

พฤติกรรมของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีรอยนูนวงกลมรับภาระกระจายคงที่

นภาพร เทียนสุวรรณ

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2560

BEHAVIOR OF A SQUARE PLATE WITH A HEMISPHERICAL BULGE SUBJECTED TO
UNIFORMLY DISTRIBUTED LOADS

Napabhorn Thiensuwan

TNI

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

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2017

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีรอยร้าววงกลมรับภาระกระจายคงที่
โดย นภาพร เทียนสุวรรณ
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)
วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร. สุธี โอฟารฤทธินันท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอเกียรติ วงศ์สารพิกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาริฉัตร คงทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ)

นภาพร เทียนสุวรรณ : พฤติกรรมของแผ่นสี่เหลี่ยมมีรอยนูนวงกลมรับภาระกระจายคงที่.
อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ, 81 หน้า.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแผ่นบางมีรอยนูนและรอยบุ่มรับแรงกระจายตั้งฉากกับระนาบของแผ่น โดยยึดขอบล่างของแผ่นทั้งสี่ด้าน ในการวิเคราะห์ที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปร 2 ตัว คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดความลึกของรอยนูนและรอยบุ่ม โดยแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวของแผ่น และอัตราส่วนระหว่างความลึกกับความหนาของแผ่น แล้วทำการเปรียบเทียบระยะโก่งของแผ่นที่ภาระต่าง ๆ

จากผลการคำนวณในกรณีของแผ่นมีรอยนูน พบว่า แผ่นที่มีรอยนูนลึกกว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่าแผ่นที่มีรอยนูนน้อยกว่า และทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนจะมีแนวโน้มของระยะโก่งเหมือนกัน คือ รอยนูนที่ลึกกว่าจะมีระยะโก่งน้อยกว่า ทั้งนี้ถ้าแผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนมากแต่มีความลึกของรอยนูนน้อยจะมีระยะโก่งมาก ในขณะที่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนมีค่าน้อย ความลึกของรอยนูนจะไม่ค่อยมีผลต่อระยะโก่ง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนต่าง ๆ ในแต่ละค่าของระยะความลึกรอยนูนจะมีจุดตัดที่เกิดขึ้นที่แรงกระจายค่าหนึ่ง ที่ทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าการเสียรูปที่เท่ากัน จุดตัดนี้เป็นขีดจำกัดความสามารถของรอยนูนที่ช่วยเสริมแรงให้กับเหล็กแผ่น ถ้าเลยจุดตัดนี้ไปแล้ว แผ่นเรียบจะมีการเสียรูปที่น้อยกว่า ดังการเลือกขนาดความลึกรอยนูนและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต้องคำนึงถึงความสามารถการผลิตและขอบเขตของแรงที่ใช้ให้เหมาะสมจึงจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NAPABHORN THIENSUWAN : BEHAVIOR OF A SQUARE PLATE WITH A
HEMISPHERICAL BULGE SUBJECTED TO UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD.
ADVISOR : DR. EK-U THAMMAKORBUNJUT, 81 PP.

This research has purpose for studying characteristic of plate with hemispherical bulge and plate with dent that are subjected to perpendicular distributed load by fixing all lower edge of square plate. In the analysis, 2 parameters were changed that's diameter size and depth of bulge and dent. All parameter is shown in the form of a ratio between diameter size and length of plate and the ratio between depth and thickness of plate. Then compare the deflection of plate in various loads.

The result of calculation in case of plate with bulge, the plate that has depth bulge will have stiffness more than the plate that has shallow bulge. All size of diameter has same deflection trend. The deeper bulge will have lesser deflection. Even if the plate has large size of diameter but has shallow bulge, the deflection is still large. But if the diameter size of bulge is small, the depth of bulge is not effected with the deflection amount.

When consider the diameter of any bulge at each depth of the bulge, there will be the intersect point at one distributive force that all diameter size of the bulge have the same deflection value. This intersect point shown the limit strength which reinforce to steel plate. If over this point, flat plate will has deflection less than bulge plate. So the choosing size of depth and diameter of bulge, we have to consider productivity and limit of force that suitable then the usage will be the most efficiency.

Graduate School

Student's Signature.....

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature

Academic Year 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางการแก้ไขปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอเกียรติ วงศ์สารพิบูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาริฉัตร คงทอง และดร.สุธี โอฬารฤทธินันท์ที่ให้คำแนะนำและได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านและให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นภาพร เทียนสุวรรณ

TNI

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	10
3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3.2 ออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองรูปร่างกำหนดค่าความสัมพันธ์ ในแต่ละตัวแปร	10
3.3 ใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ผล	12

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	16
4.1 บทนำ	16
4.2 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กแผ่นเรียบ	16
4.3 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กที่มีรอยนูน	17
4.3.1 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูน แบบเปรียบเทียบความลึกรอยนูน	17
4.3.2 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูน แบบเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูน	20
4.3.3 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูนแบบเปรียบเทียบ ความลึกรอยนูน เจ็อนไขยิดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	23
4.3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูนแบบเปรียบเทียบ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนเจ็อนไขยิดผิวแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน.....	26
4.4 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กที่มีรอยบุ่ม	29
4.4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยบุ่ม แบบเปรียบเทียบความลึกรอยนูน	29
4.4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูน แบบเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูน	32
4.4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยบุ่มเปรียบเทียบ ความลึกรอยนูน เจ็อนไขยิดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	35

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
4	4.4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ และผลการจำลองแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยบวมแบบเปรียบเทียบ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน ...	38
	4.5 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กในกรณี เปลี่ยนเงื่อนไขเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร	40
	4.5.1 วิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็ก ที่มีขนาดกว้าง 150 มม. ยาว 150 มม.	41
	4.5.2 วิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีด้านกว้าง 100 มม. มีอัตราส่วนความลึกของรอยนูนต่อ ความหนาของแผ่นเท่ากับ 4	42
	4.5.3 วิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีด้านกว้าง 100 มม. มีอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต่อ ความหนาของแผ่นเหล็กใหม่	43
	4.5.4 วิเคราะห์อัตราส่วนปริมาตรที่เปลี่ยนไปเพื่อหาความสัมพันธ์ กับขนาดการเสียรูปของเหล็กแผ่นที่มีรอยนูน	44
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	51
	5.1 สรุปผลการทดลอง	51
	บรรณานุกรม	52
	ภาคผนวก	54
	ภาคผนวก ก. ตารางการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงและรูปร่างรอยนูนกับ รูปร่างรอยบวม	55
	ประวัติย่อผู้วิจัย	80

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก-13 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.3$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	68
ก-14 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.2$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	69
ก-15 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.1$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	70
ก-16 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.5$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	71
ก-17 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.4$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	72
ก-18 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.3$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	73
ก-19 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.2$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	74
ก-20 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยรูนเมื่อ $d/b = 0.1$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน	75
ก-21 ข้อมูลผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นขนาด 150×150 ตารางม.ม.ที่มีรอยรูน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด เงื่อนไขที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน ...	76
ก-22 ข้อมูลผลการคำนวณระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. ที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 4$	77
ก-23 ข้อมูลผลการคำนวณระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. ที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนสามขนาด เมื่อ $h/t = 5$	78
ก-24 ข้อมูลผลการคำนวณปริมาตรของรอยรูนที่อัตราส่วนความลึกต่างๆ	79

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	แผ่นสี่เหลี่ยมมีรอยนูนวงกลมที่ถูกเชื่อมอยู่ภายในคานเหล็กกล่อง.....	2
1.2	ตัวอย่างของแผ่นที่ใช้เป็นตัวรับรู้ความดันแบบเก็บประจุ	2
2.1	ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์บนชิ้นส่วนโครงสร้างและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	6
3.1	รูปร่างของแผ่นรอยนูนมุมมองด้านหน้าและด้านข้าง.....	9
3.2	การกำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรของการทดลอง.....	10
3.3	แผ่นรอยนูนที่มีอัตราส่วนขนาดใหญ่สุดและขนาดเล็กที่สุดในการทดลอง.....	11
3.4	ฟังก์ชันตัวแปรสำหรับการแก้ไขรูปร่างรอยนูน.....	12
3.5	การตั้งค่าคุณสมบัติและชนิดของวัสดุ.....	12
3.6	ทิศทางการกระจายแรงบนแผ่นเหล็ก.....	13
3.7	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	13
3.8	การเก็บข้อมูลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์.....	14
4.1	ผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเหล็กแผ่นเรียบ.....	15
4.2	ผลการจำลองแรงกระจายขนาด 10MPa กระทำบนแผ่นเรียบ.....	16
4.3	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่ความลึกต่าง ๆ	
	เมื่อ $d/b = 0.5$	16
4.4	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่ความลึกต่าง ๆ	
	เมื่อ $d/b = 0.4$	17
4.5	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่ความลึกต่าง ๆ	
	เมื่อ $d/b = 0.3$	17
4.6	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่ความลึกต่าง ๆ	
	เมื่อ $d/b = 0.2$	18
4.7	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่ความลึกต่าง ๆ	
	เมื่อ $d/b = 0.1$	18
4.8	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูน	
	ที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 1$	19

[illegible]

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.22	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 27
4.23	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.5$ 28
4.24	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.4$ 29
4.25	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.3$ 29
4.26	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.2$ 30
4.27	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.1$ 30
4.28	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 1$ 31
4.29	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 2.5$ 32
4.30	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 5$ 32
4.31	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 8$ 33
4.32	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 10$ 33
4.33	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 34
4.34	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.4$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.35	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.3$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 35
4.36	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.2$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 36
4.37	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 36
4.38	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 37
4.39	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 2.5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 37
4.40	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 38
4.41	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 8$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 38
4.42	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน ต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 10$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน..... 39
4.43	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 150×150 ตารางมม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดเมื่อ $h/t = 5$ 40
4.44	การเปรียบเทียบระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางมม. กับ ขนาด 150×150 ตารางมม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดเมื่อ $h/t=5$ 41
4.45	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางมม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 4$ 42
4.46	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางมม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 4$ และ 5 42
4.47	ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางมม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสามขนาด เมื่อ $h/t = 5$ 43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.48	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางมม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 5$ 44
4.49	ปริมาตรของรอยรูนบนแผ่นขนาด 100×100 ตารางมม. ที่ความลึก และเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ..... 45
4.50	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.5$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 45
4.51	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.4$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 46
4.52	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.3$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 46
4.53	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.2$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 47
4.54	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.1$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 47
4.55	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.5$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 48
4.56	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.4$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 49
4.57	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.3$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 49
4.58	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.2$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 50
4.59	ระยะโคงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.1$ ที่ความลึกต่าง ๆ..... 50

บทที่ 1

บทนำ

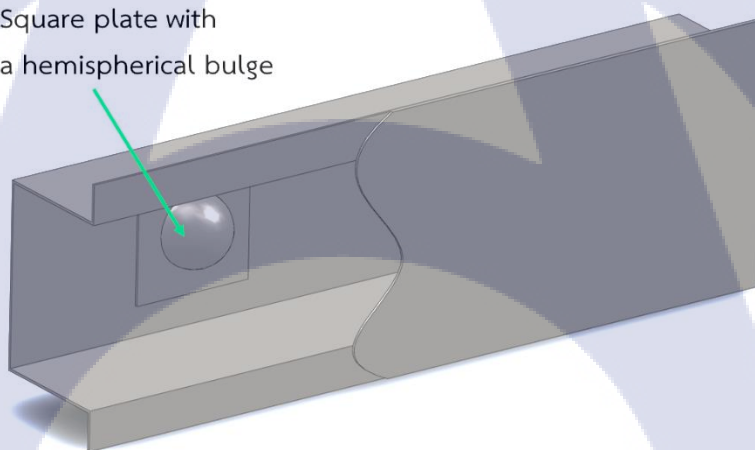
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการใช้โลหะในการผลิตและซ่อมบำรุงเป็นจำนวนมาก ชนิดของโลหะที่นำมาใช้งานก็แตกต่างกันไป เช่น ในอุตสาหกรรมเรือ และอุตสาหกรรมรถยนต์จะนิยมใช้เหล็กกล้าเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งแรง มีความทนทานสูง และสามารถแปรรูปเพื่อใช้งานได้หลากหลาย ขณะที่อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับตัวรับรู้ (sensor) และแอคชูเอเตอร์ (actuator) จะใช้วัสดุพวกซิลิกอน ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว ทอง วัสดุผสมจำรูป (shape memory alloy) และวัสดุฉลาด (smart materials) เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกล และทางไฟฟ้าเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน วัสดุต่าง ๆ ที่นำมาทำโครงสร้างในอุตสาหกรรมข้างต้น ส่วนใหญ่จะต้องรับภาระภายนอกที่มากระทำ ดังนั้นการออกแบบใช้งานจะต้องพิจารณาทั้งความแข็งแรง ความต้านทานต่อการเสียรูป และความมีเสถียรภาพของรูปร่างที่ออกแบบไว้ อนึ่งโครงสร้างจำพวกคาน (beams) แผ่น (plates) และเปลือก (shells) ซึ่งมีการศึกษาและพัฒนาอย่างยาวนานจัดเป็นโครงสร้างคลาสสิกที่มีทฤษฎีในการคำนวณเรียบเรียงไว้ในตำราเป็นจำนวนมาก [1, 2] แต่โครงสร้างบางประเภทมีลักษณะที่ยุ่งยากในการคำนวณเชิงทฤษฎี จำเป็นต้องใช้วิธีการทดลอง หรือใช้วิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) และวิธีบาวเดอร์เอลิเมนต์ (boundary element method) มาช่วยคำนวณหาคำตอบโดยประมาณ

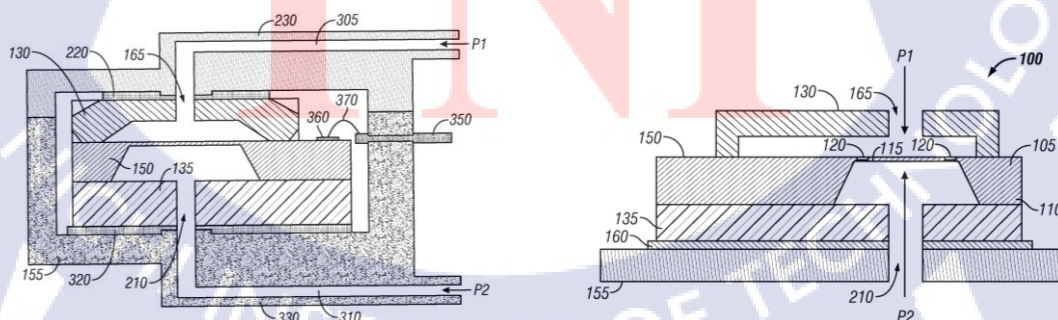
งานวิจัยนี้มีที่มาสองส่วน คือ ส่วนแรกเกิดจากการสังเกตเห็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ในการเสริมความแข็งแรงในโครงสร้างรถยนต์ของบางบริษัท ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีรอยนูน โดยรอยนูนนี้อาจมีรูปร่างเป็นวงกลมหรือวงรีขึ้นอยู่กับบริเวณที่จะเสริมแรง ตัวอย่างการใช้แผ่นมีรอยนูนแสดงดังรูปที่ 1.1 เพื่อเปลี่ยนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ณ ตำแหน่งที่ต้องการ หมายเหตุว่า ในบริษัทรถยนต์ที่มีการใช้งานโครงสร้างแบบนี้จะใช้คำศัพท์ภาษาอังกฤษเรียกรอยนูนแบบนี้ว่า “bead shape” ซึ่งโดยทั่วไปเราจะใช้คำว่า “bead” ในความหมายที่ต่างออกไป เช่น ก้อนกรวดหรือก้อนหินที่มีสีสนสวยงาม ลูกปัด และเนื้อโลหะที่เชื่อมต่อนั่นส่วนเข้าด้วยกัน (weld bead หรือ bead weld) นอกจากนี้ในงานออกแบบและซ่อมบำรุงเรือขนาดใหญ่ที่ใช้แผ่นเหล็กกล้ามาต่อเป็นโครงสร้างของตัวเรือ จะเรียกแผ่นที่มีรอยนูนหรือรอยบวมเนื่องจากเศษหินขนาดเล็กมากระแทกว่า “dented plate” ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ในอุตสาหกรรมเรือจะใช้คำว่า “dent” ในแง่ลบ คือ แทนรอยบวมที่ถือว่าเป็นความเสียหาย ในขณะที่คำว่า “bead” หรือคำ

ที่มีความหมายคล้ายกัน เช่น “bulge” จะใช้ในแง่ที่ดีกว่า คือ เป็นรอยนูนที่มีประโยชน์ในการใช้งาน และเกิดจากความตั้งใจสร้างขึ้นมา ส่วนที่สองเกิดจากการสังเกตการนำแผ่นเรียบบางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส และวงกลมไปใช้เป็นตัวรับรู้สำหรับการวัดความดันแบบตัวเก็บประจุ (capacitive pressure sensor) [3] โดยมีแผนผังตัวอย่างการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 1.2 [4] การออกแบบตัวรับรู้ความดันที่กล่าวมานี้ ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบขนาดให้เหมาะสมกับความดันที่มากระทำ บางครั้งการเลือกออกแบบโดยใช้โครงสร้างแผ่นแบบคลาสสิกอาจเป็นการจำกัดช่วงในการใช้งาน หรืออาจทำให้ขนาดที่ออกแบบไม่สามารถปรับเปลี่ยนไปตามสภาพการใช้งานที่อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งมีคำถามขึ้นมามีว่า ถ้าต้องการให้ความต้านทานการโก่ง (flexural stiffness) ของแผ่นมีค่าเปลี่ยนไป โดยขนาดความหนาที่บริเวณขอบ ความกว้าง และความยาวของแผ่นยังคงที่ และวัสดุยังเป็นชนิดเดิม จะสามารถทำได้หรือไม่ และแผ่นที่มีรอยนูนจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานประเภทนี้ได้หรือไม่

Square plate with
a hemispherical bulge



รูปที่ 1.1 แผ่นสี่เหลี่ยมมีรอยนูนวงกลมที่ถูกเชื่อมอยู่ภายในคานเหล็กกล่อง



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างของแผ่นที่ใช้เป็นตัวรับรู้ความดันแบบเก็บประจุ [3]

เมื่อประมวลแนวความคิดทั้งสองส่วนแล้ว ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจจะศึกษาพฤติกรรมของแผ่นสียเหล็กมียรอยนูนที่รับภาระกระจายคงที่ว่าจะเป็นเช่นไร ผลที่ได้น่าจะมีประโยชน์โดยสามารถเป็นความรู้พื้นฐานในการใช้แผ่นมียรอยนูนในการเสริมแรงให้โครงสร้างอื่น ๆ และอาจประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ในการวัดความดันได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแผ่นสียเหล็กมียรอยนูนที่รับภาระกระจายคงที่ที่ต่างจากกับแผ่น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระจายคงที่ในแนวตั้งฉากของแผ่นสียเหล็กมียรอยนูนโดยแบ่งการพิจารณาตามทิศทางของแรง คือ แรงกดทางด้านที่เป็นรอยนูน และแรงกดทางด้านที่เป็นรอยบุ๋ม

1.3.2 กำหนดให้แผ่นทำจากวัสดุเหล็กกล้าโครงสร้าง (structural steel)

1.3.3 เงื่อนไขขอบเขตมีสองแบบ คือ แบบยึดแน่นที่ขอบล่างของแผ่น และแบบยึดแน่นที่ผิวข้างของแผ่น

1.3.4 แผ่นมีขนาดกว้าง × ยาว เป็น 100 มม. × 100 มม. และหนา 2 มม.

1.3.5 กำหนดให้บริเวณรอยต่อของส่วนนูนกับแผ่นเรียบมีรัศมีความโค้งด้านในเท่ากับความหนาของแผ่นคือ 2 มม. และรัศมีความโค้งด้านนอกเท่ากับรัศมีในบวกกับความหนาเป็น 4 มม.

1.3.6 ภาระกระจายคงที่มีค่าเป็น 1 2.5 5 7.5 และ 10 MPa

1.3.7 วิเคราะห์ขนาดต่าง ๆ ของแผ่นในรูปของตัวแปรไร้หน่วย คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนต่อความกว้างของแผ่น (d/b) และอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยนูนต่อความหนาของแผ่น (h/t)

1.3.8 ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นโดยพิจารณาจากระยะโค้งสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของแผ่น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

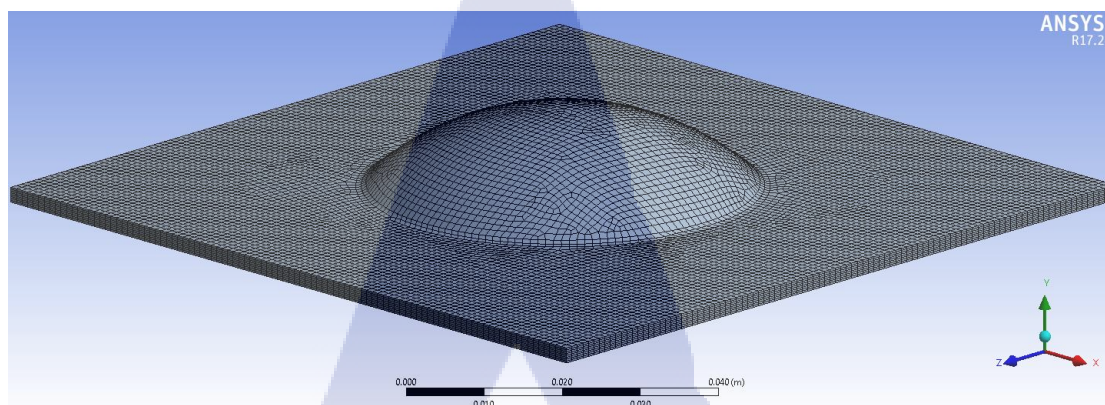
ได้ข้อมูลพฤติกรรมของแผ่นสียเหล็กมียรอยนูนและรอยบุ๋มเมื่อรับภาระกระจายคงที่ในแนวตั้งฉากของแผ่น เพื่อให้ผู้สนใจสามารถนำไปศึกษาต่อยอด หรือประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

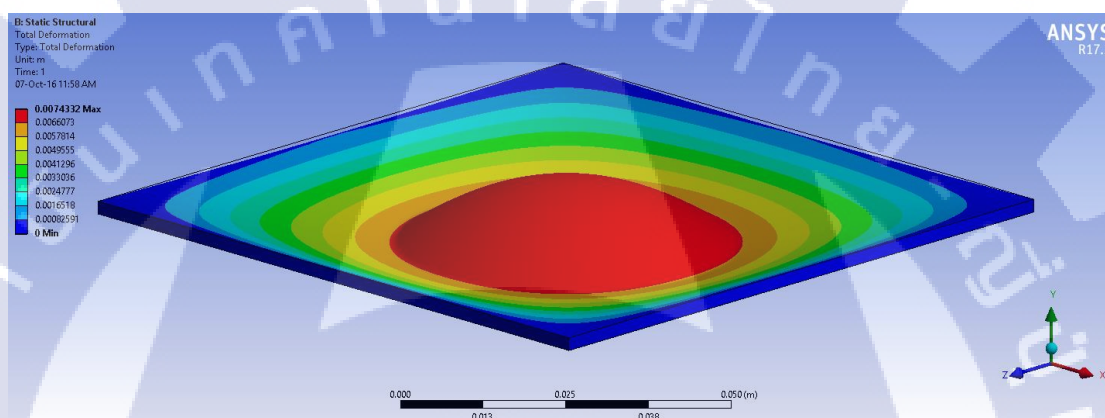
หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จะต้องแก้ระบบสมการหรือความสัมพันธ์ 3 ชุดที่เกี่ยวข้องกัน ประกอบด้วย สมการสมดุล 3 สมการ ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด 6 สมการ และความสัมพันธ์ความเครียดกับระยะเคลื่อนตัวอีก 6 สมการ รวมทั้งหมด 15 สมการ การวิเคราะห์ทางทฤษฎี (theoretical analysis) เพื่อแก้ระบบสมการเหล่านี้ในปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีความไม่เชิงเส้นจะทำได้ยากลำบากหรืออาจทำไม่ได้เลย จึงจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขมาช่วยแก้ปัญหา วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็จัดอยู่ในกลุ่มของวิธีเชิงตัวเลขซึ่งโดยหลักการแล้ว เป็นการเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่ควบคุมปัญหาที่จะวิเคราะห์ให้กลายเป็นระบบสมการพีชคณิต ซึ่งจะสามารถแก้สมการและหาคำตอบโดยประมาณได้ในรูปของเมทริกซ์ ในขั้นแรกจะแบ่งโดเมนหรือรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ขึ้นมาตามหลักการข้างต้น จากนั้นจึงทำการประกอบสมการย่อยของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบสมการโดยมีการควบคุมให้ตัวแปรที่จุดต่อและรอยต่อระหว่างเอลิเมนต์มีความต่อเนื่องกัน เมื่อทำการแทนค่าที่ขอบและแรงภายนอกที่มากระทำ ก็จะสามารถแก้ระบบสมการเพื่อหาตัวแปรไม่รู้ค่าที่ต้องการได้ และใช้ตัวแปรที่หาได้ในเบื้องต้นไปหาตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป กระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้กระทำได้โดยอาศัยการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันนี้มีโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีหลักในการคำนวณและประมวลผล เช่น ABAQUS ADINA ANSYS COMSOL Cradle HyperWorks LS-DYNA MSC-Marc และ MSC-Nastran เป็นต้น ข้อดีของโปรแกรมเชิงพาณิชย์คือ สามารถแบ่งเอลิเมนต์และสร้างเมช (mesh) ให้เข้ากับรูปทรงที่ซับซ้อนได้โดยอัตโนมัติ การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ใด ๆ สามารถทำได้ไม่ยาก ผู้วิเคราะห์สามารถใช้งานได้สะดวก ผลการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องสูง ประหยัดงบประมาณในการทดลอง และช่วยให้ทำงานได้เร็วขึ้น จากข้อดีที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการดำเนินการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) การแบ่งปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย และ (ข) ผลลัพธ์

2.1.1 ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอน [5] ดังนี้

1. การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ซึ่งเอลิเมนต์ที่เลือกใช้มีหลายแบบ เช่น เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยม สำหรับปัญหาสองมิติ และเอลิเมนต์ทรงสี่หน้ากับทรงลูกบาศก์ สำหรับปัญหาสามมิติ เป็นต้น
2. การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสมมุติการประมาณค่าตัวแปรระหว่างจุดต่อภายในเอลิเมนต์ เช่น เชิงเส้นตรง หรือพหุนาม เป็นต้น

3. การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปของเมทริกซ์ อาจใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (weighted residual method) หรือวิธีแปรผัน (variational method) ก็ได้ ในขั้นตอนนี้ เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (stiffness matrix) และเวกเตอร์ภาระ (load vector) ของแต่ละเอลิเมนต์จะถูกสร้างขึ้น

4. การประกอบสมการของเอลิเมนต์ย่อยเข้าเป็นระบบสมการรวมของปัญหา ในขั้นตอนนี้จะได้สมการสมดุลของปัญหาในรูปของเมทริกซ์ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2.1)$$

เมื่อ $[K]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง

$\{U\}$ คือ เวกเตอร์ระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อ (vector of nodal displacements)

$\{F\}$ คือ เวกเตอร์ภาระ

5. การแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ในขั้นตอนนี้จะต้องใส่ค่าภาระและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเข้าไปเพื่อให้สามารถแก้ระบบสมการได้

6. การคำนวณหาตัวแปรอื่น ๆ จากผลลัพธ์ที่จุดต่อที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 5 เช่น ใช้ค่าระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อคำนวณหาความเครียด (strain) และความเค้น (stress) ต่อไป

2.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม ANSYS สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

1. การสร้างรูปร่างหรือแบบจำลองของปัญหา ซึ่งสามารถวาดขึ้นภายในโปรแกรม ANSYS เอง หรือสามารถนำเข้าจากโปรแกรมเขียนแบบอื่นก็ได้ เช่น SolidWorks Solid Edge และ CATIA เป็นต้น

2. การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ โดยสามารถเลือกจากฐานข้อมูลวัสดุภายใน ANSYS หรือป้อนข้อมูลเพิ่มเข้าไปก็ได้

3. การเลือกชนิดของเอลิเมนต์และการสร้างเมช (mesh generation) ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกสร้างเมชได้ไม่ยาก แต่สำหรับรูปทรงของปัญหาที่ซับซ้อน หรือมีบริเวณเอกฐาน (singularity) เกิดขึ้น จำเป็นต้องมีความรอบคอบ และอาจต้องใช้เทคนิคในการแบ่งโซนของโครงสร้าง เพื่อให้แต่ละโซนมีความละเอียดของเมชที่แตกต่างกัน

4. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และภาระให้กับแบบจำลอง ในขั้นตอนนี้ผู้ใช้จะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และภาระให้เหมาะสมและสอดคล้องกัน เพราะมีผลอย่างมากต่อการคำนวณผลลัพธ์ซึ่งอาจจะคำนวณออกมาไม่ได้ หรือคำนวณออกมาได้แต่ไม่ถูกต้อง

5. การวิเคราะห์ผล ในขั้นตอนนี้ผู้ใช้จะต้องเลือกผลลัพธ์ที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณและแสดงผลออกมา

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Paik และคณะ [6] ทำการศึกษาความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นเหล็กกล้าที่มีรอยร้าวภายใต้แรงกดในแนวระนาบของแผ่นโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการวิเคราะห์ แผ่นที่ใช้ในการคำนวณมีทั้งสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบรองรับแบบง่ายในทุกกรณี ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นโดยใช้ตัวแปรไร้หน่วยคือ อัตราส่วนของความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นที่มีรอยร้าวต่อความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นที่ไม่มีรอยร้าว โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความกว้างยาวของแผ่น อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของรูต่อความกว้างของแผ่น อัตราส่วนความลึกของรอยร้าวต่อความหนาของแผ่น อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางของรอยร้าวต่อความกว้างและความยาว และลักษณะของรอยร้าวที่แบ่งเป็นทรงกลมกับทรงกรวย ผลการทดลองพบว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความลึกของรอยร้าวเท่ากัน รอยร้าวทรงกลมจะทำให้ความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นน้อยกว่าแผ่นที่มีรอยร้าวทรงกรวยอยู่เล็กน้อย ถ้าขนาดของรอยร้าวมีค่าน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงสูงสุดของแผ่น อัตราส่วนความกว้างยาว และความลึกของแผ่นไม่ค่อยมีผลต่อความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นที่มีรอยร้าว ถ้ารอยร้าวเยื้องศูนย์กลางมาทางด้านยาวของแผ่นซึ่งเป็นด้านที่ไม่มีภาระกระทำ จะทำให้ความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นลดลงประมาณ 20% เมื่อเทียบกับกรณีที่ยอยร้าวอยู่ตรงกลาง นอกจากนี้ ยังได้มีการสร้างสมการความแข็งแรงสูงสุดเมื่อมีรอยร้าวต่อความแข็งแรงสูงสุดเมื่อไม่มีรอยร้าวจากผลการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสมการนี้มีความถูกต้องพอสมควรเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ ที่ไม่ได้ทำการคำนวณในตอนแรก

Paik [7] ได้ทำการวิจัยต่อจากเดิม โดยศึกษากรณีที่แผ่นมีรอยร้าวรับภาระเฉือนในแนวระนาบด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ซึ่งพบว่า รูปร่างของรอยร้าวไม่ได้มีผลมากนักต่อความแข็งแรงเฉือนสูงสุด (ultimate shear strength) และขนาดของรอยร้าวที่เล็ก ๆ ก็ไม่ได้มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนสูงสุดเช่นกัน ในขณะที่ความลึกของรอยร้าวมีผล โดยที่ถ้าขนาดของรอยร้าวยิ่งใหญ่ขึ้น ความแข็งแรงเฉือนสูงสุดจะลดลงอย่างชัดเจน และถ้ารอยร้าวลึกมากขึ้นด้วยจะยิ่งทำให้แรงเฉือนสูงสุดลดลงมากขึ้นไปอีก ผลของการเยื้องศูนย์กลางของรอยร้าวมีน้อยมาก โดยรอยร้าวที่อยู่ตรงกลางแผ่น จะทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนต่ำที่สุดต่างจากกรณีของแผ่นมีรอยร้าวรับแรงกดในแนวระนาบ [6] รอยร้าวไม่ได้มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความกว้างยาว และความหนาของแผ่นในอันที่จะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงเฉือนสูงสุด งานวิจัยนี้มีการสร้างสมการความแข็งแรงเฉือนสูงสุดแล้วจัดรูปเป็นแฟกเตอร์สำหรับทำนายการลดลงของความแข็งแรงเฉือนสูงสุดด้วย

Sadovsky และ คณะ [8] ได้ทำการศึกษาการลดลงของความแข็งแรงเมื่อรับแรงกดของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเนื่องจากการโก่งในตอนเริ่มต้น โดยมีจุดสำคัญอยู่ที่การนำเสนอการใช้พลังงานความเครียดที่คำนวณจากระยะโก่งเริ่มต้นซึ่งนิยามด้วยอนุกรมฟูเรียร์ไซน์ (Fourier Sine series) และการนอร์มัลไลซ์ (normalize) พลังงานความเครียดดังกล่าว อนึ่งระยะโก่งในตอนเริ่มต้นได้จากการสุมวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่น ซึ่งการสุมวัดนี้เองที่ผู้วิจัยเชื่อว่าเป็นตัวทำให้การคำนวณมีความผิดพลาดจึงได้นำเสนอการแปลงเป็นพลังงานความเครียดก่อน ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือการนอร์มัลไลซ์จะให้ค่าที่ไม่ตึง ในขณะที่ยังคงระยะโก่งเริ่มต้นเป็นพลังงานความเครียดถือว่าสามารถนำมาใช้งานได้

Raviprakash และคณะ [9] ทำการศึกษาความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีรอยร้าวและรับแรงกดในแนวระนาบของแผ่น งานวิจัยนี้สมมุติให้รอยร้าวอยู่ในรูปครึ่งคลื่นไซน์ซอว์ (half-wave length Sinusoidal shape) สองมิติ โดยพิจารณาผลของรอยร้าวคือ ความกว้าง ความยาว ความลึก และทิศทางการวางตัว ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ซึ่งพบว่า ขนาดของรอยร้าวล้วนแต่ลดความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นลง ในกรณีของรอยร้าวที่สั้นมาก ๆ การเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางการวางตัวไม่ค่อยมีผลต่อค่าความแข็งแรงสูงสุด ในขณะที่รอยร้าวที่ค่อนข้างยาว การเปลี่ยนของขนาดและทิศทางการวางตัวมีผลต่อค่าความแข็งแรงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นที่มีรอยร้าวยาวที่วางแนวยาวตรงกับแนวของภาระที่กระทำจะมีความแข็งแรงสูงสุดมากกว่าแผ่นที่มีรอยร้าววางแนวยาวขวางกับแนวของภาระ

Xu และ Guedes Soares [10] ศึกษาความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นเสริมความแข็งแรงที่มีรอยร้าวและรับแรงกดในแนวระนาบ ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ทำการจำลองกตรอยร้าวทรงกลมที่กึ่งกลางของแผ่นบริเวณที่ไม่มีแผ่นเสริมเสริมแรง วิเคราะห์หาความเค้นตกค้างจากการทำรอยร้าว แล้วทำการวิเคราะห์ผลของขนาดรอยร้าว และความเค้นตกค้างต่อความแข็งแรงสูงสุด จากผลการคำนวณพบว่า ความแข็งแรงสูงสุดในกรณีของแผ่นที่พิจารณาความเค้นตกค้างมีค่ามากกว่ากรณีของแผ่นที่ไม่พิจารณาความเค้นตกค้างอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากความเค้นตกค้างทำให้เกิดความเค้นดึงตกค้างที่แผ่นเสริมเสริมแรงเลยมีส่วนช่วยให้รับแรงกดได้มากขึ้นเล็กน้อย ส่วนขนาดของรอยร้าวที่ใหญ่กว่าจะทำให้ความแข็งแรงของแผ่นลดลงมากกว่า

H.E. Elgamel [3] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่า Piezoresistivity ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งชี้จากค่าต้านทานการเสียรูปที่เปลี่ยนไปจากความเครียดในเนื้อวัสดุ การดำเนินงานวิจัยทำโดยทดลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปจากแรงกดกับค่าไฟฟ้าที่คายออกมาจากการกดแผ่นซิลิกอนที่ยึดกับแผ่นฐานที่ขอบทั้งสี่ด้าน จากการทดลองพบว่า ซิลิกอนเป็นสารที่มีค่า Piezoresistivity สูงและไวต่อการเสียรูปมากกว่าโลหะถึง 100 เท่า จึงเหมาะสำหรับนำไปผลิตตัวตรวจรู้รับแรงกดและประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ขั้นสูงสำหรับงานทางการแพทย์และยานพาหนะ

บทที่3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

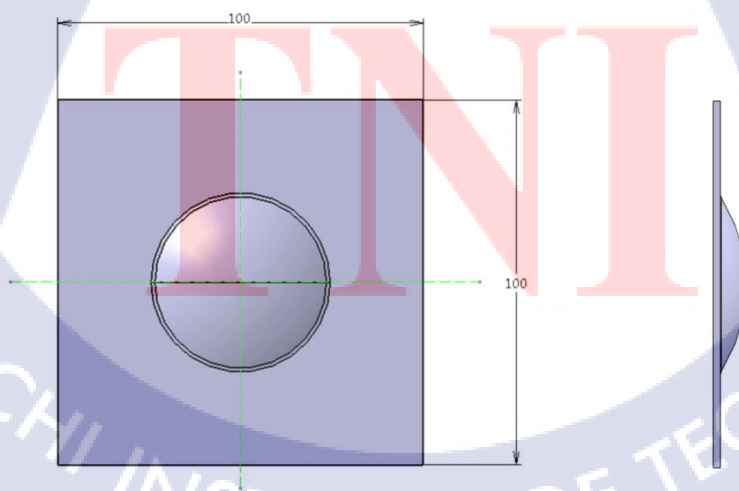
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปที่เกิดจากการกระทำของแรงกระจายที่ทำต่อแผ่นเหล็กที่มีรอยรูนและแผ่นที่มีรูปร่างเป็นรอยนูน วิธีการดำเนินงานมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแหล่งอ้างอิงข้อมูลและเป็นความรู้เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

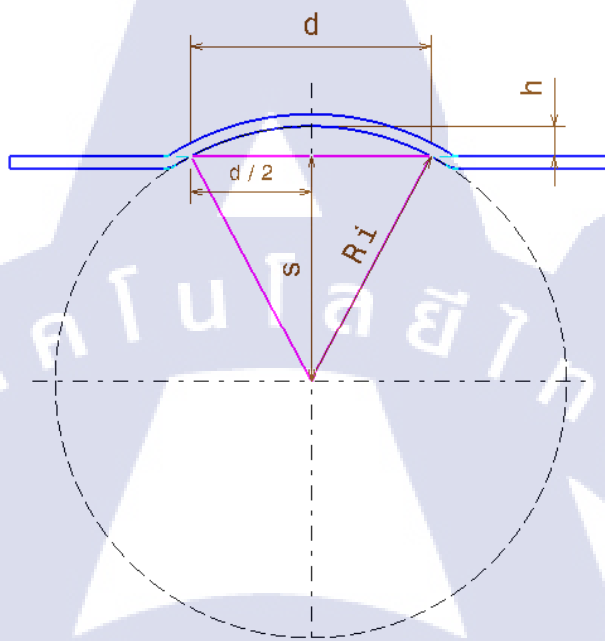
3.2 ออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองรูปร่างกำหนดค่าความสัมพันธ์ในแต่ละตัวแปร

การออกแบบการทดลองจะกำหนดค่าความหนาของเหล็กแผ่นอยู่ที่ 2 มม. และความกว้างของเหล็กแผ่นอยู่ที่ 100 มม. x 100 มม. โดยจะเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างความยาวและความลึกของรอยนูนบนชิ้นงานดังรูปที่ 3.1 รูปร่างแบบหนึ่งจะทำการ simulation แบ่งเป็นทิศทางการใส่แรงเป็นสองแบบด้วยกันคือ แรงกดในแนวตั้งฉากฝั่งรอยนูนและแรงกดในแนวตั้งฉากในฝั่งด้านที่เป็นรอยนูน เมื่อได้ข้อกำหนดในการทดลองแล้ว ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ผล นำข้อมูลที่ได้มาสร้าง Math model เพื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร หลังจากนั้นขั้นตอนต่อไปคือนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าอิทธิพลต่าง ๆ มาสรุปผล



รูปที่ 3.1 รูปร่างของแผ่นรอยนูนมองด้านหน้าและด้านข้าง

การดำเนินการทดลองมีการกำหนดตัวแปรดังรูปที่ 3.2 ดังนี้ ความหนาของแผ่นเป็นตัวแปร t ความยาวของแผ่นเป็น a ความกว้างของแผ่นเป็น b เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนเป็น d ความลึกรอยนูนเป็น h และรัศมีความโค้งด้านในของรอยนูนเป็น R_i



รูปที่ 3.2 การกำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรของการทดลอง

โดยการทดลองจะมีการกำหนดค่าขนาดตัวแปรและมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเพื่อทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.1.1 ความหนา (h) = 2 มม.

3.1.2 แผ่นเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสแตนเลส 304 ดังนั้นความกว้าง (a) และความยาว (b) จะมีขนาดที่เท่ากันคือ 100 มม.

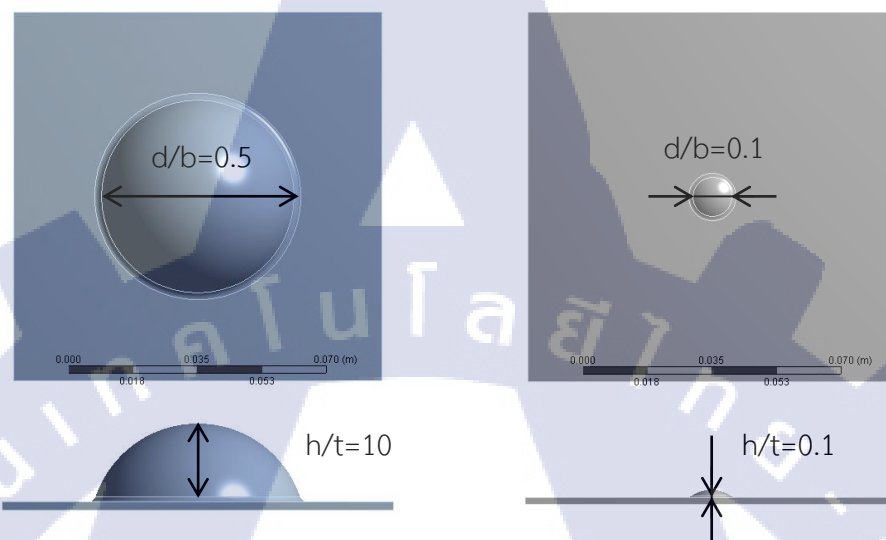
3.1.3 เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูน (d) กับความกว้างของแผ่น (b) เพื่อทำการวิเคราะห์มี 5 ค่าคือ 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5

3.1.4 เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความลึกรอยนูน (h) กับความหนาของแผ่น (t) เพื่อทำการวิเคราะห์มี 5 ค่า คือ 1 2.5 5 8 และ 10

3.1.5 เปลี่ยนแปลงค่าภาระที่กระทำออกเป็น 5 ค่าคือ 1 2.5 5 7.5 และ 10 MPa

3.1.6 เปลี่ยนแปลงทิศทางที่ใส่แรงกระจายแบ่งเป็นสองด้านด้วยกันคือ ด้านที่เป็นรอยนูน และด้านที่เป็นรอยบวม

การทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยนูนตามตัวแปรที่อธิบายในข้างต้น ตัวอย่างรูปร่างของรอยนูนที่มีความกว้างและความลึกของรอยนูนมากที่สุด กับรอยนูนที่มีความกว้างและความลึกของรอยนูนน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผ่นรอยนูนที่มีอัตราส่วนขนาดใหญ่สุดและขนาดเล็กที่สุดในการทดลอง

3.3 ใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ผล

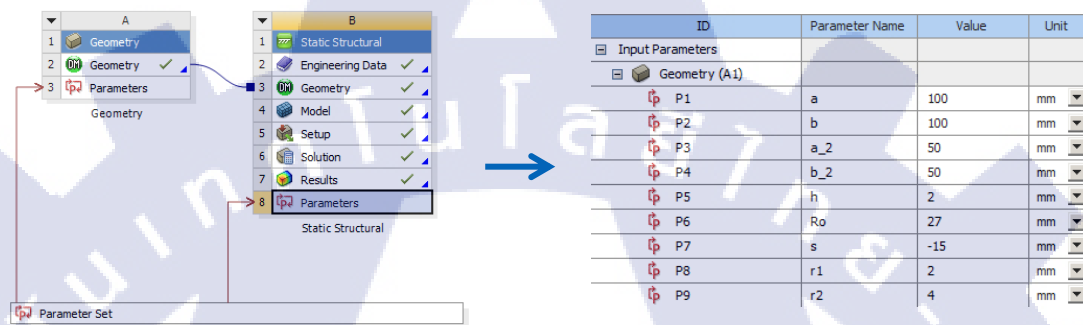
3.3.1 สร้างแบบจำลองรูปร่างรอยนูนลงในโปรแกรม ANSYS โดยเพิ่มฟังก์ชันตัวแปรเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่างรอยนูนจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรได้ ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างรอยนูนคือเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูน R_o และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงขอบผิวแผ่นเหล็ก s สามารถคำนวณได้จากสูตรสมการ (3.1) - (3.3) และนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปแก้ไขตัวแปรดังรูปที่ 3.4

$$R_i = \frac{h}{2} + \frac{d^2}{8h} \quad (3.1)$$

$$R_o = R_i + t \quad (3.2)$$

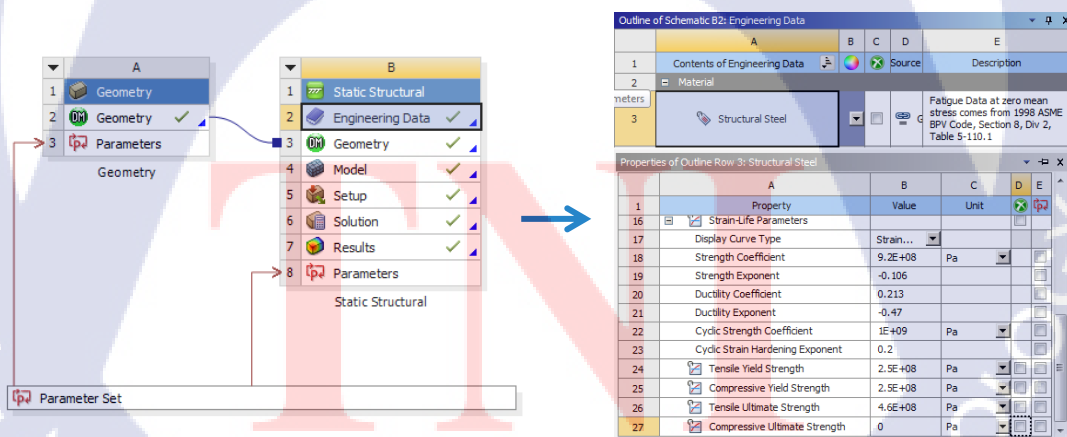
$$s = R_i - h \quad (3.3)$$

- เมื่อ
- R_i เป็นขนาดรัศมีภายในของรอยนูนและรัศมีภายนอกของรอยนูน
 - R_o เป็นขนาดรัศมีภายนอกของรอยนูนและรัศมีภายนอกของรอยนูน
 - h เป็นขนาดความลึกของรอยนูนและความลึกของรอยนูน
 - d เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูน
 - s เป็นค่าความต่างของรัศมีรอยนูนภายในกับค่าความลึกของรอยนูน
 - t เป็นขนาดความหนาของเหล็กแผ่น



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันตัวแปรสำหรับการแก้ไขรูปร่างรอยนูน

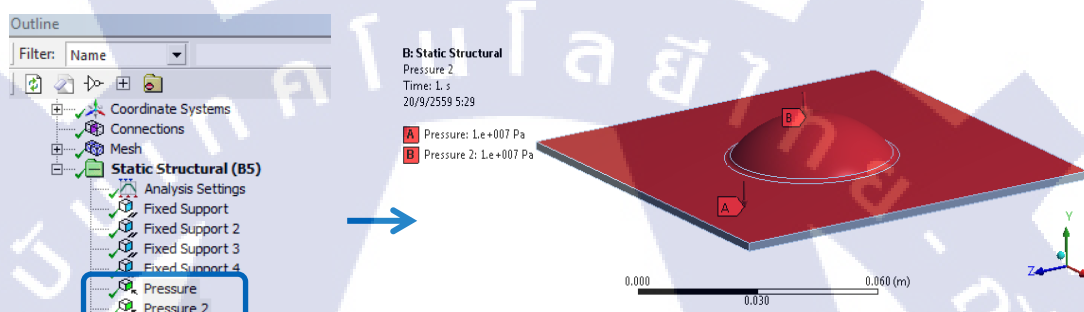
3.3.2 กำหนดชนิดของวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุเป็น Structural steel ดังรูปที่ 3.5



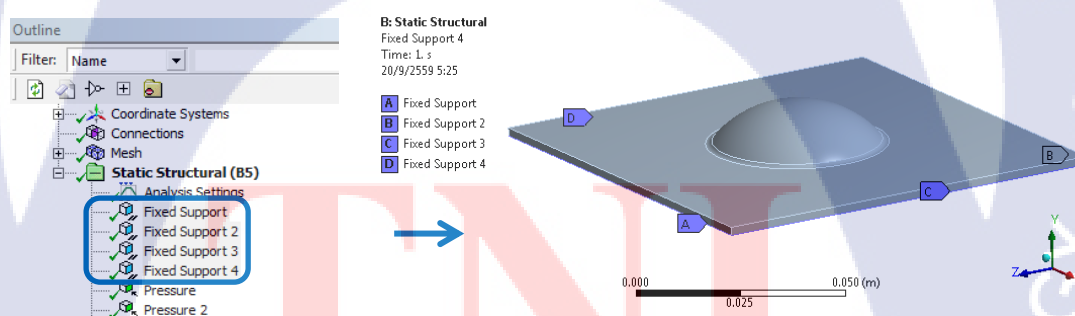
รูปที่ 3.5 การตั้งค่าคุณสมบัติและชนิดของวัสดุ

3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขโปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ผล

กำหนด Element Type เป็นแบบ Hexahedral 8 Nodes และเนื่องจากให้โปรแกรมสร้างเมชให้อัตโนมัติ ทำให้จำนวนโหนดและเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณจะอยู่ในช่วง 143660 – 176039 โหนด และ 30100 – 41636 เอลิเมนต์ตามลำดับ กำหนดความดันกระทำกับแผ่นในแนวตั้งฉากโดยปรับเปลี่ยนขนาด 5 ค่า โดยมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบยึดแน่น (Fix) ตลอดแนวขอบด้านล่างของแผ่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7

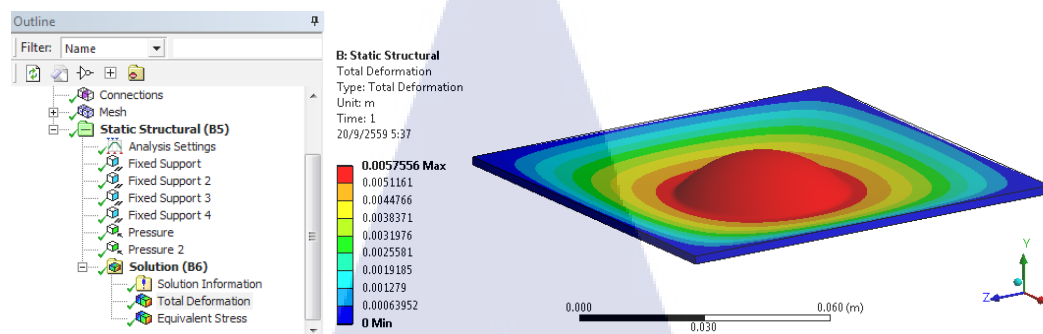


รูปที่ 3.6 ทิศทางการกระจายแรงบนแผ่นหลัก



รูปที่ 3.7 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

3.3.4 วิเคราะห์ผลจาก Total Deformation โดยทำการเก็บข้อมูลค่าการเสียรูปที่มากที่สุดในแต่ละกรณีที่ทำทดลองดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเก็บข้อมูลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์

3.3.5 สรุปผล จัดทำรายงาน และบทความวิชาการ

TNI

บทที่ 4

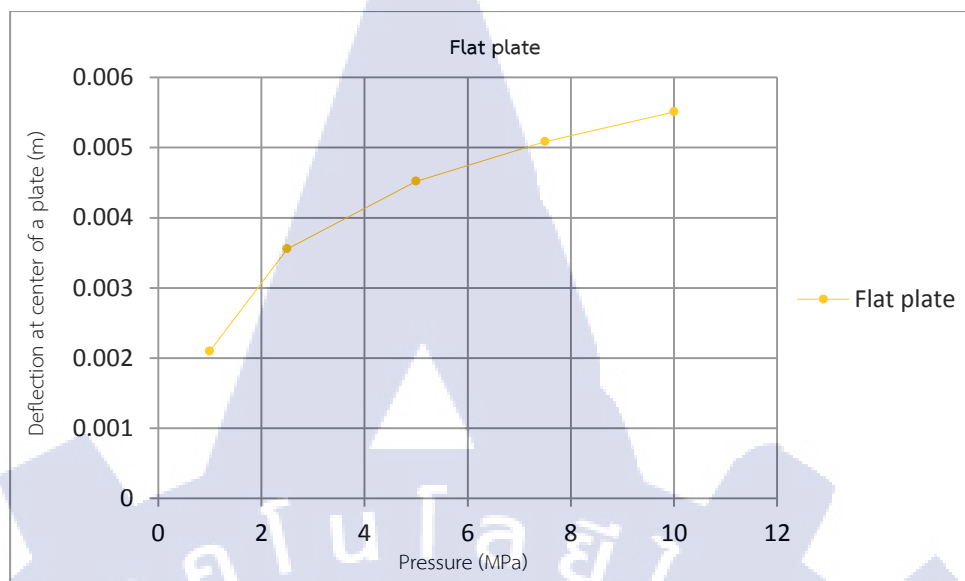
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 บทนำ

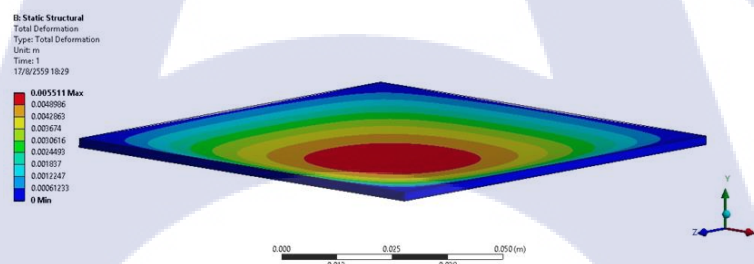
ในบทนี้จะแบ่งผลการคำนวณออกเป็น 4 กรณีหลัก ๆ คือ กรณีแรก แรงกระจายจะกระทำกับแผ่นด้านที่มีรอยนูน และกรณีที่สอง แรงกระจายจะกระทำกับแผ่นด้านที่มีรอยบุ๋มหรือเป็น หลุม กรณีที่สาม และสี่จะทำเหมือนกรณีที่หนึ่งและสองตามลำดับ แต่เปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตที่ตอนแรก ยึดแน่นที่ขอบล่างทั้งสี่ด้านของแผ่นเป็นยึดแน่นที่ผิวด้านข้างทั้งสี่ด้านของแผ่น ทั้งสี่กรณีจะวิเคราะห์ โดย (ก) การเปรียบเทียบอัตราส่วนความลึกของรอยนูนต่อความหนาของแผ่น (h/t) เมื่อให้อัตราส่วน เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนต่อความกว้างของแผ่น (d/b) มีค่าคงที่ และ (ข) การเปรียบเทียบ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนต่อความกว้างของแผ่น (d/b) เมื่อให้อัตราส่วนความลึกของ รอยนูนต่อความหนาของแผ่น (h/t) มีค่าคงที่ แต่ในการแบ่งหัวข้อจะแบ่งโดยจัดกรณีที่หนึ่งและสาม ไว้ในหัวข้อเดียวกันคือ หัวข้อที่ 4.3 และกรณีที่สองและสี่จะอยู่ในหัวข้อที่ 4.4 นอกจากนี้ ในกรณีแรก ยังมีการปรับเปลี่ยนขนาดของแผ่นและขนาดของแรงเพื่อยืนยันผลการคำนวณ และทดลองนำ ปริมาตรของรอยนูนมาช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยทั้งสองต่อระยะโก่งของ แผ่นด้วย

4.2 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กแผ่นเรียบ

จากผลการจำลองการกระจายแรงลงบนเหล็กแผ่นเรียบดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของการเสียรูปของเหล็กแผ่นว่ามีลักษณะไม่เชิงเส้น ในช่วงตอนแรกที่ใช้แรงกระจายจะมี การเสียรูปในอัตราที่สูง และลดลงในส่วนท้าย ข้อมูลการจำลองนี้ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการอ้างอิง และเปรียบเทียบกับผลการจำลองแผ่นมีรอยนูนและมีรอยบุ๋ม



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเหล็กแผ่นเรียบ



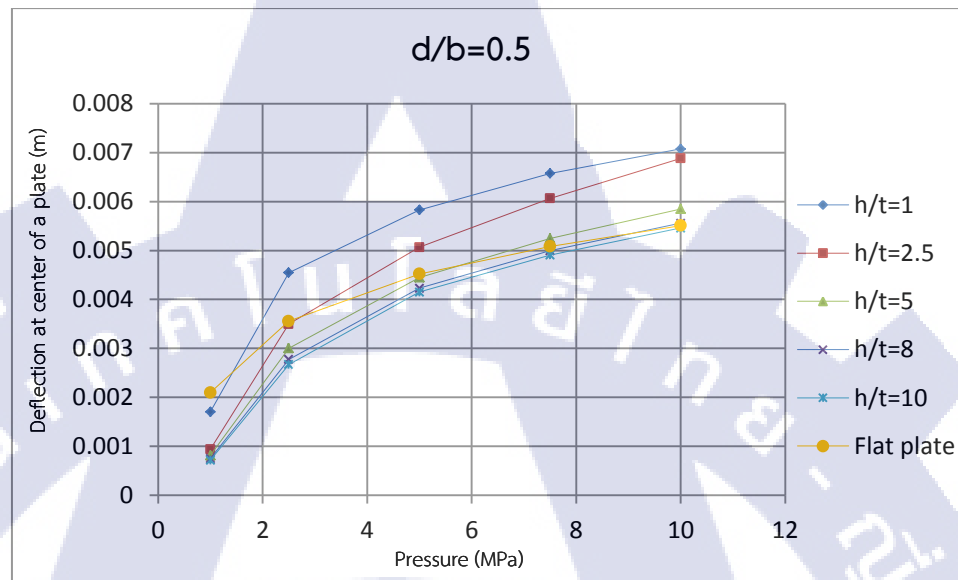
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองแรงกระจายขนาด 10MPa กระทำบนแผ่นเรียบ

4.3 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กที่มีรอยนูน

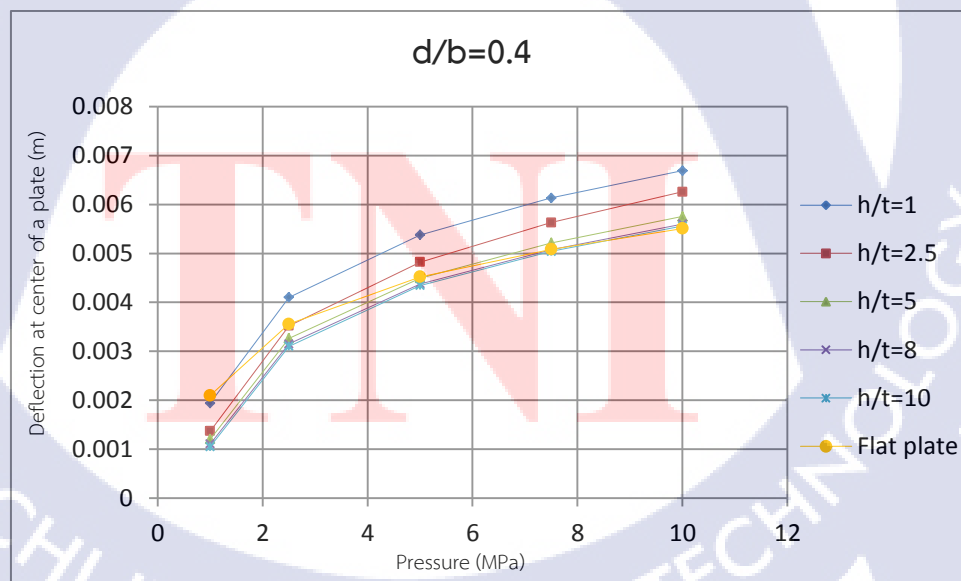
4.3.1 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยนูนแบบเปรียบเทียบความลึกรอยนูน

จากรูปที่ 4.3 – 4.7 จะให้เห็นว่าเมื่อระยะความลึกของรอยนูนเพิ่มขึ้น เหล็กแผ่นจะมีการเสียรูปที่ลดน้อยลง โดยทุก ๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนจะมีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่เหมือนกัน แต่ในระยะความลึกที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะมีค่าความแตกต่างของการเสียรูปลดน้อยลงจนเกือบจะมีค่าที่เท่ากัน กราฟผลการเสียรูปจากอัตราส่วนรอยนูนต่อความหนาที่เท่ากับ 1 และ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบ

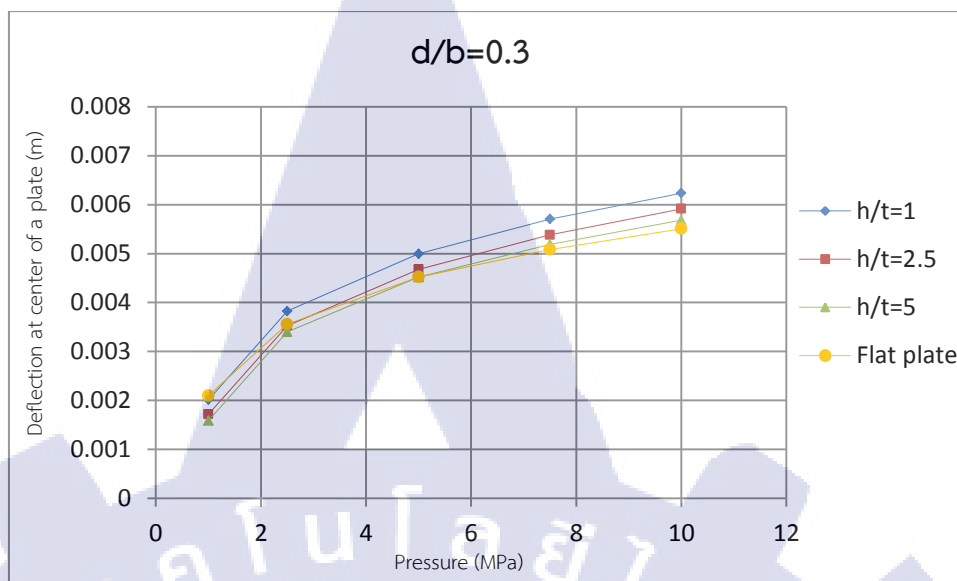
กับผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบ แผ่นเรียบจะมีความเสียรูปได้น้อยกว่า ในขณะที่อัตราส่วนรอยนูนต่อความหนาที่มากกว่า 2.5 จะมีค่าการเสียรูปที่น้อยกว่าแผ่นเรียบในช่วงต้นของแรงกระจายน้อยและมีค่าเกือบจะเท่ากับแผ่นเรียบในตอนท้ายของแรงกระจายที่มีค่ามาก



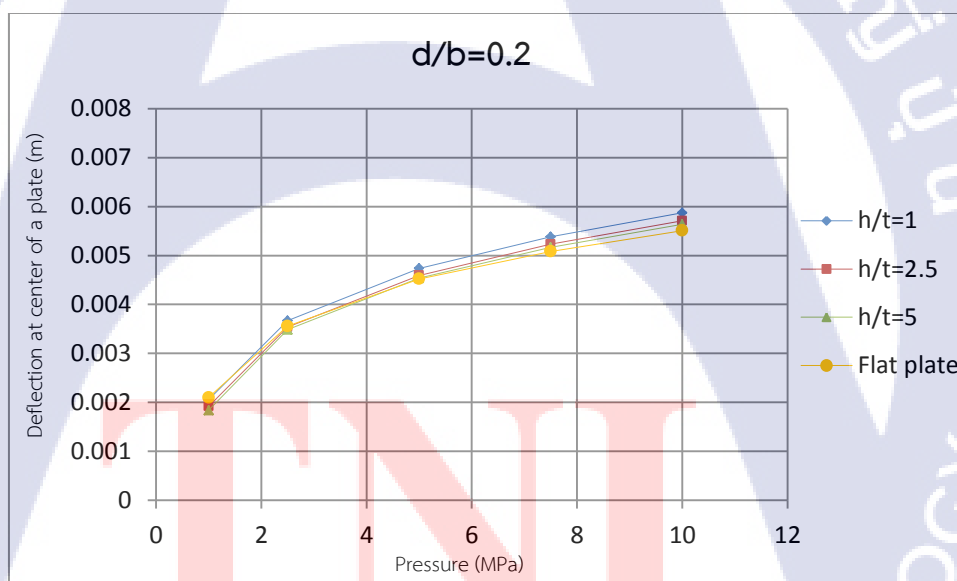
รูปที่ 4.3 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.5$



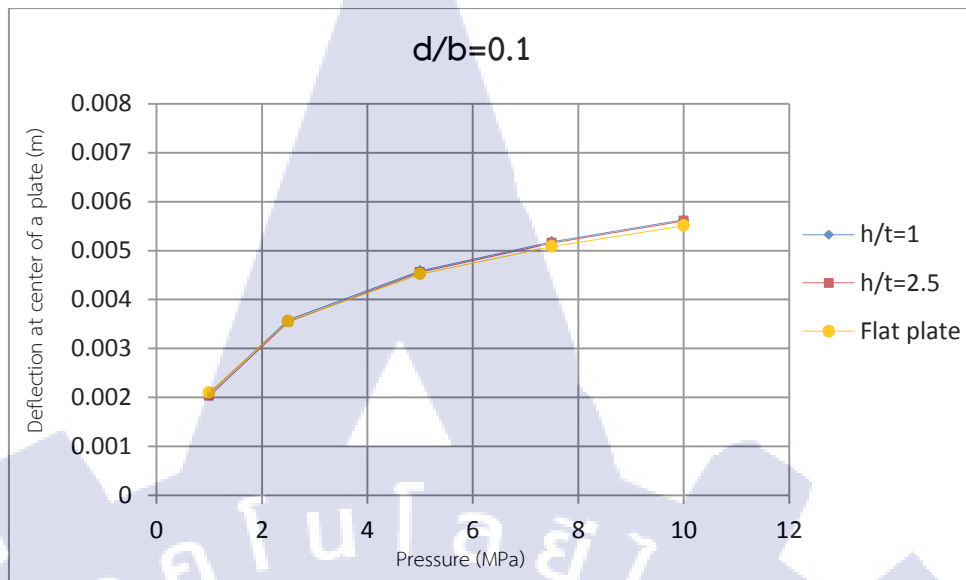
รูปที่ 4.4 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.4$



รูปที่ 4.5 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.3$



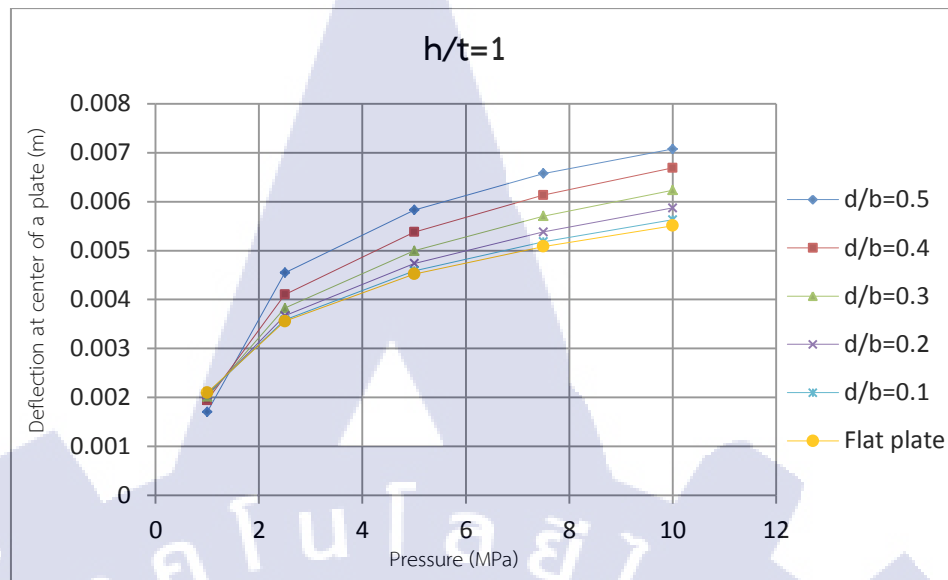
รูปที่ 4.6 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.2$



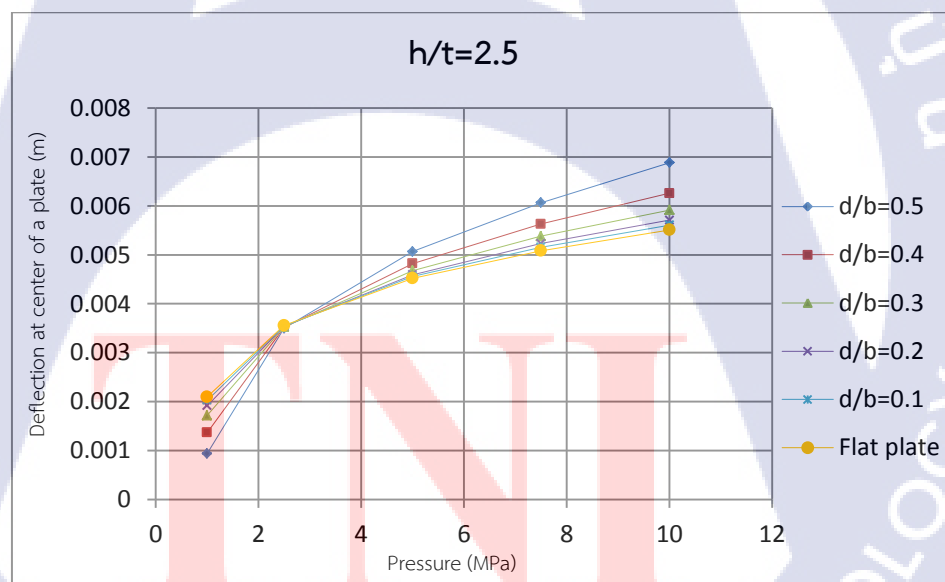
รูปที่ 4.7 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.1$

4.3.2 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยรูนแบบเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูน

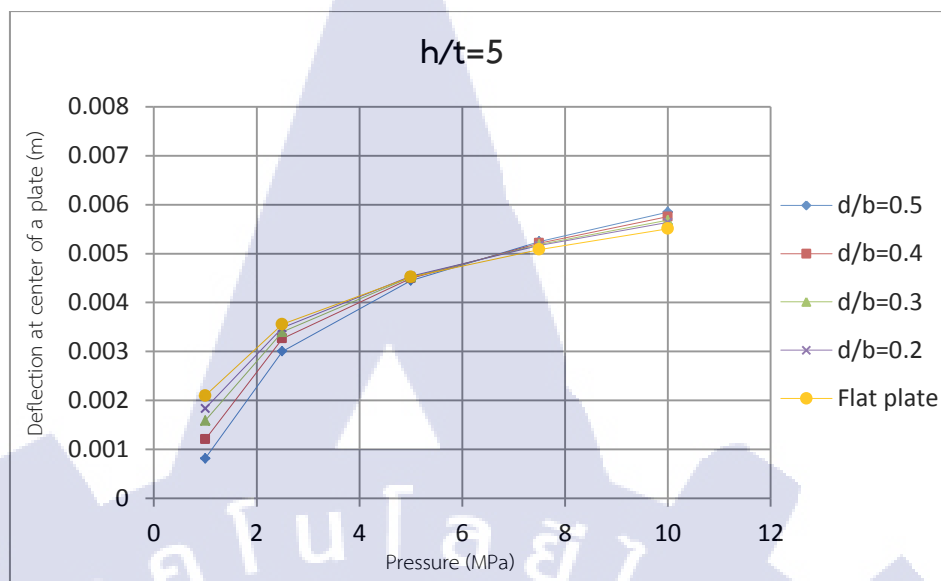
จากรูปที่ 4.8 – 4.12 อัตราส่วนความลึกต่อความหนาเท่ากับหนึ่ง เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยรูนที่มีขนาด 10 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กจะมีอัตราการเสียรูปที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่า แต่เมื่อทำการจำลองโดยการเพิ่มอัตราส่วนความลึกต่อความหนาที่มากขึ้นลักษณะกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยในช่วงต้นของแรงกระจายที่กระทำน้อยๆ ความสามารถในการเสียรูปของเหล็กแผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนขนาดใหญ่จะมีค่าลดลงและลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะความลึกของรอยรูนมากขึ้นอีก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองแรงกระจายบนแผ่นเรียบ แผ่นที่รอยรูนมีความลึกน้อยจะมีระยะโก่งมากกว่าแผ่นเรียบ และเมื่อเพิ่มความลึกมากขึ้นรอยรูนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่จะมีความทนทานต่อการเสียรูปได้ดีกว่าแผ่นเรียบในช่วงตอนต้นของแรงกระจายที่มีค่าน้อยและมีค่าการเสียรูปที่เทียบเท่ากับแผ่นเรียบในตอนท้ายของแรงกระจายที่มีค่ามาก ซึ่งสามารถมองได้ว่า รอยรูนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และความลึกเยอะจะมีลักษณะเป็นเปลือกทรงกลม (spherical shell) ซึ่งโดยปกติมีความแข็งแรงมากกว่าแผ่นบางอยู่แล้ว



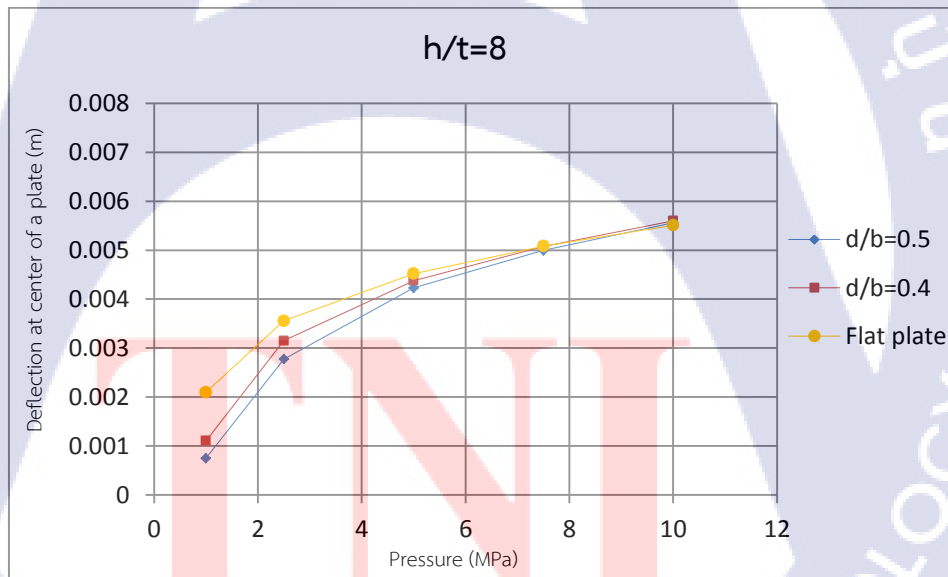
รูปที่ 4.8 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 1$



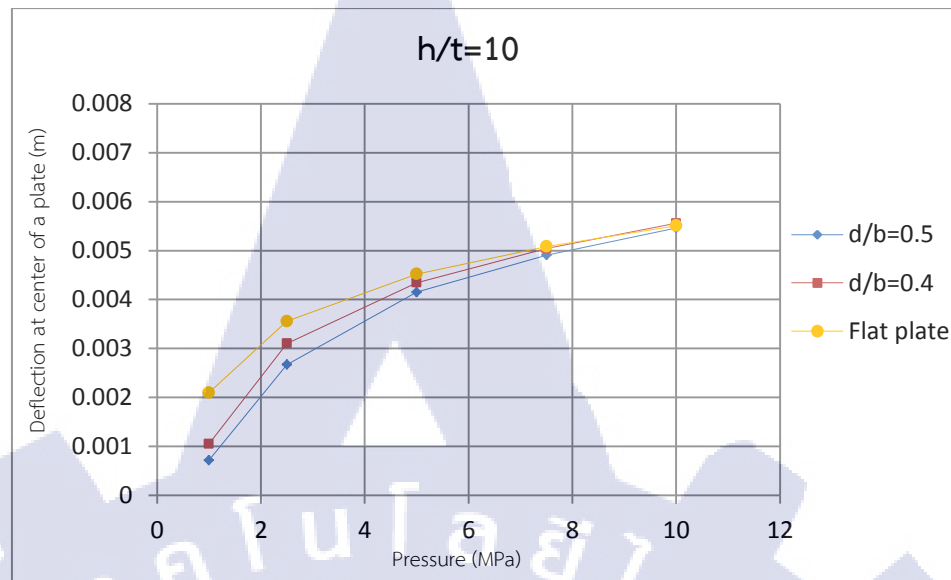
รูปที่ 4.9 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 2.5$



รูปที่ 4.10 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูลที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูลต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 5$



รูปที่ 4.11 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูลที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูลต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 8$

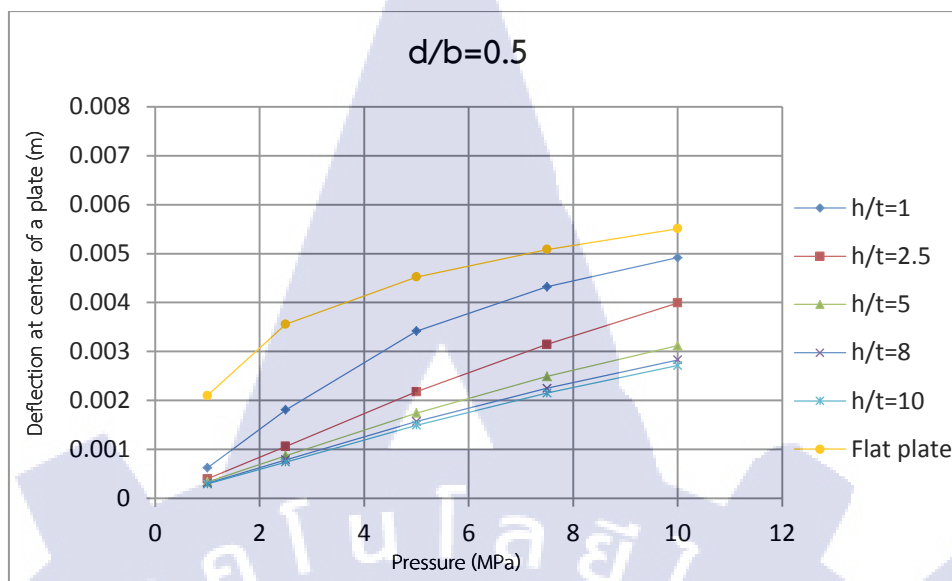


รูปที่ 4.12 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 10$

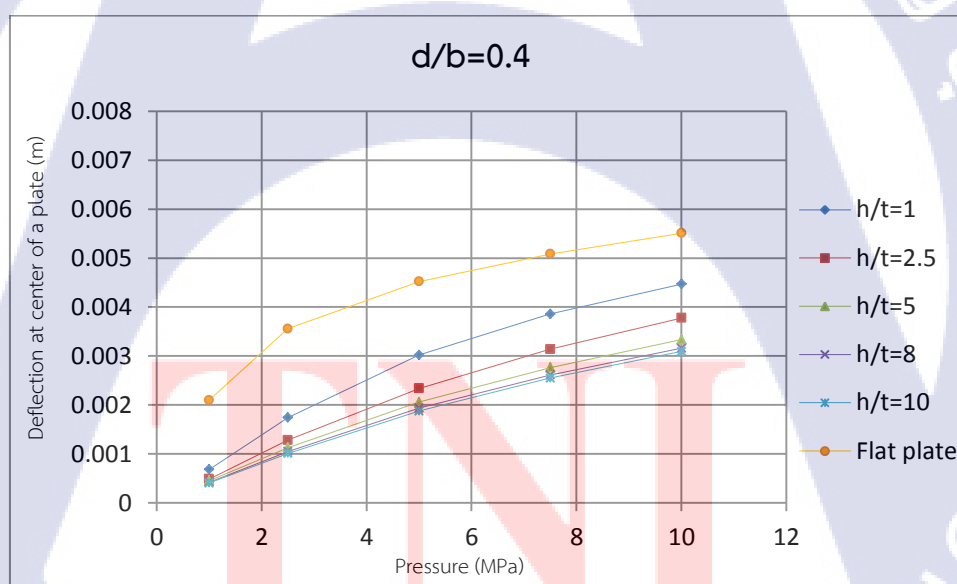
4.3.3 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูนแบบเปรียบเทียบความลึกรอยนูน เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่น เหล็กทั้ง 4 ด้าน

จากรูปที่ 4.13 – 4.17 เมื่อความลึกของรอยนูนเพิ่มขึ้นระยะโก่งที่กึ่งกลางแผ่นจะลดน้อยลงตามลำดับ แต่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนลดลงระยะโก่งของเหล็กแผ่นจะที่แรงกระจายต่าง ๆ จะค่อย ๆ ลดเข้าไปหากันจนที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความกว้างของแผ่นเท่ากับ 0.1 ไม่ว่าอัตราส่วนความลึกต่อความหนาจะมีค่าเท่าไร ระยะโก่งจะไม่ค่อยแตกต่างกัน

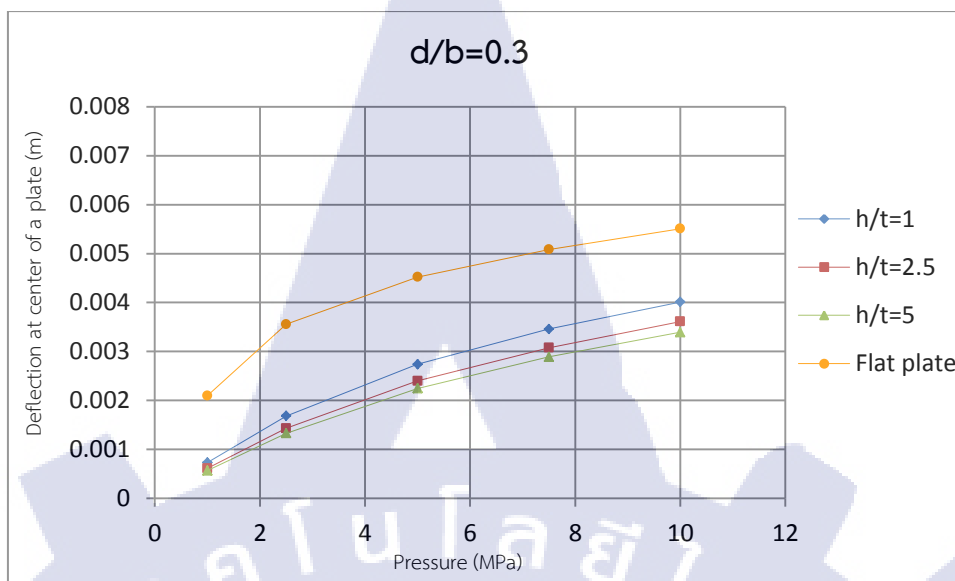
นอกจากนี้หากเปรียบเทียบระยะโก่งของแผ่นที่ยึดแน่นที่ผิวด้านข้างของแผ่นทั้งสี่ด้านกับกรณียึดแน่นที่ขอบด้านล่างทั้งสี่ด้าน ก็จะเห็นได้ว่ากรณียึดที่ผิวด้านข้างทั้งสี่ด้านจะมีระยะโก่งที่น้อยกว่าซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้



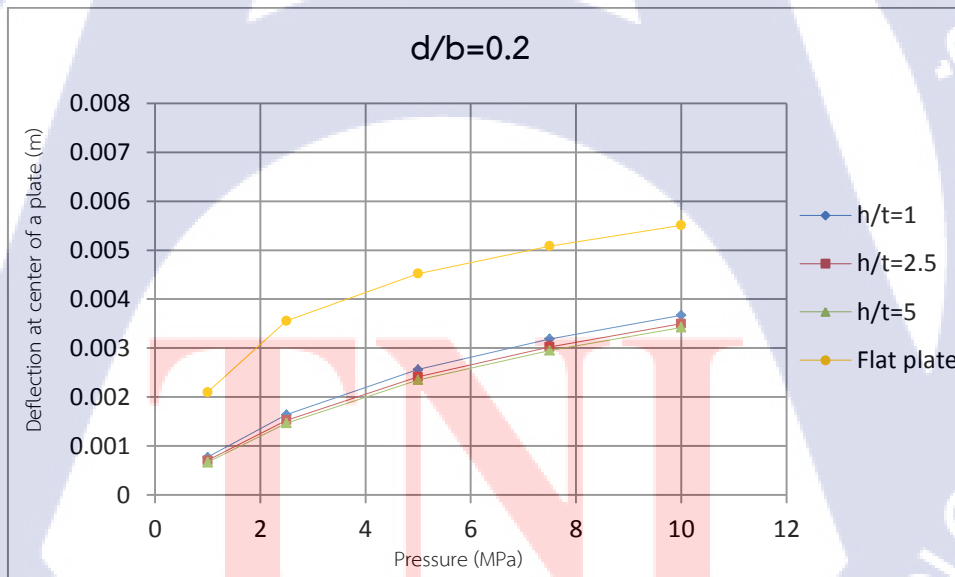
รูปที่ 4.13 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ
เมื่อ $d/b = 0.5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



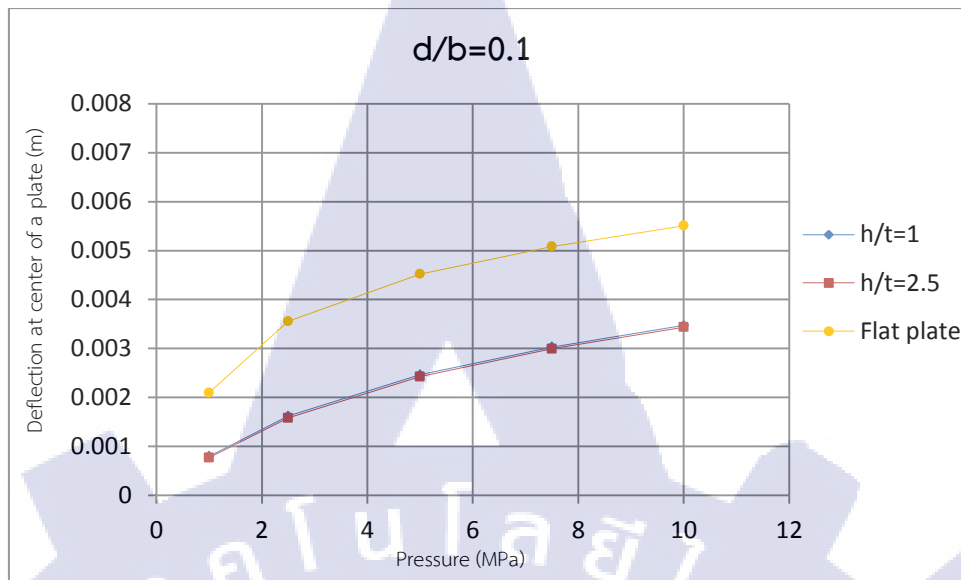
รูปที่ 4.14 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ
เมื่อ $d/b = 0.4$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



รูปที่ 4.15 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ
เมื่อ $d/b = 0.3$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน



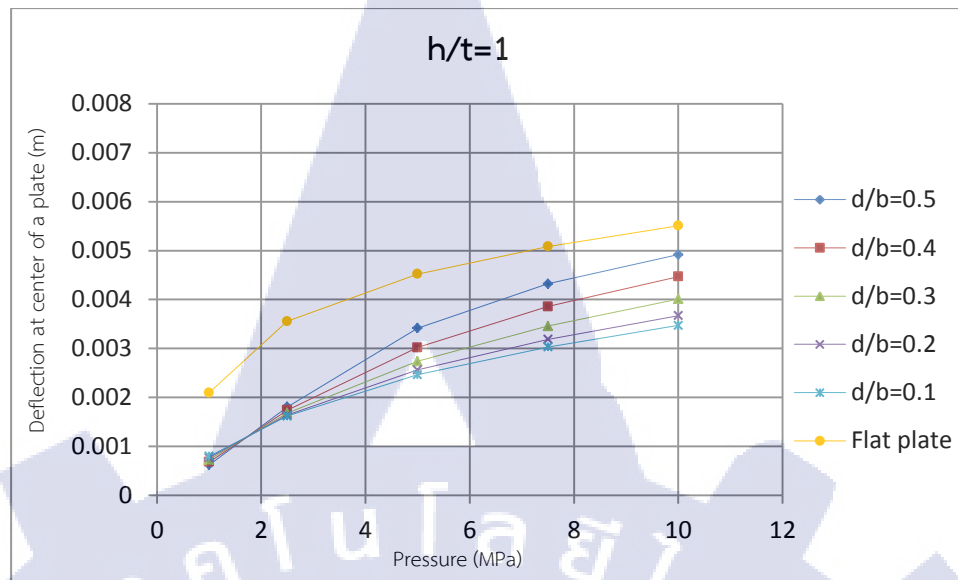
รูปที่ 4.16 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ
เมื่อ $d/b = 0.2$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน



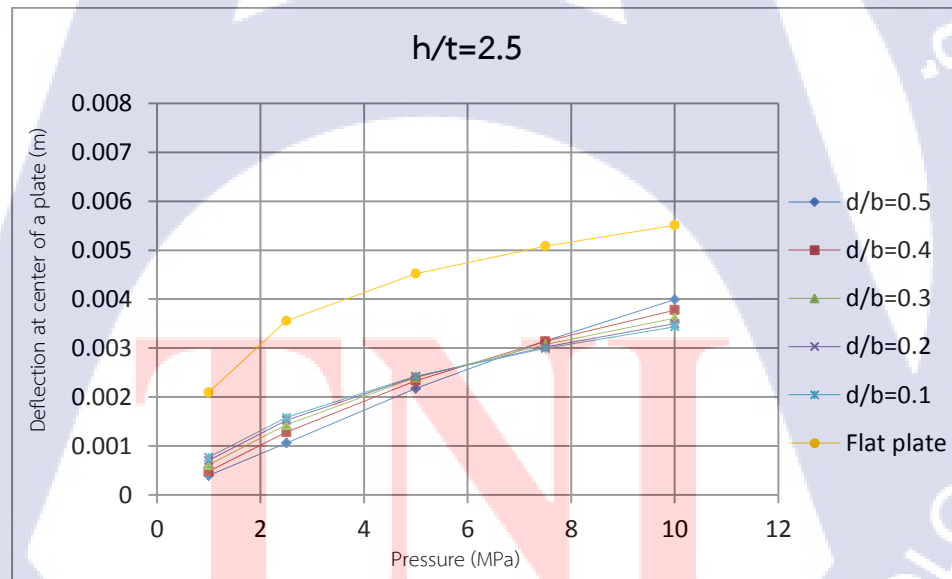
รูปที่ 4.17 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ
เมื่อ $d/b = 0.1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

4.3.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นที่มีรอยนูนแบบเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

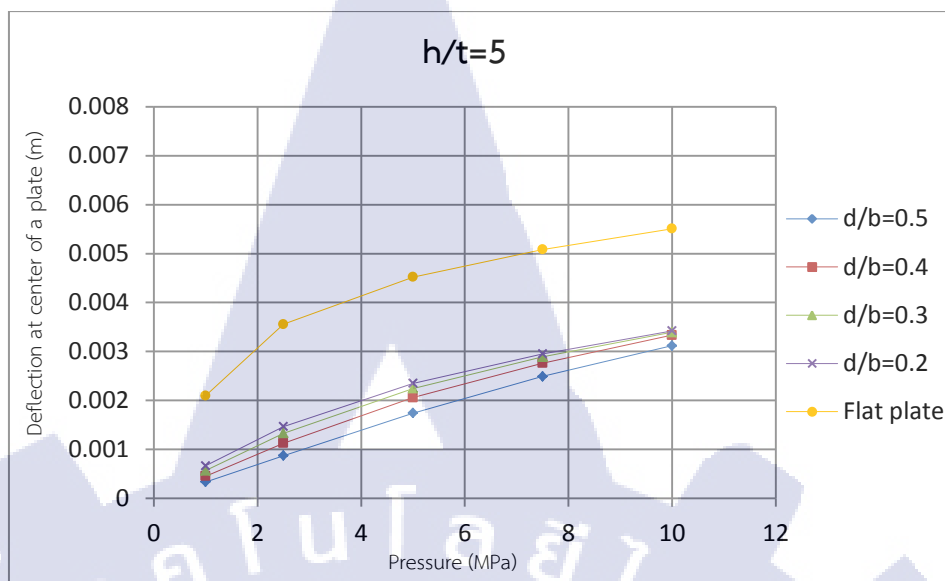
จากรูปที่ 4.18 – 4.22 ทำการเปรียบเทียบระยะโก่งของแผ่นโดยเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นค่าระยะโก่งของเหล็กแผ่นจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนความลึกของรอยนูนที่มีค่าน้อยการเพิ่มความสูงของรอยนูนจะไม่มีผลทำให้ค่าความโก่งของเหล็กแผ่นลดลง



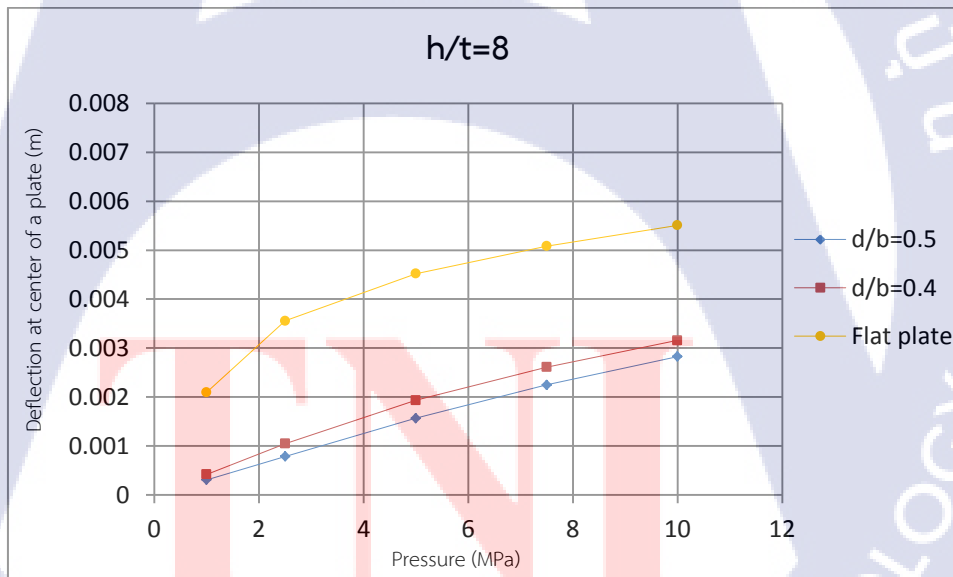
รูปที่ 4.18 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



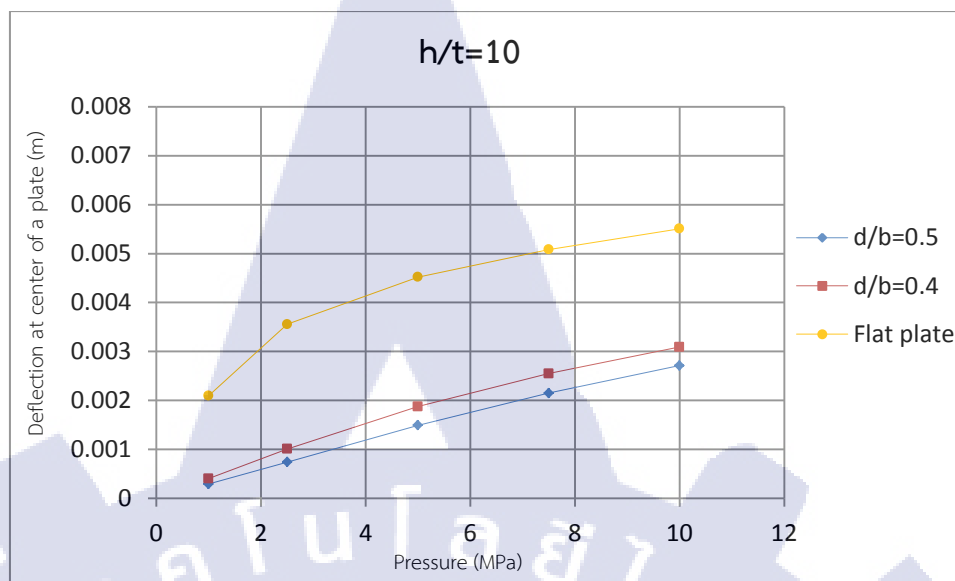
รูปที่ 4.19 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 2.5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



รูปที่ 4.20 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



รูปที่ 4.21 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 8$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

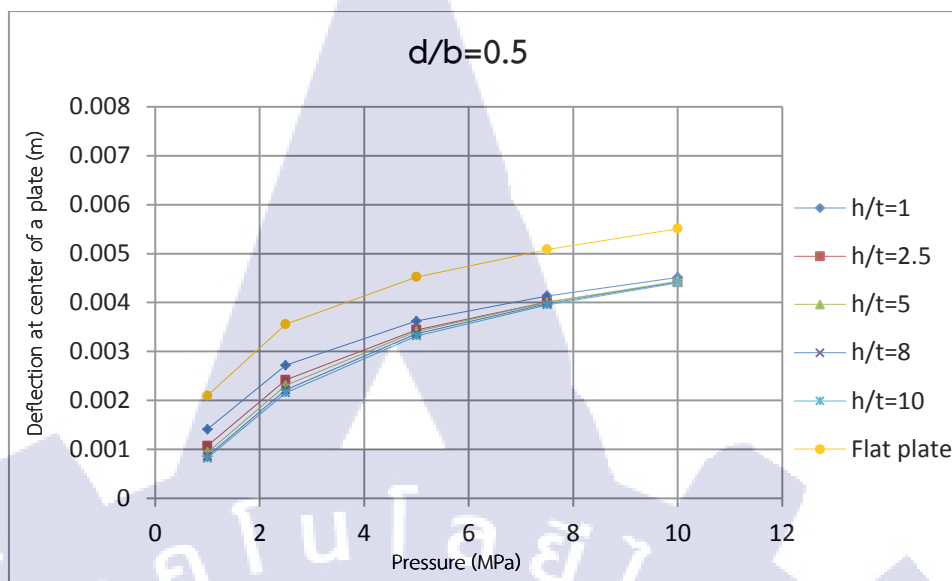


รูปที่ 4.22 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 10$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

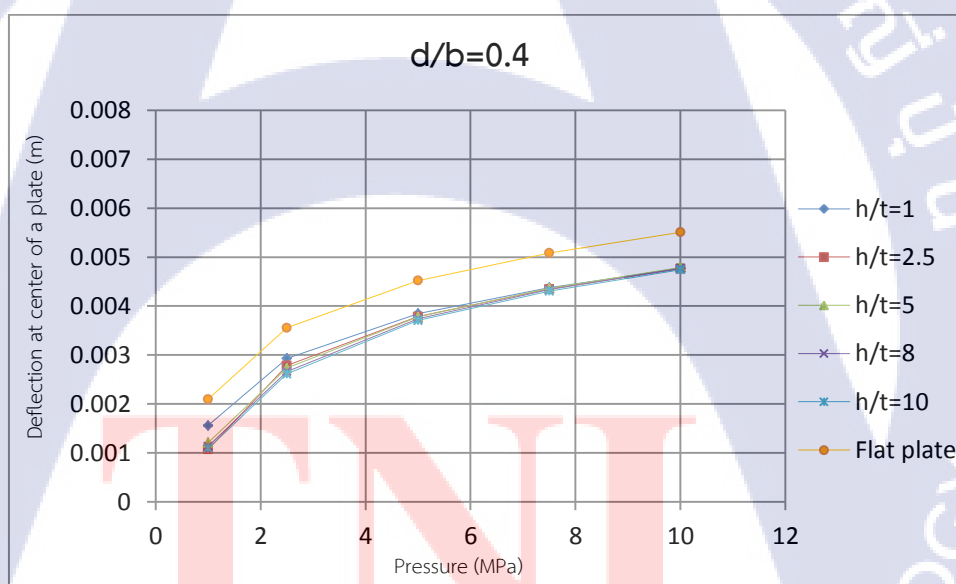
4.4 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กที่มีรอยนูน

4.4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยนูนแบบเปรียบเทียบความลึกรอยนูน

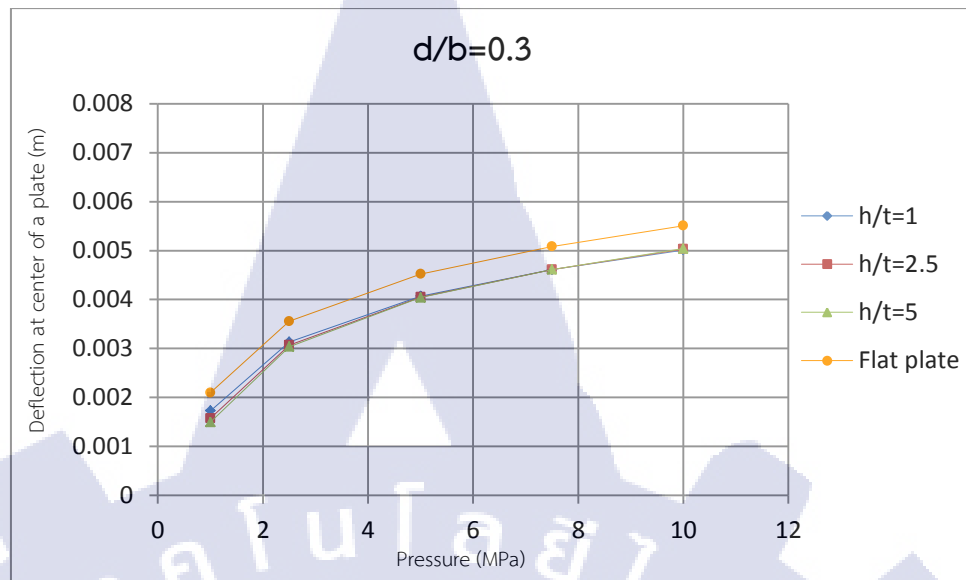
จากรูปที่ 4.23 – 4.27 พบว่าที่รอยนูนกว้างเท่ากับ 50 มม. และมีอัตราส่วนความลึกต่อความหนาแผ่นเท่ากับ 10 จะมีขนาดการเสียรูปน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดรอยนูนต่าง ๆ ขนาดรอยนูนที่เล็กลงและอัตราส่วนความลึกรอยนูนต่อความหนาแผ่นที่ลดน้อยลง จะทำให้การเสียรูปมีขนาดเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าการเสียรูประหว่างเหล็กแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีรอยนูน การเสียรูปของเหล็กแผ่นเรียบจะมีการเสียรูปที่มากกว่าเหล็กแผ่นที่มีรอยนูน จากกราฟเมื่อขนาดความกว้างของรอยนูนเพิ่มขึ้นถึง 30 มม. ค่าความเสียรูปที่อัตราส่วนความลึกขนาดต่าง ๆ จะมีขนาดที่ไม่แตกต่างกัน



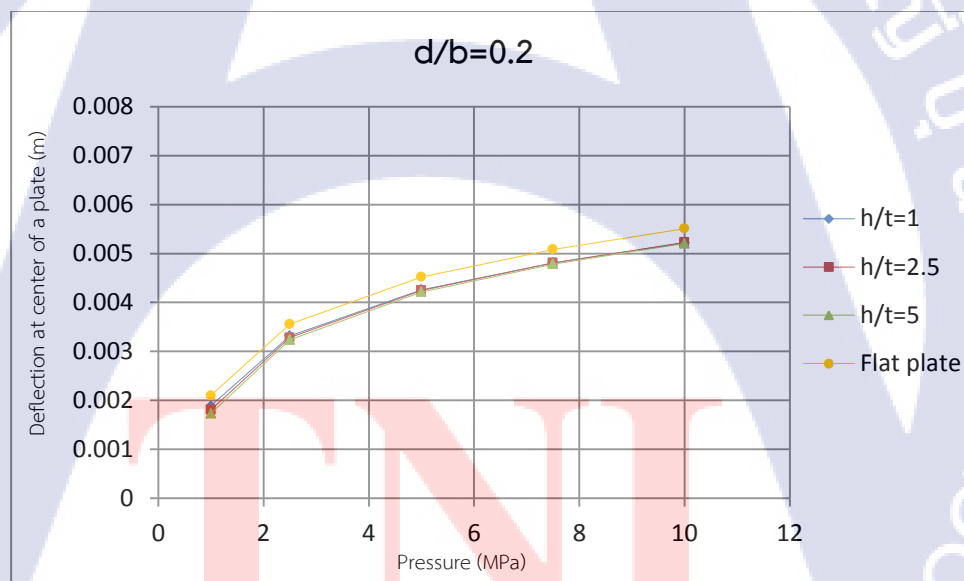
รูปที่ 4.23 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.5$



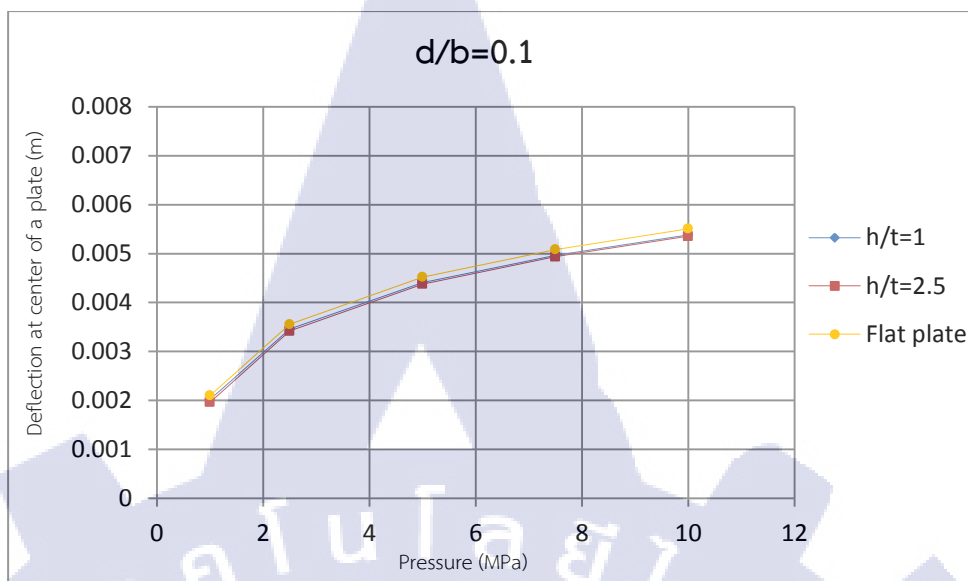
รูปที่ 4.24 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.4$



รูปที่ 4.25 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.3$



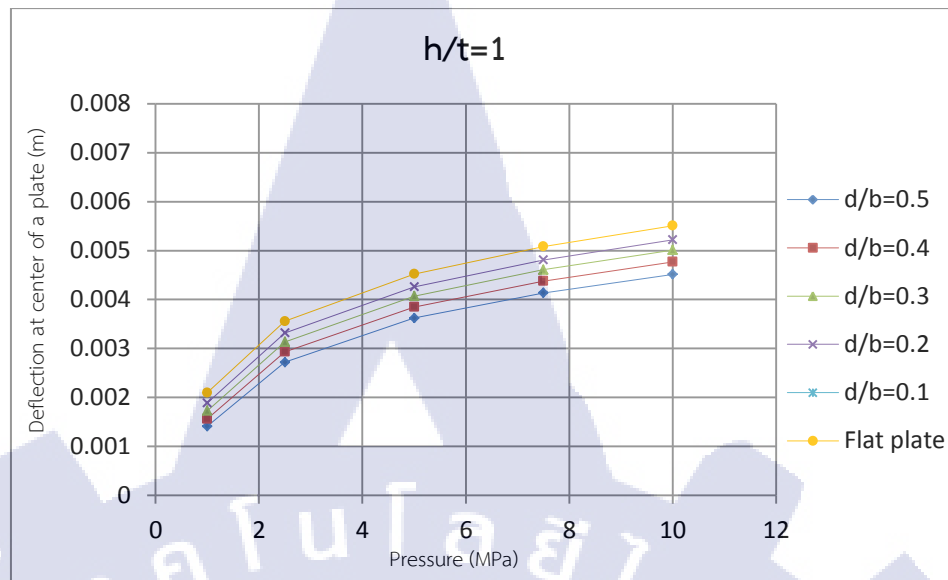
รูปที่ 4.26 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.2$



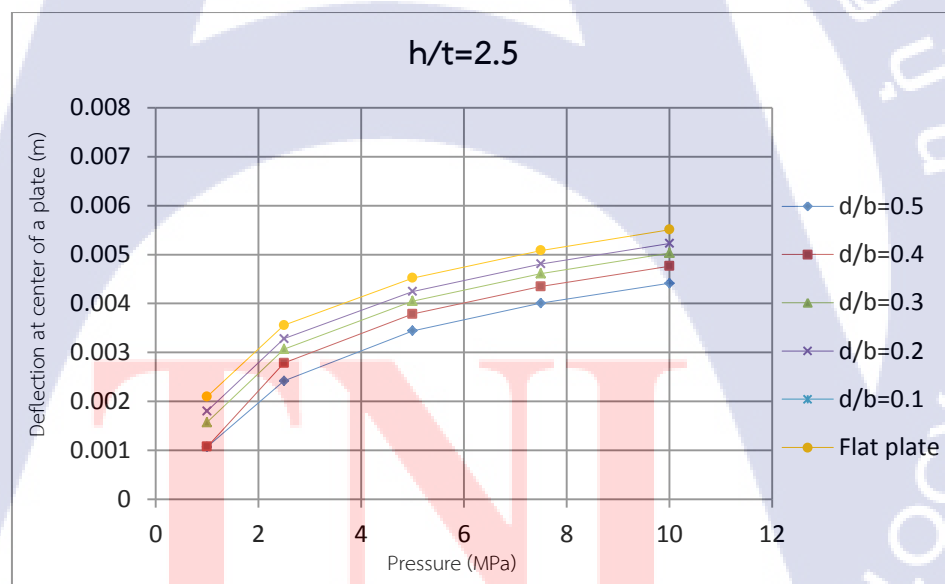
รูปที่ 4.27 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่ความลึกต่าง ๆ เมื่อ $d/b = 0.1$

4.4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยนูนแบบเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูน

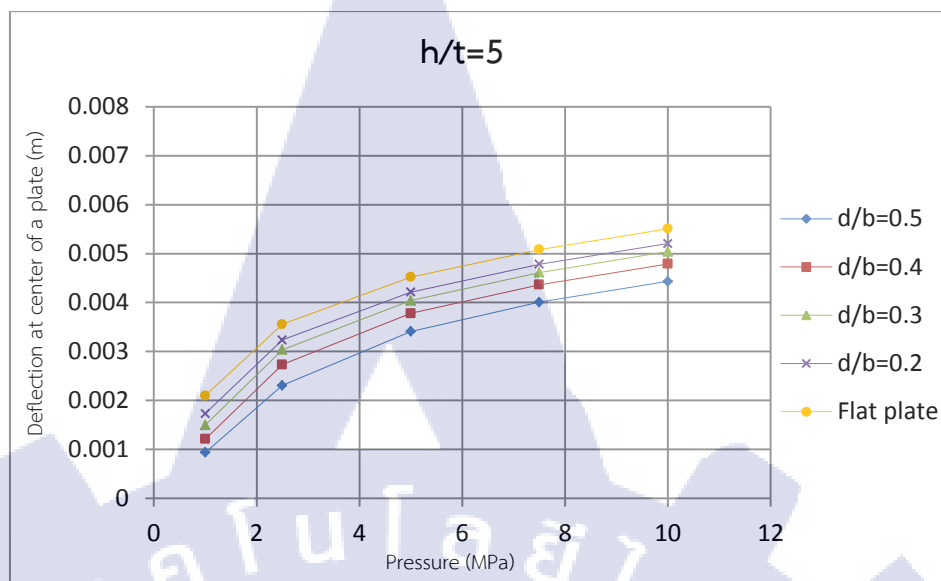
เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.28 – 4.32 ที่ความลึกเดียวกันแต่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันจะพบว่าขนาดรอยบวมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างที่สุดจะมีค่าการเสียรูปที่น้อยที่สุดและขนาดรอยบวมที่เล็กที่สุดจะมีค่าการเสียรูปที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ความลึกเดียวกัน และเมื่อพิจารณาโดยการเพิ่มอัตราส่วนความลึกต่อความหนาเพิ่มมากขึ้น ค่าการเสียรูปของเหล็กแผ่นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นที่จุดหนึ่งค่าการเสียรูปของเหล็กแผ่นจะเริ่มมีขนาดที่เท่ากัน สรุปได้ว่า แผ่นเหล็กที่มีรอยบวมมีการเสียรูปที่น้อยกว่าแผ่นเหล็กแบบเรียบ และมีแนวโน้มการเสียรูปลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของรอยบวมมากขึ้น



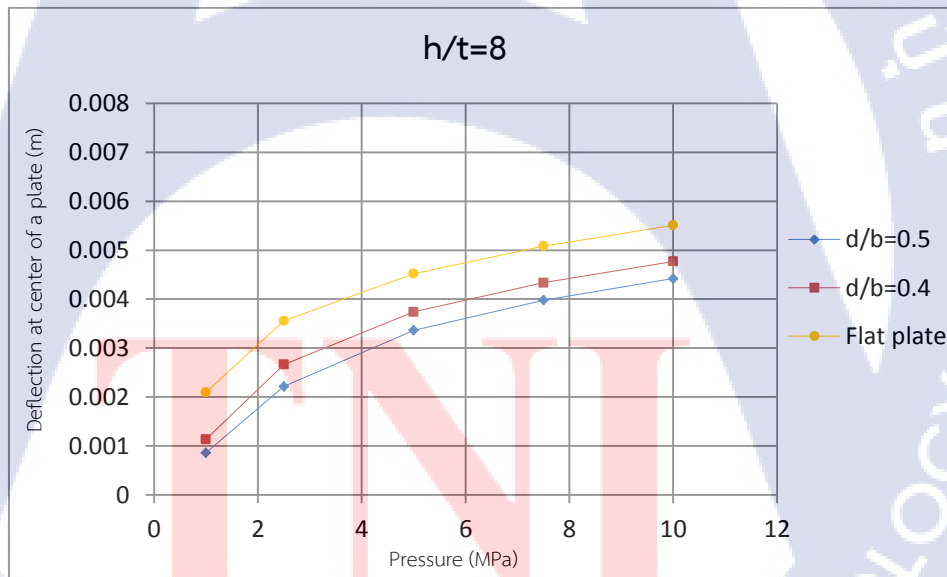
รูปที่ 4.28 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋มต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 1$



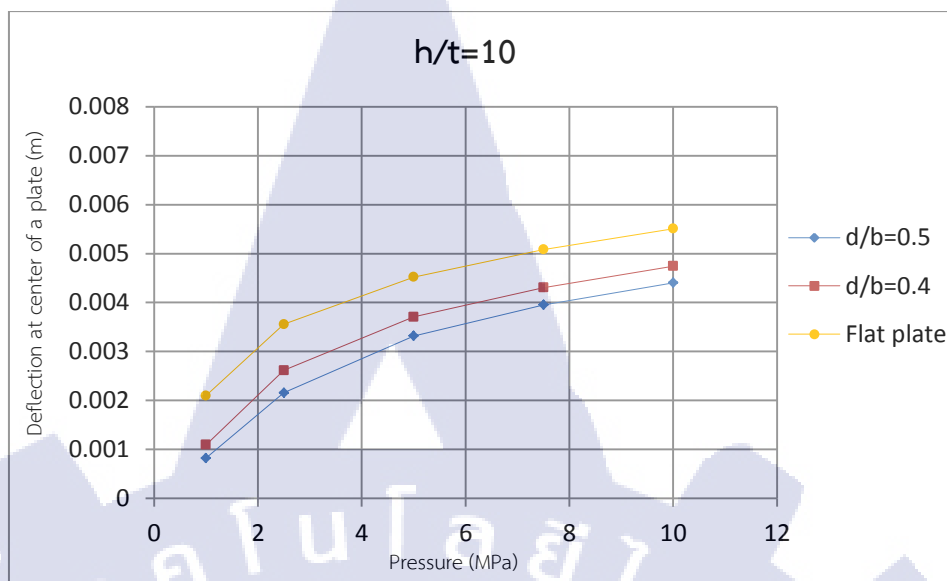
รูปที่ 4.29 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋มต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 2.5$



รูปที่ 4.30 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋มต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 5$



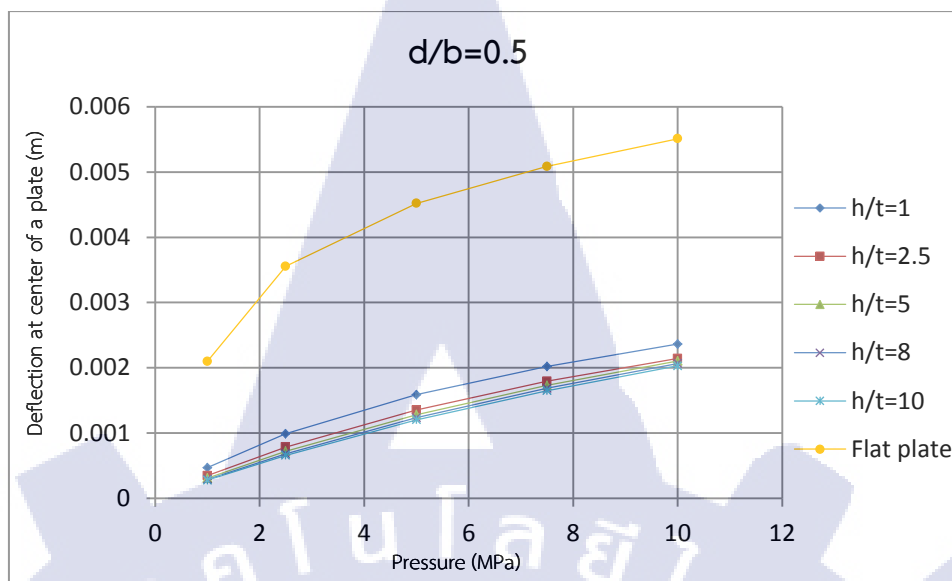
รูปที่ 4.31 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบุ๋มที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋มต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 8$



รูปที่ 4.32 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยบวมที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบวมต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 10$

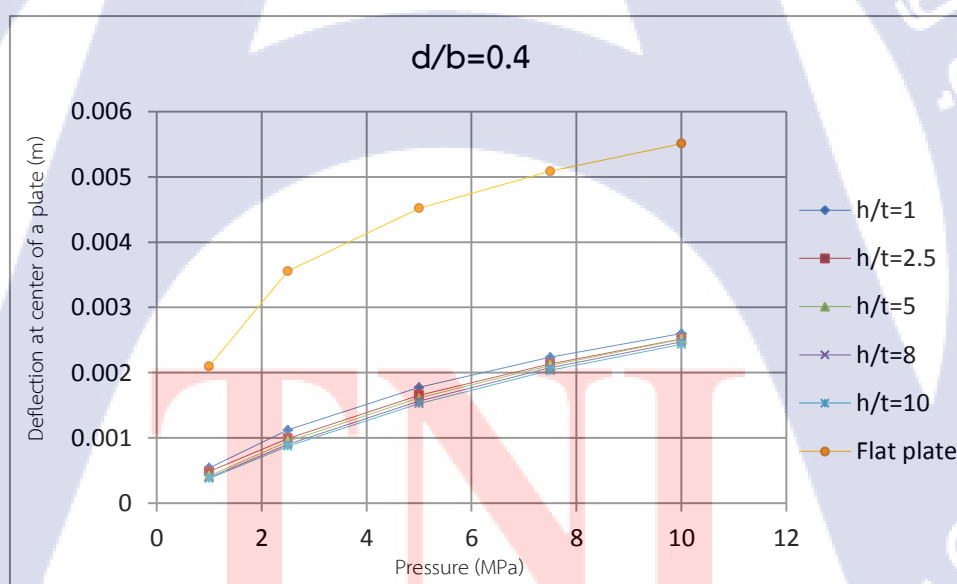
4.4.3 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยบวมแบบเปรียบเทียบความลึกรอยบวม เงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

จากรูปที่ 4.33 – 4.37 เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบวมต่อความกว้างของแผ่นมีค่าคงที่แล้วทำการปรับเพิ่มแรงกระจาย จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความลึกต่อความหนาแทบจะไม่มีผลต่อระยะโก่งของแผ่น และแนวโน้มการเพิ่มของระยะโก่งเมื่อเพิ่มแรงยังน้อย สามารถพิจารณาได้ว่า ความไวของการเสียรูปในกรณีนี้ค่อนข้างต่ำ



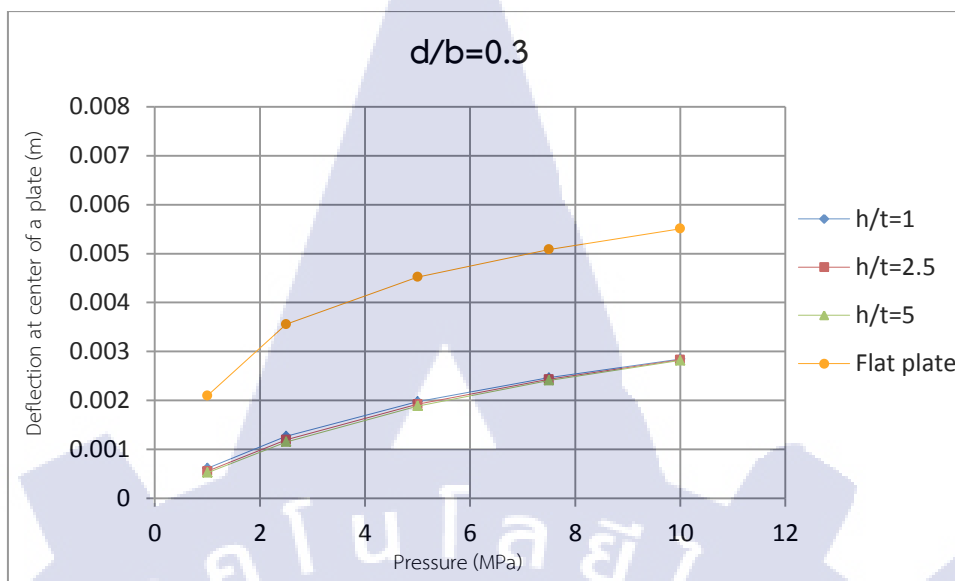
รูปที่ 4.33 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ

เมื่อ $d/b = 0.5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



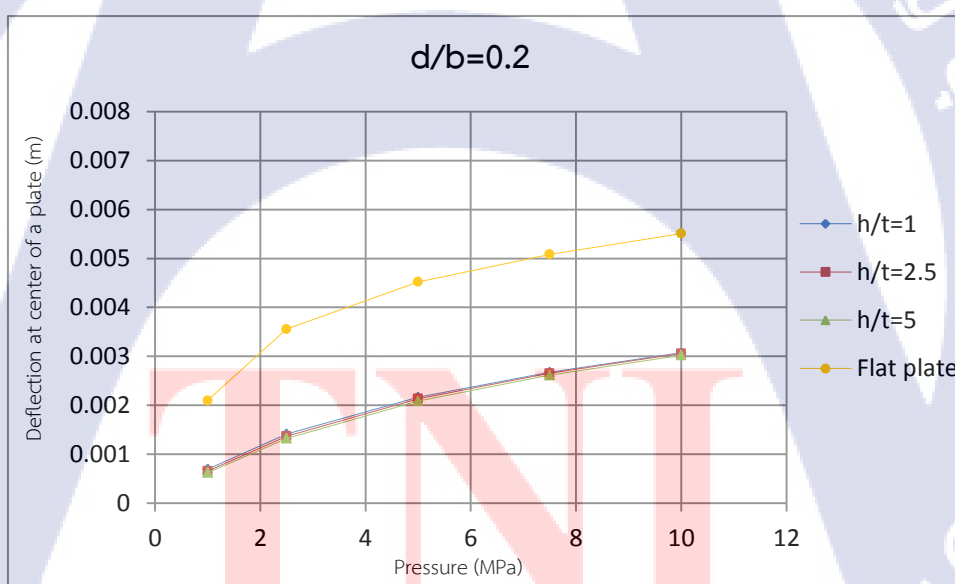
รูปที่ 4.34 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่ความลึกต่าง ๆ

เมื่อ $d/b = 0.4$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



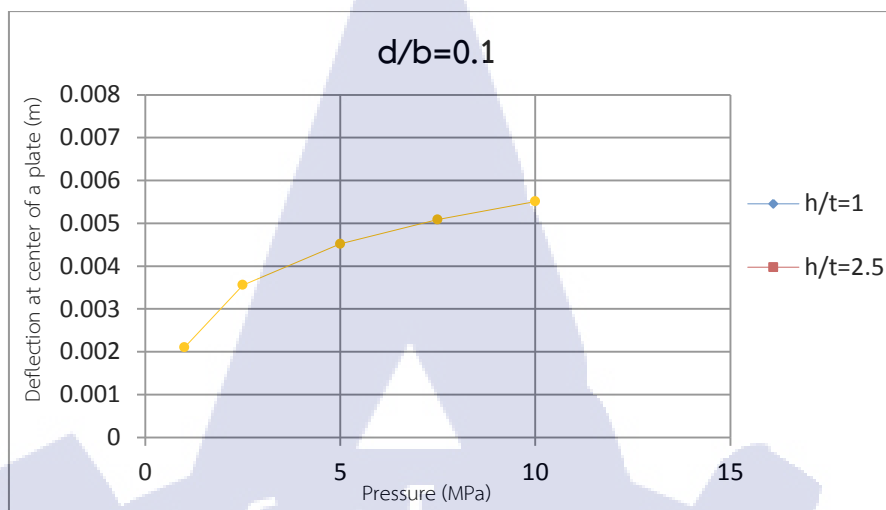
รูปที่ 4.35 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ

เมื่อ $d/b = 0.3$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



รูปที่ 4.36 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ

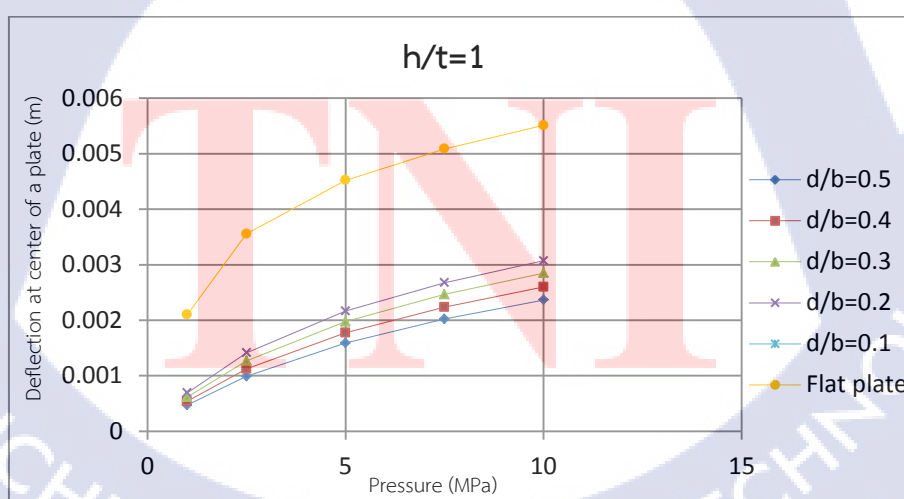
เมื่อ $d/b = 0.2$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



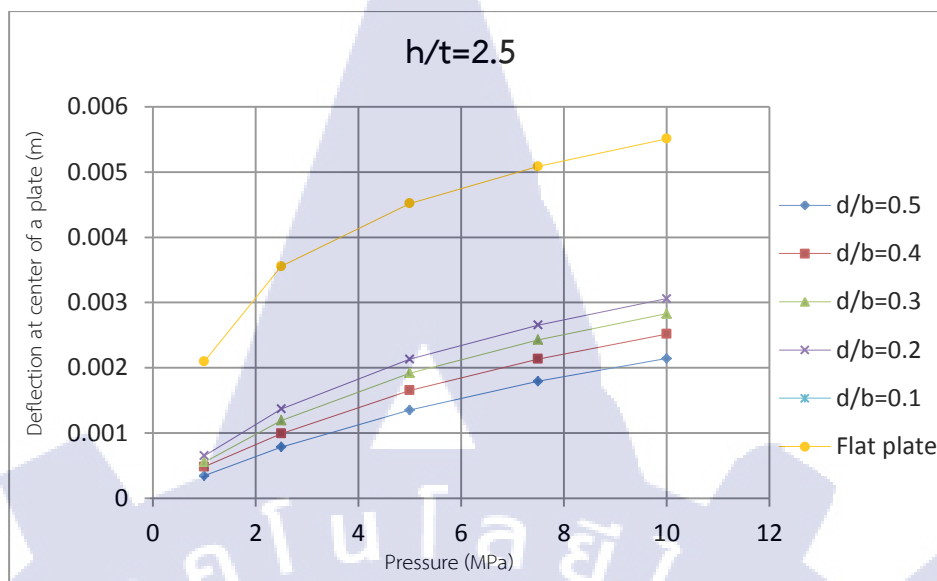
รูปที่ 4.37 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่มีความลึกต่าง ๆ
เมื่อ $d/b = 0.1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

4.4.4 เปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายแรงลงบนแผ่นเรียบและผลการจำลองของแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยนูนแบบเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

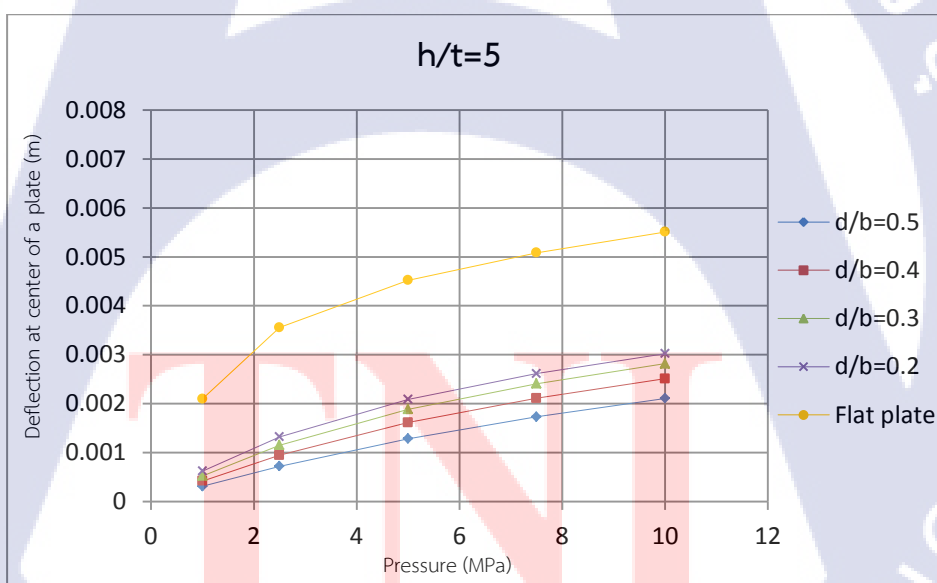
จากรูปที่ 4.38 – 4.42 เมื่อให้อัตราส่วนความลึกต่อความหนาของแผ่นมีค่าคงที่ ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนมีค่าเพิ่มขึ้นระยะโก่งจะมีค่าลดลง หรือกล่าวได้ว่า ไม่ว่าความลึกของรอยนูนจะเป็นเท่าไร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนที่ใหญ่กว่าจะเสียรูปน้อยกว่า



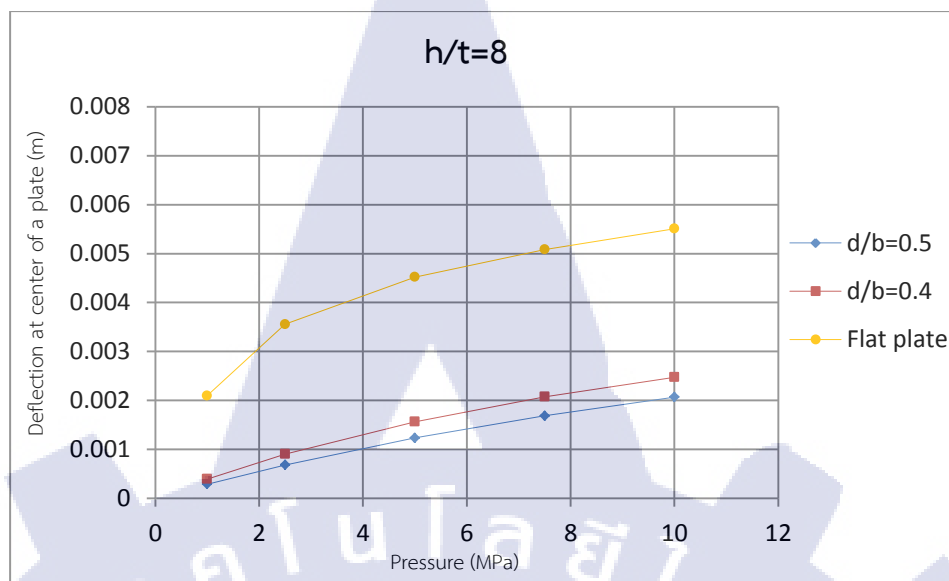
รูปที่ 4.38 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 1$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



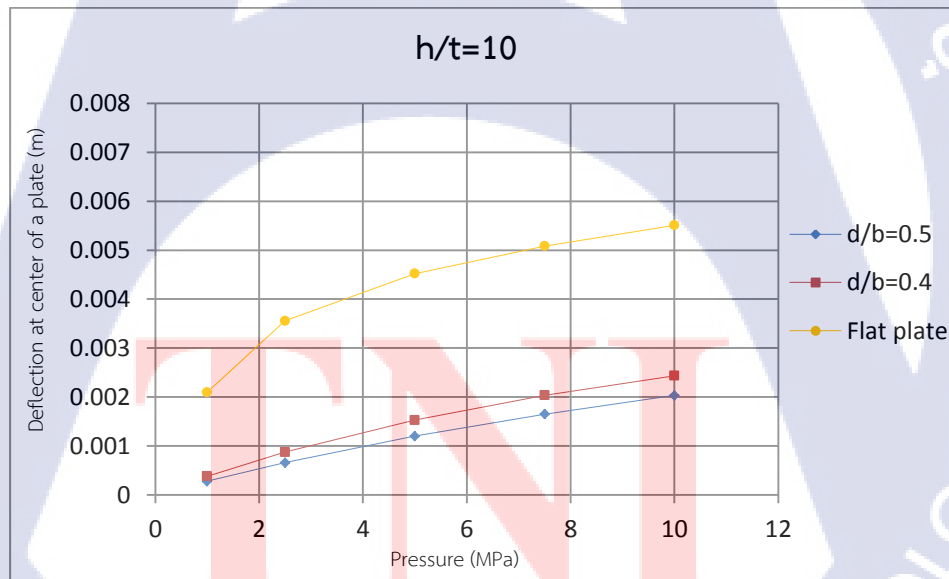
รูปที่ 4.39 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 2.5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน



รูปที่ 4.40 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 5$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน



รูปที่ 4.41 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 8$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน



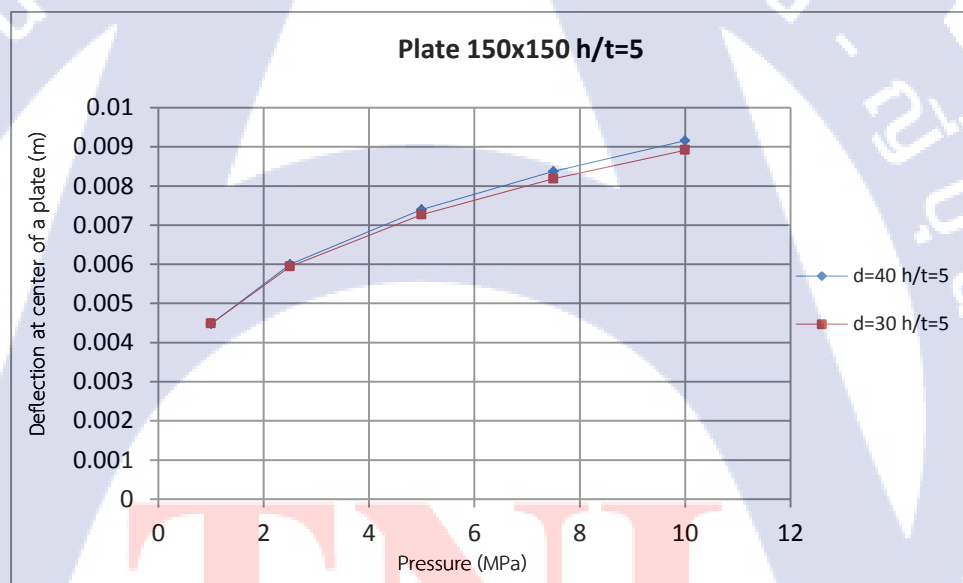
รูปที่ 4.42 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเรียบกับแผ่นมีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยรูนต่าง ๆ
เมื่อ $h/t = 10$ เงื่อนไขแบบยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

4.5 ผลการวิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กในกรณีเปลี่ยนเงื่อนไขเพื่อตรวจสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปร

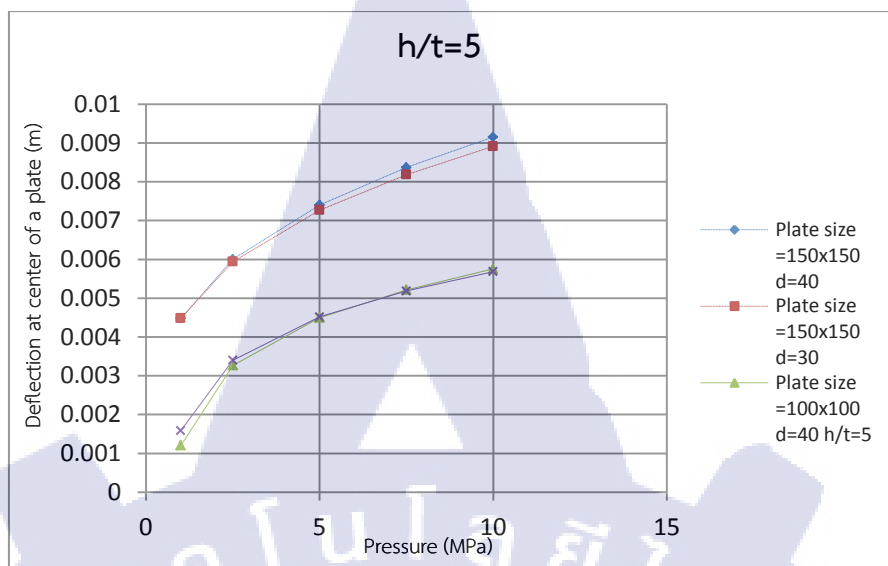
ในส่วนนี้จะเป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแผ่นและภาระที่กระทำเพื่อตรวจสอบว่า ผลการคำนวณที่ไ้ยังมีแนวโน้มเหมือนเดิมหรือไม่

4.5.1 วิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กที่มีขนาดกว้าง 150 มม. ยาว 150 มม.

จากรูปที่ 4.43 เมื่อให้ความลึกของรอยนูนคงที่ แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูน จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของกราฟยังเป็นลักษณะเดิม และเมื่อเปรียบเทียบระยะโก่งระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150 มม. x 150 มม. กับแผ่นขนาด 100 มม. x 100 มม. ตามรูปที่ 4.44 จะเห็นได้ว่า แผ่นที่มีขนาดใหญ่จะมีระยะโก่งมากกว่า แสดงว่า ผลของเงื่อนไขที่ขอบซึ่งในกรณีนี้เป็นแบบยึดแน่นที่ขอบล่างของแผ่น มีผลต่อระยะโก่งที่เกิดขึ้น

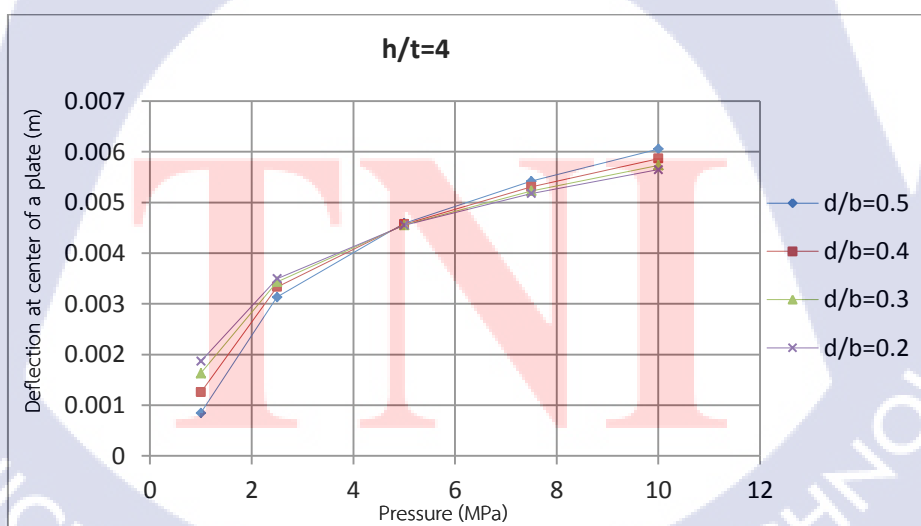


รูปที่ 4.43 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 150 x 150 ตารางม.ม. มีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดเมื่อ $h/t = 5$

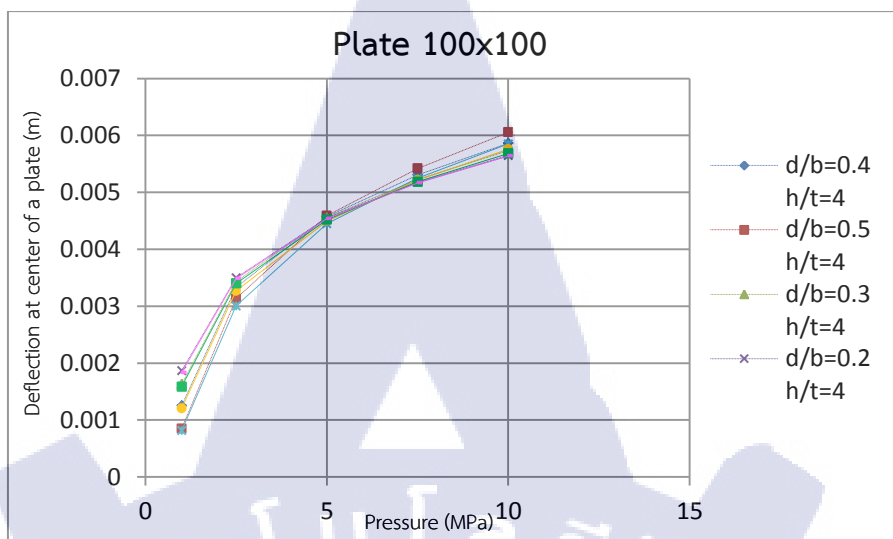


รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. กับขนาด 150×150 ตารางม.ม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดเมื่อ $h/t = 5$

4.5.2 วิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีด้านกว้าง 100 มม. มีอัตราส่วนความลึกของรอยรูนต่อความหนาของแผ่นเท่ากับ 4 (เงื่อนไขที่ทำก่อนหน้านี้คือ $h/t=1$ 2.5 5 10) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดตัดกราฟและอัตราส่วนความลึกของรอยรูน

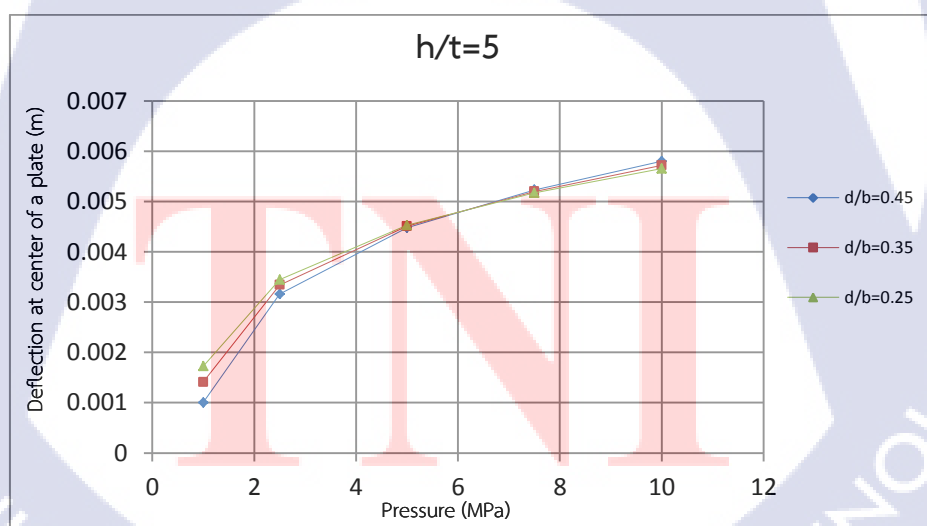


รูปที่ 4.45 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 4$

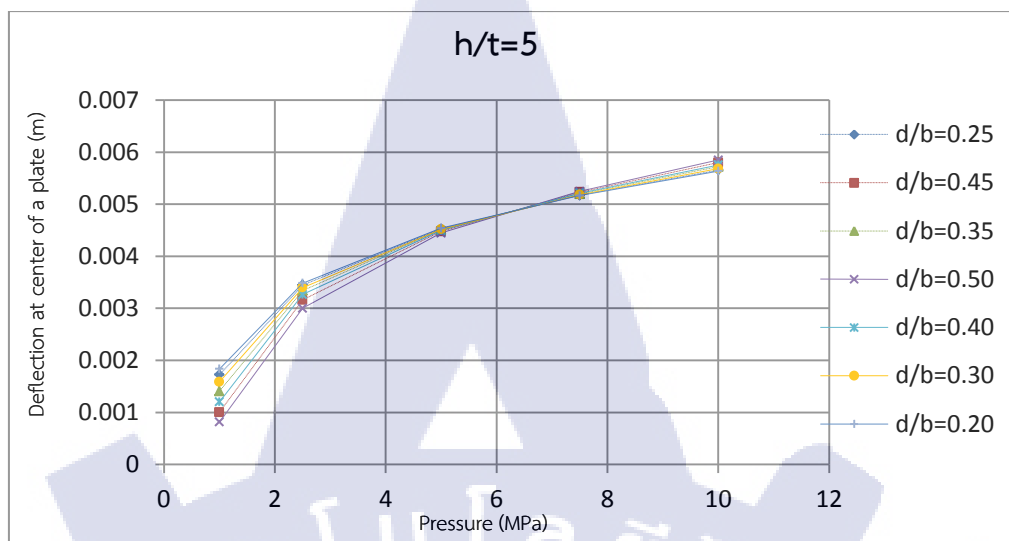


รูปที่ 4.46 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. มีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 4$ และ 5

4.5.3 วิเคราะห์แรงกระจายที่กระทำบนแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีด้านกว้าง 100 มม. ที่มีอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต่อความหนาของแผ่นเหล็กใหม่เป็น 0.45 0.35 0.25 ที่ต่างจากเงื่อนไขการจำลองข้างต้น



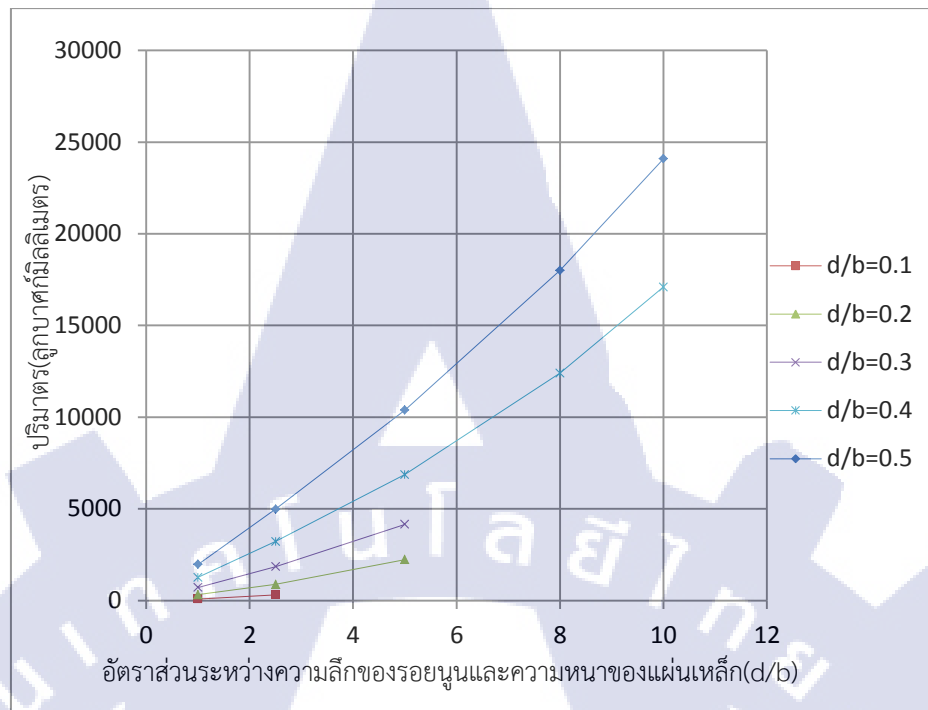
รูปที่ 4.47 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. มีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสามขนาด เมื่อ $h/t = 5$



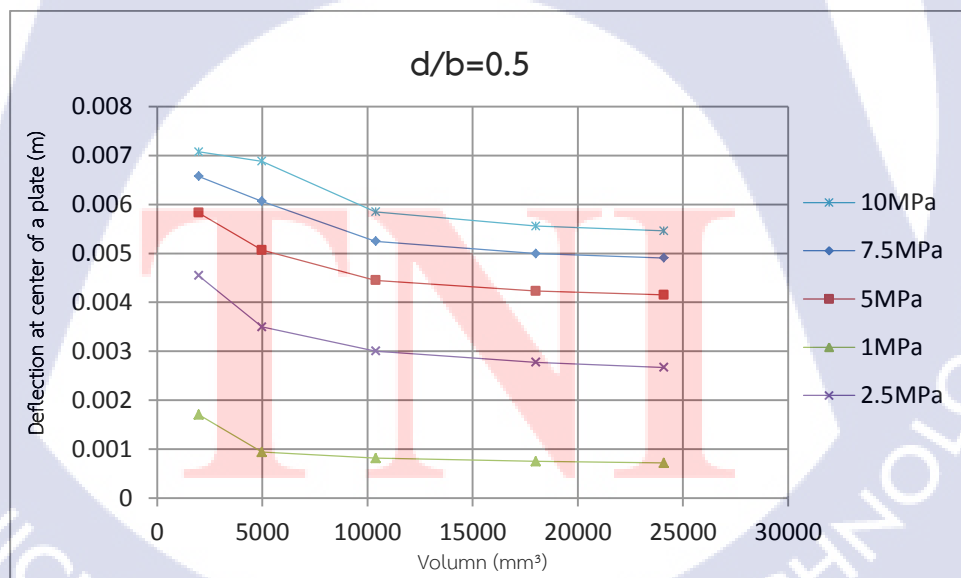
รูปที่ 4.48 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. มีรอยรูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 5$

4.5.4 วิเคราะห์อัตราส่วนปริมาตรที่เปลี่ยนไปเพื่อหาความสัมพันธ์กับขนาดการเสียรูปของเหล็กแผ่นที่มีรอยรูน

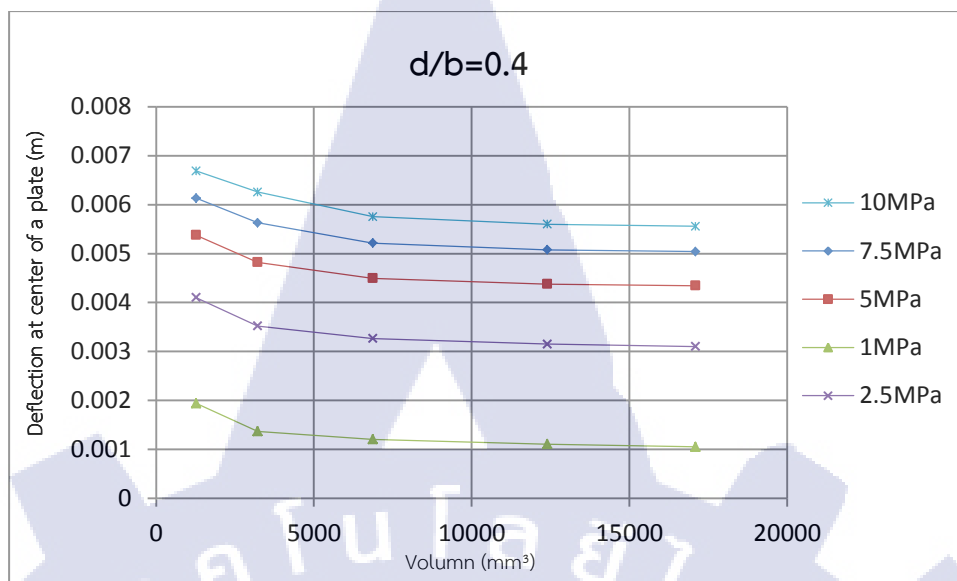
จากกราฟเมื่อปริมาตรของรอยรูนเพิ่มขึ้นการระยะโก่งการเสียรูปของเหล็กแผ่นที่มีรอยรูนจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อรอยรูนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงจนมีขนาดเล็กความลึกของรอยรูนที่เพิ่มมากขึ้นจะไม่ค่อยมีผลกับปริมาตร ทำให้ค่าระยะโก่งของเหล็กแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบจะเท่ากัน



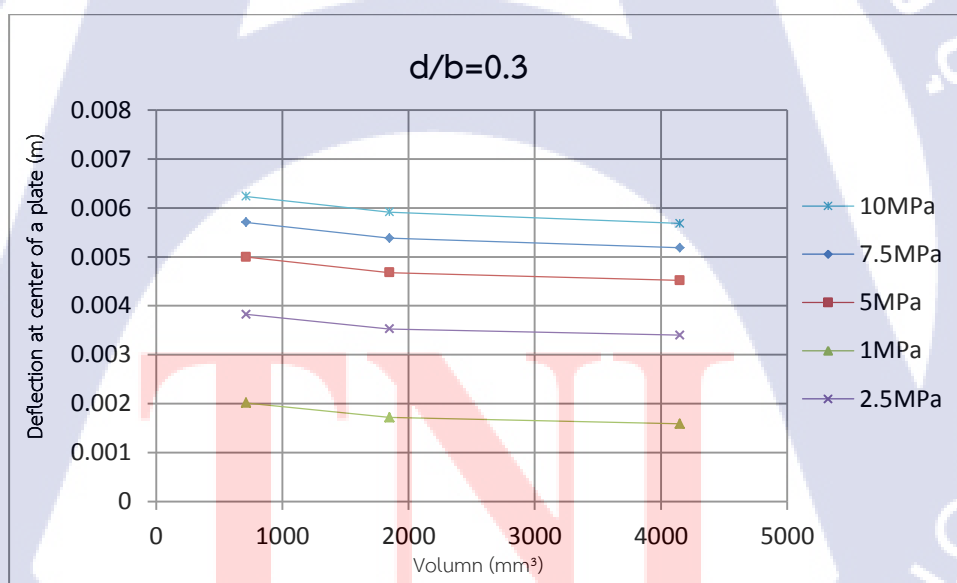
รูปที่ 4.49 ปริมาตรของรอยนูนบนแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. ที่ความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ



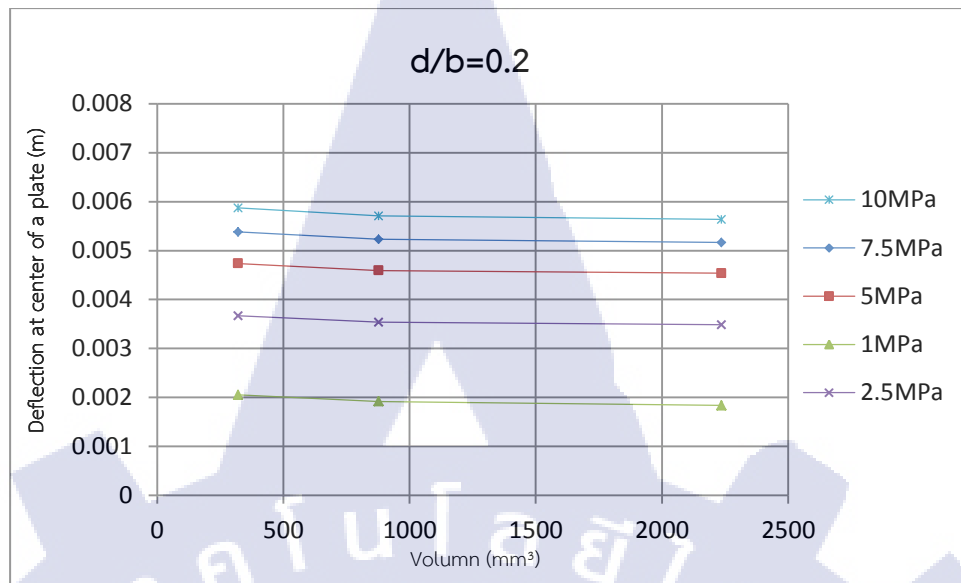
รูปที่ 4.50 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยนูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.5$ ที่ความลึกต่าง ๆ



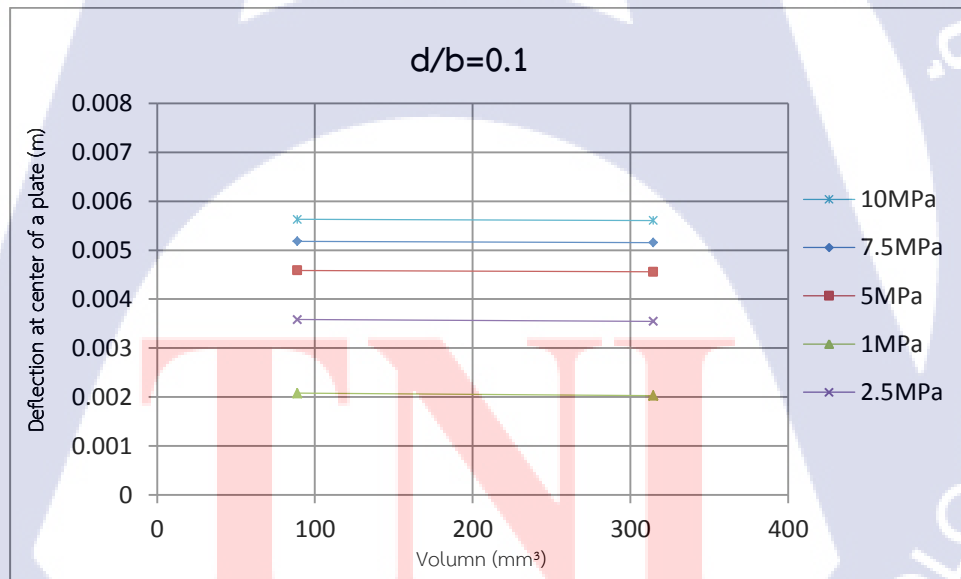
รูปที่ 4.51 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.4$ ที่ความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.52 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูนที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.3$ ที่ความลึกต่าง ๆ



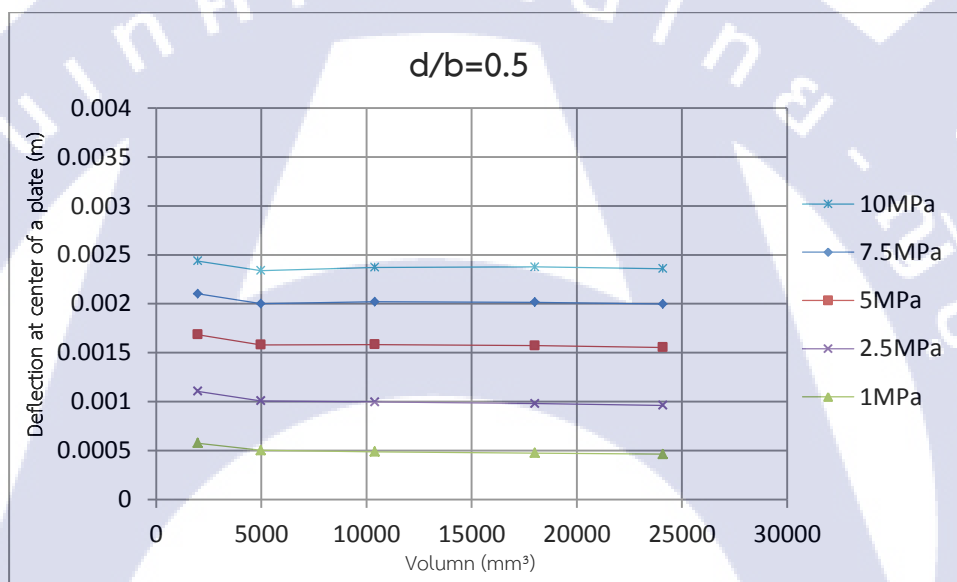
รูปที่ 4.53 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูลที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.2$ ที่ความลึกต่าง ๆ



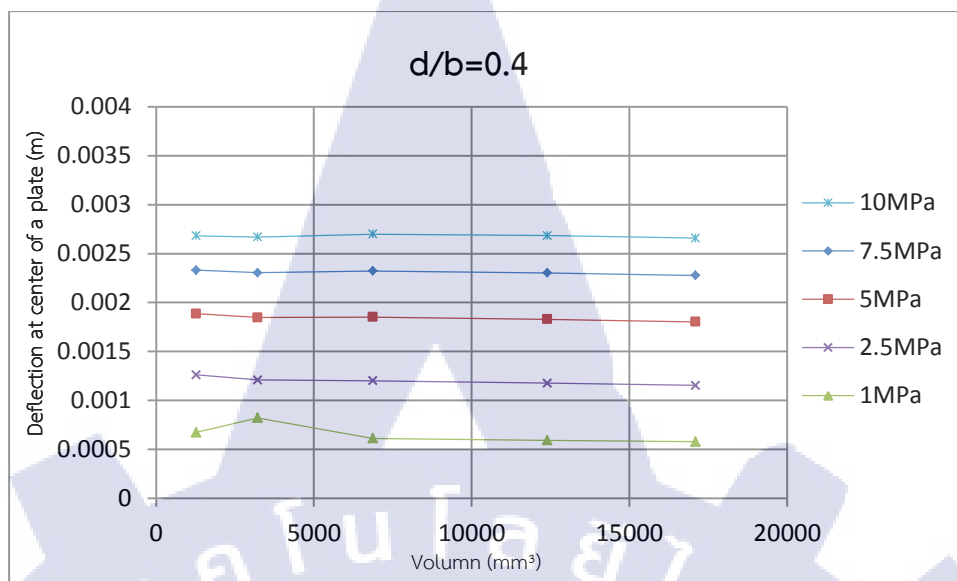
รูปที่ 4.54 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยรูลที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.1$ ที่ความลึกต่าง ๆ

4.5.5 วิเคราะห์อัตราส่วนปริมาตรที่เปลี่ยนไปเพื่อหาความสัมพันธ์กับขนาดการเสียรูปของเหล็กแผ่นที่มีรูปร่างรอยบุ๋ม

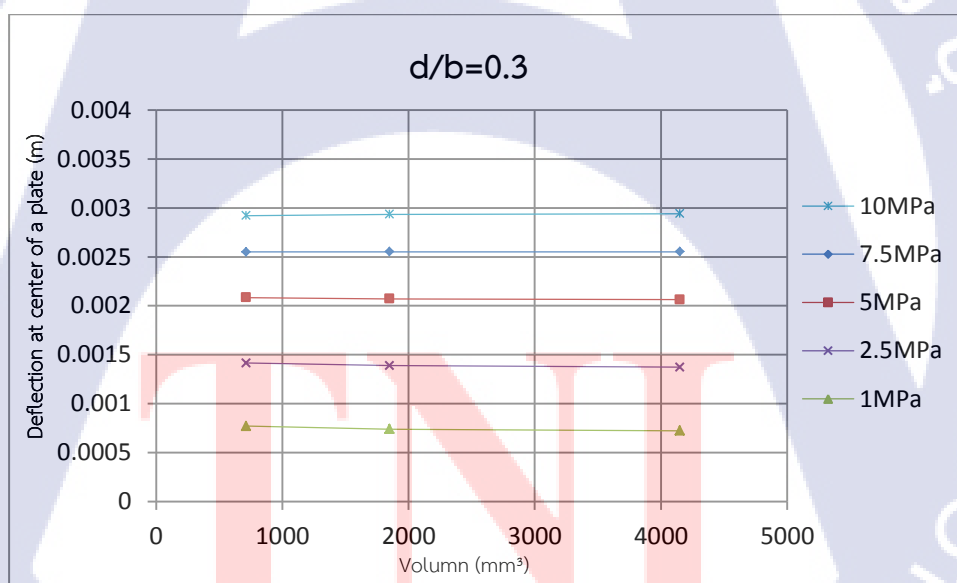
จากรูปที่ 4.55 เมื่อปริมาตรของรอยบุ๋มเพิ่มมากขึ้น รอยบุ๋มที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความกว้างของเหล็กแผ่นเท่ากับ 0.5 ในช่วงแรกระยะโค้งของเหล็กแผ่นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.56 – 4.59 เมื่อปริมาตรของรอยบุ๋มเพิ่มขึ้น ระยะโค้งของเหล็กแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และหากพิจารณากรณีที่ปริมาตรของรอยบุ๋มคงที่ เมื่อเพิ่มแรงกระจายให้มากขึ้น ระยะโค้งที่กึ่งกลางแผ่นจะเพิ่มมากขึ้น มีลักษณะเป็นเส้นตรง จากข้อมูลในส่วนนี้สรุปได้ว่า ปริมาตรของรอยบุ๋มไม่สามารถใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง d/b h/t และระยะโค้งที่กึ่งกลางแผ่นได้



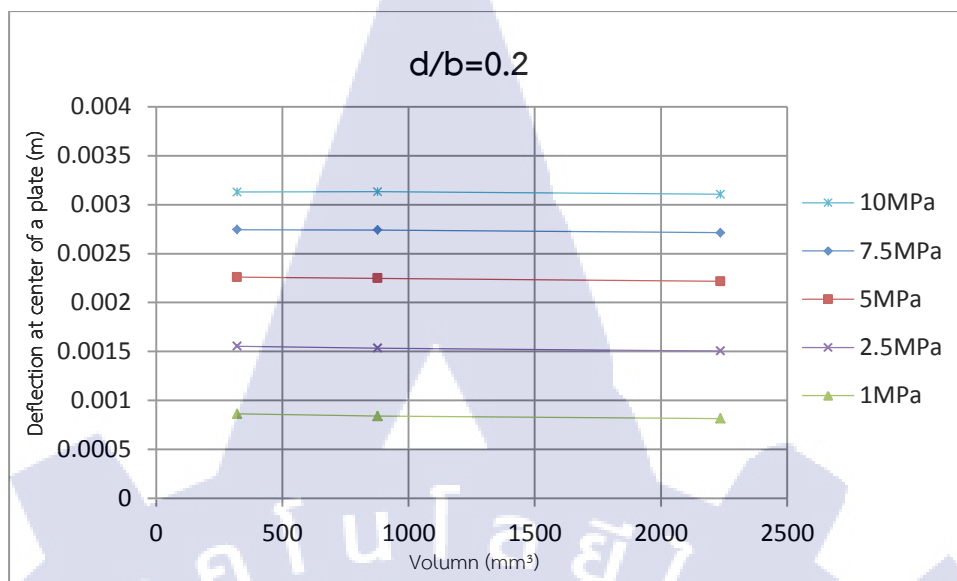
รูปที่ 4.55 ระยะโค้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรูปร่างรอยบุ๋มที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.5$
ที่ความลึกต่าง ๆ



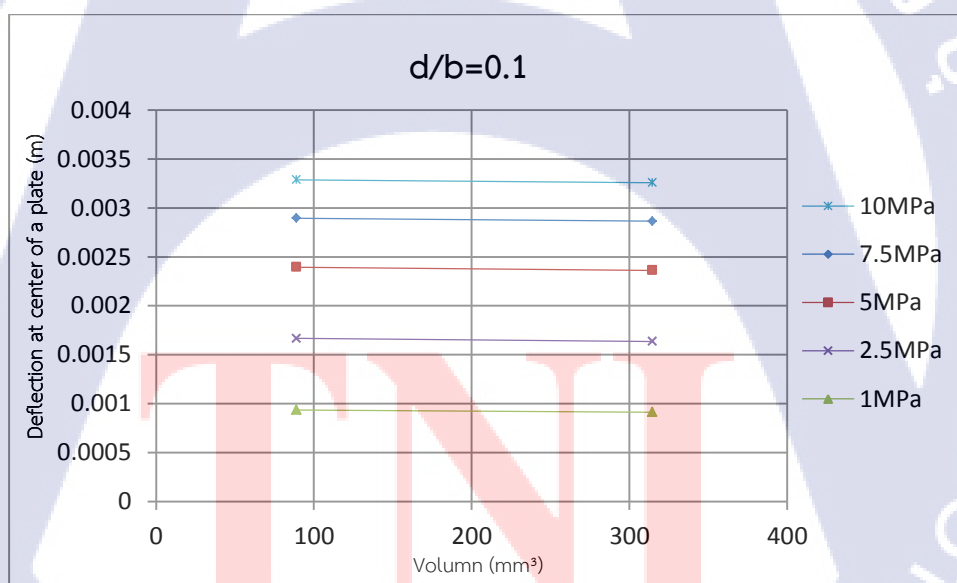
รูปที่ 4.56 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบุ๋มที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.4$ ที่ความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.57 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบุ๋มที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.3$ ที่ความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.58 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.2$ ที่ความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.59 ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นมีรอยบวมที่แรงกระจายโหลด 5 ค่า เมื่อ $d/b = 0.1$ ที่ความลึกต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแผ่นบางมีรอยนูนและรอยบุ๋มรับแรงกระจายตั้งฉากกับระนาบของแผ่น โดยยึดขอบล่างของแผ่นทั้งสี่ด้าน ในการวิเคราะห์ที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปร 2 ตัว คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดความลึกของรอยนูนและรอยบุ๋ม โดยแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวของแผ่น และอัตราส่วนระหว่างความลึกกับความหนาของแผ่น แล้วทำการเปรียบเทียบระยะโก่งของแผ่นที่ภาระต่าง ๆ

จากผลการคำนวณในกรณีของแผ่นมีรอยนูน พบว่า แผ่นที่มีรอยนูนลึกกว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่าแผ่นที่มีรอยนูนน้อยกว่า และทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนจะมีแนวโน้มของระยะโก่งเหมือนกัน คือ รอยนูนที่ลึกกว่าจะมีระยะโก่งน้อยกว่า ทั้งนี้ถ้าแผ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนมากแต่มีความลึกของรอยนูนน้อยจะมีระยะโก่งมาก ในขณะที่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนมีค่าน้อย ความลึกของรอยนูนจะไม่ค่อยมีผลต่อระยะโก่ง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยนูนต่าง ๆ ในแต่ละค่าของระยะความลึกรอยนูนจะมีจุดตัดที่เกิดขึ้นที่แรงกระจายค่าหนึ่ง ที่ทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าการเสียรูปที่เท่ากัน จุดตัดนี้เป็นขีดจำกัดความสามารถของรอยนูนที่ช่วยเสริมแรงให้กับเหล็กแผ่น ถ้าเลยจุดตัดนี้ไปแล้ว แผ่นเรียบจะมีการเสียรูปที่น้อยกว่า ดังการเลือกขนาดความลึกรอยนูนและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนต้องคำนึงถึงความสามารถการผลิตและขอบเขตของแรงที่ใช้ให้เหมาะสมจึงจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] S. P. Timoshenko and S. W. Krieger, *Theory of Plates and Shells*, USA, McGraw-Hill, 1959.
- [2] E. Ventsel and T. Krauthammer, *Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications*, USA: Marcel Dekker, 2001.
- [3] H. E. Elgamel, "Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 50, no. 1 – 2, pp. 17-22, August 1995.
- [4] P. Rozgo et al., *Wet/Wet Differential Pressure Sensor Based on Microelectronic Packaging Process*. [Online]. Available : <http://www.google.com/patents/US8230745>. [Accessed : September 10, 2014]
- [5] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [6] J. K. Paik et al., "Ultimate strength of dented steel plates under axial compressive loads," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 45, no. 3, pp. 433-448, March 2003.
- [7] J. K. Paik, "Ultimate strength of dented steel plates under edge shear loads," *Thin-Walled Structures*, vol. 43, no. 9, pp. 1475 - 1492, September 2005.
- [8] Z. Sadovsky et al., "Degradation of the compressive strength of rectangular plates due to initial deflection," *Thin-Walled Structures*, vol. 43, no. 1, pp. 65 - 82, January 2005.
- [9] A. V. Raviprakash et al., "Residual ultimate compressive strength of dented square plates," *Thin-Walled Structures*, vol. 58, no. 9, pp. 32 - 39, September 2012.

- [10] M. C. Xu and C. G. Soares, "Assessment of residual ultimate strength for wide dented stiffened panels subjected to compressive loads," *Engineering Structures*, vol. 49, no. 4, pp. 316 - 328, April 2013.



ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

ตารางการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงและรูปร่างรอยนูนกับรูปร่างรอยบุ๋ม

TNI

ตารางที่ ก-1 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.5$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.001705	1	1	0.00093812	1	1	0.00081397
2	2.5	0.004547	2	2.5	0.0034983	2	2.5	0.003002
3	5	0.0058311	3	5	0.0050671	3	5	0.0044478
4	7.5	0.0065756	4	7.5	0.0060653	4	7.5	0.0052484
5	10	0.0070773	5	10	0.0068819	5	10	0.00585
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00074996	1	1	0.00071554			
2	2.5	0.0027735	2	2.5	0.0026709			
3	5	0.0042302	3	5	0.0041504			
4	7.5	0.004995	4	7.5	0.0049058			
5	10	0.0055588	5	10	0.0054596			

ตารางที่ ก-2 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.4$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0019398	1	1	0.001369	1	1	0.0012034
2	2.5	0.0041031	2	2.5	0.0035201	2	2.5	0.0032663
3	5	0.0053772	3	5	0.0048213	3	5	0.0044953
4	7.5	0.0061335	4	7.5	0.00563	4	7.5	0.0052145
5	10	0.0066896	5	10	0.0062593	5	10	0.0057556
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0011067	1	1	0.0010509			
2	2.5	0.0031522	2	2.5	0.003101			
3	5	0.0043787	3	5	0.0043434			
4	7.5	0.005079	4	7.5	0.0050408			
5	10	0.0056011	5	10	0.0055576			

ตารางที่ ก-3 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.3$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0020165	1	1	0.0017165	1	1	0.0015873
2	2.5	0.0038247	2	2.5	0.0035256	2	2.5	0.0033995
3	5	0.0049948	3	5	0.004678	3	5	0.0045187
4	7.5	0.0057053	4	7.5	0.0053811	4	7.5	0.0051839
5	10	0.0062368	5	10	0.0059161	5	10	0.0056829
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-4 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.2$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0020513	1	1	0.0019164	1	1	0.0018347
2	2.5	0.0036665	2	2.5	0.0035355	2	2.5	0.0034836
3	5	0.0047359	3	5	0.0045941	3	5	0.0045388
4	7.5	0.0053818	4	7.5	0.0052313	4	7.5	0.0051665
5	10	0.0058711	5	10	0.0057093	5	10	0.0056378
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-5 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.1$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0020789	1	1	0.0020298	1	1	
2	2.5	0.0035829	2	2.5	0.0035479	2	2.5	
3	5	0.0045877	3	5	0.0045568	3	5	
4	7.5	0.0051821	4	7.5	0.0051561	4	7.5	
5	10	0.0056318	5	10	0.0056064	5	10	
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-6 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยบุ๋มเมื่อ $d/b = 0.5$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0014096	1	1	0.0010699	1	1	0.00093539
2	2.5	0.0027195	2	2.5	0.0024177	2	2.5	0.0023078
3	5	0.0036211	3	5	0.0034426	3	5	0.0034088
4	7.5	0.0041364	4	7.5	0.0040072	4	7.5	0.0040067
5	10	0.0045159	5	10	0.004414	5	10	0.0044342
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00085938	1	1	0.00082223			
2	2.5	0.0022149	2	2.5	0.0021546			
3	5	0.0033624	3	5	0.0033189			
4	7.5	0.0039777	4	7.5	0.003952			
5	10	0.0044202	5	10	0.0044024			

ตารางที่ ก-7 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยบุ๋มเมื่อ $d/b = 0.4$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0015617	1	1	0.0010734	1	1	0.0012106
2	2.5	0.0029305	2	2.5	0.0027836	2	2.5	0.002731
3	5	0.0038488	3	5	0.0037854	3	5	0.0037787
4	7.5	0.0043784	4	7.5	0.0043487	4	7.5	0.004363
5	10	0.0047697	5	10	0.0047619	5	10	0.0047904
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0011354	1	1	0.0010923			
2	2.5	0.0026634	2	2.5	0.0026128			
3	5	0.0037386	3	5	0.0037055			
4	7.5	0.0043349	4	7.5	0.004306			
5	10	0.0047701	5	10	0.0047451			

ตารางที่ ก-8 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยบุ๋มเมื่อ $d/b = 0.3$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0017282	1	1	0.0015742	1	1	0.0014942
2	2.5	0.0031356	2	2.5	0.0030703	2	2.5	0.003035
3	5	0.0040683	3	5	0.0040516	3	5	0.0040391
4	7.5	0.0046089	4	7.5	0.0046145	4	7.5	0.0046139
5	10	0.0050133	5	10	0.0050323	5	10	0.0050408
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-9 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยบุ๋มเมื่อ $d/b = 0.2$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0018891	1	1	0.0018044	1	1	0.0017322
2	2.5	0.0033175	2	2.5	0.0032814	2	2.5	0.0032349
3	5	0.0042609	3	5	0.0042481	3	5	0.0042143
4	7.5	0.0048105	4	7.5	0.0048108	4	7.5	0.0047827
5	10	0.0052222	5	10	0.0052296	5	10	0.005206
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-10 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยนูนเมื่อ $d/b = 0.1$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1		1	1	
2	2.5		2	2.5		2	2.5	
3	5		3	5		3	5	
4	7.5		4	7.5		4	7.5	
5	10		5	10		5	10	
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-11 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.5$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00062052	1	1	0.00039555	1	1	0.00033523
2	2.5	0.0018063	2	2.5	0.0010592	2	2.5	0.00087045
3	5	0.0034147	3	5	0.002175	3	5	0.0017404
4	7.5	0.0043234	4	7.5	0.0031457	4	7.5	0.0024897
5	10	0.0049187	5	10	0.0039924	5	10	0.0031178
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00030615	1	1	0.0002927			
2	2.5	0.00078571	2	2.5	0.00073995			
3	5	0.0015657	3	5	0.0014921			
4	7.5	0.002248	4	7.5	0.0021505			
5	10	0.0028273	5	10	0.0027136			

ตารางที่ ก-12 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.4$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0006809	1	1	0.00048305	1	1	0.00045124
2	2.5	0.0017395	2	2.5	0.0012798	2	2.5	0.0011266
3	5	0.0030194	3	5	0.0023347	3	5	0.0020571
4	7.5	0.0038579	4	7.5	0.0031361	4	7.5	0.0027607
5	10	0.00447	5	10	0.0037768	5	10	0.0033353
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00041971	1	1	0.00040261			
2	2.5	0.0010475	2	2.5	0.0010082			
3	5	0.0019321	3	5	0.0018762			
4	7.5	0.0026101	4	7.5	0.0025501			
5	10	0.0031579	5	10	0.0030929			

ตารางที่ ก-13 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.3$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00072842	1	1	0.00061137	1	1	0.00056587
2	2.5	0.0016828	2	2.5	0.0014304	2	2.5	0.0013285
3	5	0.0027391	3	5	0.0023975	3	5	0.0022446
4	7.5	0.0034574	4	7.5	0.0030751	4	7.5	0.0028877
5	10	0.0040108	5	10	0.0036123	5	10	0.0033917
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-14 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.2$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00076738	1	1	0.00070253	1	1	0.00066502
2	2.5	0.0016407	2	2.5	0.0015239	2	2.5	0.001467
3	5	0.0025616	3	5	0.0024125	3	5	0.0023485
4	7.5	0.0031861	4	7.5	0.0030216	4	7.5	0.0029526
5	10	0.0036719	5	10	0.003497	5	10	0.0034214
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-15 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรอยร้าวเมื่อ $d/b = 0.1$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00079791	1	1	0.00076772	1	1	
2	2.5	0.0016185	2	2.5	0.0015806	2	2.5	
3	5	0.0024632	3	5	0.0024252	3	5	
4	7.5	0.00303	4	7.5	0.0029939	4	7.5	
5	10	0.0034704	5	10	0.0034357	5	10	
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-16 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยนูนเมื่อ $d/b = 0.5$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00046964	1	1	0.00034704	1	1	0.0003105
2	2.5	0.00098905	2	2.5	0.00078497	2	2.5	0.00072103
3	5	0.0015884	3	5	0.0013521	3	5	0.0012817
4	7.5	0.0020202	4	7.5	0.0017936	4	7.5	0.0017297
5	10	0.0023628	5	10	0.0021419	5	10	0.0021064
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00028895	1	1	0.00027778			
2	2.5	0.00068117	2	2.5	0.00065847			
3	5	0.0012337	3	5	0.0012014			
4	7.5	0.001685	4	7.5	0.0016498			
5	10	0.0020662	5	10	0.0020304			

ตารางที่ ก-17 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยนูนเมื่อ $d/b = 0.4$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00053921	1	1	0.00048262	1	1	0.00041812
2	2.5	0.0011221	2	2.5	0.00099173	2	2.5	0.00094422
3	5	0.0017734	3	5	0.0016541	3	5	0.0016126
4	7.5	0.0022353	4	7.5	0.0021352	4	7.5	0.0021106
5	10	0.002599	5	10	0.0025185	5	10	0.0025099
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00039387	1	1	0.00037898			
2	2.5	0.0009023	2	2.5	0.00087396			
3	5	0.0015647	3	5	0.001527			
4	7.5	0.0020753	4	7.5	0.002034			
5	10	0.0024725	5	10	0.0024341			

ตารางที่ ก-18 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยนูนเมื่อ $d/b = 0.3$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00061565	1	1	0.00055364	1	1	0.0005246
2	2.5	0.0012691	2	2.5	0.0011932	2	2.5	0.0011533
3	5	0.0019751	3	5	0.001919	3	5	0.0018862
4	7.5	0.0024648	4	7.5	0.0024298	4	7.5	0.0024085
5	10	0.0028474	5	10	0.0028289	5	10	0.0028164
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-19 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยนูนเมื่อ $d/b = 0.2$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00069252	1	1	0.00065347	1	1	0.00062189
2	2.5	0.0014134	2	2.5	0.0013684	2	2.5	0.001322
3	5	0.0021643	3	5	0.0021319	3	5	0.002086
4	7.5	0.0026747	4	7.5	0.0026545	4	7.5	0.0026133
5	10	0.0030716	5	10	0.0030602	5	10	0.0030234
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-20 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นมีรูปร่างรอยบุ๋มเมื่อ $d/b = 0.1$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นหลักทั้ง 4 ด้าน

h/t=1			h/t=2.5			h/t=5		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1		1	1	
2	2.5		2	2.5		2	2.5	
3	5		3	5		3	5	
4	7.5		4	7.5		4	7.5	
5	10		5	10		5	10	
h/t=8			h/t=10					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1		1	1				
2	2.5		2	2.5				
3	5		3	5				
4	7.5		4	7.5				
5	10		5	10				

ตารางที่ ก-21 ตารางผลการคำนวณแรงกระจายกระทำต่อแผ่นขนาด 150×150 ตารางม.ม.ที่มีรอยรูลูกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด โดยมีเงื่อนไขยึดที่ขอบล่างของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

d=40 h/t=5			d=30 h/t=5					
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)			
1	1	0.0044781	1	1	0.0044824			
2	2.5	0.0060007	2	2.5	0.005941			
3	5	0.0073997	3	5	0.0072676			
4	7.5	0.0083726	4	7.5	0.008184			
5	10	0.0091557	5	10	0.0089166			

ตารางที่ ก-22 ข้อมูลผลการคำนวณระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. ที่เส้นผ่านศูนย์กลางรอยนูนขนาดต่าง ๆ เมื่อ $h/t = 4$

d/b=0.5			d/b=0.4			d/b=0.3		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.00084654	1	1	0.0012518	1	1	0.0016276
2	2.5	0.0031319	2	2.5	0.0033314	2	2.5	0.0034319
3	5	0.004589	3	5	0.0045712	3	5	0.0045554
4	7.5	0.0054195	4	7.5	0.0053061	4	7.5	0.005227
5	10	0.0060533	5	10	0.0058633	5	10	0.0057324
d/b=0.2								
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)						
1	1	0.0018648						
2	2.5	0.0034969						
3	5	0.0045493						
4	7.5	0.0051771						
5	10	0.0056469						

ตารางที่ ก-23 ข้อมูลผลการคำนวณระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นขนาด 100×100 ตารางม.ม. มีรอยนูนที่เส้นผ่านศูนย์กลางสามขนาด เมื่อ $h/t = 5$ โดยมีเงื่อนไขยึดที่ผิวของแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน

d/b=0.45			d/b=0.35			d/b=0.25		
No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)	No.	Pressure (MPa)	Deformation (m)
1	1	0.0010012	1	1	0.001409	1	1	0.0017235
2	2.5	0.003161	2	2.5	0.003342	2	2.5	0.0034461
3	5	0.0044766	3	5	0.0045088	3	5	0.0045277
4	7.5	0.0052319	4	7.5	0.0051986	4	7.5	0.0051724
5	10	0.0058003	5	10	0.0057198	5	10	0.0056553

ตารางที่ ก-24 ข้อมูลผลการคำนวณปริมาตรของรอยนูนที่อัตราส่วนความลึกต่างๆ

d/b=0.5			d/b=0.4			d/b=0.3		
No.	h/t	ปริมาตรภายในรอยนูน (ตาราง ม.ม.)	No.	h/t	ปริมาตรภายในรอยนูน (ตาราง ม.ม.)	No.	h/t	ปริมาตรภายในรอยนูน (ตาราง ม.ม.)
1	1	1968.1	1	1	1261.467	1	1	712.149
2	2.5	4980.346	2	2.5	3216.251	2	2.5	1847.564
3	5	10384.932	3	5	6868.989	3	5	4150.189
4	8	18004.881	4	8	12401.19	4	8	
5	10	24088.18	5	10	17096.5	5	10	
d/b=0.2			d/b=0.1					
No.	h/t	ปริมาตรภายในรอยนูน (ตาราง ม.ม.)	No.	h/t	ปริมาตรภายในรอยนูน (ตาราง ม.ม.)	No.	h/t	ปริมาตรภายในรอยนูน (ตาราง ม.ม.)
1	1	320.612	1	1	88.908			
2	2.5	877.922	2	2.5	314.524			
3	5	2235.791	3	5				
4	8		4	8				
5	10		5	10				