

การวิเคราะห์การเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานในพาหนะระบบราง
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DEFORMATION ANALYSIS OF AN ENERGY ABSORBING BOX
IN RAIL VEHICLES BY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEFORMATION ANALYSIS OF AN ENERGY ABSORBING BOX
IN RAIL VEHICLES BY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS



WISAWANART CHAICHOMPOO
AMMARIN MAHAWONGSANUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์การเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานในพาหนะระบบราง
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DEFORMATION ANALYSIS OF AN ENERGY ABSORBING BOX
IN RAIL VEHICLES BY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

ผู้จัดทำ

1. นาย วิศวานถ ไชยชมภู รหัสประจำตัว 56011152
2. นาย อัมรินทร์ มหาวงศนันท์ รหัสประจำตัว 56011451

จิตราภรณ์ วงศาภม

(ดร.จิตราภรณ์ วงศาภม)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การเสีรูปของตัวดูดซับพลังงานในพาหนะระบบรางโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นายวิศวกรรม ไชยชมภู 56011152
 นายอัมรินทร์ มหาวงศนันท์ 56011451
 ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา
 ดร.สุธี โอสารฤทธินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
 ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

การชนของรถไฟ ระดับความเสียหายอาจรุนแรงมากถึงขั้นมีผู้เสียชีวิตหลายคน เพื่อที่จะลดความรุนแรงของอุบัติเหตุดังกล่าวลงจึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานเนื่องจากการชนเพื่อลดความเสียหายลง ที่เรียกว่า ตัวดูดซับพลังงาน (Energy absorbing box) ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์พฤติกรรมและการเสีรูปจากการชนกระแทกของตัวดูดซับพลังงาน โดยงานวิจัยนี้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการทดสอบ(Experimental test) และ ส่วนของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์(Computer simulation) ก่อนอื่นทำการสร้างชิ้นงานตัวดูดซับพลังงานที่ระดับโครงสร้างเบื้องต้น (Component) แล้วทำการทดสอบแรงอัด จากนั้นทำการจำลองการชนด้วยโปรแกรม ALTAIR HYPERWORK โดยจะใช้คุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากทดสอบแรงดึง และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรมเพื่อลดค่าความผิดพลาดในแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง จากการทดสอบพบว่าพฤติกรรมและการเสีรูปเนื่องจากผลของรูปร่างของตัวดูดซับพลังงานนั้นสอดคล้องกัน แต่ผลคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุยังไม่สอดคล้อง โดยกระบวนการวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในการทำนายพฤติกรรมและการเสีรูปต่อไปได้ ซึ่งจะเป็นการลดข้อจำกัดในส่วนของการทดสอบชิ้นงาน

คำหลัก: ตัวดูดซับพลังงาน, โปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DEFORMATION ANALYSIS OF AN ENERGY ABSORBING BOX IN RAIL VEHICLES
BY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Wisawanart	Chaichompoo	56011152
Ammarin	Mahawongsanun	56011451
Dr.Jitraporn	Wongsangam	Advisor
Dr.Sutee	Olarnrithinun	Co-advisor
Year 2016		

ABSTRACT

The collision of rail vehicles causes a severe accident and damage. In order to reduce and protect that accident; therefore, the energy absorbing box is invented and installed in rail vehicle. This research will focus on a crash analysis procedure of deformation of an energy absorbing box that divided into two parts. The first part is experimental tests and the second part is computer simulation. A component of energy absorbing box is produced for compression test to evaluate the deformation pattern. While crashing model is simulated by using ALTAIR HYPERWORK software where material properties are determined from tensile testing. The validation is conducted by comparing the simulation results to experimental results. As testing, the deformation behavior due to the geometry of energy absorbing box is consistent, but the result due to both material properties and constraint is not consistent. This simulation will be used for predict the deformation behavior of substructure of the energy absorbing box resulting in reducing cost and eliminating limitations from actual test.

Keywords: Energy absorbing box, Computer simulation, Finite element analysis

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร.จิตรภรณ์ วงศาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.สุธี โอฬารฤทธินนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) ที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือ และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือทดสอบ และขอบคุณนายพงศ์พันธ์ วาหะสุนทรพงศ์(พีพัน) นายจุลวิชัย มาฝึก(พีบี) และนายอรรถพล พลาศรัย(พีเตียว) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำกรวิจัยนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายวิศวานาถ

นายอัมรินทร์

ไชยชมภู

มหาวงศนันท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ(ต่อ)	V
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สารบัญรูป (ต่อ)	VIII
สารบัญรูป (ต่อ)	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ทฤษฎีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	4
2.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis)	4
2.2.2 Quasi-static analysis	5
2.2.3 Explicit quasi-static analysis	5
2.2.4 Time step significance	6
2.2.5 แอนไอโซโทรปี (Anisotropy)	7
2.2.6 เทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor)	7
2.3 การทดสอบการกดอัด (Compression test)	8
2.3.1 ความต้านแรงอัด (Compressive Strength)	8
2.4 แผนภูมิความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Diagram)	9
2.5 การเชื่อมจุด (Spot Welding)	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 บทนำ	
3.1 การทดสอบ (Experimental test)	12
3.1.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile specimen)	12
3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง (Tensile test)	17
3.1.3 การเตรียมตัวดูดซับพลังงาน (Energy absorbing box)	18
3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบแรงอัด (Compression test)	26
3.2 การจำลองบนคอมพิวเตอร์ (Computer simulation)	27
3.2.1 จำลองการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งรอยเชื่อม	28
3.2.2 Pre-process	29
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	
4.1 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ	41
4.2 ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อหาความแข็งแรงของรอยเชื่อม	43
4.3 ผลการทดสอบแรงอัด	44
4.4 ผลการทดสอบแรงอัดด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์	46
4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย	54
5.3 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ	34
3.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของรอยเชื่อม	35
4.1 สมบัติของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง ที่ Strain rate เท่ากับ 0.003 s-1	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของ Continuous domain	5
2.2 ลักษณะของ Discretized domain	5
2.3 ลักษณะกระบวนการรีดโลหะ	7
2.4 ตัวประกอบของความเค้นทั้ง 3 ทิศทาง	7
2.5 เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression test)	8
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง	9
2.7 ลักษณะโดยทั่วไปของจุดคราก (Yield point) ในกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก	9
2.8 กระบวนการเชื่อมจุด	10
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	11
3.2 แบบชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM Standards E8/E8M – 09	12
3.3 เครื่อง Hydraulic pressing machine (TMC DDP 200T)	13
3.4ก เหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G 3141	13
3.4ข เหล็กแผ่นก่อนจะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่อง Hydraulic pressing machine	14
3.4ค การบ่มขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง	14
3.4ง ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile specimen)	14
3.5 เครื่องเชื่อมจุดยี่ห้อพลัง รุ่น SP – 9000	15
3.6 แป้นปรับค่าของเครื่องเชื่อมจุดยี่ห้อพลัง รุ่น SP – 9000	15
3.7 การเชื่อมจุดชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่นำไปทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม	16
3.8 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงสำหรับใช้ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม	16
3.9 เครื่อง Tensile testing machine (INSTION 8872)	17
3.10 การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Tensile testing machine (INSTION 8872)	17
3.11 แบบตัวดูดซับพลังงาน	18
3.12 เหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมที่นำมาขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับพลังงาน	19
3.13 แบบเหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมที่นำมาขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับพลังงาน	19
3.14 การนำศูนย์ก่อนนำเหล็กแผ่นไปเจาะรู	20
3.15 เครื่องเจาะ (morgon FRD-900S)	20
3.16 เจาะรูเหล็กแผ่นด้วยเครื่องเจาะ (morgon FRD-900S)	20
3.17 ลักษณะการพับเหล็กแผ่นหลังจากเจาะรูแล้ว	21
3.18 การพับเหล็กแผ่นหลังจากเจาะรูเสร็จแล้ว	21
3.19 ตัวดูดซับพลังงานหลังจากพับเหล็กแผ่นเสร็จ	21
3.20 ลักษณะการเชื่อมจุดตัวดูดซับพลังงาน	22
3.21 การระบุตำแหน่งที่จะเชื่อมจุด	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 การเชื่อมจุดตัวดูดซับพลังงานด้วยเครื่องเชื่อมจุดยี่ห้อพลัง รุ่น SP - 9000	23
3.23 ชิ้นงานตัวดูดซับพลังงานที่พร้อมสำหรับการทดสอบแรงอัด	23
3.24 แบบตัวยึด (Jig fixture)	24
3.25 ตัวยึดส่วนบน	25
3.26 ตัวยึดส่วนล่าง	25
3.27 ตัวยึดหลังการติดตั้งให้กับตัวดูดซับพลังงาน	25
3.28 เครื่อง Tensile testing machine (BPS INSTRUMENT – WDW Series)	26
3.29 การทดสอบแรงอัดกับตัวดูดซับพลังงาน	26
3.30 ภาพรวมการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์	27
3.31 แสดงตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ A	28
3.32 แสดงตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ B	28
3.33 แสดงขั้นตอนที่หนึ่ง	29
3.34 แสดงขั้นตอนที่สอง	29
3.35 แสดงขั้นตอนที่สาม	30
3.36 แสดงขั้นตอนที่สี่	30
3.37 รูปร่างของตัวดูดซับพลังงาน	31
3.38 หน้าต่าง Import ไฟล์โปรแกรม HyperMesh	32
3.39 การสร้าง Mid surface	32
3.40 การแบ่งผิวชิ้นงาน	33
3.41 การ Meshing บนผิวชิ้นงาน	33
3.42 ภาพการสะท้อนชิ้นงานบน – ล่าง	34
3.43 หน้าต่าง Material properties (ซ้าย) ของตัววัสดุ (ขวา) ของรอยเชื่อม	35
3.44 ลักษณะของรอยเชื่อม	36
3.45 การกำหนดชนิด Material และ Property (บน) ของวัสดุ (ล่าง) ของรอยเชื่อม	36
3.46 พิกัดรอยเชื่อมในหน่วยมิลลิเมตร	37
3.47 ลักษณะของ Rigid node	37
3.48 (ซ้าย) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ Top_Fixed (ขวา) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ Bottom_Fixed	38
3.49 กราฟความเร็วเทียบกับเวลา	38
3.50 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตความสมมาตร	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.51 คำสั่ง NUM_VARIABLES (ซ้าย) Displacement tracking (ขวา) Force tracking	39
3.52 การตั้งค่า Engine file	40
3.53 รูปร่างหน้าต่างของโปรแกรม RADIOSS	40
3.54 รูปร่างการแสดงผลการคำนวณของโปรแกรม RADIOSS	40
4.1 ชิ้นงานก่อนและหลังทำการทดสอบแรงดึงของแบบสำหรับใช้หาคุณสมบัติของวัสดุ	41
4.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเชิงวิศวกรรม	42
4.3 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดจริง	42
4.4 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม	43
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสียรูปของตัวดูดซับตัวที่ 1 และ 2	44
4.6 รูปแบบการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานตัวที่ 1 และ 2	44
4.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเสียรูป	45
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับกับระยะการเสียรูป	
4.8 รูปแบบการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานแบบ A และ B	46
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับระยะเสียรูป และพลังงานที่ดูดซับได้กับระยะเสียรูป	47
4.10 แสดงการจัดตำแหน่งของรอยเชื่อมรูปแบบ B	48
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสียรูป และพลังงานที่ดูดซับ	48
4.12 รูปแบบการพยับนของตัวดูดซับพลังงาน	49
4.13 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์	50
4.14 การเลื่อนกราฟเพื่อให้ผลการทดสอบกับผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน	51
4.15 เปรียบเทียบค่าพลังงานที่ดูดซับได้จากการทดลองและจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การขนส่งทางรางเป็นการขนส่งที่พัฒนาจากระบบรางนับตั้งแต่ภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 การค้นพบเครื่องจักรไอน้ำได้ถูกพัฒนาต่อเนื่องมาควบคู่กับการปฏิวัติอุตสาหกรรมในยุโรป เป็นการขนส่งที่รวดเร็วและมีบทบาทสูง สามารถเคลื่อนย้ายคน สิ่งของ ได้อย่างรวดเร็ว ปริมาณมาก และมีค่าใช้จ่ายต่ำ ระบบขนส่งทางรางจัดเป็นระบบขนส่งมวลขนขนาดใหญ่ที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของประเทศ โดยการขนส่งทางรถไฟจัดเป็นการขนส่งในปริมาณมากจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องความปลอดภัยเกี่ยวกับอุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน อาทิเช่น การชนของรถไฟ มีความเสียหายต่อชีวิตผู้โดยสารอย่างมาก โดยเฉพาะยังเป็นรถไฟความเร็วสูงแล้วยังมีความเสียหายที่รุนแรงมากขึ้นไปอีก เพื่อลดรุนแรงของอุบัติเหตุดังกล่าว จึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจากการชนเพื่อลดความเสียหายลง ที่เรียกว่า ตัวดูดซับพลังงาน (Energy absorbing box)

ตัวดูดซับพลังงาน เป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกเพื่อลดความรุนแรง ก่อนที่แรงกระแทกจะส่งผ่านไปยังบริเวณห้องคนขับและห้องโดยสารของตู้รถไฟ ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีการชนกระแทกของพาหนะระบบราง และหลักการในการออกแบบโครงสร้างรับแรงกระแทกจากการชน ซึ่งในที่นี่จะมุ่งศึกษาหลักการออกแบบและประสิทธิภาพของขั้นตอนการวิเคราะห์ สำหรับการออกแบบโครงสร้างรับแรงกระแทก โดยมุ่งเน้นวิเคราะห์พฤติกรรมการเสีรูปจากการชนของตัวดูดซับพลังงาน ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสีรูปจากการชนของตัวดูดซับพลังงาน แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการดูพฤติกรรมการเสีรูปด้วยการทดสอบจริง (Experimental test) และ ส่วนของการทดสอบด้วยการจำลองพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ เป้าหมายของการเปรียบเทียบ คือ การยืนยันผล (Validation) ของผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์ว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปเนื่องจากการถูกกดอัดของตัวดูดซับพลังงาน
- 1.2.2 เพื่อนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตัวดูดซับพลังงาน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 พฤติกรรมการเสียรูปเนื่องจากการถูกกดอัดของตัวดูดซับพลังงาน โดยทำการทดสอบจริง ด้วยกรรมวิธี การทดสอบแรงอัด (Compression Test) จะมีการพบบนเกิดขึ้น

1.3.2 จะสามารถปรับพารามิเตอร์ในโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้อย่างถูกต้องเพื่อให้แบบจำลองพฤติกรรมการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานมีลักษณะการเสียรูปสอดคล้องกับการทดสอบจริง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite element analysis)

1.4.2 แอนไอโซโทรปี (Anisotropy)

1.4.3 เทนเซอร์ (Stress Tensor)

1.4.4 การทดสอบแรงอัด (Compression test)

1.4.5 แผ่นภูมิความเค้น – ความเครียด (Stress-Strain Diagram)

1.4.6 การเชื่อมจุด (Spot welding)

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 จัดทำตัวดูดซับพลังงานเฉพาะชิ้นงานระดับโครงสร้างเบื้องต้น (Component)

1.5.2 ทำการทดสอบแรงอัด (Compression test) กับตัวดูดซับพลังงานระดับโครงสร้างเบื้องต้น

1.5.3 ทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับตัวดูดซับพลังงานระดับโครงสร้างเบื้องต้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาในหัวข้อของโครงการ

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในโปรแกรมจำลองบนคอมพิวเตอร์และหลักการวิเคราะห์การเสียรูป

1.6.3 ศึกษาหลักการออกแบบอุปกรณ์ดูดซับพลังงานในยานพาหนะระบบราง

1.6.4 จัดทำชิ้นงานตัวดูดซับพลังงาน

1.6.5 ทดสอบจริงด้วยกรรมวิธี การทดสอบแรงอัด (Compression test)

1.6.6 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

1.6.7 สรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเรื่องการวิเคราะห์การเสียรูป จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการออกแบบอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานหลังจากเกิดการชนขึ้น และทฤษฎีที่ใช้กับโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ รวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xue X. และ Schmid F. (2005) [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์การชนของโครงสร้างรับแรงกระแทกที่ติดตั้งอยู่ในตู้รถไฟแบบดั้งเดิมและทำการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างให้ดียิ่งขึ้น โดยได้อธิบายว่า โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์การชนของยานพาหนะที่ใช้ราง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในทุกขั้นตอนของการออกแบบและพัฒนาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด อีกทั้งที่ผ่านมามีการพัฒนาหลักการและเทคนิคที่ใช้ในโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ ทำให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์จากการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ใช้รับแรง โดยให้ความสนใจในการวิเคราะห์และแสวงหาจุดอ่อนของโครงสร้างแบบดั้งเดิม ผลที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับโครงสร้างจริง

Yang *et al.* (2016) [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมพิเศษและผลกระทบของอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีต่อการดูดซับพลังงานในการชนของรถไฟ โดยพวกเขาได้อธิบายไว้ว่า อลูมิเนียมอัลลอยด์เป็นหนึ่งในวัสดุหลักที่ใช้ในโครงสร้างส่วนต่างๆของรถไฟใต้ดินบางชนิดและในรถไฟความเร็วสูง อุบัติเหตุการณ์ชนของรถไฟนั้นเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ การเสียรูปอย่างรุนแรงของโครงสร้างรถไฟอาจปรากฏขึ้นในระหว่างการชน คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมอัลลอยด์ในช่วงที่เป็นพลาสติกมีความสำคัญต่อแนวโน้มการเสียรูปและการดูดซับพลังงาน อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงผลของ Strain rate ที่เกิดขึ้นอีกด้วย โดย Cowper-Symonds model จะใช้ในการอธิบายผลของ Strain rate ที่เกิดขึ้นในกลุ่มของโลหะจำพวกเหล็ก เนื่องจากไม่ค่อยมีผลกระทบจาก Strain rate แต่ในโลหะกลุ่มของอลูมิเนียมอัลลอยด์ จะใช้ Johnson-Cook model ซึ่งเป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่าอลูมิเนียมอัลลอยด์มีความไวต่อ Strain rate

Mochida *et al.* (2008) [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างป้องกันการชนที่ทำจาก อลูมิเนียมอัลลอยด์ของรถไฟความเร็วสูง Class 395 เนื่องมาจากการส่งออกเทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูงของบริษัท Hitachi ซึ่งต้องมีการทดสอบทางด้านความปลอดภัยจากอุบัติเหตุการชน โดยต้องผ่านมาตรฐานที่ทางประเทศอังกฤษได้ตั้งไว้ถึง 2 มาตรฐาน คือ British Railway Group Standard (RGS) และ Technical Specification for Interoperability (TSI) ซึ่งกำหนดไว้ว่าตัวดูดซับพลังงานต้องสามารถดูดซับพลังงานไม่น้อยกว่า 1 MJ ภายใต้เงื่อนไขการชนแบบเต็มหน้า (Full-face collision) และ 0.5 MJ จากการชนแบบเกยหน้า (Overriding collision) โดยตัวดูดซับพลังงานในตัวขบวนรถไฟความเร็วสูง Class 395 จะติดตั้งอยู่ 2 ส่วน คือ ด้านหน้าตัวรถ กับด้านหลังของห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คนขับซึ่งหลังจากการทดสอบพบว่าตัวดูดซับพลังงานภายใต้เงื่อนไขการชนแบบเต็มหน้า สามารถดูดซับพลังงานได้ 1.2 MJ ในขณะที่การชนแบบเกยหน้า สามารถดูดซับพลังงานได้ 0.75 MJ ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้

2.2 ทฤษฎีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) [4]

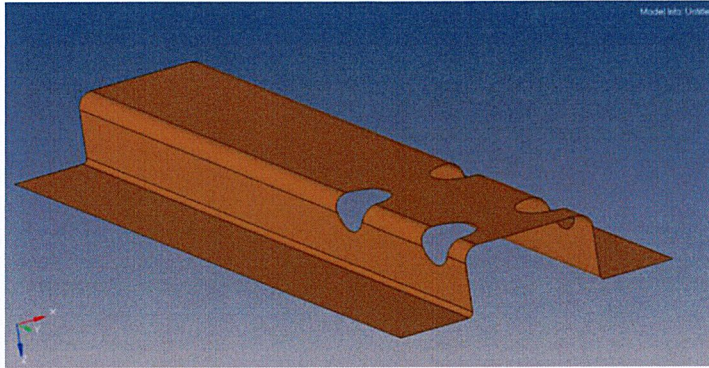
ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการปริพันธ์ผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีพื้นฐานมาจากการจำกัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นระบบ โดยการประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิคมาตรฐานทางคณิตศาสตร์ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการแปลงปัญหาที่มีลักษณะเป็นโดเมนต่อเนื่อง (Continuous domain) ดังแสดงไว้ในรูป 2.1 ซึ่งไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้เนื่องจากไม่มีขอบเขตของระบบ และองศาอิสระ (Degree of freedom) เป็นอนันต์ ซึ่งจะถูกลบไปเป็นโดเมนไม่ต่อเนื่อง (Discretized domain) ดังแสดงไว้ในรูป 2.2 โดยทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ แล้วทำการเชื่อมและยึดแต่ละเอลิเมนต์ที่ โหนด (Node) ซึ่งมันจะทำหน้าที่เป็นเหมือนกับกาวที่จะคอยเชื่อมแต่ละ เอลิเมนต์ไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ปัญหาเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 Pre-process คือการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

- สร้างแบบของปัญหาตามขนาดที่มีอยู่ (Geometry)
- สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ (Meshing)
- กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)
- กำหนดภาระและขอบเขต (Define loads and boundary conditions)

ขั้นตอนที่ 2 Solving คือการส่งคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ปัญหาโดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 Post-process คือขั้นตอนการแสดงผลการวิเคราะห์ปัญหาที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์



รูปที่ 2.1 ลักษณะของ Continuous domain



รูปที่ 2.2 ลักษณะของ Discretized domain

2.2.2 Quasi-static analysis [4]

สำหรับการแก้ปัญหาแบบ Quasi-static สามารถหาคำตอบได้จากสมการ (2.1)

$$M\{a\}^n + C\{v\}^n + K\{x\}^n = \{F_{ext}(t)\}^n \quad (2.1)$$

โดย M คือ เมทริกซ์ของมวล, C คือ เมทริกซ์ของตัวหน่วง และ K คือ เมทริกซ์ของ Stiffness ซึ่งเทอมของ $K\{x\}$ เป็นเทอมของแรงภายในโครงสร้าง โดยในการแก้ปัญหาต้องทำการหาค่า ระยะทาง (Displacement : X) ที่เวลาข้างหน้า หรือ X^{n+1} ที่ t^{n+1}

2.2.3 Explicit quasi-static analysis [4]

การแก้ปัญหาโดยวิธีการแบบ Explicit ใช้ในการหาคำตอบแบบ Dynamic ของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการแพร่ของคลื่นความเค้น (Stress wave propagations) การหาค่าระยะทางที่เปลี่ยนไปในแต่ละ Node ที่ถูกยึดไว้ในโครงสร้าง และ Time step จะต้องแบ่งแต่ละชั้นของการคำนวณให้สามารถผ่านแต่ละเอลิเมนต์ โดย “ไม่มีการข้าม” ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของ Courant-Friedrichs-Lewy นั่นคือต้องทำให้แน่ใจว่าคลื่นความเค้นได้แพร่ผ่านทุกเอลิเมนต์ นั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแบบ Explicit ถูกจำกัดด้วยขนาด Time step ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเอลิเมนต์ และความเร็วของคลื่นความเค้นที่แพร่ผ่านในวัสดุ

การจัดการเรื่องขนาดของเอลิเมนต์และความเร็วของคลื่นความเค้น สำหรับการแก้ปัญหาแบบ Explicit นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเป็นตัวกำหนดเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาของระบบ โดยทั่วไปถูกใช้ในการแก้ปัญหาที่มีลักษณะแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear problem) หรือ Short time dynamic (high frequency response) อย่างเช่น ในงานวิเคราะห์เกี่ยวกับการชนเป็นต้น โดยเงื่อนไขในการหาระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป d^{n+1} เป็นไปตามฟังก์ชันที่แสดงได้ดังสมการ (2.2)

$$d^{n+1} = f(d^n, v^n, a^n, d^{n-1}, v^{n-1} \dots) \quad (2.2)$$

ทุกตัวแปรในที่นี้มีข้อมูลสำหรับหาคำตอบที่เวลา n และด้วยเหตุนี้จึงหาคำตอบได้โดยตรงและต่อเนื่อง

2.2.4 Time step significance (Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) Characteristic length) [4]

ในกรณีที่พิจารณาในปัญหาที่ไม่ซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น การเสียรูปขนาดเล็กของวัสดุ Time step จะถูกควบคุมด้วยคลื่นความเค้นที่แพร่ผ่านวัสดุ Time step ของการแก้ปัญหาแบบ Explicit เป็นค่าที่ใช้กำหนด Stable time step ที่น้อยสุดของ Mesh ที่เกิดการเสียรูปทั้งหมด (ถ้า Mesh เกิดการเสียรูป, Time step ก็จะไปเปลี่ยนไปเช่นกัน) ซึ่งความสัมพันธ์ที่กล่าวมานี้ถูกเรียกว่า “เงื่อนไข Courant-Friedrichs-Lewy” ซึ่งต้องการให้ในหนึ่ง Time step คลื่นความเค้นจะต้องแพร่ผ่านให้ได้ทุกเอลิเมนต์เพื่อให้แต่ละเอลิเมนต์ได้แสดงผลการตอบสนองที่ได้รับจากคลื่นความเค้น ด้วยเหตุนี้ค่า Time step ที่ใช้ในโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์จะใช้ค่าแฟกเตอร์สำหรับปรับค่าให้เหมาะสม นั่นคือ แฟกเตอร์ TSSFAC (Time step scale factor) โดยทั่วไปจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 0.9 หรือน้อยกว่านั้น สำหรับในโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ Altair HyperWork มีค่ามาตรฐานอยู่ที่ 0.9

$$C_{Stress\ wave\ speed} = \sqrt{\frac{E_{Material}}{\rho_{Material}}} \quad (2.3)$$

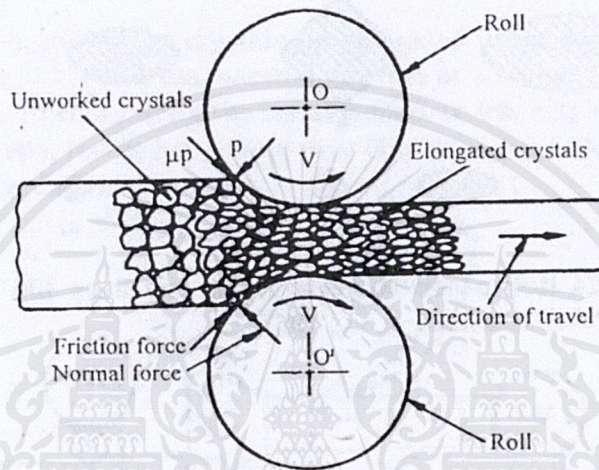
$$\Delta Time\ step_{Explicit} = \frac{Length_{Element}}{C_{Stress\ wave\ speed}} \quad (2.4)$$

แทนค่าสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.4) จะได้ สมการที่ (2.5) ซึ่งคือสมการที่ถูกใช้ในการหา Time step ที่เหมาะสมของแต่ละระบบที่ใช้การแก้ปัญหาแบบ Explicit

$$\Delta Time\ step_{CFL} = TSSFAC \frac{Length_{Element}}{\sqrt{\frac{E_{Material}}{\rho_{Material}}}} \quad (2.5)$$

2.2.5 แอนไอโซโทรปี (Anisotropy) [5]

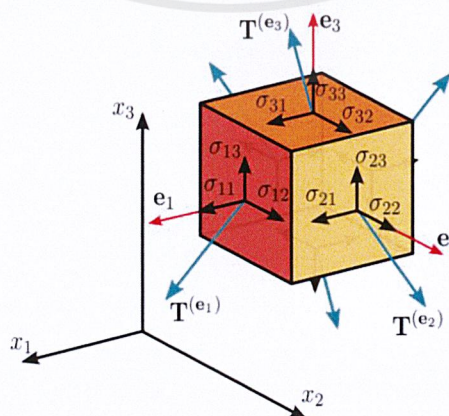
แอนไอโซโทรปี คือ คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพในทิศทางที่ต่างกกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับ ไอโซโทรปี (Isotropy) ในส่วนของวัสดุศาสตร์ วัสดุส่วนมากจะแสดงพฤติกรรมอันเนื่องมาจากแอนไอโซโทรปี อย่างเช่น ค่ามอดูลัสของยัง ที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงที่กระทำ ในกรณีของงานรีดโลหะ แนวการรีดจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของเกรนใหม่ ดังรูป 2.3 ที่ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของคุณสมบัติในวัสดุอย่างมาก หากทำการวัดค่าในแนวขวางของรอยรีดโลหะที่ผ่านกระบวนการรีดจะมีความแข็งแรงมากในทิศทางตามแนวเกรน



รูปที่ 2.3 ลักษณะกระบวนการรีดโลหะ [5]

2.2.6 เทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor) [6]

ในกลศาสตร์ความต่อเนื่อง เทนเซอร์ (Tensor) คือสิ่งที่อธิบายสถานะของความเค้นที่แต่ละจุดภายในวัสดุ โดยทั่วไปจะใช้ระบบบอกตำแหน่งแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) โดยปกติเทนเซอร์สามารถถูกเขียนเป็นเมทริกซ์ 3×3 เพราะถูกกำหนดด้วยตัวแปรอิสระ 6 ตัว ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวประกอบของความเค้นทั้ง 3 ทิศทาง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบ σ_{ij} ทั้ง 9 ตัวของเวกเตอร์ความเค้นถูกใช้ในการกำหนดสถานะของความเค้นที่แต่ละจุด และสามารถเขียนได้เป็น

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

เมื่อ σ_{11}, σ_{22} และ σ_{33} คือความเค้นในแนวตั้งฉาก ส่วน $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{21}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$ และ σ_{32} คือ ความเค้นเฉือน

2.3 การทดสอบแรงอัด (Compression test) [6]

การทดสอบแรงอัดเป็นวิธีการในการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุภายใต้โหลดแบบกดอัด โดยทำการทดสอบโดยการให้ชิ้นงานทดสอบอยู่ระหว่าง แผ่นกด และทำการบีบอัดโดยการเคลื่อนที่ของหัวกดเข้าหากัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้กดกับระยะที่มีการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ

โดยทั่วไปเครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Universal testing machine) เป็นเครื่องทดสอบที่ถูกใช้ในการทดสอบแรงดึง (Tensile test) และการทดสอบแรงอัด (Compression test) เพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดังรูป 2.5



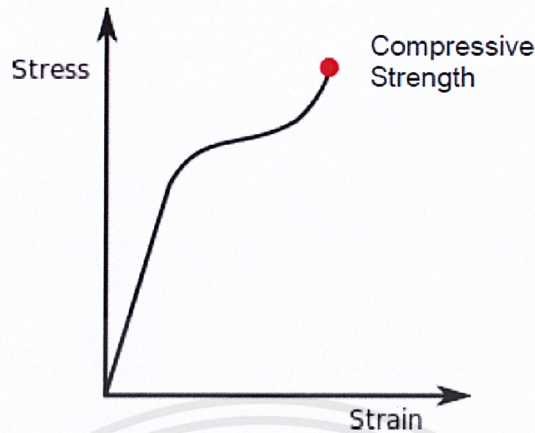
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression test)

2.3.1 ความต้านแรงอัด (Compressive Strength) [6]

ในการศึกษาความแข็งแรงของวัสดุในการต้านแรงกดอัด คือความสามารถของวัสดุหรือโครงสร้างในการต้านการถูกลดขนาดหรือทำให้เสียรูปจากแรงภายนอก โดยค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate compressive strength) คือค่าของความเค้นอัดตามแนวแกนเมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปอย่างถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดถูกพล็อตโดยเครื่องมือวัดโดยจะมีลักษณะดังรูป 2.6

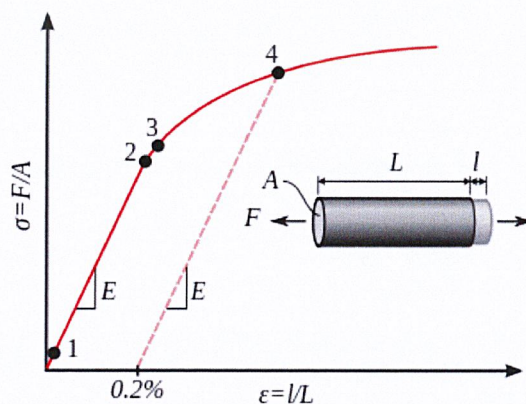


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง [6]

ความแข็งแรงของวัสดุในการต้านแรงกดอัดจะได้มาจากการทดสอบ นั่นคือการทดสอบแรงอัด โดยในการทดสอบจะมีส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นที่พฤติกรรมของวัสดุจะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law) นั่นคือ $\sigma = E\varepsilon$ เมื่อ E หมายถึง ค่ามอดูลัสของยัง ในส่วนนี้การเสียรูปของวัสดุจะเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และเมื่อสิ้นสุดการใส่โหลด วัสดุจะคืนรูปกลับไปที่มีความยาวเริ่มต้น และคุณสมบัตินี้จะสิ้นสุดเมื่อเลยจุดคราก (Yield point) นั่นคือวัสดุจะเริ่มมีพฤติกรรมแบบพลาสติก (Plastic behavior) และจะไม่คืนสภาพกลับสู่ความยาวเริ่มต้นหลังจากที่นำโหลดออก

2.4 แผนภูมิความเค้น – ความเครียด (Stress-Strain Diagram) [6]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะเป็นเอกลักษณ์ของวัสดุแต่ละชนิดและจะถูกวัดโดยการบันทึกค่าการเสียรูป (ความเครียด) ณ ช่วงเวลาที่แตกต่างกันในการทดสอบแรงดึงหรือแรงอัด (ความเค้น) ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะโดยทั่วไปของจุดคราก (Yield point) ในกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

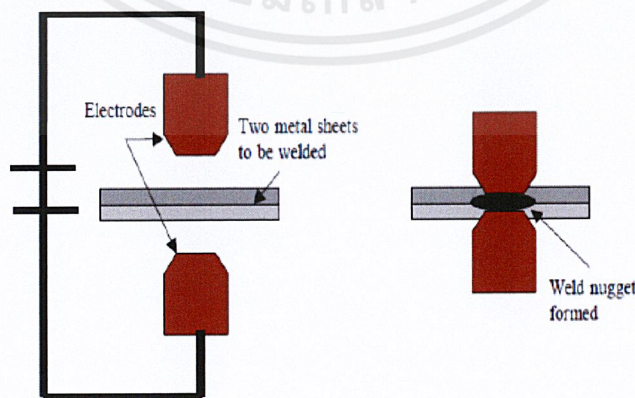
ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) โดยทั่วไปจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของ ความเค้น - ความเครียด ก่อนที่จะถึงจุดคราก (Yield point) ตรงส่วนของเส้นตรงในกราฟนั้นคือช่วงที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior) และความชันก็คือ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus)

2.5 การเชื่อมจุด (Spot Welding) [7]

กระบวนการเชื่อมจุด (Spot Welding Process) เป็นวิธีการเชื่อมที่ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานติดกันเป็นจุด โดยการวางโลหะชิ้นงาน 2 แผ่นประกบติดกัน โดยได้รับความร้อนที่เป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานที่เป็นตัวต้านทานแล้วใช้แรงกดจากอิเล็กโทรด (Electrode) ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานตรงรอยเชื่อม (Nugget) หลอมละลายติดกันในเวลาสั้น ๆ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ และใช้กระแสไฟฟ้าสูง ภายหลังจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดแล้ว ชิ้นงานจะค่อยๆเย็นตัวลงจนกระทั่ง อยู่ในสภาวะของแข็ง ดังรูป 2.8 โดยรอยเชื่อมจุดมีขนาดประมาณพื้นที่สัมผัสของอิเล็กโทรดที่ใช้ กระบวนการเชื่อมจุดนั้น มีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงาน ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน เวลาที่ใช้ในการเชื่อม ความหนาของโลหะ ชนิดของโลหะ รวมถึงชนิดและขนาดของอิเล็กโทรด เป็นต้น

กระบวนการเชื่อมจุด ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. เวลากดชิ้นงาน (Squeezing time) คือ เป็นช่วงเวลาที่การกดอิเล็กโทรดแนบกับชิ้นงานก่อนปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
2. เวลาเชื่อม (Welding Time) คือ ช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงานเพื่อให้เกิดความร้อนจนหลอมชิ้นงานเชื่อมติดกัน
3. เวลากดแช่ (Hold Time) คือ เวลาที่กดชิ้นงานค้างไว้หลังจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแล้ว ซึ่งรอยเชื่อมจะเริ่มเย็นและแข็งตัวจนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
4. เวลาเปลี่ยนงาน (Off Time) คือ เวลาที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานจากจุดเดิมเพื่อไปเชื่อมจุดอื่นต่อไป

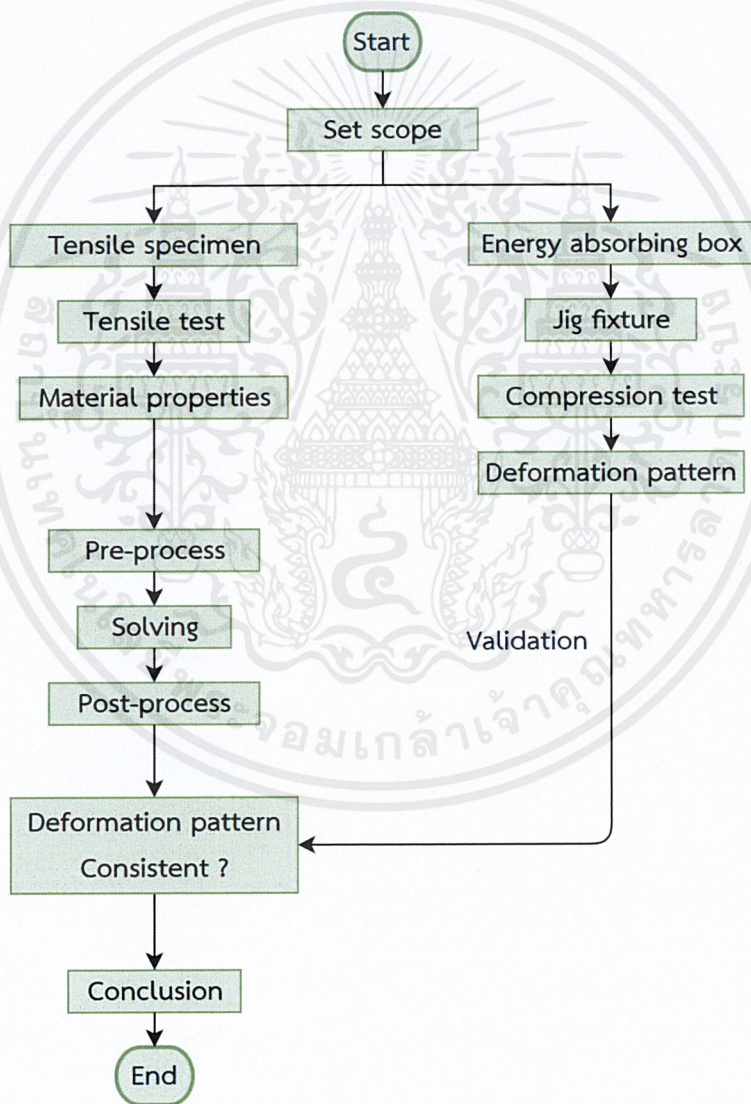


รูปที่ 2.8 กระบวนการเชื่อมจุด [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในส่วนของ การทดสอบ (Experimental test) ซึ่งประกอบด้วย การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง การเตรียมตัวดูดซับพลังงาน และขั้นตอนการทดสอบแรงอัด และยังกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในส่วนของ การจำลองบนคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนจำลองการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งรอยเชื่อม และขั้นตอน Pre-process โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูป 3.1



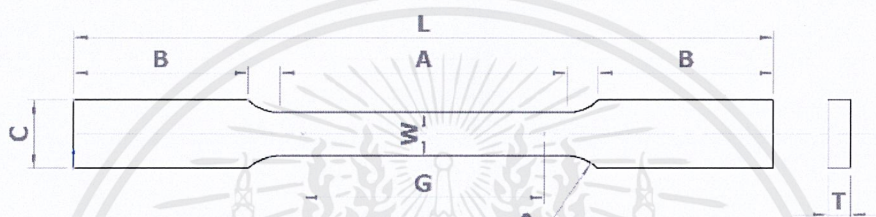
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การทดสอบ (Experimental test)

3.1.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile specimen)

ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงอ้างอิงตาม ASTM Standards E8/E8M – 09 [8] ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับชิ้นงานวัสดุแผ่นบางที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.13 มม. ถึง 19.0 มม. โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G 3141 ที่มีความหนา 1.0 มม. รายละเอียดขนาดของชิ้นงานที่จะใช้ในการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM Standards E8/E8M – 09 แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM Standards E8/E8M – 09 [8]

G = ระยะการวัด	50.0±0.1 มม.
W = ความกว้าง	12.5±0.2 มม.
T = ความหนา	ตามแต่วัสดุ
R = รัศมีของ fillet	12.5 มม.
L = ความยาวรวม	200.0 มม.
A = ความยาวของ Reduce section	57.0 มม.
B = ความยาวของ Grip section	50.0 มม.
C = ความกว้างของ Grip section	20.0 มม.

3.1.1.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

จัดทำชิ้นงานทดสอบแรงดึง วัสดุที่ใช้ คือ เหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G 3141 ความหนา 1.0 มม ทำการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีปั๊มขึ้นรูป (Stamping) โดยใช้เครื่อง Hydraulic pressing machine (TMC DDP 200T) ณ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



รูปที่ 3.3 เครื่อง Hydraulic pressing machine (TMC DDP 200T)

โดยดำเนินการจัดทำชิ้นงานดังนี้

1. จัดเตรียมวัสดุโลหะแผ่น JIS G 3141 โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกวางตัวในแนวทิศทางการรีดขึ้นรูปโลหะแผ่น



รูปที่ 3.4ก เหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G 3141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.จัดวางโลหะแผ่นในเครื่อง Hydraulic pressing machine (TMC DDP 200T)



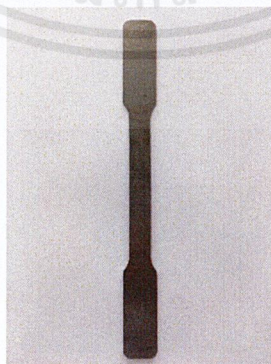
รูปที่ 3.4ข เหล็กแผ่นก่อนจะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่อง Hydraulic pressing machine

3.ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Hydraulic pressing machine (TMC DDP 200T)



รูปที่ 3.4ค การบีบขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง

4.ได้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงดังรูป 3.4ง



รูปที่ 3.4ง ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile specimen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 ขั้นตอนทดสอบแรงดึงสำหรับใช้ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

จัดทำขั้นตอนทดสอบแรงดึงสำหรับใช้ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยนำขั้นตอนทดสอบแรงดึงที่ได้จากเครื่อง Hydraulic pressing machine ไปตัดแบ่งครึ่ง แล้วทำการเชื่อมจุดด้วยเครื่องเชื่อมจุด (ยี่ห้อพลัง รุ่น SP- 9000 380V) โดยที่เครื่องเชื่อมจุดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมขนาดประมาณ 2.60 มม., กระแสไฟ 50% และเวลา 50 Cycle ณ โรงปฏิบัติการกลาง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

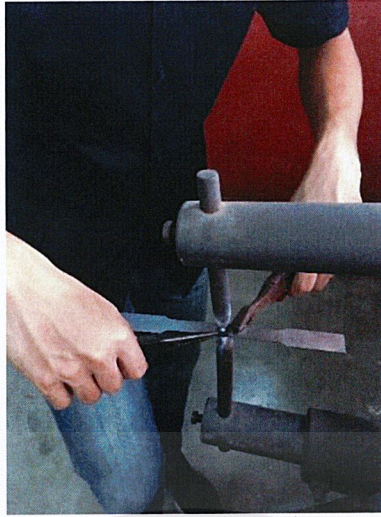


รูปที่ 3.5 เครื่องเชื่อมจุดยี่ห้อพลัง รุ่น SP – 9000



รูปที่ 3.6 แป้นปรับค่าของเครื่องเชื่อมจุดยี่ห้อพลัง รุ่น SP – 9000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การเชื่อมจุดชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่นำไปทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงสำหรับใช้ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง (Tensile test)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงดึงคือ

1. ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมว่าชิ้นงานมีการเสียรูปก่อนที่รอยเชื่อมจะเสียหายหรือไม่
2. เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Material properties) ที่จะนำไปใช้ในโปรแกรม HyperMesh

นำชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่จัดเตรียมทั้ง 2 แบบ ไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensile testing machine (INSTION 8872) ณ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Tensile testing machine (INSTION 8872)

ทำการทดสอบแรงดึงที่ Strain rate เท่ากับ 0.003 s^{-1} สำหรับหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ และความแข็งแรงของรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Tensile testing machine (INSTION 8872)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

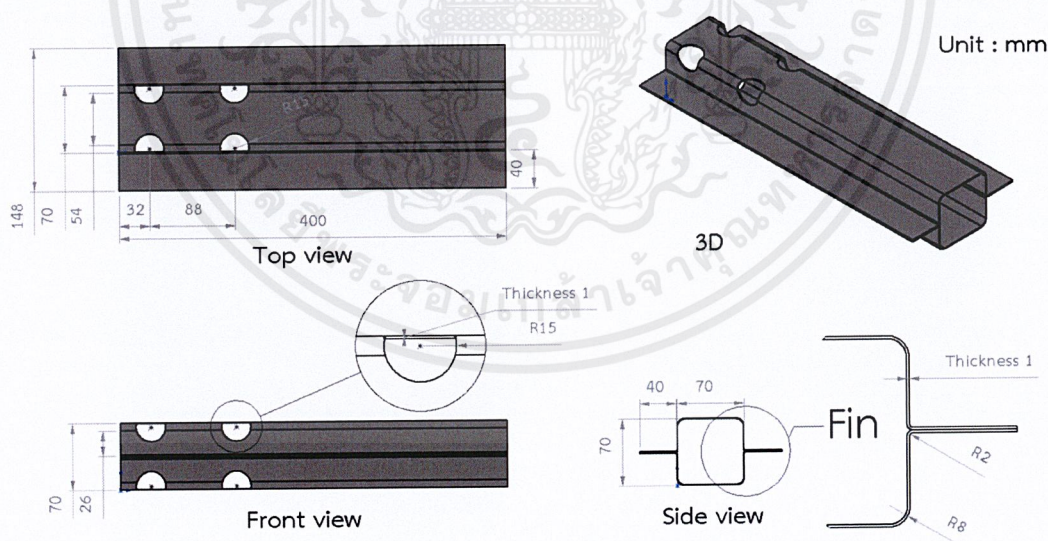
3.1.3 การเตรียมตัวดูดซับพลังงาน (Energy absorbing box)

3.1.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวดูดซับพลังงาน

วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปตัวดูดซับพลังงาน คือ เหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G 3141 ความหนา 1.0 มม เช่นเดียวกับวัสดุที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง

รูปร่างของตัวดูดซับพลังงานอ้างอิงตามงานวิจัยของ Yang et al. (2016) [2] เป็นพื้นฐาน โดยทำการดัดแปลงชิ้นงานต่างไปจากเดิมเล็กน้อย เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการจัดหาวัสดุและการขึ้นรูป โดยอ้างอิง ขนาดของตัวกล่องดูดซับพลังงาน 7x7 มม. ขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม และตำแหน่งของรูบนตัวดูดซับพลังงาน ทำการดัดแปลงในเรื่องความหนาและวัสดุ โดยลดขนาดความหนาของตัวกล่องดูดซับพลังงานจากเดิม 3.7 มม. เป็น 1.0 มม. ใช้วัสดุจากเดิม อลูมิเนียมอัลลอยด์ เป็นเหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G 3141 และออกแบบให้ตัวดูดซับพลังงานมีปีกเพิ่มขึ้นมา สำหรับใช้เป็นพื้นที่ในการเชื่อมจุดให้เหล็กแผ่นสามารถประกอบเป็นตัวดูดซับพลังงานได้

สังเกตว่าตัวดูดซับพลังงานมีการเจาะรูขนาด 15 มม. ซึ่ง Yang et al ได้อธิบายว่า รูบนตัวดูดซับพลังงานนี้ มีผลต่อการเสียรูปของโครงสร้างตัวดูดซับพลังงานในระหว่างการชนของรถไฟ เนื่องจากรูบนตัวดูดซับพลังงานจะส่งผลให้ตัวดูดซับพลังงานเกิดการเสียรูปแบบพับย่น ซึ่งจะช่วยให้สามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น

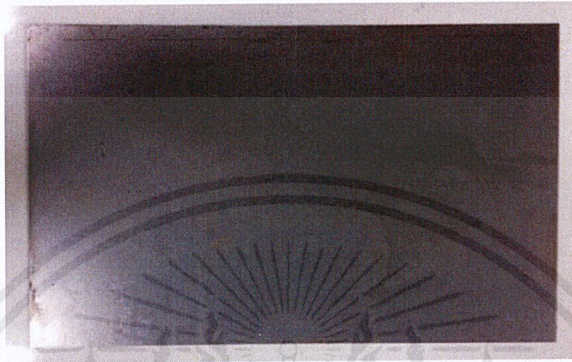


รูปที่ 3.11 แบบตัวดูดซับพลังงาน

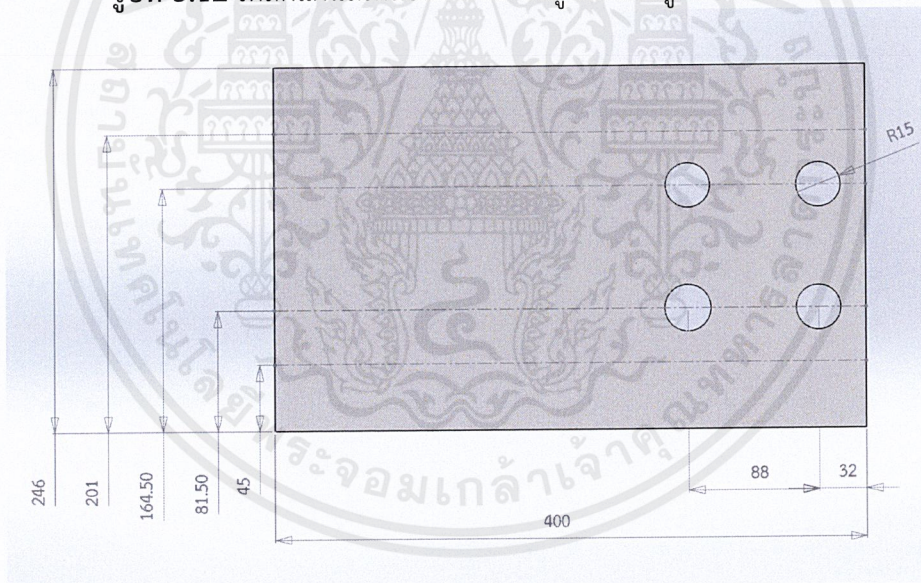
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยดำเนินการจัดทำตัวดูดซับพลังงานดังนี้

1. ตัดเหล็กแผ่นให้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด 246.0 มม. x 400.0 มม. ดังรูป 3.12 จำนวน 10 แผ่น และทำการเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 30.0 มม. จำนวน 4 รู ในตำแหน่งดังรูป 3.13 โดยใช้เครื่องเจาะ (morgon FRD-900S) ณ โรงปฏิบัติการกลาง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

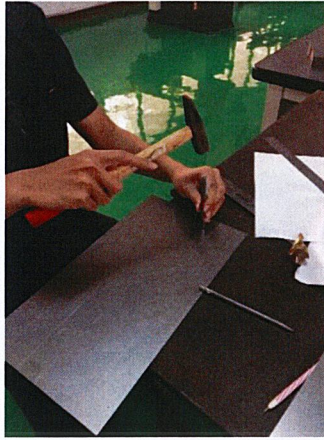


รูปที่ 3.12 เหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมที่นำมาขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับพลังงาน



รูปที่ 3.13 แบบเหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมที่นำมาขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การนำศูนย์ก่อนนำเหล็กแผ่นไปเจาะรู



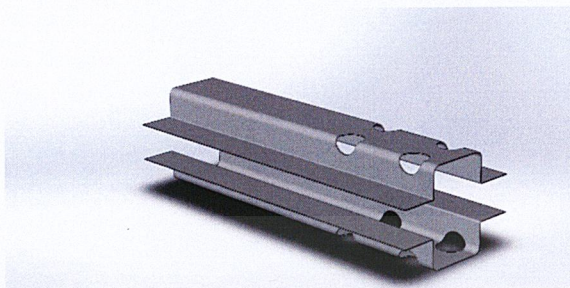
รูปที่ 3.15 เครื่องเจาะ (morgon FRD-900S)



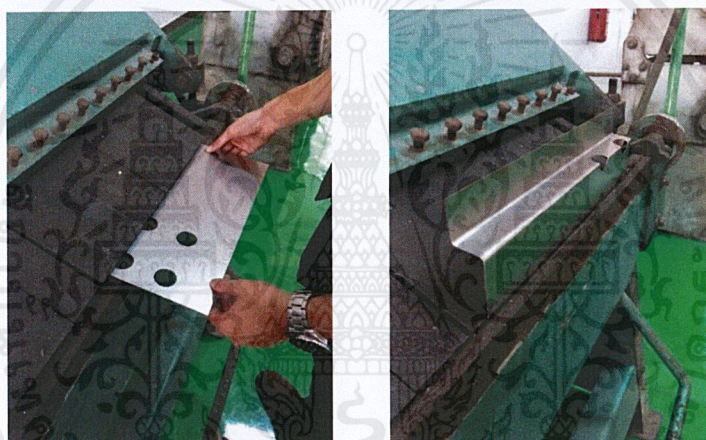
รูปที่ 3.16 เจาะรูเหล็กแผ่นด้วยเครื่องเจาะ (morgon FRD-900S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

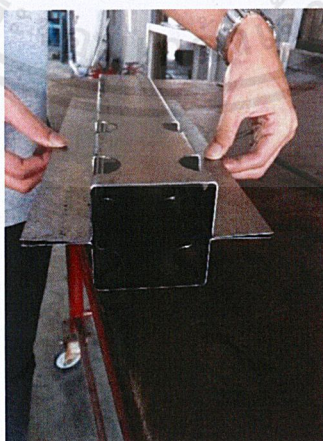
2. เมื่อทำการเจาะรูเหล็กแผ่นเสร็จ นำไปพับขึ้นรูปชิ้นงาน ให้ได้ลักษณะดังรูป 3.17 โดยใช้เครื่องพับโลหะ ณ โรงปฏิบัติการกลาง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.17 ลักษณะการพับเหล็กแผ่นหลังจากเจาะรูแล้ว



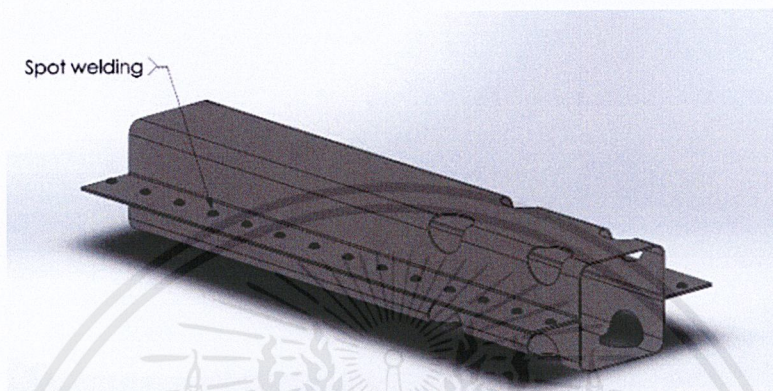
รูปที่ 3.18 การพับเหล็กแผ่นหลังจากเจาะรูเสร็จแล้ว



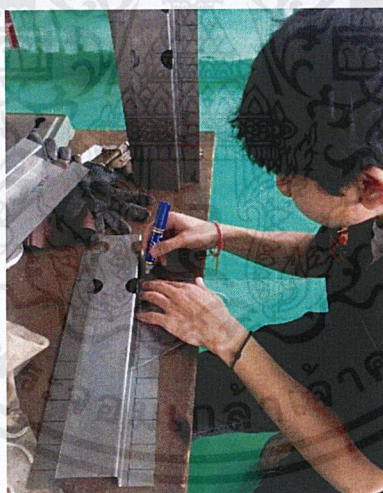
รูปที่ 3.19 ตัวดูดซับพลังงานหลังจากพับเหล็กแผ่นเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หลังจากที่ได้พบได้ตัวดูดซับพลังงานแล้ว จากนั้นนำไปเชื่อมจุด ลักษณะดังรูป 3.20 โดยอ้างอิงตำแหน่งรอยเชื่อมจากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ รายละเอียดในหัวข้อ 3.2.1 ทำการเชื่อมจุดด้วยเครื่องเชื่อมจุด (ยี่ห้อพลัง รุ่น SP- 9000 380V) โดยที่เครื่องเชื่อมจุดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมขนาดประมาณ 2.60 มม., กระแสไฟ 50% และเวลา 50 Cycle ณ ณ โรงปฏิบัติการกลาง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังเช่นเดียวกับการเชื่อมจุดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบใช้หาความแข็งแรงของรอยเชื่อม



รูปที่ 3.20 ลักษณะการเชื่อมจุดตัวดูดซับพลังงาน



รูปที่ 3.21 การระบุตำแหน่งที่จะเชื่อมจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

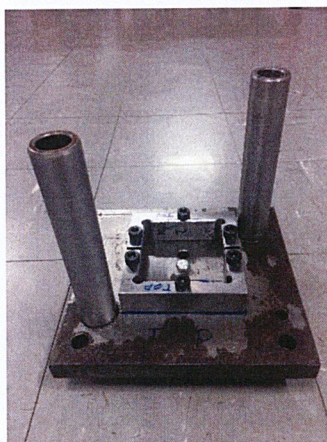


รูปที่ 3.22 การเชื่อมจุดตัวดูดซับพลังงานด้วยเครื่องเชื่อมจุดยี่ห้อพลัง รุ่น SP - 9000

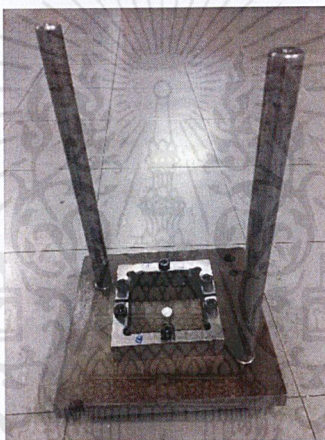


รูปที่ 3.23 ชิ้นงานตัวดูดซับพลังงานที่พร้อมสำหรับการทดสอบแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ตัวยึดส่วนบน



รูปที่ 3.26 ตัวยึดส่วนล่าง



รูปที่ 3.27 ตัวยึดหลังการติดตั้งให้กับตัวดูดซับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบแรงอัด (Compression test)

มีวัตถุประสงค์เพื่อดูพฤติกรรมการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นจริง และใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองในคอมพิวเตอร์

ทำการทดสอบแรงอัดโดยใช้เครื่องมือทดสอบ Universal testing machine (BPS INSTRUMENT – WDW Series) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยที่เงื่อนไขการทดสอบคือ ความเร็วในการกดเท่ากับ 15 มิลลิเมตรต่อนาที และทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ดังรูป 3.28 โดยทำการทดสอบกับตัวดูดซับพลังงานทั้งหมด 2 ชิ้น



รูปที่ 3.28 เครื่อง Tensile testing machine (BPS INSTRUMENT – WDW Series)

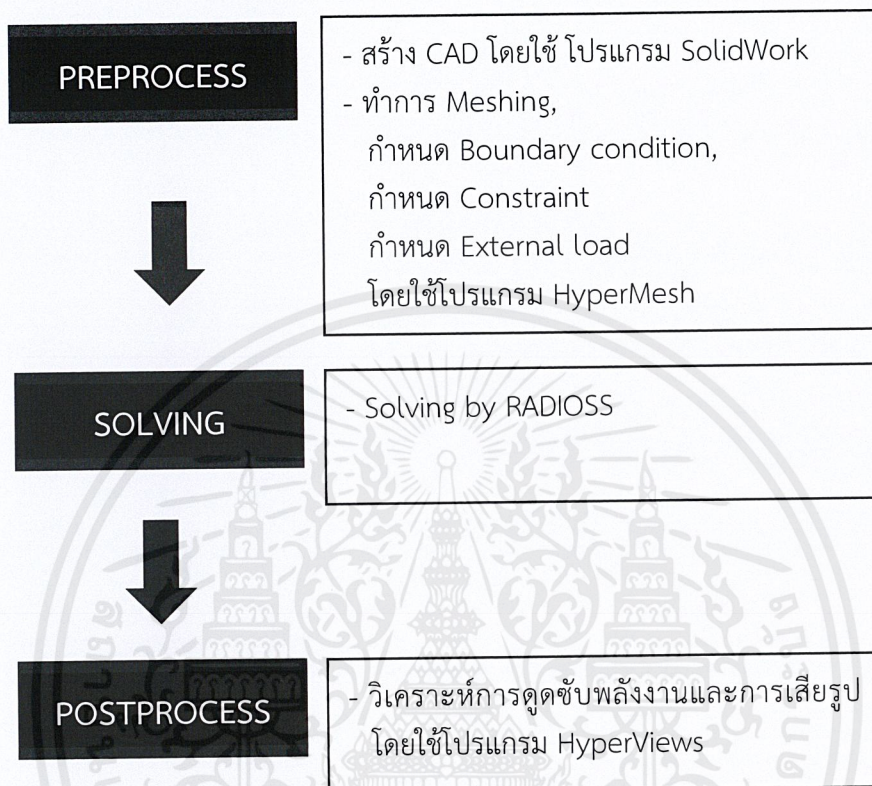


รูปที่ 3.29 การทดสอบแรงอัดกับตัวดูดซับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจำลองบนคอมพิวเตอร์ (Computer simulation)

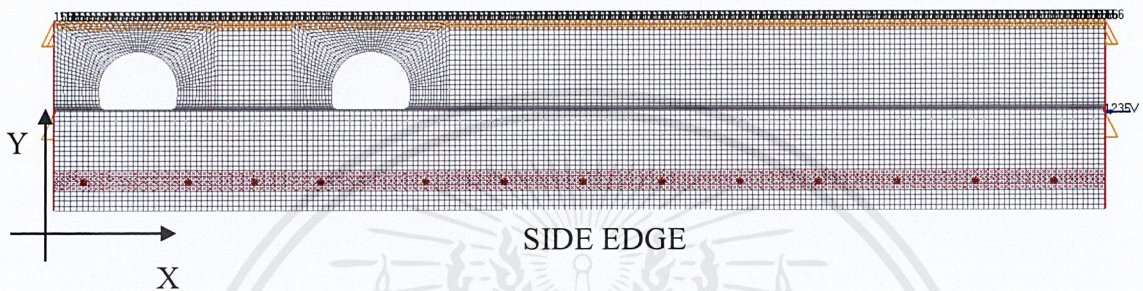
โดยทั่วไปการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ Pre-process, Solving และสุดท้ายคือ Post-process ดังรูป 3.30



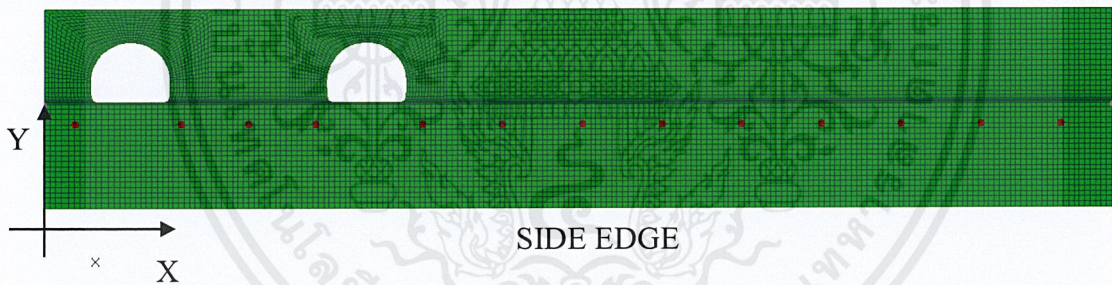
รูปที่ 3.30 ภาพรวมการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 จำลองการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งรอยเชื่อม

การจำลองเพื่อหาตำแหน่งรอยเชื่อมที่เหมาะสมได้มีการออกแบบตำแหน่งรอยเชื่อมบริเวณปีกของตัวดูดซับพลังงานออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบ A และ B โดยรูปแบบ A จะมีตำแหน่งรอยเชื่อมห่างจากขอบด้านข้าง (Side edge) หรือทิศทาง Y เท่ากับ 15 มิลลิเมตร และรูปแบบ B จะมีตำแหน่งรอยเชื่อมห่างจากขอบด้านข้าง 30 มิลลิเมตร โดยระยะตำแหน่งของรอยเชื่อมในทิศทาง X จะเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.31 สำหรับแบบ A และรูปที่ 3.32 สำหรับแบบ B



รูปที่ 3.31 แสดงตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ A



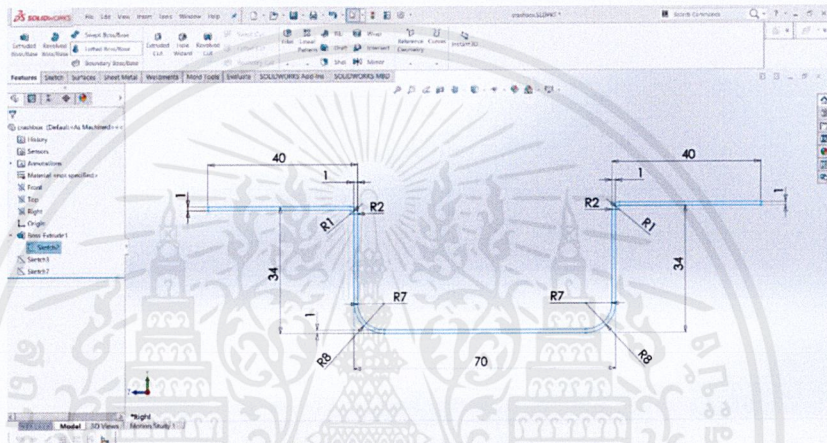
รูปที่ 3.32 แสดงตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ B

3.2.2 Pre-process

3.2.2.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวดูดซับพลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CAD generation)

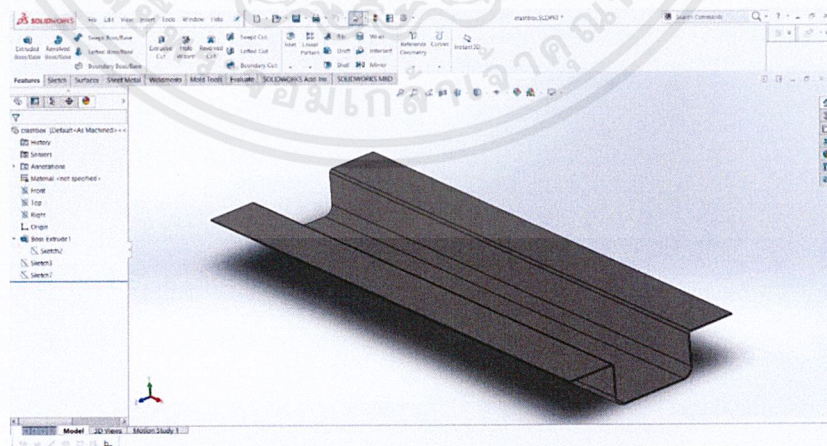
ขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2016 โดยสัดส่วนและขนาดของตัวดูดซับพลังงานจะเป็นไปดังรูป 3.9 และแบ่งขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการใช้คำสั่ง Sketch บนระนาบ YZ แล้วใช้คำสั่ง Line กำหนดขนาดตามส่วนต่างๆ ดังรูป 3.33



รูปที่ 3.33 แสดงขั้นตอนที่หนึ่ง

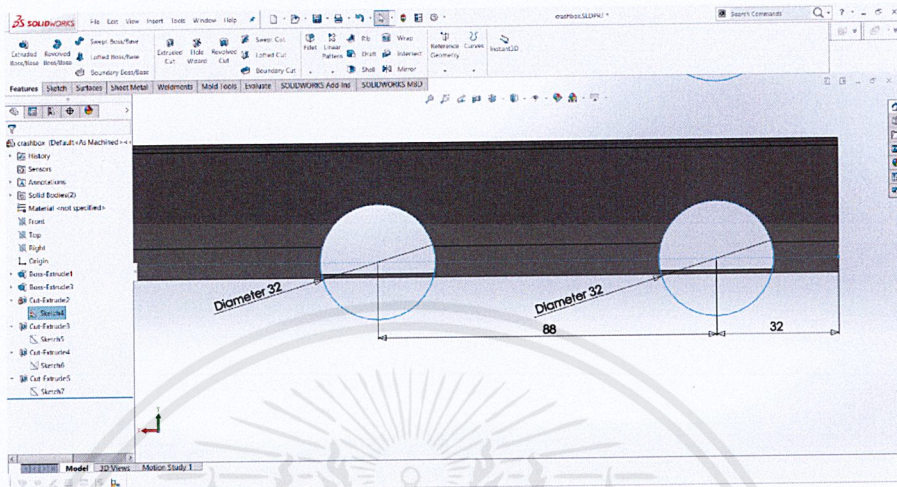
2. จากนั้นใช้คำสั่ง Extrude Boss/Bass โดยใส่ขนาดความยาวเท่ากับ 400 มิลลิเมตร ดังรูป 3.34



รูปที่ 3.34 แสดงขั้นตอนที่สอง

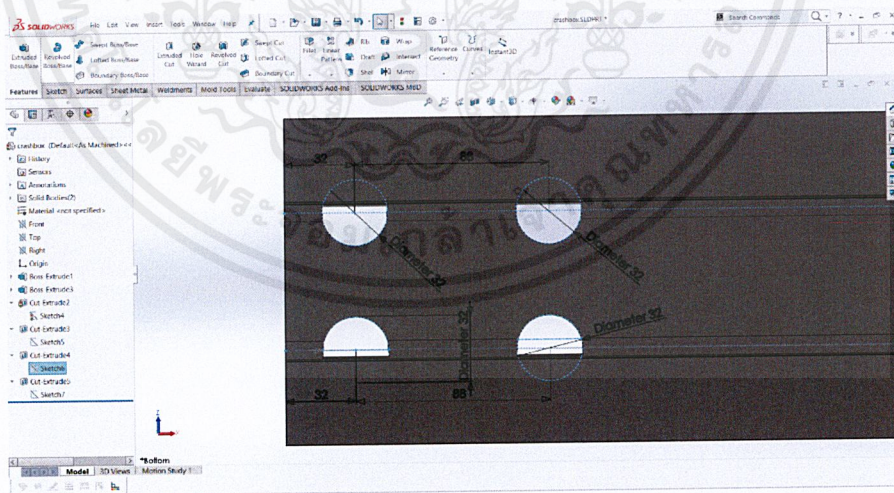
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการเจาะรูทางด้านข้าง (ระนาบ XY) ของชิ้นงานโดยการสร้างทรงกระบอกที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตรและกำหนดขนาดตามส่วนต่างๆ ดังรูป 3.35 จากนั้นใช้คำสั่ง Extrude Cut เพื่อเอาเนื้อชิ้นงานออกไป 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.35 แสดงขั้นตอนที่สาม

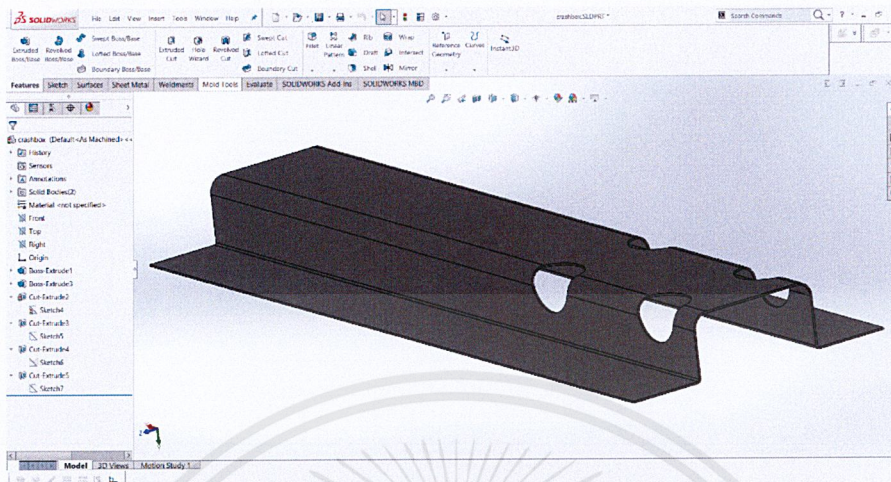
4. ทำการเจาะรูทางด้านบน (ระนาบ XZ) ของชิ้นงานโดยการสร้างทรงกระบอกที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตรและกำหนดขนาดตามส่วนต่างๆ ดังรูป 3.36 จากนั้นใช้คำสั่ง Extrude Cut เพื่อเอาเนื้อชิ้นงานออกไป 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.36 แสดงขั้นตอนที่สี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หลังจากนั้นจะได้ชิ้นงานจะได้ไฟล์รูปร่าง (Geometry file) ตัวดูดซับพลังงานดังรูป 3.37 และทำการ Save ไฟล์ให้เป็นนามสกุล STEP เพื่อเตรียมนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป



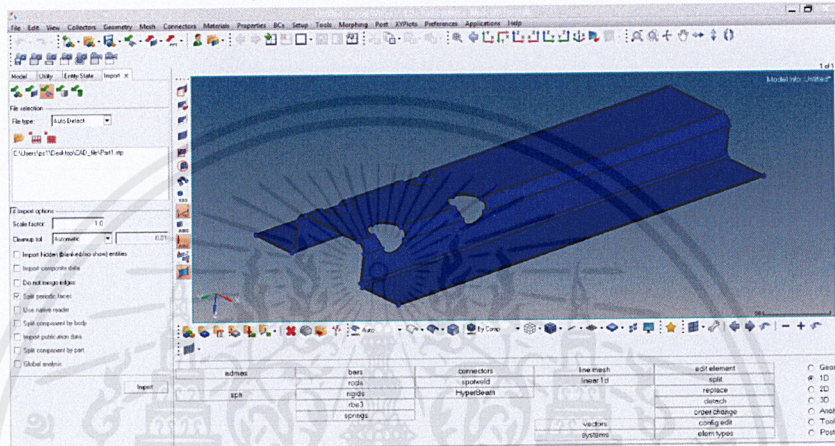
รูปที่ 3.37 รูปร่างของตัวดูดซับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 ขั้นตอนการกำหนดค่าในส่วนของโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation procedure)

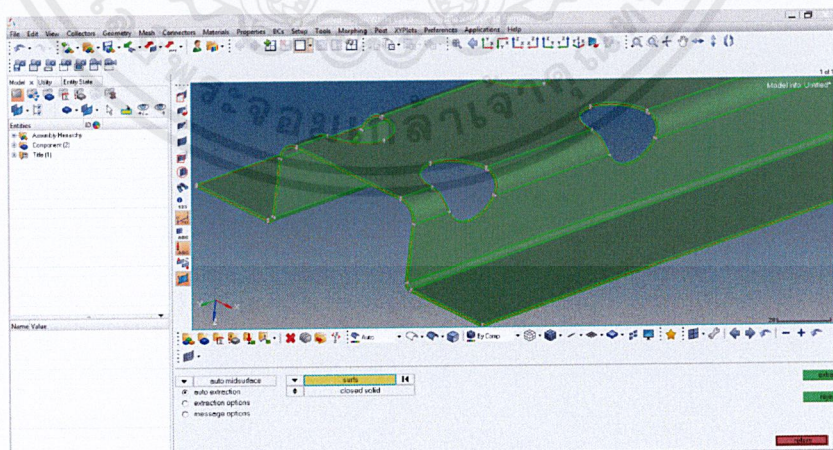
ในส่วนนี้จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสร้างเอลิเมนต์ย่อยๆในชิ้นงาน (Meshing) และการกำหนดขอบเขต (Boundary condition setting)

1. ขั้นตอนแรกทำการ Import ไฟล์ Geometry เข้ามาในโปรแกรม HyperMesh จะได้ดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 หน้าต่าง Import ไฟล์ในโปรแกรม HyperMesh

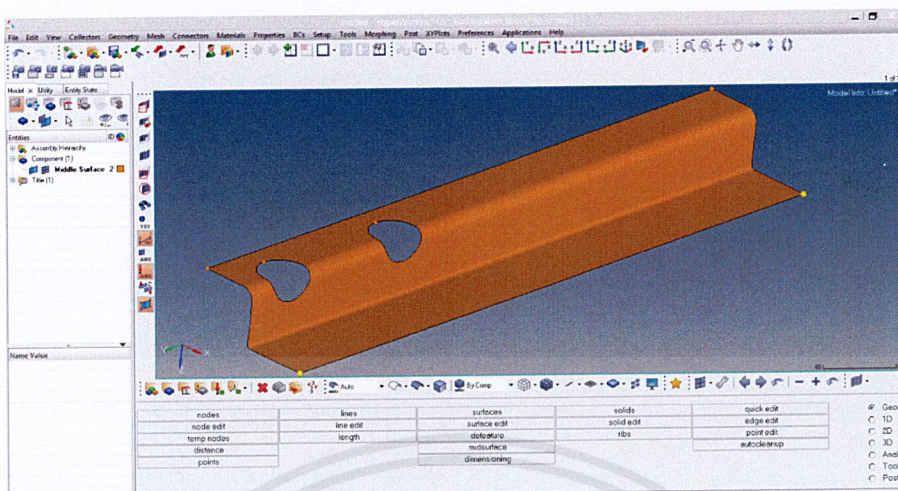
2. ใช้คำสั่ง Mid surface เพื่อเปลี่ยนให้ชิ้นงานที่มีลักษณะ Solid ให้เป็น Surface ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 การสร้าง Mid surface

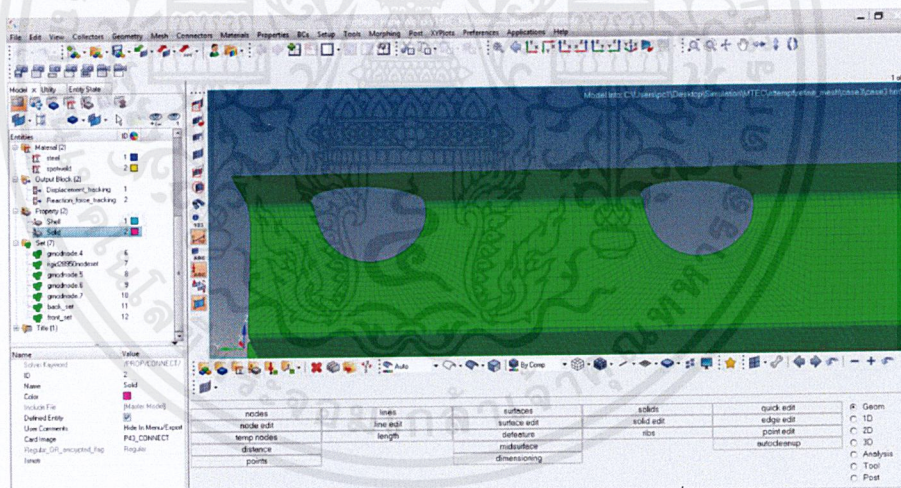
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการตัดผิวชิ้นงานครึ่งหนึ่งโดยใช้คำสั่ง Surface edit > Trim จะได้ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การแบ่งผิวชิ้นงาน

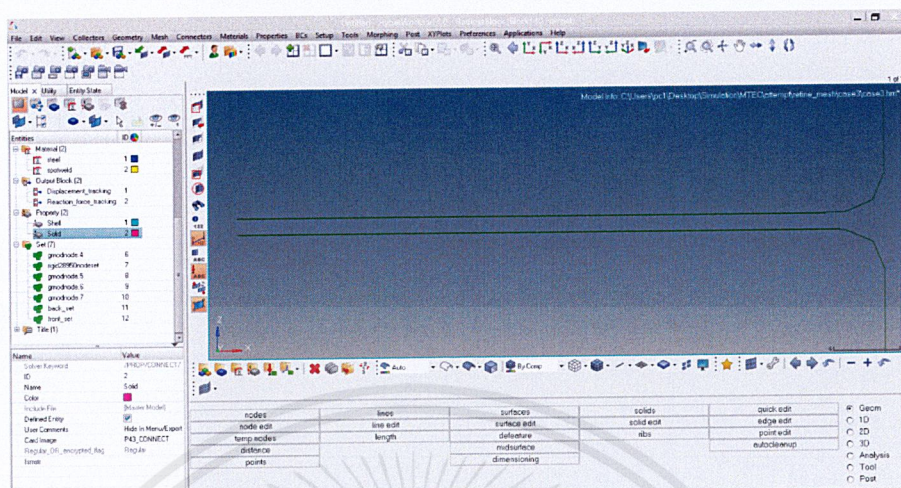
4. ทำการ Meshing ชิ้นงานโดยใช้คำสั่ง Automesh (โดยขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้เป็นคนกำหนด) ในงานวิจัยนี้ขนาดและรูปร่างของเอลิเมนต์ จะเป็นดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 การ Meshing บนผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากนั้นใช้คำสั่ง Reflect เพื่อสะท้อนชิ้นงานบนระนาบ XY โดยห่างกัน 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.42 จะทำให้ได้ชิ้นงานทั้งด้านบนและล่าง





รูปที่ 3.42 ภาพการสะท้อนชิ้นงานบน – ล่าง

6. ทำการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้งตัวดูดซับพลังงานและรอยเชื่อม โดยใช้คำสั่ง Create > Material ในส่วนของตัวดูดซับพลังงานจะใช้ M2_PLAS_JOHNS_ZERIL (Johnson's Cook material model) ตั้งชื่อว่า Steel ซึ่งจะใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตาราง 3.1 และจะมีลักษณะดังรูป 3.43 โดยไม่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

Rho_initial	$7.85 \times 10^9 \text{ kg/mm}^3$
Young's modulus (E)	204991.7 MPa
Poisson ratio (nu)	0.3
Yield stress (a)	212.8 GPa
Hardening parameter (b)	450.0
Hardening exponent (n)	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	Value	Name	Value
Solver Keyword	/MAT/PLAS_JOHNS/	Solver Keyword	/MAT/CONNECT/
ID	1	ID	2
Name	steel	Name	spotweld
Color		Color	
Include File	[Master Model]	Include File	[Master Model]
Defined Entity	<input checked="" type="checkbox"/>	Defined Entity	<input checked="" type="checkbox"/>
User Comments	Hide In Menu/Export	User Comments	Hide In Menu/Export
Card Image	M2_PLAS_JOHNS_ZERIL	Card Image	M59_CONNECT
Type	PLAS_JOHNS	Regular_OR_encrypted_flag	Regular
Regular_OR_encrypted_flag	Regular	RefRho_Option	<input type="checkbox"/>
RefRho_Option	<input type="checkbox"/>	Rho_Initial	7.85e-009
Rho_Initial	7.85e-009	E	204991.7
E	204991.7	nu	0.3
nu	0.3	a	212.8
a	212.8	b	450.0
b	450.0	n	0.5
n	0.5	EPS_p_max	
EPS_p_max		SIG_max0	
SIG_max0		c	
c		EPS_DOT_0	
EPS_DOT_0		ICC	
ICC		Fsmooth	
Fsmooth		Fcut	
Fcut		Chard	
Chard		m	
m		Tmelt	
Tmelt		RhoCp	
RhoCp		Ti	
Ti		ALE CFD Formulation	NONE
ALE CFD Formulation	NONE	HEAT_Input	<input type="checkbox"/>
HEAT_Input	<input type="checkbox"/>		

รูปที่ 3.43 หน้าต่าง Material properties (ซ้าย) ของตัววัสดุ (ขวา) ของรอยเชื่อม

และเช่นเดียวกัน ในส่วนของคุณสมบัติของรอยเชื่อมจะใช้ M59_CONNECT ตั้งชื่อว่า Spot weld ซึ่งจะใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตาราง 3.2 และจะมีลักษณะดังรูป 3.43 โดยสามารถหาค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (G) ได้จากสมการ (3.1)

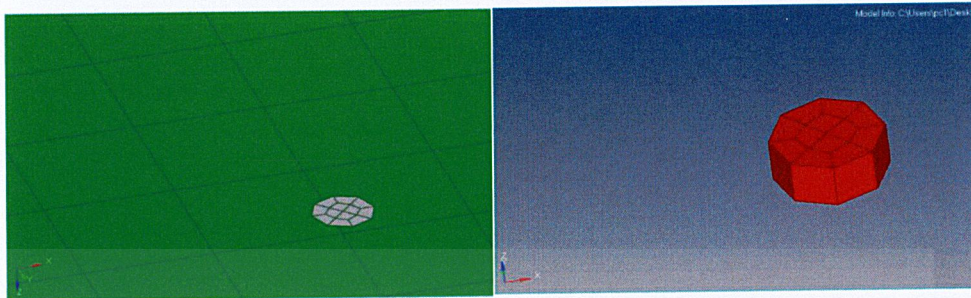
$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของรอยเชื่อม

Rho_initial	7.85x10 ⁹ kg/mm ³
Young's modulus (E)	204991.7 MPa
Shear modulus (G)	68330.6 MPa

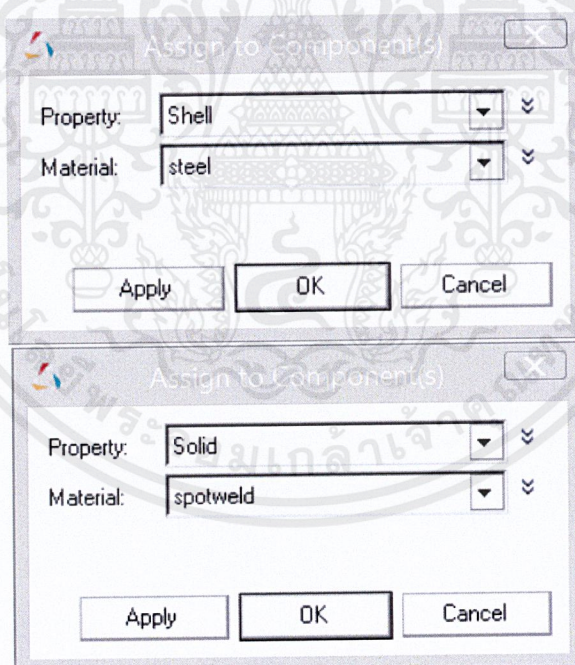
7. ทำการกำหนดลักษณะของชิ้นงาน (Part property) โดยใช้คำสั่ง Create > Property ทำการสร้าง P1_SHELL และ P49_CONNECT ซึ่งใน Card คำสั่งให้กำหนดค่าความหนา (Thickness) มีค่าเป็น 1 มิลลิเมตร

8. สร้างรูปร่างของรอยเชื่อมโดยใช้คำสั่ง Lines > Circle Center and Radius กำหนดรัศมีเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการ Meshing แล้วใช้คำสั่ง Drag เพื่อยืดรอยเชื่อมให้มีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยให้มีความสูงเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ดังรูป 3.44



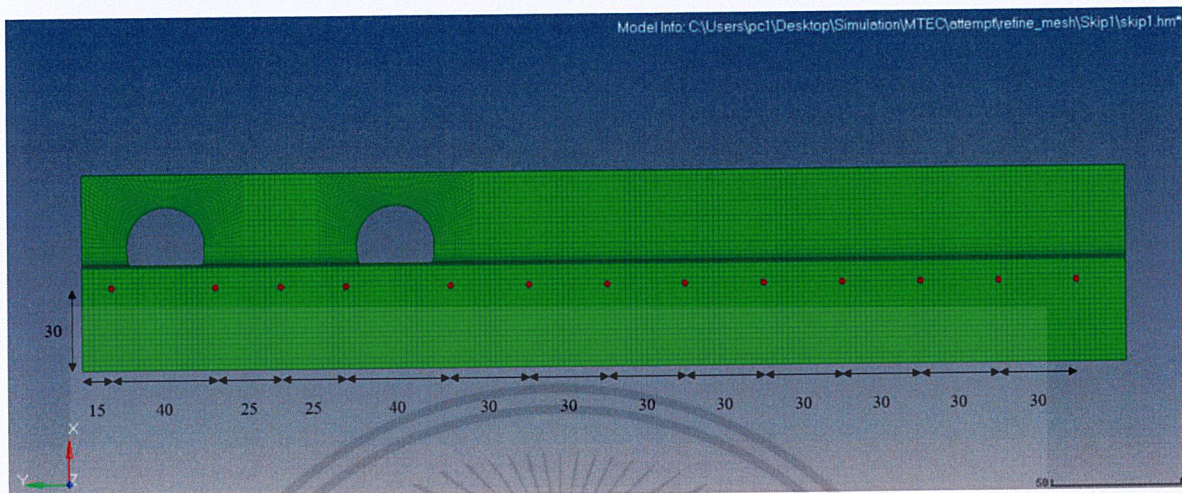
รูปที่ 3.44 ลักษณะของรอยเชื่อม

9. ทำการกำหนด Material และ Property ในแต่ละ Component โดยในตัววัสดุจะกำหนด Material เป็น Steel กับ Property เป็น Shell เช่นเดียวกันกับรอยเชื่อมจะกำหนด Material เป็น Spot weld กับ Property เป็น Solid ดังรูป 3.45



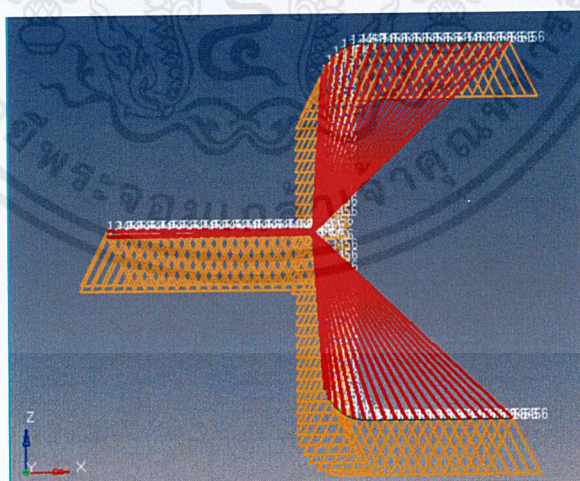
รูปที่ 3.45 การกำหนดชนิด Material และ Property (บน) ของวัสดุ (ล่าง) ของรอยเชื่อม

10. ใช้คำสั่ง Translate ในทิศทาง Y เพื่อทำการคัดลอกรอยเชื่อม โดยพิกัดของรอยเชื่อม ดังรูป 3.46 ในหน่วยมิลลิเมตร



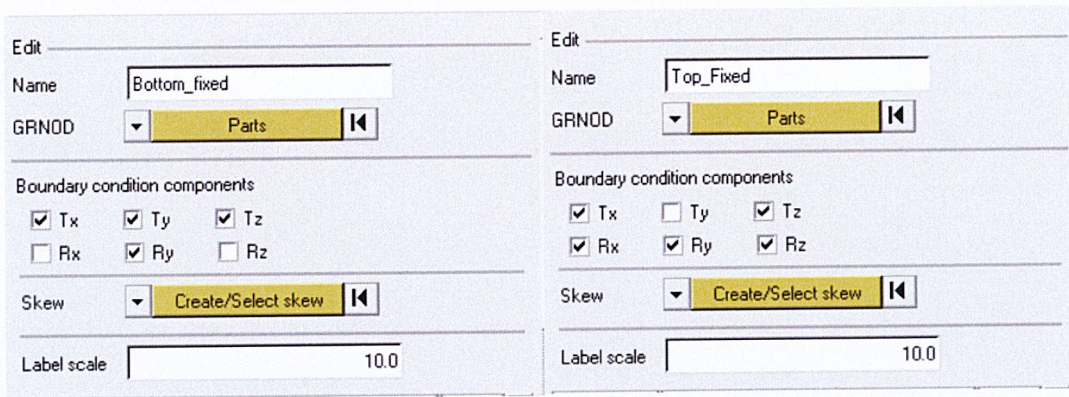
รูปที่ 3.46 พิกัดรอยเชื่อมในหน่วยมิลลิเมตร

11. ใช้คำสั่ง BC's manager ในหน้าต่าง Utility เพื่อทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ทั้งหมด 4 ชนิดได้แก่ Top_Fixed, Bottom_Fixed, Imposed_velocity และ Symmetry ในส่วนของ Top_Fixed ขั้นแรกต้องทำการสร้าง Rigid node โดยใช้คำสั่ง Rigids เพื่อยึดระนาบด้านบนไว้ด้วยกัน ดังรูป 3.47 จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยเลือกหัวข้อ Boundary Condition แล้วทำการกำหนดค่าดังรูป 3.48 (ซ้าย)



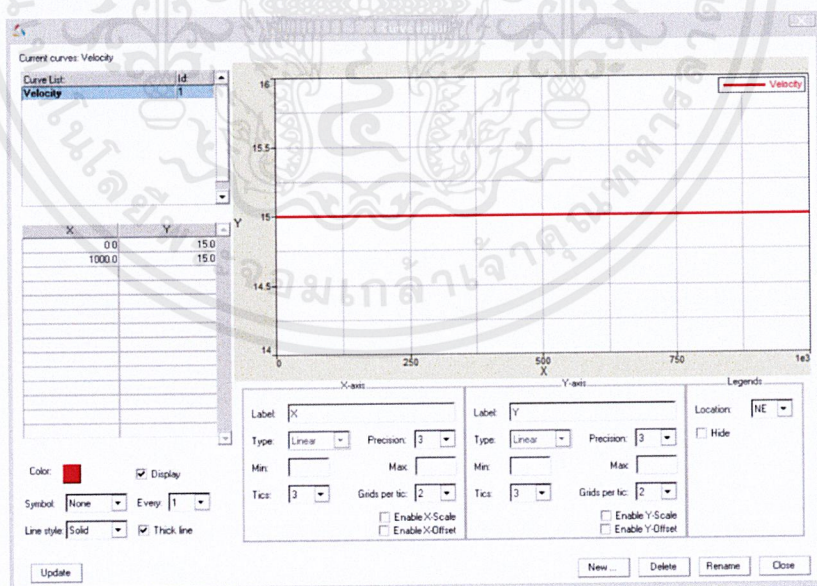
รูปที่ 3.47 ลักษณะของ Rigid node

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



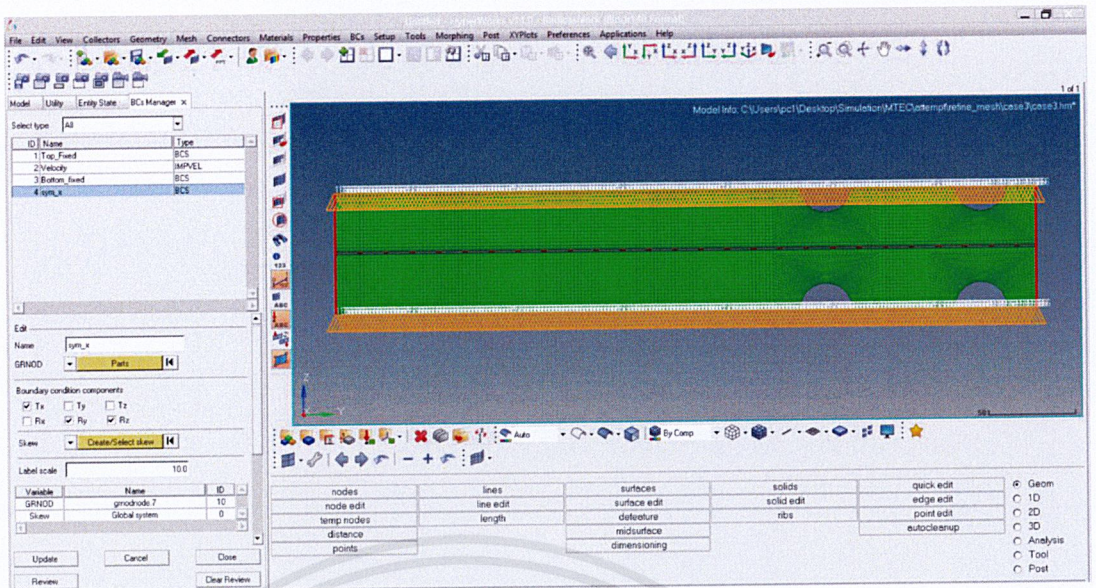
รูปที่ 3.48 (ซ้าย) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ Top_Fixed
(ขวา) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ Bottom_Fixed

ในส่วนของ Bottom Fixed ให้ทำการสร้าง Rigid node เพื่อยึดระนาบด้านล่าง แล้วทำการกำหนดค่าดังรูป 3.48 (ขวา) หลังจากนั้นกำหนด Imposed_Velocity ด้วยคำสั่ง Defined Curve เพื่อสร้างกราฟความเร็วดังรูป 3.49 โดยกำหนดให้ความเร็วที่จุดเริ่มต้น มีค่าคงที่เท่ากับ 15 มิลลิเมตรต่อวินาที ตลอดเวลา จากนั้นในหน้าต่าง Imposed_Velocity ทำการกำหนดแกนการเคลื่อนที่เป็นแกน Z รวมทั้งเลือกกราฟความเร็วที่สร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ สุดท้ายคือ Symmetry เนื่องจากในงานวิจัยนี้อาศัยหลักการความสมมาตรของชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขความสมมาตร ในตำแหน่งด้านข้างของชิ้นงานที่ถูกแบ่งครึ่ง รวมทั้งกำหนด องศาอิสระ (Degree of Freedom) ดังรูปที่ 3.50



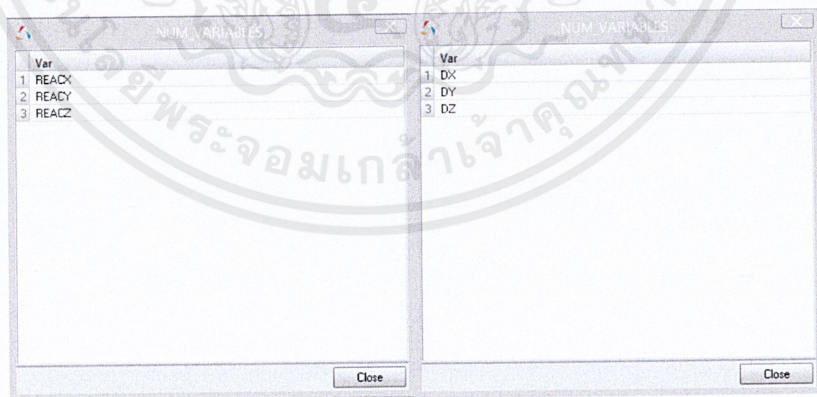
รูปที่ 3.49 กราฟความเร็วเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.50 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตความสมมาตร

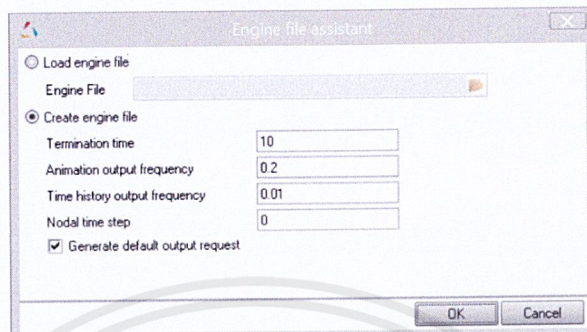
12. ทำการตั้งค่า Output file เพื่อที่จะเป็นตัวบันทึกค่า แรงต้าน (Reaction force) กับ ระยะยุบ (Displacement) โดยไปที่ Output Block > Create ต้องทำการสร้างทั้งหมด 2 ไฟล์ โดยไฟล์แรกสำหรับบันทึกค่าระยะยุบ ตั้งชื่อว่า Displacement tracking พร้อมทั้งเลือก Node ด้านหลังชิ้นงาน จากนั้นตรงคำสั่ง NUM_VARIABLES ใส่ค่า 3 พร้อมกับกำหนดค่าที่ต้องใส่ทั้ง 3 ค่า ดังรูป 3.51 (ซ้าย) เช่นเดียวกันในไฟล์สอง สำหรับบันทึกค่าแรงต้านที่เกิดขึ้น ตั้งชื่อว่า Force tracking พร้อมทั้งเลือก Node ด้านหน้าชิ้นงาน จากนั้นตรงคำสั่ง NUM_VARIABLES ใส่ค่า 3 พร้อมกับกำหนดค่าที่ต้องใส่ทั้ง 3 ค่า ดังรูป 3.51 (ขวา)



รูปที่ 3.51 คำสั่ง NUM_VARIABLES (ซ้าย) Displacement tracking (ขวา) Force tracking

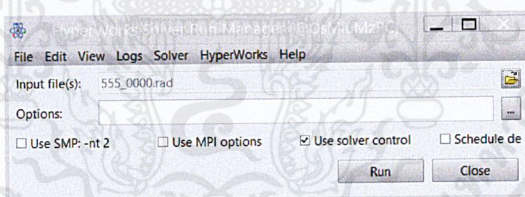
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ทำการกำหนด Engine files ในส่วนนี้จะป็นคำสั่งควบคุมเวลาในการแก้ปัญหาของโปรแกรมและเวลาที่ใช้ในการ Print out ข้อมูลที่ต้องการ ให้ใส่ค่าต่างๆ ดังรูป 3.52 หลังจากนั้นทำการ Export Solver Deck ไปยังโพลเดอร์ที่ต้องการ โดยตัวไฟล์จะต้องมีชื่อตามด้วย ชื่อที่ตั้ง_0000.rad

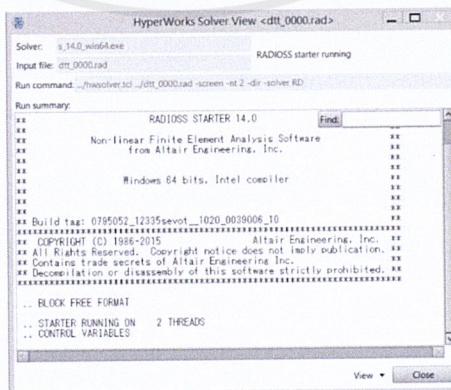


รูปที่ 3.52 การตั้งค่า Engine file

14. เข้าโปรแกรม RADIOSS ซึ่งมีลักษณะดังรูป 3.53 จากนั้นทำการเปิดไฟล์ Solver Deck ที่ทำการบันทึกไว้ แล้วกด RUN จะขึ้นหน้าต่างแสดงการคำนวณของโปรแกรมดังรูป 3.54 เป็นอันสิ้นสุดขั้นตอน Pre-process ซึ่งระยะเวลาในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับความสามารถของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง



รูปที่ 3.53 รูปร่างหน้าต่างของโปรแกรม RADIOSS



รูปที่ 3.54 รูปร่างการแสดงผลการคำนวณของโปรแกรม RADIOSS

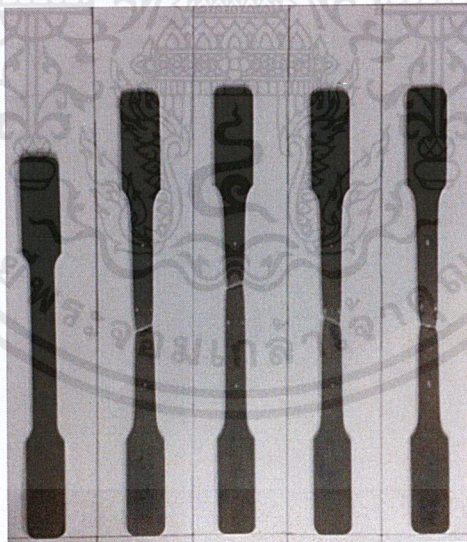
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

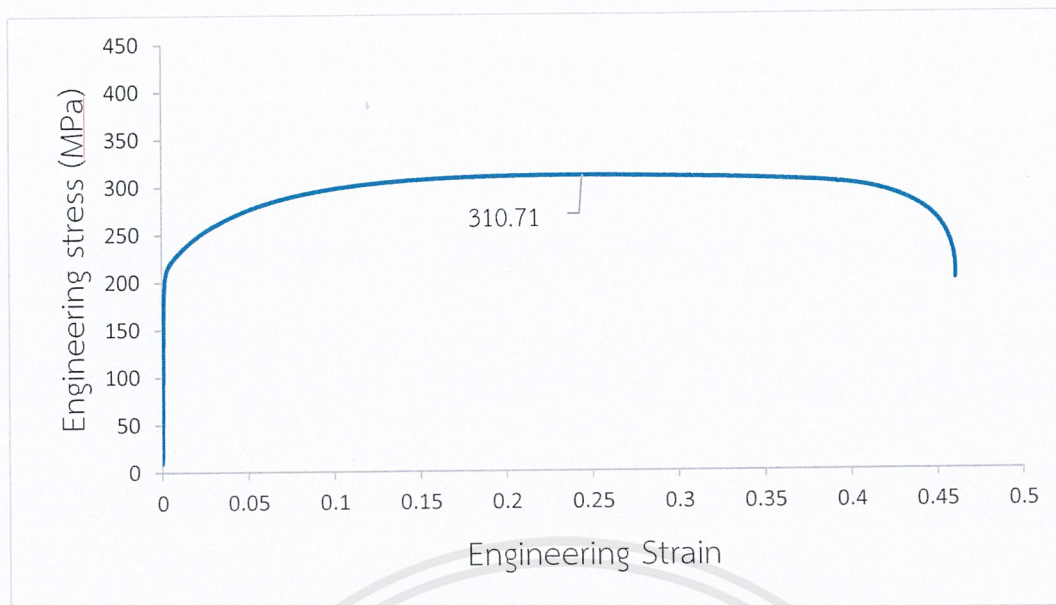
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

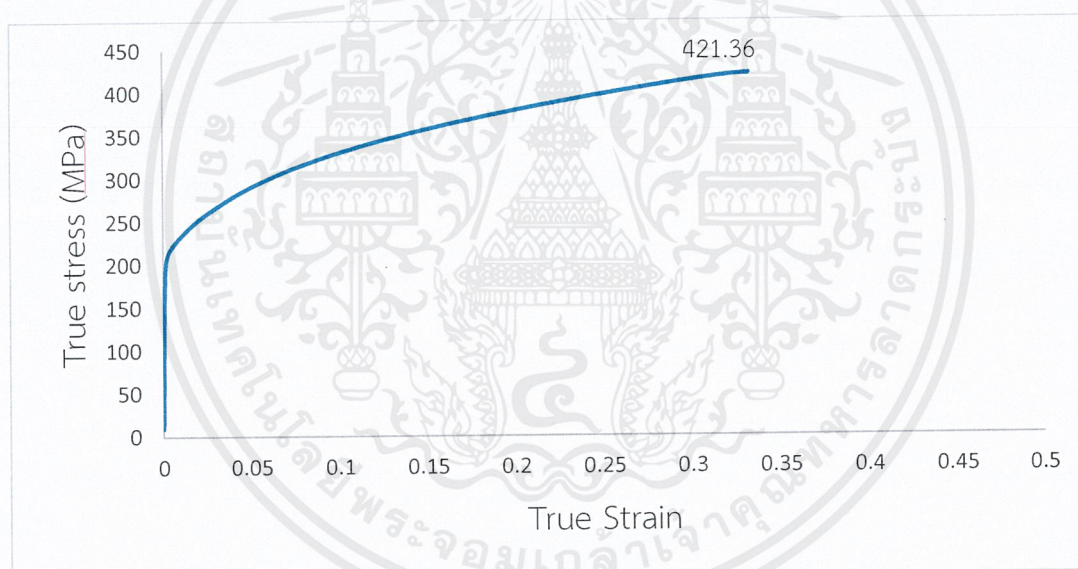
การทดสอบแรงดึงถูกนำมาใช้หาค่าคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้เป็นข้อมูลในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ต่อไป โดยค่าเหล่านี้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 4 ชิ้นซึ่งจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น รูปที่ 4.1 แสดงชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง จากรูปพบรอยขาดเกิดขึ้นบริเวณความยาวทดสอบ (Gage length) รอยแตกทำมุม 45 องศา ซึ่งเป็นลักษณะความเสียหายที่พบในวัสดุเหนียวทั่วไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเชิงวิศวกรรม และความเค้น-ความเครียดจริง แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดพบว่าวัสดุแสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อภายใต้แรงดึงที่มากกว่าตามรูปแบบวัสดุเหนียวคือมีช่วงการเสียรูปถาวร (Plastic deformation) อย่างเห็นได้ชัดก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Young's modulus ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (Yield stress, 0.2% offset) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด 0.003 s^{-1} ของชิ้นงานทั้งหมด 4 ชิ้น โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุในโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานก่อนและหลังทำการทดสอบแรงดึงของแบบสำหรับใช้หาคุณสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเชิงวิศวกรรม



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียดจริง

ตารางที่ 4.1 สมบัติของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง ที่ Strain rate เท่ากับ 0.003 s^{-1}

Young's modulus ,E (GPa)	204.99
Ultimate tensile strength ,UTS (MPa)	310.78
Yield stress(Offset 0.2%) , σ_y (MPa)	212.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อหาความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อใช้ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าชิ้นงานมีการเสียรูปก่อนที่รอยเชื่อมจะเสียหาย ซึ่งแสดงว่ารอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อวัสดุ ซึ่งทำให้แน่ใจว่าในระหว่างการทดสอบแรงอัด รอยเชื่อมจะทำหน้าที่ยึดชิ้นงานไม่ให้แยกออกจากกัน

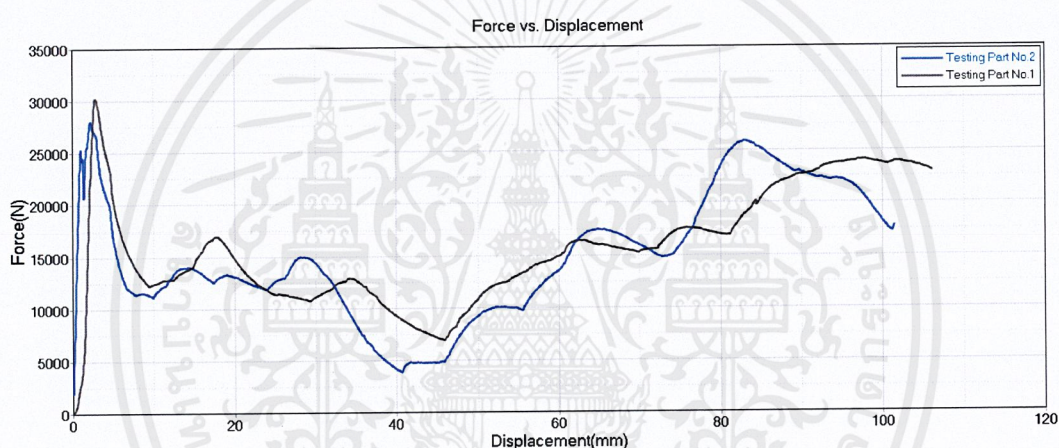


รูปที่ 4.4 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

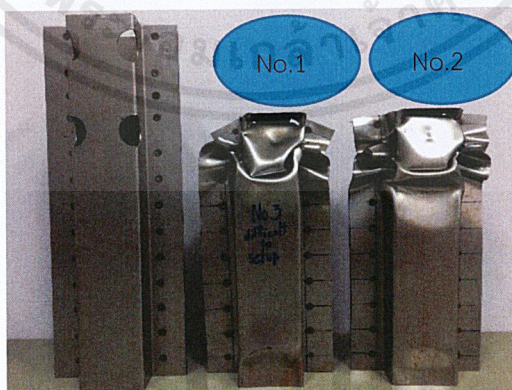
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบแรงอัด

ผลการทดสอบแรงอัดกับตัวดูดซับพลังงานตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ได้ผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสีรูปของตัวดูดซับพลังงานดังรูป 4.5 ซึ่งจะเห็นว่าการทดสอบทั้งสองครั้งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเมื่อตัวดูดซับพลังงานถูกกดอัดจะเกิดการเสีรูปในลักษณะของการพับย่น (Folding pattern) แรงในช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องมาจากแรงที่จะทำให้เกิดการเสีรูป (Displacement) จะต้องมีค่าเทียบเท่ากับความเค้นที่จะทำให้เกิดการเสีรูป ณ จุดนั้น (Flow stress) โดยค่านี้มีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากวัสดุมีพฤติกรรมต้านทานการเสีรูป (Strain hardening) หลังจากนั้นแรงที่ทำให้เกิดการเสีรูปจะมีค่าค่อนข้างคงที่และลดลงอีกครั้งเป็นผลมาจากรูปร่างของตัวดูดซับพลังงานที่มีการเจาะรู สุดท้ายแรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะการเสีรูป เป็นผลมาจากตัวดูดซับพลังงานจะไม่เกิดการเสีรูปในลักษณะที่มีการพับย่น (Folding pattern) อีกต่อไป



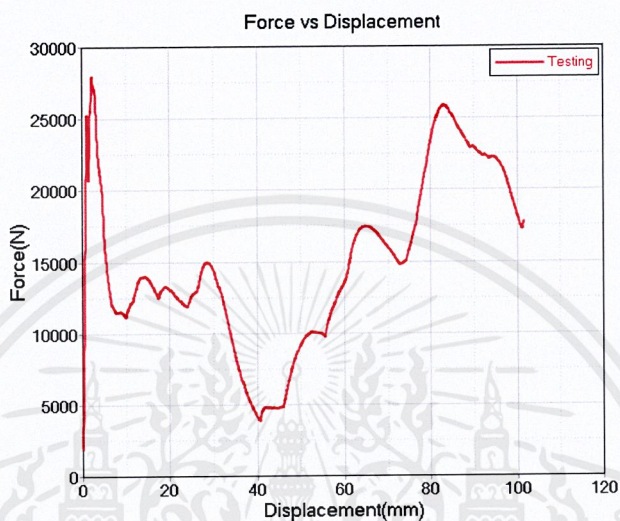
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสีรูปของตัวดูดซับตัวที่ 1 และ 2



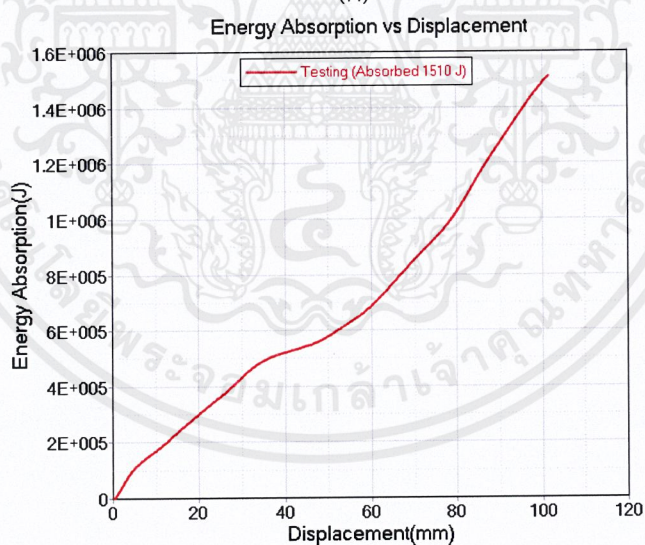
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเสีรูปของตัวดูดซับพลังงานตัวที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบแรงอัด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเสียรูป ซึ่งสามารถนำไปหาพลังงานที่ดูดซับไว้ได้ (Energy absorption) ของตัวดูดซับพลังงาน ในที่นี้เลือกใช้ค่าจากชิ้นงานตัวที่ 2 โดยค่าพลังงานที่ดูดซับไว้ได้นี้หาได้จากอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของแรงและระยะการเสียรูป รูปที่ 4.7 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับไว้ได้กับระยะการเสียรูป ซึ่งจะพบว่าพลังงานที่ดูดซับไว้ได้จะเพิ่มขึ้นตามระยะการเสียรูปที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานรวมที่ดูดซับได้ทั้งหมดที่ทำให้เกิดการเสียรูปที่ระยะ 100 มม. มีค่าเท่ากับ 1,510 J



(ก)

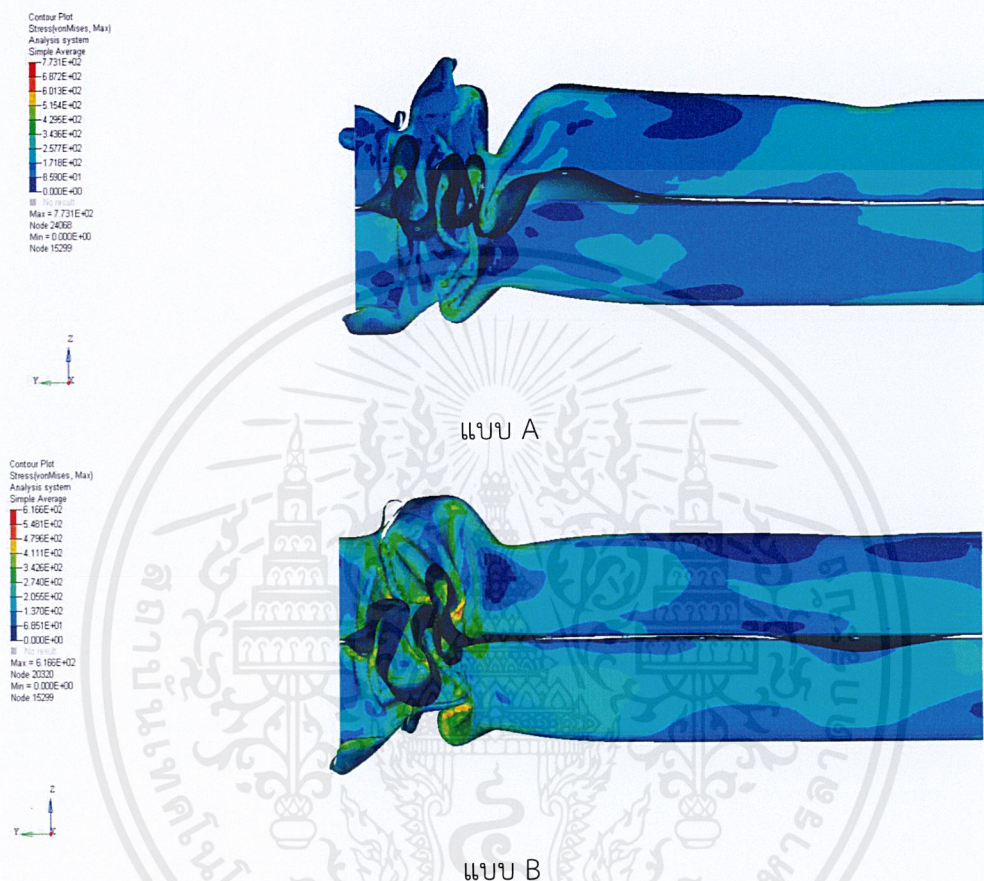


(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเสียรูป และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับกับระยะการเสียรูป

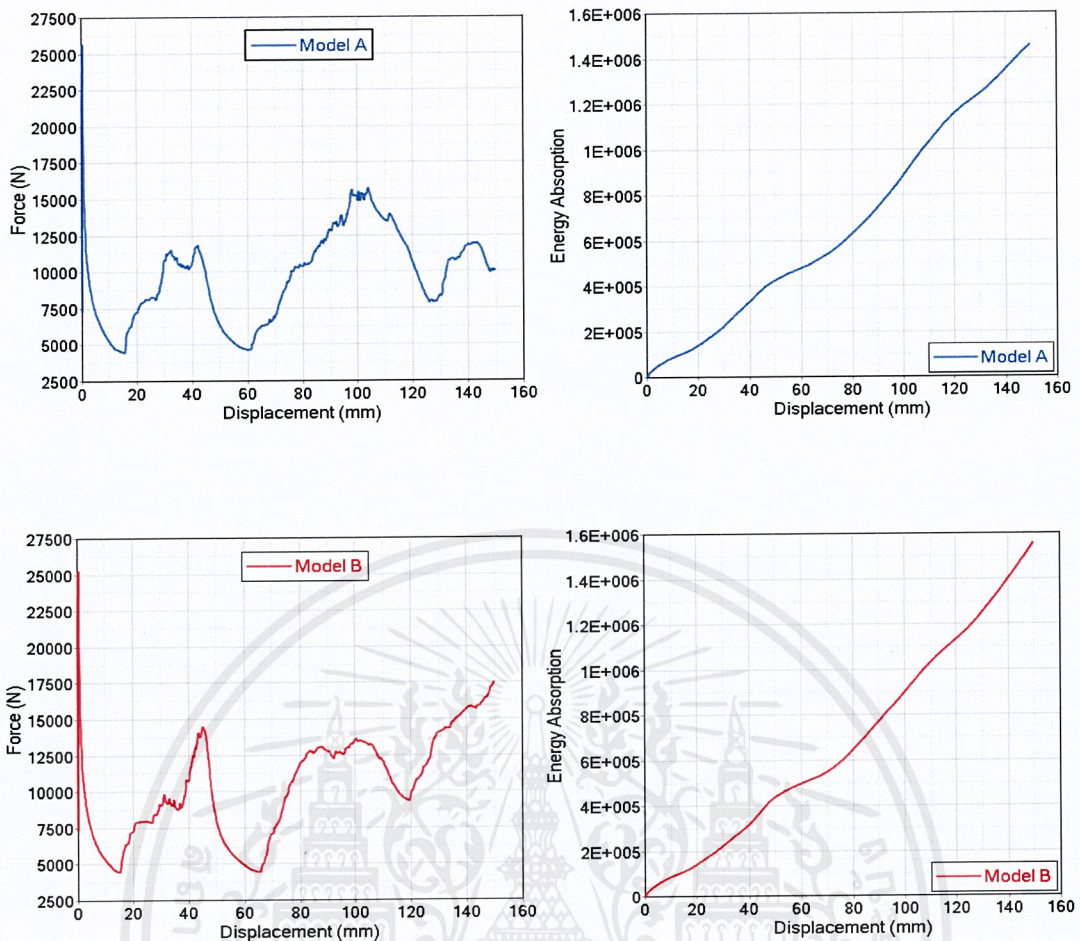
4.4 ผลการทดสอบแรงอัดด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โดยหลังจากทำการทดสอบด้วยโปรแกรม RADIOSS จะได้รูปแบบการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานรูปแบบ A และ แบบ B ดังรูป 4.8 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับระยะที่ถูกกดของตัวดูดซับพลังงาน แบบ A และ แบบ B ดังรูป 4.9



รูปที่ 4.8 รูปแบบการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานแบบ A และ B

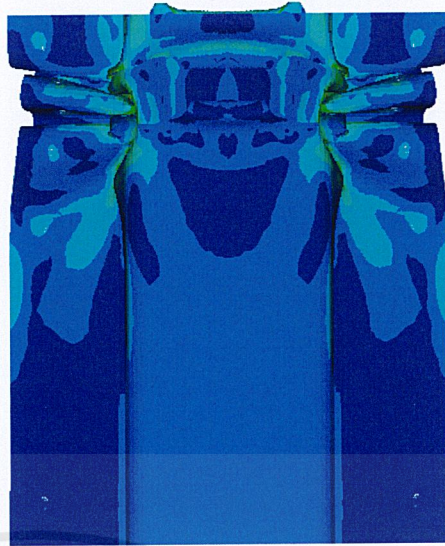
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับระยะเสียรูป และพลังงานที่ดูดซับได้กับระยะเสียรูป

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับระยะเสียรูป โดยพื้นที่ใต้กราฟจะเป็นค่าพลังงานที่ดูดซับได้ ซึ่งจากตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ A ดูดซับพลังงานได้ 1.457 kJ และ ตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ B ดูดซับพลังงานได้ 1.557 kJ และจะเห็นได้ว่ารูปแบบ B สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่ารูปแบบ A ประมาณ 100 J ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเป็นเหตุผลของการเลือกใช้ตำแหน่งรอยเชื่อมรูปแบบ B รายละเอียดดังรูปที่ 4.10 ทั้งในการทดสอบจริง (Actual test) และในโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์ (Simulation)

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Global System
 Simple Average
 6.710E+02
 5.964E+02
 5.219E+02
 4.473E+02
 3.726E+02
 2.982E+02
 2.237E+02
 1.491E+02
 7.455E+01
 0.000E+00
 No result
 Max = 6.710E+02
 Node 13065
 Min = 0.000E+00
 Node 15299



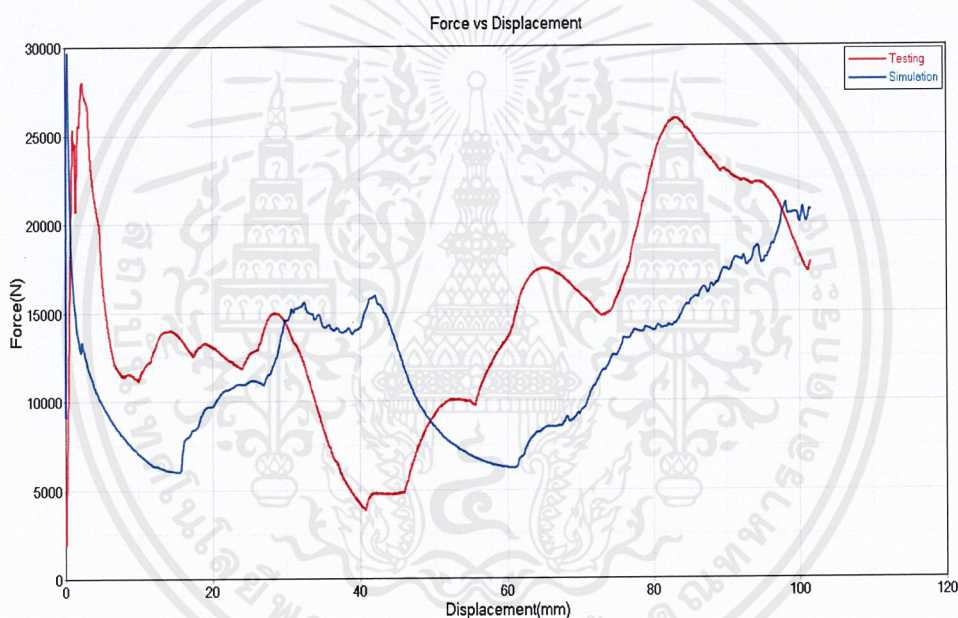
รูปที่ 4.12 รูปแบบการพยับนของตัวดูดซับพลังงาน



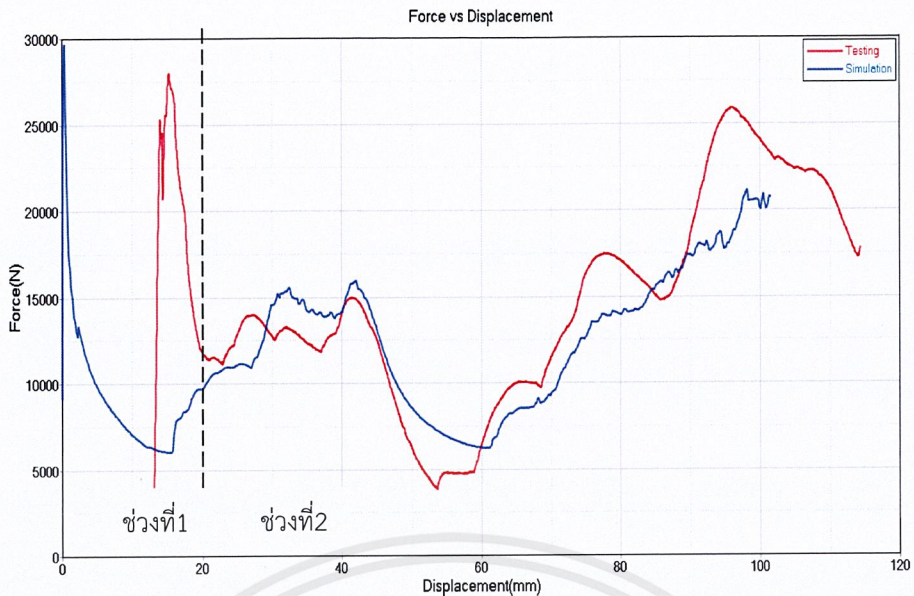
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

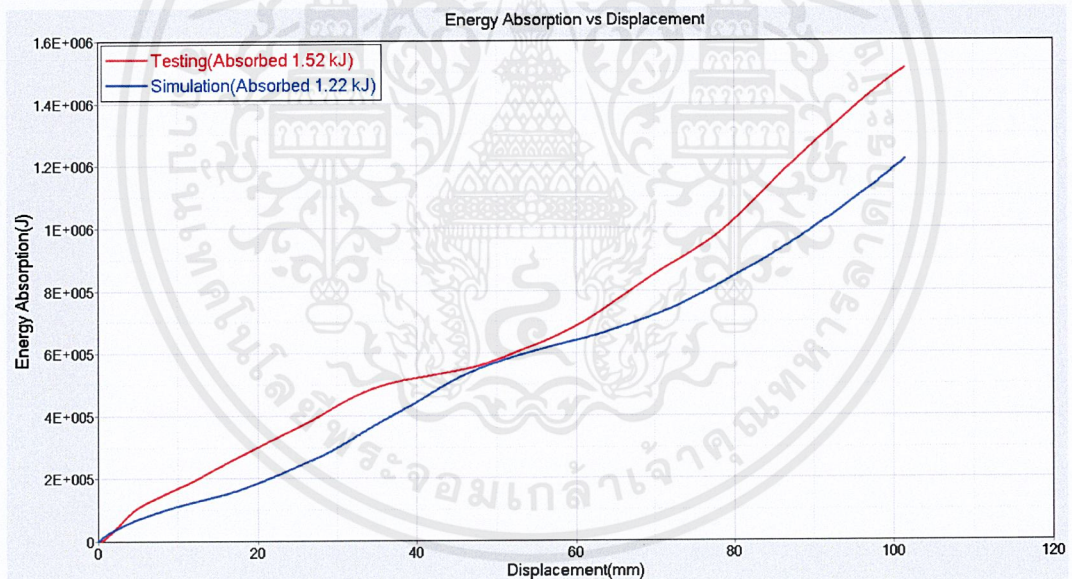
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเสียรูปภายใต้แรงกด พบว่าแนวโน้มของผลการทดสอบจะคล้ายกันหลังจากช่วงที่เกิดแรงต้านสูงสุด (Peak load) ถ้าหากทำการเลื่อนกราฟที่ได้จากการทดสอบจริงมาทางด้านขวามือเป็นระยะ 13 มิลลิเมตร ดังรูป 4.14 และทำการสร้างเส้นประเพื่อแบ่งกราฟ ที่ระยะ 20 มิลลิเมตร จะเห็นว่ากราฟถูกแบ่งเป็น 2 ช่วงโดยจากการศึกษาพบว่าในช่วงที่หนึ่ง ลักษณะและแนวโน้มของกราฟทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับ 2 ตัวแปรเป็นหลัก คือ ค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Material properties) และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) แต่เมื่อหลังจากผ่านช่วงที่หนึ่งไปแล้วลักษณะและแนวโน้มนั้นมีความสอดคล้องกัน ซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างของตัวดูดซับพลังงานที่คล้ายกันทั้งของจริงและในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ทราบว่าในช่วงที่สอง แนวโน้มของกราฟจะขึ้นอยู่กับเพียงรูปร่างของชิ้นงานเท่านั้น



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.14 การเลื่อนกราฟเพื่อให้ผลการทดสอบกับผลการจำลองบนคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าพลังงานที่ดูดซับได้จากการทดลองและจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ดูดซับได้จากการทดลองและจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จะเห็นว่าค่าการดูดซับพลังงานรวมที่ดูดซับได้จากการทดสอบคือ 1,520 J ส่วนพลังงานที่ดูดซับไว้ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์คือ 1,220 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 19.7% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าของสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้เป็นค่าที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบแรงดึงซึ่งอาจไม่

สอดคล้องกับเงื่อนไขหรือภาระแรงที่ทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปในงานวิจัยนี้ และอาจจะเป็นผลมาจากการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการจับยึดชิ้นงานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์การเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานในพาหนะระบบรางโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปจากการชนของตัวดูดซับพลังงาน แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการดูพฤติกรรมการเสียรูปด้วยการทดสอบจริง (Experimental test) และ ส่วนของการทดสอบด้วยการจำลองพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

การดูพฤติกรรมการเสียรูปด้วยการทดสอบจริง ใช้วิธีทดสอบแบบการทดสอบแรงกด (Compression test) โดยทำการทดสอบกับชิ้นงานตัวดูดซับพลังงานทั้งหมด 2 ชิ้น ผลการทดสอบพบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานทั้ง 2 ชิ้น มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเมื่อตัวดูดซับพลังงานถูกกดอัดจะเกิดการเสียรูปในลักษณะของการพับย่น (Folding) และยังพบว่าพบว่าการกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานของตัวที่ 2 มีแนวโน้มของกราฟสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มากกว่าตัวดูดซับพลังงานตัวที่ 1

การทดสอบด้วยการจำลองพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) จำลองโดยใช้โปรแกรม RADIOSS ผลการทดสอบพบว่า มีแนวโน้มคล้ายผลการทดสอบแรงอัด เนื่องจากลักษณะของกราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงและระยะการเสียรูปของการทดสอบแรงกดกับการทดสอบด้วยการจำลองพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุด้วยคอมพิวเตอร์โดยแสดงดังรูป 4.13 พบว่า ช่วงที่หนึ่งซึ่งแสดงในรูป 4.13 ในช่วงระยะการเสียรูปตั้งแต่ 1 ถึง 20 มิลลิเมตร เกิดแรงกระทำสูงสุด กราฟทั้งสองการทดสอบยังมีความแตกต่างกันทั้งขนาดแรงและระยะเสียรูป เนื่องจากยังขาดคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการโก่ง (Bending test) เพราะว่าการเสียรูปของตัวดูดซับพลังงานนั้นจะเกิดการเสียรูปสองแบบพร้อมๆ กันคือ การกดอัดและการพับย่น ทำให้ต้องมีพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการโก่งด้วย ช่วงที่สองซึ่งแสดงในรูป 4.13 กราฟทั้งสองการทดสอบมีความสอดคล้องกันมากขึ้นเนื่องจากลักษณะทางรูปร่าง (Geometry) ที่คล้ายกันของทั้งชิ้นงานจริงและชิ้นงานในแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยหากสามารถปรับพารามิเตอร์จนทำให้ผลการเปรียบเทียบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเสียรูป ทั้งในช่วงแรกซึ่งแสดงในรูป 4.13 และช่วงที่สองซึ่งแสดงในรูป 4.13 ให้มีความสอดคล้องกันแล้ว ขั้นตอนในการวิเคราะห์นี้จะสามารถนำไปปรับใช้กับงานในขนาดใหญ่และซับซ้อนขึ้นได้ โดยสิ่งนี้จะแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูป ซึ่งจะเป็นการลดข้อจำกัดในส่วนของการทดสอบชิ้นงาน

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

โปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถเป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้การกดอัด โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่นำเสนอนี้สามารถใช้งานได้ ถ้าหากชิ้นงานที่ใช้เปรียบเทียบมีรูปร่างที่คล้ายกัน เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะต้องมีการปรับพารามิเตอร์ที่จำเป็น อาทิเช่น คุณสมบัติของวัสดุให้แม่นยำมากขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปคือการเพิ่มความแม่นยำของผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ อย่างแรกคือการสแกนชิ้นงานด้วย เครื่องสแกน 3 มิติ เพื่อให้ได้ขนาด รูปร่างที่เหมือนชิ้นงานจริงที่สุด รวมทั้งทำการทดสอบการโก่ง (Bending test) เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติของวัสดุในกรณีของการพับย่น และในที่สุดท้ายคือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ของระบบ ให้มีความสอดคล้องกับการทดสอบจริงมากขึ้น สิ่งเหล่านี้จะช่วยให้ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกับการทดสอบจริงมากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Xue, F. Schmid, Crashworthiness of Conventionally Designed Railway Coaching Stock and Structural Modifications for Enhanced Performance, 5th European LS-DYNA Users Conference (2005)
- [2] C. Yang, D. Li, T. Zhu and Sh. Xiao, Special dynamic behavior of an aluminum alloy and effects on energy absorption in train collisions, Advances in Mechanical Engineering 8 (2014) 1-5.
- [3] T. Mochida, T. Yamaguchi, T. Kawasaki and T. Miyamoto, Development of Crashworthy Structure Composed of Aluminium Alloys for High-speed Railway Vehicle, Hitachi Review Vol. 57 (2008)
- [4] LS-DYNA® Analysis for Structural Mechanics (2015), Technical Support Team at Livermore Software and Technology Corporation (LSTC)
- [5] แอนโชนโทโรปี. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2560 จาก http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/Metal%20Forming%20Processes.pdf
- [6] S. Li, S. Ma, Ch. Li and X. Li, Origami Pattern Tube for Vehicle Crash Box, Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona Sweden (2013)
- [7] การเชื่อมจุด. สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2560 จาก : <https://www.eg.mahidol.ac.th/dept/egie/images/IE-Network-Archives/2011/PDF/4.OMA/QMA27.pdf>
- [8] An American National Standard. American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No.: T68



Best Project Award

This is to certify that

WITSAWANAT CHAICHOMPOO

Has been awarded the 'Best Project Award'

of the senior project in Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

In the year two thousand and seventeen

Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk
Head of Department of Mechanical Engineering, KMITL



Best Project Award

This is to certify that

AMMARIN MAHAWONGSANUN

Has been awarded the 'Best Project Award'

of the senior project in Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

In the year two thousand and seventeen

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jaruwat Charoensuk'.

Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk
Head of Department of Mechanical Engineering, KMITL