

การวิเคราะห์ลูปปิดในลวดจัดพันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาณุพงศ์ หวังสุข

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2558

ANALYSIS OF CLOSING LOOPS IN ORTHODONTIC WIRES BY FINITE ELEMENT METHOD

Panupong Wangsuk

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2015

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ลูปปิดในลวดจัดพันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

ภาณุพงศ์ หวังสุข

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนิตต์ รัตสุมาวงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาริฉัตร คงทอง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ)

ภาณุพงศ์ หวังสุข : การวิเคราะห์ลูปปิดในลวดจัดพันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. อาจารย์ที่
ปรึกษา : ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ, 118 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของลวดจัดพันแบบลูปตัวที่ต่อแรงดึง และอัตราส่วน
ของแรงต่อระยะเคลื่อนที่ และโมเมนต์ต่อแรง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการจัดพันโดยใช้ลูป ทำ
การวิเคราะห์โดยปรับเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ ของลูปตัวที่ลูปตัวแอลและลูปตัวยู แล้วใช้วิธีไฟไนต์เอลิ
เมนต์หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ของลูปซึ่งแรงที่เกิดขึ้นในแนวระดับ พบว่า แรงในแนว
ระดับและอัตราส่วนของแรงต่อระยะเคลื่อนที่ ความยาวในแนวระดับของลวดที่เป็นส่วนบนของลูปยิ่ง
มีค่ามาก ยิ่งทำให้ได้แรงในแนวระดับมีค่าน้อย นอกจากนี้ความสูงของลูปซึ่งประกอบด้วยความสูงของ
ขารวมกับความสูงของส่วนที่ดัดโค้งเป็นตัวที่มีผลต่อแรงในแนวระดับอย่างมีนัยสำคัญ ลูปที่มีความสูง
มากจะทำให้ได้แรงในแนวระดับมีค่าน้อย ข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาด
ของลูปตัวที่ที่เหมาะสม และยังใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ขนาดของลูปแบบอื่น ๆ ได้

บัณฑิตวิทยาลัย

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PANUPONG WANGSUK : ANALYSIS OF CLOSING LOOPS IN ORTHODONTIC WIRES BY FINITE ELEMENT METHOD. ADVISOR : ASSISTANCE DR. EK-U THAMMAKORBUNJUT, 118PP.

This research studies the effects of T-loop's size to the traction force and the load/deflection which will be considered in orthodontic loop design. The dimensions of T-loops, L-Loops and U-Loops are varied and the relations between deflection of loop legs and horizontal forces are analyzed using the finite element method. The results show horizontal length of T-loop will decrease the horizontal force. Furthermore, the total loop height significantly affect to the horizontal force. A loop with more height leads to a smaller horizontal force. The result of this research can then be used in an optimum T-loop design and also be acted as a guideline for an analysis of other closing loops.

Graduate School

Field of Study Engineering Technology

Academic Year 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาของอาจารย์หลายๆท่าน ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้แนวคำปรึกษาแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดจนจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตสุมาวงศ์ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ได้กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาริฉัตร คงทอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัว ที่ได้อบรมสั่งสอนชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิตอยู่ในสังคม คอยให้การสนับสนุนการศึกษาและเป็นที่กำลังใจในทุกๆ ด้านตลอดมาและตลอดไป

ภาณุพงศ์ หวังสุข

TNI

THAI - JAPAN
INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	3
2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีอิลาสติคซิติ์ และการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์	4
2.2 พื้นฐานความรู้ด้านการจัดฟัน	6
2.3 กลศาสตร์ของทันตกรรมจัดฟัน	7
2.4 ปรีทัศน์วรรณกรรม	10
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	12
3.1 ขนาดของลูปตัวที่ ลูปตัวยูป ลูปตัวแอล และลูปตัวยู กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์	12
3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS	15
3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม ANSYS	15

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 19
4.1	บทนำ 19
4.2	การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลงานวิจัยอื่น 19
4.3	วิเคราะห์ลวดจัดฟันแบบลูปตัวที, ลูปตัวแอล, ลูปตัวยู 21
4.3.1	วิธีทำการวิเคราะห์ของลวดจัดฟันแบบลูปตัวที ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการวิเคราะห์ 21
4.3.2	สรุปผลการวิเคราะห์ลูปตัวที 41
4.3.3	วิธีทำการวิเคราะห์ของลวดจัดฟันแบบ ลูปตัวแอล ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการวิเคราะห์ 42
4.3.4	สรุปผลการวิเคราะห์ ลูปตัวแอล 67
4.3.5	วิธีทำการวิเคราะห์ของลวดจัดฟันแบบ ลูปตัวยู ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการวิเคราะห์ 68
4.3.6	สรุปผลการวิเคราะห์ ลูปตัวยู 75
4.4	สรุปผลการวิเคราะห์การคำนวณลูปทั้งสามแบบ 76
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 78
	สรุปผลการทดลอง 78
	บรรณานุกรม 82
	ภาคผนวก 82
	ภาคผนวก ก. ตารางการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น ที่ขาลูป 83
	ประวัติย่อผู้วิจัย 119

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นิยมใช้ในงานพันตกรรมจัดฟัน.....	6
4.1 การเปรียบเทียบสติฟเนส (Stiffness, k) ด้วยการคำนวณกับการทดลองของงานวิจัยอื่น ในรูปร่างทีลูป	20
4.2 การเปรียบเทียบแรง F และโมเมนต์ M ด้วยการคำนวณกับผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัยอื่นในรูปร่างทีลูป	21
4.3 ผลการเปรียบเทียบแรงและโมเมนต์ของ T-Loop ด้วยตัวแปรต่างๆ	42
4.4 ผลการเปรียบเทียบแรงและโมเมนต์ของ L-Loop ด้วยตัวแปรต่างๆ	68
4.5 ผลการเปรียบเทียบแรงและโมเมนต์ของ U-Loop ด้วยตัวแปรต่างๆ	76
ก-1 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a	85
ก-2 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h	86
ก-3 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a	87
ก-4 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r	88
ก-5 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d	89
ก-6 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร L1, L2	90
ก-7 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2	91
ก-8 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B2	92
ก-9 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยน B2	93
ก-10 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยน B2	94
ก-11 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยน B2	95
ก-12 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=75 องศา และเปลี่ยน B2	96

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก-13 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวทีแบบกำหนด B1=70 องศา และเปลี่ยน B2	97
ก-14 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวทีแบบกำหนด B1=65 องศา และเปลี่ยน B2	98
ก-15 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวทีแบบเปลี่ยนตัวแปร B1=60 องศา และเปลี่ยน B2	99
ก-16 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม	100
ก-17 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม	101
ก-18 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม	102
ก-19 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม	103
ก-20 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม	104
ก-21 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดกลม	105
ก-22 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม	106
ก-23 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม	107
ก-24 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	108
ก-25 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	109

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก-26 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	110
ก-27 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	111
ก-28 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=75 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	112
ก-29 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=70 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	113
ก-30 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	114
ก-31 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=60 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	115
ก-32 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร h	116
ก-33 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร d	117
ก-34 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2	118
ก-35 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B2	119

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	ลักษณะการเรียงตัวของพื้นที่ผลิตปกติ	4
2.2	อุปกรณ์จัดฟัน	4
2.3	ตัวอย่างลูปของลวดจัดฟัน	5
2.4	จุดศูนย์กลางความต้านทาน และระบบของแรงเนื่องจากลูป	9
2.5	ขั้นตอนการจำลองปัญหาในโปรแกรม ANSYS	10
2.6	การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย	10
3.1	หน้าตัดของคาน 2 แบบ	12
3.2	รูปร่างของลวด 3 แบบ	12
3.3	ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์	13
3.4	ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์	14
3.5	ตัวแปรของขนาดลูปตัวยูที่วิเคราะห์	15
3.6	การสร้างรูปทรงของลวดตัวที่	16
3.7	กำหนดค่าของวัสดุ	16
3.8	กำหนดค่าตัวแปรต้นเป็นระยะยึดของลูปตัวที่ด้านซ้าย	17
3.9	กำหนดค่าตัวแปรต้นเป็นระยะยึดของลูปตัวที่ด้านขวา	17
3.10	ผลการคำนวณเป็น Force Reaction และ Moment Reaction.....	18
4.1	ทีลูปที่ใช้ในการเปรียบเทียบโดยการคำนวณและการทดลอง	20
4.2	ทีลูปที่ใช้ในการเปรียบเทียบโดยการคำนวณและไฟไนต์เอลิเมนต์	21
4.3	การกำหนดค่าตัวแปรของลวดคั่นฟันรูปแบบ T-Loop	22
4.4	ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร a	22
4.5	ผลการคำนวณระยะยึดกับแรงของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a	23
4.6	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a	23
4.7	ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร h	24
4.8	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h	24
4.9	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h	25
4.10	ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร r	25
4.11	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r	26

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.12 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r	26
4.13 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร d	27
4.14 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d	27
4.15 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d	28
4.16 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร $L1, L2$	28
4.17 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร $L1, L2$	29
4.18 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร $L1, L2$	29
4.19 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร $B1, B2$	30
4.20 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร $B1, B2$	30
4.21 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยน ตัวแปร $B1, B2$	31
4.22 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร $B2$	31
4.23 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร $B2$	32
4.24 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร $B2$	32
4.25 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบกำหนดมุม $B1=85$ องศา และเปลี่ยน $B2$	33
4.26 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=85$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร $B2$	33
4.27 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=85$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร $B2$	34
4.28 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบกำหนดมุม $B1=80$ องศาและเปลี่ยนตัวแปร $B2$	34
4.29 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=80$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร $B2$	35
4.30 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=80$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร $B2$	35
4.31 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบกำหนดมุม $B1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	36

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.32 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	36
4.33 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	37
4.34 ตัวแปรของขนาดลูบตัวที่ที่วิเคราะห์แบบกำหนดมุม $B1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	37
4.35 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	38
4.36 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	38
4.37 ตัวแปรของขนาดลูบตัวที่ที่วิเคราะห์แบบกำหนดมุม $B1=65$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	39
4.38 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=65$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	39
4.39 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=65$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	40
4.40 ตัวแปรของขนาดลูบตัวที่ที่วิเคราะห์แบบกำหนดมุม $B1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	40
4.41 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	41
4.42 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$	41
4.43 การกำหนดค่าตัวแปรของลวดดัดพื้น แบบลูบตัวแอล	43
4.44 ตัวแปรของขนาดลูบตัวแอลที่วิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม	43
4.45 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.46 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัด สี่เหลี่ยม	44
4.47 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม	45
4.48 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม	45
4.49 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม .	46
4.50 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม	46
4.51 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอล แบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัด สี่เหลี่ยม.....	47
4.52 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัด สี่เหลี่ยม	47
4.53 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม	48
4.54 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม ..	48
4.55 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม ...	49
4.56 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม	49
4.57 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัด สี่เหลี่ยม.....	50
4.58 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัด สี่เหลี่ยม	50
4.59 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดกลม	51
4.60 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดกลม	51
4.61 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดกลม	52
4.62 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม	52
4.63 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัด สี่เหลี่ยม.....	53
4.64 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัด สี่เหลี่ยม	53
4.65 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.66	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม . 54
4.67	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม . 55
4.68	ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยน B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 55
4.69	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 56
4.70	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 56
4.71	ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 57
4.72	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 57
4.73	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 58
4.74	ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์ แบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 58
4.75	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงลวดตัวแอล แบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 59
4.76	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอล แบบเปลี่ยน B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 59
4.77	ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์ แบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 60
4.78	ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบกำหนด B1=80 องศาและเปลี่ยน B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 60
4.79	ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยน B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 61
4.80	ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด B1=75 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม 61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.81 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=75$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	62
4.82 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=75$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	62
4.83 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์ แบบกำหนด $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	63
4.84 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบกำหนด $B_1=70$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	63
4.85 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์ แบบกำหนด $B_1=65$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	64
4.86 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลวดตัวแอลแบบกำหนด $B_1=65$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	64
4.87 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=70$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	65
4.88 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=65$ องศาและ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	65
4.89 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด $B_1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	66
4.90 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=60$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	66
4.91 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลวดตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=60$ องศา และ เปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม	67
4.92 การกำหนดค่าตัวแปรของลวดต้นฟันรูปแบบลูปตัวยู	69
4.93 ตัวแปรของขนาดลูปตัวยูที่วิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร h	70
4.94 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร h	70
4.95 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร h	71
4.96 ตัวแปรของขนาดลูปตัวยูที่วิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร d	71

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.97 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร d	72
4.98 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร d	72
4.99 ตัวแปรของขนาดลูบตัวยูที่วิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2	73
4.100 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2	73
4.101 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2	74
4.102 ตัวแปรของขนาดลูบตัวยูที่วิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร B2	74
4.103 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร B2	75
4.104 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวยู แบบเปลี่ยนตัวแปร B2	75
4.105 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบทั้งสามแบบ	77
4.106 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับโมเมนต์ของลูบทั้งสามแบบ	77

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปผู้ที่มีปัญหาฟันเรียงตัวไม่สวยงามในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างฟันมักจะเข้ารับการจัดฟัน ซึ่งนอกจากจะแก้ปัญหาดังกล่าวแล้วยังช่วยป้องกันปัญหาฟันล้ม และเพื่อให้มีความมั่นใจในการเข้าสังคมมากขึ้นอีกด้วย การจัดฟันในลักษณะนี้ทันตแพทย์จะต้องใส่แรงกระทำผ่านแบร็คเก็ต (Bracket) ที่ติดอยู่บนซี่ฟันที่ต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่เพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว การเลื่อนฟันในลักษณะดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธีขึ้นกับลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ คือ วิธีกลศาสตร์การเลื่อน (Sliding Mechanics) และวิธีกลศาสตร์ลูปปิด (Closing Loop Mechanics) กล่าวโดยสังเขปได้ว่า วิธีแรกจะมองลวดจัดฟันเป็นรางที่แบร็คเก็ตจะเลื่อนไปตามราง และทำให้ฟันเลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ทันตแพทย์มักใช้ยางเส้นขนาดเล็กคล้องระหว่างแบร็คเก็ตของฟันสองซี่เพื่อดึงฟันให้เลื่อนไปบนลวดในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่วิธีที่สองจะดัดลวดจัดฟันให้เป็นลูปรูปร่างต่าง ๆ เช่น ตัวยู ตัวที ตัวแอล หยดน้ำ และสามเหลี่ยม เป็นต้น ทันตแพทย์จะวางตำแหน่งของลูปให้อยู่ตรงช่องว่างระหว่างฟัน อาศัยการดึงลูปให้แยกออกทำให้เกิดแรงในลักษณะของสปริงที่พยายามคืนตัวดึงแบร็คเก็ตเพื่อให้ฟันเลื่อนเข้าหากัน

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่วิธีจัดฟันโดยใช้ลูปปิดซึ่งที่ผ่านมามีการศึกษาและวิจัยทางด้านนี้มากมาย โดยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์รูปร่างของลูปปิดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลวด ได้แก่ อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง (Moment-to-force ratio, M/F) อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ (Load/Deflection) และแรงในแนวตั้ง (Vertical Force) ในตัวแปรทั้งสาม อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงมีความสำคัญที่สุดต่อการเคลื่อนที่ของฟัน บทความส่วนใหญ่จะวิเคราะห์เน้นหนักไปที่ตัวแปรนี้โดยใช้วิธีของคาสติเกลียโน [1-2] วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1-5] และวิธีทดลอง [3-4, 6] โดยสองตัวแปรที่เหลือมักจะถูกระบุรวมไปในงานวิจัยดังกล่าว ในประเทศไทยมีการวิเคราะห์อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ของลวดที่รูปร่างโดยการทดลองแล้วเปรียบเทียบ โดยมีเกณฑ์ว่ารูปร่างของลวดที่ดีที่สุดจะใช้แรงดึงให้ยัดน้อยที่สุด [6]

จากการศึกษาพบว่า งานวิจัยดังกล่าวข้างต้นทำการวิเคราะห์รูปร่างของลวดโดยกำหนดขนาดของรูปร่างไปที่ค่าใดค่าหนึ่งโดยเฉพาะ เป็นการวิเคราะห์ว่ารูปร่างแบบใดมีพฤติกรรมทางกลเท่าไรและต่างกันอย่างไรมาก่อน โดยไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดความยาว ความสูง และรัศมีความโค้งของรูปร่างนั้น ๆ อย่างครบถ้วนเพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้ใช้งานว่า ตัวแปรหรือสัดส่วนใดของลูปปิดที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลูปนั้นบ้าง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของขนาดของลวดจัดฟันลูปตัวที ลูป

ตัวแอล และลูปตัวยูต่อพฤติกรรมทางกลของมันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกพิจารณาอัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS เป็นเครื่องมือในการจำลองผล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของลวดจัดฟันแบบลูปต่อพฤติกรรมทางกลของมันด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเป็นหลัก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์การเสียรูปของลูปปิดพื้นฐาน 3 รูปแบบคือ ตัวที ตัวแอล และตัวยูโดยมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS

1.3.2 วิเคราะห์ผลของขนาดต่าง ๆ ของลูปต่ออัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง

1.3.3 วิเคราะห์ผลของมุมเอียงของลวดที่ปลายขาลูปต่ออัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงมิติหรือขนาดของลูปแต่ละแบบว่าในส่วนใดมีผลต่ออัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง

1.4.2 สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมทางกลของลูปเพื่อเลือกรูปแบบที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

บทที่ 2

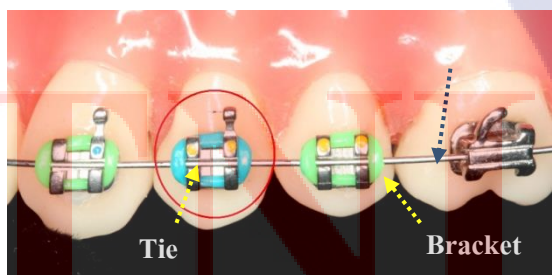
หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานความรู้ด้านการจัดฟัน

ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีคนจำนวนมากประสบปัญหาเกี่ยวกับฟันที่เรียงตัวไม่ดี เช่น ฟันห่าง ฟันซ้อน ฟันเก ฟันคุด และฟันเหยิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [7] หรือบางครั้งอาจเกิดจากอุบัติเหตุ ในทางทันตกรรมจึงมีการศึกษาและพัฒนาความรู้ในการจัดฟันให้เรียงตัวกันดีขึ้น ขั้นตอนการจัดฟัน โดยคร่าว ๆ จะเริ่มจากการพิมพ์ปากของคนไข้ เพื่อทำการวิเคราะห์แนวทางการจัดฟัน หลังจากนั้น ทันตแพทย์จะติดแบร็คเก็ต (Bracket) เข้าที่ซี่ฟัน และนำลวดจัดฟัน (Orthodontic Wire หรือ บางครั้งจะใช้คำว่า Arch Wire) ใส่ในช่องของแบร็คเก็ต ทำหน้าที่ในการออกแรงกระทำทำให้ฟันเคลื่อน ตัวไปในตำแหน่งที่ต้องการโดยมียางรัดลวดกับแบร็คเก็ตเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [8]



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเรียงตัวของฟันที่ผิดปกติ [7]



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์จัดฟัน [8]

ลวดจัดฟันทำจากวัสดุหลัก ๆ 2 ชนิด คือ นิกเกิล-ไทเทเนียม (Ni-Ti) ซึ่งเป็นวัสดุผสมจำรูป (Shape Memory Alloy) และเหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless Steel) ลวดที่ทำจากวัสดุทั้งสองจะนำมาใช้จัดฟันที่เรียงไม่ดีในรูปแบบที่ต่างกัน กล่าวคือ ฟันที่วางตัวผิดตำแหน่งไปในแนวด้านหน้าหรือ ด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หรือฟันเหยิน จะใช้ลวดที่ทำจากนิกเกิล-ไทเทเนียม โดยลวดในตอน

เริ่มต้นจะอยู่ในลักษณะโค้งที่ฟันควรจะเรียงตัว เมื่อสอดลวดเข้าไปในแบร็คเก็ตและยึดแน่นด้วยยาง ยึด ซึ่งฟันที่อยู่ผิดตำแหน่งจะทำให้ลวดโค้งงอผิดรูปไปด้วย ผลที่ตามมาคือ ลวดจะพยายามเคลื่อนตัว กลับมาอยู่ในสภาพเหมือนตอนเริ่มต้นที่เป็นโค้งสวยงาม ทำให้เกิดแรงกระทำที่ฟันซี่นั้นและซี่อื่น ๆ ข้างเคียง ฟันซี่ที่อยู่ผิดตำแหน่งจะถูกดันให้เคลื่อนมาอยู่ในรูปโค้งของลวด แม้ว่าจะมีแรงกระจายไปยัง ฟันซี่อื่นก็ตาม แต่ฟันที่อยู่ผิดที่ที่จะรับแรงกระทำมากที่สุด และต้องเคลื่อนที่มากที่สุด นอกจากนี้ กรณี ฟันเหยิน ที่ระนาบของฟันไม่ได้อยู่ในแนวระนาบเดียวกันกับฟันซี่อื่น ๆ ในแนวข้างเคียง จะใช้ลวด นิกเกิล-ไทเทเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมใส่เข้าไปในแบร็คเก็ตเช่นกัน เพียงแต่จะมีการบิดลวดด้วย ซึ่งลวด ในส่วนที่ถูกบิดไปนี้จะพยายามหมุนกลับมายังตำแหน่งเดิม ทำให้เกิดแรงบิดกระทำผ่านแบร็คเก็ตไป ยังฟันด้วย ทำให้ระนาบของฟันซี่นี้ถูกบิดกลับมาอยู่ในแนวเดียวกับฟันข้างเคียง ส่วนฟันอีกกลุ่มหนึ่ง เช่น ฟันห่าง และฟันซ้อน อาจจะใช้ลวดเหล็กกล้าสแตนเลสตัดให้เป็นรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [10] อาศัยการดึงขาลูปให้แยกออกแล้วลูปจะพยายามดึงกลับทำให้เกิดแรงกระทำกับฟันให้ฟัน เคลื่อนตัวไปในทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างลูปของลวดจัดฟัน [9, 10]

สำหรับงานวิจัยนี้ การคำนวณการเสียรูป แรง และโมเมนต์ที่ลูปทั้งสามแบบด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะใช้คุณสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าสแตนเลสจากเอกสารอ้างอิง [11] ดัง ตารางที่ 2.1 เพื่อให้เห็นแนวทางในการวิเคราะห์ หากจะมีการนำวิธีการในวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้จริง จำเป็นต้องใช้คุณสมบัติวัสดุจากผู้ผลิตลวดจัดฟันโดยเฉพาะเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำ ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นิยมใช้ในงานทันตกรรมจัดฟัน [11]

Alloy	Modulus of Elasticity	Yield Strength (0.2% offset) (GPa)	Ultimate Tensile Strength (GPa)	Number of 90° cold bends without fracture
Stainless steel	179	1.6	2.1	5
Cobalt-chromium-nickel	184	1.4	1.7	8
Nickel-titanium	41	0.43	1.5	2
Beta-titanium	72	0.93	1.3	4

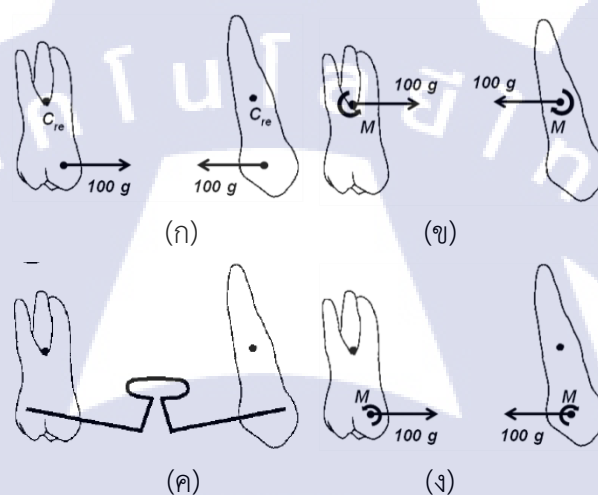
* Formerly required in ANSI/ADA Specification No. 32 for orthodontic wires.

2.2 กลศาสตร์ของทันตกรรมจัดฟัน

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงกลศาสตร์ของฟันที่ถูกแรงภายนอกกระทำซึ่งผู้เขียนพยายามเรียบเรียงขึ้นตามความเข้าใจที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยทางด้านทันตกรรมจัดฟันและการขอคำปรึกษาจากทันตแพทย์ เรื่องหนึ่งที่ต้องเข้าใจและระมัดระวังในการใช้งาน คือหน่วยของแรง และโมเมนต์ ซึ่งงานทางด้านทันตกรรมนิยมใช้หน่วยของแรง และโมเมนต์เป็น กรัม (g) และกรัม·มิลลิเมตร (g·mm) ตามลำดับ แตกต่างจากงานทางวิศวกรรมที่นิยมใช้หน่วยของแรง และโมเมนต์เป็น นิวตัน (N) และนิวตัน·เมตร (N·m) ตามลำดับ

ในส่วนของกลศาสตร์การจัดฟันจะพิจารณาฟันหนึ่งซึ่งเป็นวัตถุอิสระโดยมีแรงภายนอกกระทำ ซึ่งแรงทั้งหมดประกอบด้วยแรงกระทำที่แบร็คเก็ตและแรงต้านของเนื้อเยื่อบริเวณรากฟันที่กระทำกับฟัน จะพบว่า มีจุดอยู่จุดหนึ่งวางตัวอยู่ในแกนแนวตั้งของฟัน ซึ่งถ้าใส่แรงกระทำในแนวนอนกับฟันโดยให้ผ่านจุดนี้ ฟันจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับแรงโดยไม่เกิดการหมุน จุดดังกล่าวนี้เรียกว่า จุดศูนย์กลางการต้านทาน (Center of Resistance) [12] แต่ในทางปฏิบัติการเลื่อนฟันไม่ว่าจะใช้วิธีการกลศาสตร์การเลื่อนหรือกลศาสตร์ลูปปิดจะต้องใส่แรงกระทำที่แบร็คเก็ตดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) โดยสมมุติว่าแรงที่ต้องใช้มีขนาด 100 กรัม จากความรู้ทางกลศาสตร์ในส่วนของสถิตยศาสตร์ จะมีระบบของแรงและโมเมนต์ (หรือแรงคู่ควบ) กระทำที่จุด C_{re} ดังรูปที่ 2.4 (ข) โมเมนต์ดังกล่าวเกิดจากแรง 100 กรัมคูณกับระยะทางระหว่างแบร็คเก็ตถึงจุด C_{re} ซึ่งโมเมนต์หรือแรงคู่ควบนี้จะทำให้รากฟันหมุนไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศที่ฟันจะเคลื่อนที่ไป สำหรับวิธีการกลศาสตร์ลูปปิด ทันตแพทย์จะออกแบบลูปปิดที่ทำให้เกิดระบบของแรงและโมเมนต์ขึ้นที่แบร็คเก็ตในลักษณะดังรูปที่ 2.4 (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยโมเมนต์ที่เกิดจากลูปปิดจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับโมเมนต์ของแรง 100 กรัมที่เกิดขึ้นที่จุด C_{re} จากหลักการดังที่กล่าวมา การออกแบบลูปปิดจึงให้ความสำคัญ

กับ (1) ขนาดของแรงที่จะใช้ในการเลื่อนฟันให้พอดีที่จะสามารถเลื่อนฟันได้โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อหรือส่วนอื่น ๆ รอบฟัน และ (2) ขนาดของโมเมนต์ที่จะสามารถหักล้างกับแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นที่จุด C_{re} ได้ โดยจะพิจารณาขนาดของโมเมนต์นี้ในรูปของตัวแปร M/F อนึ่งเนื่องจากแบร็คเก็ตติดอยู่ที่ผิวนอกสุดของฟัน ดังนั้นนอกจากจะเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบขึ้นตามรูปที่ 2.4 (ข) แล้ว ยังเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบรอบแกนในแนวตั้งของฟันด้วย ซึ่งโมเมนต์นี้จะพยายามหมุนฟันรอบแกนในแนวตั้ง แต่ขนาดของโมเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ในกรณีแรก บทความนี้จะจะไม่พิจารณาผลกระทบใด ๆ จากโมเมนต์นี้ และจะไม่นำไปเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของลูปปิด



รูปที่ 2.4 จุดศูนย์กลางความต้านทาน และระบบของแรงเนื่องจากลูป (ปรับปรุงรูปจากงานของ Lindauer [12])

2.3 ทฤษฎีอีลาสติคซิติ์ และการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับทฤษฎีอีลาสติคซิติ์แบบคลาสสิกจะพิจารณาวัตถุของแข็งใด ๆ ประกอบขึ้นจากวัสดุที่ต่อเนื่อง ไม่สนใจว่าในระดับที่เล็กมาก ๆ วัตถุต่าง ๆ จะประกอบขึ้นจากโมเลกุล ดังนั้นเมื่อพิจารณาจุด ๆ หนึ่งในวัตถุจึงสมมติให้จุดนั้นมีลักษณะเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์โดยมีเนื้อวัสดุอยู่ในเอลิเมนต์นั้นเช่นเดียวกับที่พิจารณาจากโครงสร้างขนาดใหญ่ ตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเค้น (Stress) ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ความเครียด (Strain) และอุณหภูมิที่ทุก ๆ จุดในวัตถุ หากมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกันไปในทุก ๆ จุด

การวิเคราะห์วัตถุที่มีแรงภายนอกกระทำจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียด และระยะเคลื่อนตัวโดยการเปลี่ยนแปลงของความเค้นจะเป็นไปตามสมการสมดุล (Equilibrium Equations) คือ

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ σ_{ij} เป็นความเค้นที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามจุดต่าง ๆ ในวัตถุ และ $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$
 $\frac{\partial}{\partial x}$ เป็นอนุพันธ์ย่อยของตัวแปรใด ๆ เทียบกับพิกัด x y หรือ z (พิกัดคาร์ทีเซียน)
 b_i เป็นแรงวัตถุ (Body Force) ที่เกิดจากความโน้มถ่วง หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น
 ส่วนความเครียดจะสัมพันธ์กับส่วนประกอบของระยะเคลื่อนตัวตามสมการ

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ ε_{ij} เป็นส่วนประกอบของความเครียด และ $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$
 u เป็น ระยะเคลื่อนตัวในวัตถุ

เรียกสมการที่ (2.2) ว่า ความสัมพันธ์ความเครียดและระยะเคลื่อนตัว (Strain-displacement Relations) และสุดท้ายความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด (Stress-strain Relations) ภายใต้กฎของฮุก (Hooke's law) ดังแสดงในรูป

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.3)$$

เมื่อ C_{ijkl} เป็นค่าคงที่ในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุ [13] อาจเขียนในรูปเมทริกซ์ได้เป็น D_{II} [14] ความสัมพันธ์ทั้งสามข้างต้นเมื่อกระจายออกมาจะได้ 15 ตัวแปร และ 15 สมการโดยปกติจะต้องแก้สมการดังกล่าวร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตเพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ

สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เราจะแบ่งวัตถุที่พิจารณาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ แล้วพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์เสมือนเป็นวัตถุภายใต้สมการที่ (2.1 - 2.3) แล้วประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weighted Residual Method) เข้ากับสมการสมดุล จะได้สมการอินทิกรัลที่ควบคุมสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เป็น

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i w_i d\Omega + \int_{\Gamma} t_i w_i d\Gamma \quad (2.4)$$

เมื่อ w_i เป็นฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function) ถ้าใช้วิธีของบับโนฟและกาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin's method) จะแทนฟังก์ชันน้ำหนักด้วยฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function, N_a^e) ซึ่งสนามระยะเคลื่อนตัว (Displacement Field, u_i^e) ภายในเอลิเมนต์จะสัมพันธ์กับระยะเคลื่อนตัวที่โหนด (Nodal Displacement, U_i) ของเอลิเมนต์นั้น ๆ โดยอาศัยฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ตามสมการ

$$u_i^e = N_a^e U_i \quad (2.5)$$

จากนั้น แทนสมการที่ (2.5) ลงในสมการความเครียดและระยะเคลื่อนตัวจะได้

$$\varepsilon_{ij}^e = B_{ij}^e U_i \quad (2.6)$$

เมื่อ B_{ij}^e เป็นเมทริกซ์ความเครียดและระยะเคลื่อนตัว (Strain-Displacement Matrix) แทนสมการที่ (2.6) ลงในสมการความเค้นและความเครียด แล้วแทนลงในสมการที่ (2.4) ทำการจัดรูปและประกอบสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าเป็นสมการรวมของปัญหาทั้งโดเมน จะได้สมการอยู่ในรูป

$$K_{pQ} U_Q = F_p \quad (2.7)$$

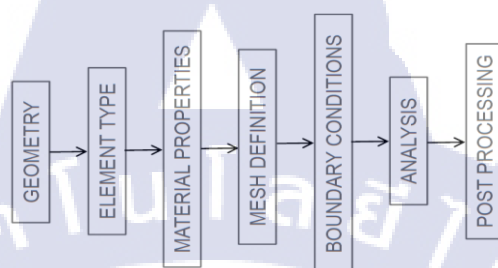
เมื่อ $K_{pQ} = K_{piqk} \int_V C_{ijkl} \frac{\partial N^p}{\partial x_j} \frac{\partial N^q}{\partial x_i} dV$ เป็นเมทริกซ์ความแข็งเกร็งรวม (Global Stiffness Matrix) ของปัญหา

F_p เป็นผลรวมของแรงวัตถุ และแรงที่ผิว

จากสมการที่ (2.7) หากแทนเงื่อนไขขอบเขต และแรงภายนอกลงไป จะสามารถแก้ระบบสมการในรูปเมทริกซ์เพื่อหาคำตอบที่ต้องการได้

จากที่บรรยายมาโดยคร่าว ๆ จะเห็นได้ว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งที่จะเปลี่ยนสมการควบคุม (Governing Equations) ของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้กลายเป็นสมการพีชคณิตที่อยู่ในรูปเมทริกซ์ โดยแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ แล้วทำการประกอบสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบสมการรวมของปัญหาที่จะวิเคราะห์ จากนั้นจึงแทนค่าที่ขอบเขตและภาระภายนอกเพื่อแก้ระบบสมการหาคำที่ต้องการ

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม ANSYS มีขั้นตอนพอสรุปเป็นหลักการได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือ การสร้างแบบจำลองของปัญหา การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ การสร้างเมช (Mesh Generation) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตซึ่งรวมไปถึงการกำหนดภาระที่กระทำ การคำนวณตัวแปรเบื้องต้น และสุดท้ายคือการนำตัวแปรเบื้องต้นที่คำนวณได้ไปคำนวณตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องต่อไป



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการจำลองปัญหาในโปรแกรม ANSYS

ในการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) โดยเอลิเมนต์ย่อยนี้อาจมีรูปร่างเป็นสองมิติ เช่น สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม หรือสามมิติ เช่น รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element) รูปอิฐบล็อก (Brick Element หรือ Hexahedral Element) และรูปกลม ก็ได้ เอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ซึ่งในแต่ละจุดต่อจะใช้อ้างอิงถึงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ รูปที่ 2.6 (ข) เป็นตัวอย่างเอลิเมนต์สามมิติที่นิยมใช้กันทั่วไป



รูปที่ 2.6 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย (ก) โดยใช้เอลิเมนต์รูปอิฐบล็อก และ (ข) ตัวอย่างเอลิเมนต์สามมิติ [15]

2.4 ปรัชญาวิศวกรรม

Siatkowski [1, 4] นำเสนอวิธีการออกแบบลูปปิดในลวดจัดพันอย่างเป็นระบบโดยใช้ทฤษฎีของคาสติเกลียโนสร้างสมการอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงเป็นฟังก์ชันของขนาดมิติของลูป สมการ

ที่ได้สามารถใช้เลือกอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงที่เหมาะสมได้ จากนั้นจึงออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น งานวิจัยนี้วิเคราะห์ลูปตัวยูที่มีการขด ลูปตัวที ลูปตัวแอล และลูปตัวแอลที่มีการขด แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกระทบของขนาดต่าง ๆ ของลวดอย่างครบถ้วนและชัดเจน

Ungbhakorn et al [2 - 3] ใช้ทฤษฎีของคาสติเกลียโนวิเคราะห์ลวดจัดฟันที่ถูกตัดเป็นรูปร่างต่าง ๆ กันเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์ และอัตราส่วนของแรงและโมเมนต์ที่ปลายลวด ต่อระยะ H และมุม ϕ ของลวดที่ถูกตัด โดยเทียบกับผลการทดลอง และผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ใช้โปรแกรม Nastran) ซึ่งงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นจุดอ่อนของทฤษฎีของคาสติเกลียโนที่ยังไม่สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องในทุกกรณี ในขณะที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า

Chen และคณะ [16] ทำการทดลองหาโมเมนต์และแรงของลูปตัวทีโดยวิเคราะห์ผลของขนาดของลูปที่เปลี่ยนแปลงไป โดยขนาดดังกล่าวอยู่ในช่วงการใช้งานจริงในคลินิกทันตกรรม พบว่าการเพิ่มขนาดของลูปในแนวตั้งหรือในแนวนอนจะเป็นการลดค่าคงที่สปริงที่ได้จากความชันของกราฟแรงต่อระยะกระจัด จุดอ่อนของงานวิจัยนี้คือ ไม่ได้ตรวจสอบขนาดของลูปอย่างครบถ้วน

Setiawan และคณะ [5] ใช้ทฤษฎีของคาสติเกลียโน และโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ลูปจัดฟันรูปตัวที ลูปเห็ด และลูปตัวยูเทียบกับผลการทดลอง โดยกำหนดขนาดของลูปที่ค่าใดค่าหนึ่ง จากนั้นจึงคำนวณค่าของแรง โมเมนต์ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรงของทั้งสามวิธีมาเปรียบเทียบกัน นอกจากนี้ยังทำตารางเปรียบเทียบลูปปิดทั้งสามแบบโดยแสดงให้เห็นว่า แบบใดให้แรง โมเมนต์ และอัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง มาก น้อย หรือปานกลางด้วย เพื่อให้ทันตแพทย์สามารถนำไปใช้ได้อย่างเหมาะสม

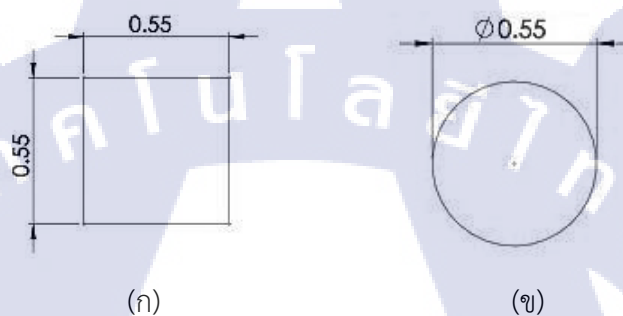
Techalerpaisarn และ Versluis [6] วิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของลูปปิดทั้งแบบตัวแอลและตัวที โดยมีการแบ่งตัวแอลออกเป็น 6 รูปแบบย่อย คือ ตัวแอล 90 องศา ตัวแอลเอียง 70 องศา ตัวแอล 90 องศาที่มีคอยล์ที่ปลาย ตัวแอล 70 องศาที่มีคอยล์ที่ปลาย ตัวแอล 90 องศาที่มีคอยล์ตรงมุม และตัวแอล 70 องศาที่มีคอยล์ตรงมุม ตัวแปรสำคัญที่วิเคราะห์คือ ตำแหน่งของลูป โดยพิจารณาว่าห่างจากแบร็คเก็ตทางซ้ายและขวาเป็นระยะต่าง ๆ จะมีผลอย่างไรต่อ อัตราส่วนแรงต่อระยะกระจัด อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง และแรงในแนวตั้งที่ปลายขา นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบลูปแต่ละแบบด้วย

โกศลอิทธิกุล และคณะ [17] ทำการวิเคราะห์อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่โดยการทดลองดึงลูป 4 แบบ แล้วใช้ทฤษฎีทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ในการเปรียบเทียบขนาดของลูปทั้งสี่แบบจะมีค่าคงที่โดยให้ความสูงและความยาวของลวดในแนวนอนที่ต่อจากปลายขาลูปมีค่าเท่ากัน จากผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนตัวของลูปทั้งสี่เรียงจากมากไปน้อยคือ ลูปรูปตัวยูแบบขากลับทาง ลูปรูปตัวยู ลูปรูปตัวยูมีขีด และลูปรูปตัวยูมีขีดแบบขากลับทาง

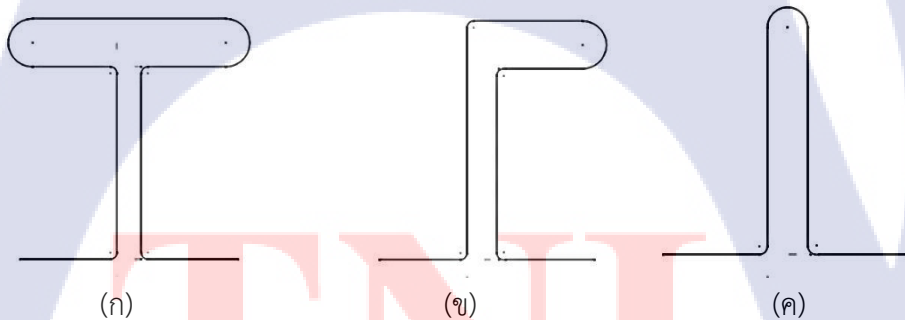
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ปัญหาที่สนใจคือ หน้าตัดของลวดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่เฉพาะกรณีของลูปรูปตัวแอลจะทำการคำนวณหน้าตัดวงกลมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในขณะที่รูปร่างของลูปทั้งสามแบบคือ แบบตัวที ตัวแอล และตัวยู แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 หน้าตัดของลวด 2 แบบ



รูปที่ 3.2 รูปร่างของลวด 3 แบบ

3.1 ขนาดของลูปตัวที ลูปตัวยู ลูปตัวแอล และลูปตัวยู กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลูปตัวทีที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะรูปร่างและการกำหนดตัวแปรของขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.3 รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 โดยจะจำกัดขนาดสูงสุดในแนวนอนและในแนวตั้งให้ไม่เกินด้านละ 10 มม. เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในช่องปาก หน้าตัดของลวดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5.5×5.5 ตร.มม.

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าลูบจะมีการตัดโค้งคล้ายพยัญชนะตัว T ในภาษาอังกฤษ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ ความยาวของลูบในแนวนอน a รัศมีความโค้ง r ความสูงของขาลูบ h และระยะห่างระหว่างขาลูบ d งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรเหล่านี้โดยนำมาเทียบกันเพื่อให้ทราบว่า ตัวแปรใดมีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลูบเท่าใด ดังกรณีต่อไปนี้

3.1.1 วิเคราะห์ d โดยกำหนดให้ $r = 1$ มม. $h = 10$ มม. และ $a = 8$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า d จาก 1 ถึง 6 มม.

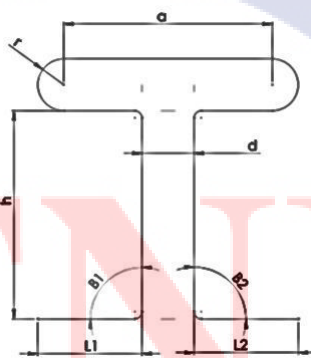
3.1.2 วิเคราะห์ r โดยกำหนดให้ $h + 2r = 10$ มม. $d = 1$ มม. และ $a + 2r = 10$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า r จาก 0.5 ถึง 3 มม..

3.1.3 วิเคราะห์ h โดยกำหนดให้ $a = 8$ มม. $d = 1$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า h จาก 3 ถึง 8 มม.

3.1.4 วิเคราะห์ a โดยกำหนดให้ $h = 8$ มม. $d = 1$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า a จาก 3 ถึง 8 มม.

3.1.5 วิเคราะห์ B1, B2 โดยกำหนดให้ $a = 8$ มม. $d = 1$ มม. $h = 10$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า B1, B2 จาก 60 ถึง 90 องศา

3.1.6 วิเคราะห์ L1, L2 โดยกำหนดให้ $a = 8$ มม. $d = 1$ มม. $h = 10$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า L1, L2 จาก 1 ถึง 6 มม.



รูปที่ 3.3 ตัวแปรของขนาดลูบตัวที่วิเคราะห์

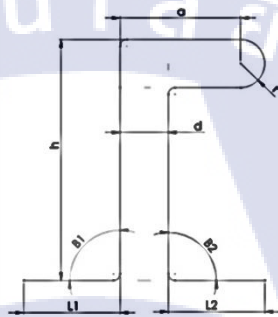
จากรูปที่ 3.4 ลูบจะมีการตัดโค้งคล้ายพยัญชนะตัว L ในภาษาอังกฤษ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ ความยาวของลูบในแนวนอน a รัศมีความโค้ง r ความสูงของขาลูบ h และระยะห่างระหว่างขาลูบ d งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรเหล่านี้โดยนำมาเทียบกันเพื่อให้ทราบว่า ตัวแปรใดมีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลูบเท่าใด ดังกรณีต่อไปนี้

3.1.7 วิเคราะห์ r โดยกำหนดให้ $h + 2r = 10$ มม. $d = 1$ มม. และ $a + 2r = 10$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า r จาก 0.5 ถึง 3 มม.

3.1.8 วิเคราะห์ h โดยกำหนดให้ $a = 8$ มม. $d = 1$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า h จาก 3 ถึง 8 มม.

3.1.9 วิเคราะห์ a โดยกำหนดให้ $h = 8$ มม. $d = 1$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า a จาก 3 ถึง 8 มม.

3.1.10 วิเคราะห์ $B1, B2$ โดยกำหนดให้ $a = 8$ มม. $d = 1$ มม. $h = 10$ มม. และ $r = 1$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า $B1, B2$ จาก 60 ถึง 90 องศา



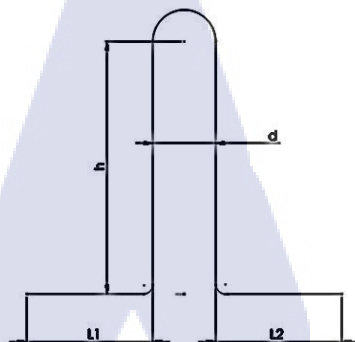
รูปที่ 3.4 ตัวแปรของขนาดลูบตัวแอลที่วิเคราะห์

จากรูปที่ 3.5 ลูบจะมีการตัดโค้งคล้ายพยัญชนะตัว U ในภาษาอังกฤษ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ ความสูงของขาลูบ h และระยะห่างระหว่างขาลูบ d งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรเหล่านี้โดยนำมาเทียบกันเพื่อให้ทราบว่า ตัวแปรใดมีผลต่อพฤติกรรมทางกลของลูบเท่าใด ดังกรณีต่อไปนี้

3.1.11 วิเคราะห์ h โดยกำหนดให้ $h + r = 10$ มม. $d = 2$ มม. และ $L1 + L2 + d = 10$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า h จาก 9 ถึง 4 มม.

3.1.12 วิเคราะห์ d โดยกำหนดให้ $h + r = 10$ มม. $h = 10$ มม. และ $L1 + L2 + d = 10$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า d จาก 1 ถึง 6 มม.

3.1.13 วิเคราะห์ $B1, B2$ โดยกำหนดให้ $h + r = 10$ มม. $d = 2$ มม. $h = 10$ มม. และ $L1 + L2 + d = 10$ มม. แล้วปรับเปลี่ยนค่า $B1, B2$ จาก 60 ถึง 90 องศา



รูปที่ 3.5 ตัวแปรของขนาดลูบตัวยูที่วิเคราะห์

3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS

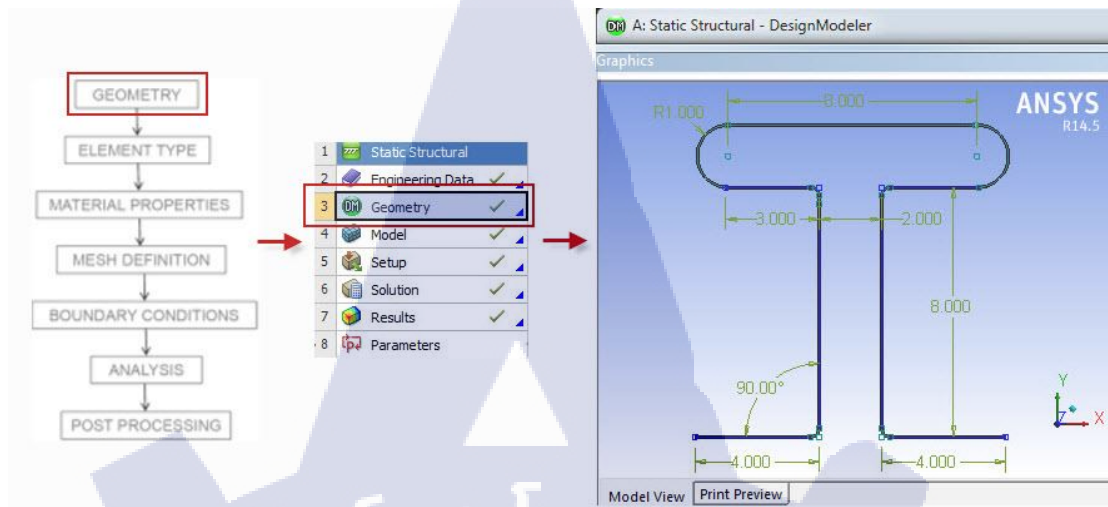
ข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม ANSYS อาจเรียงลำดับตามรูปที่ 2.5 โดยประมาณ ด้วยความยืดหยุ่นของโปรแกรม ผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูลสลับขั้นตอนก่อนหลังได้ในระดับหนึ่ง ส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์คือ รูปร่างของลูบตัวที่ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 และการปรับเปลี่ยนขนาดต่าง ๆ สามารถทำได้โดยแก้ไขตัวเลขบอกขนาดในส่วนของ CAD ซึ่งโปรแกรมจะปรับขนาดให้โดยอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เอลิเมนต์ SOLID95 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสามมิติ 20 จุดต่อการคำนวณ และให้โปรแกรมกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมให้โดยอัตโนมัติ โดยจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อที่ใช้ในการคำนวณจะอยู่ระหว่าง 40 000 - 80 000 เอลิเมนต์ และ 20 000 - 35 000 จุดต่อตามลำดับ ส่วนการให้ภาระกับโครงสร้างลูบ สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดระยะยึดที่ขา ลูบทั้งสองข้างให้เคลื่อนออกไปเป็นระยะ $x/2$ แล้วให้โปรแกรมคำนวณหาแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น โดยจะปรับเปลี่ยนระยะยึดตั้งแต่ 0.25 ถึง 3 มม. หมายความว่า งานวิจัยนี้จะมุ่งพิจารณาที่อัตราส่วนแรงต่อระยะเคลื่อนที่เป็นหลัก

3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์

ในการวิจัยได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาค่าแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการทำให้ลูบตัวที่ตัว ยูตัวแอลเกิดสปริงแบ็ค โดยการกำหนดค่าการยึดตัวของขาลวด

ขั้นตอนการเตรียมการใช้ระบบปฏิบัติการ Windows โดยเลือกที่โปรแกรม ANSYS 14.5> Workbench14.5 จะเข้าสู่ระบบดังรูปที่ 3.6

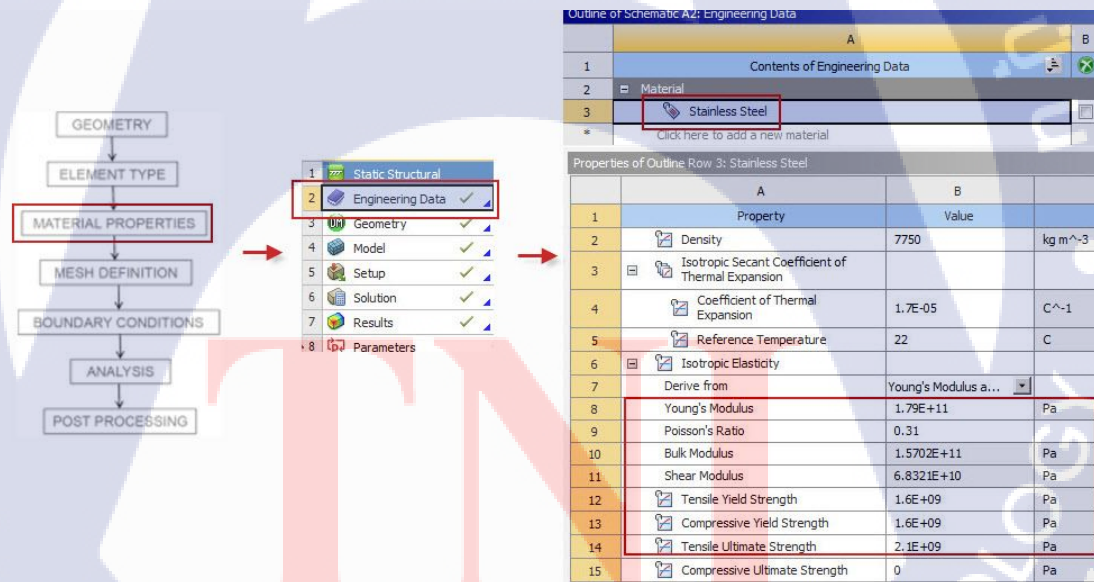
3.3.1 GEOMETRY สร้างแบบจำลองรูปแบบลูบตัวที่



รูปที่ 3.6 การสร้างรูปทรงของลวดตัวที่

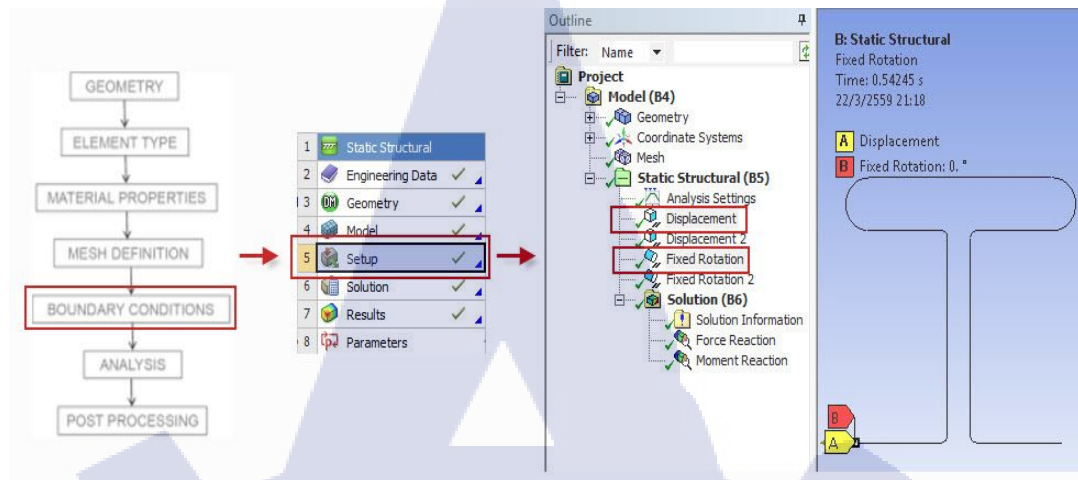
3.3.2 ELEMENT TYPE กำหนด Element Type เป็นแบบ Hexahedra

3.3.3 MATERIAL PROPERTIES กำหนดชนิดของวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุ

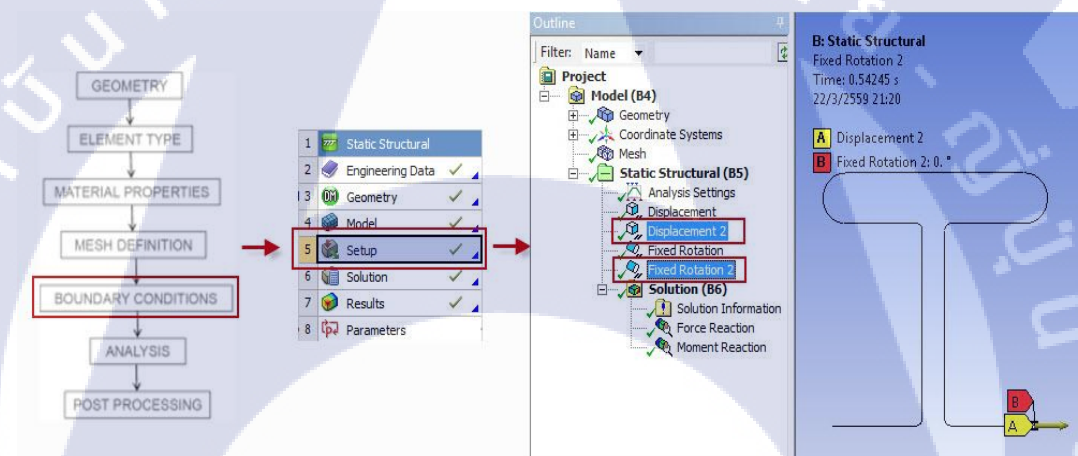


รูปที่ 3.7 กำหนดค่าของวัสดุ

3.3.4 BOUNDARY CONDITIONS กำหนดตัวแปรต้นเป็นค่าระยะยึด x จากขาลวดทั้งสองที่จุด A เป็น(0.25,05,0.75,1.0,1.25,1.5 mm)ด้านซ้ายและด้านขวา และกำหนดค่า Fixed Rotation ที่จุด B ดังรูปที่ 3.8,3.9

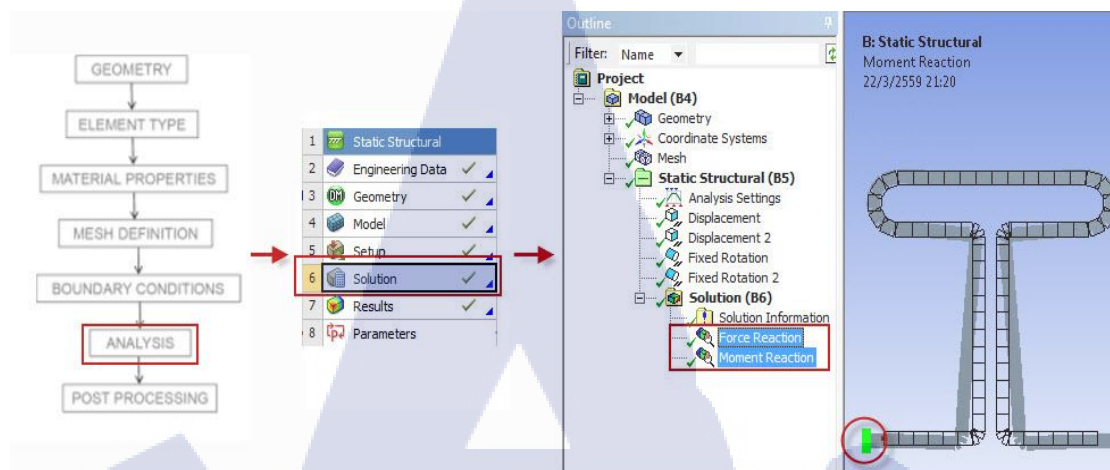


รูปที่ 3.8 การหนดค่าตัวแปรต้นเป็นระยะยึดของขาลูปตัวที่ด้านซ้าย



รูปที่ 3.9 กาหนดค่าตัวแปรต้นเป็นระยะยึดของขาลูปตัวที่ด้านขวา

3.3.5 ANALYSIS ขั้นตอนการคำนวณ แสดงผลการคำนวณในลักษณะตัวเลข ที่ Solution เลือก Force Reaction และ Moment Reaction เพื่อดูผลจากการคำนวณการเกิดขึ้น



รูปที่ 3.10 ผลการคำนวณเป็น Force Reaction และ Moment Reaction

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

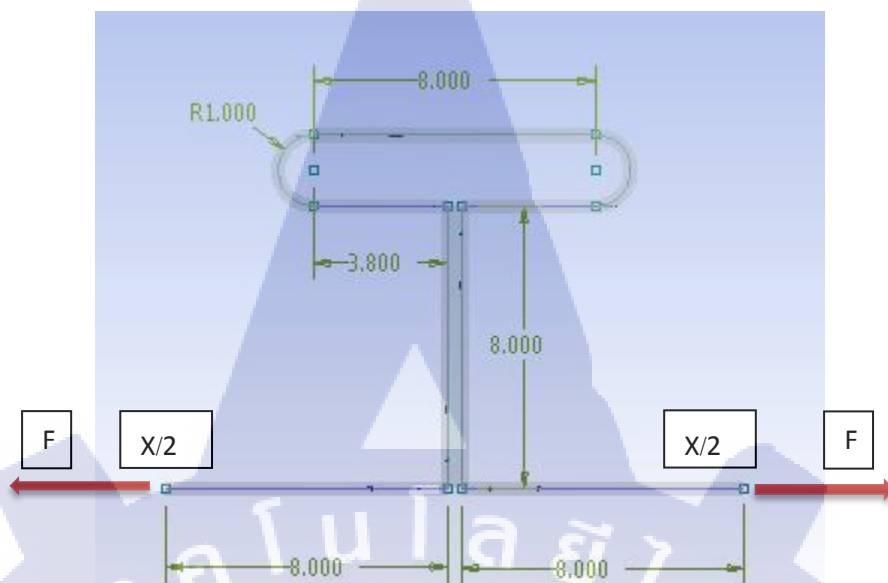
4.1 บทนำ

งานวิจัยในโครงการนี้ ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์คานในลวดจัดฟันเพื่อนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการออกแบบขนาดของลูปตัวที่ที่เหมาะสม และใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ขนาดของลูปแบบอื่น ซึ่งงานวิจัยนี้จะปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ของลูปตัวที่ คือ ระยะห่างของขา ลูป ความสูงของขา ลูป ความสูงของขาตัดโค้ง และกว้างของขาตัดโค้ง ซึ่งจะเปรียบเทียบโดยใช้ อัตราส่วนโมเมนต์ต่อแรง (Moment-to-force ratio, M/F) อัตราส่วนแรงต่อระยะการเคลื่อนที่ และ มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการทดลองของงานวิจัยอื่น [3], [5] เป็นการยืนยันว่างานวิจัยนี้ ถูกต้อง

4.2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลงานวิจัยอื่น

4.2.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองงานวิจัยอื่น

เพื่อเป็นการยืนยันว่าการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม (Ansys) มีความถูกต้องแม่นยำ และได้ผลการคำนวณที่ตรงกันจึงทำการเปรียบเทียบไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของงานวิจัยอื่น [3] โดยใช้ขนาดตามรูปที่ 4.1 พื้นที่หน้าตัด 0.55×0.55 mm วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้า แอสเทนเลสโดยมีโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) = 172 Gpa กำหนดระยะเป็น $x/2$ ที่จุดปลายขา ลูปทั้งสองข้าง เปรียบเสมือนจุดที่ยึดติดกับแบล็คเก็ตและกำหนดให้เป็นจุดหมุนคงที่ เมื่อทำการยืดขา ลูปด้วยระยะ $x/2$ ทำให้เกิดแรง F และโมเมนต์ M ที่จุดเดียวกันกับจุดปลายขา ลูป จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ขา ลูปในรูปร่างต่างๆ กำหนดให้แรง F หน่วยเป็นกรัม (g) โมเมนต์ M หน่วย (g • mm) ระยะยืด $x/2$ หน่วยเป็น (mm) และนำไปใช้ในลูปตัวที่ถัดไป



รูปที่ 4.1 รูปตัว T ที่ใช้ในการเปรียบเทียบโดยการคำนวณและการทดลอง

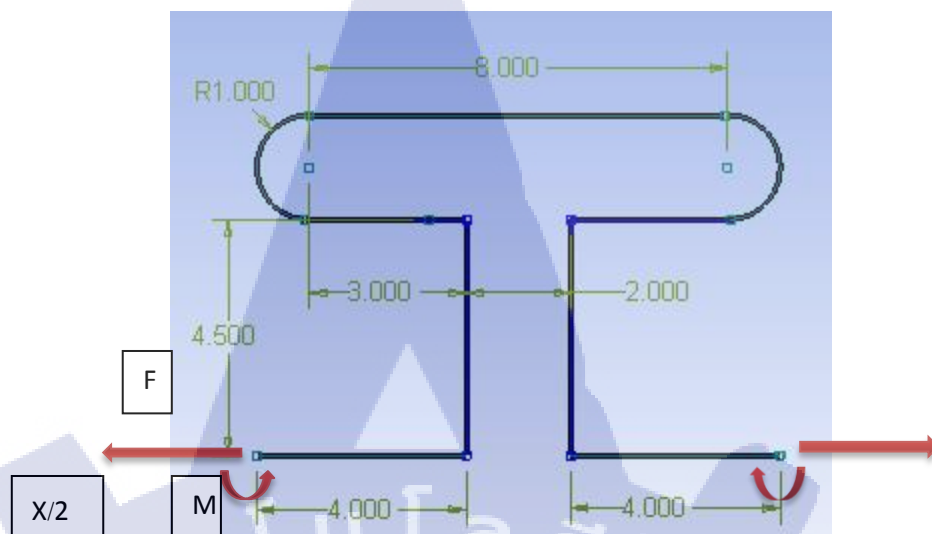
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสติฟเนส (Stiffness, k) ด้วยการคำนวณกับการทดลองของงานวิจัยอื่น
ในรูปร่างรูปตัว T ดังในรูปที่ 4.1

Loop Type	Finite Element Stiffness K (g/mm)	Experiment Stiffness K (g/mm)	ERROR (%)
T-Loop	59.13	59.63	0.83

จากตารางที่ 4.1 ได้ทำการเปรียบเทียบค่าสติฟเนส (Stiffness, k) ระหว่างการคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์ (Ansys) กับผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยอื่น [3] โดยให้หน่วยเป็น (gram/millimeter ,g/mm) พบว่าค่าสติฟเนสมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งมี Error = 0.83 %

4.2.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลไฟไนต์เอลิเมนต์งานวิจัยอื่น

การเปรียบเทียบไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัยอื่น [5] โดยใช้ขนาดตามรูปที่ 4.2 พื้นที่หน้าตัด 0.4046X0.5588 mm วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าสเตนเลสโดยมีโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) = 200 Gpa



รูปที่ 4.2 รูปตัวที่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบโดยการคำนวณและไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบแรง F และโมเมนต์ M ด้วยการคำนวณกับผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัยอื่นในรูปร่างรูปตัวที่ดังในรูปที่ 4.2

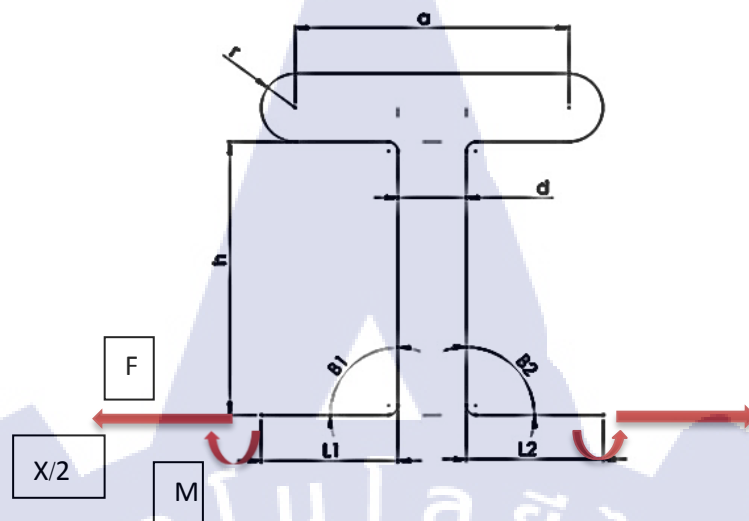
x	ไฟไนต์เอลิเมนต์		ไฟไนต์เอลิเมนต์งานวิจัยอื่น		error(%)	
	F (g)	M (g•mm)	F (g)	M (g•mm)	F	M
1 mm	269.46	965.76	268	958	0.01	0.08
2 mm	538.92	1931.52	536	1848	0.03	0.84

จากตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบแรง F และโมเมนต์ M ระหว่างการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ (Ansys) กับไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัยอื่นโดยใช้หน่วยของแรงเป็น (gram,g) และโมเมนต์เป็น (gram•millimeter,g•mm) [5] พบว่าค่าที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน

4.3 วิเคราะห์ลวดจัดฟัน

4.3.1 วิธีทำการวิเคราะห์ของลวดจัดฟันแบบรูปตัวที่ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการวิเคราะห์

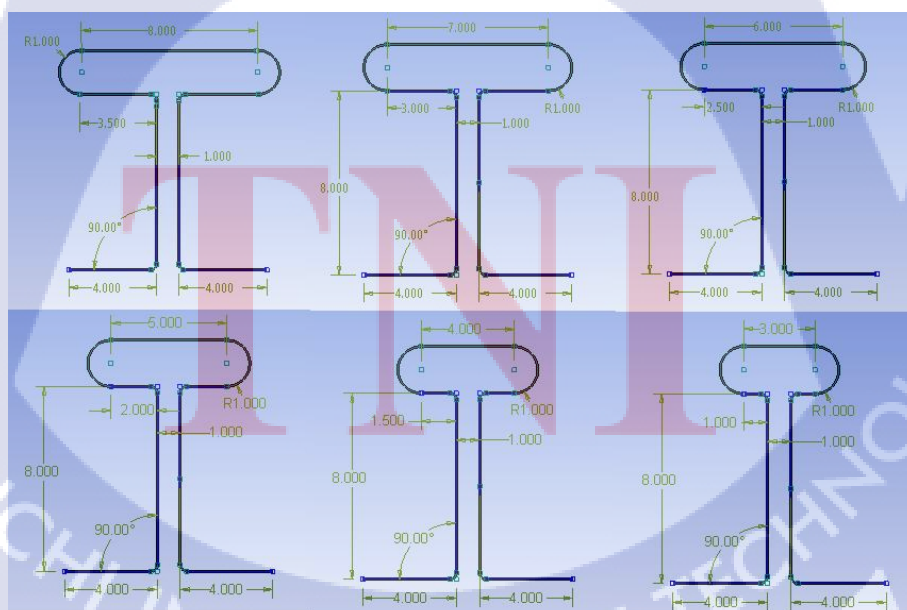
ทำการวิเคราะห์หาแรงต่อระยะยืด โมเมนต์ต่อแรง ของลวดจัดฟันเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าสแตนเลสโดยมีโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) = 179 Gpa ทำการวิเคราะห์รูปตัวที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 0.55x0.55 mm โดยกำหนดตัวแปรดังในรูปที่ 4.3 ระยะ d,h,a,r,L1,L2 มีหน่วยเป็น (mm) B1,B2 หน่วย (°)



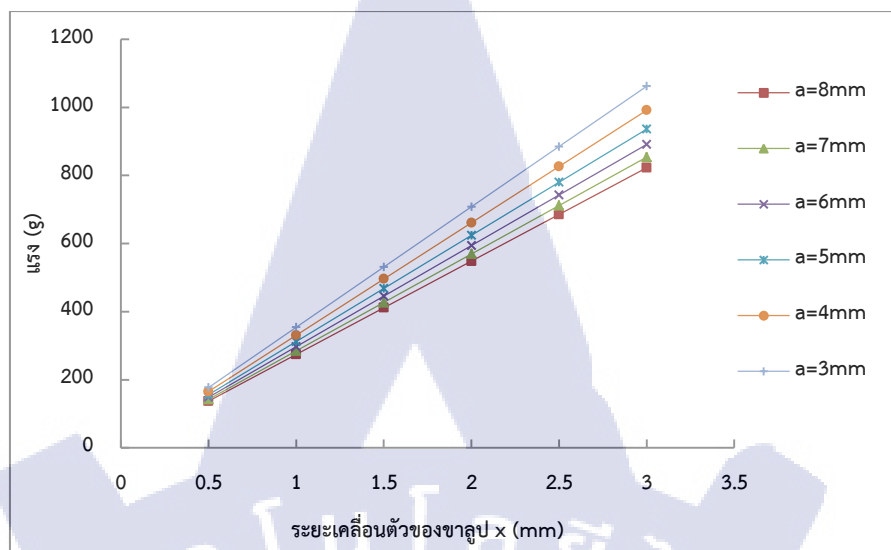
รูปที่ 4.3 การกำหนดค่าตัวแปรของลวดจัดฟันรูปแบบลูปตัวที่

4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a

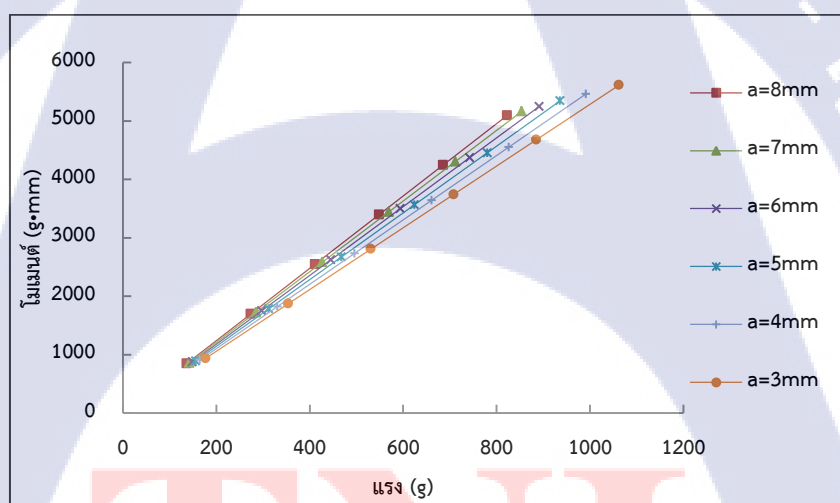
จากรูปที่ 4.5, 4.6 กรณีลูปตัวที่การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร a จะเห็นว่า ค่า a ที่มากกว่าจะให้แรง F ที่มีขนาดน้อยกว่า แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (200-1000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (1000-5000 g·mm)



รูปที่ 4.4 ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร a



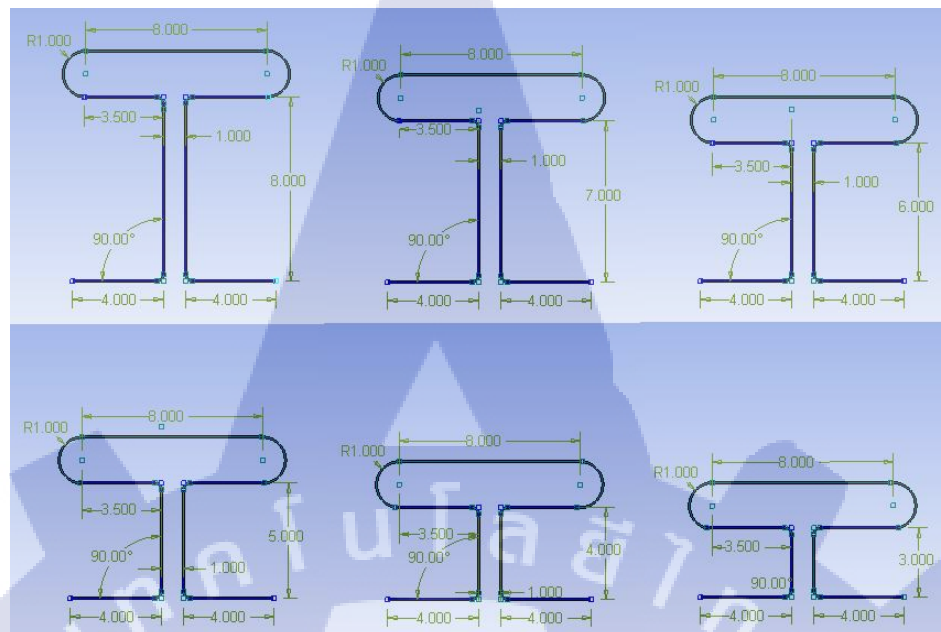
รูปที่ 4.5 ผลการคำนวณระยะยึดกับแรงของลูप्तว์ที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a



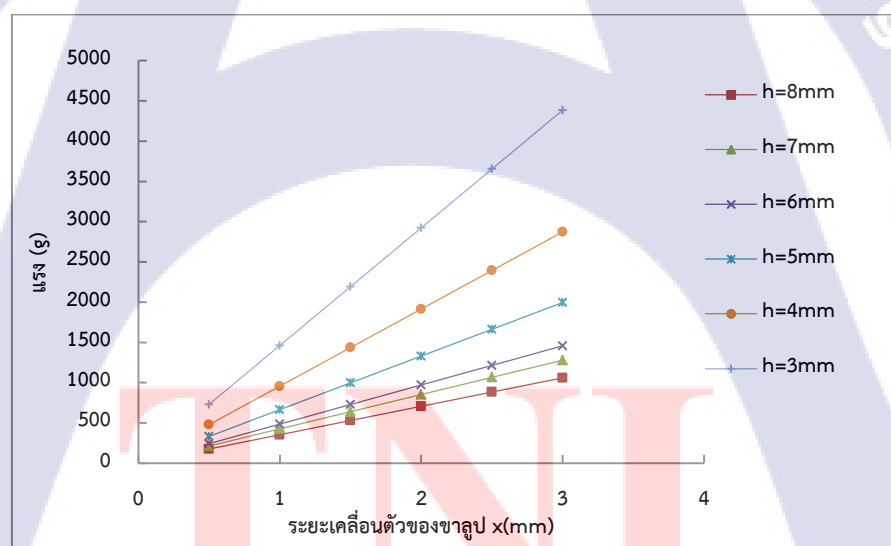
รูปที่ 4.6 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูप्तว์ที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a

4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ลูप्तว์ที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h

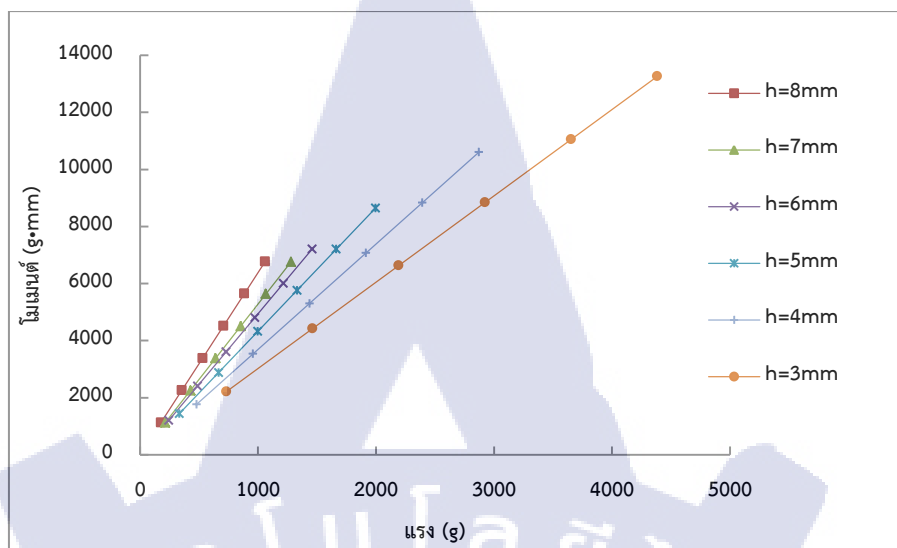
จากรูปที่ 4.8, 4.9 กรณิลูप्तว์ที่ การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร h สามารถประเมินได้ว่า เมื่อความสูงของขาลูปมีค่าไม่มากพอ แรง F และ M ที่ขาลูป จะมีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่แรงที่ใช้ในการเลื่อนพันอาจมีค่าไม่ถึง 500 g โดยมีแรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (200-4000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (1000-14000 g·mm)



รูปที่ 4.7 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่วีเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร h



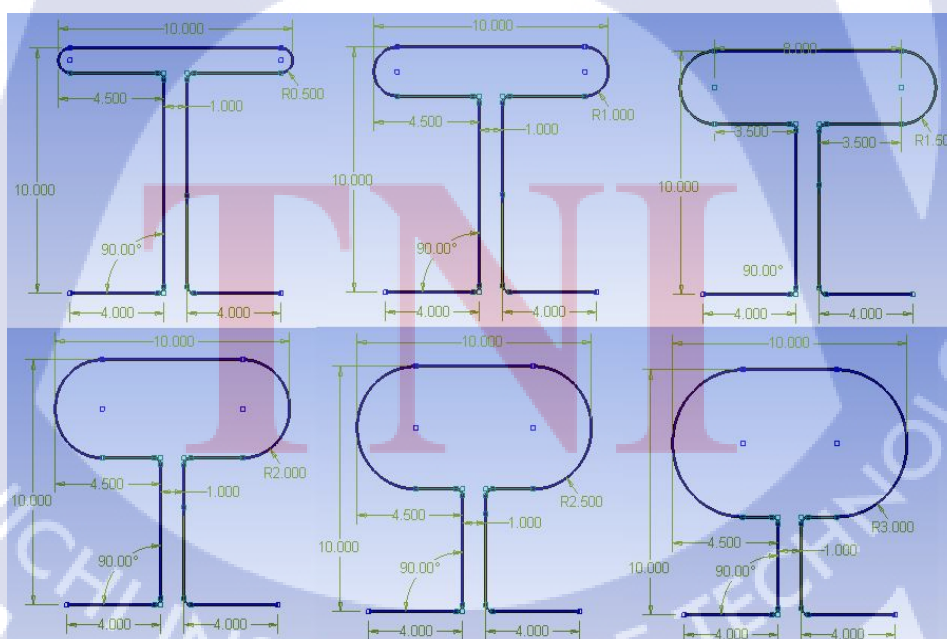
รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h



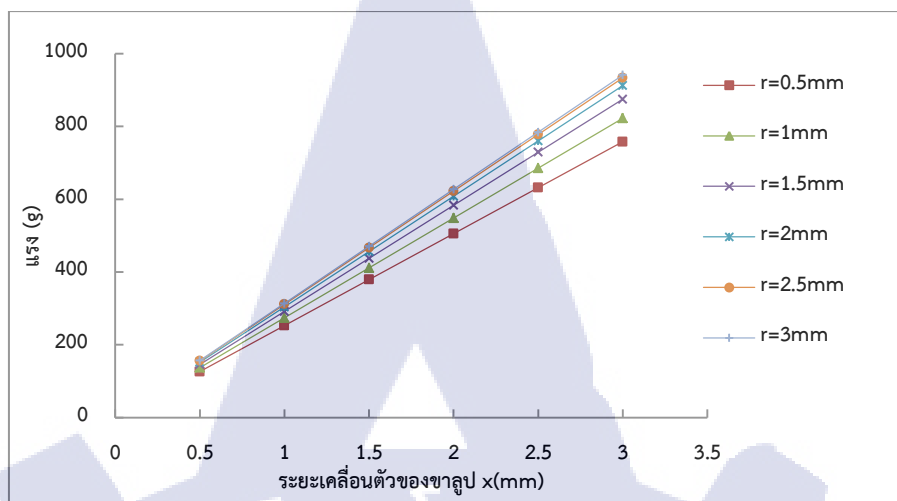
รูปที่ 4.9 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h

4.3.1.3 ผลการวิเคราะห์รูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r

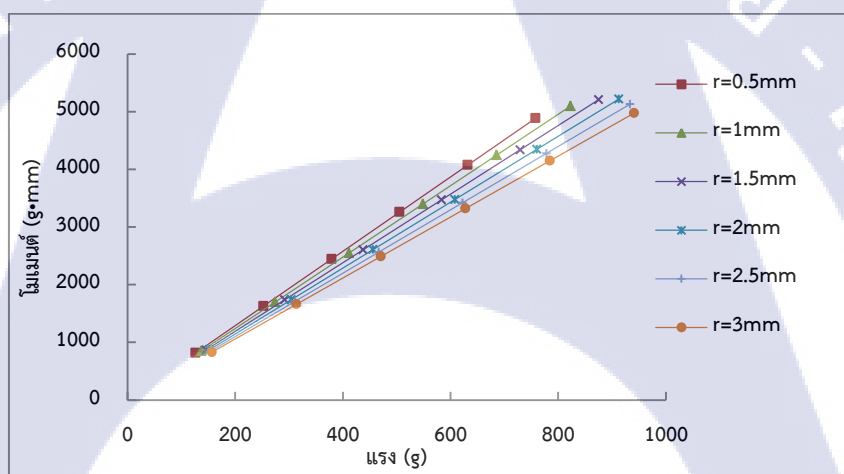
จากรูปที่ 4.11 ,4.12 กรณีรูปตัวที่ การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร r จะเห็นได้ว่ารัศมีของรูปมีน้อยจะส่งผลทำให้เกิด F ที่มีน้อยตามไปด้วย แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-900 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (1000-5000 g*mm)



รูปที่ 4.10 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร r



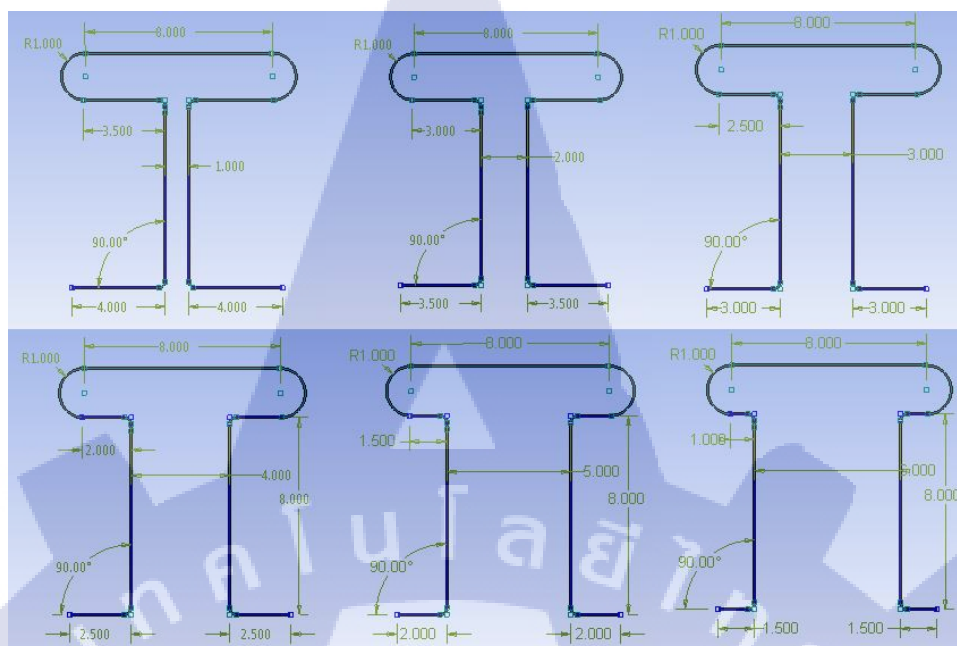
รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r



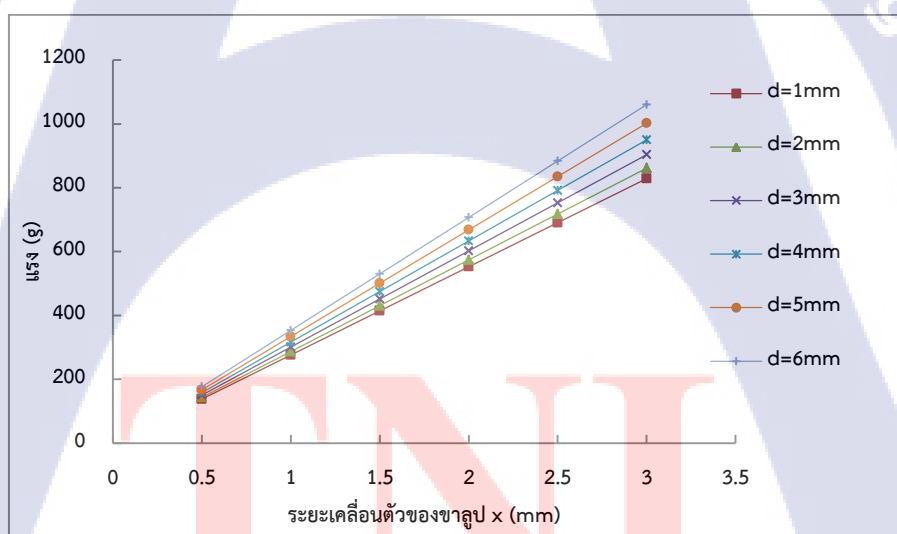
รูปที่ 4.12 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r

4.3.1.4 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d

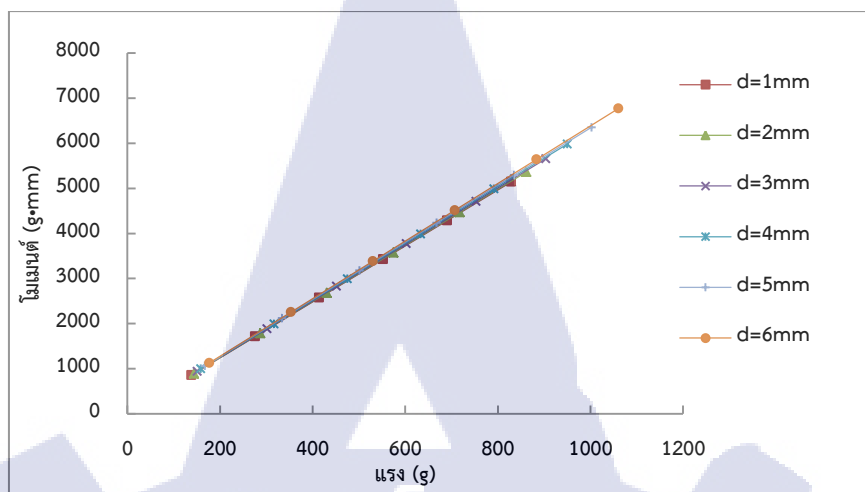
จากรูปที่ 4.14, 4.15 กรณิลูปตัวที่ การวิเคราะห์ เปลี่ยนตัวแปร d จะเห็นว่าระยะระหว่างขาลูปทั้งสองไม่มีผลต่อ M ของลวด แต่จะมีผลต่อ F ที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างขาลูปมาก โดยทันตแพทย์สามารถเลือกกำหนดระยะลูปได้ตามความเหมาะสมกับลักษณะในช่องปากของคนไข้ แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (200-1000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (1000-7000 g*mm)



รูปที่ 4.13 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยน d



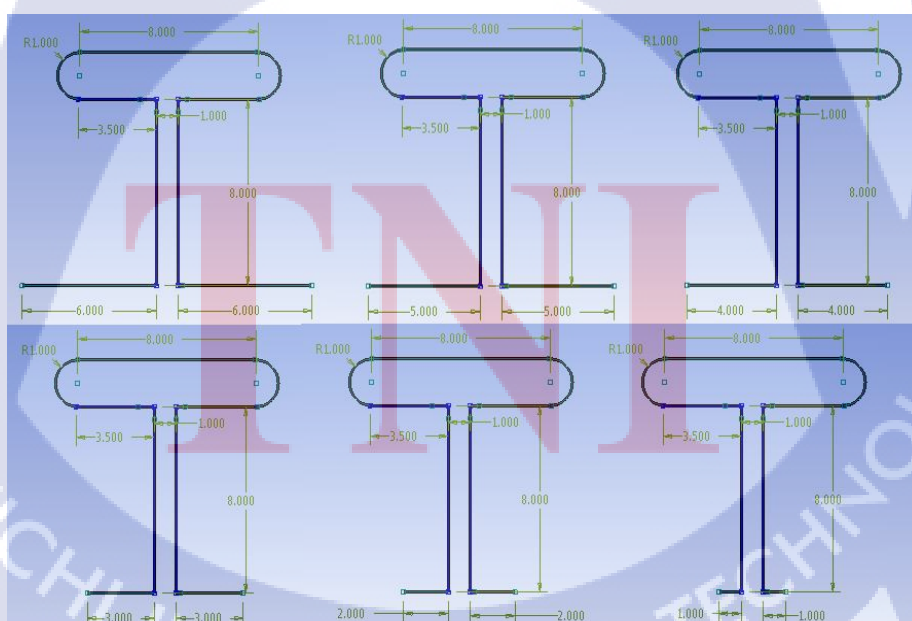
รูปที่ 4.14 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d



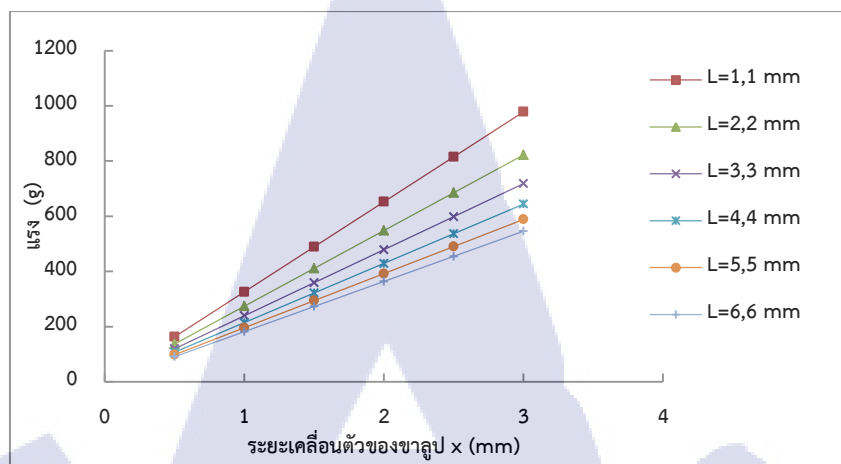
รูปที่ 4.15 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d

4.3.1.5 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร L1, L2

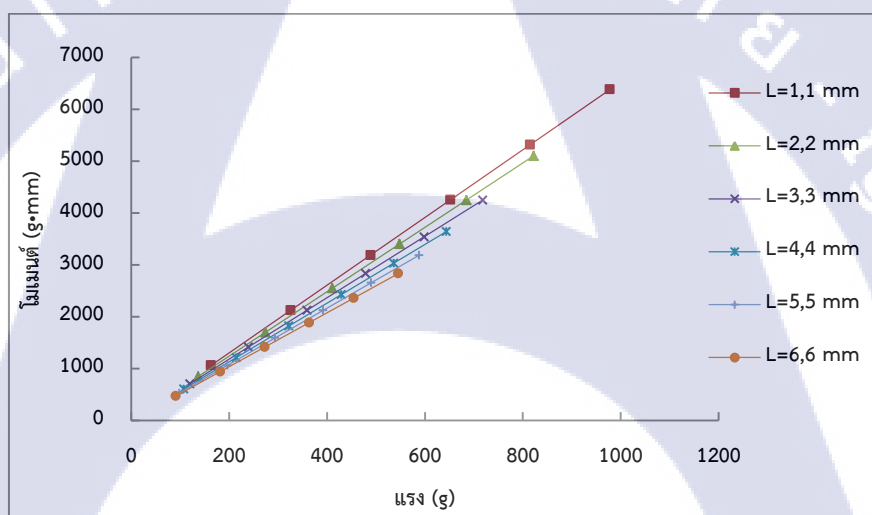
จากรูปที่ 4.17, 4.18 กรณีลูปตัวที่ การวิเคราะห์ เปลี่ยนตัวแปร L1, L2 พบว่าระยะห่างของขาลูปที่มากจะส่งผลกับแรงที่เกิดขึ้นทำให้น้อยลง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการเลือกนำมาใช้โดยจะถูกกำหนดจากตัวแบล็คเก็ตทั้งสองที่ติดอยู่กับตัวคั่นไข้ แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-1000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-6000 g·mm)



รูปที่ 4.16 ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร L1, L2



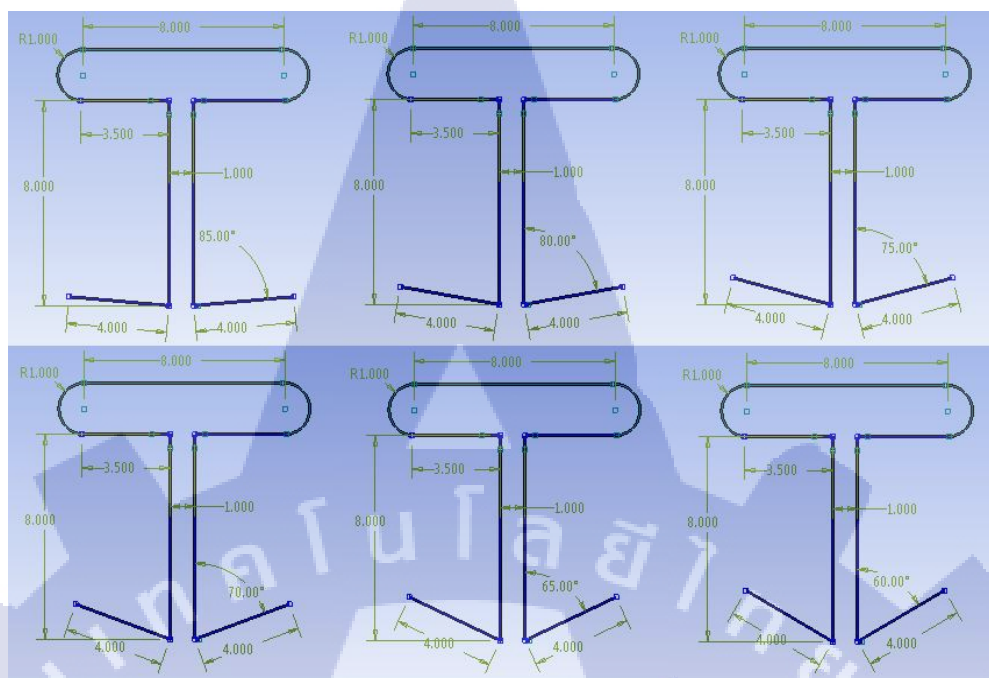
รูปที่ 4.17 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร L1,L2



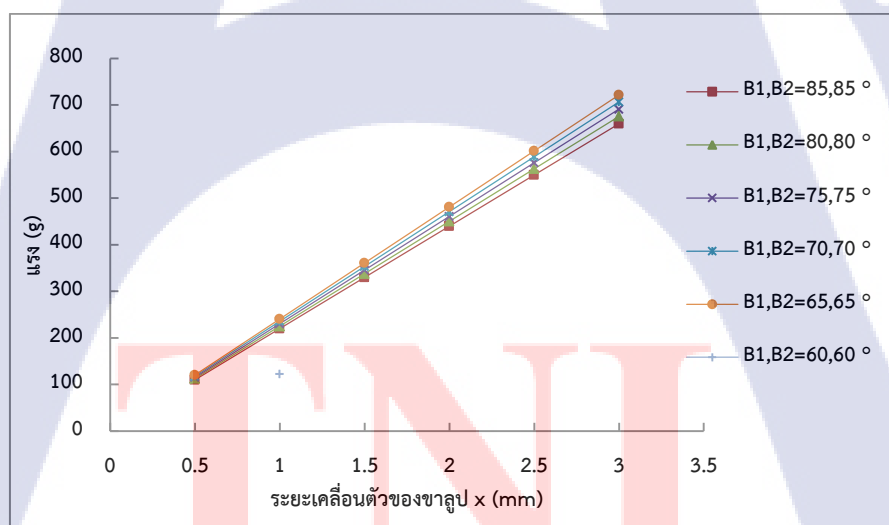
รูปที่ 4.18 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร L1, L2

4.3.1.6 ผลการวิเคราะห์ลูบตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2

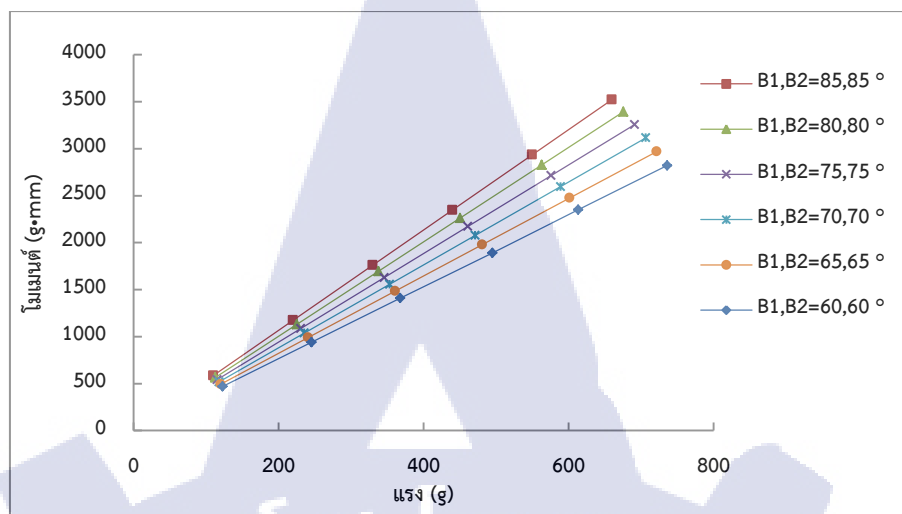
จากรูปที่ 4.20, 4.21 กรณิลูบตัวที่ การวิเคราะห์ เปลี่ยนตัวแปร B1, B2 เห็นได้ว่ามุมที่เปลี่ยนไปทั้งสองด้านจะส่งผลกระทบต่อแรงค้ำยันน้อย แต่ส่งผลกระทบต่อโมเมนต์ตามไปด้วย แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-750 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-3500 g•mm)



รูปที่ 4.19 ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2



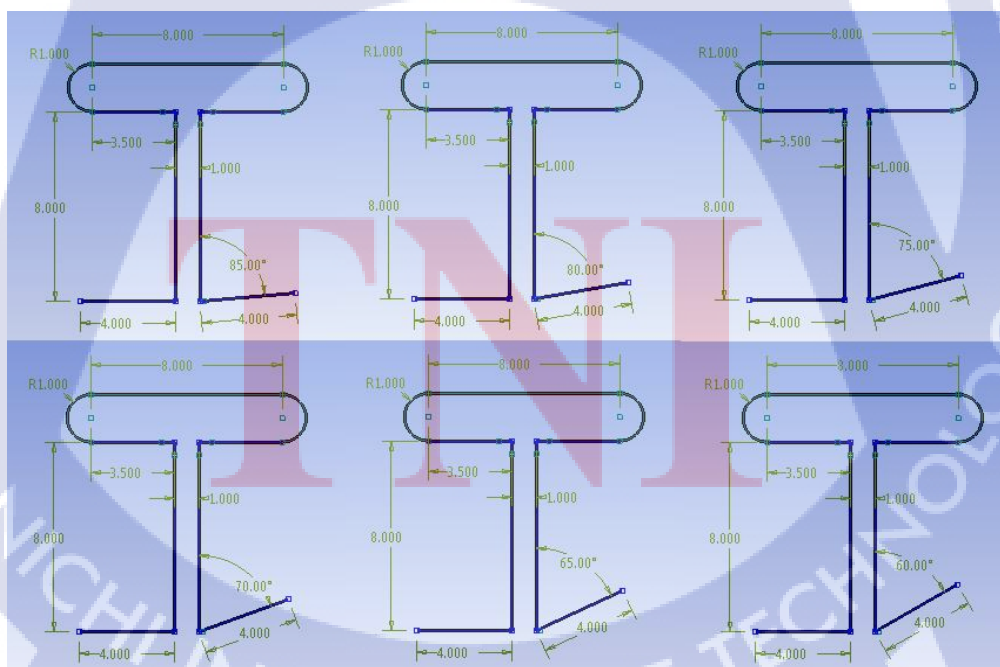
รูปที่ 4.20 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2



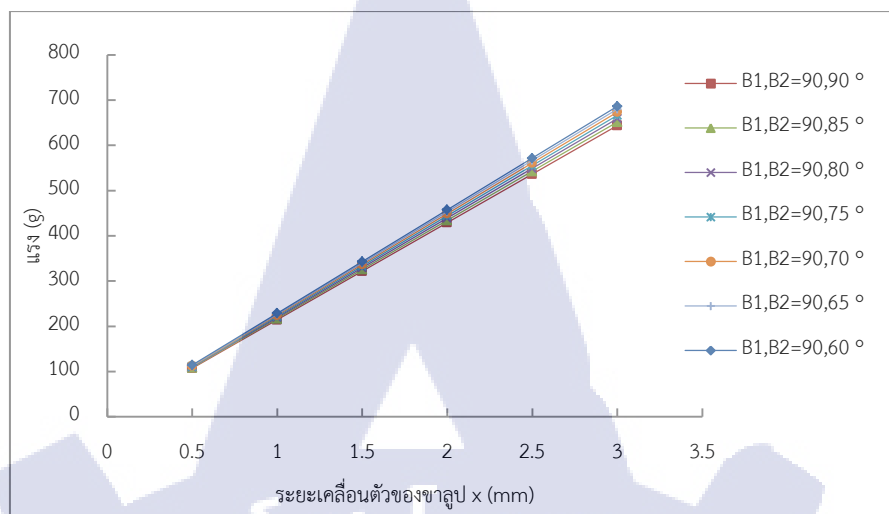
รูปที่ 4.21 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2

4.3.1.7 ผลการวิเคราะห์รูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B2

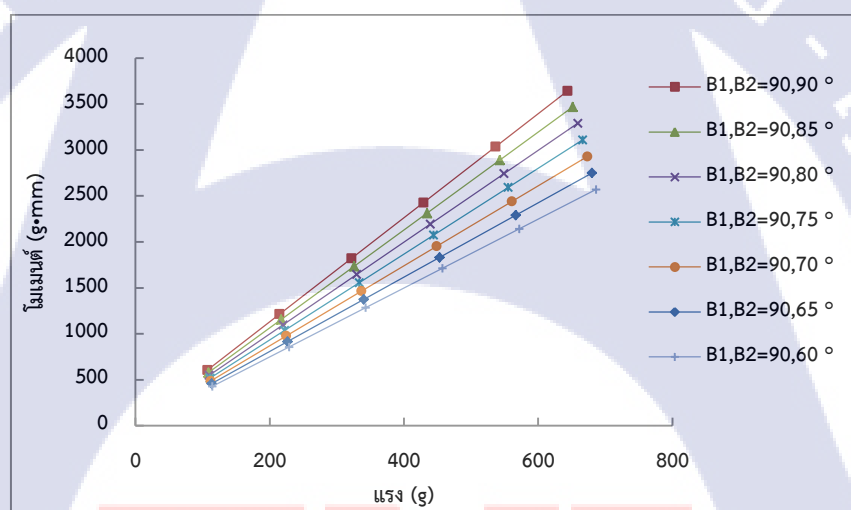
จากรูปที่ 4.23, 4.24 กรณีรูปตัวที่ การวิเคราะห์ เปลี่ยน B2 การคำนวณพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกับกรณีเปลี่ยน B1, B2 แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-700 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-3500 g·mm)



รูปที่ 4.22 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร B2



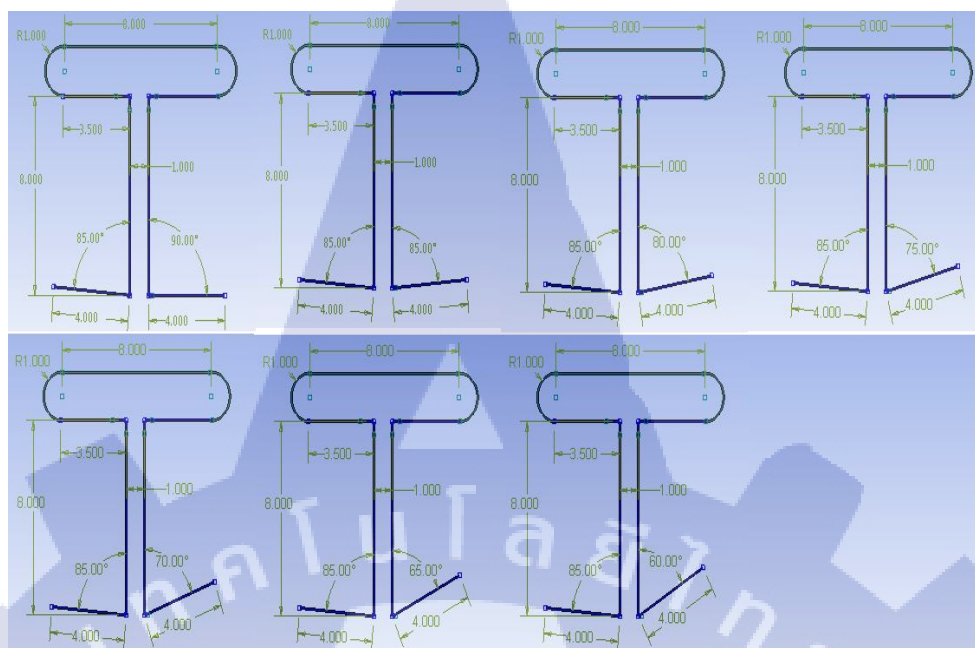
รูปที่ 4.23 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลู่วัที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B2



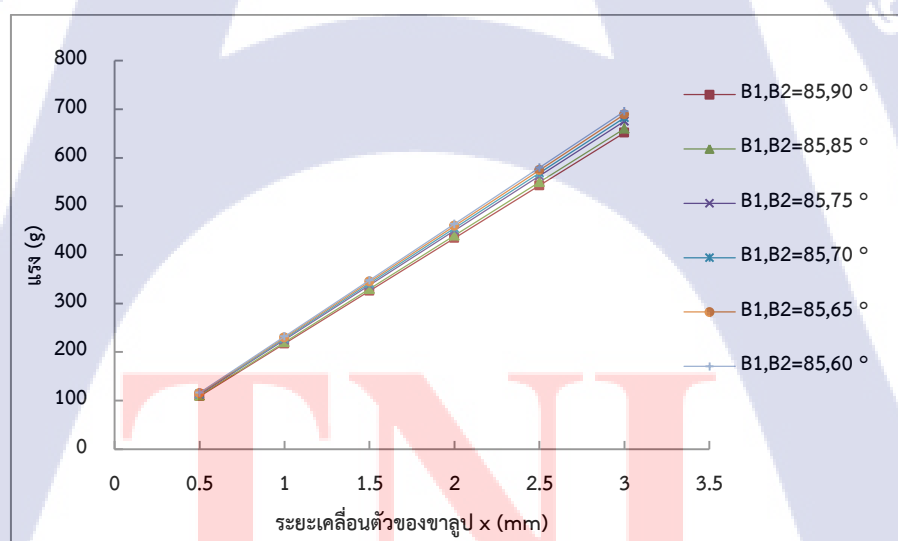
รูปที่ 4.24 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลู่วัที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B2

4.3.1.8 ผลการวิเคราะห์ลู่วัที่แบบกำหนดมุม B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร

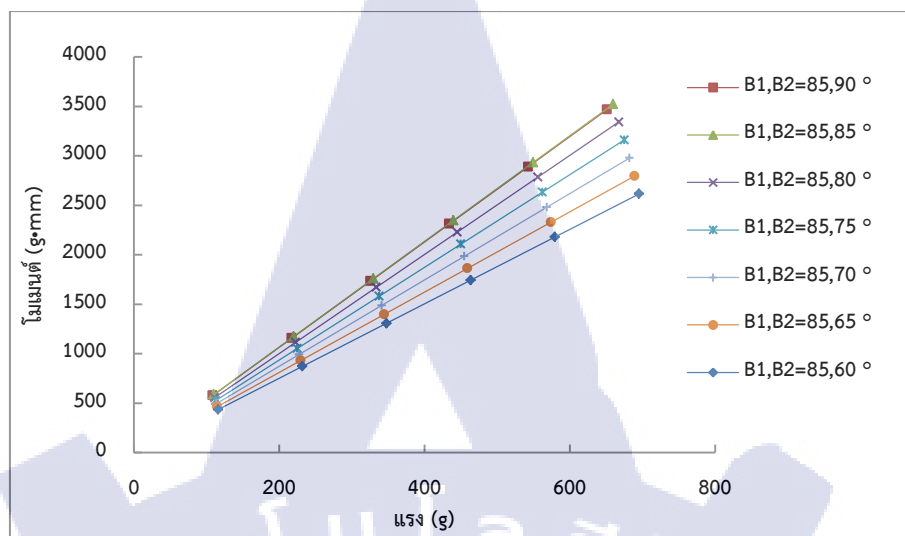
B2



รูปที่ 4.25 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์ แบบกำหนดมุม $B1=85$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$

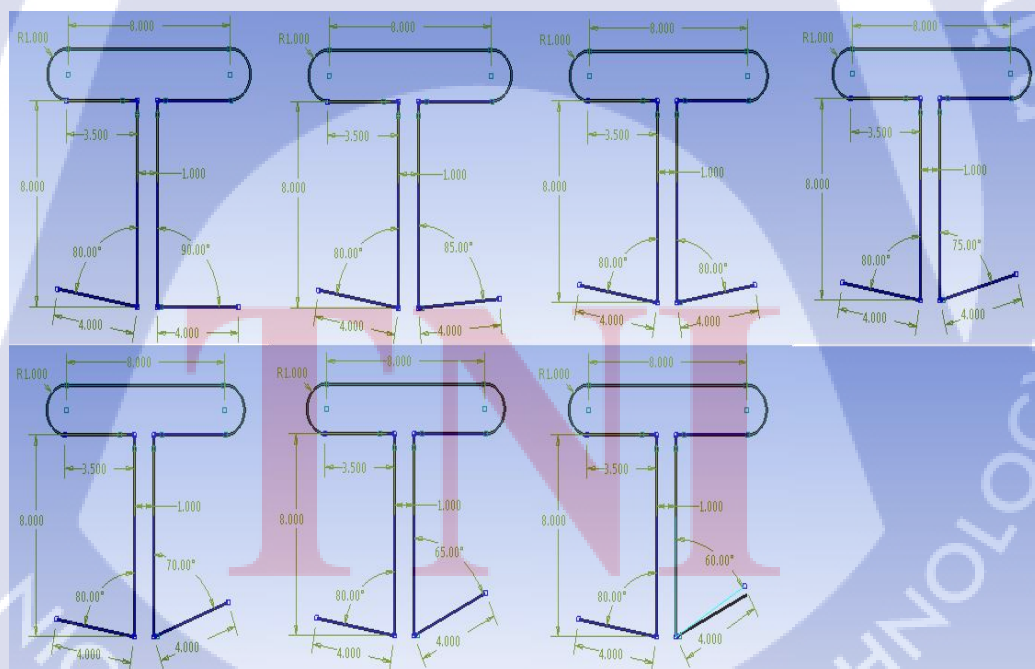


รูปที่ 4.26 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B1=85$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร $B2$

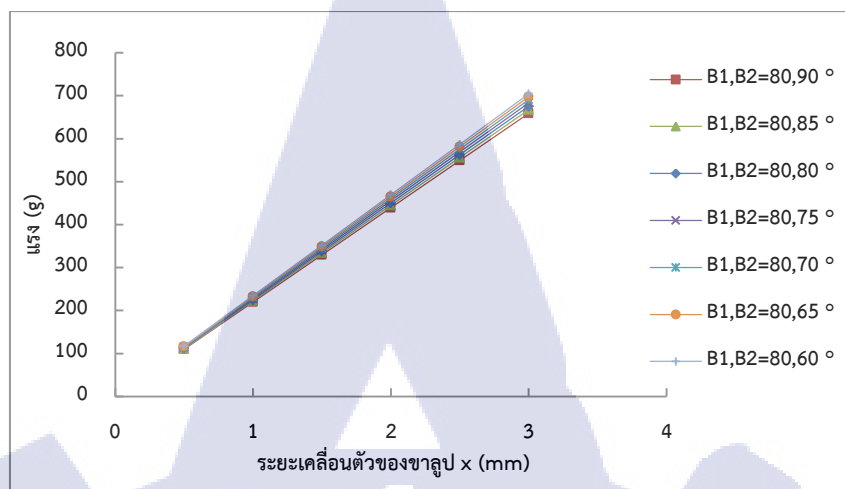


รูปที่ 4.27 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=85$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

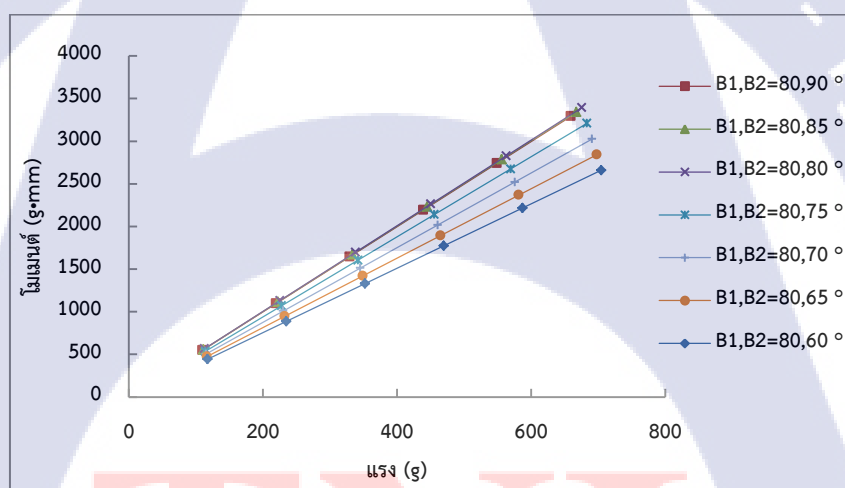
4.3.1.9 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=80$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



รูปที่ 4.28 ตัวแปรของขนาดลูปตัวที่ที่วิเคราะห์ แบบกำหนดมุม $B_1=80$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



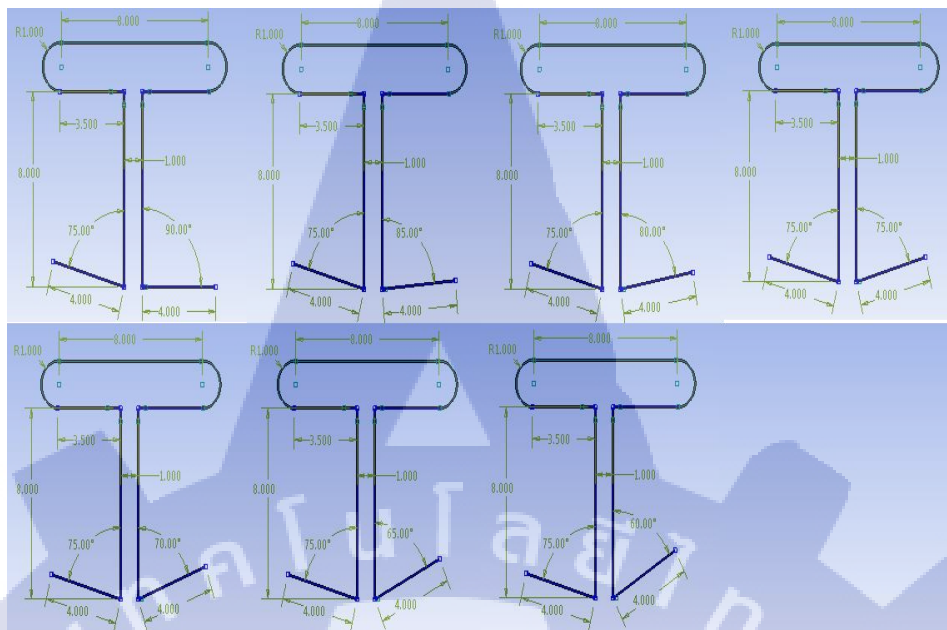
รูปที่ 4.29 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=80$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



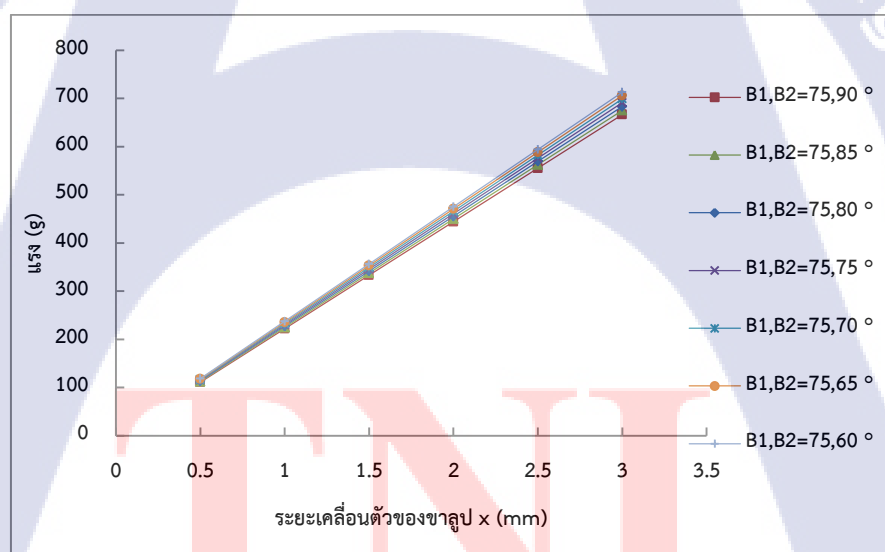
รูปที่ 4.30 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=80$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

4.3.1.10 ผลการวิเคราะห์ลูบตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร

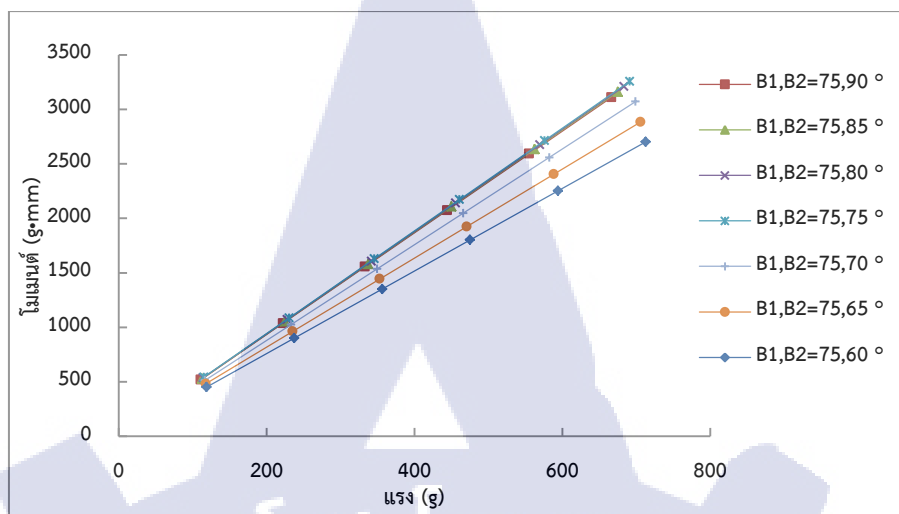
B2



รูปที่ 4.31 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์ แบบกำหนดมุม $B_1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

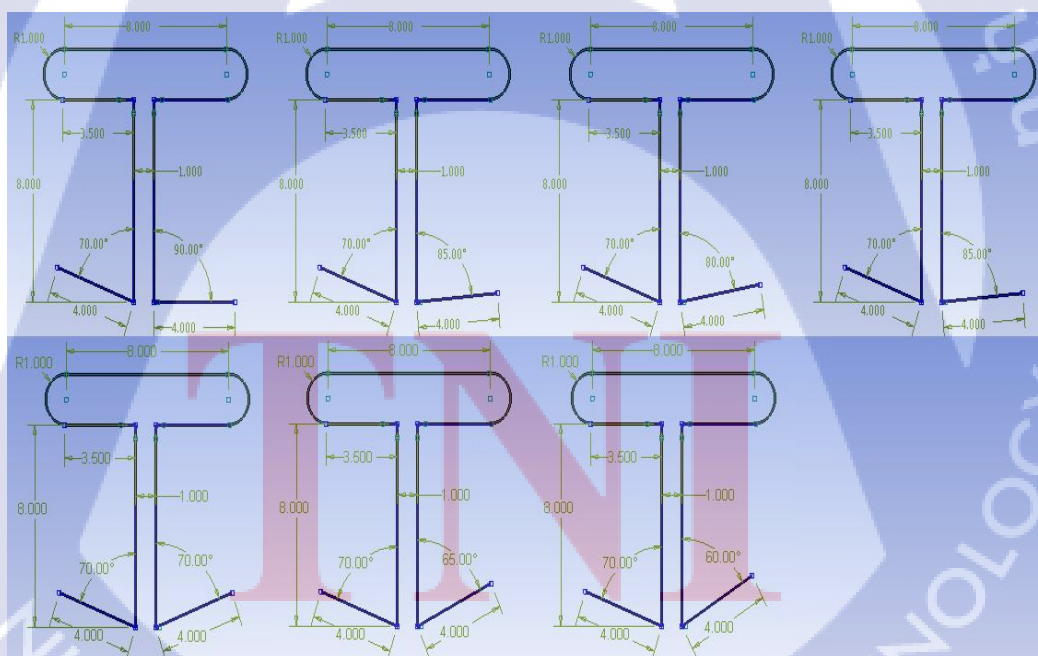


รูปที่ 4.32 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

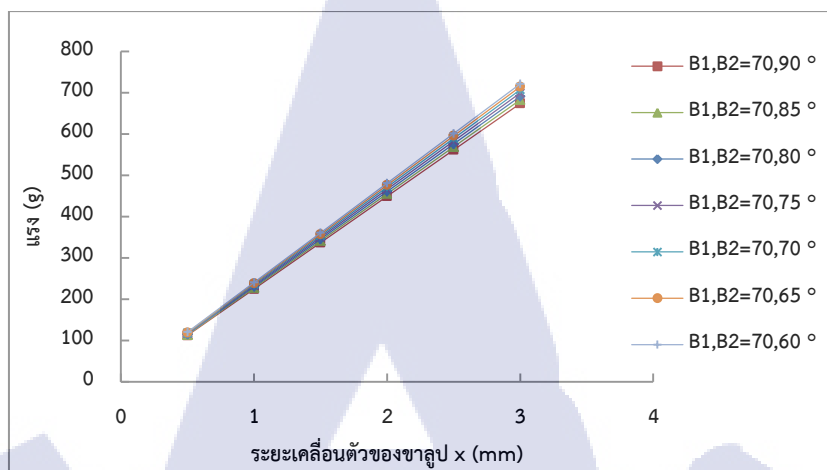


รูปที่ 4.33 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลู่วัสดุที่แบบกำหนดมุม $B_1=75$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

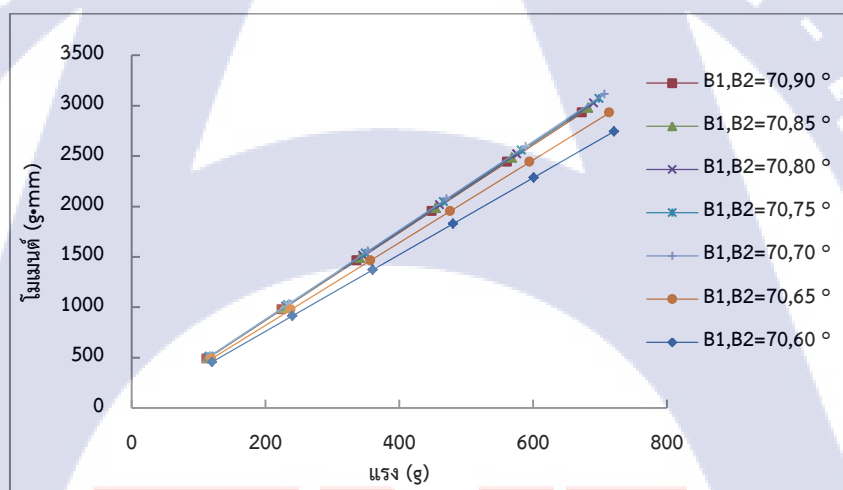
4.2.9 ผลการวิเคราะห์ลู่วัสดุที่แบบกำหนดมุม $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



รูปที่ 4.34 ตัวแปรของขนาดลู่วัสดุที่วิเคราะห์ แบบกำหนดมุม $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



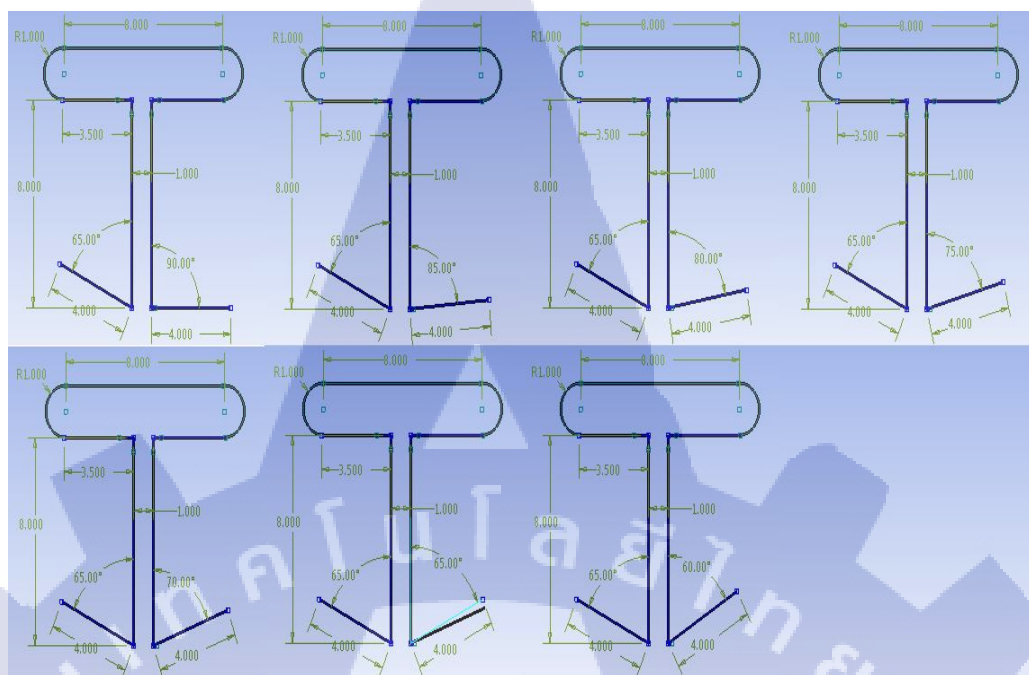
รูปที่ 4.35 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



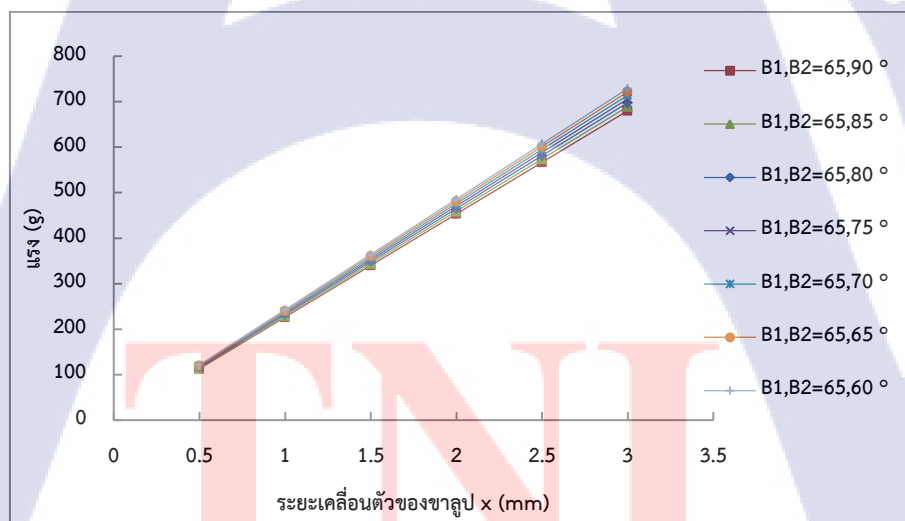
รูปที่ 4.36 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

4.3.1.11 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=65$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร

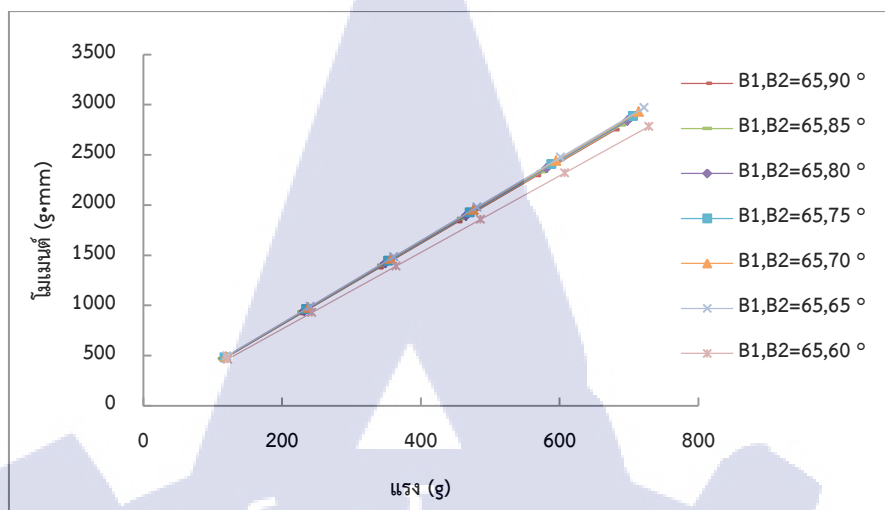
B_2



รูปที่ 4.37 ตัวแปรของขนาดรูปตัวที่ที่วิเคราะห์ แบบกำหนดมุม B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2



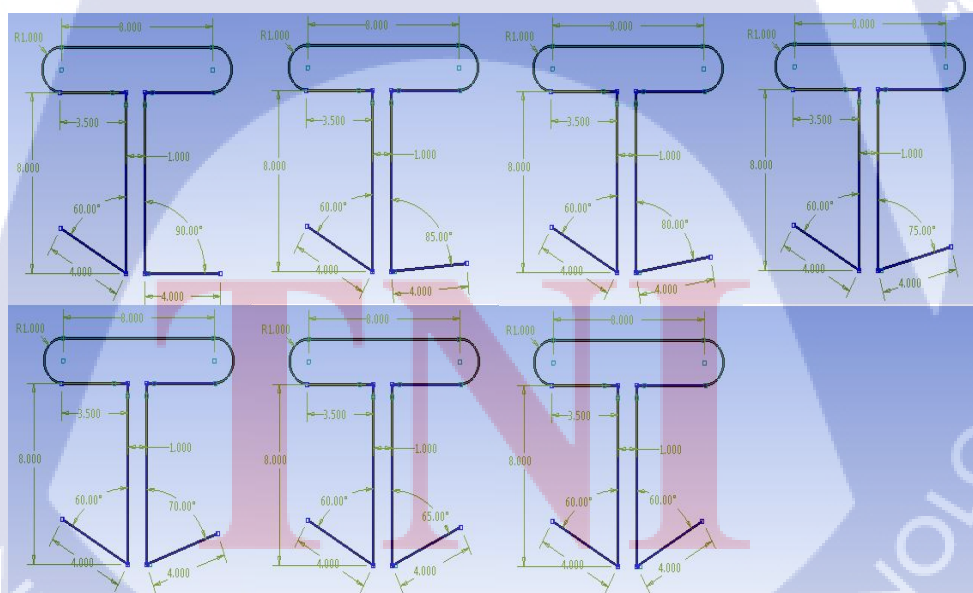
รูปที่ 4.38 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของรูปตัวที่แบบกำหนดมุม B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2



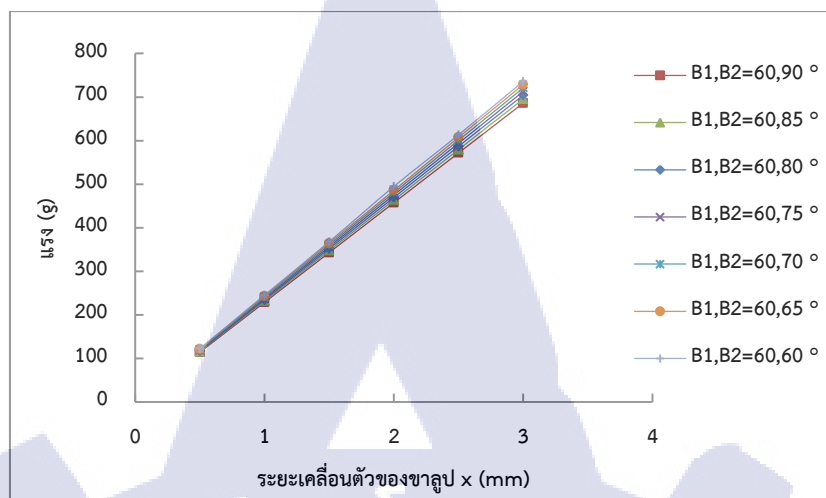
รูปที่ 4.39 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูप्तวที่แบบกำหนดมุม $B_1=65$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

4.3.1.12 ผลการวิเคราะห์ลูप्तวที่แบบกำหนดมุม $B_1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร

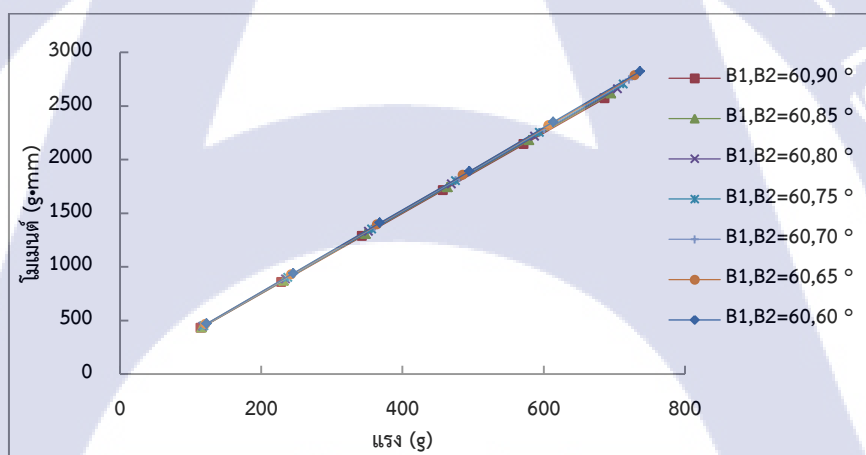
B_2



รูปที่ 4.40 ตัวแปรของขนาดลูप्तวที่ที่วิเคราะห์ แบบกำหนดมุม $B_1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2



รูปที่ 4.41 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของสปริงตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

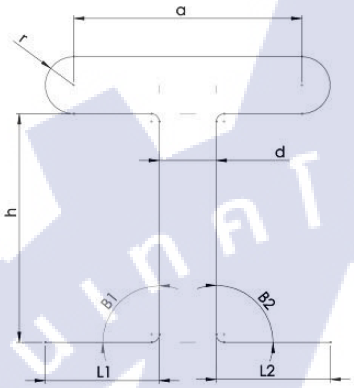


รูปที่ 4.42 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของสปริงตัวที่แบบกำหนดมุม $B_1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2

4.3.2 สรุปผลการวิเคราะห์สปริงตัวที่

ผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อแรงและ โมเมนต์ที่สปริงตัวที่ตามตารางที่

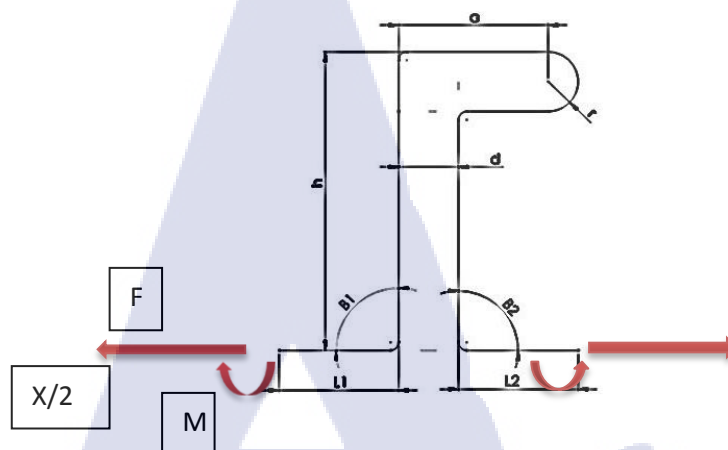
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบแรงและโมเมนต์ของลวดตัวที่ด้วยตัวแปรต่างๆ

รูปแบบของลวดจัดพัน	ตัวแปร	ผลลัพธ์		
		แรง (F)	โมเมนต์ (M)	โมเมนต์ ต่อแรง (M/F)
 ลวดตัวที่	เพิ่ม a	ลด	ลด	เพิ่ม
	เพิ่ม h	ลดเยอะ	ลดเยอะ	เพิ่ม
	เพิ่ม r	เพิ่ม	ไม่ต่าง	ลด
	เพิ่ม d	เพิ่ม	เพิ่ม	ไม่ต่าง
	เพิ่ม L1, L2	ลด	ลด	ลด
	ลดมุม B1, B2	ไม่ต่าง	ลด	ลด
	ลดมุม B2	ไม่ต่าง	ลด	ลด

4.3.3 วิธีทำการวิเคราะห์ของลวดจัดพันแบบลูปตัวแอลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการ

วิเคราะห์

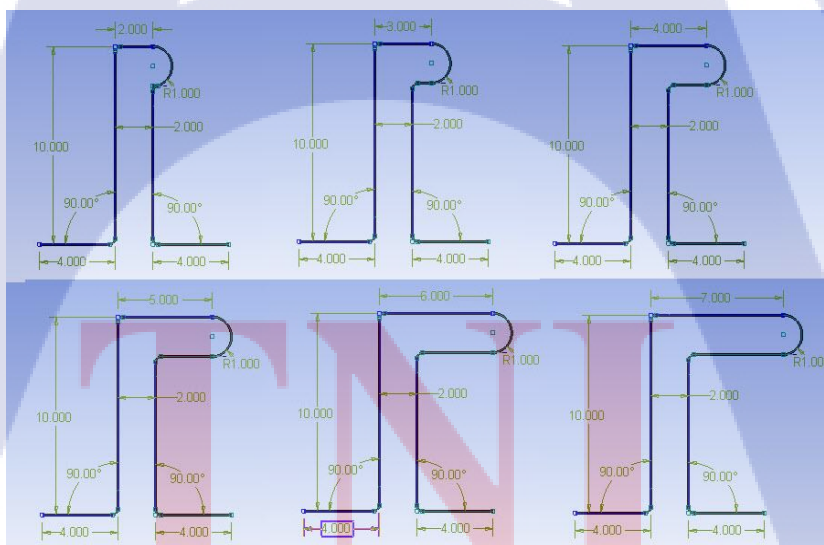
ทำการวิเคราะห์หาแรงต่อระยะยืด โมเมนต์ต่อแรง ของลวดจัดพันเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าเสตนเลสโดยมีโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) = 179 Gpa ทำการวิเคราะห์คานลูปตัวแอลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 0.55×0.55 mm และกรณีถ้าเป็นหน้าตัดกลม 0.55 mm โดยมีการกำหนดตัวแปรดังในรูปที่ 4.43 กำหนดจุดปลายลวดทั้งสองด้านยึดติดกับแบล็คเก็ต โดยมีเงื่อนไขว่าการหมุนคงที่ ทำการยืด ($x/2$) ทั้งสองด้าน ส่งผลให้เกิดแรง F และโมเมนต์ที่จุดนี้ กำหนดให้ แรง F หน่วย (g) โมเมนต์ M หน่วย (g•mm) ระยะยืดหน่วย $x/2$ หน่วย (mm) ระยะ a,d,h,r,L1,L2 หน่วย (mm) B1,B2 หน่วย (°)



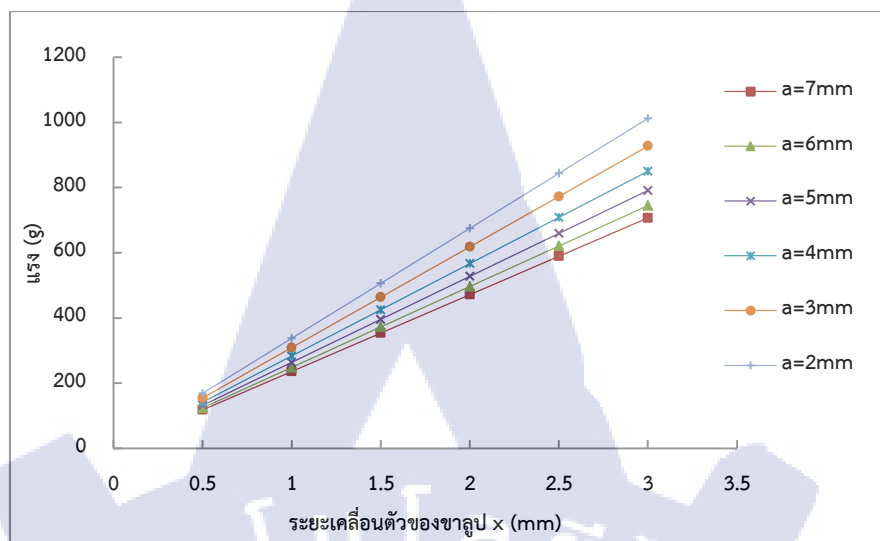
รูปที่ 4.43 การกำหนดค่าตัวแปรของลวดจัดฟันรูปแบบลูปตัวแอล

4.3.3.1 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม

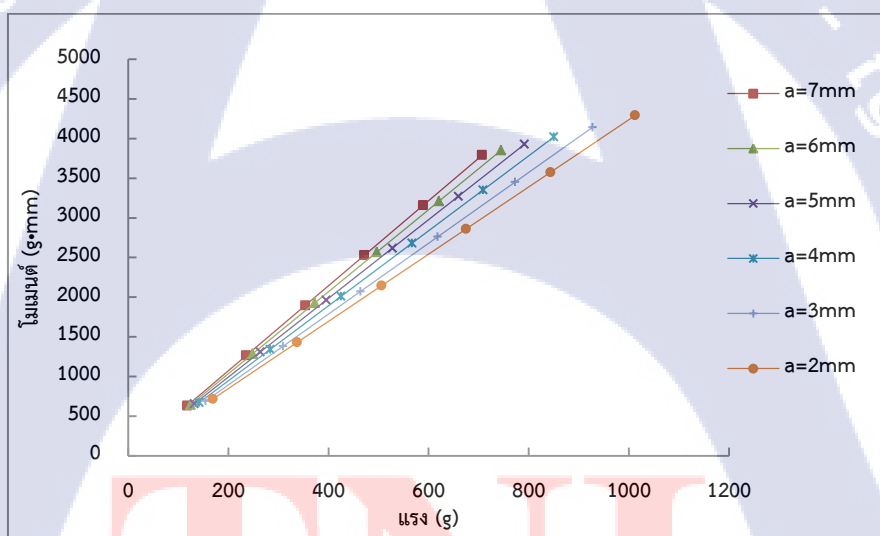
จากรูปที่ 4.45, 4.46 กรณิลูปตัวแอล การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร a จะเห็นว่า ค่า a ที่มากขึ้นจะให้แรง F ที่มีขนาดน้อยลงส่งผลให้เกิดโมเมนต์ที่ลดลงด้วย ซึ่งแรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-1000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-4000 g•mm)



รูปที่ 4.44 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม

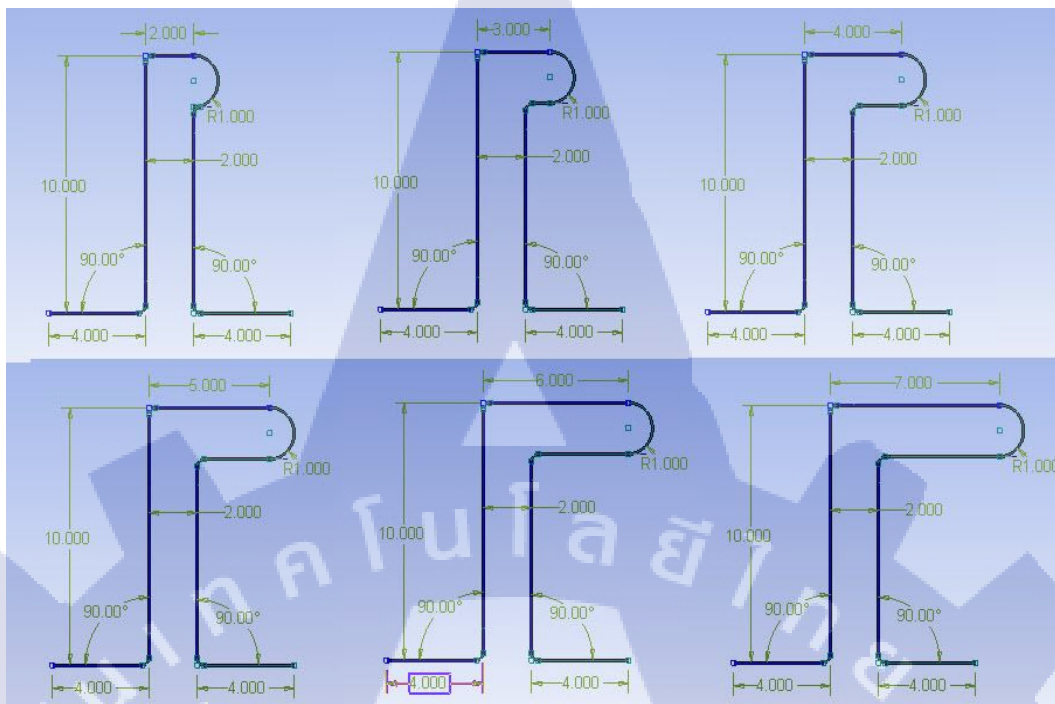


รูปที่ 4.45 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม

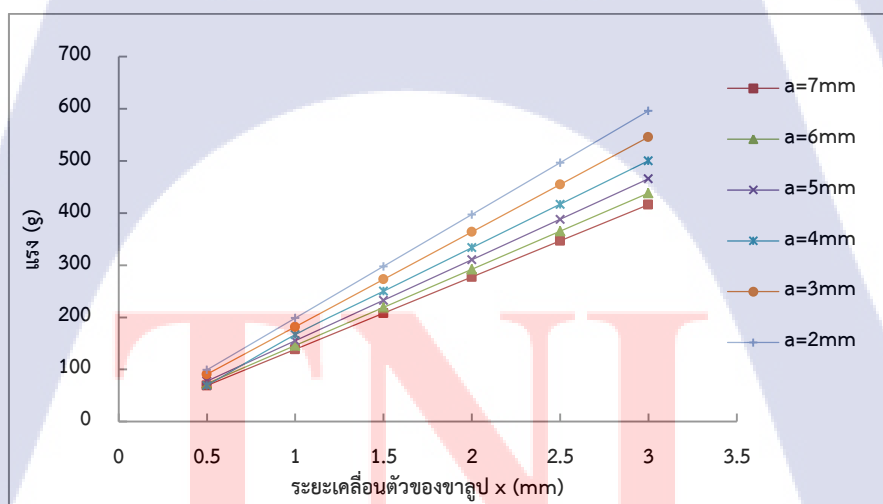


รูปที่ 4.46 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม

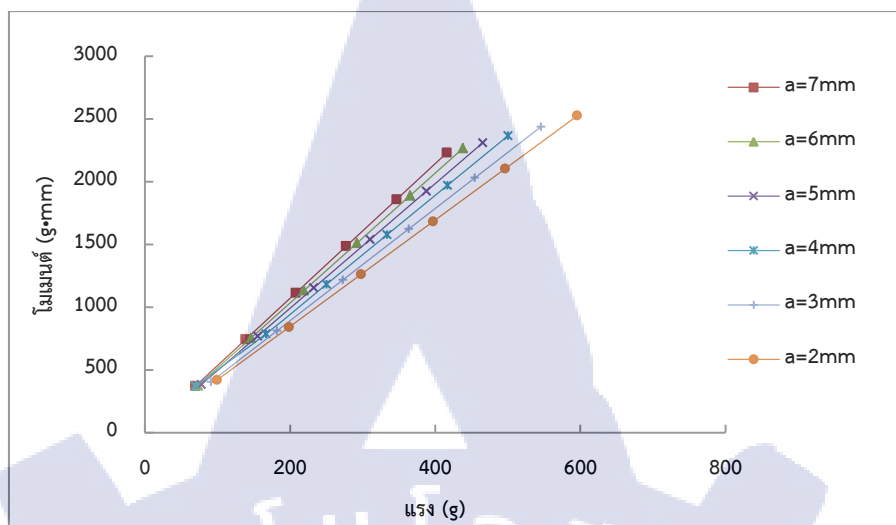
4.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม



รูปที่ 4.47 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม



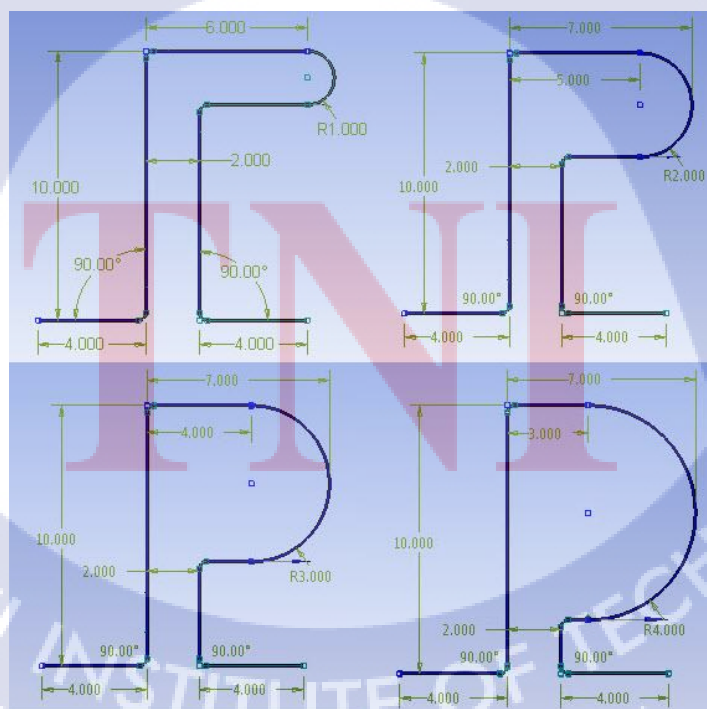
รูปที่ 4.48 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม



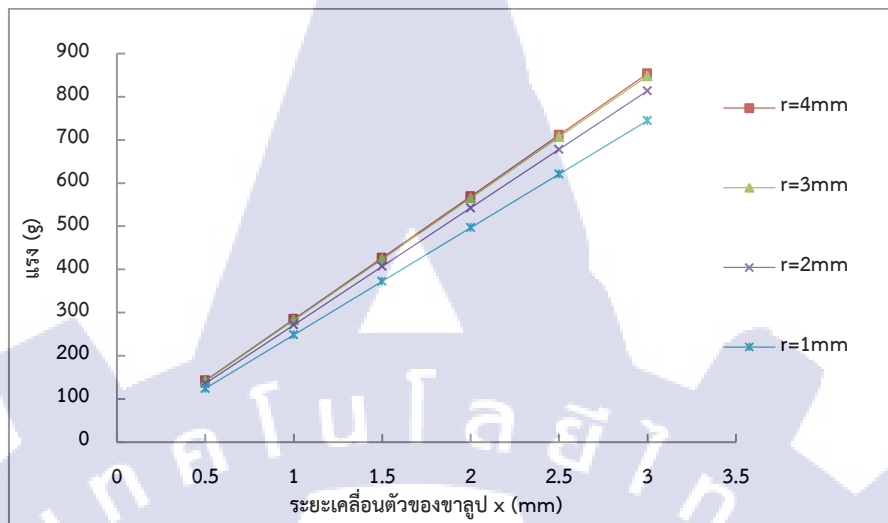
รูปที่ 4.49 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม

4.3.3.3 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม

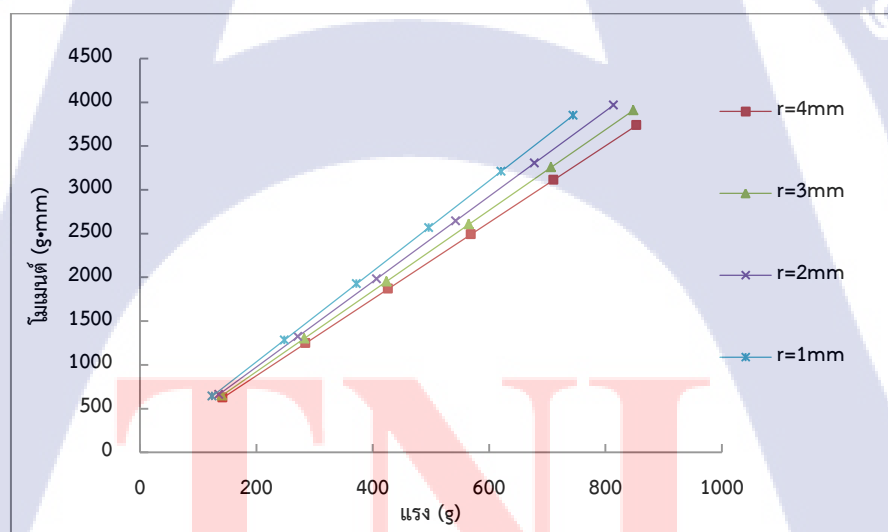
กรณีลูปตัวแอล การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร r จะเห็นได้ว่า ค่า r ที่มากขึ้นจะให้แรง F ที่มีขนาดมากขึ้น แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (200-800 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-4000 g·mm)



รูปที่ 4.50 ตัวแปรของขนาดลูปลูกัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม

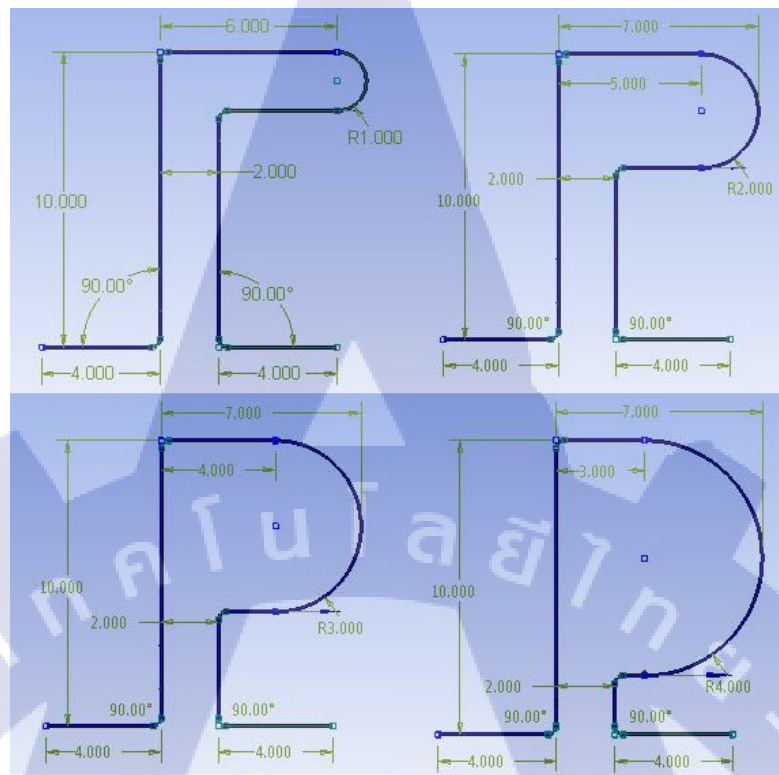


รูปที่ 4.51 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปลูกัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม

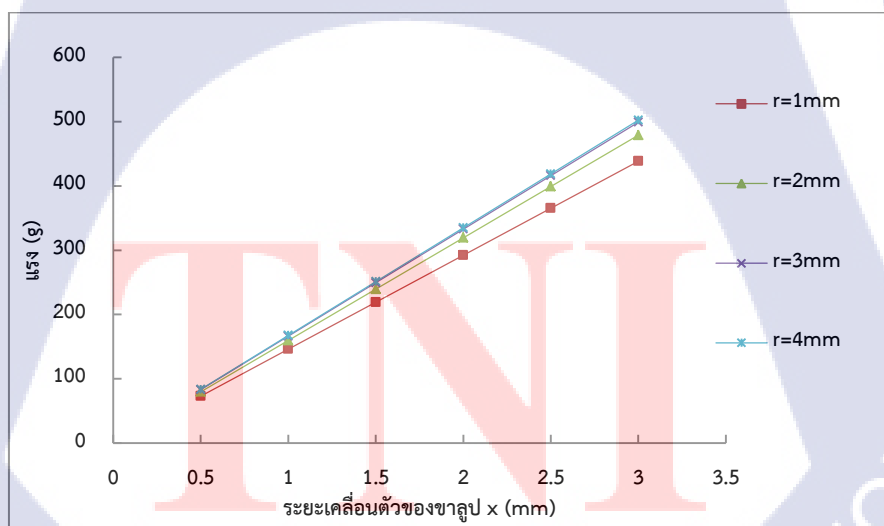


รูปที่ 4.52 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปลูกัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม

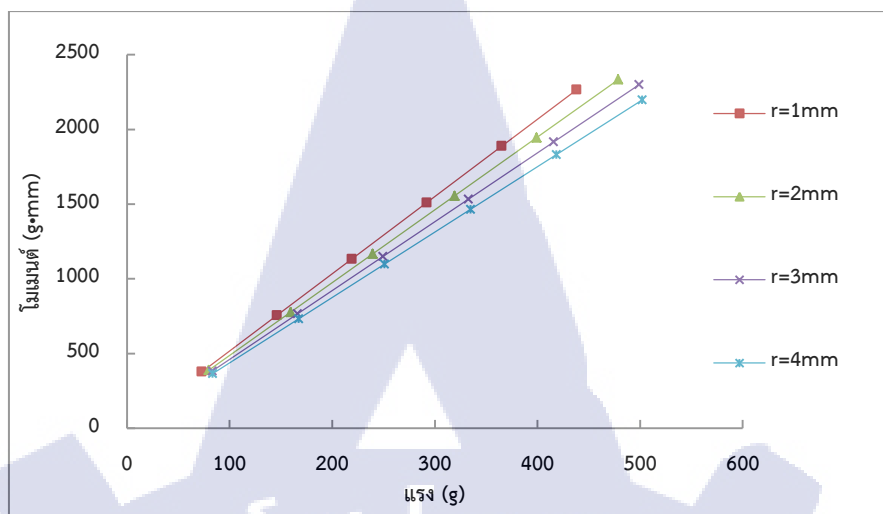
4.3.3.4 ผลการวิเคราะห์ลูปลูกัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม



รูปที่ 4.53 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม



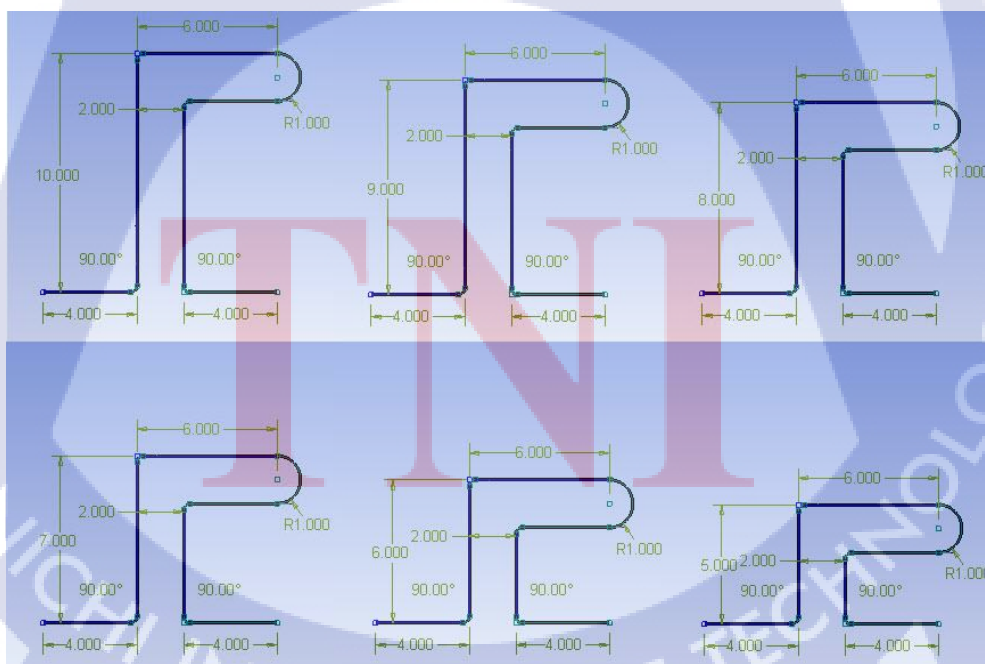
รูปที่ 4.54 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม



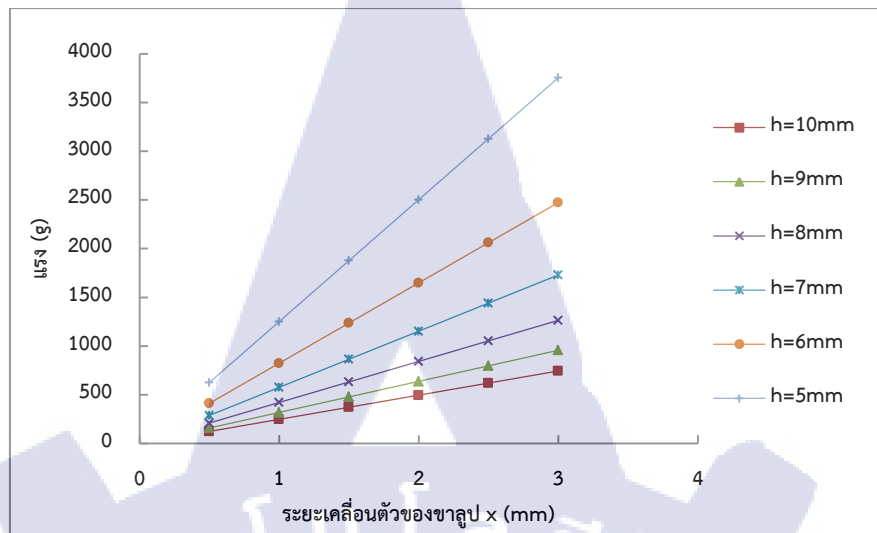
รูปที่ 4.55 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูप्तัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดกลม

4.3.3.5 ผลการวิเคราะห์ลูप्तัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม

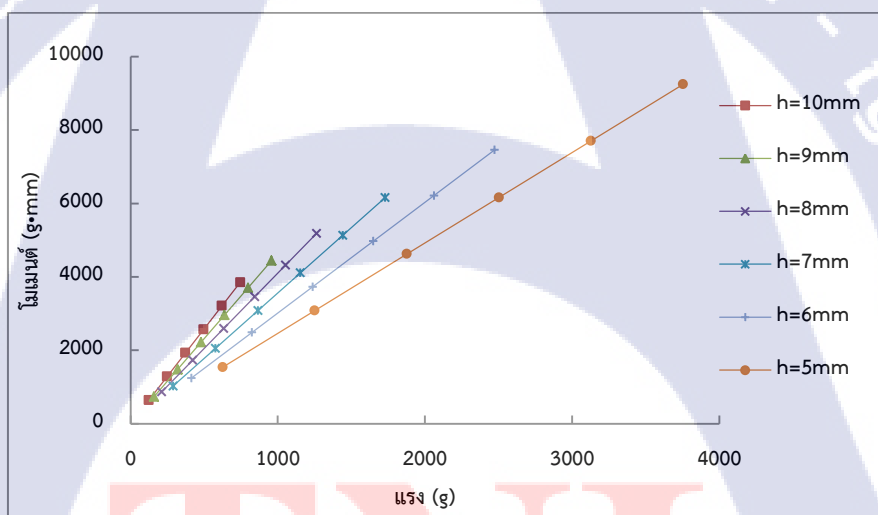
จากรูปที่ 4.57, 4.58 กรณีลูप्तัวแอล การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร h จะเห็นว่า ค่า h ที่มากขึ้นจะให้แรง F ที่มีขนาดน้อยลง แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-3500 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-9000 g·mm)



รูปที่ 4.56 ตัวแปรของขนาดลูप्तัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม

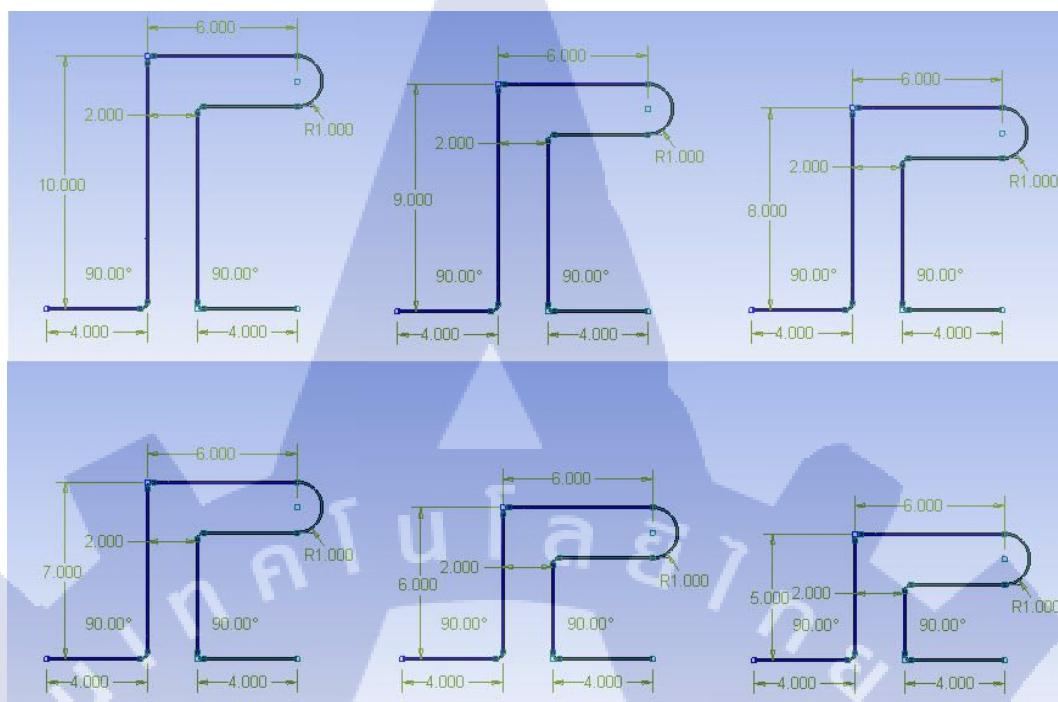


รูปที่ 4.57 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของสปริงตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม

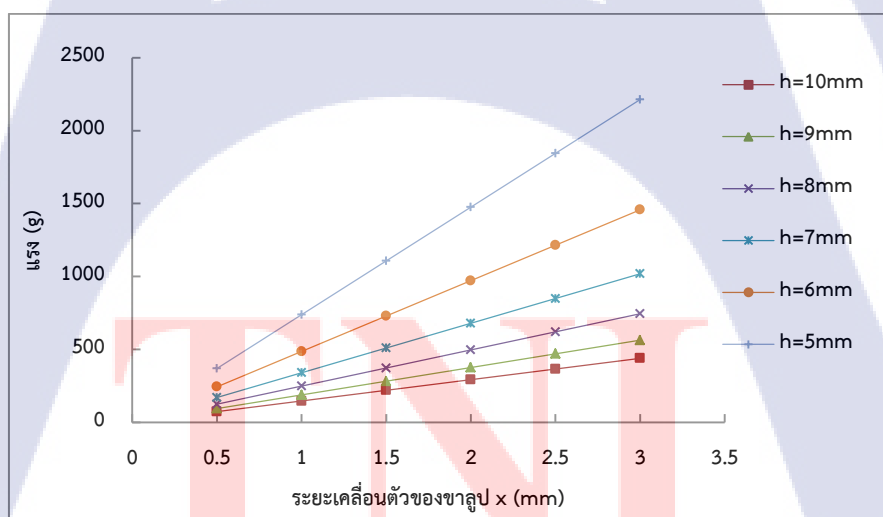


รูปที่ 4.58 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของสปริงตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม

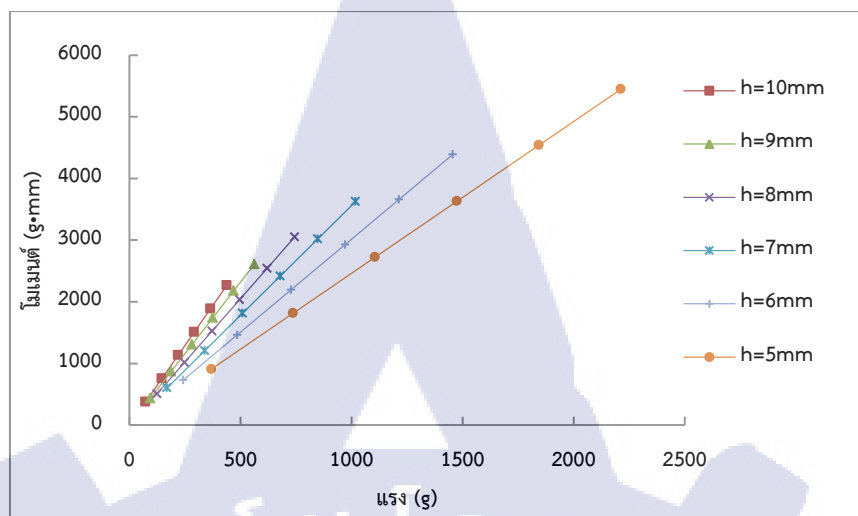
4.3.3.6 ผลการวิเคราะห์สปริงตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดกลม



รูปที่ 4.59 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยน h หน้าตัดกลม



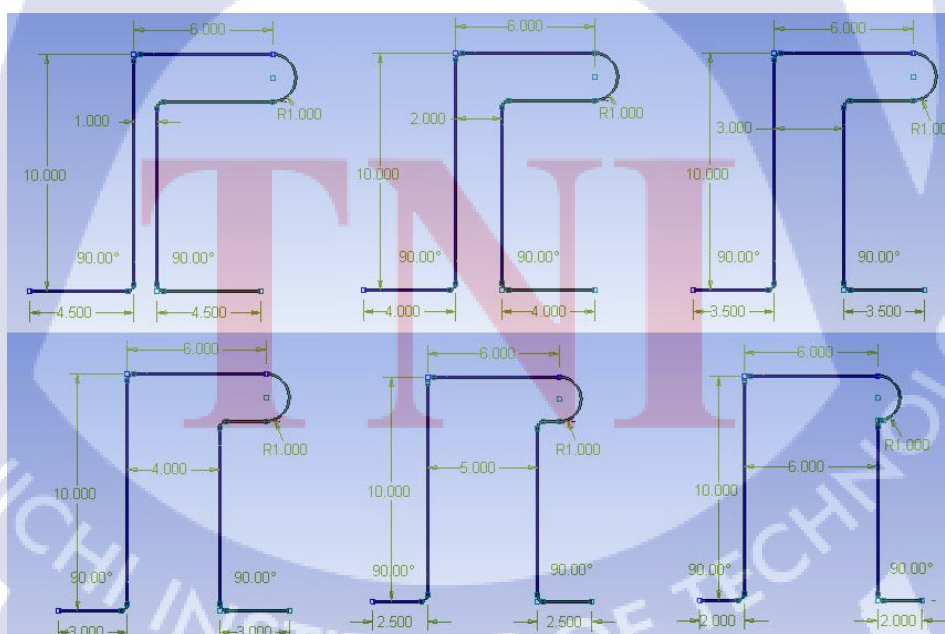
รูปที่ 4.60 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยน h หน้าตัดกลม



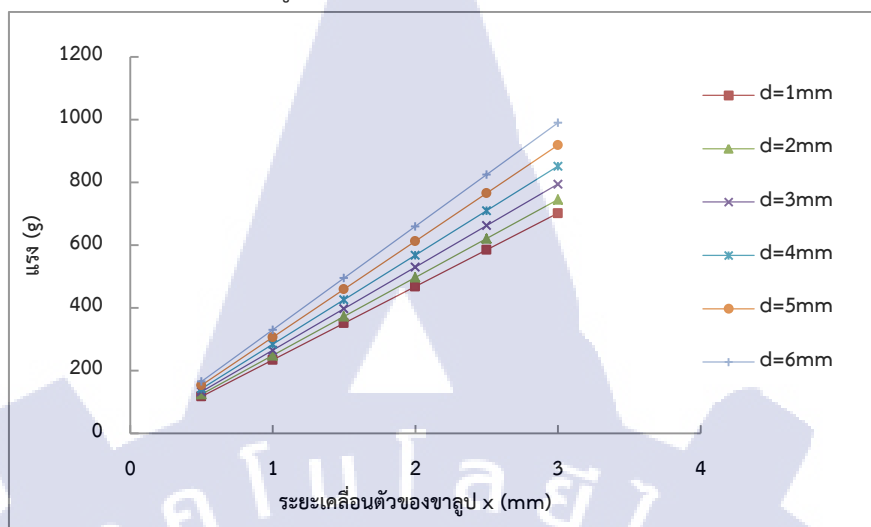
รูปที่ 4.61 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยน h หน้าตัดกลม

4.3.3.7 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม

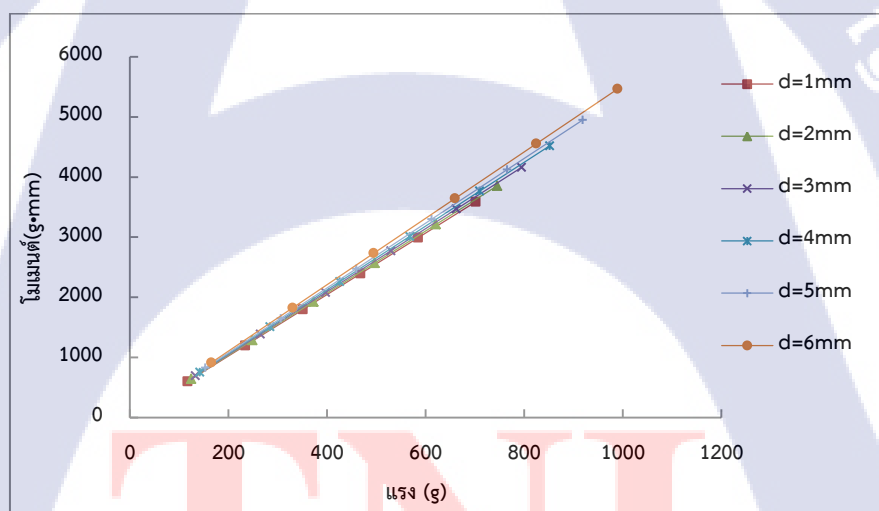
จากรูปที่ 4.63, 4.64 กรณีลูปตัวแอล การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร d จะเห็นว่าแรงดึงลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างขาของลูปที่น้อย และจะส่งผลดีกับการใช้งานของผู้ประสบปัญหาที่มีลักษณะทางของซี่ฟันน้อย ซึ่งทำให้แรงที่เกิดจากการดึงกลับอยู่ในช่วง (100-1000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-5000 g·mm)



รูปที่ 4.62 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม

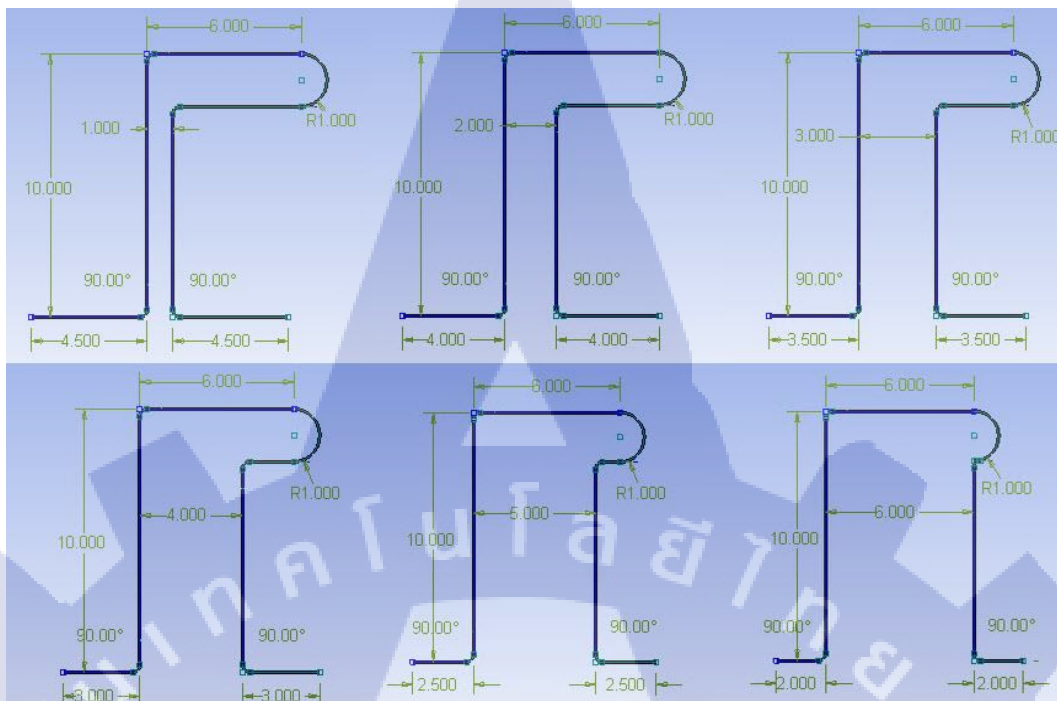


รูปที่ 4.63 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม

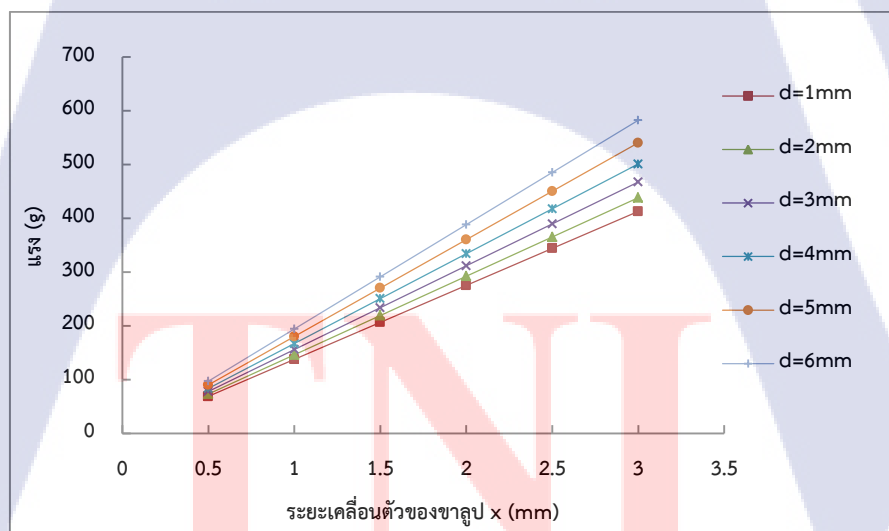


รูปที่ 4.64 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม

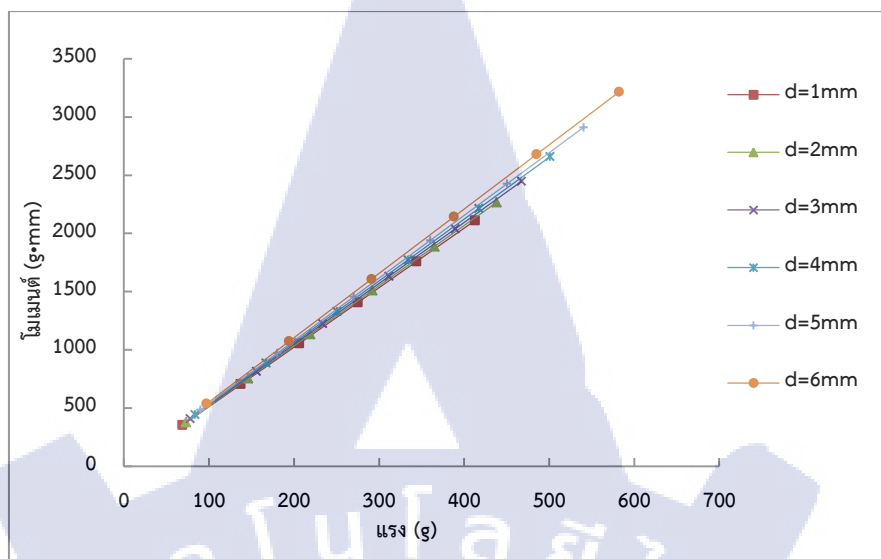
4.3.3.8 ผลการวิเคราะห์ลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม



รูปที่ 4.65 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม



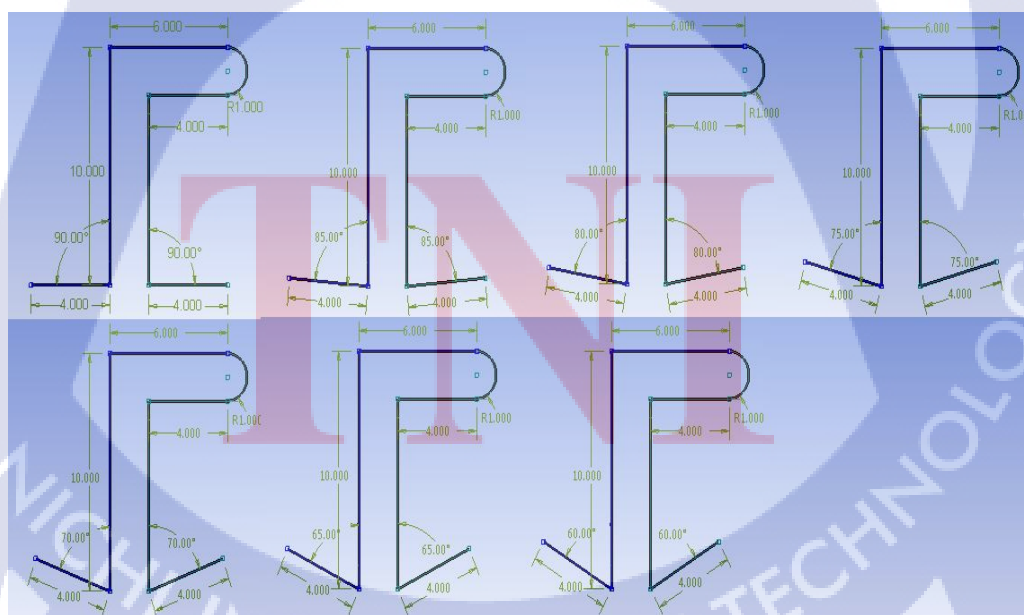
รูปที่ 4.66 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม



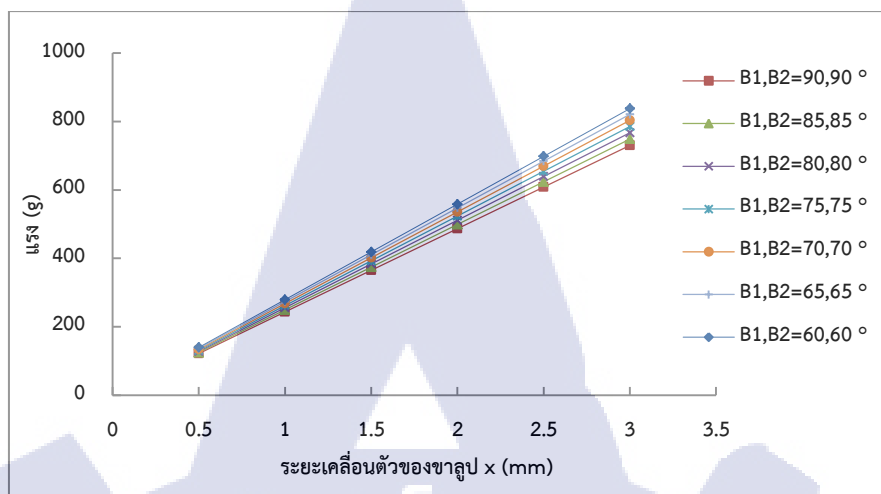
รูปที่ 4.67 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม

4.3.3.9 ผลการวิเคราะห์รูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

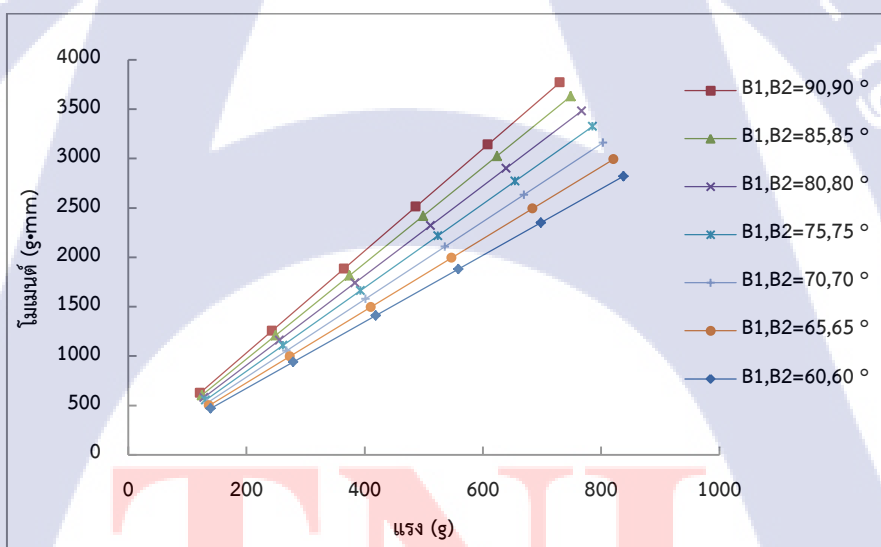
จากรูปที่ 4.69, 4.70 กรณีรูปตัวแอล การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มมุมทั้งสองของขาหุบมีผลให้โมเมนต์ที่จุดสัมผัสกับแบล็คเก็ตหมุนและมีค่าเพิ่มมากขึ้น มีแรงดึงกลับอยู่ในช่วง (100-900 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-4000 g·mm)



รูปที่ 4.68 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยน B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



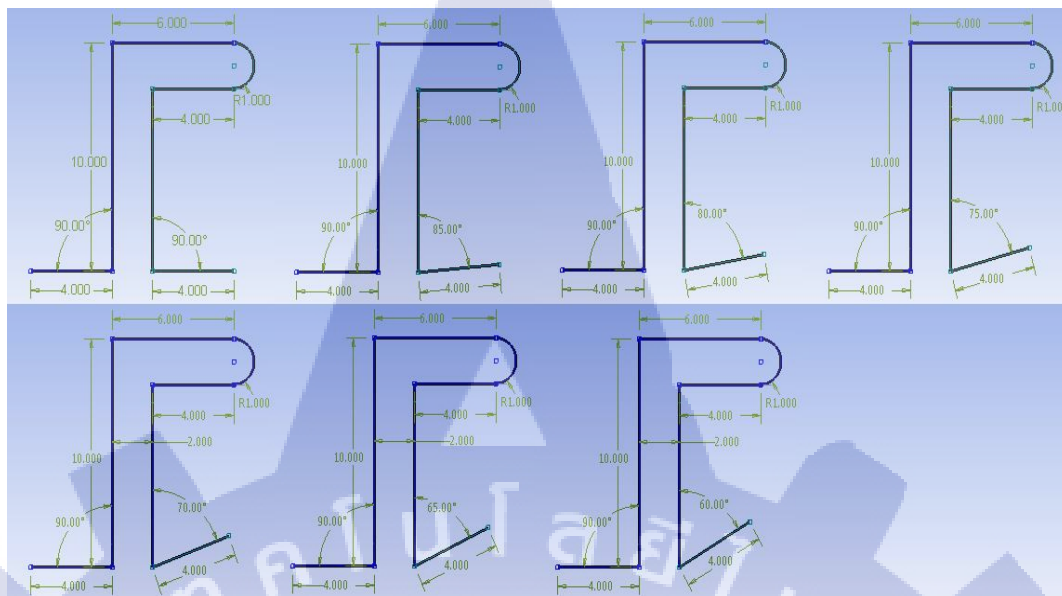
รูปที่ 4.69 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



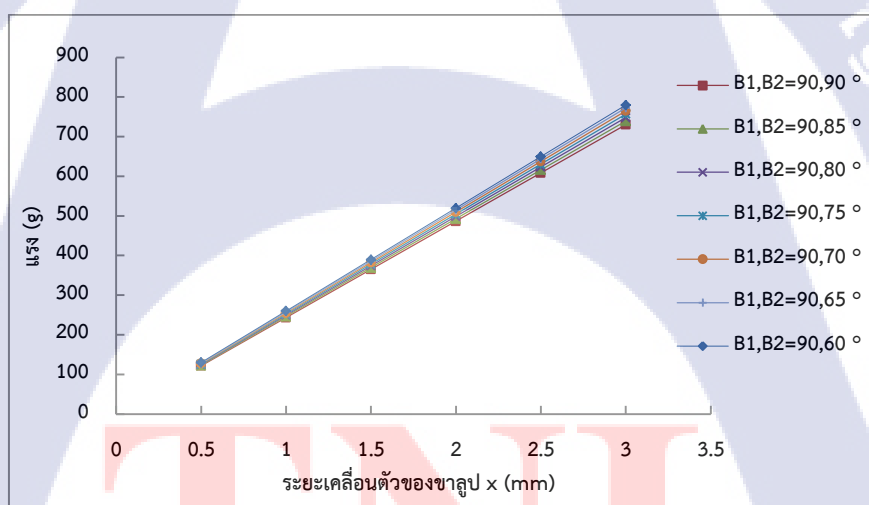
รูปที่ 4.70 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

4.3.3.10 ผลการวิเคราะห์รูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

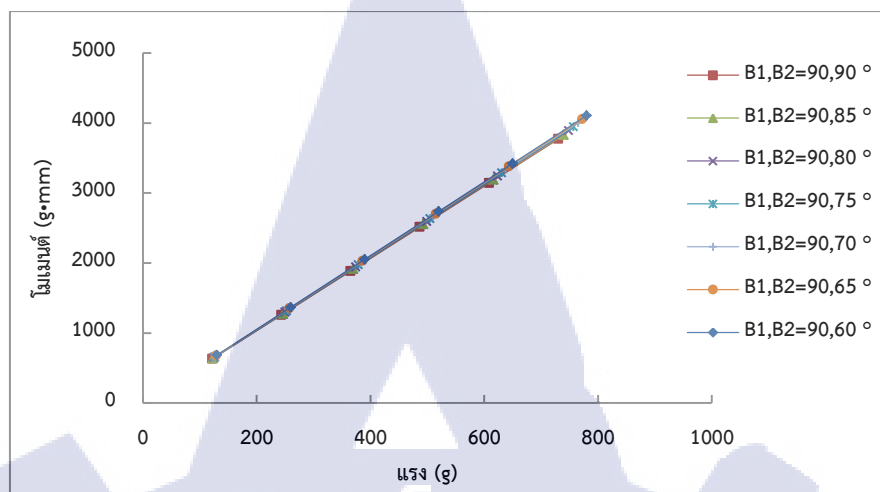
จากรูปที่ 4.72, 4.73 กรณีสภาพตัวแอล การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร B2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มมุมของขาข้างเดียวจะไม่มีผลต่อแรงในแนวระดับและอัตราส่วนของแรงต่อโมเมนต์ มีแรงดึงกลับอยู่ในช่วง (100-900 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-4000 g*mm)



รูปที่ 4.71 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

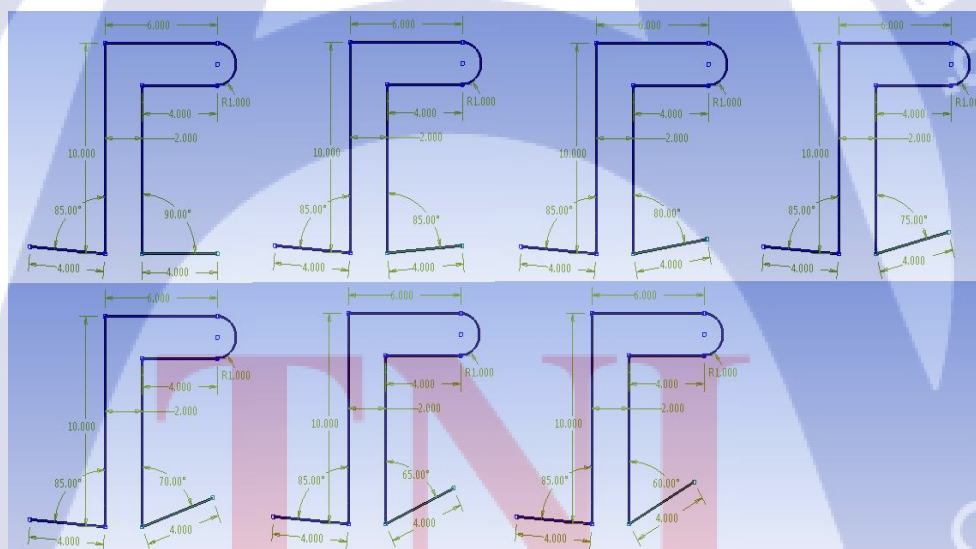


รูปที่ 4.72 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

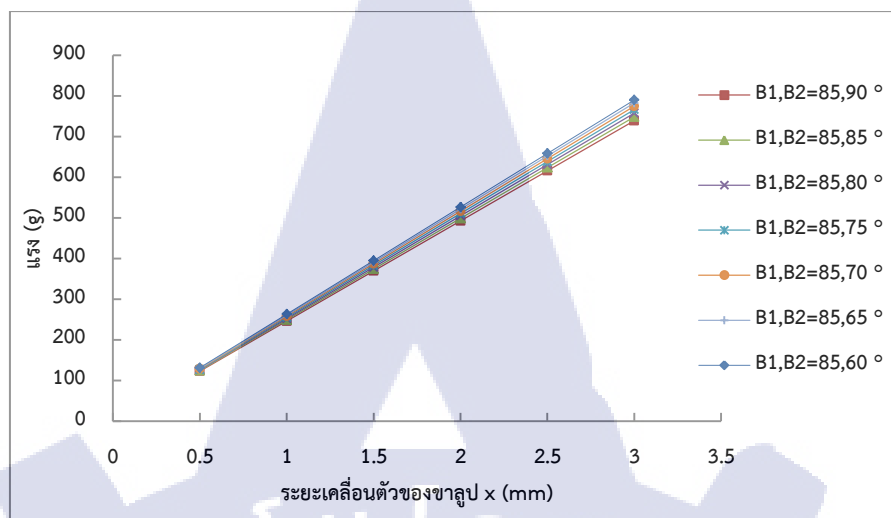


รูปที่ 4.73 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

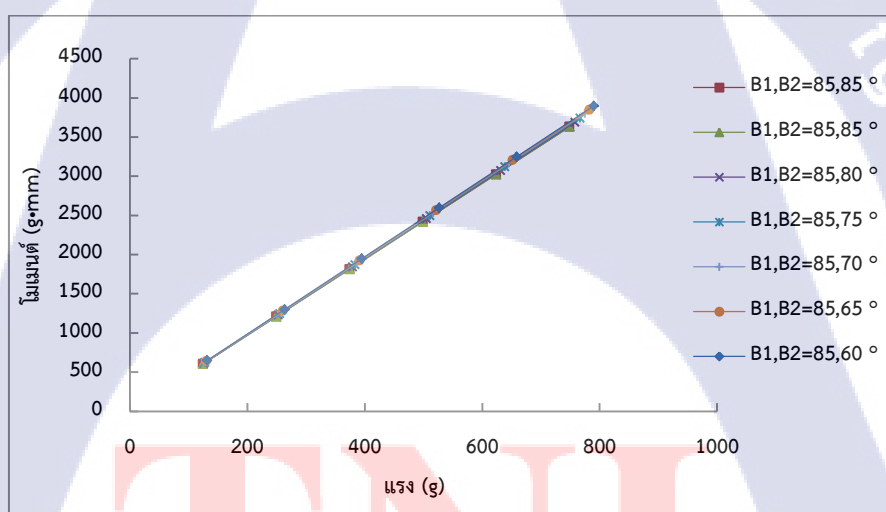
4.3.3.11 ผลการวิเคราะห์ รูปตัวแอลแบบกำหนดมุม B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.74 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

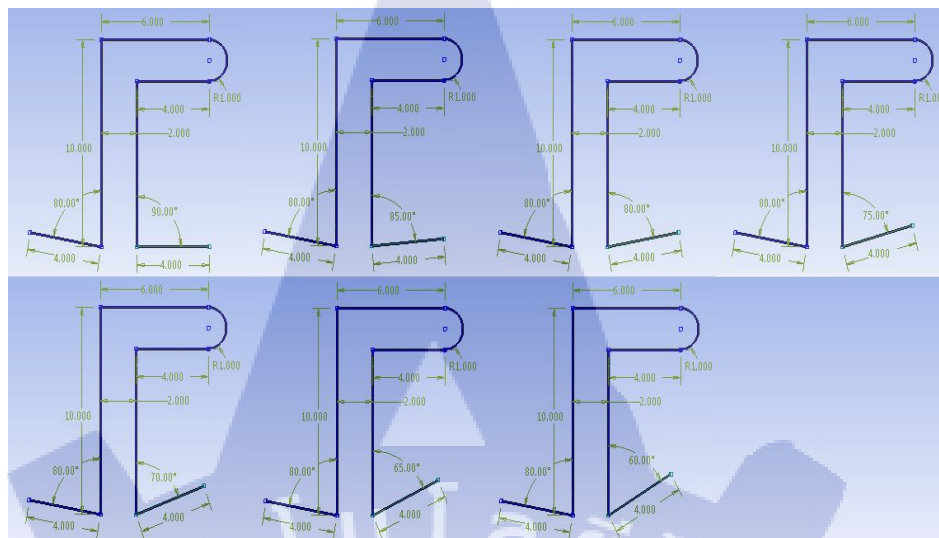


รูปที่ 4.75 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

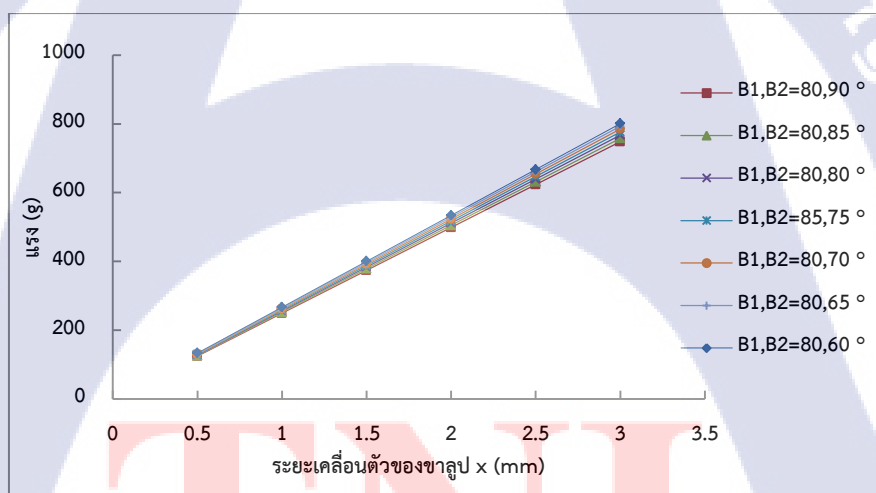


รูปที่ 4.76 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยน B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

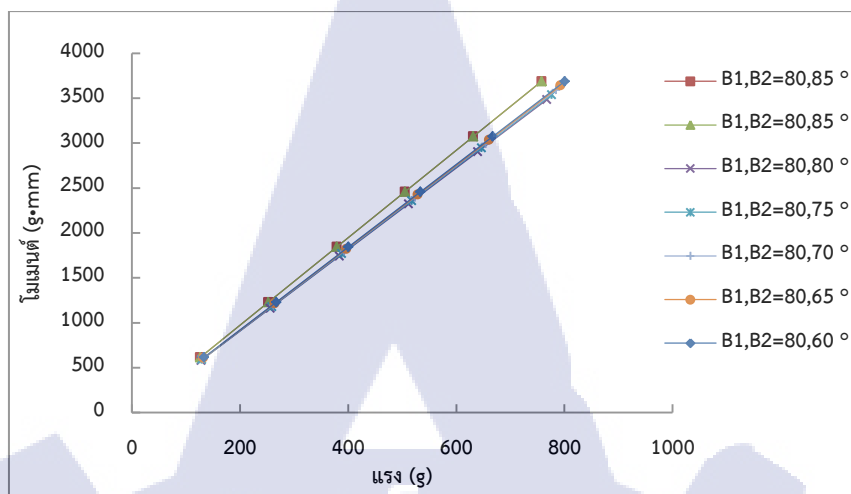
4.3.3.12 ผลการวิเคราะห์ รูปตัวแอลแบบกำหนดมุม B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.77 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

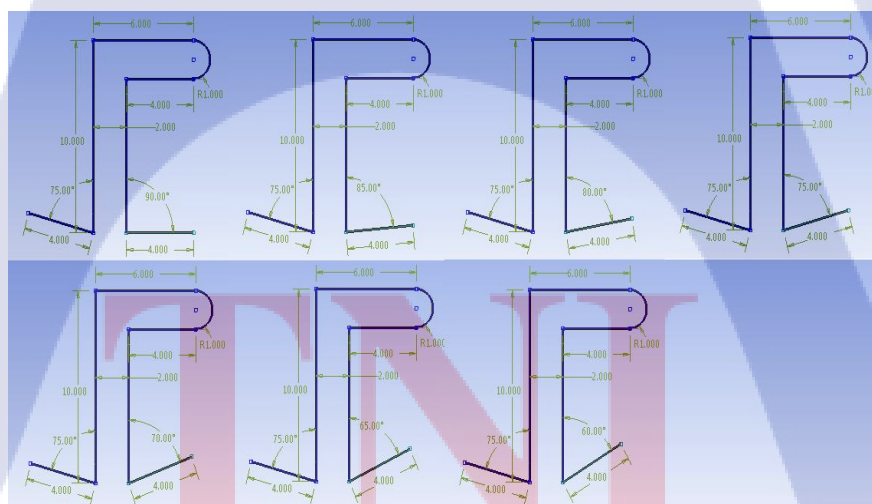


รูปที่ 4.78 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

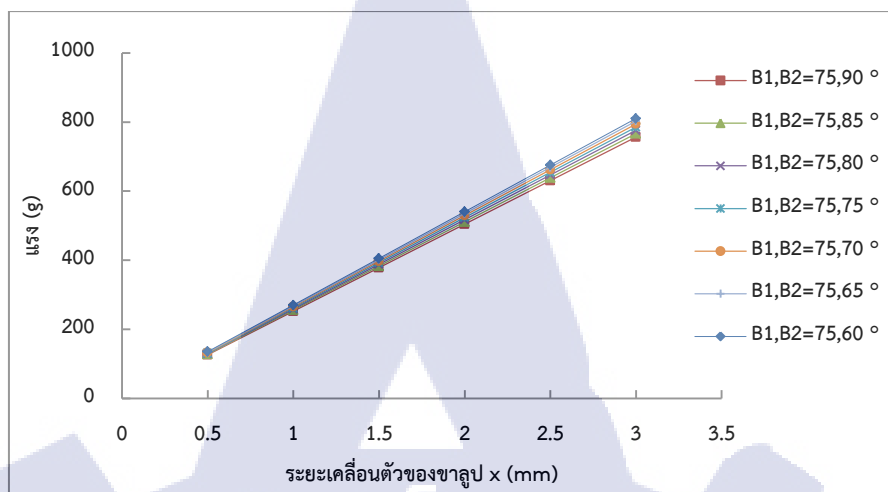


รูปที่ 4.79 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยน B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

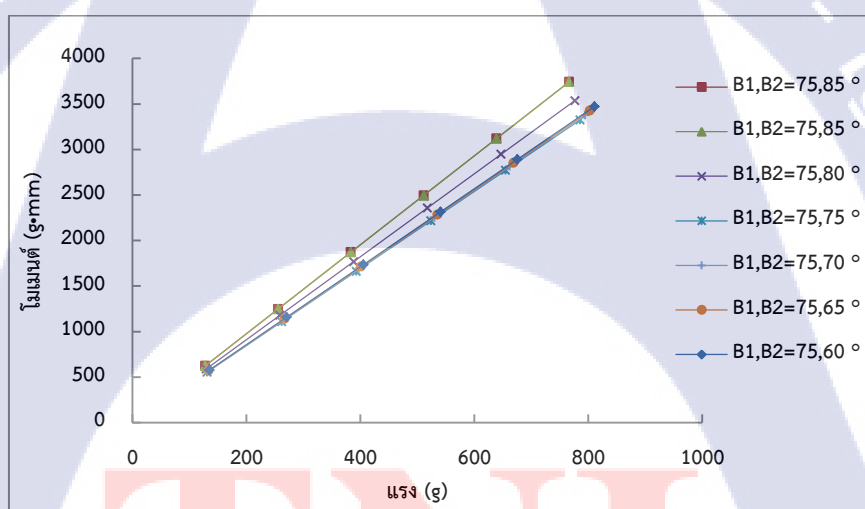
4.3.3.13 ผลการวิเคราะห์ ลูปตัวแอลแบบกำหนดมุม B1=75 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.80 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด B1=75 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

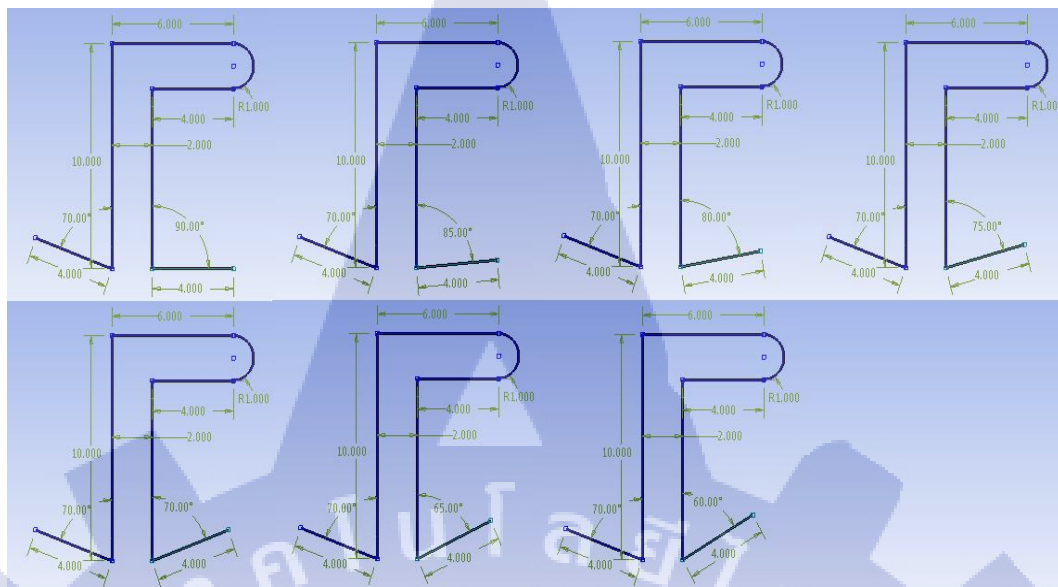


รูปที่ 4.81 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปลวดแอลแบบเปลี่ยน B1=75 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

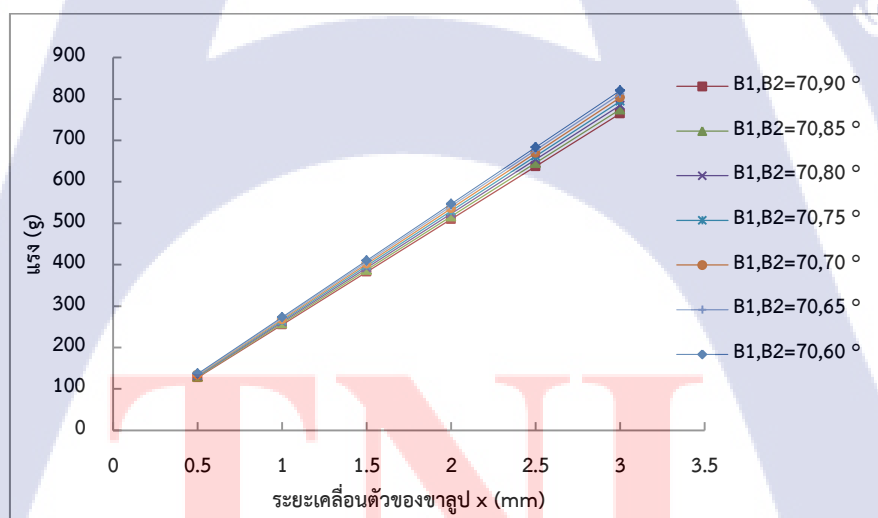


รูปที่ 4.82 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปลวดแอลแบบเปลี่ยน B1=75 องศา และแปร B2 เปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

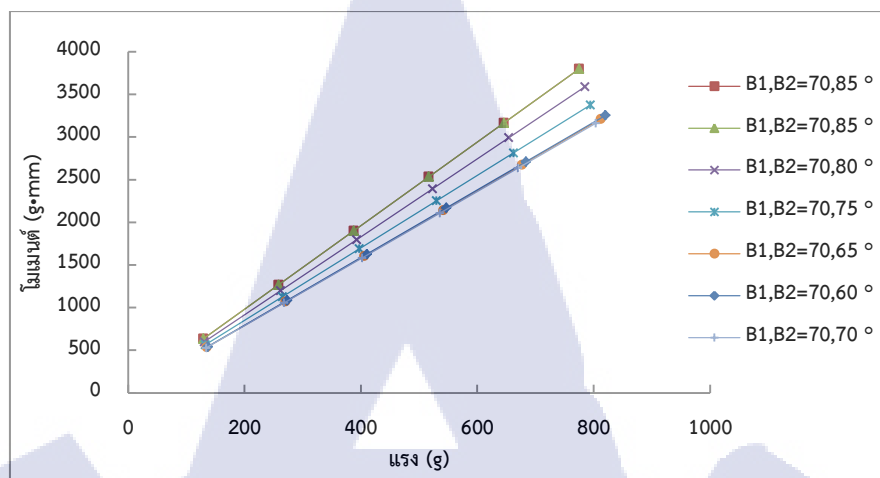
4.3.3.14 ผลการวิเคราะห์ ลูปลวดแอลแบบกำหนดมุม B1=70 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.83 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

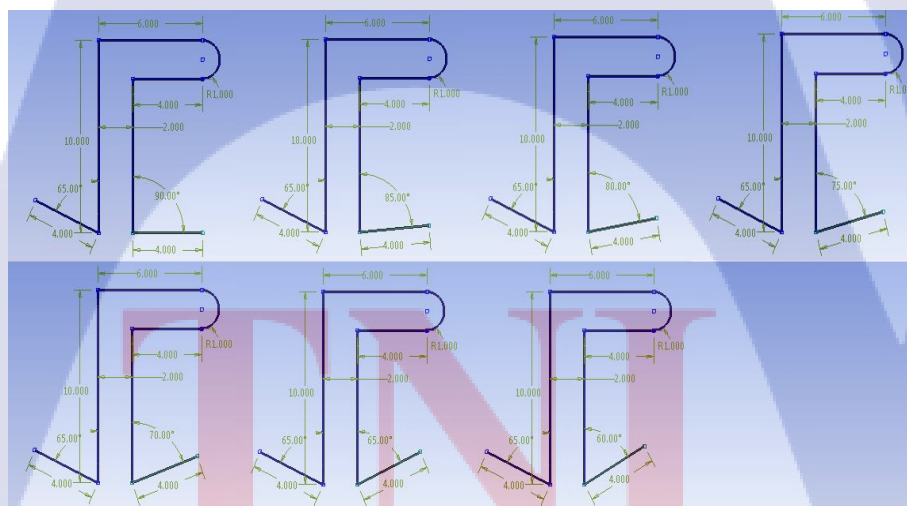


รูปที่ 4.84 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวแอลแบบกำหนด $B_1=70$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

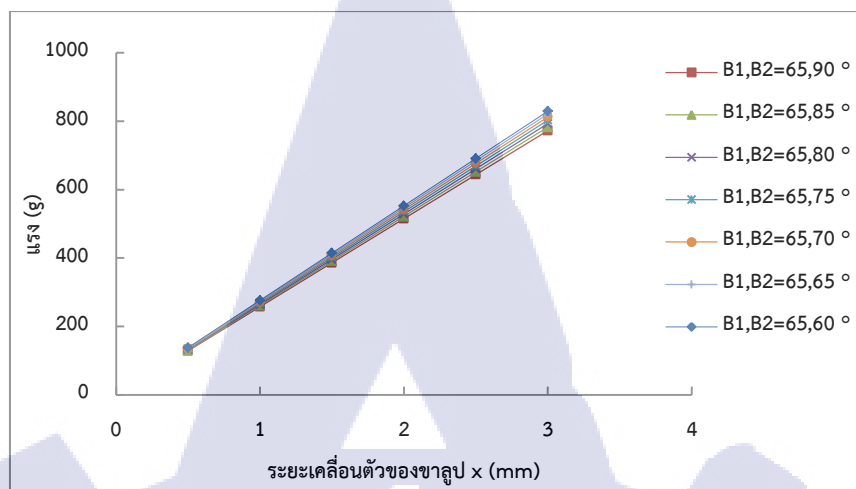


รูปที่ 4.85 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยน B1=70 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

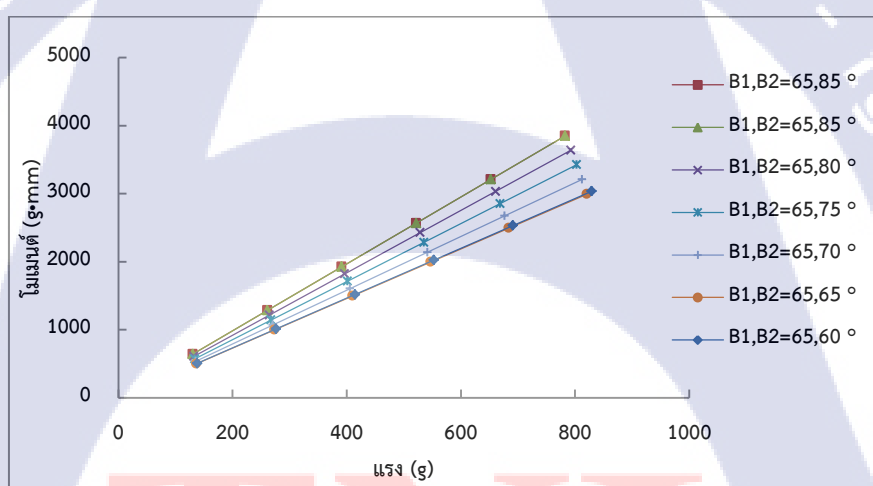
4.3.3.15 ผลการวิเคราะห์ ลูปตัวแอลแบบกำหนดมุม B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.86 ตัวแปรของขนาดลูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

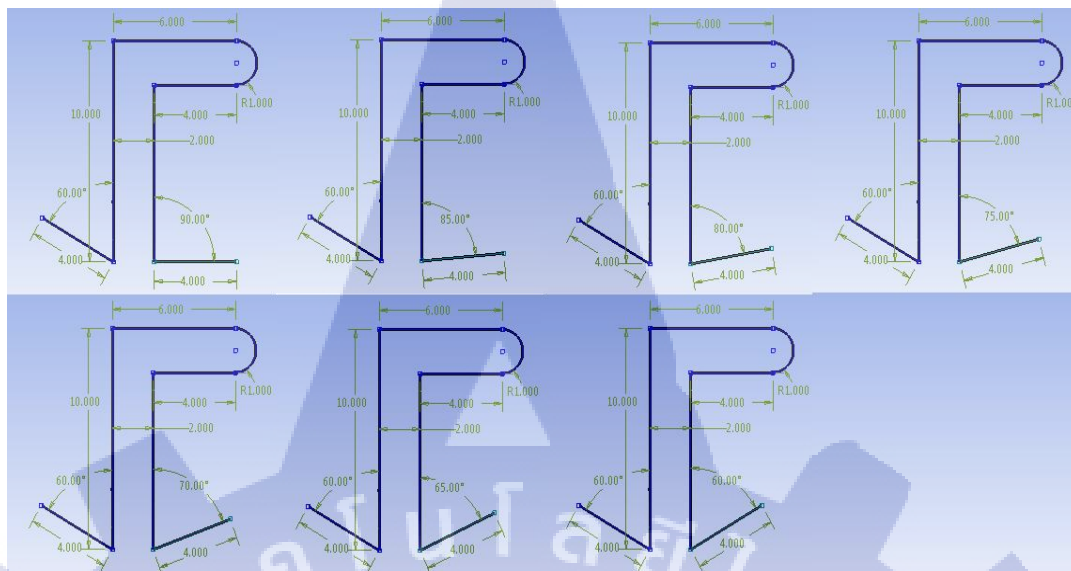


รูปที่ 4.87 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูบตัวแอลแบบกำหนด B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

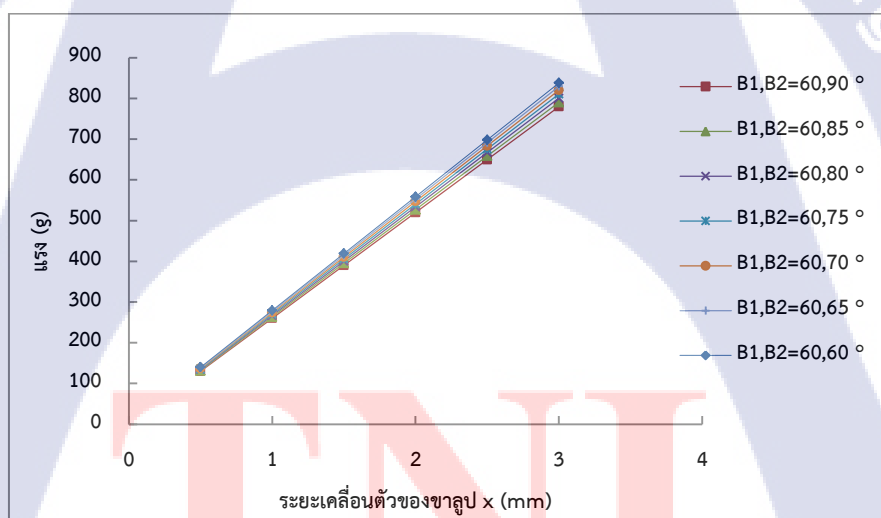


รูปที่ 4.88 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูบตัวแอลแบบเปลี่ยน B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

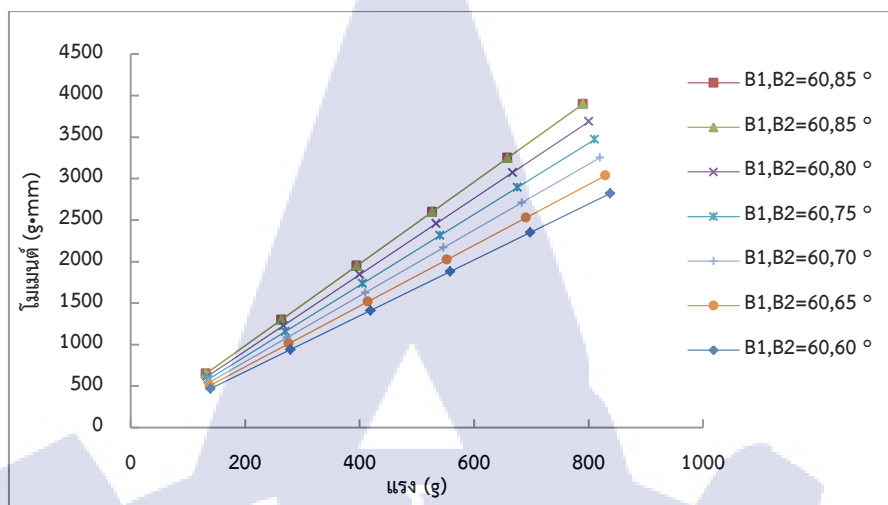
4.3.3.16 ผลการวิเคราะห์ ลูบตัวแอลแบบกำหนดมุม B1=60 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.88 ตัวแปรของขนาดรูปตัวแอลที่วิเคราะห์แบบกำหนด $B_1=60$ องศา และเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.90 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปตัวแอลแบบเปลี่ยน $B_1=60$ องศาและเปลี่ยนตัวแปร B_2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.91 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยน B1=60 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

4.3.4 สรุปผลการวิเคราะห์ลูปตัวแอล

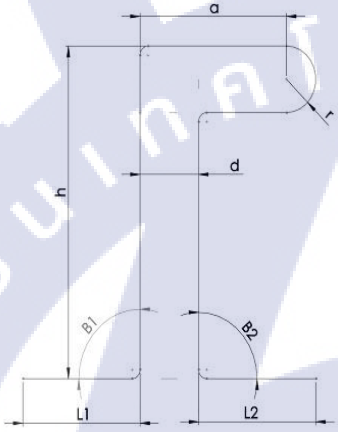
ผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อแรงและ โมเมนต์ที่ลูปตัวแอลตาม

ตารางที่ 4.4

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบแรงและโมเมนต์ของลวดจัดฟันด้วยตัวแปรต่างๆ

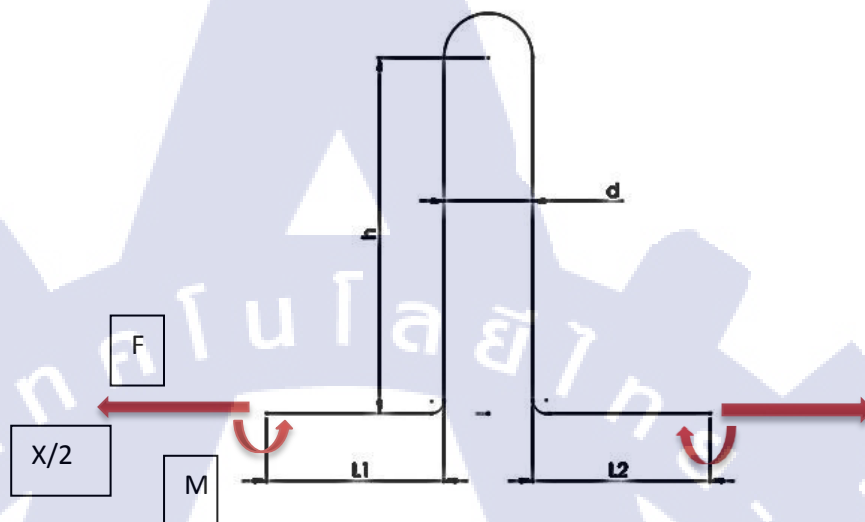
รูปแบบของคาน	ตัวแปร	ผลลัพธ์		
		แรง (F)	โมเมนต์ (M)	โมเมนต์ต่อแรง (M/F)
	เพิ่ม a	ลด	ลด	เพิ่ม
	เพิ่ม r	เพิ่ม	ไม่ต่าง	ลด
	เพิ่ม h	ลดเยอะ	ลดเยอะ	เพิ่ม
	เพิ่ม d	เพิ่ม	เพิ่ม	ไม่ต่าง
	ลดมุม B1, B2	เพิ่ม	ลด	ลด
	ลดมุม B2	ไม่ต่าง	เพิ่ม	ไม่ต่าง
	เพิ่ม a หน้าตัดกลม	ลด	ลด	เพิ่ม
	เพิ่ม r หน้าตัดกลม	เพิ่ม	ไม่ต่าง	ลด
	เพิ่ม h หน้าตัดกลม	ลดเยอะ	ลดเยอะ	เพิ่ม
	เพิ่ม d หน้าตัดกลม	เพิ่ม	เพิ่ม	ไม่ต่าง
	ลวดกลม	เพิ่ม	เพิ่ม	ไม่ต่าง
	ลวดแบน	เพิ่ม	เพิ่ม	ไม่ต่าง

4.3.5 วิธีการวิเคราะห์ของลวดจัดฟันแบบลวดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการวิเคราะห์

วิเคราะห์

ทำการวิเคราะห์หาแรงต่อระยะยึด โมเมนต์ต่อแรง ของลวดจัดฟันเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าสแตนเลสโดยมีโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) = 179 Gpa ทำการวิเคราะห์คานลวดจัดฟันหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 0.55x0.55 mm โดยกำหนดตัวแปรดังในรูปที่ 4.92 กำหนดจุดปลายขาลูปทั้งสองด้านเปรียบเสมือนการยึดติดกับแบล็คเก็ตซึ่งกำหนดค่าเป็นการหมุนคงที่ โดยให้ระยะยึด $x/2$ ยึดออกทั้งสองข้างของขาลูปที่จุดปลายของขาลูป ทำให้เกิดแรง F และโมเมนต์ M จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ขาลูปในรูปร่างต่างๆ กำหนดให้แรง F หน่วยเป็นกรัม (g)

โมเมนต์ M หน่วย ($g \cdot mm$) ระยะยึด $x/2$ หน่วยเป็น (mm) ระยะ $d, h, L1, 2$ หน่วยเป็น (mm) และนำไปใช้ในลูปด้วยถัดไป



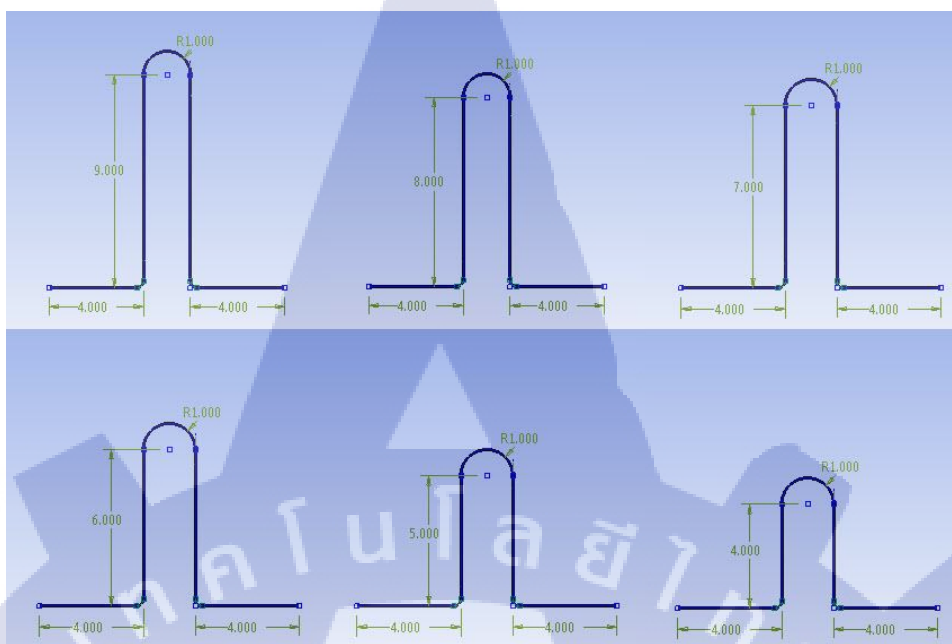
รูปที่ 4.92 การกำหนดค่าตัวแปรของลวดจัดฟันรูปแบบลูปด้วย

4.3.5.1 ผลการวิเคราะห์ ลูปด้วยแบบเปลี่ยนตัวแปร h

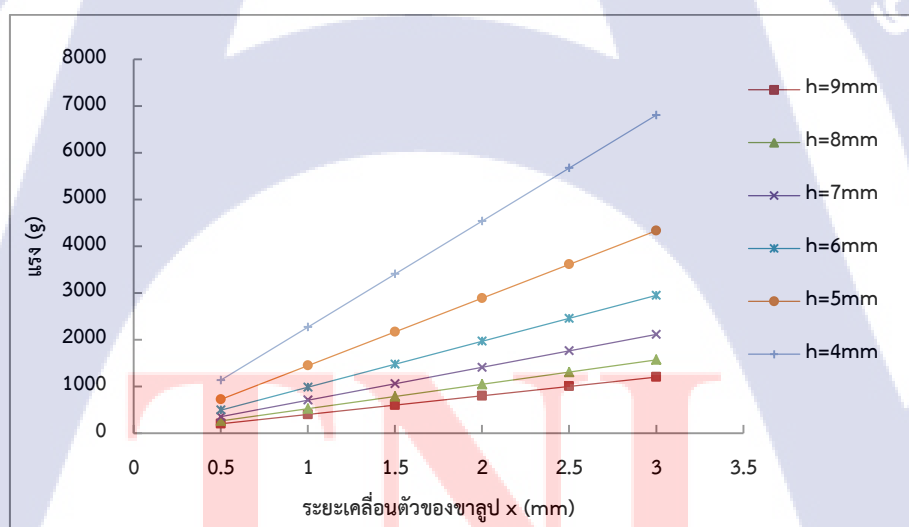
กรณีลูปด้วย การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร h ประเมินได้ว่า เมื่อความสูงของขาลูปมีค่าไม่มากพอ แรง F และ M ที่ขาลูป จะมีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่แรงที่ใช้ในการเลื่อนฟันอาจมีค่าไม่ถึง 500 g โดยมีแรงดึงกลับอยู่ในช่วง (100-7000 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (250-12000 $g \cdot mm$)

TNI

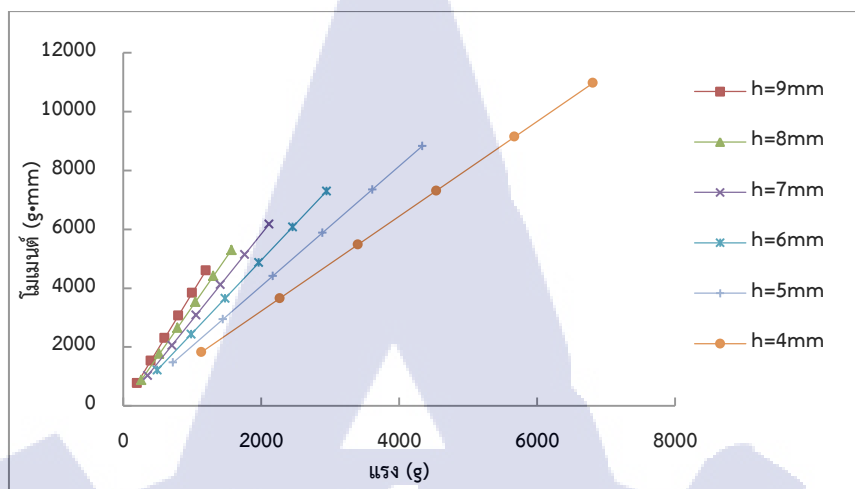
THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY



รูปที่ 4.93 ตัวแปรของขนาดลูปตัวยูที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร h



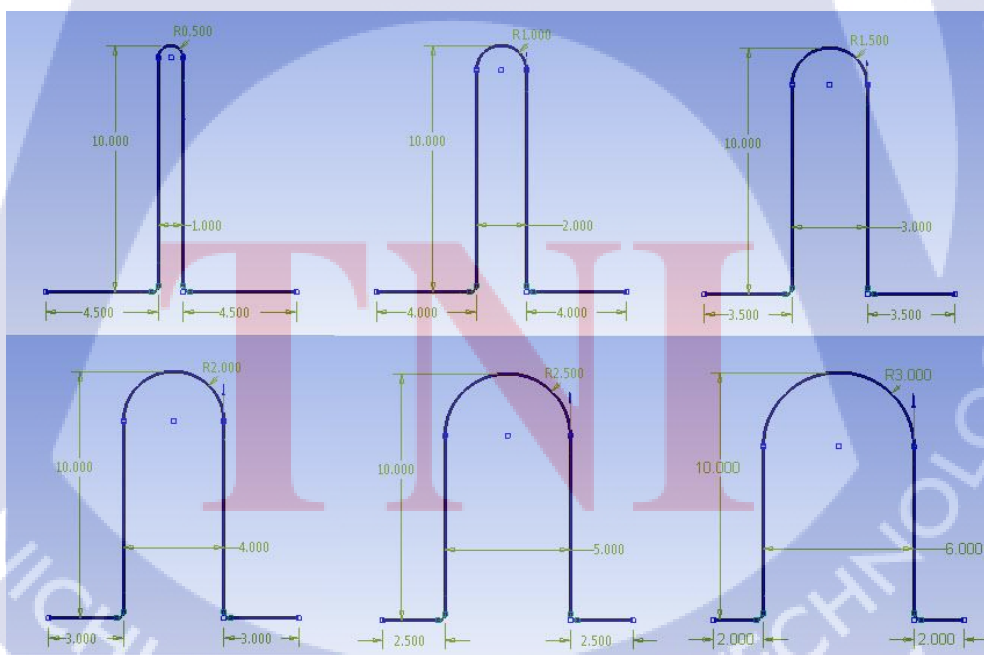
รูปที่ 4.94 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของลูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร h



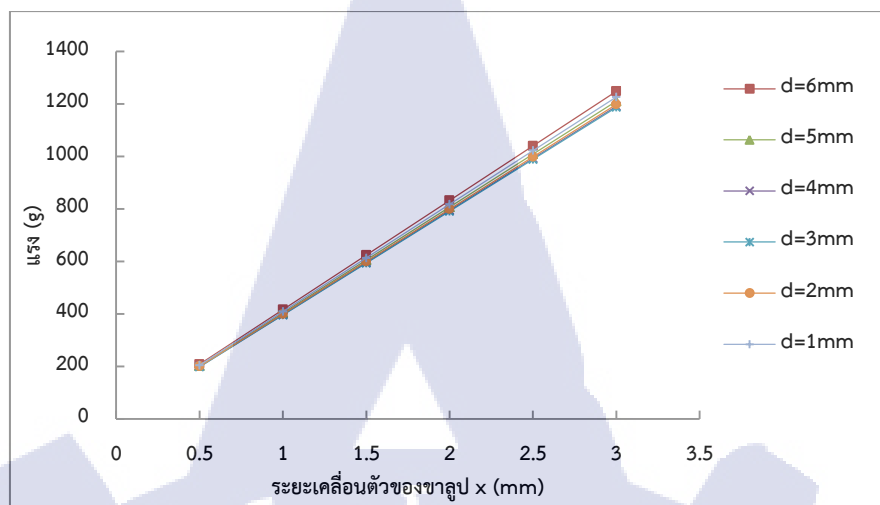
รูปที่ 4.95 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร h

4.3.5.2 ผลการวิเคราะห์ รูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร d

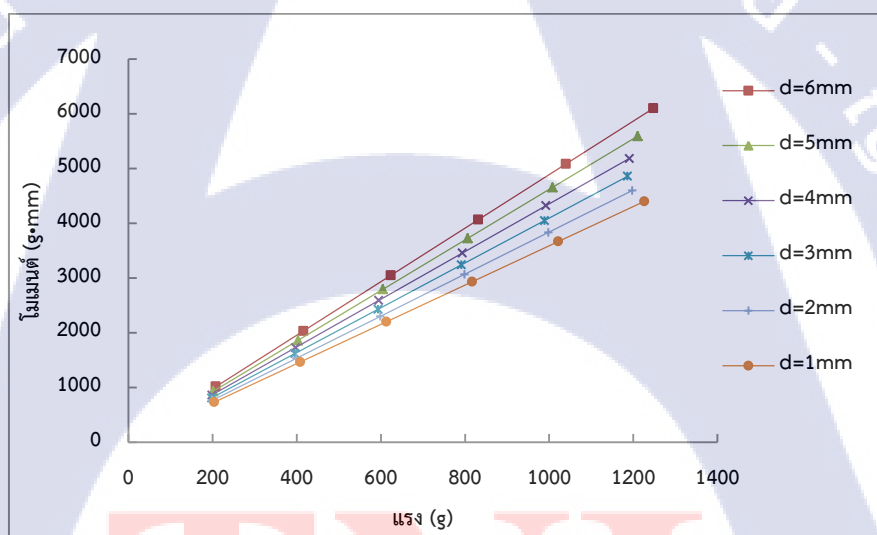
จากรูป 4.97, 4.98 กรณีรูปตัวยู การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร d ระยะห่างของขารูปที่มากขึ้นจะส่งผลโดยตรงทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้นแต่จะไม่มีผลต่อแรงในแนวระดับ ซึ่งแรงดึงกลับอยู่ในช่วง (200-1200 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (1000-6000 g·mm)



รูปที่ 4.96 ตัวแปรของขนาดรูปตัวยูที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร d



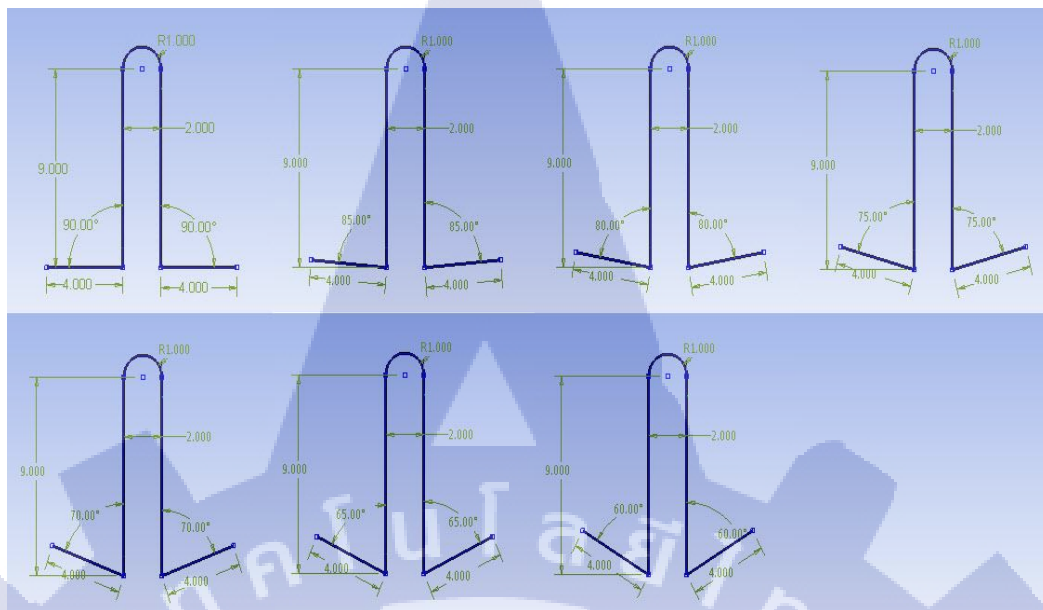
รูปที่ 4.97 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร d



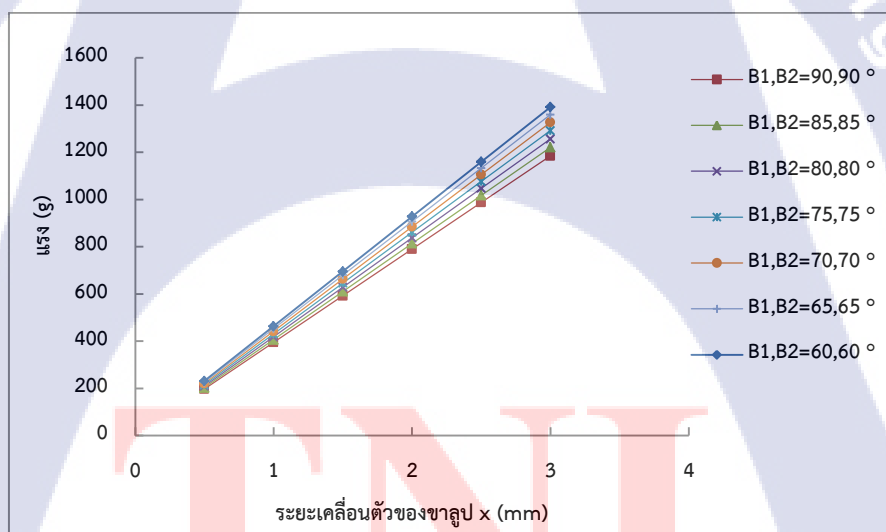
รูปที่ 4.98 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร d

4.3.5.3 ผลการวิเคราะห์ ลูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2

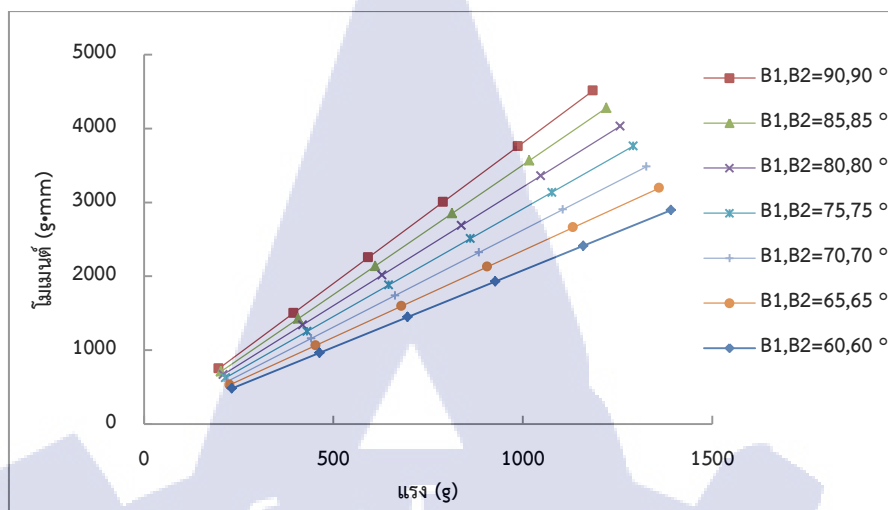
กรณีลูปตัวยู การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มมุมทั้งสองของขาลูปมีผลให้โมเมนต์ที่จุดสัมผัสกับแบล็คเก็ตหุนและมีค่าเพิ่มมากขึ้น มีแรงดึงกลับอยู่ในช่วง (200-1400 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (500-4500 g*mm)



รูปที่ 4.99 ตัวแปรของขนาดรูปตัวยูที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยน B1,B2



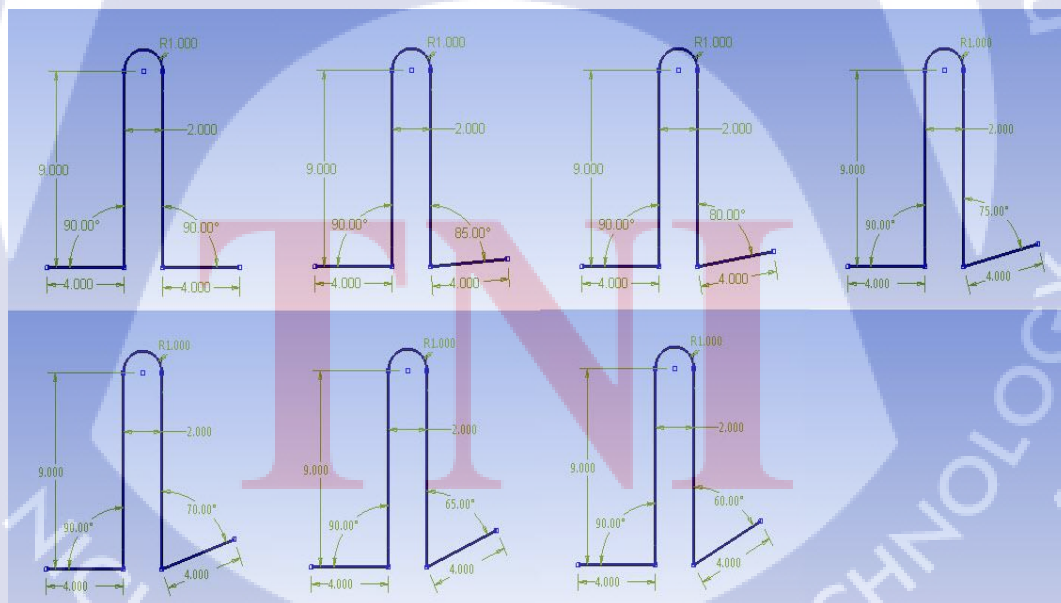
รูปที่ 4.100 ผลการคำนวณเป็นระยะยืดกับแรงของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2



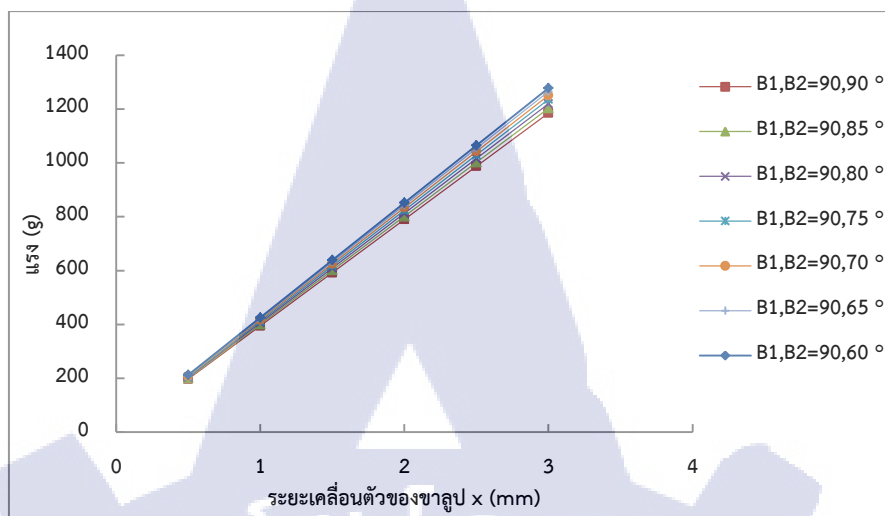
รูปที่ 4.101 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของรูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2

4.3.5.4 ผลการวิเคราะห์ รูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B2

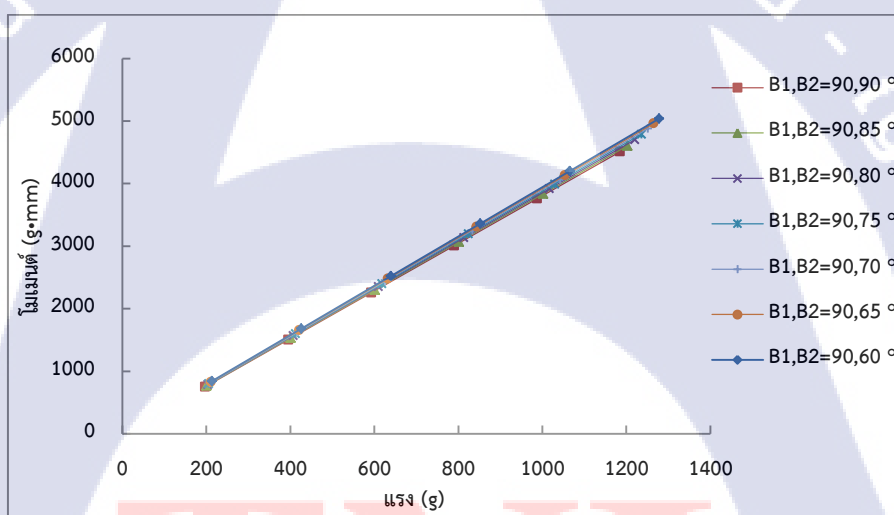
จากรูปที่ 4.103, 4.104 กรณีสถิตภาพ การวิเคราะห์ แบบเปลี่ยนตัวแปร B2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มมุมของขารูปข้างเดียวจะไม่มีผลต่อแรงในแนวระดับและอัตราส่วนของแรงต่อโมเมนต์ มีแรงดึงกลับอยู่ในช่วง (200-1200 g) และโมเมนต์อยู่ในช่วง (1000-5000 g·mm)



รูปที่ 4.102 ตัวแปรของขนาดรูปตัวยูที่วิเคราะห์แบบเปลี่ยนตัวแปร B2



รูปที่ 4.103 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของลูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B2



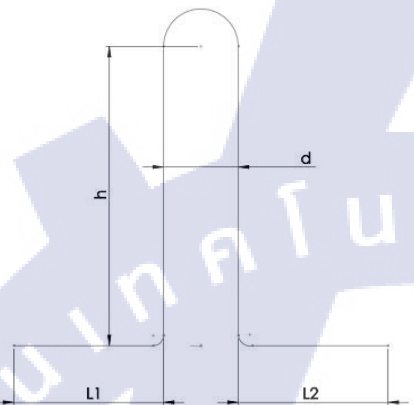
รูปที่ 4.104 ผลการคำนวณเป็นแรงกับโมเมนต์ของลูปตัวยูแบบเปลี่ยนตัวแปร B2

4.3.6 สรุปผลการวิเคราะห์ลูปตัวยู

ผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อแรงและ โมเมนต์ที่ลูปตัวแอลตามตาราง

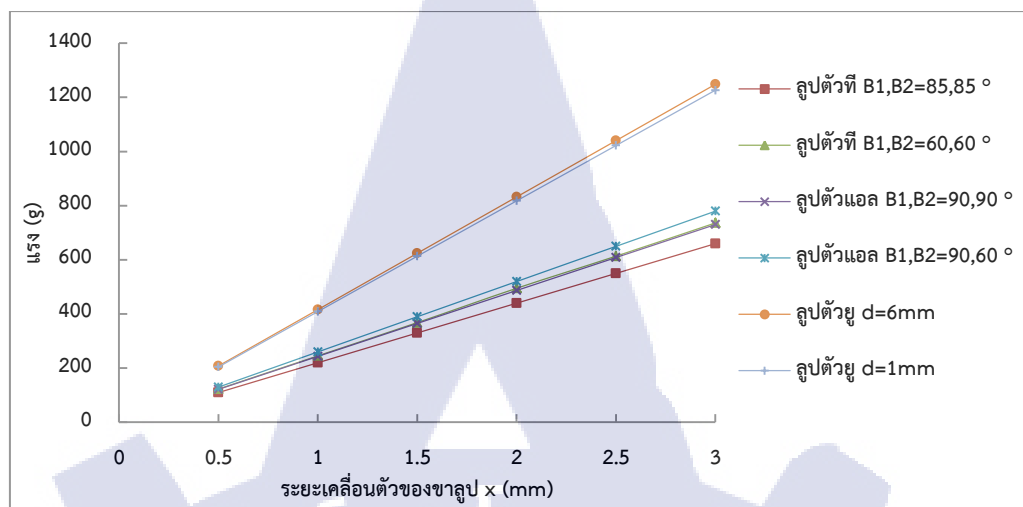
ที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบแรงและโมเมนต์ของลูปตัวด้วยตัวแปรต่างๆ

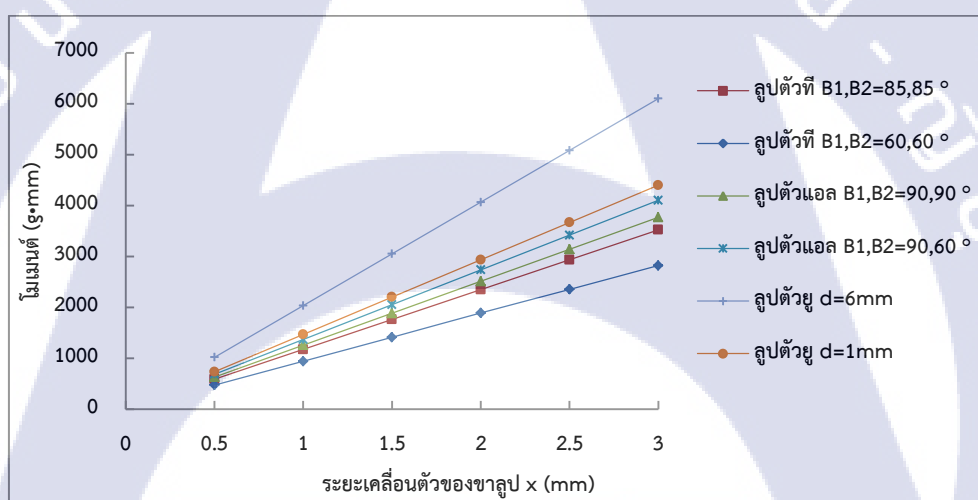
รูปแบบของคาน	ตัวแปร	ผลลัพธ์		
		แรง (F)	โมเมนต์ (M)	โมเมนต์ต่อแรง (M/F)
 ลูปตัว	เพิ่ม h	ลดเยอะ	ลดเยอะ	เพิ่ม
	เพิ่ม d	ไม่ต่าง	เพิ่ม	ไม่ต่าง
	ลดมุม B1,B2	เพิ่ม	ลด	ลด
	ลดมุม B2	ไม่ต่าง	เพิ่ม	ไม่ต่าง

4.4 สรุปผลการวิเคราะห์การคำนวณลูปทั้งสามแบบ

ในการสรุปผลการคำนวณจะสรุปผลการวิเคราะห์เป็นแรง F และ โมเมนต์ M ที่เกิดขึ้นมีขนาดน้อยเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานจริง จากรูปที่ 4.105 และรูปที่ 4.106 การนำข้อมูลที่สอดคล้องกับแรง F และโมเมนต์ M ของลูปทั้งสามรูปแบบ นำมาเปรียบเทียบ ที่ระยะ 1 mm ลูปตัวที่เกิดแรง F อยู่ในช่วง 219.92-245.38 g โมเมนต์ M อยู่ในช่วง 940.80-1174.21 g•mm ลูปตัวแอลเกิดแรง F อยู่ในช่วง 243.39- 259.90 g โมเมนต์ M อยู่ในช่วง 1256.51-1368.32 g•mm ลูปตัวยู เกิดแรง F อยู่ในช่วง 408.83- 416.07 g โมเมนต์ M อยู่ในช่วง 1467.25-2034.41 g•mm พบว่าช่วงของแรงที่มีขนาดน้อยที่สุดได้แก่ลูปตัวที ลูปตัวแอลจะมีแรงเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อย ส่วนลูปตัวยูจะมีค่าแรงค่อนข้างสูง ซึ่งโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกันระหว่างลูปทั้งสามจะเห็นได้ว่าลูปตัวทีมีช่วงของโมเมนต์ต่ำที่สุด ส่วนลูปตัวยูจะมีโมเมนต์สูงขึ้นไปตามลำดับ



รูปที่ 4.105 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับแรงของรูปทั้งสามแบบ



รูปที่ 4.106 ผลการคำนวณเป็นระยะยึดกับโมเมนต์ของรูปทั้งสามแบบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดหน้าตัด รูปร่างของคานาลวดจัดฟันในรูปแบบตัวที่ตัวแอลด้วย อัตราส่วนของแรงดึงต่อระยะการเคลื่อนที่ และอัตราส่วนแรงดึงกับโมเมนต์ ข้อมูลจากการทำงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของลูปที่เหมาะสม และยังเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ขนาดของลูปแบบอื่นๆ ได้ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys วิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้อธิบายความรู้เบื้องต้นในการจัดฟันโดยวิธีกลศาสตร์ของลูปและใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่กระทำที่แบร็คเก็ตและทำให้ฟันเลื่อนไปในทิศทางที่ต้องการ

จากการคำนวณของลูปทั้งสามพบว่าแรง F ของลูปขึ้นกับตัวแปรหลายตัวแต่มีตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้แรง F มีค่าน้อยน้อยคือค่าความสูงของลูปโดยรวม h ซึ่งสังเกตได้ว่าความสูงของลูปโดยรวมมีผลอย่างมากต่อขนาดแรง F โดยควรจะให้ลูปมีความสูงมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้แรงที่ใช้เลื่อนฟันมีค่าน้อย และอยู่ในช่วงเหมาะสมที่จะใช้งาน

อัตราส่วนระหว่างระยะยึดกับแรง เมื่อเปรียบเทียบกับลูปทั้งสามแบบพบว่าที่ระยะยึด 1 mm ให้ค่าแรงอยู่ในช่วงที่ต่ำที่สุดคือลูปตัวที่แบบตัวแปรเอียง B1 ,B2 เอียงทำมุมองศา ลูปตัวแอลและลูปตัวยู ตามลำดับ

แรงที่เกิดจากการยึดตัวของลูปแต่ละรูปแบบให้ผลที่แตกต่างกัน แต่เมื่อต้องการแรง F ที่ขนาด 410 g ที่ระยะยึด 1 mm ขึ้นไปสามารถใช้ได้ลูปทั้งสามรูปแบบ โดยสามารถเลือกรูปแบบที่ง่ายที่สุดคือลูปตัวยูใช้แทนลูปแบบตัวและตัวแอลที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยลูปแต่ละรูปแบบก็จะมีลักษณะเด่นในการนำไปใช้ได้ลูปตัวแอลอาจจะไม่ใช่ลูปที่ให้ค่าที่ดีที่สุดแต่นำไปประยุกต์ใช้กับฟันก้ามที่อยู่ด้านในช่องปากโดยไม่ทำให้เกิดช่องปากได้ดี

โมเมนต์ต่อแรงที่เกิดจากการยึดตัวที่ส่งผลไปยังจุดแบล็คเก็ต เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลูปทั้งสามรูปแบบ ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์แปรผันเป็นเส้นตรงกับแรง ขณะที่แรงมากขึ้นก็จะส่งผลโดยตรงให้โมเมนต์มากขึ้นตาม โมเมนต์ที่มีค่ามากเมื่อเทียบกับแรงที่มีค่าน้อยก็จำเป็นสำหรับกรณีจุด center of resistance อยู่ลึกเข้าไปยังโคนฟัน ทำให้เกิดโมเมนต์ด้านที่ค่อนข้างมากจึงต้องสร้างโมเมนต์จากลวดตัดฟันมาหักล้างเพื่อให้ฟันที่เคลื่อนที่เข้าหากันเป็นเส้นตรงได้ดี

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] R. E. Siatkowski, "Continuous arch wire closing loop design optimization and verification Part I," *American Journal Orthod Dentofac Orthop*, vol. 112, no. 4, pp. 393-402, November 1997.
- [2] V. Ungbhakorn, and, et al., "Assessment of castigliano's theorem on the analysis of closing loop for canine retraction by experiment and finite element method. Part I," *Thammasat International Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 28-37, April-June 2005.
- [3] V. Ungbhakorn, and, et al., "Assessment of castigliano's theorem on the analysis of closing loop for canine retraction by experiment and finite element method. Part II," *Thammasat International Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 38-44, April-June 2005.
- [4] R. E. Siatkowski, "Continuous arch wire closing loop design optimization and verification Part II," *American Journal Orthod Dentofac Orthop*, vol. 112, no.4, pp. 487-495, November 1997.
- [5] R. Setiawan, et al., "Mechanical behavior of various orthodontic retraction springs," *ITB Journal of Engineering Science*, vol.43, no.3, pp. 227-243, July 2011.
- [6] P. Techalertpaisarn and A. Versluis, "Mechanical properties of Opus closing loops, L-loops, and T-loops investigated with finite element anlaysis," *American Journal Orthod Dentofacial Orthop*, vol.143, pp. 675-683, 2013.
- [7] N. Robert and T. Neil, *Essentials of Orthodontics Diagonosis and Treatment* Wiley-Blackwell: A John Wiley, 2011.
- [8] Orthodontist-brisbane.net, "อุปกรณ์จัดฟัน" [Online]. Available : <http://www.orthodontist-brisbane.net/braces-faqs/parts-of-braces/>. [Accessd : September 7, 2015].
- [9] Orthohacker.com "ตัวอย่างรูปของลวดจัดฟัน" [Online]. Available : <http://orthohacker.com/2014/08/04/aplicaciones-clinicas-de-loops-en-ortodoncia/> [Accessd : August 20, 2015].

- [10] Orthodontisteenligne.com “ตัวอย่างรูปของลวดจัดฟัน” [Online]. <https://www.orthodontisteenligne.com/blogue/fils-orthodontiques/> [Accessed : August 22, 2015].
- [11] N. Robert and T. Neil, *Essentials of Orthodontics Diagnosis and Treatment*, Wiley-Blackwell: A John Wiley, 2011.
- [12] S. J. Lindauer, “The basics of orthodontic mechanics,” *Semin Orthod*, vol.7, no.1, pp. 2-15, March 2001.
- [13] W. S. Slaughter, *The Linearized Theory of Elasticity*, USA: Birkhauser, 2002.
- [14] T. J. R. Hughes, *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, USA: Dover Publications Inc., 2000.
- [15] S. Moaveni, *Finite element analysis Theory and application with ANSYS*, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [16] J. Chen, et al., “Effects of T-loop geometry on its forces and moments,” *The Angle Orthodontist Journal*, vol. 70, pp. 48-51, February 2000.
- [17] P. Koson-ittikul, et al., “The Analysis of Load/Deflection of Four Simple Closing Loop Designs by Using Universal Testing Machine,” *KKU Research Journal*, vol. 8, no.2, pp. 56-64, April 2008.

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

ตารางการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ขาลูบ

TNI

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a

a=8mm				a=7mm				a=6mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	137.09	849.09	1	0.5	142.31	860.88	1	0.5	148.51	874.64
2	1	274.19	1698.17	2	1	284.62	1721.77	2	1	297.01	1749.27
3	1.5	411.28	2547.26	3	1.5	426.93	2582.65	3	1.5	445.52	2623.91
4	2	548.38	3396.35	4	2	569.24	3443.53	4	2	594.03	3498.55
5	2.5	685.47	4245.44	5	2.5	711.55	4304.41	5	2.5	742.53	4373.19
6	3	822.57	5094.52	6	3	853.86	5165.30	6	3	891.04	5247.82
a=5mm				a=4mm				a=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	156.00	890.98	1	0.5	165.25	910.86	1	0.5	177.00	935.71
2	1	312.00	1781.97	2	1	330.51	1821.71	2	1	354.00	1871.41
3	1.5	467.99	2672.95	3	1.5	495.76	2732.57	3	1.5	531.01	2807.12
4	2	623.99	3563.93	4	2	661.02	3643.43	4	2	708.01	3742.82
5	2.5	779.99	4454.92	5	2.5	826.27	4554.28	5	2.5	885.01	4678.53
6	3	935.99	5345.90	6	3	991.52	5465.14	6	3	1062.01	5614.23

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร h

h=3mm				h=4mm				h=5mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	730.81	2210.36	1	0.5	478.69	1767.51	1	0.5	332.67	1441.03
2	1	1461.62	4420.72	2	1	957.37	3535.02	2	1	665.35	2882.05
3	1.5	2192.43	6631.08	3	1.5	1436.06	5302.53	3	1.5	998.02	4323.08
4	2	2923.24	8841.44	4	2	1914.74	7070.04	4	2	1330.70	5764.11
5	2.5	3654.05	11051.80	5	2.5	2393.43	8837.55	5	2.5	1663.37	7205.14
6	3	4384.86	13262.17	6	3	2872.11	10605.07	6	3	1996.05	8646.16
h=6mm				h=7mm				h=8mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	242.97	1201.34	1	0.5	213.26	1126.81	1	0.5	176.75	1128.57
2	1	485.94	2402.67	2	1	426.51	2253.62	2	1	353.50	2257.14
3	1.5	728.91	3604.01	3	1.5	639.77	3380.43	3	1.5	530.24	3385.71
4	2	971.89	4805.35	4	2	853.03	4507.24	4	2	706.99	4514.28
5	2.5	1214.86	6006.69	5	2.5	1066.28	5634.04	5	2.5	883.74	5642.85
6	3	1457.83	7208.02	6	3	1279.54	6760.85	6	3	1060.49	6771.42

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร a

a=3mm				a=4mm				a=5mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	177.00	935.71	1	0.5	165.25	910.86	1	0.5	156.00	890.98
2	1	354.00	1871.41	2	1	330.51	1821.71	2	1	312.00	1781.97
3	1.5	531.01	2807.12	3	1.5	495.76	2732.57	3	1.5	467.99	2672.95
4	2	708.01	3742.82	4	2	661.02	3643.43	4	2	623.99	3563.93
5	2.5	885.01	4678.53	5	2.5	826.27	4554.28	5	2.5	779.99	4454.92
6	3	1062.01	5614.23	6	3	991.52	5465.14	6	3	935.99	5345.90
a=6mm				a=7mm				a=8mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	148.51	874.64	1	0.5	142.31	860.88	1	0.5	137.09	849.09
2	1	297.01	1749.27	2	1	284.62	1721.77	2	1	274.19	1698.17
3	1.5	445.52	2623.91	3	1.5	426.93	2582.65	3	1.5	411.28	2547.26
4	2	594.03	3498.55	4	2	569.24	3443.53	4	2	548.38	3396.35
5	2.5	742.53	4373.19	5	2.5	711.55	4304.41	5	2.5	685.47	4245.44
6	3	891.04	5247.82	6	3	853.86	5165.30	6	3	822.57	5094.52

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร r

r=0.5mm				r=1mm				r=1.5mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	126.35	814.46	1	0.5	137.09	849.09	1	0.5	145.83	867.70
2	1	252.71	1628.91	2	1	274.19	1698.17	2	1	291.66	1735.41
3	1.5	379.06	2443.37	3	1.5	411.28	2547.26	3	1.5	437.48	2603.11
4	2	505.41	3257.83	4	2	548.38	3396.35	4	2	583.31	3470.82
5	2.5	631.77	4072.29	5	2.5	685.47	4245.44	5	2.5	729.14	4338.52
6	3	758.12	4886.74	6	3	822.57	5094.52	6	3	874.97	5206.23
r=2mm				r=2.5mm				r=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	152.05	869.30	1	0.5	155.59	855.18	1	0.5	156.88	829.46
2	1	304.09	1738.60	2	1	311.18	1710.35	2	1	313.76	1658.92
3	1.5	456.14	2607.90	3	1.5	466.77	2565.53	3	1.5	470.64	2488.38
4	2	608.19	3477.21	4	2	622.36	3420.70	4	2	627.52	3317.83
5	2.5	760.24	4346.51	5	2.5	777.95	4275.88	5	2.5	784.40	4147.29
6	3	912.28	5215.81	6	3	933.54	5131.05	6	3	941.28	4976.75

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร d

d=1mm				d=2mm				d=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	138.11	857.10	1	0.5	143.54	893.56	1	0.5	150.56	942.57
2	1	276.21	1714.20	2	1	287.08	1787.11	2	1	301.12	1885.13
3	1.5	414.32	2571.30	3	1.5	430.61	2680.67	3	1.5	451.67	2827.70
4	2	552.42	3428.40	4	2	574.15	3574.22	4	2	602.23	3770.26
5	2.5	690.53	4285.50	5	2.5	717.69	4467.78	5	2.5	752.79	4712.83
6	3	828.63	5142.61	6	3	861.23	5361.34	6	3	903.35	5655.39
d=4mm				d=5mm				d=6mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	158.34	997.31	1	0.5	167.01	1058.86	1	0.5	176.75	1128.57
2	1	316.67	1994.61	2	1	334.02	2117.71	2	1	353.50	2257.14
3	1.5	475.01	2991.92	3	1.5	501.03	3176.57	3	1.5	530.24	3385.71
4	2	633.35	3989.23	4	2	668.04	4235.42	4	2	706.99	4514.28
5	2.5	791.69	4986.54	5	2.5	835.05	5294.28	5	2.5	883.74	5642.85
6	3	950.02	5983.84	6	3	1002.06	6353.13	6	3	1060.49	6771.42

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร L1, L2

L=1,1 mm				L=2,2 mm				L=3,3 mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	163.05	1063.60	1	0.5	137.04	850.50	1	0.5	119.71	708.54
2	1	326.10	2127.20	2	1	274.08	1701.01	2	1	239.42	1417.08
3	1.5	489.16	3190.80	3	1.5	411.12	2551.51	3	1.5	359.13	2125.61
4	2	652.21	4254.40	4	2	548.16	3402.01	4	2	478.84	2834.15
5	2.5	815.26	5318.00	5	2.5	685.20	4252.52	5	2.5	598.55	3542.69
6	3	978.31	6381.60	6	3	822.24	5103.02	6	3	718.26	4251.23
L=4,4 mm				L=5,5 mm				L=6,6 mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	107.34	607.18	1	0.5	98.06	531.19	1	0.5	90.96	472.30
2	1	214.67	1214.37	2	1	196.12	1062.39	2	1	181.93	944.61
3	1.5	322.01	1821.55	3	1.5	294.18	1593.58	3	1.5	272.89	1416.91
4	2	429.35	2428.73	4	2	392.24	2124.77	4	2	363.85	1889.21
5	2.5	536.69	3035.91	5	2.5	490.30	2655.96	5	2.5	454.81	2361.51
6	3	644.02	3643.10	6	3	588.37	3187.16	6	3	545.78	2833.82

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2

B1,B2=60,60 °				B1,B2=65,65 °				B1,B2=70,70 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	122.69	470.40	1	0.5	120.29	495.12	1	0.5	117.79	519.44
2	1	245.39	940.80	2	1	240.58	990.24	2	1	235.58	1038.87
3	1.5	368.08	1411.20	3	1.5	360.87	1485.36	3	1.5	353.37	1558.31
4	2	494.87	1890.66	4	2	481.16	1980.48	4	2	471.16	2077.75
5	2.5	613.47	2352.00	5	2.5	601.45	2475.59	5	2.5	588.94	2597.18
6	3	736.16	2822.40	6	3	721.74	2970.71	6	3	706.73	3116.62
B1,B2=75,75 °				B1,B2=80,80 °				B1,B2=85,85 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	115.22	543.04	1	0.5	112.60	565.67	1	0.5	109.96	587.11
2	1	230.43	1086.08	2	1	225.20	1131.34	2	1	219.93	1174.21
3	1.5	345.65	1629.13	3	1.5	337.80	1697.01	3	1.5	329.89	1761.32
4	2	460.87	2172.17	4	2	450.40	2262.68	4	2	439.86	2348.42
5	2.5	576.08	2715.21	5	2.5	563.00	2828.35	5	2.5	549.82	2935.53
6	3	691.30	3258.25	6	3	675.60	3394.02	6	3	659.79	3522.63

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B2

B1,B2=90,60 °				B1,B2=90,65 °				B1,B2=90,70 °				B1,B2=90,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	114.38	428.49	1	0.5	113.34	458.13	1	0.5	112.24	488.24	1	0.5	111.07	518.48
2	1	228.76	856.98	2	1	226.68	916.26	2	1	224.47	976.48	2	1	222.13	1036.95
3	1.5	343.14	1285.47	3	1.5	340.03	1374.40	3	1.5	336.71	1464.71	3	1.5	333.20	1555.43
4	2	457.52	1713.96	4	2	453.37	1832.53	4	2	448.94	1952.95	4	2	444.27	2073.91
5	2.5	571.90	2142.45	5	2.5	566.71	2290.66	5	2.5	561.18	2441.19	5	2.5	555.33	2592.39
6	3	686.28	2570.94	6	3	680.05	2748.79	6	3	673.41	2929.43	6	3	666.40	3110.86
B1,B2=90,80 °				B1,B2=90,85 °				B1,B2=90,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	109.84	548.54	1	0.5	108.58	578.13	1	0.5	107.29	606.97	1			
2	1	219.69	1097.08	2	1	217.16	1156.25	2	1	214.57	1213.95	2			
3	1.5	329.53	1645.61	3	1.5	325.74	1734.38	3	1.5	321.86	1820.92	3			
4	2	439.38	2194.15	4	2	434.32	2312.50	4	2	429.14	2427.90	4			
5	2.5	549.22	2742.69	5	2.5	542.90	2890.63	5	2.5	536.43	3034.87	5			
6	3	659.07	3291.23	6	3	651.48	3468.75	6	3	643.71	3641.84	6			

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยน B2

B1,B2=85,60 °				B1,B2=85,65 °				B1,B2=85,70 °				B1,B2=85,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	115.93	436.02	1	0.5	114.87	465.97	1	0.5	113.73	496.39	1	0.5	112.52	526.92
2	1	231.87	872.03	2	1	229.73	931.95	2	1	227.45	992.77	2	1	225.04	1053.84
3	1.5	347.80	1308.05	3	1.5	344.60	1397.92	3	1.5	341.18	1489.16	3	1.5	337.57	1580.77
4	2	463.74	1744.06	4	2	459.46	1863.89	4	2	454.90	1985.55	4	2	450.09	2107.69
5	2.5	579.67	2180.08	5	2.5	574.33	2329.87	5	2.5	568.63	2481.94	5	2.5	562.61	2634.61
6	3	695.61	2616.09	6	3	689.19	2795.84	6	3	682.35	2978.32	6	3	675.13	3161.53
B1,B2=85,80 °				B1,B2=85,85 °				B1,B2=85,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	111.26	557.26	1	0.5	109.96	587.11	1	0.5	108.58	578.13	1			
2	1	222.53	1114.52	2	1	219.93	1174.21	2	1	217.16	1156.25	2			
3	1.5	333.79	1671.78	3	1.5	329.89	1761.32	3	1.5	325.74	1734.38	3			
4	2	445.06	2229.04	4	2	439.86	2348.42	4	2	434.32	2312.50	4			
5	2.5	556.32	2786.30	5	2.5	549.82	2935.53	5	2.5	542.90	2890.63	5			
6	3	667.59	3343.56	6	3	659.79	3522.63	6	3	651.48	3468.75	6			

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยน B2

B1,B2=80,60 °				B1,B2=80,65 °				B1,B2=80,70 °				B1,B2=80,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	117.40	443.33	1	0.5	116.30	473.58	1	0.5	115.13	504.27	1	0.5	113.89	535.08
2	1	234.80	886.65	2	1	232.60	947.15	2	1	230.26	1008.55	2	1	227.78	1070.16
3	1.5	352.20	1329.98	3	1.5	348.90	1420.73	3	1.5	345.39	1512.82	3	1.5	341.67	1605.23
4	2	469.60	1773.30	4	2	465.20	1894.31	4	2	460.51	2017.09	4	2	455.57	2140.31
5	2.5	587.00	2216.63	5	2.5	581.50	2367.88	5	2.5	575.64	2521.37	5	2.5	569.46	2675.39
6	3	704.40	2659.96	6	3	697.81	2841.46	6	3	690.77	3025.64	6	3	683.35	3210.47
B1,B2=80,80 °				B1,B2=80,85 °				B1,B2=80,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	112.60	565.67	1	0.5	111.26	557.26	1	0.5	109.84	548.54	1			
2	1	225.20	1131.34	2	1	222.53	1114.52	2	1	219.69	1097.08	2			
3	1.5	337.80	1697.01	3	1.5	333.79	1671.78	3	1.5	329.53	1645.61	3			
4	2	450.40	2262.68	4	2	445.06	2229.04	4	2	439.38	2194.15	4			
5	2.5	563.00	2828.35	5	2.5	556.32	2786.30	5	2.5	549.22	2742.69	5			
6	3	675.60	3394.02	6	3	667.59	3343.56	6	3	659.07	3291.23	6			

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=75 องศา และเปลี่ยน B2

B1,B2=75,60 °				B1,B2=75,65 °				B1,B2=75,70 °				B1,B2=75,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	118.82	450.48	1	0.5	117.69	481.01	1	0.5	116.49	511.98	1	0.5	115.22	543.04
2	1	237.64	900.96	2	1	235.38	962.02	2	1	232.97	1023.96	2	1	230.43	1086.08
3	1.5	356.46	1351.45	3	1.5	353.07	1443.03	3	1.5	349.46	1535.94	3	1.5	345.65	1629.13
4	2	475.28	1801.93	4	2	470.76	1924.05	4	2	465.95	2047.92	4	2	460.87	2172.17
5	2.5	594.11	2252.41	5	2.5	588.46	2405.06	5	2.5	582.43	2559.90	5	2.5	576.08	2715.21
6	3	712.93	2702.89	6	3	706.15	2886.07	6	3	698.92	3071.87	6	3	691.30	3258.25
B1,B2=75,80 °				B1,B2=75,85 °				B1,B2=75,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	113.89	535.08	1	0.5	112.52	526.92	1	0.5	111.07	518.48	1			
2	1	227.78	1070.16	2	1	225.04	1053.84	2	1	222.13	1036.95	2			
3	1.5	341.67	1605.23	3	1.5	337.57	1580.77	3	1.5	333.20	1555.43	3			
4	2	455.57	2140.31	4	2	450.09	2107.69	4	2	444.27	2073.91	4			
5	2.5	569.46	2675.39	5	2.5	562.61	2634.61	5	2.5	555.33	2592.39	5			

6	3	683.35	3210.47	6	3	675.13	3161.53	6	3	666.40	3110.86	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-13 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบกำหนด B1=70 องศา และเปลี่ยน B2

B1,B2=75,60 °				B1,B2=75,65 °				B1,B2=75,70 °				B1,B2=75,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	118.82	450.48	1	0.5	117.69	481.01	1	0.5	116.49	511.98	1	0.5	115.22	543.04
2	1	237.64	900.96	2	1	235.38	962.02	2	1	232.97	1023.96	2	1	230.43	1086.08
3	1.5	356.46	1351.45	3	1.5	353.07	1443.03	3	1.5	349.46	1535.94	3	1.5	345.65	1629.13
4	2	475.28	1801.93	4	2	470.76	1924.05	4	2	465.95	2047.92	4	2	460.87	2172.17
5	2.5	594.11	2252.41	5	2.5	588.46	2405.06	5	2.5	582.43	2559.90	5	2.5	576.08	2715.21
6	3	712.93	2702.89	6	3	706.15	2886.07	6	3	698.92	3071.87	6	3	691.30	3258.25
B1,B2=75,80 °				B1,B2=75,85 °				B1,B2=75,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	113.89	535.08	1	0.5	112.52	526.92	1	0.5	111.07	518.48	1			
2	1	227.78	1070.16	2	1	225.04	1053.84	2	1	222.13	1036.95	2			
3	1.5	341.67	1605.23	3	1.5	337.57	1580.77	3	1.5	333.20	1555.43	3			
4	2	455.57	2140.31	4	2	450.09	2107.69	4	2	444.27	2073.91	4			
5	2.5	569.46	2675.39	5	2.5	562.61	2634.61	5	2.5	555.33	2592.39	5			

6	3	683.35	3210.47	6	3	675.13	3161.53	6	3	666.40	3110.86	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-14 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวที่แบบกำหนด B1=65 องศา และเปลี่ยน B2

B1,B2=65,60 °				B1,B2=65,65 °				B1,B2=65,70 °				B1,B2=65,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	121.48	464.08	1	0.5	120.29	495.12	1	0.5	119.02	488.21	1	0.5	117.69	481.01
2	1	242.96	928.15	2	1	240.58	990.24	2	1	238.05	976.43	2	1	235.38	962.02
3	1.5	364.43	1392.23	3	1.5	360.87	1485.36	3	1.5	357.07	1464.64	3	1.5	353.07	1443.03
4	2	485.91	1856.30	4	2	481.16	1980.48	4	2	476.10	1952.85	4	2	470.76	1924.05
5	2.5	607.39	2320.38	5	2.5	601.45	2475.59	5	2.5	595.12	2441.06	5	2.5	588.46	2405.06
6	3	728.87	2784.46	6	3	721.74	2970.71	6	3	714.15	2929.28	6	3	706.15	2886.07
B1,B2=65,80 °				B1,B2=65,85 °				B1,B2=65,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	116.30	473.58	1	0.5	114.87	465.97	1	0.5	113.34	458.13	1			
2	1	232.60	947.15	2	1	229.73	931.95	2	1	226.68	916.26	2			
3	1.5	348.90	1420.73	3	1.5	344.60	1397.92	3	1.5	340.03	1374.40	3			
4	2	465.20	1894.31	4	2	459.46	1863.89	4	2	453.37	1832.53	4			
5	2.5	581.50	2367.88	5	2.5	574.33	2329.87	5	2.5	566.71	2290.66	5			

6	3	697.81	2841.46	6	3	689.19	2795.84	6	3	680.05	2748.79	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-15 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวที่แบบเปลี่ยนตัวแปร B1=60 องศา และเปลี่ยน B2

B1,B2=60,60 °				B1,B2=60,65 °				B1,B2=60,70 °				B1,B2=60,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	122.69	470.40	1	0.5	121.48	464.08	1	0.5	120.18	457.42	1	0.5	118.82	450.48
2	1	245.39	940.80	2	1	242.96	928.15	2	1	240.37	914.84	2	1	237.64	900.96
3	1.5	368.08	1411.20	3	1.5	364.43	1392.23	3	1.5	360.55	1372.25	3	1.5	356.46	1351.45
4	2	494.87	1890.66	4	2	485.91	1856.30	4	2	480.74	1829.67	4	2	475.28	1801.93
5	2.5	613.47	2352.00	5	2.5	607.39	2320.38	5	2.5	600.92	2287.09	5	2.5	594.11	2252.41
6	3	736.16	2822.40	6	3	728.87	2784.46	6	3	721.10	2744.51	6	3	712.93	2702.89
B1,B2=60,80 °				B1,B2=60,85 °				B1,B2=60,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	117.40	443.33	1	0.5	115.93	436.02	1	0.5	114.38	428.49	1			
2	1	234.80	886.65	2	1	231.87	872.03	2	1	228.76	856.98	2			
3	1.5	352.20	1329.98	3	1.5	347.80	1308.05	3	1.5	343.14	1285.47	3			
4	2	469.60	1773.30	4	2	463.74	1744.06	4	2	457.52	1713.96	4			
5	2.5	587.00	2216.63	5	2.5	579.67	2180.08	5	2.5	571.90	2142.45	5			

6	3	704.40	2659.96	6	3	695.61	2616.09	6	3	686.28	2570.94	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-16 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดสี่เหลี่ยม

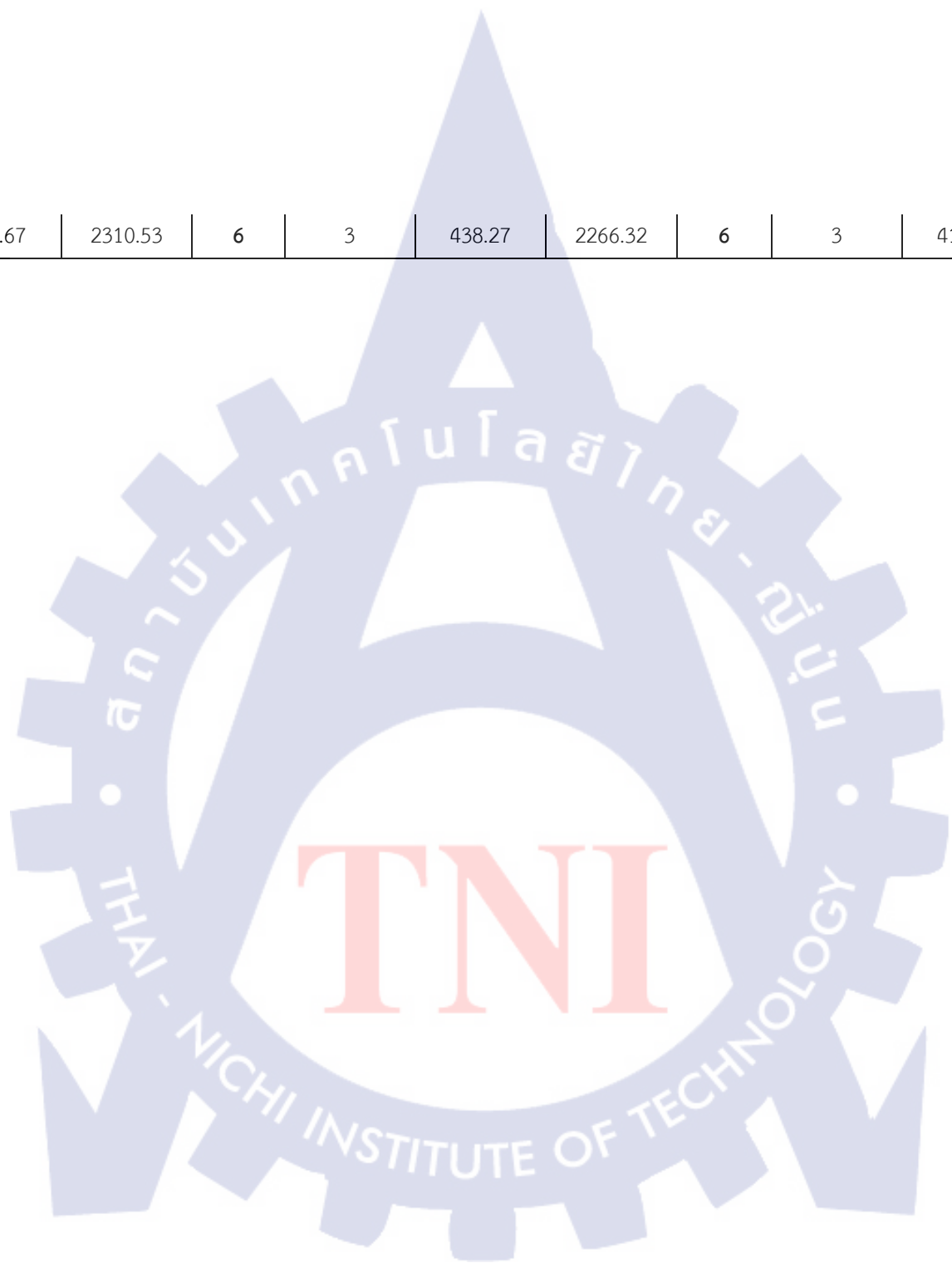
a=2mm				a=3mm				a=4mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	168.75	715.05	1	0.5	154.54	690.23	1	0.5	141.71	670.07
2	1	337.49	1430.09	2	1	309.09	1380.45	2	1	283.42	1340.15
3	1.5	506.24	2145.14	3	1.5	463.63	2070.68	3	1.5	425.13	2010.22
4	2	674.99	2860.18	4	2	618.17	2760.91	4	2	566.85	2680.30
5	2.5	843.74	3575.23	5	2.5	772.72	3451.13	5	2.5	708.56	3350.37
6	3	1012.48	4290.27	6	3	927.26	4141.36	6	3	850.27	4020.45
a=5mm				a=6mm				a=7mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	131.90	654.47	1	0.5	124.14	641.97	1	0.5	117.85	631.68
2	1	263.80	1308.94	2	1	248.28	1283.95	2	1	235.71	1263.37
3	1.5	395.69	1963.42	3	1.5	372.43	1925.92	3	1.5	353.56	1895.05
4	2	527.59	2617.89	4	2	496.57	2567.89	4	2	471.41	2526.74
5	2.5	659.49	3272.36	5	2.5	620.71	3209.86	5	2.5	589.27	3158.42

6	3	791.39	3926.83	6	3	744.85	3851.84	6	3	707.12	3790.11
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------

ตารางที่ ก-17 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่วาลแบบเปลี่ยนตัวแปร a หน้าตัดกลม

a=2mm				a=3mm				a=4mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	99.31	420.81	1	0.5	90.95	406.17	1	0.5	69.34	371.66
2	1	198.62	841.62	2	1	181.89	812.34	2	1	166.78	788.57
3	1.5	297.93	1262.43	3	1.5	272.84	1218.51	3	1.5	250.17	1182.86
4	2	397.25	1683.24	4	2	363.78	1624.68	4	2	333.56	1577.15
5	2.5	496.56	2104.04	5	2.5	454.73	2030.86	5	2.5	416.95	1971.44
6	3	595.87	2524.85	6	3	545.67	2437.03	6	3	500.33	2365.72
a=5mm				a=6mm				a=7mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	77.61	385.09	1	0.5	73.05	377.72	1	0.5	69.34	371.66
2	1	155.22	770.18	2	1	146.09	755.44	2	1	138.69	743.31
3	1.5	232.83	1155.26	3	1.5	219.14	1133.16	3	1.5	208.03	1114.97
4	2	310.44	1540.35	4	2	292.18	1510.88	4	2	277.37	1486.62
5	2.5	388.05	1925.44	5	2.5	365.23	1888.60	5	2.5	346.72	1858.28

6	3	465.67	2310.53	6	3	438.27	2266.32	6	3	416.06	2229.94
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------



ตารางที่ ก-18 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าตัดสี่เหลี่ยม

r=1mm				r=2mm				r=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	124.14	641.97	1	0.5	135.63	661.10	1	0.5	141.34	651.40
2	1	248.28	1283.95	2	1	271.26	1322.21	2	1	282.68	1302.79
3	1.5	372.43	1925.92	3	1.5	406.88	1983.31	3	1.5	424.01	1954.19
4	2	496.57	2567.89	4	2	542.51	2644.41	4	2	565.35	2605.58
5	2.5	620.71	3209.86	5	2.5	678.14	3305.51	5	2.5	706.69	3256.98
6	3	744.85	3851.84	6	3	813.77	3966.62	6	3	848.03	3908.37
r=4mm											
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	142.25	622.72	1				1			
2	1	284.50	1245.44	2				2			
3	1.5	426.75	1868.16	3				3			
4	2	569.01	2490.89	4				4			
5	2.5	711.26	3113.61	5				5			
6	3	853.51	3736.33	6				6			

ตารางที่ ก-19 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร r หน้าที่ดกลม

r=1mm				r=2mm				r=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	73.05	377.72	1	0.5	79.81	389.00	1	0.5	83.17	383.30
2	1	146.09	755.44	2	1	159.62	778.00	2	1	166.34	766.59
3	1.5	219.14	1133.16	3	1.5	239.42	1167.00	3	1.5	249.51	1149.89
4	2	292.18	1510.88	4	2	319.23	1556.00	4	2	332.68	1533.19
5	2.5	365.23	1888.60	5	2.5	399.04	1945.00	5	2.5	415.85	1916.49
6	3	438.27	2266.32	6	3	478.85	2334.00	6	3	499.02	2299.78
r=4mm											
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	83.71	366.42	1				1			
2	1	167.41	732.84	2				2			
3	1.5	251.12	1099.26	3				3			
4	2	334.82	1465.68	4				4			
5	2.5	418.53	1832.10	5				5			
6	3	502.24	2198.52	6				6			

ตารางที่ ก-20 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยืดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดสี่เหลี่ยม

h=5mm				h=6mm				h=7mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	368.83	908.06	1	0.5	242.82	732.17	1	0.5	169.72	604.33
2	1	737.65	1816.13	2	1	485.65	1464.35	2	1	339.44	1208.66
3	1.5	1106.48	2724.19	3	1.5	728.47	2196.52	3	1.5	509.17	1812.99
4	2	1475.30	3632.25	4	2	971.30	2928.69	4	2	678.89	2417.31
5	2.5	1844.13	4540.31	5	2.5	1214.12	3660.87	5	2.5	848.61	3021.64
6	3	2212.95	5448.38	6	3	1456.95	4393.04	6	3	1018.33	3625.97
h=8mm				h=9mm				h=10mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	124.02	508.70	1	0.5	93.86	435.35	1	0.5	73.05	377.72
2	1	248.04	1017.41	2	1	187.72	870.69	2	1	146.09	755.44
3	1.5	372.06	1526.11	3	1.5	281.58	1306.04	3	1.5	219.14	1133.16
4	2	496.08	2034.81	4	2	375.43	1741.39	4	2	292.18	1510.88
5	2.5	620.10	2543.52	5	2.5	469.29	2176.73	5	2.5	365.23	1888.60
6	3	744.12	3052.22	6	3	563.15	2612.08	6	3	438.27	2266.32

ตารางที่ ก-21 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยืดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร h หน้าตัดกลม

h=5mm				h=6mm				h=7mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	368.83	908.06	1	0.5	242.82	732.17	1	0.5	169.72	604.33
2	1	737.65	1816.13	2	1	485.65	1464.35	2	1	339.44	1208.66
3	1.5	1106.48	2724.19	3	1.5	728.47	2196.52	3	1.5	509.17	1812.99
4	2	1475.30	3632.25	4	2	971.30	2928.69	4	2	678.89	2417.31
5	2.5	1844.13	4540.31	5	2.5	1214.12	3660.87	5	2.5	848.61	3021.64
6	3	2212.95	5448.38	6	3	1456.95	4393.04	6	3	1018.33	3625.97
h=8mm				h=9mm				h=10mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	124.02	508.70	1	0.5	93.86	435.35	1	0.5	73.05	377.72
2	1	248.04	1017.41	2	1	187.72	870.69	2	1	146.09	755.44
3	1.5	372.06	1526.11	3	1.5	281.58	1306.04	3	1.5	219.14	1133.16
4	2	496.08	2034.81	4	2	375.43	1741.39	4	2	292.18	1510.88
5	2.5	620.10	2543.52	5	2.5	469.29	2176.73	5	2.5	365.23	1888.60
6	3	744.12	3052.22	6	3	563.15	2612.08	6	3	438.27	2266.32

ตารางที่ ก-22 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยืดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดสี่เหลี่ยม

d=1mm				d=2mm				d=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	116.91	597.84	1	0.5	124.14	641.97	1	0.5	132.39	693.13
2	1	233.83	1195.68	2	1	248.28	1283.95	2	1	264.79	1386.27
3	1.5	350.74	1793.52	3	1.5	372.43	1925.92	3	1.5	397.18	2079.40
4	2	467.66	2391.36	4	2	496.57	2567.89	4	2	529.58	2772.53
5	2.5	584.57	2989.20	5	2.5	620.71	3209.86	5	2.5	661.97	3465.67
6	3	701.49	3587.04	6	3	744.85	3851.84	6	3	794.37	4158.80
d=4mm				d=5mm				d=6mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	141.92	753.15	1	0.5	153.05	824.52	1	0.5	164.91	910.73
2	1	283.84	1506.29	2	1	306.11	1649.05	2	1	329.82	1821.46
3	1.5	425.76	2259.44	3	1.5	459.16	2473.57	3	1.5	494.74	2732.20
4	2	567.67	3012.58	4	2	612.21	3298.09	4	2	659.65	3642.93
5	2.5	709.59	3765.73	5	2.5	765.26	4122.61	5	2.5	824.56	4553.66

6	3	851.51	4518.87	6	3	918.32	4947.14	6	3	989.47	5464.39
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------

ตารางที่ ก-23 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่วาลแบบเปลี่ยนตัวแปร d หน้าตัดกลม

d=1mm				d=2mm				d=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	68.79	351.74	1	0.5	73.05	377.72	1	0.5	77.90	407.84
2	1	137.58	703.48	2	1	146.09	755.44	2	1	155.81	815.67
3	1.5	206.37	1055.22	3	1.5	219.14	1133.16	3	1.5	233.71	1223.51
4	2	275.16	1406.96	4	2	292.18	1510.88	4	2	311.61	1631.35
5	2.5	343.95	1758.70	5	2.5	365.23	1888.60	5	2.5	389.52	2039.19
6	3	412.74	2110.44	6	3	438.27	2266.32	6	3	467.42	2447.02
d=4mm				d=5mm				d=6mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	83.51	443.17	1	0.5	90.07	485.20	1	0.5	97.05	535.96
2	1	167.02	886.34	2	1	180.13	970.39	2	1	194.10	1071.92
3	1.5	250.53	1329.51	3	1.5	270.20	1455.59	3	1.5	291.16	1607.88
4	2	334.04	1772.68	4	2	360.27	1940.78	4	2	388.21	2143.83
5	2.5	417.56	2215.85	5	2.5	450.34	2425.98	5	2.5	485.26	2679.79

6	3	501.07	2659.01	6	3	540.40	2911.17	6	3	582.31	3215.75
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------

ตารางที่ ก-24 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่วาลแบบเปลี่ยนตัวแปร B1,B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=60,60 °				B1,B2=65,65 °				B1,B2=70,70 °				B1,B2=75,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	139.64	470.18	1	0.5	136.84	498.79	1	0.5	133.93	526.93	1	0.5	130.93	554.23
2	1	279.28	940.36	2	1	273.69	997.59	2	1	267.86	1053.86	2	1	261.86	1108.46
3	1.5	418.91	1410.53	3	1.5	410.53	1496.38	3	1.5	401.79	1580.80	3	1.5	392.78	1662.69
4	2	558.55	1880.71	4	2	547.38	1995.17	4	2	535.72	2107.73	4	2	523.71	2216.92
5	2.5	698.19	2350.89	5	2.5	684.22	2493.97	5	2.5	669.66	2634.66	5	2.5	654.64	2771.15
6	3	837.83	2821.07	6	3	821.07	2992.76	6	3	803.59	3161.59	6	3	785.57	3325.38
B1,B2=80,80 °				B1,B2=85,85 °				B1,B2=90,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	127.87	580.38	1	0.5	124.78	605.12	1	0.5	121.70	628.26	1			
2	1	255.73	1160.75	2	1	249.56	1210.23	2	1	243.40	1256.51	2			
3	1.5	383.60	1741.13	3	1.5	374.34	1815.35	3	1.5	365.10	1884.77	3			
4	2	511.47	2321.50	4	2	499.12	2420.46	4	2	486.80	2513.03	4			
5	2.5	639.34	2901.88	5	2.5	623.90	3025.58	5	2.5	608.50	3141.29	5			

6	3	767.20	3482.25	6	3	748.68	3630.69	6	3	730.20	3769.54	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-25 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=90,60 °				B1,B2=90,65 °				B1,B2=90,70 °				B1,B2=90,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	129.95	684.16	1	0.5	128.76	675.83	1	0.5	127.48	667.01	1	0.5	126.12	657.76
2	1	259.91	1368.32	2	1	257.52	1351.66	2	1	254.96	1334.01	2	1	252.24	1315.51
3	1.5	389.86	2052.48	3	1.5	386.28	2027.49	3	1.5	382.43	2001.02	3	1.5	378.36	1973.27
4	2	519.81	2736.64	4	2	515.03	2703.32	4	2	509.91	2668.02	4	2	504.48	2631.02
5	2.5	649.77	3420.80	5	2.5	643.79	3379.15	5	2.5	637.39	3335.03	5	2.5	630.60	3288.78
6	3	779.72	4104.96	6	3	772.55	4054.98	6	3	764.87	4002.04	6	3	756.72	3946.53
B1,B2=90,80 °				B1,B2=90,85 °				B1,B2=90,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F(g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F(g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F(g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F(g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	124.70	648.16	1	0.5	123.22	638.29	1	0.5	121.70	628.26	1			
2	1	249.39	1296.31	2	1	246.44	1276.59	2	1	243.40	1256.51	2			
3	1.5	374.09	1944.47	3	1.5	369.65	1914.88	3	1.5	365.10	1884.77	3			
4	2	498.78	2592.63	4	2	492.87	2553.17	4	2	486.80	2513.03	4			
5	2.5	623.48	3240.78	5	2.5	616.09	3191.47	5	2.5	608.50	3141.29	5			

6	3	748.18	3888.94	6	3	739.31	3829.76	6	3	730.20	3769.54	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-26 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=85 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=85,60 °				B1,B2=85,65 °				B1,B2=85,70 °				B1,B2=85,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	131.72	649.90	1	0.5	130.49	641.75	1	0.5	129.17	633.13	1	0.5	127.77	624.09
2	1	263.44	1299.81	2	1	260.98	1283.51	2	1	258.34	1266.26	2	1	255.54	1248.19
3	1.5	395.17	1949.71	3	1.5	391.47	1925.26	3	1.5	387.51	1899.39	3	1.5	383.31	1872.28
4	2	526.89	2599.61	4	2	521.96	2567.01	4	2	516.67	2532.51	4	2	511.08	2496.38
5	2.5	658.61	3249.51	5	2.5	652.45	3208.77	5	2.5	645.84	3165.64	5	2.5	638.85	3120.47
6	3	790.33	3899.42	6	3	782.93	3850.52	6	3	775.01	3798.77	6	3	766.61	3744.57
B1,B2=85,80 °				B1,B2=85,85 °				B1,B2=85,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	126.30	614.73	1	0.5	124.78	605.12	1	0.5	123.22	638.29	1			
2	1	252.60	1229.46	2	1	249.56	1210.23	2	1	246.44	1276.59	2			
3	1.5	378.91	1844.19	3	1.5	374.34	1815.35	3	1.5	369.65	1914.88	3			
4	2	505.21	2458.92	4	2	499.12	2420.46	4	2	492.87	2553.17	4			
5	2.5	631.51	3073.65	5	2.5	623.90	3025.58	5	2.5	616.09	3191.47	5			

6	3	757.81	3688.38	6	3	748.68	3630.69	6	3	739.31	3829.76	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-27 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบกำหนด B1=80 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=80,60 °				B1,B2=80,65 °				B1,B2=80,70 °				B1,B2=80,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	133.45	614.62	1	0.5	132.18	606.67	1	0.5	130.82	598.27	1	0.5	129.38	589.48
2	1	266.90	1229.24	2	1	264.36	1213.35	2	1	261.64	1196.54	2	1	258.75	1178.96
3	1.5	400.35	1843.86	3	1.5	396.53	1820.02	3	1.5	392.45	1794.82	3	1.5	388.13	1768.44
4	2	533.80	2458.48	4	2	528.71	2426.69	4	2	523.27	2393.09	4	2	517.51	2357.92
5	2.5	667.24	3073.10	5	2.5	660.89	3033.37	5	2.5	654.09	2991.36	5	2.5	646.88	2947.40
6	3	800.69	3687.72	6	3	793.07	3640.04	6	3	784.91	3589.63	6	3	776.26	3536.89
B1,B2=80,80 °				B1,B2=80,85 °				B1,B2=80,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	127.87	580.38	1	0.5	126.30	614.73	1	0.5	124.70	648.16	1			
2	1	255.73	1160.75	2	1	252.60	1229.46	2	1	249.39	1296.31	2			
3	1.5	383.60	1741.13	3	1.5	378.91	1844.19	3	1.5	374.09	1944.47	3			
4	2	511.47	2321.50	4	2	505.21	2458.92	4	2	498.78	2592.63	4			
5	2.5	639.34	2901.88	5	2.5	631.51	3073.65	5	2.5	623.48	3240.78	5			

6	3	767.20	3482.25	6	3	757.81	3688.38	6	3	748.18	3888.94	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-28 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=75 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=75,60 °				B1,B2=75,65 °				B1,B2=75,70 °				B1,B2=75,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	135.12	578.63	1	0.5	133.81	570.91	1	0.5	132.41	562.76	1	0.5	130.93	554.23
2	1	270.24	1157.26	2	1	267.62	1141.82	2	1	264.82	1125.51	2	1	261.86	1108.46
3	1.5	405.35	1735.90	3	1.5	401.43	1712.73	3	1.5	397.23	1688.27	3	1.5	392.78	1662.69
4	2	540.47	2314.53	4	2	535.24	2283.64	4	2	529.64	2251.02	4	2	523.71	2216.92
5	2.5	675.59	2893.16	5	2.5	669.05	2854.56	5	2.5	662.05	2813.78	5	2.5	654.64	2771.15
6	3	810.71	3471.79	6	3	802.86	3425.47	6	3	794.46	3376.53	6	3	785.57	3325.38
B1,B2=75,80 °				B1,B2=75,85 °				B1,B2=75,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	129.38	589.48	1	0.5	127.77	624.09	1	0.5	126.12	657.76	1			
2	1	258.75	1178.96	2	1	255.54	1248.19	2	1	252.24	1315.51	2			
3	1.5	388.13	1768.44	3	1.5	383.31	1872.28	3	1.5	378.36	1973.27	3			
4	2	517.51	2357.92	4	2	511.08	2496.38	4	2	504.48	2631.02	4			
5	2.5	646.88	2947.40	5	2.5	638.85	3120.47	5	2.5	630.60	3288.78	5			

6	3	776.26	3536.89	6	3	766.61	3744.57	6	3	756.72	3946.53	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-29 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=70 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=70,60 °				B1,B2=70,65 °				B1,B2=70,70 °				B1,B2=70,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	136.71	542.30	1	0.5	135.37	534.82	1	0.5	133.93	526.93	1	0.5	132.41	562.76
2	1	273.43	1084.60	2	1	270.74	1069.64	2	1	267.86	1053.86	2	1	264.82	1125.51
3	1.5	410.14	1626.90	3	1.5	406.11	1604.47	3	1.5	401.79	1580.80	3	1.5	397.23	1688.27
4	2	546.86	2169.20	4	2	541.48	2139.29	4	2	535.72	2107.73	4	2	529.64	2251.02
5	2.5	683.57	2711.50	5	2.5	676.85	2674.11	5	2.5	669.66	2634.66	5	2.5	662.05	2813.78
6	3	820.28	3253.80	6	3	812.22	3208.93	6	3	803.59	3161.59	6	3	794.46	3376.53
B1,B2=70,80 °				B1,B2=70,85 °				B1,B2=70,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	130.82	598.27	1	0.5	129.17	633.13	1	0.5	127.48	667.01	1			
2	1	261.64	1196.54	2	1	258.34	1266.26	2	1	254.96	1334.01	2			
3	1.5	392.45	1794.82	3	1.5	387.51	1899.39	3	1.5	382.43	2001.02	3			
4	2	523.27	2393.09	4	2	516.67	2532.51	4	2	509.91	2668.02	4			
5	2.5	654.09	2991.36	5	2.5	645.84	3165.64	5	2.5	637.39	3335.03	5			

6	3	784.91	3589.63	6	3	775.01	3798.77	6	3	764.87	4002.04	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-30 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของรูปตัวแอลแบบกำหนด B1=65 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=65,60 °				B1,B2=65,65 °				B1,B2=65,70 °				B1,B2=65,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	138.22	506.01	1	0.5	136.84	498.79	1	0.5	135.37	534.82	1	0.5	133.81	570.91
2	1	276.45	1012.02	2	1	273.69	997.59	2	1	270.74	1069.64	2	1	267.62	1141.82
3	1.5	414.67	1518.03	3	1.5	410.53	1496.38	3	1.5	406.11	1604.47	3	1.5	401.43	1712.73
4	2	552.90	2024.05	4	2	547.38	1995.17	4	2	541.48	2139.29	4	2	535.24	2283.64
5	2.5	691.12	2530.06	5	2.5	684.22	2493.97	5	2.5	676.85	2674.11	5	2.5	669.05	2854.56
6	3	829.34	3036.07	6	3	821.07	2992.76	6	3	812.22	3208.93	6	3	802.86	3425.47
B1,B2=65,80 °				B1,B2=65,85 °				B1,B2=65,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	132.18	606.67	1	0.5	130.49	641.75	1	0.5	128.76	675.83	1			
2	1	264.36	1213.35	2	1	260.98	1283.51	2	1	257.52	1351.66	2			
3	1.5	396.53	1820.02	3	1.5	391.47	1925.26	3	1.5	386.28	2027.49	3			
4	2	528.71	2426.69	4	2	521.96	2567.01	4	2	515.03	2703.32	4			
5	2.5	660.89	3033.37	5	2.5	652.45	3208.77	5	2.5	643.79	3379.15	5			

6	3	793.07	3640.04	6	3	782.93	3850.52	6	3	772.55	4054.98	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-31 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลูปตัวแอลแบบกำหนด B1=60 องศา และเปลี่ยนตัวแปร B2 หน้าตัดสี่เหลี่ยม

B1,B2=60,60 °				B1,B2=60,65 °				B1,B2=60,70 °				B1,B2=60,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	139.64	470.18	1	0.5	138.22	506.01	1	0.5	136.71	542.30	1	0.5	135.12	578.63
2	1	279.28	940.36	2	1	276.45	1012.02	2	1	273.43	1084.60	2	1	270.24	1157.26
3	1.5	418.91	1410.53	3	1.5	414.67	1518.03	3	1.5	410.14	1626.90	3	1.5	405.35	1735.90
4	2	558.55	1880.71	4	2	552.90	2024.05	4	2	546.86	2169.20	4	2	540.47	2314.53
5	2.5	698.19	2350.89	5	2.5	691.12	2530.06	5	2.5	683.57	2711.50	5	2.5	675.59	2893.16
6	3	837.83	2821.07	6	3	829.34	3036.07	6	3	820.28	3253.80	6	3	810.71	3471.79
B1,B2=60,80 °				B1,B2=60,85 °				B1,B2=60,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	133.45	614.62	1	0.5	131.72	649.90	1	0.5	129.95	684.16	1			
2	1	266.90	1229.24	2	1	263.44	1299.81	2	1	259.91	1368.32	2			
3	1.5	400.35	1843.86	3	1.5	395.17	1949.71	3	1.5	389.86	2052.48	3			
4	2	533.80	2458.48	4	2	526.89	2599.61	4	2	519.81	2736.64	4			
5	2.5	667.24	3073.10	5	2.5	658.61	3249.51	5	2.5	649.77	3420.80	5			

6	3	800.69	3687.72	6	3	790.33	3899.42	6	3	779.72	4104.96	6			
---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	---	--------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-32 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่ตัวแบบเปลี่ยนตัวแปร h

h=4mm				h=5mm				h=6mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	1134.64	1828.35	1	0.5	722.16	1471.39	1	0.5	491.35	1216.84
2	1	2269.28	3656.70	2	1	1444.33	2942.79	2	1	982.71	2433.68
3	1.5	3403.91	5485.05	3	1.5	2166.49	4414.18	3	1.5	1474.06	3650.51
4	2	4538.55	7313.40	4	2	2888.66	5885.58	4	2	1965.42	4867.35
5	2.5	5673.19	9141.75	5	2.5	3610.82	7356.97	5	2.5	2456.77	6084.19
6	3	6807.83	10970.10	6	3	4332.98	8828.36	6	3	2948.13	7301.03
h=7mm				h=8mm				h=9mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	352.12	1028.72	1	0.5	261.24	882.45	1	0.5	199.71	766.95
2	1	704.23	2057.45	2	1	522.48	1764.90	2	1	399.41	1533.90
3	1.5	1056.35	3086.17	3	1.5	783.72	2647.35	3	1.5	599.12	2300.85
4	2	1408.46	4114.89	4	2	1044.95	3529.81	4	2	798.83	3067.80
5	2.5	1760.58	5143.61	5	2.5	1306.19	4412.26	5	2.5	998.53	3834.75

6	3	2112.69	6172.34	6	3	1567.43	5294.71	6	3	1198.24	4601.70
---	---	---------	---------	---	---	---------	---------	---	---	---------	---------

ตารางที่ ก-33 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่ตัวแบบเปลี่ยนตัวแปร d

d=1mm				d=2mm				d=3mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	204.42	733.63	1	0.5	199.71	766.95	1	0.5	197.81	810.11
2	1	408.83	1467.25	2	1	399.41	1533.90	2	1	395.62	1620.21
3	1.5	613.25	2200.88	3	1.5	599.12	2300.85	3	1.5	593.43	2430.32
4	2	817.66	2934.51	4	2	798.83	3067.80	4	2	791.24	3240.42
5	2.5	1022.08	3668.13	5	2.5	998.53	3834.75	5	2.5	989.05	4050.53
6	3	1226.50	4401.76	6	3	1198.24	4601.70	6	3	1186.86	4860.63
d=4mm				d=5mm				d=6mm			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	198.52	864.50	1	0.5	201.75	932.10	1	0.5	208.04	1017.20
2	1	397.05	1729.01	2	1	403.50	1864.20	2	1	416.08	2034.41
3	1.5	595.57	2593.51	3	1.5	605.24	2796.30	3	1.5	624.12	3051.61
4	2	794.09	3458.02	4	2	806.99	3728.39	4	2	832.16	4068.82
5	2.5	992.62	4322.52	5	2.5	1008.74	4660.49	5	2.5	1040.20	5086.02

6	3	1191.14	5187.03	6	3	1210.49	5592.59	6	3	1248.24	6103.23
---	---	---------	---------	---	---	---------	---------	---	---	---------	---------

ตารางที่ ก-34 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่ตัวแบบเปลี่ยนตัวแปร B1, B2

B1,B2=60,60 °				B1,B2=65,65 °				B1,B2=70,70 °				B1,B2=75,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	231.93	482.59	1	0.5	226.66	532.14	1	0.5	221.11	580.60	1	0.5	215.35	627.29
2	1	463.85	965.19	2	1	453.31	1064.28	2	1	442.22	1161.20	2	1	430.70	1254.57
3	1.5	695.78	1447.78	3	1.5	679.97	1596.42	3	1.5	663.33	1741.79	3	1.5	646.05	1881.86
4	2	927.70	1930.37	4	2	906.63	2128.56	4	2	884.44	2322.39	4	2	861.40	2509.15
5	2.5	1159.63	2412.97	5	2.5	1133.28	2660.69	5	2.5	1105.55	2902.99	5	2.5	1076.75	3136.44
6	3	1391.55	2895.56	6	3	1359.94	3192.83	6	3	1326.66	3483.59	6	3	1292.10	3763.72
B1,B2=80,80 °				B1,B2=85,85 °				B1,B2=90,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	209.45	671.63	1	0.5	203.47	713.18	1	0.5	197.49	751.61	1			
2	1	418.89	1343.26	2	1	406.94	1426.36	2	1	394.98	1503.21	2			
3	1.5	628.34	2014.89	3	1.5	610.41	2139.54	3	1.5	592.48	2254.82	3			
4	2	837.79	2686.53	4	2	813.88	2852.72	4	2	789.97	3006.43	4			
5	2.5	1047.23	3358.16	5	2.5	1017.35	3565.90	5	2.5	987.46	3758.03	5			

6	3	1256.68	4029.79	6	3	1220.82	4279.08	6	3	1184.95	4509.64	6			
---	---	---------	---------	---	---	---------	---------	---	---	---------	---------	---	--	--	--

ตารางที่ ก-35 ข้อมูลผลการคำนวณระยะยึดกับแรงและโมเมนต์ของลู่ตัวแบบเปลี่ยนตัวแปร B2

B1,B2=90,60 °				B1,B2=90,65 °				B1,B2=90,70 °				B1,B2=90,75 °			
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	212.97	839.79	1	0.5	210.82	826.83	1	0.5	208.47	813.00	1	0.5	205.94	798.43
2	1	425.94	1679.57	2	1	421.64	1653.65	2	1	416.95	1626.01	2	1	411.89	1596.86
3	1.5	638.91	2519.36	3	1.5	632.46	2480.48	3	1.5	625.42	2439.01	3	1.5	617.83	2395.29
4	2	851.87	3359.14	4	2	843.28	3307.31	4	2	833.89	3252.02	4	2	823.78	3193.72
5	2.5	1064.84	4198.93	5	2.5	1054.10	4134.13	5	2.5	1042.37	4065.02	5	2.5	1029.72	3992.16
6	3	1277.81	5038.71	6	3	1264.92	4960.96	6	3	1250.84	4878.02	6	3	1235.67	4790.59
B1,B2=90,80 °				B1,B2=90,85 °				B1,B2=90,90 °							
No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)	No.	ระยะ x (mm)	แรง F (g)	โมเมนต์ M (g•mm)
1	0.5	203.25	783.24	1	0.5	200.43	767.58	1	0.5	197.49	751.61	1			
2	1	406.51	1566.48	2	1	400.85	1535.16	2	1	394.98	1503.21	2			
3	1.5	609.76	2349.72	3	1.5	601.28	2302.74	3	1.5	592.48	2254.82	3			
4	2	813.02	3132.96	4	2	801.71	3070.31	4	2	789.97	3006.43	4			
5	2.5	1016.27	3916.20	5	2.5	1002.14	3837.89	5	2.5	987.46	3758.03	5			

6	3	1219.53	4699.44	6	3	1202.56	4605.47	6	3	1184.95	4509.64	6			
---	---	---------	---------	---	---	---------	---------	---	---	---------	---------	---	--	--	--

