

การศึกษาพฤติกรรมการกดของพลาสติก ABS แบบมีรูพรุนโดยการ  
ทดสอบการอัดและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
A STUDY ON COMPRESSIVE BEHAVIOR OF POROUS ABS  
USING EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# A STUDY ON COMPRESSIVE BEHAVIOR OF POROUS ABS USING EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **ACADEMIC YEAR 2020** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาพฤติกรรมการกัดของพลาสติก ABS แบบมีรูพรุน  
โดยการทดสอบการอัดและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นักศึกษา

นางสาวสุจิตรา นิลศิริ รหัสประจำตัว 60011080

นางสาวอนัญญา กุมาภาชี รหัสประจำตัว 60011136

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2563

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ผศ.ดร. พชรพล ตันขววิรุฬห์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจำนวนของโครงสร้างรูพรุน (Unit Cells) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอัดในชิ้นงานและศึกษาสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานด้วยการทดสอบการอัดชิ้นงานและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม โดยโครงสร้างรูพรุนเป็นโครงสร้างอย่างหนึ่งทางวิศวกรรมที่มีเซลล์หรือหน่วยย่อยที่เกิดจากการเรียงตัวของโครงข่ายในรูปแบบต่างๆกระจายตัวอยู่เป็นช่วงๆ ซึ่งโครงสร้างนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญคือทำให้น้ำหนักเบาแต่มีความซับซ้อนมากกว่าโครงสร้างทั่วไป ในการที่จะศึกษาคุณสมบัติทางกลของโครงสร้างนี้สามารถทำได้โดยการทดสอบทางกล ซึ่งการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างรูพรุนนี้คือ การทดสอบการกดอัด แต่ในการทดสอบจริงบางครั้งอาจต้องใช้เวลาในการเตรียมชิ้นทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ ในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยจำลองสถานะการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน โดยทำการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับ การจำลองในโปรแกรม และทำการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนของหน่วยเซลล์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัด ด้วยการทดสอบชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 1 หน่วย ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 8 หน่วย ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 64 หน่วย และชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนอินฟินิตีหน่วย ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าในส่วนของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 1 หน่วย ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 8 หน่วย และ ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 64 หน่วย การจำลองในโปรแกรมยังไม่สามารถให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบจริงได้ และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนของหน่วยเซลล์จาก 1 หน่วย ไป 8 หน่วย และ 64 หน่วย พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนทั้ง 3 แบบ เอกสารนี้เข้าข่ายต้นมีความใกล้เคียงกัน กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**Thesis Title** A Study on Compressive Behavior of Porous ABS Using Experimental and Finite Element Analysis

**Student** Ms. Sujitra Nilsiri  
Ms. Ananya Kumphasri

**Degree** Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Academic Year** 2020

**Thesis Advisor** Asst.Prof.Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

### ABSTRACT

The objectives of this research are study the number of porous structures (Unit Cells) that affect the compression behavior in the workpiece. A study on the compressive strength of the specimen by using the compression test and simulating finite element were performed. Porous Structure is a kind of engineered structure having periodic cell made of struts at different orientations. The key features of pore structures are that they are lightweight. To evaluate the mechanical properties of this structure, compression test was performed. However, in compression test, it may take a long time to complete testing process. In this research, the FEA approach was applied to simulate compression testing of porous structure. Moreover, results were compared with the results from compression test experiment. Apart from comparison, this research also studies on the effect of unit cell size on the compressive behaviors. Four types of porous structural were fabricated specimens 1 unit, 8 units, 64 units, and infinity unit porous structure. The results showed that for 1 unit, 8 units, and 64 units porous structure, the simulation in the program was unable to produce results consistent with the actual test. When the number of unit cells are increased from 1 unit to 8 units and 64 units, it was found that their physical properties were similar. As a result, the

compression behaviors of those porous structure specimens are similar.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการกดของพลาสติก ABS แบบมีรูพรุนโดยการทดสอบการอัดและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ ซึ่งสามารถสำเร็จล่วงหน้าได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง และให้คำปรึกษาที่เกิดขึ้นจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พชรพล ตันทวีรุฬห์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการให้คำเสนอแนะ แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการศึกษา ให้คำปรึกษาในปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และสามารถสำเร็จล่วงหน้าได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของสถานที่และห้องปฏิบัติการรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการวิจัย ขอขอบพระคุณ นายกำธร สุขพิมายและขอขอบพระคุณบุคคลากรอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ผู้ซึ่งคอยช่วยเหลือให้ความอนุเคราะห์ให้ข้อมูลในการปฏิบัติงานเป็นอย่างดี จนกระทั่งการศึกษานี้สำเร็จล่วงหน้าได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในหลายๆเรื่อง จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย คณะผู้ดำเนินการวิจัยหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการการศึกษา วิศวกรรมพลาสติก ABS และความแข็งแรงของวัสดุ และผู้ที่สนใจศึกษา

นางสาวสุจิตรา นิลศิริ

นางสาวอัญญา กุมภาชี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ

### บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์ .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	3

### บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของวัสดุพอรุน .....	5
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นทางไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	7
2.2.1 ชนิดของเอลิเมนต์ .....	7
2.2.2 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	8
2.3 คุณสมบัติทางกล .....	15
2.3.1 ความแข็งแรง (Strength) .....	15
2.3.2 ความแข็ง (Hardness) .....	20
2.3.3 ความเหนียว (Ductility) .....	20
2.3.4 การทดสอบแรงดึง .....	21
2.3.5 การทดสอบแรงอัด .....	21

2.4 วัสดุ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) .....	23
---	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีลาดก้าง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
2.5 การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM).....	24
2.5.1 การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุทำได้จากหลายเทคนิค .....	25
2.5.2 การพิมพ์ชิ้นงานแบบ 3 มิติ FDM หรือ FFF .....	28
2.6 วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการอัดแข็งคุณสมบัติของพลาสติกเซลลูลาร์แข็ง (ASTM D1621).....	32
2.6.1 ขั้นตอนการทดสอบ .....	33
2.6.2 กราฟและการคำนวณ .....	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 การออกแบบโครงสร้างชิ้นงานและข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา.....	36
3.1.1 ออกแบบโครงสร้างชิ้นงานที่ทำการศึกษา.....	36
3.1.2 ข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา.....	38
3.2 การทดสอบโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2.1 ทดสอบคุณสมบัติของ ABS ด้วยการดิงจริง.....	38
3.2.2 ทดสอบคุณสมบัติของ ABS ด้วยการจำลองในโปรแกรม Abaqus CAE .....	39
3.2.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมกับการทดสอบจริง .....	44
3.3 การสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี 3D Printing .....	44
3.4 ทดสอบการกดอัดชิ้นงาน .....	48
3.5 สร้างแบบจำลองการอัดชิ้นงานในโปรแกรม Abaqus CAE .....	48
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการจำลองการดิง .....	53
4.1.1 ผลการทดสอบการดิงของวัสดุ.....	53
4.1.2 ผลการทดสอบการจำลองการดิงของวัสดุ.....	54
4.1.3 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
4.2 ผลการวัดค่าข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงาน.....	57
4.3 ผลการทดสอบการกัดชิ้นงาน .....	58
4.3.1 ผลการทดสอบการกัดชิ้นงาน Infinity Unit.....	58
4.3.2 ผลการทดสอบการกัดชิ้นงาน 1 Unit.....	59
4.3.3 ผลการทดสอบการกัดชิ้นงาน 8 Units .....	61
4.3.4 ผลการทดสอบการกัดชิ้นงาน 64 Units.....	63
4.3.5 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกัด.....	64
4.3.6 ความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ .....	66
4.4 ผลการจำลองการกัดชิ้นงาน.....	67
4.4.1 ผลการจำลองการกัดชิ้นงาน Infinity Unit.....	67
4.4.2 ผลการจำลองการกัดชิ้นงาน 1 Unit .....	70
4.4.3 ผลการจำลองการกัดชิ้นงาน 8 Unit .....	73
4.4.4 ผลการจำลองการกัดชิ้นงาน 64 Unit .....	76
4.4.5 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการกัด .....	79
4.4.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดของยูนิทเซลล์ .....	80
4.5 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกัดจริงกับการจำลองในโปรแกรม.....	82
4.5.1 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกัดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของ ชิ้นงาน Infinity Unit .....	82
4.5.2 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกัดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของ ชิ้นงาน 1 Unit .....	83
4.5.3 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกัดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของ ชิ้นงาน 8 Units .....	84
4.5.4 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกัดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของ ชิ้นงาน 64 Units .....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล</b>	
5.1 การสรุปผลการวิจัย.....	88
5.1.1 ผลการวิจัยโครงสร้างรูปทรงแตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ .....	88
5.1.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบจากการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	89
5.2.1 การออกแบบโครงสร้างของชิ้นงาน .....	89
5.2.2 การสร้างแบบจำลองการกดในโปรแกรม .....	89
เอกสารอ้างอิง .....	90
ภาคผนวก.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	4
ตารางที่ 3.1 รูปและค่าพารามิเตอร์ของชิ้นงาน .....	37
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา .....	38
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึง .....	39
ตารางที่ 4.1 ผลจากการดึงทดสอบเส้นพลาสติก ABS .....	54
ตารางที่ 4.2 ผลจากการจำลองการดึงในโปรแกรมเปรียบเทียบกับการดึงทดสอบจริง .....	57
ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าข้อมูลทางกายภาพเฉลี่ยของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ .....	57
ตารางที่ 4.4 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ Infinity Unit .....	59
ตารางที่ 4.5 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 1 Unit ....	61
ตารางที่ 4.6 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 8 Units ...	62
ตารางที่ 4.7 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Units..	64
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ แบบ 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit .....	66
ตารางที่ 4.9 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit .....	69
ตารางที่ 4.10 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit .....	72
ตารางที่ 4.11 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units .....	75
ตารางที่ 4.12 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units .....	78
ตารางที่ 4.13 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit .....	82
ตารางที่ 4.14 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit .....	83
ตารางที่ 4.15 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units .....	85
ตารางที่ 4.16 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units .....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ชนิดของโครงสร้างแบบ Strut.....	6
รูปที่ 2.2 ชนิดของโครงสร้างแบบ Skeletal.....	6
รูปที่ 2.3 ชนิดของโครงสร้างแบบ Sheet.....	6
รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์มิติเดียว .....	7
รูปที่ 2.5 เอลิเมนต์สองมิติ.....	8
รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์สามมิติ .....	8
รูปที่ 2.7 แท่งชิ้นงานที่มีแรงกระทำที่หน้าตัด .....	8
รูปที่ 2.8 การแบ่งแท่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด .....	9
รูปที่ 2.9 ชิ้นส่วนเอลิเมนต์เมื่อมีแรงกระทำที่หน้าตัด .....	10
รูปที่ 2.10 Free Body Diagram ของแต่ละโหนดในชิ้นงานตัวอย่าง .....	11
รูปที่ 2.11 แรงภายในที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์แบบสุม .....	12
รูปที่ 2.12 วัสดุถูกดึง.....	15
รูปที่ 2.13 วัสดุถูกอัด.....	15
รูปที่ 2.14 วัสดุถูกเฉือน .....	16
รูปที่ 2.15 วัสดุถูกกระทำเกิดความเค้นและความเครียด .....	17
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด.....	17
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain .....	18
รูปที่ 2.18 แสดงการหาจุด Yield Point.....	18
รูปที่ 2.19 การหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น .....	19
รูปที่ 2.20 Resilience ที่เก็บสะสมพลังงานยืดหยุ่น.....	20
รูปที่ 2.21 หลักการทดสอบแรงดึง .....	21
รูปที่ 2.22 หลักการทดสอบแรงอัด.....	21
รูปที่ 2.23 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงอัด .....	22
รูปที่ 2.24 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ใน ABS .....	23
รูปที่ 2.25 โครงสร้างทางเคมีของ ABS.....	23
รูปที่ 2.26 เทคนิคการทำให้โมโนเมอร์ในอ่างเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์เซชันด้วยแสง .....	25
รูปที่ 2.27 เทคนิคการพ่นวัสดุโมโนเมอร์ .....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ก่อน และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.28 เทคนิคการฉีดขึ้นรูปพลาสติก.....	26
รูปที่ 2.29 เทคนิคการพ่นกาวบนผงวัสดุ.....	26
รูปที่ 2.30 เทคนิคการซ้อนเรียงวัสดุแผ่นเรียบ .....	27
รูปที่ 2.31 เทคนิคการหลอมผงวัสดุที่ละชั้น .....	28
รูปที่ 2.32 เทคนิคการให้พลังงานโดยตรงกับวัสดุ.....	28
รูปที่ 2.33 แสดงการทำงานฉีดขึ้นงานที่ละชั้น.....	29
รูปที่ 2.34 แสดงชิ้นส่วนของเครื่อง FDM .....	30
รูปที่ 2.35 กราฟที่ได้จากการทดสอบชิ้นงาน.....	34
รูปที่ 3.1 การเจาะรูแต่ละด้านของลูกบาศก์ทั้ง 3 ด้าน .....	36
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูพรุน 1 ยูนิต .....	37
รูปที่ 3.3 Stress-Strain Curve ของพลาสติก ABS .....	39
รูปที่ 3.4 รูปร่างและพารามิเตอร์ของชิ้นงาน.....	40
รูปที่ 3.5 ค่า Yield Stress และ Plastic Strain ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE.....	41
รูปที่ 3.6 ค่า Mass Density ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE.....	42
รูปที่ 3.7 ค่า Young's Modulus และ Poisson's Ratio ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE .....	42
รูปที่ 3.8 การกำหนดค่า Boundary Condition ในโปรแกรม Abaqus CAE .....	43
รูปที่ 3.9 ผลที่ได้จากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE .....	43
รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมกับการทดสอบด้วยเครื่อง.....	44
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการนำงานที่จะส่งพิมพ์ (Import) เข้าสู่โปรแกรม .....	45
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเซตค่า Infill Density ในการฉีดเป็น 100%.....	45
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการใส่ Brim และ Supports (Standard) แล้วกดคำสั่ง Print .....	46
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบ 1 ยูนิต.....	46
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบ 8 ยูนิต.....	47
รูปที่ 3.16 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบ 64 ยูนิต.....	47
รูปที่ 3.17 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบอนันต์ (Infinity Unit).....	47
รูปที่ 3.18 รูปร่างและพารามิเตอร์ของแผ่นกักที่ใช้ในการจำลองในโปรแกรม Abaqus CAE.....	48
รูปที่ 3.19 ค่า Yield Stress และ Plastic Strain ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE.....	49

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.20 ค่า Young's Modulus และ Poisson's Ratio สำหรับโปรแกรม Abaqus CAE .....	50
รูปที่ 3.21 ค่า Mass Density ในโปรแกรม Abaqus CAE.....	50
รูปที่ 3.22 การกำหนดค่าในโปรแกรมแบบ Encastre .....	51
รูปที่ 3.23 กำหนดค่าในโปรแกรมเป็น Displacement U3:2mm.....	51
รูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ได้มีการกำหนดชนิดและจำนวนของเอลิเมนต์ .....	52
รูปที่ 4.1 Stress-Strain Curve จากการดึงทดสอบของเส้นพลาสติก ABS .....	54
รูปที่ 4.2 ชิ้นงานจากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE .....	55
รูปที่ 4.3 Stress-Strain Curve จากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE .....	55
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบ Stress-Strain Curve จากการจำลองในโปรแกรมกับการดึงทดสอบจริง.....	56
รูปที่ 4.5 ชิ้นงาน Infinity Unit ที่ถูกกด.....	58
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยจากการทดสอบของชิ้นงาน Infinity Unit .....	59
รูปที่ 4.7 ชิ้นงาน 1 Unit ที่ถูกกด.....	60
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงาน 1 Unit....	60
รูปที่ 4.9 ชิ้นงาน 8 Units ที่ถูกกด.....	61
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงาน 8 Units .....	62
รูปที่ 4.11 ชิ้นงาน 64 Units ที่ถูกกด.....	63
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงาน 64 Units.....	64
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit.....	65
รูปที่ 4.14 ผลการเสียหายตั้งแต่พีคแรกของชิ้นงานจากการทดสอบการกดชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit.....	66
รูปที่ 4.15 ชิ้นงาน Infinity Unit ที่ถูกกดในโปรแกรม.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไปยังเนื้อหาที่ควรศึกษาเพื่อใช้ในการประกอบชิ้นงานในประเด็นด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น Infinity Unit นี้ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.17 ค่าความเค้นที่แต่ละตำแหน่งโหนดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงาน Infinity Unit .....	70
รูปที่ 4.18 ชิ้นงาน 1 Unit .....	71
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit .....	72
รูปที่ 4.20 ค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดยูนิทเซลล์ของชิ้นงาน 1 Unit ที่แต่ละตำแหน่งโหนด .....	73
รูปที่ 4.21 ชิ้นงาน 8 Unit ที่ถูกกดในโปรแกรม .....	74
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit .....	75
รูปที่ 4.23 ค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดยูนิทเซลล์ของชิ้นงาน 8 Unit ที่แต่ละตำแหน่งโหนด .....	76
รูปที่ 4.24 ชิ้นงาน 64 Unit ที่ถูกกดในโปรแกรม .....	77
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit .....	78
รูปที่ 4.26 ค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดยูนิทเซลล์ของชิ้นงาน 64 Unit ที่แต่ละตำแหน่งโหนด .....	79
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการกดชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit .....	79
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดของยูนิทเซลล์ ที่แต่ละตำแหน่ง โหนดของชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit .....	81
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นที่ตำแหน่งโหนดที่ 21 ของชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit .....	81
รูปที่ 4.30 Stress-Strain Curve การทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit .....	83
รูปที่ 4.31 Stress-Strain Curve การทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit .....	84
รูปที่ 4.32 Stress-Strain Curve การทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units .....	85

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 64 Units ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการกดของพลาสติก ABS แบบมีรูพรุนโดยการทดสอบการอัดและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์
3. ขอบเขตของงานวิจัย
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้งานทางด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรมได้มุ่งเน้นไปที่กระบวนการออกแบบและกระบวนการในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานวัสดุที่น้อยลงซึ่งส่งผลให้น้ำหนักมีความน้อยลงตามไปด้วย ขั้นตอนในการผลิตมีความง่ายขึ้น และมีการใช้พลังงานลดลง โดยที่ไม่กระทบต่อฟังก์ชันการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการปฏิบัติอุตสาหกรรม มนุษย์ได้มีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติไปเป็นจำนวนมาก แต่ไม่สามารถใช้ทรัพยากรและพลังงานที่มีอยู่อย่างยั่งยืนได้ ทำให้ทรัพยากรที่มีอยู่นั้นเริ่มลดน้อยลงไปทุกวัน ดังนั้นในการที่จะลดการใช้ทรัพยากรลงแต่ยังคงประสิทธิภาพไว้ได้ จึงได้เริ่มมีการสนใจในการที่จะศึกษาโครงสร้างที่ช่วยตอบสนองความต้องการในด้านนี้ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวที่สนใจจะศึกษาคือ โครงสร้างที่มีรูพรุน (Porous Structure)

วัสดุพรุนคือ วัสดุที่มีรูพรุน (โพรงช่องหรือช่องว่าง) เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ลักษณะของวัสดุที่มีรูพรุน จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาด การจัดเรียง และรูปร่างของรูพรุน ตลอดจนความพรุนและองค์ประกอบของตัววัสดุ นอกจากนี้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพรุนยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการทำนายโครงสร้างภายใน ในการที่จะปรับปรุงและพัฒนา จะต้องมีความเข้าใจในโครงสร้างภายในของวัสดุพรุนอย่างถูกต้อง ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของรูพรุน จึงมี

ความสำคัญในการพิจารณาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัสดุพรุนโดยการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อักษรห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเลขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่ จำเป็นที่จะต้องศึกษาว่าที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนและจำนวนยูนิตเซลล์ในการจัดเรียงโครงสร้างที่แตกต่าง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

กันของวัสดุพูน จะส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุอย่างไร ซึ่งในการที่จะได้มาซึ่งคุณสมบัติของวัสดุพูนที่มีโครงสร้างหรือเปอร์เซ็นต์ความพูนต่างกันนั้น จะต้องมีการผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกการทดสอบแรงกด (Compression Test) มาใช้ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติที่ต้องการ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่มีโครงสร้างรูพูน รวมทั้งมีความง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์ผล

การทดสอบแรงกด เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อมีแรงกดมากกระทำ ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง มีความสูงหรือความยาวหดสั้นเข้าตามทิศทางของแรงที่กระทำ ซึ่งในการทำการทดสอบนั้นจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปใช้กับเครื่องทดสอบแรงเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ทำให้ในการทดสอบแรงกดจริงจะต้องเสียเวลาในการเตรียมชิ้นงาน ยิ่งเป็นชิ้นงานที่มีความซับซ้อนอย่างวัสดุพูนแล้ว อาจทำให้ต้องใช้เวลานานในการที่จะต้องทำการศึกษาโครงสร้าง ออกแบบและสร้างชิ้นทดสอบนั้นขึ้นมา อีกทั้งในการทดสอบจริงนั้น จำเป็นต้องทำการทดสอบหลายครั้งเพื่อให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ทำให้ต้องมีการเตรียมชิ้นงานมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลที่ตามมาคือเวลาที่เสียไปในการเตรียมชิ้นงานและการทำการทดสอบ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดต้นทุนและเวลาในการทดสอบจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญ

วิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพการทดสอบ คือการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่เราต้องการลงในการจำลองการทดสอบได้ เพื่อดูว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการใช้โปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เราสนใจนั้น มีความเหมือนหรือแตกต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบจริงมากน้อยเพียงใด หากผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมมีความใกล้เคียงกับการทดสอบจริงก็จะทำให้สามารถจำลองและวิเคราะห์ชิ้นทดสอบได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ลดเวลาและต้นทุนลงไปได้โดยใช้โปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยทดแทนการทำการทดสอบจริง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเกี่ยวกับจำนวนของโครงสร้างรูพูน (Unit Cells) ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอัดในชิ้นงาน
2. ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูพูนแบบ Skeletal โดยการทดสอบการอัดและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus CAE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์และจำลองการทำไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus CAE
2. ศึกษาและวิเคราะห์การอัดขึ้นงานจากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธี Fused Deposition Modeling: FDM (3D printing)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบความสามารถในการรับแรงกดอัดของขึ้นงานเมื่อมีจำนวนโครงสร้างที่เป็นรูปพรุนต่างกัน
2. ทำให้ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดสอบจริง

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าหาหัวข้อที่สนใจเกี่ยวกับงานวิจัย
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องคุณสมบัติของวัสดุพอร์น
3. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องทฤษฎีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องคุณสมบัติทางกลของวัสดุ
5. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องวัสดุ ABS
6. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ
7. ออกแบบโครงสร้างขึ้นงานที่จะศึกษา
8. ทดสอบคุณสมบัติของ ABS ด้วยวิธีการดึง
9. สร้างแบบจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE
10. สร้างขึ้นงานทดสอบด้วยวิธี 3D Printing
11. ทำการทดสอบการกดอัดขึ้นงานด้วยเครื่อง UTM
12. สร้างแบบจำลองการอัดขึ้นงานในโปรแกรม Abaqus CAE
13. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบทั้งจากการทดสอบจริงและการจำลองในโปรแกรม
14. สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

	ระยะเวลาในการดำเนินงาน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
1. ศึกษาค้นคว้าหาหัวข้อที่สนใจเกี่ยวกับงานวิจัย	↔									
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องคุณสมบัติของวัสดุพูน	↔	↔								
3. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องทฤษฎีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	↔	↔								
4. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	↔	↔								
5. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องวัสดุ ABS	↔	↔								
6. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในเรื่องการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ	↔	↔								
7. ออกแบบโครงสร้างชิ้นงานที่จะศึกษา			↔							
8. ทดสอบคุณสมบัติของ ABS ด้วยวิธีการดึง				↔						
9. สร้างแบบจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE				↔						
10. สร้างชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี 3D Printing					↔					
11. ทำการทดสอบการกดอัดชิ้นงานด้วยเครื่อง UTM					↔					
12. สร้างแบบจำลองการอัดชิ้นงานในโปรแกรม Abaqus CAE					↔			↔		
13. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบทั้งจากการทดสอบจริงและการจำลองในโปรแกรม								↔		
14. สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้									↔	

4

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการกดของพลาสติก ABS แบบมีรูพรุนโดยการทดสอบการอัดและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

1. คุณสมบัติของวัสดุรูพรุน
2. ทฤษฎีเบื้องต้นทางไฟไนต์เอลิเมนต์
3. คุณสมบัติทางกล
4. วัสดุ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)
5. การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM)
6. วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการอัดแข็งคุณสมบัติของพลาสติกเซลลูลาร์แข็ง (ASTM D1621)

#### 2.1 คุณสมบัติของวัสดุรูพรุน

วัสดุรูพรุน (Porous Materials) เป็นวัสดุของแข็งที่มีช่องว่างหรือโพรงขนาดเล็กภายในโครงสร้าง มีลักษณะเด่นคือ พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่สูง จึงเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ปิโตรเคมี อาหาร และยา International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) จำแนกวัสดุรูพรุนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. วัสดุไมโครพอร์รัส (Microporous Materials) มีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. วัสดุเมโซพอร์รัส (Mesoporous Materials) มีขนาดของรูพรุนในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. วัสดุแมโครพอร์รัส (Macroporous Materials) มีขนาดของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร

วัสดุรูพรุน (Porous Materials) ได้มีการนำวัสดุรูพรุนมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น เป็นตัวคละตะลิสต์ เซ็นเซอร์ หรืออาจนำไปใช้ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ โดยทั่วไปวัสดุรูพรุนจะมีความพรุนแตกต่างกัน และรูพรุนนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบแรกเป็นแบบที่เป็นรูพรุนแบบเปิดโดยที่รูพรุนมีการเชื่อมต่อไปที่ผิวของวัสดุ ส่วนแบบที่สองเป็นรูพรุนแบบปิดซึ่งรูพรุนจะปิดและแยกออกจากภายนอก [1]

วัสดุรูพรุนมักพบได้ในธรรมชาติและเป็นวัสดุอุตสาหกรรม เช่น ไม้ คาร์บอน โฟม เซรามิกและอิฐ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
เพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องเข้าใจคุณสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับโครงสร้าง ความพรุนอาจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 5

แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการใช้งาน ค่าความพรุนอาจมากกว่า 60% (หมายความว่า 60% ของปริมาตรของส่วนประกอบคืออากาศ) ตัวอย่างทั่วไป ได้แก่ โครงกระดูกทางชีวการแพทย์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ค่าความพรุน (Porosity, P) คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุพรุน (Pore Space,  $V_p$ ) กับปริมาตรรวม (Bulk Volume,  $V_b$ ) ของวัสดุพรุน (Porous Material) [2]

$$P = \frac{V_b - V_s}{V_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยที่  $V_s$  คือ ปริมาตรเนื้อของแข็ง (Solid Volume) ในวัสดุพรุน ความพรุนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุพรุน ซึ่งนอกจากจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรรวมและความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของวัสดุพรุนแล้ว [3] ยังบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหลของอากาศผ่านวัสดุ โครงสร้างรูพรุนมีรูปแบบที่แตกต่างกัน 3 แบบ [4] ได้แก่

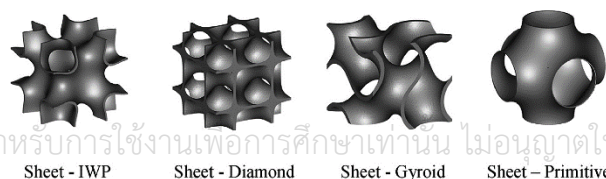
1. แบบเสาโครงสร้าง (Strut) เป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมต่อกันซึ่งเกิดการเชื่อมต่อแบบมีมุม ทำให้ความสามารถในการถ่ายแรง และกระจายความเค้นได้ไม่ดี เมื่อนำมาใช้ทดสอบความแข็งแรง
2. แบบโครงร่างโครงสร้าง (Skeletal) เป็นโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อกระจายแรงภายในโครงสร้างได้ดีขึ้น โดยที่บริเวณรอยต่อมีความต่อเนื่องมากขึ้น เมื่อนำมาใช้ทดสอบความแข็งแรง
3. แบบโครงสร้างพื้นผิว (Sheet) เป็นโครงสร้างที่เป็นลักษณะพื้นผิวของแบบโครงร่างโครงสร้าง



รูปที่ 2.1 ชนิดของโครงสร้างแบบ Strut



รูปที่ 2.2 ชนิดของโครงสร้างแบบ Skeletal



รูปที่ 2.3 ชนิดของโครงสร้างแบบ Sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## 2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นทางไฟไนต์เอลิเมนต์

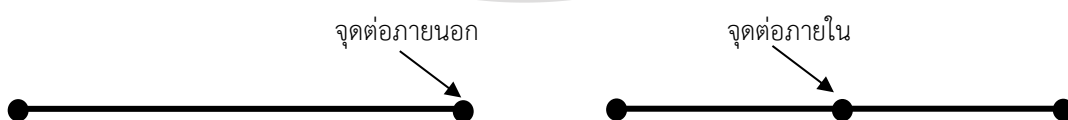
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ด้วยการวิเคราะห์ปัญหา อันประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์, เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหาไปพร้อมกัน สมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ (Derivative) จะถูกแปลงไปอยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) ซึ่งประกอบด้วยการบวก ลบ คูณ และหารเท่านั้น เพื่อให้สามารถใช้เครื่องคิดเลขกดเป็นตัวเลขออกมาได้ หรือหากปัญหานั้นมีขนาดใหญ่มากก็สามารถทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้การคำนวณมีความสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยใช้หลักการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม โดยจะใช้วิธีแบ่งรูปทรงของชิ้นงานทั้งหมดออกเป็นส่วนย่อยๆ (Elements) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์นั้นเกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของโหนด(node) ตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป จากนั้นทำการคำนวณถึงสิ่งที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์โดยใช้ฟังก์ชันการกระจัดซึ่งแทนรูปร่างของแต่ละเอลิเมนต์มาวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการกระจัด ค่าของสมการทั้งหมดของแต่ละเอลิเมนต์จะถูกนำมารวมกันเป็นโครงสร้างทั้งหมดเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป หากต้องการผลที่มีความแม่นยำมากขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของเอลิเมนต์ให้มากขึ้น หรือลดขนาดของเอลิเมนต์ลงนั่นเอง [5]

### 2.2.1 ชนิดของเอลิเมนต์

ในการแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์หรือส่วนย่อย ๆ จะพิจารณาจากรูปทรงของชิ้นงานเป็นหลัก เอลิเมนต์ที่แบ่งควรจะเหมาะสมกับรูปทรงในแต่ละบริเวณซึ่งอาจแตกต่างกันออกไป เช่น ส่วนเว้า, ส่วนโค้ง, ส่วนที่มีรู เป็นต้น ชนิดของเอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทตามมิติของปัญหา คือ เอลิเมนต์มิติเดียว, เอลิเมนต์สองมิติ และเอลิเมนต์สามมิติ ดังนี้

#### 1. เอลิเมนต์มิติเดียว

เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้ในปัญหามิติเดียว ดังรูปที่ 2.4 เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิดหรือการโก่งของคาน เป็นต้น ในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อภายนอกหรืออาจมีจุดต่อภายในร่วมก็ได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลมีผลแม่นยำมากขึ้น



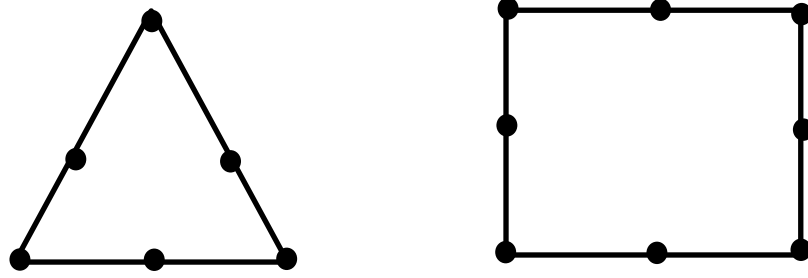
รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์มิติเดียว

#### 2. เอลิเมนต์สองมิติ

เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับปัญหาในระบบสองมิติ และนิยมใช้สำหรับปัญหาความเค้นระนาบ หรือความเครียดระนาบ เอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงและไม่จำกัดด้วยจุดต่อภายในหรืออาจมีจุดต่อภายในร่วมด้วย ดังรูปที่ 2.5 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

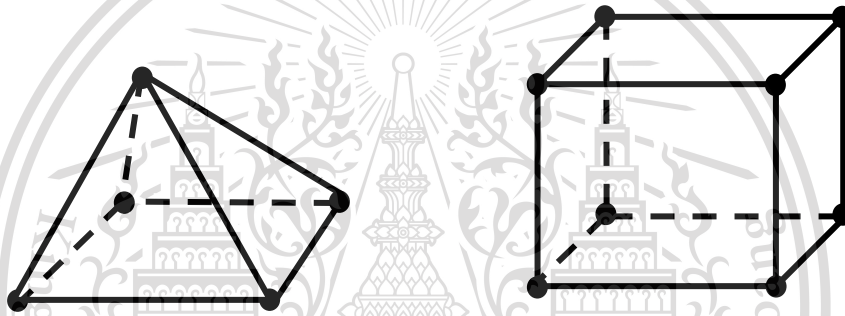
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.5 เอลิเมนต์สองมิติ

### 3. เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับปัญหาสามมิติทั่วไปที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งสามแนวแกน ซึ่งรูปทรงของเอลิเมนต์จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม รูปกรวยสามเหลี่ยม หรือปริซึม ดังรูปที่ 2.6

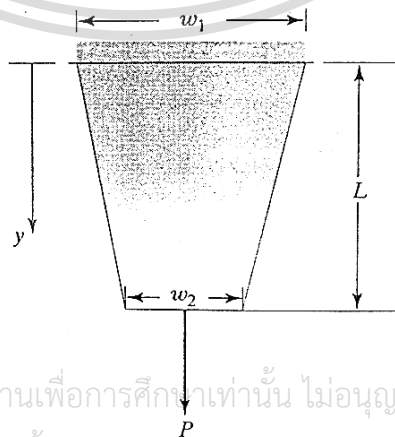


รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์สามมิติ

#### 2.2.2 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 1. ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing Phase) ประกอบไปด้วย

- การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric Construction) ทำการสร้างรูปร่างแบบจำลองขึ้นมา โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังรูปที่ 2.7

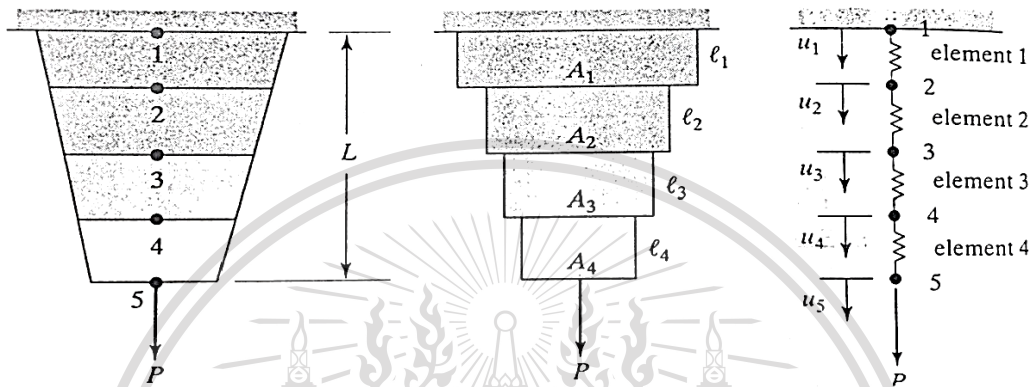


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 แท่งชิ้นงานที่มีแรงกระทำที่หน้าตัด

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

- การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆต่อกัน (Discretization) โดยแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยโหนด ให้ทำการแบ่งแท่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนย่อยตามโหนดและเอลิเมนต์ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนพื้นฐานในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่ามีการแบ่งออกเป็น 5 โหนดและ 4 เอลิเมนต์ หากทำการเพิ่มจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดมากขึ้น ก็จะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.8 การแบ่งแท่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด

- การกำหนด Shape Function ซึ่งแสดงพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์ หรือผลเฉลยของเอลิเมนต์ (ค่าประมาณ) ในการที่จะศึกษาพฤติกรรมของเอลิเมนต์โดยทั่วไปนั้นจะต้องมีการพิจารณาถึงการเคลื่อนตัวของชิ้นงาน เมื่อมีแรง  $F$  มากระทำที่หน้าตัด  $A$  โดยชิ้นงานมีความยาว  $l$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ให้สมการในการหาค่าความเค้นในแต่ละเอลิเมนต์เป็น

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

ในการหาค่าความเครียดเมื่อชิ้นงานมีแรงมากระทำที่หน้าตัด ทำให้ความยาว  $l$  เปลี่ยนไปเป็น  $\Delta l$  สามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.3)$$

จากกฎของฮุก

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

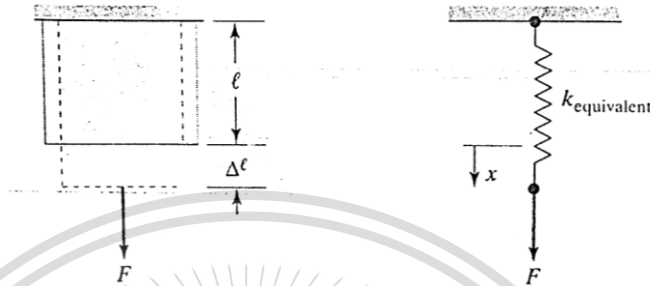
เมื่อ  $E$  คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของวัสดุ เมื่อนำสมการ (2.2) (2.3) และ (2.4) มารวมกันและจัดรูปใหม่ จะได้ว่า

$$F = \left( \frac{AE}{l} \right) \Delta l \quad (2.5)$$

This material is reserved for educational use only not allowed for commercial use.

จะเห็นได้ว่าสมการ (2.5) มีความใกล้เคียงกับสมการของสปริง  $F = kx$  ดังนั้นเอลิเมนต์ที่มีแรงมากระทำที่จุดกึ่งกลางสามารถจำลองให้อยู่ในรูปของสปริงได้ โดยสมการค่าคงที่ของสปริง คือ

$$K_{eq} = \frac{AE}{l} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.9 ชิ้นส่วนเอลิเมนต์เมื่อมีแรงมากระทำที่หน้าตัด

จากรูปชิ้นงานตัวอย่างจะเห็นได้ว่าหน้าตัดของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงขนาดไปตามแนวแกน  $y$  ในการประมาณค่าครั้งแรกได้ทำการแบ่งหน้าตัดของชิ้นงานออกเป็นส่วนๆ โดยมีขนาดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 2.10 และให้มีแรงมากระทำที่จุดกึ่งกลางของหน้าตัด ดังนั้นแท่งชิ้นงานสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสปริงต่อกัน 4 ชิ้น (เอลิเมนต์) ได้ โดยค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสปริงได้เช่นกัน จะได้ว่า

$$f = k_{eq}(u_{i+1} - u_i) = \frac{A_{avg}E}{l}(u_{i+1} - u_i) = \frac{(A_{i+1} + A_i)E}{2l}(u_{i+1} - u_i) \quad (2.7)$$

โดยค่าคงที่ของความแข็งเกร็งในเอลิเมนต์ คือ

$$k_{eq} = \frac{(A_{i+1} + A_i)E}{2l} \quad (2.8)$$

$A_i$  และ  $A_{i+1}$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์ที่ตำแหน่งโหนดที่  $i$  และ  $i + 1$  ตามลำดับ และ  $l$  คือ ความยาวของเอลิเมนต์ จากสมการข้างต้นทำการพิจารณาเมื่อมีแรงมากระทำที่แต่ละโหนด จะเขียน Free Body Diagram เมื่อมีแรงมากระทำที่โหนดที่ 1 ถึงโหนดที่ 5 ได้ดังรูปที่ 2.10

จากสมดุลสถิตทำให้ผลรวมของแรงที่มากระทำที่แต่ละโหนดมีค่าเป็นศูนย์ โดยสามารถเขียนสมการที่ (2.8) แต่ละโหนดได้ดังนี้

$$\text{Node1:} \quad R_1 - k_1(u_2 - u_1) = 0$$

$$\text{Node2:} \quad k_1(u_2 - u_1) - k_2(u_3 - u_2) = 0$$

$$\text{Node3:} \quad k_2(u_3 - u_2) - k_3(u_4 - u_3) = 0$$

$$\text{Node4:} \quad k_3(u_4 - u_3) - k_4(u_5 - u_4) = 0$$

$$\text{Node5:} \quad k_4(u_5 - u_4) - P = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามคัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆไปยังที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

- สร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์ เนื่องจากในแต่ละเอลิเมนต์ของชิ้นงานข้างต้น ประกอบไปด้วย 2 โหนด และในแต่ละโหนดก็จะมี การเคลื่อนตัวอยู่ ทำให้เราจำเป็นต้องสร้างสมการ 2 สมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ขึ้นมา ซึ่งสมการเหล่านี้จะต้องมีความเกี่ยวข้องกับค่าการเคลื่อนตัวที่โหนดและค่าความแข็งแรงของเอลิเมนต์ พิจารณาแรงภายใน  $f_i$  และ  $f_{i+1}$  กับค่าการเคลื่อนตัวที่  $u_i$  และ  $u_{i+1}$  ของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.11

จากเงื่อนไขของสมดุลสถิต ทำให้ผลรวมของ  $f_i$  และ  $f_{i+1}$  มีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อคำนึงถึงความเหมาะสมในการพิสูจน์สมการแล้วนั้น จะทำการกำหนดให้  $f_i$  และ  $f_{i+1}$  มีทิศไปทางแกน  $y$  ที่เป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (b) ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการแรงภายในที่เกิดขึ้นที่โหนดได้ดังสมการ

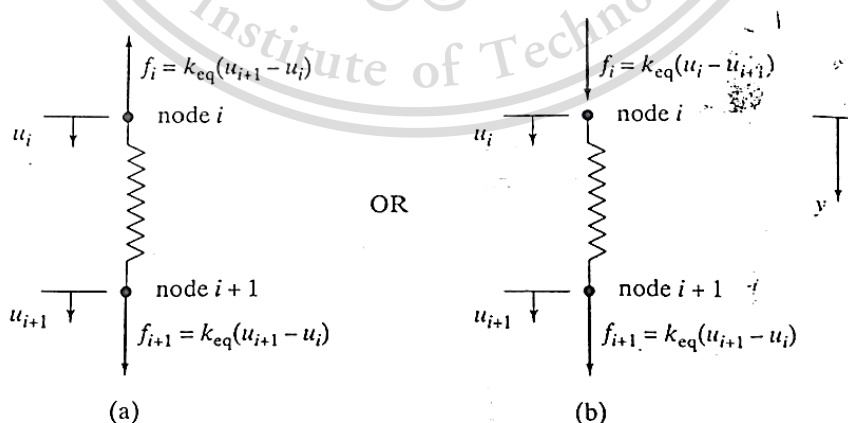
$$f_i = k_{eq}(u_i - u_{i+1})$$

$$f_{i+1} = k_{eq}(u_{i+1} - u_i)$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} f_i \\ f_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{eq} & -k_{eq} \\ -k_{eq} & k_{eq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

- รวมเอลิเมนต์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาระดับสูง ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 2.11 แรงภายในที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์แบบสปริง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการ (2.11) นำไปหาค่าของแต่ละเอลิเมนต์ แล้วนำมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อหาค่าของ Global Stiffness Matrix ค่า Stiffness Matrix ของเอลิเมนต์ (1) คือ

$$[K]^{(1)} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix}$$

และตำแหน่งของเอลิเมนต์ใน Global Stiffness Matrix คือ

$$[K]^{(1G)} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix}$$

ค่า Stiffness Matrix ของเอลิเมนต์ (2) คือ

$$[K]^{(2)} = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$$

และตำแหน่งของเอลิเมนต์ใน Global Stiffness Matrix คือ

$$[K]^{(2G)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix}$$

ค่า Stiffness Matrix ของเอลิเมนต์ (3) คือ

$$[K]^{(3)} = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

และตำแหน่งของเอลิเมนต์ใน Global Stiffness Matrix คือ

$$[K]^{(3G)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix}$$

ค่า Stiffness Matrix ของเอลิเมนต์ (4) คือ

$$[K]^{(4)} = \begin{bmatrix} k_4 & -k_4 \\ -k_4 & k_4 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

และตำแหน่งของเอลิเมนต์ใน Global Stiffness Matrix คือ

$$[K]^{(4G)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix}$$

เมื่อรวมทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน จะได้ Global Stiffness Matrix ดังนี้

$$[K]^{(G)} = [K]^{(1G)} + [K]^{(2G)} + [K]^{(3G)} + [K]^{(4G)}$$

$$[K]^{(G)} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

- กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น กำหนดสภาวะโหดและสภาวะขอบให้กับปัญหา เนื่องจากแห่งชิ้นงานยึดติดกับส่วนบน ดังนั้น Boundary Condition จึงมีค่าเป็น  $u_1 = 0$  ใส่แรงกระทำภายนอก  $P$  ไปที่โนด 5 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

ในปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง การกำหนดรูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์มักจะอยู่ในรูปทั่วไปของ

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2.14)$$

โดยในที่นี้  $[K]$  เรียกว่า เอลิเมนต์เมทริกซ์ของความแข็งเกร็ง (Element Stiffness Matrix)

$\{u\}$  เรียกว่า เมทริกซ์ของการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ (Vector of Nodal Displacement)

$\{F\}$  เรียกว่า เมทริกซ์ของแรงกระทำที่จุดต่อ (Vector of Nodal Forces)

## 2. ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution Phase)

การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบคือค่าการกระจัดที่โนดต่างๆหรือค่าอุณหภูมิที่โนดต่างๆ (ในกรณีเป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อน)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 3. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Processing Phase)

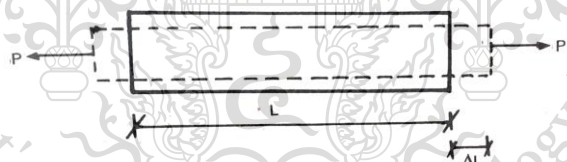
การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติม เช่น เราอาจอยากรู้ค่าความเค้นหลัก พลักซ์ความร้อน เป็นต้น

### 2.3 คุณสมบัติทางกล

คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของการพิจารณาเลือกใช้วัสดุ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติทางกลเป็นคุณสมบัติที่ทำให้วัสดุเกิดปฏิกิริยาขึ้น เมื่อแรงมากระทำจากภายนอกต่อวัสดุ ทำให้เกิดผลแสดงออกมา เช่น ผลของความเค้น หรือความเครียด เป็นต้น คุณสมบัติทางกลที่เกิดขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถยึดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว ฯลฯ ดังนั้น คุณสมบัติทางกลของวัสดุนี้มีความสำคัญมาก การเลือกใช้วัสดุเพื่อนำไปใช้งานจึงต้องแน่ใจก่อนว่าวัสดุนั้นมีความสามารถรับแรงกระทำได้ คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่สำคัญมีดังนี้

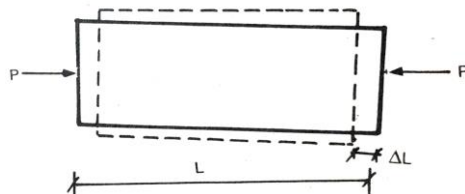
**2.3.1 ความแข็งแรง (Strength)** หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการแตกหัก แรงที่กระทำจะทำให้เกิดค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ค่าความแข็งแรงของวัสดุ นิยมวัดเป็นแรงต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่รับแรง มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร ( $N/m^2$ ) หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) โดยทั่วไปสามารถทดสอบความแข็งแรงของวัสดุได้ 3 วิธี [6] ดังนี้

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) แรงที่มากระทำต่อวัสดุจะอยู่ในลักษณะแรงดึง เพื่อให้วัสดุขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วัสดุถูกดึง

2. การทดสอบแรงอัด (Compressive Test) แรงที่มากระทำต่อวัสดุจะอยู่ในลักษณะแรงอัด เพื่อให้วัสดุแตก ดังรูปที่ 2.13

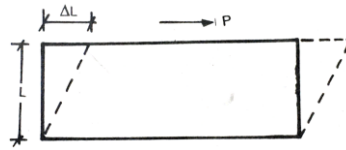


รูปที่ 2.13 วัสดุถูกอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

3. การทดสอบแรงเฉือน (Shearing Test) แรงที่มากระทำต่อวัสดุจะอยู่ในลักษณะแรงเฉือน เพื่อให้วัสดุฉีกขาด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วัสดุถูกเฉือน

4. ความเค้นและความเครียด (Stress and Strain) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุจะทำให้เกิดแรงต้านภายในวัสดุ ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงภายนอก แรงต้านภายในนี้จะกระจายตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ อัตราส่วนระหว่างค่าของแรงต้านภายในต่อพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกระทำ เรียกว่า "ความเค้น" มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m<sup>2</sup>) หรือ กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร (kg/mm<sup>2</sup>) การคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้น

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น,  
 $P$  = แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ,  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

กรณีความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ หมายถึง วัสดุยังสามารถใช้งานต่อได้ แต่ถ้าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ วัสดุก็ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

ความเค้นที่เกิดขึ้นมี 3 ลักษณะ คือ ความเค้นดึง (Tensile Stress) ความเค้นอัด (Compressive Stress) และความเค้นเฉือน (Shear Stress)

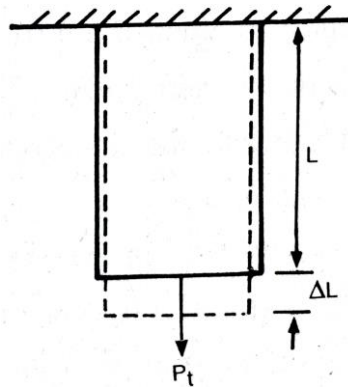
นอกจากวัสดุจะเกิดความเค้นแล้ว ยังมีผลให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดไปจากเดิม อัตราส่วนระหว่างขนาดที่เปลี่ยนไปต่อขนาดเดิมของวัสดุ เรียกว่า "ความเครียด" ขนาดที่กล่าวถึงนี้อาจจะเป็นความยาวพื้นที่หรือปริมาตรก็ได้ ความเครียดเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ เช่นเดียวกับความเค้นการคำนวณหาค่าความเค้น

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\epsilon$  = ความเครียด,  
 $\Delta L$  = ขนาดที่เปลี่ยนไป  
 $L$  = ขนาดเดิมของวัสดุ

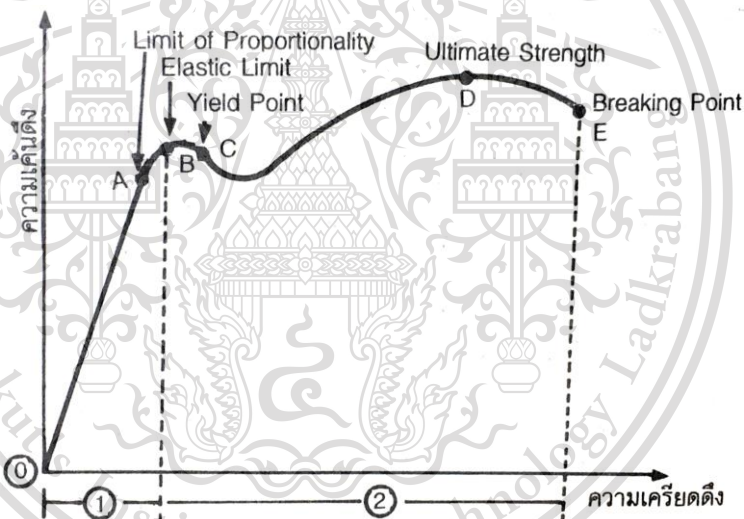
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.15 วัสดุถูกกระทำเกิดความเค้นและความเครียด

5. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด การหาความแข็งแรงและคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ จะต้องทดสอบตัวอย่างของวัสดุจนถึงจุดแตกหักหรือขาด การนำความเค้นที่เกิดขึ้น และความเครียดที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ ถือว่าสำคัญมาก โดยกำหนดให้ค่าความเค้นเป็นแกนตั้ง และค่าความเครียดเป็นแกนนอน ดังรูปที่ 2.16



ช่วงที่ 1 เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic ช่วงที่ 2 เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Plastic

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ในรูปที่ 2.16 เป็นกราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด จากกราฟอธิบายได้ดังนี้

- ช่วง OA กราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าความเครียดแปรผันโดยตรงกับความเค้น ถ้าปล่อยแรงดึงออกวัสดุจะกลับคืนสู่สภาพเดิม ที่จุด A เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ความเครียดแปรผันโดยตรงกับความเค้น เรียกจุด A ว่า ขีดจำกัดของสัดส่วน (Proportional Limit)

- ช่วง AB กราฟจะเริ่มโค้งงอเบนจากแนวเดิม (เส้นๆ) จุด B เป็นจุดสุดท้ายที่วัสดุจะกลับคืนสภาพเดิมได้ เรียกจุด B ว่า ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

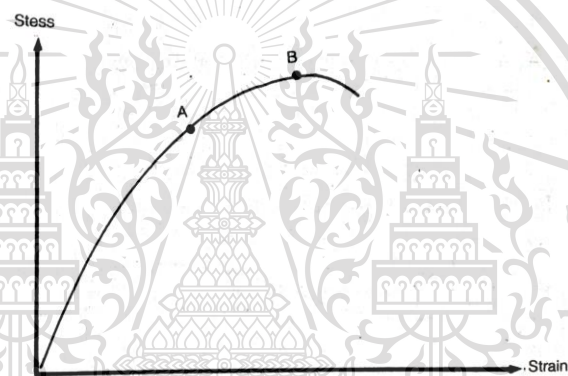
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

- ช่วง BC กราฟจะโค้งเบนไปอีกกระยะหนึ่ง เมื่อเลยจุด C วัสดุจะยืดตัวออกได้เองโดยไม่ต้องออกแรงเพิ่มขึ้น เรียกจุด C ว่า จุดคราก (Yield Point)

- ช่วง CE กราฟจะโค้งยาวจากจุด C เมื่อออกแรงดึงวัสดุจะยืดต่อไปอีกจนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดสูงสุดที่วัสดุจะรับความเค้นได้ เรียกจุด D ว่า จุดประลัย (Ultimate Strength) จากนั้นวัสดุจะยืดตัวออกเอง จนถึงจุด E วัสดุจะขาดออกจากกัน เรียกจุด E ว่า จุดแตกหัก (Breaking Point)

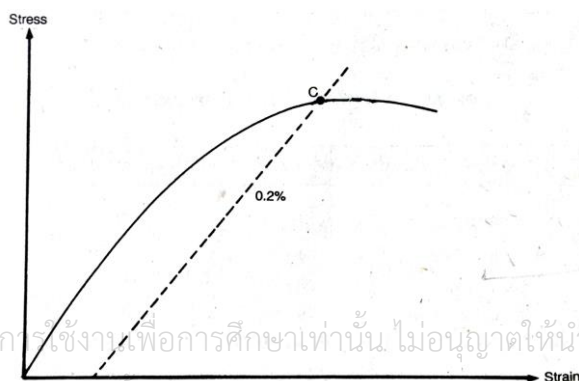
การเปลี่ยนแปลงจากจุด 0 ถึงจุด B เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic (ช่วงที่ 1) คือวัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเมื่อหยุดออกแรง ส่วนการเปลี่ยนแปลงหลังจุด B เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Plastic (ช่วงที่ 2) คือวัสดุไม่สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อหยุดออกแรงกระทำ

วัสดุบางชนิดที่ไม่มีความเหนียวจะหาจุดครากไม่ได้ และจุดอื่น ๆ ก็ไม่เด่นชัดนัก เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

ดังนั้นจากกราฟ ถ้าจะหาจุดคราก (จุด C) ซึ่งถือว่าเป็นจุดสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้างสามารถทำได้โดยเขียนเส้นตรงให้ขนานกับช่วง Elastic Limit ให้จุดเริ่มต้นของเส้นขนานนี้ห่างจากจุด Origin ของกราฟ 0.2 % ของความเครียด เส้นขนานไปตัดกับเส้นกราฟที่ไหนให้ถือว่าเป็นจุด Yield ของโลหะ Yield Point (จุด C) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการหาจุด Yield Point

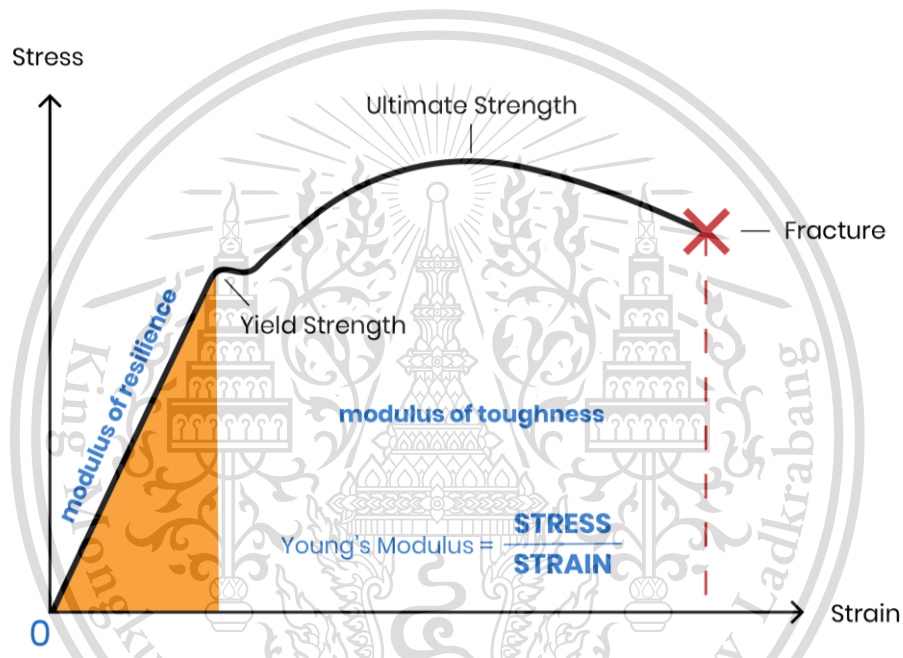
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

6. โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดซึ่งเป็นเส้นตรง นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ โรเบิร์ต ฮุก ได้ตั้งกฎว่า "ภายใต้ขีดจำกัดของสัดส่วนความยืดหยุ่น อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าคงที่" เรียกค่าคงที่นี้ว่า "โมดูลัสความยืดหยุ่น" หรือ ยังส์ โมดูลัส (Young's Modulus) สัญลักษณ์ที่ใช้คือ E การคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} \quad (2.17)$$

จากรูปที่ 2.19 แสดงการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้กฎของฮุก



รูปที่ 2.19 การหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

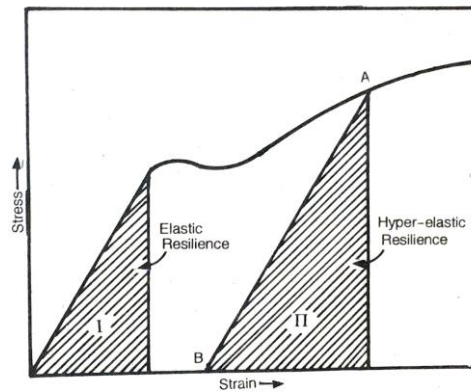
ความแข็งแรงของวัสดุจะแสดงให้เห็นโดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น คือ วัสดุที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง วัสดุจะมีความแข็งแรงสูงด้วย

ถ้าเป็นความเค้นและความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือน อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด เรียกว่า โมดูลัสของความแข็งแรง (Modulus of Rigidity) สัญลักษณ์ที่ใช้ G การคำนวณหาค่าโมดูลัสของความแข็งแรง

$$G = \frac{\text{Shear stress}}{\text{Shear Strain}} \quad (2.18)$$

7. ปริมาตรพลังงาน (Energy Capacity) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะเก็บพลังงานสะสมต่อหน่วยปริมาตร เมื่อวัสดุถูกแรงกระทำในเวลาสั้น ๆ การหาปริมาตรพลังงานของวัสดุได้ต้องอาศัยริซิลีเยนซ์ (Resilience) ดังรูปที่ 2.20

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.20 Resilience ที่เก็บสะสมพลังงานยืดหยุ่น

วัสดุที่มีริชิลีเยนซ์สูงนั้น หมายถึงวัสดุนั้นได้เก็บพลังงานสะสมไว้ได้สูง โดยที่ขนาดและรูปร่างของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง

**2.3.2 ความแข็ง (Hardness)** ความแข็งของวัสดุมีความสำคัญต่องานช่างมาก โดยเฉพาะวัสดุที่นำไปใช้งานทางอุตสาหกรรมจะต้องมีคุณสมบัตินี้ ความแข็งจะสามารถปรับแรงหรือน้ำหนักได้ ทนต่อการสึกหรอหรือบอบสลายได้ดี

**2.3.3 ความเหนียว (Ductility)** วัสดุที่มีความเหนียว คือ วัสดุที่สามารถยืดออกเป็นเส้นยาวๆหรือสามารถตีแผ่ให้เป็นแผ่นบางๆ ได้ โดยที่วัสดุไม่มีการขาดหรือแตกออก

การศึกษาสมบัติความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถทำได้โดยการให้แรงกระทำแก่วัสดุ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานหรือข้อกำหนด จากนั้นจึงทำการวัดการตอบสนองของวัสดุดังกล่าวในรูปของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากการอยู่ภายใต้ขนาดของแรงกระทำดังกล่าว โดยในการทดสอบนั้นทำโดยการเพิ่มระดับของแรงในชิ้นงานทดสอบไปที่ละน้อยตามลำดับด้วย อัตราคงที่ (Constant Rate Test) ซึ่งสามารถทำได้ 3 แบบหลัก คือ อัตราการเคลื่อนที่ของครอสเฮดคงที่ (Constant Crosshead Speed) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดคงที่ (Constant Strain Rate) และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นคงที่ (Constant Stress Rate) ส่วนลักษณะการใช้แรงกระทำต่อวัสดุในการทดสอบ สามารถทำได้ในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ แรงดึง แรงอัด แรงดัดงอ แรงเฉือน หรือแรงบิด เป็นต้น

การทดสอบประเภทนี้โดยทั่วไปมักจะรู้จักกันในชื่อของการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบแรงอัด (Compression Test) การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural or Bending Test) การทดสอบแรงเฉือน (Shear Test) หรือการทดสอบแรงบิด (Torsion Test) ตามลักษณะของทิศทางการให้แรงมากกว่าที่จะเรียกว่าการทดสอบด้วยอัตราคงที่ และโดยทั่วไปแล้วการควบคุมอัตราคงที่ในการทดสอบที่

นิยม ได้แก่ การทดสอบที่ควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ของครอสเฮดให้คงที่เนื่องจากง่ายและสะดวกในทางปฏิบัติทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.4 การทดสอบแรงดึง

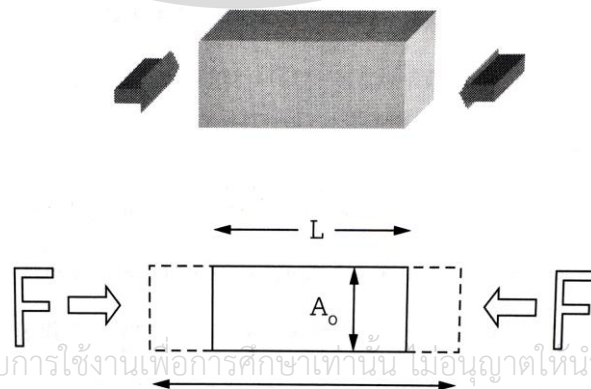
การทดสอบแรงดึงถือได้ว่าเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดก็ว่าได้สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ โดยในการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานในทิศทางตรงข้ามกันเพื่อสร้างแรงดึงขึ้นในชิ้นงาน ถึงแม้ในทางทฤษฎีการทดสอบประเภทนี้จะสามารถใช้งานในการทดสอบวัสดุได้ทุกประเภท หากแต่ในทางปฏิบัติแล้ว การทดสอบแรงดึงมักจะใช้ในการทดสอบวัสดุประเภทโลหะและโพลีเมอร์เป็นส่วนใหญ่ ไม่นิยมใช้งานในการทดสอบเซรามิก ทั้งนี้เนื่องจากความยากของการเตรียมชิ้นงาน การจับยึด และการติดตั้งในการทดสอบอันเนื่องมาจากความเปราะซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของเซรามิกที่เป็นข้อจำกัดในการทดสอบ [7]



รูปที่ 2.21 หลักการทดสอบแรงดึง

### 2.3.5 การทดสอบแรงอัด

ในทางทฤษฎีแล้วการทดสอบแรงอัดจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการทดสอบแรงดึงเพียงแต่ลักษณะของแรงที่ใช้ในการทดสอบนั้นเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเท่านั้น โดยในการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานในทิศทางตรงข้ามที่วิ่งเข้าหากันเพื่อสร้างแรงอัดขึ้นในชิ้นงานถึงแม้การทดสอบประเภทนี้จะสามารถใช้งานในการทดสอบพลาสติกได้ทุกประเภท



รูปที่ 2.22 หลักการทดสอบแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

แต่จะเหมาะสำหรับพลาสติกแข็งเปราะเนื่องจากความต้านทานแรงอัดสูงสุดจะคำนวณได้อย่างแน่นอนสำหรับพลาสติกที่เกิดการแตกหักอย่างฉับพลันที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำเท่านั้น แต่ในกรณีของพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่ไม่แตกหักอย่างฉับพลัน การคำนวณค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดจะมีค่าไม่แน่นอนแต่จะขึ้นกับข้อกำหนดของการทดสอบว่าจะกำหนดว่าจะถือจุดใดเป็นจุดเสียหายของวัสดุในการทดสอบ ซึ่งอาจจะกำหนดเป็นค่าความต้านทานแรงอัดที่ความเครียดค่าหนึ่งก็ได้ เช่น ที่ 4% หรือ 5% ความเครียด เป็นต้น นอกจากนี้พลาสติกบางประเภทเมื่อทดสอบด้วยเทคนิคการอัดจะไม่เกิดการแตกหัก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมีส่วนสูงลดลงเรื่อย ๆ จนแบนราบและจะมีผลทำให้แรงอัดกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการส่งผ่านแรงระหว่างแผ่นกดทั้งสองข้างมีได้มากขึ้น พลาสติกที่แสดงลักษณะเช่นนี้จะไม่มีค่าความต้านทานแรงอัดอย่างแท้จริง

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของชิ้นทดสอบแรงอัดนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Right Rectangular Prism) ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Right Square Prism) ทรงกระบอกตัน (Right Cylinder) และท่อทรงกระบอก (Right Circular Tube) [7]



รูปที่ 2.23 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงอัด

แต่ไม่ว่าจะเป็นชิ้นงานรูปทรงใดก็ตาม บริเวณพื้นผิวที่สัมผัสแผ่นกดจะต้องขนาน เหมาะสมต่อการใช้งานเนื่องจากไม่สูงเกินไปจนกระทั่งอาจทำให้เกิดการโก่งเดาะในระหว่างการทดสอบหรือเตี้ยเกินไปที่ผลกระทบในบริเวณผิวสัมผัสจะส่งผลต่อการทดสอบได้ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

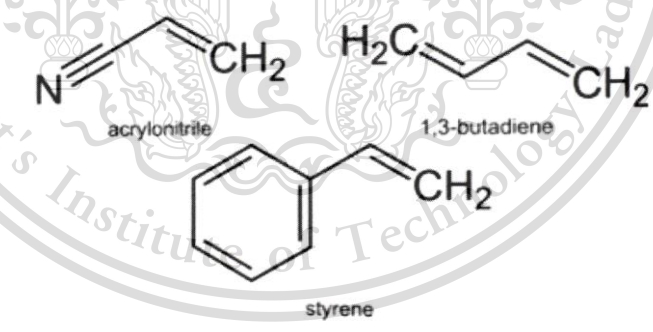
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.4 วัสดุ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

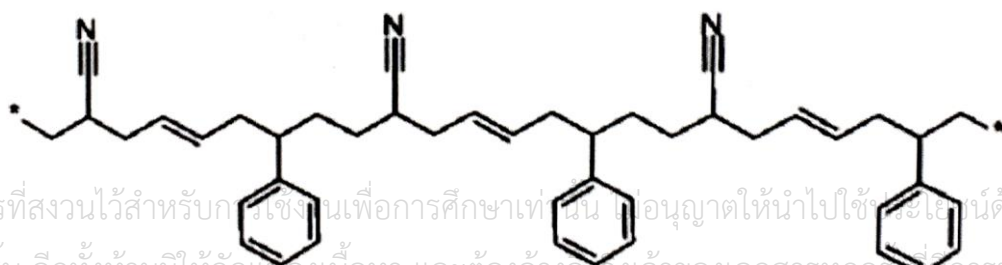
ABS ย่อมาจาก Acrylonitrile Butadiene Styrene เป็นพลาสติกประเภทน้ำมัน Vexmatech ABS มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม กล่าวคือ มีความแข็งแรงและเหนียวตามธรรมชาติจึงรับแรงกระแทกได้ดี มีคุณภาพพื้นผิวที่ดี มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน (ABS) เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ชนิดหนึ่งและถูกเรียกว่า เทอร์พอลิเมอร์ เพราะเกิดจากมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) บิวทาไดอีน (Butadiene) และสไตรีน (Styrene) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ทั้ง 3 ชนิด ดังนั้นสูตรทางเคมีของ ABS จะได้เป็น  $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$  [9]

ABS มีสีตามธรรมชาติเป็นสีเหลืองน้ำตาล แต่ที่มีขายตามท้องตลาดจะเป็นเม็ดที่ย้อมสี ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ ประมาณ 15-35 เปอร์เซ็นต์ บิวทาไดอีน ประมาณ 5-30 เปอร์เซ็นต์ และสไตรีน ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอะคริโลไนไตรล์ มีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมีของ ABS ส่วนบิวทาไดอีนที่เป็นยาง ทำให้ ABS มีความเหนียวและทนทานต่อแรงกระแทกและสไตรีนจะเป็นตัวช่วยให้ ABS มีความแข็งแรงและมีความมันวาว จากการที่ ABS เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการนำมอนอเมอร์ 3 ชนิดมาผลิต ในการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของมอนอเมอร์ทั้งสามชนิดจะทำให้ได้ ABS ที่มีเกรดแตกต่างกันออกไป

ซึ่งนอกจากนี้ยังมีการผลิต ABS เกรดพิเศษโดยผลิตจากมอนอเมอร์ทั้ง 3 ชนิด ที่กล่าวมาพร้อมกับมอนอเมอร์อีกหนึ่งชนิด เช่น เกรดสำหรับงานทนความร้อน จะเพิ่มแอลฟาเมทิลสไตรีน (Alpha-Methylstyrene) เข้ามาร่วม และเกรดสำหรับวัสดุโปร่งใสจะรวมกับเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 2.24 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ใน ABS



รูปที่ 2.25 โครงสร้างทางเคมีของ ABS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

- ลักษณะทั่วไป : เม็ดสีเหลืองออกน้ำตาล
- สมบัติทั่วไป : เหนียว ทนการกระแทก มีความแข็งแรงสูง ทนต่อดินฟ้าอากาศ ไม่เสื่อมสภาพไม่มีพิษตกค้าง
- การขึ้นรูป : ABS ส่วนใหญ่จะนิยมใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) และกระบวนการอัดรีด (Extrusion Process) [8]

1. คุณสมบัติหลักของพลาสติก ABS เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานโครงสร้างต่างๆ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพหลายประการ

- ความแข็งแรงสูง
- ทนต่อแรงกระแทกได้ดีแม้ในอุณหภูมิต่ำ
- คุณสมบัติของฉนวนที่ดี
- เชื่อมได้ดี
- ทนต่อการขีดถูและความเครียดได้ดี
- ความเสถียรของมิติสูง (กลไกมีความแข็งแรงและคงที่เมื่อเวลาผ่านไป)
- ความสว่างของพื้นผิวสูงและพื้นผิวที่ขูดเยียม

2. การใช้งาน ABS คุณสมบัติหลายประการทำให้ ABS เหมาะสำหรับใช้ในยานยนต์ เครื่องใช้ในบ้าน อิเล็กทรอนิกส์ อาคารและการก่อสร้าง อุตสาหกรรมการขนส่ง ใช้ในการทำเลโก้ เครื่องมืออุปกรณ์กีฬา เครื่องมือทำสวน ใช้งานทางการแพทย์รวมถึงการผลิตเครื่องฟลวยละออง

## 2.5 การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM)

การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) เป็นคำที่พวกเราจะได้ยินกันบ่อยขึ้นเรื่อย ๆ ในอีกไม่ช้า คำจำกัดความของการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุว่า เป็นการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ เข้าไปที่ละชั้นหรือทีละส่วน เพื่อรวมเป็นรูปทรงของชิ้นงานสุดท้าย ซึ่งต่างจากการผลิตแบบดั้งเดิมที่เป็นการลดเนื้อวัสดุด้วยวิธีต่างๆ เช่น การกัด การตัด การเจาะ และการกลึง เป็นต้น ข้อดีที่เห็นได้ชัดเจนของการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุคือ มีสัดส่วนของวัสดุที่ถูกทิ้งน้อยมาก และสามารถใช้ในการสร้างชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนที่ไม่อาจใช้วิธีการดั้งเดิมได้ อีกทั้งไม่ต้องการแม่พิมพ์ จึงลดต้นทุนในการทำแม่พิมพ์ การสร้างวัตถุหรือชิ้นงาน 3 มิติเป็นไปได้แล้ว และใช้กันอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น ยานยนต์ การบิน การแพทย์ เครื่องกีฬา และเครื่องครัว เป็นต้น โดยเทคนิคหรือเครื่องมือก็แตกต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของวัสดุที่เลือกใช้

ซึ่งการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุด้วยการพิมพ์แบบสามมิติเป็นเครื่องมือ ที่เหมาะสมในการนำมาใช้

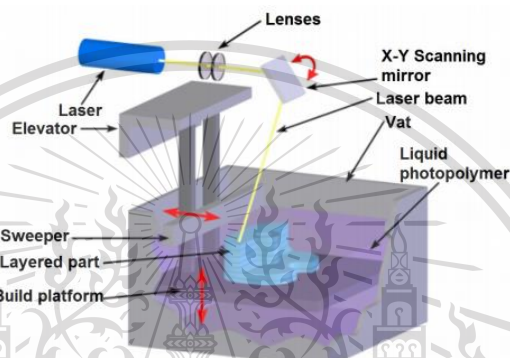
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ปรับเปลี่ยนแบบง่ายเพียงแค่แก้ตัวแปรในคอมพิวเตอร์ และสร้างชิ้นงานได้รวดเร็วในขณะที่ยังคงคุณสมบัติเดิม [9]

### 2.5.1 การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุทำได้จากหลายเทคนิค ดังนี้

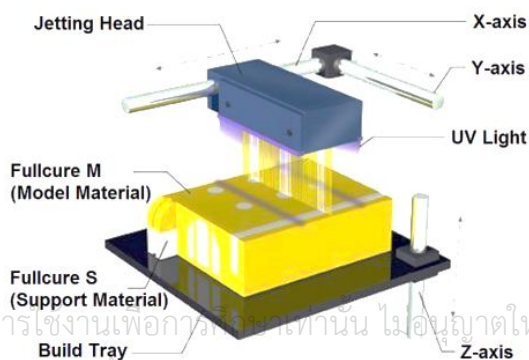
1. การทำให้โมโนเมอร์ในอ่างเกิดโพลิเมอร์ด้วยแสง (Vat Photopolymerization) เทคนิคนี้กับเทคนิคการพ่นวัสดุโมโนเมอร์มีส่วนที่เหมือนกันคือ ใช้วัสดุเริ่มต้นเป็นโมโนเมอร์ที่อยู่ในรูปของเหลว โดยโมโนเมอร์ ที่นำมาใช้เป็นชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน จากการกระตุ้นด้วยแสงและเกิดเป็นโพลิเมอร์ใน สภาพของแข็ง หากแต่เทคนิคนี้จะใช้แสงเลเซอร์ไปกระตุ้นโมโนเมอร์ที่บรรจุในอ่าง



รูปที่ 2.26 เทคนิคการทำให้โมโนเมอร์ในอ่างเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันด้วยแสง

โดยมีส่วนควบคุมลำแสงในแนวราบตามแกน X, Y อย่างแม่นยำ และมีส่วนปรับระดับของส่วนฐานรองในแนวตั้งตาม แกน Z ชิ้นงานจะถูกสร้างทีละชั้น เมื่อสร้างชั้นแรกเสร็จ ส่วนฐานจะถูกลดระดับลงไปในอ่างทีละชั้นและการสร้างชั้นต่อไปจะดำเนินการด้วยการกวาดลำแสงในแนวราบ โดยทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนได้ชิ้นงาน 3 มิติที่สมบูรณ์ จากนั้นชิ้นงานที่เป็นพลาสติกแข็งจะถูกนำขึ้นจากอ่างโมโนเมอร์เพื่อทำความสะอาดต่อไป

2. การพ่นวัสดุโมโนเมอร์ (Material Jetting) เทคโนโลยีนี้จะพ่นโมโนเมอร์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่อสร้างชิ้นงานและฉายแสงยูวีทันทีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน โดยจะสร้างชิ้นงานไปทีละชั้นเช่นกัน

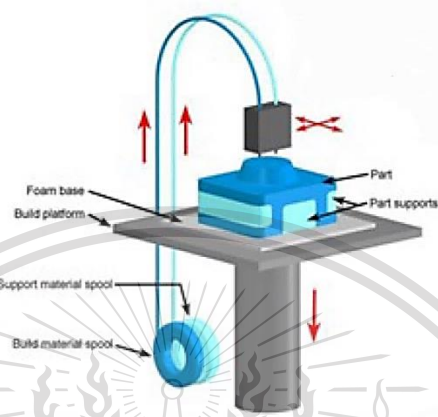


รูปที่ 2.27 เทคนิคการพ่นวัสดุโมโนเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

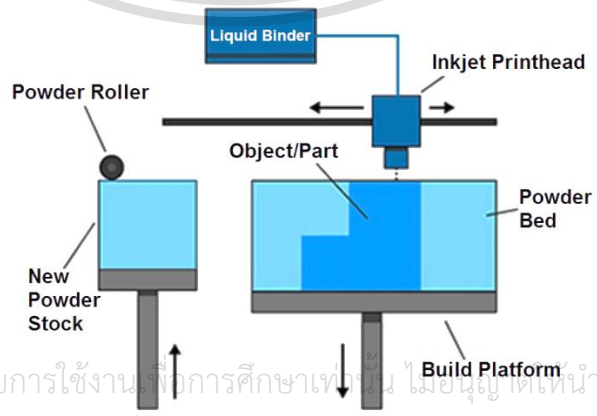
3. การดันวัสดุหลอม (Material Extrusion) เทคนิคนี้ใช้กับวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์ โดยเส้นลวดโพลิเมอร์ ชนิดเทอร์โมพลาสติกจะถูกหลอมด้วยความร้อนและถูกดันออกมาจากหัวฉีด (Extrusion Nozzle) และส่งไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการเติมเนื้อวัสดุ วิธีการนี้ค่อนข้างเป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้วิธีนี้มีราคาถูก สร้างชิ้นงานขนาดเล็กได้



รูปที่ 2.28 เทคนิคการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

ตัวอย่างของโพลิเมอร์หรือพลาสติกที่สามารถนำมาใช้ได้ เทคนิคนี้ ได้แก่ โพลีแลกติก แอซิด (PLA) ไนลอน (Nylon) โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) โพลิสไตรีน (Polystyrene) และเอบีเอส (ABS) เป็นต้น

4. การพ่นกาวบนผงวัสดุ (Binder Jetting) เทคนิคนี้ใช้ได้ทั้งโพลิเมอร์ เซรามิก และโลหะ ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานด้วยเทคนิคนี้โดยเครื่องจะโรยหรือเกลี่ยผงวัสดุทีละชั้นและหยดหรือพ่นกาว เพื่อประสานผงวัสดุเข้าด้วยกันในตำแหน่งที่ต้องการ โดยในกรณีที่ใช้กาวที่เป็นโมโนเมอร์ไวแสง ต้องทำการฉายแสงเพื่อให้โมโนเมอร์เกิดโพลิเมอร์ไรเซชันเป็นโพลิเมอร์แข็งเพื่อประสานผงวัสดุในตำแหน่งนั้นไว้ด้วยกัน กระบวนการนี้ต้องถูกทำซ้ำไปตามจำนวนชั้นที่ตั้งไว้จนท้ายสุดได้ชิ้นงานที่ฝังอยู่ในผงวัสดุ (ราวกับฟอสซิล)



รูปที่ 2.29 เทคนิคการพ่นกาวบนผงวัสดุ

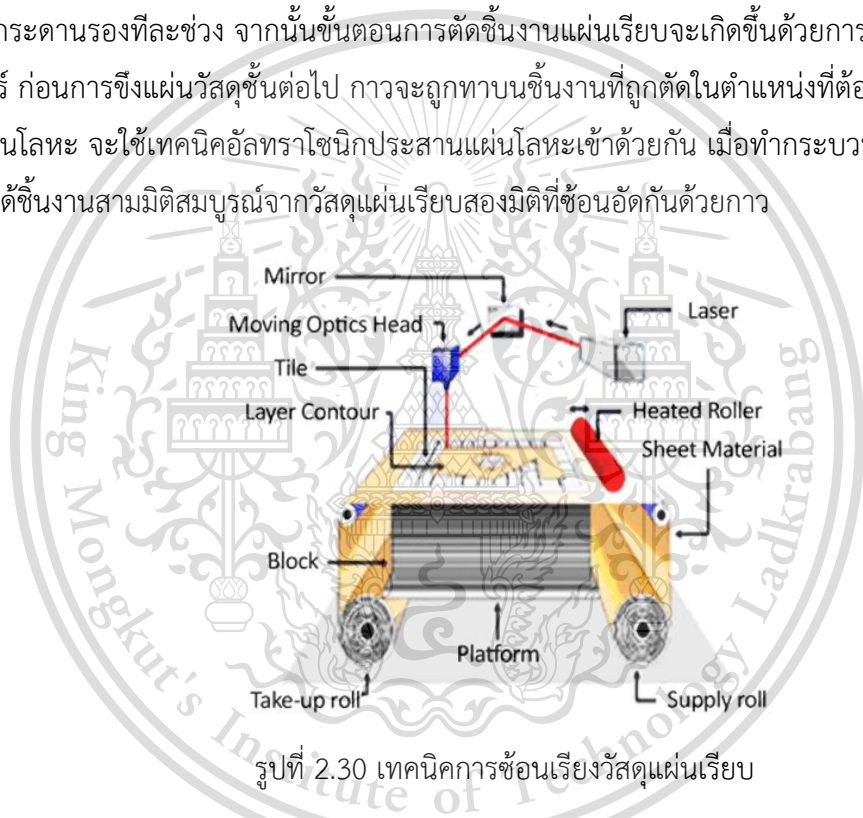
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

โดยทั่วไปการกำจัดฝุ่นวัสดุออกจากชิ้นงานมักใช้วิธีการพ่นเป่าในตู้ปิดเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นหรือด้วยการดูดผงวัสดุออกไป ทั้งนี้ผงวัสดุที่เหลือสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ในกรณีชิ้นงานพลาสติกอาจนำไปใช้งานได้หลังการตกแต่งเล็กน้อย แต่หากเป็นชิ้นงานเซรามิกหรือโลหะ ต้องนำไปผ่านกระบวนการเผา(sintering) เพื่อกำจัดกาวและหลอมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อน ซึ่งต้องมีการคำนวณขนาดสุดท้ายของชิ้นงานภายหลังการกำจัดวัสดุประสานออกไปแล้วด้วยเพราะชิ้นงานจะหดตัวมีขนาดเล็ก

5. การซ้อนเรียงของวัสดุแผ่นเรียบ (Sheet Lamination) จะนำมาใช้กับวัสดุแผ่นบางที่ตัดง่าย เช่น พลาสติก กระดาษ หรือโลหะ การสร้างชิ้นงานด้วยเทคนิคนี้โดยแผ่นฟิล์มวัสดุจะถูกดึงออกมาจากม้วนและชิงบนกระดานรองที่ละช่วง จากนั้นขั้นตอนการตัดชิ้นงานแผ่นเรียบจะเกิดขึ้นด้วยการใช้มีดที่คมกริบหรือเลเซอร์ ก่อนการชิงแผ่นวัสดุชั้นต่อไป กาวจะถูกทาบนชิ้นงานที่ถูกตัดในตำแหน่งที่ต้องการ ทั้งนี้หากวัสดุที่ใช้เป็นโลหะ จะใช้เทคนิคอัลตราโซนิคประสานแผ่นโลหะเข้าด้วยกัน เมื่อทำกระบวนการนี้ซ้ำไปมาท้ายสุดจะได้ชิ้นงานสามมิติสมบูรณ์จากวัสดุแผ่นเรียบสองมิติที่ซ้อนอัดกันด้วยกาว

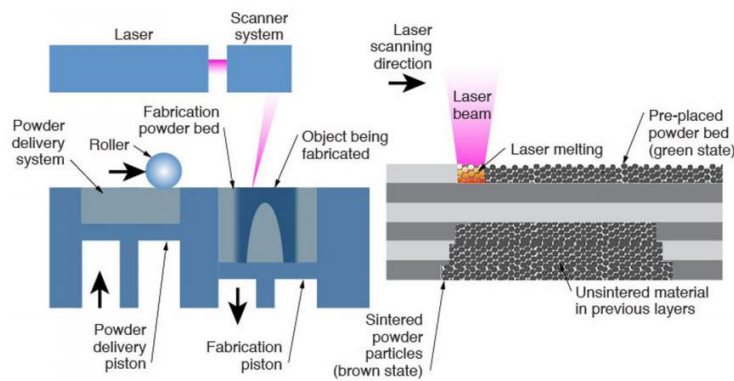


6. การหลอมผงวัสดุที่ละชั้น (Powder Bed Fusion) มักเลือกใช้วัสดุที่หลอมตัวได้ด้วยความร้อน ได้แก่ พลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกและโลหะ ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานเริ่มจากเกลี่ยผงวัสดุเป็นชั้นบางๆ แล้วใช้เลเซอร์กำลังสูงส่องไปยังตำแหน่งที่ต้องการสร้างชิ้นงานจนผงวัสดุในตำแหน่งนั้นหลอมตัว จากนั้นเกลี่ยผงวัสดุสำหรับสร้างชั้นถัดไปเข้ามาและใช้เลเซอร์กำลังสูงส่องไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยขั้นตอนจะเกิดซ้ำๆ จนได้ชิ้นงานที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

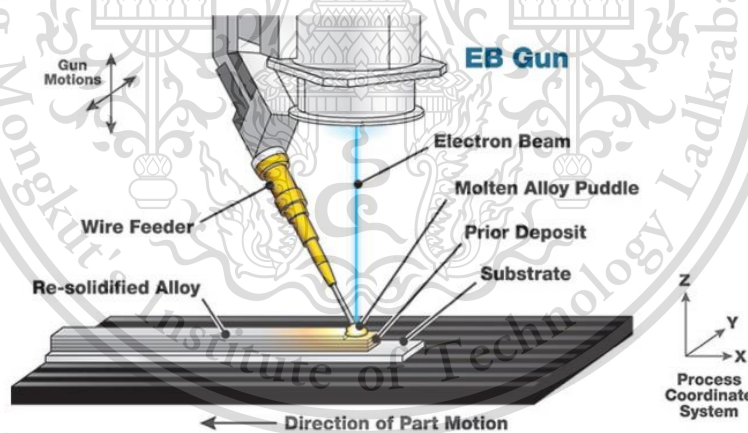
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 27



รูปที่ 2.31 เทคนิคการหลอมผงวัสดุทีละชั้น

7. การให้พลังงานโดยตรงกับวัสดุให้หลอมและเกาะตัวกันเป็นชิ้นงาน (Directed Energy Deposition) เทคนิคนี้มีส่วนคล้ายกับวิธีการดันวัสดุหลอมคือ เส้นลวดวัสดุจะถูกนำมาจัดวางในตำแหน่งที่ต้องการสร้างชิ้นงาน แต่ส่วนที่ต่างคือ กระบวนการให้ความร้อนแก่เส้นลวดวัสดุจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณปลายลวดและเมื่อเวลาต้องการเติมเนื้อวัสดุเท่านั้น แหล่งพลังงานที่มีการนำมาใช้ในการหลอมวัสดุของเทคนิคนี้ ได้แก่ การใช้ลำอิเล็กตรอน และการใช้เลเซอร์กำลังสูง โดยทั่วไปเทคนิคนี้มักใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะ การให้พลังงานเพื่อหลอมวัสดุเฉพาะจุดที่กำลังต้องการเติมเนื้อวัสดุมีข้อดีคือ ลดการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น ตัวอย่างชิ้นงาน



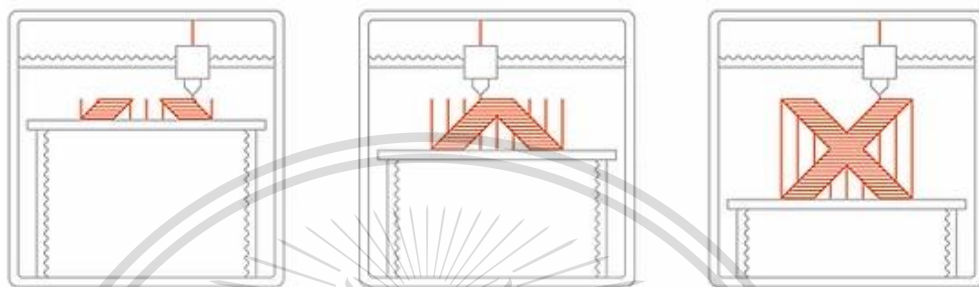
รูปที่ 2.32 เทคนิคการให้พลังงานโดยตรงกับวัสดุ

### 2.5.2 การพิมพ์ชิ้นงานแบบ 3 มิติ FDM หรือ FFF

Fused Deposition Modeling (FDM) หรือ Fused Filament Fabrication (FFF) เป็นเทคโนโลยีการพิมพ์ชิ้นงานแบบ 3 มิติด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มักจะเป็นเทคโนโลยีแรกๆ ที่ผู้คนเลือกนำมาใช้งาน และมีผู้ใช้งานมากที่สุดจากเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติทั่วโลก โดยวัตถุดิบจะถูกสร้างขึ้นจากการที่วัสดุถูกละลายด้วยความร้อนจากหัวฉีด (Nozzle) แล้วขึ้นรูปทีละชั้น ซึ่งวัสดุที่ใช้คือไม่ว่าจะเป็นเทอร์โมพลาสติกในรูปแบบเส้น (Filament) [10] และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

1. หลักการทำงาน เครื่องระบบ FDM นั้นมีหลักการทำงานเหมือนกับ “ฉีดยาและวาดเส้นพลาสติกออกมาเป็นวัตถุ” ส่วนของหัวฉีดทำหน้าที่ฉีดเส้นพลาสติกออกมา (ลักษณะคล้ายๆ ปืนกา) โดยหัวฉีดมีฮีทเตอร์ทำความร้อนให้ถึงจุดที่เส้นพลาสติกละลายเป็นน้ำ ฉีดผ่านหัวฉีดออกมา โดยปกติหัวฉีดจะมีรูขนาด 0.4 mm เครื่องจะมีมอเตอร์ทำการเคลื่อนหัวฉีด หรือฐานพิมพ์ให้เคลื่อนที่ และพิมพ์ไปที่ละชั้น จนออกมาเป็นงานชิ้นรูป เครื่องพิมพ์สามารถทำงานที่ซับซ้อนได้ [10]



รูปที่ 2.33 แสดงการทำงานฉีดชิ้นงานทีละชั้น

การผลิตชิ้นงานโดยการใช้ Additive Manufacturing คือการเพิ่มเติมวัสดุทีละชั้น ๆ จนกลายมาเป็นชิ้นงาน และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา โดยคนส่วนมากจะเริ่มต้นรู้จักเครื่องพิมพ์ 3 มิติจากเทคโนโลยี FDM/FFF ซึ่งมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ทำงานต้นแบบ (Prototype) ไปจนถึงชิ้นงานที่ใช้งานได้จริง (Functional Part) ในหลายๆอุตสาหกรรม

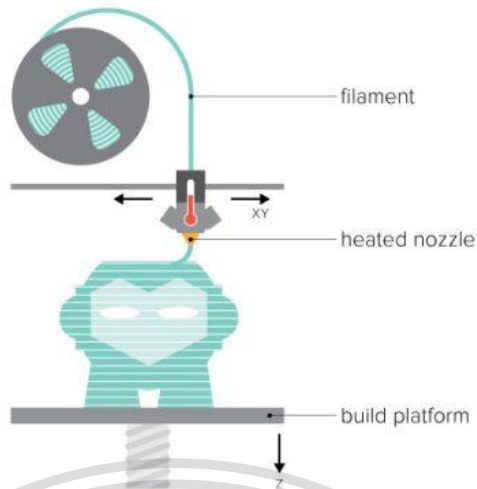
## 2. ชิ้นส่วนหลัก

1. เส้นพลาสติก (Filament) วัสดุสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติซึ่งจะอยู่ในรูปแบบเส้นพลาสติก
2. เครื่องทำความร้อน (Heater Element) เครื่องทำความร้อนจะให้ความร้อนเส้นพลาสติกสูงไปถึงจุดหลอมเหลวของเส้นพลาสติก ซึ่งมีความแตกต่างตามประเภทของพลาสติก
3. หัวฉีด (Nozzle) หัวฉีดจะเคลื่อนที่ตามแกน X - Y เพื่อที่จะสร้างชิ้นงานจากเส้นพลาสติกที่ถูกหลอมละลาย
4. ถาดรองชิ้นงาน (Build Platform) ถาดรองชิ้นงานจะสามารถทำความร้อน เพื่อที่จะให้อุณหภูมิใกล้เคียงกับเส้นพลาสติกที่ถูกหลอมละลาย ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
5. โครงสร้างค้ำยันชิ้นงาน (Support Material) โครงสร้างค้ำยันชิ้นงานจะถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวพยุงชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนและส่วนที่อาจจะเกิดการโค้งงอ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.34 แสดงชิ้นส่วนของเครื่อง FDM

### 3. คุณสมบัติของ FDM 3D printing

- พารามิเตอร์เครื่องพิมพ์ (Printer Parameters) ระบบ FDM ส่วนใหญ่จะสามารถปรับตั้งค่าการพิมพ์ได้หลายอย่าง เช่น อุณหภูมิของหัวฉีดและอุณหภูมิของแพลตฟอร์ม ความเร็วของการทำงานแต่ละ Layer และความเร็วของพัดลมระบายความร้อน ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งาน สิ่งสำคัญจากมุมมองของนักออกแบบคือ ขนาดในการสร้างงานและความสูงของ layer มีดังนี้: Build size ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ความสูงของ Layer ซึ่งมีความสูง 50 - 400 ไมครอน โดยความสูงที่นิยมใช้กันมากที่สุดจะอยู่ที่ 200 ไมครอน

- การบิดเบี้ยว (Warping) การบิดรูปเป็นหนึ่งในปัญหาที่พบบ่อยที่สุดในเทคโนโลยี FDM เมื่อส่วนต่างๆ ของงานพิมพ์เย็นลงในอัตราที่ต่างกันขนาดก็จะเปลี่ยนไปด้วยความเร็วที่ต่างกัน และการระบายความร้อนที่แตกต่างทำให้เกิดความบิดตัว ในทางเทคนิคการบิดรูปนั้นสามารถป้องกันได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของระบบอย่างใกล้ชิด การออกแบบที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างชิ้นงานและบริเวณฐานที่รองรับชิ้นงาน ยกตัวอย่าง การออกแบบชิ้นงานที่มีพื้นที่ราบขนาดใหญ่ เช่น กล่องสี่เหลี่ยม ก็มีแนวโน้มที่จะบิดรูปได้ ควรหลีกเลี่ยงเมื่อเป็นไปได้ หรือคุณสมบัติชิ้นงานที่ยื่นออกมาบางๆ เช่น ขาของส้อม ก็มีแนวโน้มที่จะบิดรูปได้ ซึ่งในกรณีนี้การบิดรูปสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเพิ่มวัสดุบางอย่างไปที่ขอบของชิ้นงานที่บาง เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับฐานที่รองรับชิ้นงาน หรือแม้กระทั่งมุมของชิ้นงานหากออกแบบให้มีความคม ก็มีแนวโน้มที่จะบิดรูปน้อยกว่ารูปร่างโค้งมน ดังนั้นการเพิ่มวัสดุเพื่อลดมุมในการออกแบบจึงเป็นแนวทางปฏิบัติที่ดี โดยวัสดุที่ต่างกัน มีคุณสมบัติที่ต่างกัน ก็จะมีคามอ่อนไหวต่อการบิดรูปที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงได้ และต้องอ้างอิงถึงเว็บไซต์ที่แหล่งที่มาไว้ใช้  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ของ Layer ใหม่บน Layer เก่าที่อยู่บนชิ้นงานที่พิมพ์ไปแล้วอีกด้วย ความแข็งแรง พันธะระหว่างชั้นต่างๆ จะต่ำกว่าความแข็งแรงพื้นฐานของวัสดุเสมอ ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานของ FDM นั้นมีลักษณะเป็น Anisotropic โดยกำเนิด คือความแข็งแรงในแกน Z นั้นน้อยกว่าความแข็งแรงของในแกน X และ Y เสมอ ด้วยเหตุผลนี้สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงการวางแนวของชิ้นงาน เมื่อออกแบบชิ้นงาน

- โครงสร้างสนับสนุนชิ้นงาน (Support Structure) เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพิมพ์ชิ้นงานที่ไม่ใช่แนวตั้ง เพราะ FDM เทอร์โมพลาสติกที่ละลายจะไม่สามารถลอยในอากาศบางอย่างได้ ด้วยเหตุผลนี้รูปทรงเรขาคณิตบางรูปแบบจึงต้องการ Support Structures และพื้นผิวติดกับ Support Structures โดยทั่วไปจะมีคุณภาพพื้นผิวที่ต่ำกว่าส่วนอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้จึงแนะนำให้ออกแบบชิ้นงานที่ลดการใช้ Support structures มากที่สุด

- ความหนาของ Infill และ Shell ชิ้นงานจาก FDM 3D Printing มักจะไม่นิยมพิมพ์แบบทึบเพื่อลดระยะเวลาในการพิมพ์และประหยัดวัสดุ แต่พื้นที่ด้านนอกจะถูกพิมพ์แบบเรียงต่อกันหลายรอบเรียกว่า Shell และภายในนั้นเต็มไปด้วยโครงสร้างภายในที่มีความหนาแน่นต่ำเรียกว่า Infill โดย Infill และความหนาของ Shell มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานอย่างมาก สำหรับเครื่องพิมพ์ FDM แบบ Desktop การตั้งค่าเริ่มต้นคือความหนาแน่นของ Infill อยู่ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และความหนาของ Shell อยู่ที่ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความลงตัวที่ดีระหว่างความแข็งแรงและความรวดเร็วในการพิมพ์ รวมไปถึงราคาต่อการพิมพ์ด้วย

#### 4. ข้อดี

1. มีราคาถูกที่สุด สามารถซื้อหาได้ทั่วไป เนื่องจากต้นทุนการผลิตถูก แล้วส่วนมากเป็น Open Source จึงซื้อหาได้ทั่วไป
2. งานที่พิมพ์ออกมาสามารถใช้งาน รับแรง หรือขัดแต่ง และสามารถนำชิ้นส่วนที่พิมพ์ไปเป็นส่วนประกอบในเครื่องจักรได้
3. ใช้งานง่ายและต้นทุนวัสดุสิ้นเปลืองต่ำ ปัจจุบันมีโปรแกรมสำหรับเครื่อง FDM ให้เลือกใช้มากมาย
4. มีวัสดุให้เลือกใช้งานหลายชนิด เนื่องจากเป็นที่นิยมจึงมีหลายบริษัทผลิตเส้นพลาสติกหลากหลายชนิด (ควรดูคุณสมบัติและข้อมูลจำเพาะพิเศษสำหรับเส้นพลาสติกชนิดนั้นๆ ด้วย)

#### 5. ข้อเสีย

1. ความละเอียดในการพิมพ์ อาจจะไม่สู้ระบบอื่นไม่ได้ เนื่องจากการพิมพ์เกิดจากการฉีดเส้นพลาสติกออกมา ขนาดหัวฉีดที่นิยมคือ 0.4 มิลลิเมตร แต่ถึงอย่างไรชิ้นงานที่ได้ยังคงเป็นเป็นเส้นอยู่ แม้จะพิมพ์ด้วยความละเอียดสูงแล้วก็ตาม

2. หากเทียบขนาดของชิ้นงานและความละเอียดที่เท่ากัน ระบบ FDM ถือว่าใช้เวลาในการพิมพ์ไม่เท่าไรกับระบบอื่น เนื่องจากการพิมพ์ด้วยการฉีดเส้นพลาสติกบางๆ แล้วค่อยๆ วาดจนออกมาเป็นรูปร่างไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 31

โดยรวมแล้วเครื่องพิมพ์ระบบ FDM เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องสีของชิ้นงานที่ไม่สมจริง (True Color) รวมถึงไม่สามารถพิมพ์งานที่ละเอียดมากได้ อีกทั้งผิวของชิ้นงานที่พิมพ์ออกมานั้นยังเป็นร่องระบบอื่นอยู่

## 6. วัสดุของเครื่อง FDM/FFF 3D Printer

โดยทั่วไปแล้วจะเป็นพลาสติกเส้นซึ่งมีให้เลือกใช้งานอยู่ 2 ขนาดคือ 1.75 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร โดยเส้นพลาสติกนั้นจะทำมาในรูปแบบม้วน ปัจจุบันมีเส้นพลาสติกให้เลือกใช้งานมากกว่า 50 ชนิดในท้องตลาด

- PLA (Polylactic Acid) เป็นเส้นพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น กากพืชผลทางการเกษตร ข้าวโพด มันสำปะหลัง พลาสติกชนิดนี้เหมาะกับการใช้กับ 3D Printer เกือบทุกชนิดเนื่องจากค่อนข้างปลอดภัย ไม่มีกลิ่นพลาสติกไหม้ หดตัวน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้ฐานทำความร้อน แต่มีข้อเสียอยู่บ้างในเรื่องทนความร้อนได้ไม่สูงนัก

- ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) เป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์เครื่อง ใช้ในบ้าน เช่น ชั้นน้ำ ถังน้ำ หรือของเล่นที่เรารู้จักกันดีคือ Lego ข้อดีคือ ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี แต่มีข้อเสียคือ พิมพ์ได้ยาก เนื่องจากมีอัตราการหดตัวสูง ต้องเปิดฐานทำความร้อน พิมพ์แล้วมีกลิ่นพลาสติกไหม้

- Dissolvable Filament หรือเส้นพลาสติกที่ละลายออกได้ ใช้ในการพิมพ์ในส่วน Support ต้องใช้กับเครื่องพิมพ์ FDM ที่มีหัวตั้งแต่ 2 หัวขึ้นไป พลาสติกที่พิมพ์นี้จะถูกละลายออกไปหลังการพิมพ์ชิ้นงานเสร็จ (โดยทั่วไปนั้นเครื่องพิมพ์ที่มีราคาสูงจะมีสองหัวฉีด เพื่อให้อีกหนึ่งหัวหนึ่งทำหน้าที่พิมพ์ Dissolvable Filament)

- อื่นๆ นอกจากเส้นพลาสติกที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยังมีเส้นพลาสติกให้เลือกใช้อีกหลากหลายชนิด เช่น เส้นไม้ (Wood Filament) เส้นผสมทองเหลือง (Bronze Filament) เส้นผสมทองแดง (Copper Filament) Nylon PETG Rubber [10]

### 2.6 วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการอัดแข็งคุณสมบัติของพลาสติกเซลลูลาร์แข็ง (ASTM D1621)

วิธีการทดสอบนี้อธิบายขั้นตอนในการพิจารณาคุณสมบัติการบีบอัดของวัสดุเซลล์แข็ง โดยเฉพาะพลาสติกที่ขยายตัวโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโครสเฮดของเครื่องทดสอบ

การทดสอบ ASTM D1621 คือ กำลังรับแรงอัดของวัสดุเซลลูลาร์ที่กำหนดโดยการใช้โหลดกับชิ้นงานทดสอบ ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลม ชิ้นงานทดสอบเหล่านี้ได้รับการจัดเตรียมอย่างระมัดระวังเพื่อให้ขนาดกันและตั้งฉากกับด้านข้าง Touchstone สามารถดำเนินการตามมาตรฐานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม การกำหนดคุณสมบัติการบีบอัดของ Rigid Cellular Plastics ASTM D1621 เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการบีบอัดของวัสดุเซลล์แข็งโดยเฉพาะพลาสติกที่ใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขยายตัว การคำนวณที่ได้จากวิธีนี้ ได้แก่ กำลังรับแรงอัดความเครียดแรงอัดความเค้นอัดและโมดูลัสของความยืดหยุ่น ต้องใช้เครื่องทดสอบสากลที่สามารถทำการทดสอบการบีบอัดด้วยความเร็วครอสเฮดคงที่ โดยมีกำลังแรงเพียงพอที่จะบีบอัดชิ้นงานโดย 13 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงเพื่อทำการทดสอบนี้ [12]

### 2.6.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดขนาดของชิ้นงานที่มีความแม่นยำ 61 เปอร์เซ็นต์ ดังต่อไปนี้

-วัดความหนาได้สูงสุดรวม 25.4 มิลลิเมตร โดยใช้เกจแบบหน้าปัดโดยให้ดินฝิมิพื้นที่ขั้นต่ำ 6.45 ตารางเซนติเมตร กดเป็นหมุนไว้ที่  $0.17 \pm 0.03$  kPa

-วัดขนาดที่ 25.4 มิลลิเมตร ด้วยหน้าปัดเกจคาลิปเปอร์แบบเลื่อนหรือสเกลเหล็กหรือเทป เมื่อใช้เกจคาลิปเปอร์แบบเลื่อนการตั้งค่าที่เหมาะสมจะต้องเป็นจุดที่การวัดของเกจสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานโดยไม่ต้องบีบ

-บันทึกค่าคิดเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดสามครั้ง

2. ใช้โหลดกดอัดกับชิ้นงานทดสอบ ในลักษณะที่กระจายอย่างสม่ำเสมอที่สุดเท่าที่จะทำได้ตลอดการโหลดที่พื้นผิวของชิ้นงาน อัตราการเคลื่อนที่ของครอสเฮดจะต้องเป็น  $2.5 \pm 0.25$  มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับความหนาของชิ้นงาน

3. ใช้การเคลื่อนที่ของครอสเฮดเป็นตัววัดการโก่งตัว ให้วัดการโก่งเพิ่มขึ้นไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาเดิมของชิ้นงาน ในการวัดแต่ละครั้งให้บันทึกการเสียรูปและภาระที่เกี่ยวข้อง

4. ดำเนินการต่อไปจนกว่าจะถึงจุด Yield Point แล้วเกิดความเสียหายหรือจนกว่าชิ้นงานจะถูกบีบอัด ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาเดิม แล้วพิจารณาว่าสิ่งใดจะเกิดขึ้นก่อนแบ่งเป็นเกิด Yield Point ก่อนการเสียรูป 10 เปอร์เซ็นต์และเกิด Yield Point หลังการเสียรูป 10 เปอร์เซ็นต์

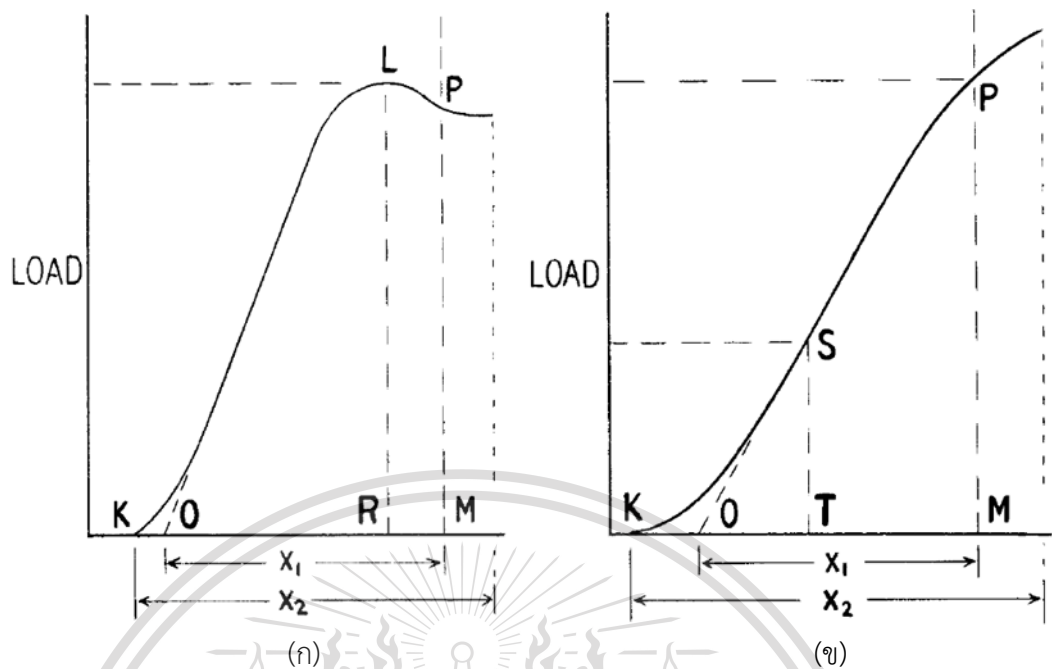
### 2.6.2 กราฟและการคำนวณ

1. วิธีพิจารณาว่ากราฟที่ได้เป็นกรณีใด ตามขั้นตอนที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



โดยที่  $x_1 = 10\%$  Core Deformation

$x_2 =$  Deflection (Approximately 13 %)

รูปที่ 2.35 กราฟที่ได้จากการทดสอบชิ้นงาน (ก) เกิด Yield Point ก่อนการเสียรูป 10

เปอร์เซ็นต์ (ข) เกิด Yield Point หลังการเสียรูป 10 เปอร์เซ็นต์

2. ลากเส้นตรงให้ตรงส่วนที่ชันที่สุดของเส้นโค้งสร้างจุด O “ศูนย์เสียรูป” ดังรูปที่ 2.33
3. วัดจากจุด O ตามแกน x เป็นระยะ 10 เปอร์เซ็นต์ ได้จุด M ดังรูปที่ 2.33 แล้วให้ลากเส้นแนวตั้งที่ตัดกับเส้นโค้งเป็นจุด P
  - ถ้าไม่มีจุด Yield Point ก่อนที่จะจุด P อ่านโหนดที่จุด P
  - หากมีจุด Yield Point ก่อนจุด P ดังจุด L ในรูปที่ 2.33 (ก) ให้อ่านและวัดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนรูปแกนหรือความเครียด (ระยะทาง O-R) ที่จุด Yield Point
  - คำนวณแรงอัดโดยแบ่งโหนดตามกรณีจุด Yield Point ก่อนจุด P ด้วยพื้นที่หน้าตัดแนวนอนเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ
4. หากต้องการโมดูลัสแรงอัดให้เลือกจุดที่สะดวก เช่น จุด S ในรูปที่ 2.33 (ก) ตามส่วนตรงของเส้นโค้ง ความเครียดของโหนด อ่านภาวะและวัดการเสียรูปหรือความเครียด (ระยะทาง O-T) ที่จุดนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 34

คำนวณโมดูลัสที่ปรากฏดังนี้

$$E_c = \frac{WH}{AD} \quad (2.19)$$

- เมื่อ  $E_c$  คือ ค่า Modulus of Elasticity หรือค่า Young's Modulus ในการกด (MPa)  
 $W$  คือ แรงที่ใช้ในการกด (นิวตัน)  
 $H$  คือ ความสูงของชิ้นงานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดชิ้นงานเริ่มต้นในแนวระดับ (ตารางมิลลิเมตร)  
 $D$  คือ ระยะของการเสียรูป (มิลลิเมตร)

คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณดังนี้

$$s = \sqrt{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)/(n - 1)} \quad (2.20)$$

- เมื่อ  $S$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณ  
 $x$  คือ ข้อมูล (ตัวที่ 1,2,3...,n)  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

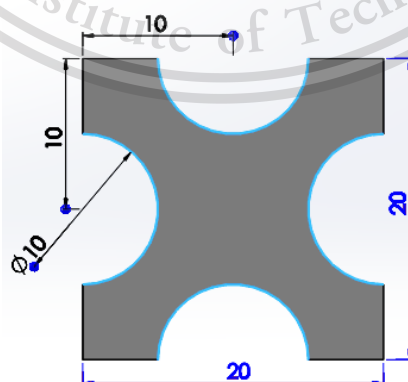
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชิ้นงานทดสอบ วิธีการดำเนินการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบจริง ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบโครงสร้างชิ้นงานและข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา
2. การทดสอบโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย
3. การสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี 3D Printing
4. ทดสอบการกัดอัดชิ้นงาน
5. สร้างแบบจำลองการอัดชิ้นงานในโปรแกรม Abaqus CAE

#### 3.1 การออกแบบโครงสร้างชิ้นงานและข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา

##### 3.1.1 ออกแบบโครงสร้างชิ้นงานที่ทำการศึกษา

จากการศึกษาโครงสร้างของวัสดุพูน ได้ทำการออกแบบโครงสร้างชิ้นงานเป็นแบบโครงร่างโครงสร้าง (Skeletal) โดยทำการออกแบบชิ้นงานในโปรแกรม SolidWorks ให้มีลักษณะของโครงสร้างชิ้นงานเป็นลูกบาศก์ ขนาด 20x20x20 มิลลิเมตร และทำการเจาะรูแต่ละด้านของลูกบาศก์ทั้ง 3 ด้านให้ทะลุ โดยทำการเจาะแต่ละด้านดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่ทำการเจาะ 10 มิลลิเมตร

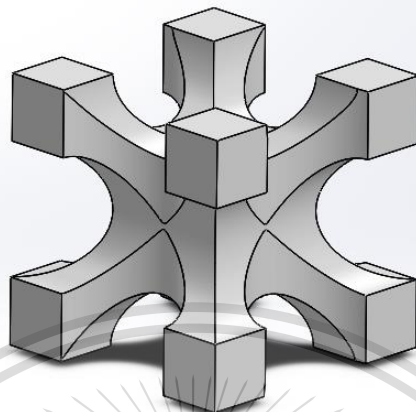


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 การเจาะรูแต่ละด้านของลูกบาศก์ทั้ง 3 ด้านหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, 36 and cite the document when use.

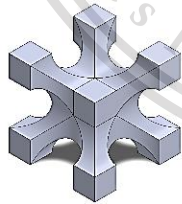
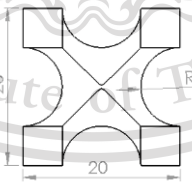
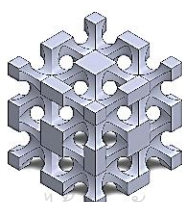
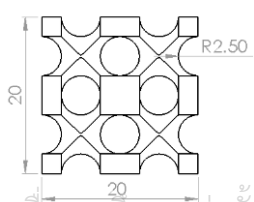
หลังจากที่ได้ทำการเจาะทะลุลูกบาศก์ทั้ง 3 ด้านแล้ว จะได้เป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างตามที่ได้ทำการออกแบบมา 1 ชิ้น เรียกชิ้นงานนี้ว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูพรุน 1 หน่วย หรือ 1 ยูนิต (Unit)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูพรุน 1 ยูนิต

เนื่องจากการดำเนินงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะศึกษาโครงสร้างรูพรุนแบบเดียวกัน มีขนาดของชิ้นงานเท่ากัน แต่มีจำนวนยูนิตที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูพรุน 1 ยูนิต 8 ยูนิต 64 ยูนิต และโครงสร้างรูพรุนแบบอนันต์ (Infinity Unit) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รูปและค่าพารามิเตอร์ของชิ้นงาน

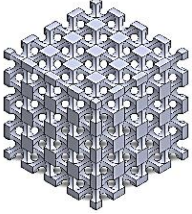
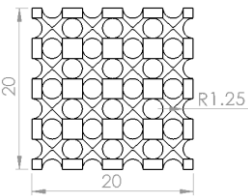
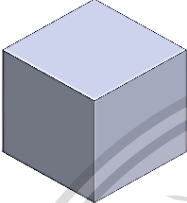
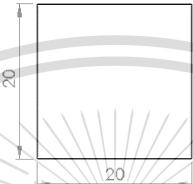
จำนวน Unit	รูป 3 มิติของชิ้นงาน	รูป 2 มิติของชิ้นงาน	ค่าพารามิเตอร์ของชิ้นงาน
1			ชิ้นงานขนาด 20x20x20 มิลลิเมตร ขนาดของรูพรุนในชิ้นงาน D = 10 มิลลิเมตร เท่ากันทุกทิศทาง
8			ชิ้นงานขนาด 20x20x20 มิลลิเมตร ขนาดของรูพรุนในชิ้นงาน D = 5 มิลลิเมตร เท่ากันทุกทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์สงวนไว้ให้คณะอาจารย์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 รูปและค่าพารามิเตอร์ของชิ้นงาน (ต่อ)

64			ชิ้นงานขนาด 20x20x20 มิลลิเมตร ขนาดของรูพรุนในชิ้นงาน D = 2.5 มิลลิเมตร เท่ากันทุกทิศทาง
Infinity			ชิ้นงานขนาด 20x20x20 มิลลิเมตร

### 3.1.2 ข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา

เมื่อได้ทำการออกแบบชิ้นงานที่จะใช้ในการศึกษาครั้งนี้แล้ว ทำให้ทราบค่าน้ำหนัก ปริมาตร เปอร์เซ็นต์ความพรุน (Porosity) และพื้นที่ผิว จากการวัดค่าในโปรแกรม SolidWorks ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการศึกษา

Number of Unit	Mass (g)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Surface Area (mm <sup>2</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.63	2576.94	67.79	1970.30	1.02059
8	2.63	2579.83	67.79	3342.15	1.019447018
64	2.64	2584.43	67.79	6087.25	1.0215018
Infinity	8.16	8000	0	2400	1.02

## 3.2 การทดสอบโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.1 ทดสอบคุณสมบัติของ ABS ด้วยการดึงจริง

ในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม จากวิธีการทดสอบแรงดึงในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง (Stress-Strain Curve)

โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine, SHIMADZU AGS-X Series (CAP.100kN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

มาทำการดึงเส้นพลาสติก ABS ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ความยาวเส้นพลาสติก

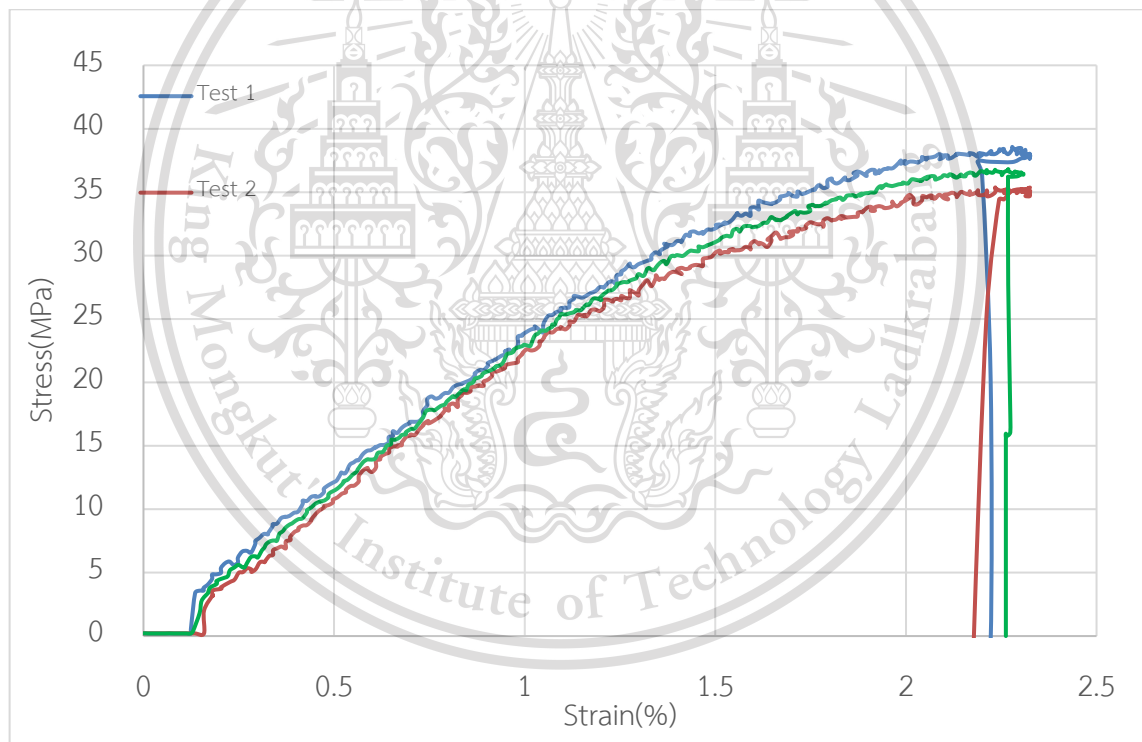
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

150 มิลลิเมตร และระยะ Gauge Length 90 มิลลิเมตร ทำการดึงทั้งหมด 2 ครั้ง ด้วยความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วนำค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบไปทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในโปรแกรม ได้ข้อมูลจากการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึง

การทดลองที่	Elastic (MPa)	Yield's Strength (MPa)	Max Stress (MPa)
1	2321.18	34.0520	38.5654
2	2378.46	30.1466	35.3737
Average	2349.82	32.0993	36.9696
SD	40.5031	2.76153	2.25687



รูปที่ 3.3 Stress-Strain Curve ของพลาสติก ABS

### 3.2.2 ทดสอบคุณสมบัติของ ABS ด้วยการจำลองในโปรแกรม Abaqus CAE

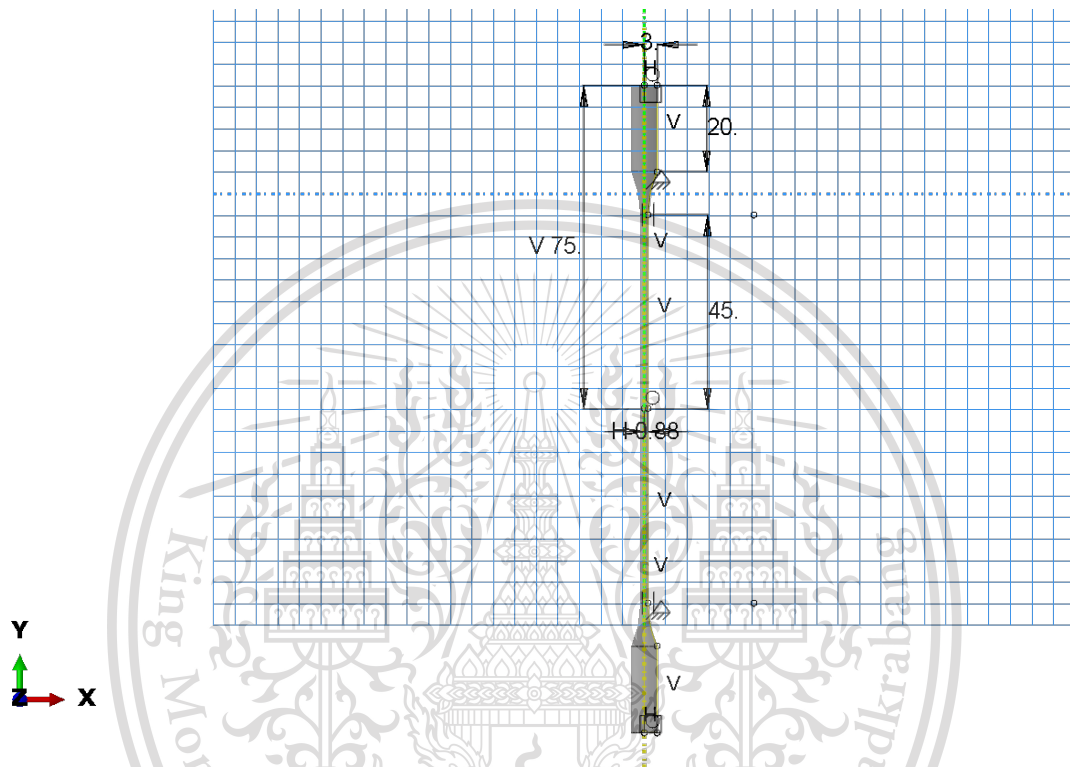
เพื่อทดสอบว่าโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากน้อยเพียงใด จึงนำ

ค่าที่ได้จากการดึงทดสอบด้วยเครื่องมือใช้โปรแกรม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## 1. การสร้างแบบจำลองชิ้นงาน

ทำการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากชิ้นงานที่นำไปทดสอบจริง มีรูปร่างและพารามิเตอร์ของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปร่างและพารามิเตอร์ของชิ้นงาน

## 2. การกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุพลาสติก ABS ยาว 150 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติ โดยวิธีการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง UTM ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้ค่าคุณสมบัติที่นำไปใช้ในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

The image displays two screenshots of the Abaqus Material Properties dialog box for Plastic behavior. The left screenshot shows the 'Plastic' section with a table of Yield Stress and Plastic Strain data for 26 points. The right screenshot shows the same dialog box but with the 'Plastic' section expanded to show more data points, up to 45.

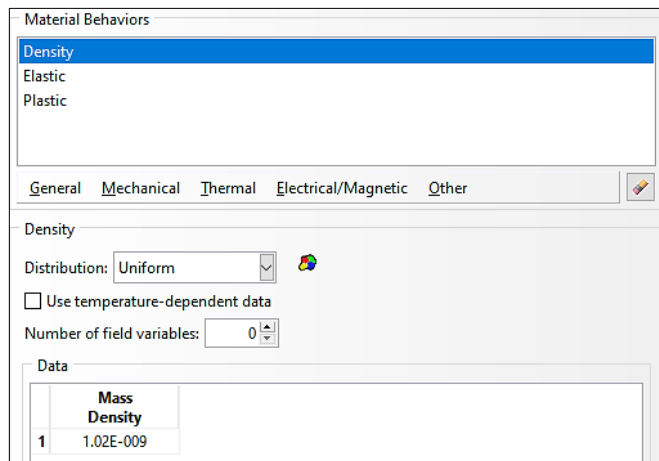
Point	Yield Stress	Plastic Strain
1	32.09646154	0
2	32.29803326	0.016666667
3	32.31786071	0.022222222
4	32.32777547	0.033333333
5	32.56239293	0.067222222
6	32.58552391	0.073333333
7	32.59213306	0.078888889
8	32.85979834	0.084444444
9	33.03824116	0.09
10	33.09771933	0.129444444
11	33.33233888	0.141111111
12	33.52069439	0.152222222
13	33.56695634	0.191666667
14	33.99904407	0.197777778
15	34.1782869	0.231666667
16	34.36664033	0.247777778
17	34.47568815	0.259444444
18	34.57482536	0.270555556
19	34.73013514	0.287777778
20	34.74996258	0.298888889
21	34.76317879	0.304444444
22	34.83587734	0.321666667
23	34.88544491	0.327222222
24	34.89205613	0.332777778
25	34.92840333	0.343888889
26	34.97466736	0.349444444
27	34.98127651	0.361111111
28	35.25224324	0.366666667
29	35.44060083	0.372777778
30	35.46703534	0.378333333
31	35.60251975	0.389444444
32	35.62565073	0.423888889
33	35.66860915	0.435
34	35.80409356	0.451111111
35	35.9957526	0.456666667
36	36.01227443	0.462777778
37	36.23037214	0.502222222
38	36.25350312	0.507222222
39	36.33611435	0.541666667
40	36.4121185	0.558333333
41	36.5442973	0.609444444
42	36.63682328	0.637222222
43	36.7458711	0.654444444
44	36.7590894	0.676111111
45	36.82187318	0.710555556

รูปที่ 3.5 ค่า Yield Stress และ Plastic Strain ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE

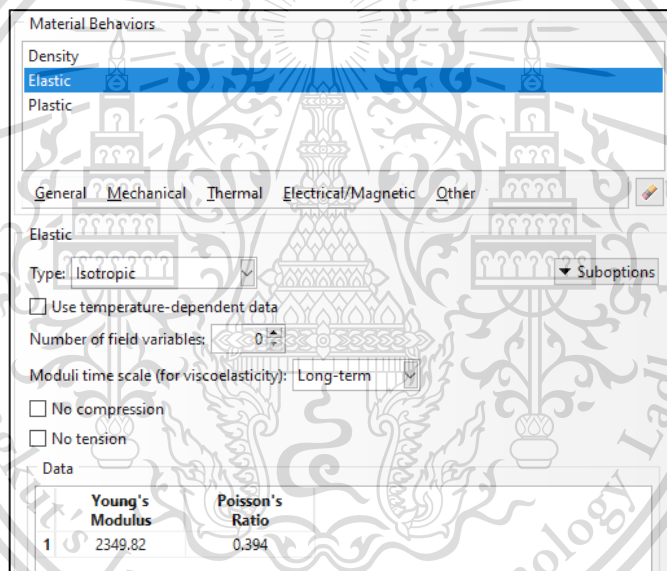
นอกจากค่าที่ได้จากการดึงแล้ว ยังมีค่าคุณสมบัติที่ได้จากทฤษฎีของ ABS ที่นำไปใช้ในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 3.6 ค่า Mass Density ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE



รูปที่ 3.7 ค่า Young's Modulus และ Poisson's Ratio ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE

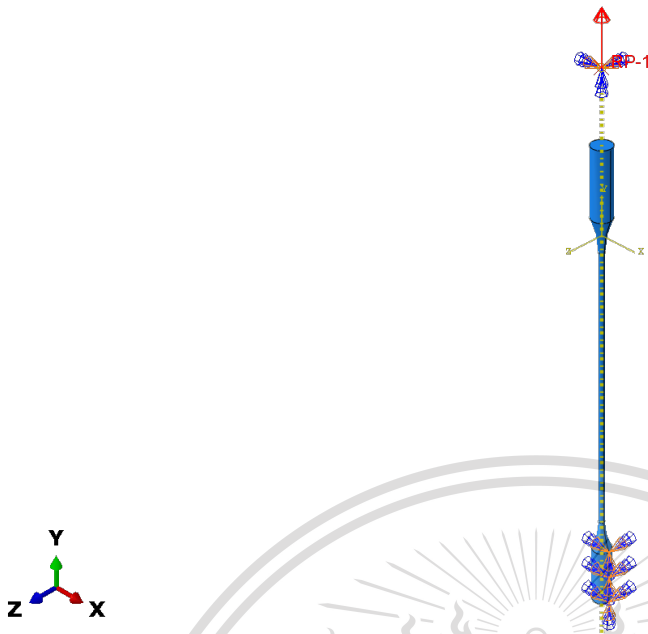
### 3. การกำหนด Boundary Condition ในโปรแกรม

ทำการกำหนดค่า Boundary Condition ในโปรแกรมตามการทดสอบจริง โดยกำหนดให้ชิ้นงานไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกแนวแกนที่บริเวณส่วนด้านล่าง และกำหนดให้อีกด้านหนึ่งมีการเคลื่อนที่ขึ้นตามแนวแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

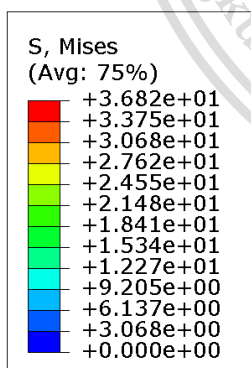
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.8 การกำหนดค่า Boundary Condition ในโปรแกรม Abaqus CAE

#### 4. การประมวลผล

เมื่อมีการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุและเงื่อนไขขอบเขตตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายที่ทำในโปรแกรมคือการประมวลผลและดึงค่าข้อมูลที่ต้องการออกมาแสดง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยผลจากการจำลองการทดสอบการดึงที่ได้ แสดงในรูปที่ 3.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

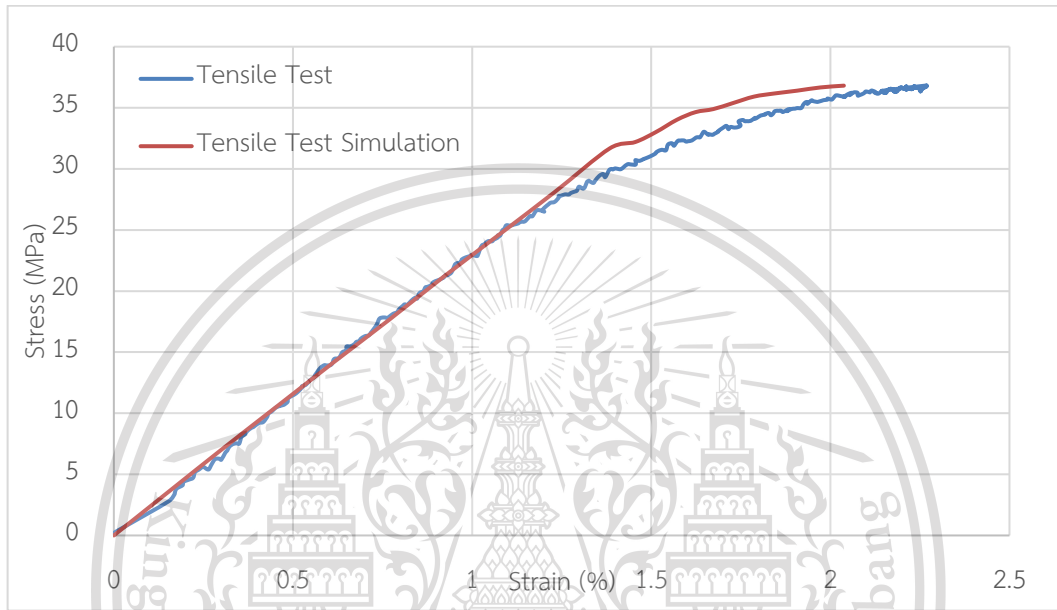
รูปที่ 3.9 ผลที่ได้จากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 3.2.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมกับการทดสอบจริง

ทำการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดและข้อมูลจากกราฟ ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมกับการทดสอบด้วยเครื่อง



รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมกับการทดสอบด้วยเครื่อง

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมกับการทดสอบด้วยเครื่องมีความใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่ทำการจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยในขั้นตอนต่อไปได้

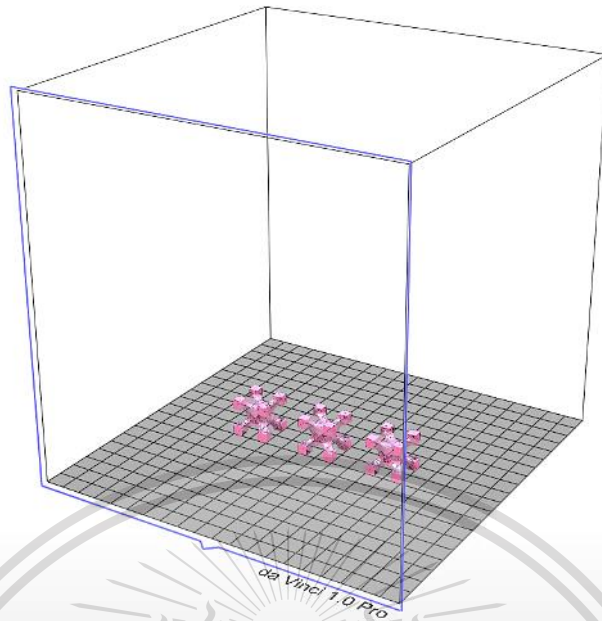
### 3.3 การสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี 3D Printing

ก่อนที่จะทำการทดสอบชิ้นงาน ต้องมีการสร้างชิ้นงานสำหรับการทดสอบชิ้นมาก่อน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการพิมพ์ชิ้นงานแบบ 3 มิติ (3D Printing) มาทำการฉีดพลาสติก ABS ขึ้นเป็นชิ้นงานตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยขั้นแรกจะต้องทำการวาดชิ้นงานขึ้นมาในโปรแกรมที่ใช้สำหรับสร้างชิ้นงาน 3 มิติก่อน ในที่นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks มาใช้ในการสร้างชิ้นงาน จากนั้นทำการบันทึกไฟล์ชิ้นงานเป็นนามสกุล .STL แล้วนำไปเข้าในโปรแกรม XYZware Pro ที่ทำงานเชื่อมต่อกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทำการเซตค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมและตำแหน่งของชิ้นงานเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

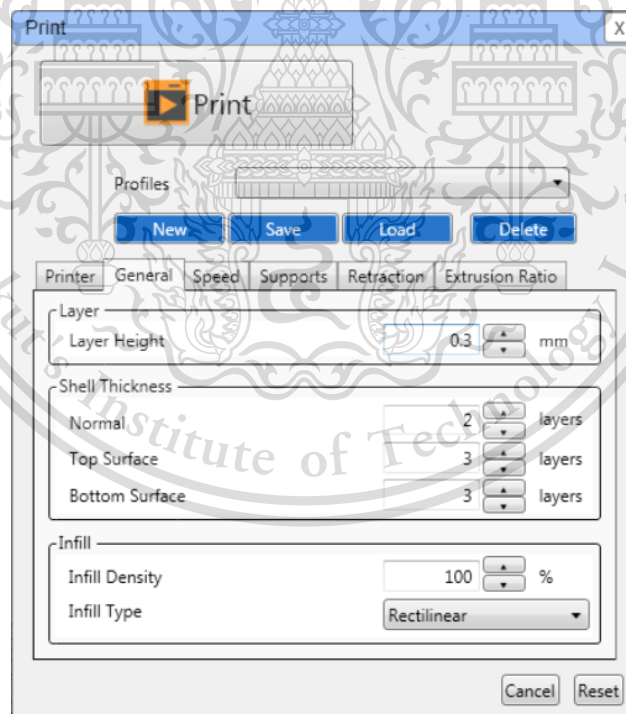
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการนำงานที่จะสั่งพิมพ์ (Import) เข้าสู่โปรแกรม

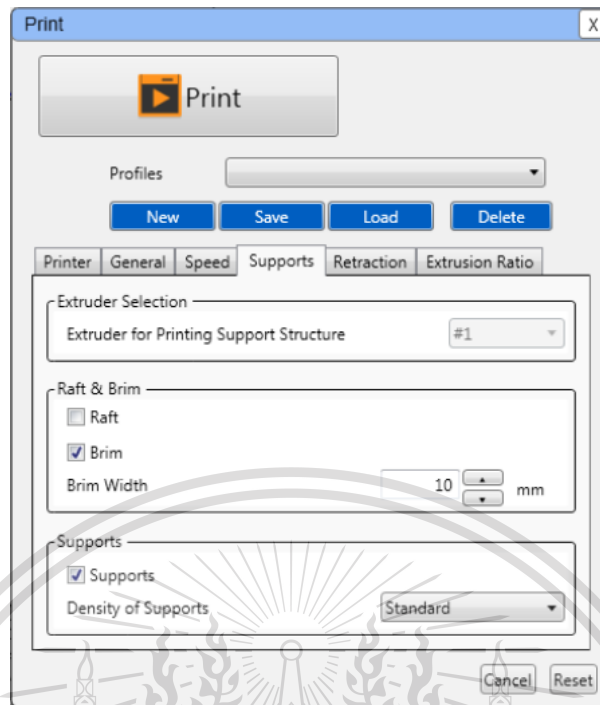


รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการตั้งค่า Infill Density ในการฉีดเป็น 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

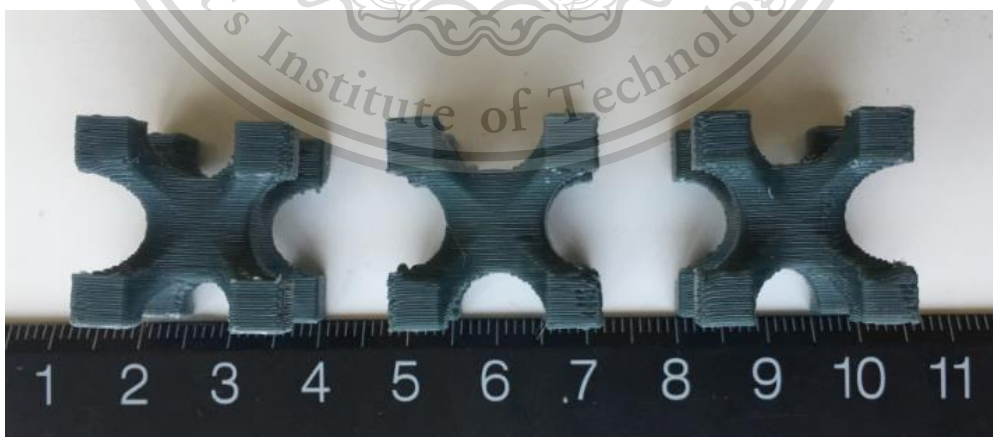
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการใส่ Brim และ Supports (Standard) แล้วกดคำสั่ง Print

จากนั้นทำการสั่งพิมพ์ด้วยเครื่อง 3D Printing รุ่น XYZ Davinci 1.0 Pro โดยทำการสั่งพิมพ์จากชิ้นงาน 4 แบบ แบบละ 3 ชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูปทรงแปดหน้า 1 ยูนิต 8 ยูนิต 64 ยูนิต และโครงสร้างรูปทรงแบบอนันต์ (Infinity Unit) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 รวมทั้งหมด 12 ชิ้น ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นมีการเชื่อมต่อพารามิเตอร์เท่ากันและชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ชิ้นงานแบบ 3 มิติเมื่อพิมพ์เสร็จได้ชิ้นงานดังนี้



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบ 1 ยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.15 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบ 8 ยูนิต



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานปริ้น 3 มิติแบบ 64 ยูนิต



รูปที่ 3.17 ชิ้นงาน 3 มิติแบบอนันต์ (Infinity Unit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4 ทดสอบการกอดอัดชิ้นงาน

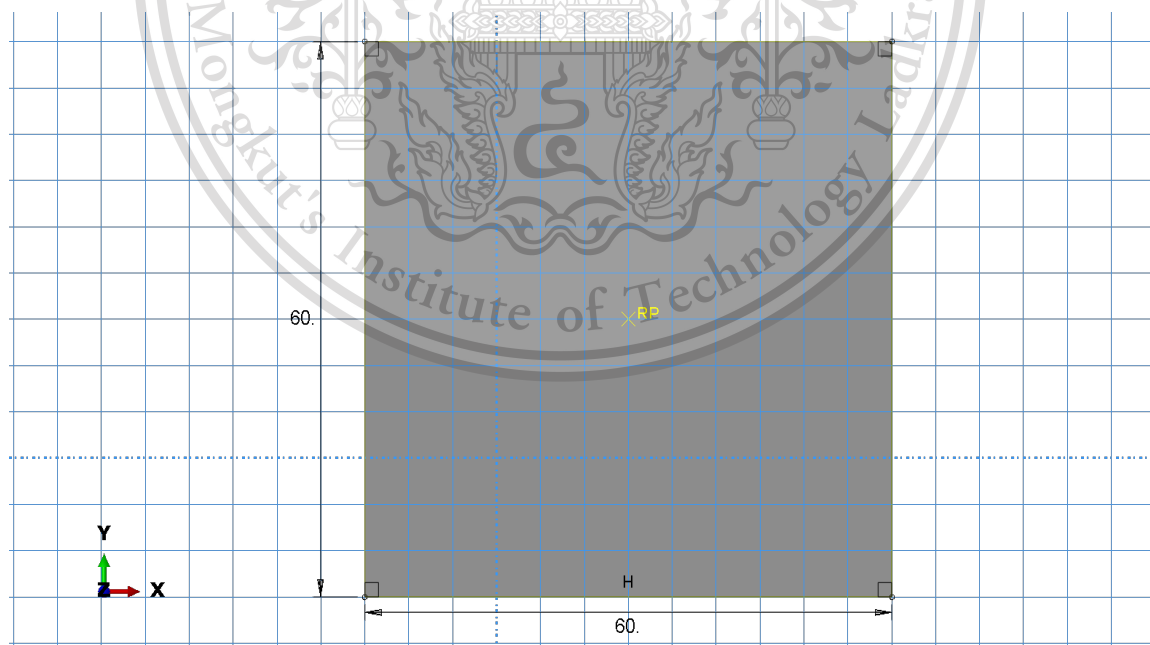
นำชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติทั้ง 12 ชิ้น ไปทำการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงด้วยวิธีการทดสอบการกอดอัด โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine, SHIMADZU AGS-X Series (CAP.100kN) มาทำการกอดอัดชิ้นงานลงไปเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วกด 1 มิลลิเมตร ต่อนาที

### 3.5 สร้างแบบจำลองการอัดชิ้นงานในโปรแกรม Abaqus CAE

การสร้างแบบจำลองการอัดชิ้นงานในโปรแกรม Abaqus CAE มีขั้นตอนในการทำงาน ดังนี้

#### 1. การสร้างแบบจำลองการกอด

ทำการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากชิ้นงานที่นำไปทดสอบจริง โดยรูปร่างและพารามิเตอร์ของชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 3.1 และได้ทำการสร้างแทนวางชิ้นงานและแผ่นกอดที่จำลองแทนเครื่อง UTM มีรูปร่างและพารามิเตอร์ของชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 60x60 มิลลิเมตร กำหนดความหนา 5 มิลลิเมตร ให้แทนวางชิ้นงานและแผ่นกอดมีคุณสมบัติแข็งเกร็ง (Rigid) โดยถือว่าการเสียรูปเนื่องจากแรงกระทำน้อยมาก หรือแทบไม่มีการเสียรูปเลย แสดงรูปร่างและพารามิเตอร์ของแผ่นกอดที่ใช้ในการจำลองในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 รูปร่างและพารามิเตอร์ของแผ่นกอดที่ใช้ในการจำลองในโปรแกรม Abaqus CAE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2. การกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

จากการทดสอบการกดชิ้นงานทั้ง 12 ชิ้น ทำให้ได้ค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแต่ละชนิดจากเครื่องทดสอบ นำค่าคุณสมบัติที่ได้ไปใช้ในโปรแกรม โดยค่า Yield Stress Plastic Strain และ Young's Modulus ที่ป้อนลงในโปรแกรม เป็นค่าที่ได้มาจากการกดทดสอบชิ้นงาน Infinity Unit ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งในส่วนของคุณค่า Young's Modulus ที่ได้ นั้น ได้มาจากการคำนวณชิ้นงาน Infinity Unit โดยนำผลการทดสอบของทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ย แล้วสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ทำการเลือกจุดที่อยู่ในช่วง Elastic ของกราฟมา 2 จุด แล้วนำไปหาค่าความชันของกราฟ จะได้เป็นค่า Young's Modulus = 1095.4652 MPa

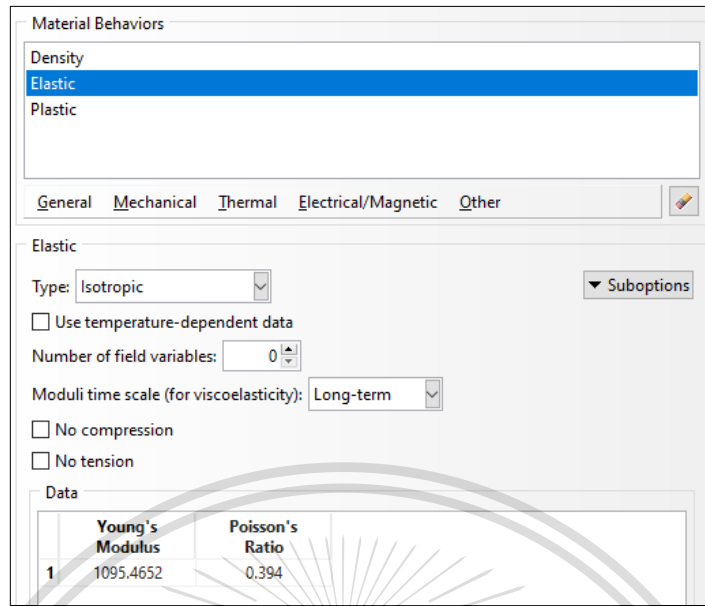
	Yield Stress	Plastic Strain		Yield Stress	Plastic Strain
18	62.00051667	26.809165	1	44.02669167	0
19	63.00160833	27.830105	2	45.00143333	0.214165
20	64.00060833	28.740835	3	46.00254167	0.515835
21	65.000875	29.675	4	47.00146667	1.002395
22	66.00020833	30.592395	5	48.00046667	2.154165
23	67.000325	31.432395	6	49.000005	6.44743
24	68.00065833	32.27406	7	50.00046667	9.4433
25	69.00083333	33.10156	8	51.00123333	11.6775
26	70.00015833	33.856665	9	52.001925	13.5883
27	71.0006	34.62743	10	53.00030833	15.389895
28	72.00093333	35.40073	11	54.000125	16.95906
29	73.0007	36.074165	12	55.00074167	18.4275
30	74.00043333	36.77920333	13	56.00025	19.854165
31	75.000975	37.4533	14	57.001025	21.140835
32	76.000025	38.1158	15	58.00065	22.410935
33	77.00145833	38.7383	16	60.00079167	24.68083
34	78.00018333	39.373335	17	61.00099167	25.7625
35	79.00148333	39.981565	18	62.00051667	26.809165
36	80.00034167	40.56829667	19	63.00160833	27.830105
37	81.00041667	41.1125	20	64.00060833	28.740835
38	82.000075	41.67667	21	65.000875	29.675
39	83.000325	42.21	22	66.00020833	30.592395
40	84.00039167	42.76073	23	67.000325	31.432395
41	85.00275833	43.243435	24	68.00065833	32.27406
42	86.00009167	43.734895	25	69.00083333	33.10156
43	87.001525	44.22743	26	70.00015833	33.856665

รูปที่ 3.19 ค่า Yield Stress และ Plastic Strain ที่ป้อนลงในโปรแกรม Abaqus CAE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

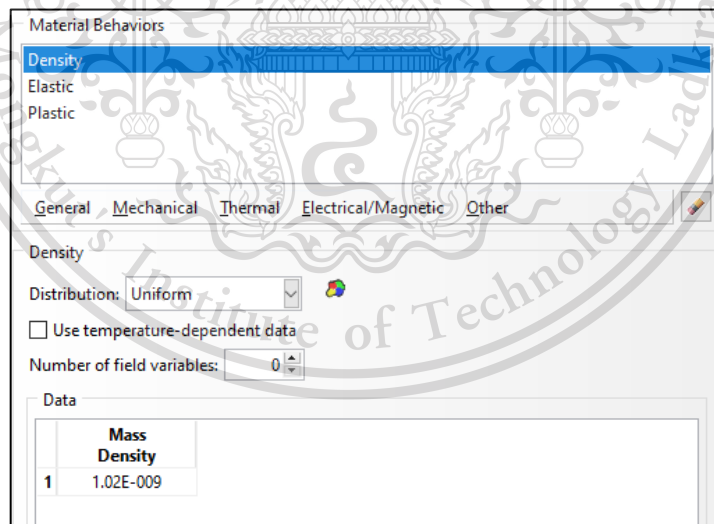
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.20 ค่า Young's Modulus และ Poisson's Ratio สำหรับโปรแกรม Abaqus CAE

นอกจากค่าที่ได้จากการกดแล้ว ยังมีค่าคุณสมบัติที่ได้จากทฤษฎีของ ABS ที่นำไปใช้ในโปรแกรม คือค่าของ Poisson's Ratio และ Mass Density ดังแสดงในรูปที่ 3.21

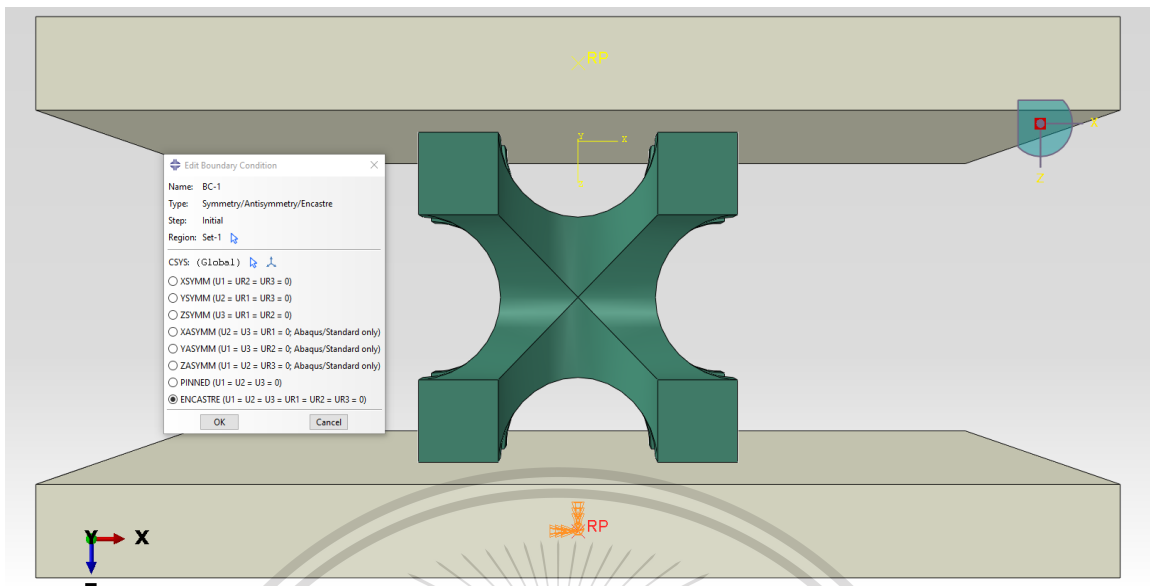


รูปที่ 3.21 ค่า Mass Density ในโปรแกรม Abaqus CAE

### 3. การกำหนด Boundary Condition ในโปรแกรม

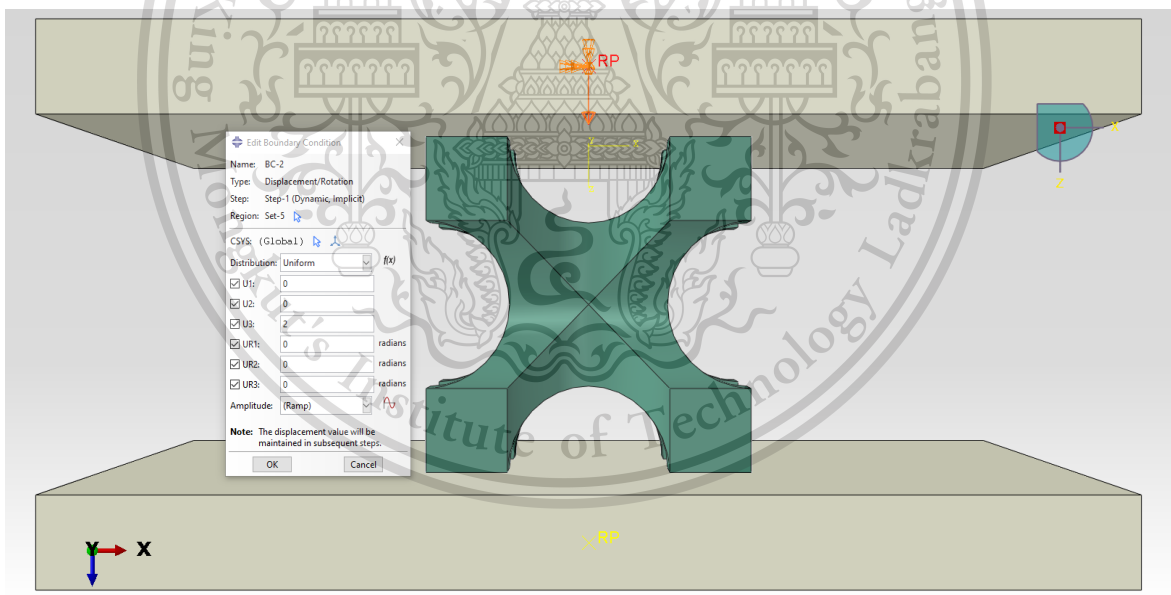
ทำการกำหนดค่า Boundary Condition ในโปรแกรมตามการทดสอบจริง กำหนดให้แบบจำลองการกดไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกแนวแกนที่บริเวณส่วนแทนวางชิ้นงานด้านล่าง โดยทำการกำหนดค่าในโปรแกรมให้เป็น Encastre ดังแสดงในรูปที่ 3.22

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 3.22 การกำหนดค่าในโปรแกรมแบบ Encastre

กำหนดให้แบบจำลองการกดมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ที่บริเวณส่วนแท่นกดขึ้นงานด้านบน โดยทำการกำหนดค่าในโปรแกรมเป็น Displacement U3:2mm ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 กำหนดค่าในโปรแกรมเป็น Displacement U3:2mm

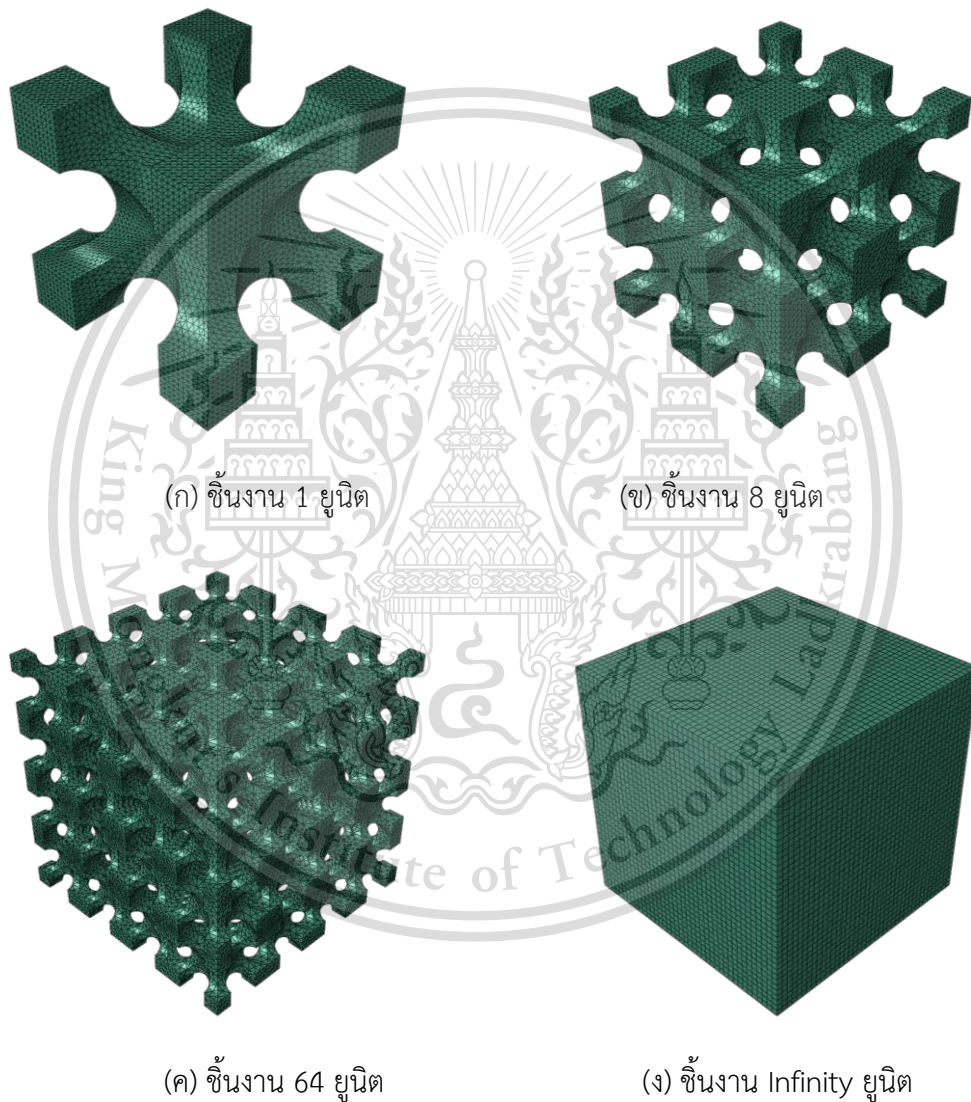
#### 4. กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction) ระหว่างพื้นผิวของ ABS กับ Steel พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมีค่าเป็น  $\mu_s = 0.3$  จึงเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้มาใช้ในการจำลองการกดในโปรแกรม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 5. กำหนดชนิดและจำนวนของเอลิเมนต์

กำหนดให้ชนิดของเอลิเมนต์ของชิ้นงานที่มีรูพรุน เป็นเอลิเมนต์รูปทรงสามเหลี่ยม (Tetrahedron) และสำหรับชิ้นงานที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมตันนั้น ได้กำหนดให้ชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบรูปทรงสี่เหลี่ยม (Hexahedron) ในส่วนของขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ได้กำหนดให้ชิ้นงานแต่ละแบบตามความเหมาะสม โดยโปรแกรมจะทำการสร้างเอลิเมนต์ขึ้นมาให้อัตโนมัติ แสดงรูปของชิ้นงานที่ได้มีการกำหนดชนิดและจำนวนของเอลิเมนต์ในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ได้มีการกำหนดชนิดและจำนวนของเอลิเมนต์

### 6. การประมวลผล

เมื่อมีการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุและเงื่อนไขขอบเขตตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายที่ทำในโปรแกรมคือการประมวลผลและดึงค่าข้อมูลที่ต้องการออกมาแสดง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยผลจากการจำลองการทดสอบการกดที่ได้จะมีการกล่าวต่อไปในบทที่ 4

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

จากดำเนินการออกแบบและทำการพิมพ์ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแล้ว ได้ทำการนำชิ้นงานไปทดสอบการกดและนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบมาป้อนค่าเข้าไปในโปรแกรมและสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus CAE ซึ่งผลที่ได้จากการดำเนินงานได้เป็น ดังนี้

1. ทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการจำลองการดึง
2. ผลการวัดค่าข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงาน
3. ผลการทดสอบการกดชิ้นงาน
4. ผลการจำลองการกดชิ้นงาน
5. เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม

#### 4.1 ทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการจำลองการดึง

ในการนำโปรแกรมมาใช้ในการจำลองการทดสอบจริงจะต้องมีการทดสอบการทำงานของโปรแกรมนั้นๆก่อน เพื่อยืนยันว่าผลที่ได้จากการจำลองนั้นมีความแม่นยำ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากน้อยเพียงใด โดยในการที่จะสร้างแบบจำลองหนึ่งๆขึ้นมา นั้น จะต้องอ้างอิงจากการทดสอบจริงเป็นหลัก ซึ่งการทดสอบที่สามารถทำได้ง่ายที่สุดคือ การทดสอบการดึง ดังนั้นในการทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบการดึงเส้นพลาสติก ABS จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการดึงไปทำการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ผลที่ได้จากการทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการจำลองการดึงเป็นดังนี้

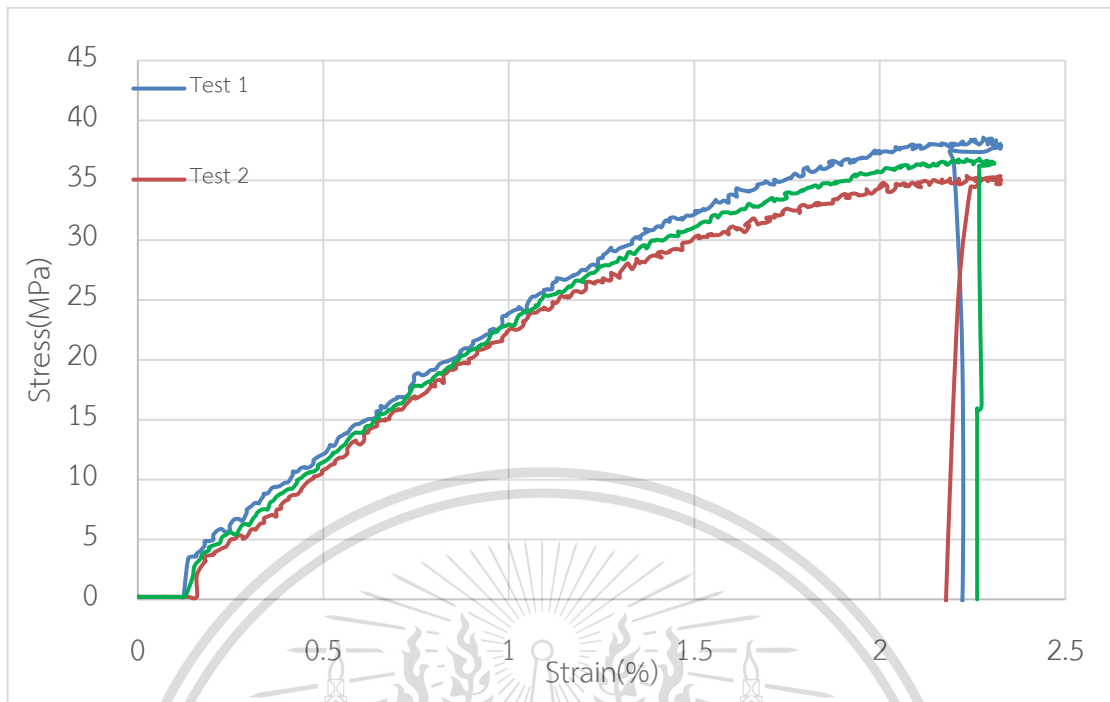
##### 4.1.1 ผลการทดสอบการดึงของวัสดุ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเส้นพลาสติก ABS ด้วยการดึงผ่านเครื่อง UTM จำนวน 2 ครั้ง ได้ผลจากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 53



รูปที่ 4.1 Stress-Strain Curve จากการดึงทดสอบของเส้นพลาสติก ABS

พบว่าค่าเฉลี่ยของ Elastic Modulus เท่ากับ 2349.82 MPa ค่าเฉลี่ยของ Yield Stress เท่ากับ 32.10 MPa ค่าเฉลี่ยของ Maximum Stress เท่ากับ 36.97 MPa และ ค่าเฉลี่ยของ Fitted Strain เท่ากับ 3.08 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.1 ผลจากการดึงทดสอบเส้นพลาสติก ABS

ดึงทดสอบครั้งที่	Elastic Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Max Stress (MPa)	Fitted Strain (%)
1	2321.18	34.05	38.56	2.99
2	2378.46	30.15	35.37	3.18
ค่าเฉลี่ย	2349.82	32.10	36.97	3.08
ค่า S.D.	40.50	2.76	2.26	0.13

#### 4.1.2 ผลการทดสอบการจำลองการดึงของวัสดุ

หลังจากทำการทดสอบการดึงเส้นพลาสติก ABS ด้วยการดึงผ่านเครื่อง UTM ทั้ง 2 ครั้งเสร็จสิ้นแล้ว นำค่าที่ได้จากการทดสอบข้างต้นมาหาค่าเฉลี่ย และป้อนค่าเข้าไปในโปรแกรม เพื่อทดสอบการ

ทำงานของโปรแกรม Abaqus CAE ด้วยการจำลองการดึงทดสอบของชิ้นงาน ผลที่ได้จากการจำลองจะทำการเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากในโปรแกรมกับการดึงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

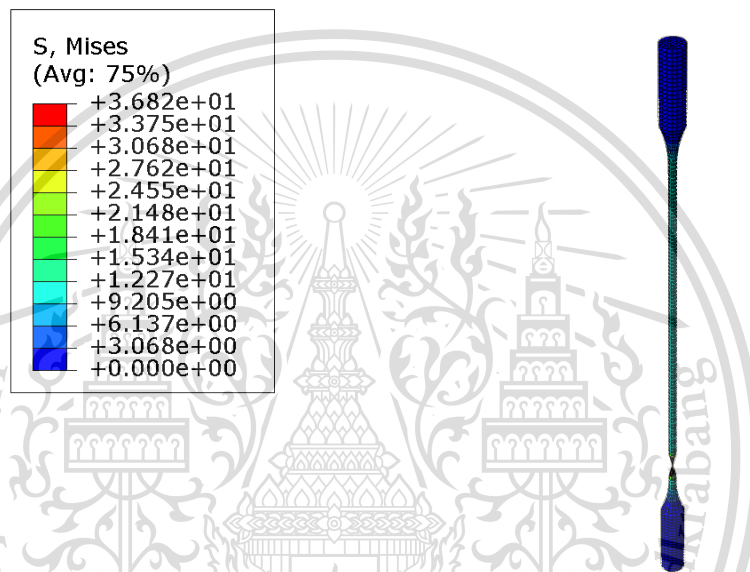
ทดสอบจริง รวมไปถึงเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุด ค่าความเค้นจุดคราก และค่ามอดูลัสของยัง พร้อม  
 ทั้งหมดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากสมการ 4.1

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{Exp-FEM}}{\text{Exp}} \times 100 \quad (4.1)$$

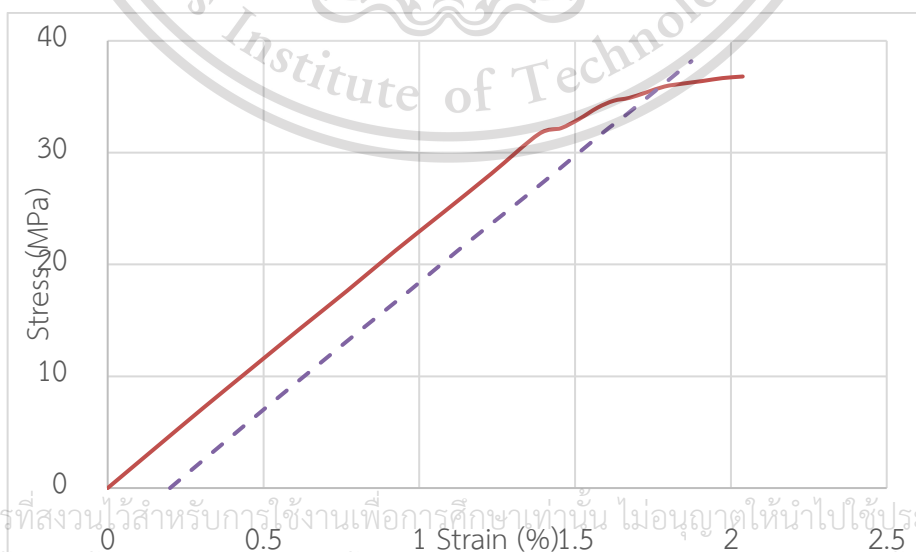
เมื่อ *Exp* คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบการดึง

*FEM* คือ ค่าที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม

ผลจากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานจากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE



รูปที่ 4.3 Stress-Strain Curve จากการจำลองการดึงในโปรแกรม Abaqus CAE

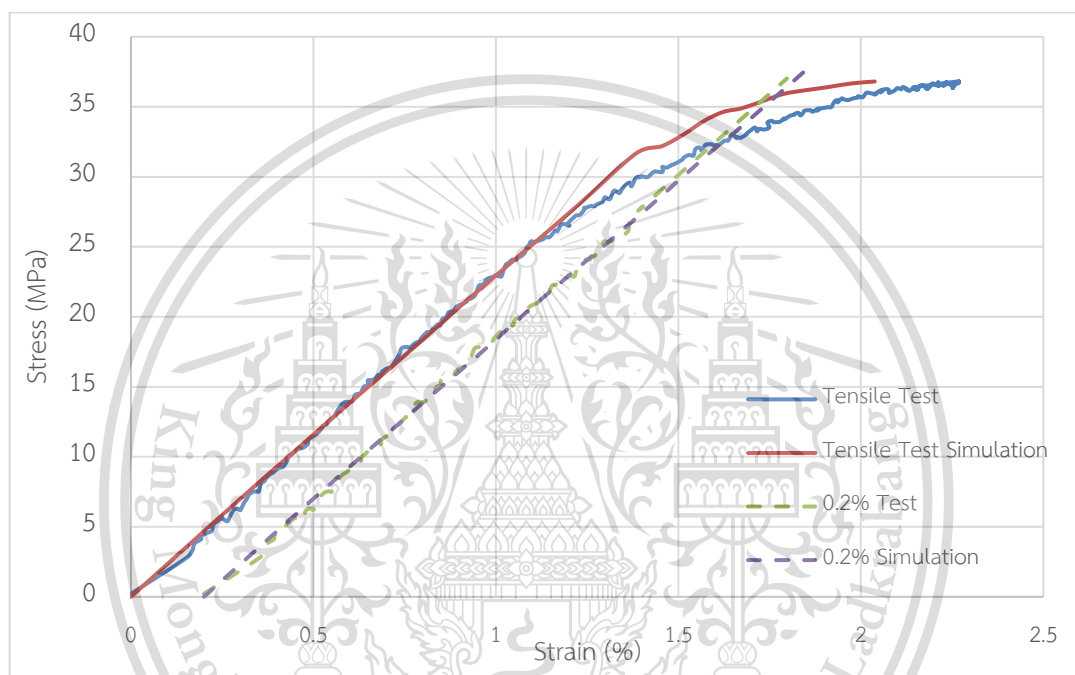
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 4.1.3 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการจำลองในโปรแกรมทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด นำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการดึงทดสอบทั้งสองครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าในช่วงยืดหยุ่น กราฟมีความใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงก่อนที่ใกล้จะถึงจุด Yield Point กราฟมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากค่าที่ป้อนลงไปโปรแกรมไม่ครบถ้วนในบางส่วน เพราะไม่สามารถระบุค่าที่ได้จะนำไปป้อนได้ ทำให้ผลที่ได้จากการจำลองอาจไม่ตรงกับการทดสอบจริงทั้งหมด



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบ Stress-Strain Curve จากการจำลองในโปรแกรมกับการดึงทดสอบจริง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ทำให้ได้ข้อมูลของค่าความเค้นสูงสุด ค่าความเค้นจุดคราก และค่ามอดูลัสของยัง โดยค่ามอดูลัสของยังที่ได้จากการดึงทดสอบจริงและการจำลองในโปรแกรมนั้น ได้มาจากการคำนวณที่เส้น 0.2% Test และ 0.2% Simulation ในโปรแกรม Microsoft Excel แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งสองวิธีดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสูงสุดที่สุด คือค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความเค้นจุดคราก คือ -11.6990 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความเค้นสูงสุด และค่ามอดูลัสของยัง คือ 0.4352 และ 1.6026 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งหากมองในภาพรวมแล้ว ถือว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบจริงและการจำลองในโปรแกรมค่อนข้างน้อย จึงได้ข้อสรุปว่าโปรแกรม Abaqus CAE ที่นำมาใช้ในการจำลองนี้สามารถนำไปใช้กับงานวิจัยในส่วนต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.2 ผลจากการจำลองการดึงในโปรแกรมเปรียบเทียบกับ การดึงทดสอบจริง

	Max Stress (MPa)	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)
การทดสอบการดึง	36.9696	32.0993	23.1817
การจำลองการดึง	36.8087	35.8546	22.8102
ความคลาดเคลื่อน (%)	0.4352	-11.6990	1.6026

#### 4.2 ผลการวัดค่าข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงาน

จากที่ได้ทำการสั่งพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่อง 3D Printing รุ่น XYZ Davinci 1.0 Pro โดยทำการสั่งพิมพ์จากชิ้นงาน 4 แบบ แบบละ 3 ชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานที่มีโครงสร้างรูพรุน 1 ยูนิต 8 ยูนิต 64 ยูนิต และโครงสร้างรูพรุนแบบอนันต์ (Infinity Unit) รวมทั้งหมด 12 ชิ้น ซึ่งชิ้นงานทุกชิ้นมีการเซตค่าพารามิเตอร์เท่ากันและชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ชิ้นงานแบบ 3 มิติเมื่อพิมพ์เสร็จได้ทำการวัดค่าข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานเป็นผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าข้อมูลทางกายภาพเฉลี่ยของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน

โครงสร้างชิ้นงาน (Unit)	ปริมาตร (mm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (g)	ความพรุน (%)
1	2576.94	2.885	67.78
8	2579.83	2.769	67.75
64	2584.43	2.599	67.69
Infinity	8000	9.013	0

เมื่อพิจารณาปริมาตรโครงสร้างชิ้นงานที่แตกต่างกัน 1 8 64 และ Infinity ยูนิต พบว่าปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโครงสร้างยูนิตเพิ่มขึ้น 1 8 64 และแบบ Infinity หรือแบบตัน มีปริมาตรมากที่สุด คือ 2576.94, 2579.83, 2584.43 และ 8000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาน้ำหนักของชิ้นงานพบว่าเมื่อมีจำนวนโครงสร้างชิ้นงานเพิ่มขึ้น 1 8 และ 64 ยูนิตตามลำดับทำให้น้ำหนักของชิ้นงานลดลง คือ 2.885, 2.769 และ 2.599 กรัมตามลำดับ โครงสร้างชิ้นงานแบบ Infinity หรือแบบตัน มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 9.013 กรัม เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานพบว่าค่าความพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้ **ทั้งหมด** สาระที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 4.3 ผลการทดสอบการกดชิ้นงาน

จากที่ได้มีการนำชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติทั้ง 12 ชิ้น โดยแบ่งเป็นชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแปดหน้า 1 หน่วย 8 หน่วย 64 หน่วย และโครงสร้างรูปทรงแบบอนันต์ (Infinity Unit) โครงสร้างละ 3 ชิ้น เพื่อทำการทดสอบแต่ละโครงสร้างทั้งหมด 3 ครั้ง ทำการศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดของโครงสร้างรูปทรงแปดหน้า โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Tensile Testing Machine, SHIMADZU AGS-X Series (CAP.100kN) มาทำการกดอัดชิ้นงานลงไปเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วกด 1 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 ผลการทดสอบการกดชิ้นงาน Infinity Unit

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ Infinity Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 10 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูป โดยมีการพองออกที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงาน แต่ที่ระยะการกด 10 มิลลิเมตรจะเห็นได้ว่าบริเวณขอบมีการพองแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเห็นเป็นชั้นๆเป็นผลเนื่องมาจากการพิมพ์แบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค)



(ก) ระยะ 0 มิลลิเมตร

(ข) ระยะ 5 มิลลิเมตร

(ค) ระยะ 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.5 ชิ้นงาน Infinity Unit ที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร

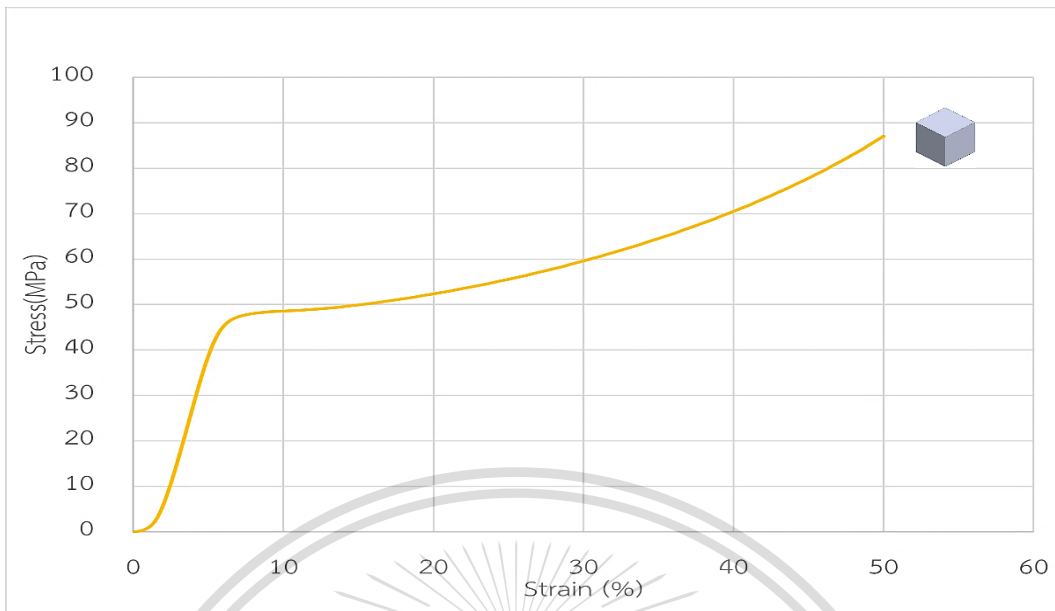
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแปดหน้าแบบ Infinity Unit แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะการกดอัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดอัดก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยแรงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกไปเป็นพลาสติก นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มแรกของระยะการกดที่ระยะประมาณ 0-0.5 มิลลิเมตร กราฟมีการโค้งงอเล็กน้อยเนื่องมาจากการพิมพ์แบบ 3 มิติ ที่มีลักษณะการพิมพ์แบบเติมเนื้อวัสดุเป็นชั้นๆ อาจทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในชิ้นงานได้ ทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกดอัดจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นภายในชิ้นงานจากค่าหนึ่งไปเป็นอีกค่าหนึ่ง ส่งผลให้กราฟที่ได้ในช่วงแรกไม่เป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 58



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยจากการทดสอบของชิ้นงาน Infinity Unit

ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ Infinity Unit จากเครื่องทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าเฉลี่ยของ Elastic Modulus เท่ากับ 1051.64 MPa ค่าเฉลี่ยของ Yield Stress เท่ากับ 44.02 MPa ค่าเฉลี่ยของ Maximum Force เท่ากับ 34828.87 N และ ค่าเฉลี่ยของ Maximum Stress เท่ากับ 87.07 MPa

ตารางที่ 4.4 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ Infinity Unit

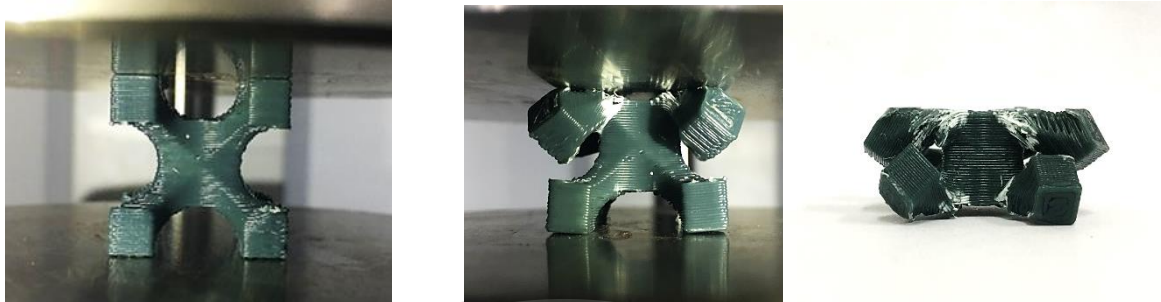
การทดลองที่	Elastic Modulus (MPa)	Yield Stress (0.2%) (MPa)	Strain at Yield (%)	Max Stress Calc. at Entire Areas (MPa)
1	1062.92	45.17	5.92	87.18
2	1001.35	43.25	5.73	86.45
3	1090.65	43.64	5.58	87.59
Average	1051.64	44.02	5.75	87.07
S.D.	45.71	1.02	0.17	0.58

#### 4.3.2 ผลการทดสอบการกดชิ้นงาน 1 Unit

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 1 Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 10 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0-5 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูปโดย

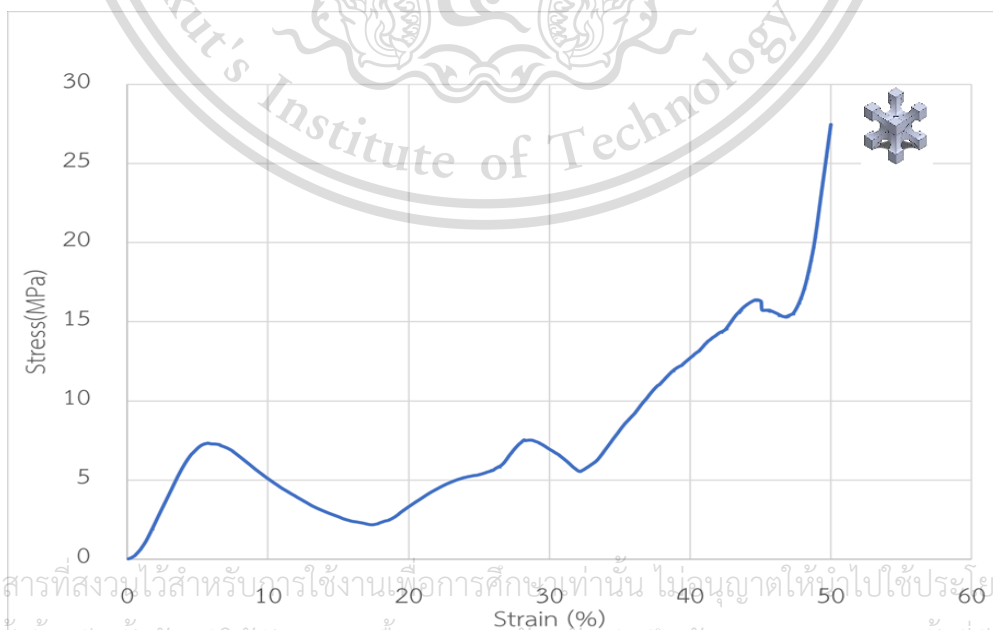
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

มีการแตกหักที่บริเวณขาทั้งสองข้างของชิ้นงานด้านบน แต่ที่ระยะการกด 10 มิลลิเมตรจะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีการแตกหักทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ค)



(ก) ระยะ 0 มิลลิเมตร (ข) ระยะ 5 มิลลิเมตร (ค) ระยะ 10 มิลลิเมตร  
รูปที่ 4.7 ชิ้นงาน 1 Unit ที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปหุ่นแบบ 1 Unit แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการกดที่ระยะประมาณ 0-1 มิลลิเมตร เมื่อระยะการกดเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อระยะการกดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานตกลงมาในช่วงของกราฟ เนื่องมาจากการแตกหักที่บริเวณขาและตัวโครงสร้างของชิ้นงาน ทำให้มีชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงกดอัดไม่สม่ำเสมอจนตลอดทั้งการกด ในช่วงท้ายของการกดจะเห็นได้ว่าความชันของกราฟเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากการที่ขาของชิ้นงานถูกบีบอัดจนเกิดการแตกหักโดยสมบูรณ์แล้ว ไม่มีส่วนใดที่จะเกิดการแตกหักได้อีก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงาน 1 Unit

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 1 Unit จากเครื่องทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าค่าเฉลี่ยของ Elastic Modulus เท่ากับ 30.08 MPa ค่าเฉลี่ยของ Yield Stress เท่ากับ 7.43 MPa ค่าเฉลี่ยของ Maximum Force เท่ากับ 2746.51 N และ ค่าเฉลี่ยของ Maximum Stress เท่ากับ 6.87 MPa

ตารางที่ 4.5 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 1 Unit

การทดลองที่	Elastic Modulus (MPa)	Yield Stress (0.2%) (MPa)	Strain at Yield (%)	Max Stress Calc. at Entire Areas (MPa)
1	29.76	7.14	33.39	7.32
2	28.79	7.40	38.36	4.72
3	31.70	7.74	33.81	8.56
Average	30.08	7.43	35.18	6.87
S.D.	1.48	0.30	2.76	1.96

#### 4.3.3 ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงาน 8 Units

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 8 Units ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 10 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูปโดยมีการแตกหักที่บริเวณขาของชิ้นงาน ที่ระยะการกด 10 มิลลิเมตรจะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีการแตกหักทั้งสองด้าน โดยขาของชิ้นงานมีลักษณะถูกบีบเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ค)



(ก) ระยะ 0 มิลลิเมตร

(ข) ระยะ 5 มิลลิเมตร

(ค) ระยะ 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.9 ชิ้นงาน 8 Units ที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร

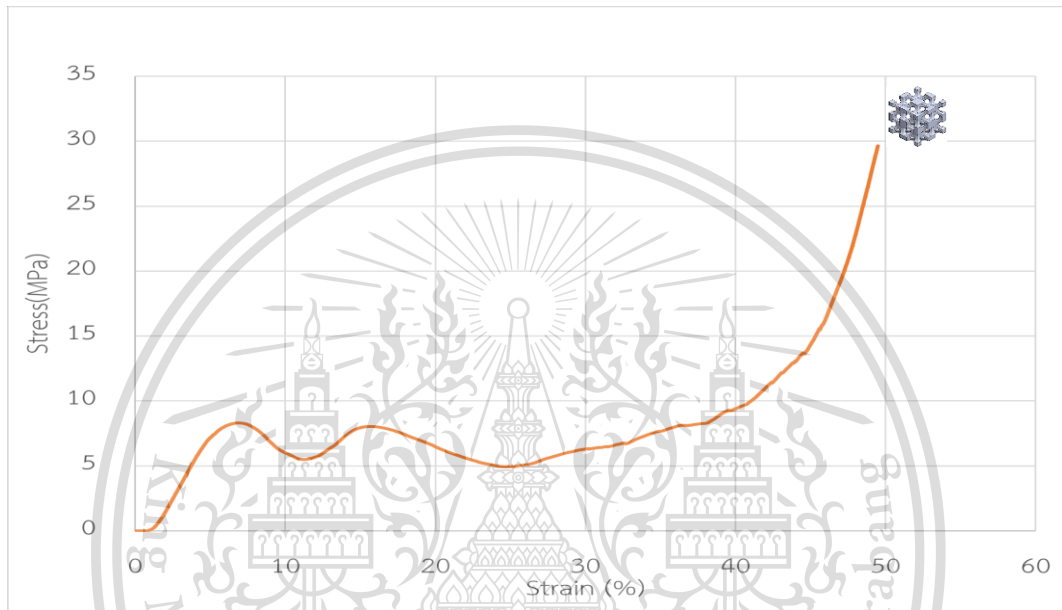
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร และต้องขออนุญาตก่อนเผยแพร่สู่สาธารณะ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 8 Unit แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการกดที่ระยะประมาณ 0-1.5 มิลลิเมตร เมื่อระยะการกด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

เพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อระยะการกดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานตกลงมาในช่วงของกราฟ เนื่องมาจากการแตกหักที่บริเวณขาและตัวโครงสร้างของชิ้นงาน ทำให้มีชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงกดอัดไม่สม่ำเสมอกันตลอดทั้งการกด ในช่วงท้ายของการกด จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากการที่ขาของชิ้นงานถูกบีบอัดจนเกิดการแตกหักโดยสมบูรณ์แล้ว ไม่มีส่วนใดที่จะเกิดการแตกหักได้อีก



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงาน 8 Units

ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 8 Units จากเครื่องทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าเฉลี่ยของ Elastic Modulus เท่ากับ 32.47 MPa ค่าเฉลี่ยของ Yield Stress เท่ากับ 8.12 MPa ค่าเฉลี่ยของ Maximum Force เท่ากับ 3184.70 N และ ค่าเฉลี่ยของ Maximum Stress เท่ากับ 7.96 MPa

ตารางที่ 4.6 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 8 Units

การทดลองที่	Elastic Modulus (MPa)	Yield Stress (0.2%) (MPa)	Strain at Yield (%)	Max Stress Calc. at Entire Areas (MPa)
1	31.85	8.61	5.97	8.64
2	33.85	8.66	6.34	8.22
3	31.70	7.09	6.41	7.02
Average	32.47	8.12	6.24	7.96
S.D.	1.19	0.88	0.23	0.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอื้ออำนวยให้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้อื่นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

#### 4.3.4 ผลการทดสอบการกดชิ้นงาน 64 Units

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 10 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูปโดยมีการแตกหักที่บริเวณขาและตัวโครงสร้างของชิ้นงาน ที่ระยะการกด 10 มิลลิเมตรจะเห็นว่าชิ้นงานมีการแตกหักทั้งสองด้าน โดยชิ้นงานมีลักษณะถูกบีบเข้าหากันทั้งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ค)



(ก) ระยะ 0 มิลลิเมตร

(ข) ระยะ 5 มิลลิเมตร

(ค) ระยะ 10 มิลลิเมตร

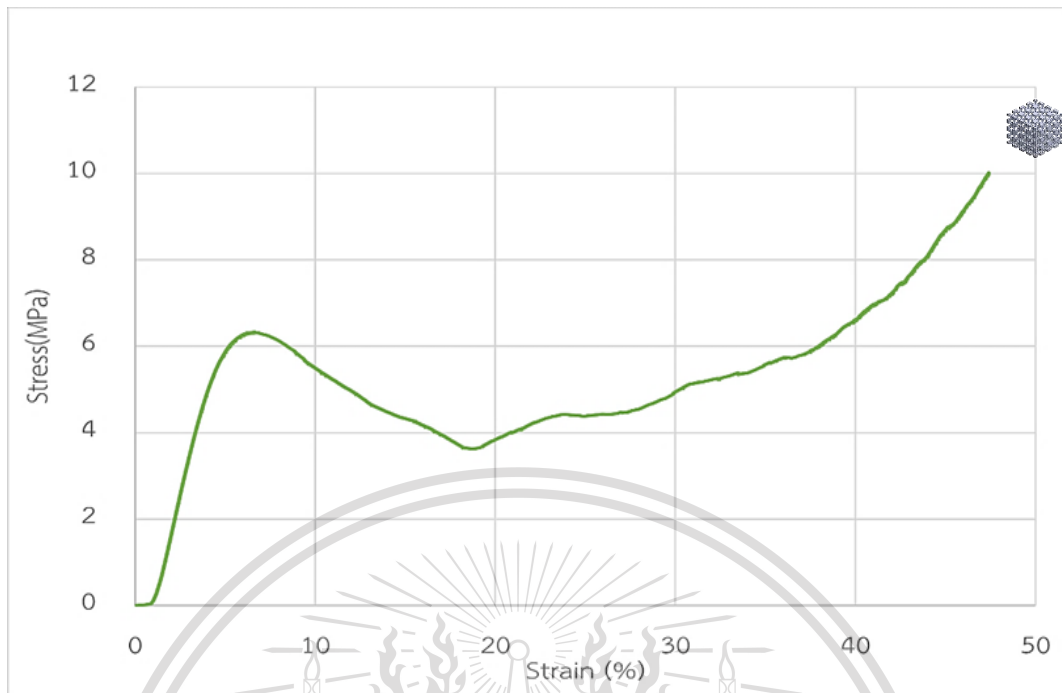
รูปที่ 4.11 ชิ้นงาน 64 Units ที่ถูกกดที่ระยะ 0 5 และ 10 มิลลิเมตร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดที่ได้จากการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Units แสดงให้เห็นว่าในระยะเริ่มต้นของการกดแรงที่ใช้ในการกดอัดชิ้นงานมีค่าเป็นศูนย์ถึงติดลบ เนื่องจากพื้นผิวชิ้นงานบริเวณหน้าที่มีการสัมผัสกับตัวแทนวางและแท่นกดชิ้นงานไม่ราบเรียบ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างกัน ส่งผลให้ในระยะเริ่มต้นของการกดยังไม่มีการออกแรงกดลงไปบนชิ้นงาน ทำให้แรงที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์ถึงติดลบ แต่เมื่อระยะการกดเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานตกลงมาในช่วงของกราฟ เนื่องมาจากการแตกหักที่บริเวณขาและตัวโครงสร้างของชิ้นงาน ทำให้มีชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงกดอัดไม่สม่ำเสมอจนตลอดทั้งการกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงาน 64 Units

ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Units จากเครื่องทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าเฉลี่ยของ Elastic Modulus เท่ากับ 36.28 MPa ค่าเฉลี่ยของ Yield Stress เท่ากับ 6.10 MPa ค่าเฉลี่ยของ Maximum Force เท่ากับ 1035.61 N และ ค่าเฉลี่ยของ Maximum Stress เท่ากับ 2.59 MPa

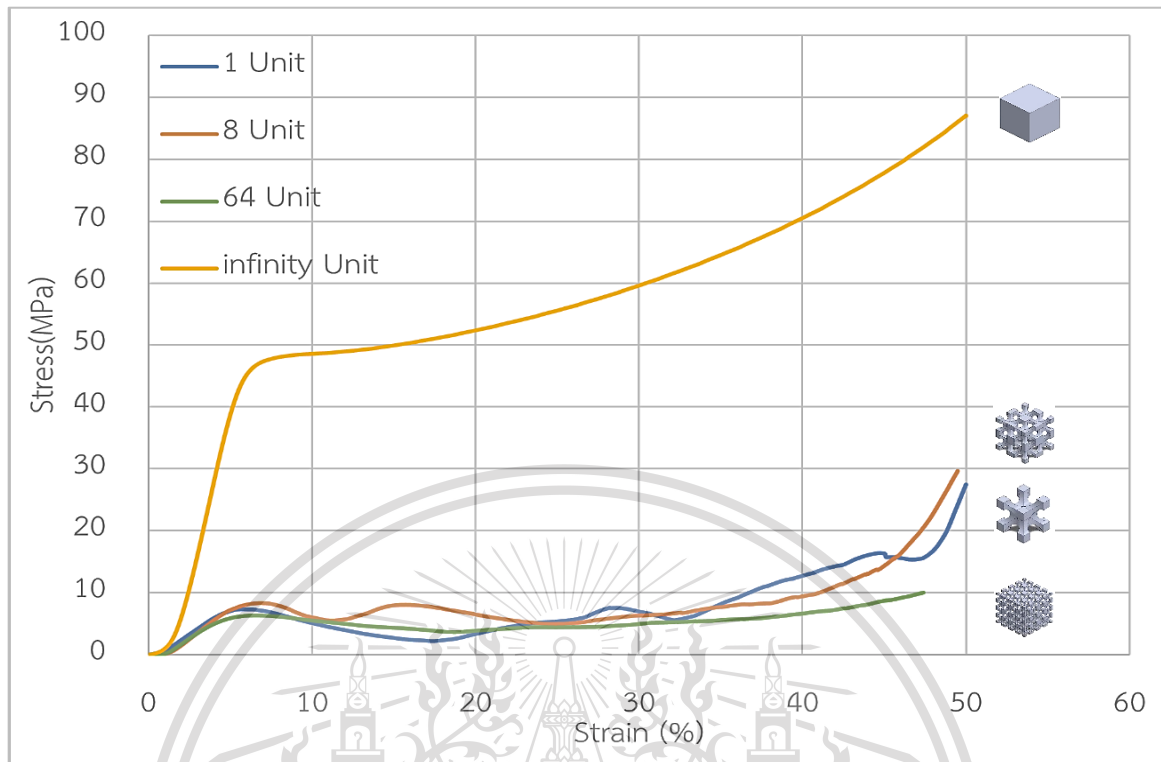
ตารางที่ 4.7 ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Units

การทดลองที่	Elastic Modulus (MPa)	Yield Stress (0.2%) (MPa)	Strain at Yield (%)	Max Stress Calc. at Entire Areas (MPa)
1	34.56	6.56	7.91	2.68
2	39.56	5.59	6.41	2.67
3	34.71	6.14	7.32	2.42
Average	36.28	6.10	7.21	2.59
S.D.	2.84	0.48	0.76	0.15

#### 4.3.5 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกด

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการบิด เป็นไปดังรูปที่ 4.13

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit

เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit จากเครื่องทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าจากค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากเครื่องทดสอบ ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 64 Units มีค่า Yield Stress อยู่ที่ 6.10 MPa ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่ชิ้นงาน 1 Unit 8 Units และ Infinity Unit มีค่า Yield Stress อยู่ที่ 7.43 MPa 8.12 MPa และ 44.02 MPa ตามลำดับ แสดงว่าชิ้นงาน 64 Units เกิดการแตกหักก่อนชิ้นงานอื่น เช่นเดียวกับกับค่า Maximum Force และ Maximum Stress ของชิ้นงาน 64 Units ที่มีค่าต่ำที่สุด แสดงว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงหรือความทนทานในการรับแรงอัดได้ต่ำกว่าชิ้นงานแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานที่ได้มาจากการพิมพ์ 3 มิติค่อนข้างมีความเปราะมาก ดังนั้นในขั้นตอนการนำเอาซัพพอร์ตที่ติดอยู่กับชิ้นงาน 64 Units ออกทำให้ขาบางส่วนของชิ้นงานหลุดออกมาด้วย ทำให้ชิ้นงานมีความไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับชิ้นงานตัวอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

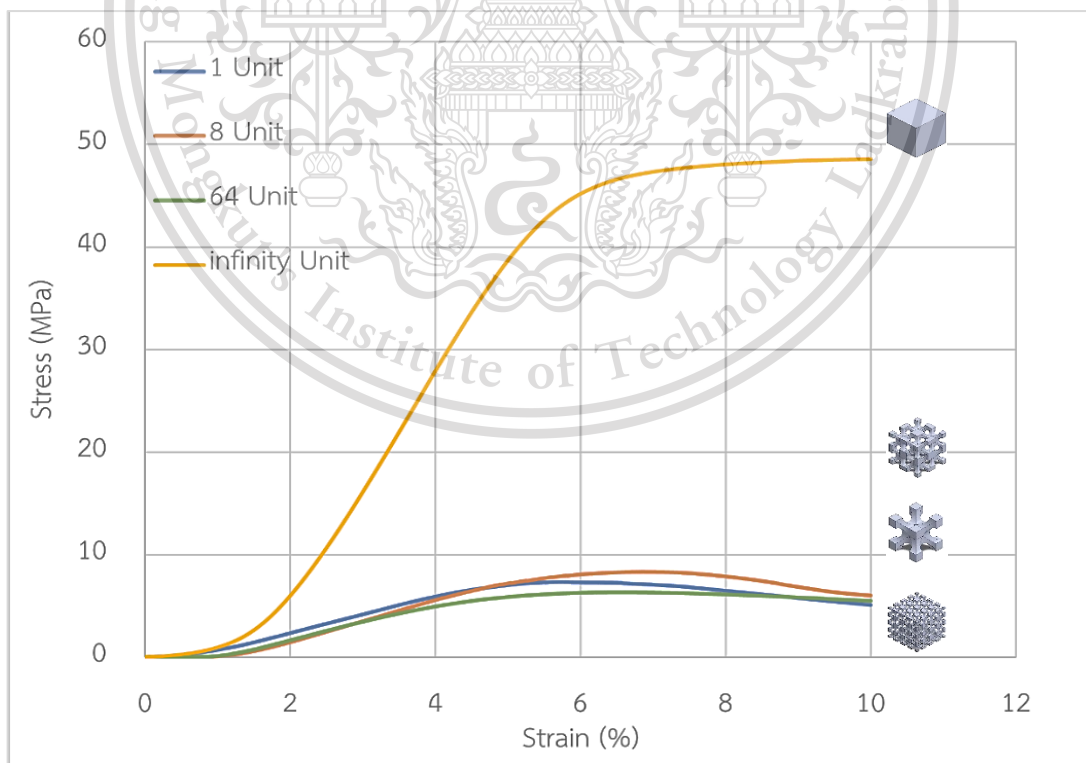
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบการกดอัดชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน  
แบบ 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit

ชิ้นงาน	Yield Stress (0.2%) (MPa)	Max Force (N)	Max Stress Calc. at Entire Areas (MPa)
1 Unit	7.43	2746.51	6.87
8 Units	8.12	3184.70	7.96
64 Units	6.10	1035.61	2.59
Infinity Unit	44.02	34828.87	87.07

#### 4.3.6 ความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ

จากการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการกด เป็นไปดังรูปที่ 4.13 พบว่า ชิ้นงานเกิดการเสียรูปตั้งแต่พีคแรกๆของกราฟแต่ละชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 4.14 เมื่อชิ้นงานเกิดความเสียหายตั้งแต่พีคแรกแล้วช่วงหลังจากนั้นก็ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลจึงนำไปสู่การจำลองทดสอบชิ้นงานอยู่ในช่วง Strain 0-10 % หรือกดเป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.14 ผลการเสียหายตั้งแต่พีคแรกๆของชิ้นงานจากการทดสอบการกดอัดชิ้นงาน 1 8 64 และ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
Infinity Unit

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

#### 4.4 ผลการจำลองการกดขึ้นงาน

หลังจากทำการทดสอบการกดอัดขึ้นงานที่มีโครงสร้างรูพรุนทั้ง 12 ชั้นเสร็จสิ้นแล้ว นำค่าที่ได้จากการทดสอบข้างต้นมาหาค่าเฉลี่ย และป้อนค่าเข้าไปในโปรแกรม Abaqus CAE เพื่อจำลองการทดสอบการกดโดยทำการสร้างแบบจำลองและเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นให้ตรงกับทดสอบจริงมากที่สุด โดยในการทดสอบจริงนั้นได้ทำการกดขึ้นงานทดสอบลงไปเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร แต่ในการจำลองในโปรแกรมนี้จะทำการเซตค่าให้ตกลงไปเพียงแค่ 2 มิลลิเมตรเท่านั้น เนื่องจากขีดจำกัดทางด้านประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล และสาเหตุที่เลือกใช้ค่า 2 มิลลิเมตร เนื่องมาจากผลการทดสอบการกดขึ้นงานทดสอบจริงข้างต้น ที่ขึ้นงาน 1 Unit 8 Units และ 64 Units ช่วงที่แรงเริ่มตกลงจะอยู่ที่ช่วงก่อนถึงระยะ 2 มิลลิเมตร แสดงว่าขาของขึ้นงานเริ่มมีการแตกหักที่ระยะก่อนหน้านั้น จึงได้เลือกค่านี้มาใช้ในโปรแกรม

นอกจากนี้ในการคำนวณค่ามอดูลัสของยังในการทดสอบและการจำลองนี้ ได้ใช้วิธีคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D1621 (Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics<sup>1</sup>) จากสมการ 4.2

$$E_c = \frac{WH}{AD} \quad (4.2)$$

เมื่อ	$E_c$	คือ ค่า Modulus of Elasticity หรือค่า Young's Modulus ในการกด (MPa)
	$W$	คือ แรงที่ใช้ในการกด (นิวตัน)
	$H$	คือ ความสูงของขึ้นงานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดขึ้นงานเริ่มต้นในแนวระดับ (ตารางมิลลิเมตร)
	$D$	คือ ระยะของการเสียรูป (มิลลิเมตร)

##### 4.4.1 ผลการจำลองการกดขึ้นงาน Infinity Unit

การจำลองความสามารถในการรับแรงอัดของขึ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ Infinity Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 2 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของขึ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อขึ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ขึ้นงานจะมีการเสียรูปโดยการพองออกที่บริเวณด้านข้างของขึ้นงาน เมื่อขึ้นงานมีการเสียรูปมากขึ้นค่าความเค้นก็จะสูงขึ้นไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

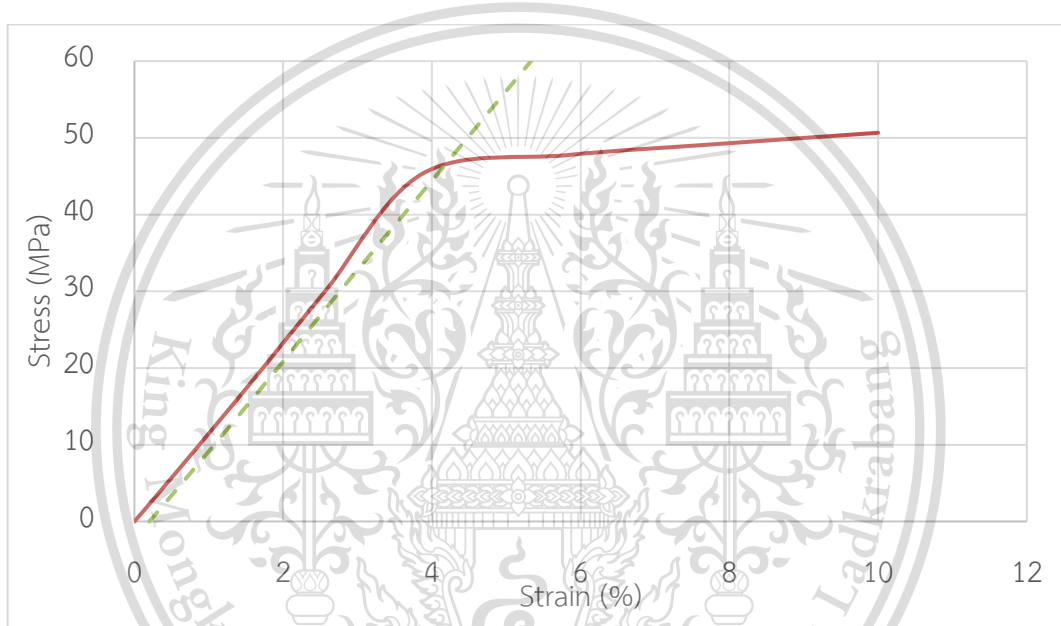
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ตารางที่ 4.9 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit

	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	44.02	711.82	47.90

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit ค่า Yield Stress อยู่ที่ 44.02 MPa ค่า Young's Modulus อยู่ที่ 711.82 MPa ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ 47.90 MPa



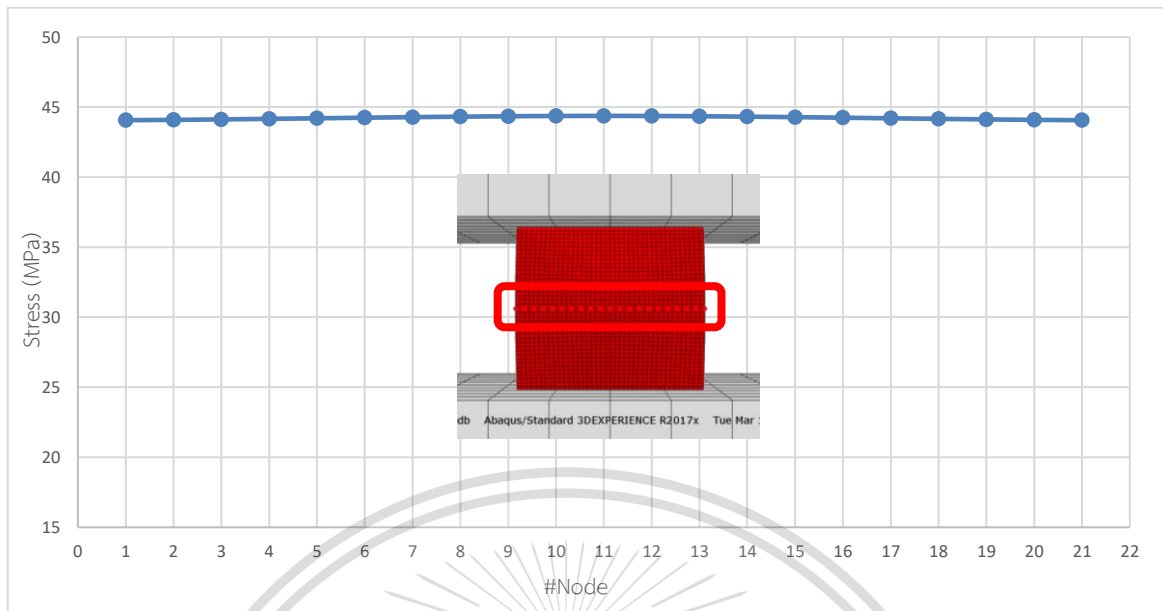
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit

ทำการวัดค่าความเค้นที่แต่ละโหนดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงาน เพื่อดูการกระจายตัวของความเค้นอัด พบว่าความเค้นอัดที่เกิดขึ้นตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเท่ากันในทุกตำแหน่ง แสดงว่าชิ้นงานมีการกระจายตัวของความเค้นอัดสม่ำเสมอทั้งชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.17 ค่าความเค้นที่แต่ละตำแหน่งโหนดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงาน Infinity Unit

#### 4.4.2 ผลการจำลองการกดชิ้นงาน 1 Unit

การจำลองความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 1 Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 2 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูปโดยเกิดการงอที่ส่วนขาของชิ้นงาน ในรูปที่ 4.18 บริเวณที่เป็นสีน้ำเงินคือบริเวณที่เกิดความเค้นต่ำที่สุด ส่วนบริเวณที่เป็นสีเหลืองคือบริเวณที่เกิดความเค้นสูง โดยเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ที่ขอบของชิ้นงาน เนื่องจากบริเวณที่มีความโค้งจะทำให้ความเค้นเกิดการรวมตัวสูงและเกิดการเสียรูปมากกว่าบริเวณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

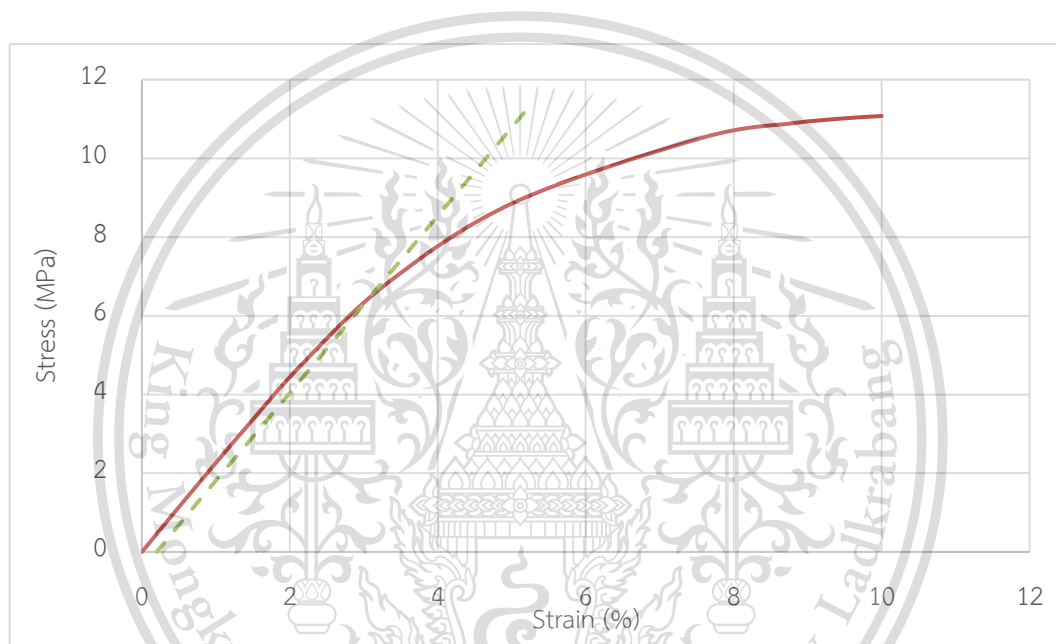
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ตารางที่ 4.10 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit

	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	7.43	130.30	5.09

จากตารางที่ 4.10 พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit ค่า Yield Stress อยู่ที่ 7.43 MPa ค่า Young's Modulus อยู่ที่ 130.30 MPa ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ 5.09 MPa



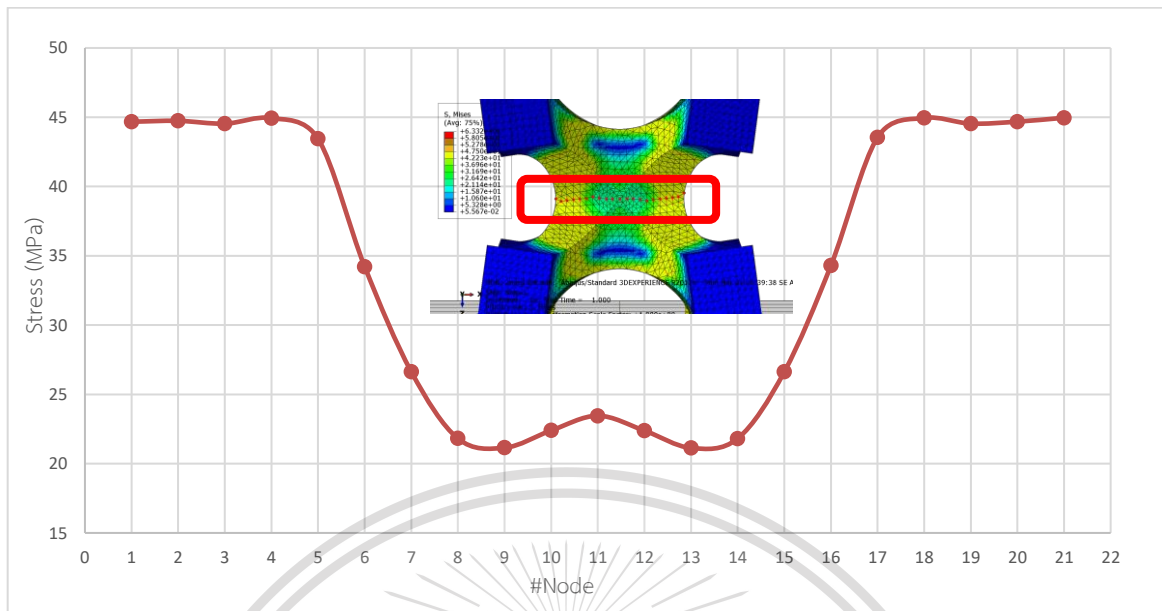
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit

ทำการวัดค่าความเค้นที่แต่ละโหนดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงาน เพื่อดูการกระจายตัวของความเค้นอัด พบว่าที่ตำแหน่งโนดบริเวณขอบของชิ้นงานเกิดค่าความเค้นอัดสูงกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณที่มีความโค้งจะทำให้ความเค้นอัดเกิดการรวมตัวสูง เมื่อวัดค่าความเค้นอัดที่ตำแหน่งโนดเข้ามาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงาน พบว่าค่าความเค้นอัดมีแนวโน้มลดลง และกลับมาเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงาน เนื่องมาจากที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของชิ้นงานนั้นมีลักษณะคล้ายรูปกากบาท เป็นผลทำให้ความเค้นอัดมีการรวมตัวที่จุดกึ่งกลางนั้นสูงกว่าบริเวณรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.20 ค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดยูนิตเซลล์ของชิ้นงาน 1 Unit ที่แต่ละตำแหน่งโหนด

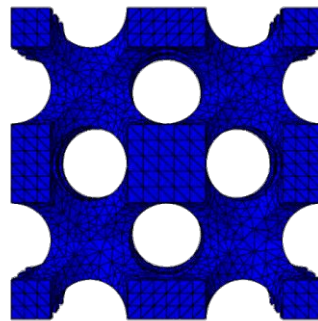
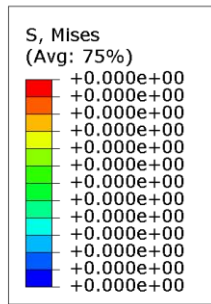
#### 4.4.3 ผลการจำลองการกดชิ้นงาน 8 Unit

การจำลองความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 8 Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 2 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูปโดยเกิดการงอที่ส่วนขาของชิ้นงาน ในรูปที่ 4.21 บริเวณที่เป็นสีน้ำเงินคือบริเวณที่เกิดความเค้นต่ำที่สุด ส่วนบริเวณที่เป็นสีเขียวคือบริเวณที่เกิดความเค้นสูง โดยเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ที่ขอบของชิ้นงาน เนื่องจากบริเวณที่มีความโค้งจะทำให้ความเค้นเกิดการรวมตัวสูงและเกิดการเสียรูปมากกว่าบริเวณอื่น

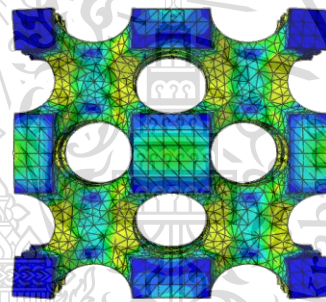
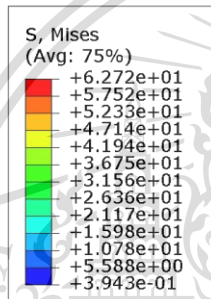
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

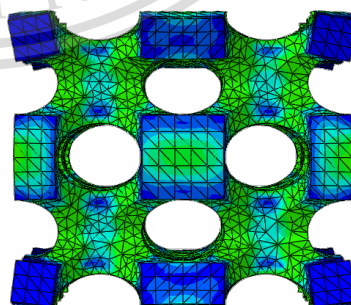
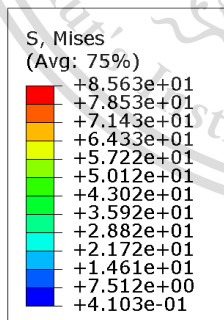
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก) ระยะ 0 มิลลิเมตร



(ข) ระยะ 1 มิลลิเมตร



(ค) ระยะ 2 มิลลิเมตร

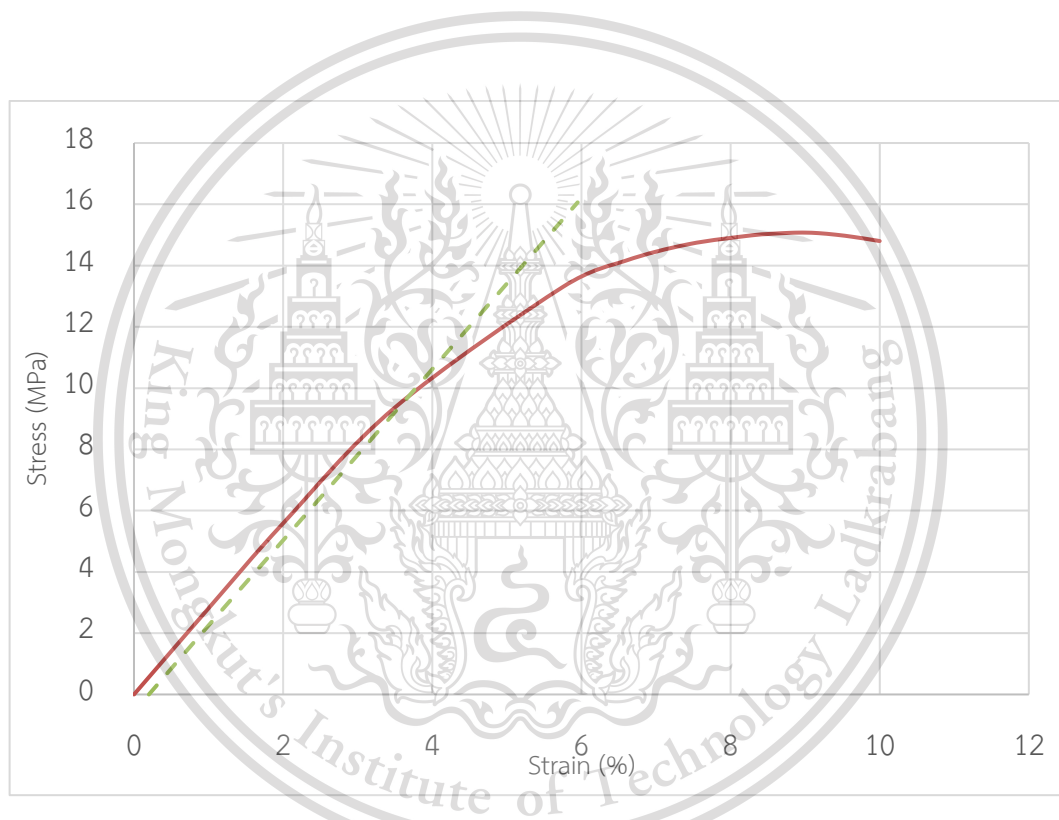
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.11 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units

	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	8.12	153.20	6.03

จากตารางที่ 4.11 พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units ค่า Yield Stress อยู่ที่ 8.12 MPa ค่า Young's Modulus อยู่ที่ 153.20 MPa ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ 6.03 MPa



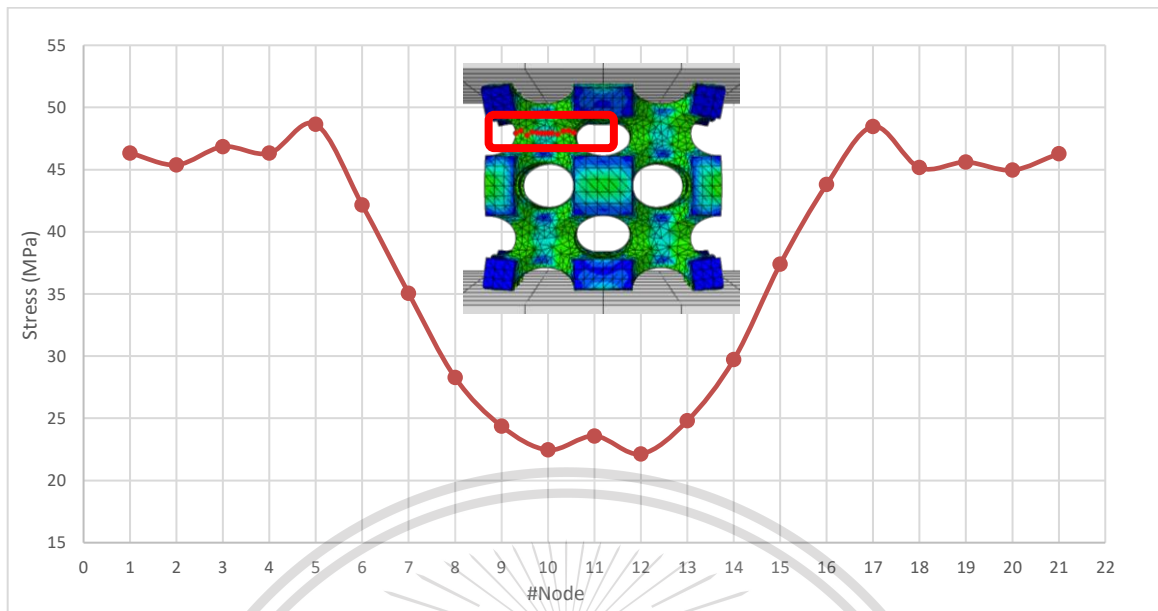
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit

ทำการวัดค่าความเค้นที่แต่ละโหนดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงาน เพื่อดูการกระจายตัวของความเค้นอัด พบว่ามีแนวโน้มการกระจายตัวของความเค้นเช่นเดียวกับของชิ้นงาน 1 Unit ดังแสดงในรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.23 ค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดยูนิตเซลล์ของชิ้นงาน 8 Unit ที่แต่ละตำแหน่งโหนด

#### 4.4.4 ผลการจำลองการกดชิ้นงาน 64 Unit

การจำลองความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนแบบ 64 Unit ที่ถูกกดลงไปเป็นระยะทั้งสิ้น 2 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของชิ้นงานที่ถูกกดที่ระยะ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานถูกกดลงไปเป็นระยะเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะมีการเสียรูปโดยเกิดการงอที่ส่วนขาของชิ้นงาน ในรูปที่ 4.24 บริเวณที่เป็นสีน้ำเงินคือบริเวณที่เกิดความเค้นต่ำที่สุด ส่วนบริเวณที่เป็นสีเหลืองคือบริเวณที่เกิดความเค้นสูง โดยเกิดขึ้นเป็นส่วนมากที่ขอบของชิ้นงาน เนื่องจากบริเวณที่มีความโค้งเว้าจะทำให้ความเค้นเกิดการรวมตัวสูงและเกิดการเสียรูปมากกว่าบริเวณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

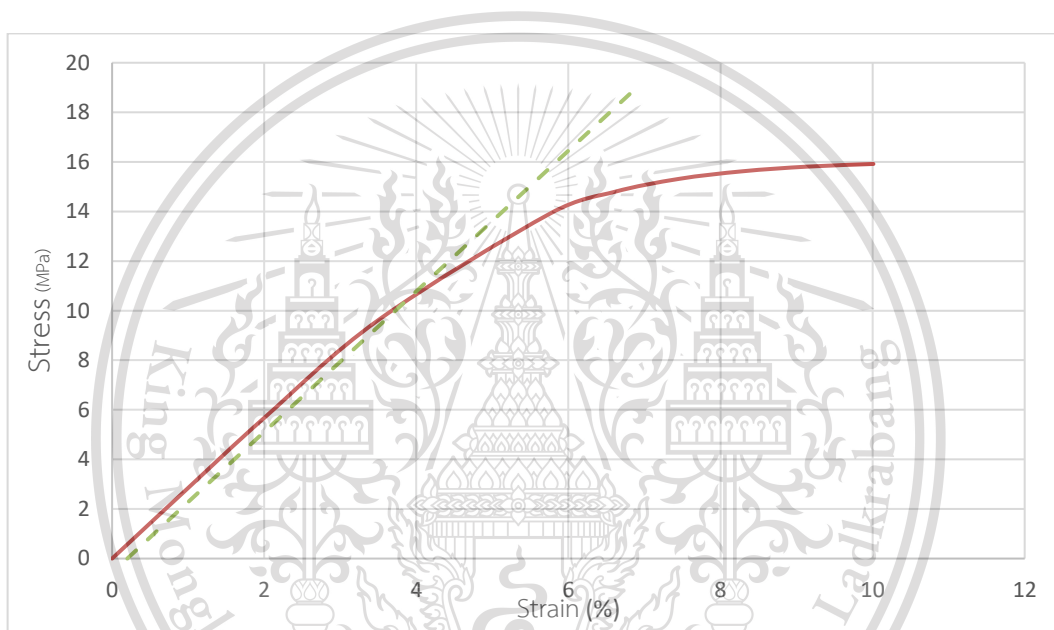
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ตารางที่ 4.12 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units

	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	6.10	118.74	6.06

จากตารางที่ 4.12 พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units ค่า Yield Stress อยู่ที่ 6.10 MPa ค่า Young's Modulus อยู่ที่ 118.74 MPa ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ 6.06 MPa

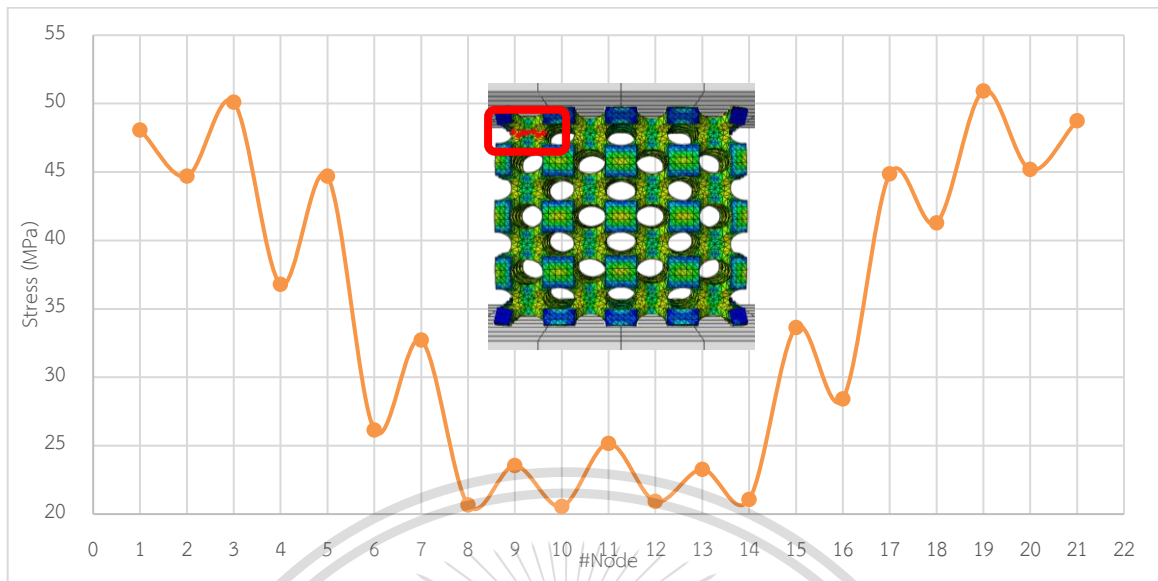


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองของชิ้นงาน Infinity Unit

ทำการวัดค่าความเค้นที่แต่ละโหนดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงาน เพื่อดูการกระจายตัวของความเค้นอัด พบว่ามีแนวโน้มการกระจายตัวของความเค้นอัดเป็นแบบค่าสูงและต่ำสลับกันไปมา ทั้งนี้อาจเป็นสาเหตุมาจากตำแหน่งโหนดที่ทำการเลือกค่าความเค้นอัดมานั้นเป็นตำแหน่งที่ขอบของเอลิเมนต์กับตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นเอลิเมนต์ ทำให้ที่บริเวณขอบมีความเค้นอัดสูงกว่าตำแหน่งที่เป็นกึ่งกลางสลับกันไปมาตลอดทั้งแนว ทั้งนี้หากดูที่แนวโน้มของค่าความเค้นอัดตลอดแนวหน้าตัดของชิ้นงานตามระยะทาง จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มการกระจายตัวของความเค้นเช่นเดียวกับของชิ้นงาน 8 Unit คือมีความเค้นสูงสุดที่บริเวณขอบ และต่ำลงที่บริเวณกึ่งกลางในแต่ละยูนิทเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

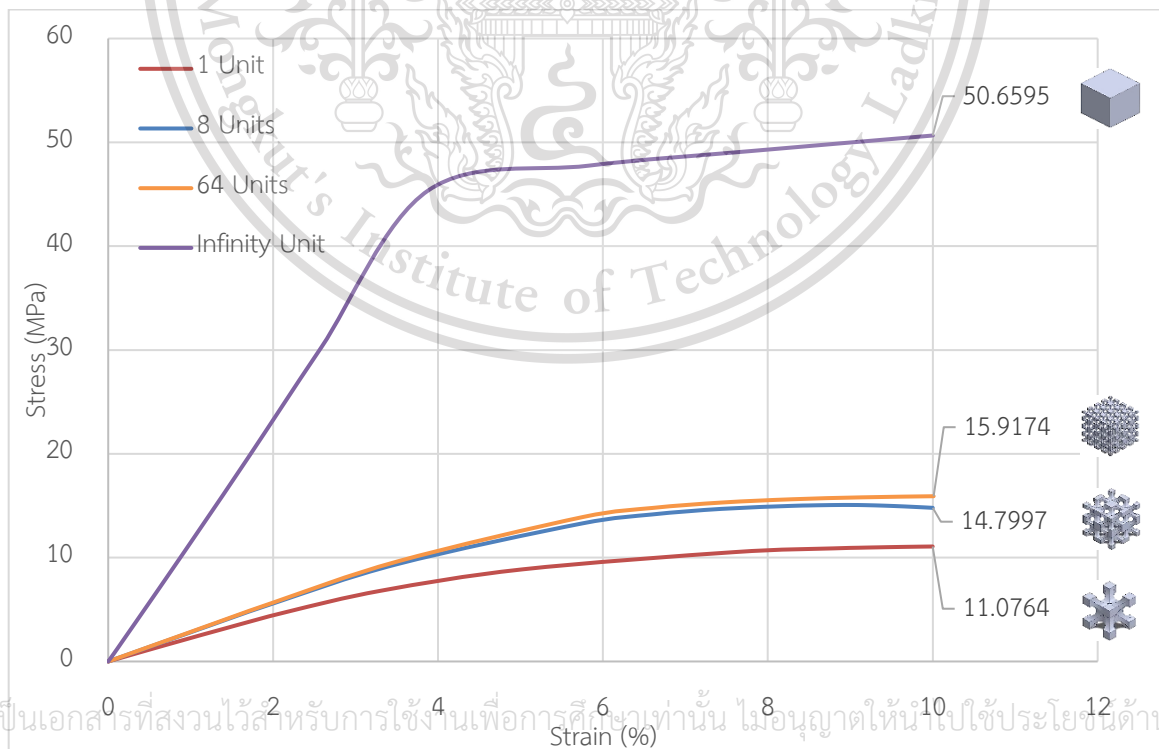
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.26 ค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดยูนิตเซลล์ของชิ้นงาน 64 Unit ที่แต่ละตำแหน่งโหนด

#### 4.4.5 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการกด

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองพฤติกรรมในการรับแรงอัดของชิ้นงานโครงสร้างรูปทรงแปดหน้า 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit ในโปรแกรม ซึ่งแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 4.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการกดชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

พบว่า ที่ค่าความเครียดเท่ากับ 10 ชั้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ Infinity Unit มีความสามารถในการรับความเค้นอัดได้สูงที่สุดที่ 50.6595 MPa รองลงมาคือชั้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Units 8 Units และ 1 Unit โดยมีค่าความเค้นอัดอยู่ที่ 15.9174 MPa 14.7997 MPa และ 11.0764 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากในการออกแบบตัวโครงสร้างชั้นงานที่มีรูปทรง จะช่วยในการลดน้ำหนักของชั้นงาน แต่ผลที่ตามมาคือชั้นงานมีความแข็งแรงต่ำลงมาก เมื่อเทียบกับชั้นงานที่แทบจะไม่มีรูปทรงหรือมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชั้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบ 64 Units 8 Units และ 1 Unit จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นอัดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สาเหตุมาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเท่ากัน

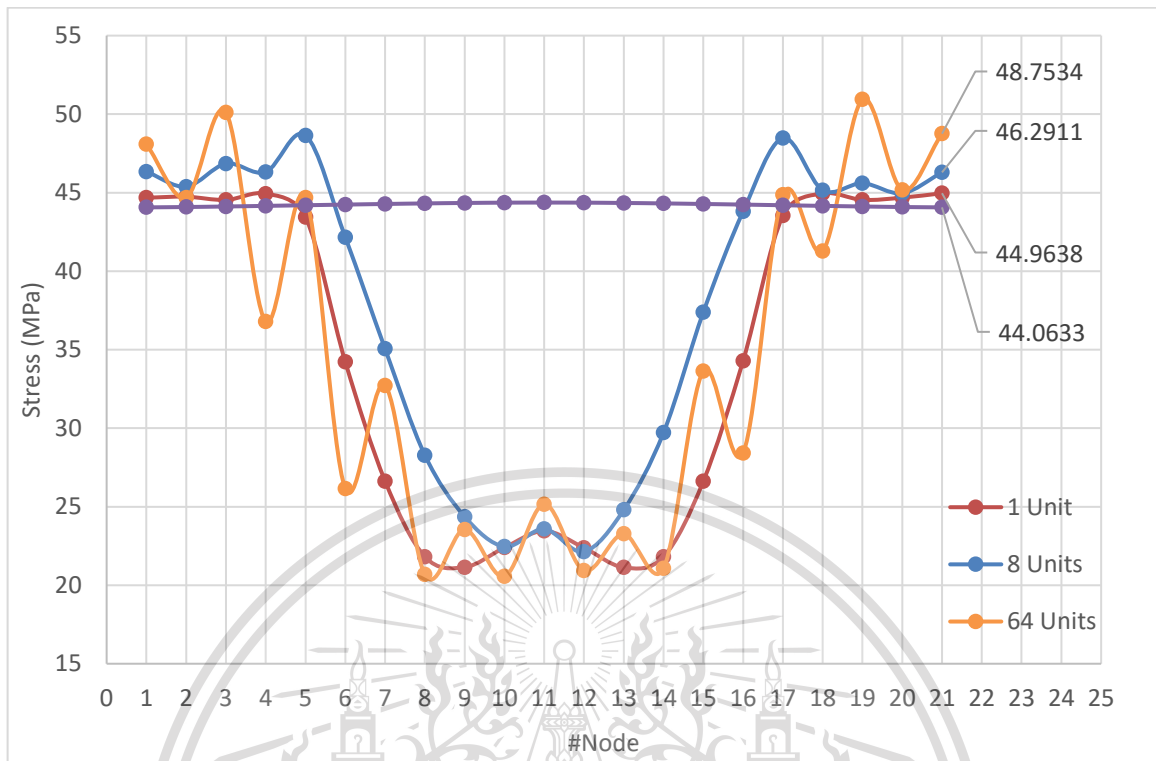
#### 4.4.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดของยูนิตเซลล์

จากการเปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดของยูนิตเซลล์ ที่แต่ละตำแหน่ง โหนดของชั้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit ในโปรแกรม ซึ่งแสดงในรูปของค่าความเค้นอัดที่แต่ละตำแหน่งโหนดในยูนิตเซลล์เดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าที่ตำแหน่งโหนดที่ 1 และโหนดที่ 21 ซึ่งเป็นบริเวณขอบตรงส่วนโค้งของชั้นงาน ค่าความเค้นอัดที่เกิดขึ้นบนชั้นงาน 64 Units มีค่าสูงที่สุด คือ 48.7534 MPa รองลงมาคือ 8 Units 1 Unit และ Infinity Unit โดยมีค่าความเค้นอัดเท่ากับ 46.2911 MPa 44.9638 MPa และ 44.0633 MPa ตามลำดับ เนื่องจากที่บริเวณส่วนโค้งในยูนิตเซลล์ของชั้นงาน 64 Units มีขนาดเล็ก ส่วนโค้งที่เล็กนี้อาจส่งผลให้ความเค้นเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดี หรือเกิด Stress Concentration ที่บริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อย ซึ่งจากความสัมพันธ์ของสมการความเค้น  $\sigma = \frac{F}{A}$  เมื่อ  $\sigma$  คือความเค้น  $F$  คือแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของชั้นงาน จึงทำให้เมื่อพื้นที่หน้าตัดลดลงค่าความเค้นจึงเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้นสูงที่สุด เมื่อเทียบกับชั้นงานโครงสร้างรูปทรงแบบอื่น

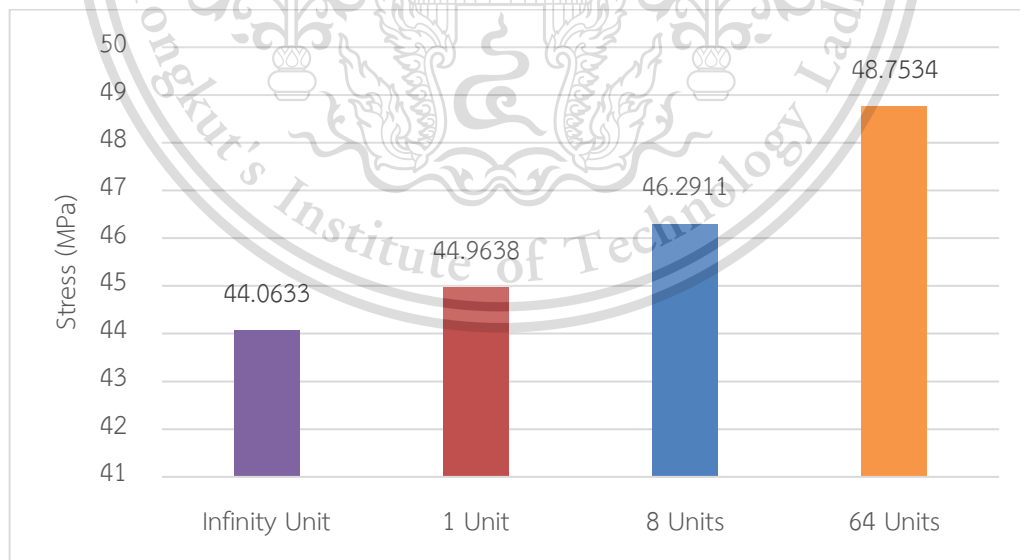
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 80



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นตลอดแนวหน้าตัดของยูนิทเซลล์ ที่แต่ละตำแหน่งโหนดของชิ้นงาน 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบผลจากการวัดค่าความเค้นที่ตำแหน่งโหนดที่ 21 ของชิ้นงาน 1 Unit 8 Units

64 Units และ Infinity Unit  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 81

#### 4.5 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม

ภายหลังการจากจำลองในโปรแกรมเสร็จสิ้นแล้ว นำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างผลการดำเนินงานทั้งสองแบบ

##### 4.5.1 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit

เปรียบเทียบผลการทดสอบการกดชิ้นงานจริงกับการจำลองในโปรแกรมหดแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบการกดอัดกับการจำลองการกดอัดของค่า Yield Stress อยู่ที่ -8.50 เปอร์เซ็นต์ ค่า Young's Modulus อยู่ที่ -25.48 เปอร์เซ็นต์ ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ -5.76 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.13 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit

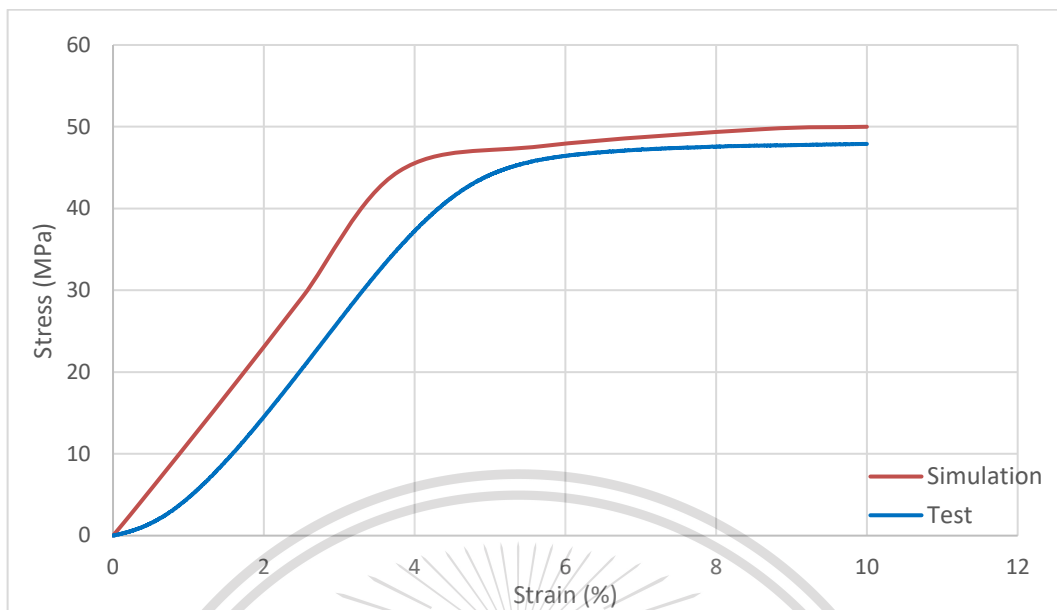
	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	44.02	711.82	47.90
การจำลองการกดอัด	47.76	955.19	50.66
ความคลาดเคลื่อน (%)	-8.50	-25.48	-5.76

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit ดังแสดงในรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดสอบการกดจริงกราฟมีความโค้งเล็กน้อย เนื่องมาจากการที่มีช่องว่างเกิดขึ้นภายในชิ้นงานเป็นผลเนื่องมาจากการพิมพ์สามมิติที่ทำให้ชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous) ความเค้นในช่วงแรกจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้ง เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทดสอบในโปรแกรมจะเห็นได้ว่าความเค้นเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตั้งแต่เริ่มต้น เนื่องมาจากในโปรแกรมไม่ได้มีการจำลองให้ชิ้นงานมีความเป็น Cellular Structure แต่จำลองเป็นชิ้นงานที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อระยะการกดอัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดอัดก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยแรงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกไปเป็นพลาสติก ที่ค่า Young's Modulus เท่ากับ 955.19 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าการทดสอบการกดจริง เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่า หากทำการตัดกราฟในช่วงแรกที่มีความโค้งออกไป อาจทำให้ผลระหว่างการทดสอบและการจำลองมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.30 Stress-Strain Curve การทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน Infinity Unit

#### 4.5.2 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit

เปรียบเทียบผลการทดสอบการกดชิ้นงานจริงกับการจำลองในโปรแกรมหดแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบการกดอัดกับการจำลองการกดอัดของค่า Yield Stress อยู่ที่ -0.27 เปอร์เซ็นต์ ค่า Young's Modulus อยู่ที่ -14.29 เปอร์เซ็นต์ ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ -117.68 เปอร์เซ็นต์

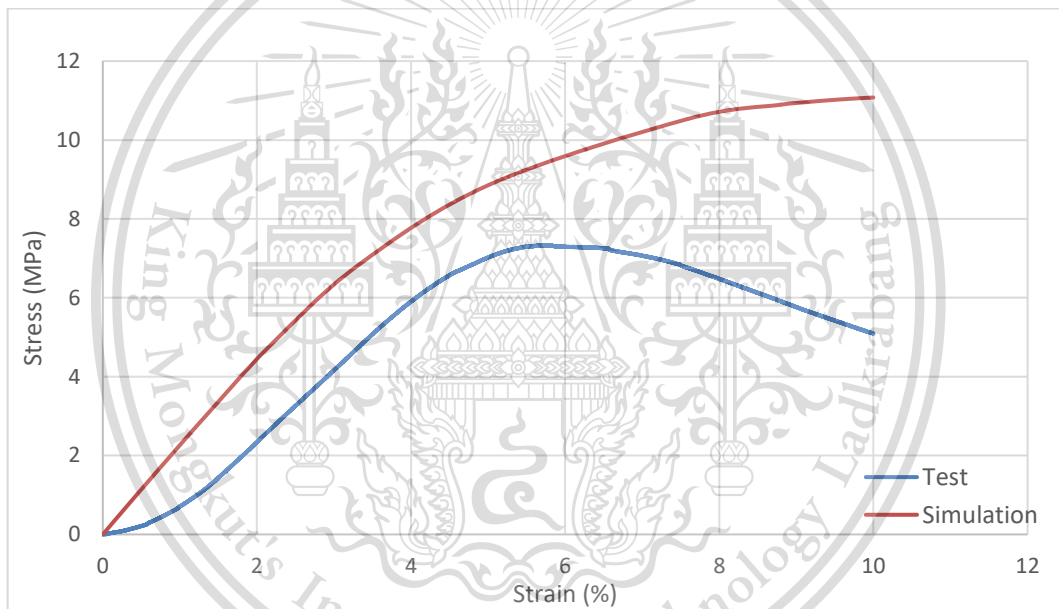
ตารางที่ 4.14 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit

	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	7.43	130.30	5.09
การจำลองการกดอัด	7.45	148.92	11.08
ความคลาดเคลื่อน (%)	-0.27	-14.29	-117.68

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit ดังแสดงในรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดสอบการกดจริงกราฟมีความโค้งเล็กน้อย เนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับผลที่เกิดขึ้นในการทดสอบการกดอัดชิ้นงาน Infinity Unit และเมื่อระยะการกดอัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดอัดที่สูงขึ้นตามไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ไปด้วย โดยแรงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกไปเป็นพลาสติก ที่ค่า Young's Modulus เท่ากับ 148.92 MPa ในช่วงหลังจากเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นไปจนถึงระยะการกุด 2 มิลลิเมตร กราฟมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงมากระหว่างการทดสอบกับการจำลองเป็นผลเนื่องมาจากในการทดสอบการกุดชิ้นงาน 1 Unit ชิ้นงานเกิดความเสียหายที่บริเวณขาของชิ้นงาน ซึ่งเกิดการแตกหัก ทำให้แรงที่ใช้ในการกุดต่ำลง ส่งผลให้ความเค้นอัดต่ำลงตามไปด้วย แต่ในการจำลองหลังจากเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก ความเค้นอัดยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คาดว่าเป็นผลจากการที่โปรแกรมทำการจำลองถึงเฉพาะการเสียรูป แต่ไม่สามารถจำลองถึงการแตกหักที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นผลที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือเฉพาะในช่วงที่เป็นอีลาสติกเท่านั้น แต่หลังจากช่วงพลาสติกเป็นต้นไปอาจต้องมีการศึกษาถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้โปรแกรมเพิ่มเติม



รูปที่ 4.31 Stress-Strain Curve การทดสอบการกุดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 1 Unit

#### 4.5.3 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกุดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units

เปรียบเทียบผลการทดสอบการกุดชิ้นงานจริงกับการจำลองในโปรแกรมดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบการกุดอัดกับการจำลองการกุดอัดของค่า Yield Stress อยู่ที่ -15.39 เปอร์เซ็นต์ ค่า Young's Modulus อยู่ที่ -22.29 เปอร์เซ็นต์ ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ -145.44 เปอร์เซ็นต์

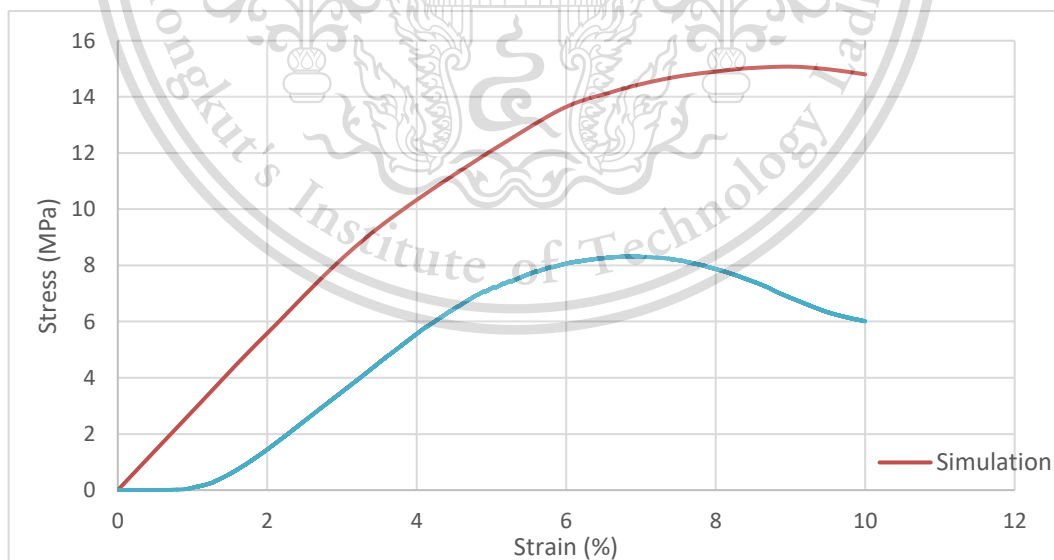
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.15 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม  
ของชิ้นงาน 8 Units

	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	8.12	153.20	6.03
การจำลองการกดอัด	9.37	187.35	14.80
ความคลาดเคลื่อน (%)	-15.39	-22.29	-145.44

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดสอบการกดจริงกราฟมีความโค้งเล็กน้อย เนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับผลที่เกิดขึ้นในการทดสอบการกดอัดชิ้นงาน Infinity Unit และเมื่อระยะการกดอัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดอัดก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยแรงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกไปเป็นพลาสติก ที่ค่า Young's Modulus เท่ากับ 187.35 MPa ในช่วงหลังจากเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นไปจนถึงระยะการกด 2 มิลลิเมตร กราฟมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงมากระหว่างการทดสอบกับการจำลองเป็นผลเนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับผลที่เกิดขึ้นในการทดสอบและจำลองการกดอัดชิ้นงาน 1 Unit



รูปที่ 4.32 Stress-Strain Curve การทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 8 Units

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.5.4 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units

เปรียบเทียบผลการทดสอบการกดชิ้นงานจริงกับการจำลองในโปรแกรมดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบการกดอัดกับการจำลองการกดอัดของค่า Yield Stress อยู่ที่ -70.49 เปอร์เซ็นต์ ค่า Young's Modulus อยู่ที่ -75.17 เปอร์เซ็นต์ ค่า Stress at 2mm Disp. อยู่ที่ -162.71 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.16 ค่าคุณสมบัติเชิงกลจากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units

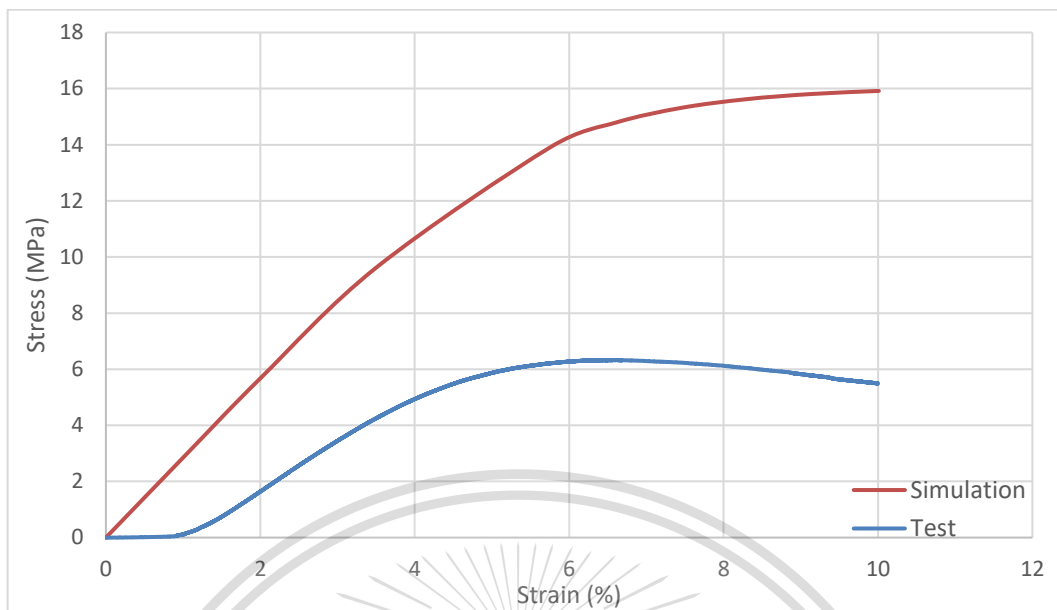
	Yield Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Stress at 2mm Disp. (MPa)
การทดสอบการกดอัด	6.10	118.74	6.06
การจำลองการกดอัด	10.40	208.00	15.92
ความคลาดเคลื่อน (%)	-70.49	-75.17	-162.71

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Unit ดังแสดงในรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดสอบการกดจริงกราฟมีความโค้งเล็กน้อย เนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับผลที่เกิดขึ้นในการทดสอบการกดอัดชิ้นงาน Infinity Unit และเมื่อระยะการกดอัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการกดอัดก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยแรงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกไปเป็นพลาสติก ที่ค่า Young's Modulus เท่ากับ 208.00 MPa ซึ่งค่าที่ได้จากการจำลองมีความแตกต่างจากการทดสอบจริงค่อนข้างมาก เป็นผลมาจากในการทดสอบการกดอัดชิ้นงาน 64 Units โครงสร้างของชิ้นงานที่ทำการพิมพ์ 3 มิติไม่มีความสมบูรณ์ เนื่องจากหัวฉีดพลาสติกของเครื่องพิมพ์มีขนาดใหญ่กว่าความละเอียดของชิ้นงานที่ต้องการ ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างเปราะ ดังนั้นในขั้นตอนการนำเอาซีพอร์ตที่ติดอยู่กับชิ้นงานออกทำให้ขาบางส่วนของชิ้นงานหลุดออกมาด้วย ส่วนในช่วงหลังจากเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นไปจนถึงระยะการกด 2 มิลลิเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงมากระหว่างการทดสอบกับการจำลองเป็นผลเนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับผลที่เกิดขึ้นในการทดสอบและจำลองการกดอัดชิ้นงาน 1 Unit

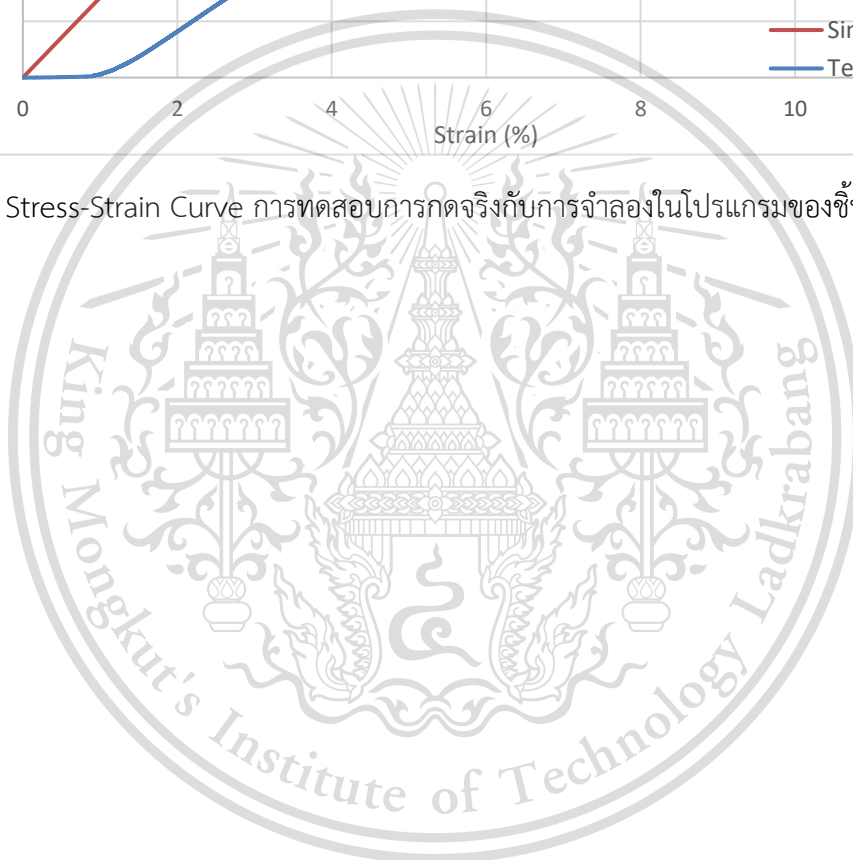
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.33 Stress-Strain Curve การทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมของชิ้นงาน 64 Units



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะของการศึกษาพฤติกรรมการกดของพลาสติก ABS แบบมีรูพูนโดยการทดสอบการอัดและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

1. สรุปผลการวิจัย
2. ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

**5.1.1 ผลการวิจัยโครงสร้างรูพูนแตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ** เมื่อทำการออกแบบชิ้นงานให้มีจำนวนโครงสร้างรูพูนแตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ 1 Unit 8 Units 64 Units และ Infinity Unit ตามลำดับ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน ได้แก่ ปริมาตร น้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์ความพูนของชิ้นงาน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนยูนิตเซลล์จาก 1 Unit ไปเป็น 8 Units และ 64 Units ค่าคุณสมบัติทางกายภาพที่ทำการศึกษาระหว่างยูนิตเซลล์ทั้งสามแบบมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรชิ้นงานทั้งสามแบบเท่ากับ 3.78 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักเท่ากับ 0.14 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ความพูนเท่ากับ 0.00047

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน 1 Unit 8 Units และ 64 Units เทียบกับชิ้นงาน Infinity Unit พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งในด้านของปริมาตร น้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์ความพูนของชิ้นงาน โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาตรชิ้นงานทั้งสามแบบเทียบกับชิ้นงาน Infinity Unit เท่ากับ 3832.24 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักเท่ากับ 4.43 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ความพูนเท่ากับ 47.90

**5.1.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบจากการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม Abaqus CAE** ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม Abaqus CAE ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์ความแตกต่างที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความ

เค้น-ความเครียด และค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบจริงและการจำลองในโปรแกรม พบว่าที่ชิ้นงาน Infinity Unit ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมมีความใกล้เคียงกัน ในส่วนของชิ้นงาน 1 Unit 8 Units และ 64 Units พบว่าผลที่ได้จากการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรมมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนยูนิตเซลล์เพิ่มขึ้น ความแตกต่างยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบการกดจริงกับการจำลองในโปรแกรม เนื่องมาจาก 2 สาเหตุหลัก คือผลจากการปรีนธ์ 3 มิติที่ทำให้ชิ้นงานที่นำไปใช้ในการทดสอบจริงมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous) และผลจากการที่เกิดการรวมตัวกันของความเค้น (Stress Concentration) ที่บริเวณส่วนโค้งของโครงสร้างชิ้นงาน ส่งผลให้ที่ชิ้นงานที่มีจำนวนยูนิตเซลล์มาก ๆ อย่างชิ้นงาน 64 Units เกิดการแตกหักได้เร็วที่สุดใน การทดสอบจริง โดยสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่สามารถจำลองถึงคุณสมบัติ ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและการแตกหักของชิ้นงานได้ ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับในโปรแกรมมี ความแตกต่างกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

**5.2.1 การออกแบบโครงสร้างของชิ้นงาน** ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของชิ้นงาน ขึ้นมาโดยที่พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีความแตกต่างกันเพียง เล็กน้อย ส่งผลให้ผลที่ได้จากการทดสอบจริงและจำลองถึงความสามารถในการรับแรงกดอัดของชิ้นงาน โครงสร้างรูปทรงทั้งสามแบบ คือ 1 Unit 8 Units และ 64 Units มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งหากต้องการ ที่จะศึกษาถึงความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนมากขึ้น อาจทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ความ พรุณของชิ้นงานให้มีความแตกต่างกัน หรือออกแบบชิ้นงานที่มีจำนวนยูนิตสูงขึ้น เพื่อให้เห็นถึงความ แตกต่างและแนวโน้มอาจจะที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสามารถนำไปสร้างเป็นสมการต่อไปได้

**5.2.2 การสร้างแบบจำลองการกดในโปรแกรม** ในการสร้างแบบจำลองการกดในโปรแกรม หากสามารถ สร้างแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงได้มากที่สุด ก็จะทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำ ใกล้เคียงกับ ความเป็นจริงมากขึ้น โดยในส่วนที่คาดว่าโปรแกรมไม่สามารถจำลองได้ คือ คุณสมบัติความเป็น Non-Homogeneous ของชิ้นงาน และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมไปถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ที่ อาจทำให้โปรแกรมสามารถจำลองให้ชิ้นงานในส่วนของเกิดการแตกหักได้ ซึ่งในส่วนนี้อาจต้อง ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสามารถและขีดจำกัดของโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองการทดสอบ ให้เป็นไปตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 89

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ภิกษุ รุ่งโรจน์ชัยพร, 2554. วัสดุพูนคืออะไร.วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ฉบับที่1.
- [2] อภิรัฐ จันทลักษณ์ วัชรพล ชยประเสริฐ และ เอนก สุขเจริญ, 2555. การวัดความพูนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน.รายงานการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [3] Mohsenin, N.N., 1986. Physical properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics, and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers, New York, NY.
- [4] Oraib Al-Ketan, Reza Rowshan, Rashid K. Abu Al-Rub, 2018. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut,skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. Masdar Institute of Science and Technology, Abu Dhabi, UAE.
- [5] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2560. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING). (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์, 2538. การปฏิบัติงานทดสอบวัสดุ(แบบทำลาย). (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร : บริษัทสยามสปอร์ต ซินดิเคท จำกัด.
- [7] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร:บริษัท พิมพ์ดีการพิมพ์ จำกัด.
- [8] เกียรติศักดิ์ วงศ์พร้อมรัตน์, 2556. รอบรู้เรื่องพลาสติก PLASTICS KNOWLEDGE. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: บริษัท วี พลาสติก (ไทยแลนด์) จำกัด.
- [9] สมบุญ สหสิทธิวัฒน์, 2560. การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ:ฝืนที่เป็นจริง.บทความศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ฉบับที่ 85.
- [10] <https://www.print3dd.com/what-is-fdm-fff-3d-printer/>. FDM/FFF 3D Printer คืออะไร.
- [11] <https://www.theadditive3d.com/post/how-to-fff-3d-printing-work>. วิธีการทำงานเครื่องพิมพ์สามมิติ FDM / FFF (เชิงลึก).
- [12] [https://www.trl.com/astm\\_d1621\\_compression\\_testing\\_of\\_rigid\\_cellular\\_plastics](https://www.trl.com/astm_d1621_compression_testing_of_rigid_cellular_plastics). ASTM D1621 – COMPRESSION TESTING OF RIGID CELLULAR PLASTICS.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

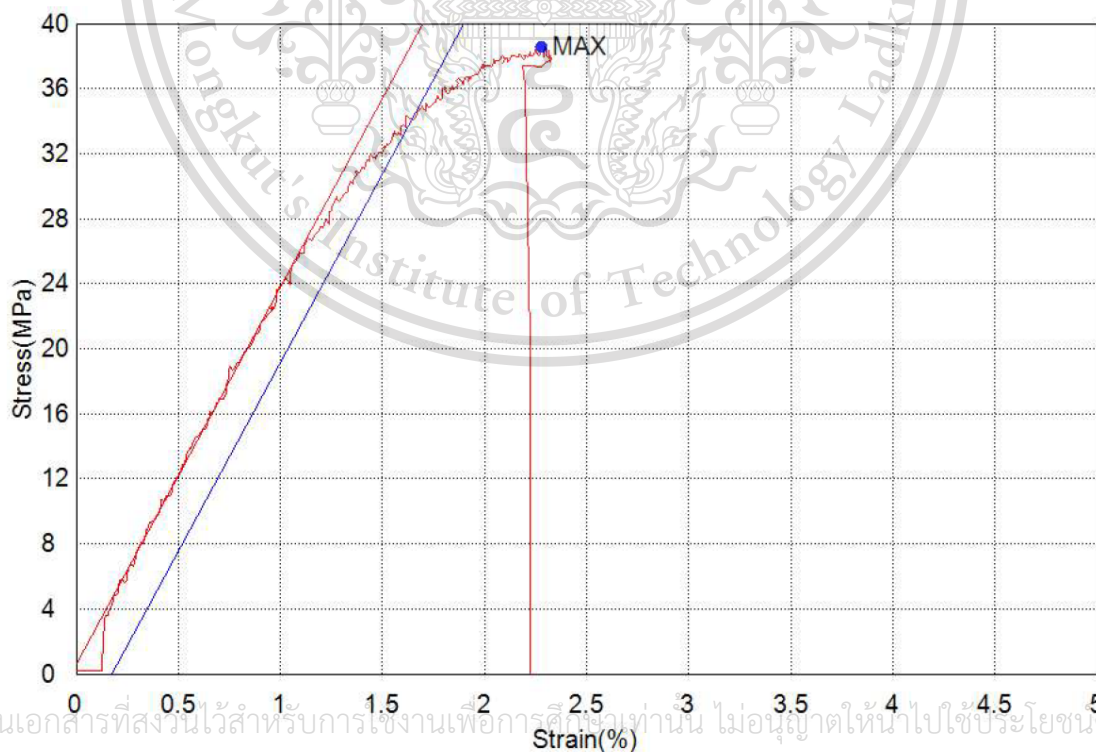
Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 92

Product Name	Plastic	Testing Machine	AG-X
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	50mm/min	Shape	Rod
No of Batches:	1	Qty/Batch:	3
Ext.1 Gauge Length	90mm		

Name	Elastic	YP(%FS)_Stress	YS1_Stress	Max_Stress
Parameters	Stress 10 - 20 MPa	0.2 %	0.2 %	Calc. at Entire Areas
Unit	MPa	MPa	MPa	MPa
1_1	2321.18	--	34.0520	38.5654
1_2	2378.46	--	30.1466	35.3737
Average	2349.82	--	32.0993	36.9696
Standard Deviation	40.5031	--	2.76153	2.25687

Name	Break Ext.1(Strain)	Fitted Strain
Parameters	Sensitivity: 10	
Unit	%	%
1_1	--	2.98889
1_2	--	3.17778
Average	--	3.08334
Standard Deviation	--	0.13357

รูปที่ ผ.1 ข้อมูลและคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการดึงทดสอบทั้ง 2 ครั้ง

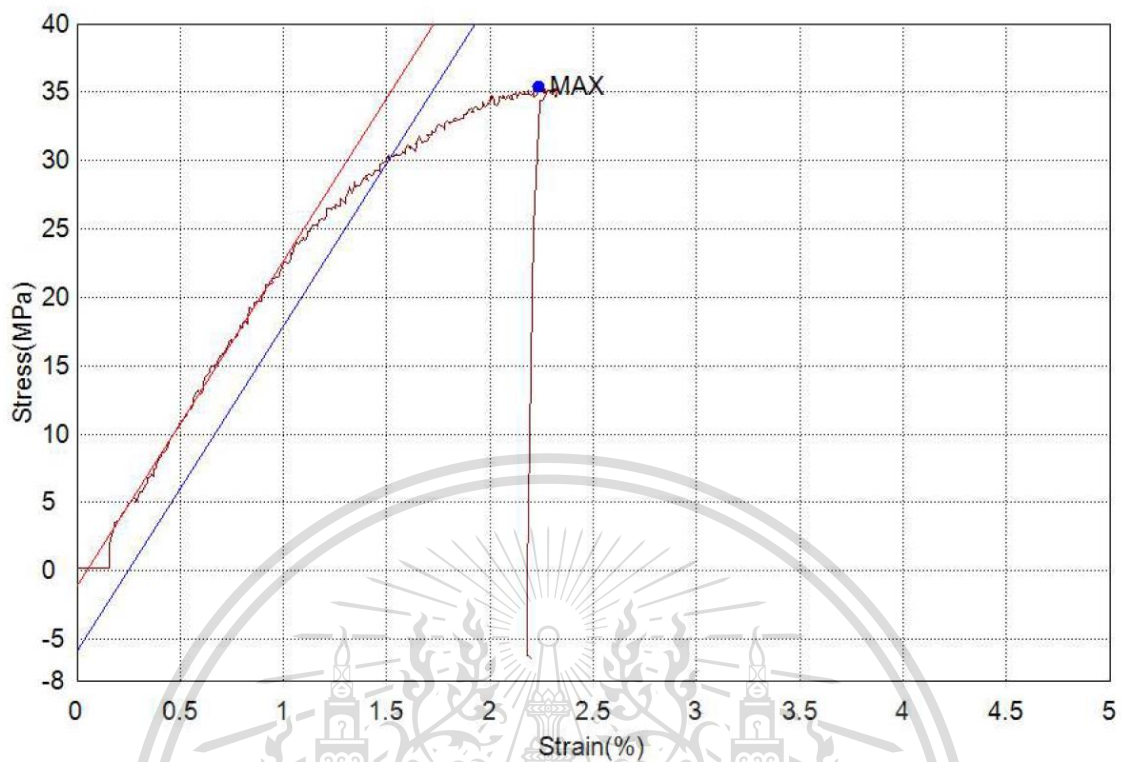


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ผ.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจากการดึงทดสอบครั้งที่ 1

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ ๘.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจากการดึงทดสอบครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 94

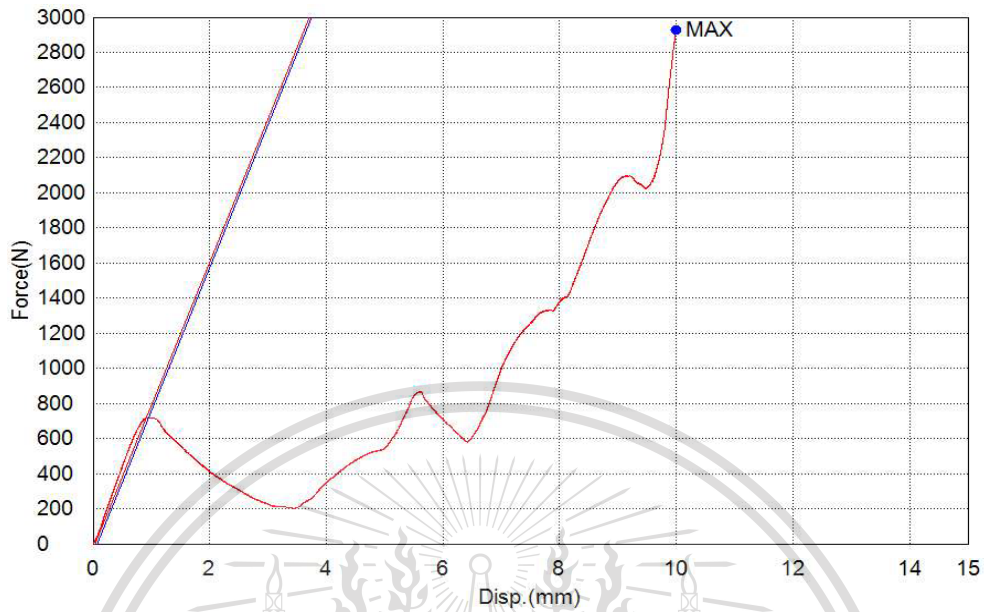


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

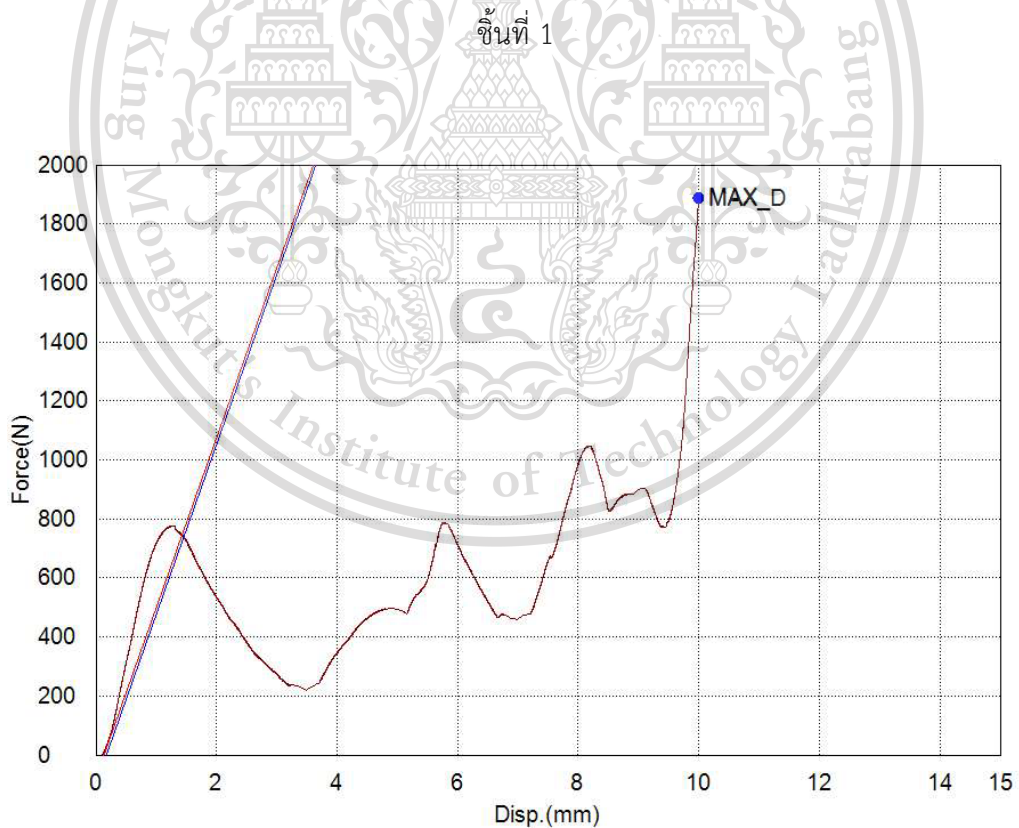
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงานจากเครื่อง UTM, SHIMADZU AGS-X Series ของชิ้นงาน 1 Unit



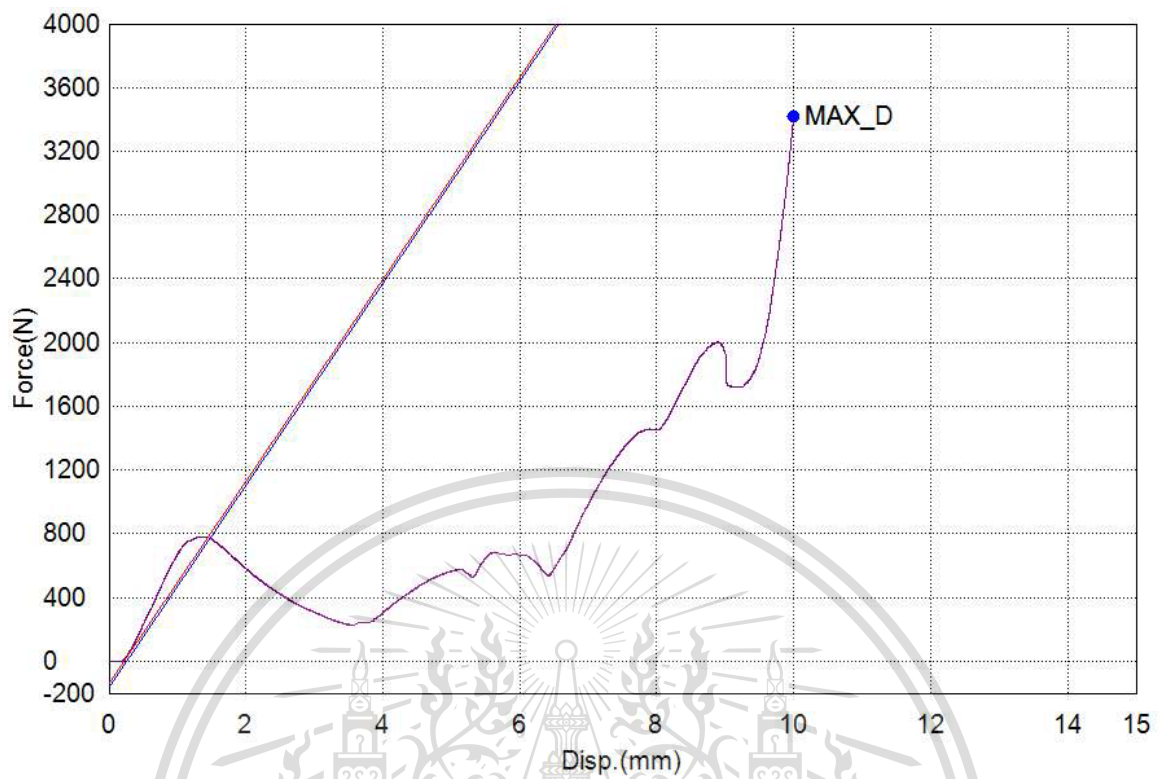
รูปที่ ๔.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 1 Unit



รูปที่ ๕.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ-1 Unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ชั้นที่ 2  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ ๘.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 1 Unit

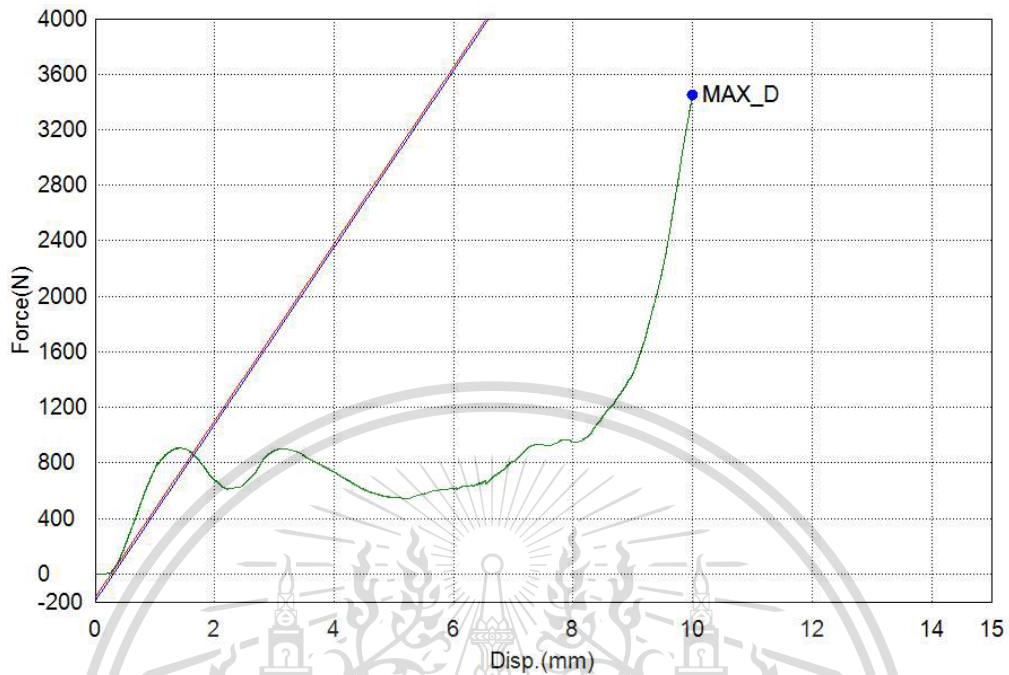
ชั้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

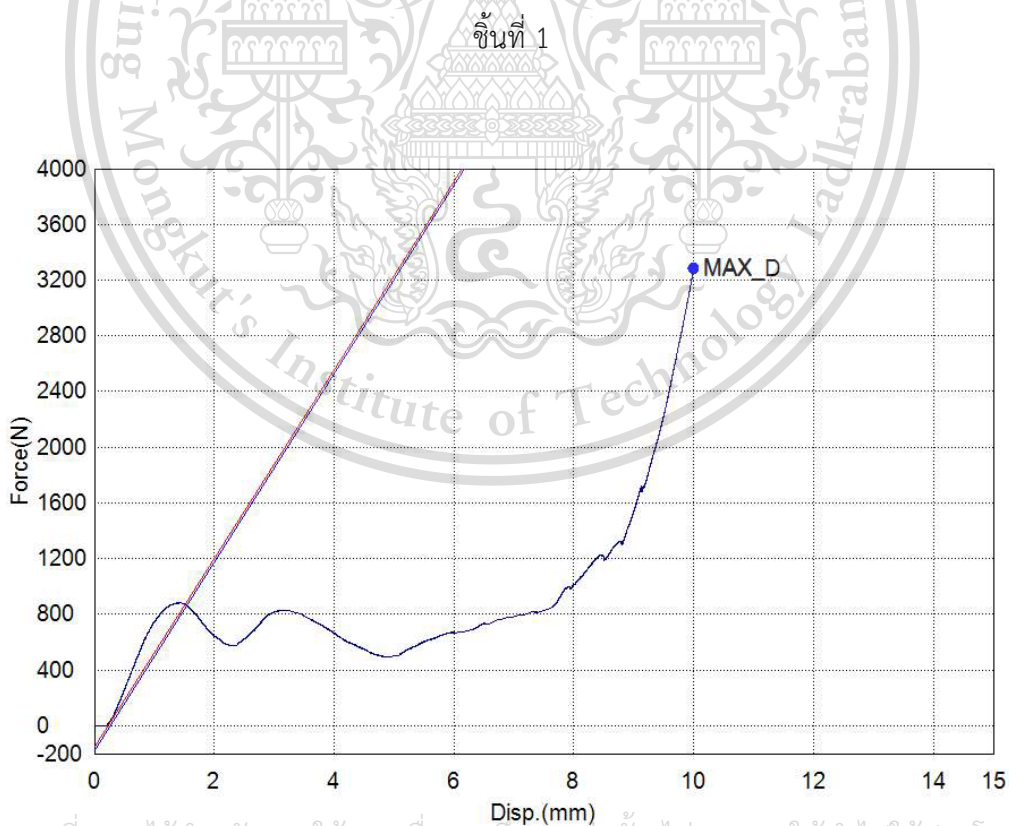
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงานจากเครื่อง UTM, SHIMADZU AGS-X Series ของชิ้นงาน 8 Units



รูปที่ ๗.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 8 Units



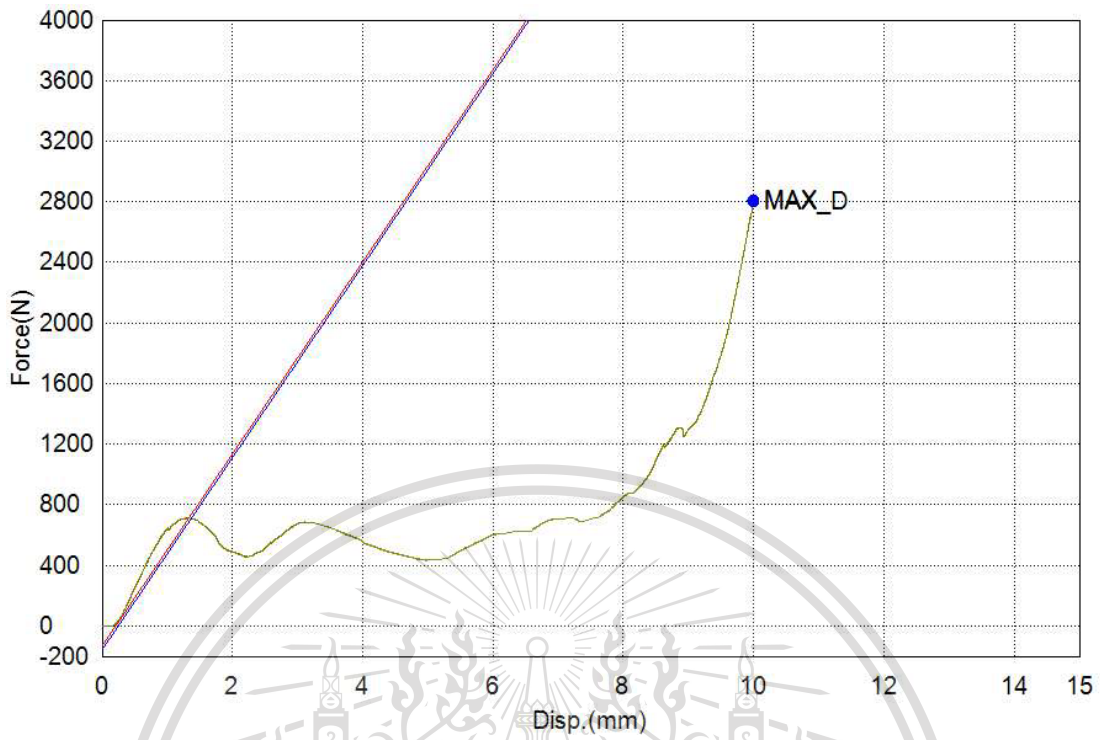
รูปที่ ๗.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 8 Units

ชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ ๘.๙ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 8 Units ขึ้น

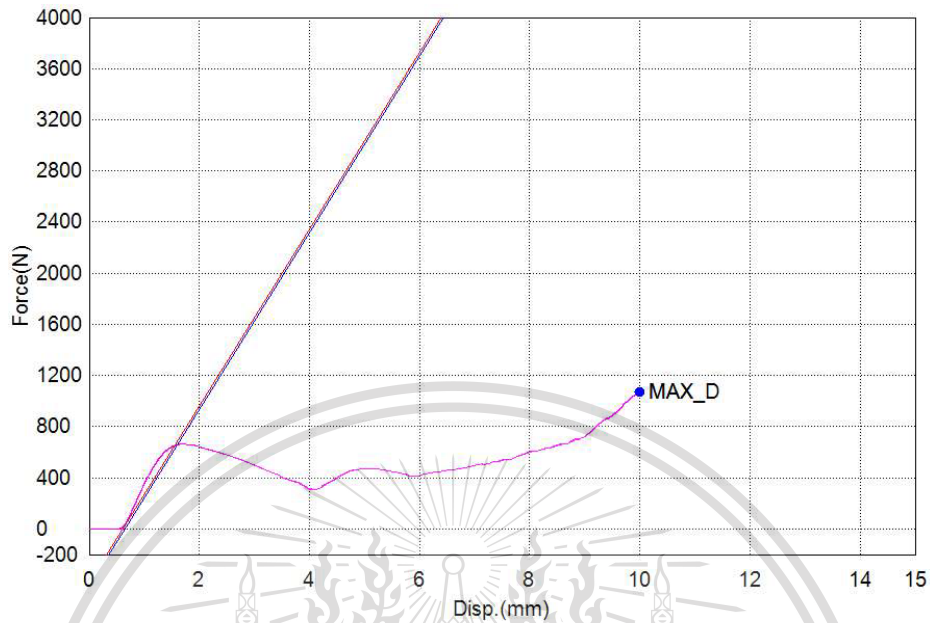
ที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

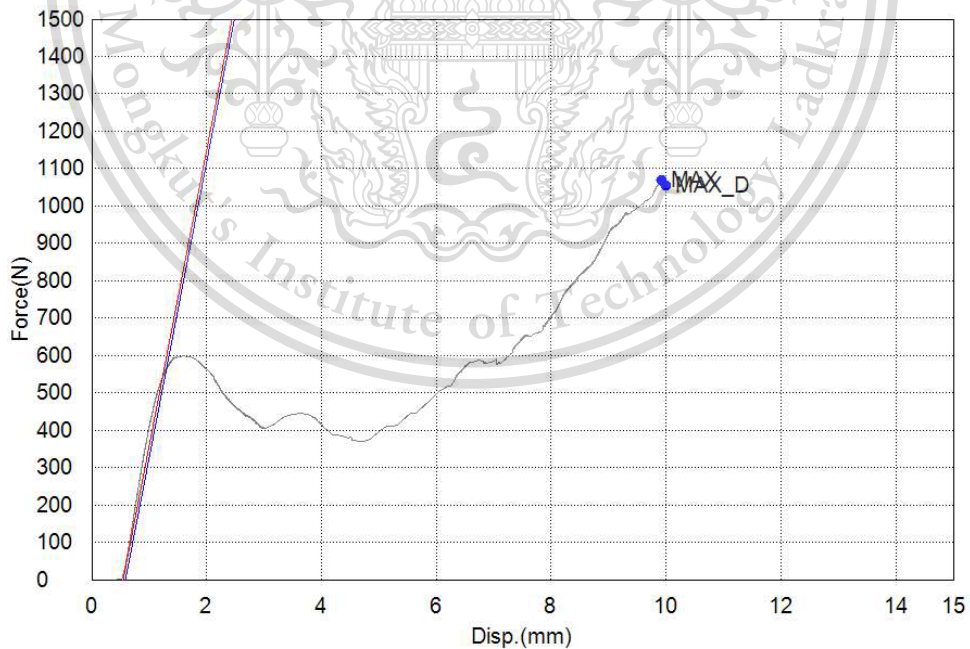
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3. ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงานจากเครื่อง UTM, SHIMADZU AGS-X Series ของชิ้นงาน 64 Units



รูปที่ ๑๐ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 64 Units

ชั้นที่ 1



รูปที่ ๑๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 64 Units

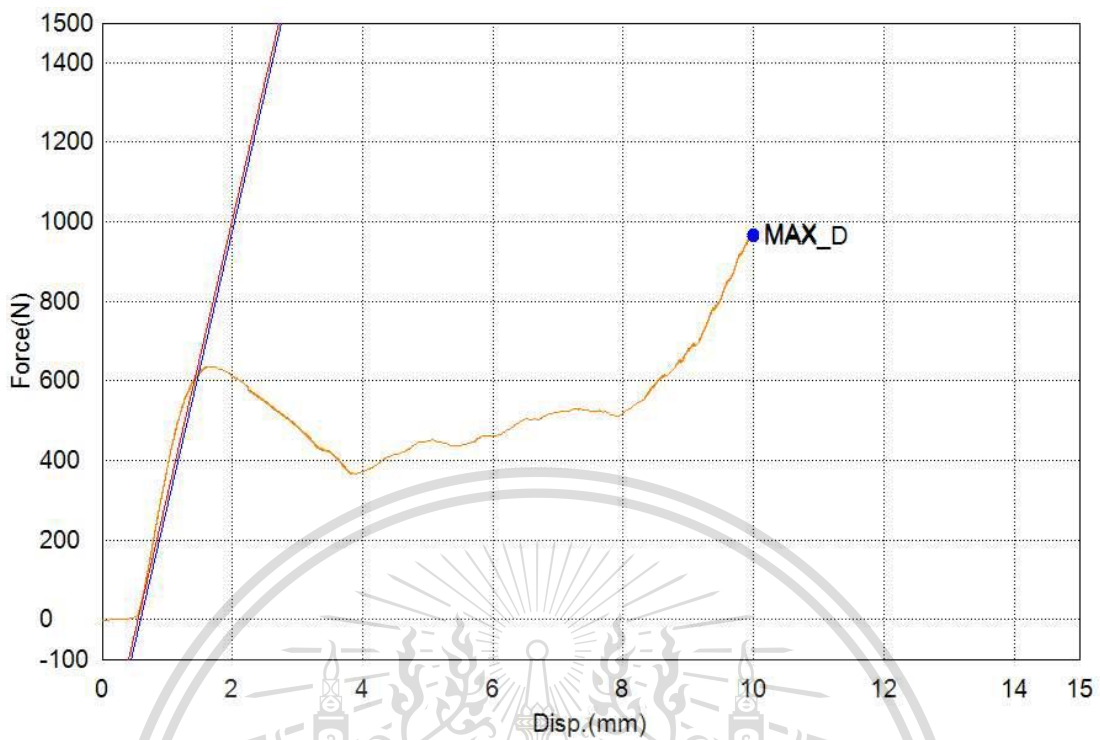
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ชั้นที่ 2

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ๘.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ 64 Units

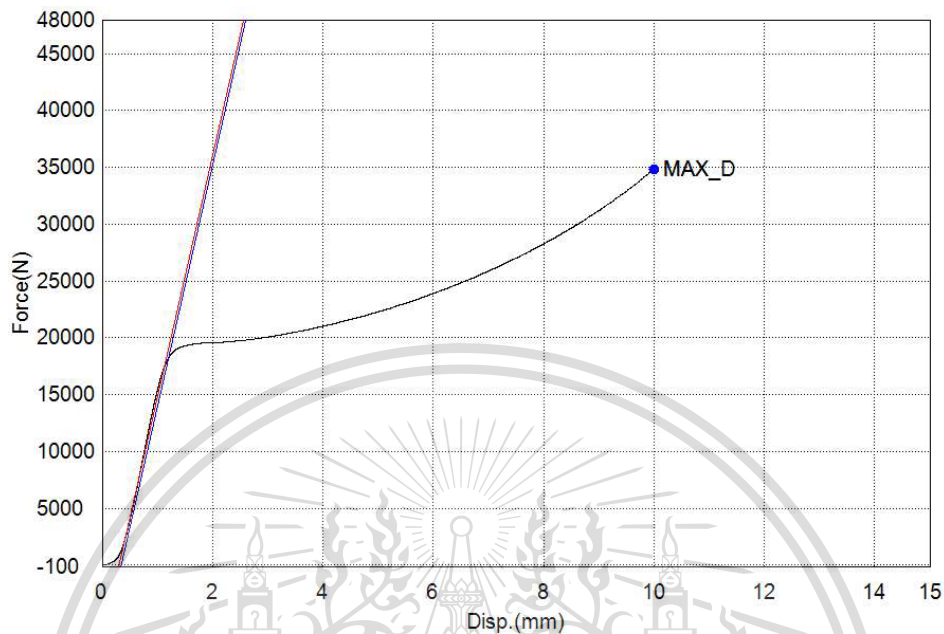
ชั้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

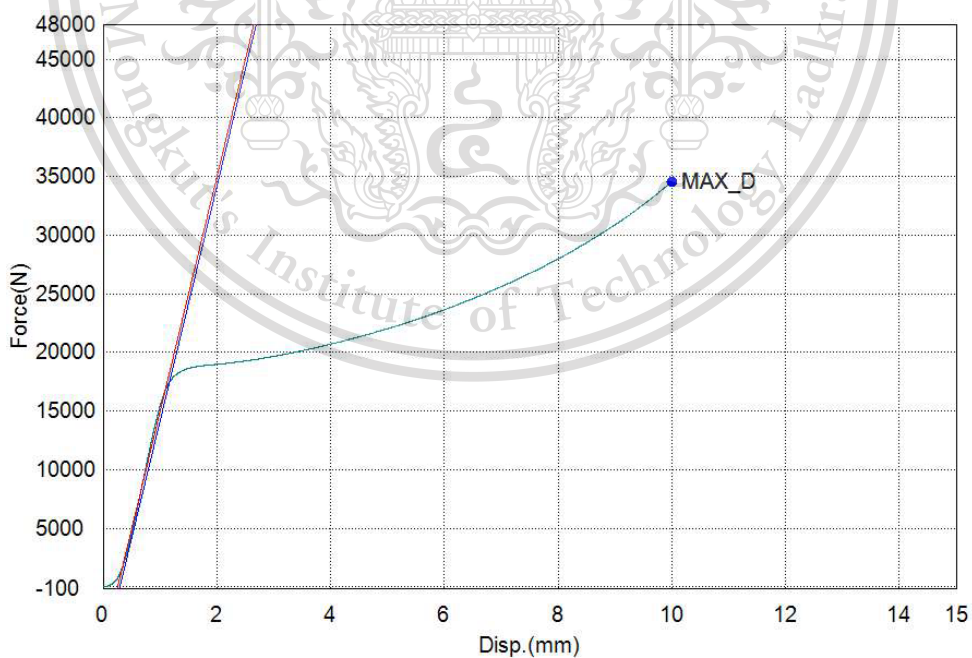
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, 101 and cite the document when use.

4. ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงานจากเครื่อง UTM, SHIMADZU AGS-X Series ของชิ้นงาน  
Infinity Unit



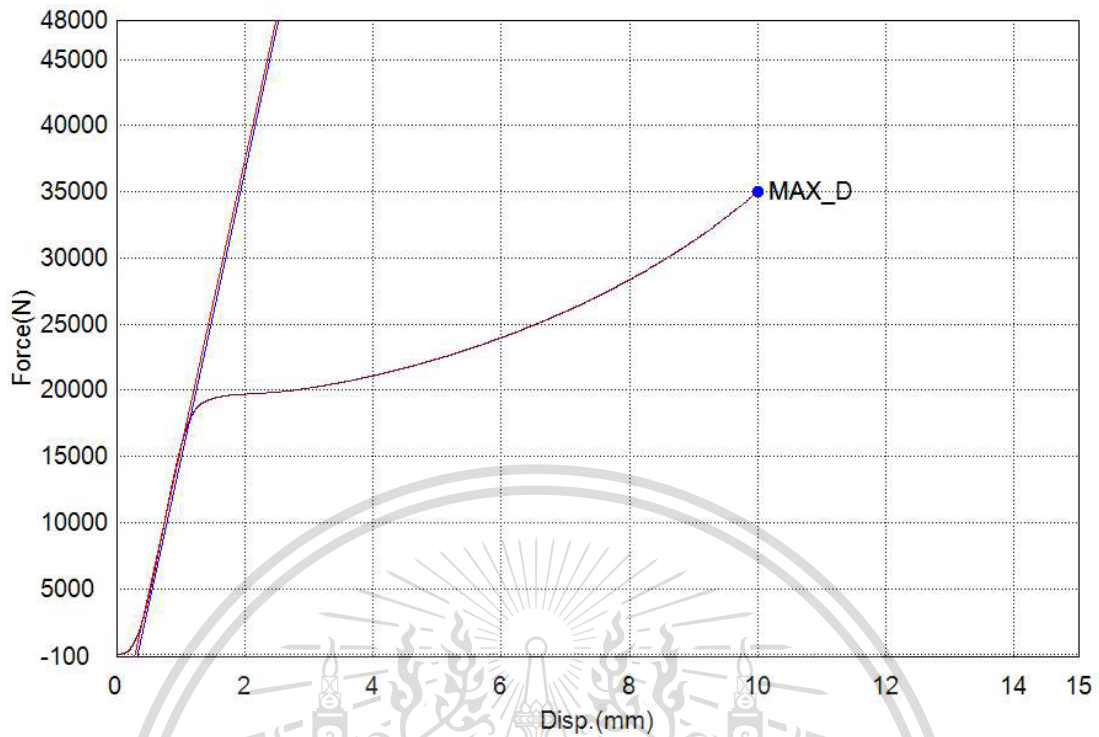
รูปที่ ๑.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ  
Infinity Unit ชั้นที่ 1



รูปที่ ๑.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ  
Infinity Unit ชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ ๗.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดจากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ Infinity Unit ชั้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, 103 and cite the document when use.

Key Word		Product Name	
Test File Name	infinity_2.xtak	Method File Name	
Report Date	24/2/2564	Test Date	24/2/2564
Test Mode	Single	Test Type	Compression
Speed	1mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	4	Qty/Batch:	3

Name Parameters Unit	Elastic Force 10 – 100 N N/mm2	YP(%FS)_Force 0.1 % N	YS1_Force 0.2 % N	Max_Force Calc. at Entire Areas N
1unit_1	29.7651	--	667.969	681.543
1unit_2	28.7925	--	740.147	1890.07
1unit_3	31.6982	--	773.509	3422.21
8unit_1	31.8483	--	860.961	3455.00
8unit_2	33.8489	--	865.507	3289.03
8unit_3	31.7034	--	709.359	2810.07
64unit_1	34.5641	--	655.508	1071.09
64unit_2	39.5590	--	558.885	1067.99
64unit_3	34.7100	--	614.103	967.757
infinity_1	1062.92	--	18069.9	34870.4
infinity_2	1001.35	--	17299.2	34579.6
infinity_3	1090.65	--	17457.9	35036.6

Name Parameters Unit	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	Break_Stroke Sensitivity: 10 mm	Max_Displ_Displ. mm
1unit_1	1.70386	--	2.36971
1unit_2	4.72518	--	10.0001
1unit_3	8.55553	--	10.0000
8unit_1	8.63751	--	10.0001
8unit_2	8.22258	--	10.0001
8unit_3	7.02516	--	10.0001
64unit_1	2.67772	--	10.0001
64unit_2	2.66997	--	10.0001
64unit_3	2.41939	--	10.0001
infinity_1	87.1760	--	10.0001
infinity_2	86.4491	--	10.0001
infinity_3	87.5915	--	10.0001

รูปที่ ๑๖.16 ข้อมูลและคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการกดอัดชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 104

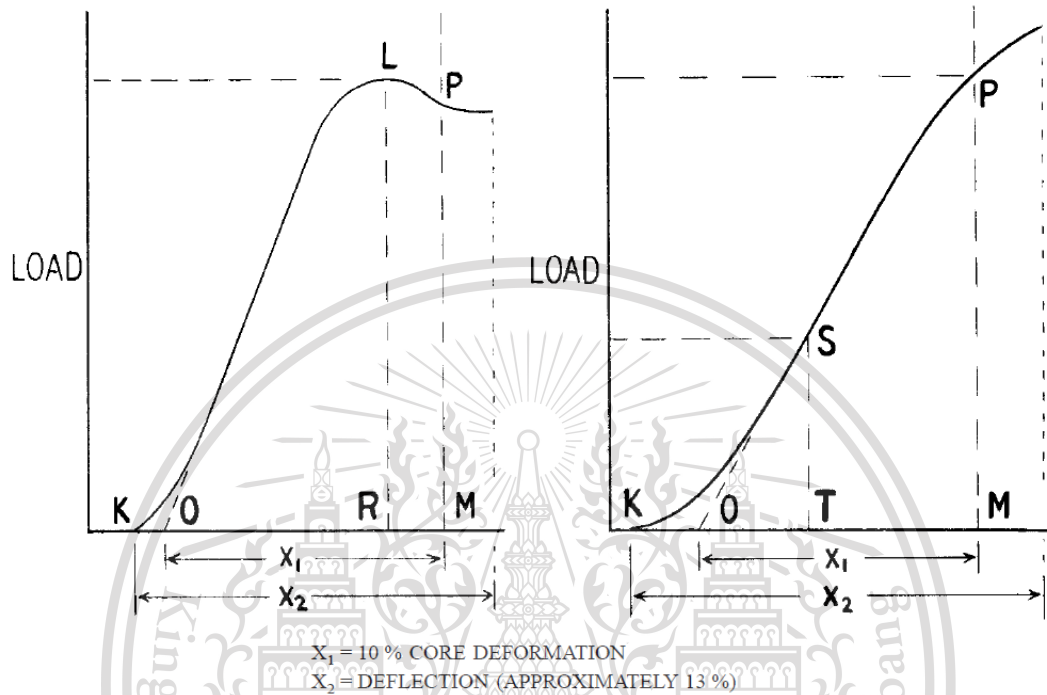


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, <sup>105</sup> and cite the document when use.

จากมาตรฐาน ASTM D1621 สามารถคำนวณหาค่า Young's Modulus จากผลการกดอัดชิ้นงานทดสอบ ได้ดังนี้



รูปที่ ผ.17 ก. เกิด Yield Point ก่อนการเสียรูป 10%

ข. เกิด Yield Point หลังการเสียรูป 10%

จากสมการคำนวณหาค่า Young's Modulus ในการกดชิ้นงานทดสอบ

$$E_c = WH/AD$$

เมื่อ  $E_c$  คือ ค่า Modulus of elasticity หรือค่า Young's Modulus ในการกด (MPa)

$W$  คือ แรงที่ใช้ในการกดที่ทำให้เกิดการเสียรูปครั้งแรก (N)

$H$  คือ ความสูงของชิ้นงานเริ่มต้น (mm)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดชิ้นงานเริ่มต้นในแนวระดับ (mm<sup>2</sup>)

$D$  คือ ระยะของการเสียรูปครั้งแรก (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 106

ค.1 ค่า Young's Modulus ของชิ้นงาน 1 Unit

$$E_c = \frac{WH}{AD} = \frac{(742.4353)(20)}{(99.96)(1.14)} = 130.3039$$

ค.2 ค่า Young's Modulus ของชิ้นงาน 8 Units

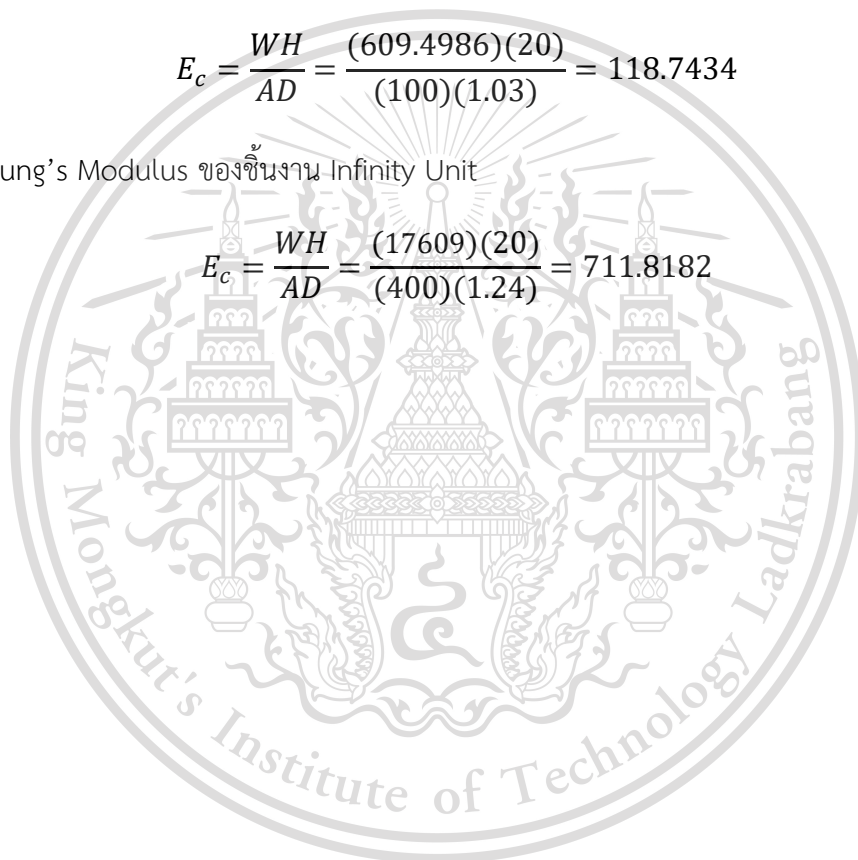
$$E_c = \frac{WH}{AD} = \frac{(811.9423)(20)}{(100)(1.06)} = 153.1967$$

ค.3 ค่า Young's Modulus ของชิ้นงาน 64 Units

$$E_c = \frac{WH}{AD} = \frac{(609.4986)(20)}{(100)(1.03)} = 118.7434$$

ค.4 ค่า Young's Modulus ของชิ้นงาน Infinity Unit

$$E_c = \frac{WH}{AD} = \frac{(17609)(20)}{(400)(1.24)} = 711.8182$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. 107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ผ.1 ค่าความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม

Tensile Test		Compression Test							
		1 Unit		8 Units		64 Units		Infinity Units	
Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.59	0.15	0.23	0.10	2.81	1.00	2.85	1.00	0.11	0.01
7.18	0.31	0.46	0.20	5.59	2.00	5.68	2.00	0.22	0.02
10.69	0.46	0.80	0.35	9.37	3.50	9.63	3.51	0.38	0.04
14.20	0.61	1.31	0.57	13.30	5.75	13.92	5.76	0.63	0.06
17.65	0.77	2.06	0.91	14.16	6.59	14.79	6.60	1.01	0.09
21.22	0.92	3.18	1.42	14.70	7.44	15.31	7.45	1.59	0.14
24.65	1.08	4.80	2.18	14.99	8.28	15.62	8.29	2.46	0.22
28.11	1.23	6.83	3.32	15.03	8.49	15.81	9.14	3.76	0.33
31.68	1.38	8.87	5.02	15.04	8.60	15.91	9.98	5.72	0.50
32.19	1.46	10.53	7.59	15.06	8.70	15.92	10.01	8.67	0.76
33.01	1.51	10.89	8.79	15.07	8.81			13.13	1.14
34.02	1.57	10.95	9.09	15.08	8.91			19.90	1.72
34.64	1.62	10.99	9.32	15.07	9.02			30.26	2.58
34.89	1.67	11.02	9.55	15.06	9.18			45.38	3.88
35.37	1.73	11.05	9.77	15.01	9.42			47.76	5.83
35.91	1.79	11.08	10.00	14.93	9.65			49.15	7.77
36.18	1.85			14.84	9.89			50.47	9.72
36.40	1.91			14.80	10.00			50.66	10.00
36.66	1.97								
36.81	2.04								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ผ.2 ผลจากการวัดค่า Stress ที่เกิดขึ้นที่ Node แต่ละตำแหน่ง ตามแนวตัดขวางของทุกชิ้นงาน

#Node	Infinity Unit	1 Unit	8 Units	64 Units
1	44.0633	44.6761	46.341	48.08
2	44.0855	44.742	45.3847	44.6887
3	44.1198	44.5375	46.8483	50.1005
4	44.1582	44.9387	46.3227	36.7889
5	44.1989	43.4447	48.6496	44.6937
6	44.24	34.2201	42.16	26.1509
7	44.2797	26.6317	35.0571	32.7159
8	44.3155	21.8161	28.2809	20.6819
9	44.3443	21.1483	24.3687	23.5432
10	44.3631	22.3936	22.4597	20.563
11	44.3695	23.456	23.5802	25.163
12	44.3631	22.384	22.1375	20.9325
13	44.3443	21.1326	24.8005	23.27
14	44.3155	21.8123	29.7138	21.0674
15	44.2797	26.6218	37.3915	33.6426
16	44.24	34.2922	43.7985	28.4189
17	44.1989	43.5424	48.4696	44.8613
18	44.1582	44.9482	45.1619	41.2797
19	44.1198	44.5412	45.6025	50.9337
20	44.0855	44.6825	44.9625	45.18
21	44.0633	44.9638	46.2911	48.7534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.