

การพัฒนาเครื่องดึงขดรูปวง
THE DEVELOPMENT OF WIRE DRAWING MACHINE

ธนาคาร ทุน
ชานันท์ โสภณวิธาน
นฤวิทย์ ภาวโน

ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาเครื่องดึงขึ้นรูปลวด
THE DEVELOPMENT OF WIRE DRAWING MACHINE

ธนาคาร	หนูเสน
ธนนันท์	โชคชัยวรังกูร
นฤวิทย์	ภาวโน

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท
รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

THE DEVELOPMENT OF WIRE DRAWING MACHINE

THANAKAN NUSEN

THANANAN CHOKCHAIWARANGKUL

NARUEWIT PAWANO

Advisor

Assoc.Prof. Somchai Norasethasopon

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาเครื่องดึงขึ้นรูปลวด

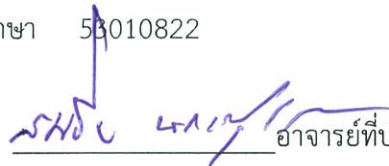
THE DEVELOPMENT OF WIRE DRAWING MACHINE

ผู้จัดทำ

นายธนากร หนูเสน รหัสนักศึกษา 53010676

นายธนาพันธ์ โชคชัยวรางกูร รหัสนักศึกษา 53010680

นายณฤวิทย์ ภาวโน รหัสนักศึกษา 53010822


อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์
(รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ)

การพัฒนาเครื่องดัดขึ้นรูปลวด

นายธนาคาร	หนูเสน	53010676
นายณานันท์	โชคชัยวรังกูร	53010680
นายณวิทย์	ภาวโน	53010822
รศ.สมชัย	นรเศรษฐ์ไศภาน	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาเครื่องทดสอบดัดขึ้นรูปลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเน้นการดัดขึ้นรูปลวดผ่านน้ำมันหล่อลื่น ให้เครื่องทดสอบดัดขึ้นรูปลวดสามารถวัดแรงที่กระทำต่อลวดขณะที่ทำการดัดขึ้นรูปลวดได้เพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบดัดขึ้นรูปลวดให้สามารถวิเคราะห์ค่าแรงที่กระทำขณะที่ทำการดัดขึ้นรูปลวด เพื่อลดปัญหาด้านการสึกหรอของแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปลวดและเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการดัดขึ้นรูปลวดให้สูงขึ้น โดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ การปรับแรงที่กระทำในการดัดขึ้นรูปลวดโดยทำการดัดลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 แม่พิมพ์การดัดลวดทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ลักษณะรูปร่างมาตรฐาน JIS B4111

THE DEVELOPMENT OF WIRE DRAWING MACHINE

THANAKAN	NUSEN	53010676
THANANAN	CHOKCHAIWARANGKUL	53010680
NARUEWIT	PAWANO	53010822
Assoc.Prof. Somchai	Norasethasopon	Advisor

Abstract

The purpose of this project is to develop wire drawing testing machine focusing on lubrication. The wire drawing testing machine can measure the force on the wire. Analysis the force at the time of the wire drawing. Which is able to decrease die wear and improve the performance of cold wire drawing process by introducing various lubricants. Modifying the force can be done by Stainless steel wire pulling (SUS304) and wire drawing dies made from tungsten carbide. Shapes standard (JIS B4111)

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก รศ.สมชัย นเรศรัฐโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่คอยให้แนวคิดและคำแนะนำในการทำปริญญาโทเล่มนี้ ตลอดจนถึงแนะแนวทางแก้ไขปัญหาลดระยะเวลาในการทำปริญญาโทฉบับนี้ จนปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจและสนับสนุนช่วยเหลือทุกเรื่องในการทำปริญญาโทฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณพี่ป๋อง ที่คอยเอื้อเพื่อให้ข้อมูลและความรู้ในเรื่องโปรแกรมแลปวิวและสเตรนเกจ ขอขอบคุณพี่ปอนด์ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในด้านวงจรและมอเตอร์

และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนทั้งในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทั้งต่างภาค ต่างคณะ ต่างมหาวิทยาลัย ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือในทุกเรื่อง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีกระบวนการดิ่งลวด	3
2.1.1 เครื่องดิ่งลวด	3
2.1.2 กระบวนการดิ่งลวด	5
2.2 อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด (%)	8
2.3 แรงดิ่งขึ้นรูปลวด ($F_{D,tot}$)	8
2.3.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน	8
2.3.2 แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดิ่งลวด	9
2.3.3 แรงเฉือนรีตันแดนท์	9
2.4 อุณหภูมิที่เกิดในการดิ่งลวด	10
2.5 การทดสอบแรง	10
2.5.1 การคำนวณความเค้นและความเครียดวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้ สภาวะแรงดึงตามแนวแกน	10
2.5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve)	11
2.6 สเตรนเกจ (Strain Gage)	11
2.6.1 ค่าเกจแฟคเตอร์ (Gage Factor)	12
2.7 วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Bridge)	12
2.7.1 บริดจ์แบบวงจรวีตส์โตน (Wheatstone Bridge)	12
2.8 วงจรสเตรนเกจและวงจรวีตส์โตนบริดจ์	13
2.8.1 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจ	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 การวัดแรงบนคานยื่น (Cantilever Beam)	14
2.9 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analogue to Digital Converter)	15
2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไดรบอลอย์	15
2.10.1 สารหล่อลื่น	15
2.10.2 การสึกหรอ	20
2.11 การเคลือบผิว	21
บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและชุดวัดแรง	23
3.1 ความเร็วที่ใช้ดึง	23
3.2 การคำนวณแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด	23
3.2.1 อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด	23
3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	24
3.2.3 การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด	24
3.3 การออกแบบเพลลา	26
3.3.1 วัสดุเพลลา	26
3.3.2 ขนาดของเพลลา	26
3.3.3 การพิจารณาในการออกแบบเพลลา	27
3.3.4 การบิด	27
3.4 สายพาน	28
3.4.1 ชนิดและวัสดุสายพาน	28
3.4.2 ลักษณะการขับเคลื่อนด้วยสายพาน	29
3.5 ล้อสายพาน	30
3.6 ชุดวัดแรง	33
3.6.1 ตัวยึดคานวัดแรง	33
3.6.2 คานยึดตริง	33
3.6.3 แท่งเหล็กยึดตาย	36
3.6.4 การออกแบบวงจรทางไฟฟ้า	36
3.6.5 การออกแบบวงจรขยายปรับแต่งแรงดันไฟฟ้า	39
3.6.6 วงจรที่ใช้แปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นดิจิทัล	40
3.6.7 โปรแกรมที่ใช้แสดงผล	40
3.7 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)	41
3.8 แม่พิมพ์ดึงลวด	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง	44
3.10 สารหล่อลื่น	44
3.11 มอเตอร์และเฟืองทด	45
บทที่ 4 การทดลอง	46
4.1 วิธีการทดลอง	46
4.1.1 การประมาณค่าเชิงโมดูลัสของคานยื่นแบบยึดตรึง	46
4.1.2 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยดึงผ่านตายที่มีสารหล่อลื่น Graphite Lubricant เป็นสารหล่อลื่นโดยมีการวัดแรงขณะดึงไปด้วย	48
4.1.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	48
4.2 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)	49
4.3 ผลการทดลอง	50
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	59
5.1 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	59
5.2 ปัญหาที่พบ	59
5.3 แนวทางการพัฒนา	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	64
ก. คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุ	64
ข. การออกแบบระยะโค้งงอของคานยื่น	66
ค. มาตรฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และมาตรฐานแม่พิมพ์	68
ง. การออกแบบเส้นทางการเดินขึ้นรูปลวดแบบเก่าเปรียบเทียบกับเส้นทางการเดินลวด แบบใหม่และการออกแบบโปรแกรมอ่านค่าแรงดึงขึ้นรูปลวด (Labview)	78
จ. บทความประกอบวิชาโครงการ	83

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในงานดึงขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปขึ้นงาน	24
ตารางที่ 3.2 ขนาดระบุของเพลตามาตรฐาน ISO/R 775 – 1969	26
ตารางที่ 3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อยสายพานแบนตามมาตรฐาน ISO 99-1975(E)	31
ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่ายังโมดูลัสของคานยื่นแบบยึดตรึง	47
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการคำนวณค่ายังโมดูลัสของคานยื่น	47
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่ายังโมดูลัสของคานยื่นแบบยึดตรึง	50
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการคำนวณค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยของคานยื่นจากแรงที่ 1 จากการสูบลมถ่วงน้ำหนักมาตรฐาน	50
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการคำนวณค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยของคานยื่นจากแรงที่ 2 จากการสูบลมถ่วงน้ำหนักมาตรฐาน	51
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลอง(ก่อนการพัฒนา)	55
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 จากการทดลอง	55
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM	56
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจาก เครื่อง UTM (ก่อนการพัฒนา)	57
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM	58

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องดึงลวดดรอเบ็น	4
รูปที่ 2.2 เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว	4
รูปที่ 2.3 เครื่องดึงลวดแบบหลายขั้น	4
รูปที่ 2.4 การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด	5
รูปที่ 2.5 ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดึงลวด	6
รูปที่ 2.6 บริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรกระบวนการดึงขึ้นรูป	7
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียด	11
รูปที่ 2.8 สเตรนเกจ	11
รูปที่ 2.9 แสดงวงจรบรีดจ์แบบวีตสโตน	12
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรบรีดจ์สภาวะสมดุล	13
รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจในวงจรวีตสโตนบรีดจ์	13
รูปที่ 2.12 แสดงการวัดความเครียดแบบมีแรงกระทำที่ปลายคาน	14
รูปที่ 2.13 แสดงระบบดิจิตอลเชื่อมต่อกับสัญญาณอนาลอก	15
รูปที่ 2.14 สภาวะการหล่อลื่นแบบต่างๆ	19
รูปที่ 3.1 ลักษณะการจับด้วยสายพาน (ก) โอพินไดรฟ์ (ข) ครอสไดรฟ์ (ค) ควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (ง) มิวล์ไดรฟ์ (จ) แสดงการจับโดยใช้ล้อช่วย (ฉ) ริเวอส์ไดรฟ์	29
รูปที่ 3.2 ล้อสายพาน	30
รูปที่ 3.3 ฐานยึดคาน	33
รูปที่ 3.4 คานยึดตริง	33
รูปที่ 3.5 แบบและขนาดของคานยึดตริง	34
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน	34
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน	34
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของคานยื่นที่แรงกระทำไม่ได้กระทำที่ตำแหน่งปลายคาน	35
รูปที่ 3.9 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 1	37
รูปที่ 3.10 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 2	37
รูปที่ 3.11 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 4	38
รูปที่ 3.12 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 5	38
รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณ	39
รูปที่ 3.14 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (RC Filter)	39
รูปที่ 3.15 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกไปเป็นดิจิตอล	40
รูปที่ 3.16 โปรแกรมแลปวิว	40

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.17 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในการทดลอง	41
รูปที่ 3.18 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในการทดลอง	42
รูปที่ 3.19 ชุดวัดแรง	42
รูปที่ 3.20 ล้อม้วนดึงเก็บลวด	43
รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐาน W103 ไม่เคลือบผิว	43
รูปที่ 3.22 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	44
รูปที่ 3.23 อ่างน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อลื่น	44
รูปที่ 3.24 มอเตอร์ต้นกำลัง	45
รูปที่ 3.25 เฟืองหนอนทดกำลัง	45
รูปที่ 4.1 รูปแสดงหน้าจอของโปรแกรมแลปวิวขณะเทียบค่า	46
รูปที่ 4.2 แสดงการปรับเทียบโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน	47
รูปที่ 4.3 การทดสอบคุณสมบัติลวดโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)	48
รูปที่ 4.4 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)	49
รูปที่ 4.5 แสดงการวัดค่าขณะดึงขั้นรูปลวด	54
รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอโปรแกรมแลปวิวขณะดึงขั้นรูปลวด	54
รูปที่ 4.7 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1)	56
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2)	56
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1) (ก่อนการพัฒนา)	57
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2) (ก่อนการพัฒนา)	57
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1)	58
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2)	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

อุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอุตสาหกรรมที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพราะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีความสวยงามทนการกัดกร่อนได้สูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานด้วยเหตุผลดังกล่าวในอุตสาหกรรมต่างๆจึงได้นำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุทำผลิตภัณฑ์ต่อ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในการผลิตลวดที่มีความเที่ยงตรงสูงจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ดึงลวดที่มีการสึกหรอต่ำ เช่น แม่พิมพ์ที่ทำจากเพชร แต่ด้วยเหตุผลด้านต้นทุนการผลิตที่สูงมากในอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไปจึงใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ แต่แม่พิมพ์ที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์จะมีความทนทานต่อการสึกหรอที่ต่ำกว่าแม่พิมพ์ที่ทำจากเพชร ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแม่พิมพ์เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ลวดที่มีความเที่ยงตรงสูง อีกทั้งงานวิจัยชิ้นนี้ยังได้ออกแบบเครื่องทดสอบแรงดึงอย่างง่ายและมีประสิทธิภาพเพียงพอและเหมาะสมต่อการศึกษาระงับที่กระทำในขณะที่ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมถูกดึงผ่านแม่พิมพ์ ซึ่งเครื่องทดสอบแรงดึงเครื่องนี้สามารถทำการคำนวณหาค่าแรงดึงของวัสดุโดยประยุกต์ใช้เข้ากับเกจวัดแรงดึงและแผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าโดยสามารถแสดงผลออกมาในคอมพิวเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเน้นการดึงขึ้นรูปลวดผ่านน้ำมันหล่อลื่นให้เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดสามารถวัดแรงที่กระทำต่อลวดขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปลวดได้ เพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดให้สามารถวิเคราะห์ค่าแรงที่กระทำขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปลวด เพื่อลดปัญหาด้านการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด และเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการดึงขึ้นรูปลวดให้สูงขึ้นโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆการปรับแรงที่กระทำและความเร็วในการดึงขึ้นรูปลวดโดยทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 แม่พิมพ์การดึงลวดทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ลักษณะรูปร่างมาตรฐาน JIS B4111

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ทดสอบและศึกษาตัวเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดซ่อมแซมเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดให้สามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติโดยทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดก่อนดึง 2.40 มิลลิเมตร ลดลงเหลือ 2.30 มิลลิเมตร ทำการดึงขั้นสุดท้าย (Skin Pass) มีอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด (Reduction Ratio Of Cross Sectional Area) %R = 9.0 เปอร์เซ็นต์

1.3.2 ติดตั้งชุดวัดแรงของลวดในเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดแบบดึงขึ้นรูปครั้งเดียวใช้ระบบมอเตอร์เป็นชุดต้นกำลัง โดยความเร็วในการดึงลวด 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ทำการออกแบบเครื่องตั้งขึ้นรูปลวดแบบชั้นเดียวใหม่
- 1.4.2 อุปกรณ์วัดแรงสามารถแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ได้
- 1.4.3 ติดตั้งคานเพื่อประกอบชุดวัดแรงเข้ากับคาน
- 1.4.4 ดำเนินการทดลอง

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีกระบวนการดึงลวด [1]

กระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อแบ่งกลุ่มตามการวิเคราะห์การทำงานแล้วจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร (Steady State Process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร (Non Steady State Process) กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียรได้แก่กระบวนการดึงลวด กระบวนการรีดลวด (Rolling) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ที่ขึ้นรูปยาว ส่วนงานในกลุ่ม กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียรเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น กระบวนการตัด (Blanking) กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) กระบวนการดึงลวดเป็นงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียรที่มีการขึ้นรูปชิ้นงานที่ยาวและต่อเนื่องมากที่สุด

2.1.1 เครื่องดึงลวด [2]

การแบ่งประเภทของเครื่องดึงลวดจะแบ่งตามระบบต้นกำลังการดึงของเครื่องและระดับการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวด ซึ่งประเภทของเครื่องดึงลวดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

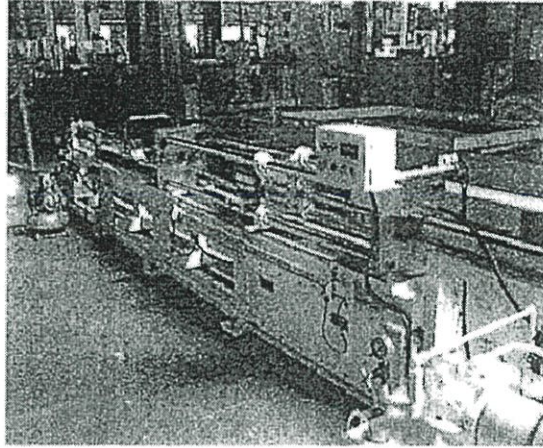
2.1.1.1 เครื่องดึงลวดแบบเครื่องดรอเบนซ์ (Draw Bench)

ระบบต้นกำลังของเครื่องดรอเบนซ์จะใช้ระบบไฮดรอลิกส์สามารถดึงได้ทั้งการดึงลวด และการดึงท่อความสามารถของเครื่องจะให้อัตราส่วนการลดหน้าตัดได้สูงและเหมาะกับการดึงลวดขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูง ดังรูป 2.1

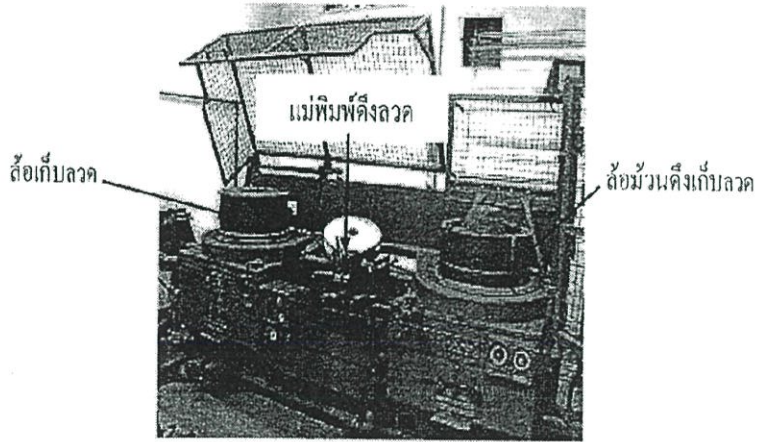
2.1.1.2 แบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการดึง

ก. เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing) เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว ดังรูปที่ 2.2 ส่วนมากจะทำการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดเพียงตัวเดียวและจะใช้อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่ต่ำโดยล้อย่นดึงเก็บจะมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังเพียงตัวเดียว

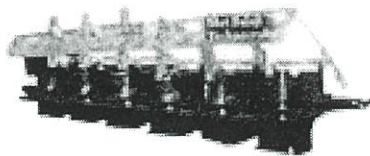
ข. เครื่องดึงรูปแบบหลายขั้น (Multiple Pass Wire Drawing) การดึงลวดหลายขั้นตอนดังรูปที่ 2.3 จะมีแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดหลายตัว ใช้ในกรณีที่ต้องการอัตราส่วนการลดหน้าตัดที่สูง การใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังตัวเดียวจะทำให้อัตราเร็วในการดึงคงที่เท่ากันทุกตัว หรือในกรณีที่ไม่มีมอเตอร์เป็นต้นกำลังหลายตัวจะมีการควบคุมความเร็วในการดึงให้เท่ากันทุกตัว



รูปที่ 2.1 เครื่องดิ่งลาดตรอบเป็น



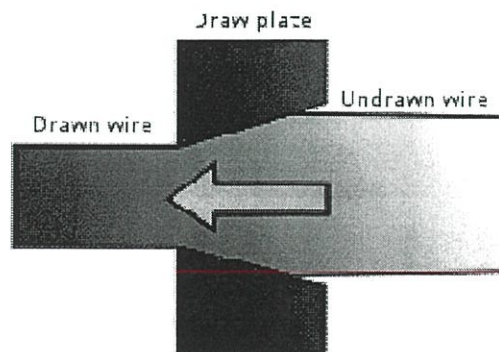
รูปที่ 2.2 เครื่องดิ่งลาดแบบขั้นตอนเดียว [2]



รูปที่ 2.3 เครื่องดิ่งลาดแบบหลายชั้น

2.1.2 กระบวนการดึงลวด

หลักการทั่วไปของการดึงลวดและการดึงท่อจะมีพื้นฐานคล้ายกันแต่จะต่างกันออกไปตรงขนาดและรูปร่างหลังการดึงกระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำวัสดุที่เป็นท่อนหรือลวดหลังจากผ่านการขึ้นรูปร้อนมาดึงลดขนาดโดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดดังรูปที่ 2.4 ผลลัพธ์จากการดึงลวดจะมีรูปร่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรูปทรงในของแม่พิมพ์ดึงลวดได้แก่รูปสี่เหลี่ยมรูปทรงกลมรูปทรงหกเหลี่ยมรูปทรงอื่นๆที่ซับซ้อนขึ้นแต่ขีดจำกัดของรูปทรงที่สามารถขึ้นรูปได้จริงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุของแต่ละชนิดกรรมวิธีการดึงลวดเริ่มจากการนำลวดมาทำความสะอาดเพื่อขจัดผิวที่เกิดออกไซด์ก่อนซึ่งหากผิวที่เกิดออกไซด์หลุดออกจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวแม่พิมพ์ดึงลวดและส่งผลให้เกิดการสึกหรอ การดึงเริ่มต้นโดยให้แรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของลวดด้วยชุดกำลังรูปร่างของลวดจะถูกกำหนดด้วยขนาดรูในของแม่พิมพ์เป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ (Plastic Deformation) ระดับของการดึงลวดเมื่อแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด [3] จะมีตั้งแต่การดึงลวดขนาดใหญ $D_0 = 4.2$ ถึง 16 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดกลาง $D_0 = 1.6$ ถึง 4.2 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก $D_0 = 0.7$ ถึง 1.6 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก (Fine Wire) D_0 น้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็กมากสามารถดึงได้เล็กสุด 0.03 มิลลิเมตร แต่ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) การหล่อลื่นในกระบวนการดึงจะมีทั้งของเหลวและของแข็งของเหลวได้แก่น้ำมันหล่อลื่นต่างๆส่วนการใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็งได้แก่ กราไฟท์ (Graphite) ระบบการหล่อลื่นจะมีทั้งการหยด การพ่นแม่พิมพ์อยู่ในสารหล่อลื่นและลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่นการดึงลวดแบบอุ่น (Warm Drawing) [4] เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดที่มีความแข็งแรงมากและดึงขึ้นรูปยากเป็นกระบวนการดึงลวดโดยเพิ่มความร้อนให้กับวัสดุหรือแม่พิมพ์ดึงลวดจนลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 200-500 องศาเซลเซียสแต่ต่ำกว่าจุดการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุทำให้ผิวภายนอกของลวดมีความแข็งแรงลดลงแต่ภายในลวดความแข็งแรงยังคงเดิมอยู่ลวดที่ผ่านการดึงมาจะเกิดความเครียดสูง (Strain Hardening) มากขึ้นและมีความแข็งแรงล้าของวัสดุ (Fatigue Strength) สูงขึ้นงานที่ทำการการขึ้นรูปอุ่นได้แก่ลวดสปริงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อุปกรณ์เครื่องมือแพทย์หรือลวดที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้น ส่วนกระบวนการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass Wire Drawing) จะเป็นการดึงลดขนาดในช่วงสุดท้ายเพื่อได้ผลลัพธ์สำเร็จที่มีความเรียบผิวตีการดึงลักษณะนี้จะมีอัตราการลดหน้าตัดของลวดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

2.1.2.1 ลักษณะแม่พิมพ์ดิ่งลวด

ลักษณะแม่พิมพ์ดิ่งลวดตามมาตรฐาน JIS B4111 [5] จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ดายอินเสิร์ต (Die Insert) และแม่พิมพ์ส่วนนอก (Steel Case) ดังรูปที่ 2.5 จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. ดายอินเสิร์ต คือ แม่พิมพ์ส่วนในที่ถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอก โดยทั่วไปจะทำมาจากโลหะผสมคาร์ไบด์หรือทำจากเพชร (Diamond Die) ในกรณีการดิ่งลวดที่มีความละเอียดมาก ซึ่งดายอินเสิร์ตจะมีส่วนประกอบอยู่ต่างๆดังนี้

ก. รัศมีโค้งที่ปากดาย (Bell Radius) เป็นส่วนที่ลวดเริ่มเข้าสู่แม่พิมพ์มีลักษณะคล้ายระฆัง ช่วยให้ลวดลื่นไหลเข้าสู่การลดหน้าตัดได้ดีขึ้น ลักษณะรัศมีโค้งที่ปากดายยังช่วยให้เกิดแรงอัดจากของเหลว (Hydrostatic Pressure) ส่งผลช่วยให้สารหล่อลื่นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อการหล่อลื่นได้ดีขึ้น

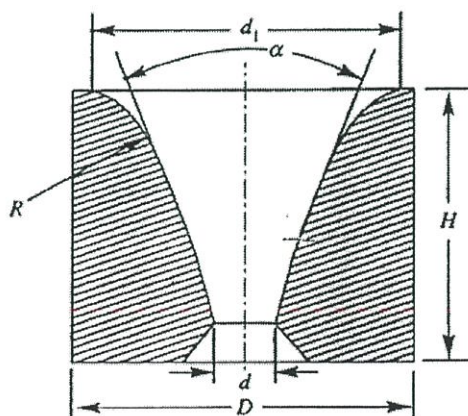
ข. มุมปากทางเข้า (Entrance Angle) เป็นส่วนทางเข้าที่ลวดถูกควบคุมโดยผนังด้านข้างลื่นไหลเข้าสู่การลดหน้าตัดพร้อมกับมีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวของลวด

ค. ครึ่งมุมไหลเข้า α (Approach Angle) เป็นส่วนแรกที่ดายเริ่มทำการลดหน้าตัดลง เป็นมุมที่มีอิทธิพลต่อการไหลของเนื้อโลหะ มุมนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการกำหนดแรงในการดิ่งลวด

ง. ส่วนลดขนาด (Die Bearing) เป็นส่วนที่ลดขนาดของลวดให้มีขนาดเท่ากับขนาดที่ต้องการของลวดสำเร็จ เป็นส่วนที่มีความเสียดทานมากและการสึกหรอที่ส่วนนี้จะส่งผลต่อรูปทรงและผิวสำเร็จของลวดหลังการดิ่ง

จ. ส่วนทางออก (Back Relief) เป็นส่วนช่วยให้ลวดลื่นไหลออกจากแม่พิมพ์ดิ่งลวด และจะช่วยทำให้ลวดรักษาความเป็นเส้นตรง

2. แม่พิมพ์ส่วนนอก เป็นส่วนประกอบที่ใหญ่กว่าเพื่อประโยชน์ในการรับแรงที่มากและง่ายในการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการสึกหรอ



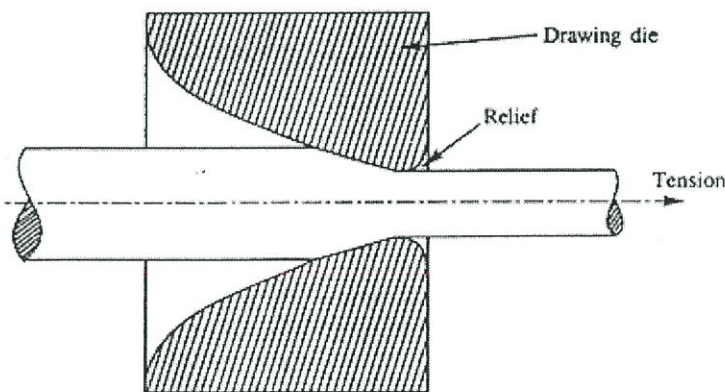
รูปที่ 2.5 ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดิ่งลวด

2.1.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับความเสียดทานในกระบวนการดึงลวด

ความเสียดทานในกระบวนการดึงลวดเป็นความเสียดทานแบบลื่นไหล (Sliding Friction) จะเกิดขึ้นบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างลวดและแม่พิมพ์ ความเสียดทานในกระบวนการดึงลวดจะเกิดขึ้นอยู่กับมุมไหลเข้า (α) เป็นสำคัญเมื่อมุมไหลเข้ามีขนาดเล็กกว่ามุมเหมาะสมก็จะมีพื้นที่สัมผัสมากเป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสมากตาม ส่งผลให้ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปที่สูงขึ้น แต่เมื่อมุมไหลเข้ามีความกว้างกว่ามุมที่เหมาะสมจะทำให้พื้นที่สัมผัสน้อยความเสียดทานน้อยแต่การไหลตัวเกิดขึ้นได้ยากจนส่งผลให้วัสดุเกิดการติด (Dead Zone) และในกรณีที่มุมไหลเข้ากว้างมากจะเกิดการปอกของผิว (Shaving) ดังนั้นจึงจะมีมุมเหมาะสมที่ทำให้เกิดความเสียดทานน้อยที่สุดระหว่างลวดและแม่พิมพ์ดึงลวด นอกจากนี้ความเสียดทานยังขึ้นอยู่กับความเรียบผิวของแม่พิมพ์อีกด้วย แม่พิมพ์ที่มีความหยาบมากจะส่งผลให้เกิดความเสียดทานที่สูงเช่นกัน [6]

2.1.2.3 แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

การวิเคราะห์แรงในการดึงขึ้นรูปลวดโลหะจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมต่างๆ ของเนื้อโลหะและองค์ประกอบอื่นๆ ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ได้แก่ ผลกระทบจากความเสียดทานระหว่างผิวลวดกับแม่พิมพ์ดึงลวด การหล่อลื่น อุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน การกระจายความเค้นและความเครียด ความเร็วของการเปลี่ยนรูป ความซับซ้อนของรูปร่างการดึงลวดและแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.6 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าความเค้นคราก (Yield Strength) ของวัสดุแต่ต้องไม่มากเกินไปจนเกินจุดแตกหักของวัสดุ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนรูปของโลหะจะซับซ้อนมาก แต่ในการวิเคราะห์จะสมมติให้บริเวณมีการเปลี่ยนรูปถาวรสารมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันทุกทิศทุกทาง [7] การคำนวณในกระบวนการดึงลวดมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 บริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรกระบวนการดึงขึ้นรูป

2.2 อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด (%)

$$\%R = \frac{A_o - A_l}{A_o} \times 100(\%) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A_o &= \text{พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง} [mm^2] \\ A_l &= \text{พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง} [mm^2] \end{aligned}$$

2.3 แรงดึงขึ้นรูปลวด ($F_{D,tot}$)

แรงดึงขึ้นรูปลวดจะพิจารณาจากผลรวมของแรงในสามส่วน ซึ่งประกอบด้วยแรงในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal Deformation Force) แรงเสียดทาน (Friction Force) และแรงเฉือนหรือแรงเฉือนรีด้นแดนท์ (Redundant Shearing) สมการของแรงดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} F_{D,tot} &= \text{แรงดึงขึ้นรูปของกรรมวิธีดึงลวด} \\ F_{id,D} &= \text{แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน} \\ F_{FR,S} &= \text{แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด} \\ F_{sh} &= \text{แรงเฉือนรีด้นแดนท์} \end{aligned}$$

2.3.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

$$F_{id,D} = A_l \sigma_{f,m} \varepsilon_{max} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\sigma_{f,m} = \text{ความเค้นขึ้นรูปเฉื่อย (Flow Stress)} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\varepsilon_{max} = \text{ความเครียด (True Strain)}$$

โดยที่

$$\sigma_{f,m} = \frac{\sigma_{m,n-1} + \sigma_{m,n}}{2} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$\sigma_{m,n-1} = \text{ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุก่อนการดึง} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\sigma_{m,n} = \text{ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังการดึง} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

โดยที่

$$\varepsilon_{max} = \ln \frac{A_0}{A_f} \quad (2.5)$$

2.3.2 แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดิ่งลวด

$$F_{FR,S} = \frac{2\mu A_l \sigma_{f,m} \varepsilon_{max}}{\sin 2\alpha} \quad (2.6)$$

เมื่อ

- $F_{FR,S}$ = แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดิ่งลวด
 μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coulomb's Coefficient of Friction)
 α = ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดิ่งลวด [องศา]

2.3.3 แรงเฉือนรีตันแดนท์

เมื่อทำการวิเคราะห์ที่เอลิเมนต์หนึ่งของลวดโดยกำหนดให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ในขณะที่ถูกดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ดิ่งลวด จะเกิดความเค้นเฉือน (Shearing Stress) ที่สูงจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของลวดที่ลดลงจึงทำให้เอลิเมนต์เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) เป็นมุมเฉือน = θ การบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์นั้นเกิดเป็นสัดส่วนกับมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดิ่งลวด เอลิเมนต์ที่เกิดการบิดเบี้ยวไปนั้นในการดึงต่อจะต้องมีแรงที่มากขึ้นเพื่อให้เอลิเมนต์ที่บิดเบี้ยวถูกดึงผ่านแม่พิมพ์ และจะกลับเป็นรูปทรงเดิมที่บริเวณทางออกบริเวณเอลิเมนต์จึงเกิดความเค้นเฉือนในปริมาณที่สูง เรียกว่าแรงเฉือนรีตันแดนท์ แรงเฉือนรีตันแดนท์ประกอบด้วยแรงสองส่วน คือ แรงแม็คโครเฉียริง (Macro-Shearing) ที่อยู่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ดิ่งลวด และแรงอันเฉียริง (Unshering) ซึ่งอยู่บริเวณทางออกของแม่พิมพ์ดิ่งลวด ปริมาณอันเฉียริงจะมีค่าเท่ากับแม็คโครเฉียริง การเกิดแม็คโครเฉียริงในปริมาณสูงจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโซนเนื้อวัสดุไม่ไหลตัว (Dead Metal Zone) เกิดการติดของเนื้อวัสดุซึ่งคล้ายกับกรรมวิธีอื่นๆ เช่น การดึงขึ้นรูปท่อ (Tube Drawing) และการเกิดคลื่นในการลดความหนาผนังบาง (Ironing Wave) เป็นผลจากการเกิดแม็คโครเฉียริงที่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ทำให้เกิดการติดของเนื้อวัสดุจึงใช้แรงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงเฉือนรีตันแดนท์คือขนาดของมุมไหลเข้าและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด [8]

แรงเฉือนรีตันแดนท์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_{Sh} = \frac{2A_0 \sigma_{f,m} (\tan \alpha)}{3} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$F_{Sh} = \text{แรงเฉือนรีตันแดนท์}$$

ดังนั้น แรงในการดึงลวดจึงประกอบด้วยแรง 3 ส่วน คือ แรงในการขึ้นรูปวัสดุ (2.3) แรงเสียดทาน (2.6) และแรงเฉือนรีตันแดนท์ (2.7) ซึ่งคำนวณโดยสมการ Siebel's Method

$$F_{D,tot} = A_l \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varepsilon_{max} + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (2.8)$$

2.4 อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด

$$\Delta T = \sigma_{f,m} \ln \frac{A_o}{A_l} \left(\frac{1}{c\rho} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta T &= \text{อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด [องศาเซลเซียส]} \\ \sigma_{f,m} &= \text{ความเค้นขึ้นรูปเฉลี่ย} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ C &= \text{ค่าการนำความร้อนของวัสดุ} \left[\frac{J}{Kg} \right] \\ \rho &= \text{ความหนาแน่นของวัสดุ} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \end{aligned}$$

2.5 การทดสอบแรง

การทดสอบแรงสามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงพร้อมทั้งคำนวณหาคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบจากข้อมูลที่ได้

2.5.1 การคำนวณความเค้นและความเครียดวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแรงดึงตามแนวแกน

จะเกิดความเค้นและความเครียดขึ้นในเนื้อวัสดุโดยปริมาณความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.11 ตามลำดับ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.10)$$

เมื่อ

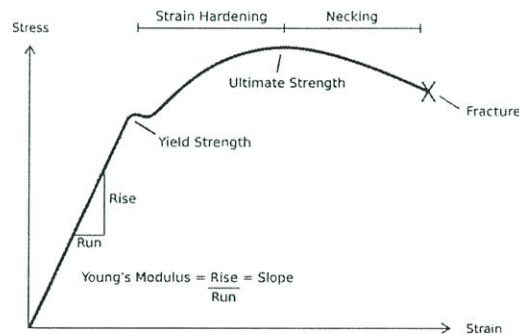
$$\begin{aligned} \sigma & \text{ คือ ความเค้น (นิวตัน / ตารางเมตร)} \\ P & \text{ คือ แรงดึงตามแนวแกนที่กระทำกับวัสดุ (นิวตัน)} \\ A & \text{ คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (Cross Section Area) ของวัสดุ (ตารางเมตร)} \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \varepsilon & \text{ คือ ความเครียด} \\ L & \text{ คือ ความยาวของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีแรง P มากระทำ (เมตร)} \\ L_0 & \text{ คือ ความยาวตั้งต้นของวัสดุก่อนรับแรง (เมตร)} \end{aligned}$$

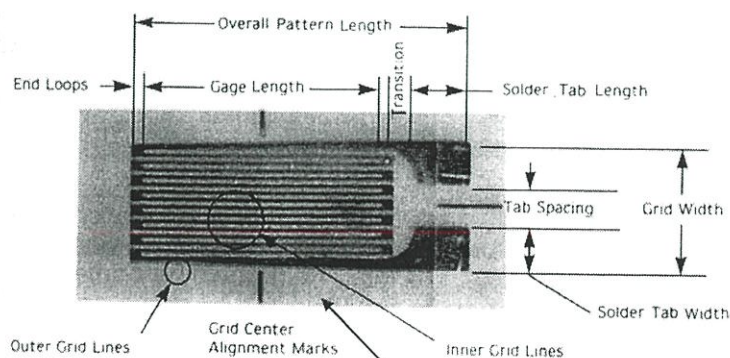
2.5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve)
 ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึงมีความสัมพันธ์กันการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถทำได้โดยสร้างกราฟที่มีความเค้นเป็นแกนตั้งและความเครียดเป็นแกนนอนกราฟนี้เรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Diagram) เมื่อทำการสร้างกราฟนี้จากการทดลองดึงวัสดุหลายๆชนิดจะพบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุต่างๆสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่มีจุดครากบน (Upper Yield Point) และจุดครากล่าง (Lower Yield Point) ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียด

2.6 สเตรนเกจ (Strain Gage)

สเตรนเกจเป็นตัววัดความเครียดของชิ้นงานโดยใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวดที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวางเช่นการวัดน้ำหนัก, ความดัน, แรงเชิงกลหรือการเคลื่อนที่ (Displacement) สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือแบบยึดติด (Bounded Strain Gage) และแบบไม่ยึดติด (Unbounded Strain Gage) ซึ่งสเตรนเกจทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือทำด้วยเส้นลวดเล็กๆขดไปขดมาและนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียดดังแสดงในรูปภาพที่ 2.8 เมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออกความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลงผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 2.8 สเตรนเกจ

2.6.1 ค่าเกจแฟคเตอร์ (Gage Factor)

การใช้สเตรนเกจในการตรวจวัดค่าความเครียดวัตถุั้นเราจะพิจารณาปริมาณทางกายภาพสองสิ่งคือค่าความต้านทาน (Gage Resistance) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าของความยาวที่เปลี่ยนแปลงซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนที่เรียกว่าเกจแฟคเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.12

โดยที่

$$S_g = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_a} \quad (2.12)$$

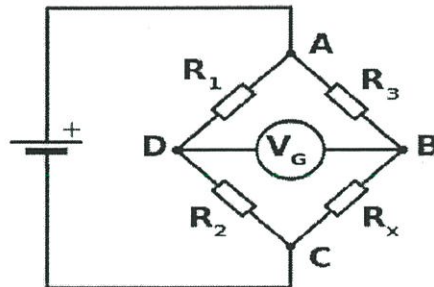
S_g คือ ค่าเกจแฟคเตอร์

2.7 วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Bridge)

วงจรบริดจ์เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นจากการวัดเปรียบเทียบใช้อย่างกว้างขวางในการวัดความต้านทานความเหนี่ยวนำและอิมพีแดนซ์

2.7.1 บริดจ์แบบวงจรวีตสโตน (Wheatstone Bridge)

บริดจ์แบบวงจรวีตสโตนจะประกอบด้วยส่วนของความต้านทาน 2 ส่วนขนานกันแต่ละส่วนจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรมกันโดยทั่วไปมักใช้ความต้านทานส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงซึ่งจะต่อคร่อมระหว่าง 2 ส่วนนี้ เพื่อจ่ายกระแสไหลผ่านความต้านทานดังกล่าวและส่วนของอุปกรณ์ชี้ค่าศูนย์ที่ใช้โดยทั่วไปมักเป็นกัลวานอมิเตอร์ (Galvanometer) จะต่ออยู่กับระหว่างกลางของ 2 ส่วนที่ขนานกันเพื่อตรวจจับสภาวะสมดุล (Balance) แสดงได้ดังรูปที่ 2.9

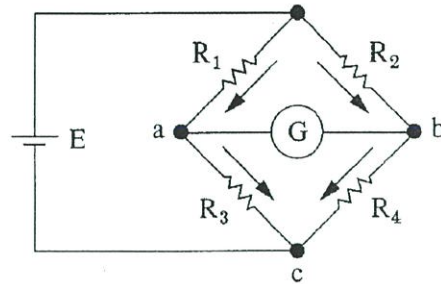


รูปที่ 2.9 แสดงวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน

2.7.1.1 บริดจ์สภาวะสมดุล (Balanced Wheatstone Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุลจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ทำให้เข็มของเครื่องวัดชี้ที่เลขศูนย์ตามที่แสดงในรูป 2.10 จากสภาพสมดุลของวงจรบริดจ์เราจะได้สมการการคำนวณหาความต้านทานเป็นไปตามสมการที่ 2.13

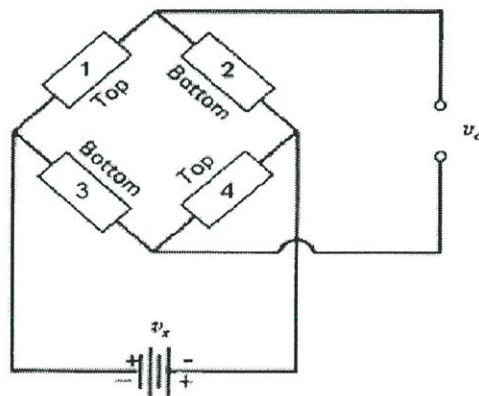
$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรบริดจ์สภาวะสมดุล

2.8 วงจรสเตรนเกจและวงจรวีตสโตนบริดจ์

ในการวัดค่าความเครียดโดยใช้สเตรนเกจนั้นนิยมใช้คู่กับวงจรวีตสโตนบริดจ์เพื่อความแม่นยำในการวัดค่าของความต้านทานที่เปลี่ยนไปซึ่งมีค่าน้อยมากพร้อมทั้งยังสามารถแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของสเตรนเกจไปเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งเราสามารถติดตั้งสเตรนเกจตามตำแหน่งในวงจรวีตสโตนบริดจ์ตามรูปที่ 2.11 เพื่อให้สามารถวัดค่าความเครียดได้ตามที่เราต้องการ



รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจในวงจรวีตสโตนบริดจ์

2.8.1 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจ โดยเมื่อติดตั้งสเตรนเกจหนึ่งตัวจะเป็นไปตามสมการที่ 2.14

$$\frac{\partial V_o}{V_s} = \frac{S_g \epsilon}{4 + 2S_g} \approx \frac{S_g \epsilon}{4} \quad (2.14)$$

และเมื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจหลายตัวจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.15

$$\frac{\partial V_o}{V_s} = K \frac{S_g \epsilon}{4+2S_g} \approx K \frac{S_g \epsilon}{4} \quad (2.15)$$

เมื่อ

- S_g คือ ค่าเกจแฟคเตอร์
 V_s คือ ค่าแรงดันไฟเลี้ยง
 K คือ ค่าที่วงจรวัดหาได้จากสมการที่ 2.16

$$K = f(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_4 - \epsilon_3) \quad (2.16)$$

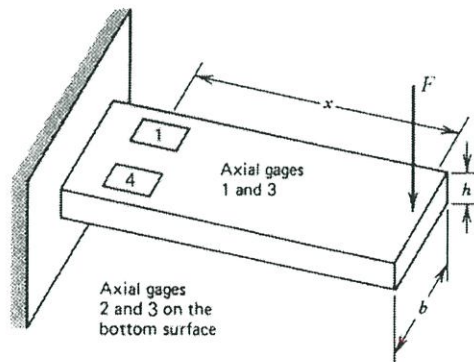
2.8.2 การวัดแรงบนคานยื่น (Cantilever Beam)

สามารถทำได้โดยโดยการติดตั้งสเตรนเกจเพื่อวัดแรงกระทำในตำแหน่งต่างๆบนคานตามรูปที่ 2.12 ไม่เพียงแต่สามารถวัดแรงกระทำที่คานยื่นแต่เรายังสามารถคำนวณหาระยะเบี่ยงเบน (Deflection) ของคานและยังสามารถคำนวณหาโมเมนต์ดัดของคานได้อีกด้วยโดยการติดตั้งสเตรนเกจบนคานยื่นและต่อเข้ากับวงจรวัดสเตรนเกจเพื่อแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$F = \frac{Ebh^2v_0}{6s_gxv_s} = Cv_0 \quad (2.17)$$

โดยที่

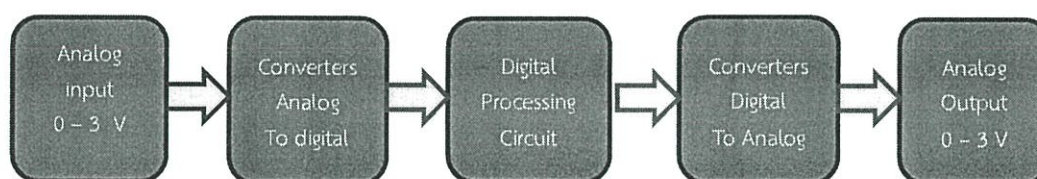
- F คือ แรงกระทำ (นิวตัน)
 E คือ ค่ายังโมดูลัสของคานยื่น (Young's Modulus) (ปาสคาล)
 x คือ ระยะทางระหว่างสเตรนเกจจนถึงแรงกระทำ (เมตร)
 C คือ ค่าคงที่การปรับเทียบ (นิวตัน / โวลต์)



รูปที่ 2.12 แสดงการวัดความเครียดแบบมีแรงกระทำที่ปลายคาน

2.9 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analogue to Digital Converter)

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องการเชื่อมโยงกันระหว่างสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัลเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ เช่น การตรวจจับสัญญาณแสงความร้อนและอุณหภูมิ ความเร็วตำแหน่ง ฯลฯ ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ทำหน้าที่แปลงปริมาณทางฟิสิกส์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า กล่าวสั้นๆ คือ แปลงปริมาณทางฟิสิกส์เป็นแรงดันไฟฟ้า เช่น ตัวแปลงสัญญาณอุณหภูมิเป็นแรงดันสามารถแปลงอุณหภูมิ 1 ต่อ 10 mV หรือตัวตรวจจับความเร็วรอบสามารถแปลงความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นแรงดัน 100 mV เป็นต้น ตัวตรวจจับเหล่านี้ให้ปริมาณแรงดันไฟฟ้าออกมาแรงดันไฟฟ้านี้คือสัญญาณอนาล็อกซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่ตรวจจับได้สัญญาณเหล่านี้ เมื่อนำมาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องมีการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลได้ดังแสดงในรูปภาพ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงระบบดิจิทัลเชื่อมต่อกับสัญญาณอนาล็อก

2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไดรบบอลีย์

2.10.1 สารหล่อลื่น [9]

สารหล่อลื่นแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่สถานะ คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) และ ของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะความสามารถในการหล่อลื่นและสร้างชั้นฟิล์มเพื่อแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นได้แก่ น้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ (Mineral Oil) และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil) ในการวิเคราะห์ประโยชน์ของน้ำมันจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและสัดส่วนของสารเพิ่มคุณภาพ

2.10.1.1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นมีอยู่หลายประการ ดังนั้นในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นจึงจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นและในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นทั้งทางด้านฟิสิกส์และเคมีที่สำคัญ มีดังต่อไปนี้

1. ความหนืด (Viscosity) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันระหว่างผิวสัมผัสและมีผลต่อการลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสด้วยความหนืดน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดใน

รูปของความต้านทานการไหล ค่าความหนืดของน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทานการไหล ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่แต่จะแปรผันตามสถานะ การใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งานความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากความหนืดจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัวโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกันทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วยหน่วยวัดความหนืดระบบสากล (เมตรริก) มีหน่วยความหนืดเป็นเซนติสโตก (Centistock;cSt) โดยที่ $1 \text{ cSt} = 1 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ ที่อุณหภูมิการวัด 40 และ 100 องศาเซลเซียส

2. ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดขึ้น เพื่อใช้ในการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมากจะมีดัชนีความหนืดต่ำ แต่น้ำมันที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยจะมีดัชนีความหนืดสูง

3. ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and Gravity) ความหนาแน่น หมายถึงมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานกำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีความถ่วงจำเพาะลดลงก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น และถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็แสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหม่าหรือสารที่เกิดการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

4. จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and Fire Points) จุดวาบไฟ หมายถึง อุณหภูมิที่น้ำมันระเหยหลายเป็นไอและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยหลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่ทำให้การลุกไหม้คงอยู่จึงมีลักษณะเป็นเปลวไฟและดับลงเองโดยทันทีเรียกว่า จุดวาบไฟ แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยไอเพียงพอที่จะเกิดการลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นจะแปรผันกับความหนืด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะมีจุดวาบไฟสูงด้วย

5. จุดไหลเท (Pour Point) จุดไหลเท หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งผสมอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็นไขจะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงเมื่อผลึกซึ่งไขเกิดขึ้นมากน้ำมันก็ไม่สามารถไหลตัวได้ ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน

6. ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization Number) น้ำมันหล่อลื่นทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่เป็นด่างเข้าไปเพื่อให้สารที่เป็นกรดมีสภาพเป็นกลาง เมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งานการตรวจสอบอัตราการสิ้นเปลืองสารที่เป็นด่างก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น

7. สี (Color) สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีที่ต่างกัน ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกันทั้งวิธีการกลั่น กรรมวิธีการผลิต และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นสีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นเป็นกรณีสำคัญที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

2.10.1.2 สารเพิ่มคุณภาพ

โดยทั่วไปน้ำมันสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติดีกว่าน้ำมันแร่ แต่สำหรับการใช้งานบางประเภทต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ก่อน โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท

1. สารป้องกันการสึกหรอ (Anti Wear Additives) เป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้การหล่อลื่นแบบสภาวะการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (Boundary Lubrication) คือ สภาวะที่ฟิล์มน้ำมันไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้และมีผิวสัมผัสบางส่วนเกิดการสัมผัสกันโดยตรง สารป้องกันการสึกหรอ จะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกเป็นสารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานที่เบา สารนี้บางครั้งเรียกว่า สารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty Acids) และน้ำมันไขมัน (Fatty Oils) ประเภทที่สองเป็นสารลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า สารรับแรงกด

2. สารรับแรงกด (Extreme Pressure Additive) ผิวสัมผัสสองผิวที่มีสารหล่อลื่นอยู่ เมื่อรับแรงกดจะเกิดแรงกดและแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของสารหล่อลื่น สารรับแรงกดจะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มคุณภาพการรับแรงกด โดยจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะทำให้เกิดชั้นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรง สารรับแรงกดทั่วไปจะเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์คลอรีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

3. สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index Improvers) สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหน้าที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเกิดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะทำหน้าที่ได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิ

ต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลน้ำมันจะยึดออกและทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น

4. สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants) สารป้องกันการเกิดฟองทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น เมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำให้โมเลกุลของสารเข้าไปติดกับฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศเล็กเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นลอยขึ้นสู่ผิวและแตกออกในที่สุด

5. สารป้องกันออกซิเดชัน (Oxidation Inhibitors) เมื่อน้ำมันหล่อลื่นเกิดความร้อนและสัมผัสกับอากาศโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันนั้นจะทำให้ค่าความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดตะกอน การใส่สารป้องกันออกซิเดชันจึงทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันให้น้อยลง

6. สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors) ในระบบหล่อลื่นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยน้ำมันหล่อลื่นมีหลายชนิดแต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิดก็คือการกัดกร่อนที่เกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของน้ำมันเอง และการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำพาไปโดนน้ำมันสำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปเป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันออกซิเดชัน

7. สารลดจุดไหลเท (Pour Point Depressants) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดไขที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จะช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้มากขึ้น น้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารลดจุดไหลเทจะทำให้น้ำมันเกิดไขที่อุณหภูมิต่ำลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส

8. สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and Dispersants) ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานและกระจายไม่ใหรวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ เพื่อไม่ให้โคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น

9. สารป้องกันสนิม (Rust Inhibitor) โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี เกิดเป็นชั้นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำหรือความชื้นทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ

2.10.1.3 ขอบเขตของสารหล่อลื่น [10]

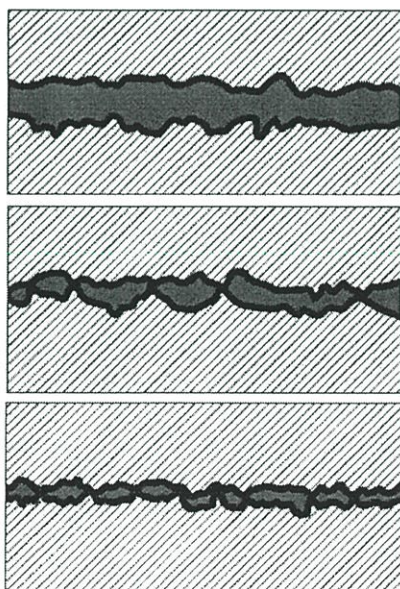
1. สภาวะไร้สารหล่อลื่น (Non Lubrication) สภาวะไร้สารหล่อลื่นผิวสัมผัสทั้งคู่จะสัมผัสกันโดยตรง และมีผลทำให้เกิดการสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าสัมผัส และเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ

2. สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์ารี (Boundary Lubrication) สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์ารีเป็นสภาวะที่ฟิล์มน้ำมันไม่สามารถรักษาสภาพให้คงตัวอยู่ได้และ

บางส่วนเกิดการสัมผัสกันโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการดัดกลืนอะตอมทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้นมาปกคลุมพื้นที่โดยส่วนใหญ่ ดังนั้นระหว่างการลื่นไถลผิวเหล่านี้จะถูกขัดถูแทนเนื้อวัสดุ เนื่องจากค่าความต้านทานต่อการเฉื่อยตัวที่ต่ำกว่าเนื้อวัสดุคู่สัมผัส และจะเกิดผิวชั้นใหม่ขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมไปเป็นระยะๆ ดังนั้นผิวหน้าเหล่านี้จึงทำหน้าที่ปกป้องเนื้อวัสดุคู่สัมผัสจากกาสึกหรอได้ หรือในกรณีที่สารหล่อลื่นไม่เพียงพอจะเกิดผิวชั้นฟิล์มเหล่านี้ขึ้นมาใหม่ได้

3. การสึกหรอแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubrication) ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์จะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกเพียงบางส่วนและมีบางส่วนที่เนื้อวัสดุจะผลสมโดยตรง กระบวนการทางเคมีหรือทางกายภาพจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มใหม่ที่ผิวสัมผัสมีความแข็งแรงต่อการเฉื่อยตัวต่ำ เมื่อมีแรงกระทำตั้งฉากบางส่วนที่ถูกรองรับโดยฟิล์มน้ำมันและบางส่วนโดยผิวเนื้อวัสดุ ซึ่งสภาพการหล่อลื่นแบบนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอต่ำ

4. การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full fluid Film Lubrication) เป็นสภาวะการหล่อลื่นที่สารหล่อลื่นเกิดชั้นฟิล์มน้ำมันหนาพอที่แยกผิววัสดุทั้งสองออกจากกันในขณะที่มีการเคลื่อนที่ บางครั้งเรียกว่า การสึกหรอเป็นศูนย์ ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบนี้แรงที่กระทำจะถูกรองรับด้วยสารหล่อลื่นโดยตรงผิวออกจากกันสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงมีเฉพาะสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นเท่านั้น การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์จะเกิดขึ้นโดยการใช้การบีบอัดสารหล่อลื่นเข้าไป



การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์
Full fluid film lubrication
(ผิวแยกออกจากกันโดยมีชั้นของฟิล์มน้ำมันเพื่อรับโหลด)

การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์
Mixed lubrication
(ชั้นของฟิล์มน้ำมันและชั้นบาวนด์ช่วยกันรับโหลด)

การหล่อลื่นแบบบาวนด์
Boundary lubrication
(คุณสมบัติของชั้นบาวนด์เป็นตัวแปรหลัก)

รูปที่ 2.14 สภาวะการหล่อลื่นแบบต่างๆ

2.10.2 การสึกหรอ [11]

2.10.2.1 กลไกการสึกหรอ

การสึกหรอเป็นความเสียหายที่เกิดจากการขัดสีของพื้นผิวคู่สัมผัส หรือเนื่องจากผิววัสดุเกิดการหลุดจากการถูกแรงกระทำขณะเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการสูญเสียเนื้อบริเวณผิวสัมผัสนั้น พฤติกรรมการสึกหรอมีความซับซ้อนเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง การสึกหรอเกิดได้หลายรูปแบบ เช่นการสึกหรอจากการไถลระหว่างผิว การขัดถูของผิวสัมผัส การชนของอนุภาคขนาดเล็ก หรือการชนของเหลวกับพื้นผิวและนอกจากนั้นการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางด้านโครงสร้างจุลภาคของผิวชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรง ปฏิกริยาทางเคมี และอุณหภูมิ การสึกหรอที่พบมักจะมีความซับซ้อนและมีหลายกลไกเกิดพร้อมกัน ดังนั้นการทำการทดลองหรือวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีการป้องกันและแก้ไขจึงต้องเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง กลไกการสึกหรอแบ่งเป็น 4 กลไก คือ การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesive Wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Erosive Wear) และ การสึกหรอแบบความล้าผิว (Surface Fatigue Wear)

1. การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesive Wear) ลักษณะความเสียหายจากการเชื่อมติดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของผิวสัมผัส และมีแรงกระทำที่มากพอจนยอดผิวสัมผัสมีความเค้นสูงมากทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเสียรูปและเกิดการเชื่อมเย็นในการเคลื่อนที่สัมผัสกันต่อไปจุดที่ติดกันจะเกิดการฉีกขาดหลุดออกมารูปการสึกหรอแบบนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของคู่วัสดุที่สัมผัสกัน และพื้นที่ที่สัมผัสของโลหะ ในกรณีที่เป็นโลหะต่างชนิดกันผิวของโลหะที่อ่อนกว่าจะหลุดไปติดที่ผิวแข็งกว่าจนผิวทั้งสองไม่แตกต่างกัน การเชื่อมติดของผิวเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและมีการยึดติดสะสมเป็นชั้นการหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสามารถกันการสัมผัสของผิวโลหะก็จะเกิดการสึกหรอแบบนี้ได้น้อย

2. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) ลักษณะความเสียหายเกี่ยวข้องกับการตัดหรือเฉือนของผิววัสดุ โดยการขูดของอนุภาคที่แข็งกว่าหรือมีขอบคมจนทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ หรืออาจเกิดขึ้นงานที่หลุดออกผ่านการขัดสีจนอนุภาคแข็งขึ้นจากกลไกของความเครียดแข็ง (Strain Hardening) หรืออนุภาคแข็งที่ติดมากับสารหล่อลื่นที่มีสิ่งเจือปนขูดบนผิวสัมผัส วัสดุที่มีความแข็งสูงจะมีโอกาสเกิดการสึกหรอแบบนี้ได้น้อย

3. การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Erosive Wear) การสึกหรอแบบกัดกร่อนส่วนมากจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิวของแข็งและการไหล (Tribo - Chemical Reaction) ผิวของวัสดุทั้งชิ้นงานและแม่พิมพ์จะมีชั้นบางๆของออกไซด์ปกคลุมผิว ซึ่งถ้าความหมายของแรงยึดเกาะไม่สูงพอ มีโอกาสที่จะแตกออกหรือถูเสียดสีทำให้การสึกหรอที่กำลังจะเกิดขึ้นมีความรุนแรง นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีแบบไม่มีสารหล่อลื่นจะเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆขึ้นอีกบนผิวซึ่งจะแตก

ออกเมื่อเกิดการเสียดสีขึ้น ดังนั้นการสูญเสียวัสดุอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการทางเคมีและทางกลพร้อมกัน

4. การสึกหรอแบบความล้าผิว (Surface Fatigue Wear) กลไกนี้จะเกิดในสภาวะต้องรับภาระซ้ำๆ (Cyclic Stress) ทำให้เกิดรอยแตกของผิวในระดับจุลภาคภายใต้ผิวโลหะ ช่องว่างจะเกิดการขยายตัวภายใต้การรับภาระอย่างต่อเนื่อง จนถึงตำแหน่งวิกฤตที่ช่องว่างขยายไปชนกัน เกิดการแตกแยกออกเป็นเกร็ดหรือชั้นของผิวโลหะ ซึ่งบางที่เรียกว่า การสึกหรอแบบแยกชั้น (Delamination Wear)

2.10.2.2 การสึกหรอที่เกิดขึ้นในกระบวนการดิ่งลวด

ลักษณะการสึกหรอที่เกิดในกระบวนการดิ่งลวดจะเกิดได้ทั้งสภาพที่ผิวสัมผัสมีการหล่อลื่นและไม่มีหล่อลื่น การสึกหรออาจเกิดการร่วมกันได้หลายแบบ การใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมจะช่วยลดการสึกหรอได้มากเพราะทำให้การสัมผัสโดยตรงกับผิวลดลง แต่ถ้าสารหล่อลื่นเกิดการหนืดหรือระบบที่ใช้ในการหล่อลื่นไม่ทำงานเท่าที่ควร จะทำให้ผิวโลหะแนบติดกันจนอาจเกิดการเชื่อมติดได้ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อการสึกหรอ ได้แก่ ความร้อนจากการเปลี่ยนรูปและแรงเสียดทาน อายุของสารหล่อลื่น แรงไม่ได้ศูนย์กลาง (Out-Off Center Loading) นอกจากนี้การปรับค่าความหยาบของผิวชิ้นงานให้เหมาะสมเพื่อการเก็บรักษาสารหล่อลื่นได้ ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการสึกหรอในกระบวนการดิ่งลวดได้เช่นกัน

1. การสึกหรอที่รัศมีโค้งที่ปากตาย (Bell Radius) เกิดขึ้นจากการแทรกของลวดกับแม่พิมพ์ดิ่งลวด การสึกหรอที่มากจะส่งผลให้วัสดุเกิดการไหลตัวไม่ทันทำให้ผิวลวดเกิดการปอก

2. การสึกหรอที่ครึ่งมุมไหลเข้า α เป็นผลให้ครึ่งมุมไหลเข้า α เพิ่มขึ้นกว่ามุมที่เหมาะสมส่งผลให้แรงในการดิ่งลวดเพิ่มมากขึ้น

3. การสึกหรอที่ส่วนลดขนาด (Die Bearing) การสึกหรอจะเกิดขึ้นมากบริเวณนี้เพราะเป็นส่วนกำหนดขนาดสำเร็จ การสึกหรอที่ส่วนนี้จะผลต่อลวดหลังการดิ่งมากที่สุดเพราะเป็นส่วนที่กำหนดขนาด รูปร่างลวดหลังจากการดิ่งและผิวลวดสำเร็จ

2.11 การเคลือบผิว

การเคลือบผิวเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของผิวบางประการให้กับวัสดุ และเพิ่มความสามารถในการต้านการสึกหรอให้กับพื้นผิวที่ง่ายต่อการสึกหรอ การเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งในการผลิตชิ้นส่วนหรือชิ้นงานทางวิศวกรรม ในปัจจุบันเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิวมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสีย และมีความเหมาะสมที่จะให้งานแตกต่างกันประโยชน์ที่ได้จากการเคลือบผิว ช่วยปรับปรุงสภาวะการทำงานให้มีความสามารถที่ดีขึ้น เนื่องจากการเคลือบผิวเครื่องมือและวัสดุชิ้นงานจะช่วยปรับสภาวะการทำงานให้เหมาะสมและเพิ่มขีดจำกัดในการทำงานด้านต่างๆมากขึ้น เช่น ลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส เพิ่มความสามารถการทำงานที่อัตราเร็วสูงและเพิ่มความสามารถการทำงานที่อุณหภูมิสูง ช่วยให้อายุการทำงานของเครื่องมือใช้ได้นานขึ้น โดยเพิ่มความสามารถในการต้านทาน

การสึกหรอ และเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนความสามารถในการนำแม่เหล็กไฟฟ้าและเพื่อความสวยงามของพื้นผิวในงานประดับตกแต่ง

กรรมวิธีการเคลือบผิวในแม่พิมพ์ดีดยังคงมีข้อจำกัดอยู่มาก เพราะในแม่พิมพ์ดีดพื้นผิวที่ต้องการเคลือบผิวจะเป็นพื้นผิวที่บริเวณรูใน แม่พิมพ์ดีดที่มีรูในเล็กมากจะประสบปัญหาในการเคลือบผิวมากหรืออาจไม่สามารถเคลือบได้ แต่ในแม่พิมพ์ดีดที่มีรูในโตก็สามารถเคลือบผิวได้ง่าย กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและทำได้จริงในปัจจุบันซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือการเคลือบผิว (Surface Coating) เป็นการเอาวัสดุอื่นมาเคลือบติดกับผิวชิ้นงานเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและการชุบแข็งเฉพาะผิว (Surface Hardening) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติที่ผิวชิ้นงานให้มีความแข็งมากขึ้นโดยเฉพาะในงานโลหะเพื่อให้ทนต่อการสึกหรอ การเสียดสีและเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ลักษณะกรรมวิธีจะเปลี่ยนชั้นผิวสัมผัสให้เป็นสารอีกชนิดหนึ่ง

บทที่ 3

ทฤษฎีการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและชุดวัดแรง

3.1 ความเร็วที่ใช้ดึง

เนื่องจากการดึงลวดนั้นความเร็วในการดึงลวดเป็นองค์ประกอบในทางทฤษฎีที่สำคัญที่สำคัญของผิวลวด ถ้าใช้ความเร็วมีค่ามากเกินไปจะทำให้พื้นผิวของลวดหยาบ ในที่นี้ใช้ความเร็วในการดึงลวด 0.12 เมตรต่อวินาที

3.2 การคำนวณแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นรูปลวด

การคำนวณแรงในการดึงชิ้นรูปนี้เพื่อจะทราบแรงดึงในทางทฤษฎี และใช้อ้างอิงกับแรงที่ได้จากการทดลองว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งจากการทดลองจะมีค่าแรงที่ใกล้เคียงกัน ในที่นี้การทดลองจะใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยมีค่า Ultimate Tensile Strength เท่ากับ 419.7 N/mm^2 และแม่พิมพ์ดึงลวดมาตรฐาน W 103 มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle) (2α) เท่ากับ 12° , Semi Angle (α) เท่ากับ 6°

3.2.1 อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด [1]

$$\%R = \frac{A_o - A_l}{A_l} \times 100 \quad (3.1)$$

A_o คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm^2]

A_l คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm^2]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดก่อนการดึง 2.40 mm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหลังการดึง 2.30 mm

พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง

$$A_o = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.2)$$

$$A_o = \frac{\pi 2.40^2}{4}$$

$$A_o = 4.5239 \text{ mm}^2$$

พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง

$$A_l = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.3)$$

$$A_l = \frac{\pi 2.30^2}{4}$$

$$A_l = 4.1547 \text{ mm}^2$$

อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด

$$\%R = \frac{A_o - A_l}{A_l} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\%R = \frac{4.5239 - 4.1547}{4.1547} \times 100$$

$$\%R = 8.16 \approx 9$$

3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในงานดิ่งขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปขึ้นงาน [3]

Process	Solid Forward Extrusion	Hollow Forward Extrusion	Drawing of Bar and Tubes	Ironing	Drawing of Hollow Bodies
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย(μ)	0.04-0.08	0.1-0.125	0.02-0.05	0.02-0.07	0.02-0.08

3.2.3 การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปลวด

แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปลวด คำนวณโดย Siebel's Method [2]

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (3.5)$$

$$F_{D,tot} = A_l \times \sigma_m \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right]$$

เมื่อ	
A_o	= พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm^2]
A_t	= พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm^2]
$\sigma_{t,m}$	= ความเค้นในแนวแกน ความเค้นของการไหลเฉลี่ย [N/mm^2]
μ	= สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Coulomb's coefficient of friction ($\mu \approx 0.035$)
α	= ครึ่งมุมไหลเข้าแม่พิมพ์
$\hat{\alpha}$	= $\tan \alpha$
เมื่อ	
$\hat{\alpha}$	= 0.1051
φ_{max}	= ความเครียด

$$\varphi_{max} = \ln \frac{A_o}{A_t} \quad (3.6)$$

$$\varphi_{max} = \ln \left(\frac{4.5239}{4.1547} \right)$$

$$\varphi_{max} = 0.08513$$

เมื่อ

$$\sigma_{t,m} = \text{ความเค้นของการไหลเฉลี่ยความเค้นในแนวแกน } [\text{N}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{2} (\sigma_{f,o} + \sigma_{f,s}) \quad (3.7)$$

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{2} (344.8 + 365.2)$$

$$\sigma_{t,m} = 355 \text{ N}/\text{m}^2$$

แรงในการดึงขึ้นรูปหลอด

$$F_{D,tot} = A_t \times \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\mu} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (3.8)$$

$$F_{D,tot} = 4.1547 \times 355 \left[\left(1 + (2) \frac{0.080}{0.208} \right) (0.08513) + \frac{2}{3(0.1051)} \right]$$

$$F_{D,tot} = 325.487 \text{ N}/\text{m}^2$$

3.3 การออกแบบเพลลา [12]

ในการออกแบบเพลลาเราจะต้องคำนึงถึงแรงต่างๆ เพลลาอาจจะรับแรงดึง แรงอัด แรงบิด แรงดัด หรือหลายแรงรวมกันจึงต้องใช้ความเค้นผสมช่วย โดยแรงที่กล่าวมาอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้เพลลาเกิดการเสียหายขึ้น ดังนั้นจึงต้องออกแบบเพลลาให้มีความแข็งแรงทนทานพอสำหรับการใช้งาน ในลักษณะแบบนี้ นอกจากนั้นเพลลา ยังต้องมีความแข็งแรง (rigidity) เพียงพอเพื่อลดมุมบิดของเพลลา ระยะโก่ง (deflection) ของเพลลาเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการกำหนดขนาดของเพลลาเวลาหมุนถ้าเกิดมีระยะโก่งมากจะเกิดการแกว่งมาก ทำให้ความเร็ววิกฤต (critical speed) ของเพลลานั้นลดลงทำให้เกิดมีการสั่นอย่างรุนแรงในขณะความเร็วที่เพลลาใกล้ความเร็ววิกฤตนี้ได้

3.3.1 วัสดุเพลลา

วัสดุที่ใช้สำหรับทำเพลลาที่นิยมทั่วไปคือเหล็กกล้าละมุน (mild steel) เพลลาที่มีขนาดมากกว่า 90 mm มักจะกลึงจากเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งผ่านการรีดร้อน ถ้าต้องการให้มีความเหนียวและมีความทนทานต่อแรงกระชากแล้วมักใช้เหล็กกล้าผสมโลหะอื่น อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพลลามีราคาถูกและมีความต้องการที่เหมาะสมผู้ออกแบบพยายามใช้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา

3.3.2 ขนาดของเพลลา

เพื่อให้เพลลามีมาตรฐานเหมือนกันองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศได้กำหนดมาตรฐานของเพลลาซึ่งเป็นขนาดระบุ (nominal size) ใน ISO/R 775 – 1969 เอาไว้สำหรับให้ผู้ออกแบบเลือกใช้ทั้งนี้เพื่อให้สามารถหาซื้อได้ทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของแบริ่งใช้รองรับเพลลาด้วย ขนาดระบุของเพลลา ดูได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดระบุของเพลลาตามมาตรฐาน ISO/R 775 – 1969

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น mm				
6	25	70	130	240
7	30	75	140	260
8	35	80	150	280
9	40	85	160	300
10	45	90	170	320
12	50	95	180	340
14	55	100	190	360
18	60	110	200	380
20	65	120	220	

3.3.3 การพิจารณาในการออกแบบเพลลา

การคำนวณหาขนาดของเพลลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน การหาขนาดของเพลลาเพื่อให้เพลลาทนต่อแรงที่มากกระทำอย่างเดียวยังไม่เป็นเพียงพอ เพลลาจะต้องมีความแข็งแรงอยู่ภายในค่าพิกัดที่ต้องการ ถ้ามุมบิดไปมากนอกจากจะเสียความเที่ยงตรงแล้วทางด้านตำแหน่งยังก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมีผลทำให้เฟืองและแบร์ริงที่รองรับเพลลาเกิดความเสียหายได้แม้ว่าจะไม่มีมาตรฐานสำหรับพิกัดของมุมบิดของเพลลาไว้ก็ตามในทางปฏิบัติจะใช้มุมบิดของเพลลาในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน 0.3° ต่อความยาว 1 m [13] สำหรับเพลลาส่งกำลังทั่วไปอาจจะให้มีมุมบิดได้ถึง 1° ต่อความยาว 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา ความแข็งแรงของระยะโก่ง ต้องใช้ระยะโก่งของเพลลาที่อยู่ภายใต้แรงที่อยู่ภายนอกเป็นสำคัญในการกำหนดระยะเบียด (clearance) ระหว่างล้อ สายพาน เฟือง โครงสร้างของเครื่องจักรกลตลอดจนชนิดของแบร์ริง ถ้าเพลลามีระยะโก่งมากไปจะทำให้ความยาวเฟืองส่วนที่สัมผัสชกกันลดลงทำให้อัตราส่วนการขบ (contact ratio) ของเฟืองลดลงด้วย ทำให้การส่งกำลังไม่ราบเรียบ การเลือกแบร์ริงจะต้องเลือกแบร์ริงชนิดที่อนุญาตให้มีการเอียงแนวสำหรับการใช้งานได้เหมาะสมกับระยะโก่งของเพลลา ซึ่งอาจเป็นแบร์ริงแบบธรรมดาหรือแบร์ริงแบบปรับแนวตัวเอง (self-aligning bearing) โดยทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับค่าของระยะโก่งสำหรับเพลลาเครื่องจักรกลทั่วไป ค่าระยะโก่งระหว่างจุดที่รองรับด้วยแบร์ริงไม่ควรเกิน 0.08 mm/m

3.3.4 การบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (torque) จะบิดเป็นมุมเท่ากับ

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (3.9)$$

โดย L คือ ความยาว

T คือ โมเมนต์บิด

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (polar area moment of inertial)

$$J = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (3.10)$$

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง

ในการออกแบบเพลลาใช้มุมบิดไม่เกิน 0.3° ในทางปฏิบัติ และดัชนีความแข็งแรงของเหล็กกล้า (G) 30 Gpa จากค่าโมเมนต์บิดที่การคำนวณ และค่าความยาวที่เลือกใช้แทนค่าในสมการ 3.9 จะสามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาที่ได้

3.4 สายพาน

การส่งกำลังทางกลจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึง อาจทำได้โดยสามวิธี คือ โดยสายพาน โดยใช้เฟือง และโดยใช้โซ่ การส่งกำลังโดยใช้สายพานเป็นแบบอ่อนตัวได้ (flexible) ซึ่งมีข้อดี ข้อเสียหลายประการ เช่น มีราคาถูกและใช้งานง่าย รับแรงกระตุกได้ดีและแรงสั่นสะเทือนได้ดี ขณะใช้งานไม่มีเสียงดัง เหมาะกับเพลานที่อยู่ห่างกันมากๆ และค่าบำรุงรักษาต่ำ เป็นต้น ข้อเสียก็คือ อัตราการทดไม่ค่อยแน่นอน เนื่องจาก มีการ สลลป (slip) การครีพ (creep) ของสายพาน และต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างเพลานหรือปรับแรงตึงสายพานระหว่างใช้งาน และไม่สามารถใช้งานที่มีอัตราการทดสูงได้ ซึ่งมักใช้อัตราการทดไม่เกิน 5

3.4.1 ชนิดและวัสดุสายพาน

สายพานแบ่งเป็นสี่ชนิดตามลักษณะหน้าตัดของสายพาน คือ สายพานแบน (flat belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายพานลิ้ม (V-belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สายพานกลม (rope) มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม และไทมมิ่งแบ็ลท์ (timing) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแต่จะทำเป็นร่องคล้ายฟันเพื่อลดทลตความยาวของสายพาน สายพานแต่ละชนิดจะมีลักษณะในการใช้งานแตกต่างกันออกไป

วัสดุที่ใช้ทำสายพานซึ่งใช้งานกันมากก็คือหนัง (oak-tanned leather) เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำสายพานต้องมีค่าความต้านทานสูง (strength) สามารถบิดตัวได้ดี และจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสสูง แต่ถ้าเป็นการใช้งานเป็นพิเศษ เช่นอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้น มีไอของสารเคมี หรือมีน้ำมันอยู่ ก็มักใช้สายพานแบบ chrome leather เพื่อสายพานมีอายุการใช้งานได้นานพอสมควร จึงมักใช้ค่าความคั้นในการออกแบบสายพานต่ำกว่าความต้านแรงตึงสูงสุดของสายพานมาก โดยทั่วไปมักจะใช้ค่าความปลอดภัยประมาณ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานหนังมีค่าประมาณ 0.4 ถึง 0.5 และความเร็วใช้งานของสายพานควรอยู่ในช่วง 1000 ถึง 2000 m/min

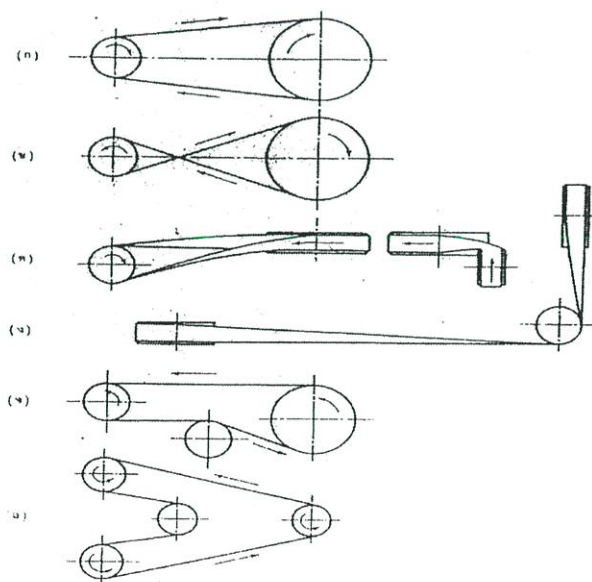
สายพานอีกชนิดหนึ่งคือสายพานยาง (rubber belts) สายพานประเภทนี้จะมียางหรือผ้าใบเป็นไส้ภายในและมียางหุ้มอยู่ภายนอกยางที่ใช้หุ้มจะเป็นยางหุ้มกำมะถันในอุณหภูมิสูง (vulcanized) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความต้านแรงสายพานยางเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีน้ำมันหรือแสงแดดเมื่อเปรียบเทียบกับสายพานหนังแล้ว สายพานยางจะมีราคาถูกกว่า แต่อายุการใช้งานสั้นกว่าสายพานยางทนต่อสภาพบรรยากาศในการใช้งานได้ดีกว่าสายพานหนัง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสายพานจะมีค่าประมาณ 0.3 ถึง 0.4 และสามารถรับแรงตึงได้ประมาณ 20 N ต่อซัน ต่อความยาวสายพาน 1 mm สายพานบาลลาดา (balata belts) เป็นยางคล้ายสายพานยางแต่ไม่ต้องผ่านกรรมวิธีอบด้วยกำมะถัน ทนต่อกรดและความชื้นได้ดี แต่อุณหภูมิใช้งานไม่ควรเกิน 40 °C สายพานชนิดนี้มีความต้านแรงมากกว่าสายพานยางประมาณ 25%

สายพานผ้าถัก (textile belts) ทำจากผ้าหรือผ้าใบซ้อนกันเป็นชั้นๆ แล้วยึดติดกันจากนั้นจึงเคลือบด้วยน้ำมันลินซิด (linseed) เพื่อทำให้สายพานกันน้ำได้ มักใช้งานชั่วคราว

สายพานทุกชนิดที่ได้กล่าวมาจะยึดตัวได้ดี ดังนั้นเมื่ออยู่ภายใต้แรงตึงจะยึดตัวทำให้เกิดการสลลป (slip) บนล้อสายพาน (pulley) ในทางปฏิบัติจึงมักจะยึดสายพานให้ตึงไว้ก่อนเพื่อเป็นการลดการสลลปของสายพาน

3.4.2 ลักษณะการขับด้วยสายพาน

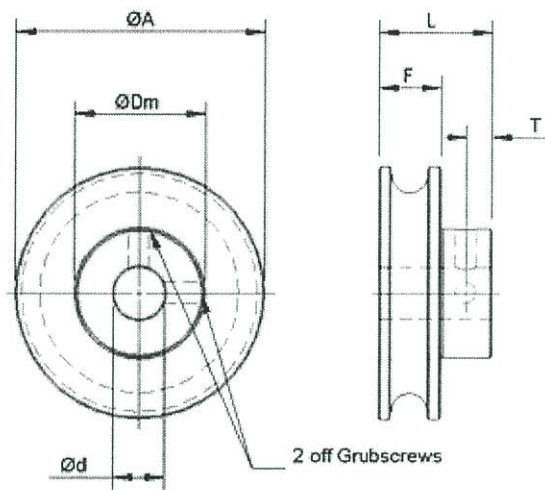
จากคุณสมบัติของการอ่อนตัวของสายพาน จึงจัดลักษณะการขับของสายพานได้ต่างๆ กัน ลักษณะที่นิยมใช้ในการขับด้วยสายพานดูได้จากรูปที่ 3.1 เมื่อต้องการขับเพลลาที่อยู่ขนานกัน และต้องการให้เพลลาทั้งสองหมุนในทิศทางเดียวกัน ก็ทำได้ในลักษณะดังรูปที่ 3.1 (ก) ซึ่งเรียกว่าโอพินไดรฟ์ (open drive) และถ้าหากเพลลาอยู่ห่างกันมากควรจะให้สายพานด้านข้างตึง (tight) และด้านบนหย่อน (slack) แต่ถ้าต้องการให้เพลลาทั้งสองหมุนสวนทางกันก็ทำได้โดยวิธีดังรูปที่ 3.2 (ข) ซึ่งเรียกว่าครอสไดรฟ์ (crossed drive) แต่การขับในลักษณะนี้จุดที่สายพานไขว้กันจะทำให้สายพานถูกันทำให้สายพานเกิดการสึกหรอมาก ดังเพื่อให้เป็นการป้องกันมิให้สายพานสึกหรอมากเกินไปจึงควร จะให้จุดศูนย์กลางของล้อสายพานอยู่ห่างกันไม่น้อยกว่า 20 เท่าของความกว้างสายพานและทำงานที่มีความเร็วสายพานไม่เกิน 15 m/s การขับแบบควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (quarter turn drive) ดังรูปที่ 3.1 (ค) ใช้เมื่อเพลลาทั้งสองตั้งฉากกัน และเพื่อป้องกันมิให้สายพานหลุดออกจากล้อสายพานในขณะที่ใช้งาน จึงต้องใช้ล้อสายพานที่กว้างเพียงพอ โดยทั่วไปมักจะกว้างมากกว่าความกว้างสายพานไม่น้อยกว่า 1.4 เท่า และก่อนใช้งานจะต้องทดสอบก่อนเสมอ ส่วนการขับแบบมิลล์ไดรฟ์ (mule drive) ดังรูปที่ 3.1 (ง) ใช้เมื่อเพลลาทั้งสองตั้งฉากกัน แต่ไม่อาจจัดในลักษณะควอเตอร์เทอนไดรฟ์ได้ หรือเมื่อต้องการให้หมุนกลับทิศทางได้เมื่อไม่สามารถใช้ขับในลักษณะโอพินไดรฟ์ได้เพราะส่วนโค้งสัมผัส (arc of contact) บนล้อสายพานเล็กมีค่าน้อยเกินไป (เพราะอัตราทดสูง และล้อสายพานอยู่ใกล้มาก) หรือเมื่อไม่อาจทำให้สายพานตึงโดยวิธีอื่น ก็อาจทำได้โดยใช้ล้อช่วย (idler) ดังรูปที่ 3.1 (จ) เป็นการช่วยให้สายพานสัมผัสกับล้อมากขึ้นซึ่งเพิ่มกำลังที่ส่งได้ด้วย ส่วนการขับแบบรีเวสไดรฟ์ (reverse drive) ใช้เมื่อต้องการส่งกำลังไปยังเพลลาหลายๆ อันพร้อมกัน



รูปที่ 3.1 ลักษณะการขับด้วยสายพาน (ก) โอพินไดรฟ์ (ข) ครอสไดรฟ์ (ค) ควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (ง) มิลล์ไดรฟ์ (จ) แสดงการขับโดยใช้ล้อช่วย (ฉ) รีเวสไดรฟ์

3.5 ล้อสายพาน

จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของล้อสายพานเนื่องจากการส่งกำลังโดยสายพานแบนทำได้โดยใช้ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าล้อสายพานกับผิวหน้าของสายพาน เพื่อที่จะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง เนื่องจากล้อสายพานจะยึดติดกับเพลาด้วยลิม ดังนั้นที่มุมล้อสายพานจึงต้องเจาะล่องลิมไว้ด้วยเพื่อยึดติดกับเพลาเพื่อให้สายพานมีน้ำหนักเบาจึงมักทำเป็นแขนยื่นออกจากมุมล้อไปผิวหน้าที่สัมผัสกับสายพานโดยแขนยื่นนี้มีขนาดเรียวยาวตลอดและมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรีซึ่งลักษณะของล้อสายพานที่ใช้กันทั่วไปนั้น ดูได้จากรูปที่ 3.2 และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานดูได้จากตาราง 3.3



รูปที่ 3.2 ล้อสายพาน

ตารางที่ 3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อยาสายพานแบนตามมาตรฐาน ISO 99-1975(E)

ขนาดระบุ		ขนาดในพิกัด			
mm	in	เล็กสุด mm	ใหญ่สุด mm	เล็กสุด in	ใหญ่สุด in
40	1.60	39.50	40.50	1.56	1.60
45	1.80	44.40	45.60	1.75	1.80
50	2.00	49.40	50.60	1.95	2.00
56	2.24	55.20	56.80	2.17	2.24
63	2.50	62.20	63.80	2.45	2.51
71	2.80	70.00	72.00	2.76	2.84
80	3.15	79.00	81.00	3.11	3.19
90	3.55	88.80	91.20	3.50	3.59
100	4.00	98.80	101.20	3.88	3.98
112	4.50	110.80	113.20	4.36	4.46
125	5.00	123.40	126.60	4.86	4.98
140	5.60	138.40	141.60	5.45	5.58
160	6.30	158.00	162.00	6.22	6.38
180	7.10	178.00	182.00	7.01	7.17
200	8.00	198.00	202.00	7.80	7.95
224	9.00	221.50	226.5	8.72	8.92
250	10.00	247.50	252.50	9.74	9.94
280	11.20	276.80	283.20	10.90	11.15
315	12.50	311.80	318.20	12.28	12.53
335	14.00	351.80	358.20	13.85	14.10

ตารางที่ 3.3(ต่อ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อยายพานแบนตามมาตรฐาน ISO 99-1975(E)

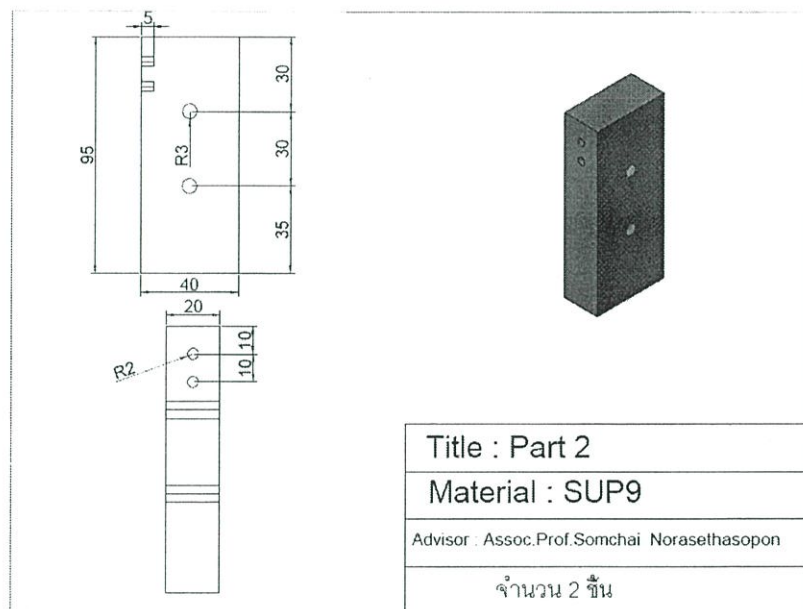
ขนาดระบุ		ขนาดในพิกัด			
mm	in	เล็กสุด mm	ใหญ่สุด mm	เล็กสุด in	ใหญ่สุด in
400	16.00	396.00	404.00	15.59	15.91
450	18.00	446.00	454.00	17.56	17.87
500	20.00	496.00	504.00	19.53	19.84
560	22.40	555.00	565.00	21.85	22.24
630	25.00	635.00	635.00	24.61	25.00
710	28.00	715.00	715.00	27.75	28.15
800	31.50	793.70	806.30	31.25	31.74
900	35.50	893.70	906.30	35.18	35.68
1000	40.00	993.70	1006.30	39.12	39.62
1120	45.00	1112.00	1128.00	43.78	44.41
1250	50.00	1242.00	1258.00	48.90	49.53
1400	56.00	1392.00	1408.00	54.80	55.43
1600	63.00	1590.00	1610.00	62.60	63.39
1800	71.00	1790.00	1810.00	70.48	71.26
2000	80.00	1990.00	2010.00	78.35	79.13

3.6 ชุดวัดแรง

การวัดแรงในการทดลองมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์แรงในการดึงขึ้นรูปพลาสติกโลหะ จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมต่างๆ ของเนื้อโลหะและองค์ประกอบอื่นๆ ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ได้แก่ ผลกระทบจากความเสียหายระหว่างผิวลวดกับแม่พิมพ์ดึงลวด การหล่อลื่น อุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าความเค้นคราก (Yield Strength) ของวัสดุแต่ต้องไม่มากเกินไปจนเกินจุดแตกหักของวัสดุ

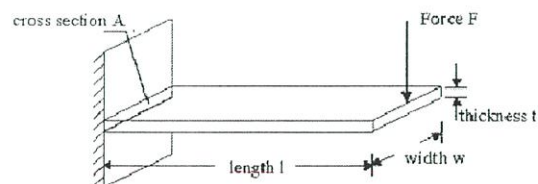
3.6.1 ตัวยึดคานวัดแรง

การออกแบบตัวยึดคานดังรูปที่ 3.3 ซึ่งการออกแบบเพื่อให้คานสามารถรับแรงกิริยาที่กระทำต่อคานได้และให้เกิดความแข็งแรงของชุดวัดแรง



รูปที่ 3.3 ฐานยึดคาน

3.6.2 คานยึดตึง [9]

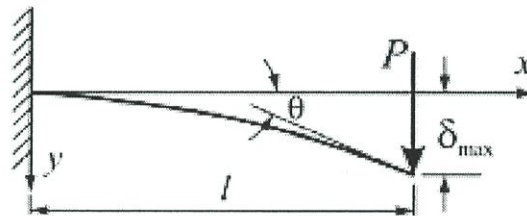


รูปที่ 3.4 คานยึดตึง

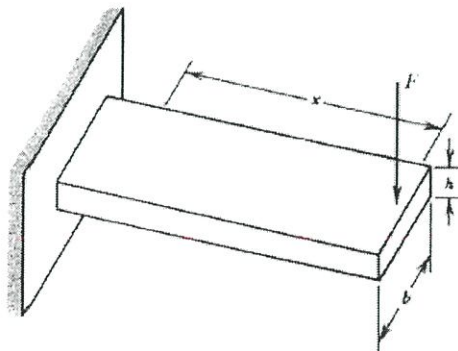


รูปที่ 3.5 แบบและขนาดของคานายึดตรึง

การคำนวณระยะโก่งตัวของคานทำให้สามารถทราบระยะการโก่งตัวของคานที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำซึ่งระยะการโก่งตัวของคานนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นขนาดของแรงกระทำวัสดุของคานที่ถูกกระทำประเภทของคานระยะที่แรงกระทำต่อคานเทียบกับจุดของคานการคำนวณระยะโก่งตัวของคานมีผลต่อการออกแบบการวัดหรือความแข็งแรงของโครงสร้างคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคานจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ในการคำนวณระยะโก่งตัวของคานยื่นสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 3.11 และยังสามารถคำนวณหาความชันสูงสุดที่เกิดขึ้นบนคานได้ด้วยสมการที่ 3.12



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน

$$W(x) = \frac{Fx^2}{6EI}(3l-x) \quad (3.11)$$

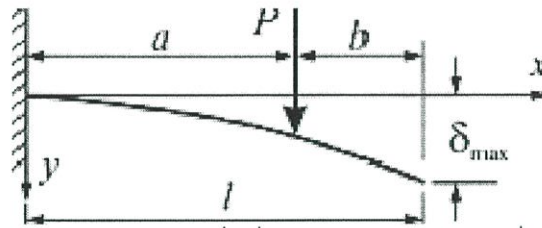
เมื่อ I คือโมเมนต์ที่สองของพื้นที่ (Second moment of area)

$$\theta = \frac{Fl^2}{2EI} \quad (3.12)$$

เมื่อ θ คือ ความชันของคานาที่จุดปลาย

I คือ โมเมนต์ที่สองของพื้นที่

สำหรับคานายื่นประเภทที่แรงกระทำไม่ได้กระทำที่ตำแหน่งปลายคานาดังแสดงในรูปที่ 3.8 จะสามารถคำนวณหาระยะโก่งตัวของคานาได้จากสมการที่ 3.13, 3.14



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของคานายื่นที่แรงกระทำไม่ได้กระทำที่ตำแหน่งปลายคานา

$$W(x) = \frac{Fx^2}{6EI}(3a-x) \quad (3.13)$$

สำหรับ $0 < x < a$

$$W(x) = \frac{Fa^2}{6EI}(3x-a) \quad (3.14)$$

สำหรับ $a < x < l$

และสมการสำหรับคำนวณหาความชันที่ปลายคานาได้จากสมการที่ 3.15

$$\theta = \frac{Fa^2}{2EI} \quad (3.15)$$

ในงานวิจัยนี้ส่วนสำคัญคือการออกแบบให้คานยื่นสามารถรับแรงที่กำหนดภาระสูงสุดได้ 1000 นิวตัน ซึ่งในการเลือกใช้วัสดุผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุแบบเหล็กสปริงมาทำคานยื่นผู้วิจัยได้ศึกษาระยะโก่งตัวของคานยื่นดังสมการที่ 3.11 พบว่าคานยื่นมีระยะโก่งตัวประมาณ 0.001

ในการคำนวณค่าความปลอดภัยผู้วิจัยจะสมมติว่าแรงที่กระทำที่ปลายคานมีค่าสูงสุด 1000 นิวตัน ซึ่งค่าโมเมนต์ดัดมากที่สุดจะถูกนำมาหาความเค้นดัด (σ_b) จากสมการที่ 3.16

$$\sigma_b = \frac{My}{IC} = \frac{M \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{6Fx}{bh^2} \quad (3.16)$$

เมื่อแทนค่า F, x, b และ h จากรูปที่ 3.5 ลงในสมการที่ 3.16 จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{6Fx}{bh^2} = \frac{6 \times (1000 \text{ N}) \times (50 \times 10^3)}{(30 \times 10^3) \times (5 \times 10^3)} \\ &= 400 \text{ MPa} \end{aligned}$$

เมื่อคำนวณหาโมเมนต์ดัดมากที่สุดแล้วเราก็กำหนดค่าความปลอดภัยจากสมการต่อไปนี้

$$N_s = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_b} \quad (3.17)$$

จากนั้นหาค่าความปลอดภัยจากสมการที่ 3.17 จะได้เป็น

$$N_s = \frac{1080}{400} = 2.7$$

โดยคานยึดตรึงใช้เหล็กทึบ SUP9 ตาม JIS (Japanese Industrial Standards) ซึ่งมีค่า

$$\sigma_y = 1080 \text{ MPa}$$

3.6.3 แท่งเหล็กยึดตาย

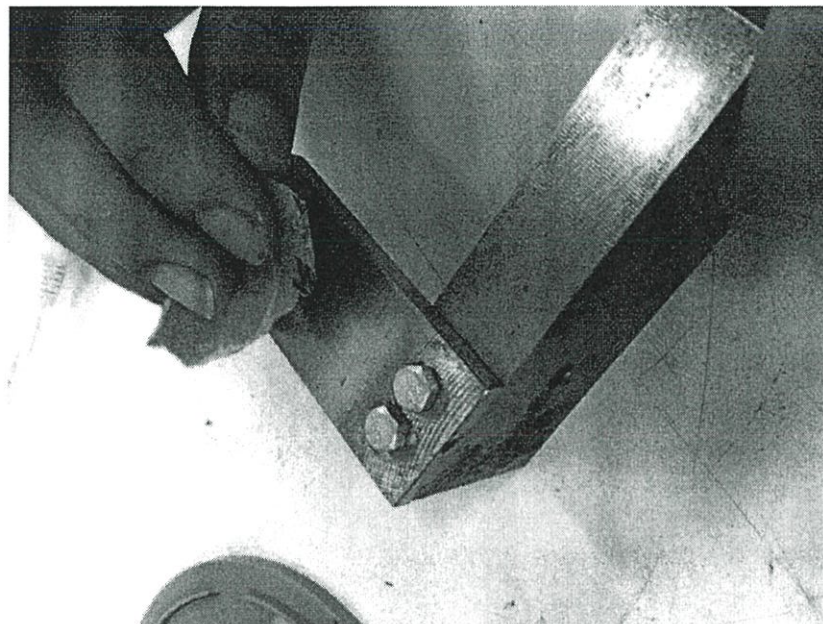
แท่งเหล็กที่ใช้ติดตั้งตายเพื่อให้ได้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแนวแกนเมื่อมีแรงมากระทำกับตาย ตายก็จะเคลื่อนที่แบบอิสระไปต้นคาน

3.6.4 การออกแบบวงจรทางไฟฟ้า

การวัดแรงสามารถวัดได้หลายวิธีแต่ผู้วิจัยเลือกที่จะใช้สเตรนเกจ (Strain gage) ในการวัด เนื่องจากมีราคาและความแม่นยำเหมาะสมกับการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยผู้วิจัยเลือกสเตรนเกจยี่ห้อ KYOWA รุ่น KFG-2-120-C1-11 ซึ่งมีค่าความไวเท่ากับ $2.08 \pm 0.1\%$ โดยรายละเอียดได้ถูกแสดงไว้ที่ภาคผนวกซึ่งสเตรนเกจจะถูกติดตั้งที่คานยึดตรึงและจะถูกต่อเข้ากับวงจรวัดสโตนบริดจ์จากนั้นจะถูกขยายโดยวงจรขยายซึ่งการออกแบบจะถูกอธิบายไว้ดังนี้

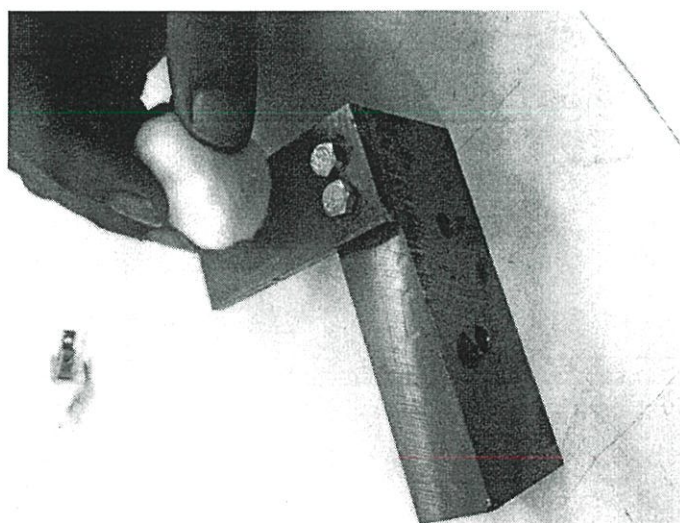
3.6.4.1 การติดตั้งสเตรนเกจ

ขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยนำกระดาษทรายมาขัดบริเวณที่ติดตั้งสเตรนเกจเพื่อให้พื้นผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 1

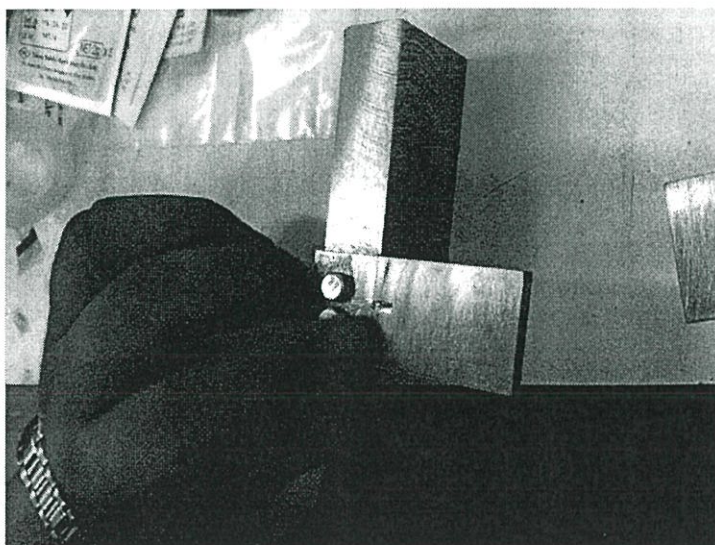
ขั้นตอนที่ 2 ผู้วิจัยนำสารระเหยเช่นอะซิโตนมาทาบริเวณที่จะติดตั้งสเตรนเกจเพื่อทำความสะอาดและลบคราบมันในผิวเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 2

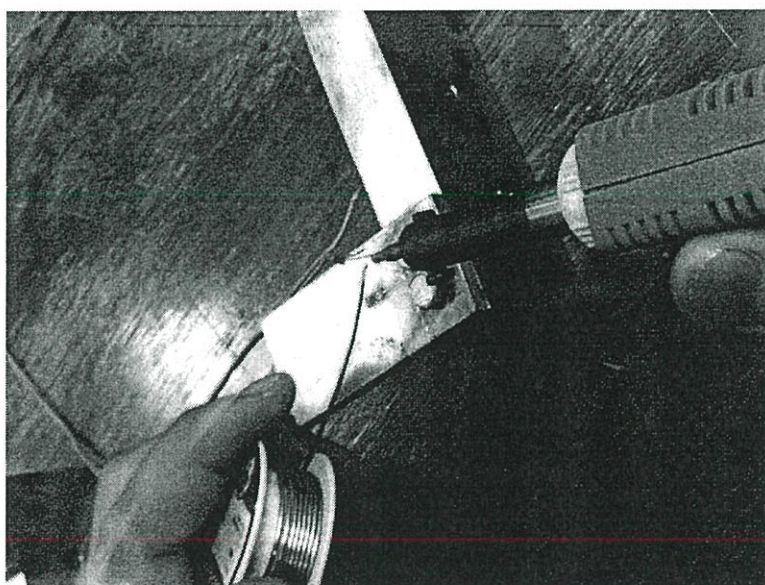
ขั้นตอนที่ 3 ผู้วิจัยทำการวัดและกำหนดจุดติดตั้งทากาวที่ติดตั้งลงบนผิวเหล็ก

ขั้นตอนที่ 4 ผู้วิจัยทำการกดตัวสเตรนเกจผ่านแผ่นฟิล์มที่มาในชุดติดตั้งเพื่อให้ตัวสเตรนเกจแนบสนิทกับแผ่นเหล็กทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมงให้กาวแห้งดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 4

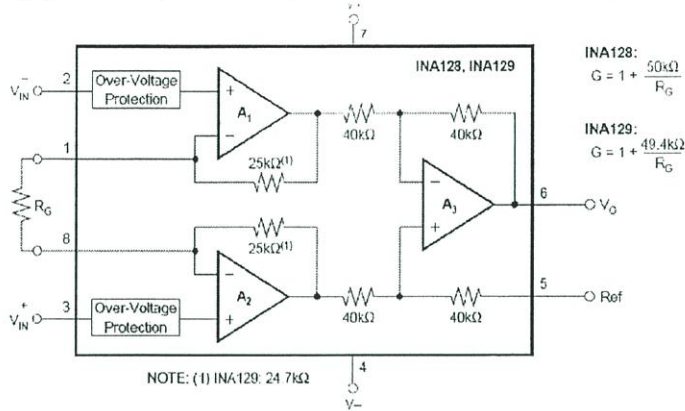
ขั้นตอนที่ 5 ผู้วิจัยทำการเชื่อมสายไฟกับขาสเตรนเกจและวงจรวัดให้เรียบร้อยดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การติดตั้งสเตรนเกจขั้นตอนที่ 5

3.6.5 การออกแบบวงจรขยายปรับแต่งแรงดันไฟฟ้า

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากโพลดิเซลล์มีค่าน้อยมากซึ่งจากการทดลองดึงลวดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 0.001mV – 0.004 V จึงได้ออกแบบวงจรดังรูปที่ 3.20 ซึ่งวงจรมีประกอบด้วย INA129P มีกำลังขยาย 1000 เท่าดังนั้นวงจขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณได้ 10,000 – 500,000 เท่าโดยรายละเอียดมีดังนี้

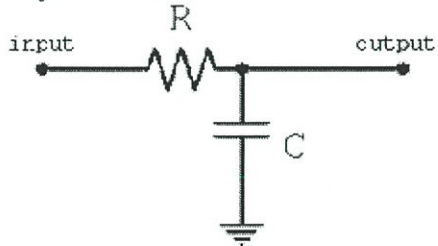


รูปที่ 3.13 วงจขยายสัญญาณ

กำลังขยายของ INA129P หาได้จาก

$$G_{INA129P} = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{50 \Omega} \approx 1000 \tag{3.18}$$

เนื่องจากกำลังขยายมีค่ามากดังนั้นสัญญาณรบกวนจึงมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องออกแบบวงจรกรองสัญญาณ (RC filter) ดังรูปที่ 3.13 [14]



รูปที่ 3.14 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (RC Filter)

จากรูปที่ 3.14 สามารถคำนวณหาความถี่คัตออฟ (f_c) ได้จากสมการที่ 3.19จากการออกแบบสัญญาณกรองความถี่จะได้ค่าดังต่อไปนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.19}$$

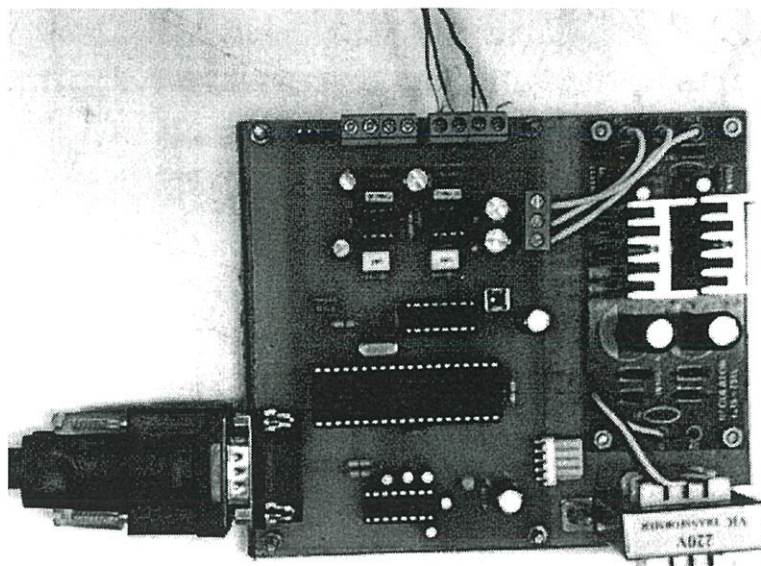
เมื่อ $R = 220 \text{ K}\Omega$

$C = 2 \mu\text{F}$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.19แล้วแทนค่าลงไปจะได้

$$f_c = 0.3617 \text{ Hz} \tag{3.20}$$

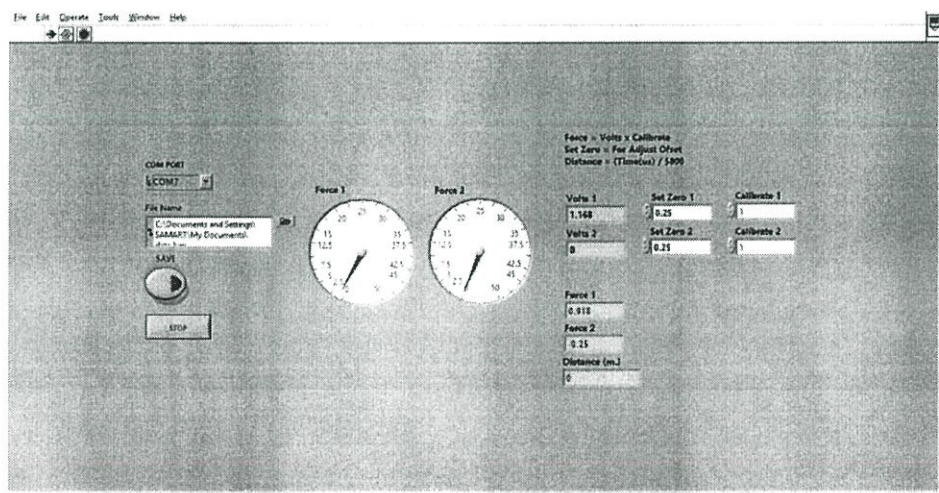
3.6.6 วงจรที่ใช้แปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นดิจิตอล



รูปที่ 3.15 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นดิจิตอล

3.6.7 โปรแกรมที่ใช้แสดงผล

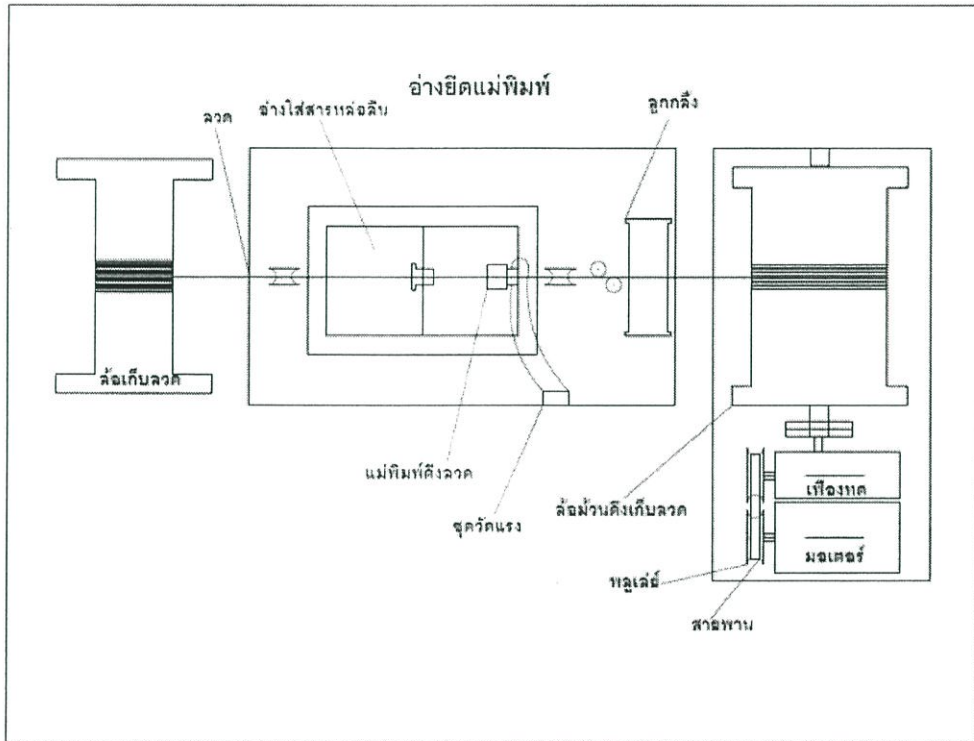
ในที่นี้จะใช้โปรแกรมแลปวิว (LABVIEW) ซึ่งจะเป็นโปรแกรมกึ่งสำเร็จรูปซึ่งสามารถออกแบบได้ตามความต้องการซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการใช้งาน



รูปที่ 3.16 โปรแกรมแลปวิว

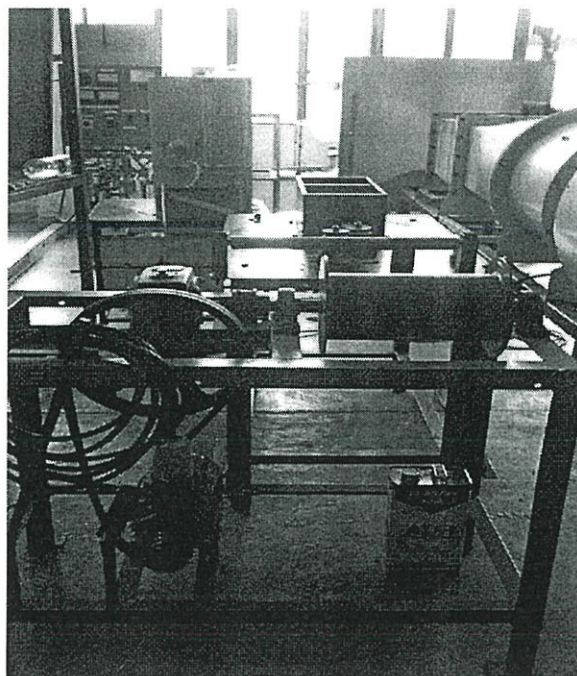
3.7 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)

การออกแบบเครื่องดึงขั้นรูปลวดจะออกแบบตามแบบที่ใกล้เคียงกับที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

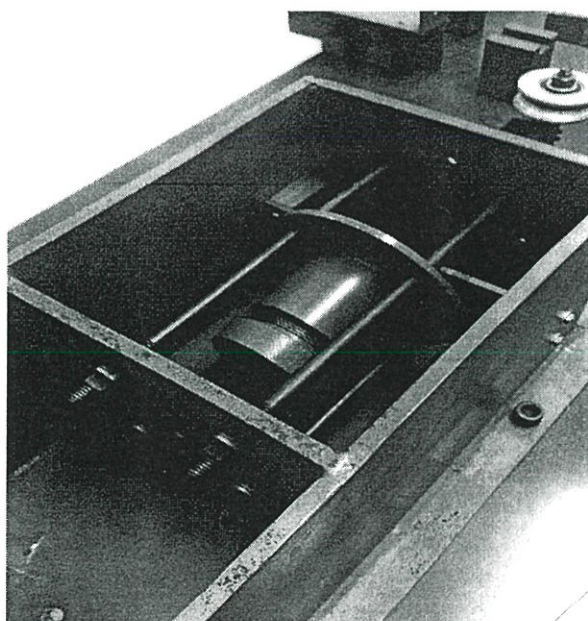


รูปที่ 3.17 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในการทดลอง

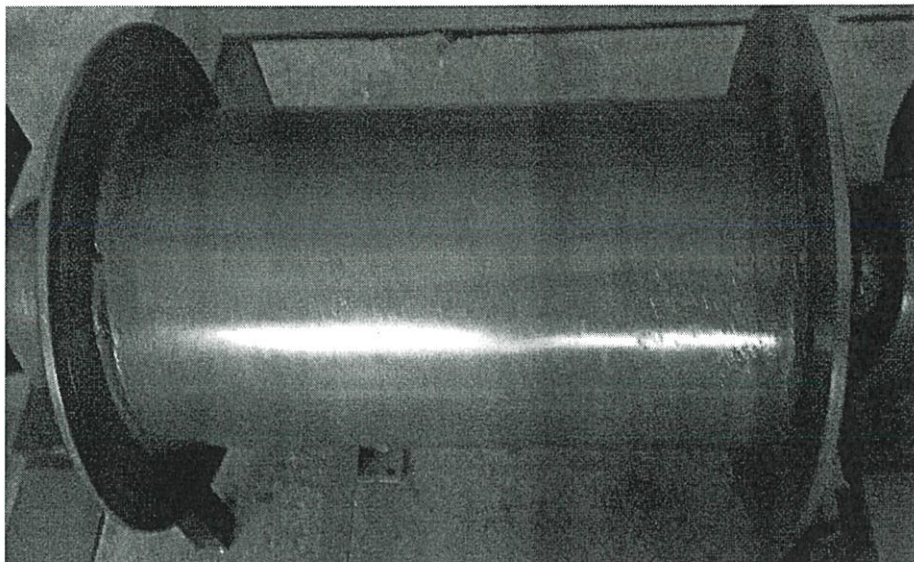
เครื่องดึงลวดแบบการดึงขั้นเดียวที่ใช้ในการทดลองมีความเร็วในการดึงลวด 0.12 เมตรต่อวินาที ต้นกำเนิดนั้นใช้ระบบมอเตอร์เป็นต้นกำเนิดผ่านชุดเฟืองทดรอบให้ช้าลง โดยลวดจะถูกดึงโดยล้อม้วนดึงในขณะเดียวกันก็ดึงเก็บลวดไปด้วยซึ่งล้อม้วนดึงลวดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 175 มิลลิเมตร เรากำหนดให้ลวดมีการดึงผ่านสารหล่อลื่นก่อนจะเข้าสู่ตายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพซึ่งเป็นอ่างใส่น้ำมันหล่อลื่นและอีกส่วนจะเป็นการดึงผ่านตายซึ่งเราติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนการดึงซึ่งเรากำหนดให้สามารถวัดแรงได้มากที่สุด 1000 นิวตัน



รูปที่ 3.18 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.19 ชุดวัดแรง



รูปที่ 3.20 ล้อม้วนดึงเก็บลวด

3.8 แม่พิมพ์ดึงลวด

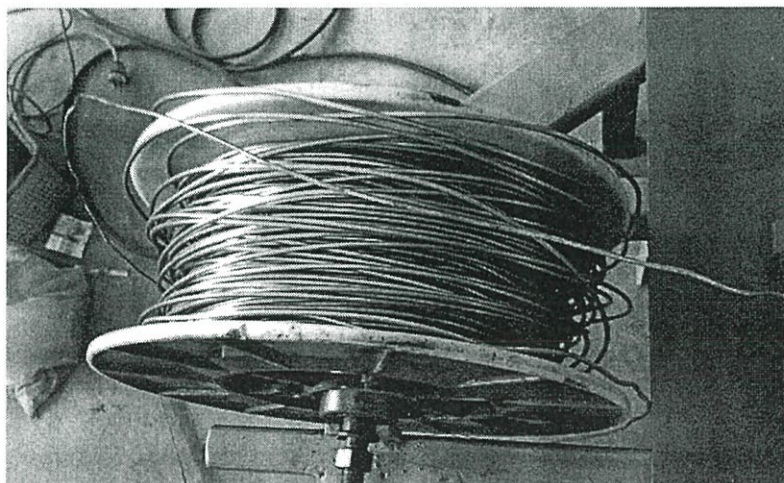
แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการดึงขึ้นรูปลวดทั่วไปจะคำนึงถึงประสิทธิภาพสำหรับการทดลองได้กำหนดรูปร่างตามมาตรฐาน W103 แม่พิมพ์จะประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกคือดายอินเสริท (Die Insert) และส่วนที่สองคือดายส่วนนอก (Die Case) ดายอินเสริทจะทำมาจากเสตนคาไบต์ K20 (ISO Code) ดายส่วนนอกเป็นส่วนประกอบในการรับแรงทำมาจากวัสดุ JIS SKD11



รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์ดึงลวดตามมาตรฐาน W103 ไม่เคลือบผิว

3.9 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง

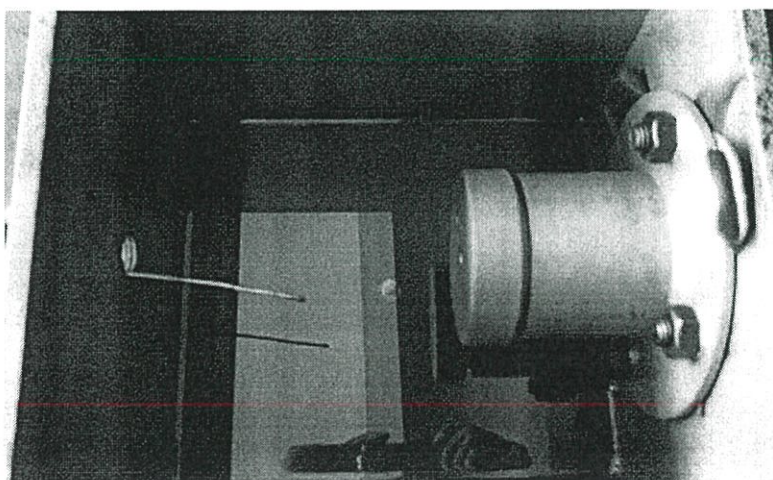
ลวดที่ใช้ในการทดลองในการดึงขึ้นรูปนั้นเป็นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เกรด SUS 304 ก่อนดึงลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.30 มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับมีการลดอัตราหน้าตัดของลวดลง 9%



รูปที่ 3.22 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

3.10 สารหล่อลื่น

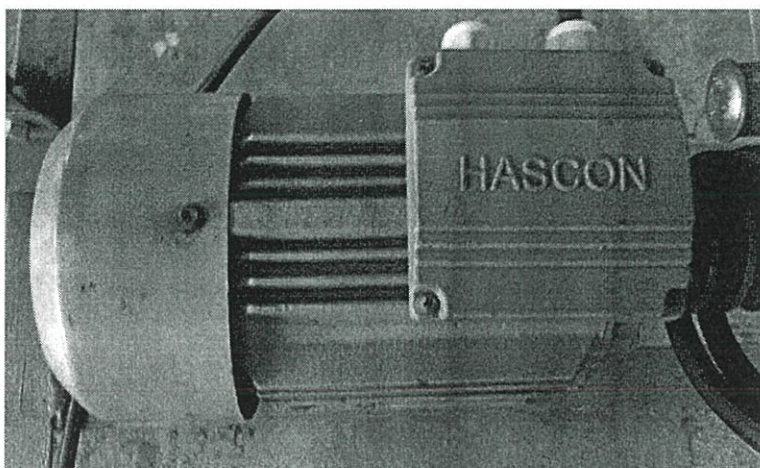
ในการทดลองนี้ใช้น้ำมันหล่อลื่นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมคือ Graphite Lubricant เบอร์ XL27



รูปที่ 3.23 อ่างน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อลื่น

3.11 มอเตอร์และเฟืองทด

ตัวกำเนิดกำลังงานผู้ทดลองใช้มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า (1.5 กิโลวัตต์) มีความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที และใช้เฟืองหนอนซึ่งมีอัตราทด 30:1 เพื่อลดความเร็วรอบที่มาจากมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบลดลง



รูปที่ 3.24 มอเตอร์ต้นกำลัง



รูปที่ 3.25 เฟืองหนอนทดกำลัง

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ

4.1.1 การประมาณค่ายังโมดูลัสของคานย่นแบบยืดตรง

การหาค่ายังโมดูลัสของคานย่นแบบยืดตรงในขณะที่ได้รับแรงกระทำในช่วงต่างๆเพื่อนำมาประมาณหาค่าการปรับเทียบการทดลองในการประมาณค่ายังโมดูลัสของคานย่นแบบยืดตรงมีการทดลองดังนี้

4.1.3.1 ปรับตำแหน่งอ่างเก็บให้สามารถวางลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐานในแนวตั้งได้

4.1.3.2 ทำการรันโปรแกรมแลปวิวขึ้นเก็บค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขณะยังไม่วางลูกตุ้มมาตรฐานที่ปลายค่า

4.1.3.3 ทำการวางลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐานลงไปที่ย่านคานที่น้ำหนัก 5, 6, 7 กิโลกรัมแล้วอ่านค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่แสดงไว้ที่โปรแกรมแลปวิว

4.1.3.4 นำค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่อ่านได้มาลบกับค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเริ่มต้นแล้วบันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 4.1

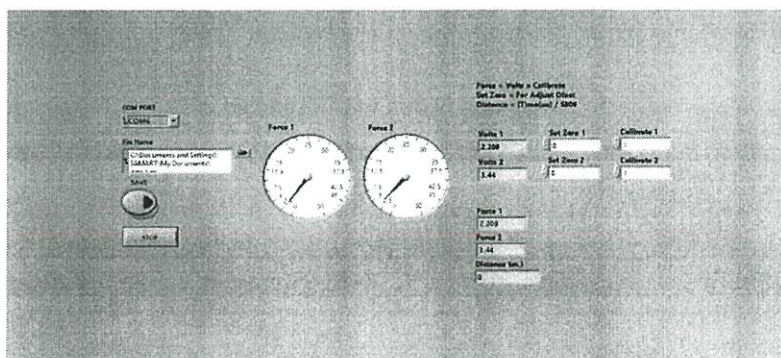
4.1.3.5 นำค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ได้จากจากการทดลองมาแทนในสมการที่ 4.1 เพื่อคำนวณหาค่ายังโมดูลัสของคานย่นแบบยืดตรงแล้วทำการบันทึกผลลงในตาราง 4.2

4.1.3.6 ทำการทดลองซ้ำอีก 5 ครั้ง จากการทดลองจะได้ค่าการทดลองออกมาสองค่าเพราะจากการทดลองได้ทำการวัดแรงจำนวนสองแรง

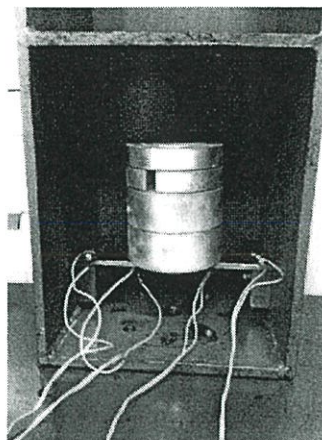
$$E = \frac{6FxS_g V_s}{2bh^2 V_o} \quad (4.1)$$

4.1.3.7 จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของค่ายังโมดูลัสที่ได้จากการปรับเทียบแทนค่าลงในสมการ 4.2 เพื่อหาค่าคงที่การปรับเทียบ เพื่อนำไปใช้ในในขณะที่วัดแรงดึงจากเครื่องดึงขึ้นรูปหลอด

$$C = \frac{Ebh^2}{3S_gxV_s} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.1 รูปแสดงหน้าจอของโปรแกรมแลปวิวขณะเทียบค่า



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่ายังโมดูลัสของคานยื่นแบบยึดตรึง

แรงปฏิกิริยา (kgf)	ด้านของ ชุดวัดแรง	ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V)				
		การทดลองครั้งที่				
		1	2	3	4	5
3	1					
	2					
5	1					
	2					
7	1					
	2					

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการคำนวณค่ายังโมดูลัสของคานยื่น

แรงปฏิกิริยา (kgf)	ค่ายังโมดูลัส (E) (MPa)					ค่ายังโมดูลัสเฉลี่ย E_{avg}
	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
3						
5						
7						

4.1.2 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยดึงผ่านด้ายที่มีสารหล่อลื่น Graphite Lubricant เป็นสารหล่อลื่นโดยมีการวัดแรงขณะดึงไปด้วย

4.1.2.1 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้สารหล่อลื่นกราไฟท์เป็นตัวหล่อลื่นเริ่มต้น โดยลดขนาดปลายลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเจียรระไน ให้ได้ความยาวประมาณ 1.5 เมตร

4.1.2.2 นำลวดที่ลดขนาดโดยการเจียรระไน ประกอบเข้ากับเครื่องดึงลวดโดยดึงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดรูใน 2.30 มิลลิเมตร ด้วยชุดต้นกำลังในการดึงด้วยมอเตอร์

4.1.2.3 ติดตั้งชุดวัดแรงในตำแหน่งแล้วเปิดโปรแกรมแลปวิวและอ่านค่าแรงขณะทำการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงที่ได้จากการคำนวณ

4.1.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

4.1.2.1 นำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนดึงและหลังดึงมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่ความเร็วต่างๆ

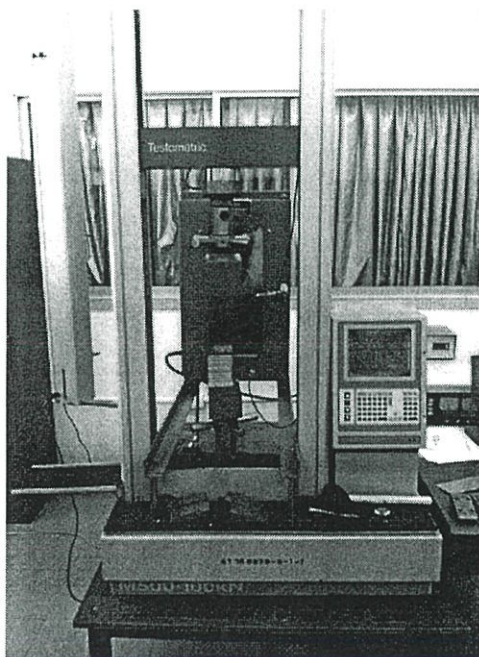
4.1.2.2 วิเคราะห์ผลจากการทดลองจากเครื่อง UTM และเทียบเทียบค่ากับผลจากงานวิจัยตัวเก่า



รูปที่ 4.3 การทดสอบคุณสมบัติลวดโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

4.2 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เป็นเครื่องใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติภายในของวัสดุต่างๆ โดยค่าที่แสดงออกมาจะถูกประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ สำหรับค่าที่สามารถแสดงออกมาได้มีมากมายหลายค่า เช่น stress , strain , elongation , modulus เป็นต้น โดยเครื่อง UTM นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนกำลัง ส่วนคอมพิวเตอร์ควบคุม ส่วนทดลอง



รูปที่ 4.4 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

4.3 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การปรับเทียบค่า

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่ายังโมดูลัสของคานยื่นแบบยึดตรึง

แรงปฏิกิริยา (kgf)	ตัววัดแรงที่	ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V)				
		การทดลองครั้งที่				
		1	2	3	4	5
3	1	0.127	0.107	0.092	0.102	0.107
	2	0.151	0.117	0.098	0.103	0.127
5	1	0.215	0.229	0.175	0.185	0.219
	2	0.259	0.288	0.210	0.220	0.254
7	1	0.278	0.303	0.283	0.303	0.268
	2	0.337	0.357	0.337	0.371	0.318

ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเริ่มต้น V_0 (F1) = 1.911V

ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเริ่มต้น V_0 (F2) = 3.069V

การหาค่ายังโมดูลัส สามารถหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$E = \frac{6FxSgV_s}{2bh^2V_0} \quad (4.1)$$

ถ้าใช้ค่ายังโมดูลัสของคานยื่นจากการทดลองตอนที่ 1 แล้วจะสามารถหาค่าคงที่ในการปรับเทียบได้จากสมการที่ 4.2 โดยค่าคงที่การปรับเทียบที่ได้จะนำไปสู่การประมาณค่าหาแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุต่อไปจากสมการที่ 2.17 ค่าคงที่การปรับเทียบที่ได้จะนำไปใช้ในการประมาณค่าแรงดึงโดยการใส่ค่าการปรับเทียบเข้าสู่โปรแกรมแลบวิว (Labview)

$$C = \frac{Ebh^2}{3s_gxV_s} \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการคำนวณค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยของคานยื่นจากแรงที่ 1 จากการสุ่มตุ้มถ่วงน้ำหนักมาตรฐาน

แรงปฏิกิริยา (kgf)	ค่ายังโมดูลัส (E) (MPa)					ค่ายังโมดูลัส เฉลี่ย E_{avg} (MPa)
	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
3	204.369	242.569	282.118	254.459	242.569	245.231
5	201.201	188.900	247.189	233.828	197.526	213.729
7	217.847	199.873	213.998	199.873	225.975	211.513
						223.491

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการคำนวณค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยของคานยื่นจากแรงที่ 2 จากการสู่มัดม้วน
น้ำหนักมาตรฐาน

แรงปฏิกิริยา (kgf)	ค่ายังโมดูลัส (E) (MPa)					ค่ายังโมดูลัส เฉลี่ย E_{avg} (MPa)
	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
3	171.887	221.837	264.846	251.989	204.369	222.986
5	167.019	150.202	205.991	196.628	170.307	178.029
7	179.707	169.639	179.707	163.238	190.445	176.547
						192.521

วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1

จากการทดลองผู้วิจัยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาจากลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐานกับค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปได้ดังตารางที่ 4.3-4.5 และสามารถนำค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปไปหาค่ายังโมดูลัสของคานยื่นจากสมการที่ 4.1 เราจึงได้ค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยของคานยื่นที่ตัววัดแรงที่ 1 เท่ากับ 223.491 เมกาปาสคาล และ ค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยของคานยื่นที่ตัววัดแรงที่ 2 เท่ากับ 192.521 เมกาปาสคาลจากนั้นเรานำค่ายังโมดูลัสของคานยื่นไปแทนในสมการที่ 4.2 จะได้ค่าคงที่ในการเปรียบเทียบเท่ากับ

$$C_{F1} = \frac{(223.491 \times 10^6) \times (30 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-3})^2}{3 \times 2.08 \times (40 \times 10^{-3}) \times 2.65} = 253.4$$

$$C_{F2} = \frac{(192.521 \times 10^6) \times (3 \times 10^{-2}) \times (5 \times 10^{-3})^2}{3 \times 2.08 \times (40 \times 10^{-3}) \times 2.65} = 218.3$$

ตอนที่ 2 การวัดแรงขณะดึงขึ้นรูปลวด

การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด คำนวณโดย Siebel's Method

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (3.5)$$

$$F_{D,tot} = A_l \times \sigma_{r,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right]$$

เมื่อ

A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm^2]

A_l = พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm^2]

$\sigma_{r,m}$ = ความเค้นในแนวแกน ความเค้นของการไหลเฉลี่ย [N/mm^2]

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Coulomb's coefficient of friction ($\mu \approx 0.035$)

α = ครึ่งมุมไหลเข้าแม่พิมพ์

$\hat{\alpha}$ = $\tan \alpha$

เมื่อ

$\hat{\alpha}$ = 0.1051

φ_{max} = ความเครียด

$$\varphi_{max} = \ln \frac{A_o}{A_l} \quad (3.6)$$

$$\varphi_{max} = \ln \left(\frac{4.5239}{4.1547} \right)$$

$$\varphi_{max} = 0.08513$$

เมื่อ

$\sigma_{r,m}$ = ความเค้นของการไหลเฉลี่ยความเค้นในแนวแกน [N/m^2]

$$\sigma_{r,m} = \frac{1}{2} (\sigma_{f,o} + \sigma_{f,s}) \quad (3.7)$$

$$\sigma_{r,m} = \frac{1}{2} (344.8 + 365.2)$$

$$\sigma_{r,m} = 355 \text{ N/m}^2$$

แรงในการดึงขึ้นรูปลวด

$$F_{D,tot} = A_t \times \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\mu} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (3.8)$$

$$F_{D,tot} = 4.1547 \times 355 \left[\left(1 + (2) \frac{0.080}{0.208} \right) (0.08513) + \frac{2}{3(0.1051)} \right]$$

$$F_{D,tot} = 325.487 \text{ N/m}^2$$

ซึ่งจากทฤษฎีแรงที่ต้องใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด จากลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร เหลือ 2.3 มิลลิเมตร ต้องให้แรง 325.487 N/m^2

การวัดแรงขณะดึงขึ้นรูปลวด

Force 1 วัดแรงขณะดึงขึ้นรูปได้ประมาณ 481.623 N

Force 2 วัดแรงขณะดึงขึ้นรูปได้ประมาณ 192.906 N

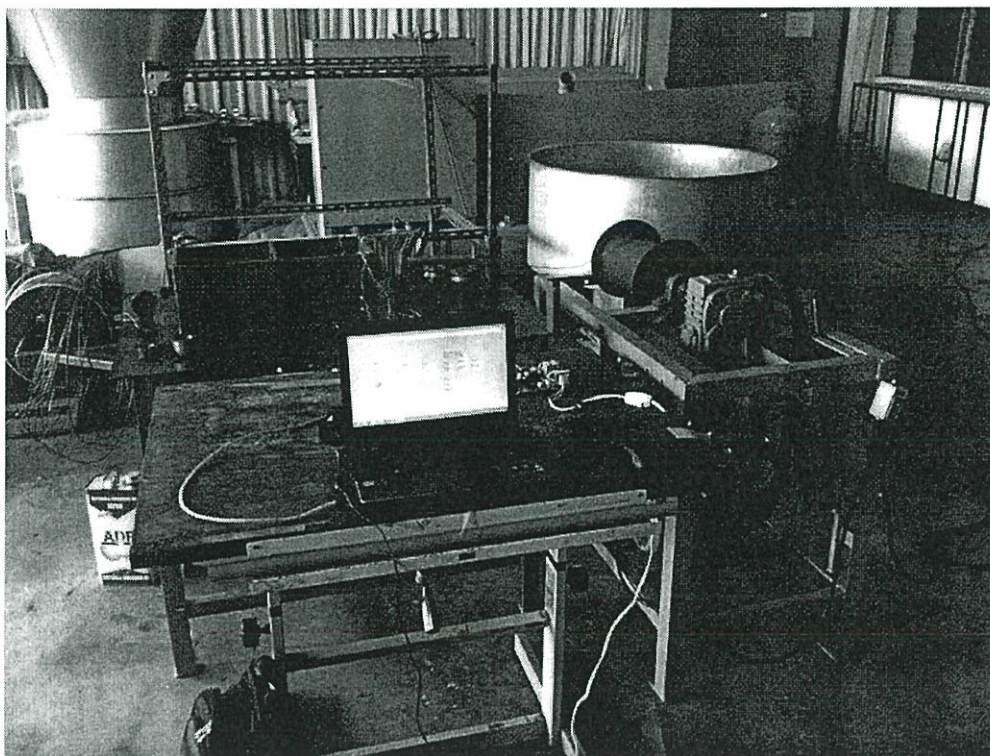
ค่าเฉลี่ยของแรงทั้งสองค่ากับ $\frac{481.623+192.906}{2} = 337.265 \text{ N}$

ซึ่งมีค่าคาดเคลื่อนจากค่าทฤษฎี

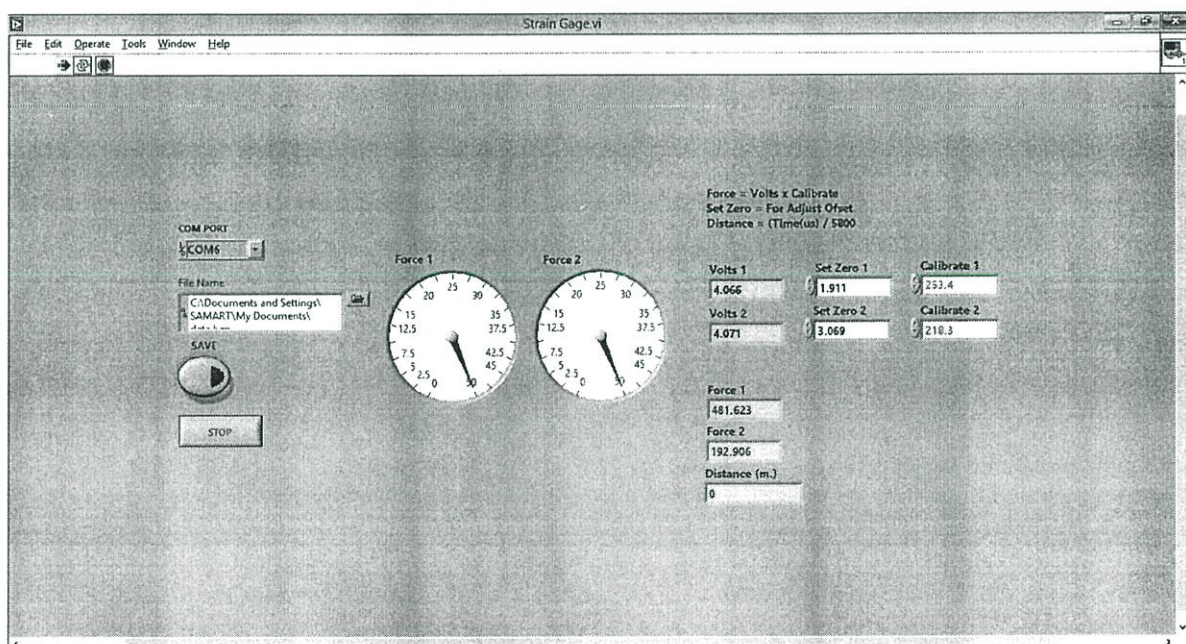
$$\% \text{คาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าจริง} - \text{ค่าจากทฤษฎี}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

$$\% \text{คาดเคลื่อน} = \frac{|337.265 - 325.487|}{325.487} \times 100$$

$$\% \text{คาดเคลื่อน} = 3.62 \%$$



รูปที่ 4.5 แสดงการวัดค่าขณะตั้งขึ้นรูปลวด



รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอโปรแกรมแลปวิวขณะตั้งขึ้นรูปลวด

ตอนที่ 3 ทดสอบคุณสมบัติทางกลของลวดก่อนและหลังดัดขึ้นรูป และเปรียบเทียบกับผลการผลจากงานวิจัยตัวเก่า

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลอง(ก่อนการพัฒนา)

	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนดัด	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	583.568 N/mm ²
	Yield Strength (MPa)	345.830 N/mm ²
ลวดหลังดัด	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	680.425 N/mm ²
	Yield Strength (MPa)	607.376 N/mm ²

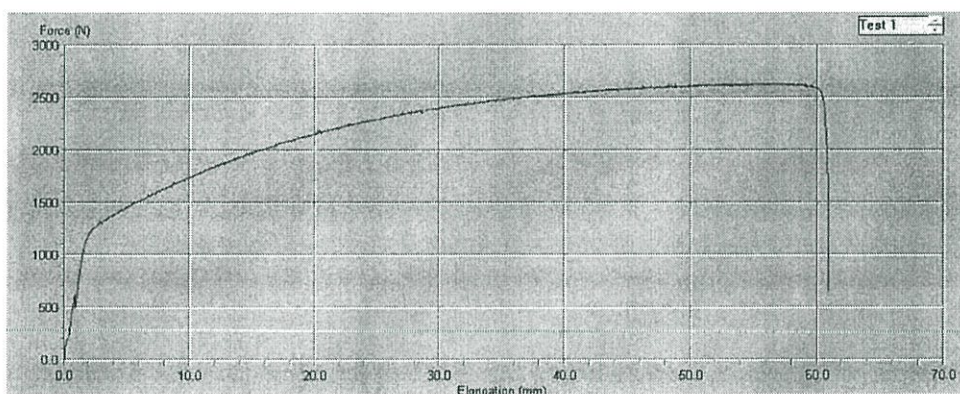
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 จากการทดลอง

	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนการดัด	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	585.995 N/mm ²
	Yield Strength (Mpa)	234.091 N/mm ²
ลวดหลังการดัด	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	604.064 N/mm ²
	Yield Strength (Mpa)	256.042 N/mm ²

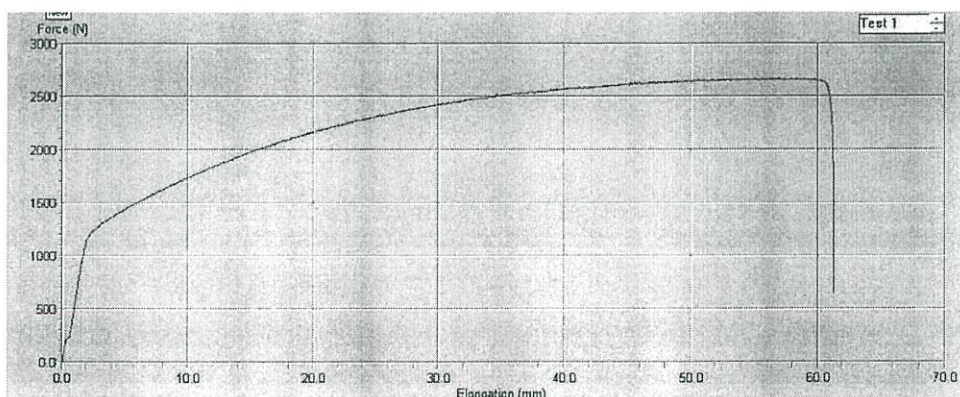
Test : Diameter 2.4 mm.
 Test Type : Tensile
 Test Speed : -
 Sample Length : 120.0 mm.
 Sample Type : Circular

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM

Test No.	V ($\frac{\text{mm}}{\text{min}}$)	Force Peck (N)	Strain Peck (%)	Stress Peck ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)	Elong Peck (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2650	198.54	580.252	57.099	618	136.608	7.158	0.859
2	20	2677	172.685	591.747	56.85	1500	331.573	47.80	5.736



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1)

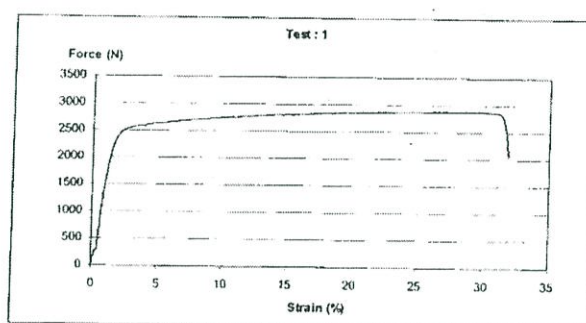


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2)

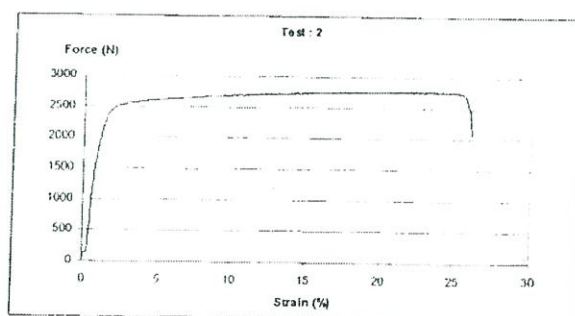
Test : Diameter 2.3 mm.
 Test Type : Tensile
 Test Speed : -
 Sample Length : 30.0 mm.
 Sample Type : Circular

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ก่อนการพัฒนา)

Test No.	V ($\frac{\text{mm}}{\text{min}}$)	Force Peck (N)	Strain Peck (%)	Stress Peck ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)	Elong Peck (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2887	92.827	694.866	27.848	2512	604.608	7.977	2.393
2	20	2767	74.250	665.984	22.275	2535	610.144	8.480	2.544



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่องUTM (ครั้งที่ 1) (ก่อนการพัฒนา)

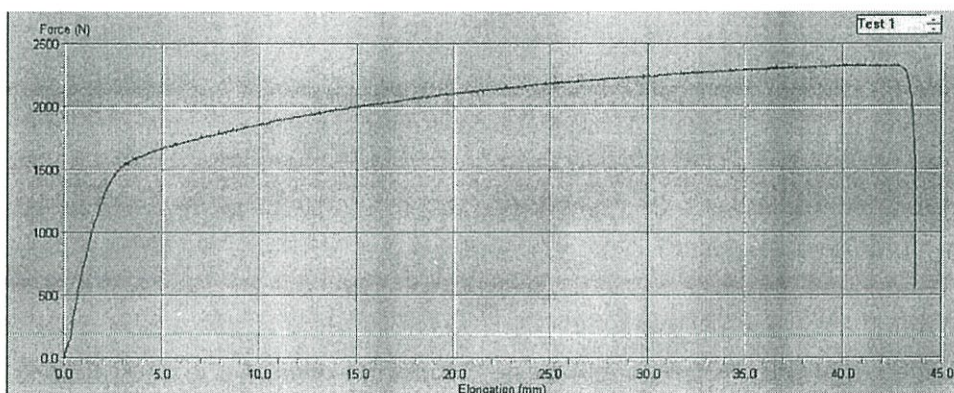


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่องUTM (ครั้งที่ 2) (ก่อนการพัฒนา)

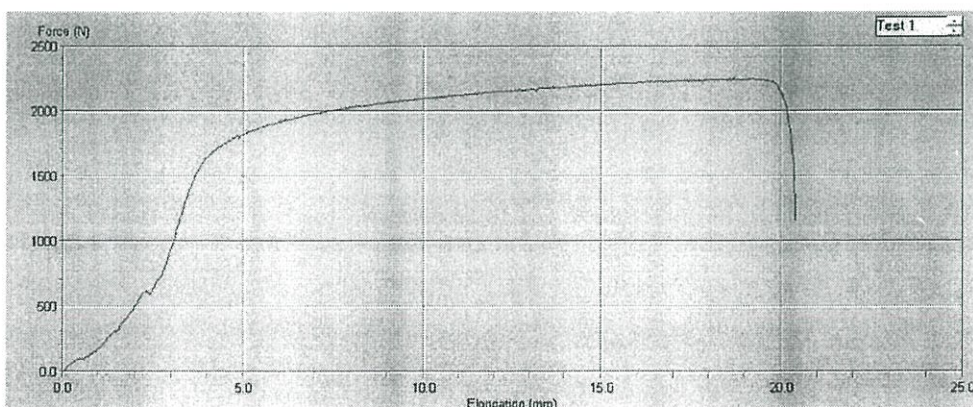
Test : Diameter 2.3 mm.
 Test Type : Tensile
 Test Speed : -
 Sample Length : 120.0 mm.
 Sample Type : Circular

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM

Test No.	V ($\frac{mm}{min}$)	Force Peck (N)	Strain Peck (%)	Stress Peck ($\frac{N}{mm^2}$)	Elong Peck (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield ($\frac{N}{mm^2}$)	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2339	93.827	562.969	40.726	1505	362.135	23.00	2.76
2	20	2265	72.964	545.158	18.669	623	149.949	19.217	2.306



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2)

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

5.1 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการทดลองให้เครื่องดึงขึ้นรูปลวดสามารถกลับมาใช้งานได้เหมือนเดิมและสร้างอุปกรณ์ในการวัดแรง ผลปรากฏว่าเครื่องนี้สามารถลดขนาดลวดเหล็กกล้าไร้สนิมและสามารถวัดแรงได้จริงตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ ในการสร้างเครื่องมือวัดแรงสามารถทำได้โดยอาศัยโปรแกรมแลปวิว โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่าความต้านทานของสแตนเลสเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าคงที่ในการเปรียบเทียบเพื่อนำไปสู่การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงลวด ซึ่งค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองนั้นมีสองค่า ค่าคงที่ที่หนึ่งคือค่า $C_{F1} = 253.4$ และ ค่าคงที่ที่สองคือค่า $C_{F2} = 218.3$ ซึ่งสองค่านี้จำเป็นสำหรับการคำนวณในการหาแรงที่ใช้สำหรับดึงลวดนั่นเอง นำค่า C ที่ได้มาหาแรงดึงขึ้นรูปลวดจะทำให้สามารถวัดแรงที่กระทำกับคานที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 481.623 N และค่าแรงกระทำที่คานที่สองมีค่าเท่ากับ 192.906 N หากนำแรงสองแรงมาเฉลี่ยกัน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงกระทำที่มาจากทฤษฎี จะได้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.62 % และจากการทดลองในการดึงเพื่อทำการลดขนาดของลวดโดยเครื่องดึงขึ้นรูปลวด แล้วนำลวดที่ไปหาคุณสมบัติภายใน โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเค้นที่ได้หลังการดึงขึ้นรูปลวดมีขนาดเพิ่มมากขึ้นกว่าก่อนการดึงขึ้นรูปลวด เนื่องจากลวดที่ผ่านการดึงลดขนาดมาแล้วจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงทำให้ลวดมีเนื้อที่แน่นขึ้นเป็นเหตุทำให้เกิดแรงที่เพิ่มขึ้นด้วย และทำให้ระยะขาดจากกันน้อยลงด้วยเนื่องจากลวดที่ผ่านการลดขนาดมาแล้วลวดจะยาวกว่าเดิม ถ้านำมาทดสอบอีกครั้งจะทำให้ระยะยึดจนขาดจากกันมีค่าน้อยลงอีกด้วยและจากที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลการทดลองในการติดตั้งเส้นทางการดึงลวดแบบใหม่ที่ได้เทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทดลองแบบการติดตั้งเส้นทางการดึงลวดแบบเก่านั้น ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้ในการดึงขึ้นรูปลวดแบบเส้นทางใหม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพหลังการดึงลวดแบบใหม่มีการเพิ่มขึ้นด้วย

5.2 ปัญหาที่พบ

5.2.1 ปัญหาการเกิดสัญญาณลบกวนในขณะที่ทำการดึงลวดผ่านเครื่องดึงขึ้นรูปลวด

5.2.2 ในขั้นแรกต้องนำลวดไปเจียรลดขนาดเพื่อติดตั้งเข้ากับเครื่องดึงขึ้นรูปลวด ทำให้ใช้เวลาในการเจียรค่อนข้างนานหลายชั่วโมงเนื่องจากต้องเจียรลวดหลายเมตร และต้องเจียรให้มีรูปร่างกลม

5.2.3 การเจียรลวดต้องเจียรลวดอย่าให้มีขนาดเล็กเกินไปเพราะจะทำให้ขณะดึงลวดเพื่อลดขนาดจะทำให้ลวดที่ดึงนั้นขาดได้

5.2.4 เมื่อเตรียมการติดตั้งอุปกรณ์การดึงขึ้นรูปลวดเรียบร้อยแล้ว ควรใช้มือหมุนขับเคลื่อนดึงลวดผ่านตายประมาณ 1 รอบของล้อม้วนเก็บเพื่อป้องกันลวดขาดเวลาเดินเครื่องจริง

5.2.5 ลวดที่นำมาลดขนาดถ้ามีการบิดเบี้ยวหรือมีการหักเหมากเมื่อเวลาดึงผ่านชุดตายจะเกิดการติดขัดเป็นผลให้แรงดึงมีค่าสูงอาจทำให้ลวดที่เจียรมาไม่ตัดอาจขาดได้

5.2.6 การสึกหรอของแม่พิมพ์ลวดเนื่องจากลวดที่ทำการดึงมีความร้อนและมีแรงดึงสูงในการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ทำให้แม่พิมพ์สึกหรอได้

5.2.7 ต้องใส่สารหล่อลื่น เพื่อลดปัญหาความร้อนที่เกิดขึ้น

5.3 แนวทางการพัฒนา

5.3.1 ทดสอบดึงลวดได้หลายขนาดและหลายรูปทรงโดยออกแบบแม่พิมพ์ตามที่ต้องการ

5.3.2 ออกแบบตัวพาลวดเก็บที่ล้อม้วนเก็บให้มีการเก็บลวดเข้าล้อม้วนเก็บได้ง่าย

5.3.3 ทำการปรับปรุงโหลดเซลล์แบบคาน เพื่อความแม่นยำในการอ่านค่าที่แม่นยำมากขึ้น

5.3.4 ประสิทธิภาพในการปรับเทียบ โดยการใช้พुरुฟวิงริง (Proving Ring) แทนการใช้คัม น้ำหนัก (Dead Load) ทั้งนี้เพราะเหตุว่าใช้พुरुฟวิงริงจะสะดวกรวดเร็วกว่า แต่จะมีราคาแพงมาก

5.3.5 ปรับปรุงตัวยึดแม่พิมพ์ให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้น จะทำให้ลวดที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.3.6 ทำการออกแบบลดการเสียดสีให้น้อยลงเพื่อลดปัญหาการขาดกันของเส้นลวด

5.3.7 ทำการทดลองเปลี่ยนสารหล่อลื่นเพื่อหาสารหล่อลื่นที่ดีที่สุด

5.3.8 ออกแบบล้อเก็บลวดเพื่อให้ลวดก่อนดึงขึ้นรูปไม่ขดงอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Avitzur, B.Z.L., 1968 Metal Forming, McGraw-Hill, New York, pp.219-246
- [2] Rer. Nat.F.Ender, 1990, Wire Drawing Machine, [online] Available : <http://www.imet.tu-clausthal.de/en/techdienst/wul.shtml>, [2005, June 30].
- [3] Lange, K., 1985, Handbook of Metal forming, McGraw Hill, New York, pp.(13.14)-(14.14)
- [4] Skolyszewki, A., Packo, M., Luksza, J. and Ruminski, M., 2002, "Warm Forming of Acid Resistant Steel Wires Used for Manufacturing of Spring", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, pp.326-333.
- [5] United Tungsten & Diamond Company Limited, 2546. มาตรฐานแม่พิมพ์มดิ่งลวดกลม JISB4111 (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 8
- [6] Schey, J.A., 1984, Tribology in Metal Working, American Society for Metal, pp.343-391.
- [7] Dieter, G.E., 1988, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, New York, pp.503-5505.
- [8] Blazynski, T.Z., 1976. In Metal Forming, Tool Profile and Flow, Unwin Brother Ltd., London, pp.222-238.
- [9] วีรศักดิ์ กรัยวิเชียร, 2544, น้ำมันหล่อลื่น, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7.
- [10] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์, John T.H. pearce, ผกามาต แซ่หว่อง, วารุณี เปรมานนท์, สุรพล ราษฎร์นัย และ สิทธิชัย วิโรจน์นุปลัมภ์, 2545, การสึกหรอ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, หน้า 129 -132.
- [11] วารุณี เปรมานนท์, 2547, "Tribological Behavior of Tool Materials Against Stainless Steel Workpiece Material in a Ball-on-disk Model Wear Device", การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม, pp. 521-242.

- [12] ดร.วริทธิ์ อิงภากรณ์ และ ชาญณัดงาน, “การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1,2”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- [13] รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ, “กลศาสตร์ของแข็ง เล่ม 1”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- [14] ผศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช, “Material Science”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- [15] Manam Stainless Wire Company Limited, 2547, ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS G4309 (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 2-4.
- [16] Donald P. and Bernstein I. M., Handbook of Stainless Steel, [online], Available : [http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=Q304A\[2005, June30\]](http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=Q304A[2005, June30]).
- [17] SeropeKalpakjian, 1991, Manufacturing Processes for Engineering Material, John wileyPublishing Company, Illinois Institute of Technology, pp.49-85 ,pp.38.
- [18] Willam D. Callister, Jr.,2001, Fuudamental of Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, New York, pp.445-448.
- [19] ปัญญา ศรีจันทร์ และ ทิพพรรณ สุดประเสริฐ,2545, โลหะ วัสดุและการกัดกร่อน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, หน้า 35-45.
- [20] Sumitomo, 2000, Diamond-like Carbon, [Online] Availbe : <http://www.sei.co.jp/RandD/Itami/e-tool/Wadaien.html>, [2005,June 30].
- [21] สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์, มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
URL:http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/ELTC2103/chaptor_6/tension_test.doc, access on 23/07/2012
- [22] Faculty of Engineering and Industrial Technology,
<http://www.eng.su.ac.th/me/elearning/615214Labtesting/Labtesting1.PDF>, access on 22/07/2010.

[23] Hamilton ,H. Mabieand Charles, F. Reinholtz.Mechanisms And Dynamics of Machinery : Study of Mechanisms, John Wiley & Sons, New York.

[24] Hibbeler, R.C.,(2000). Mechanics Of Materials,4thEd. ,Pearson Education Indochina, Thailand

[25] Mechanical Properties Of 1018 Steel In Tension,I.R Confused Lab Partners. Annual Report 2010.

[26] SCAN-test Methods are issued and recommended byKCL, PFI and STFI-Packforsk for the pulp, paper and board industries in Finland, Norway and Sweden.
Distribution: Secretariat, Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee,
Box 5604, SE-114 86 Stockholm, Sweden

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุ

ก.1 คุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก SUS304 อ้างอิงจากบริษัทผู้ผลิต
ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม บริษัท Mammam Stainless Wire Company

ส่วนผสมทางเคมี								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	other
0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	8.0-10.5	18.0-20.0	-	0.1

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

คุณสมบัติทางกล	ค่า
Hardness , Vickers	129
Strain hardening exponent	0.45
Strength coefficient	1275
Modulus of Elasticity	193-200 Gpa
Poisson's Ratio	0.29

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 จากการทดลองตามมาตรฐาน มอก.244

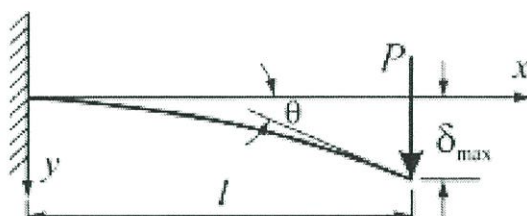
เล่ม 7

	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	419.7 (N/mm^2)
	Yield Strength (MPa)	344.8(N/mm^2)
	Elongation at Break	71.3%
ลวดหลังการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	441(N/mm^2)
	Yield Strength (MPa)	365.2(N/mm^2)
	Elongation at Break	33.3

ภาคผนวก ข.
การออกแบบระยะโค้งงอของคานยื่น

ข.1 การออกแบบคานยื่น

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้สเตรนเกจใช้ได้จึงต้องออกแบบคานให้มีระยะโง่งงเพื่อให้ระยะของขดลวดในสเตรนเกจเกิดการยืดตัวหรือหดตัวเพื่อให้ค่าความต้านทานในตัวสเตรนเกจเปลี่ยนแปลงผู้วิจัยจึงสามารถวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ดังนั้นจึงต้องคำนวณตามสมการที่ข.1 ได้ดังนี้



รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะของคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน

$$W(x) = \frac{Pl^3}{3EI}$$

(ข.1)

เมื่อกำหนดระยะโง่งงสูงสุดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

แทนค่า

ระยะโง่งโค้งสูงสุดจากคานตัวที่ 1

$$W_1(x) = \frac{1000(0.065)^3}{3(223.491 \times 10^6) \frac{1}{12}(0.03)(5 \times 10^{-3})} = 0.0273 \text{ มิลลิเมตร}$$

ระยะโง่งโค้งสูงสุดจากคานตัวที่ 2


$$W_2(x) = \frac{1000(0.065)^3}{3(192.521 \times 10^6) \frac{1}{12}(0.03)(5 \times 10^{-3})} = 0.0380 \text{ มิลลิเมตร}$$


หมายเหตุคานคืนตัวกลับ

ภาคผนวก ค.

มาตรฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และมาตรฐานแม่พิมพ์

ค.1 มาตรฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
ค.1.1. INA129P





INA128
INA129

Precision, Low Power
INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50µV max
- LOW DRIFT: 0.5µV/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 5nA max
- HIGH CMR: 120dB min
- INPUTS PROTECTED TO ±40V
- WIDE SUPPLY RANGE: ±2.25 to ±18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 700µA
- 8-PIN PLASTIC DIP, SO-8

APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION

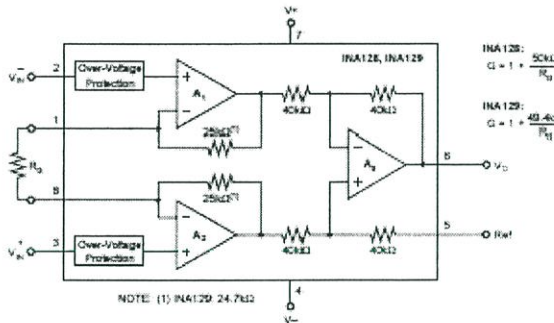
DESCRIPTION

The INA128 and INA129 are low power, general purpose instrumentation amplifiers offering excellent accuracy. Their versatile 3-op amp design and small size make them ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (200kHz at G = 100).

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. INA128 provides an industry standard gain equation; INA129's gain equation is compatible with the AD620.

The INA128/INA129 is laser trimmed for very low offset voltage (50µV), drift (0.5µV/°C) and high common-mode rejection (120dB at G ≥ 100). It operates with power supplies as low as ±2.25V, and quiescent current is only 700µA—ideal for battery operated systems. Internal input protection can withstand up to ±40V without damage.

The INA128/INA129 is available in 8-pin plastic DIP, and SO-8 surface-mount packages, specified for the -40°C to +85°C temperature range. The INA128 is also available in dual configuration, the INA128B.



NOTE (1): INA129 24.7kΩ

International Airport Industrial Park • Mail Bag Address: PO Box 11408, Tucson, AZ 85714 • Street Address: 6730 E. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85716 • Tel: (520) 746-4111 • Fax: (520) 746-4133
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAX Line: (602) 818-4113 (USA/Canada Only) • Cable: BURROPS • Telex: 985441 • FAX: (520) 888-1619 • Immediate Product Info: (800) 548-4133

รูปที่ ค.1 แสดงมาตรฐาน INA129P (รูปที่ 1)

SPECIFICATIONS

All $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = \pm 15\text{V}$, $R_T = 10\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA129P, U			INA129PA, UA			UNITS			
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX				
INPUT Offset Voltage, RTI Initial vs Temperature vs Power Supply Long-Term Stability Impedance: Differential Common-Mode Common-Mode Voltage Range ⁽¹⁾ Safe Input Voltage Common-Mode Rejection	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} $V_{IN} = \pm 0.25\text{V}$ to $\pm 15\text{V}$ $V_{CM} = 0\text{V}$ $V_{CM} = \pm 10\text{V}$, $\Delta R_T = 1\text{k}\Omega$ G=1 G=10 G=100 G=1000		$\pm 10 \pm 100\mu\text{V}$ $\pm 0.2 \pm 2\mu\text{V}$ $\pm 0.2 \pm 20\mu\text{V}$ $\pm 0.1 \pm 5\mu\text{V}$ $10^{11} \parallel 2$ $10^{11} \parallel 9$	$\pm 50 \pm 500\mu\text{V}$ $\pm 0.5 \pm 5\mu\text{V}$ $\pm 1 \pm 100\mu\text{V}$		$\pm 25 \pm 100\mu\text{V}$ $\pm 0.2 \pm 5\mu\text{V}$ *	$\pm 125 \pm 1000\mu\text{V}$ $\pm 1 \pm 25\mu\text{V}$ $\pm 2 \pm 200\mu\text{V}$	μV $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ $\mu\text{V}/\text{V}$ $\mu\text{V}/\text{ms}$ $\Omega \parallel \text{pF}$ $\Omega \parallel \text{pF}$ V V			
			(V ⁺) - 2 (V ⁻) + 2	(V ⁺) - 1.4 (V ⁻) + 1.7		*	*	*			
			50	86		73	*	*	dB		
			100	108		93	*	*	dB		
			120	125		110	*	*	dB		
			120	130		110	*	*	dB		
BIAS CURRENT vs Temperature Offset Current vs Temperature			± 2 ± 30 ± 1 ± 30	± 5 ± 5		*	± 10 ± 10	nA pA/°C nA pA/°C			
NOISE VOLTAGE, RTI f = 10Hz f = 100Hz f = 1kHz f ₀ = 0.1Hz to 10Hz Noise Current f = 10Hz f = 1kHz f ₀ = 0.1Hz to 10Hz	G = 1000, R _T = 0Ω		10 6 6 0.2			*		nV/√Hz nV/√Hz nV/√Hz μV/p			
				0.9 0.3 30			*		pA/√Hz pA/√Hz pA/p		
		GAIN Gain Equation, INA129 INA129 Range of Gain Gain Error Gain vs Temperature ⁽²⁾ 50kΩ (or 40-4kΩ) Resistance ⁽²⁾ Nonlinearity	$V_{CC} = \pm 13.5\text{V}$, G=1 G=10 G=100 G=1000	1	$1 + (50k\Omega/R_T)$ $1 + (40-4k\Omega/R_T)$		*	*	V/V V/V V/V		
						± 0.01 ± 0.02 ± 0.05 ± 0.5	± 0.004 ± 0.4 ± 0.5		*	± 0.1 ± 0.5 ± 0.7	% % %
						± 0.5 ± 1 ± 25	± 1 ± 10 ± 100		*	± 2 *	% ppm/°C
				± 0.0001 ± 0.0003 ± 0.0005 ± 0.001	± 0.001 ± 0.002 ± 0.003 (Note 4)		*	± 0.002 ± 0.004 ± 0.004 *	% of FSR % of FSR % of FSR		
OUTPUT Voltage: Positive Negative Load Capacitance Stability Short-Circuit Current	$R_L = 10\text{k}\Omega$ $R_L = 10\text{k}\Omega$	(V ⁺) - 1.4 (V ⁻) + 1.4	(V ⁺) - 0.9 (V ⁻) + 0.8 1000 ± 5 - ± 15		*	*	V V pF mA				
FREQUENCY RESPONSE Bandwidth, -3dB Slew Rate Setting Time, 0.01% Overload Recovery	$V_{CC} = \pm 10\text{V}$, G=10 G=1 G=10 G=100 G=1000 50% Overdrive		1.3 100 200 20			*	MHz MHz MHz MHz				
				4 7 7 9 80			*	V/μs μs μs μs μs			
				4			*	μs			
							*	μs			
							*	μs			
POWER SUPPLY Voltage Range Current, Total	$V_{IN} = 0\text{V}$	± 2.25	± 15 ± 700	± 15 ± 750	*	*	V μA				
TEMPERATURE RANGE Specification Operating S _{JA} B-Pin Dip 50-8 SOIC		-40 -40	85 80 150	125	*	*	°C °C °C/W °C/W				

* Specification same as INA129P, U or INA129PA, UA.

NOTE: (1) Input common-mode range varies with output voltage—see typical curves. (2) Guaranteed by vendor's test. (3) Temperature coefficient of the 50kΩ (or 40-4kΩ) term in the gain equation. (4) Nonlinearity measurements in G = 1000 are dominated by noise. Typical nonlinearity is $\pm 0.001\%$.

รูปที่ ค.2 แสดงมาตรฐานอุปกรณ์ INA129P (รูปที่ 2)

APPLICATION INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA128/INA129. Applications with noisy or high impedance power supplies may require decoupling capacitors close to the device pins as shown.

The output is referred to the output reference (Ref) terminal which is normally grounded. This must be a low-impedance connection to assure good common-mode rejection. A resistance of 8Ω in series with the Ref pin will cause a typical device to degrade to approximately 80dB CMR ($G = 1$).

SETTING THE GAIN

Gain is set by connecting a single external resistor, R_G , connected between pins 1 and 8:

$$\text{INA128: } G = 1 + \frac{50\text{k}\Omega}{R_G} \quad (1)$$

$$\text{INA129: } G = 1 + \frac{49.4\text{k}\Omega}{R_G} \quad (2)$$

Commonly used gains and resistor values are shown in Figure 1.

The $50\text{k}\Omega$ term in Equation 1 ($49.4\text{k}\Omega$ in Equation 2) comes from the sum of the two internal feedback resistors of A_1 and A_2 . These on-chip metal film resistors are laser trimmed to

accurate absolute values. The accuracy and temperature coefficient of these internal resistors are included in the gain accuracy and drift specifications of the INA128/INA129.

The stability and temperature drift of the external gain setting resistor, R_G , also affects gain. R_G 's contribution to gain accuracy and drift can be directly inferred from the gain equation (1). Low resistor values required for high gain can make wiring resistance important. Sockets add to the wiring resistance which will contribute additional gain error (possibly an unstable gain error) in gains of approximately 100 or greater.

DYNAMIC PERFORMANCE

The typical performance curve "Gain vs Frequency" shows that, despite its low quiescent current, the INA128/INA129 achieves wide bandwidth, even at high gain. This is due to the current-feedback topology of the input stage circuitry. Settling time also remains excellent at high gain.

NOISE PERFORMANCE

The INA128/INA129 provides very low noise in most applications. Low frequency noise is approximately $0.2\mu\text{Vp-p}$ measured from 0.1 to 10Hz ($G \geq 100$). This provides dramatically improved noise when compared to state-of-the-art chopper-stabilized amplifiers.

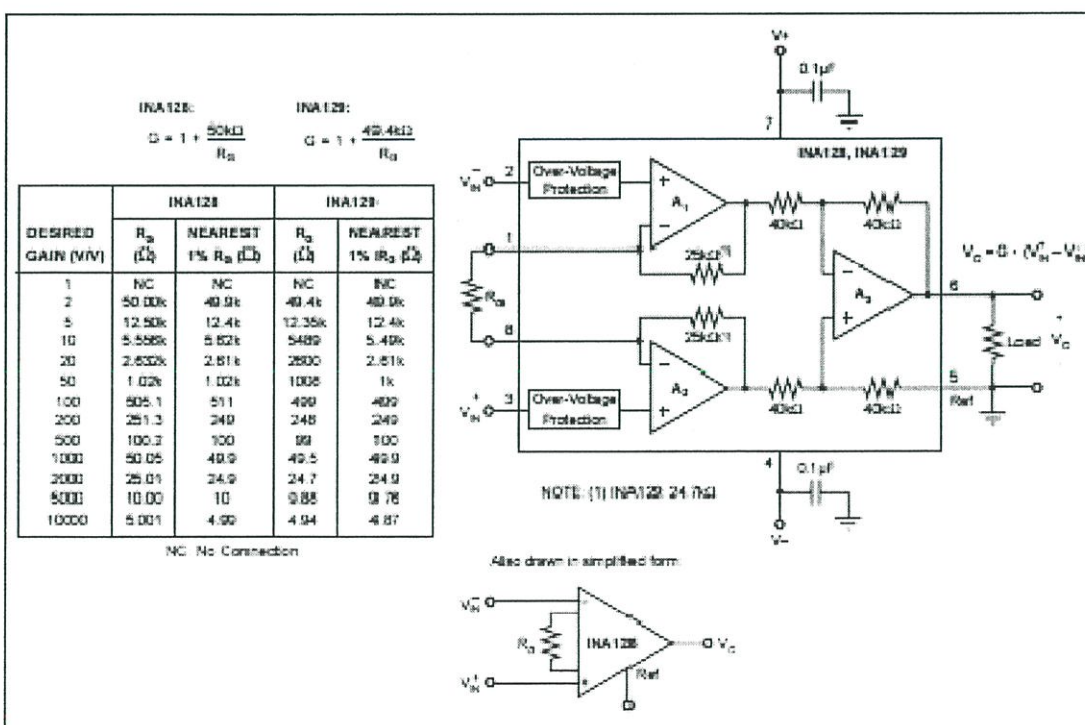


FIGURE 1. Basic Connections.

รูปที่ ค.2 แสดงมาตรฐานอุปกรณ์ INA129P (รูปที่ 3)

ก.1.2 MAX232CPE

19-4393 Rev. 8/1006



+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

General Description

The MAX220-MAX249 family of line drivers/receivers is intended for all EIA/TIA-232E and V.28/V.24 communications interfaces, particularly applications where ±12V is not available.

These parts are especially useful in battery-powered systems, since their low-power shutdown mode reduces power dissipation to less than 5µW. The MAX225, MAX233, MAX235, and MAX245/MAX246/MAX247 use no external components and are recommended for applications where printed circuit board space is critical.

Applications

- Portable Computers
- Low-Power Modems
- Interface Translation
- Battery-Powered RS-232 Systems
- Multidrop RS-232 Networks

AutoShutdown and UCSP are trademarks of Maxim Integrated Products, Inc.

Next-Generation Device Features

- ♦ For Low-Voltage, Integrated ESD Applications
MAX3222E/MAX3232E/MAX3237E/MAX3241E/
MAX3246E: +3.0V to +5.5V, Low-Power, Up to
1Mbps, True RS-232 Transceivers Using Four
0.1µF External Capacitors (MAX3246E Available
in a UCSP™ Package)
- ♦ For Low-Cost Applications
MAX221E: ±15kV ESD-Protected, +5V, 1µA,
Single RS-232 Transceiver with AutoShutdown™

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX220CPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP
MAX220CSE	0°C to +70°C	16 Narrow SO
MAX220CWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MAX220C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX220EPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP
MAX220ESE	-40°C to +85°C	16 Narrow SO
MAX220EWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO
MAX220EJE	-40°C to +85°C	16 CERDIP
MAX220MJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP

Ordering information continued at end of data sheet
*Contact factory for dice specifications.

Selection Table

Part Number	Power Supply (V)	No. of RS-232 Drivers/Rx	No. of Ext. Caps	Nominal Cap. Value (µF)	SHDN & Three-State	Rx Active in SHDN	Data Rate (kbps)	Features
MAX220	+5	2/2	4	0.347/0.33	No	—	120	Ultra-low-power, industry-standard pinout
MAX222	+5	2/2	4	0.1	Yes	—	200	Low-power shutdown
MAX223 (MAX213)	+5	4/4	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	MAX241 and receivers active in shutdown
MAX225	+5	5/5	0	—	Yes	✓	120	Available in SO
MAX230 (MAX200)	+5	5/4	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	5 drivers with shutdown
MAX231 (MAX201)	+5 and +7.5 to +13.2	2/2	2	1.0 (0.1)	No	—	120	Standard +5/+12V or battery supplies, same functions as MAX232
MAX232 (MAX202)	+5	2/2	4	1.0 (0.1)	No	—	120 (164)	Industry standard
MAX232A	+5	2/2	4	0.1	No	—	200	Higher slow rate, small caps
MAX233 (MAX203)	+5	2/2	0	—	No	—	120	No external caps
MAX233A	+5	2/2	0	—	No	—	200	No external caps, high slow rate
MAX234 (MAX204)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Replaces 1488
MAX235 (MAX205)	+5	5/5	0	—	Yes	—	120	No external caps
MAX236 (MAX206)	+5	4/3	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	Shutdown, three state
MAX237 (MAX207)	+5	5/3	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Compliant IBM PC serial port
MAX238 (MAX208)	+5	4/4	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Replaces 1488 and 1489
MAX239 (MAX209)	+5 and +7.5 to +13.2	3/5	2	1.0 (0.1)	No	—	120	Standard +5/+12V or battery supplies, single-package solution for IBM PC serial port
MAX240	+5	5/5	4	1.0	Yes	—	120	DIP or flatpack package
MAX241 (MAX211)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	Complete IBM PC serial port
MAX242	+5	2/2	4	0.1	Yes	✓	200	Separate shutdown and enable
MAX243	+5	2/2	4	0.1	No	—	200	Open-line detection simplifies cabling
MAX244	+5	5/10	4	1.0	No	—	120	High slow rate
MAX245	+5	5/10	0	—	Yes	✓	120	High slow rate, int. caps, two shutdown modes
MAX246	+5	5/10	0	—	Yes	✓	120	High slow rate, int. caps, three shutdown modes
MAX247	+5	5/5	0	—	Yes	✓	120	High slow rate, int. caps, nine operating modes
MAX248	+5	5/5	4	1.0	Yes	✓	120	High slow rate, selective half-chip enables
MAX249	+5	5/10	4	1.0	Yes	✓	120	Available in quad flatpack package



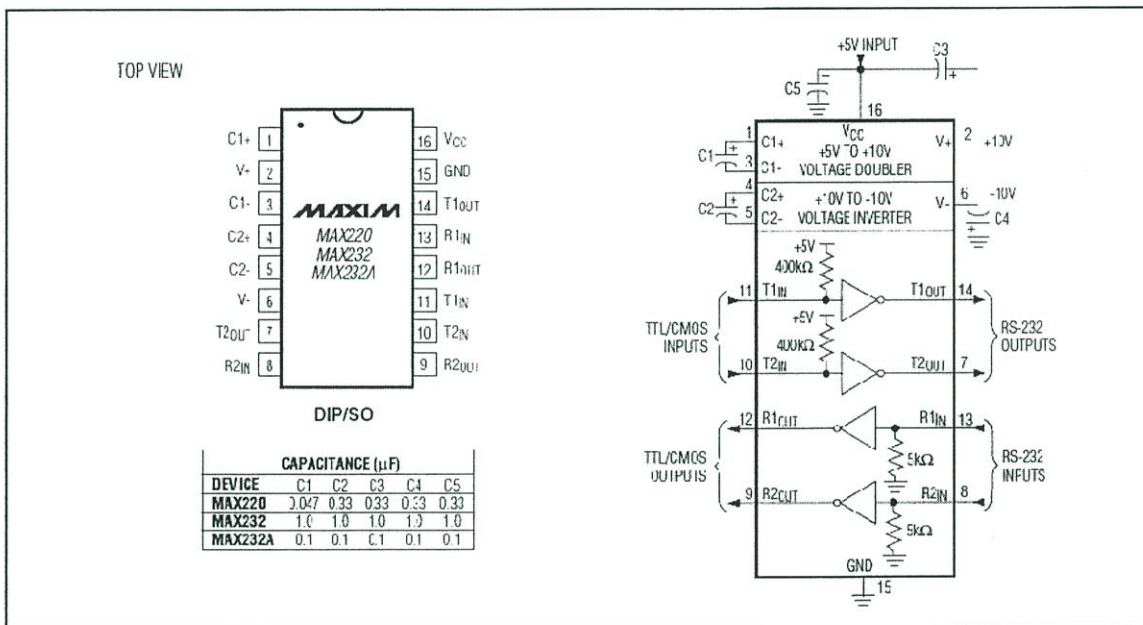
Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

รูปที่ ก.3 แสดงมาตรฐานอุปกรณ์ MAX232CPE (รูปที่ 1)

MAX220-MAX249

+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers



MAX220-MAX249

Figure 5. MAX220/MAX232/MAX232A Pin Configuration and Typical Operating Circuit

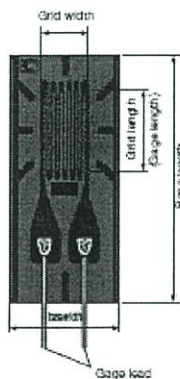
รูปที่ ค.4 แสดงมาตรฐานอุปกรณ์ MAX232CPE (รูปที่ 2)

ค.1.3 มาตรฐานสเตรนเกจ KFG-2-120-C1-11



Strain Gages for General Stress Measurement

General-purpose Foil Strain Gages in KFG Series



The KFG series gages use polyimide resin for the base approximately 13 μm thick, ensuring excellent flexibility. Besides indoor measurement, the outstanding moisture resistance lets them effectively perform outdoor measurement. Unless directly exposed to waterdrops, no coating treatment is required.

Applicable Adhesives and Operating Temperature Range after Curing

- CC-33A (-150-120°C (-10 to 80°C with vinyl-coated cable attached)
- CC-85 (-80-120°C (-10 to 80°C with vinyl-coated cable attached)
- CC-90 (-80-100°C (-10 to 80°C with vinyl-coated cable attached)
- EP-34B (-55-150°C (-10 to 80°C with vinyl-coated cable attached)
- PC-600 (-100-150°C (-10 to 80°C with vinyl-coated cable attached)

Notes on pre-attached leadwire cables

- Standard color of the 2-wire cable pre-attached to uniaxial gages is red (R). If desired, a white, green, yellow or black cable can be pre-attached.
- Standard 3-wire cable pre-attached to uniaxial gages has red stripes. If desired, the red stripes can be changed to blue or yellow stripes.
- In the case of a triaxial gage, 2-wire cables are color-coded with red, white and green stripes for 0°, 90° and 45°, respectively and 3-wire cables, with red, yellow and blue stripes for 0°, 90° and 45°, respectively. The latter code is S in common.

Types, lengths and codes of leadwire cables pre-attached to KFG series gages

Type	Polyester-coated 2-wire copper cable		Polyester-coated 3-wire copper cable		Vinyl-coated flat 2-wire cable		Vinyl-coated flat 3-wire cable		Middle-temperature 2-wire cable	Middle-temperature 3-wire cable
	C1,C2,C3, C15,C16, D1,C2,D1,D4, D6,D9,D16, D17,D18,D19, D20,D21	C15,C16, D1,D4, D16,D17	C1,C2,C3, C15,C16, D6,D19	D1,D4, D16,D17, D20,D21, D22	C1,C2,C3, C15,C16, D6,D9,D19, D21	D1,D4, D16,D17, D20,D22	C1,C2,C3, C15,C16, D1,D4,D6, D16,D17,D19, D20,D22	C1,C2,C3, C15,C16, D1,D2,D4,D6, D16,D17,D19, D20,D21,D22		
Length										
5 cm	N5C2	N5C3								
3	N3C2	N3C3								
4	N4C2	N4C3								
5	N5C2	N5C3								
10	N10C2	N10C3								
15	N15C2	N15C3	L15C2R	L15C2S	L15C2R	L15C2S	L15C2R	L15C2S	R15C2	R15C3
30	N30C2	N30C3	L30C2R	L30C2S	L30C2R	L30C2S	L30C2R	L30C2S	R30C2	R30C3
90	N90C2	N90C3	L90C2R	L90C2S	L90C2R	L90C2S	L90C2R	L90C2S	R90C2	R90C3
5 m	N5M2	N5M3	L5M2R	L5M2S	L5M2R	L5M2S	L5M2R	L5M2S	R5M2	R5M3
3			L3M2R	L3M2S	L3M2R	L3M2S	L3M2R	L3M2S	R3M2	R3M3
4			L4M2R	L4M2S	L4M2R	L4M2S	L4M2R	L4M2S	R4M2	R4M3
5			L5M2R	L5M2S	L5M2R	L5M2S	L5M2R	L5M2S	R5M2	R5M3
6			L6M2R	L6M2S	L6M2R	L6M2S	L6M2R	L6M2S	R6M2	R6M3
7			L7M2R	L7M2S	L7M2R	L7M2S	L7M2R	L7M2S	R7M2	R7M3
8			L8M2R	L8M2S	L8M2R	L8M2S	L8M2R	L8M2S	R8M2	R8M3
9			L9M2R	L9M2S	L9M2R	L9M2S	L9M2R	L9M2S	R9M2	R9M3
10			L10M2R	L10M2S	L10M2R	L10M2S	L10M2R	L10M2S	R10M2	R10M3
15			L15M2R	L15M2S	L15M2R	L15M2S	L15M2R	L15M2S	R15M2	R15M3
30			L30M2R	L30M2S	L30M2R	L30M2S	L30M2R	L30M2S	R30M2	R30M3
90			L90M2R	L90M2S	L90M2R	L90M2S	L90M2R	L90M2S	R90M2	R90M3
30m			L30M2R	L30M2S	L30M2R	L30M2S	L30M2R	L30M2S	R30M2	R30M3
Operating temp.	-150 to 120°C		-150 to 120°C		-10 to 80°C		-10 to 80°C		100-150°C	100-150°C
Remarks	Need to be cured in dry air or vacuum		L: L.P for 6 m or longer		L: L, 1: 10 for 5 m or longer		L: L		L: L	L: L

When ordering, suffix the leadwire cable code to the model number with a space in between.

Examples

- KFG-5-120-C1-11 N10C3 for the gage with a polyester-coated 2-wire copper cable 10 cm long
- KFG-5-120-C1-11 L5M2R for the gage with a vinyl-coated flat 2-wire cable 5 m long
- KFG-5-120-D17-11 L5M3S for the gage with a vinyl-coated flat 3-wire cable 5 m long
- KFG-5-120-C1-11 R5M3 for the gage with a middle-temperature 3-wire cable 5 m long
- KFG-5-120-D17-11 R5M2 for the gage with a middle-temperature 2-wire cable 5 m long

If no leadwire cable code is suffixed, the gage is delivered with gage leads only (silver-clad copper wires 25 mm long)

For the types of leadwire cables, refer to page 4-17.]

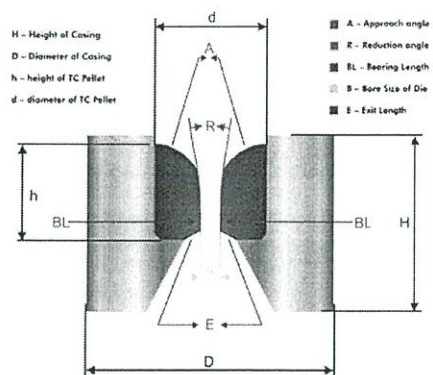
รูปที่ ค.5 แสดงมาตรฐานสเตรนเกจ (รูปที่ 1)

Pattern, Gage Resistance, Gage Factor	Model	Corresponds to the Material Base color	Dimensions (mm)				Remarks
			Grid		Base		
			Length	Width	Length	Width	
Uniaxial Silver clad copper gage leads 25mm long Resistance: 120Ω, Gage factor: Approx. 2.1 <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> ● Common steel ● Stainless steel ● Aluminum ● Magnesium alloy <p style="font-size: small;">[Note: Expansion coefficient based on the base color to be gaged]</p> </div>							
KFG-30-120-C1 Figure 3-KFG-30-120-C1-11	KFB-30-120-C1-11	●	30	3.3	27	5.2	
	KFB-30-120-C1-10	●					
	KFB-30-120-C1-23	●					
	KFB-30-120-C1-27	●					
KFG-20-120-C1 Figure 2-KFG-20-120-C1-10	KFB-20-120-C1-11	●	20	5	28	8	
	KFB-20-120-C1-16	●					
	KFB-20-120-C1-23	●					
	KFB-20-120-C1-27	●					
KFG-10-120-C1 Figure 1-KFG-10-120-C1-23	KFB-10-120-C1-11	●	10	3	16	5.2	
	KFB-10-120-C1-16	●					
	KFB-10-120-C1-23	●					
	KFB-10-120-C1-27	●					
KFG-6-120-C1 Figure 6-KFG-6-120-C1-27	KFB-6-120-C1-11	●	6	1.7	10	3.4	
	KFB-6-120-C1-16	●					
	KFB-6-120-C1-23	●					
	KFB-6-120-C1-27	●					
KFG-5-120-C1 Figure 5-KFG-5-120-C1-11	KFB-5-120-C1-5	○	For lumber				
	KFB-5-120-C1-11	●	5	1.4	8.4	2.8	
	KFB-5-120-C1-16	●					
	KFB-5-120-C1-23	●					
KFB-5-120-C1-27	●						
KFG-4N-120-C1 Figure 4N-KFG-4N-120-C1-16	KFB-4N-120-C1-11	●	4	0.7	8	1.4	
	KFB-4N-120-C1-10	●					
	KFB-4N-120-C1-23	●					
	KFB-4N-120-C1-27	●					
KFG-3-120-C1 Figure 3-KFG-3-120-C1-23	KFB-3-120-C1-11	●	3	1.3	7.4	2.8	
	KFB-3-120-C1-16	●					
	KFB-3-120-C1-23	●					
	KFB-3-120-C1-27	●					
KFG-2-120-C1 Figure 2-KFG-2-120-C1-27	KFB-2-120-C1-5	○	For lumber				
	KFB-2-120-C1-11	●	2	1.2	6.3	2.8	
	KFB-2-120-C1-16	●					
	KFB-2-120-C1-23	●					
KFB-2-120-C1-27	●						
KFG-2N-120-C1 Figure 2N-KFG-2N-120-C1-11	KFB-2N-120-C1-11	●	2	0.64	6.3	1.4	
	KFB-2N-120-C1-10	●					
	KFB-2N-120-C1-23	●					
	KFB-2N-120-C1-27	●					
KFG-1-120-C1 Figure 1-KFG-1-120-C1-16	KFB-1-120-C1-11	●	1	1.1	4.8	2.4	
	KFB-1-120-C1-16	●					
	KFB-1-120-C1-23	●					
	KFB-1-120-C1-27	●					
KFG-1N-120-C1 Figure 1N-KFG-1N-120-C1-23	KFB-1N-120-C1-11	●	1	0.66	4.2	1.4	
	KFB-1N-120-C1-10	●					
	KFB-1N-120-C1-23	●					
	KFB-1N-120-C1-27	●					
KFG-03-120-C1 Figure 3-KFG-03-120-C1-27	KFB-03-120-C1-11	●	0.3	1.4	3.6	2.4	
	KFB-03-120-C1-16	●					
	KFB-03-120-C1-23	●					
	KFB-03-120-C1-27	●					
KFG-02-120-C1 Figure 2-KFG-02-120-C1-11	KFB-02-120-C1-11	●	0.2	1.4	3.3	2.4	
	KFB-02-120-C1-16	●					
	KFB-02-120-C1-23	●					
	KFB-02-120-C1-27	●					

Minimum quantity 10 pieces

รูปที่ ค.6 แสดงมาตรฐานสแตนเกจ (รูปที่ 2)

ค.2 มาตรฐานแม่พิมพ์



รูปที่ ค.7 ขนาดของแม่พิมพ์ดิ่งลวดกลม ตามมาตรฐาน JIS B4111

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของคาร์ไบด์ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในการทดสอบ ตามมาตรฐานคาร์ไบด์เกรด K20(ISO Code) อ้างอิงตามมาตรฐาน บริษัท ยูไนเต็ด ทังสแตน แอนด์ ไดมอนด์ จำกัด (United Tungsten & Diamond Co.,LTD) ผู้ผลิตแม่พิมพ์ลวด

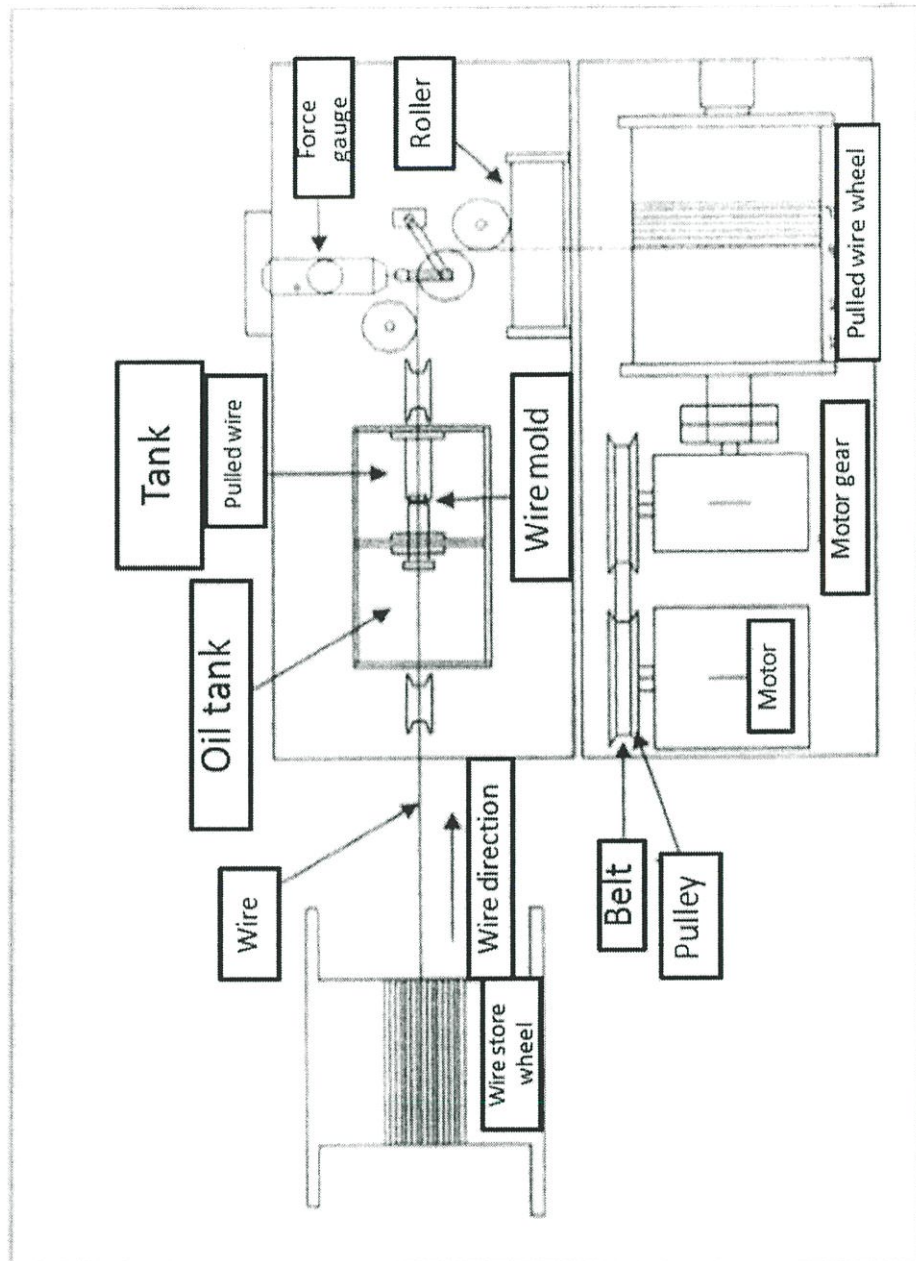
คุณสมบัติ	ค่า
Hardness(HRA)	91.5-92.4
TRA(KPIS)	>240
T.R.S($\frac{Kg}{mm^2}$)	200
Density($\frac{g}{cc}$)	14.80-15.10

ตารางที่ ค.2 ขนาดมาตรฐาน JIS B4111 ของแม่พิมพ์ดีดกลึง

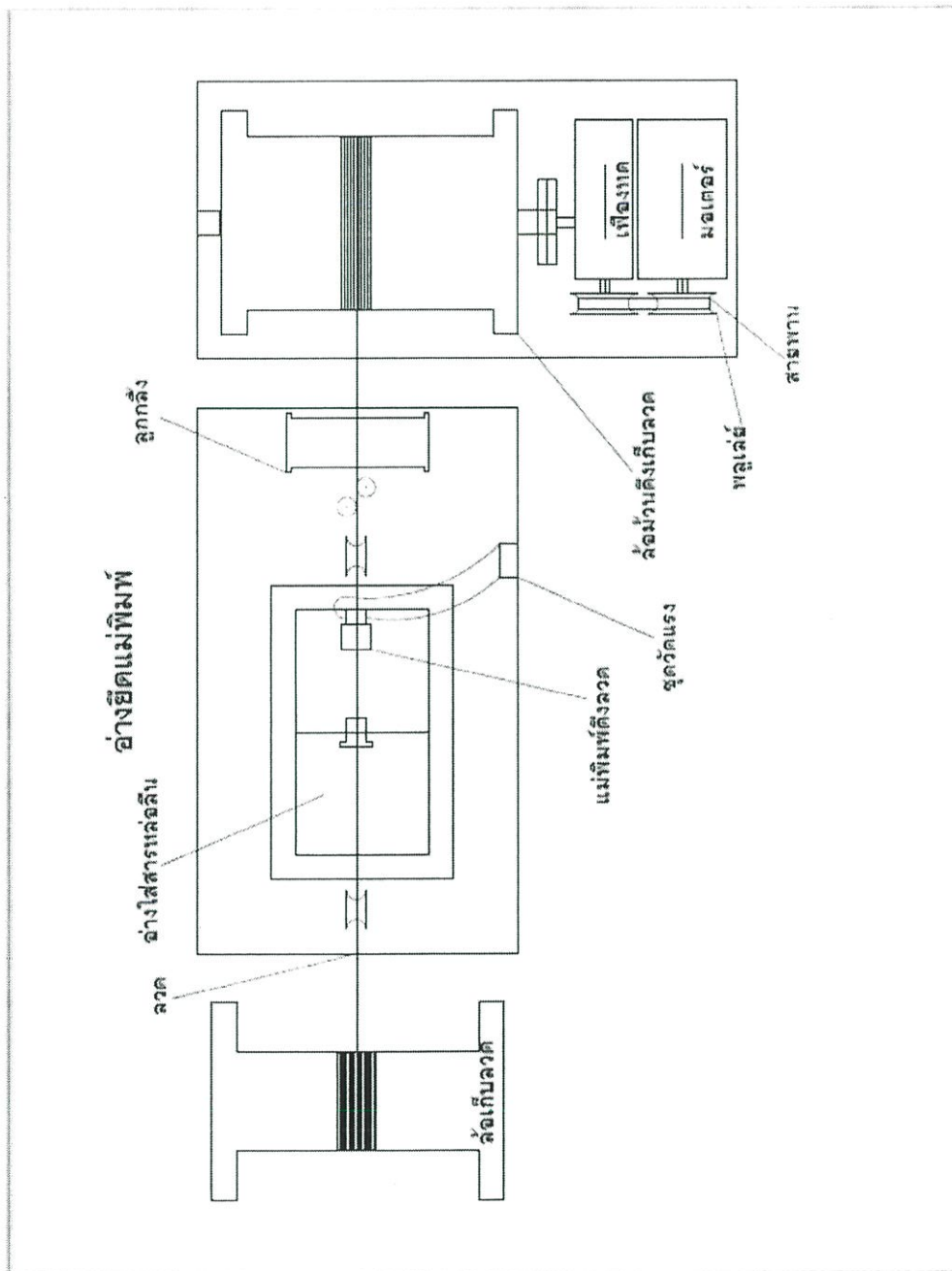
ชนิด	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางรูใน B มม.	Steel Case		Carbide Nib	
		D	H	d	h
		มม.	มม.	มม.	มม.
W102	0.7-1.5	24	12	9	6
W103	1.5-2.5	30	15	12	8
W104	2.5-4	42	20	15	1
W105	4-6	55	24	20	14
W106	6-8	60	28	25	18
W107	8-10	70	35	30	22
W108	10-13	85	40	35	25
W109	13-16	100	45	40	27
W110	16-20	125	50	50	30
W111	20-26	145	60	90	35
W112	26-32	175	70	70	40
W113	32-36	195	80	80	45
W114	38-46	215	96	90	50
W115	46-54	230	90	100	50
W116	54-64	240	90	110	50
W117	64-74	260	100	120	50
W118	74-84	280	100	130	50
W119	84-94	300	100	140	50
W120	94-100	300	100	150	50

ภาคผนวก ง.

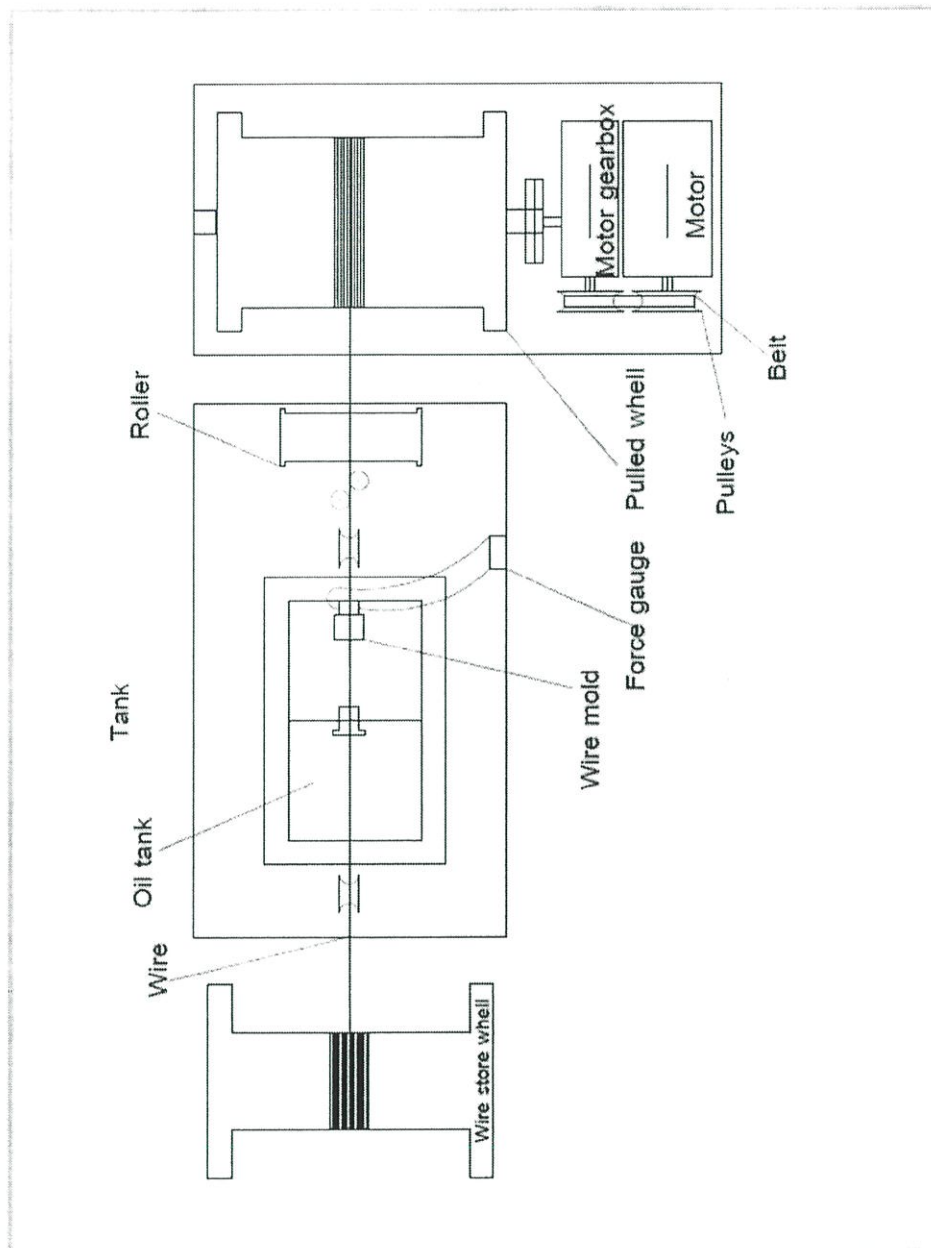
การออกแบบเส้นทางการเดินขึ้นรูปลวดแบบเก่าเปรียบเทียบกับเส้นทางการเดินลวดแบบใหม่
และการออกแบบโปรแกรมอ่านค่าแรงดึงขึ้นรูปลวด (Labview)



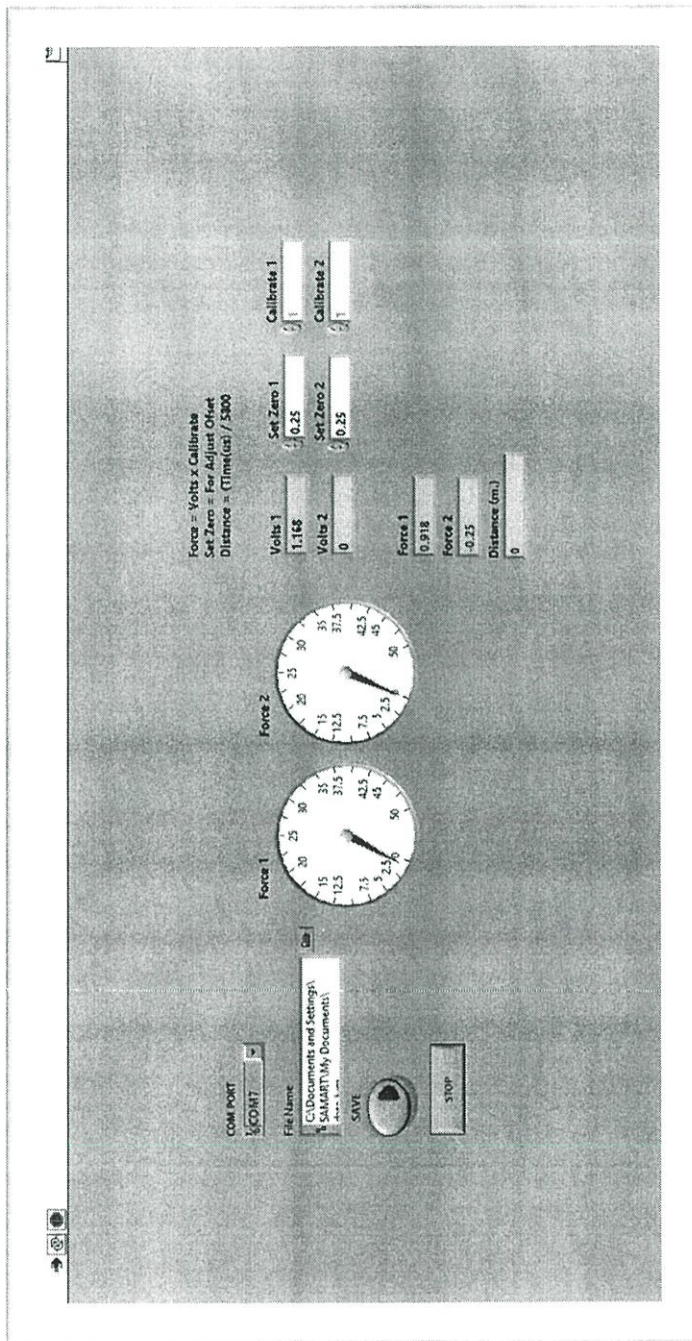
รูปที่ ง.1 รูปแสดงชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องดึงขึ้นรูปลวดแบบเก่า



รูปที่ ๒.๒ รูปแสดงชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องตั้งลวดแบบใหม่ (รูปที่ ๑)



รูปที่ ๓.3 รูปแสดงชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องดัดขึ้นรูปลวดใหม่ (รูปที่ 2)



รูปที่ ๓.๔ รูปแสดงการออกแบบโปรแกรม Labview

ภาคผนวก จ.
บทความประกอบวิชาโครงการ

การพัฒนาเครื่องดึงขึ้นรูปลวด

THE DEVELOPMENT OF WIRE DRAWING MACHINE

ธนาคาร หนูเสน 53010676, ธนานันท์ โชคชัยวรารัง 53010680 และ นววิทย์ภาวโน 53010822

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

(อ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ)

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเน้นการดึงขึ้นรูปลวดผ่านน้ำมันหล่อลื่น ให้เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดสามารถวัดแรงที่กระทำต่อลวดขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปลวดได้เพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดให้สามารถวิเคราะห์ค่าแรงที่กระทำขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปลวด เพื่อลดปัญหาด้านการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวดและเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการดึงขึ้นรูปลวดให้สูงขึ้นโดยสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ การปรับแรงที่กระทำในการดึงขึ้นรูปลวดโดยทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 แม่พิมพ์การดึงลวดทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ลักษณะรูปร่างมาตรฐาน JIS B4111

Abstract

The purpose of this project is to develop wire drawing testing machine focusing on lubrication. The wire drawing testing machine can measure the force on the wire. Analysis the force at the time of the wire drawing. Which is able to decrease die wear and improve the performance of cold wire drawing process by introducing various lubricants. Modifying the force can be done by Stainless steel wire pulling (SUS304) and wire drawing dies made from tungsten carbide. Shapes standard (JIS B4111)

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

อุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพราะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีความสวยงามทนการกัดกร่อนได้สูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในอุตสาหกรรมต่างๆจึงได้นำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุทำผลิตภัณฑ์ต่อ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในการผลิตลวดที่มีความเที่ยงตรงสูงจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ดึงลวดที่มีการสึกหรอที่ต่ำ เช่น แม่พิมพ์ที่ทำจากเพชร แต่ด้วยเหตุผลด้านต้นทุนการผลิตที่สูงมากในอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไปจึงใช้แม่พิมพ์ดึงลวดทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ แต่แม่พิมพ์ดึงลวดทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ยังเกิดปัญหาการสึกหรอที่สูงส่งผล

ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแม่พิมพ์เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ลวดความเที่ยงตรงสูงและยังพบปัญหาด้านคุณภาพผิวที่หยาบเนื่องจากการเชื่อมติด (Adhesion) ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่รูแม่พิมพ์ทำให้ลวดที่เคลื่อนที่ผ่านถูกขูดเป็นรอยในการซ่อมแซมจะต้องหยุดกระบวนการและทำการขจัดตายเป็นระยะ ซึ่งทำให้รูในมีขนาดผิดพลาดไปหรืออาจต้องเปลี่ยนแม่พิมพ์ดึงลวดทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจึงได้มีการผลิตเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดขึ้น แต่ในเครื่องตัวเดิมนั้นไม่สามารถวัดแรงในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปลวดได้ซึ่งปัจจัยทั้งสองเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดึงขึ้นรูปลวดเช่นกัน จึงมีความจำเป็นต้องแก้ไขปัญหานี้โดยการศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด เพื่อใช้ศึกษาการลดการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงลวด เหล็กกล้าไร้สนิม ลวดที่ดึงมีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดสำเร็จที่ถูกต้องแม่นยำขึ้นโดยทำการปรับปรุงสถานะกระบวนการผลิตด้วยการศึกษาแรงที่กระทำในการดึงขึ้นรูปลวด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ทดสอบและศึกษาตัวเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด ซ่อมแซมเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดให้สามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติ

1.3.2 ติดตั้งชุดวัดแรงของลวดในเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดแบบดึงขึ้นรูปครั้งเดียวใช้ระบบมอเตอร์เป็นชุดต้นกำลัง

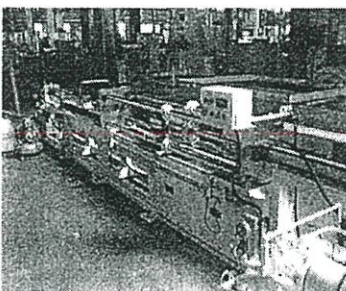
2. การดึงขึ้นรูปลวด

2.1 เครื่องดึงลวด

การแบ่งประเภทของเครื่องดึงลวดจะแบ่งตามระบบต้นกำลังการดึงของเครื่องและระดับการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวด ซึ่งประเภทของเครื่องดึงลวดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ [1]

2.1.1. เครื่องดึงลวดแบบเครื่องดรอเบ็นซ์(Draw Bench)

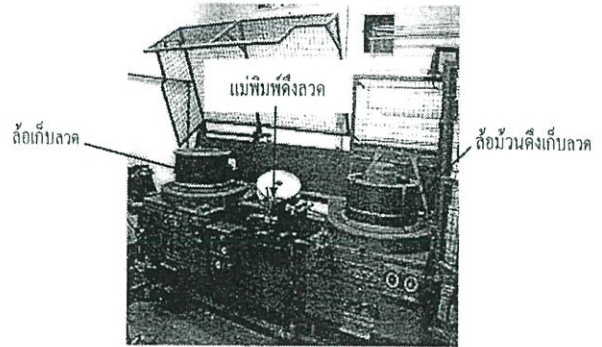
ระบบต้นกำลังของเครื่องดรอเบ็นซ์จะใช้ระบบไฮดรอลิกส์ สามารถดึงได้ทั้งการดึงลวดและการดึงท่อ ความสามารถของเครื่องจะให้อัตราส่วนการลดหน้าตัดได้สูงและเหมาะกับการดึงลวดขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 2.1 เครื่องดึงลวดแบบดรอเบ็นซ์

2.1.2. แบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการดึง

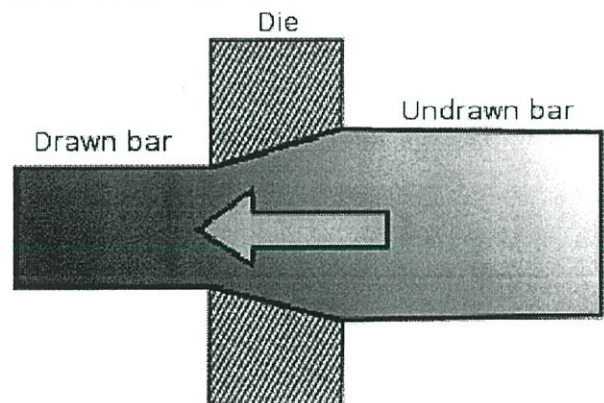
เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)



รูปที่ 2.2 เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว [2]

เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียวดังรูปที่ 2.2 ส่วนมากจะทำการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดเพียงตัวเดียวและจะใช้อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่ต่ำ โดยล้อม้วนดึงเก็บจะมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังเพียงตัวเดียว

2.2 กระบวนการดึงลวด



รูปที่ 2.4 การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

หลักการทั่วไปของการดึงลวดและการดึงท่อจะมีพื้นฐานคล้ายกัน แต่จะต่างกันออกไปตรงขนาดและรูปร่างหลังการดึง กระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำวัสดุที่เป็นท่อนหรือลวดหลังจากผ่านการขึ้นรูปร้อนมาดึงลดขนาดโดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ดังรูปที่ 2.4 ผลผลิตจากการดึงลวดจะมีรูปร่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรูปทรงรูของแม่พิมพ์ดึงลวด ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงหกเหลี่ยม รูปทรงอื่นๆที่ซับซ้อนขึ้น แต่ขีดจำกัดของรูปทรงที่สามารถขึ้นรูปได้จริงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ

วัสดุของแต่ละชนิด กรรมวิธีการดึงลวดเริ่มจากการนำลวดมาทำความสะอาดเพื่อขจัดผิวที่เกิดออกไซด์ก่อน ซึ่งหากผิวที่เกิดออกไซด์หลุดออกจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวแม่พิมพ์ดึงลวดและส่งผลให้เกิดการสึกหรอ การดึงเริ่มต้นโดยให้แรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของลวดด้วยชุดกำลังรูปร่างของลวดจะถูกกำหนดด้วยขนาดรูในของแม่พิมพ์เป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ (Plastic Deformation) ระดับของการดึงลวดเมื่อแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด [3] จะมีตั้งแต่การดึงลวดลวดขนาดใหญ่ $D_o = 4.2$ ถึง 16 มิลลิเมตรการดึงลวดขนาดกลาง $D_o = 1.6$ ถึง 4.2 มิลลิเมตรการดึงลวดขนาดเล็ก $D_o = 0.7$ ถึง 1.6 มิลลิเมตรการดึงลวดขนาดเล็ก (Fine Wire) D_o น้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตรการดึงลวดขนาดเล็กมากสามารถดึงได้เล็กสุด 0.03 มิลลิเมตรแต่ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) การหล่อลื่นในกระบวนการดึงจะมีทั้งของเหลวและของแข็ง ของเหลวได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นต่างๆ ส่วนการใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง ได้แก่ กราไฟท์(Graphite) ระบบการหล่อลื่นจะมีทั้งการหยด การพ่น แม่พิมพ์อยู่ในสารหล่อลื่น และลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่น การดึงลวดแบบอุ่น (Warm Drawing)[4] เป็นกรรมวิธีหนึ่งซึ่งช่วยในการดึงขึ้นรูปลวดที่มีความแข็งแรงมากและดึงขึ้นรูปยากเป็นกระบวนการดึงลวดโดยเพิ่มความร้อนให้กับวัสดุหรือแม่พิมพ์ดึงลวดจนลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 200-500 องศาเซลเซียสแต่ต่ำกว่าจุดการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุ ทำให้ผิวภายนอกของลวดมีความแข็งแรงลดลงแต่ภายในลวดความแข็งแรงยังคงเดิมอยู่ ลวดที่ผ่านการดึงมาจะเกิดความเครียดสูง (Strain Hardening) มากขึ้นและมีความแข็งแรงล้าของวัสดุ (Fatigue Strength) สูงขึ้น งานที่ทำการการขึ้นรูปอุ่นได้แก่ ลวดสปริง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ หรือลวดที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้นส่วนกระบวนการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass Wire Drawing) จะเป็นการดึงลวดขนาดในช่วงสุดท้ายเพื่อได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จที่มีความเรียบผิวดี การดึงลักษณะนี้จะมีอัตราการลดหน้าตัดของลวดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์

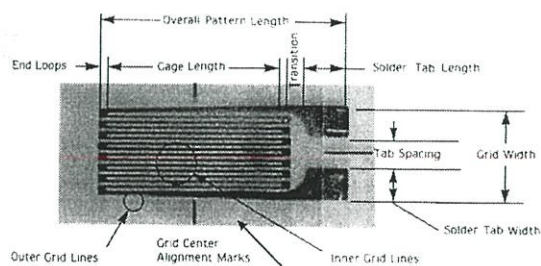
3.1 สเตรนเกจ (Strain Gage)

สเตรนเกจเป็นตัววัดความเครียดของชิ้นงานโดยใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวดที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้ สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่นการวัดน้ำหนัก, ความดัน, แรงเชิงกลหรือการเคลื่อนที่ (Displacement) สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือแบบยึดติด(Bounded Strain Gage) และแบบไม่ยึดติด (Unbounded Strain Gage) ซึ่งสเตรนเกจทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือทำด้วยเส้นลวดเล็กๆขดไปขดมาและนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียดดังแสดงในรูปภาพที่ 3.1 เมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออกความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลงผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด

3.1 ค่าเกจแฟคเตอร์(Gage Factor) การใช้สเตรนเกจในการตรวจวัดค่าความเครียดวัตถุนั้นเราจะพิจารณาปริมาณทางกายภาพสองสิ่งคือค่าความต้านทาน (Gage Resistance) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าของความยาวที่เปลี่ยนแปลงซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนที่เรียกว่าเกจแฟคเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$S_g = \frac{dR/R}{\epsilon_a} \quad (3.1)$$

โดยที่ S_g คือค่าเกจแฟคเตอร์



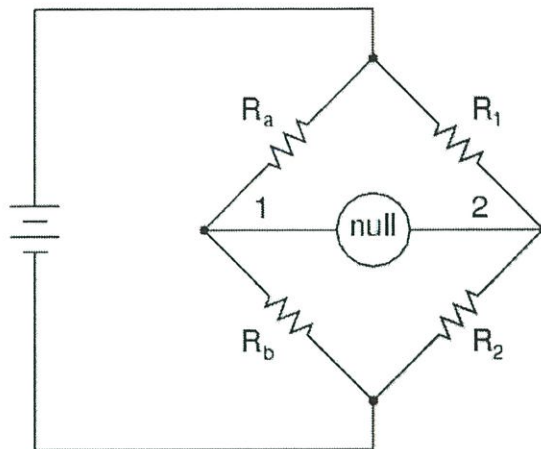
รูปที่ 3.1 เกจวัดความเครียด

3.2 วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Bridge)

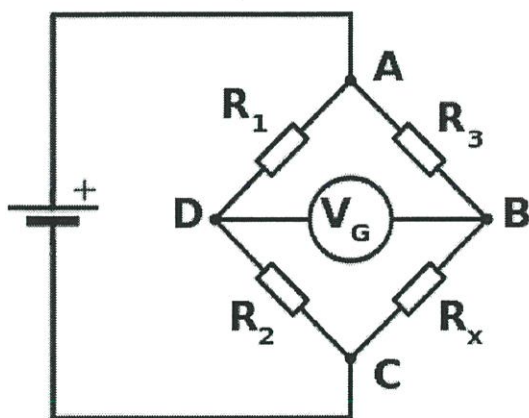
วงจบริดจ์เป็นเครื่องมือที่ทำขึ้นจากการวัดเปรียบเทียบใช้อย่างกว้างขวางในการวัดความต้านทานความเหนี่ยวนำและอิมพีแดนซ์

3.2.1 บริดจ์แบบวงจรวีตสโตน (Wheatstone Bridge)

บริดจ์แบบวงจรวีตสโตนจะประกอบด้วยส่วนของความต้านทาน 2 ส่วนขนานกันแต่ละส่วนจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรมกันโดยทั่วไปมักใช้ความต้านทานส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงซึ่งจะต่อคร่อมระหว่าง 2 ส่วนนี้เพื่อจ่ายกระแสไหลผ่านความต้านทานดังกล่าวและส่วนของอุปกรณ์ชี้ค่าศูนย์ที่ใช้โดยทั่วไปมักเป็นกัลวานอมิเตอร์(Galvanometer) จะต่ออยู่กับระหว่างกลางของ 2 ส่วนที่ขนานกันเพื่อตรวจจับสภาวะสมดุล (Balance) แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3แสดงวงจบริดจ์สภาวะสมดุล 10



รูปที่ 3.2แสดงวงจบริดจ์แบบวีตสโตน

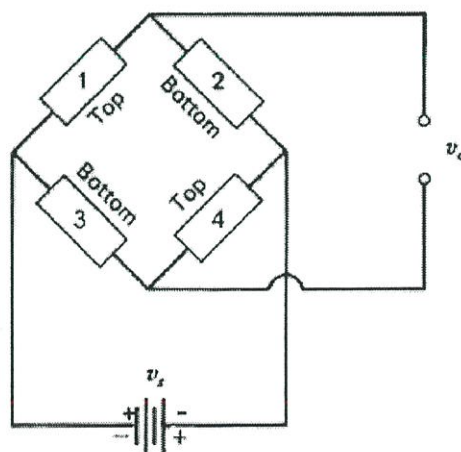
3.2.2 บริดจ์สภาวะสมดุล(Balanced Wheatstone Bridge)

ขณะที่บริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุลจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ทำให้เข็มของเครื่องวัดชี้ที่เลขศูนย์ตามที่แสดงในรูป3.3จากสภาวะสมดุลของวงจบริดจ์เราจะได้สมการการคำนวณหาความต้านทานเป็นไปตามสมการที่ 3.2

$$R4 = R2R3/R1 \tag{3.2}$$

3.3วงจรสเตรนเกจและวงจรวีตสโตนบริดจ์

ในการวัดค่าความเครียดโดยใช้สเตรนเกจนั้นนิยมใช้คู่กับวงจรวีตสโตนบริดจ์เพื่อความแม่นยำในการวัดค่าของความต้านทานที่เปลี่ยนไปซึ่งมีค่าน้อยมาก พร้อมทั้งยังสามารถแปลงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของสเตรนเกจไปเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งเราสามารถติดตั้งสเตรนเกจตามตำแหน่งในวงจรวีตสโตนบริดจ์ตามรูปที่ 3.4 เพื่อให้สามารถวัดค่าความเครียดได้ตามที่เราต้องการ



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจในวงจรวีตสโตนบริดจ์

3.3.1 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจโดยเมื่อติดตั้งสเตรนเกจหนึ่งตัวจะเป็นไปตามสมการที่ 3.3

$$\frac{\partial V_0}{V_S} = \frac{S_g \varepsilon}{4+2S_g} \approx \frac{S_g \varepsilon}{4} \quad (3.3)$$

และเมื่อทำการติดตั้งสเตรนเกจหลายตัวจะสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\frac{\partial V_0}{V_S} = K \frac{S_g \varepsilon}{4+2S_g} \approx K \frac{S_g \varepsilon}{4} \quad (3.4)$$

เมื่อ

S_g คือค่าเกจแฟคเตอร์

V_S คือค่าแรงดันไฟเลี้ยง

K คือค่าที่วงจรมีได้จากสมการที่ 3.5

$$K = f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \quad (3.5)$$

3.5 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analogue to Digital Converter)

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องการเชื่อมโยงกันระหว่างสัญญาณอนาลอกและสัญญาณดิจิทัลเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆเช่นการตรวจจับสัญญาณแสงความร้อนและอุณหภูมิความเร็วตำแหน่ง ฯลฯ ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับต่างๆซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ทำหน้าที่แปลงปริมาณทางฟิสิกส์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากล่าวสั้นๆคือแปลงปริมาณทางฟิสิกส์เป็นแรงดันไฟฟ้าเช่นตัวแปลงสัญญาณอุณหภูมิเป็นแรงดันสามารถแปลงอุณหภูมิ 1 ต่อ 10 mV หรือตัวตรวจจับความเร็วรอบสามารถแปลงความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นแรงดัน 100 mV เป็นต้นตัวตรวจจับเหล่านี้ให้ปริมาณแรงดันไฟฟ้าออกมาแรงดันไฟฟ้านี้คือสัญญาณอนาลอกซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่ตรวจจับได้สัญญาณเหล่านี้เมื่อนามาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องมีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลเพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลได้ดังแสดงในรูปภาพ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงระบบดิจิทัลเชื่อมต่อกับสัญญาณอนาลอก

4. ขอบเขตการวิจัย

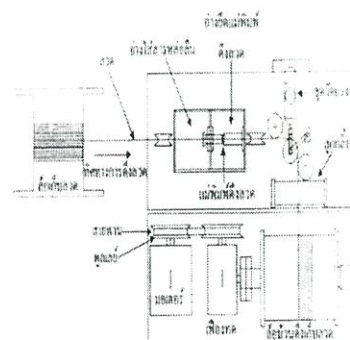
ทดสอบและศึกษาตัวเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปหลอด ซ่อมแซมเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปหลอดให้สามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติ

ติดตั้งชุดวัดแรงของหลอดในเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปหลอดแบบดึงขึ้นรูปครั้งเดียวใช้ระบบมอเตอร์เป็นชุดต้นกำลัง

5. วิธีการดำเนินโครงการ

โครงการนี้เป็นงานพัฒนาเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปหลอดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โดยการดึงผ่านน้ำมันหล่อลื่น เป็นกระบวนการดึงหลอดแบบขั้นเดียว ศึกษาที่ขั้นตอนการดึงขั้นสุดท้าย ให้สามารถวัดแรงกระทำในขณะที่ขึ้นรูปหลอด ประกอบไปด้วย

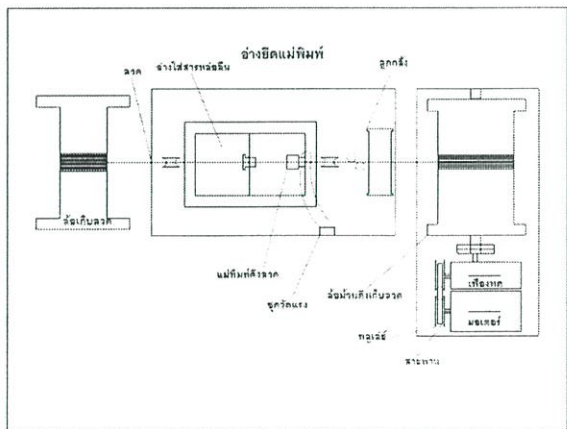
5.1 ศึกษาและซ่อมแซมเครื่องดึงหลอดแบบขั้นตอนเดียว (Single Stepped Wire Drawing) จากงานวิจัยเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปหลอด (Wire Drawing Testing Machine) ที่ต้องการพัฒนาโดยงานวิจัยเก่าการออกแบบเครื่องจะออกแบบตามแบบที่ใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงหลอดเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 5.1 เครื่องดึงหลอดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในงาน (แบบเก่า)

เครื่องดิ่งลวดแบบการดิ่งขึ้นเดียว อัตราความเร็วในการดิ่งลวด 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที ต้นกำลังในการดิ่งลวดใช้ระบบมอเตอร์เป็นต้นกำลังผ่านชุดเฟืองทดเพื่อทดรอบให้ช้าลง และลวดจะถูกเก็บด้วยล้อม้วนดิ่ง ในขณะเดียวกันก็จะม้วนเก็บลวดไปด้วย ล้อม้วนดิ่งลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 290 มิลลิเมตร ระบบการหล่อลื่นของเครื่องดิ่งลวดจะกำหนดให้ลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่นแล้วเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อลดขนาด ชุดหล่อลื่นจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อ่างสำหรับยัดแม่พิมพ์ดิ่งลวด เป็นส่วนที่ใช้ยัดแม่พิมพ์ดิ่งลวดให้อยู่กับที่ ซึ่งจะใช้สกรูสำหรับยัดแม่พิมพ์ดิ่งลวดเพื่อสามารถทำการถอดเปลี่ยนได้และอีกส่วนคือ อ่างสำหรับใส่น้ำมันหล่อลื่น ในส่วนนี้จะใส่น้ำมันหล่อลื่นให้เต็มอ่างเพื่อทำการหล่อลื่นให้มีประสิทธิภาพ ขณะทำการดิ่งเส้นลวดจะจมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นและไหลเข้าสู่ทางเข้าแม่พิมพ์ดิ่งลวดพร้อมกัน

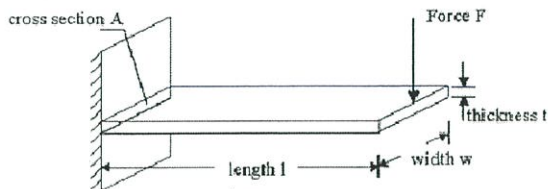
5.2 ศึกษาชุดเครื่องวัดแรงในขณะดิ่งขึ้นรูปลวด โดยจะทำชุดวัดแรงขึ้นโดยใช้สเตรนเกจ และออกแบบเส้นทางการดิ่งลวดขึ้นใหม่



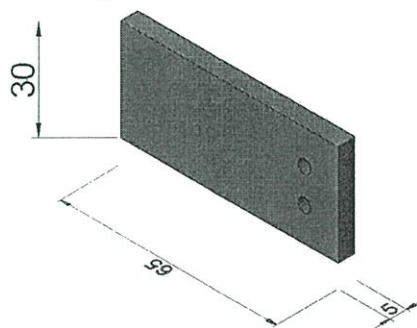
รูปที่ 5.2 เครื่องดิ่งลวดแบบขึ้นเดียวที่ใช้ในงาน (แบบใหม่)

จากงานวิจัยตัวเก่าจะมีจุดที่ต้องหมุนเส้นทางดิ่งลวดไป 90 องศา เพื่อที่จะติดตั้งชุดวัดแรงแบบสปริง แต่เมื่อพัฒนาชุดวัดแรงใหม่ โดยใช้สเตรนเกจแล้วนำมาติดตั้งบริเวณแม่พิมพ์ดิ่งลวด จะทำให้เส้นทางดิ่งลวดเป็นแล้วตรงได้ จะทำให้การดิ่งขึ้นรูปลวดมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.3 การออกแบบคานยึดดิ่ง



รูปที่ 5.2 คานยึดดิ่ง

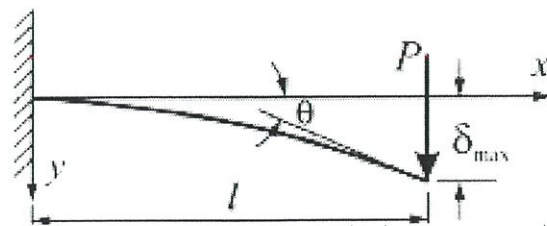


รูปที่ 5.3 แบบและขนาดของคานยึดดิ่ง

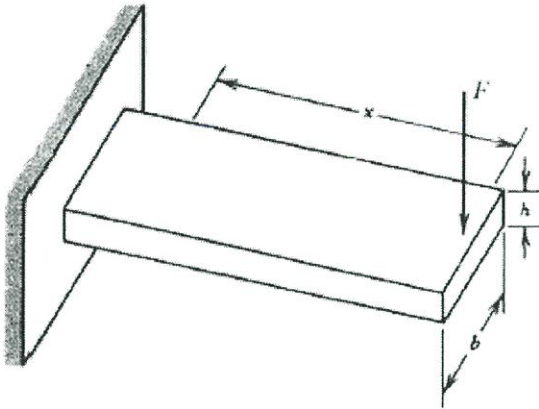
5.4 การคำนวณระยะโค้งงอของคาน

การคำนวณระยะโค้งงอตัวของคานทำให้สามารถทราบระยะการโค้งงอตัวของคานที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำซึ่งระยะการโค้งงอตัวของคานนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นขนาดของแรงกระทำวัสดุของคานที่ถูกกระทำประเภทของคาน ระยะที่แรงกระทำต่อคานเทียบกับจุดของคาน การคำนวณระยะโค้งงอตัวของคานมีผลต่อการออกแบบการวัดหรือความแข็งแรงของโครงสร้าง

คานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคานจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ในการคำนวณระยะโค้งงอตัวของคานยื่นสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 5.1 และยังสามารถคำนวณหาความชันสูงสุดที่เกิดขึ้นบนคานได้ด้วยสมการที่ 5.2



รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะของคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน



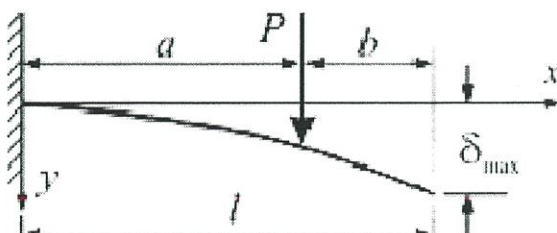
รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะคานยื่นที่ถูกแรงกระทำที่ปลายคาน

$$W(x) = \frac{Fx^2}{6EI}(3l-x) \quad (5.1)$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ที่สองของพื้นที่ (Second moment of area)

$$= \frac{Fl^2}{2EI} \quad (5.2)$$

เมื่อ θ คือความชันของคานที่จุดปลาย
 I คือโมเมนต์ที่สองของพื้นที่
สำหรับคานยื่นประเภทที่แรงกระทำไม่ได้กระทำที่ตำแหน่งปลายคานดังแสดงในรูปที่ 5.6 จะสามารถคำนวณหาระยะโค้งตัวของคานได้จากสมการที่ 5.3, 5.4



รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะของคานยื่นที่แรงกระทำไม่ได้กระทำที่ตำแหน่งปลายคาน

$$W(x) = \frac{Fx^2}{6EI}(3a-x) \quad (5.3)$$

สำหรับ $0 < x < a$

$$W(x) = \frac{Fa^2}{6EI}(3x-a) \quad (5.4)$$

สำหรับ $a < x < l$

และสมการสำหรับคำนวณหาความชันที่ปลายคานหาได้จากสมการที่ 5.5

$$\theta = \frac{Fa^2}{2EI} \quad (5.5)$$

ในงานวิจัยนี้ส่วนสำคัญคือการออกแบบให้คานยื่นสามารถรับแรงที่กำหนดภาระสูงสุดได้ 1000 นิวตันซึ่งในการเลือกใช้วัสดุผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุแบบเหล็กสปริงมาทำคานยื่นผู้วิจัยได้ศึกษาระยะเวลาโค้งตัวของคานยื่นดังสมการที่ 5.1 พบว่าคานยื่นมีระยะโค้งตัวประมาณ 0.001

5.5 การคำนวณหาค่าความปลอดภัยของคานยื่น

ในการคำนวณค่าความปลอดภัยผู้วิจัยจะสมมติว่าแรงที่กระทำที่ปลายคานมีค่าสูงสุด 1000 นิวตันซึ่งค่าโมเมนต์ดัดมากที่สุดจะถูกนำมาหาความเค้นดัด (σ_b) จากสมการที่ 5.6

$$\sigma_b = \frac{My}{IC} = \frac{M \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{6Fx}{bh^2} \quad (5.6)$$

เมื่อแทนค่า F , x , b และ h จากรูปที่ 5.5 ลงในสมการที่ 5.6 จะได้เป็น

$$\sigma_b = \frac{6Fx}{bh^2} = \frac{6 \times (1000 \text{ N}) \times (40 \times 10^3)}{(30 \times 10^3) \times (5 \times 10^3)} = 320 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

เมื่อคำนวณหาโมเมนต์ดัดมากที่สุดแล้วเราก็คำนวณค่าความปลอดภัยจากสมการต่อไปนี้

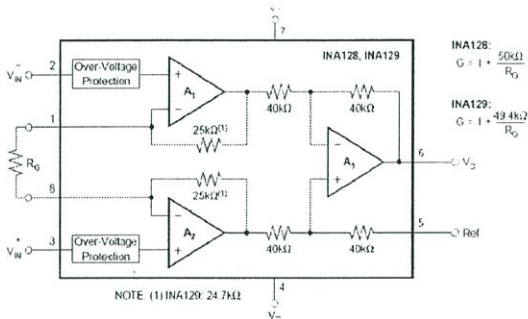
$$N_s = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_b} \quad (5.8)$$

จากนั้นหาค่าความปลอดภัยจากสมการที่ 5.8 จะได้เป็น

$$N_s = \frac{1080}{320} = 3.37$$

5.6 การออกแบบวงจรขยายปรับแต่งแรงดันไฟฟ้า

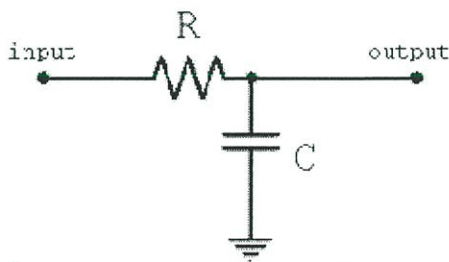
เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากโพลเซลล์มีค่าน้อยมากซึ่งจากการทดลองดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านแม่พิมพ์พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 0.001mV – 0.004 V จึงได้ออกแบบวงจรดังรูปที่ 5.7 ซึ่งวงจรมีประกอบด้วย INA129P มีกำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 5.7 วงจรขยายสัญญาณ

$$G_{INA129P} = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{50\Omega} \approx 1000$$

เนื่องจากกำลังขยายมีค่ามากดังนั้นสัญญาณรบกวนจึงมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องออกแบบวงจรกรองสัญญาณ (RC filter) ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (RC Filter)

จากรูปที่ 5.8 สามารถคำนวณหาความถี่คัตออฟ(f_c) ได้จากสมการที่ 5.9 จากการออกแบบสัญญาณรบกวนความถี่จะได้ค่าดังต่อไปนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{5.9}$$

เมื่อ $R = 220\text{k}\Omega$

$$C = 2\mu\text{F}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 5.9 แล้วแทนค่าลงไปจะได้

$$f_c = 0.3617 \text{ Hz}$$

6. วิธีการทดลอง

6.1 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยดึงผ่านแม่พิมพ์ที่มีสารหล่อลื่นกราไฟท์เป็นตัวหล่อลื่น

6.1.1 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยดึงผ่านแม่พิมพ์ที่มีสารหล่อลื่นกราไฟท์เป็นตัวหล่อลื่นเริ่มต้นโดยลดขนาดปลายลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเจียระไน ให้ได้ความยาวประมาณ 1.5 เมตร

6.1.2 นำลวดที่ผ่านการลดขนาด ประกอบเข้ากับเครื่องดึงลวดโดยดึงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดรูใน 2.3 มิลลิเมตร ด้วยชุดต้นกำลังในการดึงด้วยมอเตอร์

6.1.3 นำลวดที่ผ่านการดึงไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

6.2 ออกแบบชุดเครื่องวัดแรงในขณะดึงขึ้นรูปลวดโดยจะทำชุดวัดแรงขึ้นโดยใช้สเตรนเกจ

6.2.1 สร้างวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

6.2.2 ติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับชุดวัดแรง นำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องดึงขึ้นรูปลวด

6.2.3 เขียนโปรแกรม Lab view เพื่อให้สามารถอ่านค่าแรงขณะทำการดึงได้

7. ผลการทดลอง

การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอด
แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอด คำนวณโดย
Siebel's Method

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh}$$

$$F_{D,tot} = A_t \times \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right]$$

เมื่อ

$$A_o = \text{พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm}^2\text{]}$$

$$A_t = \text{พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{f,m} = \text{ความเค้นในแนวแกน ความเค้นของการไหลเฉื่อย [N/mm}^2\text{]}$$

$$\mu = \text{สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน}$$

$$\text{Coulomb's coefficient of friction } (\mu \approx 0.035)$$

$$\alpha = \text{ครึ่งมุมไหลเข้าแม่พิมพ์}$$

$$\hat{\alpha} = \tan \alpha$$

เมื่อ

$$\hat{\alpha} = 0.1051$$

$$\varphi_{max} = \text{ความเครียด}$$

$$\varphi_{max} = \ln \frac{A_o}{A_t}$$

$$\varphi_{max} = \ln \left(\frac{4.5239}{4.1547} \right)$$

$$\varphi_{max} = 0.08513$$

เมื่อ

$$\sigma_{f,m} = \text{ความเค้นของการไหลเฉื่อยความเค้นในแนวแกน [N/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_{f,m} = \frac{1}{2} (\sigma_{f,o} + \sigma_{f,s})$$

$$\sigma_{f,m} = \frac{1}{2} (344.8 + 365.2)$$

$$\sigma_{f,m} = 355 \text{ N/m}^2$$

แรงในการดึงขึ้นรูปหลอด

$$F_{D,tot} = A_t \times \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\mu} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \alpha \right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1547 \times 355 \left[\left(1 + (2) \frac{0.080}{0.208} \right) (0.08513) + \frac{2}{3(0.1051)} \right]$$

$$F_{D,tot} = 325.487 \text{ N}$$

ซึ่งจากทฤษฎีแรงที่ต้องใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอด จาก
หลอดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร เหลือ 2.3
มิลลิเมตร ต้องให้แรง 325.487 N

การวัดแรงขณะดึงขึ้นรูปหลอด

Force 1 วัดแรงขณะดึงขึ้นรูปได้ประมาณ 481.623 N

Force 2 วัดแรงขณะดึงขึ้นรูปได้ประมาณ 192.906 N

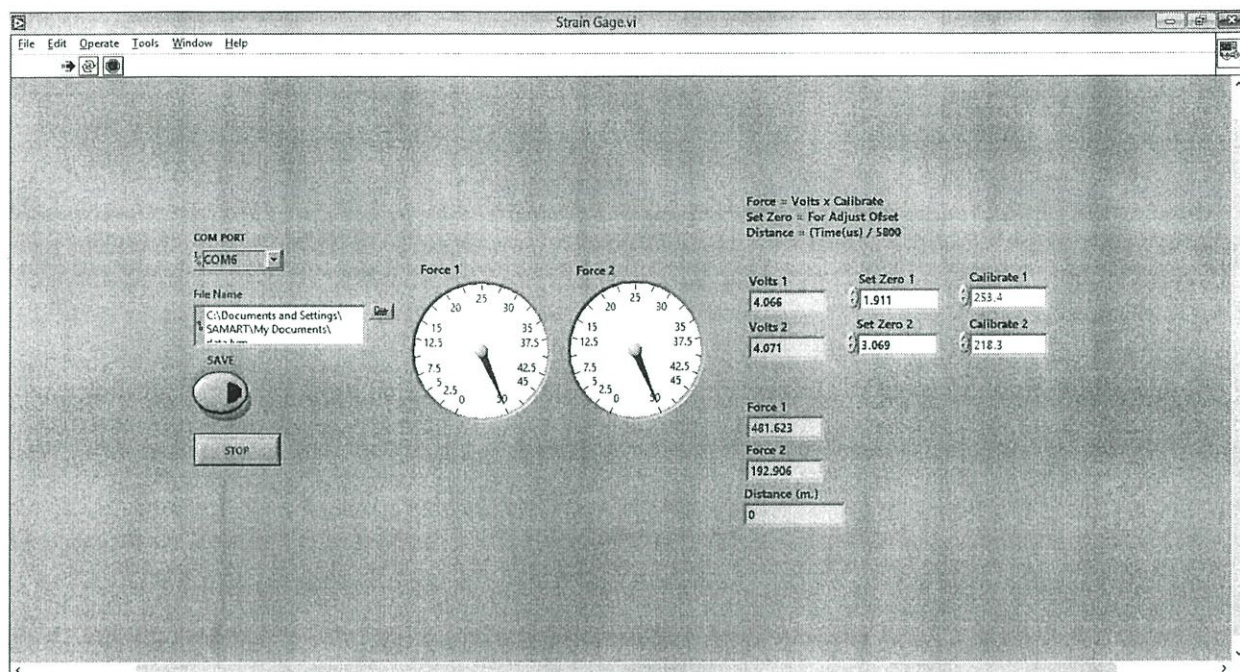
$$\text{ค่าเฉลี่ยของแรงทั้งสองค่ากับ} \\ \frac{481.623 + 192.906}{2} = 337.265 \text{ N}$$

ซึ่งมีค่าคาดเคลื่อนจากค่าทฤษฎี

$$\% \text{คาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าจริง} - \text{ค่าจากทฤษฎี}|}{\text{ค่าทฤษฎี}} \times 100$$

$$\% \text{คาดเคลื่อน} = \frac{|337.265 - 325.487|}{325.487} \times 100$$

$$\% \text{คาดเคลื่อน} = 3.62 \%$$



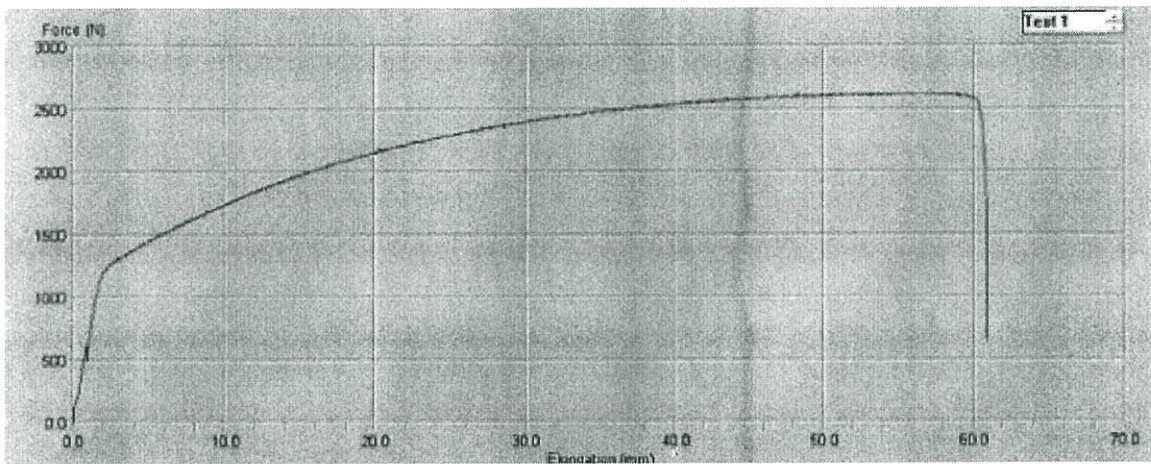
รูปที่ 7.1 การอ่านค่าขณะทำการดึงขึ้นรูปลวด

ตาราง 7.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลอง

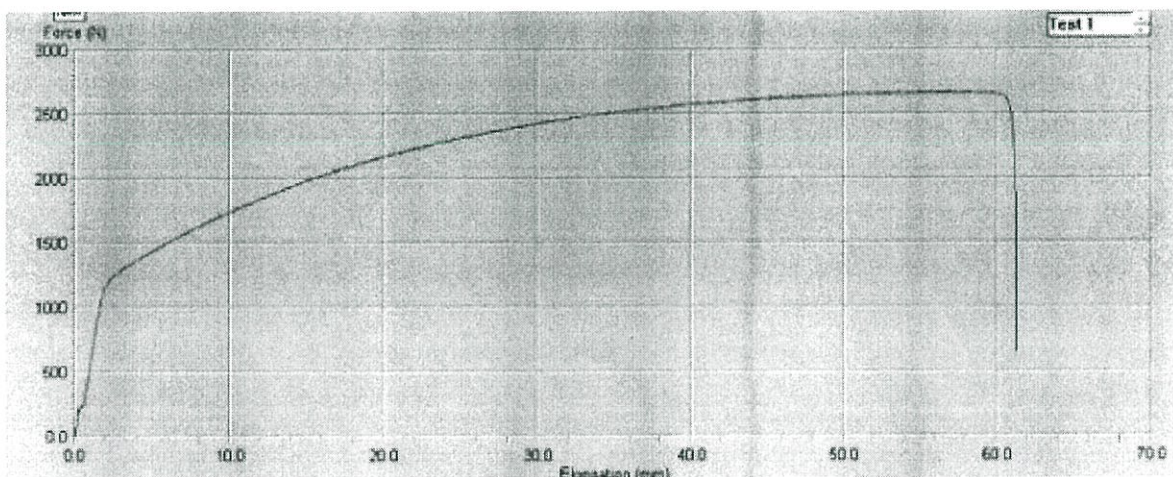
	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	585.995 N/mm ²
	Yield Strength (MPa)	234.091 N/mm ²
ลวดหลังดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	679.063 N/mm ²
	Yield Strength (MPa)	256.042 N/mm ²

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM

Test No.	V	Force Peak	Stain Peak	Stress Peak	Elong Peak	Force Yield	Stress Yield	Stain Yield	Elong Yields
1	10	2650	198.54	580.252	57.099	618	136.608	7.158	0.859
2	20	2677	172.685	591.747	56.85	1500	331.573	47.80	5.736



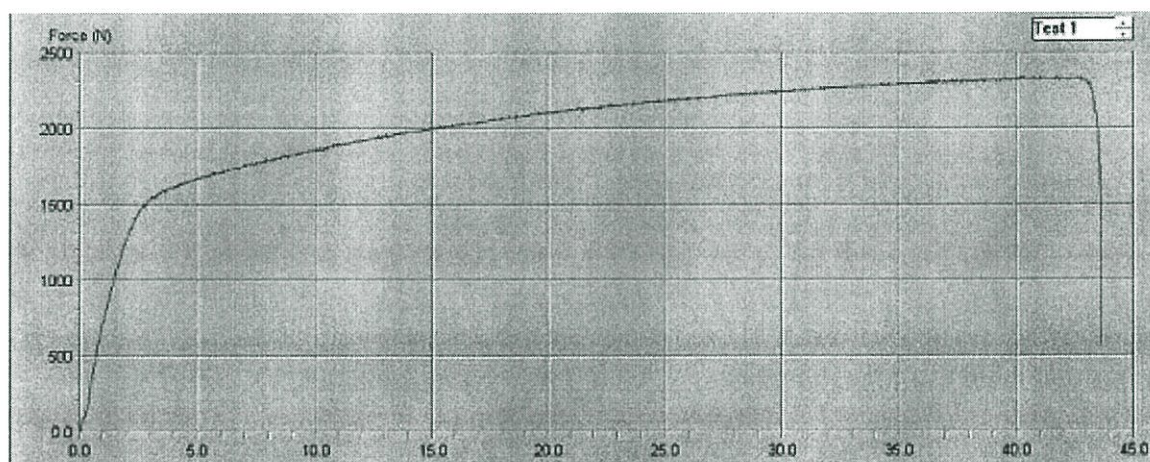
รูปที่ 7.2 กราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM ($v=10$ m/s)



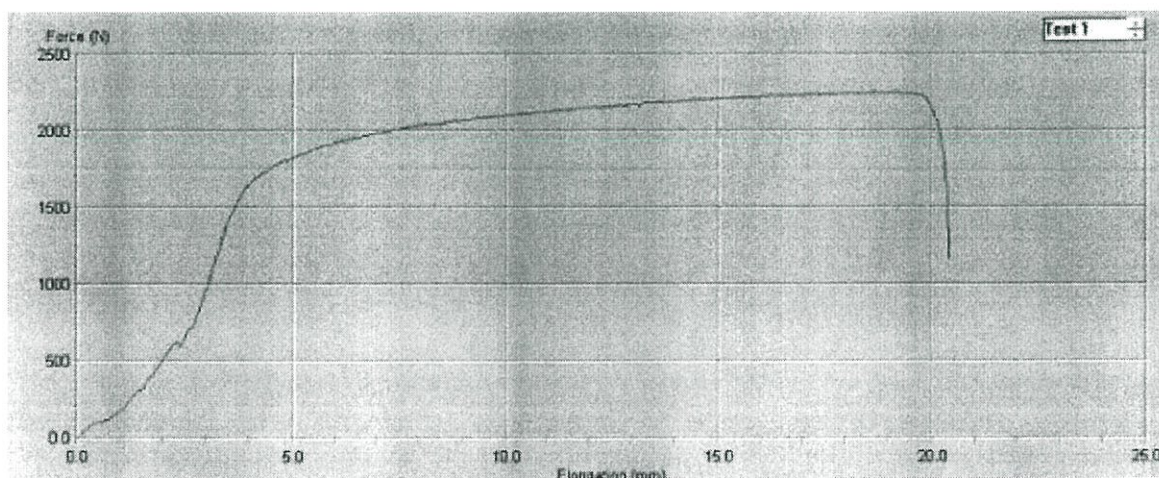
รูปที่ 7.3 กราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM ($v=20$ m/s)

ตารางที่ 7.3 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM

Test No.	V	Force Peak	Stain Peak	Stress Peak	Elong Peak	Force Yield	Stress Yield	Stain Yield	Elong Yields
1	10	2889	93.827	662.969	40.726	2525	362.135	23.00	2.76
2	20	2795	72.964	695.158	18.669	2529	149.949	19.217	2.306



รูปที่ 7.4 กราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM ($v=10$ m/s)



รูปที่ 7.5 กราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM ($v=20$ m/s)

จากการทดลองความเค้นที่ตาราง 7.3 และ 7.4 ได้นำมาเปรียบเทียบความเค้นของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงของค่าความเค้นในการทดลองทางผู้ทดลองได้ใช้ค่าความเร็วในการดึง 10 mm/min จากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าความเค้นหลังดึงลดขนาด(หลังการพัฒนา)จะมีค่ามากกว่าความเค้นหลังดึงลดขนาด(ก่อนการพัฒนา)

รูปที่ 7.4 กราฟหลังดึงหลังการพัฒนาระหว่างแรงกับความเครียด รูปที่ 7.6 กราฟหลังดึงก่อนการพัฒนา ระหว่างแรงกับความเครียด

8.สรุป

8.1สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบค่าความเค้นระหว่างก่อนดึงและหลังการดึงจะมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากการออกแบบใหม่ทำให้แรงที่ใช้ดึงเป็นแนวตรงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเล็กลงและมีเนื้อลวดที่แน่นขึ้นเป็นเหตุให้มีแรงดึงเพิ่มขึ้นและความเค้นเพิ่มขึ้น

8.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

- ได้เครื่องดึงขึ้นรูปลวดไว้สำหรับทดสอบและศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของลวดเมื่อทำการดึงในสภาวะต่างๆ
- เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยในอุตสาหกรรมการผลิตลวด
- เพื่อทำให้เกิดความร่วมมือกันระหว่างภาคอุตสาหกรรมและการศึกษา

8.3 การวิจัยในอนาคต

- ทำการวิจัยเกี่ยวกับการลดค่าความถี่รับกวนของชุดวัดแรง
- ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของพื้นผิวของลวดหลังการดึงขึ้นรูปลวด

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Avitzur, B.Z.L., 1968, Metal Forming, McGraw-Hill, New York, pp. 219-246
- [2] Rer. Nat. F. Endre, 1990, Wire Drawing Machines, [Online] Available <http://www.imet.tuclausthal.de/en/techdienst/wwul.shtml>,[2005, June 30].
- [3] Lange, K.,1985, Handbook of Metal forming, McGrawHill, New York, pp. (13.14-14.14).
- [4] Skolyszewski, A., Packo, M., Luksza, J. and Ruminski, M.,2002, "Warm Forming of Acid resistant Steel wires used forManufacturing of Springs",Journal of Materials processing Technology, Vol. 125-126, pp. 326-333.
- [5] นริศ เกลาเกลี้ยง. (2551). เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด (WIRE DRAWING TESTING MACHINE).วิ ท ย า นิ พ น ธ์ ป ริ ญ ญา วิ ศ ว ก ร ร ม ศ า ส ต ร์ บั ณ ฑิต ส า ข า วิ ศ ว ก ร ร ม ศ า ส ต ร์ ค ณ ะ วิ ศ ว ก ร ร ม ศ า ส ต ร์ ส ต า บั น เ ท ค โ น ล อ ยี พ ร ะ จ อ ม เ ก ล้ า จ ้ า กุ ณ ท ห า ร ล า ด ก ร ะ บั ง .