความหนาขาเข้าของชิ้นงาน

ตำแหน่งแท่นรืดที่ 1	ΔH_1
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 2	ΔH_2
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 3	ΔH_3
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 4	ΔH_4
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 5	ΔH_5

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของชิ้นงาน

ตำแหน่งแท่นรืดที่ 1	Δh_1
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 2	Δh_2
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 3	Δh_3
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 4	Δh_4
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 5	Δh_5

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Backward tension

ตำแหน่งแท่นรืดที่ 1	Δt_{b1}
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 2	Δt_{b2}
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 3	Δt_{b3}
ตำแหน่งแท่นรืดที่ 4	Δt_{b4}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 Δt_{5s}

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Forward tension

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 Δt_{f1}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 Δt_{f2}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3 Δt_{f3}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 4 Δt_{f4}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 Δt_{f5}

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Forward slip

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 Δf_1

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 Δf_2

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3 Δf_3

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 4 Δf_4

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 Δf_5

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Sheet velocity

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 Δv_1

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 Δv_2

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3 Δv_3

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 4 Δv_4

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 Δv_5

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Roll velocity

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 Δv_{R1}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 Δv_{R2}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3 Δv_{R3}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 4 Δv_{R4}

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 Δv_{R5}

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Roll gap

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1 ΔG_1

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 ΔG_2

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3 ΔG_3

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 4 ΔG_4

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 ΔG_5

3.6.1.1 การเปลี่ยนแปลงของ Friction coefficient

ตำแหน่งแท่นรีดที่ 1	$\Delta\mu_1$
ตำแหน่งแท่นรีดที่ 2	$\Delta\mu_2$
ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3	$\Delta\mu_3$
ตำแหน่งแท่นรีดที่ 4	$\Delta\mu_4$
ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5	$\Delta\mu_5$

3.6.2 ตารางกำหนดค่าตัวแปร

แบบจำลองการรีดต่อเนื่องจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์ที่ทำการศึกษานี้จะสร้างให้มีรูปแบบการกำหนดค่าแปรให้เป็นตัวแปรทราบค่าหรือไม่ทราบค่าโดยอาศัยตารางที่เพื่อการรับค่าเหล่านี้เข้าไปในแบบจำลอง โดยตัวแปรที่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรทราบค่าจะต้องมีการแสดงค่าที่เปลี่ยนแปลงแล้วเข้าไปในแบบจำลองด้วยโดยตารางการกำหนดค่าตัวแปรสามารถแสดงได้ดังนี้

ตัวแปรไม่ทราบค่า	แท่นรีดที่ 1		แท่นรีดที่ 2		แท่นรีดที่ 3		แท่นรีดที่ 4		แท่นรีดที่ 5	
	กำหนดเป็น		กำหนดเป็น		กำหนดเป็น		กำหนดเป็น		กำหนดเป็น	
ΔP	X		X		X		X		X	
ΔH	X		X		X		X		X	
Δk	X		X		X		X		X	
Δv_x	●	0	X		X		X		X	
Δv_r	X		X		X		X		●	0
Δv	X		X		X		X		X	
Δv_x	●	0	●	0	●	0	●	0	●	0
ΔG	●	0	●	0	●	0	●	0	●	0
$\Delta\mu$	●	0	●	0	●	0	●	0	●	0

ตารางที่ 3.1 กำหนดค่าตัวแปร

โดย สัญลักษณ์ ● หมายถึงถูกกำหนดเป็นตัวแปรทราบค่าโดยจะมีการระบุค่าการเปลี่ยนแปลงที่ทราบในช่องว่างถัดไป สัญลักษณ์ X หมายถึงการถูกกำหนดเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงจะถูกคำนวณหาในแบบจำลองต่อไป

3.6.3 หลักเกณฑ์การกำหนดค่าตัวแปร

จากตารางการกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถกำหนดค่าตัวแปรตัวแปรตัวใดก็ได้ให้เป็นตัวแปรทราบค่าและไม่ทราบค่าโดยมีหลักเกณฑ์พื้นฐานทางคณิตศาสตร์เพียงให้มีตัวแปรทราบค่าครบ 18 ตัวแปรเพื่อทำการแก้สมการแบบ Matrix ได้ แต่เนื่องจากสมการทั้งหมดสร้างขึ้นมาจากทฤษฎีการรีดทำให้เกิดหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการกำหนดค่าตัวแปรเพิ่มขึ้นมาดังนี้

- 3.6.3.1 การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งด้านหลังแท่นรีดตัวแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นการเริ่มต้นการรีดสามารถควบคุมความเค้นแรงดึงเริ่มต้นได้
- 3.6.3.2 การเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงที่ตำแหน่งด้านหน้าแท่นรีดตัวสุดท้ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นการสิ้นสุดการรีดสามารถควบคุมความเค้นแรงดึงสุดท้ายได้
- 3.6.3.3 การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของลูกรีดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในงานรีดมีขนาดใหญ่พอที่จะควบคุมอัตราเร็วของลูกรีดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง
- 3.6.3.4 การเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll gap) ถูกกำหนดให้เป็นค่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ในขั้นตอนการติดตั้งเครื่องจักร
- 3.6.3.5 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างทำการรีดแบบสถิตศาสตร์เนื่องจากยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากเพียงพอ การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีดสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อพิจารณาการรีดในภาวะพลศาสตร์

จากหลักเกณฑ์ในการสร้างแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรโดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีดของแท่นรีดใดแท่นรีดหนึ่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าแล้วกำหนดตัวแปรไม่ทราบค่าตัวอื่นเป็นตัวแปรทราบค่าแทนจะพบว่าการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรไม่ทราบค่าอื่นๆ ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าการพิจารณาการรีดแบบสถิตศาสตร์ทั่วไปมาก

3.7 แปลง Main matrix ของแบบจำลองให้สามารถคำนวณด้วย Gauss's method

3.7.1 การตัดหลักของ Main matrix model จากตารางกำหนดค่าตัวแปร

การแปลง Main matrix ของแบบจำลองให้สามารถคำนวณด้วย Gauss's method สามารถทำได้โดยการตัดหลักของตัวแปรที่ทราบค่าที่แน่นอนแล้วจากตารางกำหนดค่าตัวแปรออกจาก Main matrix model ซึ่งทำให้เป็นการลดขนาดของ Main matrix model ลง การตัดหลักของ Main matrix model จะทำการตัดหลักของตัวแปรที่ทราบค่าเฉพาะในตำแหน่งของแท่นรีดที่ทราบค่าการเปลี่ยนแปลงเมื่อหลักที่การตัดค่าลงจะทำการเลื่อนตำแหน่งของหลักถัดไปด้านขวามาแทนที่โดยตัวอย่าง Source code สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก เมื่อมีการกำหนดตัวแปรทราบค่าครบ 18 ตัวจะทำให้ Main matrix model มีขนาดเป็นเมตริกซ์จัตุรัส (Square matrix) หรือเป็น Matrix ที่มีขนาดเท่ากันทั้งแถวและหลัก ซึ่ง Square matrix นี้เป็น Matrix ที่สามารถหาค่าได้ตาม Gauss eliminate method ได้

3.7.2 การคำนวณค่าคงที่ของสมการจากตารางกำหนดค่าตัวแปร

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งในสมการการรีดต่อเนื่องเป็นตัวแปรทราบค่าแล้วย่อมส่งผลให้ตัวแปรดังกล่าวกลายเป็นค่าคงที่ในสมการ การคำนวณค่าคงที่จากสมการสามารถคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้โดยการแทนค่าตัวแปรทราบค่าลงในสมการและแทนค่า 0 ลงในตำแหน่งตัวแปรไม่ทราบค่าของสมการ

3.7.1 การคำนวณค่าคงที่จาก Equation of strip thickness

$$\begin{aligned}
 \text{แท่นรีดที่ 1} & \quad -\Delta h_1 + \Delta G_1 + \frac{\Delta P_1}{M_1} \\
 \text{แท่นรีดที่ 2} & \quad -\Delta h_2 + \Delta G_2 + \frac{\Delta P_2}{M_2} \\
 \text{แท่นรีดที่ 3} & \quad -\Delta h_3 + \Delta G_3 + \frac{\Delta P_3}{M_3} \\
 \text{แท่นรีดที่ 4} & \quad -\Delta h_4 + \Delta G_4 + \frac{\Delta P_4}{M_4} \\
 \text{แท่นรีดที่ 5} & \quad -\Delta h_5 + \Delta G_5 + \frac{\Delta P_5}{M_5}
 \end{aligned}$$

3.7.2 การคำนวณค่าคงที่จาก Equation of rolling force

$$\begin{aligned}
 \text{แท่นรีดที่ 1} & \quad -\Delta P_1 + \frac{\partial P_1}{\partial H_1} \Delta H_1 + \frac{\partial P_1}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial P_1}{\partial t_{b1}} \Delta t_{b1} + \frac{\partial P_1}{\partial t_{f1}} \Delta t_{f1} + \frac{\partial P_1}{\partial \mu_1} \Delta \mu_1 \\
 \text{แท่นรีดที่ 2} & \quad -\Delta P_2 + \frac{\partial P_2}{\partial H_2} \Delta H_2 + \frac{\partial P_2}{\partial h_2} \Delta h_2 + \frac{\partial P_2}{\partial t_{b2}} \Delta t_{b2} + \frac{\partial P_2}{\partial t_{f2}} \Delta t_{f2} + \frac{\partial P_2}{\partial \mu_2} \Delta \mu_2 \\
 \text{แท่นรีดที่ 3} & \quad -\Delta P_3 + \frac{\partial P_3}{\partial H_3} \Delta H_3 + \frac{\partial P_3}{\partial h_3} \Delta h_3 + \frac{\partial P_3}{\partial t_{b3}} \Delta t_{b3} + \frac{\partial P_3}{\partial t_{f3}} \Delta t_{f3} + \frac{\partial P_3}{\partial \mu_3} \Delta \mu_3 \\
 \text{แท่นรีดที่ 4} & \quad -\Delta P_4 + \frac{\partial P_4}{\partial H_4} \Delta H_4 + \frac{\partial P_4}{\partial h_4} \Delta h_4 + \frac{\partial P_4}{\partial t_{b4}} \Delta t_{b4} + \frac{\partial P_4}{\partial t_{f4}} \Delta t_{f4} + \frac{\partial P_4}{\partial \mu_4} \Delta \mu_4 \\
 \text{แท่นรีดที่ 5} & \quad -\Delta P_5 + \frac{\partial P_5}{\partial H_5} \Delta H_5 + \frac{\partial P_5}{\partial h_5} \Delta h_5 + \frac{\partial P_5}{\partial t_{b5}} \Delta t_{b5} + \frac{\partial P_5}{\partial t_{f5}} \Delta t_{f5} + \frac{\partial P_5}{\partial \mu_5} \Delta \mu_5
 \end{aligned}$$

3.7.3 การคำนวณค่าคงที่จาก Forward slip equation

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad -\Delta f_1 + \frac{\partial f_1}{\partial H_1} \Delta H_1 + \frac{\partial f_1}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial f_1}{\partial t_{b_1}} \Delta t_{b_1} + \frac{\partial f_1}{\partial t_{f_1}} \Delta t_{f_1}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad -\Delta f_2 + \frac{\partial f_2}{\partial H_2} \Delta H_2 + \frac{\partial f_2}{\partial h_2} \Delta h_2 + \frac{\partial f_2}{\partial t_{b_2}} \Delta t_{b_2} + \frac{\partial f_2}{\partial t_{f_2}} \Delta t_{f_2}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad -\Delta f_3 + \frac{\partial f_3}{\partial H_3} \Delta H_3 + \frac{\partial f_3}{\partial h_3} \Delta h_3 + \frac{\partial f_3}{\partial t_{b_3}} \Delta t_{b_3} + \frac{\partial f_3}{\partial t_{f_3}} \Delta t_{f_3}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad -\Delta f_4 + \frac{\partial f_4}{\partial H_4} \Delta H_4 + \frac{\partial f_4}{\partial h_4} \Delta h_4 + \frac{\partial f_4}{\partial t_{b_4}} \Delta t_{b_4} + \frac{\partial f_4}{\partial t_{f_4}} \Delta t_{f_4}$$

$$\text{แท่นรีดที่ 5} \quad -\Delta f_5 + \frac{\partial f_5}{\partial H_5} \Delta H_5 + \frac{\partial f_5}{\partial h_5} \Delta h_5 + \frac{\partial f_5}{\partial t_{b_5}} \Delta t_{b_5} + \frac{\partial f_5}{\partial t_{f_5}} \Delta t_{f_5}$$

3.7.4 การคำนวณค่าคงที่จาก Equation of material velocity

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

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

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

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

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

3.7.5 กฎความคงที่ของอัตราเร็วเชิงปริมาตร (Condition for volumetric velocity constancy)

$$\text{แท่นรีดที่ 1} \quad -\Delta h_1 v_1 - h_1 \Delta v_1 + \Delta h_2 v_2 + h_2 \Delta v_2$$

$$\text{แท่นรีดที่ 2} \quad -\Delta h_2 v_2 - h_2 \Delta v_2 + \Delta h_3 v_3 + h_3 \Delta v_3$$

$$\text{แท่นรีดที่ 3} \quad -\Delta h_3 v_3 - h_3 \Delta v_3 + \Delta h_4 v_4 + h_4 \Delta v_4$$

$$\text{แท่นรีดที่ 4} \quad -\Delta h_4 v_4 - h_4 \Delta v_4 + \Delta h_5 v_5 + h_5 \Delta v_5$$

3.7.6 กฎความคงที่ของความหนาขึ้นงานรีด (Condition for thickness constancy)

$$\begin{aligned}
 \text{แผ่นรีดที่ 1} & \quad -\Delta h_1 + \Delta H_2 \\
 \text{แผ่นรีดที่ 2} & \quad -\Delta h_2 + \Delta H_3 \\
 \text{แผ่นรีดที่ 3} & \quad -\Delta h_3 + \Delta H_4 \\
 \text{แผ่นรีดที่ 4} & \quad -\Delta h_4 + \Delta H_5
 \end{aligned}$$

3.7.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงระหว่างแผ่นรีด (Equation of tension)

$$\begin{aligned}
 \text{แผ่นรีดที่ 1} & \quad -\Delta t_{f1} \cdot h_1 - t_{f1} \cdot \Delta h_1 + \Delta t_{b2} \cdot H_2 + t_{b2} \Delta H_2 \\
 \text{แผ่นรีดที่ 2} & \quad -\Delta t_{f2} \cdot h_2 - t_{f2} \cdot \Delta h_2 + \Delta t_{b3} \cdot H_3 + t_{b3} \Delta H_3 \\
 \text{แผ่นรีดที่ 3} & \quad -\Delta t_{f3} \cdot h_3 - t_{f3} \cdot \Delta h_3 + \Delta t_{b4} \cdot H_4 + t_{b4} \Delta H_4 \\
 \text{แผ่นรีดที่ 4} & \quad -\Delta t_{f4} \cdot h_4 - t_{f4} \cdot \Delta h_4 + \Delta t_{b5} \cdot H_5 + t_{b5} \Delta H_5
 \end{aligned}$$

3.8 สมการรวมของแบบจำลองการรีดต่อเนื่อง

สมการรวมของแบบจำลองต่อเนื่องประกอบด้วย เมตริกซ์หลักที่ผ่านการตัดแถวตัดหลักจากข้อกำหนดเบื้องต้นและตารางกำหนดค่าตัวแปรแล้ว [A], เมตริกซ์ตัวแปรที่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า [B] และเมตริกซ์ค่าคงที่ที่ผ่านการคำนวณ [C] แล้วตามลำดับดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,31} & a_{1,32} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & & a_{2,31} & a_{2,32} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ a_{31,1} & a_{31,2} & & a_{31,31} & a_{31,32} \\ a_{32,1} & a_{32,2} & \cdots & a_{32,31} & a_{32,32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{1,1} \\ b_{2,1} \\ \vdots \\ b_{31,1} \\ b_{32,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{2,1} \\ \vdots \\ c_{31,1} \\ c_{32,1} \end{bmatrix}$$

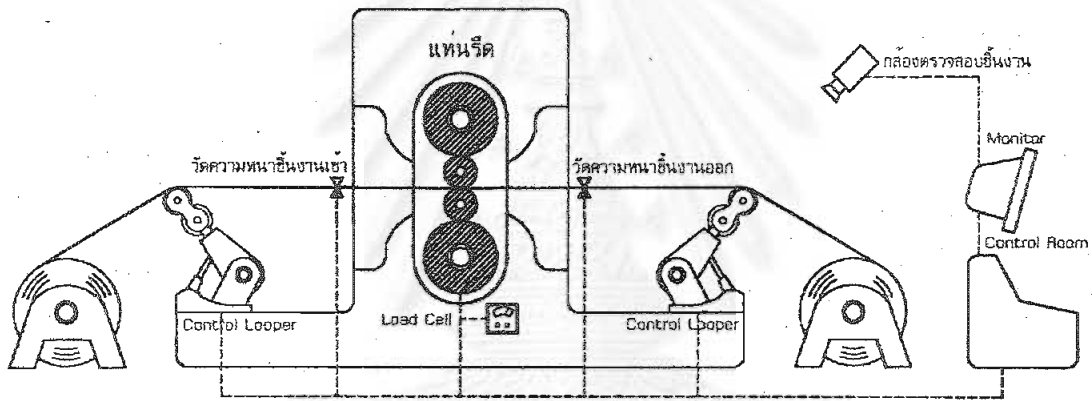
เมื่อทำการแก้สมการเมตริกซ์ของแบบจำลองดังที่กล่าวมาแล้วค่าคำตอบของเมตริกซ์ [B] ที่แต่ละตำแหน่งจะแสดงคำตอบหรือขนาดของตัวแปรไม่ทราบค่าแต่ละตัว

บทที่ 4

กระบวนการทดลอง

การทำแบบจำลองการรีดจากทฤษฎีการรีดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์จำเป็นต้องมีการทดลองมาสนับสนุนเพื่อให้ผลของการคำนวณด้วยแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการรีดเพื่อการผลิตมากที่สุด โดยผลการทดลองที่จำเป็นต่อการทำแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบได้แก่ การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการรีดซึ่งแสดงค่าองค์ประกอบต่างๆของการรีดกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และการทดลอง Plane strain compressive test เพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานรีด

4.1 การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริง



รูปที่ 4.1 แผนผังของแท่นรีดจำลอง

4.1.1 การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงแบบใช้แท่นรีดเดี่ยวโดยสังเขป

การจำลองแบบจากการรีดจริงนี้ทำการทดลองเพื่อหาค่าองค์ประกอบการรีดที่สำคัญในงานรีดมาเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบการรีดที่คำนวณได้จากการทำแบบจำลองได้แก่

- Rolling force (ton)
- Forward tension (kg/mm^2)
- Backward tension (kg/mm^2)
- ความหนาขาเข้า (มิลลิเมตร)
- ความหนาขาออก (มิลลิเมตร)
- อัตราเร็วของชิ้นงานรีด (เมตรต่อนาที)

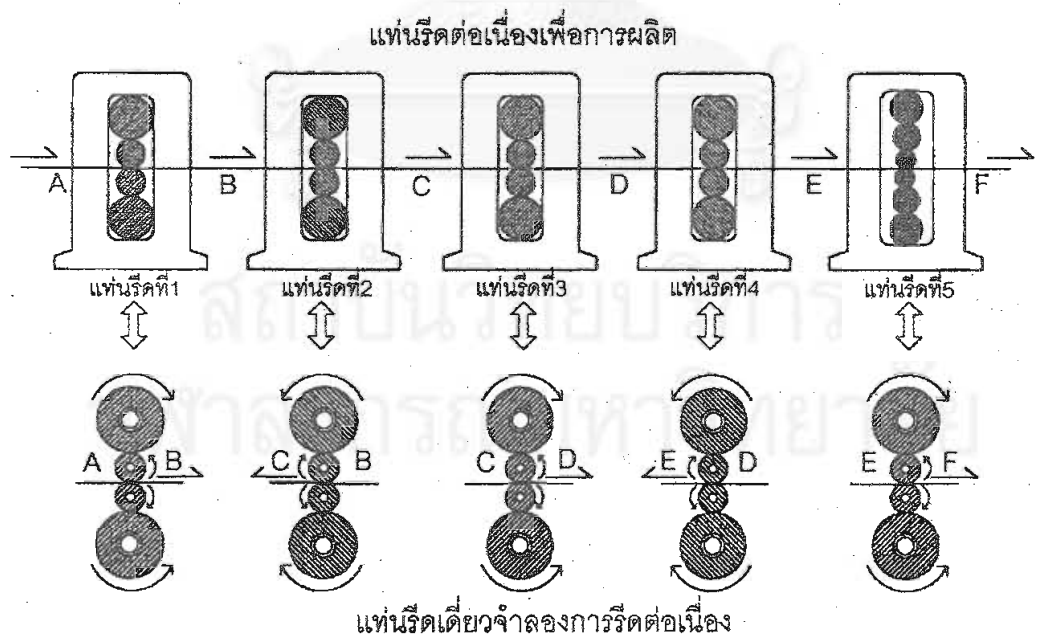
จากรูปที่ 4.1 แสดงแผนผังของแท่นรีดเพื่อการทดลองโดยสังเขป ค่า Rolling force สามารถวัดและคำนวณได้จาก Load cell ที่ตำแหน่งแท่นรีด ส่วนค่า Forward tension และ Backward tension สามารถวัดจากการใช้ Control looper ที่ตำแหน่งทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแท่นรีด ค่าความ

หน้าขาออกและความหนาขาเข้าของชิ้นงานรีดสามารถวัดจากอุปกรณ์วัดคุมที่ตำแหน่งทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแท่นรีด โดยค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดทั้งหมดจะถูกเชื่อมข้อมูลไปแสดงผลในห้องควบคุม (Control room) และมีกล้องคอยตรวจสอบชิ้นงานเพื่อคอยตรวจว่าชิ้นงานยังคงมีสภาพผิวที่ยอมรับได้ในกรณีที่มีการทดสอบตั้งค่า Forward tension หรือ Backward tension แบบต่างๆ โดยสภาพของผิวชิ้นงานรีดจะถูกเชื่อมต่อมาแสดงยังตำแหน่งจอภาพที่ Control room ด้วย

นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง Control room ยังมีหน้าที่ควบคุมการทำงานของแท่นรีดและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองคือ

- การตั้งค่า Roll gap ของแท่นรีดจำลองซึ่งจะเป็นตัวกำหนด Reduction ratio ของการรีด
- การกำหนดค่า Backward tension และ Forward tension ของ Control looper ที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลังของแท่นรีดจำลอง
- การกำหนดค่าอัตราเร็วของการรีดชิ้นงานโดยการควบคุมมอเตอร์ที่ให้กำลังในการหมุนลูกรีด

จากรูปที่ 4.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าเป็นการทดลองรีดที่จำลองแบบมาจากการรีดจริง แต่ทำการรีดที่แท่นรีดเพียงแท่นเดียวด้วยเหตุผลทางด้านค่าใช้จ่ายทางการทดลองซึ่งถ้าทำการจำลองแบบการรีดต่อเนื่องโดยการสร้างแท่นรีดถึง 5 แท่นรีดจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์การทดลองสูงมาก การทดลองนี้จึงทำการลดจำนวนแท่นรีดลงเหลือเพียงแท่นเดียวโดยอาศัยเทคนิคการหมุนลูกรีดกลับทิศทางและลดขนาดค่า Roll gap



รูปที่ 4.2 การแทนระบบรีดต่อเนื่องด้วยแท่นรีดเดียว

จากรูปที่ 4.2 แสดงการแทนกระบวนการรีดต่อเนื่องเพื่อการผลิตด้วยแท่นรีดเดียวจำลองเพื่อการทดลอง จากภาพจะเห็นได้ว่าที่แท่นรีดเพื่อการผลิต ชิ้นงานจะถูกรีดต่อเนื่องไปด้วยแท่นรีดถึง 5 แท่น

รีดโดยเป็นการรีดต่อเนื่องและพร้อมกันไป แต่ในกระบวนการทดลองจะเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงจึงทำการแทนที่โดยการใช้น้รีดเดี่ยว จากภาพชิ้นงานที่แท่นรีดแรกของกระบวนการรีดเพื่อการผลิตถูกรีดจากตำแหน่ง A ไป B ในแท่นรีดเดี่ยวก็ทำการรีดจาก A ไป B ในทิศทางเดียวกัน

ในตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 ของกระบวนการรีดเพื่อการผลิต ชิ้นงานถูกรีดจากตำแหน่ง B ไป C แต่ที่แท่นรีดเดียวนั้นทำการรีดจาก B ไป C ในทิศทางตรงกันข้าม โดยแท่นรีดเดี่ยวจะทำการลดขนาดของชิ้นงานด้วย Reduction ratio ขนาดเดียวกับตำแหน่งแท่นรีดที่ 2 ของกระบวนการรีดเพื่อการผลิต ในตำแหน่งแท่นรีดถัดไปของกระบวนการรีดเพื่อการผลิตจะถูกแทนที่ด้วยแท่นรีดเดี่ยวในลักษณะเดียวกัน โดยแท่นรีดเดี่ยวจะทำการลดขนาดของชิ้นงานด้วย Reduction ratio ขนาดเดียวกับตำแหน่งแท่นรีดนั้นๆ ของกระบวนการรีดเพื่อการผลิต สังเกตเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งแท่นรีดที่ 3 ของกระบวนการรีดเพื่อการผลิตจะถูกแทนที่ด้วยแท่นรีดเดี่ยวที่หมุนกลับทิศทางกับกระบวนการรีดเพื่อการผลิต ด้วยการหมุนกลับไปมาเช่นนี้ทำให้การทดลองไม่จำเป็นต้องสร้างแท่นรีดทดลองถึง 5 แท่นเช่นแท่นรีดเพื่อการผลิต

4.1.2 ตารางการทดลอง

การทดลองชุดที่	Backward tension kg/mm ²	Forward tension kg/mm ²	ความหนาขาเข้า mm	ความหนาขาออก mm
1	15	15	1.2	1.1
			1.2	0.9
			1.2	0.7
2	15	5	1.2	1.1
			1.2	0.9
			1.2	0.7
3	5	15	1.2	1.1
			1.2	0.9
			1.2	0.7
4	5	5	1.2	1.1
			1.2	0.9
			1.2	0.7
5	15	15	1.0	0.9
			1.0	0.7
			1.0	0.5
6	15	5	1.0	0.9
			1.0	0.7
			1.0	0.5
7	5	15	1.0	0.9
			1.0	0.7
			1.0	0.5
8	5	5	1.0	0.9
			1.0	0.7
			1.0	0.5

ตารางที่ 4.1 ลำดับการทดลองด้วยเครื่องจำลองการรีด

4.1.3 ชิ้นงานทดสอบ

การทดลองนี้ใช้ชิ้นงานเป็นเหล็กแผ่นบางที่ผ่านการรีดร้อนและม้วนเป็นชิ้นงานแล้วตามมาตรฐาน International standard JIS G3131 SPHC ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

Steel Grade	Thickness Mm	Mechanical Characteristic		
		Yield Stress kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Elongation %
SPHC	1.2	21.1	31.9	42.7

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบการรีด

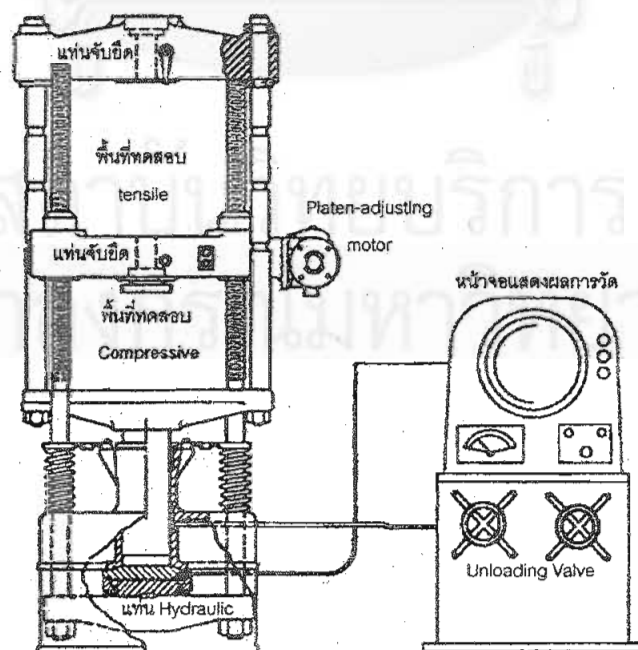
4.2 การทดลอง Plane strain compressive test

4.2.1 การทดลองด้วยกระบวนการ Plane strain compressive test โดยสังเขป

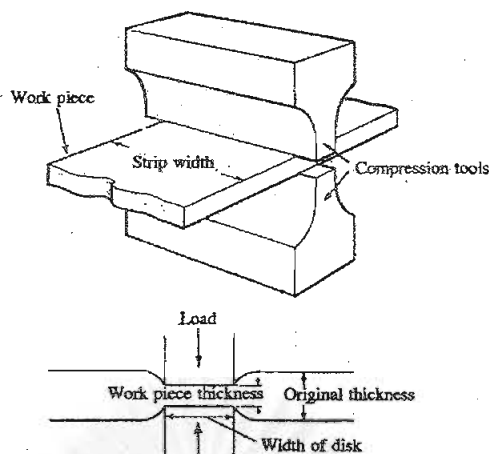
Plane strain compressive test เป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำการรีดเป็นชิ้นงานรีด โดยการคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = A(\varepsilon + b)^n$$

เมื่อ A , b และ n เป็นค่าคงที่ของสมการ ส่วนสัญลักษณ์ σ = Stress และ ε = Strain โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานสามารถทำการทดลองจาก Hydraulic Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 4.3 Hydraulic Testing Machine



รูปที่ 4.4 การทดสอบชิ้นงานด้วย Plane strain compressive test

จากรูปที่ 5.3 แสดง Hydraulic Testing Machine ซึ่งมีลักษณะเป็น Universal testing machine คือสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อทำการทดสอบชิ้นงานได้หลายรูปแบบ โดยการทดลองนี้จะทำการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ Compressive โดยอาศัยแรงกระทำจากกระบอก Hydraulic โดยความเค้นที่กระทำกับชิ้นงานจะถูกแสดงผลที่หน้าจอสแสดงผลการวัด ลักษณะการทดสอบโดยการความเค้นจากเครื่องมือจะเป็นเช่นรูปที่ 5.4 โดยชิ้นงานจะถูกนำมาวัดขนาดของความหนาที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการทดสอบด้วย Plane strain compressive test แล้ว

4.2.2 ตารางการทดลอง

ลำดับการทดลอง	Width of disk (mm)	Load (kg)
1	2	0
2	2	300
3	2	1780
4	2	1970
5	2	2070
6	2	2300
7	2	2510
8	2	2590
9	2	2760

ตารางที่ 4.3 การทดลอง Plane strain compressive test

4.2.3 ชิ้นงานทดสอบ

การทดลองนี้ใช้ชิ้นงานเป็นเหล็กแผ่นบางที่ผ่านการรีดร้อนและมีขนาดชิ้นงาน ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน International standard JIS G3131 SPHC ดังนี้

Steel Grade	Thickness Mm	Mechanical Characteristic		
		Yield Stress kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Elongation %
SPHC	1.2	21.1	31.9	42.7

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบ Plane strain compressive test

ชิ้นงานทดสอบนี้ถูกทดสอบด้วยจานกดทดสอบที่มีความกว้าง (Width of disk) ขนาด 2 มิลลิเมตร โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบมาทดลอง Plane strain compressive test จำนวน 3 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำกรทดลอง

บทที่ 5

ผลการทดลองและการคำนวณเพื่อหาค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง

5.1 ผลการทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริง

การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงตามตารางการทดลองที่ 4.1 ให้ผลการทดลองโดยการวัดค่าองค์ประกอบารรีดต่างๆ ได้ข้อมูลดิบตามภาคผนวก ข. ตารางที่ ๕.1 และ ๕.2 จากข้อมูลดิบที่ทำการวัดจากการจำลองกระบวนการรีดจริงสามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตเพื่อหาค่าตัวต่อขององค์ประกอบารรีดสำหรับการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงในสมการ Derivative ขององค์ประกอบารรีด ดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

Rolling Force kg/mm	Backward tension kg/mm ²	Forward tension kg/mm ²	ความหนาขา เข้า mm	ความหนาขา ออก mm	sheet velocity m/min
39.078	14.578	15.733	1.2	1.102	1.639
77.582	14.518	14.773	1.2	0.905	1.588
104.973	14.491	15.282	1.2	0.702	1.464
44.887	14.487	4.950	1.2	1.093	1.479
83.467	14.489	4.989	1.2	0.894	1.319
114.300	14.457	4.886	1.2	0.691	1.309
41.233	5.217	15.317	1.2	1.107	1.675
97.825	5.250	15.050	1.2	0.901	1.599
144.522	5.300	14.744	1.2	0.687	1.551
50.250	5.250	4.817	1.2	1.112	1.638
107.600	5.217	4.900	1.2	0.892	1.583
152.017	5.233	5.333	1.2	0.677	1.537

ตารางที่ 5.1 ค่าองค์ประกอบารรีดโดยวัดจากการจำลองกระบวนการรีดจริงเมื่อความหนาขาเข้าเป็น 1.2 มิลลิเมตร

จากตารางแสดงผลการทดลองเห็นได้ว่าขนาดขององค์ประกอบารรีดที่สามารถกำหนดได้อันได้แก่ ความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด, ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด, ความหนาขาเข้าและความหนาขาออก มีค่าเบี่ยงเบนไปจากตารางกำหนดการทดลองที่ 4.1 ไปบ้าง เนื่องจากเป็นการทดลองรีดจริงจึงเกิดความคลาดเคลื่อนจากการทำงานของเครื่องจักรซึ่งไม่สามารถควบคุมให้มีค่าเที่ยงตรงตามตารางอย่างสมบูรณ์แบบได้

Rolling Force kg/mm	Backward tension kg/mm ²	Forward tension kg/mm ²	ความหนาขา เข้า mm	ความหนาขา ออก mm	sheet velocity m/min
57.862	15.075	14.962	1	0.909	1.952
129.750	15.075	14.962	1	0.693	1.876
205.929	15.114	15.143	1	0.498	1.769
59.171	14.986	5.129	1	0.912	1.933
131.157	15.086	4.786	1	0.686	1.851
209.517	15.033	5.867	1	0.480	1.763
62.262	5.762	15.537	1	0.908	1.992
135.286	5.129	14.657	1	0.703	1.894
215.056	5.044	14.900	1	0.492	1.725
71.150	4.962	5.250	1	0.904	1.950
145.2142857	5.114	5.043	1	0.703	1.884
218.833	5.011	5.867	1	0.498	1.728

ตารางที่ 5.2 ค่าองค์ประกอบารรีดโดยวัดจากการจำลองกระบวนการรีดจริงเมื่อความหนาขาเข้าเป็น 1.0 มิลลิเมตร

จากตารางแสดงผลการทดลองรีดจริงดังกล่าวสามารถทำการปรับค่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของการคำนวณหาค่า Derivative แบบจำลองงานรีดต่อเนื่องแบบสถิตยศาสตร์ได้ โดยการแทนค่าเข้าไปในแบบจำลองที่สร้างขึ้นตาม Source code ที่ภาคผนวก ก ทำการคำนวณโดยกำหนด ค่าความเค้นแรงดึง ด้านหน้าแท่นรีด, ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด, ความหนาขาเข้า, ความหนาขาออก และอัตราเร็วของชิ้นงานให้ตรงกับตาราง จากนั้นจึงทำการปรับค่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของ Derivative แต่ละตัวภายใน Source code ที่ ภาคผนวก ก Macro ที่ ก.2 แล้วนำค่าองค์ประกอบารรีดที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับตารางผลการทดลองที่ 5.1 และ 5.2 ทำการปรับเปลี่ยนค่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของ Derivative ทุกตัวขององค์ประกอบารรีดที่ใช้ในการคำนวณแล้วทำการคำนวณใหม่จนกว่าผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองการรีดจะให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองรีดจริงและแบบจำลองการรีดทาง Computer จำเป็นต้องปรับค่าช่วงการเปลี่ยนแปลงทุกๆตัวพร้อมกันทั้งหมดเนื่องจากแบบจำลองการรีดต่อเนื่องเป็นแบบจำลองที่องค์ประกอบารรีดทุกตัวมีอิทธิพลต่อกันและกัน ฉะนั้นช่วงการเปลี่ยนแปลงของ Derivative การรีดแต่ละตัวจึงไม่มีค่าช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ตายตัว แต่จะเป็นการกำหนดให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของทุกๆ Derivative มีการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับการทดลองดังที่แสดงในตารางที่ 5.3 ดังนี้

Derivative	ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง	ขอบบน, + Δ	ช่วงการเปลี่ยนแปลง
		ขอบล่าง, - Δ	
$\partial P / \partial H$	$\partial H = H \pm \Delta H$	+0.08	0.16
		-0.08	
$\partial P / \partial h$	$\partial h = h \pm \Delta h$	+0.08	0.16
		-0.08	
$\partial P / \partial t_r$	$\partial t_r = t_r \pm \Delta t_r$	+0.05	0.10
		-0.05	
$\partial P / \partial t_f$	$\partial t_f = t_f \pm \Delta t_f$	+0.05	0.10
		-0.05	
$\partial y / \partial H$	$\partial H = H \pm \Delta H$	+0.08	0.16
		-0.08	
$\partial y / \partial h$	$\partial h = h \pm \Delta h$	+0.08	0.16
		-0.08	
$\partial y / \partial t_r$	$\partial t_r = t_r \pm \Delta t_r$	+0.05	0.10
		-0.05	
$\partial y / \partial t_f$	$\partial t_f = t_f \pm \Delta t_f$	+0.05	0.10
		-0.05	

ตารางที่ 5.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมเพื่อคำนวณหาค่า Derivative ของที่ประกอบการรีดที่จำเป็นต่อการทำแบบจำลองการรีดต่อเนื่อง

5.2 ผลการทดลอง Plane strain compressive test

จากตารางที่ 4.3 ตารางการทดลอง Plane strain compressive test ได้ผลการทดลองดังตารางแสดงผลการทดลองที่ 5.4 ดังนี้

ความหนา วัดครั้งที่1	ความหนา วัดครั้งที่2	ความหนา วัดครั้งที่3	ความหนา เฉลี่ย, mm	Width of work piece	Load (kg.)	ความเครียด ϵ	ความเค้น σ
0.99	0.99	0.99	0.99	20.2	0	0	0
0.986	0.988	0.991	0.988333	20.25	1875	0.00194	40.2576
0.941	0.94	0.939	0.94	20.26	2475	0.059599	53.1139
0.907	0.9	0.902	0.903	20.28	2475	0.10578	53.0615
0.906	0.895	0.894	0.898333	20.3	2350	0.111738	50.332
0.776	0.767	0.76	0.767667	20.33	2650	0.292502	56.6736
0.682	0.684	0.682	0.682667	20.38	2750	0.427453	58.6679
0.592	0.591	0.59	0.591	20.44	2850	0.593272	60.6228
0.484	0.482	0.479	0.481667	20.53	3000	0.82852	63.5337

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลอง Plane strain compressive test

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ*ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ
ชิ้นงานจากสมการต่อไปนี้

$$\sigma = A(\varepsilon + b)^n$$

เมื่อ A , b และ n เป็นค่าคงที่ของสมการจะได้ค่า ผลการคำนวณ A เท่ากับ 63.2, b เท่ากับ
0.0019 และ n เท่ากับ 0.08

นำผลการคำนวณที่ได้ไปแทนค่าในสมการการคำนวณเพื่อหาค่าองค์ประกอบการวิตเบื้องต้นใน
ภาคผนวก ก Macro ที่ ก.1 เป็นการทำให้แบบจำลองสามารถให้ผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องกับ
ชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าที่เลือกมาทำการทดลองได้ เนื่องจากค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองจะสะท้อนคุณ
สมบัติของวัสดุชิ้นงานได้



สถาบันวิทยบริการ
าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*การคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ในสมการ จากข้อมูลการทดลอง สามารถคำนวณตามวิธีการทางคณิตศาสตร์หรือ
Numerical method ได้หลายวิธี ในที่นี้ได้ทำการคำนวณโดย โปรแกรมช่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์สำเร็จรูป SPSS
เพื่อความรวดเร็วและแม่นยำของผลการคำนวณ

บทที่ 6

ผลการคำนวณโดยแบบจำลองและวิเคราะห์ผลการคำนวณ

6.1 ผลการคำนวณองค์ประกอบการรีด

ผลการคำนวณองค์ประกอบการรีดในแต่ละแท่นรีดจะขึ้นอยู่กับข้อมูลการรีดที่ใส่เข้าไปในแบบจำลอง โดยข้อมูลการรีดที่แตกต่างกันจะให้ผลการคำนวณที่แตกต่างกันด้วย โดยองค์ประกอบการรีดที่เป็นข้อมูลสำหรับใส่เข้าไปในแบบจำลองของทุกๆแท่นรีดได้แก่ ความหนาของชิ้นงานขาเข้า, ความหนาของชิ้นงานขาออก, ความเค้นแรงดึงด้านหน้าแท่นรีด, ความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีด, รัศมีลูกรีด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและลูกรีด ข้อมูลที่จำเป็นอีกประการที่จำเป็นต้องบอกให้แบบจำลองทราบได้แก่ ค่าความกว้างของชิ้นงานรีด, อัตราเร็วของชิ้นงานที่ขาออกจากระบบการรีด, Elastic modulus, Poisson ratio และ Mill modulus ซึ่งเป็นคุณสมบัติรวมของทุกๆแท่นรีดในระบบการรีดต่อเนื่อง

โดยการกำหนดค่าองค์ประกอบการรีดในที่นี้กำหนดตามลักษณะของการรีดที่สอดคล้องกับการทดลองการรีดจริงในส่วนที่สามารถกำหนดได้แก่รัศมีลูกรีด, ค่าความกว้างของชิ้นงานรีด, Mill modulus, Elastic modulus, Poisson ratio และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ส่วนองค์ประกอบการรีดที่สามารถปรับค่าได้ระหว่างการรีด จะทำการตั้งค่าให้มีค่าสอดคล้องกับการรีดจริงไม่เกิดภาวะผิดปกติระหว่างการรีดอันได้แก่ ความเค้นแรงดึงทั้งด้านหน้าและด้านหลังแท่นรีด, ความหนาของชิ้นงานทั้งขาเข้าและขาออกจากแท่นรีดและอัตราเร็วของชิ้นงานที่ขาออกจากระบบการรีด โดยได้กำหนดให้ข้อมูลองค์ประกอบการรีดเบื้องต้นเป็นดังนี้

ตำแหน่งแท่นรีดที่	Backward tension kg/mm ²	Forward tension kg/mm ²	ความหนาขาเข้า mm	ความหนาขาออก mm	รัศมีลูกรีด 250 mm	อัตราเร็วของชิ้นงานที่ขาออกจากระบบการรีด 675 m/min	Mill modulus 500 kg/mm ²	ค่าความกว้างของชิ้นงาน 903 mm	Elastic modulus = 21000 kg/mm ²	Poisson ratio = 0.3	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน=0.03
1	5	15	2	1.5							
2	15	15	1.5	1							
3	15	15	1	0.5							
4	15	15	0.5	0.3							
5	15	5	0.3	0.2							

ตารางที่ 6.1 กำหนดข้อมูลค่าองค์ประกอบการรีดเพื่อการคำนวณจากแบบจำลอง

จากข้อมูลองค์ประกอบการรีดของแท่นรีดแต่ละแท่นรีดและองค์ประกอบการรีดรวมของระบบการรีดที่ได้กล่าวมา ป้อนข้อมูลลงแบบจำลองที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก สามารถให้ผลการคำนวณค่าองค์ประกอบการรีดอื่นๆได้ตั้งค่าที่แสดงในตารางที่ 6.2

ตำแหน่ง แท่นรีดที่	Strain	Neutral Angle	Forward Slip	Roll Flattening Mm	Rolling force kg/mm	อัตราเร็วขึ้น งานรีด (m/min)	อัตราเร็วถูก รีด (m/min)
1	0.19179	0.00764	0.01243	318.96041	564.31990	90	88.89537
2	0.55799	0.00414	0.00552	321.87983	586.57363	135	134.25839
3	1.15524	0.00598	0.02422	339.00680	728.36446	270	263.61393
4	1.72684	0.00598	0.05321	446.29941	642.54645	450	427.26419
5	2.16743	0.00417	0.04746	546.87869	485.88620	675	644.41868

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณองค์ประกอบารรีดของแต่ละแท่นรีดจากแบบจำลอง

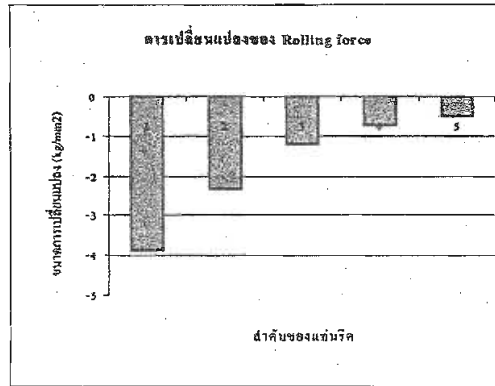
นอกจากแบบจำลองการรีดจะคำนวณค่าขององค์ประกอบารรีดของแต่ละแท่นรีดแล้ว แบบจำลองยังแสดงค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบารรีดที่จำเป็นดังตารางที่ 6.3

ตำแหน่ง แท่นรีดที่	$\frac{\partial P}{\partial H}$	$\frac{\partial P}{\partial h}$	$\frac{\partial P}{\partial v_r}$	$\frac{\partial P}{\partial v_r}$	$\frac{\partial v}{\partial H}$	$\frac{\partial v}{\partial h}$	$\frac{\partial v}{\partial v_r}$	$\frac{\partial v}{\partial v_r}$
1	530.0487	-531.9872	2.6122	-7.6333	-0.0133	0.0047	-0.0131	0.0047
2	491.4969	-512.5840	-12.5915	-1.4795	-0.0130	-0.0046	-0.0031	0.0022
3	575.1340	-738.7363	-12.9528	-2.3877	-0.0222	-0.0526	-0.0030	0.0023
4	1917.4003	-2519.4065	-9.8609	-3.8830	0.1500	-0.3548	-0.0020	0.0017
5	3620.3252	-4581.0821	-9.0835	-3.3480	0.4441	-0.7794	-0.0012	0.0008

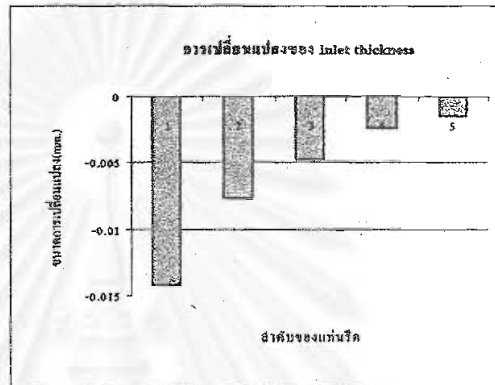
ตารางที่ 6.3 Derivative ระหว่างองค์ประกอบารรีด

แบบจำลองได้ทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบารรีดแต่ละตัวในแต่ละแท่นรีดโดยอาศัยการกำหนดข้อมูลองค์ประกอบารรีดที่ทราบค่าจากตารางที่ 6.1 และการกำหนดตัวแปรทราบค่าการเปลี่ยนแปลงและไม่ทราบค่าการเปลี่ยนแปลงในตารางที่ 3.1 โดยกำหนดให้ตัวแปรที่ทราบค่าทั้งหมดเป็น 0 ตามหลักเกณฑ์การกำหนดตัวแปรดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.6.3 ยกเว้นกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วขึ้นงานรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดที่ 5 มีการเปลี่ยนแปลงเป็น 0.1 เนื่องจากการกำหนดค่าเปลี่ยนแปลงที่องค์ประกอบารรีดเป็นค่าน้อยๆที่ตัวแปรตัวนี้ จะมีผลกระทบกับข้อมูลน้อยและสามารถเข้ากับข้อกำหนดของการแก้ปัญหาที่ว่าต้องมีตัวแปรที่ทราบค่าถูกกำหนดค่าไม่เท่ากับ 0 อย่างน้อย 1 ตัว จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบงานรีดดังรูปที่ 6.1

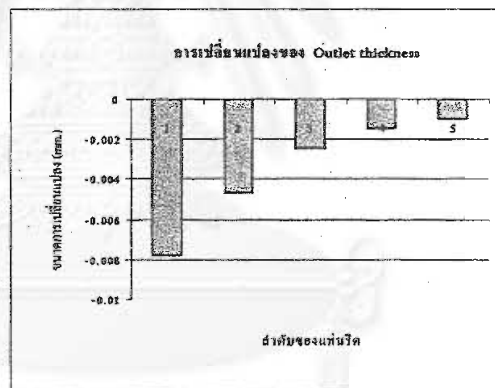
แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ Rolling force (ΔP) kg/mm
1	-3.889226793
2	-2.339618603
3	-1.209099626
4	-0.724891202
5	-0.4864053



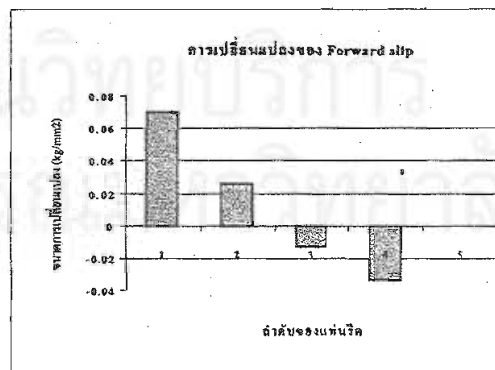
แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ ความหนา ขาเข้า (ΔH), mm
1	-0.014141672
2	-0.007778454
3	-0.004679237
4	-0.002418199
5	-0.001449782



แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ ความหนา ขาออก (Δh), mm
1	-0.007778454
2	-0.004679237
3	-0.002418199
4	-0.001449782
5	-0.000972811

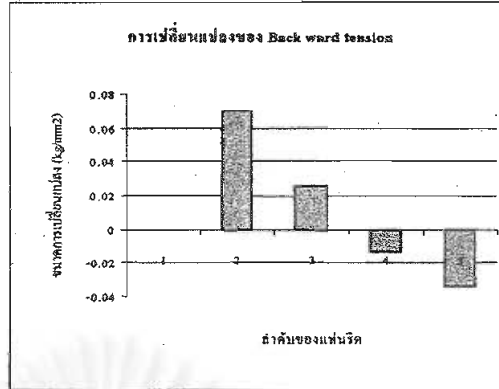


แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ forward slip (Δf)
1	0.000475568
2	-3.68702E-05
3	0.000123413
4	0.000122913
5	0.000155179

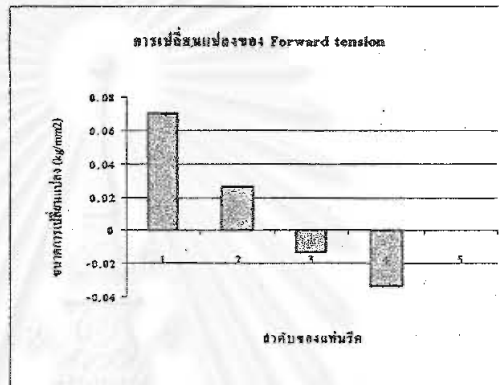


รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดจากแบบจำลอง

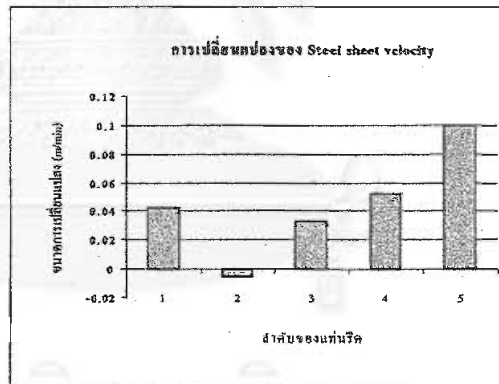
แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นด้านหลัง (Δt_r), kg/mm ²
1	0
2	0.069627823
3	0.025896433
4	-0.013028355
5	-0.033660112



แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นด้านหน้า (Δt_f), kg/mm ²
1	0.069627823
2	0.025896433
3	-0.013028355
4	-0.033660112
5	0



แท่นรีดที่	การเปลี่ยนแปลงของ อัตราเร็วขึ้นงานรีด (Δv_r), m/min
1	0.042275778
2	-0.004950132
3	0.032533286
4	0.052516423
5	0.1



รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบารรีดจากแบบจำลอง (ต่อ)

จากรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มโดยส่วนใหญ่ของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบารรีดจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่แท่นรีดแรก โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของ Rolling force, ความหนาขาเข้าและออกจากแท่นรีด, Forward slip และ ความเค้นแรงดึงทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแท่นรีดจากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าความเค้นแรงดึงความเค้นแรงดึงด้านหน้าของแท่นรีดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่แท่นรีดแรก ซึ่งเป็นความเค้นแรงดึงตัวเดียวกับความเค้นแรงดึงด้านหลังแท่นรีดในตำแหน่งแท่นรีดที่สอง จากปรากฏการณ์การแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงที่แบบจำลองแสดงมานี้สามารถแสดงให้เห็น

เห็นได้ว่าแท่นรีดแรกเป็นแท่นรีดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดมากที่สุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใดๆเกิดกับระบบการรีด

จากรูปที่ 6.1 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าค่าความเค้นแรงดึงด้านหน้าของแท่นรีดใดๆจะเท่ากับความเค้นแรงดึงด้านหลังของแท่นรีดแท่นถัดไปเนื่องจากการส่งผ่านความเค้นแรงดึงในวัสดุชิ้นงานเดียวกัน โดยปกติค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของลูกรีดในทุกๆแท่นรีดจะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากแท่นรีดมักควบคุมด้วยมอเตอร์ขนาดใหญ่และโครงสร้างของแท่นรีดมีความมั่นคงมาก เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรีดอื่นๆจะถือว่าคุณสมบัติใดๆของแท่นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และมักกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นตัวแปรทราบค่าเท่ากับศูนย์เสมอ ดังที่สังเกตจากตารางกำหนดค่าตัวแปร ตารางที่ 3.1 เห็นได้ว่า ค่า Roll gap หรือระยะระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีดจะมีการกำหนดค่าเป็นศูนย์ในทุกๆแท่นรีด และค่าอัตราเร็วของลูกรีดได้ถูกกำหนดเป็นศูนย์ในทุกๆแท่นรีดเช่นกัน

6.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรัศมีลูกรีดต่อความหนาสุดท้าย

การวิเคราะห์นี้เป็นการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงของรัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดว่าถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีลูกรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดใดๆจะส่งผลกระทบต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดมากที่สุด โดยการคำนวณนี้เป็นการคำนวณในแบบจำลองจึงมีการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีลูกรีดอย่างอิสระซึ่งต่างจากการทดลองจริงที่รัศมีลูกรีดทำการเปลี่ยนแปลงค่าไม่ได้ในการทดลอง

ในการคำนวณนี้ ข้อมูลการรีดอื่นๆที่จำเป็นต้องป้อนเข้าแบบจำลองนอกจากรัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดจะมีค่าคงที่เนื่องจากการแทนค่าเพื่อหาอิทธิพลของรัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดเท่านั้น จากแบบจำลองจะทำการแทนค่ารัศมีลูกรีดใหม่ในทุกแท่นรีดโดยลักษณะการแทนค่ารัศมีลูกรีดเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของรัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดจะเป็นดังตารางที่ 6.5

ขนาดการเพิ่มของรัศมี	ตำแหน่งแท่นรีด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
10 mm.	แท่นที่ 1	260	250	250	250	250
	แท่นที่ 2	250	260	250	250	250
	แท่นที่ 3	250	250	260	250	250
	แท่นที่ 4	250	250	250	260	250
	แท่นที่ 5	250	250	250	250	260
การเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกสุดท้าย, mm		-0.0009022	-0.0009022	-0.0009025	-0.0009034	-0.0009223

ตารางที่ 6.4 แทนค่ารัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดเพื่อหาอิทธิพลของรัศมีลูกรีด ในแต่ละตำแหน่งแท่นรีดต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกสุดท้าย

ขนาดการเพิ่ม ของรัศมี	ตำแหน่ง แท่นรีด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
30 mm.	แท่นที่ 1	280	250	250	250	250
	แท่นที่ 2	250	280	250	250	250
	แท่นที่ 3	250	250	280	250	250
	แท่นที่ 4	250	250	250	280	250
	แท่นที่ 5	250	250	250	250	280
การเปลี่ยนแปลงของความ หนาขาออกสุดท้าย, mm		-0.009022	-0.009024	-0.009032	-0.009053	-0.009662

ขนาดการเพิ่ม ของรัศมี	ตำแหน่ง แท่นรีด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
50 mm.	แท่นที่ 1	300	250	250	250	250
	แท่นที่ 2	250	300	250	250	250
	แท่นที่ 3	250	250	300	250	250
	แท่นที่ 4	250	250	250	300	250
	แท่นที่ 5	250	250	250	250	300
การเปลี่ยนแปลงของความ หนาขาออกสุดท้าย, mm		-0.009022	-0.009025	-0.009038	-0.009066	-0.010145

ขนาดการเพิ่ม ของรัศมี	ตำแหน่ง แท่นรีด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
80 mm.	แท่นที่ 1	330	250	250	250	250
	แท่นที่ 2	250	330	250	250	250
	แท่นที่ 3	250	250	330	250	250
	แท่นที่ 4	250	250	250	330	250
	แท่นที่ 5	250	250	250	250	330
การเปลี่ยนแปลงของความ หนาขาออกสุดท้าย, mm		-0.009022	-0.009027	-0.009046	-0.009077	-0.010943

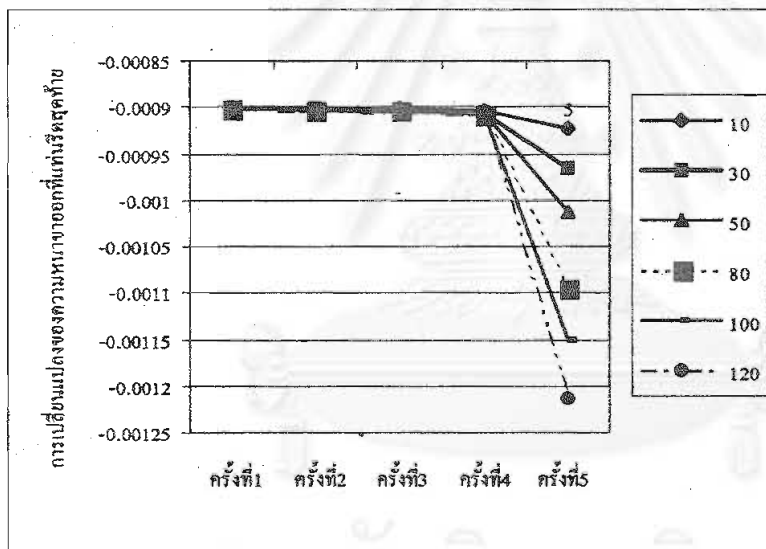
ขนาดการเพิ่ม ของรัศมี	ตำแหน่ง แท่นรีด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
100 mm.	แท่นที่ 1	350	250	250	250	250
	แท่นที่ 2	250	350	250	250	250
	แท่นที่ 3	250	250	350	250	250
	แท่นที่ 4	250	250	250	350	250
	แท่นที่ 5	250	250	250	250	350
การเปลี่ยนแปลงของความ หนาขาออกสุดท้าย, mm		-0.009021	-0.009028	-0.009050	-0.009079	-0.01152

ตารางที่ 6.4 แทนค่ารัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดเพื่อหาอิทธิพลของรัศมีลูกรีด ในแต่ละตำแหน่งแท่นรีด ต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกสุดท้าย (ต่อ)

ขนาดการเพิ่ม ของรัศมี	ตำแหน่ง แท่นรีด	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
120 mm.	แท่นที่ 1	370	250	250	250	250
	แท่นที่ 2	250	370	250	250	250
	แท่นที่ 3	250	250	370	250	250
	แท่นที่ 4	250	250	250	370	250
	แท่นที่ 5	250	250	250	250	370
การเปลี่ยนแปลงของความ หนาธาออกสุดท้าย, mm		-0.0009021	-0.0009029	-0.0009054	-0.0009079	-0.0012131

ตารางที่ 6.4 แทนค่ารัศมีลูกรีดในแต่ละแท่นรีดเพื่อหาอิทธิพลของรัศมีลูกรีด ในแต่ละตำแหน่งแท่นรีด ต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาธาออกสุดท้าย (ต่อ)

จากตารางที่ 6.5 เป็นผลการคำนวณจากแบบจำลองซึ่งสามารถนำมาแสดงในรูปแบบของกราฟ ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงรัศมีลูกรีด

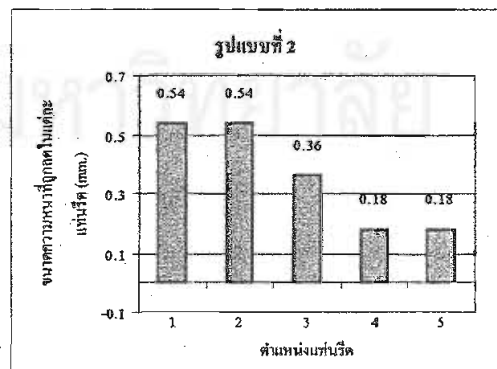
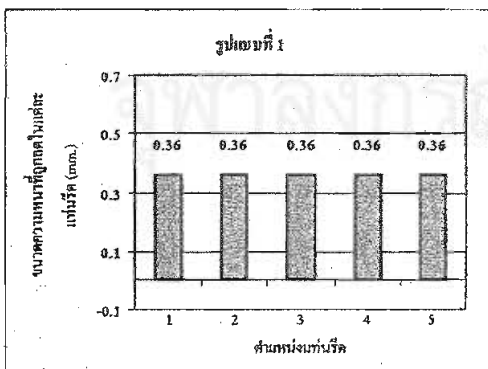
จากตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.2 จะสังเกตเห็นว่าลำดับครั้งที่ของการคำนวณตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 5 จะตรงกับลำดับของแท่นรีดที่ทำการเปลี่ยนขนาดรัศมีลูกรีด เช่นในตารางที่ 6.5 การคำนวณครั้งที่ 1 จำทำการเปลี่ยนขนาดรัศมีลูกรีดที่แท่นรีดที่ 1 ในขณะที่แท่นรีดลำดับอื่นๆไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นลำดับครั้งที่ในรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นการนำผลการคำนวณในตารางที่ 6.5 มาแสดงในรูป จึงแสดงถึงลำดับของแท่นรีดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรัศมีลูกรีดแล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาธาออกของชิ้นงานที่แท่นรีดสุดท้าย

จากภาพจะเห็นได้ว่าถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงรัศมีลูกรีดที่แท่นรีดสุดท้ายจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของชิ้นงานอย่างชัดเจนที่สุด โดยที่ตำแหน่งแท่นรีดอื่นการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมีลูกรีดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาขาออกของชิ้นงานเช่นกันแต่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงรัศมีลูกรีดที่แท่นรีดสุดท้าย

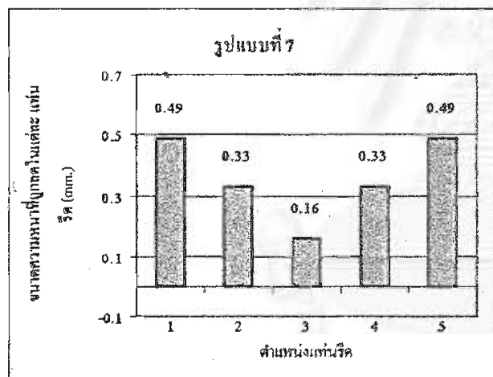
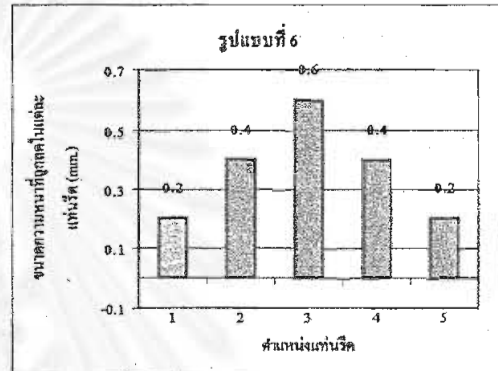
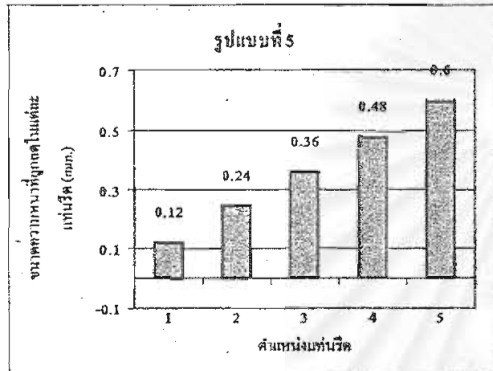
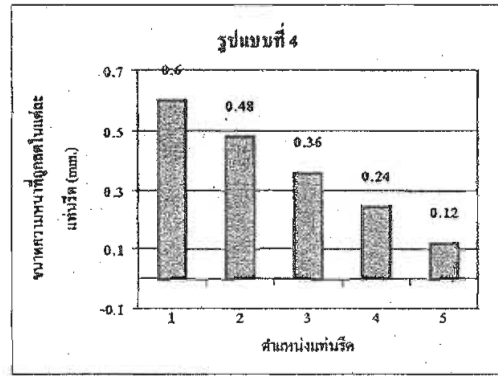
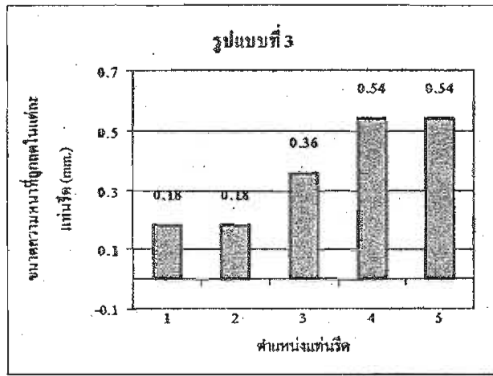
6.3 การวิเคราะห์หัพบาทของความหนาขาเข้าและขาออกต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีด

โดยปกติแล้วความหนาของชิ้นงานทั้งขาเข้าสู่ระบบการรีดและขาออกจากระบบการรีดของชิ้นงานรีดใด ๆ มักถูกกำหนดดังนี้ ความหนาของชิ้นงานขาเข้าสู่ระบบการรีดจะถูกกำหนดโดยความหนาของวัตถุดิบที่จะทำมาผลิตหรือรีดลดขนาด ซึ่งความหนาของวัตถุดิบนี้จะถูกกำหนดมาจากกระบวนการผลิตอื่นจึงมีขนาดตายตัวที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ส่วนความหนาของชิ้นงานขาออกจากระบบการรีดจะถูกกำหนดโดยความต้องการของการผลิตต่อเนื่องที่จะนำชิ้นงานสำเร็จของระบบการรีดนั้นไปใช้งาน เมื่อความหนาเข้าและออกจากระบบการรีดถูกจำกัดดังกล่าวมานี้ สิ่งที่สามารถกำหนดได้จากกรรรีดลดขนาดในระบบการรีดต่อเนื่องคือ การกำหนดว่าแท่นรีดแต่ละแท่นรีดที่ทำการรีดลดขนาดของความหนาชิ้นงาน แท่นรีดในตำแหน่งใดควรลดขนาดความหนาของชิ้นงานมาก แท่นรีดใดสมควรลดขนาดของชิ้นงานน้อย เพื่อให้ความหนาสุดท้ายของชิ้นงานที่ออกมา มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

ดังนั้นการวิเคราะห์นี้จึงออกแบบให้มีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานโดยการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปแบบของความหนาขาเข้าและความหนาขาออกของชิ้นงานในแท่นรีดแต่ละแท่นรีดเท่านั้น โดยกำหนดความหนาขาเข้าระบบการรีดทุกรูปแบบเท่ากันคือ 2 มิลลิเมตร กำหนดความหนาขาออกจากระบบการรีดทุกรูปแบบเท่ากันคือ 0.2 มิลลิเมตร โดยรูปแบบของการลดขนาดแต่ละรูปแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 รูปแบบการขนาดชิ้นงานในแต่ละแท่นรีด



รูปที่ 6.3 รูปแบบการขนาดขึ้นงานในแต่ละแท่นรีด (ต่อ)

จากรูปที่ 6.3 แสดงขนาดของการลดความหนาขึ้นงานในแต่ละแท่นรีด ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละแท่นรีดจะทำการลดขนาดของความหนาของขึ้นงานไม่เท่ากัน โดยในการรีดโดยแท่นรีดจริงการตั้งค่าการขนาดของขึ้นงานสามารถตั้งได้จากระยะห่างระหว่างลูกรีดภายในแท่นรีด (Roll gap) ค่าความหนาที่ถูกลดขนาดในแต่ละแท่นรีดที่แสดงในรูปที่ 6.3 คือค่าความต่างระหว่าง ความหนาขาเข้าและ Roll gap นั้นเอง

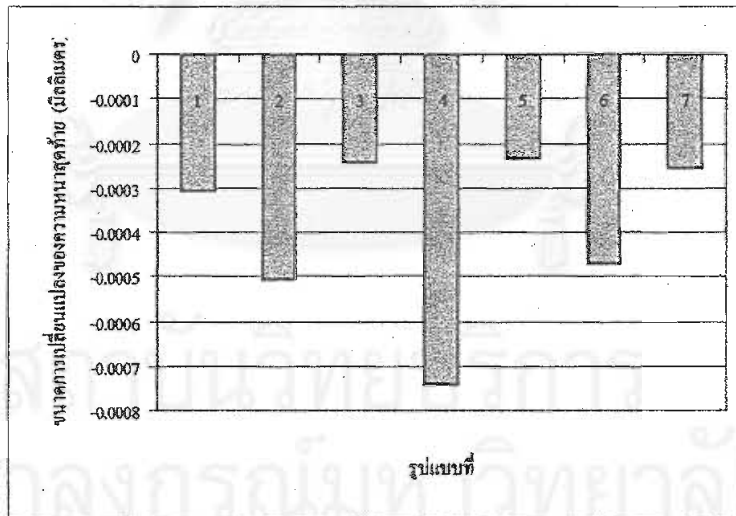
เมื่อนำรูปแบบการลดขนาดขึ้นงานแต่ละรูปแบบมาป้อนข้อมูลเข้าแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายจากระบบการรีด จะพบว่าผลการคำนวณในแต่ละรูปแบบไม่เท่ากัน โดยผลการคำนวณในแต่ละรูปแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.4

รูปแบบที่	แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5	ค่าการเปลี่ยนแปลง ความหนาสุดท้าย
1	2	1.64	1.28	0.92	0.56	-0.000304729
	1.64	1.28	0.92	0.56	0.2	
2	2	1.46	0.92	0.56	0.38	-0.000508996
	1.46	0.92	0.56	0.38	0.2	
3	2	1.82	1.64	1.28	0.74	-0.000244355
	1.82	1.64	1.28	0.74	0.2	
4	2	1.4	0.92	0.56	0.32	-0.00074345
	1.4	0.92	0.56	0.32	0.2	
5	2	1.88	1.64	1.28	0.8	-0.000233996
	1.88	1.64	1.28	0.8	0.2	
6	2	1.8	1.4	0.8	0.4	-0.000473331
	1.8	1.4	0.8	0.4	0.2	
7	2	1.51	1.18	1.02	0.69	-0.00025654
	1.51	1.18	1.02	0.69	0.2	

* หน่วยความหนาชิ้นงานทั้งหมดที่แสดงในตารางอยู่ในรูป มิลลิเมตร

ความหนาขาเข้าแท่นรีด, มิลลิเมตร
ความหนาขารออกจากแท่นรีด, มิลลิเมตร

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายจากรูปแบบการลดขนาดที่ต่างกัน



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายในแต่ละรูปแบบ

จากรูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการลดขนาดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในความหนาสุดท้ายของชิ้นงานมากที่สุดคือรูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 2 ตามลำดับ สังเกตจากรูปที่ 6.3 และตารางที่ 6.6 จะพบว่ารูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 2 เป็นรูปแบบที่มีการลดขนาดมากที่สุดที่ตำแหน่งแท่นรีดต้นๆ อันได้แก่ตำแหน่งแท่นรีดแรกและแท่นรีดที่สองตามลำดับ

รูปแบบการลดขนาดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในความหนาสุดท้ายของชิ้นงานน้อยที่สุดคือรูปแบบที่ 5 และรูปแบบที่ 3 ตามลำดับ สังเกตจากรูปที่ 6.3 และตารางที่ 6.6 จะพบว่ารูปแบบที่ 5 และรูปแบบที่ 3 เป็นรูปแบบที่มีการลดขนาดมากที่สุดที่ตำแหน่งแท่นรีดท้ายๆ อันได้แก่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้ายและแท่นรีดที่สี่ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบรูปแบบการลดขนาดที่ 1, รูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 7 จะพบว่ารูปแบบที่ 7 อันเป็นรูปแบบที่มีการลดขนาดมากที่สุดที่ตำแหน่งแท่นรีดต้นและปลายของระบบการรีดมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายน้อยที่สุดในบรรดา รูปแบบการลดขนาดทั้งสามรูปแบบ และรูปแบบที่ 6 อันเป็นรูปแบบที่มีการลดขนาดมากที่สุดที่ตำแหน่งแท่นรีดตรงกลางของระบบการรีดมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายมากที่สุดในบรรดา รูปแบบการลดขนาดทั้งสามรูปแบบ

จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายชิ้นงานจากรูปแบบการลดขนาดทั้งหมด จะพบว่า การลดขนาดของความหนาแผ่นชิ้นงานในตำแหน่งแท่นรีดแท่นต่างๆ ของระบบการรีดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายชิ้นงานมากกว่าการลดขนาดของความหนาแผ่นชิ้นงานในตำแหน่งแท่นรีดแท่นท้ายๆ ของระบบการรีด ดังนั้นในระบบการรีดต่อเนื่องควรทำการลดขนาดของชิ้นงานมากในตำแหน่งแท่นรีดสุดท้ายหรือใกล้เคียงเพื่อลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายชิ้นงาน

6.4 การวิเคราะห์บทบาทของอัตราเร็วของชิ้นงานรีดต่อความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีด

อัตราเร็วของชิ้นงานรีดถือว่าเป็นองค์ประกอบการรีดที่สำคัญมากตัวหนึ่ง เนื่องจากเป็นตัวบอกว่าการรีดนั้นๆ สามารถให้ผลผลิตมากน้อยเพียงไรในช่วงเวลาการผลิต อัตราเร็วของชิ้นงานรีดในแต่ละตำแหน่งแท่นรีดจะไม่เท่ากันเนื่องจากปริมาตรของชิ้นงานรีดที่เข้าออกในแต่ละแท่นรีดไม่เท่ากัน แต่อัตราเร็วของชิ้นงานรีดในแต่ละตำแหน่งแท่นรีดจะมีความสัมพันธ์กันอยู่โดยอาศัยกฎการคงที่ของอัตราเร็วปริมาตรของชิ้นงานรีดในการคำนวณ โดยการวัดค่าอัตราเร็วของชิ้นงานรีดนี้จะวัดอ้างอิงที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้าย

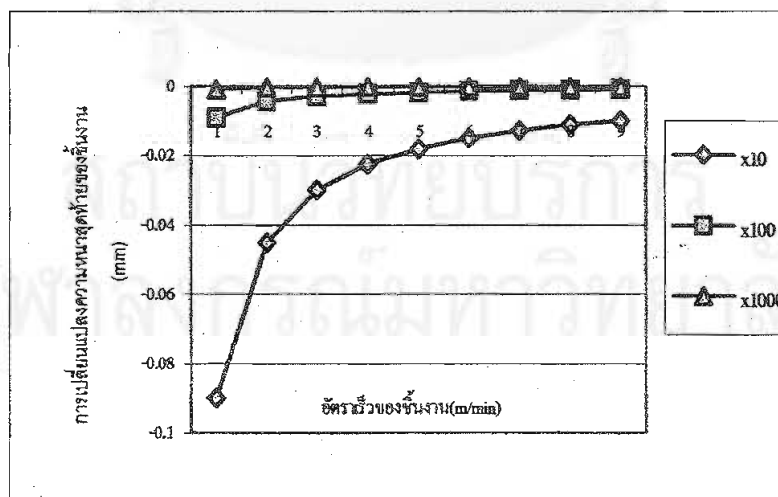
ในกระบวนการรีดจึงสามารถทำการควบคุมอัตราเร็วของชิ้นงานรีดโดยการควบคุมจากอัตราเร็วของลูกรีดของแต่ละแท่นรีด การคำนวณหาค่าอัตราเร็วรอบของลูกรีดจากอัตราเร็วของชิ้นงานรีดในแต่ละแท่นรีดสามารถคำนวณโดยนำขนาดของอัตราเร็วของชิ้นงานรีดมาคูณกับผลบวกระหว่าง 1 และค่า Forward slip ของแท่นรีดนั้นๆ หรือสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v_{Ri} = v_i (1+f)$$

การวิเคราะห์ว่าอัตราเร็วของชิ้นงานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงาน รัศมีอย่างไรบ้างสามารถทำได้โดย การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเร็วของชิ้นงานรัศมีที่แทนรัศมีสุดท้ายในแบบ จำลองโดยองค์ประกอบการรัศมีตัวอื่นยังมีค่าคง และให้แบบจำลองทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของ ความหนาสุดท้ายของชิ้นงานออกมา การเปลี่ยนค่าอัตราเร็วของชิ้นงานรัศมีที่แทนรัศมีสุดท้ายจะส่งผลให้ อัตราเร็วชิ้นงานที่ตำแหน่งแทนรัศมีอื่นๆมีการเปลี่ยนค่าไปด้วยตามความสัมพันธ์

อัตราเร็ว ชิ้นงานรัศมี m/min	การเปลี่ยนแปลงของ ความหนาชิ้นงาน สุดท้าย, mm	อัตราเร็ว ชิ้นงานรัศมี m/min	การเปลี่ยนแปลงของ ความหนาชิ้นงาน สุดท้าย, mm	อัตราเร็ว ชิ้นงานรัศมี m/min	การเปลี่ยนแปลงของ ความหนาชิ้นงาน สุดท้าย, mm
10	-0.090215683	100	-0.009021568	1000	-0.000902157
20	-0.045107841	200	-0.004510784	2000	-0.000451078
30	-0.030071894	300	-0.003007189	3000	-0.000300719
40	-0.022553921	400	-0.002255392	4000	-0.000225539
50	-0.018043137	500	-0.001804314	5000	-0.000180431
60	-0.015035947	600	-0.001503595	6000	-0.000150359
70	-0.012887955	700	-0.001288795	7000	-0.000128888
80	-0.01127695	800	-0.001127696	8000	-0.00011277
90	-0.010023965	900	-0.001002396	9000	-0.00010024

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายจากอัตราเร็วของชิ้นงานรัศมีที่ตำแหน่งแทนรัศมีสุดท้ายที่มีขนาดแตกต่างกันจากการคำนวณของแบบจำลอง



รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายในแต่ละขนาดอัตราเร็วของชิ้นงานที่ตำแหน่งแทนรัศมีแทนสุดท้าย

จากตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าอัตราเร็วของชิ้นงานที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้ายจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนจากอัตราเร็วของชิ้นงานที่มีขนาดต่ำมากไปจนถึงสูงมากเพื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับชิ้นงานที่อัตราเร็วของชิ้นงานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานจะแปรผกผันกับอัตราเร็วของชิ้นงานรีด เมื่อชิ้นงานรีดมีอัตราเร็วที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีดมีขนาดน้อยลง จากตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.5 เป็นการแสดงให้เห็นผลการคำนวณจากแบบจำลองซึ่งเป็นการคำนวณเพื่อหาบทบาทของอัตราเร็วของชิ้นงานต่อให้การเปลี่ยนแปลงความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรีด ซึ่งการตั้งอัตราเร็วของชิ้นงานเพื่อประสิทธิภาพของระบบการรีดในกระบวนการรีดจริงจะมีข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดกำลังของมอเตอร์ที่ทำการควบคุมแท่นรีดทำให้ไม่สามารถเร่งอัตราเร็วของชิ้นงานรีดให้มีอัตราเร็วสูงดังเช่นแบบจำลองได้

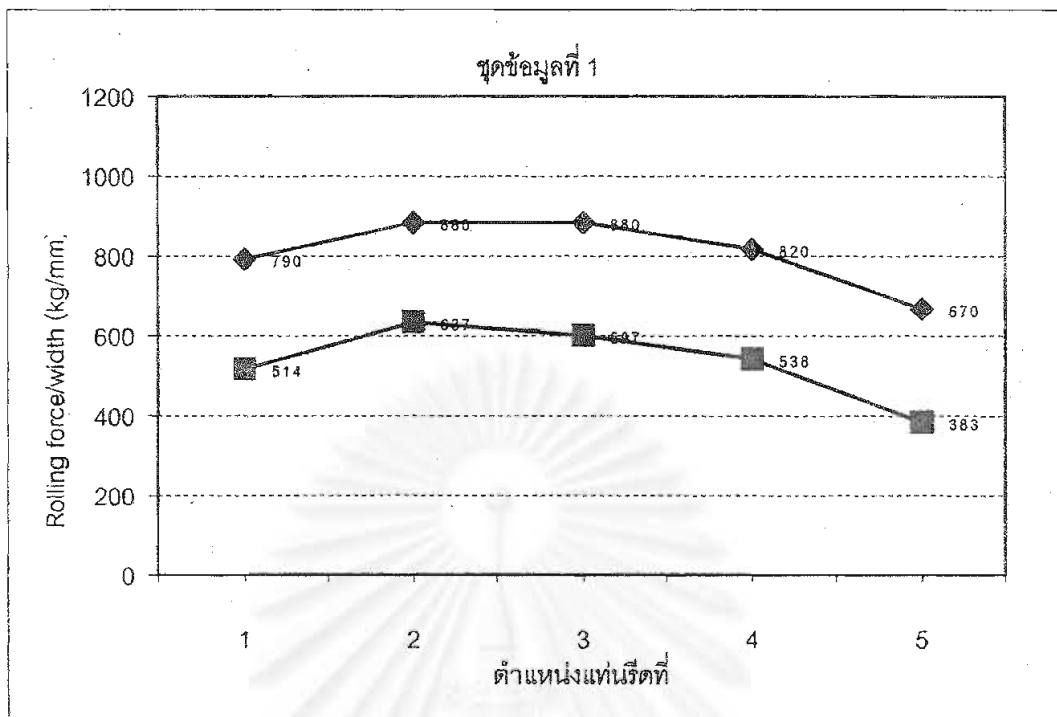
6.5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า Rolling force จากแบบจำลองกับกระบวนการรีดจริง

ตารางที่ 6.7, 6.8 และ 6.9 แสดงค่า Rolling force จากการรีดจริง โดยทำการวัดค่า Rolling force จากการกำหนดค่าองค์ประกอบการรีดที่สามารถควบคุมได้คือ

1. ความหนาขาเข้าและความหนาขาออกในแต่ละแท่นรีด (Inlet thickness และ Outlet thickness)
2. ความกว้างของชิ้นงานรีด (Steel sheet width)
3. การลดขนาดชิ้นงานรีด (Reduction, %) ของแต่ละแท่นรีด
4. เค้นแรงดึงทางด้านหน้าและด้านหลังของแท่นรีด (Backward และ Forward tension)
5. อัตราเร็วของชิ้นงานรีดที่ตำแหน่งแท่นรีดสุดท้าย (Final sheet velocity)

จากตารางที่ 6.7, 6.8 และ 6.9 แสดงให้เห็นการวัดค่า Rolling force จากองค์ประกอบการรีดที่มีค่าแตกต่างกัน เพื่อเป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่า Rolling force จากกระบวนการรีดจริงในการผลิตที่ค่าองค์ประกอบการรีดที่แตกต่างกัน

ค่า Rolling force จากการคำนวณและชุดข้อมูลจากกระบวนการรีดจริงได้แสดงเปรียบเทียบกันในรูปที่ 6.6, 6.7 และ 6.8



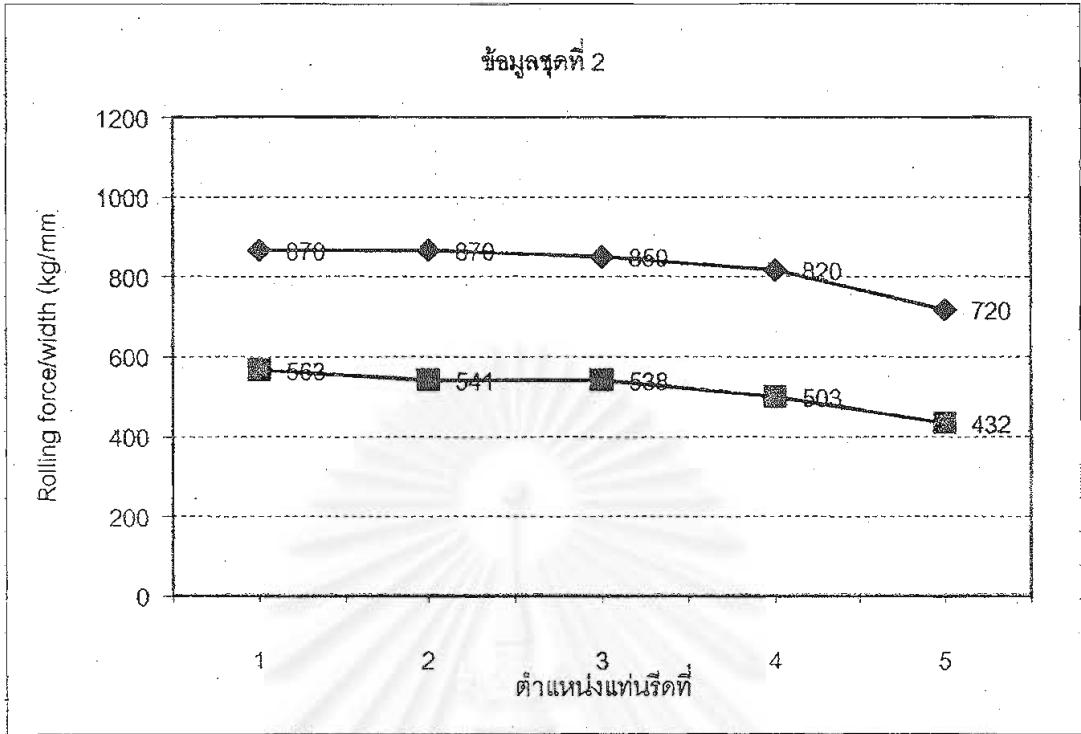
รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่างผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1

◆ ผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1

■ ผลการคำนวณ

ตารางที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่างผลการคำนวณกับผลการรีดจริงจากข้อมูลการรีดจริงชุดที่ 1

ข้อมูลการรีดต่อเนื่องชุดที่ 1									
Inlet thickness	Outlet thickness	Sheet velocity	Steel sheet width	Reduction (%)					
				แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5	
Mm	Mm	m/min	mm	1	2	3	4	5	
2.6	0.50	658	1129	28.6	38.8	35.2	32.4	0	
ความหนาของชิ้นงานเมื่อออกจากแต่ละแท่นรีด (mm)				1.86	1.14	0.74	0.50	0.50	
Backward tension ของแท่นรีดที่ 1 (kg/mm ²)	ความเค้นแรงดึงระหว่างแท่นรีด (kg/mm ²)					Forward tension ของแท่นรีดที่ 5 (kg/mm ²)			
	แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5				
4.1	14.7	15.3	15.9	16.7					4.6
Rolling force / width (kg/mm)									
ตำแหน่ง	แท่นรีดที่ 1	แท่นรีดที่ 2	แท่นรีดที่ 3	แท่นรีดที่ 4	แท่นรีดที่ 5				
ข้อมูลการรีดต่อเนื่อง	790	880	880	820	670				
การคำนวณ	514	637	597	538	383				



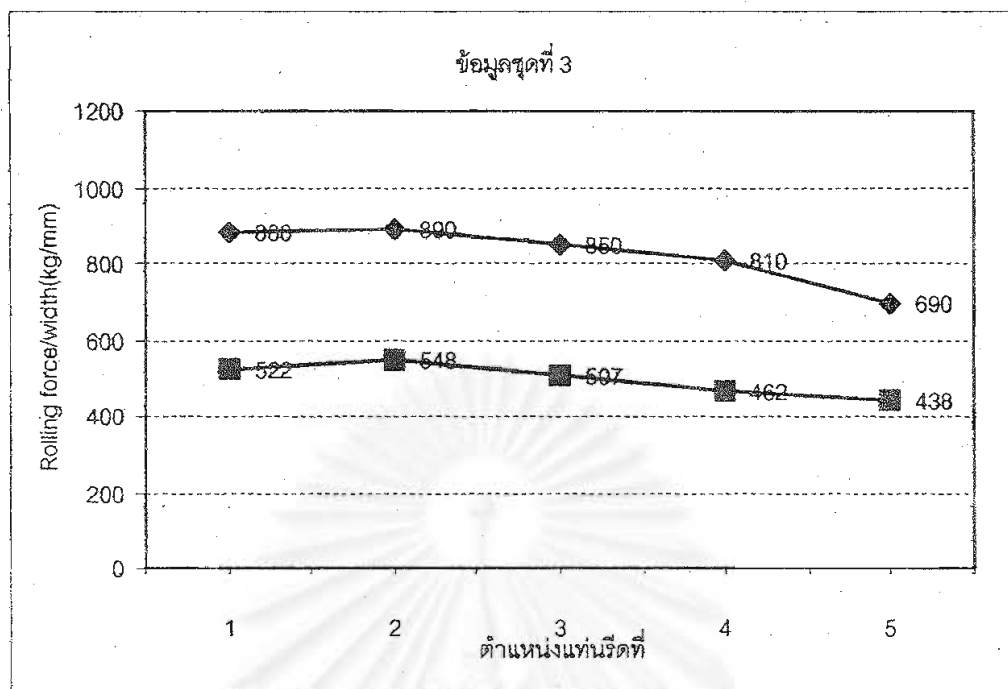
รูปที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดจริงจากข้อมูลการวัดจริงชุดที่ 2

◆ ผลการวัดจริงจากข้อมูลการวัดจริงชุดที่ 2

■ ผลการคำนวณ

ตารางที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดจริงจากข้อมูลการวัดจริงชุดที่ 2

ข้อมูลการรีดต่อเนื่องชุดที่ 2									
Inlet thickness	Outlet thickness	Sheet velocity	Steel sheet width	Reduction (%)					
				แทนรีดที่ 1	แทนรีดที่ 2	แทนรีดที่ 3	แทนรีดที่ 4	แทนรีดที่ 5	
mm	Mm	m/min	mm	1	2	3	4	5	
2.6	0.5	990	1229	28.7	35.6	35.8	32.4	3.5	
ความหนาของชิ้นงานเมื่อออกจากแต่ละแทนรีด (mm)				1.85	1.19	0.77	0.52	0.50	
Backward tension ของแทนรีดที่ 1 (kg/mm ²)	ความเค้นแรงดึงระหว่างแทนรีด (kg/mm ²)					Forward tension ของแทนรีดที่ 5 (kg/mm ²)			
	แทนรีดที่ 1	แทนรีดที่ 2	แทนรีดที่ 3	แทนรีดที่ 4	แทนรีดที่ 5				
4.7	15.7	15.4	15.3	15.9					
Rolling force / width (kg/mm)									
ตำแหน่ง	แทนรีดที่ 1	แทนรีดที่ 2	แทนรีดที่ 3	แทนรีดที่ 4	แทนรีดที่ 5				
ข้อมูลการวัดต่อเนื่อง	870	870	850	820	720				
การคำนวณ	563	541	538	503	432				



รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดจริงจากข้อมูลการวัดจริงชุดที่ 3

◆ ผลการวัดจริงจากข้อมูลการวัดจริงชุดที่ 3

■ ผลการคำนวณ

ตารางที่ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบค่า Rolling force ระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดจริงจากข้อมูลการวัดจริงชุดที่ 3

ข้อมูลการวัดต่อเนื่องชุดที่ 3									
Inlet thickness	Outlet thickness	Sheet velocity	Steel sheet width	Reduction (%)					
				แทนรีดที่ 1	แทนรีดที่ 2	แทนรีดที่ 3	แทนรีดที่ 4	แทนรีดที่ 5	
mm	mm	m/min	mm						
2.6	0.5	991	1229	28.6	36.0	35.7	32.7	3.1	
ความหนาของชิ้นงานเมื่อออกจากแต่ละแทนรีด (mm)				1.86	1.19	0.76	0.51	0.50	
Backward tension ของแทนรีดที่ 1 (kg/mm^2)	ความเค้นแรงดึงระหว่างแทนรีด (kg/mm^2)					Forward tension ของแทนรีดที่ 5 (kg/mm^2)			
	แทนรีดที่ 1 แทนรีดที่ 2	แทนรีดที่ 2 แทนรีดที่ 3	แทนรีดที่ 3 แทนรีดที่ 4	แทนรีดที่ 4 แทนรีดที่ 5					
4.6	15.7	15.1	15.6	15.5					4.5
Rolling force / width (kg/mm)									
ตำแหน่ง	แทนรีดที่ 1	แทนรีดที่ 2	แทนรีดที่ 3	แทนรีดที่ 4	แทนรีดที่ 5				
ข้อมูลการวัดต่อเนื่อง	880	890	850	810	690				
การคำนวณ	522	548	507	462	438				

จากรูปที่ 6.6, 6.7 และ 6.8 เห็นได้ว่าค่า Rolling force ทั้งจากการคำนวณและการทดลองรีดจริงมีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อค่า Rolling force จากการทดลองรีดจริงมีขนาดเพิ่มมากขึ้นในแท่นรีดที่สองเมื่อเทียบกับแท่นรีดที่หนึ่ง ค่า Rolling force จากการคำนวณก็จะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นในแท่นรีดที่สองเช่นกัน แต่มีความแตกต่างกันด้านขนาดของ Rolling force เนื่องจาก

1. ค่าแรงเสียดทานที่ป้อนข้อมูลลงไปในกรคำนวณเป็นค่าแรงเสียดทานที่ได้มาจากทางทฤษฎี Friction hill ซึ่งอาจมีค่าความแตกต่างไปจากกระบวนการรีดจริง ซึ่งเมื่อค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานระหว่างชิ้นงานรีดและหน้าสัมผัสผลูรีดมากขึ้น ค่า Rolling force ก็จะมีสูงขึ้นด้วย
2. ข้อมูลการทดลองรีดจริงนี้เป็นการหาค่าแนวโน้มโดยรวมของ Rolling force ในแต่ละแท่นรีด จึงมีการใช้แผ่นเหล็กกล้าที่มีความแตกต่างทางคุณสมบัติเชิงกลอันได้ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุมีความแตกต่างกับการคำนวณได้

บทที่ 7

สรุปผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าโดยแบบจำลองการรืดเย็นต่อเนื่องแบบ 5 แท่นรืดนี้ เป็นการวิเคราะห์ที่กำหนดข้อมูลองค์ประกอบการรืดที่ใกล้เคียงกับการรืดจริง การกำหนดชุดข้อมูล สำหรับการรืดต่อเนื่องในรูปแบบอื่นอาจเป็นผลให้ผลการคำนวณแตกต่างกันออกไปได้ แต่แนวโน้มหรือ ลักษณะโดยรวมของผลการคำนวณของชุดข้อมูลจะเป็นในลักษณะเดียวกัน

ผลจากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการรืดจากแบบจำลองการรืดแบบ สถิติศาสตร์นี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นการคำนวณการเปลี่ยนแปลงในสภาวะพลศาสตร์ได้

การวิเคราะห์นี้แสดงผลขององค์ประกอบการรืดอันได้แก่ รัศมีลูกรืด, ความหนาของชิ้นงานรืด และอัตราเร็วของชิ้นงานรืด ต่อ การเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรืด ดังนี้

1. เมื่อรัศมีของลูกรืดในแต่ละแท่นรืดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรืดเพิ่มขึ้นตาม โดยรัศมีของแท่นรืดสุดท้ายในกระบวนการรืดต่อเนื่องจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด
2. การลดขนาดของชิ้นงานรืดที่ตำแหน่งแท่นรืดที่ 4 และ 5 ของกระบวนการรืด จะทำให้ความหนาสุดท้ายของชิ้นงานรืดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการลดขนาดของชิ้นงานรืดที่ตำแหน่งแท่นรืดที่ 1 และ 2 ของกระบวนการรืด
3. การเพิ่มอัตราเร็วของชิ้นงานรืดส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานมีขนาดลดลง กล่าวคือ การรืดที่อัตราเร็วสูงจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของความหนาสุดท้ายมีค่าน้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. M. D. Stone. Trans. ASME, ser. D, 81(1950) : 681-686.
2. U. Guenter. Method for Determination of the Basic Stand Characteristics of Rolling Mill, AEG Aktiengesellschaft, Berlin, West German, Steel Res, 61, 8 (1990).
3. F. Fujita. Continuous Rolling Theory, English version, NKK Corp, Chapter 5.
4. Roberts William L. Flat Processing of Steel. Marcel Dekkel Inc., 1988.
5. Prof. M. Hetenyi. Handbook of Experimental Stress Analysis. Northwestern University, John Wiley & Sons Inc.(1950) : 29-37.
6. D. R. Bland and H. Ford. Proc. Inst. Mech. Engrs. (London), 159 (1948) : 144-163.
7. F. R. Gantmacher. The Theory of Matrices. 2nd ed. New York: Chelsea, 1990, 1988.
8. F. Cajori. A History of Mathematics. 3rd ed. New York: Chelsea, 1980.
9. A.J. Fenner. Mechanical Testing of Materials. First published, (1965) : 53-60.
10. E. Kreyszig. Advance Engineering Mathematics. 7th ed., John Wiley & Sons. Inc.,1993.

สถาบันวิทยบริการ
วไลยภูมิมหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Source code ของแบบจำลองการรืดต่อเนื่องแบบสถิตศาสตร์

Procedure ที่ ก.1

การคำนวณองค์ประกอบการรืดที่จำเป็นในการทำแบบจำลอง

Option Explicit

Public Sub Command1_Click()

Dim Stn(4), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w, v, Modulus As Double

Dim Rofo(4) As Double

Dim DeR(4) As Double

Dim Rf(4) As Double

Dim NeuAng(4) As Double

Dim kf(4), kb(4) As Double

Dim ForS(4) As Double

Dim BckS(4) As Double

Dim Dcp As Long

Dim i, j, k As Integer

On Error Resume Next

v = CDbI(DlgSteel.Text1)

w = CDbI(DlgSteel.Text2)

Modulus = CDbI(DlgSteel.Text3)

With Dlgstd1

Th0(0) = CDbI(.Text1)

Th1(0) = CDbI(.Text2)

R(0) = CDbI(.Text3)

frico(0) = CDbI(.Text4)

tf(0) = CDbI(.Text5)

tb(0) = CDbI(.Text6)

End With

With DlgStd2

Th0(1) = CDbI(.Text1)

Th1(1) = CDbI(.Text2)

R(1) = CDbI(.Text3)

frico(1) = CDbI(.Text4)

tf(1) = CDbI(.Text5)

tb(1) = CDbI(.Text6)

End With

With DlgStd3

Th0(2) = CDbI(.Text1)

Th1(2) = CDbI(.Text2)

R(2) = CDbI(.Text3)

frico(2) = CDbI(.Text4)

tf(2) = CDbI(.Text5)

tb(2) = CDbI(.Text6)

End With

With DlgStd4

Th0(3) = CDbI(.Text1)

Th1(3) = CDbI(.Text2)

R(3) = CDbI(.Text3)

```

        frico(3) = CDb1(.Text4)
        tf(3) = CDb1(.Text5)
        tb(3) = CDb1(.Text6)
    End With
    With DlgStd5
        Th0(4) = CDb1(.Text1)
        Th1(4) = CDb1(.Text2)
        R(4) = CDb1(.Text3)
        frico(4) = CDb1(.Text4)
        tf(4) = CDb1(.Text5)
        tb(4) = CDb1(.Text6)
    End With
    Stn(0) = Strain(Th0(0), Th0(0), Th1(0))
    Stn(1) = Strain(Th0(1), Th0(0), Th1(1))
    Stn(2) = Strain(Th0(2), Th0(0), Th1(2))
    Stn(3) = Strain(Th0(3), Th0(0), Th1(3))
    Stn(4) = Strain(Th0(4), Th0(0), Th1(4))
    Rofo(0) = Rollforc(Stn(0), Th0(0), Th1(0), tf(0), tb(0), R(0), frico(0), w)
    Rofo(1) = Rollforc(Stn(1), Th0(1), Th1(1), tf(1), tb(1), R(1), frico(1), w)
    Rofo(2) = Rollforc(Stn(2), Th0(2), Th1(2), tf(2), tb(2), R(2), frico(2), w)
    Rofo(3) = Rollforc(Stn(3), Th0(3), Th1(3), tf(3), tb(3), R(3), frico(3), w)
    Rofo(4) = Rollforc(Stn(4), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w)
    For i = 0 To 4
        DeR(i) = DeformR(Str(i))
    Next i
    For i = 0 To 4
        Rf(i) = Rflat(Rofo(i), R(i), Th0(i), Th1(i), v, Modulus, w)
    Next i
    kb(0) = DeformR(0)
    For i = 0 To 4
        kf(i) = DeformR(Stn(i))
    Next i
    For i = 1 To 4
        j = i - 1
        kb(i) = kf(j)
    Next i
    For i = 0 To 4
        NeuAng(i) = Nangle(frico(i), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i))
    Next i
    For i = 0 To 4
        ForS(i) = Fslip(Th1(i), Rf(i), NeuAng(i))
    Next i
    For i = 0 To 4
        BckS(i) = Bslip(ForS(i), Th0(i), Th1(i))
    Next i
    If Text7.Text = "" Then
        Dcp = 10
    Else: Dcp = CLng(Text7.Text)
    End If
    For i = 0 To 4
        Text1(i) = Round(Rofo(i), Dcp)
    Next i

```

```

For i = 0 To 4
    Text2(i) = Round(DeR(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text3(i) = Round(Rf(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text4(i) = Round(NeuAng(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text5(i) = Round(ForS(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text6(i) = Round(BckS(i), Dcp)
Next i
    Command1.Enabled = False
    Command3.Enabled = True
End Sub

```

Procedure ที่ ก.2

การคำนวณองค์ประกอบการวัดที่จำเป็นในการทำแบบจำลองซ้ำเพื่อความแม่นยำ

```

Private Sub Command3_Click()
    Dim Stn(5), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w, v, Modulus As Double
    Dim Rofo(4) As Double
    Dim DeR(4) As Double
    Dim Rf(4) As Double
    Dim NeuAng(4) As Double
    Dim kf(4), kb(4) As Double
    Dim ForS(4) As Double
    Dim BckS(4) As Double
    Dim Dcp As Long
    Dim i, j, k As Integer
    v = CDbI(DlgSteel.Text1)
    w = CDbI(DlgSteel.Text2)
    Modulus = CDbI(DlgSteel.Text3)
    With Dlgstd1
        Th0(0) = CDbI(.Text1)
        Th1(0) = CDbI(.Text2)
        R(0) = CDbI(.Text3)
        frico(0) = CDbI(.Text4)
        tf(0) = CDbI(.Text5)
        tb(0) = CDbI(.Text6)
    End With
    With DlgStd2
        Th0(1) = CDbI(.Text1)
        Th1(1) = CDbI(.Text2)
        R(1) = CDbI(.Text3)
        frico(1) = CDbI(.Text4)
        tf(1) = CDbI(.Text5)
        tb(1) = CDbI(.Text6)
    End With

```

End With

With DlgStd3

Th0(2) = CDbI(.Text1)
 Th1(2) = CDbI(.Text2)
 R(2) = CDbI(.Text3)
 frico(2) = CDbI(.Text4)
 tf(2) = CDbI(.Text5)
 tb(2) = CDbI(.Text6)

End With

With DlgStd4

Th0(3) = CDbI(.Text1)
 Th1(3) = CDbI(.Text2)
 R(3) = CDbI(.Text3)
 frico(3) = CDbI(.Text4)
 tf(3) = CDbI(.Text5)
 tb(3) = CDbI(.Text6)

End With

With DlgStd5

Th0(4) = CDbI(.Text1)
 Th1(4) = CDbI(.Text2)
 R(4) = CDbI(.Text3)
 frico(4) = CDbI(.Text4)
 tf(4) = CDbI(.Text5)
 tb(4) = CDbI(.Text6)

End With

Stn(0) = Strain(Th0(0), Th0(0), Th1(0))

Stn(1) = Strain(Th0(1), Th0(0), Th1(1))

Stn(2) = Strain(Th0(2), Th0(0), Th1(2))

Stn(3) = Strain(Th0(3), Th0(0), Th1(3))

Stn(4) = Strain(Th0(4), Th0(0), Th1(4))

Stn(5) = 0

Rofo(0) = Rollforc(Stn(0), Th0(0), Th1(0), tf(0), tb(0), R(0), frico(0), w)

Rofo(1) = Rollforc(Stn(1), Th0(1), Th1(1), tf(1), tb(1), R(1), frico(1), w)

Rofo(2) = Rollforc(Stn(2), Th0(2), Th1(2), tf(2), tb(2), R(2), frico(2), w)

Rofo(3) = Rollforc(Stn(3), Th0(3), Th1(3), tf(3), tb(3), R(3), frico(3), w)

Rofo(4) = Rollforc(Stn(4), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w)

For i = 0 To 4

Rf(i) = Rflat(Rofo(i), R(i), Th0(i), Th1(i), v, Modulus, w)

Next i

kb(0) = DeformR(0)

For i = 0 To 4

kf(i) = DeformR(Stn(i))

Next i

For i = 1 To 4

j = i - 1

kb(i) = kf(j)

Next i

Rofo(0) = NRollforc(Stn(0), Stn(1), Th0(0), Th1(0), tf(0), tb(0), kf(0), kb(0), Rf(0), frico(0), w)

Rofo(1) = NRollforc(Stn(1), Stn(2), Th0(1), Th1(1), tf(1), tb(1), kf(1), kb(1), Rf(1), frico(1), w)

Rofo(2) = NRollforc(Stn(2), Stn(3), Th0(2), Th1(2), tf(2), tb(2), kf(2), kb(2), Rf(2), frico(2), w)

Rofo(3) = NRollforc(Stn(3), Stn(4), Th0(3), Th1(3), tf(3), tb(3), kf(3), kb(3), Rf(3), frico(3), w)

Rofo(4) = NRollforc(Stn(4), Stn(5), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), kf(4), kb(4), Rf(4), frico(4), w)

```

For i = 0 To 4
    DeR(i) = DeformR(Str(i))
Next i
For i = 0 To 4
    Rf(i) = Rflat(Rofo(i), R(i), Th0(i), Th1(i), v, Modulus, w)
Next i
For i = 0 To 4
    NeuAng(i) = Nangle(frico(i), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i))
Next i
For i = 0 To 4
    ForS(i) = Fslip(Th1(i), Rf(i), NeuAng(i))
Next i
For i = 0 To 4
    BckS(i) = Bslip(ForS(i), Th0(i), Th1(i))
Next i
If Text7.Text = "" Then
    Dcp = 10
Else: Dcp = CLng(Text7.Text)
End If
For i = 0 To 4
    Text1(i) = Round(Rofo(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text2(i) = Round(DeR(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text3(i) = Round(Rf(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text4(i) = Round(NeuAng(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text5(i) = Round(ForS(i), Dcp)
Next i
For i = 0 To 4
    Text6(i) = Round(BckS(i), Dcp)
Next i
Label7.Caption = "Rolling Parameter Solution Table ( After recalculation )"
Command3.Enabled = False
End Sub

```

Procedure ที่ ก.2

การสร้าง Main matrix model

```

Private Sub Command1_Click()
    Dim MainM(32, 50) As Double
    Dim CalcM(32, 32) As Double
    Dim EQ, Std As String
    EQ = "Eq. No."
    Std = "Std."
    Dim Str(5), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w, v, Modulus As Double

```

```

Dim dPbin(4), dPbout(4), dPbtb(4), dPbtf(4), dFbin(4), dFbout(4), dFbtb(4), _
dFbtf(4), dPbfriCo(4) As Double
Dim kf(4), kb(4) As Double
Dim Tdata As Double
Dim Rf(4) As Double
Dim Vsh(4), vr(4) As Double
Dim Rofo(4) As Double
Dim DeR(4) As Double
Dim NeuAng(4) As Double
Dim ForS(4) As Double
Dim BckS(4) As Double
Dim MillM(4) As Double
Dim Dcp As Long
Dim i, j, k As Integer
On Error Resume Next
v = CDbI(DlgSteel.Text1)
w = CDbI(DlgSteel.Text2)
Modulus = CDbI(DlgSteel.Text3)
For i = 0 To 4
    MillM(i) = DlgSM.Text2
Next i
With Dlgstd1
    Th0(0) = CDbI(.Text1)
    Th1(0) = CDbI(.Text2)
    R(0) = CDbI(.Text3)
    frico(0) = CDbI(.Text4)
    tf(0) = CDbI(.Text5)
    tb(0) = CDbI(.Text6)
End With
With DlgStd2
    Th0(1) = CDbI(.Text1)
    Th1(1) = CDbI(.Text2)
    R(1) = CDbI(.Text3)
    frico(1) = CDbI(.Text4)
    tf(1) = CDbI(.Text5)
    tb(1) = CDbI(.Text6)
End With
With DlgStd3
    Th0(2) = CDbI(.Text1)
    Th1(2) = CDbI(.Text2)
    R(2) = CDbI(.Text3)
    frico(2) = CDbI(.Text4)
    tf(2) = CDbI(.Text5)
    tb(2) = CDbI(.Text6)
End With
With DlgStd4
    Th0(3) = CDbI(.Text1)
    Th1(3) = CDbI(.Text2)
    R(3) = CDbI(.Text3)
    frico(3) = CDbI(.Text4)
    tf(3) = CDbI(.Text5)
    tb(3) = CDbI(.Text6)

```



```

End With
With DlgStd5
    Th0(4) = CDbI(.Text1)
    Th1(4) = CDbI(.Text2)
    R(4) = CDbI(.Text3)
    frico(4) = CDbI(.Text4)
    tf(4) = CDbI(.Text5)
    tb(4) = CDbI(.Text6)
End With
    Stn(0) = Strain(Th0(0), Th0(0), Th1(0))
    Stn(1) = Strain(Th0(1), Th0(0), Th1(1))
    Stn(2) = Strain(Th0(2), Th0(0), Th1(2))
    Stn(3) = Strain(Th0(3), Th0(0), Th1(3))
    Stn(4) = Strain(Th0(4), Th0(0), Th1(4))
    Stn(5) = 0
    kb(0) = DeformR(R(0))
For i = 0 To 4
    kf(i) = DeformR(Stn(i))
Next i
For i = 1 To 4
    j = i - 1
    kb(i) = kf(j)
Next i
Rofo(0) = Rollforc(Stn(0), Th0(0), Th1(0), tf(0), tb(0), R(0), frico(0), w)
Rofo(1) = Rollforc(Stn(1), Th0(1), Th1(1), tf(1), tb(1), R(1), frico(1), w)
Rofo(2) = Rollforc(Stn(2), Th0(2), Th1(2), tf(2), tb(2), R(2), frico(2), w)
Rofo(3) = Rollforc(Stn(3), Th0(3), Th1(3), tf(3), tb(3), R(3), frico(3), w)
Rofo(4) = Rollforc(Stn(4), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w)
For i = 0 To 4
    Rf(i) = Rflat(Rofo(i), R(i), Th0(i), Th1(i), v, Modulus, w)
Next i
Rofo(0) = NRollforc(Stn(0), Stn(1), Th0(0), Th1(0), tf(0), tb(0), kf(0), kb(0), Rf(0), frico(0), w)
Rofo(1) = NRollforc(Stn(1), Stn(2), Th0(1), Th1(1), tf(1), tb(1), kf(1), kb(1), Rf(1), frico(1), w)
Rofo(2) = NRollforc(Stn(2), Stn(3), Th0(2), Th1(2), tf(2), tb(2), kf(2), kb(2), Rf(2), frico(2), w)
Rofo(3) = NRollforc(Stn(3), Stn(4), Th0(3), Th1(3), tf(3), tb(3), kf(3), kb(3), Rf(3), frico(3), w)
Rofo(4) = NRollforc(Stn(4), Stn(5), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), kf(4), kb(4), Rf(4), frico(4), w)
For i = 0 To 4
    Rf(i) = Rflat(Rofo(i), R(i), Th0(i), Th1(i), v, Modulus, w)
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dPbin(i) = NdPbydHin(Stn(i), Stn(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i), frico(i), w)
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dPbout(i) = NdPbydhout(Stn(i), Stn(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i), frico(i), w)
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dPbtb(i) = NdPbydtb(Stn(i), Stn(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i), frico(i), w)
Next i
For i = 0 To 4

```

```

j = i + 1
dPbtf(i) = NdPbydtf(Str(i), Str(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i), frico(i), w)
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dFbin(i) = NdfbydHin(Str(i), Str(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), Rf(i), frico(i), w, v, Modulus, kf(i),
    kb(i))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dFbout(i) = NdfbydHout(Str(i), Str(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), Rf(i), frico(i), w, v, Modulus, kf
    (i), kb(i))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dFbtf(i) = Ndfbydtf(Str(i), Str(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), Rf(i), frico(i), w, v, Modulus, kf(i), kb
    (i))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dFbtb(i) = Ndfbydtb(Str(i), Str(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), Rf(i), frico(i), w, v, _ Modulus, kf
    (i), kb(i))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    dPbfrico(i) = NdPbydfrico(Str(i), Str(j), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), _
    kb(i), Rf(i), frico(i), w)
Next i
For i = 0 To 4
    NeuAng(i) = Nangle(frico(i), Th0(i), Th1(i), tf(i), tb(i), kf(i), kb(i), Rf(i))
Next i
For i = 0 To 4
    ForS(i) = Fslip(Th1(i), Rf(i), NeuAng(i))
Next i
Vsh(4) = DlgSM.Text1
i = 3
Do While i > -1
    j = i + 1
    Vsh(i) = Vsh(j) * (Th1(j) / Th1(i))
    i = i - 1
Loop
For i = 0 To 4
    vr(i) = Vsh(i) / (1 + ForS(i))
Next i
Dim Sol(50), z(32), Knw(32, 50)
Dim n, m, X, Y As Integer
For i = 1 To 32
    For j = 1 To 50
        Knw(i, j) = 0
    Next j
Next i
* dPi,eq1

```

```

For i = 1 To 5
For j = 1 To 5
If i = j Then
n = i - 1
Knw(i, j) = (-1 / MillM(n))
End If
Next j
Next i
' dhi,eq1
For i = 1 To 5
For j = 11 To 15
n = i + 10
If j = n Then
Knw(i, j) = 1
End If
Next j
Next i
' dGi,eq1
For i = 1 To 5
For j = 41 To 45
n = i + 40
If j = n Then
Knw(i, j) = -1
End If
Next j
Next i
' dPi,eq2
For i = 6 To 10
For j = 1 To 5
n = j + 5
If i = n Then
Knw(i, j) = 1
End If
Next j
Next i
' dHi,eq2
For i = 6 To 10
For j = 6 To 10
If i = j Then
m = i - 6
Knw(i, j) = -dPbin(m)
End If
Next j
Next i
' dhi,eq2
For i = 6 To 10
For j = 11 To 15
n = j - 5
If i = n Then
m = i - 6
Knw(i, j) = -dPbout(m)
End If

```



สถาบันวิทยบริการ
 ไลบรารีมหาวิทยาลัย

```

Next j
Next i
' dtb,eq2
For i = 6 To 10
  For j = 16 To 20
    n = j - 10
    If i = n And i <> 6 Then
      m = i - 6
      Knw(i, j) = -dPbtb(m)
    End If
    If i = 6 And n = 6 Then
      Knw(i, j) = 0
    End If
  Next j
Next i
' dtf,eq2
For i = 6 To 10
  For j = 21 To 25
    n = j - 15
    If i = n And i <> 10 Then
      m = i - 6
      Knw(i, j) = -dPbtf(m)
    End If
    If i = 10 And n = 10 Then
      Knw(i, j) = 0
    End If
  Next j
Next i
' dfrico,eq2
For i = 6 To 10
  For j = 46 To 50
    n = j - 40
    If i = n Then
      m = i - 6
      Knw(i, j) = -dPbfrico(m)
    End If
  Next j
Next i
' dHi,eq3
For i = 11 To 15
  For j = 6 To 10
    n = j + 5
    If i = n Then
      m = j - 6
      Knw(i, j) = -dFbin(m)
    End If
  Next j
Next i
' dhi,eq3
For i = 11 To 15
  For j = 11 To 15
    If i = j Then

```

```

    m = j - 11
    Knw(i, j) = -dFbout(m)
    End If
  Next j
Next i
' dtbi,eq3
For i = 11 To 15
  For j = 16 To 20
    n = j - 5
    If i = n And i <> 11 Then
      m = j - 16
      Knw(i, j) = -dFbtb(m)
      End If
    If i = 11 And n = 11 Then
      Knw(i, j) = 0
      End If
  Next j
Next i
' dtf,eq3
For i = 11 To 15
  For j = 21 To 25
    n = j - 10
    If i = n Then
      m = j - 21
      Knw(i, j) = -dFbtb(m)
      If i = 15 And n = 15 Then
        Knw(i, j) = 0
        End If
      End If
    End If
  Next j
Next i
' dfi,eq3
For i = 11 To 15
  For j = 26 To 30
    n = j - 15
    If i = n Then
      Knw(i, j) = 1
      End If
    End If
  Next j
Next i
' dvi,eq4
For i = 16 To 20
  For j = 26 To 30
    n = j - 10
    If i = n Then
      m = i - 16
      Knw(i, j) = -vr(m)
      End If
    End If
  Next j
Next i
' dvi,eq4
For i = 16 To 20

```

```

For j = 31 To 35
  n = j - 15
  If i = n Then
    Knw(i, j) = 1
  End If
Next j
Next i
' dvRi,eq4
For i = 16 To 20
  For j = 36 To 40
    n = j - 20
    If i = n Then
      m = i - 16
      Knw(i, j) = -(1 + ForS(m))
    End If
  Next j
Next i
' dhi,eq5
For i = 21 To 24
  For j = 11 To 15
    n = j + 10
    m = j - 11
    X = m + 1
    Y = j + 1
    If i = n Then
      Knw(i, j) = Vsh(m)
      Knw(i, Y) = -Vsh(X)
    End If
  Next j
Next i
' dvi,eq5
For i = 21 To 24
  For j = 31 To 35
    n = j - 10
    m = i - 21
    X = m + 1
    Y = j + 1
    If i = n Then
      Knw(i, j) = Th1(m)
      Knw(i, Y) = -Th1(X)
    End If
  Next j
Next i
' dHi,eq6
For i = 25 To 28
  For j = 6 To 10
    n = j + 19
    Y = j + 1
    If i = n Then
      Knw(i, Y) = -1
    End If
  Next j

```

```

Next i
' dhi,eq6
For i = 25 To 28
  For j = 11 To 15
    n = j + 14
    If i = n Then
      Knw(i, j) = 1
    End If
  Next j
Next i
Next i
' dHi,eq7
For i = 29 To 32
  For j = 6 To 10
    n = j + 23
    m = j - 6
    X = m + 1
    Y = j + 1
    If i = n Then
      Knw(i, Y) = -tb(X)
    End If
  Next j
Next i
Next i
' dhi,eq7
For i = 29 To 32
  For j = 11 To 15
    n = j + 18
    m = j - 11
    X = m + 1
    If i = n Then
      Knw(i, j) = tf(m)
    End If
  Next j
Next i
Next i
' dtbi,eq7
For i = 29 To 32
  For j = 16 To 20
    n = j + 13
    m = j - 16
    X = m + 1
    Y = j + 1
    If i = n Then
      Knw(j, Y) = -Th0(X)
    End If
  Next j
Next i
Next i
' dtfi,eq7
For i = 29 To 32
  For j = 21 To 25
    n = j + 8
    m = j - 21
    If i = n Then
      Knw(i, j) = Th1(m)
    End If
  Next j
Next i

```

```

        End If
    Next j
Next i
For i = 1 To 32
    For j = 1 To 50
        MainM(i, j) = Krw(i, j)
    Next j
    Next i
    With MatrixG
        .Cols = 33: .Rows = 33
        .Col = 0: .Row = 0: .Text = "Equation"
        For i = 1 To 5
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 1
        Next i
        For i = 6 To 10
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 2
        Next i
        For i = 11 To 15
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 3
        Next i
        For i = 16 To 20
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 4
        Next i
        For i = 21 To 24
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 5
        Next i
        For i = 25 To 28
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 6
        Next i
        For i = 29 To 32
            .Col = 0: .Row = i: .Text = EQ & 7
        Next i
    End With

```

Procedure ที่ ก.3

การรับค่าจากตารางกำหนดตัวแปรและลดขนาดของ Main matrix

```

With Cpfm
m = 0
n = 0
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check1(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dP" & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i

```



```

For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check2(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dH " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check3(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dh " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check4(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dtb " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check5(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dtf " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check6(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "df " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i

```

```

    Next j
End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check7(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dv " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check8(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dvR " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check9(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dG " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    k = i + 1
    m = m + 1
    If .Check10(i) = vbUnchecked Then
        n = n + 1
        MatrixG.Col = n: MatrixG.Row = 0: MatrixG.Text = "dfrico " & Std & k
        For j = 1 To 32
            CalcM(j, n) = MainM(j, m)
        Next j
    End If
Next i
End With
With MatrixG
    For i = 1 To 32
        For j = 1 To 32
            .Col = i: .Row = j: .Text = Round(CalcM(i, j), 6)
        Next j
    Next i
End With

```

```

    Next j
  Next i
End With
Command2.Enabled = True
Command1.Enabled = False
Command3.Enabled = True
End Sub

```

Procedure ที่ ก.4

การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงด้วย Gauss eliminate method

Option Explicit

Private Sub Command1_Click()

Call ScreenArr

End Sub

Private Sub Form_Load()

Dim MainM(32, 50) As Double

Dim CalcM(1 To 32, 1 To 32) As Double

Dim EQ, Std As String

EQ = "Eq. No."

Std = "Std."

Dim Stn(5), Th0(4), Th1(4), tf(4), tb(4), R(4), frico(4), w, v, Modulus As Double

Dim dPbin(4), dPbout(4), dPbtb(4), dPbtf(4), dFbin(4), dFbout(4), dFbtb(4), _
dFbtf(4), dPbfrico(4) As Double

ย้อนการคำนวณโดยใช้ Source code ของ Procedure ที่ ก.1
ถึง Procedure ที่ ก.3

Dim chP(4), chInlet(4), choutlet(4), Chtb(4), Chtf(4) As Double

Dim chF(4), chV(4), chvR(4), chG(4), chFrico(4) As Double

With Cpfm

For i = 0 To 4

 j = i + 10

 chP(i) = .Text2(j)

Next i

For i = 0 To 4

 j = i + 15

 chInlet(i) = .Text2(j)

Next i

For i = 0 To 4

 j = i + 20

 choutlet(i) = .Text2(j)

Next i

For i = 0 To 4

 j = i + 25

 Chtb(i) = .Text2(j)

Next i

For i = 0 To 4

```

        j = i + 30
        Chtf(i) = .Text2(j)
    Next i
    For i = 0 To 4
        j = i + 35
        chF(i) = .Text2(j)
    Next i
    For i = 0 To 4
        j = i + 40
        chV(i) = .Text2(j)
    Next i
    For i = 0 To 4
        j = i + 45
        chvR(i) = .Text2(j)
    Next i
    For i = 0 To 4
        j = i + 50
        chG(i) = .Text2(j)
    Next i
    For i = 0 To 4
        j = i + 55
        chFrico(i) = .Text2(j)
    Next i
End With
For i = 0 To 4
    j = i + 1
    chgSol(j) = -(choutlet(i) - (chG(i) + (chP(i) / MillM(i))))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 6
    chgSol(j) = -(chP(i) - (dPbin(i) * chInlet(i)) - (dPbout(i) * choutlet(i)) _
        - (dPbtb(i) * Chtb(i)) - (dPbtf(i) * Chtf(i)) - (dPbfrico(i) * chFrico(i)))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 11
    chgSol(j) = -(chF(i) - (dFbin(i) * chInlet(i)) - (dFbout(i) * choutlet(i)) _
        - (dFbtb(i) * Chtb(i)) - (dFbtf(i) * Chtf(i)))
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 16
    chgSol(j) = -(chV(i) - (chF(i) * vr(i)) - (1 + ForS(i)) * chvR(i))
Next i
For i = 0 To 3
    j = i + 21
    chgSol(j) = -(choutlet(i) * Vsh(i) + Th1(i) * chV(i) _
        - choutlet(i + 1) * Vsh(i + 1) - Th1(i + 1) * chV(i + 1))
Next i
For i = 0 To 3
    j = i + 25
    chgSol(j) = -(choutlet(i) - chInlet(i + 1))
Next i
For i = 0 To 3

```

```

j = i + 29
chgSol(j) = -(Chtf(i) * Th1(i) + tf(i) * choutlet(i) _
            - Chtb(i + 1) * Th0(i + 1) - tb(i + 1) * chinlet(i + 1))
Next i
For i = 1 To 32
    For j = 1 To 32
        Co(i, j) = CalcM(i, j)
    Next j
Next i
Next i
For i = 1 To 32
    z(i) = chgSol(i)
Next i
Indx = 32
Call Gauss(Co, z, Sol, Indx)
iCount = 1
For i = 0 To 4
    j = i + 10
    If Cpfrm.Check1(i) = vbUnchecked Then
        Text1(i).Text = Round(Sol(iCount), 7) & " kg/mm2"
        iCount = iCount + 1
    Else: Text1(i) = Cpfrm.Text2(j) & " kg/mm2"
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 15
    If Cpfrm.Check2(i) = vbUnchecked Then
        Text2(i).Text = Round(Sol(iCount), 9) & " mm."
        iCount = iCount + 1
    Else: Text2(i) = Cpfrm.Text2(j) & " mm."
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 20
    If Cpfrm.Check3(i) = vbUnchecked Then
        Text3(i).Text = Round(Sol(iCount), 9) & " mm."
        iCount = iCount + 1
    Else: Text3(i) = Cpfrm.Text2(j) & " mm."
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 25
    If Cpfrm.Check4(i) = vbUnchecked Then
        Text4(i).Text = Round(Sol(iCount), 7) & " kg/mm2"
        iCount = iCount + 1
    Else: Text4(i) = Cpfrm.Text2(j) & " kg/mm2"
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 30
    If Cpfrm.Check5(i) = vbUnchecked Then
        Text5(i).Text = Round(Sol(iCount), 7) & " kg/mm2"
        iCount = iCount + 1
    End If
Next i

```

```

Else: Text5(i) = Cpfrm.Text2(j) & " kg/mm2"
End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 35
    If Cpfrm.Check6(i) = vbUnchecked Then
        Text6(i).Text = Round(Sol(iCount), 9)
        iCount = iCount + 1
    Else: Text6(i) = Cpfrm.Text2(j)
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 40
    If Cpfrm.Check7(i) = vbUnchecked Then
        Text7(i).Text = Round(Sol(iCount), 8) & " cm/min"
        iCount = iCount + 1
    Else: Text7(i) = Cpfrm.Text2(j) & " cm/min"
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 45
    If Cpfrm.Check8(i) = vbUnchecked Then
        Text8(i).Text = Round(Sol(iCount), 8) & " cm/min"
        iCount = iCount + 1
    Else: Text8(i) = Cpfrm.Text2(j) & " cm/min"
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 50
    If Cpfrm.Check9(i) = vbUnchecked Then
        Text9(i).Text = Round(Sol(iCount), 9) & " mm."
        iCount = iCount + 1
    Else: Text9(i) = Cpfrm.Text2(j) & " mm."
    End If
Next i
For i = 0 To 4
    j = i + 55
    If Cpfrm.Check10(i) = vbUnchecked Then
        Text10(i).Text = Round(Sol(iCount), 9)
        iCount = iCount + 1
    Else: Text10(i) = Cpfrm.Text2(j)
    End If
Next i
End Sub

```

Macro ที่ ๓.1

การคำนวณหาค่าองค์ประกอบการรีดที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง

```

Function Rollforc(Str, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
    Dim DefR, STavg, Ld, Qpget
    Const A = 63.2          ' kg/mm2

```

```

Const E0 = 0.0019
Const n = 0.08          ' 0.2-0.25
' Stn =strain
' Th0 =thickness inlet
' Th1 =thickness outlet
' tf =front tension
' tb =back tension
' R =roll radius
' frico =friction coefficient
' w =work piece width
' DefR =deformation resistant or dynamic constrained yield stress
' STavg =tension stress average
' Ld=contact length
DefR = A * (Stn + E0) ^ n
STavg = (tf + tb) / 2
Qpget = Qp(frico, Th0, Th1, R)
Ld = Sqr(R * (Th0 - Th1) - ((Th0 - Th1) ^ 2) / 2)
Rollforc = (DefR - STavg) * Ld * Qpget * 1000 / w

```

End Function

Function Strain(Th0i, Th0f, Th1i)

```
Strain = -(LN(Th0i / Th0f) + 2 * LN(Th1i / Th0f)) / 3
```

End Function

Function LN(X)

```
LN = Log(X) / Log(2.718281828)
```

End Function

Function DeformR(Stn)

```
A = 60
```

```
E0 = 0.001
```

```
n = 0.2
```

```
DeformR = A * (Stn + E0) ^ n
```

End Function

Function Qp(frico, Th0, Th1, R)

```
Dim ReRt, Bang
```

```
' ReRt =reduction ratio
```

```
' Bang =bite angle
```

```
ReRt = (Th0 - Th1) / Th0
```

```
Bang = Bitecalc(Th0, Th1, R)
```

```
Qp = 1.08 + 1.79 * ReRt * (frico / Bang) * Sqr(ReRt) - 1.02 * ReRt
```

End Function

Function Bitecalc(Th0, Th1, R)

```
Bitecalc = Arccos(1 - (Th0 - Th1) / (2 * R))
```

End Function

Function Arccos(X)

```
Arccos = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
```

End Function

Function Rflat(Rollforc, R, Th0, Th1, v0, E, w)

```
Dim Co
```

```
' v0 =poisson ratio
```

```
' E =elastic modulus
```

```
Co = Cocalc(v0, E)
```

```
Rflat = R * (1 + (Co * Rollforc * 1000 / (w * (Th0 - Th1))))
```

End Function

Function Cocalc(v0, E)

Const Phi = 3.141592654
Cocalc = $16 * (1 - v0 ^ 2) / (\text{Phi} * E)$

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 = Bitecalc(Th0, Th1, Rflat)
 $Rt = Th1 / Rflat$
 $H1calc = (2 / \text{Sqr}(Rt)) * \text{Atn}(Bang / \text{Sqr}(Rt))$

End Function

Function NewtonR(Stn, R, Th0, Th1, v0, E, w, tb, tf, frico)

Dim Rf, Rforc
Dim i, n As Integer
n = 50
For i = 1 To n
Rforc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
Rf = Rflat(Rforc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
R = Rf
Next i
NewtonR = R

End Function

Function Fslip(Th1, Rflat, Nangle)

Dim Thn
Thn = thickness at neutral point
 $Thn = Th1 + 2 * Rflat * (1 - \text{Cos}(Nangle))$
 $Fslip = (Thn / Th1) - 1$

End Function

Function Bslip(Fslip, Th0, Th1)

Dim bRt
 $bRt = 1 - (Th1 / Th0)$
 $Bslip = bRt - (1 - bRt) * Fslip$

End Function

Function NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)

Dim DefR, STavg, Ld, Qpget, NAget, BAget
Const A = 63.2 ' kg/mm2
Const E0 = 0.0019
Const n = 0.08 ' 0.2-0.25


```

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)) * tb + (NAget / BAget) * tf)
Qpget = Qp(frico, Th0, Th1, Rflat)
Ld = Sqr(Rflat * (Th0 - Th1) - ((Th0 - Th1) ^ 2) / 2)
NRollforc = (DefR - STavg) * Ld * Qpget * 1000 / w

```

End Function

Macro ที่ ก.2

การคำนวณหาค่า Derivative ระหว่างองค์ประกอบการรีด

Function dPbydHin(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)

```

Dim NTh0
NTh0 = Th0 + 0.08
Th0 = Th0 - 0.08
dPbydHin = (Rollforc(Stn, NTh0, Th1, tf, tb, R, frico, w) - Rollforc _
(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)) / (NTh0 - Th0)

```

End Function

Function dPbydhout(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)

```

Dim NTh1
NTh1 = Th1 + 0.08
Th1 = Th1 - 0.08
dPbydhout = (Rollforc(Stn, Th0, NTh1, tf, tb, R, frico, w) - Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)) /
(NTh1 - Th1)

```

End Function

Function dPbydtb(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)

```

Dim Ntb
Ntb = tb + 0.5
tb = tb - 0.5
dPbydtb = (Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, Ntb, R, frico, w) - Rollforc _
(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)) / (Ntb - tb)

```

End Function

Function dPbydtf(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)

```

Dim Ntf
Ntf = tf + 0.5
tf = tf - 0.5
dPbydtf = (Rollforc(Stn, Th0, Th1, Ntf, tb, R, frico, w) - Rollforc _
(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)) / (Ntf - tf)

```

End Function

Function dfbydHin(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)

```

Dim NTh0, Forc, NewR, NewA
Dim NFslip, OFslip
NTh0 = Th0 + 0.08
Th0 = Th0 - 0.08
Forc = Rollforc(Stn, NTh0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, NTh0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, NTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)
NFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)

```

```

Forc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)
OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
dfbydHin = (NFslip - OFslip) / (NTh0 - Th0)

```

End Function

```

Function dfbydHout(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
Dim NTh1, Forc, NewR, NewA
Dim NFslip, OFslip
NTh1 = Th1 + 0.08
Th1 = Th1 - 0.08
Forc = Rollforc(Stn, Th0, NTh1, tf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, NTh1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, NewR)
NFslip = Fslip(NTh1, NewR, NewA)
Forc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)
OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
dfbydHout = (NFslip - OFslip) / (NTh1 - Th1)

```

End Function

```

Function dfbydtb(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
Dim Ntb, Forc, NewR, NewA
Dim NFslip, OFslip
Ntb = tb + 0.5
tb = tb - 0.5
Forc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, Ntb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, Ntb, kf, kb, NewR)
NFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
Forc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)
OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
dfbydtb = (NFslip - OFslip) / (Ntb - tb)

```

End Function

```

Function dfbydtf(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
Dim Ntf, Forc, NewR, NewA
Dim NFslip, OFslip
Ntf = tf + 0.5
tf = tf - 0.5
Forc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, Ntf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, Ntf, tb, kf, kb, NewR)
NFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
Forc = Rollforc(Stn, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)
OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
dfbydtf = (NFslip - OFslip) / (Ntf - tf)

```

End Function

```

Function NdPbydHin(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)

```

Dim NTh0, OTh0
 $NTh0 = Th0 + 0.08$
 $OTh0 = Th0 - 0.08$
 $NdPbydHin = (NRollforc(Stn1, Stn2, NTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w) -$
 $- NRollforc(Stn1, Stn2, OTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (NTh0 - OTh0)$

End Function

Function NdPbydhout(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)
 Dim NTh1, OTh1
 $NTh1 = Th1 + 0.08$
 $OTh1 = Th1 - 0.08$
 $NdPbydhout = (NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w) -$
 $- NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, OTh1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (NTh1 - OTh1)$

End Function

Function NdPbydtb(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)
 Dim Ntb, Otb
 $Ntb = tb + 0.5$
 $Otb = tb - 0.5$
 $NdPbydtb = (NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, Ntb, kf, kb, Rflat, frico, w) -$
 $- NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, Otb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (Ntb - Otb)$

End Function

Function NdPbydtf(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)
 Dim Ntf, Otf
 $Ntf = tf + 0.5$
 $Otf = tf - 0.5$
 $NdPbydtf = (NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, Ntf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w) -$
 $- NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, Otf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)) / (Ntf - Otf)$

End Function

Function NdPbydfrico(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, frico, w)
 Dim Nfrico, Ofrico
 $Nfrico = frico + 0.01$
 $Ofrico = frico - 0.01$
 $NdPbydfrico = (NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, Nfrico, w) -$
 $- NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, kf, kb, Rflat, Ofrico, w)) / (Nfrico - Ofrico)$

End Function

Function NdfbydHin(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
 Dim NTh0, Forc, NewR, NewA
 Dim NFslip, OFslip, OTh0
 $NTh0 = Th0 + 0.08$
 $OTh0 = Th0 - 0.08$
 $Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, NTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, R, frico, w)$
 $NewR = Rflat(Forc, R, NTh0, Th1, v0, E, w)$
 $NewA = Nangle(frico, NTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)$
 $NFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)$
 $Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, OTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, R, frico, w)$
 $NewR = Rflat(Forc, R, OTh0, Th1, v0, E, w)$
 $NewA = Nangle(frico, OTh0, Th1, tf, tb, kf, kb, NewR)$
 $OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)$
 $NdfbydHin = (NFslip - OFslip) / (NTh0 - OTh0)$

End Function

Function NdfbydHout(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
 Dim NTh1, Forc, NewR, NewA
 Dim NFslip, OFslip, OTh1

```

NTh1 = Th1 + 0.08
OTh1 = Th1 - 0.08
Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, NTh1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, NTh1, tf, tb, kf, kb, NewR)
NFslip = Fslip(NTh1, NewR, NewA)
Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, OTh1, tf, tb, kf, kb, R, frico, w)
NewR = Rflat(Forc, R, Th0, OTh1, v0, E, w)
NewA = Nangle(frico, Th0, OTh1, tf, tb, kf, kb, NewR)
OFslip = Fslip(OTh1, NewR, NewA)
NdfbydHout = (NFslip - OFslip) / (NTh1 - OTh1)

```

End Function

```

Function Ndfbydtb(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
  Dim Ntb, Forc, NewR, NewA
  Dim NFslip, OFslip, Otb
  Ntb = tb + 0.5
  Otb = tb - 0.5
  Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, Ntb, kf, kb, R, frico, w)
  NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
  NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, Ntb, kf, kb, NewR)
  NFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
  Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, Otb, kf, kb, R, frico, w)
  NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
  NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, tf, Otb, kf, kb, NewR)
  OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
  Ndfbydtb = (NFslip - OFslip) / (Ntb - Otb)

```

End Function

```

Function Ndfbydtf(Stn1, Stn2, Th0, Th1, tf, tb, R, frico, w, v0, E, kf, kb)
  Dim Ntf, Forc, NewR, NewA
  Dim NFslip, OFslip, Otf
  Ntf = tf + 0.5
  Otf = tf - 0.5
  Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, Ntf, tb, kf, kb, R, frico, w)
  NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
  NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, Ntf, tb, kf, kb, NewR)
  NFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
  Forc = NRollforc(Stn1, Stn2, Th0, Th1, Otf, tb, kf, kb, R, frico, w)
  NewR = Rflat(Forc, R, Th0, Th1, v0, E, w)
  NewA = Nangle(frico, Th0, Th1, Otf, tb, kf, kb, NewR)
  OFslip = Fslip(Th1, NewR, NewA)
  Ndfbydtf = (NFslip - OFslip) / (Ntf - Otf)

```

End Function

Macro ที่ ๓.3

Gauss eliminate method

```

Public Sub Gauss(A, B, xxx, nnn)
  Static m, i, k, n
  Static C As Double, amax As Double, wb As Double, w As Double
  n = nnn
  For i = 1 To n

```

```

amax = Abs(A(i, i))
m = i
k = i + 1
If k > n Then GoTo calc
strt:
    If amax >= Abs(A(k, i)) Then GoTo nxt
    amax = Abs(A(k, i))
    m = k
nxt:
    If k >= n Then GoTo chng
    k = k + 1
    GoTo strt
chng:
    If m = i Then GoTo calc
    k = i
    wb = B(k)
    B(k) = B(m)
    B(m) = wb
nxtk:
    w = A(i, k)
    A(i, k) = A(m, k)
    A(m, k) = w
    If k = n Then GoTo calc
    k = k + 1
    GoTo nxtk
calc:
    C = A(i, i)
    For j = i To n
        A(i, j) = A(i, j) / C
    Next j
    B(i) = B(i) / C
    For k = 1 To n
        If k = i Then GoTo endk
        C = A(k, i)
        For j = i To n
            A(k, j) = A(k, j) - C * A(i, j)
        Next j
        B(k) = B(k) - C * B(i)
    endk:
    Next k
Next i
For i = 1 To n
    xxx(i) = B(i)
Next i
End Sub

```

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงเมื่อความหนาขาเข้าเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร

การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงตามตารางการทดลองที่ 4.1 ในส่วนที่ความหนาขาเข้าเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองโดยการวัดค่าองค์ประกอบการรีดต่างๆตามตารางผลการทดลองดังต่อไปนี้

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
39.4	14.7	15.7	1.2	1.103	1.63
39.2	14.7	15.8	1.2	1.103	1.63
39.1	14.7	15.8	1.2	1.096	1.64
38.9	14.6	15.6	1.2	1.102	1.64
39	14.5	15.6	1.2	1.103	1.64
39.1	14.5	15.8	1.2	1.103	1.64
39	14.5	15.8	1.2	1.102	1.64
38.9	14.4	15.7	1.2	1.104	1.65
39.1	14.6	15.8	1.2	1.103	1.64
77.4	14.5	14.9	1.2	0.903	1.58
77.7	14.5	14.7	1.2	0.909	1.58
77.5	14.5	14.9	1.2	0.895	1.58
77.4	14.5	14.7	1.2	0.903	1.6
77.6	14.4	14.7	1.2	0.909	1.58
77.6	14.5	14.7	1.2	0.909	1.59
78	14.6	14.7	1.2	0.903	1.59
77.7	14.5	14.8	1.2	0.901	1.59
77.5	14.6	15	1.2	0.903	1.6
77.6	14.5	14.7	1.2	0.909	1.59
77.4	14.6	14.7	1.2	0.909	1.59
105	14.5	15.3	1.2	0.701	1.44
104.8	14.4	15.2	1.2	0.705	1.45
105.1	14.6	14.9	1.2	0.714	1.46
104.5	14.4	15.3	1.2	0.705	1.46

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
105.1	14.3	15.6	1.2	0.702	1.49
104.7	14.6	15.7	1.2	0.692	1.45
105.1	14.5	15.3	1.2	0.698	1.47
105.4	14.5	15.2	1.2	0.7	1.5
105	14.5	15.2	1.2	0.701	1.45
104.8	14.6	15.3	1.2	0.703	1.48
105.2	14.5	15.1	1.2	0.7	1.46
44.6	14.4	4.9	1.2	1.087	1.46
44.7	14.6	4.9	1.2	1.09	1.48
44.9	14.4	5.1	1.2	1.1	1.48
44.9	14.4	5	1.2	1.09	1.48
44.9	14.6	4.9	1.2	1.09	1.47
45	14.4	4.9	1.2	1.089	1.46
45	14.5	5	1.2	1.1	1.49
45.1	14.6	4.9	1.2	1.101	1.51
83.7	14.5	5.1	1.2	0.88	1.32
83.9	14.6	4.7	1.2	0.893	1.34
83.2	14.5	5.1	1.2	0.888	1.31
83.7	14.4	4.9	1.2	0.893	1.33
83.6	14.5	5	1.2	0.904	1.3
83.6	14.4	5.1	1.2	0.893	1.32
83.1	14.5	5.1	1.2	0.888	1.35
83.3	14.4	5	1.2	0.888	1.3
83.1	14.6	4.9	1.2	0.917	1.3
114.8	14.4	4.8	1.2	0.694	1.3
114.7	14.6	4.9	1.2	0.681	1.33
114.1	14.4	4.6	1.2	0.69	1.29
114.3	14.4	5	1.2	0.687	1.31
114.2	14.4	4.9	1.2	0.697	1.32
114.1	14.4	5	1.2	0.693	42.28
113.9	14.6	5	1.2	0.693	42.28

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
41.3	5.3	15.3	1.2	1.106	7.87
41.3	5.1	15.3	1.2	1.106	7.87
41.2	5.2	15.4	1.2	1.106	7.81
41.3	5.3	15.2	1.2	1.113	7.26
41.1	5.2	15.3	1.2	1.106	7.87
41.2	5.2	15.4	1.2	1.106	7.87
97.8	5.3	15	1.2	0.899	25.09
97.6	5.2	15.1	1.2	0.899	25.09
97.7	5.2	15.2	1.2	0.899	25.09
97.8	5.3	15.2	1.2	0.897	25.26
97.9	5.2	15	1.2	0.899	25.09
97.9	5.3	15	1.2	0.905	24.59
97.9	5.3	15.1	1.2	0.899	25.09
98	5.2	14.8	1.2	0.907	24.43
144.8	5.2	14.7	1.2	0.69	42.47
144.8	5.3	14.7	1.2	0.682	43.15
144.7	5.3	14.6	1.2	0.686	42.86
144.4	5.3	14.9	1.2	0.674	43.82
144.4	5.3	14.6	1.2	0.682	43.15
144.5	5.3	14.6	1.2	0.688	42.86
143.9	5.3	14.8	1.2	0.679	43.44
144.4	5.4	14.9	1.2	0.682	43.15
144.8	5.3	14.9	1.2	0.674	43.82
50.2	5.2	4.8	1.2	1.111	7.46
50.1	5.3	4.9	1.2	1.119	6.73
50.2	5.2	4.8	1.2	1.111	7.441
49.8	5.3	4.9	1.2	1.103	8.08
50.4	5.2	4.8	1.2	1.119	6.73
50.8	5.3	4.7	1.2	1.111	7.46
108.1	5.2	4.8	1.2	0.899	25.1
107.9	5.2	4.9	1.2	0.895	25.44

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
107.7	5.3	5	1.2	0.891	25.77
107.4	5.2	4.9	1.2	0.886	26.13
107.2	5.2	4.9	1.2	0.895	25.44
107.3	5.2	4.9	1.2	0.889	25.95
152.3	5.2	5.3	1.2	0.68	43.35
152.7	5.2	5.2	1.2	0.683	43.05
152	5.3	5.3	1.2	0.672	44.04
151.8	5.2	5.3	1.2	0.675	43.74
152	5.3	5.4	1.2	0.68	43.35
151.3	5.2	5.5	1.2	0.672	44.04

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงเมื่อความหนาเข้าเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร

การทดลองโดยการจำลองกระบวนการรีดจริงตามตารางการทดลองที่ 4.1 ในส่วนที่ความหนาเข้าเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร ให้ผลการทดลองโดยการวัดค่าองค์ประกอบการรีดต่างๆตามตารางผลการทดลองดังต่อไปนี้

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
57.7	15	14.8	1	0.914	1.95
57.7	15.2	15	1	0.908	1.95
57.8	15.2	15.2	1	0.903	1.96
57.9	15.1	15	1	0.908	1.96
58	15	15	1	0.909	1.95
58	15	14.8	1	0.914	1.95
57.9	15.1	15	1	0.908	1.95
57.9	15	14.9	1	0.908	1.95
130.2	15.1	14.9	1	0.7	1.88
130.2	15.2	15	1	0.7	1.88
129.9	15	14.8	1	0.694	1.88

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
129.8	14.9	14.8	1	0.696	1.88
129.7	15.2	15.1	1	0.69	1.88
129.6	15	14.8	1	0.692	1.87
129.3	15.1	15.1	1	0.686	1.86
129.5	15.1	15.2	1	0.684	1.88
206.9	15.1	14.9	1	0.504	1.77
206.7	15.2	15.3	1	0.504	1.77
206	15.1	15	1	0.501	1.76
205.7	15	15.3	1	0.495	1.78
205.8	15.1	15	1	0.498	1.78
205.3	15.2	15.3	1	0.492	1.76
205.1	15.1	15.2	1	0.492	1.76
59	15	5.1	1	0.918	1.93
59.3	15	5.3	1	0.907	1.94
59.2	15	5.1	1	0.913	1.93
59.2	15.1	5.1	1	0.906	1.92
59	14.9	5	1	0.913	1.94
59.2	15	5.2	1	0.913	1.94
59.3	14.9	5.1	1	0.913	1.93
131.6	15.1	4.5	1	0.687	1.85
131.5	15.1	4.6	1	0.689	1.86
131.5	15.1	4.8	1	0.693	1.85
131.1	15.1	4.9	1	0.683	1.85
131	15	4.8	1	0.689	1.86
130.8	15.1	4.9	1	0.683	1.85
130.6	15.1	5	1	0.681	1.84
209.3	15.1	6	1	0.484	1.78
209.6	15.1	5.8	1	0.486	1.76
209.5	15	5.8	1	0.478	1.76
209.6	15	5.7	1	0.475	1.76
209.6	15.1	5.9	1	0.484	1.76

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
209.5	14.9	6	1	0.472	1.76
62.1	5.6	15.5	1	0.916	2
62.2	5.8	15.6	1	0.905	1.99
62.1	5.8	15.7	1	0.905	2
62.1	5.8	15.5	1	0.91	1.99
62.5	5.7	15.5	1	0.904	1.99
62.6	5.8	15.6	1	0.905	1.99
62.2	5.8	15.5	1	0.91	1.99
62.3	5.8	15.4	1	0.91	1.99
135	5.2	14.6	1	0.703	1.89
135.4	5.1	14.5	1	0.71	1.91
135.1	5.1	14.7	1	0.705	1.9
135.4	5.1	14.7	1	0.703	1.88
135.5	5.2	14.7	1	0.701	1.9
135.4	5.1	14.7	1	0.701	1.9
135.2	5.1	14.7	1	0.699	1.88
215.5	5.1	15.3	1	0.492	1.7
215.8	5.1	15	1	0.495	1.75
215.8	5.1	14.5	1	0.498	1.76
214.7	5	14.7	1	0.489	1.7
215.4	5.1	14.6	1	0.495	1.72
214.7	5.1	14.9	1	0.49	1.73
214.2	5	14.4	1	0.495	1.73
214.3	4.9	15.2	1	0.484	1.68
215.1	5	15.5	1	0.487	1.76
71.4	4.7	5.1	1	0.908	1.95
71.1	4.7	5.2	1	0.902	1.95
71	4.8	5.3	1	0.903	1.95
70.8	5.3	5.3	1	0.901	1.94
71.1	5.2	5.2	1	0.907	1.95
71.4	4.8	5.2	1	0.903	1.96

Rolling Force	Backward tension	Forward tension	Inlet thickness	outlet thickness	sheet velocity
kg/mm	kg/mm	kg/mm	mm	mm	m/min
71.3	4.9	5.3	1	0.903	1.95
71.1	5.3	5.4	1	0.902	1.95
145.2	5.2	5	1	0.704	1.88
145.5	5.3	5.1	1	0.705	1.89
145.4	5.2	5	1	0.704	1.88
145.1	5.2	5.1	1	0.698	1.88
145.6	4.7	5	1	0.707	1.9
144.9	4.9	5	1	0.705	1.88
144.8	5.3	5.1	1	0.7	1.88
218.5	5	5.9	1	0.501	1.72
218.6	4.9	5.6	1	0.501	1.74
219.2	4.8	5.7	1	0.506	1.78
218.4	5	5.8	1	0.489	1.71
219.9	5.1	6	1	0.498	1.75
218.4	5.1	6.1	1	0.492	1.71
218.2	5.2	6	1	0.486	1.68
219.6	5.1	5.8	1	0.504	1.73
218.7	4.9	5.9	1	0.504	1.73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกพจน์ ปัทมสัตยาสนธิ เกิดวันที่ 24 มิถุนายน 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย