



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบเพื่อความแข็งแรงสำหรับบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตโดยการขึ้นรูปรีดร้อน

Design for Strength for Thermoformed-Plastic Packages

นามผู้วิจัย นายประพันธ์ ชรรมนนทิกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนีย์พันธุ์, M.S.)

กรรมการ

(อาจารย์ธีรารักษ์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ภูริปัญญาคุณ, วศ.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบเพื่อความแข็งแรงสำหรับบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตโดยการขึ้นรูปร้อน

Design for Strength for Thermoformed-Plastic Packages

โดย

นายประพันธ์ ชรรมนนทิกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

ประพันธ์ ธรรมนนทิกุล 2552: การออกแบบเพื่อความแข็งแรงสำหรับบรรจุภัณฑ์
พลาสติกที่ผลิตโดยวิธีขึ้นรูปรีดร้อน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์, M.S. 185 หน้า

บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตโดยวิธีขึ้นรูปรีดร้อนถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร การลดต้นทุนการผลิตให้น้อยที่สุด ปัจจัยโดยตรงจากน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นความหนาผนังบรรจุภัณฑ์จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด บรรจุภัณฑ์ที่มีผนังบางมากเกินไปส่งผลให้เกิดการยุบตัว เมื่อมีภาระด้านบนมากกระทำ วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-Element Analysis หรือ FEA) เพื่อหาความหนาที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นจากการศึกษาการยุบตัวเนื่องจากภาระด้านบนทั้งจากการทดสอบ และจาก FEA ของถาดพลาสติกที่ผลิตโดยวิธีขึ้นรูปรีดร้อน รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (124.5 x 124.5 x 28.5 มม. ความหนาผนังเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 มม.) ผลิตจากพลาสติกชนิดโพลีสไตรีน (PS) ผลการเปรียบเทียบจาก 9 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEMs) ซึ่งแต่ละแบบต่างกันที่การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Constrain) และการกำหนดเงื่อนไขภาระแบบสถิตยศาสตร์ (Static loading) พบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของถาดที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบ fixed 4 มุม ที่ฐาน และกำหนดภาระเป็นแบบกระจาย ให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำที่สุด โดยค่าเฉลี่ยระยะยุบในช่วงภาระด้านบนระหว่าง 7.6 N ถึง 38.0 N มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($e_{\%}$) เท่ากับ 3.49% ในขณะที่ค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน ($|e|_{\%}$) เท่ากับ 5.02% ดังนั้นการศึกษาเพิ่มเติมจึงใช้แบบจำลอง FEM ดังกล่าวเพื่อศึกษารูปทรง และขนาดต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ภายใต้ภาระด้านบนรวม 77 รูปแบบ งานวิจัยนี้ได้เสนอเกณฑ์การเปรียบเทียบความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ i) อัตราส่วนระหว่าง แรงต่อน้ำหนัก (F/m) ii) แรงต่อปริมาตรความจุ (F/V_C) iii) ระยะยุบตามแกนความสูงต่อน้ำหนัก (δ_z/m) และ iv) ระยะยุบตามแกนความสูงต่อปริมาตรความจุ (δ_z/V_C) บรรจุภัณฑ์ที่แข็งแรงต้องมีค่า F/m และ F/V_C มาก และ δ_z/m และ δ_z/V_C น้อย ผลจากการศึกษาได้สรุปแนวทางการออกแบบเป็นตารางซึ่งสามารถช่วยให้นักออกแบบสามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยวิธีขึ้นรูปรีดร้อนให้มีความแข็งแรงได้ดีมากขึ้น เช่น รูปทรงกระบอกจะมีความแข็งแรงดีที่สุด

Praphan Thammanontikul 2009: Design for Strength for Thermoformed-Plastic Packages. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Satjarthip Thusneyapan, M.S. 185 pages.

Thermoformed-plastic package are used extensively for our daily life, especially for the food packaging. To minimize the cost, which is directly related to the mass of the package, the thickness is the most concern. Too thin of the wall thickness causes the collapse of the package when several parts are loading on top. This thesis applied finite-element analysis (FEA) for determining the thickness. The initial study selected a thermoformed tray with a square shape (124.5 x 124.5 x 28.5 mm, with the average wall thickness of 0.2 mm), made from polystyrene (PS), for investigation the deflection due to top loading – both experiment and FEA. The compared nine finite-element models (FEMs), they differed by constrain and static loading conditions. It was found that a FEM of the tray with four fixed corners at the base and distributed loading gave the most accurate result. The averaged vertical deflection, for the loading between 7.6 N and 38.0 N, gave the error of 3.49%; while the average of the absolute error was 5.02%. Further study, by using the obtained FEM, investigated various geometry and dimension influencing the top load strength of the package. This research introduced criterions for comparing the strength of the package; they were the ratios of i) force per mass (F/m), ii) force per capacity (F/V_C), iii) vertical deflection per mass (δ_z/m), and iv) vertical deflection per capacity (δ_z/V_C). A package with good strength would have the large values of F/m and F/V_C , and small values of δ_z/m and δ_z/V_C . The resulted studies tabulated a design guide which could help designers to design thermoformed products with better strength. For example the cylindrical shape has the best strength.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สัจจาทิพย์ ทศนีย์พันธุ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ตลอดเวลาตลอดช่วงทำการศึกษา และวิจัยในการให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ และช่วยแก้ไขปัญหา ให้วิทยานิพนธ์นี้มีความ สมบูรณ์ทั้งทางวิชาการและรูปแบบการพิมพ์เสนอรายงานผลวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล กรรมการวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ฐิริปัญญาคุณ กรรมการวิชารอง และผู้ช่วย ศาสตราจารย์กานติส สุดสาคร ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อมโนช ธรรมนนทิกุล คุณแม่พจณี ธรรมนนทิกุล พี่ประดิษฐ์ ธรรมนนทิกุล ที่ให้การส่งเสริม สนับสนุน และเป็นให้กำลังใจ จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณชาคริต สุวรรณจรัส นิสิตปริญญาเอก คุณกฤษกร เขาทอง คุณทิพากร พรพันธุ์ไพบูลย์ คุณชลิต อรรถคำภีรวงศ์ คุณรวีวัฒน์ รักสัง นิสิตปริญญาโท หน่วยปฏิบัติการ วิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (Mechanical and Product Design Research Laboratory, MPDRL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับ คำแนะนำในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ กับข้าพเจ้าตั้งแต่ ระดับอนุบาล ถึง ระดับอุดมศึกษา

ประพันธ์ ธรรมนนทิกุล

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(6)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(21)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
บรรจุภัณฑ์พลาสติก	3
กรรมวิธีการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก	3
กรรมวิธีการขึ้นรูปรีออน	4
แบบแรงดูดจากสุญญากาศโดยตรง	4
แบบแม่พิมพ์ดันแล้วใช้แรงดูดจากสุญญากาศ	5
แบบขึ้นรูปจากแรงดัน	6
แบบแรงดันหรือสุญญากาศดึงอิสระ	7
แบบแม่พิมพ์คู่	7
แบบหัวอัดช่วยก่อนใช้แรงสุญญากาศ	8
แบบแรงสุญญากาศแล้วอัดสวนด้วยแรงลม	9
แบบ Vacuum Air-Slip Forming	10
แบบ Air-Cushioning Vacuum Forming	11
วิธีแผ่นพลาสติกคู่	12
พลาสติกสำหรับกรรมวิธีขึ้นรูปรีออน	13
โพลีเอททิลีน เทเรฟทาเลต	13
โพลีโพรพิลีน	13
โพลีสไตรีน	13
การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก	14
มาตรฐานการทดสอบบรรจุภัณฑ์	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การทดสอบการวางซ้อน	16
การระบุตำแหน่งวางบรรจุภัณฑ์ทดสอบ	17
คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ และคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม	18
การวิเคราะห์เพื่อช่วยการออกแบบ	19
การวิเคราะห์เพื่อช่วยกระบวนการผลิต	19
การจำลองการทดสอบโดยใช้ FEA	19
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
ชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางกล	21
ชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	21
อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	22
อุปกรณ์ทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์	23
อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ CAD/CAE	24
วิธีการ	25
วิธีการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์	25
วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	27
วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้ CAD	30
การจำลองบรรจุภัณฑ์แบบ A และ B	31
การจำลองบรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน	31
การจำลองเพื่อศึกษาความกว้างของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม	
แบบ 100	32
การจำลองเพื่อศึกษาความยาวของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม	
แบบ 100	32
การจำลองเพื่อศึกษาความสูงของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100	32
การจำลองเพื่อศึกษาขอบมรอบบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100	34
การจำลองเพื่อศึกษามุมความชันของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม	
แบบ 100	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การจำลองเพื่อศึกษาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของบรรจุภัณฑ์ ทรงกระบอก แบบ 200	35
การจำลองเพื่อศึกษาความสูงของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200	36
การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลที่ขอบฐานของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200	37
การจำลองเพื่อศึกษามุมความชันของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200	37
การจำลองเพื่อศึกษาความกว้างของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300	37
การจำลองเพื่อศึกษาความยาวของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300	37
การจำลองเพื่อศึกษาความสูงของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300	39
การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลที่ขอบฐานของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300	39
การจำลองเพื่อศึกษามุมความชันของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300	40
การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลรอบบรรจุภัณฑ์ทรงหกเหลี่ยม แบบ 400	41
การจำลองเพื่อศึกษา rib ที่ฐานรูปแบบต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์	42
การจำลองเพื่อศึกษาพีเจอร์รูปแบบต่างๆ ที่ผนังด้านข้างของ บรรจุภัณฑ์	42
วิธีการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์	56
การสร้าง Mesh	57
การกำหนด Constrain	57
การกำหนดคภาระ	60
วิธีการวิเคราะห์ผลที่ได้จาก CAE	62
ผลการวิจัยและวิจารณ์	63
ผลการทดสอบทางกลของภาชนะด้านบนของบรรจุภัณฑ์	63
ผลการทดสอบสมบัติทางกลของ Polystyrene	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบบรรจุภัณฑ์แบบ A และ B	70
ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ของบรรจุภัณฑ์แบบ A	70
ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ของบรรจุภัณฑ์แบบ B	86
ผล FEA วิเคราะห์ประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน (100, 200, 300 และ 400)	92
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยมต่อการเปลี่ยนขนาด	100
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนความสูงของของบรรจุภัณฑ์รูปทรง แบบ 100	106
ผลการวิเคราะห์ขอบมลของรูปทรง แบบ 100	109
ผลการวิเคราะห์ความชันผนังของรูปทรง แบบ 100	114
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงกระบอกเมื่อเปลี่ยนขนาด	118
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเปลี่ยนขนาด	125
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเปลี่ยนความสูง	129
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเพิ่มขอบมลที่ฐาน	132
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเปลี่ยนความชัน	135
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงหกเหลี่ยมเมื่อมีขอบมล	138
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยมเมื่อมี Rib ที่ฐาน	145
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1710 เมื่อเปลี่ยนพื้นที่ หน้าตัดของ Rib	151
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อมี Rib ที่ผนัง	156
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยม แบบ 1810 เมื่อเปลี่ยนพื้นที่ หน้าตัดของ Rib	160
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนจำนวน Rib	165
ผลสรุปแนวทางการออกแบบ บรรจุภัณฑ์รูปทรงต่าง ๆ	169
สรุปและข้อเสนอแนะ	173
สรุป	173
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	174

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	176
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการเปรียบเทียบการทดสอบทางกล กับ FEA	177
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการกรองสัญญาณความถี่ โดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB	179
ภาคผนวก ค การคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ย ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A และ B	183
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	185

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638	15
2	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยม (1xx)	47
3	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงกระบอก (2xx)	49
4	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปวงรี (3xx)	50
5	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงหกเหลี่ยม (4xx)	51
6	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ฐาน (17x0)	52
7	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ฐาน (171x)	53
8	ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ผนังด้านข้าง (18xx)	54
9	ค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จากผลการทดสอบการดึงของPS	67
10	เปรียบเทียบระยะยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ตามแกน Z ของผลการทดสอบทางกล (δ_{EXP}) และผลจาก FEA (δ_{FEA}) ที่เงื่อนไข Constrain ต่างๆ	81
11	ความคลาดเคลื่อน (e) เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($e_{\%}$) จากผล FEA ของระยะยุบตามแกน Z ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ที่เงื่อนไข Constrain ต่างๆ และค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (e_{avg}) และความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($ e _{avg}$) จาก 5 โหลดทดสอบ	83
12	ขั้นตอน FEA ของการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ระยะเวลา ขนาดไฟล์ และความคลาดเคลื่อนของแต่ละเงื่อนไขของบรรจุภัณฑ์ แบบ A	87
13	ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (e_{avg}) ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($ e _{avg}$) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ระยะเวลา ขนาดไฟล์ จากผล FEA ของระยะยุบตามแกน Z ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B ที่เงื่อนไข Constrain ต่างๆ	91
14	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยม	169
15	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงกระบอก	170
16	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงวงรี	170
17	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงหกเหลี่ยม	170
18	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อมี Rib ที่ฐาน เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยม	171

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1710	171
20	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อมี Rib ที่ผนังเทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยม	172
21	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1810	172
22	แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเปลี่ยนจำนวน Rib เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1810 และ 1820	172
ตารางผนวกที่		
ค1	แสดงค่าความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A	184
ค2	แสดงค่าความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B	184

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงหลักการผลิตชิ้นงานโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปร้อน	3
2	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แรงคูดจากสุญญากาศโดยตรง	4
3	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ดันแล้วใช้แรงคูดสุญญากาศ	5
4	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แรงดัน	6
5	แสดงการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันหรือสุญญากาศดึงอิสระ	7
6	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์คู่	7
7	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้หัวอัดช่วยก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ	8
8	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยวิธี Vacuum Snap-Back Forming	9
9	แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยวิธี Vacuum Air-Slip Forming	10
10	แสดงการขึ้นรูปโดยวิธี Air-Cushioning Vacuum Forming	11
11	แสดงการขึ้นรูปวิธีแผ่นพลาสติกคู่	12
12	(ก) ภาพชิ้นงานทดสอบขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ แบบ 1 , 2 , 3 และ 5 (ข) ภาพชิ้นงานทดสอบขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ แบบ 4	15
13	แสดงการกำหนดหมายเลขของด้านต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์แบบ ก) รูปกล่องเหลี่ยม ข) รูปทรงกระบอก ค) รูปถุง หรือกระสอบ	18
14	บรรจุภัณฑ์ประเภทภาชนะบรรจุอาหาร ก) แบบ A และ ข) แบบ B	20
15	ชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	22
16	เครื่องทดสอบการดึง (Tensile Tester)	22
17	เวอร์เนียวัดขนาด	23
18	เครื่องชั่งน้ำหนัก	23
19	แผ่นน้ำหนัก	23
20	แผ่นรอง หรือแผ่นรองน้ำหนัก	23
21	เวอร์เนียวัดความสูง	23
22	แสดงการวัดระยะความสูงที่ตำแหน่งมุม 1 ถึง มุม 4	26
23	การติดตั้งชิ้นงานทดสอบลงบนเครื่องทดสอบการดึง	27
24	ตัวแปรที่กำหนดให้กับบรรจุภัณฑ์	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	บรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน แบบ 100 ถึง 400	32
26	บรรจุภัณฑ์แบบ 100 เมื่อเปลี่ยนความกว้าง (W) และเปรียบเทียบกับ แบบ 101 ถึง 103	33
27	บรรจุภัณฑ์แบบ 100 เมื่อเปลี่ยนความยาว (L) และเปรียบเทียบกับ แบบ 111 ถึง 113	33
28	บรรจุภัณฑ์แบบ 100 เมื่อเปลี่ยนความสูง (H) เปรียบเทียบกับ แบบ 121 และ 122	34
29	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ ทรงสี่เหลี่ยม เพื่อศึกษาขอบมด (131 ถึง 153) และมุม ความชัน (161 ถึง 163)	35
30	บรรจุภัณฑ์แบบ 200 เมื่อเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลาง เปรียบเทียบกับ แบบ 201 และ 202	36
31	บรรจุภัณฑ์แบบ 200 เมื่อเปลี่ยนความสูง เปรียบเทียบกับแบบ 221 และ 222	36
32	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก เพื่อศึกษาขอบมด (241 ถึง 243) และ มุมความชัน (261 ถึง 263)	38
33	บรรจุภัณฑ์แบบ 300 เมื่อเปลี่ยนความกว้าง (W) เปรียบเทียบกับ แบบ 301 และ 302	38
34	บรรจุภัณฑ์แบบ 300 เมื่อเปลี่ยนความยาว (L) เปรียบเทียบกับ แบบ 311 และ 312	39
35	บรรจุภัณฑ์แบบ 300 เมื่อเปลี่ยนความสูง เปรียบเทียบกับแบบ 321 และ 322	40
36	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี เพื่อศึกษาขอบมด (341 ถึง 343) และ มุมความชัน (361 ถึง 363)	40
37	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ทรงหกเหลี่ยม เพื่อศึกษาขอบมด (431 ถึง 453)	41
38	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1710 ถึง 1770	42
39	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1711 ถึง 1715	44
40	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1810 ถึง 1830	45
41	รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1811 ถึง 1816 และ 1821	46
42	ลำดับการวิเคราะห์โดยใช้ CAE	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) แบบ Contact	58
44	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ฐานของชิ้นงาน (ก) แบบ Fixed 4 มุม (ข) แบบ Fixed 1 ขอบ (ค) แบบ Fixed 2 ขอบ (ง) แบบ ไม่ Fixed	59
45	การกำหนดภาระแบบกระจาย (Distributed Load)	61
46	การกำหนดภาระแบบ Multiple Points Constrain (MPC)	61
47	เมนูแสดงค่าต่างๆ ของ stress/strain และ displacement ที่สามารถแสดงผล ได้จากโปรแกรม MSC.Patran 2005	62
48	ระยะยวบตัวจากการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์ แบบ A	64
49	ระยะยวบตัวจากการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์ แบบ B	64
50	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับ ϵ ของชิ้นงานทดสอบ (specimen) ทั้ง 5 ชิ้น	65
51	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ σ กับ ϵ ของทั้ง 5 ชิ้นงานทดสอบ พร้อมแสดง ตำแหน่งของค่า $\sigma_{b,avg}$ และ $\epsilon_{b,avg}$	66
52	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ensemble average ของค่า σ เทียบกับ ϵ เส้นปะ แสดงค่าสูงสุด(Max) ค่าต่ำที่สุด (Min) และตัวเลขระบุค่า ensemble standard deviation ของความเค้น σ	67
53	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{avg} กับ ϵ_{avg} และค่าความชัน (slope) กับ ϵ_{avg}	68
54	แสดงการนำค่า σ - ϵ มาป้อนเข้าซอฟต์แวร์ MSC.Patran	69
55	ผลการวิเคราะห์การยวบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบ Contact และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Contact โดยภาพ (ก) ระยะยวบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยวบตามแกน Z (ค) การขยายตัว ด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	72

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	73
57	ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 1 ขอบ โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	74
58	ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 2 ขอบ โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	75
59	ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ ไม่ Fixed โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	76
60	ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
61	ผลการวิเคราะห์การขยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 1 ขอบ โดยภาพ (ก) ระยะขยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะขยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	78
62	ผลการวิเคราะห์การขยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 2 ขอบ โดยภาพ (ก) ระยะขยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะขยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	79
63	ผลการวิเคราะห์การขยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ ไม่ Fixed โดยภาพ (ก) ระยะขยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะขยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	80
64	กราฟแสดงผล FEA เมื่อกำหนด Constrain และเงื่อนไขการกำหนดภาระแบบต่าง ๆ เปรียบเทียบระยะขยุบตามแกน Z กับผลการทดสอบทางกล ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 37.20 N ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A	82
65	กราฟกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($e_{\%}$) ของระยะขยุบตามแกน Z จากผล FEA ภายใต้เงื่อนไข Constrain และภาระแบบต่างๆ ทั้ง 9 แบบ (เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกลที่แรง 7.64 ถึง 37.20 N) ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A เส้นปะในแนวนอน แสดงค่าเฉลี่ยของ $e_{\%}$ จากทั้ง 5 แรงทดสอบ	84
66	กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ $ e _{\%}$ จาก 9 เงื่อนไขของระยะขยุบตามแกน Z (σ_z) ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 37.20 N โดยเส้นปะในแนวนอน แสดงค่าเฉลี่ยของ $ e _{\%}$ จากทั้ง 5 แรงทดสอบ	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
67	ผลการวิเคราะห์การขูดของบรรจุภัณฑ์ แบบ B ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย ภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม โดยภาพ (ก) ระยะขูดรวม หรือ magnitude (ข) ระยะขูดตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	88
68	กราฟแสดงผล FEA จาก 9 เงื่อนไขเปรียบเทียบกับ ผลการทดสอบจริง ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 44.84 N ของบรรจุภัณฑ์แบบ B	90
69	กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์จาก 9 เงื่อนไขของระยะขูดตามแกน Z (δ_z) ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B ที่แรงทดสอบเท่ากับ 7.64 N ถึง 44.84 N	90
70	ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน $F = 22.06$ N ของรูปทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100 โดย (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	93
71	ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน $F = 22.06$ N ของรูปทรงกระบอก แบบ 200 โดย (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	94
72	ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน $F = 22.06$ N ของรูปทรงวงรี แบบ 300 โดย (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	97
73	ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน $F = 22.06$ N ของรูปทรงหกเหลี่ยม แบบ 400 โดย (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด	98
74	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δ_z กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 400	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
75	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{\max} กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 400	99
76	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรง แบบ 100, 200, 300 และ 400	99
77	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 100 ถึง 103 เมื่อ ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	101
78	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบแบบ 100 และ 111 ถึง 113 เมื่อ ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	101
79	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบแบบ 100 ถึง 103 เมื่อ ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	102
80	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบแบบ 100 และ 111 ถึง 113 เมื่อ ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	102
81	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 100 ถึง 103 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	103
82	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 111 ถึง 113 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	103
83	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δ_z กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 113	105
84	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 113	105
85	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรง แบบ 100 ถึง 113	105
86	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 121 และ 122 ที่ภาระ 22.06 N	107
87	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 121 และ 122 ที่ภาระ 22.06 N	107
88	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 121 และ 122 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	107
89	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรงแบบ 100, 121, 122	108
90	กราฟ σ vs F ของรูปทรงแบบ 100, 121, 122	108
91	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรง แบบ 100, 121, 122	108

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
92	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	110
93	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	111
94	ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	112
95	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153	113
96	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153	113
97	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรง แบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153	114
98	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 161 ถึง 163 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	116
99	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 161 ถึง 163 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	116
100	ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 161 ถึง 163 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	116
101	กราฟ δ_z vs F ของ แบบ 100, 161 ถึง 163	117
102	กราฟ σ vs F ของ แบบ 100, 161 ถึง 163	117
103	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรง แบบ 100, 161 ถึง 163	117
104	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 200 ถึง 202	120
105	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 221 และ 222	120
106	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 241 และ 243	120
107	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 261 และ 263	120
108	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 200 ถึง 202	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
109	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 221 ถึง 222	121
110	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 241 ถึง 243	121
111	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 261 ถึง 263	121
112	ความเค้นของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	122
113	ความเค้นของรูปทรง แบบ 221 ถึง 222 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	122
114	ความเค้นของรูปทรง แบบ 241 ถึง 243 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	122
115	ความเค้นของรูปทรง แบบ 261 ถึง 263 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	122
116	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263	123
117	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 200 และ 241 ถึง 243	123
118	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263	123
119	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 200 และ 241 ถึง 243	124
120	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263	124
121	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 200 และ 241 ถึง 243	124
122	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	126
123	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	127
124	ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	127
125	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312	128
126	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312	128
127	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312	128

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
128	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 300, 321 และ 322 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	130
129	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 300, 321 และ 322 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	130
130	ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 300, 321 และ 322 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	130
131	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300, 321, 322	131
132	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300, 321, 322	131
133	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 300, 321 และ 322	131
134	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	133
135	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	133
136	ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	133
137	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300 และ 341 ถึง 343	134
138	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300 และ 341 ถึง 343	134
139	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 300, 341 และ 343	134
140	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 361 ถึง 363 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	136
141	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 361 ถึง 363 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	136
142	ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	136
143	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300 และแบบ 361 ถึง 363	137
144	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300 และแบบ 361 ถึง 363	137

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
145	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 300, 361 และ 363	137
146	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 400 ถึง 453 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	139
147	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 400 ถึง 453 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	140
148	ความเค้นของรูปทรงแบบ 400 ถึง 453 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	141
149	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 400 และ 431 ถึง 433	142
150	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 400, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453	142
151	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 400 และ 431 ถึง 433	143
152	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 400, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453	143
153	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 400 และ 431 ถึง 433	144
154	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 400, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453	144
155	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	147
156	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	148
157	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	149
158	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1710 ถึง 1770	150
159	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1710 ถึง 1770	150
160	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770	150

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
161	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 เมื่อ ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	152
162	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	153
163	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	154
164	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 1710 ถึง 1715	155
165	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 1710 ถึง 1715	155
166	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715	155
167	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830	157
168	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	158
169	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	158
170	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1810 ถึง 1830	159
171	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1810 ถึง 1830	159
172	เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830	159
173	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 เมื่อ ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	161
174	การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	162
175	ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 เมื่อภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N	163
176	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 1810 ถึง 1815	164
177	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 1810 ถึง 1815	164

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
178	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เจริญความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815	164
179	การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $ \delta $ ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821	166
180	เปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	166
181	ความเค้น (σ) ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N	167
182	กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821	167
183	กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821	168
184	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เจริญความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821	168

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	Area
avg	=	Average
CAD	=	Computer-Aided Design
CAE	=	Computer-Aided Engineering
e	=	Error
e_{avg}	=	Average Error
$ e _{avg}$	=	Average of Absolute Error
$e_{\%}$	=	Percent Error
F	=	Force, Top Load Force
FEA	=	Finite Element Analysis
FEM	=	Finite Element Model
H	=	Height
h	=	rib height
L	=	Length
m	=	mass of the model (product)
max	=	Maximum
min	=	Minimum
mm	=	Millimeter
MPa	=	Mega Pascal
MPC	=	Multiple Points Constrain
N	=	Newton
PS	=	Polystyrene
r	=	rib radius
R_C	=	Radius of Corners
R_E	=	Radius of Edges
SD	=	Standard Deviation

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T	=	Thickness
V	=	Volume of model
V_c	=	Capacity (cc, mm ³)
W	=	Width
w	=	rib width
X	=	X-Axis (แกนแนวนอน)
Y	=	Y-Axis (แกนแนวนอน ตั้งฉากกับ X-Axis)
Z	=	Z-Axis (แกนแนวตั้ง หรือแนวความสูง ตั้งฉากกับ ระนาบ XY)
θ	=	Draft angle
α_1	=	Ratio of height per length
α_2	=	Ratio of width per length
α_3	=	Ratio of radius per length
δ	=	ระยะยุบรวม หรือ magnitude
δ_x	=	การขยายตัวด้านข้างตามแกน X
δ_y	=	การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y
δ_z	=	ระยะยุบตามแนวความสูง (แกน Z)
δ_{FEA}	=	ระยะยุบจากการวิเคราะห์ FEA
σ	=	Stress
σ_{avg}	=	Average Stress
σ_b	=	Breaking Stress
$\sigma_{b,avg}$	=	Breaking Average Stress
σ_{FEA}	=	Stress Calculated from FEA
σ_{EXP}	=	Stress from Experiment
σ_{max}	=	Maximum Stress
σ_{min}	=	Minimum Stress
ϵ	=	Strain

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ϵ_{avg}	=	Average Strain
ϵ_b	=	Breaking Strain
$\epsilon_{b,avg}$	=	Average Breaking Strain
ϵ_{max}	=	Maximum Strain
ϵ_{min}	=	Minimum Strain

การออกแบบเพื่อความแข็งแรงสำหรับบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ผลิต โดยการขึ้นรูปร้อน

Design for Strength for Thermoformed-Plastic Packages

คำนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยพลาสติกถูกนำมาใช้แทนวัสดุธรรมชาติในอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์ บรรจุภัณฑ์อาหาร ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติเด่น โดยมีกรรมวิธีการผลิตที่สะดวกและรวดเร็ว มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ทนแรงกระแทกได้ดี และเป็นฉนวนไฟฟ้า จึงทำให้ อุตสาหกรรมการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) นิยมใช้พลาสติกเป็นวัสดุในการผลิต ภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีขนาดใหญ่และต้องการน้ำหนักน้อยจะมีซี่คาน (rib) รูปแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในป้องกันสินค้าในบรรจุภัณฑ์ รูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์หรือภาชนะมีลักษณะเป็น กล่องรูปทรงเหลี่ยม รี และกลม ลวดลายที่ผนัง (wall) และพื้น (base) และซี่คาน (rib) ต่างเป็น ฟีเจอร์ (feature) ที่เสริมความแข็งแรงของภาชนะโดยมีผลกระทบต่อน้ำหนักน้อย บรรจุภัณฑ์พลาสติกดังกล่าวส่วนมากผลิตโดยกรรมวิธีขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) และการฉีดพลาสติก (Injection) ดังนั้นการวิเคราะห์รูปทรงลวดลายและซี่คาน(rib) จึงมีประโยชน์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์พลาสติก เนื่องด้วยในปัจจุบันยังไม่มี การวิเคราะห์เปรียบเทียบความคงทนของบรรจุภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการออกแบบที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทาง สำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยใช้วัสดุดิบ(พลาสติก)ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษา โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ และคอมพิวเตอร์ช่วยการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปทรงต่อความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์โดยใช้ CAD/CAE
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของฟีเจอร์ (feature) เสริมที่ผนังและพื้นของภาชนะต่อความแข็งแรงและน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์
3. สรุปเป็นหลักการเบื้องต้นของการออกแบบ รูปทรง และฟีเจอร์เสริมความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์

ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. เพื่อใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นให้แก่นักออกแบบและบุคคลทั่วไป สำหรับนำไปใช้ในการพิจารณาการออกแบบบรรจุภัณฑ์รูปทรงต่างๆ ให้เหมาะสมกับความต้องการ
2. ลดการใช้ทรัพยากรพลาสติก จากการออกแบบที่ใช้วัสดุคืบมากเกินไป
3. ลดค่าใช้จ่าย และเวลาในการทดสอบจริง

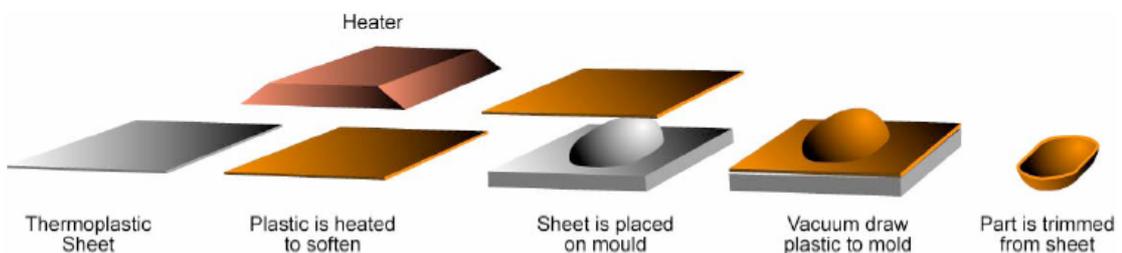
การตรวจเอกสาร

1. บรรจุภัณฑ์พลาสติก

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ประเภทภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจากพลาสติก ได้แก่ กล่องหรือถาดบรรจุอาหาร ถ้วยน้ำดื่ม เป็นต้น ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปทรงได้ง่าย น้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) กรรมวิธีการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทกล่องหรือถาดนี้ ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ กรรมวิธีการขึ้นรูปร้อน (Thermoforming)

2. กรรมวิธีการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก

การผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก มีกรรมวิธีการผลิตอยู่หลายแบบ แต่วิธีที่ สะดวก รวดเร็ว และประหยัด คือ กรรมวิธีขึ้นรูปร้อน (Thermoforming Process) กรรมวิธีนี้เป็นการขึ้นรูปจากแผ่นพลาสติกในขณะที่แผ่นพลาสติก (Thermoplastic Sheet) อ่อนตัวเนื่องจากได้รับความร้อนจาก เครื่องทำความร้อน (Heater) แล้วกดแผ่นพลาสติกให้แนบเข้ากับแม่พิมพ์ โดยใช้แรงลม (Air Pressure) เป็นแรงสุญญากาศ (Vacuum) ดูดอากาศระหว่างแผ่นพลาสติก กับแม่พิมพ์ออก เพื่อลดช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์กับแผ่นพลาสติก เมื่อขึ้นงานพลาสติกเย็นตัวลงจะได้รูปทรงที่ต้องการได้ แล้วนำชิ้นงานมาตัดแต่งขอบ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงหลักการผลิตชิ้นงานโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปร้อน

การแปรรูปแผ่นพลาสติกโดยวิธีการขึ้นรูปร้อนมีหลายเทคนิควิธี แต่ทุกเทคนิคมีหลักการพื้นฐาน เหมือนกัน คือ การทำให้แผ่นพลาสติกอ่อนตัวที่อุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วทำการจับยึดแผ่นพลาสติก ตามด้วยการขึ้นรูป (Forming) โดยการใช้แรงสุญญากาศ ในช่วง 20 ถึง 27 นิ้วของ

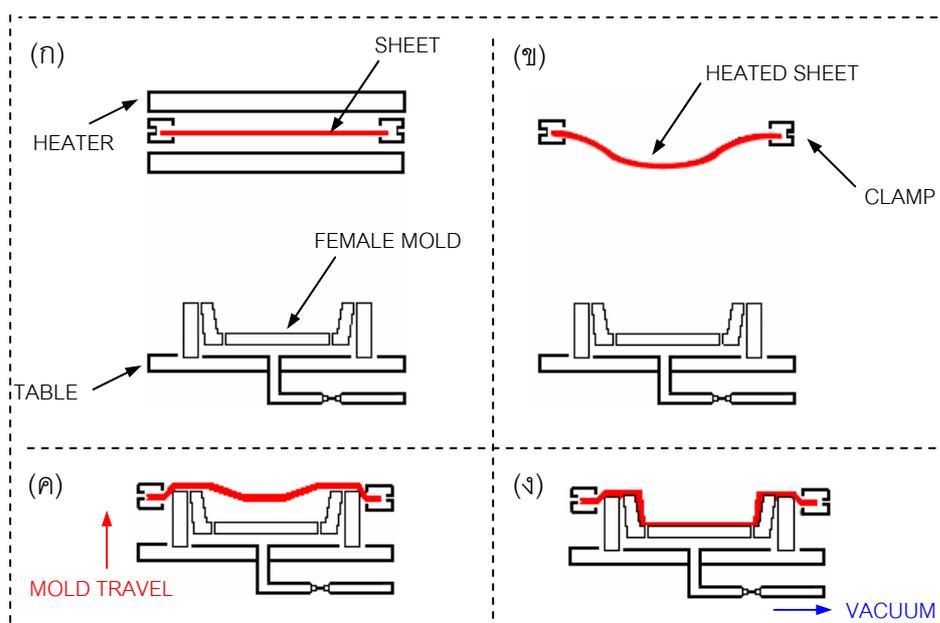
ปรอท โดยระดับแรงสุญญากาศขึ้นอยู่กับแต่ละเทคนิคของการขึ้นรูปและรายละเอียดของชิ้นงานที่ผลิต

3. กรรมวิธีการขึ้นรูปร้อน

1. แบบแรงดูดจากสุญญากาศโดยตรง

การขึ้นรูปโดยใช้แรงดูดจากสุญญากาศโดยตรง (Straight Vacuum Forming) เป็นเทคนิควิธีที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ แต่มีข้อเสีย คือชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ โดยมีส่วนฐานหนา และส่วนมุมบาง หลักการขึ้นรูป คือใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum) ดูดแผ่นพลาสติกที่อ่อนตัว ให้แนบติดกับผิวของแบบ ขั้นตอนการขึ้นรูปสามารถสรุปดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 2ก และ 2ข)
2. ปิดเครื่องทำความร้อน เลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นจนถึงแผ่นพลาสติก (ภาพที่ 2ค)
3. ใช้แรงดันสุญญากาศ ดูดแผ่นพลาสติกมาแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 2ง)
4. รอพลาสติกแข็งตัวแล้วถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

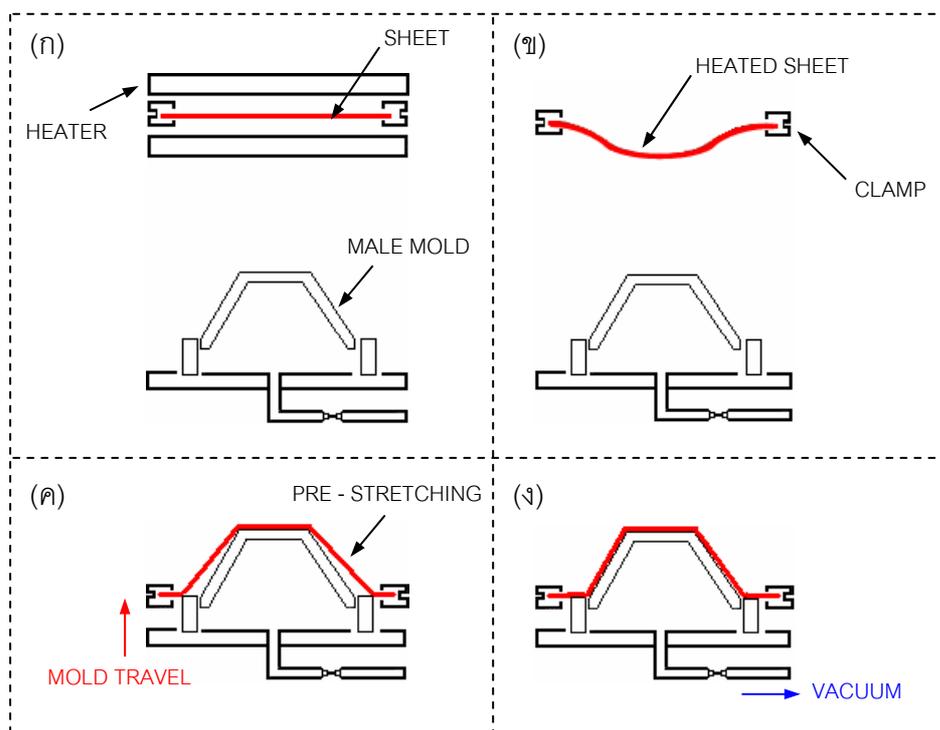


ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แรงดูดจากสุญญากาศโดยตรง

2. แบบแม่พิมพ์ดันแล้วใช้แรงดูดจากสุญญากาศ

วิธีการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ดันแล้วใช้แรงดูดจากสุญญากาศ (Vacuum Drape Forming) เป็นเทคนิควิธีการขึ้นรูปที่ สะดวก รวดเร็ว และประหยัด เนื่องจากการใช้แม่พิมพ์ตัวผู้ (Male mold) ซึ่งทำแบบได้ง่ายกว่า และมีต้นทุนถูกกว่าแม่พิมพ์ตัวเมีย (Female Mold) หลักการขึ้นรูป คือ การเลื่อนแผ่นพลาสติกที่อ่อนตัว ลงมาครอบแม่พิมพ์ หรือเลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นไปเพื่อให้แม่พิมพ์ดันแผ่นพลาสติกให้ยืดออก (Pre-Stretching) แล้วใช้แรงดูดจากสุญญากาศ เพื่อให้แผ่นพลาสติกแนบติดกับแม่พิมพ์ แล้วใช้แรงดันลมถอดชิ้นงานออก ขั้นตอนการขึ้นรูปสรุปดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 3ก และ 3ข)
2. เลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นจนถึง แผ่นพลาสติก (ภาพที่ 3ค)
3. ใช้แรงดูดจากสุญญากาศ ดึงแผ่นพลาสติกมาแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 3ง)

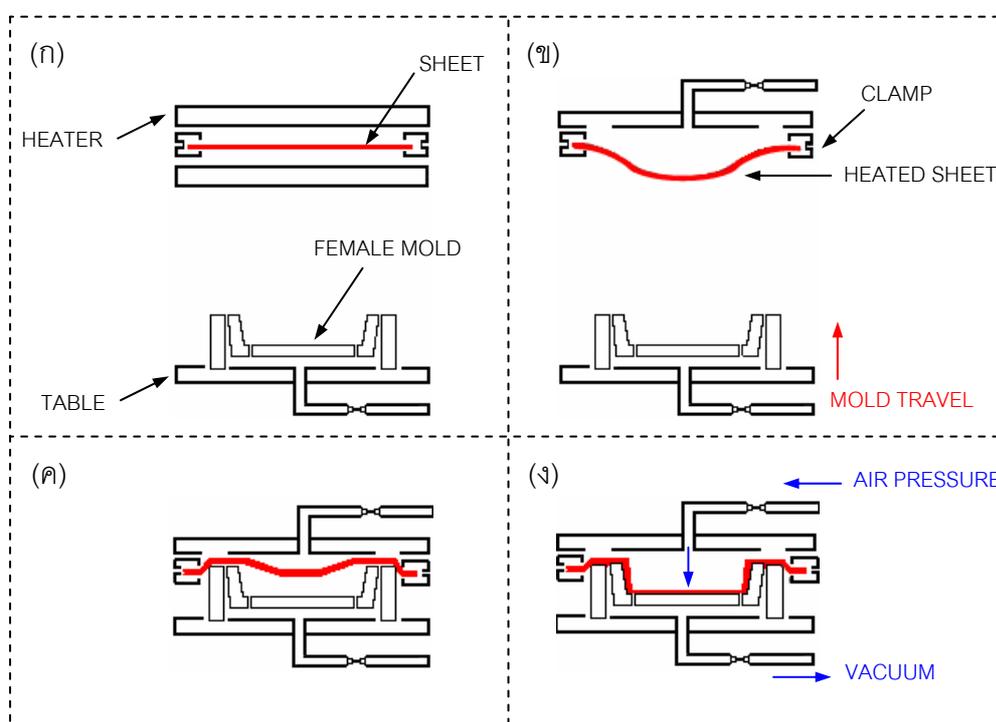


ภาพที่ 3 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ดันแล้วใช้แรงดูดสุญญากาศ

3. แบบขึ้นรูปจากแรงดัน

การขึ้นรูปโดยใช้แรงดัน (Pressure Forming) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่ใช้แรงดูดจากสุญญากาศ และแรงดันลม เป็นแรงดูดและอัดให้แผ่นพลาสติกประกบติดกับแบบ โดยเทคนิคการขึ้นรูปแบบนี้จำเป็นต้องมีแม่พิมพ์ และอุปกรณ์จับยึดที่แข็งแรง เนื่องจากเทคนิคนี้ใช้แรงดันมากกว่า 100 psi การขึ้นรูปแบบใช้แรงดัน ใช้ระยะเวลาการผลิตสั้นกว่า และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรายละเอียดมากได้ดีกว่าการขึ้นรูปแบบแรงดูดจากสุญญากาศโดยตรงอย่างเดียว ขั้นตอนการขึ้นรูปสรุปดังนี้

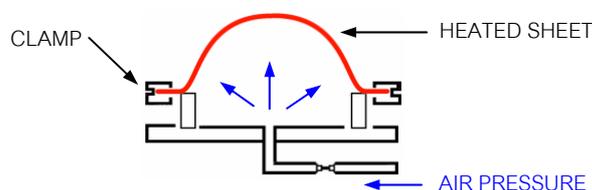
1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 4ก)
2. เลื่อนแม่พิมพ์ขึ้น จนถึงแผ่นพลาสติก (ภาพที่ 4ข และ 4ค)
3. ใช้แรงดูดจากสุญญากาศ และแรงดันลมดูดและดันแผ่นพลาสติกแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 4ง)



ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แรงดัน

4. แบบแรงดันหรือสูญญากาศดึงอิสระ

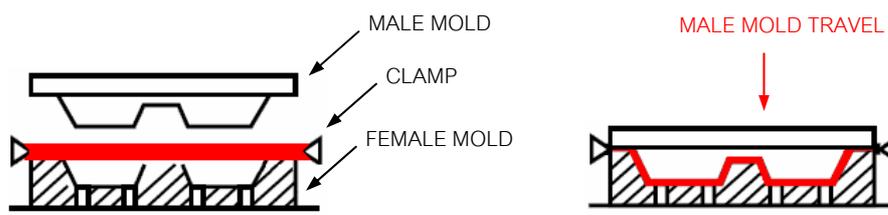
การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันหรือสูญญากาศดึงอิสระ (Free Draw Forming) หรือการขึ้นรูปแบบเป่า (Blow Forming) เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป ดังนั้นขึ้นงานเกิดการบิดรูปน้อย เนื่องจากขึ้นงานไม่สัมผัสแม่พิมพ์ เทคนิคนี้ขึ้นงานมีลักษณะโปร่งใสมาก โดยเทคนิคการขึ้นรูป ใช้แรงดันลมเป่าอัด หรือแรงดูดของสูญญากาศดูดให้ขึ้นงานยืดออก เมื่อถึงระยะที่ต้องการก็ทำการปล่อยแรงดันในทิศสวนทาง เพื่อพุงให้พลาสติกนิ่ง และคงรูปร่างจนอุณหภูมิลดลง ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันหรือสูญญากาศดึงอิสระ

5. แบบแม่พิมพ์คู่

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์คู่ (Matched-Mold Forming) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปขึ้นงานที่ต้องการรายละเอียดสูง เช่น การทำตัวหนังสือ หรือลวดลายต่างๆ เทคนิคการขึ้นรูปแบบนี้ไม่ต้องใช้ แรงจากสูญญากาศ และแรงดันลม โดยหลักการขึ้นรูป ใช้แม่พิมพ์ตัวผู้ (Male mold) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Female mold) กดอัดแผ่นพลาสติกที่อยู่ระหว่างแม่พิมพ์ โดยมีอากาศไหลออกทางช่องระบายอากาศ (Trapped Air Vents) วิธีนี้แผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิต่ำกว่าการขึ้นรูปทั่วไป ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำความร้อน แต่ค่าใช้จ่ายทาง ด้านแม่พิมพ์สูงกว่า เพราะต้องใช้แม่พิมพ์สองซีก ดังแสดงในภาพที่ 6

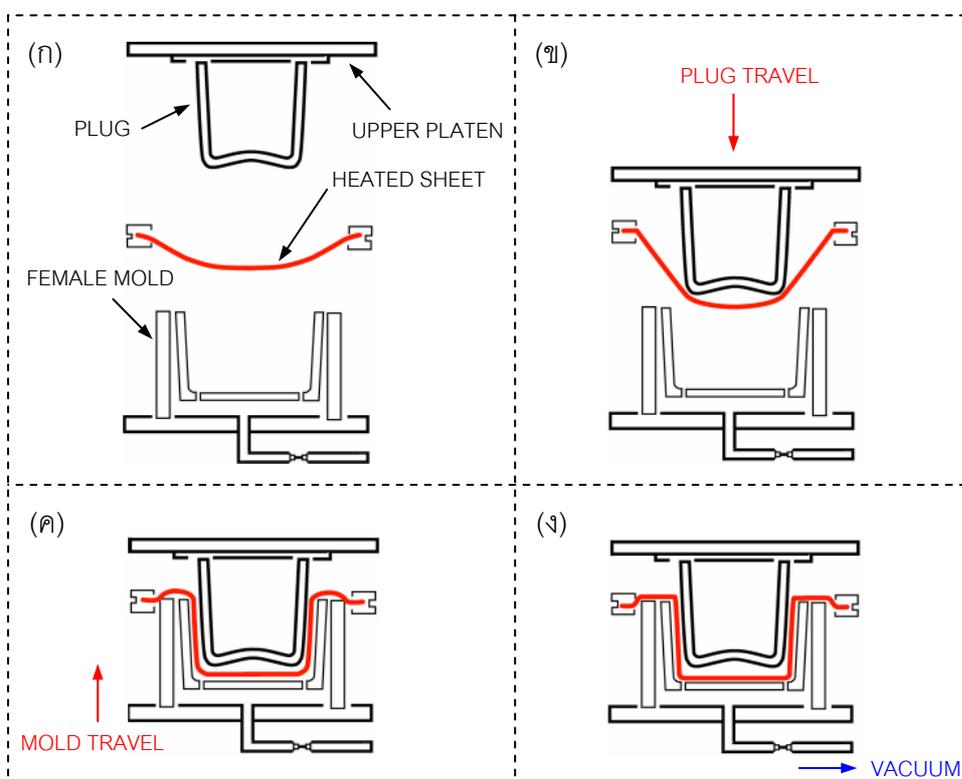


ภาพที่ 6 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์คู่

6. แบบหัวอัดช่วยก่อนใช้แรงสุญญากาศ (Plug-Assist Vacuum Forming)

เนื่องด้วยข้อจำกัดการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความลึก แรงดูดจากสุญญากาศอาจไม่เพียงพอที่ทำให้แผ่นพลาสติกแนบติดกับแม่พิมพ์ จึงนำหัวอัด (Plug) มาช่วย โดยหัวอัดมีขนาดประมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรภายในของแม่พิมพ์ตัวเมีย หลักการขึ้นรูป ใช้หัวอัดเคลื่อนลงมาอัดแผ่นพลาสติกให้ยืดตัวภายในแม่พิมพ์ (Pre-stretching) จากนั้นใช้แรงดูดจากสุญญากาศดูดให้แผ่นพลาสติกแนบติดกับแบบ ชิ้นงานสามารถถอดออกโดยใช้แรงดันลม ขั้นตอนการขึ้นรูปสรุปได้ดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 7ก)
2. เคลื่อนหัวอัดลงมาอัดแผ่นพลาสติก ให้แผ่นพลาสติกยืดตัว (ภาพที่ 7ข)
3. เคลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นจนถึง แผ่นพลาสติก (ภาพที่ 7ค)
4. ใช้แรงดูดจากสุญญากาศ ดึงแผ่นพลาสติกมาแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 7ง)

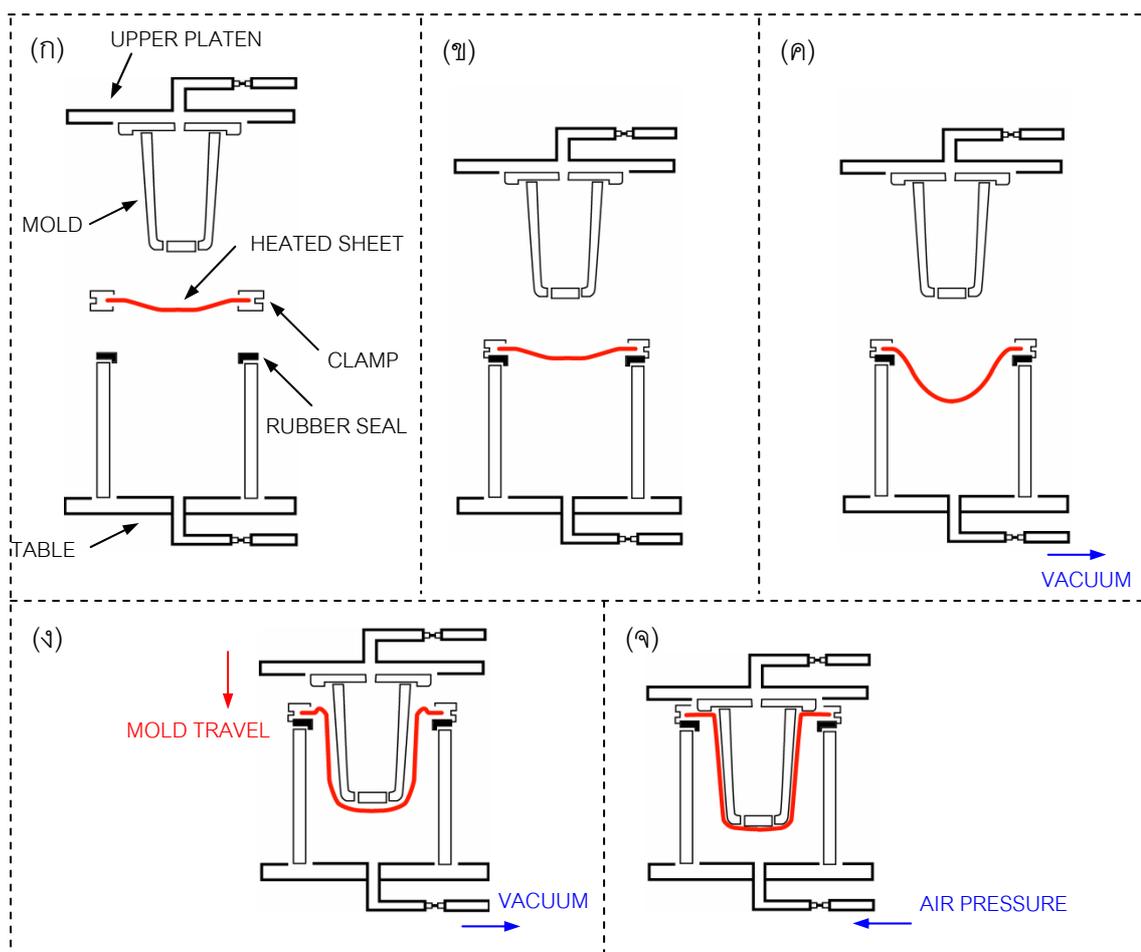


ภาพที่ 7 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้หัวอัดช่วยก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ

7. แบบแรงสุญญากาศแล้วอัดสวนด้วยแรงลม (Vacuum Snap-Back Forming)

การขึ้นรูปแบบนี้ เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความลึก และต้องการควบคุมความหนาของชิ้นงาน โดยยืดแผ่นพลาสติก โดยใช้แรงดูดจากสุญญากาศ แล้วใช้แรงดันลมอัดสวนทาง (Snap-Back) ทำให้แผ่นพลาสติกถูกแรงดันลมอัดไปประกบกับแม่พิมพ์ที่อยู่ด้านบน ขั้นตอนการขึ้นรูปสรุปดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 8ก และ 8ข)
2. ใช้แรงดูดจากสุญญากาศ ยืดแผ่นพลาสติกออก (ภาพที่ 8ค)
3. ปิดเครื่องทำความร้อน เลื่อนแม่พิมพ์ลงมาที่ แผ่นพลาสติก (ภาพที่ 8ง)
4. ใช้แรงดันลม อัดแผ่นพลาสติกให้แนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 8จ)



ภาพที่ 8 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยวิธี Vacuum Snap-Back Forming

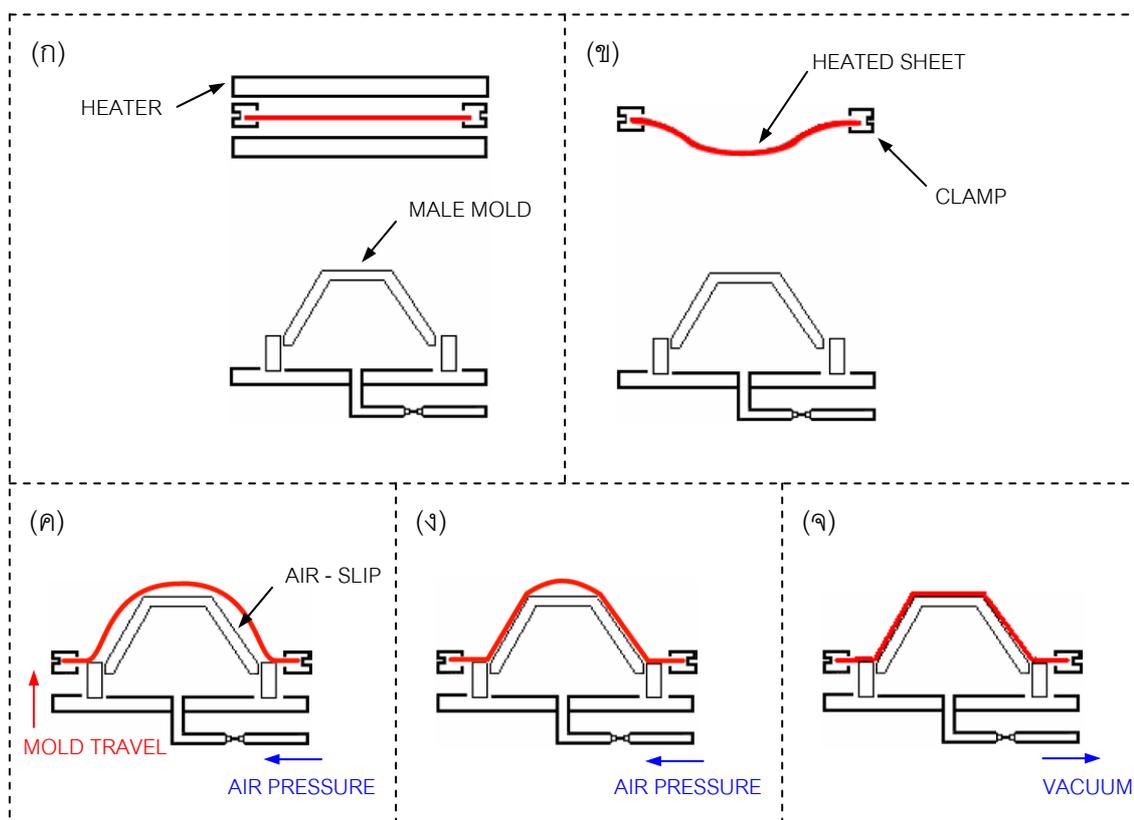
8. แบบ Vacuum Air-Slip Forming

การขึ้นรูปแบบ Vacuum Air-Slip Forming มีลักษณะคล้ายการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตันแล้วใช้แรงดูดจากสุญญากาศ (Vacuum Drape Forming) ความแตกต่าง คือ ขณะที่แม่พิมพ์เคลื่อนที่ จะมีการเป่าลมเข้าไปบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นพลาสติกกับแม่พิมพ์ ทำให้แผ่นพลาสติกพองตัวออกเป็นถุงอากาศ (Air-Slip) การขึ้นรูปวิธีนี้ ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการสัมผัสกันของแผ่นพลาสติกกับแม่พิมพ์ ขั้นตอนการขึ้นรูปสรุปดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 9ก และ 9ข)
2. เคลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นช้า ๆ พร้อมกับเป่าลม จนแม่พิมพ์ถึง แผ่นพลาสติก

(ภาพที่ 9ค และ 9ง)

3. ใช้แรงดูดจากสุญญากาศ ดึงแผ่นพลาสติกมาแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 9จ)

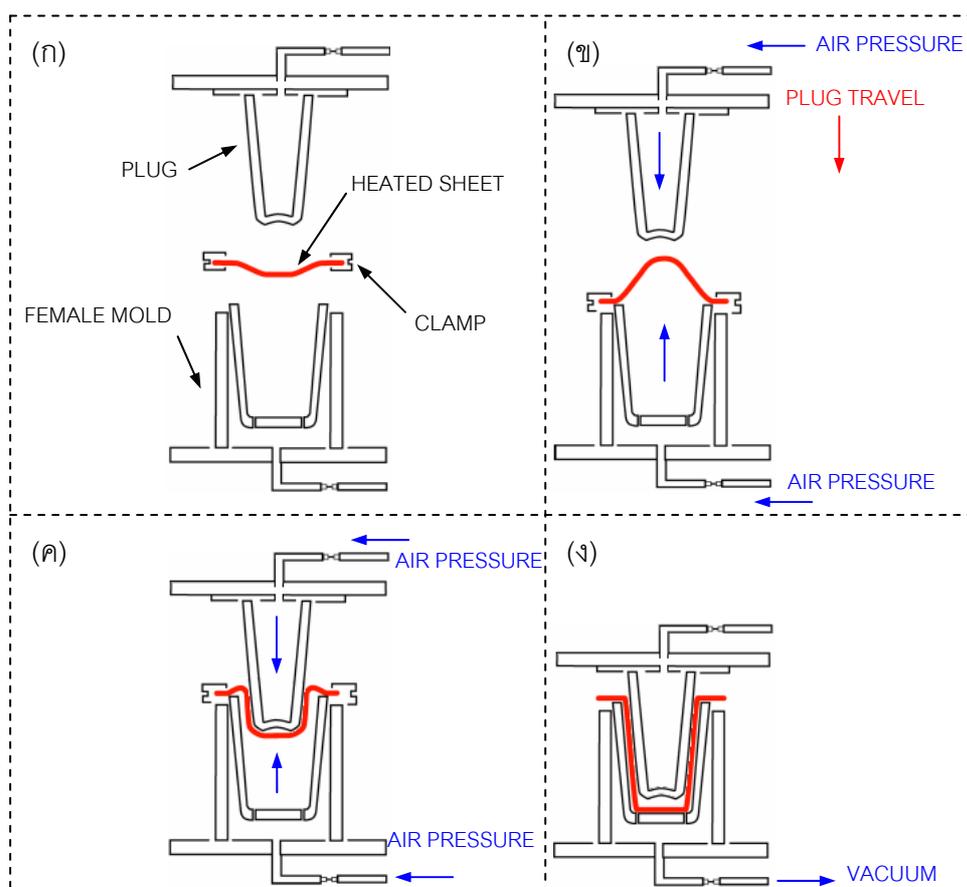


ภาพที่ 9 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโดยวิธี Vacuum Air-Slip Forming

9. แบบ Air-Cushioning Vacuum Forming

การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ เป็นการนำหัวอัด (Plug) มาประยุกต์เข้ากับ การขึ้นรูปแบบ Vacuum Air-Slip Forming โดยหัวอัดถูกออกแบบให้สามารถเป่าลม ในขณะที่กำลังกดอัด หลักการทำงานของวิธีนี้ คือ ใช้แรงดันลมเป่าในทิศทางสวนทางกัน คือที่หัวอัดมีการเป่าลมในทิศพุ่งลง และที่แม่พิมพ์มีการเป่าลมในทิศพุ่งขึ้น การเป่าลมลักษณะนี้ ทำให้แผ่นพลาสติกเกิดการยืดหยุ่นตัวสูงมาก ทำให้สามารถควบคุมความหนาได้ดี ขั้นตอนการขึ้นรูปมีดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว (ภาพที่ 10ก)
2. เคลื่อนหัวอัดลงมาพร้อมกับเป่าลมในทิศพุ่งลง (ภาพที่ 10ข และ 10ค)
3. หยุดเป่าลมจากหัวอัด และใช้แรงดูดจากสุญญากาศดึงแผ่นพลาสติกมาแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 10ง)

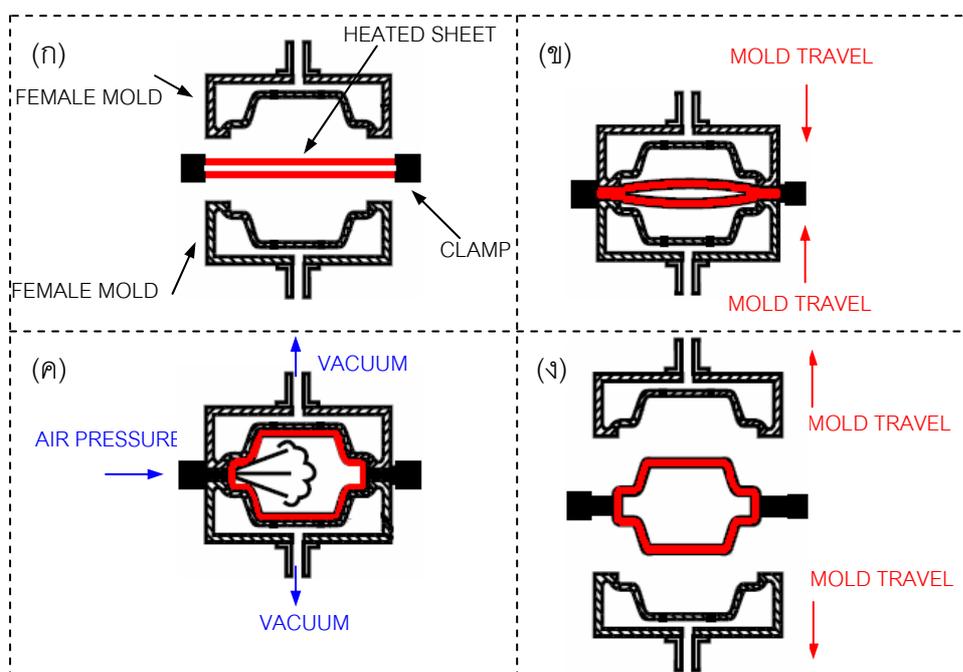


ภาพที่ 10 แสดงการขึ้นรูปโดยวิธี Air-Cushioning Vacuum Forming

10. วิธีแผ่นพลาสติกคู่ (Twin – Sheet Thermoforming)

การขึ้นรูปแบบแผ่นพลาสติกคู่ เป็นวิธีการขึ้นรูปที่ใช้สำหรับขึ้นงานที่ต้องการความคงทนแข็งแรง และน้ำหนักเบา เช่นอุปกรณ์กันกระแทก ถึงบรรจุเชื้อเพลิง และท่อลม เป็นต้น โดยการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกคู่ได้กลายเป็นทางเลือก ของการขึ้นรูปแบบเป่า (Blow molding) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเหนียว หลักการขึ้นรูป คือ ให้แผ่นพลาสติกทั้งสองแผ่นอยู่ระหว่าง แม่พิมพ์ ตัวเมีย สองตัว (บน และ ล่าง) นำแม่พิมพ์ทั้งสองประกบกัน แล้วใช้แรงดันลมเป่าลมไปที่ช่องว่างระหว่างแผ่นพลาสติก ใช้แรงดูดจากสุญญากาศดูดแผ่นพลาสติกมาแนบติดกับแม่พิมพ์ ขั้นตอนการขึ้นรูปสรุปได้ดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว
2. วางแผ่นพลาสติกทั้งสองแผ่น อยู่ระหว่างแม่พิมพ์ (ภาพที่ 11ก)
3. เลื่อนแม่พิมพ์ทั้งสอง มาประกบติดกัน (ภาพที่ 11ข)
4. ใช้แรงดันลมช่วยเป่าภายในแม่พิมพ์ และแรงดูดจากสุญญากาศดูดให้ แผ่นพลาสติกแนบติดกับแม่พิมพ์ (ภาพที่ 11ค)
5. ถอดแม่พิมพ์ออก (ภาพที่ 11ง)



ภาพที่ 11 แสดงการขึ้นรูปวิธีแผ่นพลาสติกคู่

4. พลาสติกสำหรับกรรมวิธีขึ้นรูปร้อน

4.1 โพลีเอททิลีน เทเรฟทาเลต

โพลีเอททิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) หรือ PET หรือ PETE โดยทั่วไปนิยมเรียกว่า PET (เพท) เป็นพลาสติกที่มีความใส สามารถมองเห็นได้ มีความเหนียว แข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก น้ำหนักเบา ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี มีจุดหลอมเหลวในช่วง 250°C ถึง 260°C ความหนาแน่นในช่วง 1.38 ถึง 1.39 gm/cm^3 โดย PET เป็นได้ทั้งพลาสติกแข็ง (Rigid) หรือกึ่งแข็ง (semi-rigid) นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำปลา ขวดน้ำมันพืช และภาชนะบรรจุอาหาร เป็นต้น

4.2 โพลีโพรพิลีน

โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) หรือ PP เป็นพลาสติกที่มีสีขาวนวลและกึ่งโปร่งแสง มีความแข็งและเหนียว คงขนาดรูปร่างได้ดี ทนต่อความร้อนและสารเคมี ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้ดี มีจุดหลอมเหลวในช่วง 160°C ถึง 170°C ความหนาแน่นในช่วง 0.90 ถึง 0.91 gm/cm^3 อุณหภูมิการใช้งานประมาณ -20°C ถึง 200°C นิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถูกร้อนชนิดใส กล่องบรรจุอาหาร ขวดน้ำดื่ม ถ้วยโยเกิร์ต ชิ้นส่วนรถยนต์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด เป็นต้น

4.3 โพลีสไตรีน

โพลีสไตรีน (Polystyrene) หรือ PS เป็นพลาสติกแข็งแต่เปราะ มีลักษณะโปร่งใสคงรูปร่างได้ดี ทนต่อกรดและด่าง การหดตัวภายในแม่พิมพ์ต่ำ เป็นฉนวนป้องกันไฟฟ้าที่ดี มีคุณลักษณะการขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยกรรมวิธีต่างๆ เช่น การดันขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูป การเป่าขึ้นรูป และการขึ้นรูปร้อน มีจุดหลอมเหลวในช่วง 70°C ถึง 115°C ความหนาแน่นในช่วง 0.90 ถึง 0.91 gm/cm^3 อุณหภูมิการใช้งานประมาณ -80°C ถึง 175°C นิยมใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร เช่น ถาดหลุมสำหรับรองขนมปังกรอบ ถ้วย หรือแก้วน้ำ สำหรับการใช้ครั้งเดียว กล่องโฟม กล่องไอศกรีม บรรจุภัณฑ์หุ้ม และอุปกรณ์ไฟฟ้า (เช่น mouse) เป็นต้น

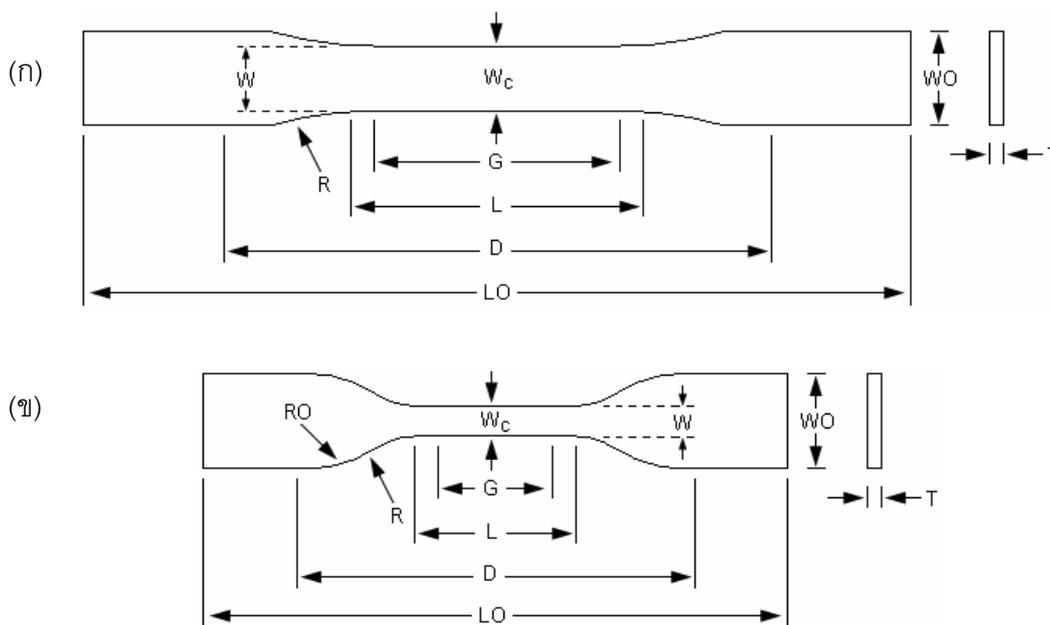
5. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก

การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ได้ขนาด น้ำหนัก และความแข็งแรง ตรงตามความต้องการนั้น สมบัติทางกลของพลาสติกที่ถูกต้อง จะช่วยให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น สมบัติทางกลของพลาสติก สามารถทำการทดสอบ โดยวิธีการทดสอบการดึง (Tensile Testing) ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM D 638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics ซึ่งใช้สำหรับวัสดุพลาสติก การทดสอบนี้ ใช้หาค่า Tensile Modulus, Tensile Strength, Tensile Elongation และ Poisson's ratio พลาสติกที่ใช้ทดสอบมีรูปร่างแบบ ดรัมเบล (dumbbell) มีความหนา น้อยกว่า 14 mm (0.55 นิ้ว) โดยขนาดของชิ้นงานทดสอบแบ่ง ออกเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะความแข็งแรงของพลาสติกดังนี้

1. Rigid and Semirigid Plastics ขนาดของชิ้นงานทดสอบสำหรับ พลาสติกที่แข็งแรง และกึ่งแข็ง มี 4 แบบ จำแนกตามความหนาของชิ้นงานทดสอบ ดังนี้
 - แบบที่ 1 (Type I) สำหรับ ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 7 mm หรือ น้อยกว่า
 - แบบที่ 2 (Type II) สำหรับ วัสดุที่มีตำแหน่งรอยขาดไม่อยู่บริเวณช่วงแคบ ของชิ้นงาน
 - แบบที่ 3 (Type III) สำหรับ ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา มากกว่า 7 mm แต่ น้อยกว่า 14 mm
 - แบบที่ 5 (Type V) สำหรับ ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 4 mm หรือ น้อยกว่า
2. Nonrigid Plastics ขนาดของชิ้นงานทดสอบสำหรับ พลาสติกที่อ่อนตัว มี 2 แบบ จำแนกตามความหนาของชิ้นงานทดสอบ ดังนี้
 - แบบที่ 3 (Type III) สำหรับ ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา มากกว่า 7 mm แต่ น้อยกว่า 14 mm สามารถใช้ได้ทั้งพลาสติกอ่อน และแข็ง
 - แบบที่ 4 (Type IV) สำหรับ ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 4 mm หรือ น้อยกว่า

รายละเอียด ขนาดของชิ้นงานทดสอบทั้ง 5 แบบ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 12 และตารางที่ 1 จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่า 5 ชิ้น ระยะเวลาจับต้องนำชิ้นทดสอบประกอบ เข้ากับหัวจับให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ทำการทดสอบโดยการดึงชิ้นงานทดสอบให้ยืด ออกจนขาด โดยกำหนดความเร็วขณะดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 638 เท่ากับ 5 mm/min

อุณหภูมิห้องทดสอบ เท่ากับ $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ $50\% \pm 5\%$ ทำการบันทึกค่าความเค้น (Stress, σ) และการยืดตัว (Elongation, δ) เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่ายังโมดูลัส (หรือค่า Modulus of Elasticity, E)



ภาพที่ 12 (ก) ภาพชิ้นงานทดสอบขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ แบบ 1, 2, 3 และ 5
(ข) ภาพชิ้นงานทดสอบขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ แบบ 4

ตารางที่ 1 แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638

Dimension (mm)	7 mm or under		over 7 to 14	4 mm or under		Tolerances (mm)
	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V	
W – Width of narrow section	13	6	19	6	3.18	± 0.5
L – Length of narrow section	57	57	57	33	9.53	± 0.5
WO – Width overall, mm	19	19	29	19	9.53	+ 3.18
LO – Length overall, mm	165	183	246	115	63.5	no max
G – Gage length	50	50	50	25	7.62	± 0.13
D – Distance between grips	115	135	115	65	25.4	± 5
R – Radius of fillet	76	76	76	14	12.7	± 1
RO – Outer radius (Type IV)	-	-	-	25	-	± 1

6. มาตรฐานการทดสอบบรรจุภัณฑ์

การทดสอบความคงทนของบรรจุภัณฑ์ มีมาตรฐานการทดสอบหลายมาตรฐาน ซึ่งแต่ละมาตรฐานมีวิธีการทดสอบคล้ายกัน โดยมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือมาตรฐาน International Standard Organization (ISO) วิธีการทดสอบความคงทนของบรรจุภัณฑ์ประกอบด้วย การทดสอบการวางซ้อน (Stacking tests) จาก static load ตามเงื่อนไขทิศทางการวางบรรจุภัณฑ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 การทดสอบการวางซ้อน

การทดสอบการวางซ้อน (Stacking tests) เป็นการทดสอบภาระด้านบน (Top Load Test) เป็นวิธีการตรวจสอบความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ และป้องกันความเสียหายของสินค้าภายใน จึงเปรียบเสมือนการนำบรรจุภัณฑ์มาวางซ้อนกันในการขนส่งสินค้า หรือการเก็บเข้าโกดังสินค้า วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2234:2000 Packaging -- Complete, filled transport packages and unit loads -- Stacking tests using a static load ให้นำบรรจุภัณฑ์วางบนแผ่นเรียบ (flat) ซึ่งขนานกับแนวราบ วางแผ่นรองน้ำหนัก (Loading platform) บนด้านบนของบรรจุภัณฑ์ และวางน้ำหนักทดสอบลงซ้ำ ๆ ที่ด้านบนของแผ่นรองน้ำหนักเพื่อหลีกเลี่ยงแรงกระแทก (Impact force) โดยน้ำหนักรวมไม่เกิน 2 % ของน้ำหนักที่กำหนด (7.6 N ถึง 37.2 N หรือ 0.8 kg ถึง 3.8 kg) และระยะจุดศูนย์ถ่วง (center of gravity) ของน้ำหนักทดสอบไม่เกิน 50 % ของความสูงของบรรจุภัณฑ์ น้ำหนักทดสอบใช้เป็นแผ่นโลหะ มาตรฐานนี้กำหนดวิธีการวางน้ำหนักทดสอบ 3 วิธีดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ใช้บรรจุภัณฑ์วางซ้อนกัน แทนการวางน้ำหนักทดสอบ โดยจำนวนที่ใช้ขึ้นกับน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์รวมให้สอดคล้องกับน้ำหนักที่กำหนด
2. วางแผ่นรองน้ำหนัก และน้ำหนักทดสอบ ในลักษณะที่ทำให้บรรจุภัณฑ์อยู่ในตำแหน่งสมดุล
3. วางแผ่นรองน้ำหนัก และน้ำหนักทดสอบ ให้ขนานกับแนวราบ

การวางน้ำหนักทดสอบทั้ง 3 วิธี ให้เลือกวิธีใดวิธีหนึ่งที่เหมาะสม และสามารถวัดระยะยุบได้ โดยการวัดระยะยุบจาก ขอบฐาน (ส่วนที่ติดพื้น = 0 mm) ถึง ขอบบนของบรรจุภัณฑ์ ในขณะที่ทดสอบ

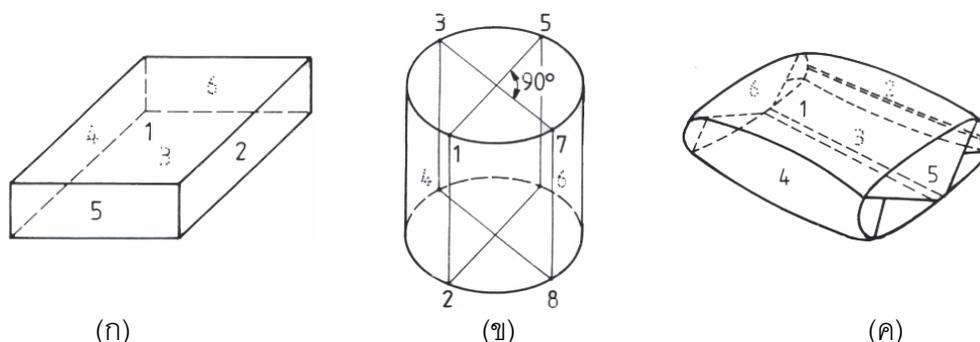
6.2 การระบุตำแหน่งวางบรรจุภัณฑ์ทดสอบ

มาตรฐาน ISO 2206:1987 Packaging -- Complete, filled transport packages - Identification of parts when testing มีการระบุตำแหน่งการวางบรรจุภัณฑ์ โดยกำหนดตัวเลข 1 ถึง 6 เพื่อใช้เรียกชื่อผนังหรือด้านขณะทำการทดสอบ โดยได้แบ่งบรรจุภัณฑ์ ตามลักษณะโครงสร้างออกเป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้

1. บรรจุภัณฑ์ รูปกล่องเหลี่ยม (ภาพที่ 13ก) ให้วางในตำแหน่งที่วางขณะขนส่ง ถ้าไม่ทราบให้นำด้านที่มีรอยต่อวางในตำแหน่งขวามือของผู้สังเกต ถ้าไม่มีรอยต่อให้เลือกตำแหน่งที่มีจุดสังเกตแล้วทำการกำหนดหมายเลขของด้าน คือด้านบนให้เป็นเบอร์ 1 ด้านที่อยู่ใกล้ผู้สังเกต ให้เป็น เบอร์ 5 ด้านขวาเป็นเบอร์ 2 ด้านล่างเป็นเบอร์ 3 ด้านซ้ายเป็นเบอร์ 4 และด้านที่อยู่ไกลเป็นเบอร์ 6

2. บรรจุภัณฑ์ รูปทรงกระบอก (ภาพที่ 13ข) แบ่งเป็น ผิววงกลมด้านบน และวงกลมด้านล่าง โดยวงกลมด้านบนกำหนดด้วยหมายเลข 1-3-5-7 และด้านล่างกำหนดด้วยหมายเลข 2-4-6-8 โดยจุด 1 และ 2 โยงกันด้วยเส้นขนานกับเส้นแกนกลางของกระบอกและจุดอื่น ๆ ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 13ข

3. บรรจุภัณฑ์ รูปถุงและกระสอบ (ภาพที่ 13ค) ให้วางนอนบนพื้นราบและวางในตำแหน่งที่ด้านปิดผนึก (Seal) หันมาทางผู้สังเกต ให้ด้านที่หันมาทางผู้สังเกตเป็นด้านเบอร์ 5 แล้วด้านบนกำหนดเป็นเบอร์ 1 ด้านขวาเป็นเบอร์ 2 ด้านล่างเป็นเบอร์ 3 ด้านซ้ายเป็นเบอร์ 4 และด้านไกลสุด (ด้านหลัง) เป็นเบอร์ 6



ภาพที่ 13 แสดงการกำหนดหมายเลขของด้านต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์แบบ ก) รูปกล่องเหลี่ยม ข) รูปทรงกระบอก และ ค) รูปถุงหรือกระสอบ

7. คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ และคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม

CAD (Computer-Aided Design) คือ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ ช่วยให้ผู้ใช้เกิดความสะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ 3 มิติ ที่เป็นลักษณะรูปโครงลวด (wire frame model) รูปแผ่นผิว (surface model) และรูปวัตถุแข็ง หรือโซลิตโมเดล (solid model) โซลิตโมเดลเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยี ที่สร้างรูปทรง 3 มิติ โดยใช้หลักการนำแผ่นผิวหลายแผ่นต่อขอบติดกันสนิท หรือเป็นผิวต่อเนื่องรวมกันเป็นผิวขอบเขต (Boundary surface) ปัจจุบัน โซลิตโมเดลเทคโนโลยี สร้างรูปทรง 3 มิติ ขึ้นก่อนแล้วจึงนำไปกำหนดเป็นภาพวาดแบบ 2 มิติพร้อมขนาด (Detail Drawing) ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาโดยใช้โซลิตโมเดลสามารถรับ หรือส่งไฟล์ (data file transfer) เพื่อใช้กับซอฟต์แวร์ CAD อื่น ๆ รวมถึงสามารถแปลง หรือเขียนเป็นไฟล์รหัสมาตรฐาน (standard CAD-data exchange file format) ไปใช้งานต่อในซอฟต์แวร์ CAM (Computer-Aided Manufacturing) และ CAE (Computer-Aided Engineering) ได้โดยไม่ต้องสร้างแบบขึ้นใหม่ (สัจจาทิพย์, 2545)

CAE คือ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม หรือช่วยคำนวณทางวิศวกรรม เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์การทำงาน หรือจำลอง (Simulation) การใช้งานในสภาวะต่าง ๆ ที่ต้องการ โดยทั่วไป ศาสตร์ที่ใช้คำนวณ คือ ศาสตร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis หรือ FEA) ซอฟต์แวร์ CAE สามารถแบ่งตามสายงาน หรือกลุ่มงานได้ 2 กลุ่ม คือ (สัจจาทิพย์, 2545)

1. การวิเคราะห์เพื่อช่วยการออกแบบ

ซอฟต์แวร์ CAE ประเภทนี้ ช่วยในส่วนของกำหนัดขนาดของชิ้นงาน เช่น ความหนาของผนัง ให้เหมาะสมต่อสภาพ หรือเงื่อนไขการนำไปใช้งาน โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดน้ำหนัก และขนาดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างการวิเคราะห์ ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าความเค้นในวัสดุ และการยึดหรือยุบตัวของวัสดุ

2. การวิเคราะห์เพื่อช่วยกระบวนการผลิต

ซอฟต์แวร์ CAE ประเภทนี้ ใช้จำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตที่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย หรือชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ ซอฟต์แวร์ประเภทนี้ เน้นการปรับปรุงเพื่อเพิ่มผลผลิตในกระบวนการผลิตต่าง ๆ แต่ไม่ครอบคลุมซอฟต์แวร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตที่ใช้เครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control) เนื่องจากได้จัดอยู่ในกลุ่มของซอฟต์แวร์ CAM ซึ่งไม่ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และทางไฟไนต์เอลิเมนต์

8. การจำลองการทดสอบโดยใช้ FEA

ชาคริต (2546) จำลองโมเดลขวดบรรจุน้ำมันเครื่องขนาด 0.5 ลิตร และ 1 ลิตร ถึง 6 ลิตร ด้วย CAD แล้วจำลองการทดสอบขวดบรรจุน้ำมันเครื่องภายใต้ภาระด้านบน (Top Load) แรงดันภายใน (Internal Pressure) และการปล่อยตก (Drop Test) โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEA (MSC.NASTRAN for Window) เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับทดสอบจริง โดยได้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.9% ถึง 12.3% (ที่ค่ามาตรฐานทดสอบ) การทดสอบ FEA ของการจำลองขวดแบบเต็มใบและครึ่งใบพบว่า ค่าความเค้น และระยะยุบไม่แตกต่างกัน ผลการจำลองขวดที่เอลิเมนต์ไม่เท่ากัน พบว่าแบบจำลองที่มีจำนวนเอลิเมนต์มาก ผลการวิเคราะห์ FEA แสดงระยะยืดมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกล แต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์มากกว่าแบบจำลองที่มีจำนวนเอลิเมนต์น้อย

ทิพากร (2548) จำลองขวดพลาสติกบรรจุของเหลวรูปทรงพื้นฐาน และขวดพลาสติกที่มีร่องลายแบบต่าง ๆ ของผนังขวด ด้วย CAD แล้วจำลองการทดสอบขวดพลาสติกบรรจุของเหลวภายใต้ภาระด้านบน และแรงดันภายใน โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEA (MSC.NASTRAN for Window) ทำการวิเคราะห์การยุบตัว ค่าความเค้น และประสิทธิภาพของขวดพลาสติกโดยทดสอบที่ภาระ

400 N ถึง 1200 N และแรงดัน 25 KPa (กิโลปาสคาล) ถึง 300 KPa เพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการวิเคราะห์ความแข็งแรงของภาชนะรูปทรงขวด

สัจจาทิพย์และชาคริต (2547) จำลองกระป๋องน้ำมันเครื่องขนาด 300 กรัม 310 กรัม 320 กรัม และ 330 กรัม ด้วย CAD แล้วจำลองการทดสอบกระป๋องพลาสติกบรรจุของเหลวภายใต้ภาระด้านบน โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEA (MSC.NASTRAN for Window) ทำการวิเคราะห์การยุบตัวของกระป๋องโดยทดสอบที่ภาระ 11.0 กิโลกรัม ถึง 32.9 กิโลกรัม แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ -12.38% สำหรับกระป๋องน้ำมันเครื่องแบบ 2 หู และ -10.79% สำหรับกระป๋องแบบไม่มีหู

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางกล

1.1 บรรจุภัณฑ์ประเภทภาชนะบรรจุอาหาร แบบ A ทำจากพลาสติก โพลีสไตรีน (PS) (ภาพที่ 1ก) ขนาด 124.5 x 124.5 x 28.5 mm หนา 0.2 mm (± 0.03 mm) และหนัก 4.72 gm จำนวน 25 ชิ้น มีจำหน่ายที่ ร้าน ยี่เจียเฮง

1.2 บรรจุภัณฑ์ประเภทภาชนะบรรจุอาหาร แบบ B ทำจากพลาสติก โพลีสไตรีน (PS) (ภาพที่ 1ข) ขนาด 139 x 68 x 33 mm หนา 0.2 mm (± 0.03 mm) และหนัก 3.73 gm จำนวน 25 ชิ้น มีจำหน่ายที่ ร้าน ยี่เจียเฮง

โดยชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 แบบเป็นบรรจุภัณฑ์ ที่โปร่งใส ผิวเรียบทุกด้าน และใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร ซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั่วไป ภาพวาดรายละเอียดของรูปทรงชิ้นงานได้แสดงใน ภาพภาคผนวก 1



(ก) บรรจุภัณฑ์ แบบ A

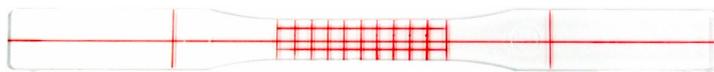


(ข) บรรจุภัณฑ์ แบบ B

ภาพที่ 14 บรรจุภัณฑ์ประเภทภาชนะบรรจุอาหาร ก) แบบ A และ ข) แบบ B

2. ชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุโพลีสไตรีน (Polystyrene หรือ PS) จากบริษัท ทีพีโอ โพลีน จำกัด (มหาชน) สำหรับทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ FEA โดยมีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM D 638-03 แบบที่ 1 (Type I) ตามแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

3. อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

1. เครื่องทดสอบการดึง รุ่น H50KS ผลิตโดยบริษัท HOUNSFIELD ประเทศ อังกฤษ (ภาพที่ 16) ทำงานด้วยระบบ Ball Screw พร้อมคอมพิวเตอรืสำหรับจัดเก็บและประมวลผล คุณลักษณะของเครื่องได้แสดงในภาคผนวกที่ 1 เครื่องทดสอบนี้เป็นของห้องปฏิบัติการวิศวกรรม วัสดุ | อาจารย์วิศวกรรมศาสตร์ 60 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
2. เวอร์เนียวัดขนาดชิ้นทดสอบ (บริษัท Mitutoyo รุ่น Digimatic Caliper) ความละเอียด ± 0.01 mm (ภาพที่ 17)
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก แบบดิจิตอล (บริษัท Precisa ประเทศฝรั่งเศส รุ่น 500M – 2000C) ความละเอียด ± 0.01 กรัม (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 16 เครื่องทดสอบการดึง (Tensile Testing Machine)

4. อุปกรณ์ทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์

1. แผ่นน้ำหนัก ทำจากแผ่นเหล็ก (Steel plate) ฟันสีกันสนิม ความกว้าง 130 mm ยาว 130 mm และหนา 3 mm (ภาพที่ 19) จำนวน 10 แผ่น น้ำหนักแผ่นละ 400 ± 20 gm
2. แผ่นรองสำหรับใช้เป็นแผ่นรองน้ำหนัก (loading support) ทำจากพลาสติก มี alignment wall ที่ 2 มม สำหรับ alignment แผ่นน้ำหนักให้อยู่ในแนวเดียวกัน น้ำหนักของแผ่นรองเท่ากับ 92 gm (ภาพที่ 20)
3. เวอร์เนียวัดความสูง (Vernier Height Gages) บริษัท Aerospace รุ่น HJ-02 ความละเอียด ± 0.02 mm (ภาพที่ 21)



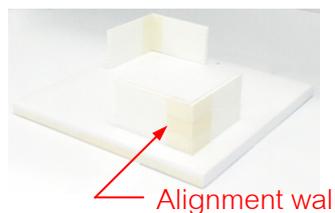
ภาพที่ 17 เวอร์เนียวัดขนาด



ภาพที่ 18 เครื่องชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 19 แผ่นน้ำหนัก



ภาพที่ 20 แผ่นรอง หรือแผ่นรองน้ำหนัก



ภาพที่ 21 เวอร์เนียวัดความสูง

5. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ CAD/CAE

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Pentium IV 1.8 GHz หน่วยความจำ DDRAM 256 MB Hard Disk 40 GB การ์ดแสดงผลหน่วยความจำวีดีโอ 64 MB จอภาพขนาด 17 นิ้ว
2. เครื่องพิมพ์ชนิด Inkjet
3. ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER ของบริษัท Parametric Technology Corporation, USA
4. ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.Patran 2005 และ MSC.Nastran 2005 ของบริษัท MSC Software Corporation, USA
5. ซอฟต์แวร์ MATLAB ของบริษัท Mathworks สำหรับประมวลผลทางสถิติ และพล็อตกราฟเส้น

การดำเนินการวิเคราะห์นี้ ใช้สถานที่ และอุปกรณ์ของ หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (Mechanical and Product Design Research Laboratory หรือ MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

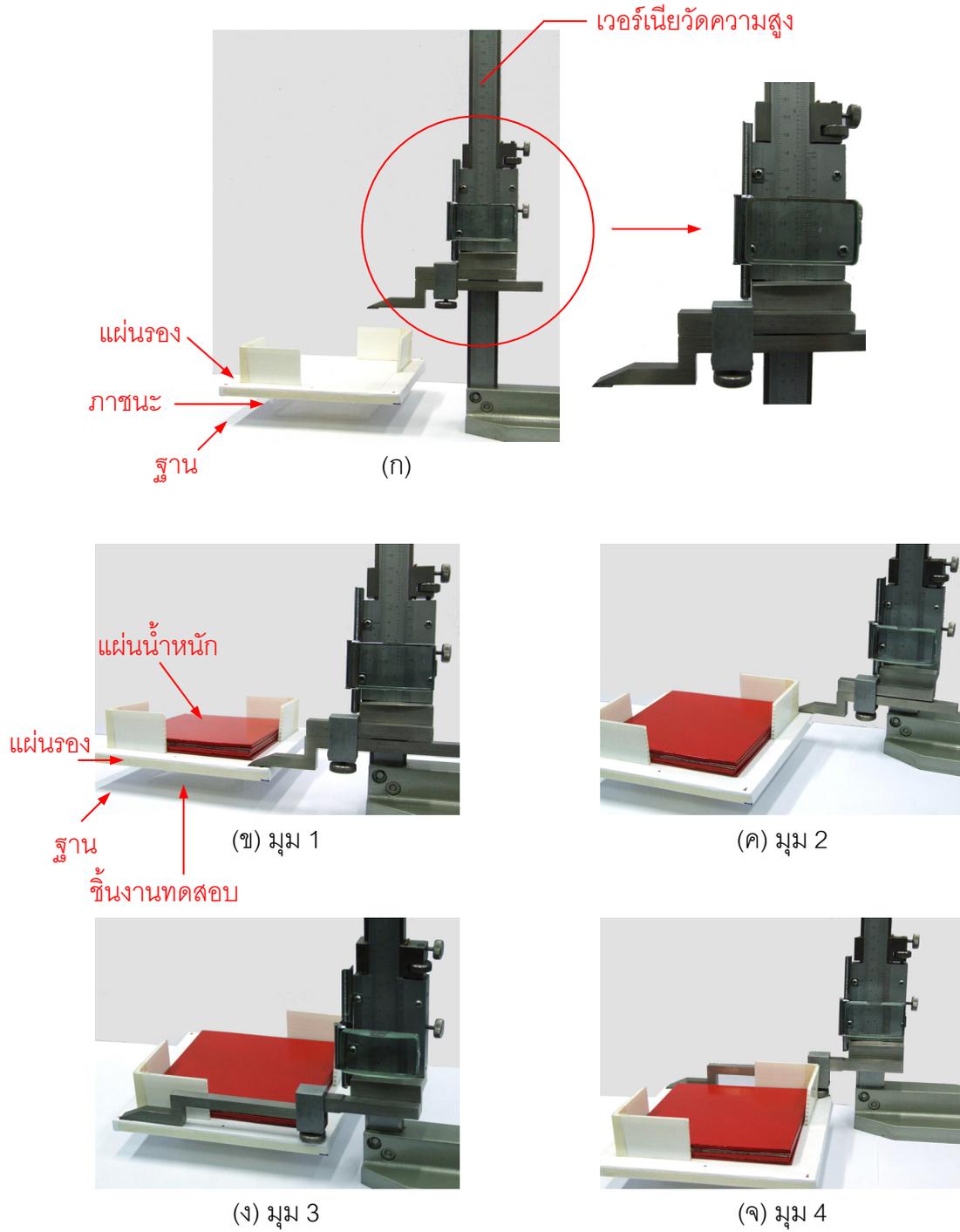
วิธีการ

1. วิธีการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์

การทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าระยะยุบตัวตามแนวแกนความสูง (δ_z) โดยใช้น้ำหนักจากแผ่นน้ำหนักวางซ้อนทับบนบรรจุภัณฑ์ ที่น้ำหนักต่าง ๆ (ตั้งแต่ 0.8 ถึง 3.8 กิโลกรัม) ตามมาตรฐานทดสอบ ISO 2234:2000 บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบมี 2 รูปแบบ คือแบบ A และ B จำนวนบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบไม่น้อยกว่า 5 ชิ้น ต่อ 1 แรง ผลที่วัดได้จากการทดสอบมาใช้อ้างอิง และเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ CAE

วิธีการ และเงื่อนไขการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

- 1.1 นำบรรจุภัณฑ์ มาวางบนฐาน (platform) ที่มีความเรียบสม่ำเสมอ
- 1.2 วัดความสูงของบรรจุภัณฑ์
- 1.3 นำแผ่นรองมาวางบนบรรจุภัณฑ์ (ภาพที่ 22ก)
- 1.4 นำแผ่นน้ำหนัก (หรือ โหลด) มาวางลงบนแผ่นรอง โดยวางแผ่นน้ำหนักทีละ 1 แผ่น และวางลงอย่างเบา ๆ เพื่อไม่ให้เกิดแรงกระแทก (Impact Force) ทำการวางจนครบตามน้ำหนักที่ต้องการ
- 1.5 วัดความสูงที่ผิวบนของแผ่นรองทั้ง 4 มุม โดยใช้เวอร์เนียวัดความสูง (ภาพที่ 22ข ถึง 22จ)
- 1.6 บันทึกค่าความสูง แล้วใช้ MATLAB แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความสูง (หรือ ระยะยุบ) ของค่าเฉลี่ยทั้ง 4 มุม กับน้ำหนัก



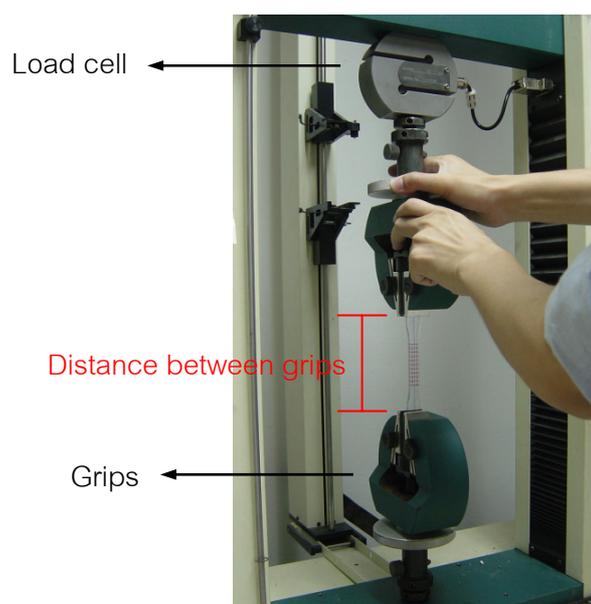
ภาพที่ 22 แสดงการวัดระยะความสูงที่ตำแหน่งมุม 1 ถึง มุม 4

2. วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานทดสอบ (ภาพที่ 15) ไปติดตั้งด้วยเครื่องทดสอบการดึง โดยระยะห่างระหว่างหัวจับ (Distance between grips) เท่ากับ 115 mm และความเร็วในการดึงเท่ากับ 5 mm/min เริ่มต้นจากแรงดึงเท่ากับ ศูนย์ นิวตัน (N) ไปจนถึงทดสอบขาด (ภาพที่ 23) บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (Force, F) กับระยะยืดตัว (Extension, δ)

2. ทำการทดสอบตามข้อที่ 1 จนครบ 5 ชิ้นทดสอบ



ภาพที่ 23 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบบนเครื่องทดสอบการดึง

3. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานทดสอบ เป็นค่าระหว่าง ระยะยืด (Extension, mm) กับ แรง (Force, N) จากข้อมูลดังกล่าว ต้องทำการแปลง ระยะยืดให้เป็นความเครียด (Strain) และ แรงให้เป็นค่าความเค้น (Stress, MPa) โดยความเครียด (ϵ) คำนวณได้จาก

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{\text{Extension}}{L} \quad (1)$$

โดย δ คือ ระยะยืด (Extension) ที่วัดได้จากการดึงขึ้นงานทดสอบ
 L คือ ระยะห่างระหว่างหัวจับ (Distance between grip) มีค่าเท่ากับ 115 mm

ค่าความเค้น (σ) คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{T \cdot W} \quad (2)$$

โดย F คือ แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นงานทดสอบ
 T คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
 W คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

4. ค่าความเค้น และค่าความเครียด ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 ใช้ในการคำนวณหา ค่าเฉลี่ยของความเค้น (σ_{avg}) ค่าเฉลี่ยของความเครียด (ε_{avg}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation หรือ SD) โดยคำนวณจาก

$$\sigma_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \quad (4)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{avg}})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n$

$n =$ จำนวนชิ้นงานทดสอบ ในงานวิจัยนี้ $n = 5$

5. คำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเค้นแตก (Average Breaking Stress, $\sigma_{b,avg}$) และค่าเฉลี่ยความเครียดแตก (Average Breaking Strain, $\epsilon_{b,avg}$) โดยนำค่าความเค้น และค่าความเครียดที่จุดแตกหัก (Break Point) ของทั้ง 5 ชิ้นงานทดสอบ มาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยใช้สมการที่ (3) และ (4)

6. คำนวณหาค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ซึ่งเป็นค่าความชัน (Slope) ในช่วงอีลาสติก (Elastic region) โดยคำนวณจากนำค่าความเค้นเฉลี่ย (σ_{avg}) และค่าความเครียดเฉลี่ย (ϵ_{avg}) จากสมการ

$$\text{Slope} = \left[\frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i} \right] \quad (6)$$

โดย $i = 1, 2, 3, \dots, n$

7. เพื่อให้ได้ข้อมูลของค่า σ_{avg} และ ϵ_{avg} ที่เรียบ หรือลดการกระจายของข้อมูล (หรือ noise) จึงนำข้อมูลจากสมการที่ (8) ไปผ่านการกรองสัญญาณความถี่สูงออก แบบ off-line โดยใช้หลักการของ Low-pass filter ความถี่ cut-off ที่ใช้เท่ากับ 10 Hz การคำนวณ off-line นี้ใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการกรองสัญญาณ แบบ 2nd order Butterworth Low-pass filter คำสั่งที่ใช้คือ

$$fNorm = \frac{W}{952}$$

$$[b, a] = \text{butter}(n, fNorm, 'low')$$

$$r = \text{filtfilt}(b, a, y)$$

โดย fNorm คือ ค่า Frequencies values in normalized terms มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

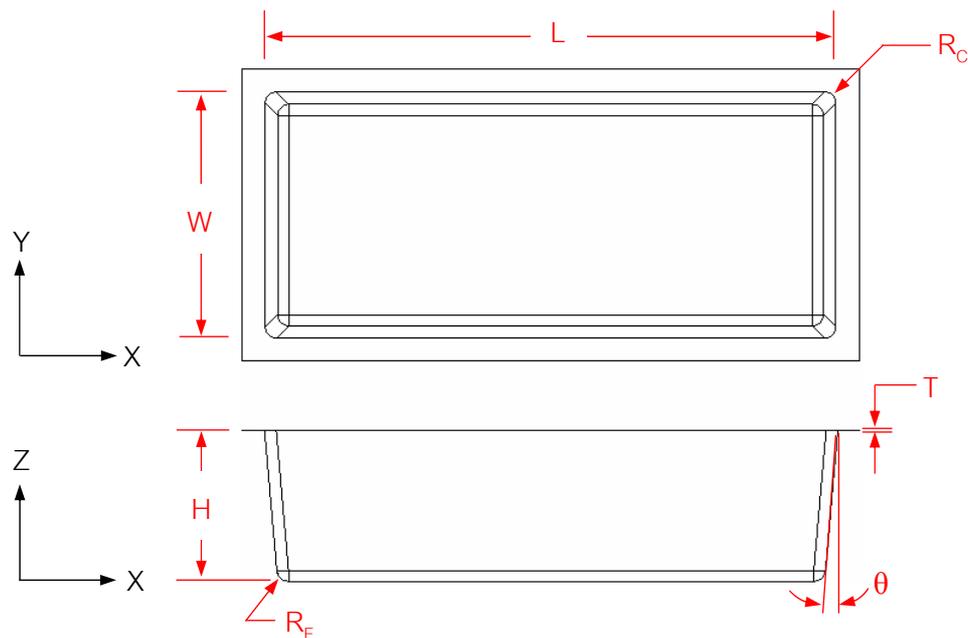
W คือ ความถี่ cut-off (Hz)

n คือ จำนวน order ที่ทำการกรองสัญญาณ

Low คือ การกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

3. วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้ CAD

งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER ทำการสร้างแบบจำลองบรรจุภัณฑ์รูปทรงต่างๆ เป็นแบบพื้นผิว (Surface) เต็มรูปทรง (Full Model) โดยรูปทรงของบรรจุภัณฑ์สามารถกำหนดเป็นตัวแปรต่างๆ ได้ตามแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ตัวแปรที่กำหนดให้กับบรรจุภัณฑ์

T = ความหนาของบรรจุภัณฑ์

H = ความสูงของบรรจุภัณฑ์

W = ความกว้างของบรรจุภัณฑ์

L = ความยาวของบรรจุภัณฑ์

θ = มุมความชัน

R_C = รัศมีการลบมุมที่ขอบระหว่างด้านกว้างกับด้านยาว

R_E = รัศมีการลบมุมที่ขอบฐานบรรจุภัณฑ์

α_1 = อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความยาว = H/L

α_2 = อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาว = W/L

α_3 = อัตราส่วนระหว่างรัศมีการลบมุมต่อความยาว = R_C/L

- X = แกน X หรือแกนบนระนาบแนวนอน
 Y = แกน Y หรือแกนบนระนาบแนวนอนตั้งฉากกับ แกน X
 Z = แกน Z แกนตั้งฉากกับระนาบ XY

3.1 การจำลองบรรจุภัณฑ์แบบ A และ B

ใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER ทำการสร้างแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์ 2 แบบ คือ แบบ A และ B ตามขนาดของผลิตภัณฑ์จริง จากนั้นทำการ Export model เป็นไฟล์ข้อมูลของมาตรฐาน STEP เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์ CAE ต่อไป

3.2 การจำลองบรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน

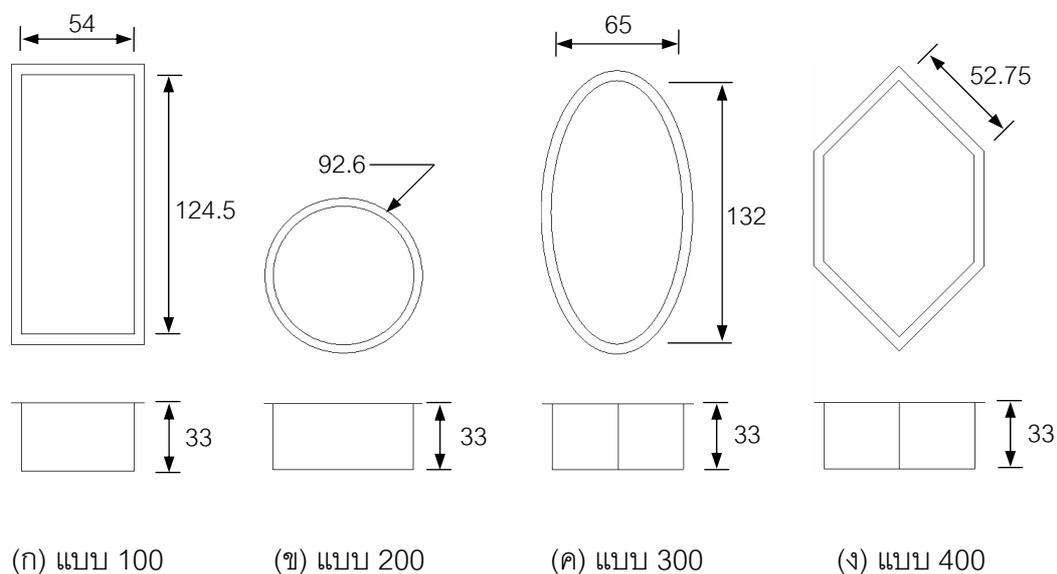
บรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐานที่จำลองโดยใช้ CAD มีทั้งหมด 4 แบบ คือ รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงกระบอก รูปทรงวงรี และรูปทรงหกเหลี่ยมด้านเท่า ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยทั้ง 4 แบบ กำหนดให้มีปริมาตรความจุภายใน (Internal Volume) ประมาณ 220 cm^3 ($220 \text{ cc} \pm 5 \text{ cc}$) มีความสูง (33 mm) และความหนา (0.2 mm) เท่ากันทุกแบบ และบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 แบบได้กำหนดเป็นรหัสเป็นแบบ 100 ถึง 400 โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

บรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยม (100) มีความกว้าง (W) เท่ากับ 54 mm ความยาว (L) เท่ากับ 124.5 mm และความสูง (H) เท่ากับ 33 mm ดังแสดงในภาพที่ 25ก

บรรจุภัณฑ์รูปทรงกระบอก (200) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 92.6 mm และความสูง เท่ากับ 33 mm ดังแสดงในภาพที่ 25ข

บรรจุภัณฑ์รูปทรงวงรี (300) มีความกว้าง เท่ากับ 65 mm ความยาว เท่ากับ 132 mm และความสูง เท่ากับ 33 mm ดังแสดงในภาพที่ 25ค

บรรจุภัณฑ์รูปทรงหกเหลี่ยมด้านเท่า (400) มีความยาวแต่ละด้านเท่ากัน เท่ากับ 52.75 mm และความสูง เท่ากับ 33 mm



ภาพที่ 25 บรรจุกัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน แบบ 100 ถึง 400

3.3 การจำลองเพื่อศึกษาความกว้างของบรรจุกัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100

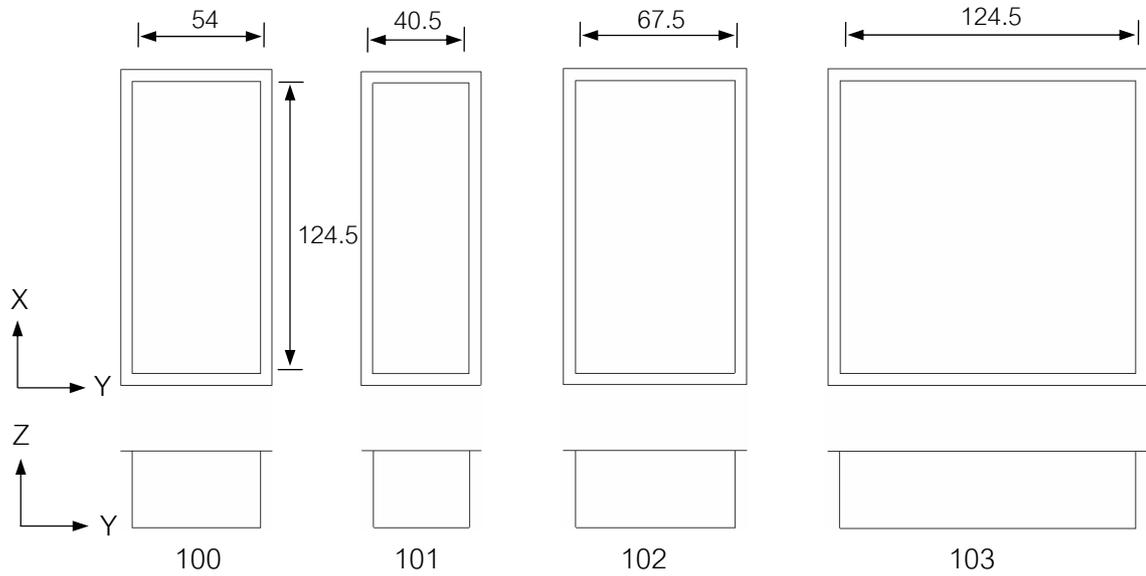
การนำบรรจุกัณฑ์ แบบ 100 มาปรับเปลี่ยนความกว้าง (W) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแข็งแรง เมื่อเปลี่ยนความกว้างจาก 54 mm เป็น 40.5, 67.5 และ 124.5 mm โดยกำหนดเป็นแบบ 101, 102 และ 103 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 26

3.4 การจำลองเพื่อศึกษาความยาวของบรรจุกัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100

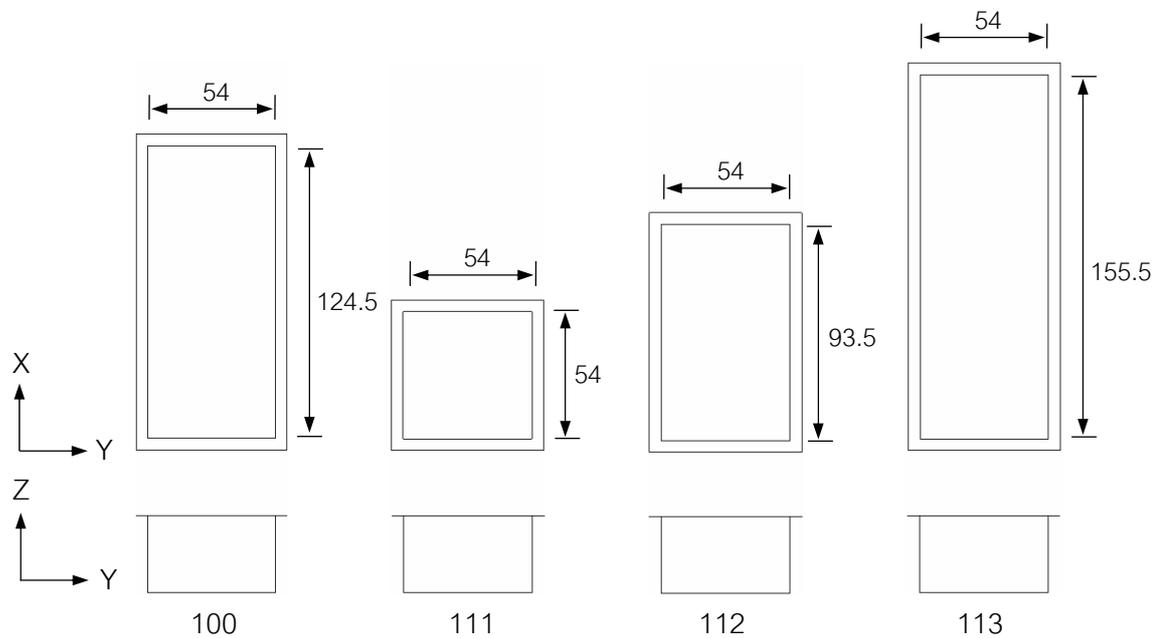
เป็นการนำแบบจำลอง แบบ 100 มาเปลี่ยนความยาว (L) จาก 124.5 mm เป็น 54, 93.5 และ 155.5 mm โดยกำหนดเป็นแบบ 111, 112 และ 113 ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความแข็งแรง เมื่อปรับเปลี่ยนความยาว ดังแสดงในภาพที่ 27

3.5 การจำลองเพื่อศึกษาความสูงของบรรจุกัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100

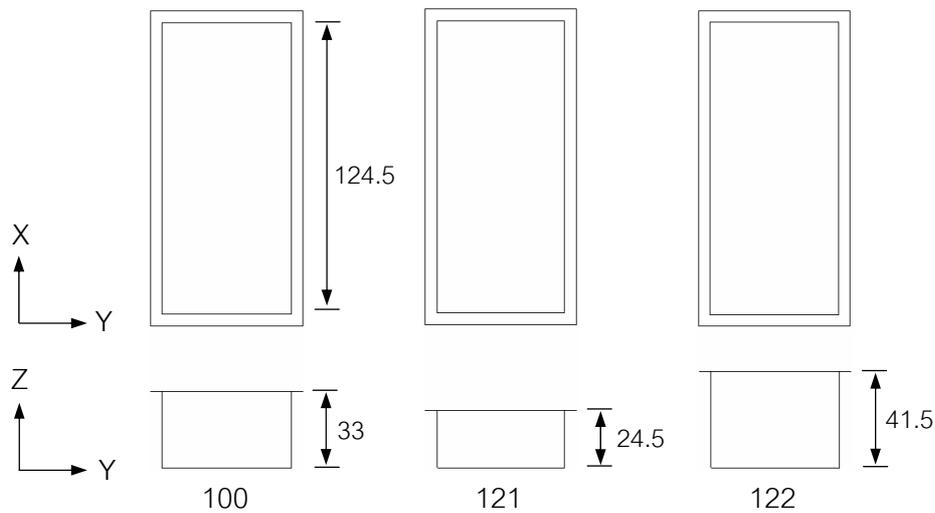
การนำแบบจำลอง แบบ 100 มาปรับเปลี่ยนความสูง (H) จาก 33 mm ไปเป็น 24.5 และ 41.5 mm โดยกำหนดเป็นแบบ 121 และ 122 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 26 บรจจุภัณฑ์แบบ 100 เมื่อเปลี่ยนความกว้าง (W) และเปรียบเทียบกับแบบ 101 ถึง 103



ภาพที่ 27 บรจจุภัณฑ์แบบ 100 เมื่อเปลี่ยนความยาว (L) และเปรียบเทียบกับแบบ 111 ถึง 113



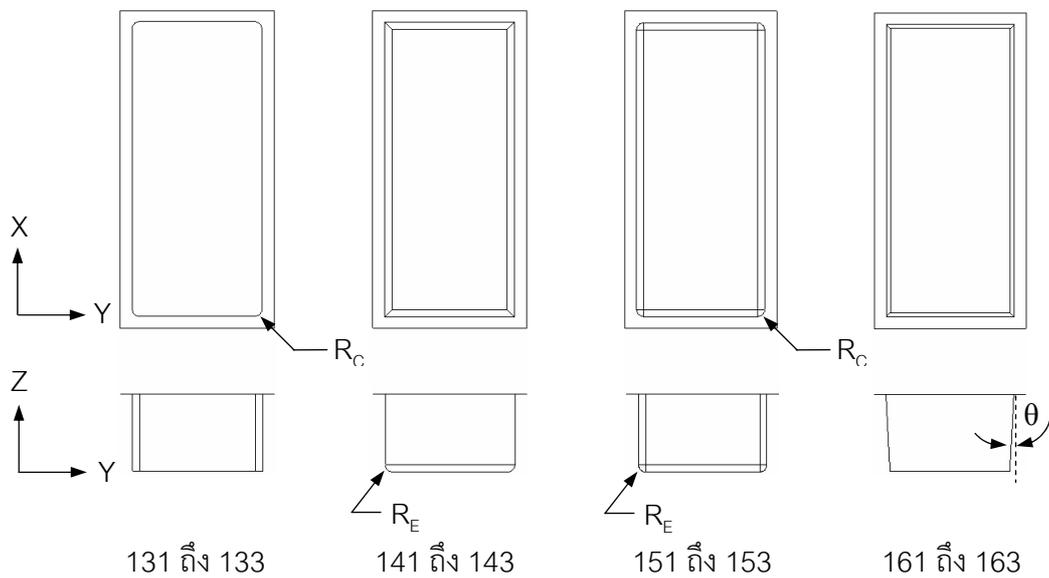
ภาพที่ 28 บรรจุภัณฑ์แบบ 100 เมื่อเปลี่ยนความสูง (H) เปรียบเทียบกับแบบ 121 และ 122

3.6 การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลรอบบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100

บรรจุภัณฑ์แบบ 131, 132 และ 133 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 แต่มีขอบมลที่มุมขอบทั้ง 4 มุม โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 131 มีค่ารัศมีของขอบมล หรือ $R_C = 1 \text{ mm}$ แบบ 132 มีค่า $R_C = 3 \text{ mm}$ และแบบ 133 มีค่า $R_C = 5 \text{ mm}$ ดังแสดงในภาพที่ 29

บรรจุภัณฑ์แบบ 141, 142 และ 143 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 แต่มีขอบมลที่ขอบฐาน (โดยให้รัศมีเท่ากับ R_E) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 141 มีค่า $R_E = 1 \text{ mm}$ แบบ 142 มีค่า $R_E = 3 \text{ mm}$ และแบบ 143 มีค่า $R_E = 5 \text{ mm}$ ดังแสดงในภาพที่ 29

บรรจุภัณฑ์แบบ 151, 152 และ 153 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 แต่มีขอบมลที่มุมขอบทั้ง 4 มุม และที่ขอบฐาน (หรือผสมแบบ 13x และ 14x) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 151 มีค่า R_C และ $R_E = 1 \text{ mm}$ แบบ 152 มีค่า R_C และ $R_E = 3 \text{ mm}$ และแบบ 153 มีค่า R_C และ $R_E = 5 \text{ mm}$ ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ ทรงสี่เหลี่ยม เพื่อศึกษาขอบมด (131 ถึง 153) และมุมความชัน (161 ถึง 163)

3.7 การจำลองเพื่อศึกษามุมความชันของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100

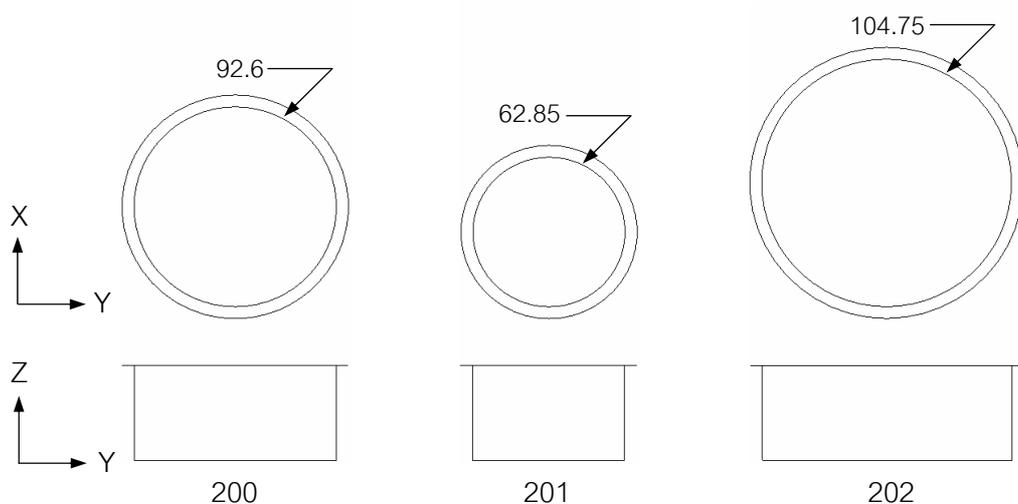
บรรจุภัณฑ์แบบ 161, 162 และ 163 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 แต่มีมุมความชัน (Draft angle: θ) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 161 มีค่า $\theta = 1^\circ$ แบบ 162 มีค่า $\theta = 3^\circ$ และแบบ 163 มีค่า $\theta = 5^\circ$ ดังแสดงในภาพที่ 29

3.8 การจำลองเพื่อศึกษาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200

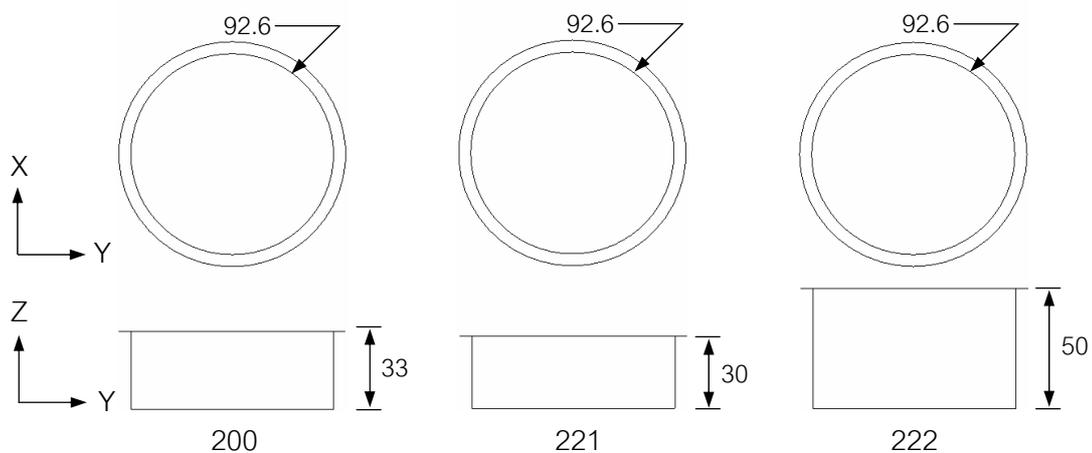
การนำบรรจุภัณฑ์ แบบ 200 มาปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแข็งแรง เมื่อเปลี่ยนค่า D จาก 92.4 mm เป็น 62.85 และ 104.75 mm โดยกำหนดเป็นรหัส 201 และ 202 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 30

3.9 การจำลองเพื่อศึกษาความสูงของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200

การนำบรรจุภัณฑ์ แบบ 200 มาปรับเปลี่ยนความสูง (H) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแข็งแรง เมื่อเปลี่ยนความสูงจาก 33 mm เป็น 30 และ 50 mm โดยกำหนดเป็นรหัส 221 และ 222 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 30 บรรจุภัณฑ์แบบ 200 เมื่อเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลาง เปรียบเทียบกับแบบ 201 และ 202



ภาพที่ 31 บรรจุภัณฑ์แบบ 200 เมื่อเปลี่ยนความสูง เปรียบเทียบกับแบบ 221 และ 222

3.10 การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลที่ขอบฐานของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200

บรรจุภัณฑ์แบบ 241, 242 และ 243 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 200 แต่มีขอบมลที่ขอบฐาน (R_E) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 241 มีค่า $R_E = 1$ mm แบบ 242 มีค่า $R_E = 3$ mm และแบบ 243 มีค่า $R_E = 5$ mm ดังแสดงในภาพที่ 32

3.11 การจำลองเพื่อศึกษามุมความชันของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก แบบ 200

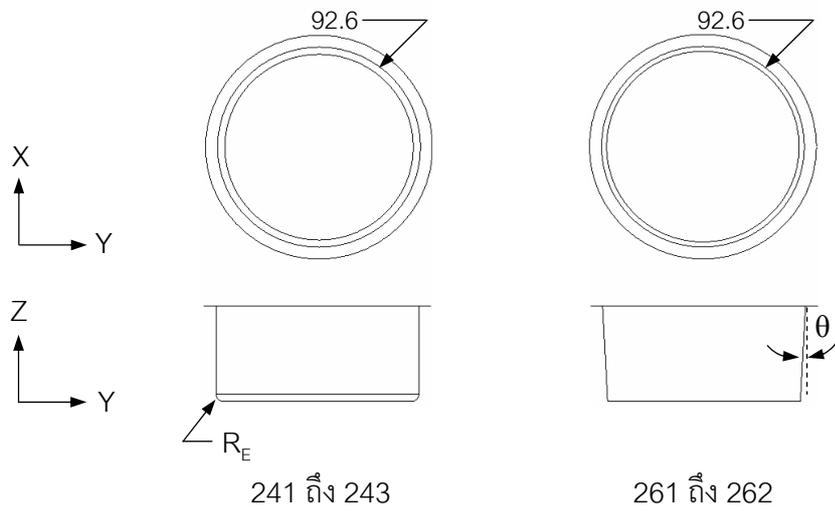
บรรจุภัณฑ์แบบ 261, 262 และ 263 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 200 แต่มีมุมความชัน (Draft angle: θ) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 261 มีค่า $\theta = 1^\circ$ แบบ 262 มีค่า $\theta = 3^\circ$ และแบบ 263 มีค่า $\theta = 5^\circ$ ดังแสดงในภาพที่ 32

3.12 การจำลองเพื่อศึกษาความกว้างของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300

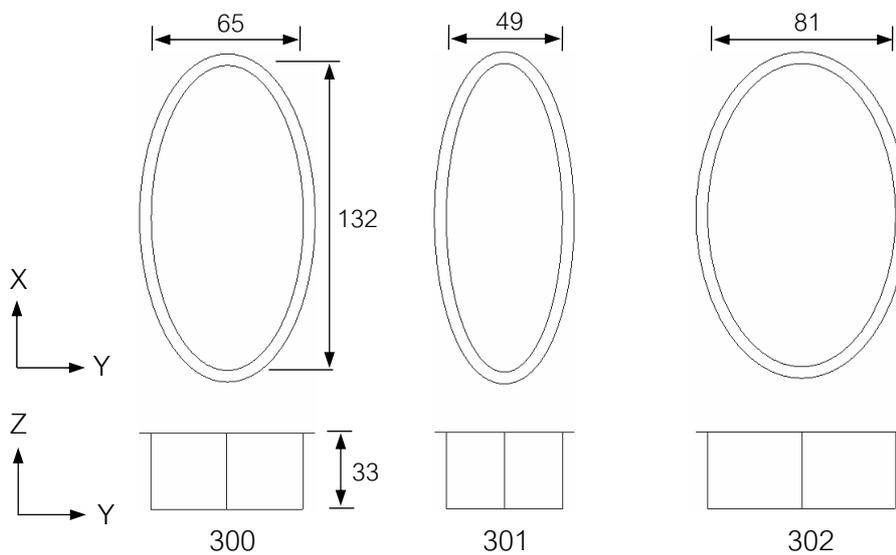
การนำบรรจุภัณฑ์รูปวงรี แบบ 300 มาปรับเปลี่ยนความกว้าง หรือความยาวของ minor axis (W) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแข็งแรง เมื่อเปลี่ยนความกว้างจาก 65 mm เป็น 49 และ 81 mm โดยกำหนดเป็นแบบ 301 และ 302 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 33

3.13 การจำลองเพื่อศึกษาความยาวของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300

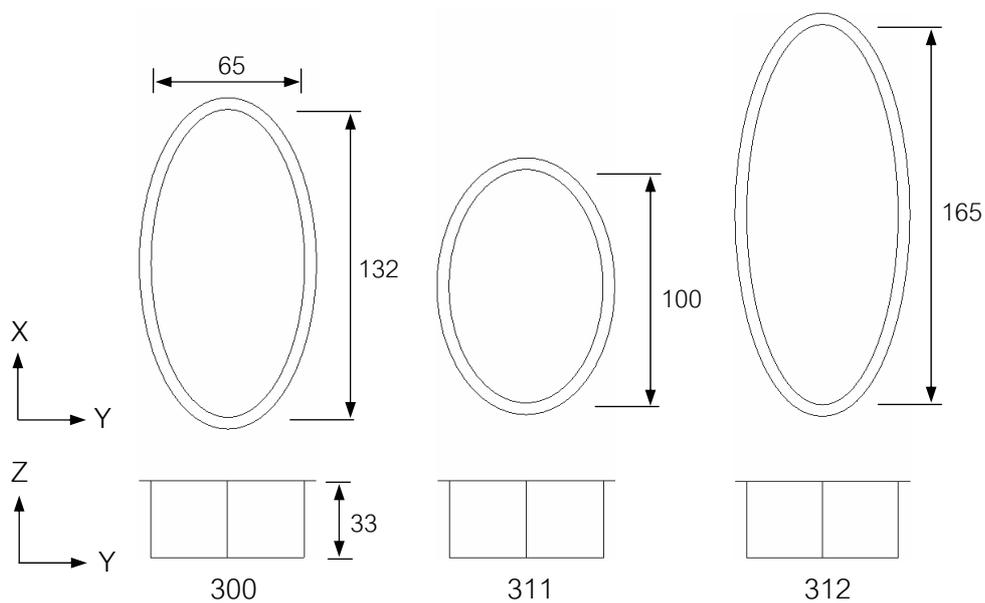
การนำบรรจุภัณฑ์ แบบ 300 มาปรับเปลี่ยนความยาว หรือความยาวของ major axis (L) จาก 132 mm เป็น 100 และ 165 mm โดยกำหนดเป็นแบบ 311 และ 312 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 32 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอก เพื่อศึกษาขอบมด (241 ถึง 243) และมุมความชัน (261 ถึง 263)



ภาพที่ 33 บรรจุภัณฑ์แบบ 300 เมื่อเปลี่ยนความกว้าง (W) เปรียบเทียบกับแบบ 301 และ 302



ภาพที่ 34 บรรจุภัณฑ์แบบ 300 เมื่อเปลี่ยนความยาว (L) เปรียบเทียบกับแบบ 311 และ 312

3.14 การจำลองเพื่อศึกษาความสูงของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300

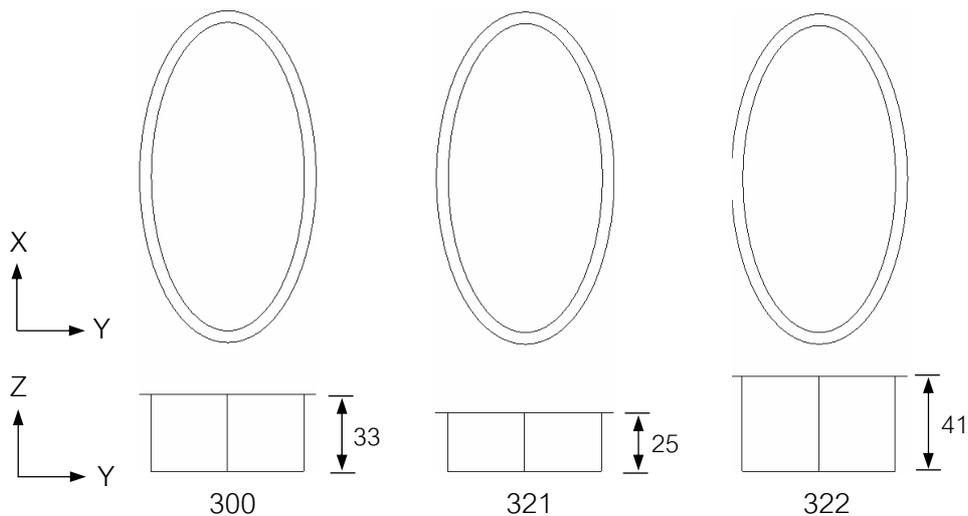
การนำบรรจุภัณฑ์ แบบ 300 มาปรับเปลี่ยนความสูง (H) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความแข็งแรง เมื่อเปลี่ยนความสูงจาก 33 mm เป็น 25 และ 41 mm โดยกำหนดเป็นแบบ 321 และ 322 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 35

3.15 การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลที่ขอบฐานของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300

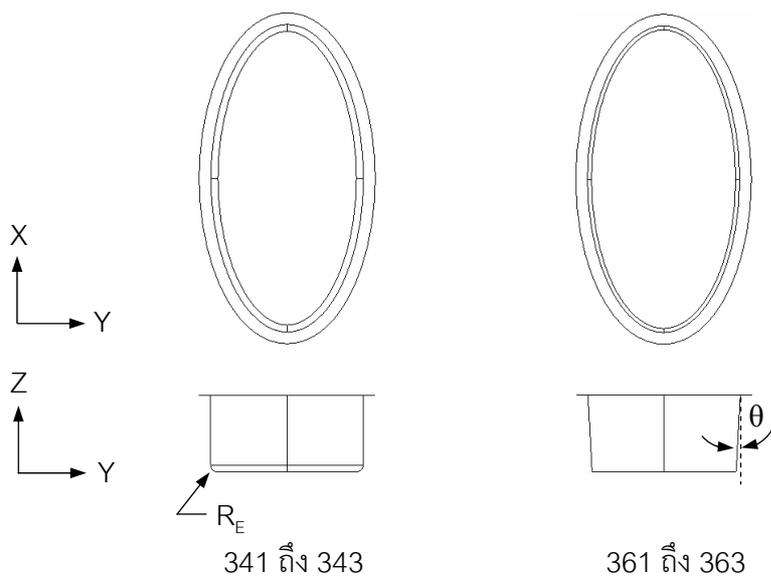
บรรจุภัณฑ์แบบ 341, 342 และ 343 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 300 แต่มีขอบมลที่ขอบฐาน (R_E) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 341 มีค่า $R_E = 1$ mm แบบ 342 มีค่า $R_E = 3$ mm และแบบ 343 มีค่า $R_E = 5$ mm ดังแสดงในภาพที่ 36

3.16 การจำลองเพื่อศึกษามุมความชันของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี แบบ 300

บรรจุภัณฑ์แบบ 361, 362 และ 363 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 300 แต่มีมุมความชัน (Draft angle, θ) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 361 มีค่า $\theta = 1^\circ$ แบบ 362 มีค่า $\theta = 3^\circ$ และแบบ 363 มีค่า $\theta = 5^\circ$ ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 35 บรรจุภัณฑ์แบบ 300 เมื่อเปลี่ยนความสูง เปรียบเทียบกับแบบ 321 และ 322



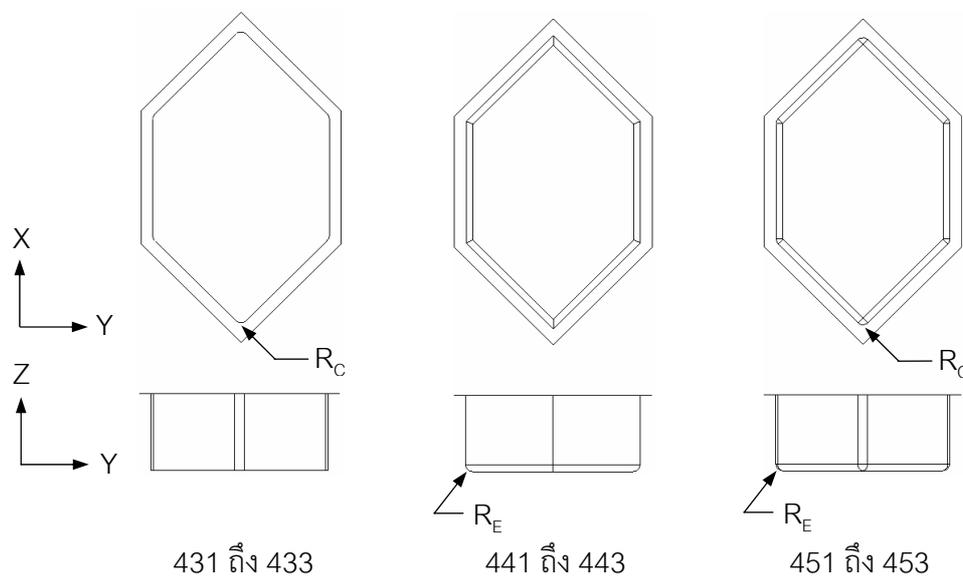
ภาพที่ 36 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ทรงวงรี เพื่อศึกษาขอบมด (341 ถึง 343) และมุมความชัน (361 ถึง 363)

3.17 การจำลองเพื่อศึกษาขอบมลรอบบรรจุภัณฑ์ทรงหกเหลี่ยม แบบ 400

บรรจุภัณฑ์แบบ 431, 432 และ 433 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 400 แต่มีขอบมลที่มุมขอบทั้ง 4 มุม (R_C) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 431 มีค่า $R_C = 1$ mm แบบ 432 มีค่า $R_C = 3$ mm และแบบ 433 มีค่า $R_C = 5$ mm ดังแสดงในภาพที่ 37

บรรจุภัณฑ์แบบ 441, 442 และ 443 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 400 แต่มีขอบมลที่ขอบฐาน (R_E) โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 441 มีค่า $R_E = 1$ mm แบบ 442 มีค่า $R_E = 3$ mm และแบบ 443 มีค่า $R_E = 5$ mm ดังแสดงในภาพที่ 37

บรรจุภัณฑ์แบบ 451, 452 และ 453 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 400 แต่มีขอบมลที่มุมขอบทั้ง 4 มุม และที่ขอบฐาน โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 451 มีค่า R_C และ $R_E = 1$ mm แบบ 452 มีค่า R_C และ $R_E = 3$ mm และแบบ 453 มีค่า R_C และ $R_E = 5$ mm ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ทรงหกเหลี่ยม เพื่อศึกษาขอบมล (431 ถึง 453)

3.18 การจำลองเพื่อศึกษา Rib ที่ฐานรูปแบบต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ แบบ 100

บรรจุภัณฑ์แบบ 1710 ถึง 1770 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 แต่มีการเพิ่ม rib แบบต่าง ๆ โดยมีพื้นที่หน้าตัดขวาง (cross section) ที่ฐานของบรรจุภัณฑ์ของ rib เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง (w) = 4 mm และสูง (h) = 4 mm ดังแสดงในภาพที่ 38

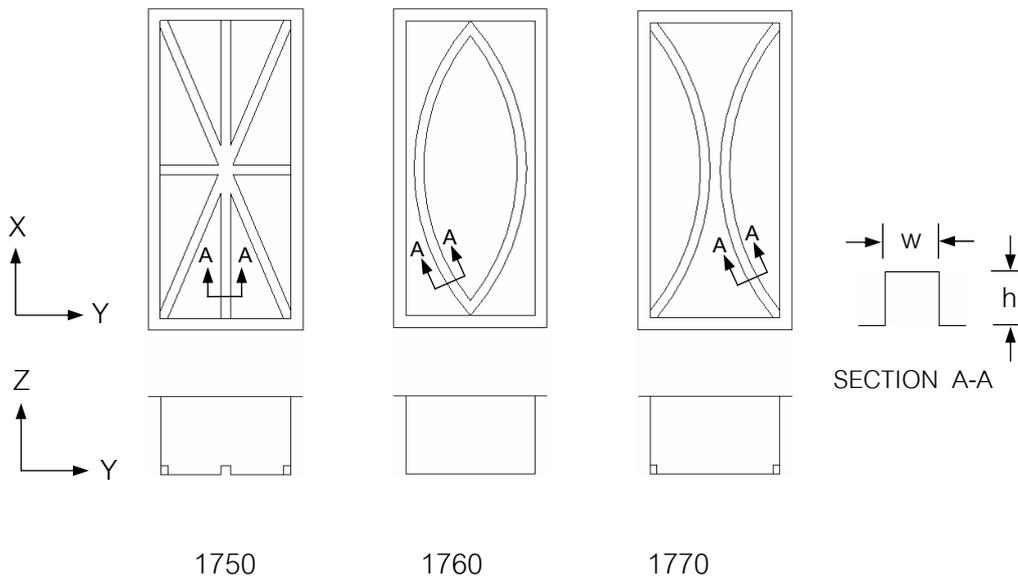
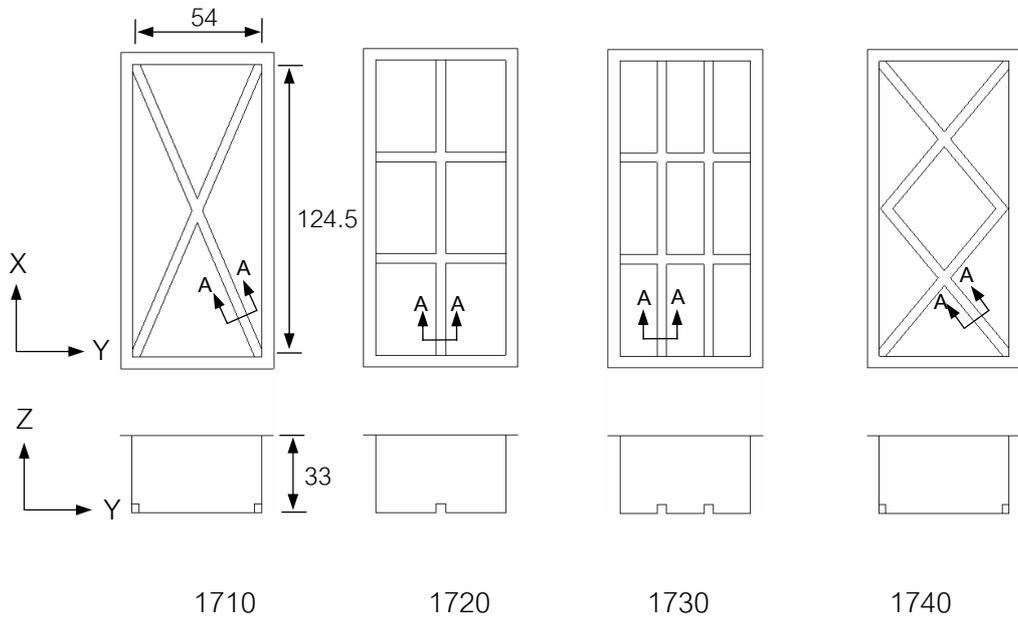
บรรจุภัณฑ์แบบ 1711 ถึง 1715 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 1710 แต่มีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดขวางของ rib ดังแสดงในภาพที่ 39

3.19 การจำลองเพื่อศึกษาพีเจอรูปแบบต่างๆ ที่ผนังด้านข้างของบรรจุภัณฑ์

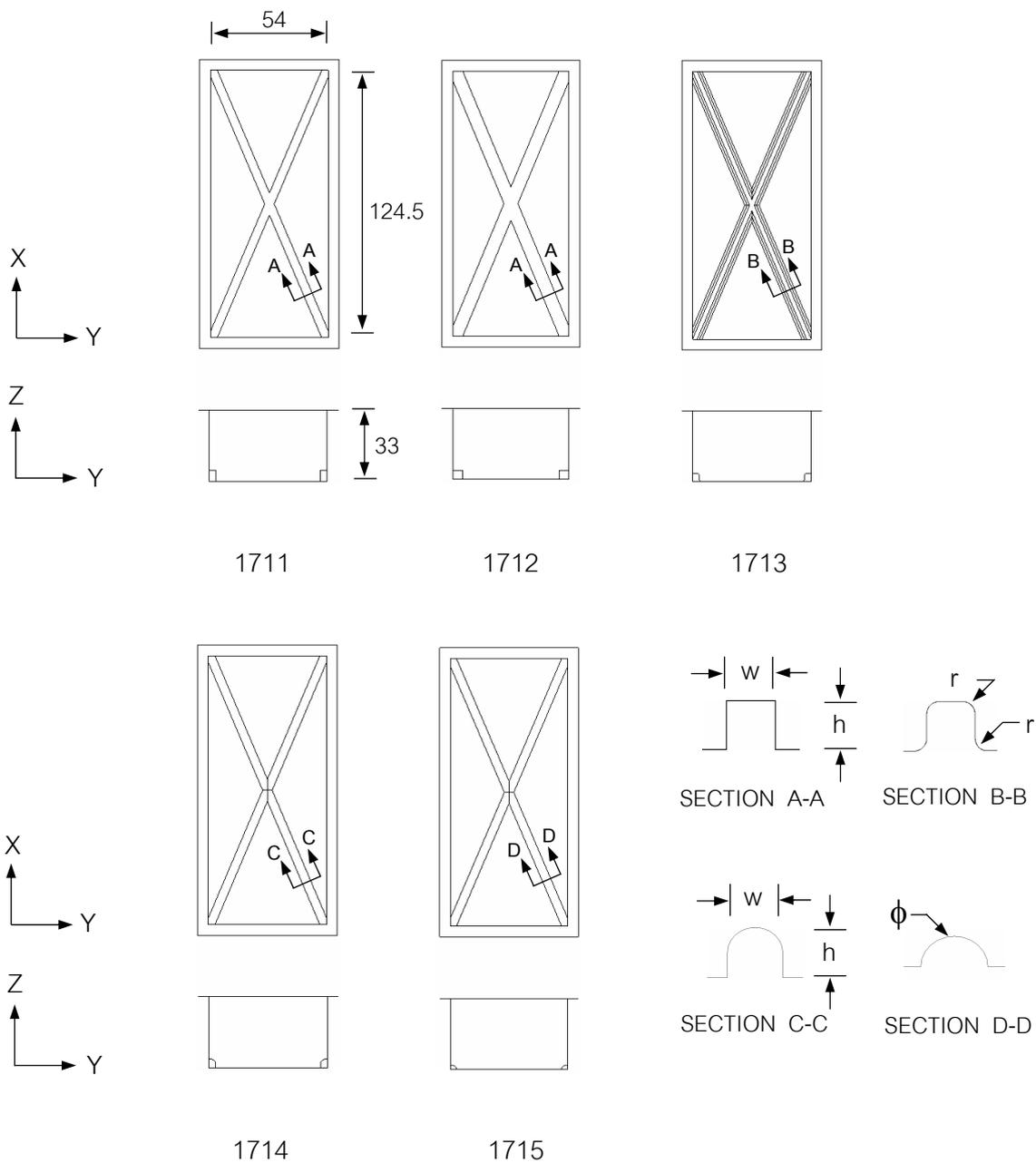
บรรจุภัณฑ์แบบ 1810 ถึง 1830 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 แต่มีการเพิ่มพีเจอรูปแบบต่าง ๆ ที่ผนังด้านข้างของบรรจุภัณฑ์ โดยมีพื้นที่หน้าตัดขวางของพีเจอรูปเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาด กว้าง (w) และสูง (h) = 3 mm ดังแสดงในภาพที่ 40

บรรจุภัณฑ์แบบ 1811 ถึง 1815 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 1810 แต่มีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดขวางของพีเจอรูปที่ผนังด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 41

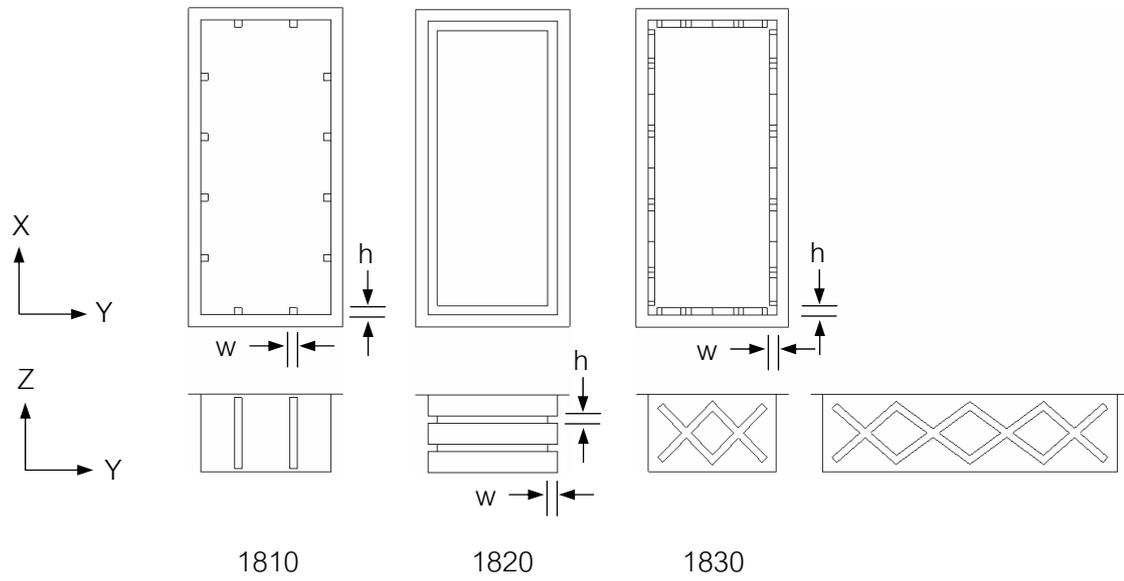
บรรจุภัณฑ์แบบ 1816 และ 1821 เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีรูปทรงพื้นฐานของบรรจุภัณฑ์แบบ 1810 และ 1820 ตามลำดับ แต่มีจำนวนพีเจอรูปเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 42



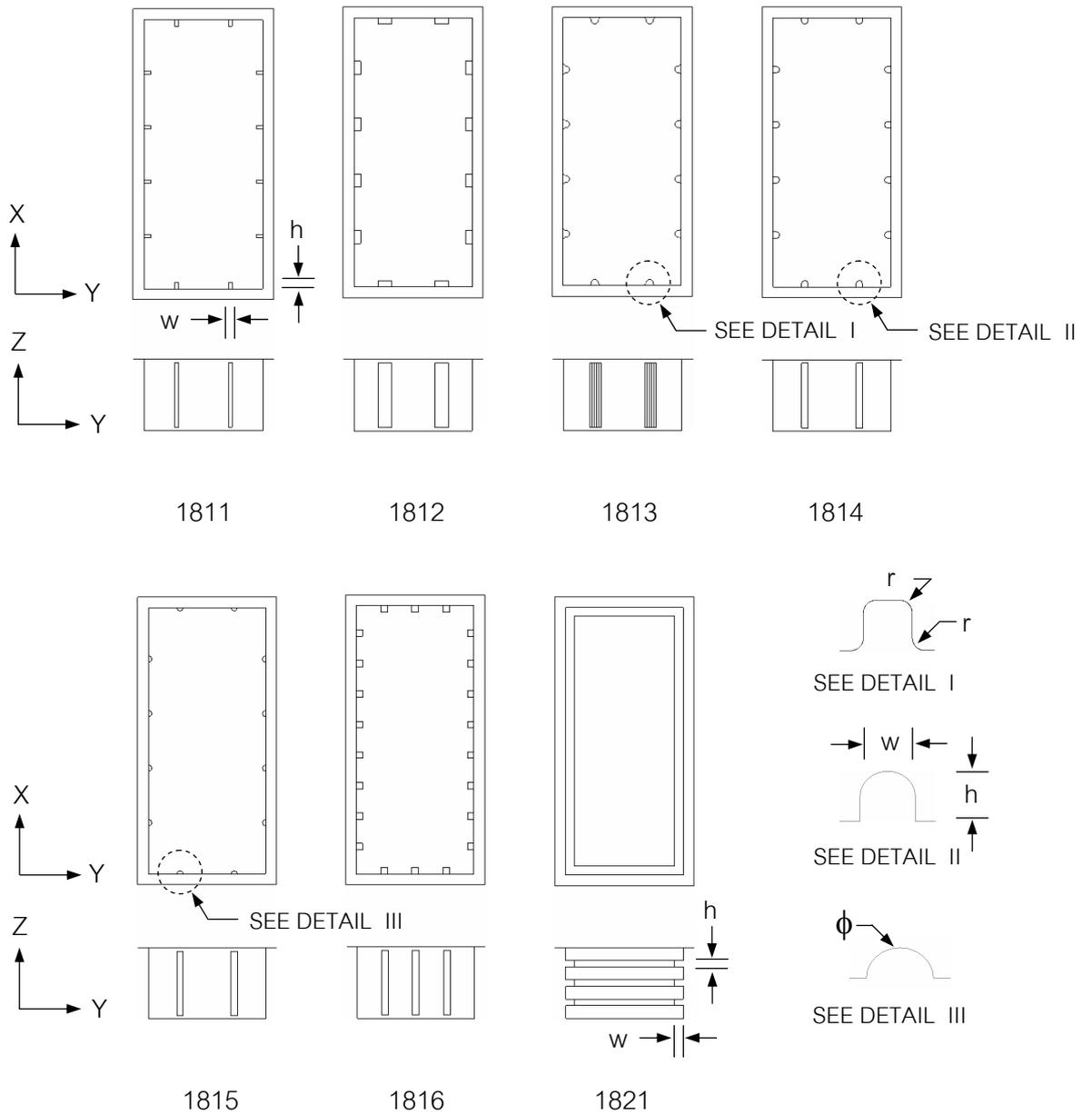
ภาพที่ 38 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1710 ถึง 1770



ภาพที่ 39 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1711 ถึง 1715



ภาพที่ 40 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1810 ถึง 1830



ภาพที่ 41 รูปทรงของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1811 ถึง 1816 และ 1821

ตารางที่ 2 ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยม (1xx)

INDEPENDENT PARAMETERS															
Model	Thickness		Height H (mm)	Width W (mm)	Length L (mm)	Capacity V_C (cc)	R_C (mm)	R_E (mm)	Draft angle θ (degree)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R_C/L , R_E/L)	Vol. of model		
	T (mm)												V (cc)	Mass (gm)	
100	0.20		33.00	54.00	124.50	220.68	-	-	0.27	0.43	-	-	4.08	54.09	4.28
101	0.20		33.00	40.50	124.50	165.31	-	-	0.27	0.33	-	-	3.54	46.70	3.71
102	0.20		33.00	67.50	124.50	276.06	-	-	0.27	0.54	-	-	4.62	59.75	4.85
103	0.20		33.00	124.50	124.50	509.87	-	-	0.27	1.00	-	-	6.90	73.89	7.25
111	0.20		33.00	54.00	54.00	95.52	-	-	0.61	1.00	-	-	2.25	42.45	2.36
112	0.20		33.00	54.00	93.50	165.64	-	-	0.35	0.58	-	-	3.27	50.65	3.44
113	0.20		33.00	54.00	155.50	275.72	-	-	0.21	0.35	-	-	4.88	56.50	5.13
121	0.20		24.50	54.00	124.50	163.84	-	-	0.20	0.43	-	-	3.47	47.22	3.65
122	0.20		41.50	54.00	124.50	277.52	-	-	0.33	0.43	-	-	4.69	59.17	4.92
131	0.20		33.00	54.00	124.50	220.66	1	-	0.27	0.43	0.008	-	4.07	54.22	4.27
132	0.20		33.00	54.00	124.50	220.44	3	-	0.27	0.43	0.024	-	4.04	54.56	4.25
133	0.20		33.00	54.00	124.50	220.00	5	-	0.27	0.43	0.040	-	4.02	54.73	4.22
141	0.20		33.00	54.00	124.50	220.62	-	1	0.27	0.43	0.008	-	4.05	54.47	4.25
142	0.20		33.00	54.00	124.50	220.05	-	3	0.27	0.43	0.024	-	3.98	55.29	4.18
143	0.20		33.00	54.00	124.50	218.89	-	5	0.27	0.43	0.040	-	3.92	55.84	4.12

ตารางที่ 2 (ต่อ) ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยม (1xx)

Model	INDEPENDENT PARAMETERS										Vol. of model		Volume ratio V_c / V	Mass (gm)	
	Thickness T (mm)	Height H (mm)	Width W (mm)	Length L (mm)	Capacity V_c (cc)	R_c (mm)	R_E (mm)	Draft angle θ (degree)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R_c/L , R_E/L)	V			(cc)
151	0.20	33.00	54.00	124.50	220.60	1	1	-	0.27	0.43	0.008	4.04	4.04	54.60	4.24
152	0.20	33.00	54.00	124.50	219.82	3	3	-	0.27	0.43	0.024	3.95	3.95	55.65	4.15
153	0.20	33.00	54.00	124.50	218.25	5	5	-	0.27	0.43	0.040	3.87	3.87	56.40	4.06
161	0.20	33.00	54.00	124.50	217.33	-	-	1	0.27	0.43	-	4.02	4.02	54.06	4.22
162	0.20	33.00	54.00	124.50	210.71	-	-	3	0.27	0.43	-	3.91	3.91	53.89	4.11
163	0.20	33.00	54.00	124.50	204.18	-	-	5	0.27	0.43	-	3.81	3.81	53.59	4.00

ตารางที่ 3 ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุภัณฑ์รูปทรงระบดก (2xx)

Model	INDEPENDENT PARAMETERS											Vol. of model (cc)	Volume ratio V_c/V	Mass (gm)						
	Thickness		Height		Dimension		Capacity		Draft angle		α_1				α_2		α_3			
	T (mm)	H (mm)	H (mm)	D (mm)	R_c (mm)	R_E (mm)	θ (degree)	(H/D)	(W/D)	(R_E/D)	(H/D)				(W/D)	(R_E/D)	(H/D)	(W/D)	(R_E/D)	
200	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	220.62	-	-	-	0.36	-	-	-	-	-	3.57	61.80	3.74
201	0.20	33.00	33.00	62.85	-	-	-	101.42	-	-	-	0.52	-	-	-	-	-	2.14	47.39	2.24
202	0.20	33.00	33.00	104.75	-	-	-	282.44	-	-	-	0.32	-	-	-	-	-	4.24	66.61	4.45
221	0.20	30.00	30.00	92.60	-	-	-	200.50	-	-	-	0.33	-	-	-	-	-	3.40	58.97	3.56
222	0.20	50.00	50.00	92.60	-	-	-	334.61	-	-	-	0.54	-	-	-	-	-	4.56	73.38	4.78
241	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	220.57	-	1	-	0.36	-	-	-	0.011	-	3.55	62.13	3.72
242	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	220.15	-	3	-	0.36	-	-	-	0.032	-	3.50	62.90	3.67
243	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	219.30	-	5	-	0.36	-	-	-	0.054	-	3.45	63.57	3.62
261	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	216.99	-	-	-	0.36	-	-	-	-	-	3.51	61.82	3.68
262	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	209.84	-	-	-	0.36	-	-	-	-	-	3.41	61.54	3.58
263	0.20	33.00	33.00	92.60	-	-	-	202.83	-	-	-	0.36	-	-	-	-	-	3.31	61.28	3.47

ตารางที่ 4 ข้อมูลของแบบจำลองของบรจกัณษที่รูปวงรี (3xx)

Model	INDEPENDENT PARAMETERS													Volume ratio	Mass (gm)						
	Thickness		Height		Width		Length		Capacity		R _C		R _E			Draft angle θ (degree)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R _E /L)	Vol. of model V (cc)	
	T (mm)	H (mm)	H (mm)	W (mm)	L (mm)	L (mm)	V _C (cc)	V _C (cc)	R _C (mm)	R _C (mm)	R _E (mm)	R _E (mm)									
300	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	132.00	220.67	-	-	0.25	0.49	-	3.78	58.38	3.97						
301	0.20	33.00	49.00	49.00	132.00	132.00	166.13	-	-	0.25	0.37	-	3.30	50.34	3.47						
302	0.20	33.00	81.00	81.00	132.00	132.00	275.14	-	-	0.25	0.61	-	4.27	64.44	4.48						
311	0.20	33.00	65.00	65.00	100.00	167.09	-	-	0.33	0.65	-	3.02	55.33	3.17							
312	0.20	33.00	65.00	65.00	165.00	275.86	-	-	0.20	0.39	-	4.57	60.36	4.80							
321	0.20	25.00	65.00	65.00	132.00	167.15	-	-	0.19	0.49	-	3.27	51.12	3.43							
322	0.20	41.00	65.00	65.00	132.00	274.12	-	-	0.31	0.49	-	4.29	63.90	4.50							
341	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	220.58	-	1	0.25	0.49	0.008	3.75	58.82	3.94							
342	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	220.07	-	3	0.25	0.49	0.023	3.69	59.64	3.88							
343	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	219.03	-	5	0.25	0.49	0.038	3.64	60.17	3.82							
361	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	217.74	-	-	1	0.25	0.49	3.73	58.38	3.92							
362	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	211.34	-	-	3	0.25	0.49	3.64	58.06	3.82							
363	0.20	33.00	65.00	65.00	132.00	205.67	-	-	5	0.25	0.49	3.55	57.94	3.73							

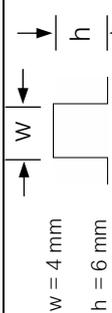
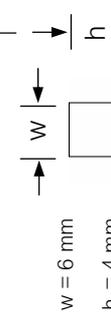
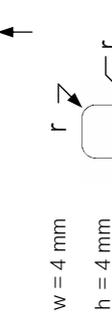
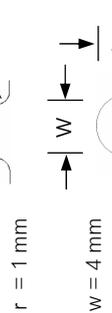
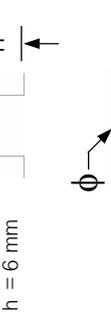
ตารางที่ 5 ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุก้อนรูปทรงทรงแปดเหลี่ยม (4xx)

INDEPENDENT PARAMETERS																	
Model	Thickness		Height	Length		Capacity		R _C (mm)	R _E (mm)	Draft angle θ (degree)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R _C /L, R _E /L)	Vol. of		Volume ratio V _c / V	Mass (gm)
	T (mm)	H (mm)		L (mm)	V _C (cc)	R _C (mm)	V _C (cc)							model V (cc)			
400	0.20	33.00	52.75	220.64	-	-	0.63	-	-	-	0.63	-	-	3.77	58.52	3.96	
431	0.20	33.00	52.75	220.63	1	-	0.63	-	-	-	0.63	-	0.019	3.76	58.68	3.95	
432	0.20	33.00	52.75	220.50	3	-	0.63	-	-	-	0.63	-	0.057	3.75	58.80	3.93	
433	0.20	33.00	52.75	220.23	5	-	0.63	-	-	-	0.63	-	0.095	3.73	59.04	3.92	
441	0.20	33.00	52.75	220.59	-	1	0.63	-	1	-	0.63	-	0.019	3.74	58.98	3.93	
442	0.20	33.00	52.75	220.08	-	3	0.63	-	3	-	0.63	-	0.057	3.68	59.80	3.87	
443	0.20	33.00	52.75	219.05	-	5	0.63	-	5	-	0.63	-	0.095	3.63	60.34	3.81	
451	0.20	33.00	52.75	220.57	1	1	0.63	-	1	-	0.63	-	0.019	3.73	59.13	3.92	
452	0.20	33.00	52.75	219.94	3	3	0.63	-	3	-	0.63	-	0.057	3.67	59.93	3.85	
453	0.20	33.00	52.75	218.67	5	5	0.63	-	5	-	0.63	-	0.095	3.60	60.74	3.78	

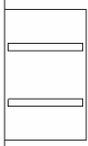
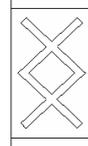
ตารางที่ 6 ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุก้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ฐาน (17x0)

Model	INDEPENDENT PARAMETERS																
	Thickness		Height		Width		Length		Dimension of rib at the base		Capacity V_c (cc)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 ($R_c/L, R_b/L$)	Vol. of model V (cc)	Volume ratio V_c/V	Mass (gm)
	T (mm)	H (mm)	W (mm)	L (mm)	w (mm)	h (mm)	α_1	α_2	α_3								
1710	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		217.66	0.27	0.43	-	4.46	48.80	4.68				
1720	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		218.27	0.27	0.43	-	4.41	49.49	4.63				
1730	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		216.40	0.27	0.43	-	4.57	47.35	4.80				
1740	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		216.90	0.27	0.43	-	4.54	47.78	4.77				
1750	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		215.13	0.27	0.43	-	4.67	46.07	4.90				
1760	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		217.75	0.27	0.43	-	4.49	48.50	4.71				
1770	0.20	33.00	54.00	124.50	w = 4 mm h = 4 mm		217.59	0.27	0.43	-	4.48	48.57	4.70				

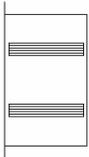
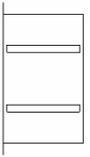
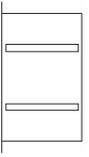
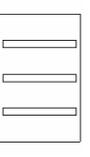
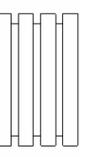
ตารางที่ 7 ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุก้อนทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ฐาน (171x)

INDEPENDENT PARAMETERS												
Model	Thickness T (mm)	Height H (mm)	Width W (mm)	Length L (mm)	Dimension of Cross Section of rib at the base	Capacity V_c (cc)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R_c/L , R_e/L)	Vol. of	Volume	Mass
										model	ratio	(gm)
										V_c / V		
1711	0.20	33.00	54.00	124.50		216.61	0.27	0.43	-	4.56	47.50	4.79
1712	0.20	33.00	54.00	124.50		215.67	0.27	0.43	-	4.44	48.57	4.66
1713	0.20	33.00	54.00	124.50		217.66	0.27	0.43	-	4.38	49.69	4.60
1714	0.20	33.00	54.00	124.50		218.10	0.27	0.43	-	4.38	49.79	4.60
1715	0.20	33.00	54.00	124.50		220.20	0.27	0.43	-	4.19	52.55	4.40

ตารางที่ 8 ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุก้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ผนังด้านข้าง (18xx)

INDEPENDENT PARAMETERS												
Model	Thickness T (mm)	Height H (mm)	Width W (mm)	Length L (mm)	Dimension of Cross Section of rib at the base	Capacity V_c (cc)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R_c/L , R_E/L)	Vol. of	Volume	Mass
										model	ratio	(gm)
										V	V_c/V	M
										(cc)		(gm)
1810	0.20	33.00	54.00	124.50		218.62	0.27	0.43	-	4.55	48.05	4.78
1820	0.20	33.00	54.00	124.50		213.68	0.27	0.43	-	5.13	41.65	5.39
1830	0.20	33.00	54.00	124.50		214.61	0.27	0.43	-	5.03	42.67	5.28
1811	0.20	33.00	54.00	124.50		220.24	0.27	0.43	-	4.53	48.62	4.76
1812	0.20	33.00	54.00	124.50		215.38	0.27	0.43	-	4.60	46.82	4.83

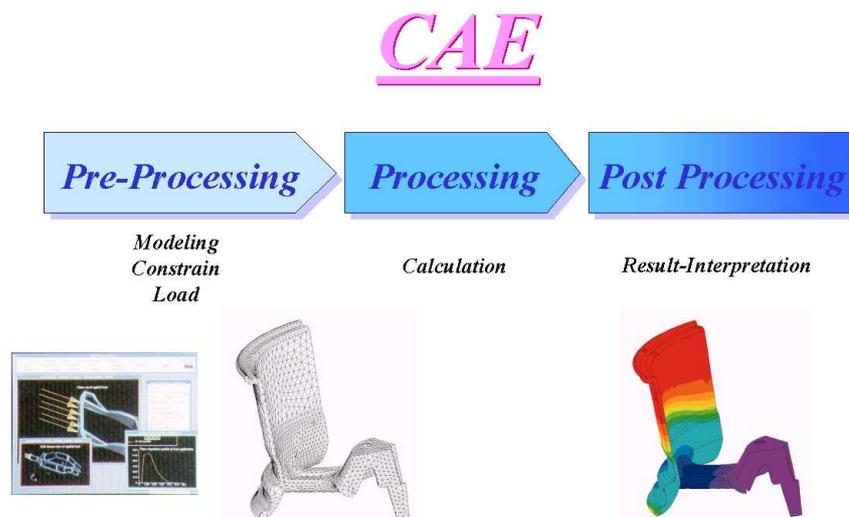
ตารางที่ 8 (ต่อ) ข้อมูลของแบบจำลองของบรรจุก้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมมี rib ที่ผนังด้านข้าง (18xx)

INDEPENDENT PARAMETERS												
Model	Thickness T (mm)	Height H (mm)	Width W (mm)	Length L (mm)	Dimension of Cross Section of rib at the base	Capacity V_c (cc)	α_1 (H/L)	α_2 (W/L)	α_3 (R_c/L , R_e/L)	Vol. of	Volume	Mass (gm)
										model	ratio	
										V	V_c / V	
1813	0.20	33.00	54.00	124.50	 w = 3 mm h = 3 mm r = 1 mm	218.62	0.27	0.43	-	4.43	49.35	4.65
1814	0.20	33.00	54.00	124.50	 w = 3 mm h = 3 mm	218.97	0.27	0.43	-	4.46	49.10	4.68
1815	0.20	33.00	54.00	124.50	 $\phi = 3$ mm	220.59	0.27	0.43	-	4.22	52.27	4.43
1816	0.20	33.00	54.00	124.50	 w = 3 mm h = 3 mm	215.92	0.27	0.43	-	4.95	43.62	5.20
1821	0.20	33.00	54.00	124.50	 w = 3 mm h = 3 mm	209.58	0.27	0.43	-	4.60	45.56	5.94

4. วิธีการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองบรรจุกณ์ที่จำลองโดยใช้ CAD ที่ได้จากหัวข้อที่ 3 ซึ่งเป็นไฟล์ชิ้นงาน (Part file) ของโปรแกรม Pro/ENGINEER มีนามสกุล .prt ต้องทำการแปลงไฟล์ให้เป็นไฟล์มาตรฐานของ Standard for the Exchange of Product Data หรือ STEP มีนามสกุล .stp เพื่อให้สามารถนำเข้า (Import) สู่อุปกรณ์ CAE ได้ โดยโปรแกรม CAE ที่ใช้ได้แก่โปรแกรม MSC.Patran 2005 และ MSC.Nastran 2005

กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis หรือ FEA) แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 42 ซึ่งโปรแกรม MSC.Patran 2005 ใช้ในขั้นตอน Pre-Processing และ Post Processing โปรแกรม MSC.Nastran 2005 ใช้ในขั้นตอน Processing โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 42 ลำดับการวิเคราะห์โดยใช้ CAE (สัจจาทิพย์, 2545)

ช่วงการเตรียมข้อมูล (Pre-Processing) เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model หรือ FEM) โดยนำไฟล์ CAD นามสกุล .stp มาสร้างโหนด (Node) บนผิวเพื่อใช้สร้างชิ้นประกอบ (Element) ที่เหมาะสม พร้อมกับกำหนดคุณสมบัติ (Property) ของวัสดุ (Material) แล้วจึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และแรง หรือโหลด (Load) ที่กระทำ เพื่อให้ตรงตามสภาวะการทดสอบจริง

ช่วงการประมวลผล (Processing) ใช้การวิเคราะห์ FEA จากโปรแกรม MSC.Nastran 2005 เพื่อประมวลผล หรือทำการคำนวณจากแบบจำลอง FEM ที่ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และ โหลดไว้แล้วในช่วงการเตรียมข้อมูล

ช่วงหลังการประมวลผล (Post Processing) เป็นการนำผลที่ได้จากการคำนวณแสดงเป็น ระดับชั้นสี (Contour) ของการเปลี่ยนรูปทรง (Deformation) ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เป็นต้น

เงื่อนไข และข้อกำหนดในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ในขั้นตอนของช่วง การเตรียมข้อมูล มีลำดับดังต่อไปนี้

4.1 การสร้าง Mesh

การสร้าง Mesh หรือ เอลิเมนต์ เริ่มจากการกำหนดจุด หรือโหนด (node) ที่กำหนด โดยอ้างอิงจากจากเส้นโค้ง (Curve) และผิว (Surface) ของแบบจำลอง แล้วกำหนดรูปทรงของ เอลิเมนต์ ให้เป็นแบบรูปสี่เหลี่ยม (Quadrilateral หรือ Quad.) ขนาดของเอลิเมนต์ ประมาณ 2.5 ถึง 4.5 mm โดยในบางแบบจำลองอาจมีการสร้างเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular หรือ Tri.) ตาม ความเหมาะสม

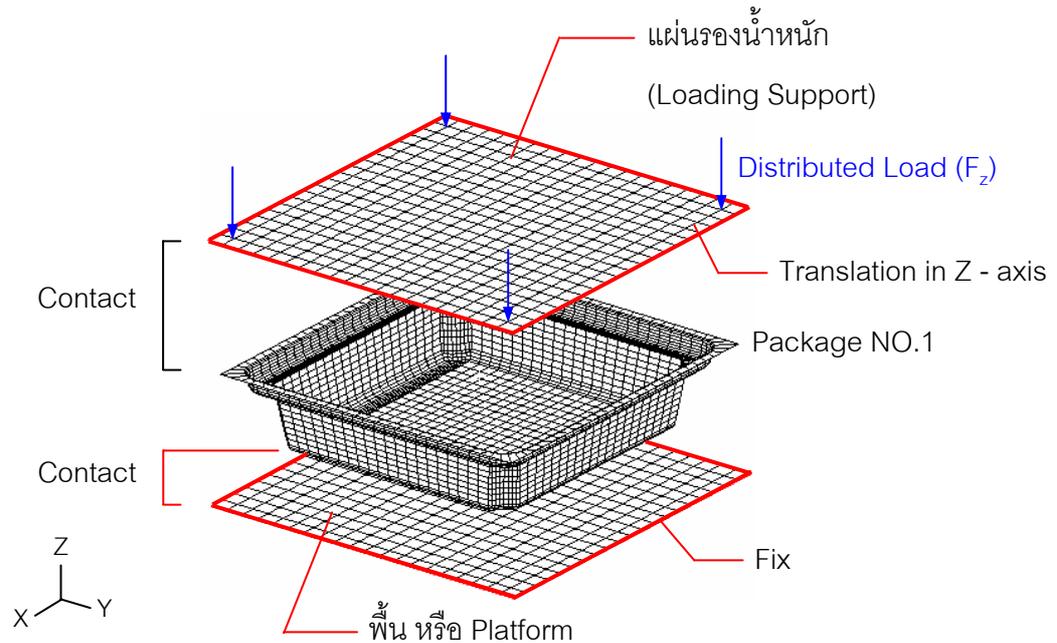
4.2 การกำหนด Constrain

การกำหนด Constrain หรือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เป็นการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของโหนด เฉพาะที่ขอบเขตที่กำหนด เพื่อให้ตรงตามสภาวะ การทดสอบจริง โดยงานวิจัยนี้ พิจารณาการกำหนด Constrain ที่เหมาะสมกับ สภาวะการ ทดสอบภาระด้านบน (Top Load Test)

ความเป็นไปได้ของการกำหนด Constrain ให้ใกล้เคียงสภาพที่เกิดขึ้นจริงบนชิ้นงาน มีดังนี้

4.2.1 การกำหนด Constrain แบบ Contact

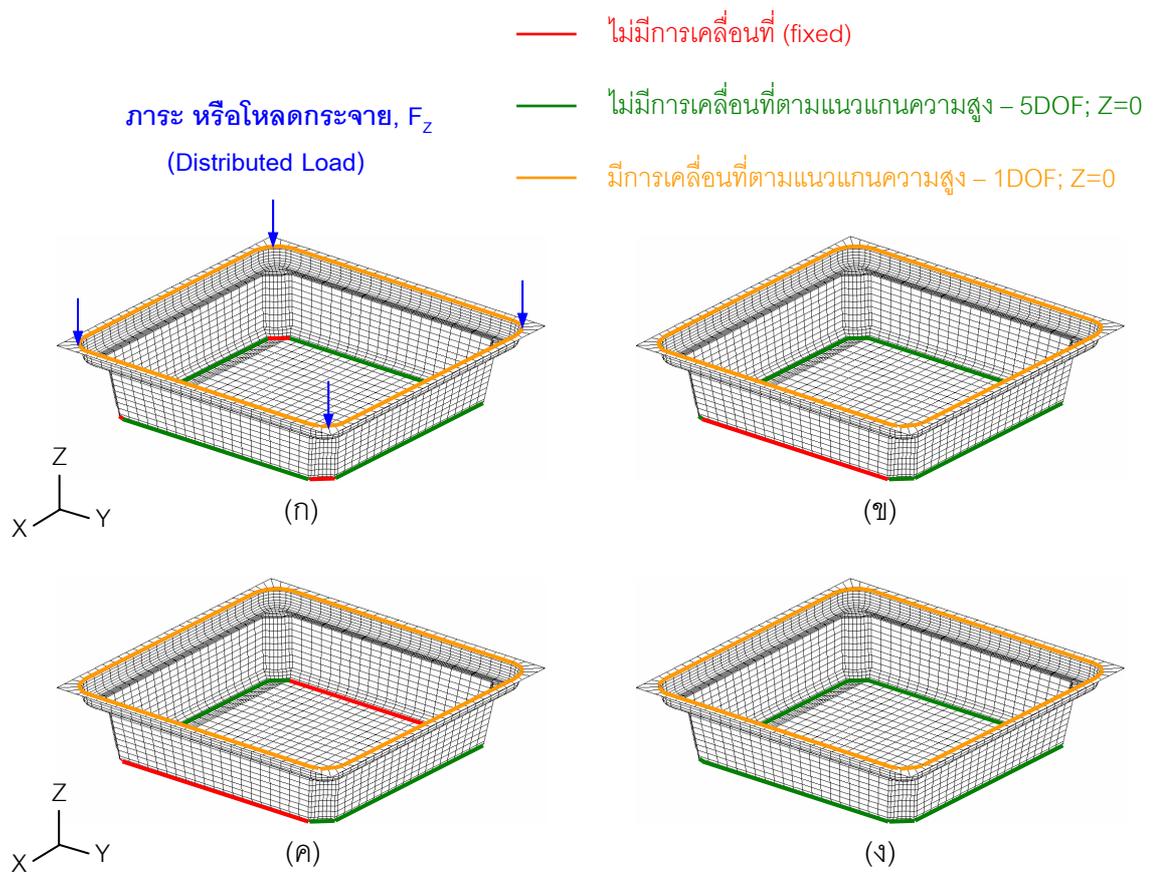
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต แบบ Contact ได้กำหนดให้ทุกโหนดของแผ่นรองน้ำหนักด้านบนสามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะตามแนวแกนของแกนความสูง (Z-axis) และให้ทุกโหนดที่ฐาน (platform) ไม่มีการเคลื่อนที่ (Fixed) ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) แบบ Contact

4.2.2 การกำหนด Constrain แบบ Fixed 4 มุม

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม ดังแสดงในภาพที่ 44ก เป็นการกำหนดให้ทุกโหนดที่มุมทั้ง 4 ของผิวด้านล่างของชิ้นงานที่สัมผัสพื้น (Platform) ไม่มีการเคลื่อนที่ (Fixed) ส่วนโหนดตามขอบผิวด้านล่างของชิ้นงาน กำหนดให้ ไม่มีการเคลื่อนที่ตามแนวความสูง (Z-axis) หรือให้สัมผัสกับผิวของพื้นตลอดเวลา แต่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) ตามแกน X และ Y และแบบเชิงมุม (circular) โดยหมุนได้รอบแกน X, Y และ Z หรือเป็นแบบ 5-DOF สำหรับโหนดตามขอบบน (ที่มีภาระ หรือโหลด-Load) กระทำ กำหนดให้โหนดเหล่านั้นเคลื่อนที่ได้เพียงแกนเดียว คือ ตามแกนความสูง หรือแกน Z ส่วนโหนดที่เหลือทั้งหมดของชิ้นงาน หรือของภาชนะกำหนดให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (6-DOF)



ภาพที่ 44 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ฐานของชิ้นงาน
 (ก) แบบ Fixed 4 มุม (ข) แบบ Fixed 1 ขอบ (ค) แบบ Fixed 2 ขอบ
 (ง) แบบ ไม่ Fixed

4.2.3 การกำหนด Constrain แบบ Fixed 1 ขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 1 ขอบ ดังแสดงในภาพที่ 44ข เป็นการกำหนดให้หนึ่งในสี่ขอบของผิวด้านล่างชิ้นงานเป็นแบบ Fixed (ไม่มีการเคลื่อนที่) ทุกโหนดที่ขอบนี้กำหนดให้เคลื่อนที่ได้อิสระ 5 แกน (เป็น 5-DOF) ยกเว้นไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่ตามแนวแกนความสูง สำหรับโหนดตามขอบบน (ที่มีภาระ หรือโหลดกระทำ) กำหนดให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะแกนตามแนวความสูง หรือแกน Z ส่วนโหนดอื่นๆ ของชิ้นงานหรือภาชนะกำหนดให้เคลื่อนที่ได้อิสระ หรือเป็น 6-DOF

4.2.4 การกำหนด Constrain แบบ Fixed 2 ขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 2 ขอบ ตามแสดงในภาพที่ 44ค เป็นการกำหนดเหมือนกับ แบบ Fixed 1 ขอบ แต่ต่างกันว่า แบบ Fixed 2 ขอบ จะกำหนดให้ 2 ขอบที่ขนานกันของขอบของผิวด้านล่างชิ้นงาน เป็นแบบ Fixed

4.2.5 การกำหนด Constrain แบบ ไม่ Fixed

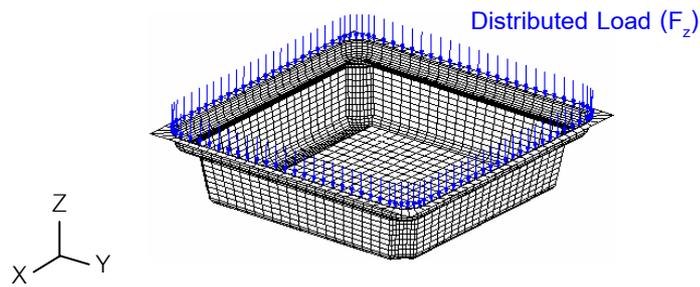
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบไม่ fixed (หรือ Not Fixed) ดังแสดงในภาพที่ 44ง เป็นการกำหนดให้ทุกโหนดทั้ง 4 ขอบของผิวด้านล่างชิ้นงานมี 5-DOF โดย ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกน Z หรือตามความสูง และทุกโหนดที่มีภาระกระทำ กำหนดให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะแกนตามแนวแกน Z

4.3 การกำหนดภาระ

การกำหนดภาระ หรือ โหลด (Load) สำหรับการทดสอบภาระด้านบน (top load test) กำหนดเป็นแรงกระทำตามขอบบนของบรรจุภัณฑ์ในทิศพุ่งลง (ภาพที่ 44ก) หรือในทิศทางลบของแกน Z (หรือ - Z axis) ภาระที่กระทำเป็นแรงคงที่ หรือเป็นการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแบบ Static ขนาดของภาระที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 ขนาด ตั้งแต่ 7.6 N ถึง 37.2 N โดยเพิ่มขนาดภาระทุกๆ 7.6 N งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการกำหนดภาระ 2 วิธี ตามตำแหน่งที่ภาระกระทำ เพื่อพิจารณาการกำหนดภาระที่เหมาะสมกับสถานการณ์การทดสอบภาระด้านบน

4.3.1 การกำหนดภาระแบบกระจาย

การกำหนดภาระแบบกระจาย (Distributed load) ให้มีทิศพุ่งลง (-Z axis) ตามแสดงภาพที่ 45 เป็นการกำหนดภาระให้เป็นการกระจายบนขอบบนของชิ้นงานแบบ load on node คือ กำหนดภาระลงบนทุกๆ โหนดของขอบชิ้นงาน โดยภาระที่กำหนด มีค่าเท่ากับสัดส่วนระหว่างภาระที่ใช้ในการวิเคราะห์ กับจำนวนโหนดที่ขอบบนของชิ้นงาน เช่น กำหนดโหลดมีค่าเท่ากับ 37.2 N กระทำบน 112 โหนด ดังนั้น ภาระที่แต่ละโหนด เท่ากับ 0.332 N



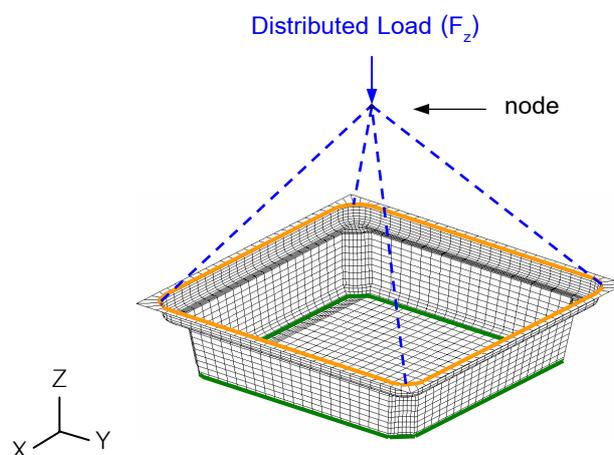
ภาพที่ 45 การกำหนดภาระแบบกระจาย (Distributed Load)

4.3.2 การกำหนดภาระแบบ Contact

วิธีการกำหนดภาระแบบ Contact จะใช้ร่วมกับการกำหนด Constrain แบบ Contact ได้เพียงแบบเดียว โดยกำหนดเป็นแรงกระทำลงบนแผ่นรองน้ำหนัก ในทิศทางพุ่งลง (-Z axis) ตามแสดงในภาพที่ 43

4.3.3 การกำหนดภาระแบบ Multiple Points Constrain

วิธีการกำหนดภาระแบบ Multiple Points Constrain หรือ MPC สามารถใช้ร่วมกับการกำหนด Constrain แบบ Fixed 4 มุม แบบ Fixed 1 ขอบ แบบ Fixed 2 ขอบ และแบบไม่ Fixed โดยวิธี MPC จะกำหนดให้แรงกระทำในทิศ -Z ที่โหนดที่อยู่เหนือชิ้นงาน (ภาพที่ 46) โดยโหนดที่ภาระกระทำจะเชื่อมต่อกับโหนดตามขอบบนของชิ้นงาน



ภาพที่ 46 การกำหนดภาระแบบ Multiple Point Constrain (MPC)

5. วิธีการวิเคราะห์ผลที่ได้จาก CAE

การจำลองการทดสอบภาหะด้านบนใช้ซอฟต์แวร์ CAE ได้แก่ MSC.Patran 2005 สำหรับ pre และ post processing และซอฟต์แวร์ MSC.Nastran 2005 สำหรับการ processing

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ FEA จาก MSC.Nastran สามารถใช้ MSC.Patran เพื่อเลือกแสดงค่าของระยะการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X หรือ δ_x แกน Y หรือ δ_y แกน Z หรือ δ_z และระยะการเปลี่ยนตำแหน่งรวม หรือ Magnitude, δ_T โดย δ_T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta_T = \sqrt{(\delta_x)^2 + (\delta_y)^2 + (\delta_z)^2} \quad (7)$$

ค่าความเค้น และค่าความเครียดที่สามารถแสดงผลได้แก่ Stress Tensor และ Strain Tensor นอกจากนี้ ยังสามารถเลือกผลการคำนวณจากทฤษฎีต่างๆ ได้หลายแบบ เช่น von Mises, Octahedral และ Tresca เป็นต้น ภาพที่ 47 แสดง เมนูแสดงค่าต่างๆ ของความเค้น ความเครียด และระยะเปลี่ยนตำแหน่ง ของผลจากการคำนวณที่ได้จากการจำลองการทดสอบภาหะด้านบนของชิ้นงาน

<ul style="list-style-type: none"> ✓ von Mises X Component Y Component Z Component XY Component YZ Component ZX Component XY Engr. Component YZ Engr. Component ZX Engr. Component Max Principal Mid Principal Min Principal 	<ul style="list-style-type: none"> Hydrostatic 1st Invariant 2nd Invariant 3rd Invariant Tresca Max Shear Octahedral Max Principal 2D Min Principal 2D Tresca 2D Max Shear 2D 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Magnitude X Component Y Component Z Component
STRESS / STRAIN		DISPLACEMENT

ภาพที่ 47 เมนูแสดงค่าต่างๆ ของ stress/strain และ displacement ที่สามารถแสดงผลได้จากโปรแกรม MSC.Patran 2005

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. ผลการทดสอบทางกลของภาชนะด้านบนของบรรจุภัณฑ์

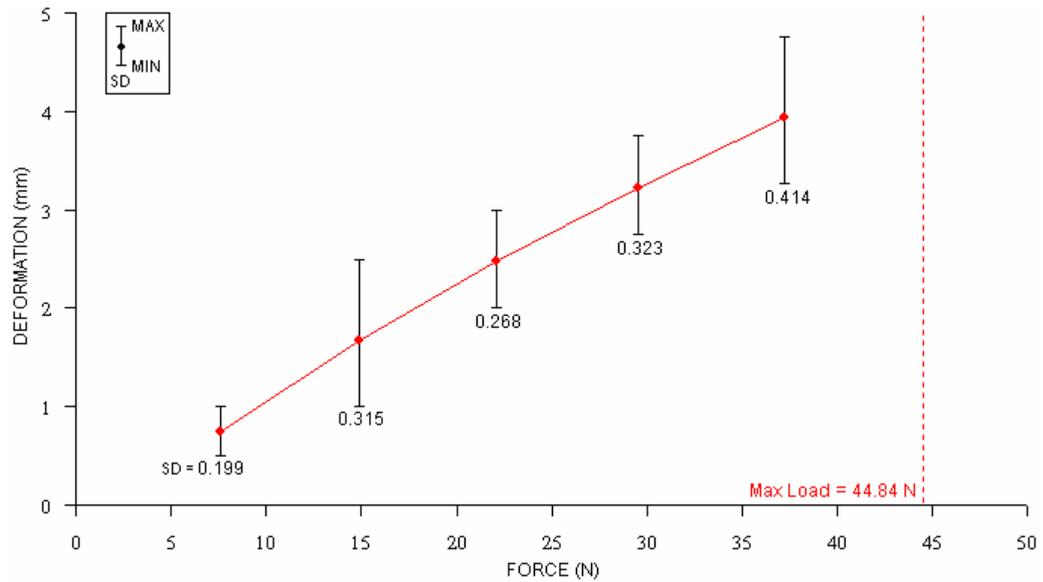
การทดสอบทางกลของภาชนะด้านบนของบรรจุภัณฑ์ แบบ A และแบบ B (ภาพที่ 14) มีวัตถุประสงค์ เพื่อนำผลการวัดระยะยุบของผลิตภัณฑ์จากการทดสอบทางกลนี้ เป็นผลอ้างอิงเพื่อประเมินความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ FEA การทดสอบนี้ ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2234:2000 โดยกำหนดแรง (หรือภาชนะด้านบน) ที่ใช้ทดสอบเริ่มต้นที่ 7.6 N (หรือ 778 gm) และเพิ่มค่าทุกๆ 7.6 N บันทึกค่าระยะยุบ (ตามแกน Z หรือ δ_z) ที่มุมทั้ง 4 ของบรรจุภัณฑ์ จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ แบบละ 5 ชิ้น ภาพแสดงเส้นกราฟของระยะยุบ (Deformation) ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation หรือ SD) ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด คำนวณจาก 4 มุม ของ 5 ชิ้นงานเมื่อเทียบกับ แรง (Force หรือ โหลด) ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A และแบบ B ได้แสดงในภาพที่ 48 และ 49 ตามลำดับ

กราฟของผลการทดสอบของชิ้นงานทดสอบ แบบ A (ภาพที่ 48) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบ และแรง (น้ำหนัก หรือภาชนะด้านบน) เป็นความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแบบเชิงเส้น โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.199 mm ถึง 0.414 mm ในช่วง 7.6 N ถึง 37.2 N ที่ภาระเท่ากับ 37.2 N ระยะยุบเท่ากับ 3.92 mm ชิ้นงานทดสอบเกิดการยุบตัวรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงเป็น 44.8 N เนื่องจากการทรุดพังตัว (collapse) ที่ผนังทั้ง 4 ด้านของชิ้นงาน ดังนั้นภาระที่ทำให้เกิดการยุบจึงอยู่ในช่วง 37.2 N ถึง 44.8 N

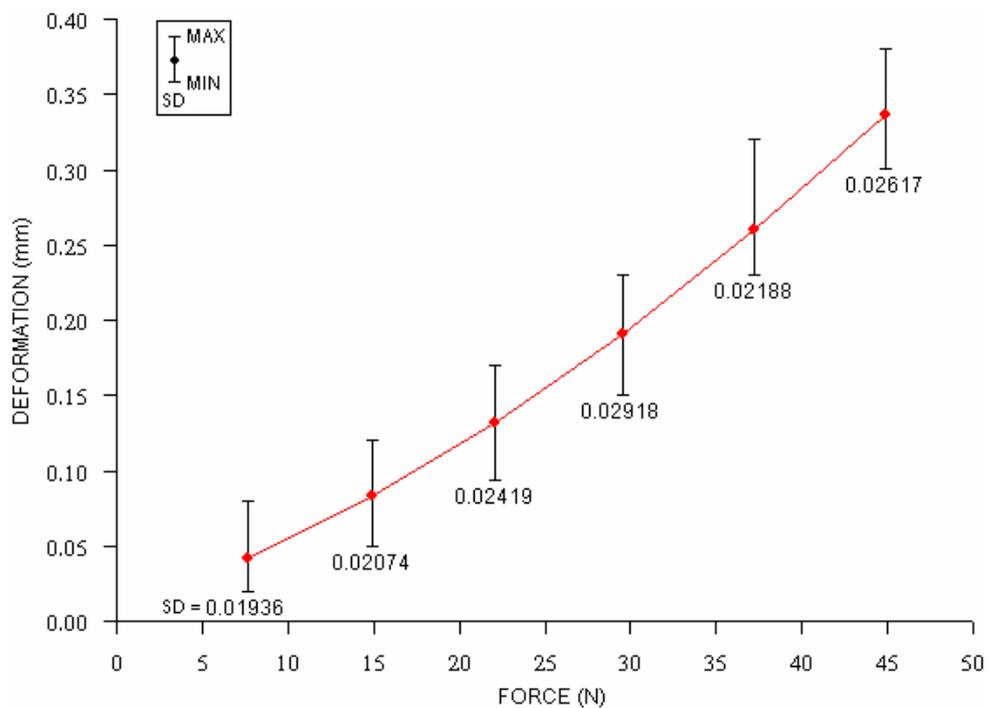
กราฟของผลการทดสอบของชิ้นงานทดสอบแบบ B (ภาพที่ 49) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบ และแรง เป็นความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแบบเชิงเส้น โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.020 mm ถึง 0.029 mm ในช่วงแรงทดสอบจาก 7.6 N ถึง 44.84 N โดยมีระยะยุบที่ 37.2 N เท่ากับ 0.26 mm ชิ้นงานทดสอบเกิดการทรุดพังตัว เมื่อเพิ่มแรงเป็น 52.2 N

จากการทดสอบทางกลของชิ้นงานทดสอบ แบบ A และ B พบว่า แบบ A มีระยะยุบมากกว่าแบบ B (0.26 mm เมื่อเทียบกับ 3.93 mm ที่ภาระเท่ากับ 37.2 N) นอกจากนี้จะพบว่า ระยะยุบก่อนเกิดการทรุดพังของแบบ A มากกว่าแบบ B ถึง 3 เท่า (3.92 mm ที่ 37.2 N ของแบบ

A เมื่อเทียบกับ 0.34 mm ที่ 44.84 N ของแบบ B) โดยเปอร์เซ็นต์การยุบตัว (δ_z/H) ของแบบ A = 13.8 % และแบบ B = 1.03 %



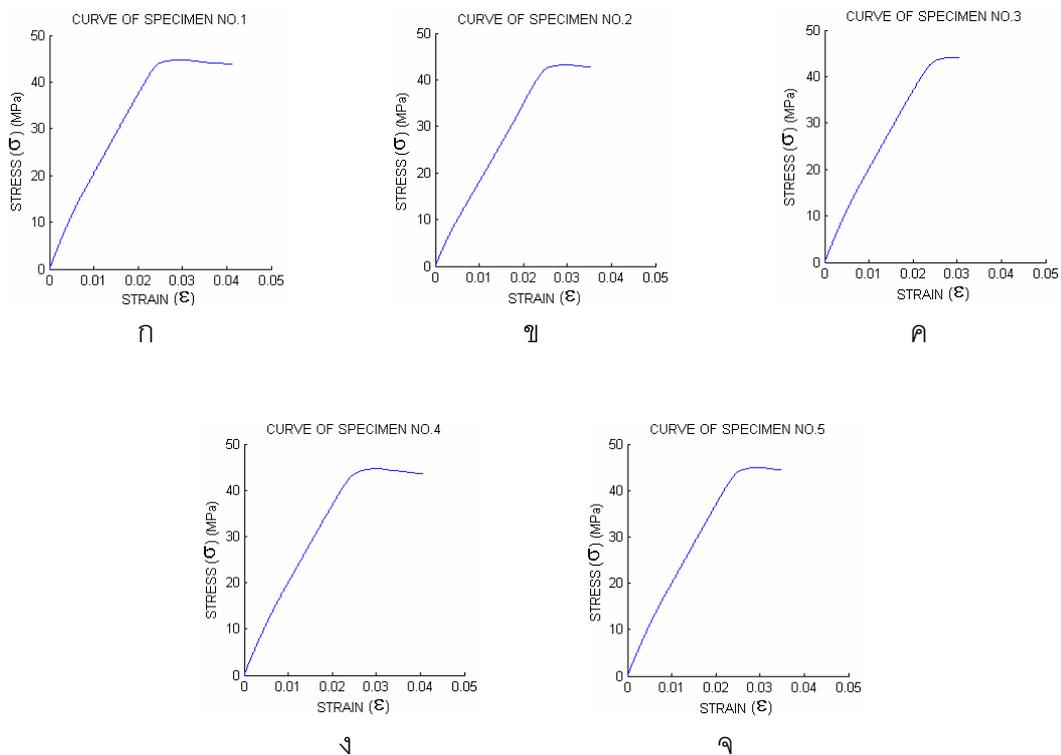
ภาพที่ 48 ระยะยุบตัวจากการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์ แบบ A



ภาพที่ 49 ระยะยุบตัวจากการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์ แบบ B

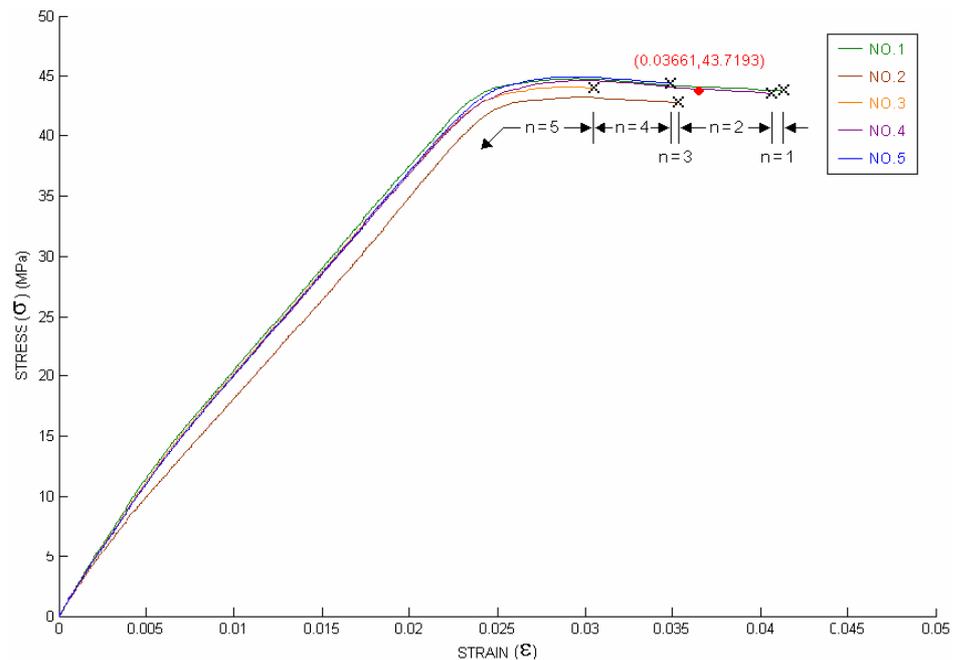
2. ผลการทดสอบสมบัติทางกลของ Polystyrene

การทดสอบสมบัติทางกลของ Polystyrene (PS) ใช้การทดสอบการดึง (Tensile Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ ความเค้นและความเครียด (Stress–Strain diagram หรือ σ - ϵ diagram) โดย PS เป็นวัสดุของบรรจุภัณฑ์ทั้ง แบบ A และ B จำนวนการทดสอบการดึงรวมทั้ง หมด 5 ครั้ง จาก 5 ชิ้นงานทดสอบ ผลการทดสอบได้แสดงในภาพที่ 50ก ถึง 50จ



ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับ ϵ ของชิ้นงานทดสอบ (specimen) ทั้ง 5 ชิ้น (ภาพ ก ถึง จ ตามลำดับ)

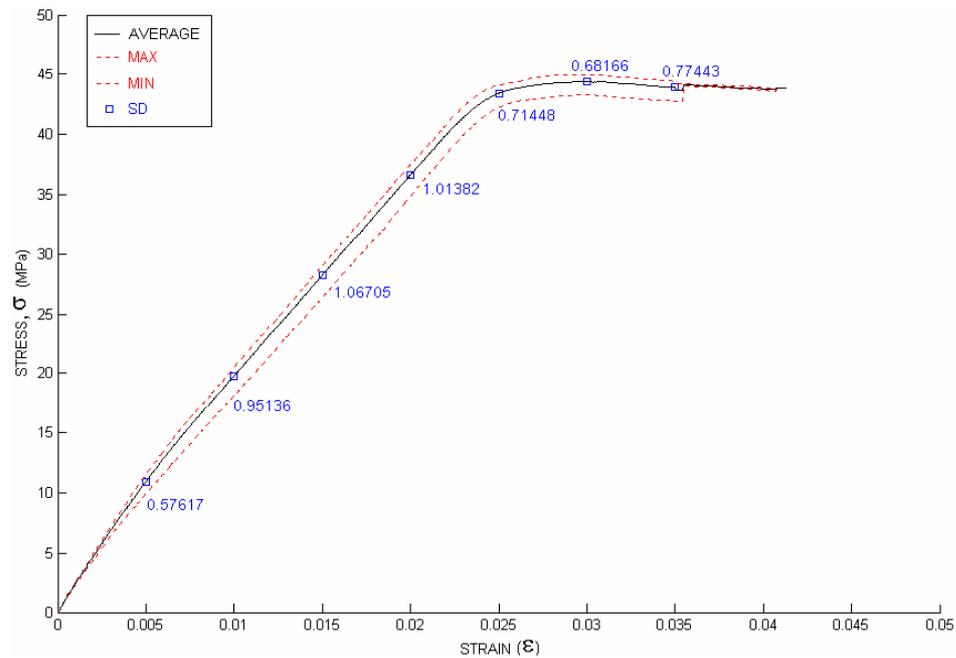
การคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเค้นแตก (Breaking Stress, $\sigma_{b,avg}$) และของความเครียดแตก (Breaking Strain, $\epsilon_{b,avg}$) จากผลการทดสอบการดึงของ 5 ชิ้นงานทดสอบ สามารถระบุเป็น พิกัดแสดงตำแหน่ง (จุดวงกลมแดง) ดังแสดงในภาพที่ 51 โดยมีค่าเฉลี่ย $\sigma_{b,avg} = 43.71$ MPa $\epsilon_{b,avg} = 0.0366$ ค่า SD ของ $\sigma_{b,avg}$ เท่ากับ 0.7751 MPa และของ $\epsilon_{b,avg}$ เท่ากับ 0.5167



ภาพที่ 51 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ σ และ ϵ ของทั้ง 5 ชิ้นงานทดสอบ พร้อมแสดงตำแหน่งของค่า $\sigma_{b,avg}$ และ $\epsilon_{b,avg}$ (จุดวงกลมแดง)

จากผลการทดสอบการดึงทั้ง 5 ครั้ง สามารถสรุปเป็นกราฟของค่าเฉลี่ยแบบ ensemble average ค่าสูงสุด (max) ค่าต่ำสุด (min) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของความเค้น เมื่อเทียบกับความเครียด ได้ตามแสดงใน ภาพที่ 52 โดยตารางที่ 9 แสดงข้อมูลของค่าความเค้น (Engineering Stress) และความเครียดจากการทดสอบการดึง

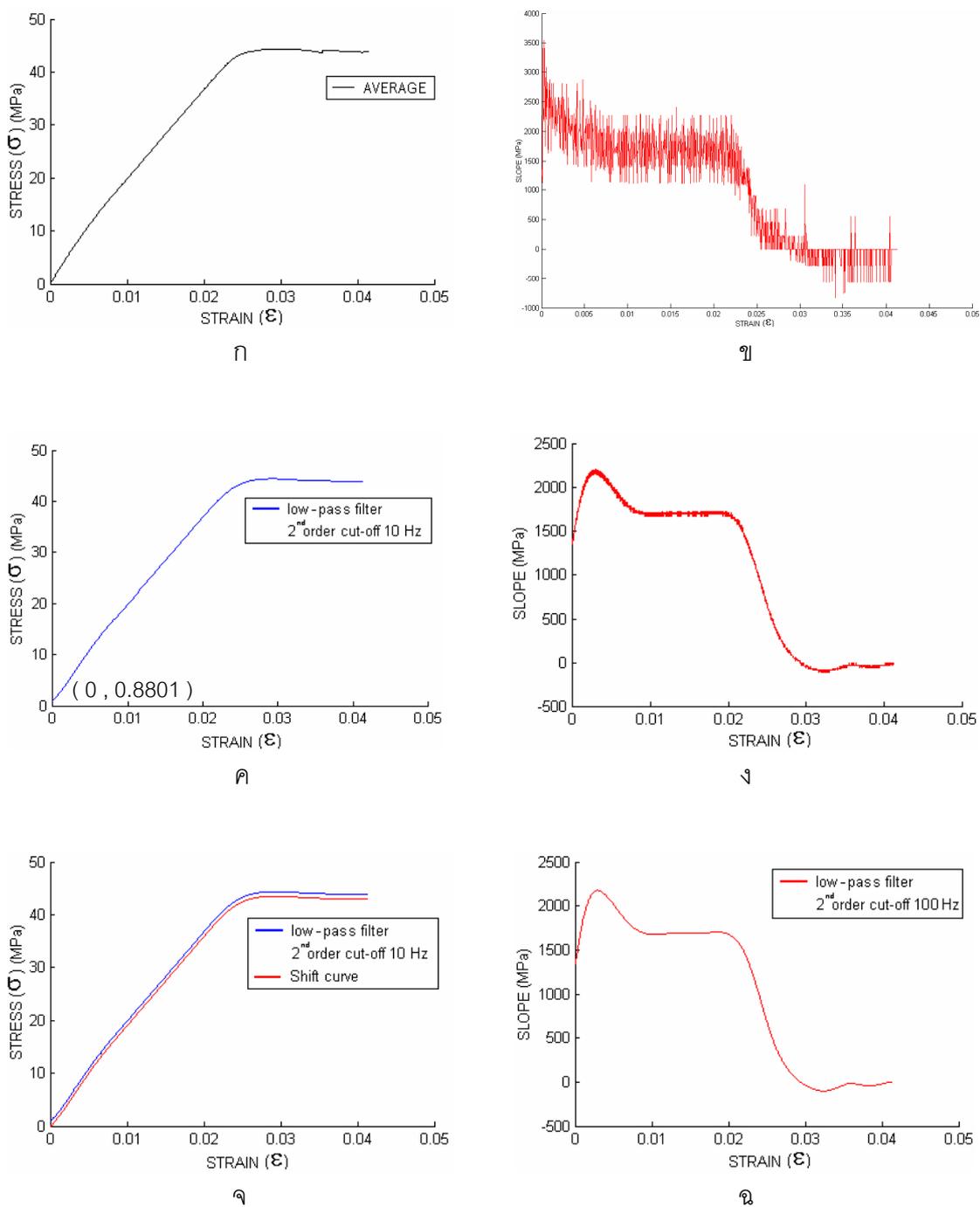
การคำนวณเพื่อหาค่า Young's Modulus, E ของ PS ได้ดำเนินการโดยเริ่มจาก การคำนวณความชัน (Slope) ของกราฟ σ - ϵ ของภาพที่ 53ก ผลการคำนวณค่าความชันได้แสดงใน ภาพที่ 53ข ภาพนี้แสดงการกระจายของค่าความชัน (หรือค่า E) การกระจายนี้เกิดจาก ความไม่ต่อเนื่องของค่า σ ซึ่งมีลักษณะคล้ายการรบกวนแบบ noise ที่มีความถี่สูง เพื่อลดการกระจายของค่าความชัน ข้อมูลของ σ - ϵ กราฟของภาพที่ 53ก ได้นำไปกรอง off-line แบบ Low-pass filter โดยใช้โปรแกรม MATLAB การกรองนี้ใช้ 2nd order Butterworth filters ที่ความถี่ cut-off เท่ากับ 10 Hz ภาพที่ 53ค แสดงกราฟ σ - ϵ ที่ผ่านการกรองแล้ว และกราฟค่าความชันได้แสดงใน ภาพที่ 53ง



ภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ensemble average ของค่า σ เทียบกับ ϵ เส้นประแสดงค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำที่สุด (Min) และตัวเลขระบุค่า ensemble standard deviation ของความเค้น σ

ตารางที่ 9 ค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จากผลการทดสอบการดึงของ PS

ϵ	STRESS (MPa)					Avg (MPa)	SD (MPa)
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5		
0.005	11.4970	9.9602	11.1659	11.0156	10.9851	10.9248	0.5762
0.010	20.4988	18.1226	20.2127	20.0328	20.1066	19.7947	0.9514
0.015	29.0115	26.3823	28.7379	28.5625	28.6397	28.2668	1.0670
0.020	37.4752	34.8849	37.0165	36.8486	37.0256	36.6502	1.0138
0.025	44.0798	42.2699	43.3000	43.4287	43.9403	43.0437	0.7145
0.030	44.7647	43.2903	44.0485	44.6472	44.9702	44.3442	0.6817
0.035	44.2755	42.7558	-	44.1598	44.4307	43.9055	0.7744

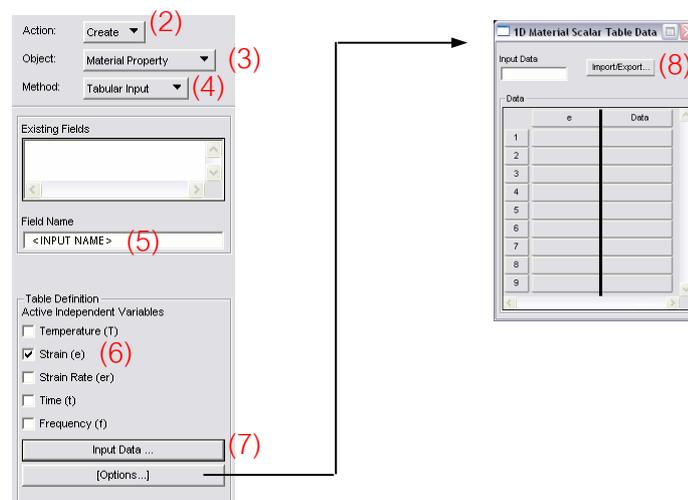


ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{avg} กับ ϵ_{avg} (ภาพ ก ค และฉ) และค่าความชัน (slope) กับ ϵ_{avg} (ภาพ ข ง และฉ)

เนื่องจากการกรองความถี่แบบ Low-pass filter ของกราฟ σ - ϵ เป็นผลให้ค่า offset เพิ่มขึ้น (เส้นบนของภาพที่ 53จ) กราฟ σ - ϵ นี้จึงต้องทำการกำจัด offset ซึ่งได้เป็นกราฟเส้นล่างของภาพที่ 53จ กราฟ σ - ϵ ที่ offset แล้วได้นำไปคำนวณค่าความชัน แล้วค่าความชันที่ได้ทำการกรองด้วย 2nd order Butterworth Low-pass filter ที่ cut off เท่ากับ 100 Hz ผลจากการกรองนี้ ซึ่งเป็นค่า Young's Modulus ได้แสดงในภาพที่ 53ด ดังนั้นค่า E ของ PS ที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 1695.036 MPa และ Yield Stress เท่ากับ 42.3759 MPa

ค่า σ - ϵ ของภาพที่ 53จ และค่าความชันของภาพที่ 53ด ได้นำมาใช้เป็นข้อมูลเพื่อป้อนในสมบัติของวัสดุ ของซอฟต์แวร์ MSC.PATRAN (ภาพที่ 54) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. กดคลิกที่ Fields []
2. ที่ Action เลือก Create
3. ที่ Object เลือก Material Property
4. ที่ Method เลือก Tabular Input
5. ใส่ชื่อในช่อง Field Name
6. ที่ Table Definition เลือกที่ Strain (ϵ)
7. กด Input Data ...
8. กด Import / Export เลือกไฟล์ข้อมูล σ - ϵ สกุล .CSV
10. กด OK และกด Apply



ภาพที่ 54 แสดงการนำค่า σ - ϵ มาป้อนเข้าซอฟต์แวร์ MSC.Patran

3. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบบรรจุภัณฑ์แบบ A และ B

3.1 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ของบรรจุภัณฑ์แบบ A

การใช้ FEA จำลองการทดสอบภาระด้านบน ของบรรจุภัณฑ์แบบ A ดำเนินการโดยกำหนดให้แรงทดสอบเท่ากับของการทดสอบทางกล (นั่นคือ 7.64 N ถึง 37.20 N เพิ่มทุกๆ 7.6 N) ในหัว ข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบระยะยุบเมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบต่างๆ จำนวน 5 แบบ ได้แก่ แบบ contact, Fixed 4 มุม, Fixed 1 ขอบ, Fixed 2 ขอบ และแบบ ไม่ Fixed และการกำหนดภาระ 3 รูปแบบคือ แบบ contact แบบภาระกระจาย (distributed) และแบบ MPC การกำหนด เอลิเมนต์ ได้กำหนดให้เป็นแบบ shell ความหนา 0.2 mm โดยเป็นเอลิเมนต์รูปทรง Quad ประกอบด้วย 3805 โหนด (node) และ 3752 เอลิเมนต์ และให้สมบัติทางกลของ PS เป็นแบบ Isotropic และ σ vs ϵ เป็น nonlinear แบบ Elastoplastic ตัวอย่างภาพแสดงผลการวิเคราะห์จาก FEA เป็นระดับขั้นสีของการเปลี่ยนรูปทรง หรือระยะยุบรวม (magnitude of deformation) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y หรือ δ_y การขยายตัวด้านข้างตามแกน X หรือ δ_x ระยะยุบตามแกน Z หรือ δ_z ค่าความเค้นแบบ Von Mises (σ) และความเครียด (ϵ) ที่ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N ของเงื่อนไขขอบเขต และภาระรวม 9 แบบ ได้แสดงในภาพที่ 55 ถึง 63

ในการเปรียบเทียบผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ระยะยุบตามแกน Z ของ FEA (δ_z) คือ ค่าที่ได้จากข้อมูลจากภาพ ข ของภาพที่ 55 ถึง 63 ทั้ง 9 ภาพนี้พบว่า ทุกเงื่อนไขมีค่าสูงสุดของ δ_z เกิดขึ้นที่ฐาน แต่ระยะ δ_z ที่ใช้เปรียบเทียบกับการทดสอบทางกล คือ ระยะยุบตามขอบด้านบนของชิ้นงาน

การเปรียบเทียบระยะยุบ (ตามแนวแกนความสูง Z-axis หรือ δ_z) ระหว่างผลจาก FEA กับผลการทดสอบทางกลของบรรจุภัณฑ์แบบ A ได้สรุปผลในตารางที่ 10 และได้แสดงเป็นกราฟในภาพที่ 64 โดยระยะยุบ δ_z เป็นค่าเฉลี่ยของมุมทั้ง 4 ของบรรจุภัณฑ์

ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($e\%$) ของผล FEA กับการทดสอบทางกล จากระยะยุบ (δ_z) กับแรงทดสอบ (F) ที่เงื่อนไขการจำลองภาระ และเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ รวมถึงผลสรุปของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน e_{avg} และค่าเฉลี่ยความ

คลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($|e_{avg}|$) ค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Min) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ได้แสดงในตารางที่ 11 และพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $e_{\%}$ กับ F ได้ตามภาพที่ 65 กราฟค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน ($|e|_{\%}$) ได้แสดงในภาพที่ 66 โดยค่าความคลาดเคลื่อน (error หรือ e) คำนวณจากค่าระยะยวบจากการทดสอบทางกล (δ_{EXP}) และค่าระยะยวบจากการวิเคราะห์ FEA (δ_{FEA}) ได้โดยสมการ

$$e = \delta_{EXP} - \delta_{FEA} \quad (10)$$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($e_{\%}$) คำนวณจาก

$$e_{\%} = \frac{\delta_{EXP} - \delta_{FEA}}{\delta_{EXP}} (100\%) \quad (11)$$

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน e_{AVG} คำนวณจาก

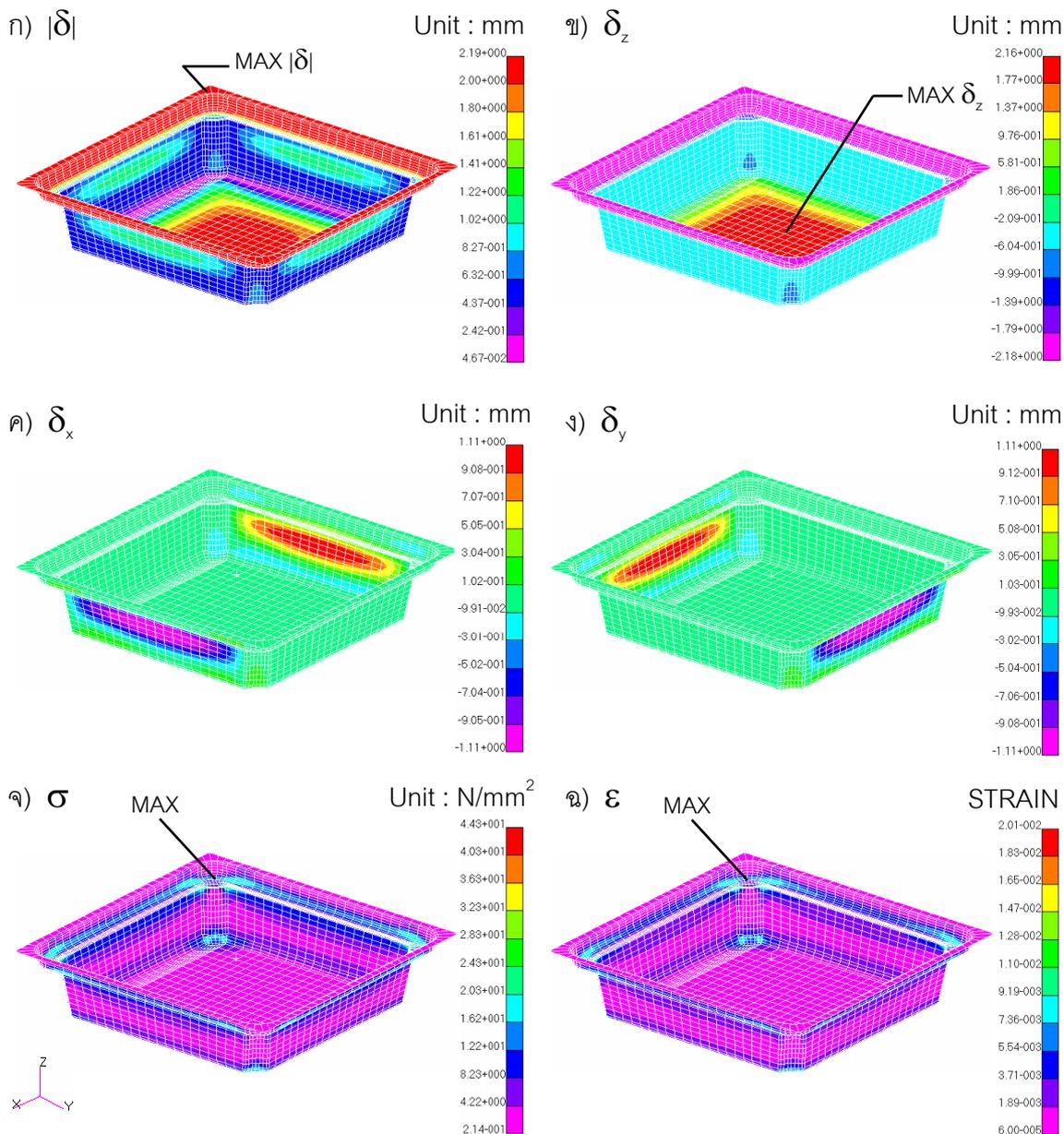
$$e_{AVG} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (12)$$

โดย n คือ จำนวนข้อมูล และ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

ค่าสัมบูรณ์ (Absolute value) ของค่าเฉลี่ย $|e|_{AVG}$ คำนวณจาก

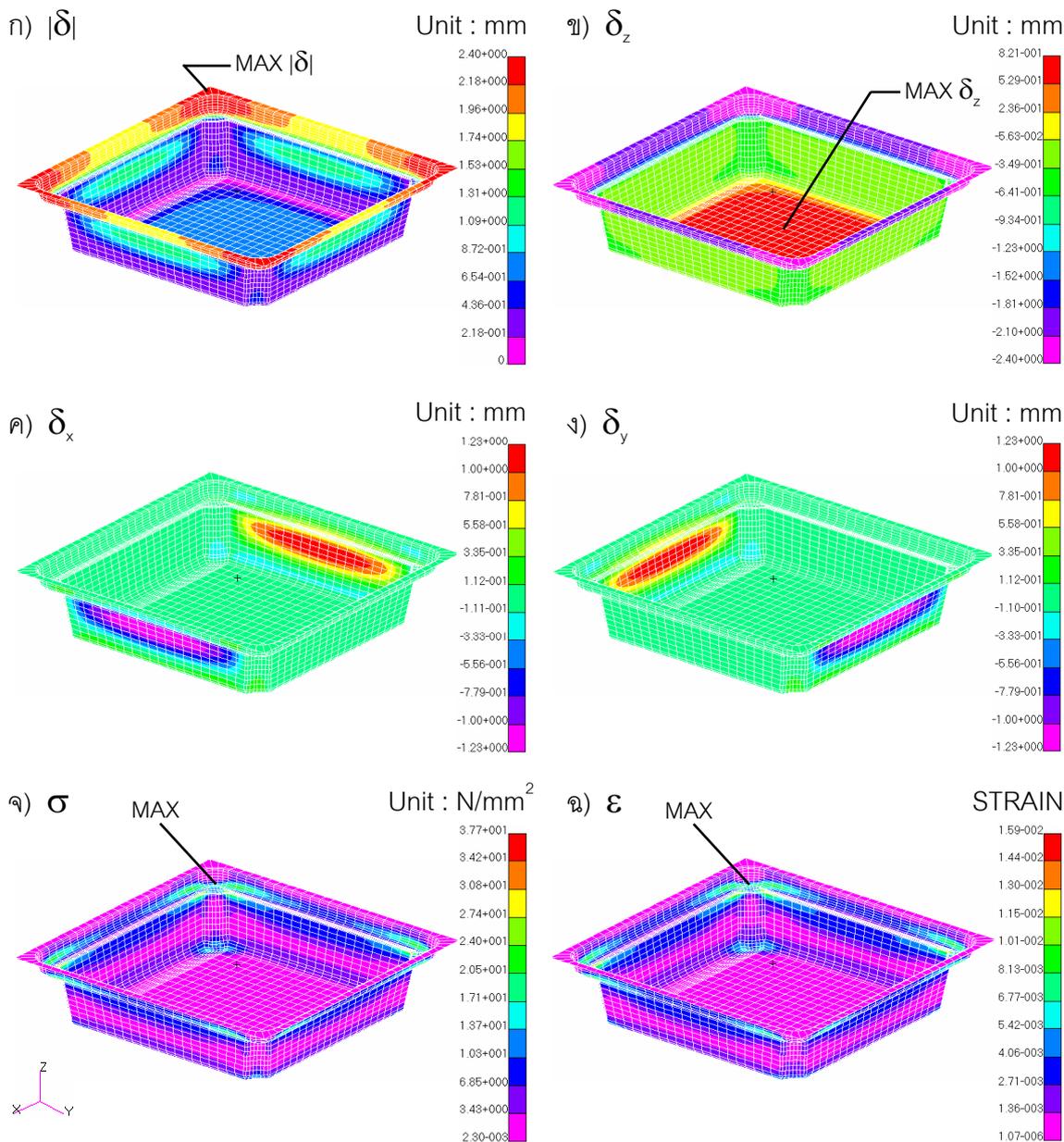
$$|e|_{AVG} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (13)$$

Constrain = Contact: F = 22.06 N (Contact)



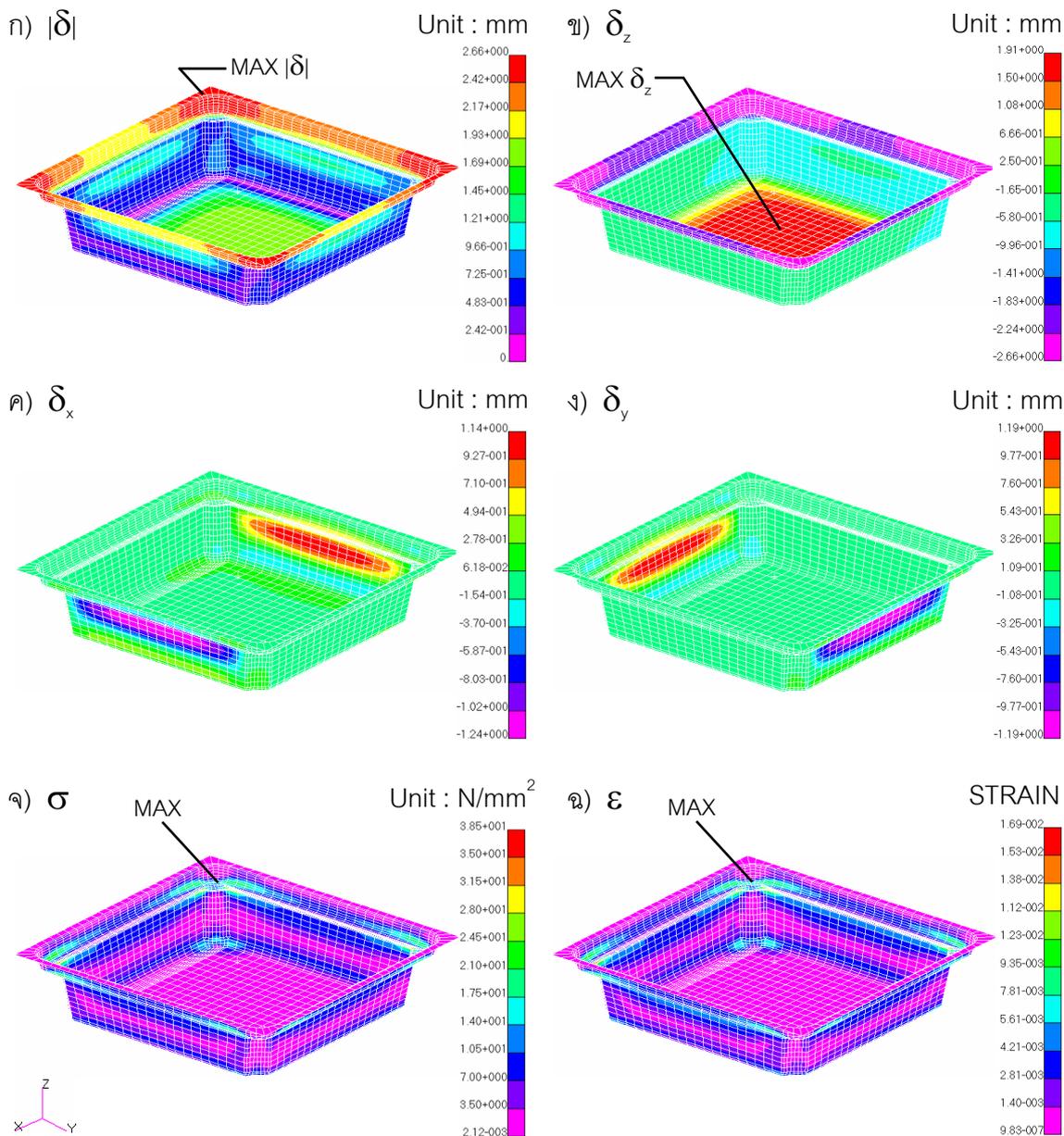
ภาพที่ 55 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบ Contact และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Contact โดยภาพ (ก) ระยะยุบ
 รวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X
 (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (Distributed)



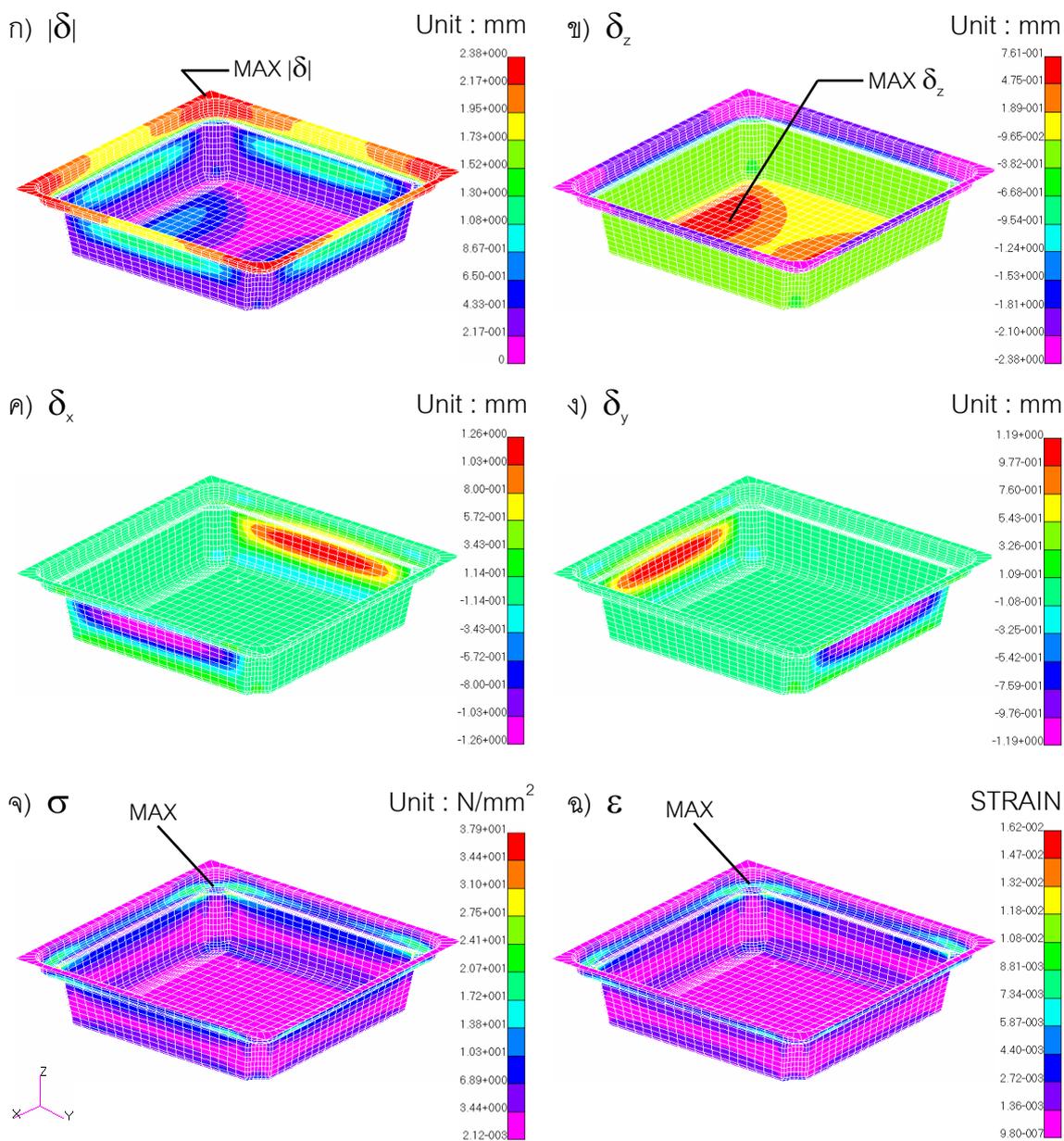
ภาพที่ 56 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 1 ขอบ: F = 22.06 N (Distributed)



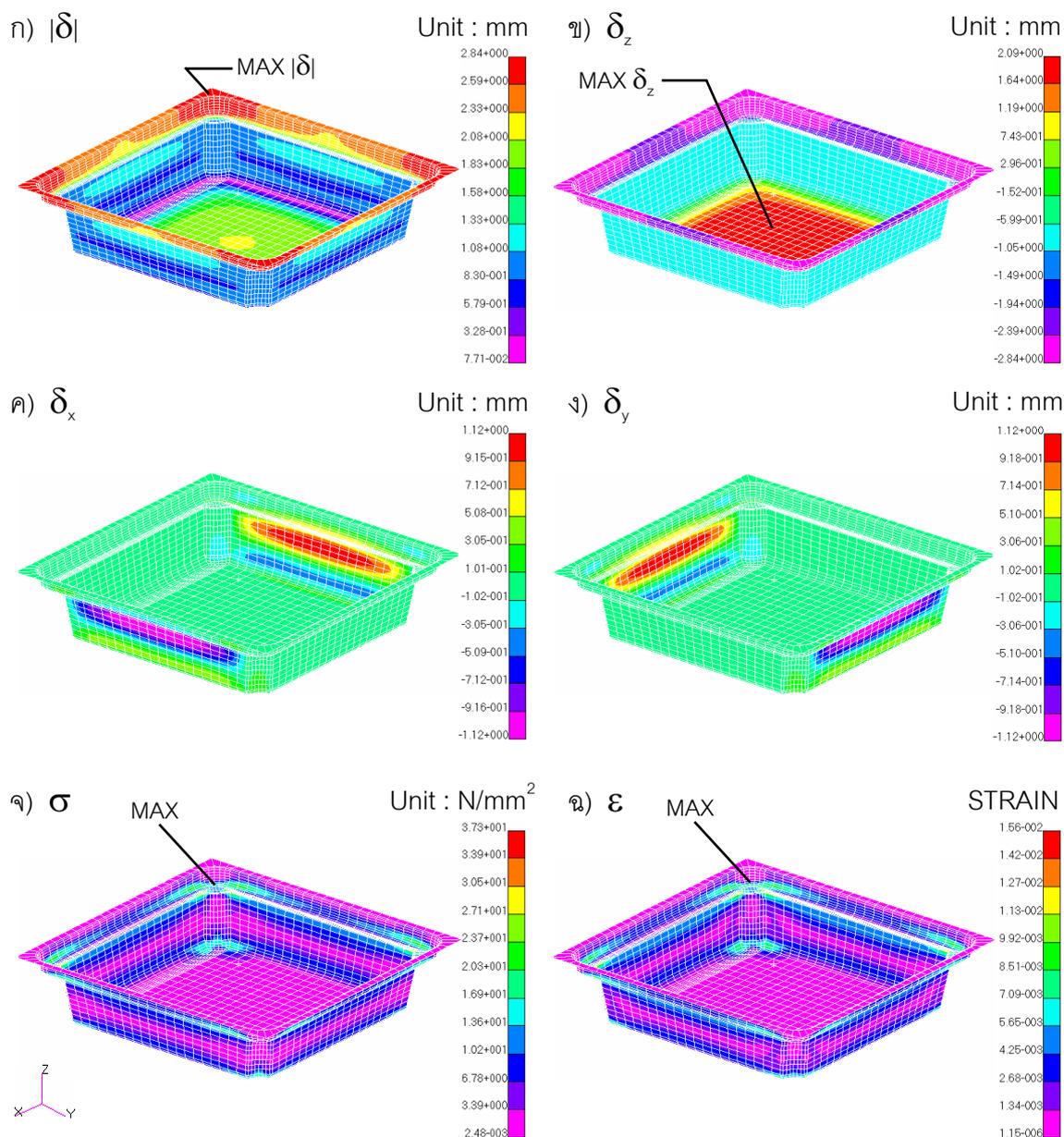
ภาพที่ 57 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 1 ขอบ โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 2 ขอบ: F = 22.06 N (Distributed)



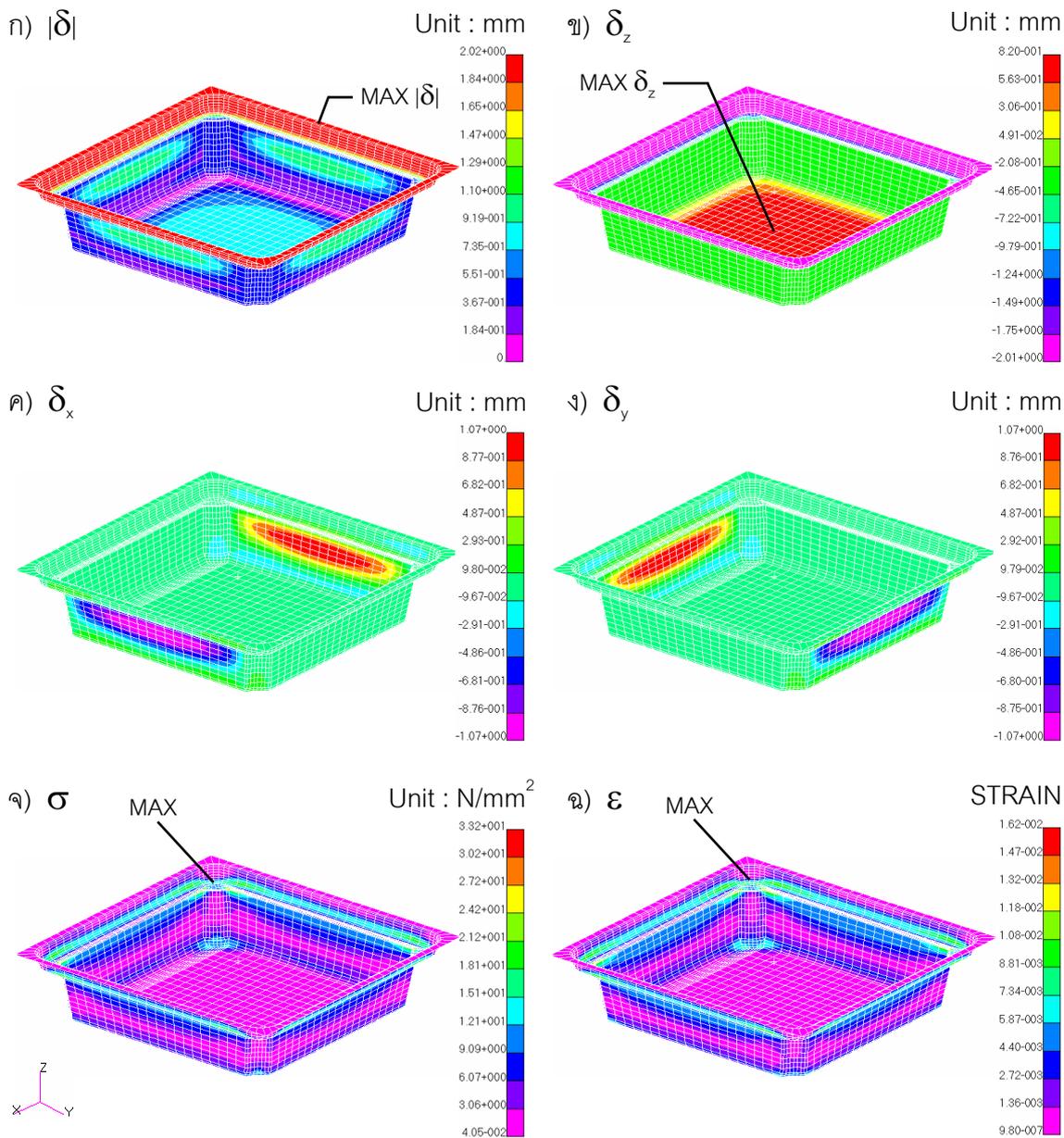
ภาพที่ 58 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 2 ขอบ โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = ไม่ Fixed: F = 22.06 N (Distributed)



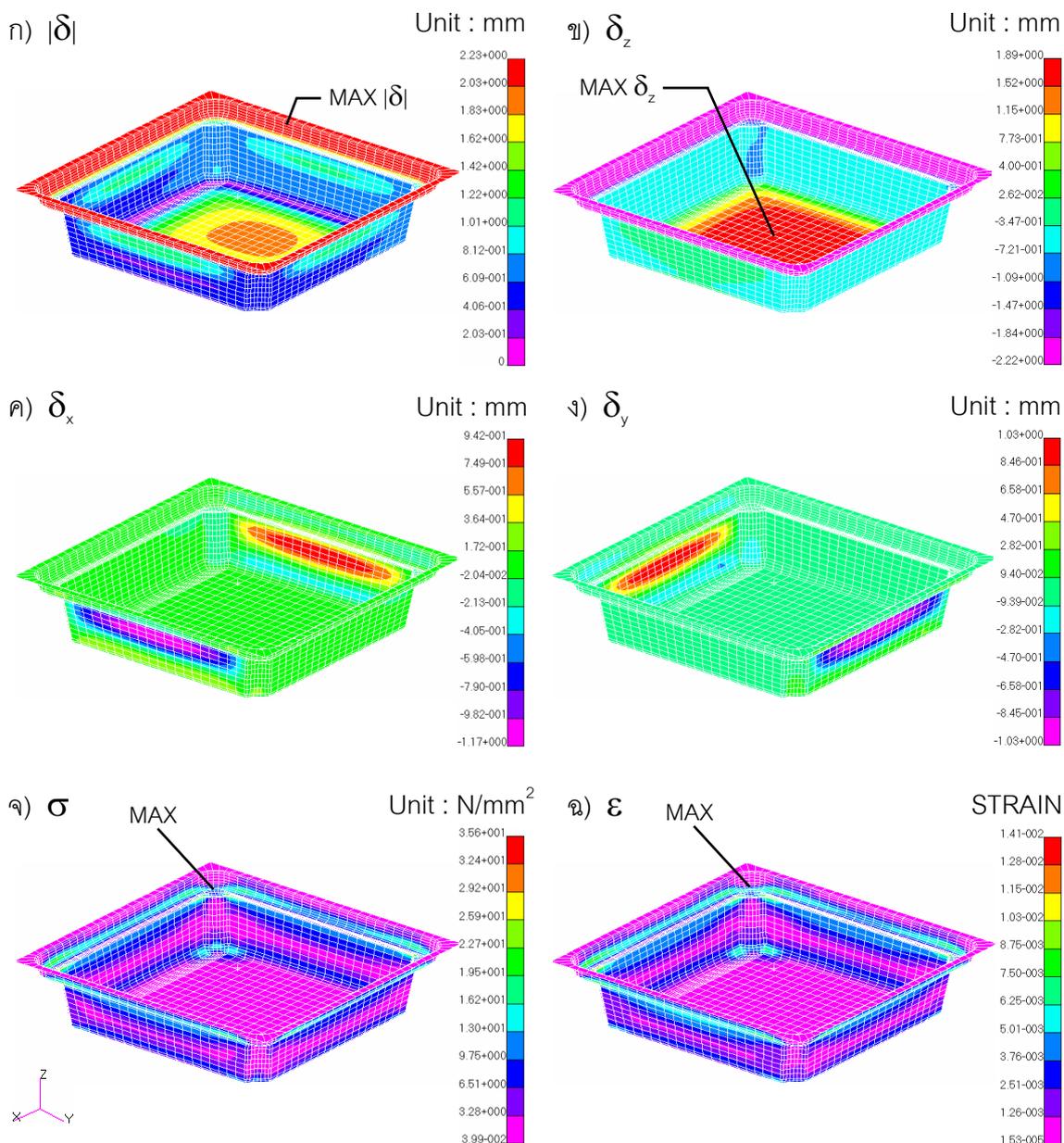
ภาพที่ 59 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ ไม่ Fixed โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (MPC)



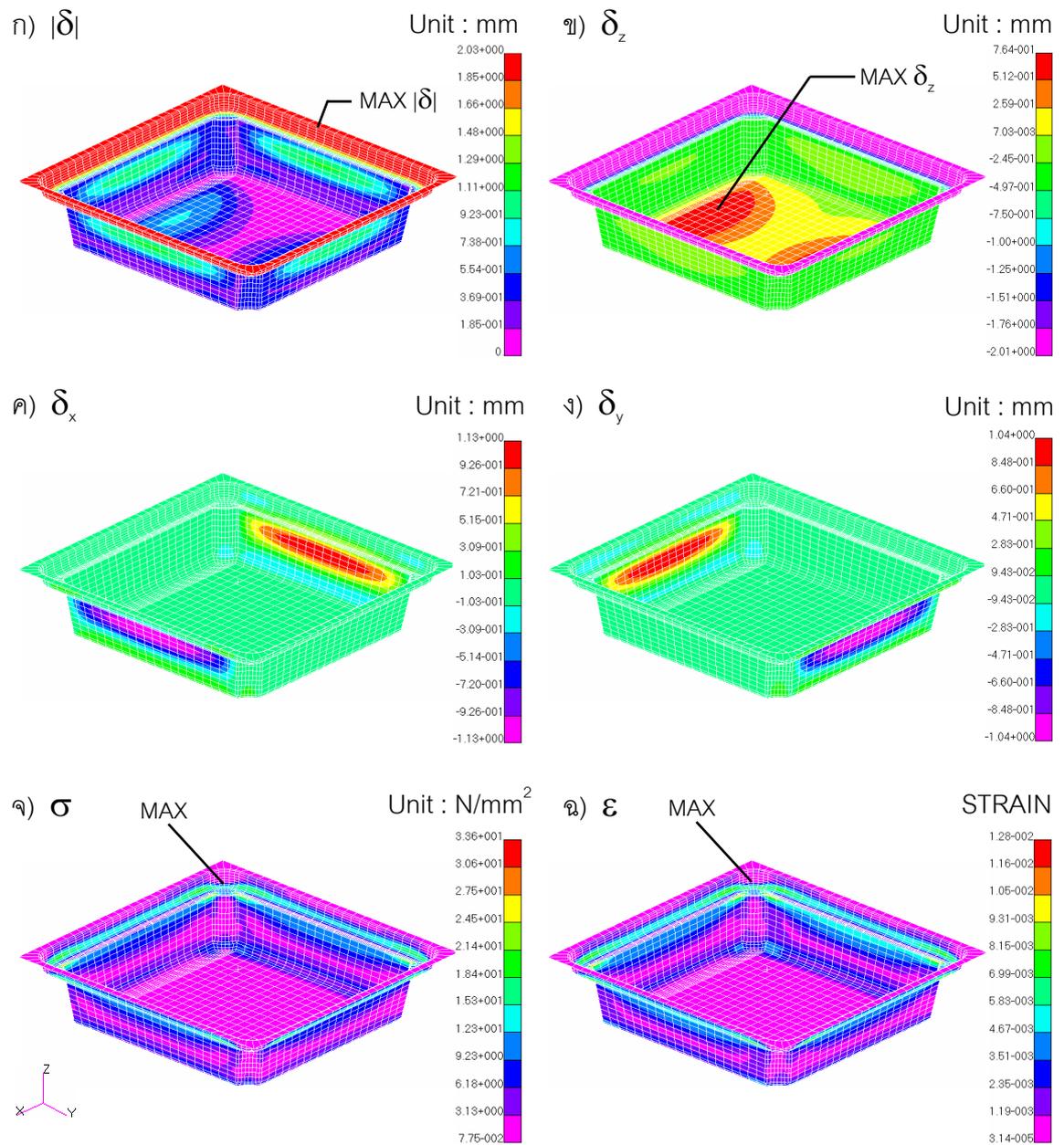
ภาพที่ 60 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 1 ขอบ: F = 22.06 N (MPC)



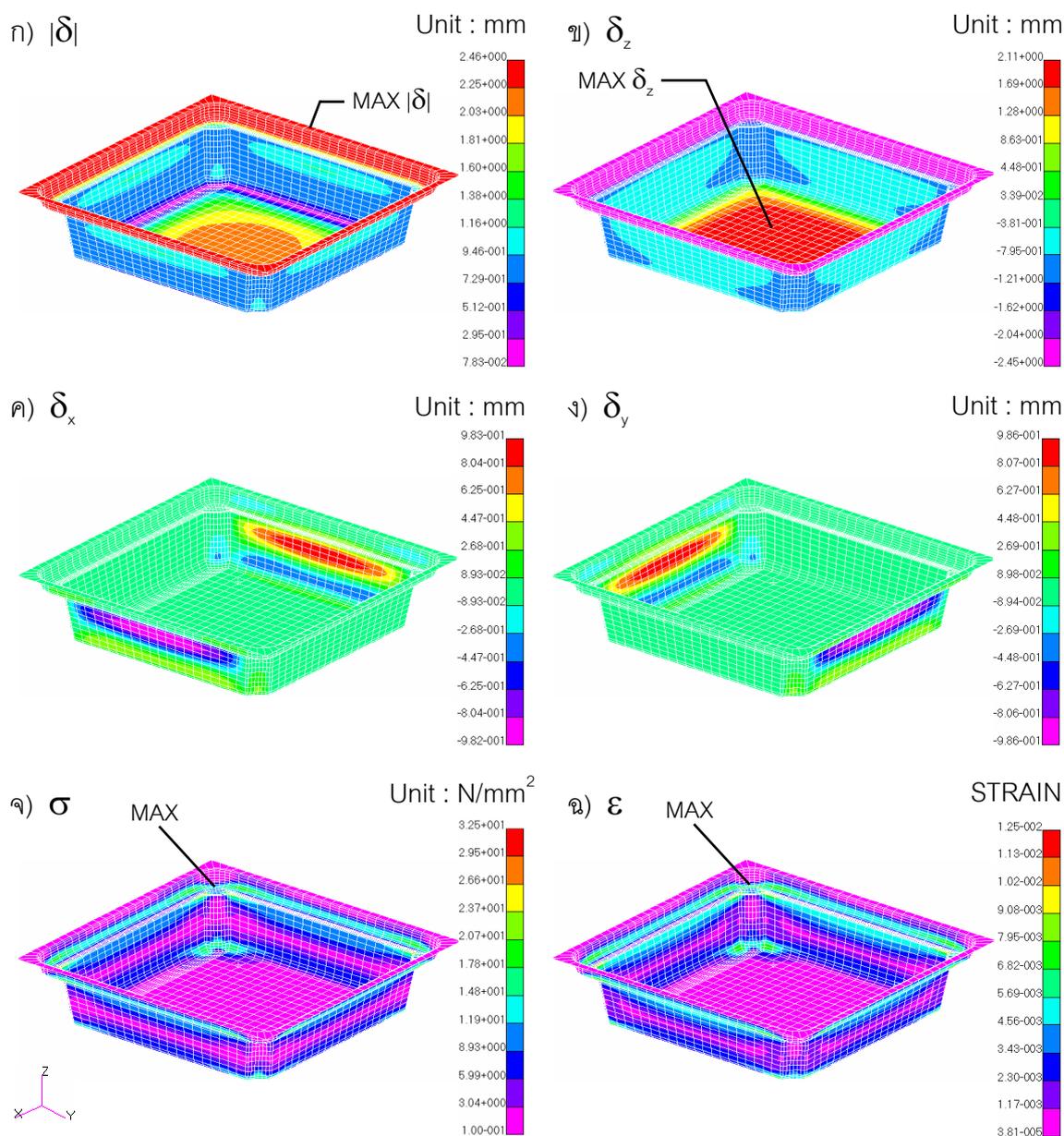
ภาพที่ 61 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 1 ขอบ โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 2 ขอบ: F = 22.06 N (MPC)



ภาพที่ 62 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 2 ขอบ โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

Constrain = ไม่ Fixed: F = 22.06 N (MPC)



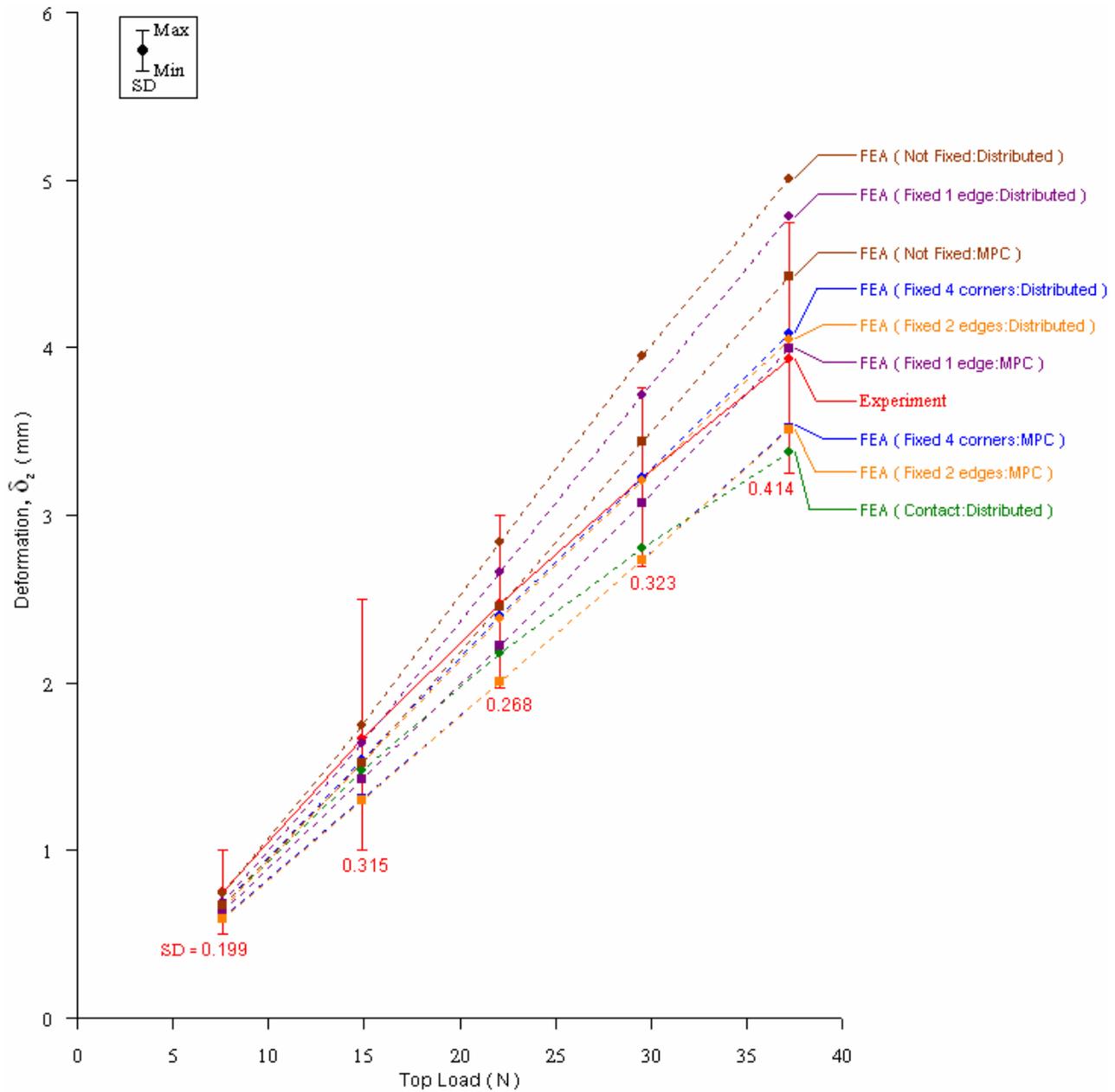
ภาพที่ 63 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดยภาระเป็นแบบ MPC และเงื่อนไขขอบเขตแบบ ไม่ Fixed โดยภาพ (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้างตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบระยะขยับของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ตามแกน Z ของผลการทดสอบทางกล (δ_{EXP}) และผลจาก FEA (δ_{FEA}) ที่เงื่อนไข Constrain ต่างๆ

EXPERIMENT		δ_z by Finite Element Analysis (FEA)									
FORCE (N)	δ_{EXP} (mm)	Contact		Fixed		ไม่ Fixed		Fixed		ไม่ Fixed	
		4 มุม:(D)*	1 ขอบ:(D)*	Fixed	Fixed	4 มุม:(MPC)**	(D)*	ไม่ Fixed	Fixed	ไม่ Fixed	Fixed
		δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)	δ_{FEA} (mm)
7.64	0.75	0.67	0.69	0.65	0.74	0.60	0.63	0.59	0.68		
14.93	1.67	1.48	1.64	1.52	1.75	1.31	1.42	1.30	1.52		
22.06	2.47	2.18	2.66	2.38	2.84	2.01	2.22	2.01	2.45		
29.52	3.22	2.80	3.72	3.21	3.95	2.73	3.07	2.73	3.44		
37.20	3.93	3.38	4.78	4.05	5.01	3.52	3.99	3.51	4.42		

* D = Distributed Load

** MPC = Multiple Points Constrain Loading



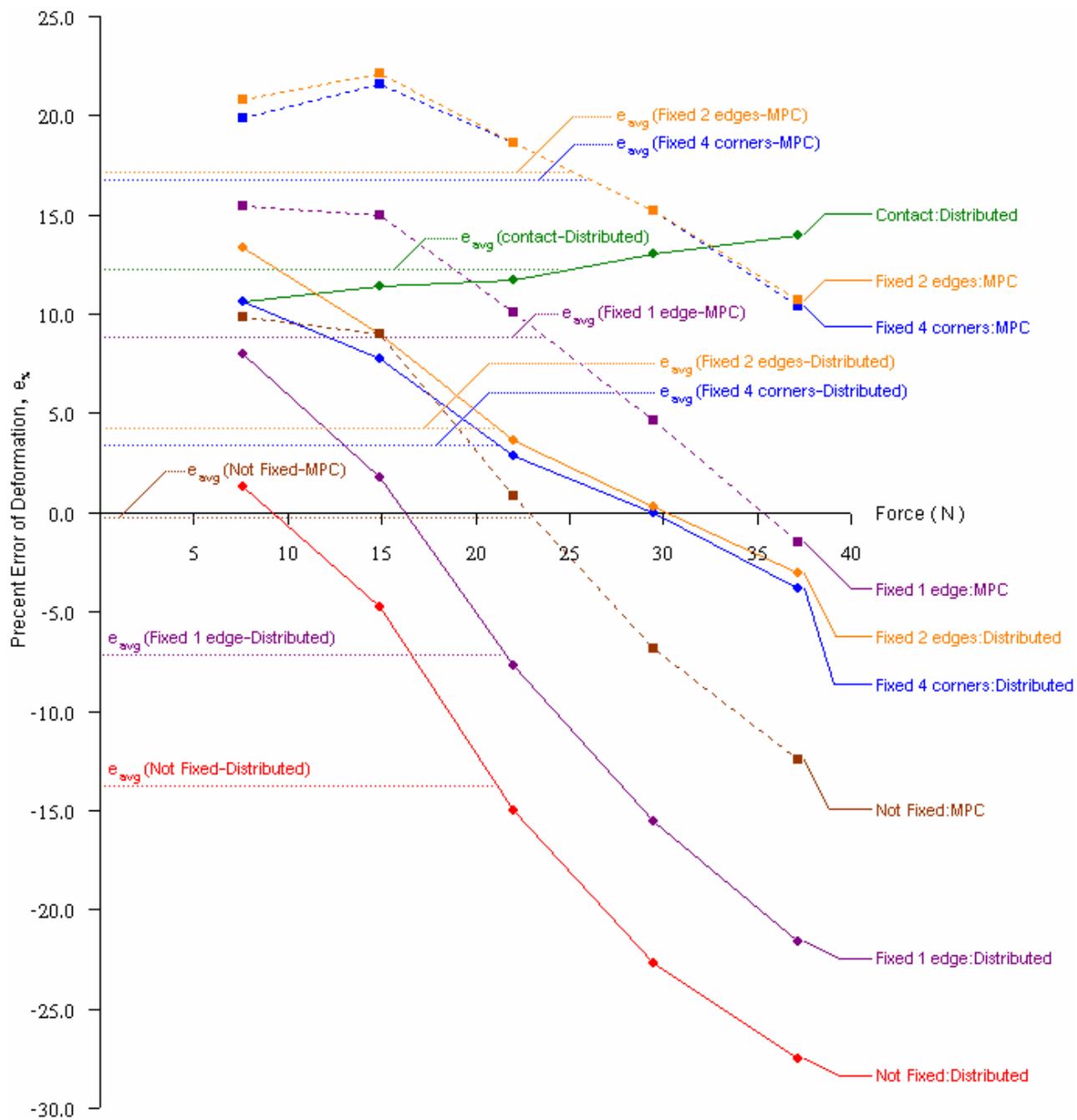
ภาพที่ 64 กราฟแสดงผล FEA เมื่อกำหนดConstrain และเงื่อนไขการกำหนดภาวะแบบต่าง ๆ เปรียบเทียบระยะยุบตามแกน Z กับผลการทดสอบทางกล ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 37.20 N ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A

ตารางที่ 11 ความคลาดเคลื่อน (e) เบอร์เริ่มต้นความคลาดเคลื่อน (e₀) จากผล FEA ของระบบตามแกน Z ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ที่เงื่อนไข Constrain ต่างๆ และค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (e_{avg}) และความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (|e|_{avg}) จาก 5 โหลดทดสอบ

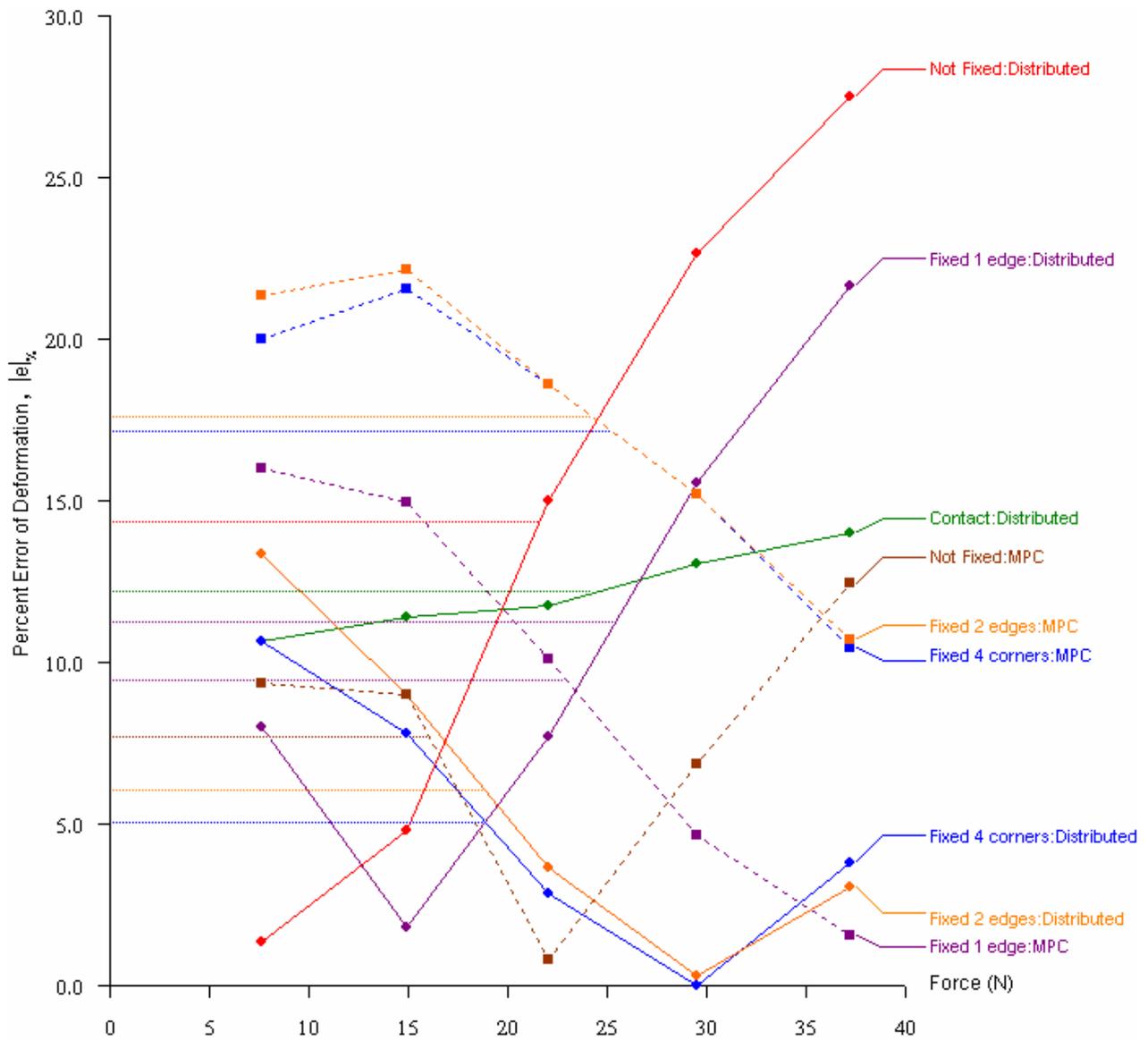
FORCE (N)	Contact		Fixed		Fixed		ไม่ Fixed		Fixed		ไม่ Fixed					
	e (mm)	e ₀ (%)	e (mm)	e ₀ (%)	1 ขอบ:(D)*	2 ขอบ:(D)*	(D)*	4 มุม:(MPC)**	1 ขอบ:(MPC)**	2 ขอบ:(MPC)**	(MPC)**	(MPC)**				
7.64	0.08	10.67	0.06	8.00	0.10	13.33	0.01	1.33	0.15	20.00	0.12	16.00	0.16	21.33	0.07	9.33
14.93	0.19	11.38	0.03	1.80	0.15	8.98	-0.08	-4.79	0.36	21.56	0.25	14.97	0.37	22.16	0.15	8.98
22.06	0.29	11.74	0.07	2.83	-0.19	-7.69	0.09	3.64	0.46	18.62	0.25	10.12	0.46	18.62	0.02	0.81
29.52	0.42	13.04	0.00	0.00	-0.50	-15.52	0.01	0.31	0.49	15.22	0.15	4.66	0.49	15.22	-0.22	-6.83
37.20	0.55	13.99	-0.15	-3.82	-0.85	-21.63	-0.12	-3.05	0.41	10.43	-0.06	-1.53	0.42	10.69	-0.49	-12.47
Max	0.55	13.99	0.13	10.67	0.06	8.00	0.15	13.33	0.01	1.33	0.49	21.56	0.25	16.00	0.49	9.33
Min	0.08	10.67	-0.15	-3.82	-0.85	-21.63	-0.12	-3.05	-1.08	-27.48	-0.06	-1.53	0.16	10.69	-0.49	-12.47
SD	0.19	1.33	0.06	4.21	0.35	7.71	0.05	5.22	0.13	4.43	0.08	6.31	0.13	4.72	0.18	4.34
e _{avg}	0.31	12.16	0.03	3.49	-0.29	-7.01	0.05	4.64	0.37	17.17	0.14	8.84	0.38	17.60	-0.09	-0.04
e _{avg}	0.31	12.16	0.09	5.02	0.33	10.93	0.09	5.86	0.37	17.17	0.17	9.46	0.38	17.60	0.19	7.69

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยจากสมการ $|e|_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e|$

* D = Distributed Load ** MPC = Multiple Points Constrain Loading



ภาพที่ 65 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($e\%$) ของระยะยวบตามแกน Z จากผล FEA ภายใต้เงื่อนไข Constrain และภาวะแบบต่างๆ ทั้ง 9 แบบ (เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกลที่แรง 7.64 ถึง 37.20 N) ของบรรจุภัณฑ์แบบ A เส้นปะในแนวนอน แสดงค่าเฉลี่ยของ $e\%$ จากทั้ง 5 แรงทดสอบ



ภาพที่ 66 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ $|e|_%$ จาก 9 เงื่อนไขของระยะยุบตามแกน $Z (\sigma_z)$ ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 37.20 N โดยเส้นปะในแนวนอนแสดงค่าเฉลี่ยของ $|e|_%$ จากทั้ง 5 แรงทดสอบ

ตารางที่ 12 สรุปข้อมูล และขั้นตอนการวิเคราะห์ FEA ของทุกเงื่อนไข เริ่มจากการกำหนดการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบต่างๆ ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ขนาดหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล ข้อมูลจากตารางที่ 11 และ 12 ได้ใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาคัดเลือกเงื่อนไขการจำลอง FEM ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการศึกษาความสามารถในการรับภาระด้านบนของรูปทรงต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ที่จะวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป โดยเมื่อวิเคราะห์ผลจากตารางทั้งสองพบว่า การกำหนดเงื่อนไข แบบ Fixed 4 มุม (D – Distributed Load) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเหตุผลเนื่องจาก

1. เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ($e_{\%} = 3.49\%$ และ $|e|_{\%} = 5.02\%$)
2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำได้ง่าย และใช้เวลาน้อยที่สุด
3. ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และภาระไม่ซับซ้อน
4. คอมพิวเตอร์ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ผล FEA เร็ว (4.37 วินาที)
5. มีขนาดพื้นที่จัดเก็บข้อมูลน้อยที่สุด (34.71 MBytes)

3.2 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของบรรจุภัณฑ์แบบ B

เพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของการใช้เงื่อนไขแบบ Fixed 4 มุม:(D) ได้นำเงื่อนไข FEM นี้ วิเคราะห์ผล FEA และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาระด้านบนจริง (ทดสอบทางกล) กับบรรจุภัณฑ์ แบบ B โดยภาพที่ 67 คือ ผล FEA แสดงระดับชั้นสีของการเปลี่ยนตำแหน่งรวม การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z แกน X แกน Y ค่าความเค้นแบบ Von mises และความเครียด ที่แรงทดสอบ (ภาระด้านบน) เท่ากับ 22.06 N โดยสมบัติของเอลิเมนต์กำหนดเท่ากับของ บรรจุภัณฑ์แบบ A แต่มี 1360 โหนด และ 1323 เอลิเมนต์

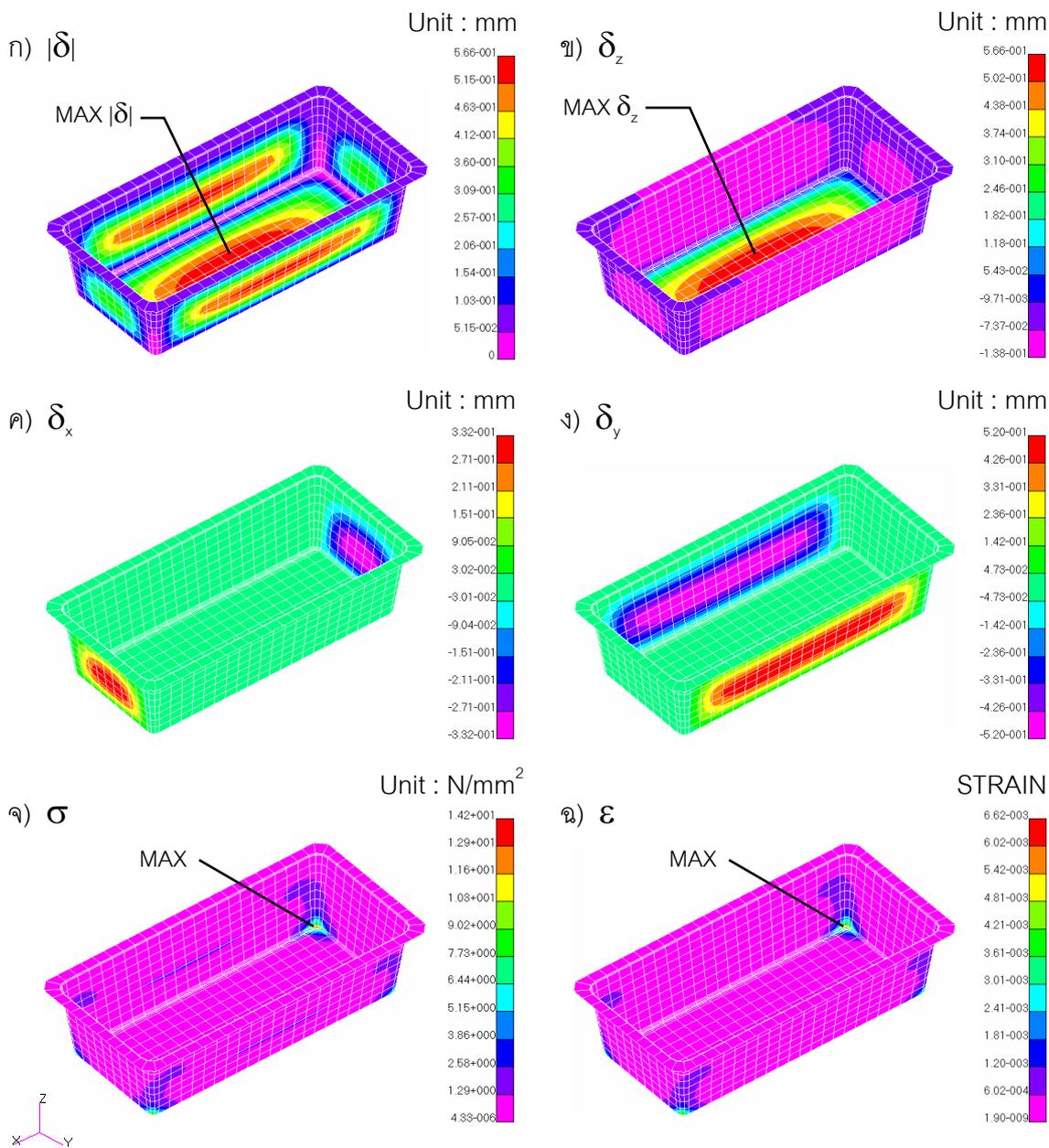
ตารางที่ 12 ขั้นตอน FEA ของการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ระยะเวลา ขนาดไฟล์ และความคลาดเคลื่อนของแต่ละเงื่อนไขของบรรจุภัณฑ์แบบ A

Constrain Type	Finite Element Model		Boundary Condition (BC)				Max Analysis Time (min)	File storage size (MB)	Total average error e _{avg} (%)				
	Model	Bearing Plate	MPC	Package	Load Point Type	Constrain of points at the base							
						Translation / Rotation (x = y = z = 0)				Translation (z = 0)			
1. Contact	✓	✓				4 จุด	1 จุด	2 จุด	Bearing Plate	Not Fixed	29.12	150.84	12.16
2. Fixed 4 จุด:(D)*	✓				✓						4.37	34.92	5.02
3. Fixed 1 จุด:(D)*	✓				✓						4.52	34.13	10.93
4. Fixed 2 จุด:(D)*	✓				✓						4.29	35.21	5.86
5. ไม่ fixed:(D)*	✓				✓						4.34	35.28	14.25
6. Fixed 4 จุด:(MPC)**	✓				✓						6.62	34.86	17.17
7. Fixed 1 จุด:(MPC)**	✓				✓						6.87	34.95	9.46
8. Fixed 2 จุด:(MPC)**	✓				✓						6.71	35.16	17.60
9. ไม่ fixed:(MPC)**	✓				✓						6.60	34.77	7.69

หมายเหตุ * D = Distributed Load

** MPC = Multiple Points Constrain Loading

Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (Distributed)



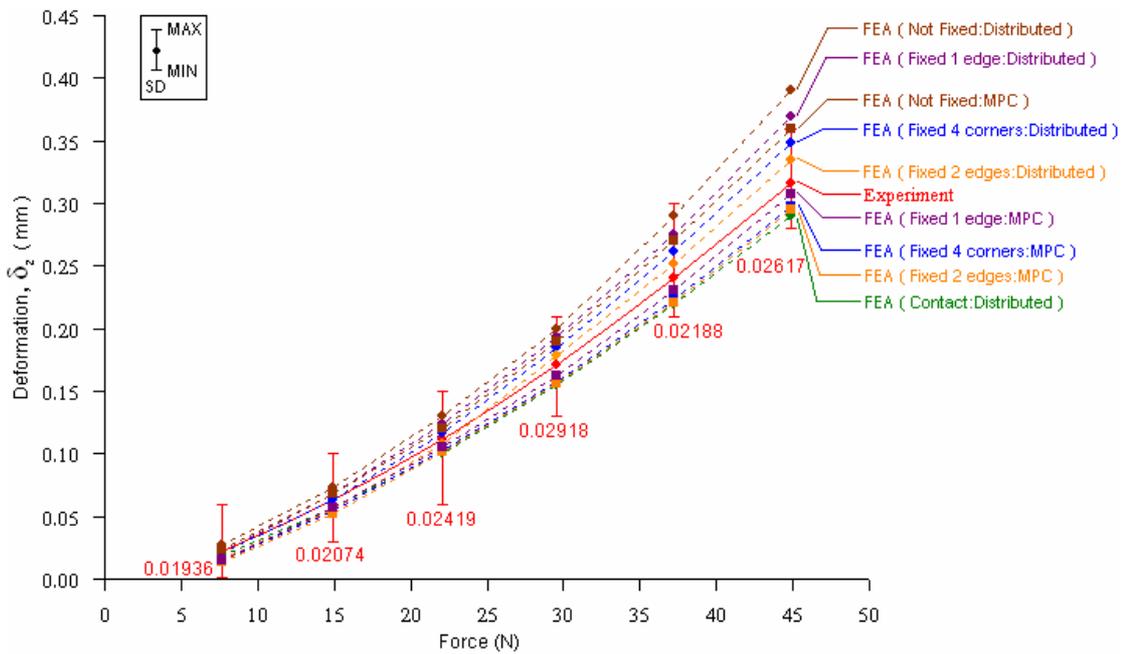
ภาพที่ 67 ผลการวิเคราะห์การยุบของบรรจุภัณฑ์ แบบ B ภายใต้ภาระด้านบน 22.06 N โดย
 ภาระเป็นแบบกระจาย และเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม โดยภาพ
 (ก) ระยะยุบรวม หรือ magnitude (ข) ระยะยุบตามแกน Z (ค) การขยายตัวด้านข้าง
 ตามแกน X (ง) การขยายตัวด้านข้างตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

ภาพที่ 68 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ FEA ของระยะยุบของบรรจุภัณฑ์แบบ B จากแรงหรือ ภาระด้านบนในช่วง 7.6 N ถึง 44.84 N ของทั้ง 9 เงื่อนไข เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล และภาพที่ 69 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($|e|_{\%}$) ของ FEA ที่แรงทดสอบต่างๆ และตารางที่ 13 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ เวลาในการคำนวณ และขนาดของไฟล์

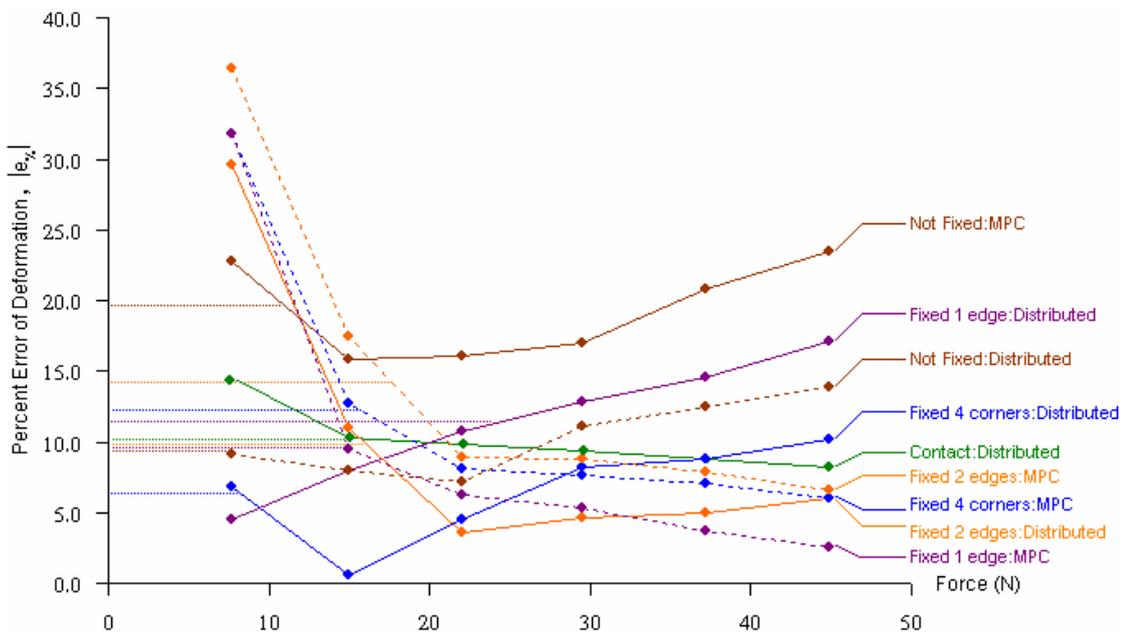
ผล FEA แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ย ($|e|_{\text{avg}}$) ของการกำหนดเงื่อนไขแบบ Fixed 4 มุม มีค่าต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 6.44% และแบบ Fixed 2 ขอบ มีค่ารองลงมา เท่ากับ 9.58%

ดังนั้นรูปแบบการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model หรือ FEM) ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์รูปทรงบรรจุภัณฑ์แบบ A และ B ซึ่งเป็นแบบที่มีผิวด้านบนเปิด (ลาดผนังสูง) คือมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed 4 มุม และภาระด้านบนแบบ Distributed ตามขอบบนของแบบจำลอง

โดยสรุป จากผลการวิจัยในหัวข้อนี้ แบบจำลอง FEM ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อภาระด้านบนของบรรจุภัณฑ์รูปทรงลาดผนังสูงต่างๆ ในหัวข้อวิจัยในลำดับต่อไป เป็นแบบ Fixed 4 มุม:(Distributed) โดยคาดคะเนความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.02 ถึง 6.44% เมื่อเป็นมาตรฐานสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 68 กราฟแสดงผล FEA ที่จาก 9 เงื่อนไขเปรียบเทียบกับ ผลการทดสอบจริง ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 44.84 N ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B



ภาพที่ 69 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์จาก 9 เงื่อนไขของระยะยุบ ตามแกน Z (δ_z) ที่แรงทดสอบ 7.64 N ถึง 44.84 N ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (e_{avg}) ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($|e|_{avg}$) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าสูงสุด ระยะเวลา ขนาดไฟล์ จากผล FEA ของระยะขยับตามแกน Z ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B ที่เงื่อนไข Constrain ต่างๆ

Constrain Type	Error			SD (mm)	Max (mm)	Min (mm)	Max Analysis Time (min)	File Size (Mbytes)
	e_{avg} (mm)	e_{avg} (%)	$ e _{avg}$ (mm)					
1. Contact	0.014	10.17	0.014	0.0087	0.026	0.003	20.51	127.20
2. Fixed 4 มุม:(D)*	- 0.012	- 4.22	0.012	0.0125	0.002	- 0.032	3.18	30.06
3. Fixed 1 ขอบ:(D)*	- 0.021	- 9.77	0.022	0.0201	0.001	- 0.054	3.09	30.59
4. Fixed 2 ขอบ:(D)*	- 0.004	4.73	0.010	0.0054	0.007	- 0.019	3.35	30.22
5. ไม่ fixed:(D)*	- 0.031	- 19.31	0.031	0.0265	- 0.005	- 0.074	3.30	29.97
6. Fixed 4 มุม:(MPC)**	0.012	12.21	0.012	0.0005	0.019	0.007	5.64	30.84
7. Fixed 1 ขอบ:(MPC)**	0.008	9.86	0.008	0.0012	0.009	0.007	5.82	30.62
8. Fixed 2 ขอบ:(MPC)**	0.014	14.35	0.014	0.0052	0.021	0.008	5.25	31.03
9. ไม่ fixed:(MPC)**	0.018	- 10.28	0.018	0.0164	- 0.002	- 0.044	5.54	30.48

หมายเหตุ * D = Distributed Load

** MPC = Multiple Points Constrain Loading

4. ผล FEA วิเคราะห์ประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน (100, 200, 300 และ 400)

4.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบ เนื่องจากภาระด้านบน

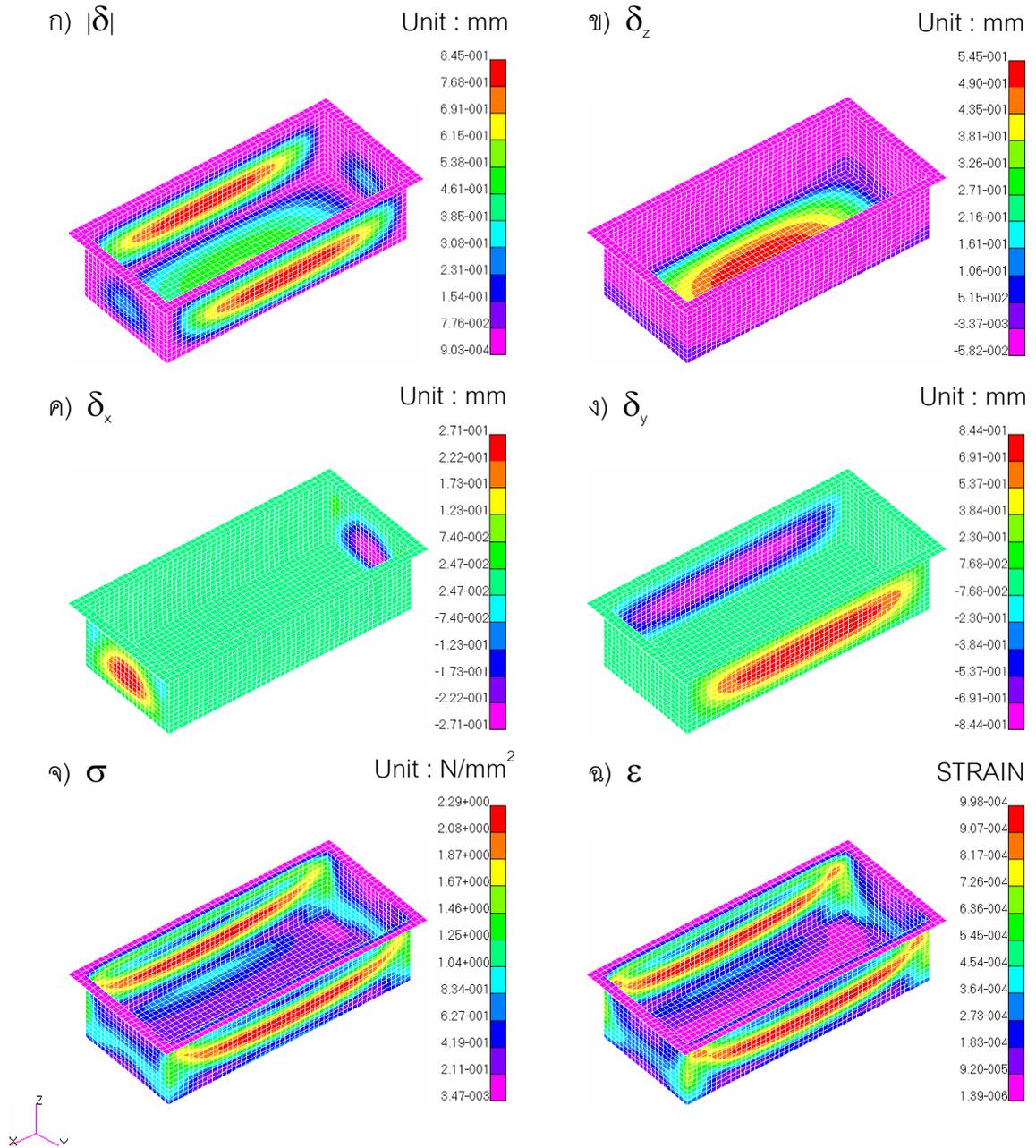
ผลการวิเคราะห์ระยะยุบตัวของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยม (รูปทรง 100) ภายใต้ภาระด้านบนที่แรงต่างๆ ให้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่ผนังด้านข้าง และฐานคล้ายคลึงกัน ตัวอย่าง เช่น ภาพที่ 69ก แสดงระยะยุบเมื่อแรงเท่ากับ 22.06 N ผล FEA แสดงบริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาวมีการเปลี่ยนตำแหน่ง ($|\delta|$) มากที่สุด (สีแดง) ผลการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกน Z (δ_z) ในภาพที่ 69ข แสดงบริเวณที่ระดับชั้นสีเป็น ค่าบวก (จากมากไปน้อยคือจากสีแดงไปสีน้ำเงิน) เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z ในขณะที่ค่าลบ (สีม่วงและสีชมพู) หมายถึงการยุบตัวลงในทิศทาง -Z ซึ่งเกิดขึ้นที่ผนังทั้ง 4 ด้าน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของบรรจุภัณฑ์ที่ภาระในช่วง 7.6 N ถึง 37.2 N ได้ผลในลักษณะเดียวกัน

การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X และ Y (ภาพที่ 69ค และ 69ง) ของรูปทรง 100 เมื่อกำหนดจุดกำเนิด (Origin point) ของแกน X และ Y อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางฐานของชิ้นงาน ระดับชั้นสีที่เป็นค่าบวก คือ สีแดงถึงสีเขียว (จากมากไปน้อย) บริเวณที่แสดงสีในช่วงนี้ หมายถึง ผนังของบรรจุภัณฑ์เกิดการโป่งออกในทิศทาง +X และ +Y ค่าลบ (จากสีเขียวถึงสีชมพู) แสดงการเกิดการโป่งของผนังออกในทิศ -X และ -Y

ผลการวิเคราะห์รูปทรงกระบอก (แบบ 200) แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งมากที่สุด (สีแดง) ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของฐาน (ภาพที่ 70ก) และภาพที่ 70ข แสดง δ_z โดยค่าบวก (จากสีแดงถึงเขียว) เกิดการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z และค่าลบ (จากสีน้ำเงินไปสีชมพู) คือการยุบตัวลงในทิศ -Z ผลของ δ_x และ δ_y ของบรรจุภัณฑ์แบบ 200 (ภาพที่ 70ค และ 70ง) แสดงผนังของทรงกระบอกเกิดการโป่งนูนออก (ขยายออกด้านข้าง) โดยเมื่อจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางดังแสดงผนังครึ่งหนึ่ง มีค่าเป็นบวก และอีกครึ่งหนึ่งมีค่าเป็นลบ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงของแบบ 200 ที่ภาระอื่นๆ มีผลในลักษณะเดียวกัน

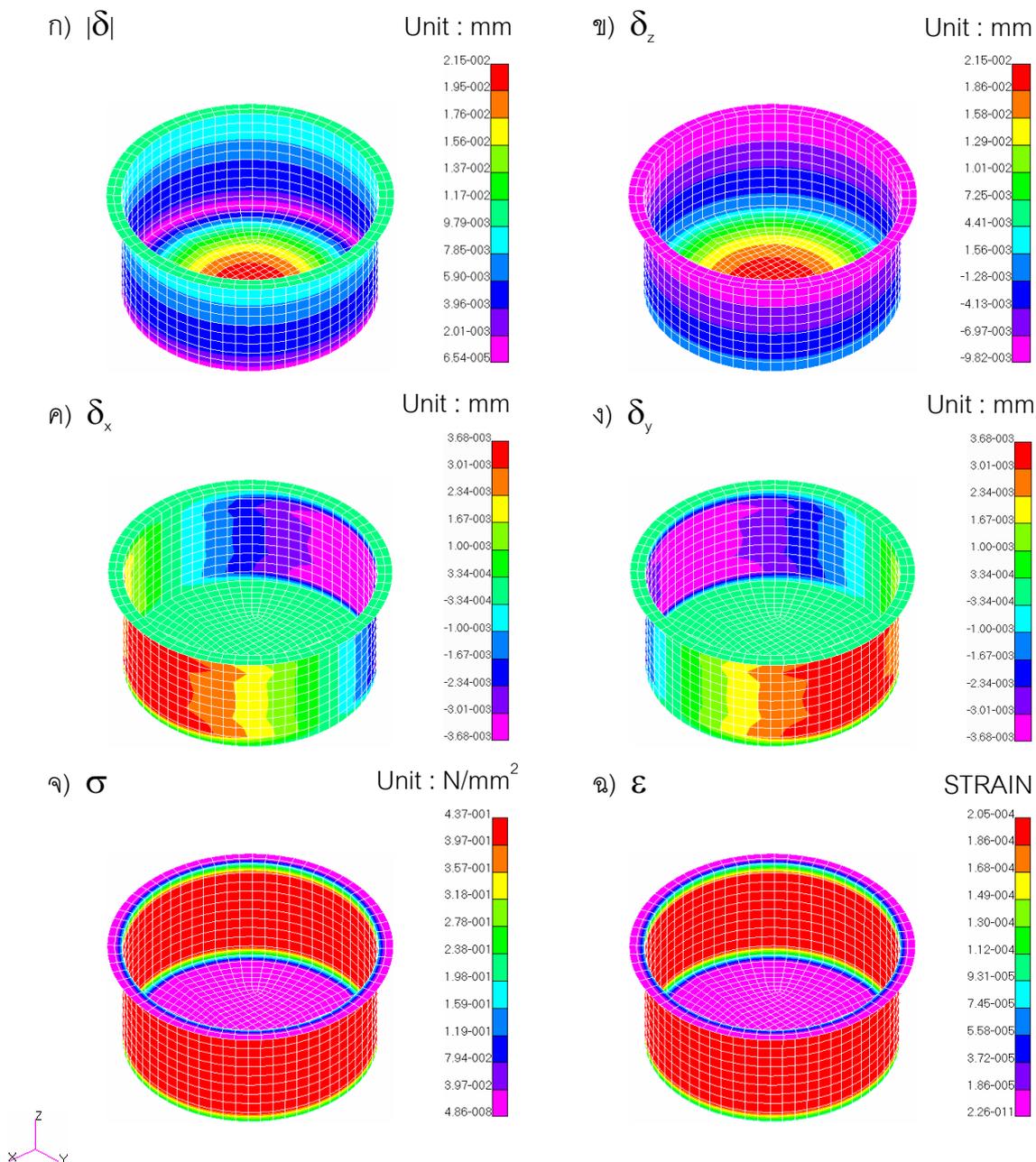
ผลการวิเคราะห์รูปทรงวงรี หรือแบบ 300 แสดงบริเวณฐานของพื้นวงรี (ภาพที่ 71ก) เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งมากที่สุด ระยะการยุบ δ_z (ภาพที่ 72ก และ 72ข) โดยระดับชั้นสีของค่า

Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (Distributed)



ภาพที่ 70 ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน F = 22.06 N ของรูปทรงสี่เหลี่ยม แบบ 100 โดย
 (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยน
 ตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ
 (ฉ) ความเครียด

Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (Distributed)



ภาพที่ 71 ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน F = 22.06 N ของรูปทรงกระบอก แบบ 200 โดย (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ (ฉ) ความเครียด

บวก หมายถึงการโป่งพองขึ้นในทิศ +Z และค่าลบ แสดงบริเวณนั้นๆ เกิดการยุบตัวลงในทิศ -Z ผลของ δ_x และ δ_y (ภาพที่ 72ค และ 72ง) ของบรรจุก้อนที่ทรงวงรีนี้แสดงการโป่งพองออกด้านข้างของผนัง ทางผนังด้านยาว (major axis) มากกว่าด้านสั้น (minor axis) (0.0098 mm เมื่อเทียบ 0.0022 mm) โดยที่แรงอื่นๆ ให้ผลต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ FEA ของรูปทรงหกเหลี่ยมแบบ 400 ภายใต้ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N ได้แสดงในภาพที่ 66 ก ถึง ง โดยที่บริเวณที่กึ่งกลางผิวฐานเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งมากที่สุด (สีแดง) แต่ที่แรงที่มากขึ้น (29.5 N ถึง 37.2 N) บริเวณผิวด้านข้างที่ขนานกับระนาบ (XZ) เกิดการโป่งพองมากที่สุด (มากกว่าที่ฐาน) การยุบตัวในแกน Z (δ_z) ให้ผลเหมือนกับรูปทรงอื่นๆ ผลของ δ_x และ δ_y ของรูปทรงแบบ 400 แสดงผนังโป่งพองออกทั้ง 6 ด้าน (จุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางฐานของรูป 6 เหลี่ยม)

4.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้นและความเครียดเนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงค่าความเค้น และความเครียด จากผล FEA ของรูปทรง 100 ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N ได้แสดงในภาพที่ 70จ และข ความเค้นสูงเกิดที่บริเวณผนังด้านยาวเป็นแนวยาว (สีแดง) ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับการเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งมากที่สุดตามแกน Y และมีค่าสูงสุดที่ประมาณกึ่งกลางของผนัง โดยที่ภาระอื่นๆ ให้ผลแบบเดียวกัน

ผล FEA แสดงผลความเค้น ของรูปทรง 200 (ภาพที่ 71จ) ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N มีค่าความเค้นสูงสุด (สีแดง) เกิดที่บริเวณผนังของผิวทรงกระบอก โดยมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณฐาน (พื้นที่วงกลม ที่สีชมพู) ค่าความเครียดของรูปทรง 200 (ภาพที่ 71ข) มีลักษณะใกล้เคียงกับความเค้น

ค่าความเค้น และความเครียดจากผล FEA ของรูปทรง 300 (ภาพที่ 72จ และข) แสดงความเค้น และความเครียดสูงสุด (สีแดง) อยู่ที่กึ่งกลางของผนังด้านยาว (major axis) ความเค้น และความเครียดของผนังด้านนี้ มีค่ามากที่สุดบริเวณใกล้ขอบบน และฐานมากกว่าตรงกลาง โดยที่บริเวณฐานของบรรจุก้อนที่มีค่าความเค้นน้อยที่สุด (สีชมพู)

ค่าความเค้น และความเครียดจาก FEA ของบรรจุภัณฑ์ แบบ 400 (ภาพที่ 73จ และ ฉ) มีค่าสูงสุด (สีแดง) เกิดที่บริเวณกึ่งกลางของขอบที่เป็นมุมของรอยต่อของผนังด้านข้างของบรรจุภัณฑ์ ทั้ง 6 ขอบ และที่กึ่งกลางของผนังทั้ง 6 ผนัง

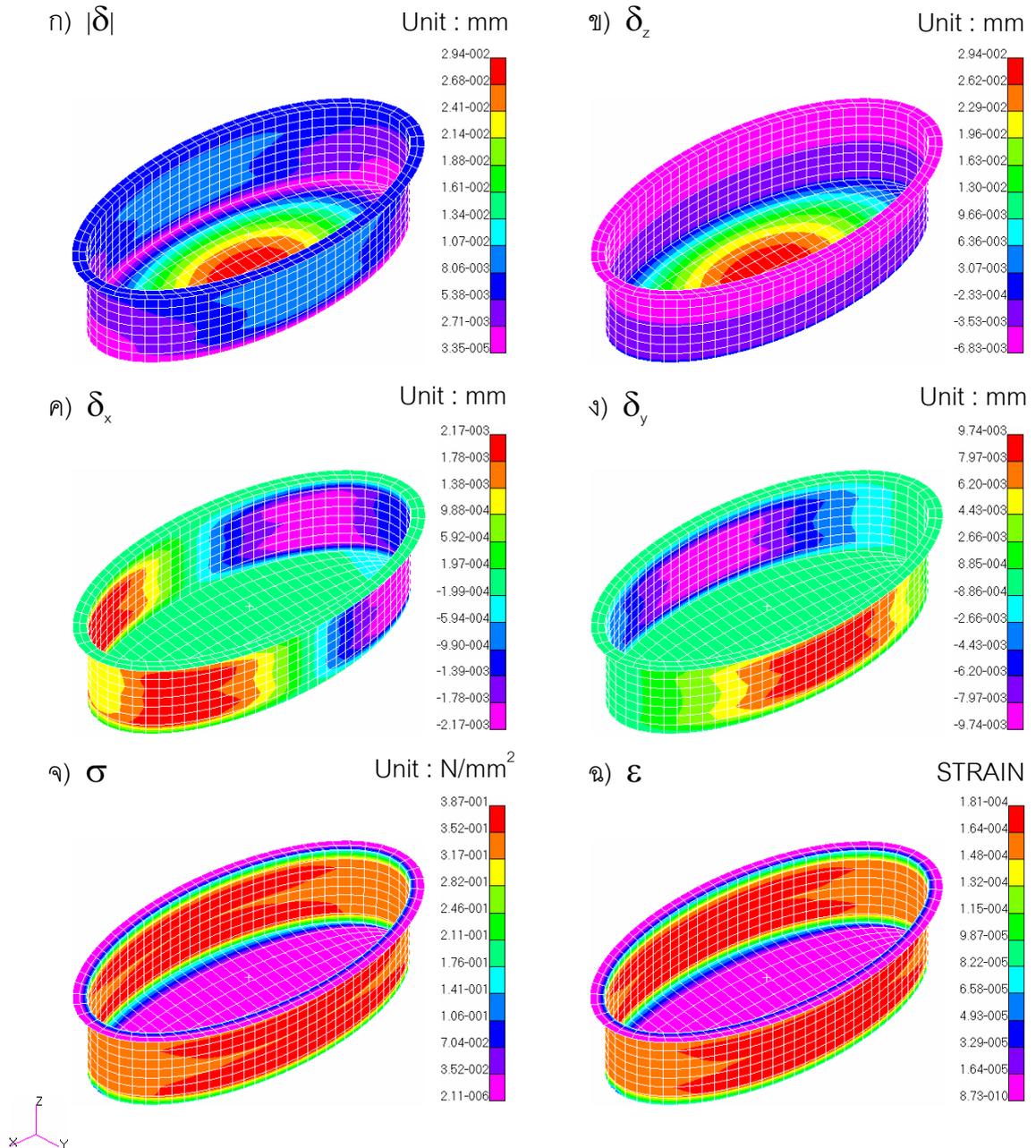
4.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรง 100, 200, 300 และ 400

จากผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตามแกน Z (δ_z) ของบรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐาน ทั้ง 4 รูปทรง ในช่วงภาระด้านบน เท่ากับ 7.6 N ถึง 37.2 N สามารถนำมาสรุปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวตามแกน Z (δ_z) กับแรง หรือภาระด้านบน (F) ได้ในภาพที่ 74 และผล FEA วิเคราะห์ความเค้นสูงสุด (σ_{max}) ของบรรจุภัณฑ์รูปทรงพื้นฐานทั้ง 4 แบบ ได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุด กับภาระด้านบน ได้ในภาพที่ 74

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 รูปแบบ ภายใต้ภาระด้านบนได้สรุปในภาพที่ 75 โดยการเปรียบเทียบนี้ อ้างอิงที่ภาระด้านบนสูงสุด เท่ากับ 37.2 N โดยกราฟแสดงประสิทธิภาพความแข็งแรงนี้ (ภาพที่ 76ก) เป็นการพล็อตของแรงทดสอบสูงสุดต่อน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (F/m) เทียบกับระยะยุบตัวในแกน Z ต่อน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (หรือ δ_z/m) และประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุ (หรือแรงต่อปริมาตร F/V_c) เทียบกับระยะยุบต่อปริมาตร (หรือ δ_{z-max}/V_c) ได้แสดงในภาพที่ 76ข

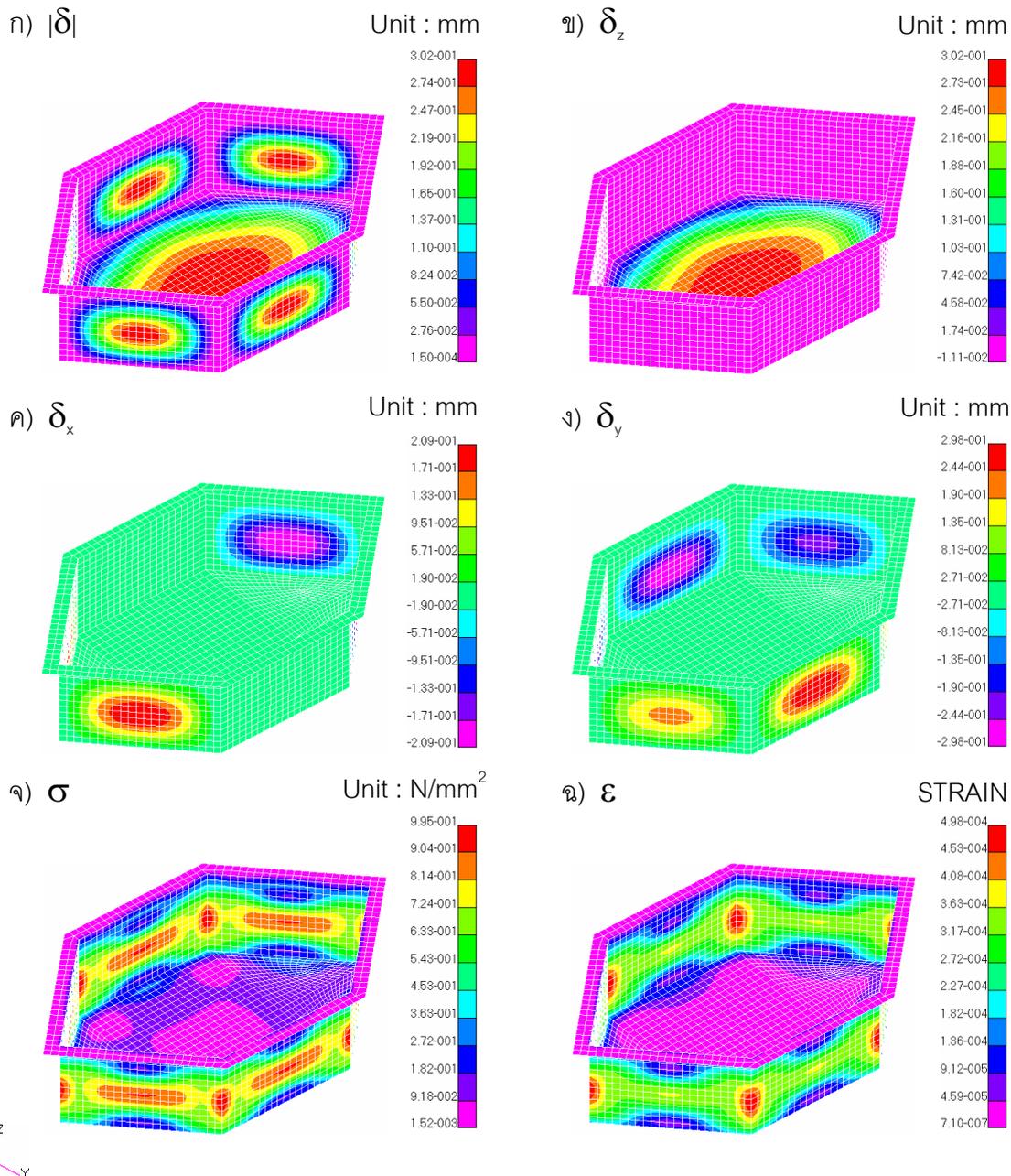
เมื่อพิจารณาภาพที่ 76 รูปทรงที่แข็งแรง มี F/m สูงสุด คือ แบบ 200 หรือ ทรงกระบอก โดยมีระยะยุบต่อน้ำหนัก (δ_z/m) น้อย ในขณะที่รูปทรงวงรี (แบบ 300) มี δ_z/m ต่ำสุด แต่ F/m น้อยกว่าแบบ 100 ประสิทธิภาพของรูปทรงเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุ ให้ผลทำนองเดียวกับประสิทธิภาพความแข็งแรง กล่าวคือ รูปทรงกระบอก หรือแบบ 200 มี ประสิทธิภาพเชิงความจุสูงสุด (มีค่า F/V_c สูงสุด) และรูปทรงวงรี (แบบ 300) มีระยะยุบเชิงความจุน้อยที่สุด (มี δ_{z-max}/V_c ต่ำสุด)

Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (Distributed)

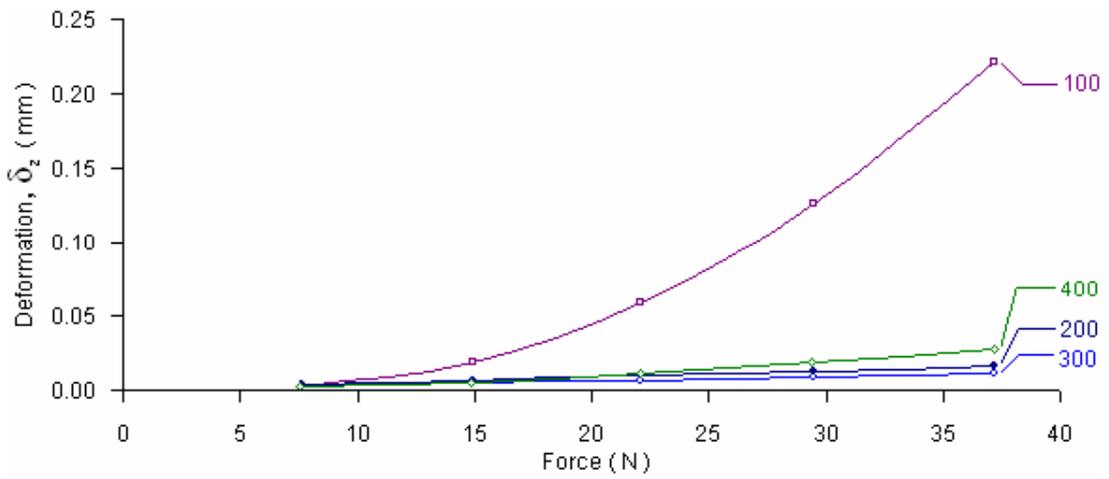


ภาพที่ 72 ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน F = 22.06 N ของรูปทรงวงรี แบบ 300 โดย
 (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยน
 ตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ
 (ฉ) ความเครียด

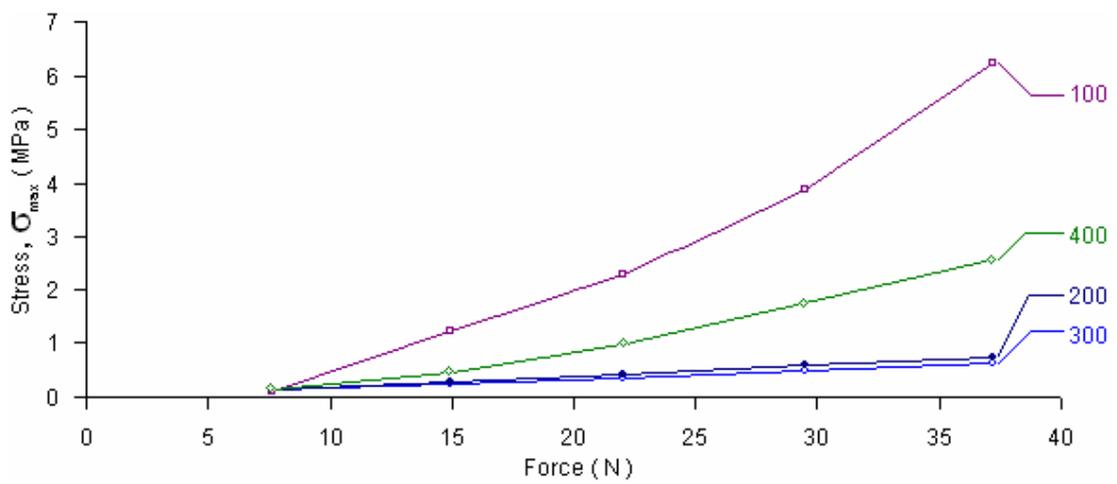
Constrain = Fixed 4 มุม: F = 22.06 N (Distributed)



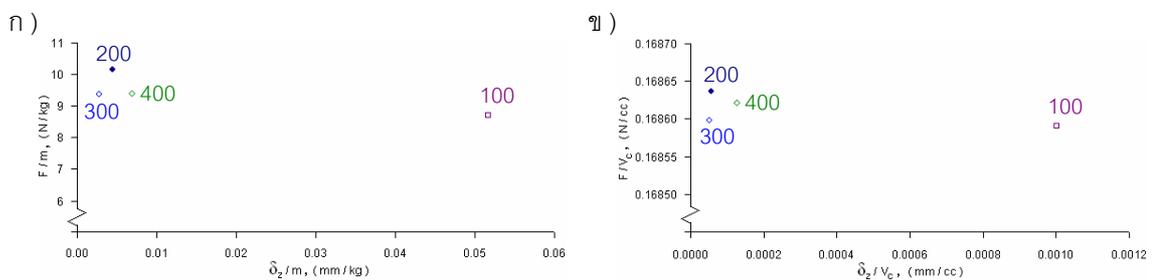
ภาพที่ 73 ตัวอย่างผล FEA เมื่อภาระด้านบน F = 22.06 N ของรูปทรงแท่งเหลี่ยม แบบ 400 โดย
 (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งรวม (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (ค) การเปลี่ยน
 ตำแหน่งตามแกน X (ง) การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Y (จ) ความเค้น และ
 (ฉ) ความเครียด



ภาพที่ 74 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δ_z กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 400



ภาพที่ 75 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{max} กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 400



ภาพที่ 76 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 100, 200, 300 และ 400

5. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยมต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด

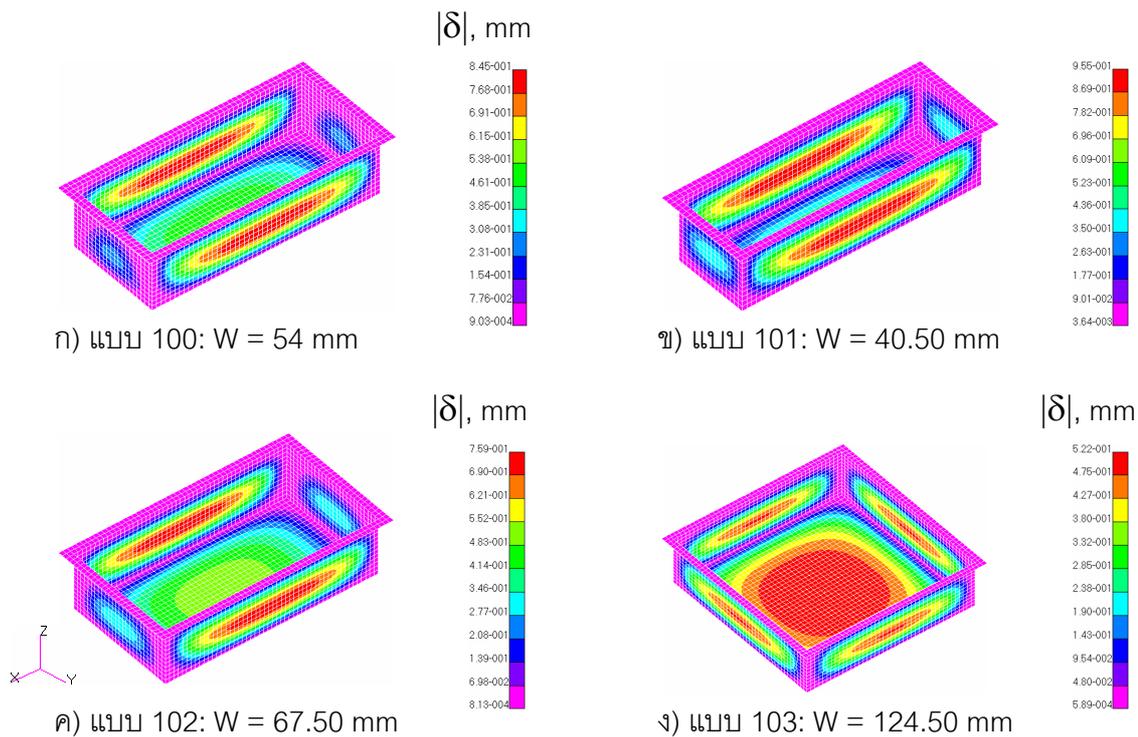
5.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว (ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งรวม หรือ Magnitude หรือ $|\delta|$) เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N ได้แสดงในภาพที่ 77 ถึง 78 โดยภาพที่ 77 เป็นของกลุ่มรูปทรง 100 ที่มีขนาดความกว้างต่างๆ (แบบ 101, 102 และ 103) และภาพที่ 78 เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความยาว (แบบ 111 ถึง 113)

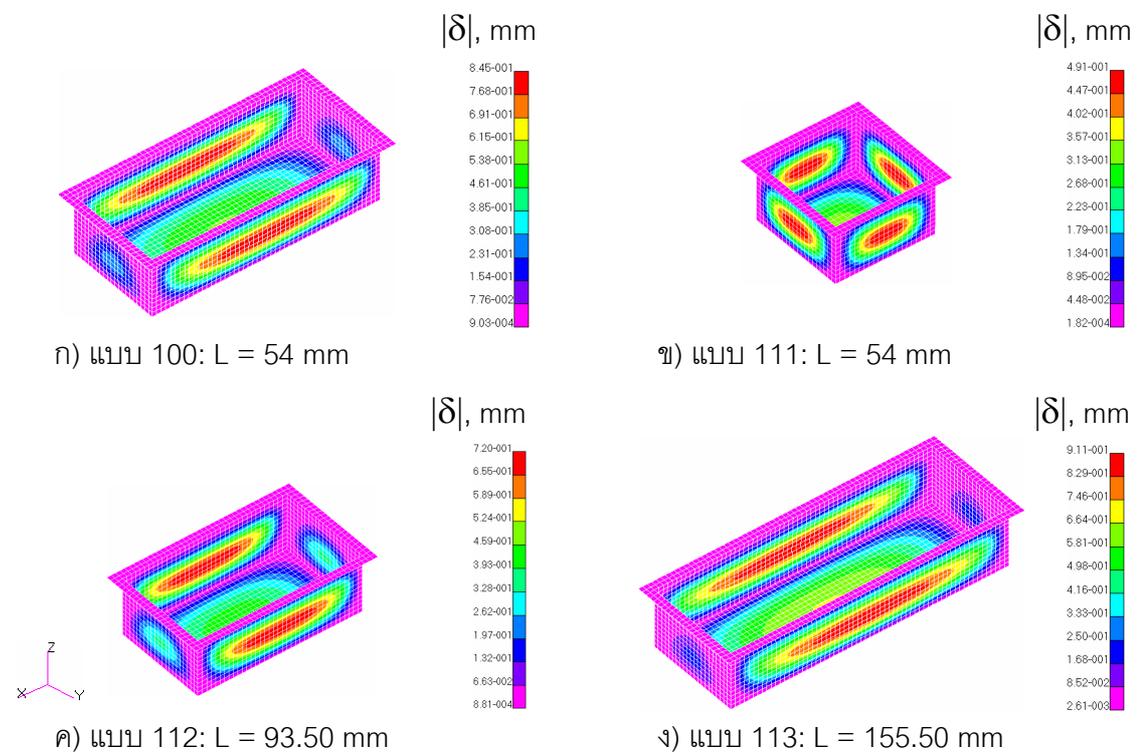
จากผล FEA แสดงบรรจุภัณฑ์แบบ 101, 102, และ 111 ถึง 113 มีการเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุด (สีแดง) เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาว และมีลักษณะคล้ายกับ แบบ 100 แต่แบบ 103 เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ ผลการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของบรรจุภัณฑ์แบบ 101 ถึง 103 และ 111 ถึง 113 มีลักษณะคล้ายกับแบบ 100 ตามแสดงในภาพที่ 79 และ 80

5.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

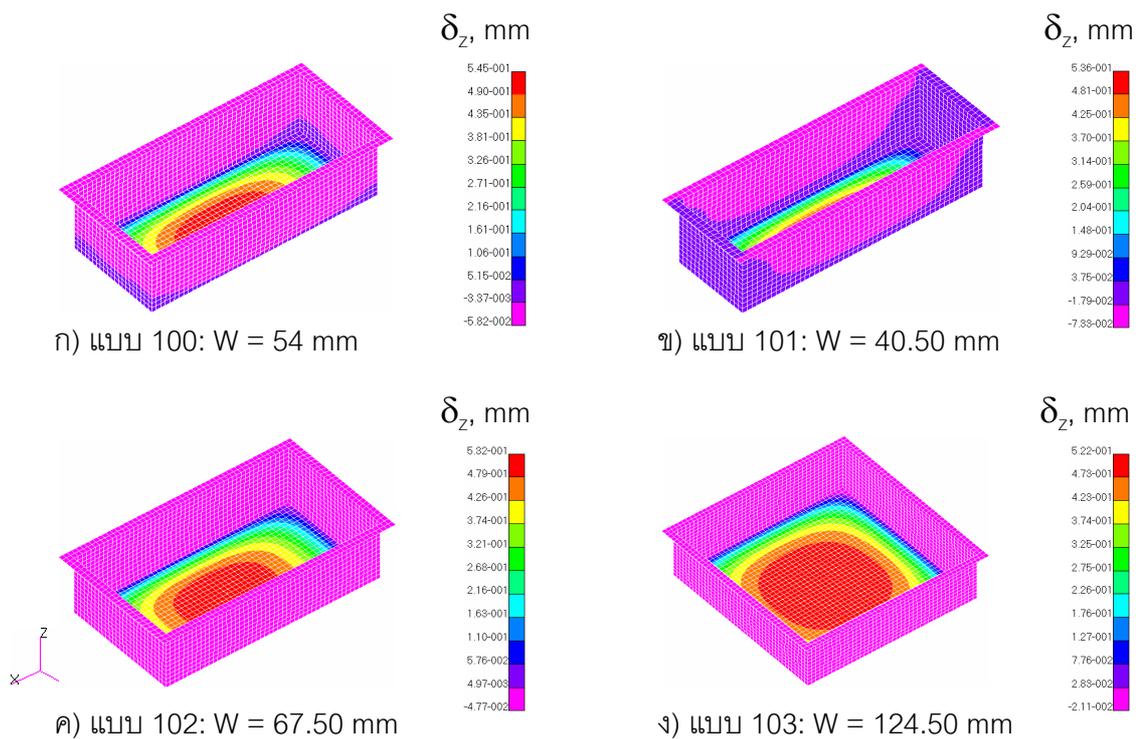
การเกิดความเค้นสูงสุด (สีแดง) ของบรรจุภัณฑ์ แบบ 101, 102, 103, 112 และ 113 ปรากฏที่ตำแหน่ง และมีลักษณะคล้ายกับแบบ 100 คือมีความเค้นสูงสุดที่บริเวณผนังด้านยาว ดังแสดงในภาพที่ 81 และ 82 แต่บรรจุภัณฑ์แบบ 111 ซึ่งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (กว้าง x ยาว เท่ากับ 54 x 54 mm) มีตำแหน่งและลักษณะแตกต่างจากแบบ 100 คือ เกิดความเค้นสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของรอยต่อระหว่างผนัง (ภาพที่ 81ข)



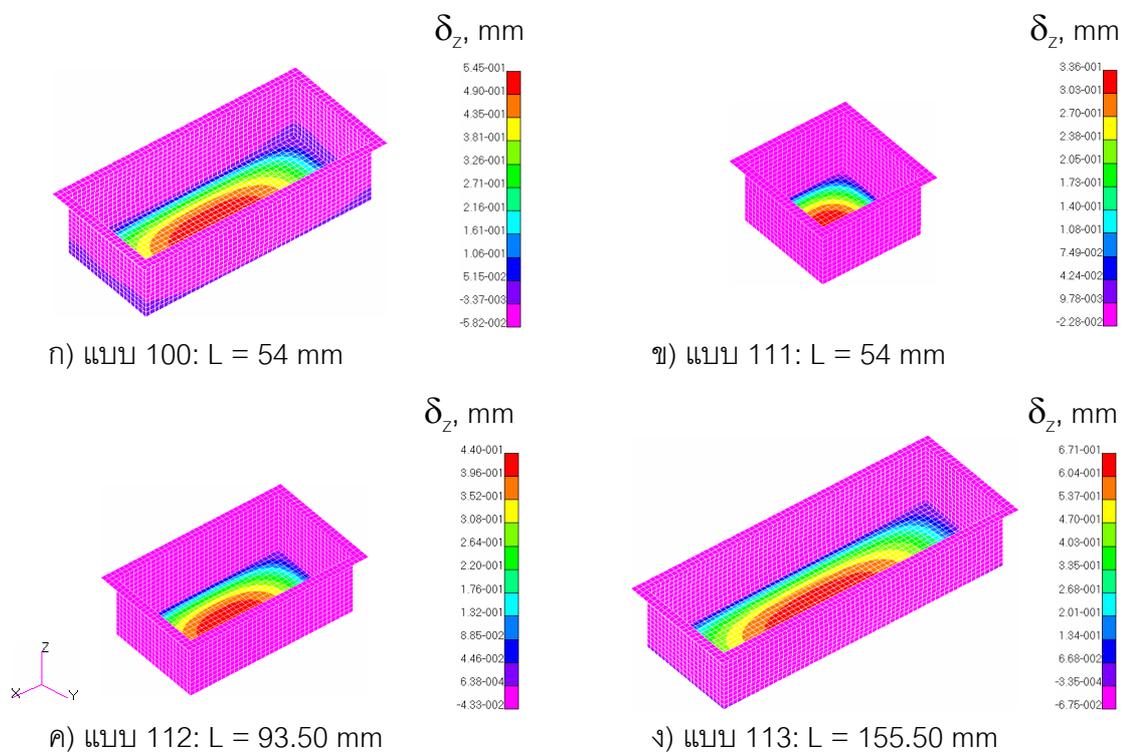
ภาพที่ 77 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 100 ถึง 103 เมื่อ
ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



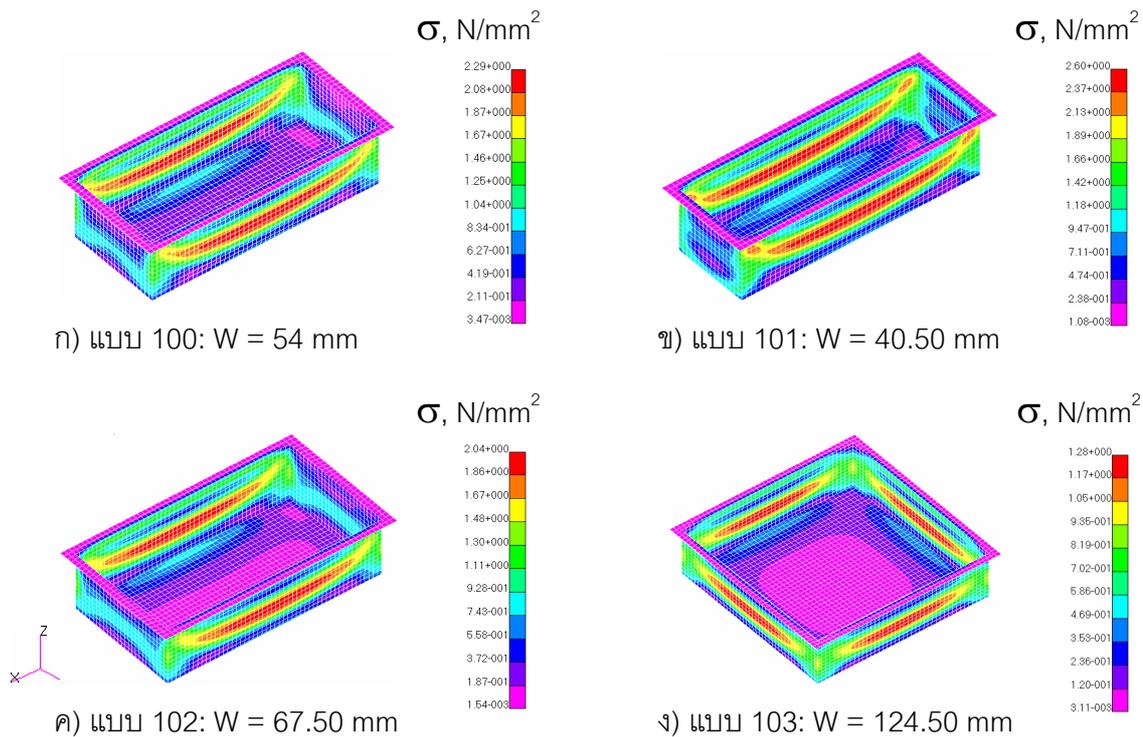
ภาพที่ 78 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 100 และ 111 ถึง 113 เมื่อ
ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



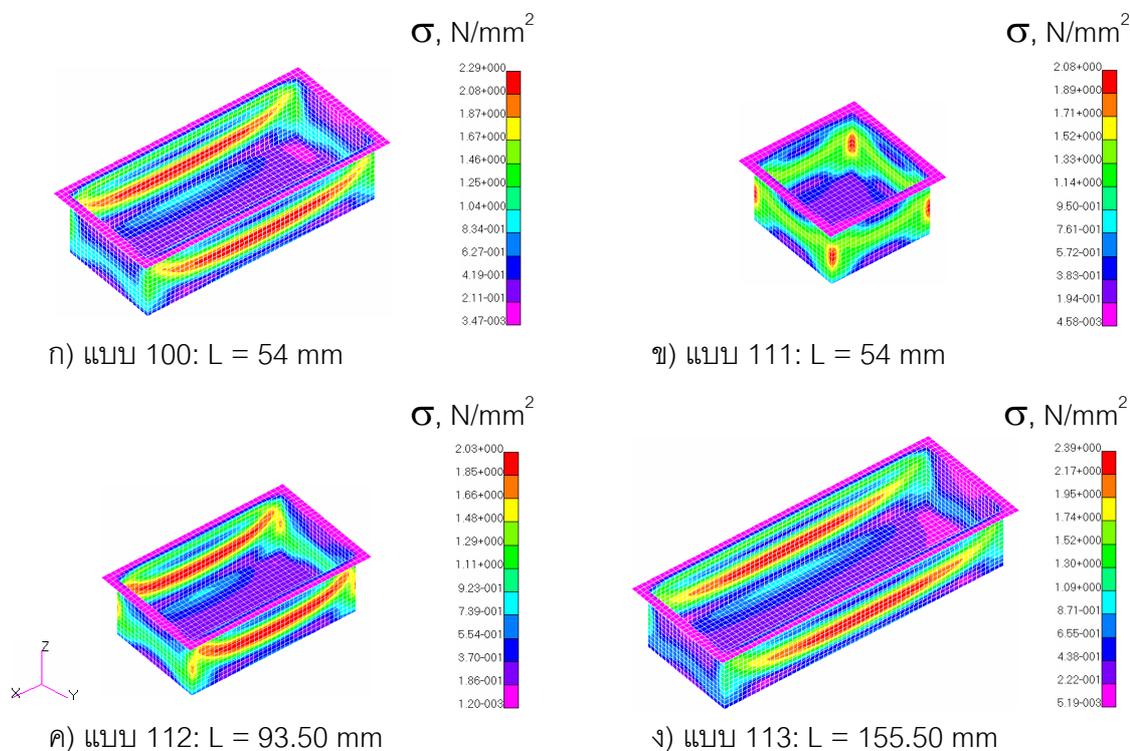
ภาพที่ 79 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 100 ถึง 103 เมื่อ
 ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 80 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 100 และ 111 ถึง 113 เมื่อ
 ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 81 ความเค้น (σ) ของรูปทรง แบบ 100 ถึง 103 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 82 ความเค้น (σ) ของรูปทรง แบบ 111 ถึง 113 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N

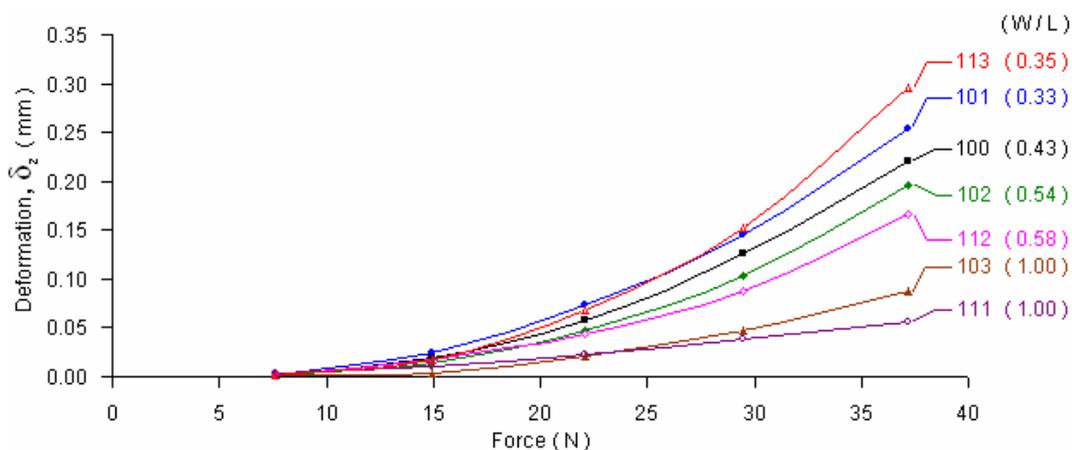
5.3 การเปรียบเทียบผล FEA เมื่อเปลี่ยนขนาดของรูปทรง 100

ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) ของบรจจุภัณฑ์ แบบ 100 ถึง 103 และ 111 ถึง 113 ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 7.6 N ถึง 37.2 N ได้สรุปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวกับภาระด้านบน (δ_z vs F) ได้แสดงในภาพที่ 83 ในภาพนี้แสดงรูปทรงแบบ 113 (ซึ่งมีความยาวมากที่สุด) มีค่า δ_z มากที่สุด รองมา คือรูปทรงแบบ 101 ที่มีความกว้างน้อยที่สุด รูปทรงแบบ 113 และ 101 ให้ผลใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีสัดส่วนของรูปทรงใกล้เคียงกัน กล่าวคือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว หรือ W/L ของแบบ 113 และ 101 เท่ากับ 0.35 และ 0.33 ตามลำดับ รูปทรงมีระยะยุบตามแกน Z น้อยที่สุด คือ แบบ 111 ซึ่งเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W/L = 1.00)

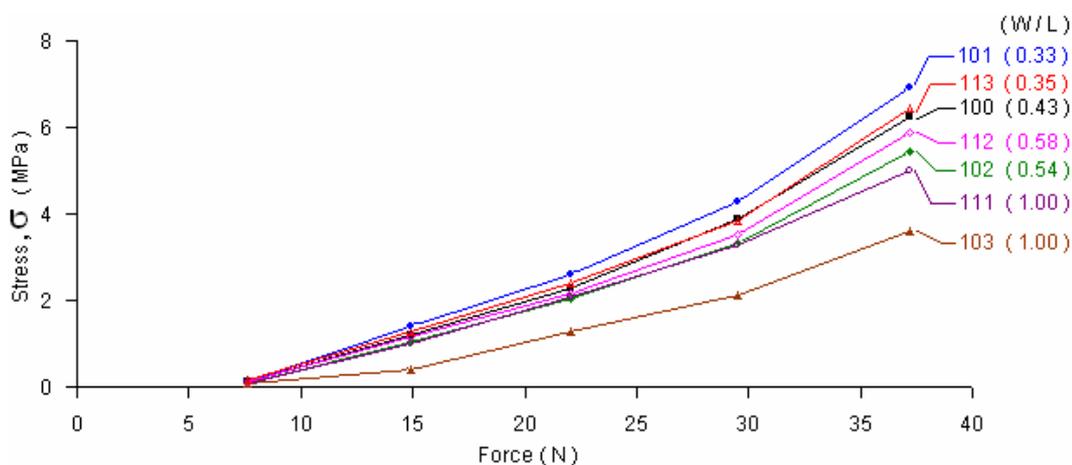
ความเค้นสูงสุดของรูปทรง แบบ 100 ถึง 103 และ 111 ถึง 113 ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 7.6 N ถึง 37.2 N ได้สรุปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับภาระด้านบน (σ vs F) ในภาพที่ 84 โดยรูปทรงที่มี W/L ต่ำ (ทรงยาว เช่นแบบ 101 และ 103) มีความเค้นสูงกว่ากลุ่มรูปทรงที่มี W/L สูง (สี่เหลี่ยมจัตุรัส เช่นแบบ 103 และ 111) ความเค้นของแบบ 103 น้อยกว่าแบบ 111 เนื่องจากแบบ 103 มีขนาดใหญ่กว่า

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรงของบรจจุภัณฑ์แบบ 100 ถึง 103 และ 111 ถึง 113 ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 37.2 N ได้สรุปในภาพที่ 85ก ในภาพนี้แสดงแรงทดสอบสูงสุดต่อน้ำหนักบรจจุภัณฑ์ (F/m) เทียบกับ ระยะยุบตัวในแกน Z ต่อน้ำหนักบรจจุภัณฑ์ (δ_z/m) ภาพแสดงประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปริมาตรบรจจุ (หรือพล็อต F/V_c เทียบกับ δ_z/V_c) ได้แสดงในภาพที่ 85ข

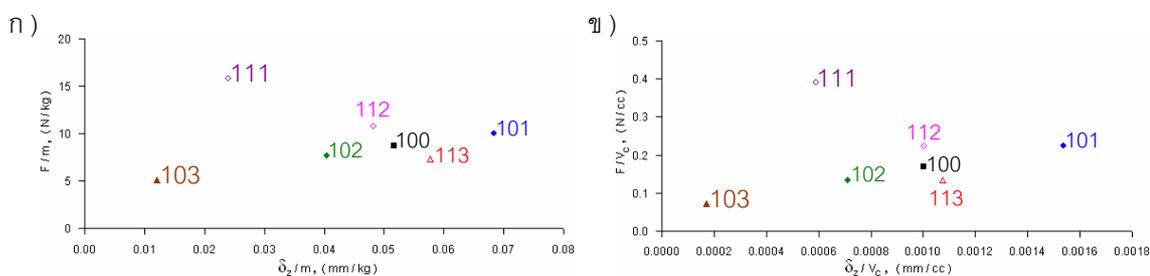
เมื่อพิจารณาภาพที่ 85ก รูปทรงที่แข็งแรง หรือมี F/m สูงสุด คือ แบบ 111 หรือรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W = L เท่ากับ 54 mm) ในขณะที่แบบ 103 ซึ่งมีรูปทรง และความสูงเท่ากับแบบ 111 แต่มีขนาดแตกต่างกัน (W = L = 124.5 mm) กลับมี F/m ต่ำสุด และ δ_z/m น้อยที่สุด ซึ่งมีเหตุผลจาก Buckling เกิดได้ง่ายกว่า ในรูปทรงที่มีความกว้างมาก สำหรับผลประสิทธิภาพปริมาตรบรจจุ (F/V_c เทียบกับ δ_z/V_c) ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับของประสิทธิภาพน้ำหนักของบรจจุภัณฑ์



ภาพที่ 83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง δ_z กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 113



ภาพที่ 84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับภาระด้านบนของรูปทรง แบบ 100 ถึง 113



ภาพที่ 85 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 100 ถึง 113

6. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนความสูงของของบรรจุภัณฑ์รูปทรง แบบ 100

6.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว (ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งรวม หรือ Magnitude หรือ $|\delta|$) ของรูปทรง 100 เมื่อเปลี่ยนความสูงภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N ได้แสดงในภาพที่ 86 โดยรูปทรงแบบ 122 (ซึ่งมีความสูงมากที่สุด $H = 41.5$ mm) มีลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งรวมเหมือนกับแบบ 100 ($H = 33$ mm) คือ ที่บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาว (สีแดง) ในขณะที่บรรจุภัณฑ์แบบ 121 ($H = 24.5$ mm) มีการเปลี่ยนตำแหน่งรวมเหมือนกับแบบ 100 เฉพาะเมื่อภาระด้านบนมากกว่า 29.52 N ผลการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของแบบ 121 และ 122 มีลักษณะคล้ายกับแบบ 100 (ภาพที่ 87)

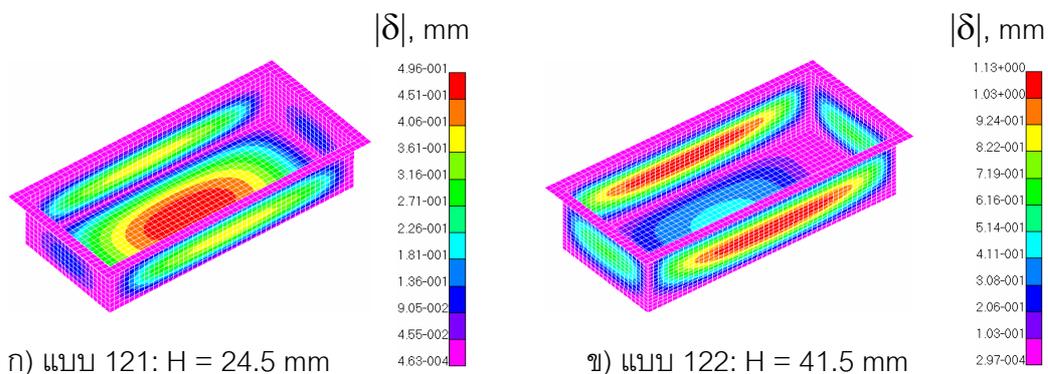
6.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

รูปทรงแบบ 121 (ซึ่งมีความสูงน้อยกว่าแบบ 100) มีความเค้นสูงสุดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ (ภาพที่ 88ก) แต่รูปทรง แบบ 122 มีความเค้นสูงสุด เกิดที่ตำแหน่ง และมีลักษณะคล้ายกับแบบ 100 คือ ที่บริเวณกลางผนังด้านยาวของบรรจุภัณฑ์ (ภาพที่ 88ข)

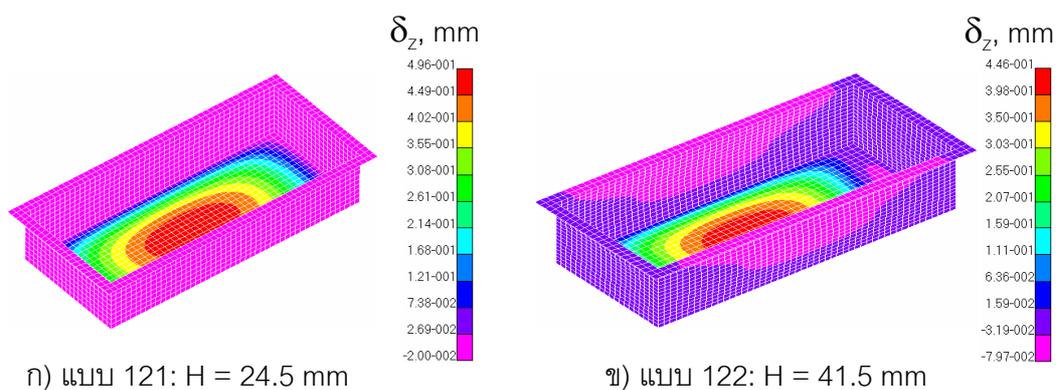
6.3 การเปรียบเทียบผล FEA เมื่อเปลี่ยนความสูงของรูปทรง 100

ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) ของบรรจุภัณฑ์ แบบ 100, 121 และ 122 ภายใต้ภาระทดสอบ ได้สรุปตามภาพที่ 89 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัว กับภาระด้านบน (δ_z vs F) โดยรูปทรงแบบ 122 (ความสูงมาก) มีค่า δ_z มากที่สุด และสามารถสรุปได้ว่ารูปทรงที่สูงกว่า จะมี δ_z มากกว่า รูปทรงที่เตี้ยกว่า

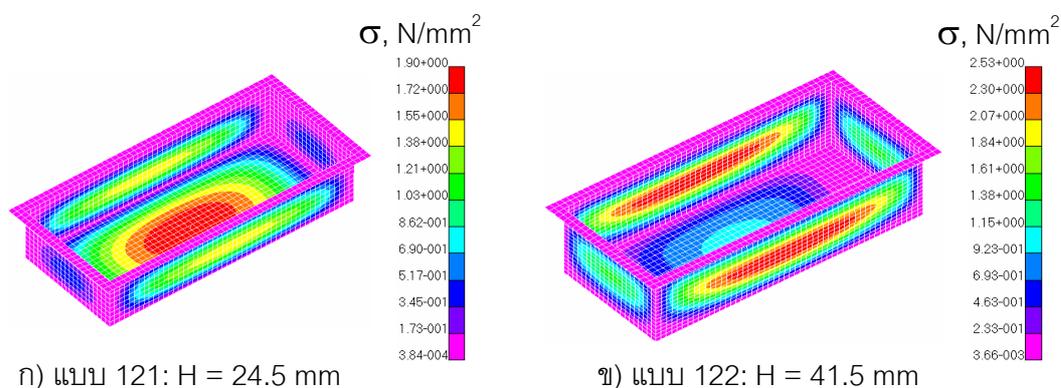
ความเค้นสูงสุดของบรรจุภัณฑ์แบบ 100, 121 และ 122 ได้สรุปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุด กับภาระด้านบน (σ vs F) ได้ตามแสดงในภาพที่ 90 โดยผลที่แสดงระบุได้ในลักษณะเดียวกันกับ σ_z vs F คือ รูปทรงที่สูงกว่าจะมี σ มากกว่ารูปทรงเตี้ยกว่า



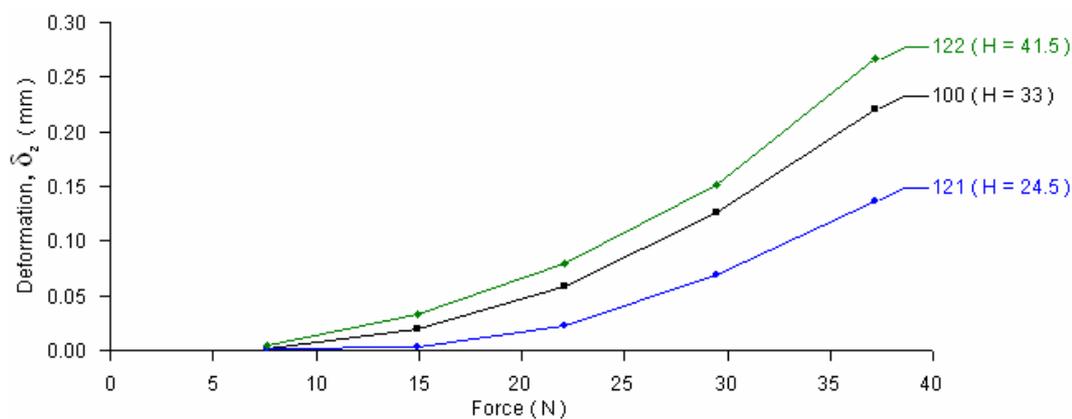
ภาพที่ 86 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 121 และ 122 ที่ภาระ 22.06 N



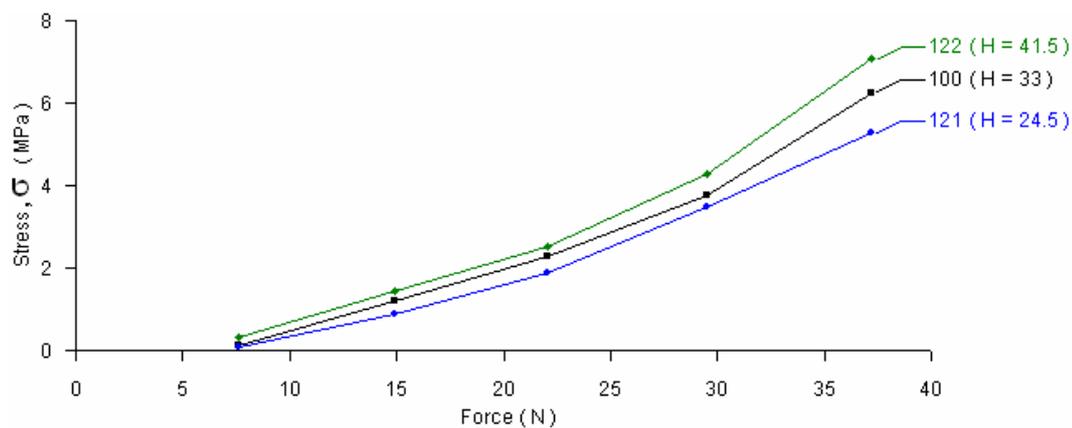
ภาพที่ 87 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 121 และ 122 ที่ภาระ 22.06 N



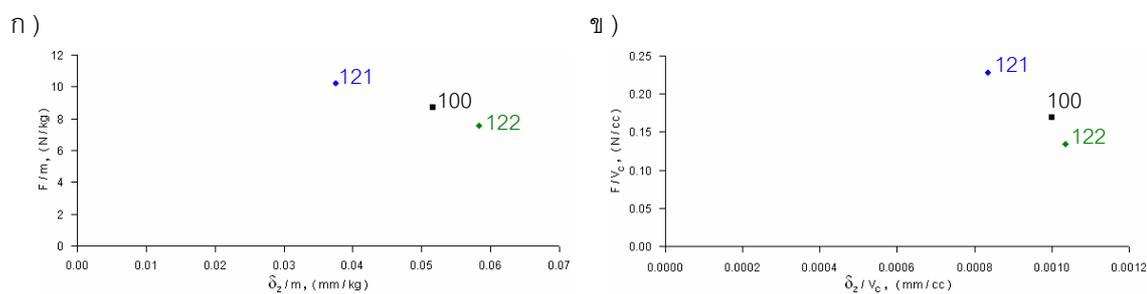
ภาพที่ 88 ความเค้น (σ) ของรูปทรง แบบ 121 และ 122 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 89 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100, 121, 122



ภาพที่ 90 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100, 121, 122



ภาพที่ 91 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 100, 121, 122

ภาพที่ 90 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) โดยรูปทรงที่แข็งแรง (มี F/m สูงสุด และ δ_z/m น้อยที่สุด) คือ แบบ 121 ($H = 24.5$ mm) หรือรูปทรงที่มีความสูงน้อย

7. ผลการวิเคราะห์ขอบมลของรูปทรง แบบ 100

7.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ และ δ_z (ภาพที่ 92 และ 93) ของรูปทรง 100 เมื่อมีขอบมลที่มุมของทั้ง 4 โดยขอบมลมีขนาดรัศมี R_C เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm (แบบ 131, 132 และ 133 ตามลำดับ) เมื่อมีขอบมลรอบขอบฐาน โดยมีขนาด R_E เท่ากับ 1, 3, และ 5 mm (แบบ 141, 142 และ 143) และเมื่อมีทั้ง R_C และ R_E เท่ากับ 1, 3, และ 5 mm (แบบ 151, 152 และ 153) เมื่อวิเคราะห์ระยะยุบ $|\delta|$ แล้วพบว่าลักษณะ และตำแหน่งที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะยุบเหมือนกับ แบบ 100 นั่นคือเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาว (สีแดง) ส่วน δ_z มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่ฐาน เช่นเดียวกับแบบ 100

7.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

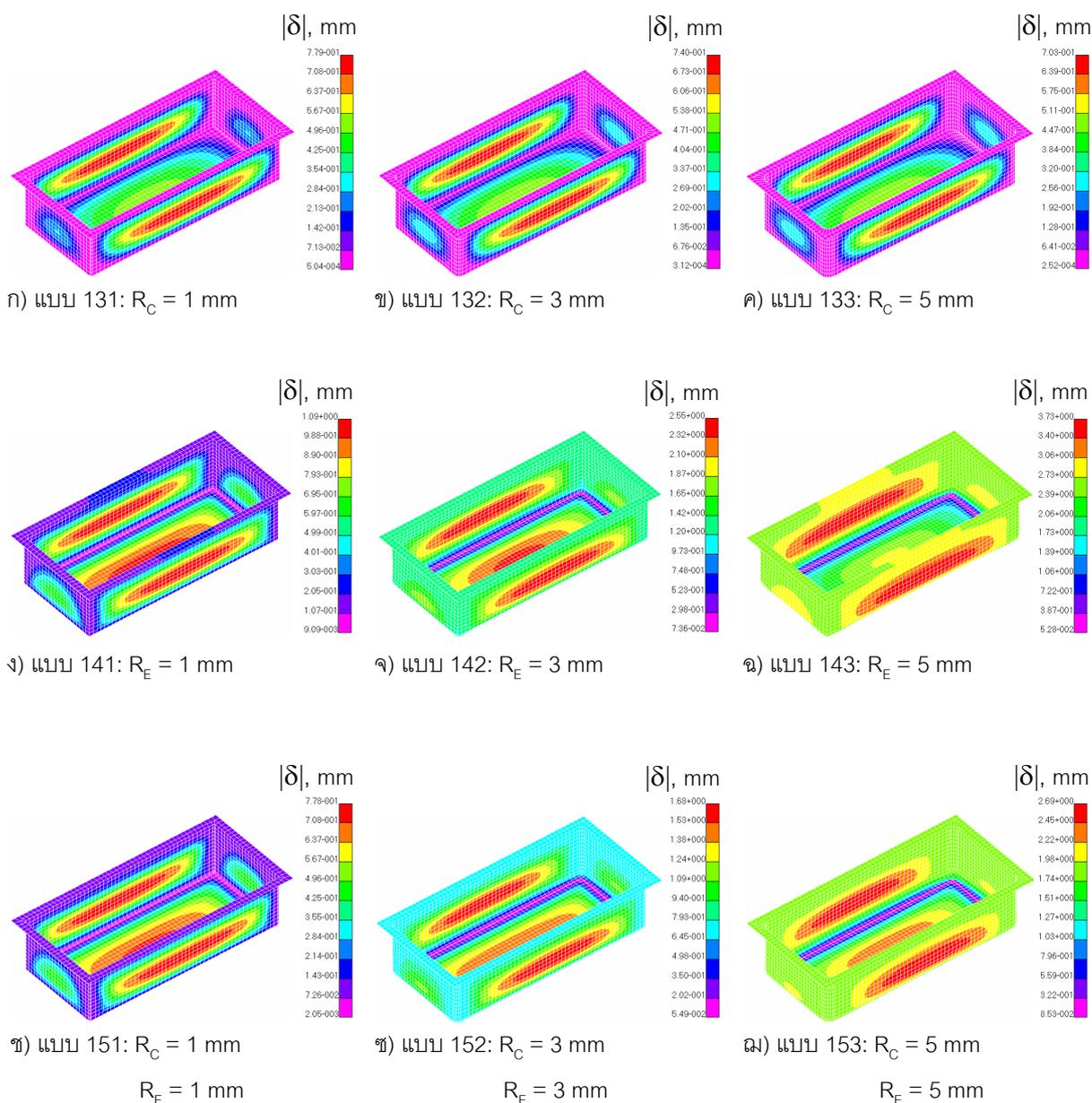
ภาพตัวอย่างแสดงค่าความเค้น จากผล FEA ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N ได้แสดงในภาพที่ 94 ของรูปทรงแบบ 131 ถึง 133 (ค่า R_C เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm) ความเค้นสูงสุด (สีแดง) เกิดที่บริเวณกลางผนังด้านยาวของบรรจุภัณฑ์ เหมือนกับรูปทรงแบบ 100 ส่วนรูปทรงแบบ 141 ถึง 143 (ค่า R_E เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm) และรูปทรง 151 ถึง 153 (ค่า R_C และ R_E เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm) เกิดความเค้นสูงสุด (สีแดง) ที่บริเวณมุมที่ฐานทั้ง 4 มุมของรูปทรง (ภาพที่ 94ง ถึง 94ฉ)

7.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรง 100 เมื่อมีขอบมล

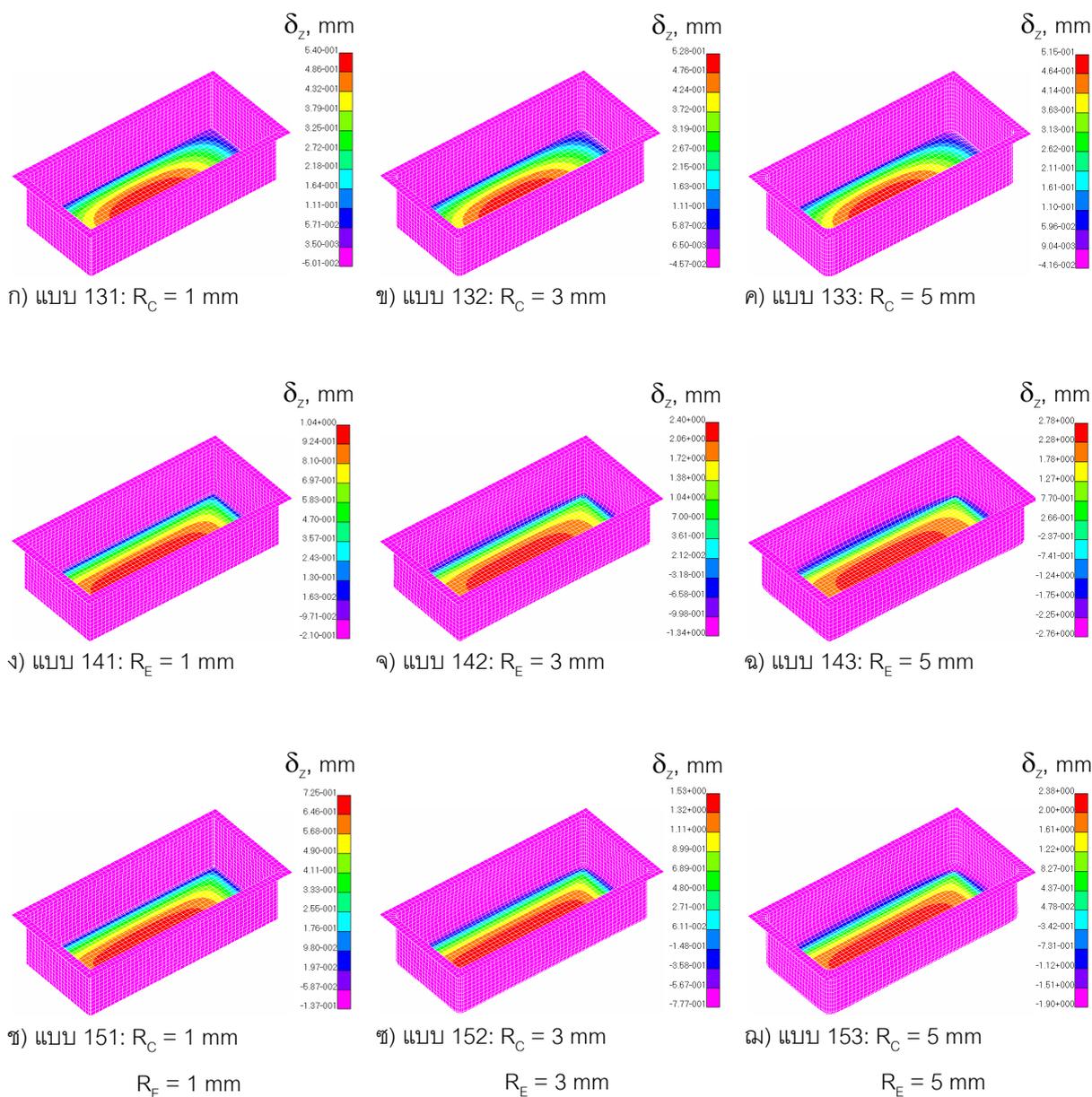
ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับ ภาระด้านบน (F) ของรูปทรงแบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153 ได้สรุปเป็นกราฟ ในภาพที่ 95 โดยกราฟนี้แสดง

ระยะยุบ δ_z แปรผันตรงกับค่า R_E (ขอบมลรอบฐาน) โดย δ_z มีค่ามากเมื่อ R_E มีค่ามาก กล่าวคือ รูปทรง 100 ที่มีค่า R_E มากจะเกิดการยุบมากกว่า เมื่อมี R_E น้อย ส่วนขนาดของขอบมลที่ขอบมุม (R_C) เมื่อค่า R_C มากทำให้ระยะยุบน้อยลง แต่ไม่ต่างอย่างชัดเจน เหมือนของ R_E

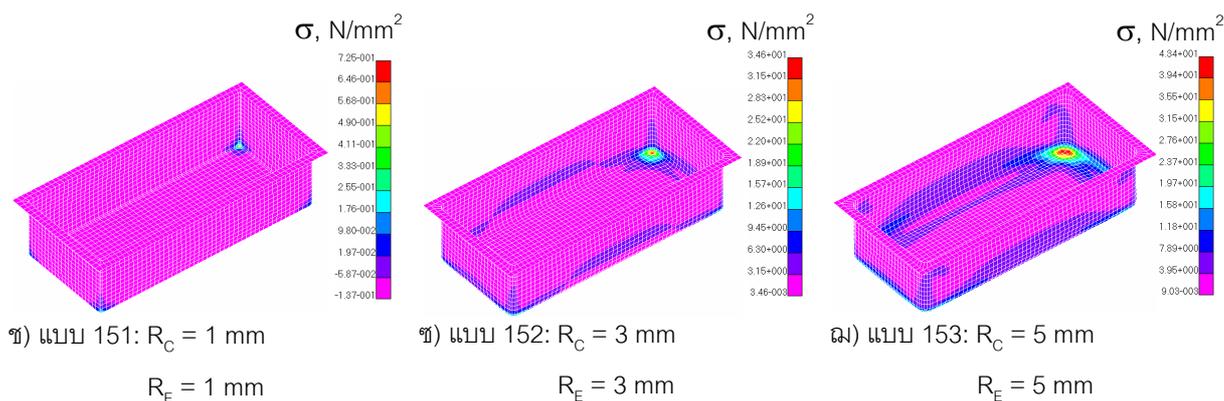
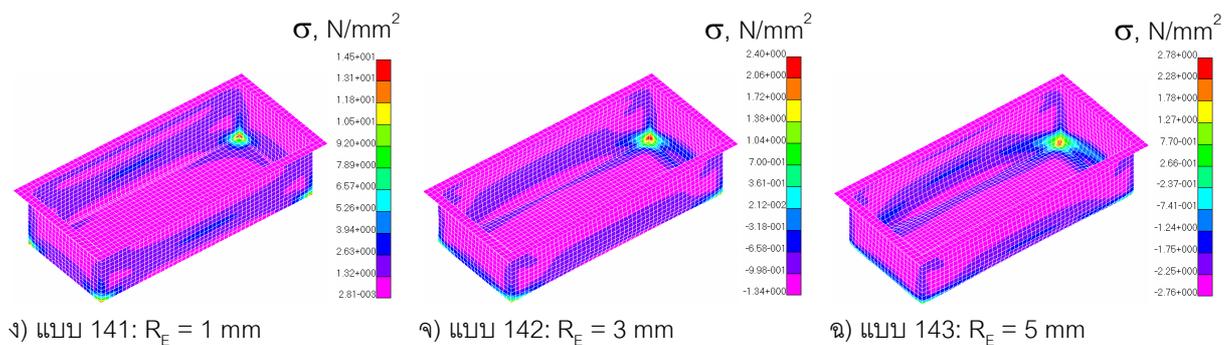
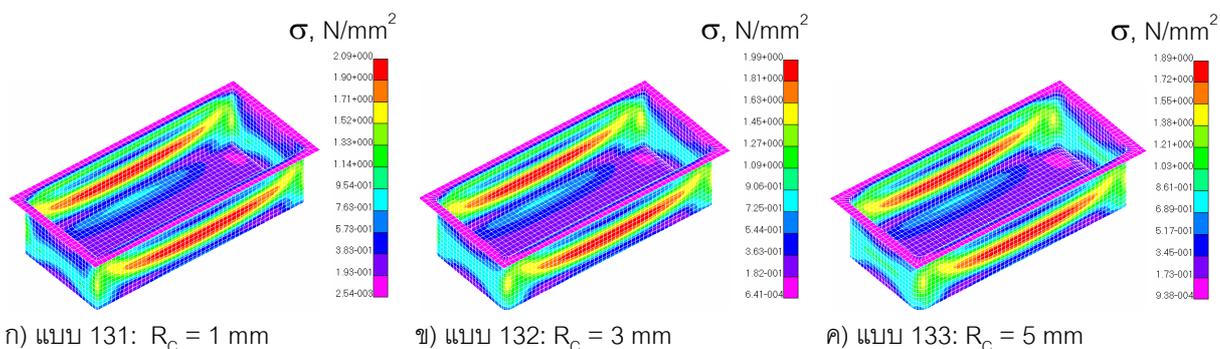
ความเค้นสูงสุดของบรรจุภัณฑ์รูปทรงทั้ง 10 แบบ ได้แสดงเป็นกราฟ σ vs F ในภาพที่ 96 จากภาพนี้ เมื่อ R_C มากจะมี σ น้อย ในขณะที่ R_E มาก ทำให้ σ มีค่ามากตามไปด้วย



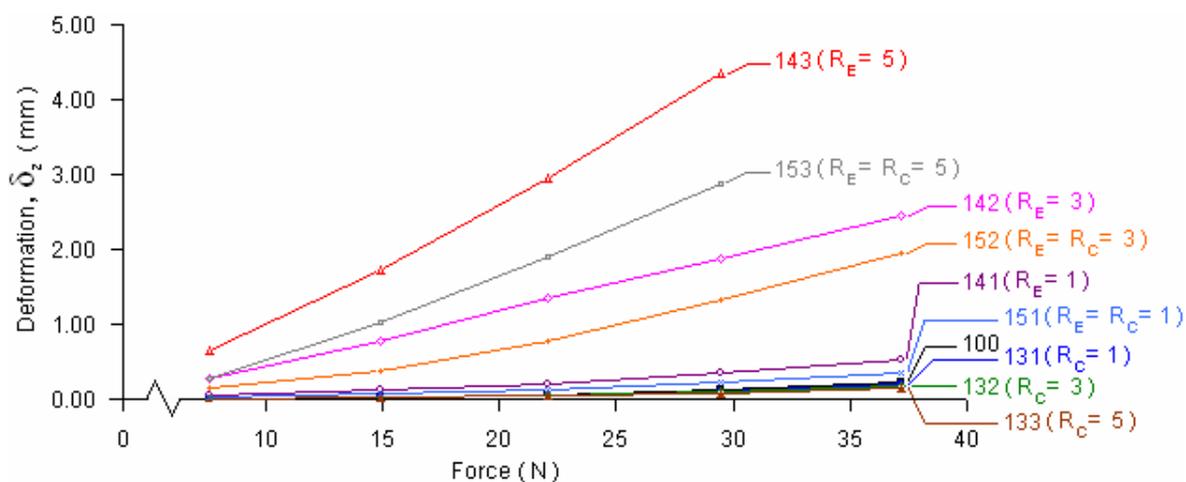
ภาพที่ 92 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



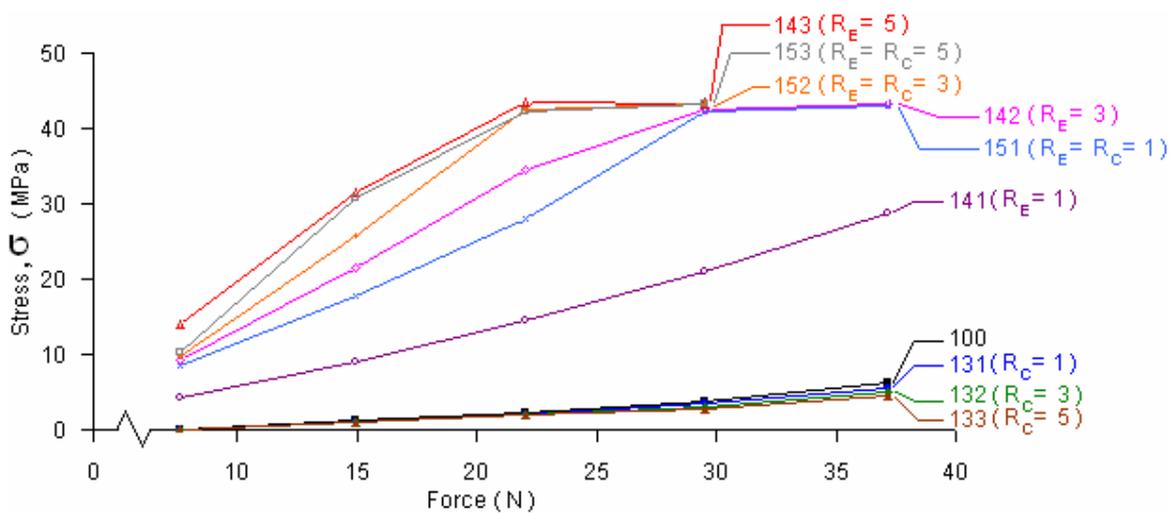
ภาพที่ 93 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 94 ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153
เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



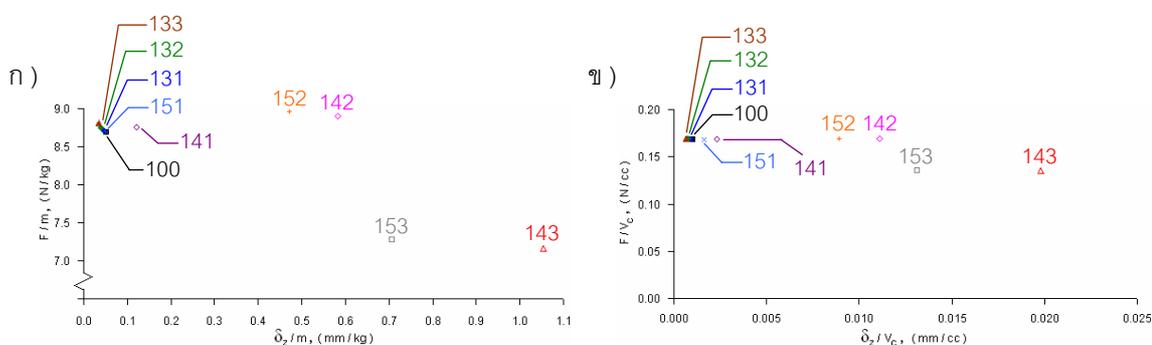
ภาพที่ 95 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153



ภาพที่ 96 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs δ_z/m) ของบรรจุภัณฑ์ทั้ง 10 รูปแบบ ได้แสดงใน ภาพที่ 97ก การเปรียบเทียบนี้เป็นการอ้างอิงภายใต้ภาระด้านบนสูงสุดของแต่ละรูปทรงที่สามารถรับได้ ประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุ (F/V_c vs δ_z/V_c) ได้แสดงใน ภาพที่ 97ข

รูปทรงที่แข็งแรง (มี F/m สูงสุด และมี δ_z/m น้อยสุด) คือ แบบ 133 (R_c เท่ากับ 5 mm) ในขณะที่รูปทรงแบบ 143 (R_E เท่ากับ 5 mm) มีค่า F/m น้อยสุด และ δ_z/m มากสุด และได้ผลที่คล้ายคลึงกันสำหรับ F/V_c และ δ_z/V_c ดังนั้น ขอบมวลรอบฐาน ที่มีขนาดรัศมี R_E มาก ทำให้ลดประสิทธิภาพการรับภาระด้านบน มีการยุบตัวมาก และความแข็งแรงลดลง



ภาพที่ 97 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 100, 131 ถึง 133, 141 ถึง 143 และ 151 ถึง 153

8. ผลการวิเคราะห์ความชันผนังของรูปทรง แบบ 100

8.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N ของรูปทรงแบบ 100 เมื่อผนังมีความชัน (θ) เป็นมุมเท่ากับ 1° , 3° และ 5° (แบบ 161, 162 และ 163 ตามลำดับ) ได้แสดงในภาพที่ 98 โดยภาพนี้แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งรวมเกิดขึ้นมากที่สุดที่กึ่งกลางของผนังด้านยาว (สีแดง) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับของแบบ 100 ส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) มีลักษณะเหมือนกับแบบ 100 เช่นเดียวกัน (ภาพที่ 99)

8.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

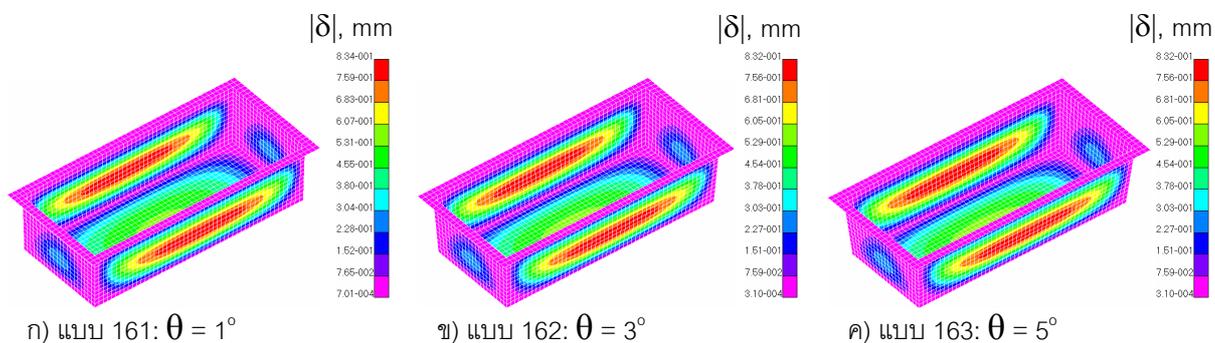
ภาพที่ 100 เป็นภาพตัวอย่างแสดงค่าความเค้น ของรูปทรง 161, 162 และ 163 เมื่อมีภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N ซึ่งภาพนี้แสดงความเค้นสูงสุด (สีแดง) ปกติที่ตำแหน่งและมีลักษณะคล้ายกับของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 โดยความเค้นสูงสุดเกิดที่บริเวณกลางผนังด้านยาวของบรรจุภัณฑ์รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

8.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรง 100 เมื่อผนังมีความชัน

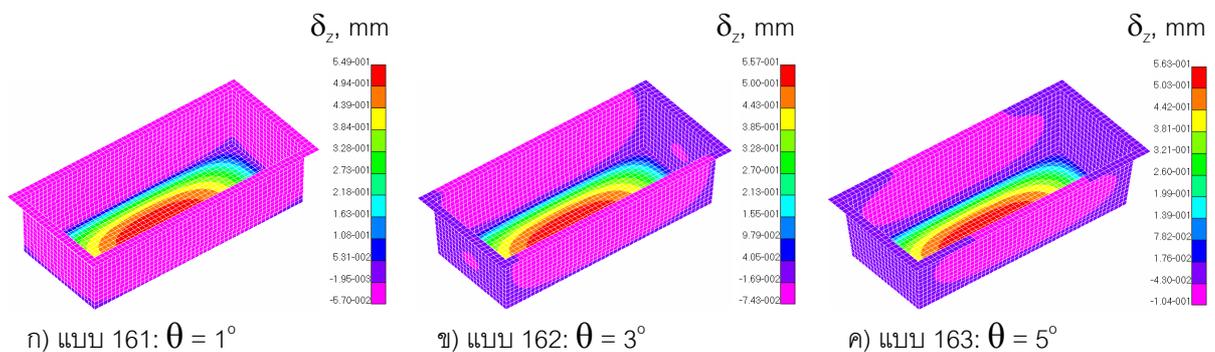
ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรง แบบ 100, 161, 162 และ 163 ได้สรุปเป็นกราฟ δ_z vs F ในภาพที่ 101 โดยกราฟของรูปทรงแบบ 163 (ซึ่งมีความชันมากที่สุด $\theta = 5^\circ$) มีค่าระยะยุบ δ_z มากสุด รองมาคือ แบบ 162 และแบบ 161 ดังนั้นรูปทรงที่มีความชันมาก ทำให้เกิด δ_z มากตามไปด้วย

ความเค้นสูงสุดของรูปทรงแบบ 161 ถึง 163 และ 100 ได้สรุปเป็นกราฟ σ_{MAX} vs F ได้ตามแสดงในภาพที่ 102 โดยภาพนี้ ได้แสดงรูปทรงที่มีความชันมาก จะมีความเค้นมากกว่าเมื่อมีความชันน้อย

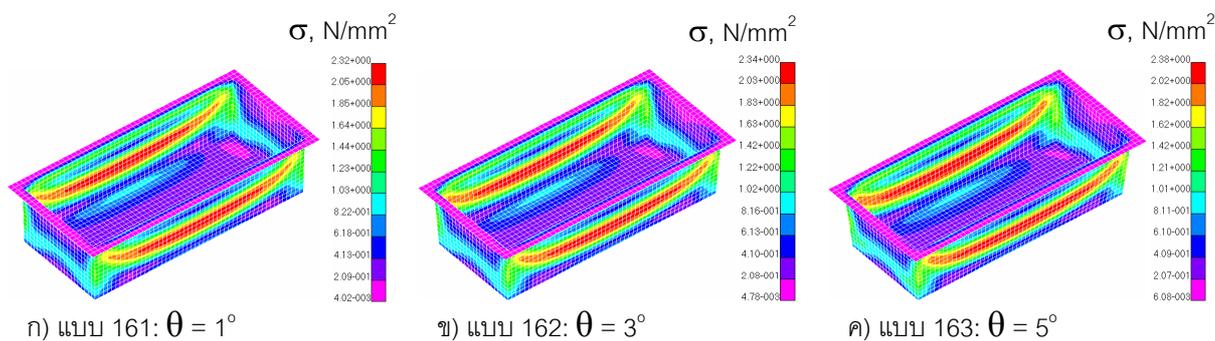
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (F/m vs σ_z/m และ F/V_c vs δ_z/V_c) ได้แสดงในภาพที่ 103 รูปทรงที่มีความแข็งแรงทนต่อภาระด้านบนมากที่สุด (F/m สูง และ δ_z/m น้อย) ผลจากภาพที่ 103 แสดงไม่มีแบบความชันใดๆ ที่มีความเด่นชัดทั้งสองกรณี กล่าวคือ แบบ 163 ($\theta = 5^\circ$) เด่นด้าน F/m แต่ด้อยด้าน δ_z/m ในขณะที่แบบ 161 ($\theta = 1^\circ$) เด่นด้าน δ_z/m แต่ด้อยกว่าด้าน F/m



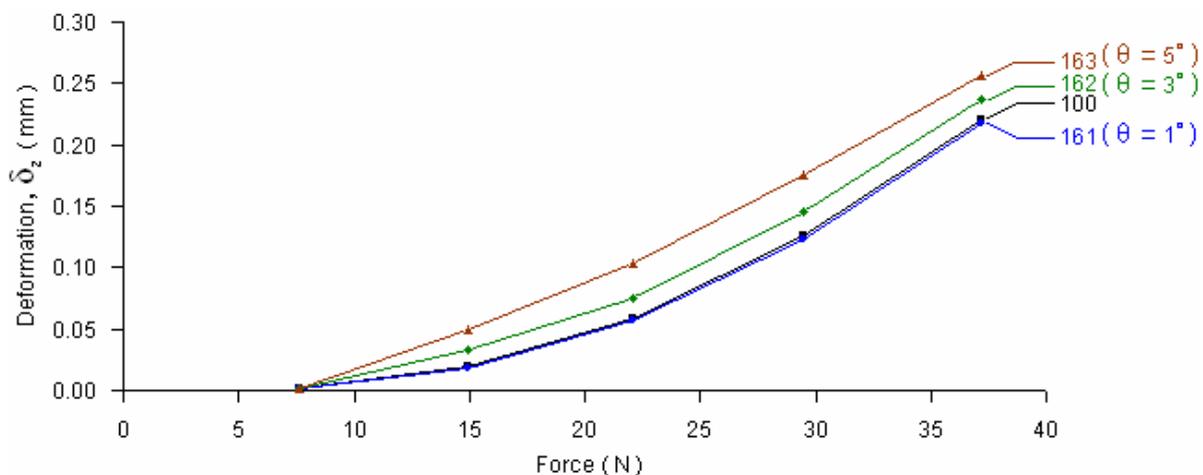
ภาพที่ 98 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 161 ถึง 163 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



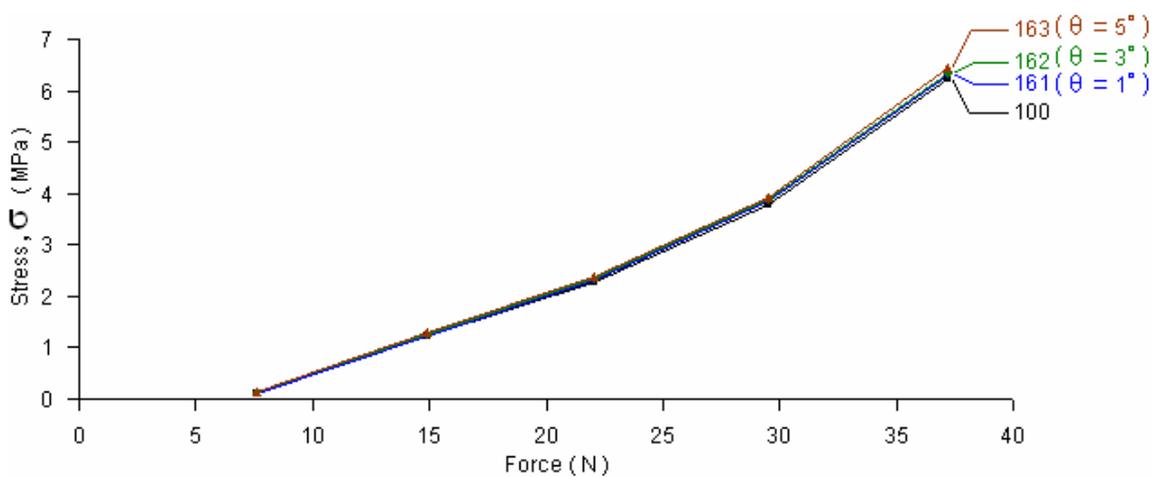
ภาพที่ 99 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 161 ถึง 163 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 100 ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 161 ถึง 163 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N

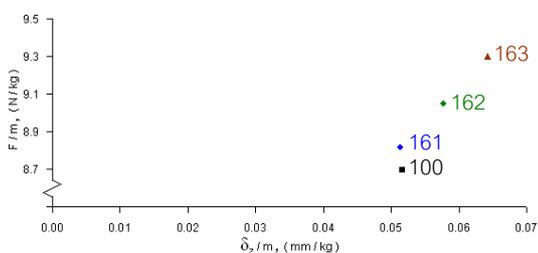


ภาพที่ 101 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100, 161 ถึง 163

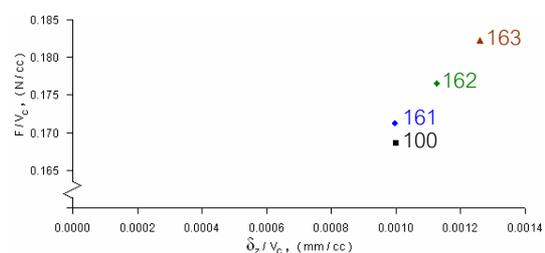


ภาพที่ 102 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100, 161 ถึง 163

ก)



ข)



ภาพที่ 103 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 100, 161 ถึง 163

9. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงกระบอกเมื่อเปลี่ยนขนาด

9.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบ $|\delta|$ ภายใต้ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N เมื่อรูปทรง 200 (ทรงกระบอก) เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ได้แสดงในภาพที่ 104 (แบบ 201 และ 202) เมื่อเปลี่ยนความสูง (H) ได้แสดงในภาพที่ 105 (แบบ 221 และ 222) เมื่อเพิ่มขอบมดที่ขอบฐาน R_E ภาพที่ 106 (แบบ 241, 242 และ 243) และเมื่อมีมุมความชัน (θ) ได้แสดงในภาพที่ 107 (แบบ 261, 262 และ 263) การเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุด $|\delta|$ เกิดที่บริเวณฐานของรูปทรงกระบอกทุกแบบ โดยเป็นการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z ซึ่งเหมือนกับ แบบ 200 การยุบตัวตามแกน Z (δ_z) มีลักษณะเหมือนกับแบบ 200 ได้แสดงในภาพที่ 108 ถึง 111

9.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงค่าความเค้น ของรูปทรง 200 เมื่อเปลี่ยนค่า D, H, θ และ R_E ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N ได้แสดงในภาพที่ 112 ถึง 115 ตามลำดับ โดยความเค้นสูงสุดเกิดที่ผนังของทรงกระบอกเมื่อไม่มีขอบมดที่รอบขอบฐาน (R_E) แต่เมื่อเพิ่มค่า R_E เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm รูปทรงที่มี R_E จะมีความเค้นเกิดที่บริเวณขอบมดรอบฐานวงกลม (ภาพที่ 114)

9.3 การเปรียบเทียบผล FEA เมื่อเปลี่ยนขนาดของรูปทรงกระบอก

การเปรียบเทียบผลระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263 (เปลี่ยน D, H และ θ) ได้สรุปเป็นกราฟในภาพที่ 116 และแบบ 200, 241 ถึง 243 ในภาพที่ 117

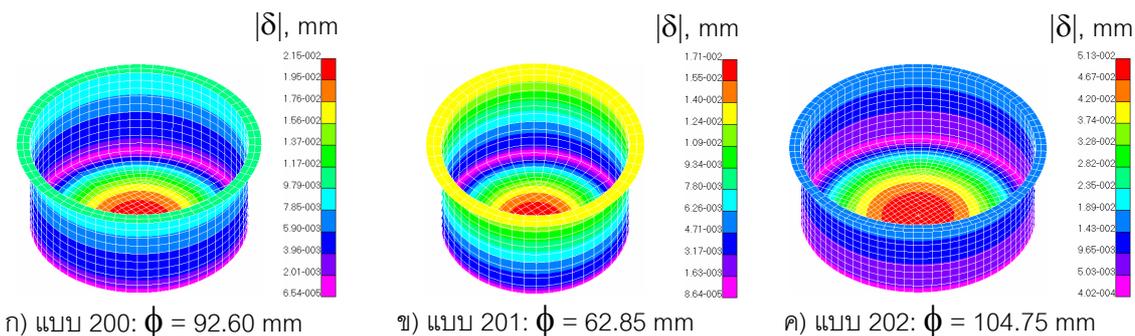
จากกราฟในภาพที่ 116 รูปทรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยจะมี δ_z มากกว่าในรูปทรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมาก แต่รูปทรงที่มีความสูง และความชันมาก จะทำให้ δ_z มาก (เมื่อเทียบกับความสูง และความชันน้อย) กราฟของภาพที่ 117 แสดงรูปทรงกระบอกที่มี R_E มากเป็นผลให้ δ_z

มากตามไปด้วย สังเกตว่าเมื่อ $R_E = 5$ mm (แบบ 243) จะมี δ_z มากกว่า 177.2 เท่า เมื่อเทียบกับแบบ 200 ($R_E = 0$)

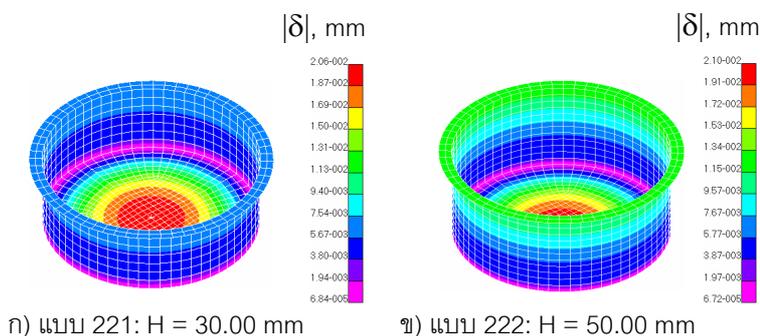
ผลวิเคราะห์ความเค้นสูงสุดของบรจกัณฑ์แบบ 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263 ได้สรุปเป็นกราฟ σ vs F ในภาพที่ 118 และของแบบ 200 และ 241 ถึง 243 ในภาพที่ 119 โดยผลที่ได้มีลักษณะแบบเดียวกับของ δ_z กล่าวคือ รูปทรงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยจะมี σ มากกว่าในรูปทรงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมาก แต่รูปทรงที่มีความชันมาก จะทำให้ σ มาก (เมื่อเทียบกับความชันน้อย) และรูปทรงที่มีความสูงต่างกันจะมี σ ใกล้เคียงกัน กราฟของภาพที่ 119 แสดงรูปทรงกระบอกที่มี R_E มากเป็นผลให้ σ มากตามไปด้วย สังเกตว่าเมื่อ $R_E = 5$ mm (แบบ 243) จะมี σ มากกว่า 43.5 เท่า เมื่อเทียบกับแบบ 200 ($R_E = 0$)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs δ_z/m) ของบรจกัณฑ์ทั้ง 12 รูปแบบ ได้สรุปใน ภาพที่ 120ก และ 121ก โดยการเปรียบเทียบนี้เป็นการอ้างอิงภายใต้ภาวะด้านบนสูงสุด ของแต่ละรูปทรงที่จะสามารถรับได้ ประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปริมาตรบรจ (F/V_c vs δ_z/V_c) ได้แสดงในภาพที่ 120ข และ 121ข

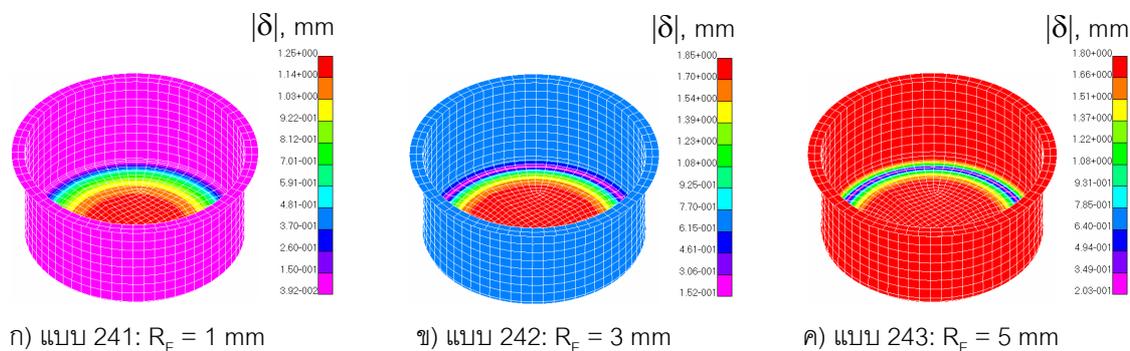
รูปทรงที่แข็งแรง (มี F/m และ F/V_c สูง) คือ แบบ 201 (ϕ น้อย) ส่วนแบบ 202 (ϕ มาก) มีค่า F/m น้อยที่สุด แต่ให้ δ_z/m (และ δ_z/V_c) ต่ำที่สุด ดังนั้นในทางกลับกัน ตัวอย่างเช่น รูปทรงกระบอก ที่มี ϕ น้อย จะมี δ_z/m และ δ_z/V_c มาก สำหรับความสูงของรูปทรงกระบอก (200, 221 และ 222) พบว่า แบบ 221 (H น้อย) มีค่า F/m สูง และในขณะเดียวกันค่า δ_z/m ต่ำ การเปลี่ยนค่า θ ของรูปทรงกระบอก (261 ถึง 263) เมื่อ θ มากจะมี F/m และ F/V_c มาก แต่ในทางตรงข้าม ทำให้ δ_z/m และ δ_z/V_c มากตามไปด้วย ส่วนรูปทรงที่มีระยะยุบต่อน้ำหนัก (δ_z/m) มากที่สุด คือ แบบ 243 ($R_E = 5$ mm) ซึ่งมีค่า R_E มากที่สุด ดังนั้น เมื่อ R_E มากจะทำให้ F/m และ F/V_c สูง แต่ก็จะทำให้ระยะยุบ (δ_z/m และ δ_z/V_c) มากตามไปด้วย



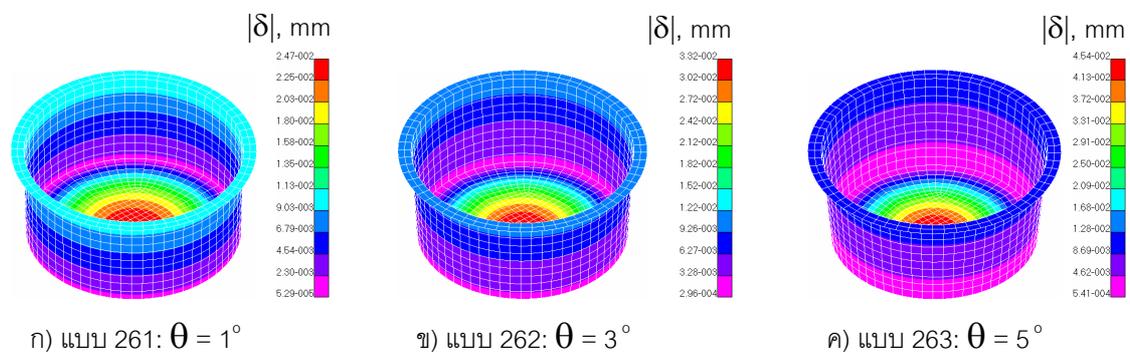
ภาพที่ 104 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202



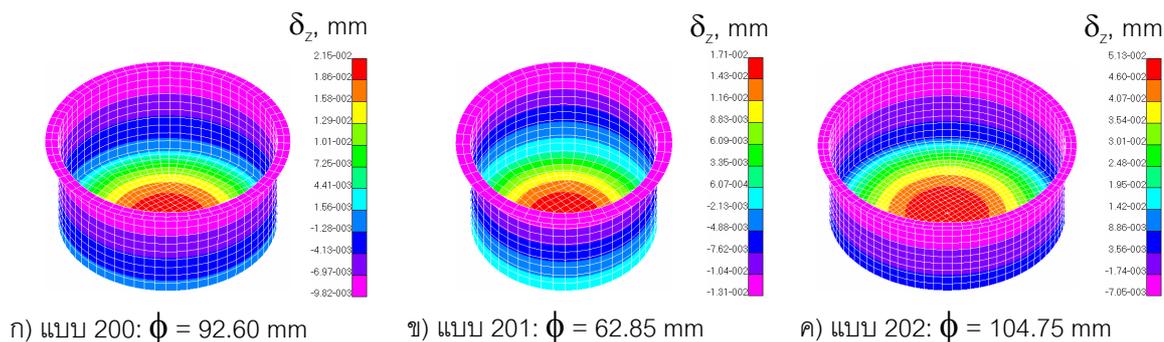
ภาพที่ 105 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 221 และ 222



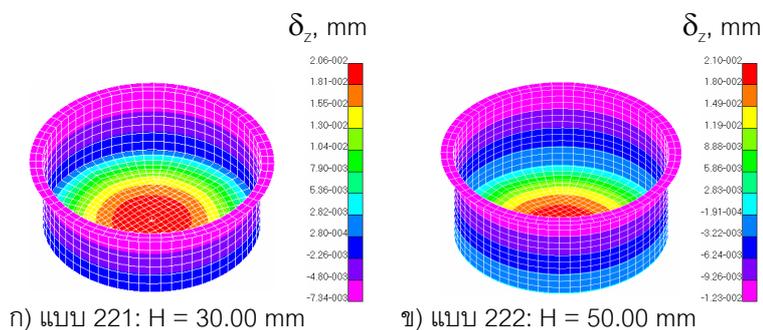
ภาพที่ 106 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 241 ถึง 243



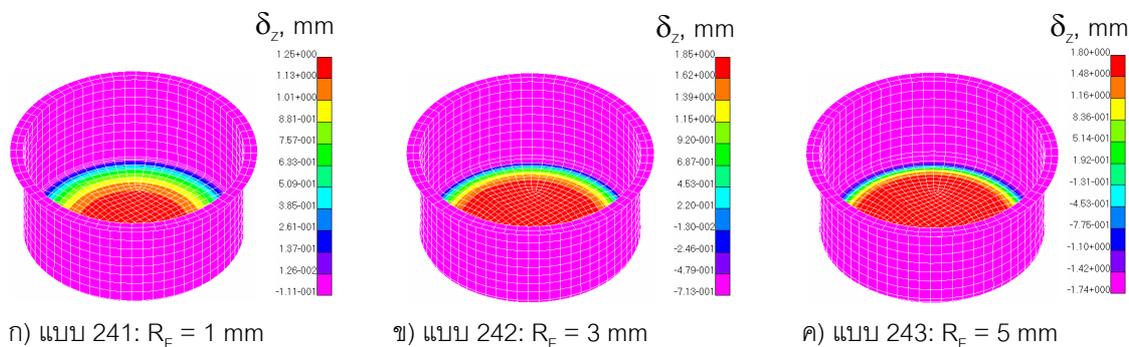
ภาพที่ 107 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 261 ถึง 263



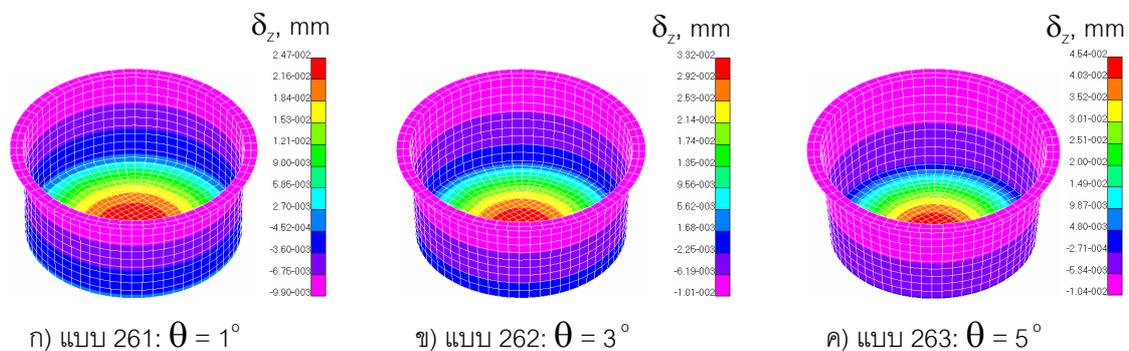
ภาพที่ 108 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202



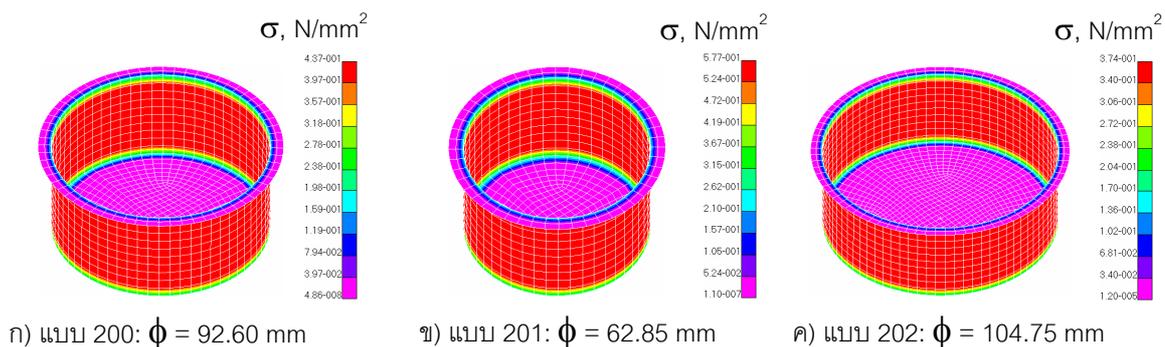
ภาพที่ 109 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 221 และ 222



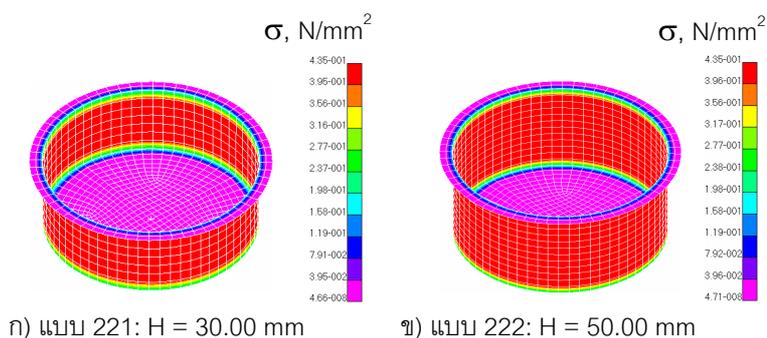
ภาพที่ 110 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 241 ถึง 243



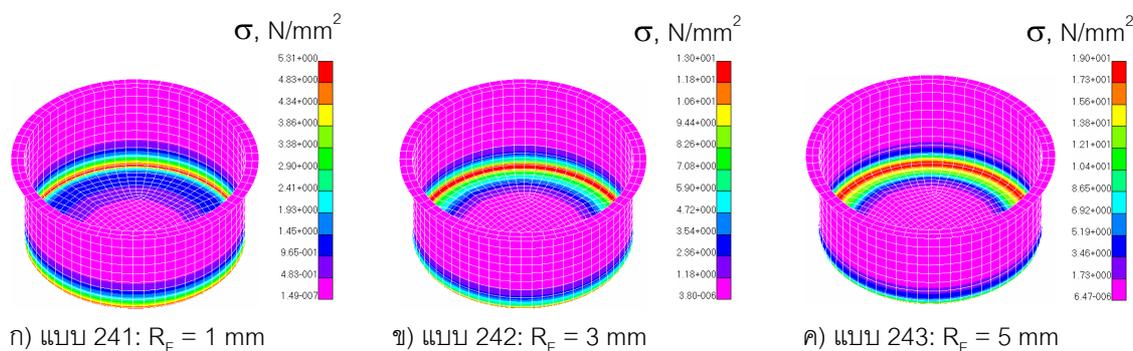
ภาพที่ 111 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 261 ถึง 263



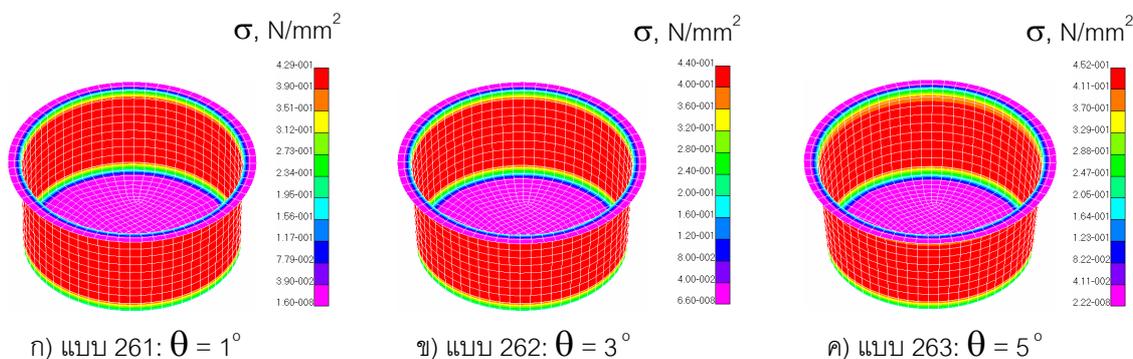
ภาพที่ 112 ความเค้นของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



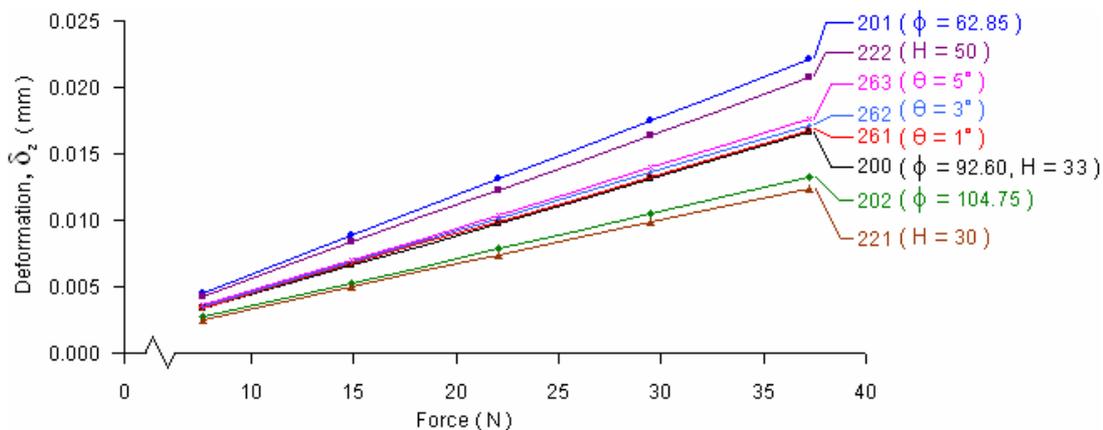
ภาพที่ 113 ความเค้นของรูปทรง แบบ 221 และ 222 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



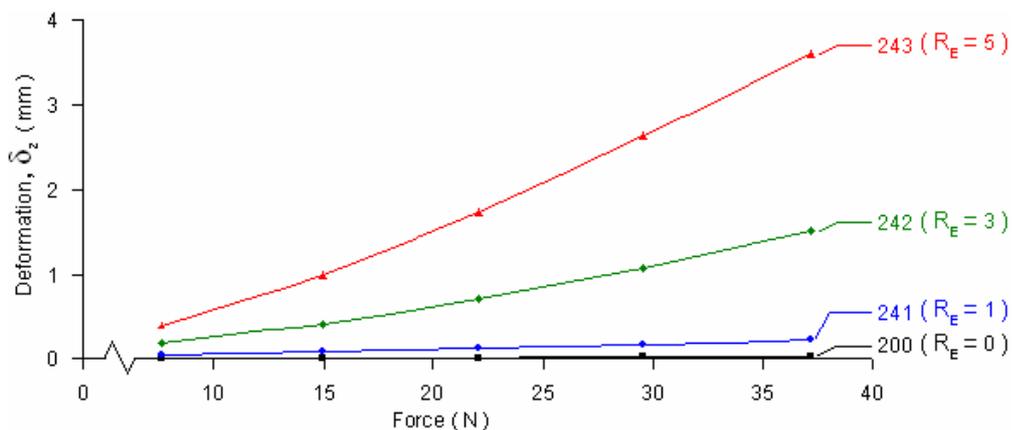
ภาพที่ 114 ความเค้นของรูปทรง แบบ 241 ถึง 243 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



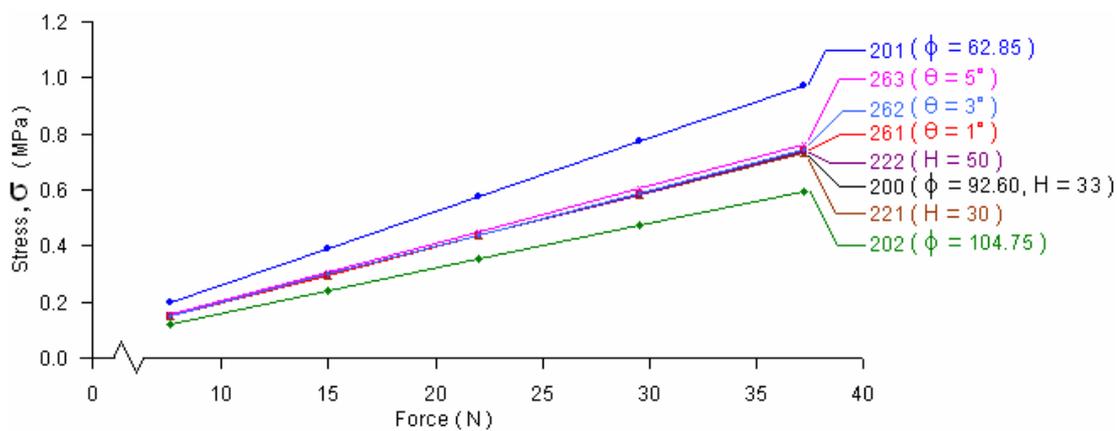
ภาพที่ 115 ความเค้นของรูปทรง แบบ 261 ถึง 263 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



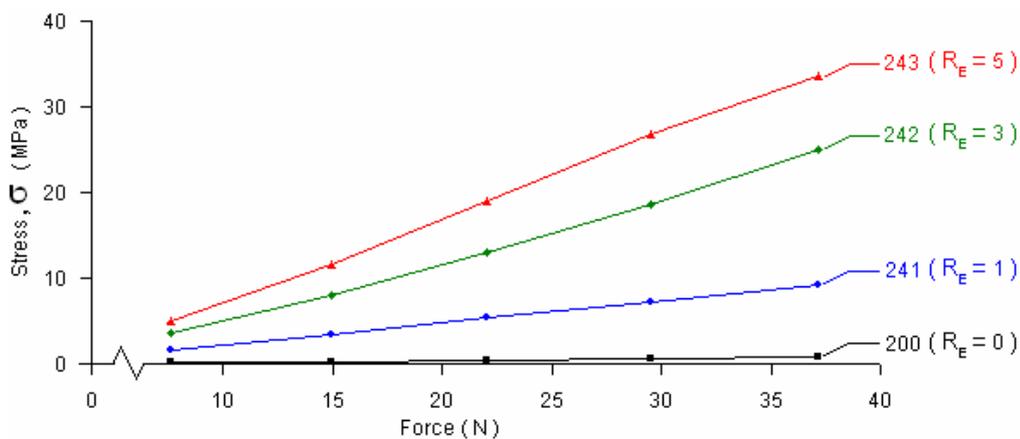
ภาพที่ 116 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263



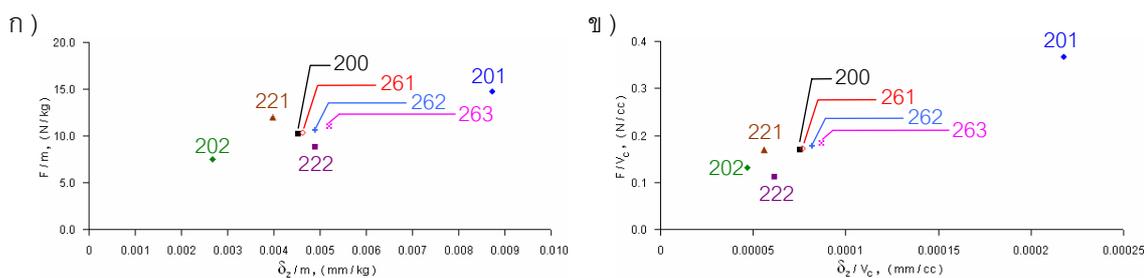
ภาพที่ 117 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 200 และ 241 ถึง 243



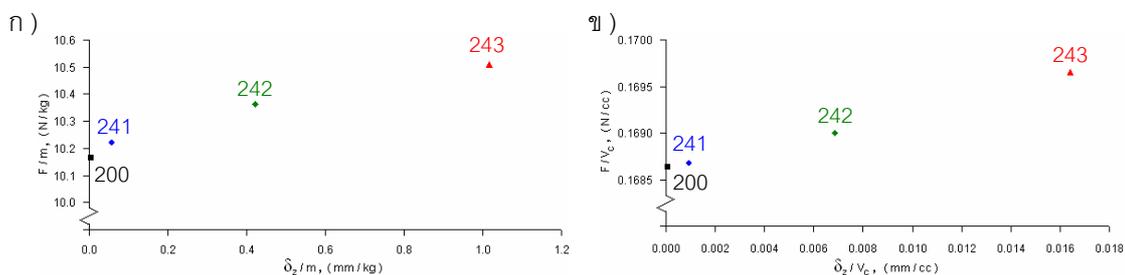
ภาพที่ 118 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263



ภาพที่ 119 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 200 และ 241 ถึง 243



ภาพที่ 120 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 200 ถึง 202, 221, 222 และ 261 ถึง 263



ภาพที่ 121 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 200 และ 241 ถึง 243

10. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเปลี่ยนขนาด

10.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA การวิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N เมื่อรูปทรง 300 เปลี่ยนความกว้าง หรือ minor axis (แบบ 301 และ 302) และความยาว หรือ major axis (แบบ 311 และ 312) ได้แสดงในภาพที่ 122 โดยรูปทรงแบบ 301, 302, 311 และ 312 มีการเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุด (สีแดง) ที่ตำแหน่งและลักษณะคล้ายกับแบบ 300 คือ เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) มีลักษณะเหมือนกับแบบ 300 ดังแสดงในภาพที่ 123

10.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

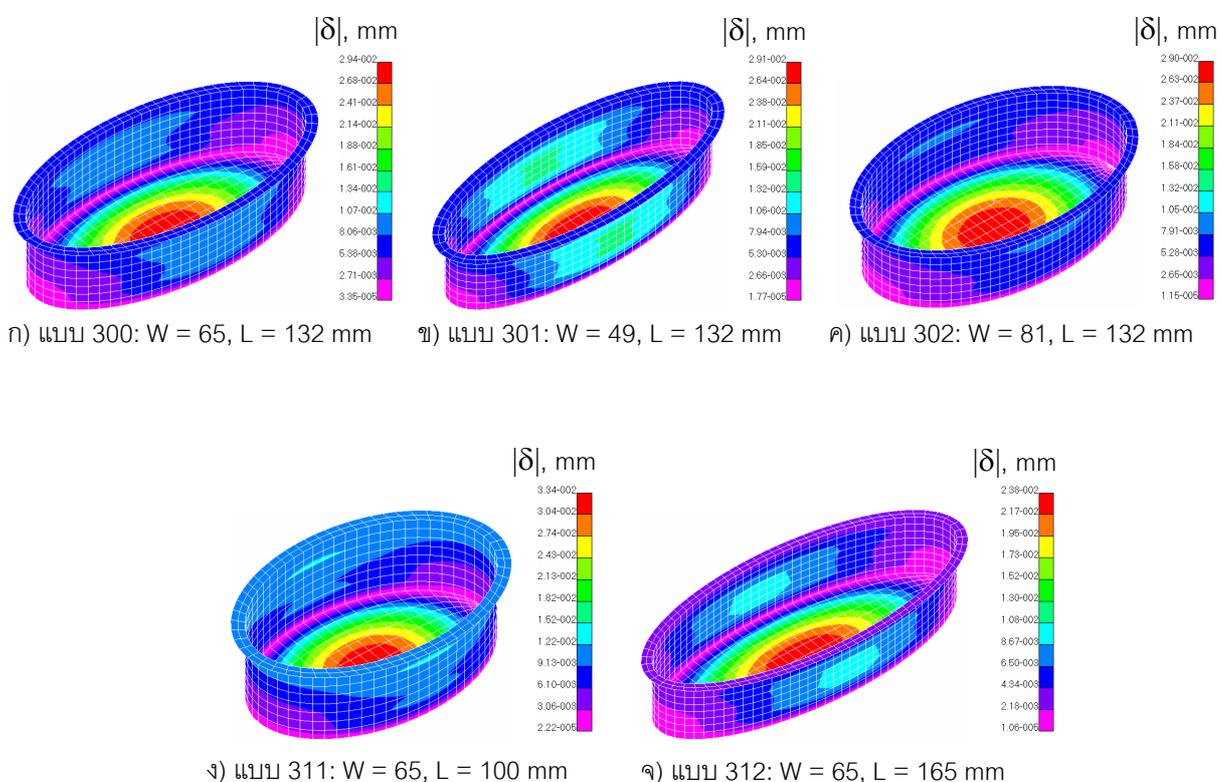
ความเค้นของรูปทรง แบบ 301 และ 302 (เปลี่ยนความกว้าง) 311 และ 312 (เปลี่ยนความยาว) มีความเค้นสูงสุดเกิดที่ตำแหน่ง และมีลักษณะคล้ายกับแบบ 300 คือ ที่บริเวณกลางผนังด้านยาวของทุกรูปทรง (ภาพที่ 124)

10.3 การเปรียบเทียบผล FEA เมื่อเปลี่ยนขนาดของรูปทรงวงรี

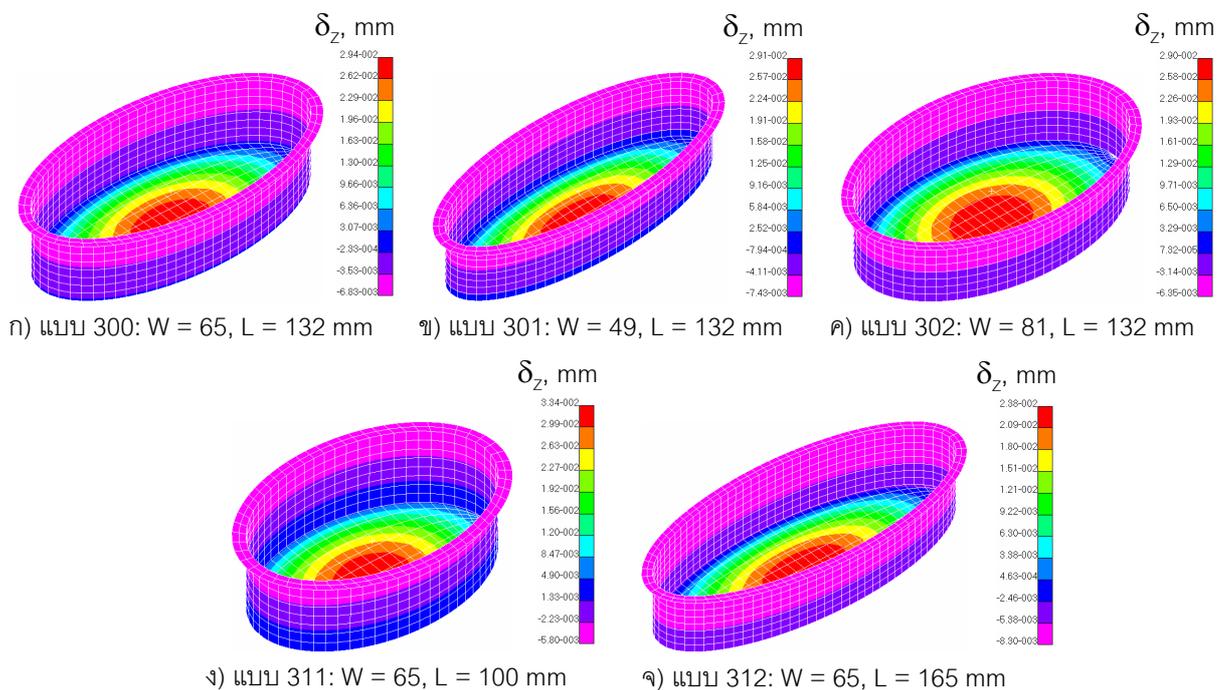
ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 ได้สรุปเป็นกราฟ (ในภาพที่ 125) จากภาพแสดงรูปทรงแบบ 311 ($W = 65 \text{ mm}$ และ $L = 100 \text{ mm}$) มี δ_z มากที่สุด รองลงมาคือ แบบ 301, 300, 302 และ 312 ตามลำดับ การให้ L คงที่ แล้วเปลี่ยน W (300 ถึง 302) พบว่า เมื่อ W มีค่าน้อย มีผลทำให้ δ_z มากขึ้น ในขณะที่เมื่อ W คงที่ แล้วเปลี่ยนค่า L น้อยลง (300, 311 และ 312) มีผลทำให้ δ_z มากขึ้น โดยผลที่ได้จากกราฟนี้ แสดง δ_z สัมพันธ์กับอัตราส่วน W/L

ความเค้นสูงสุดเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 ได้สรุปเป็นกราฟ σ vs F ในภาพที่ 126 โดยมีลักษณะกราฟเหมือนกับของ δ_z กล่าวคือ แบบ 311 มี σ สูงสุดรองลงมาคือ แบบ 301, 300, 302 และ 312 ตามลำดับ

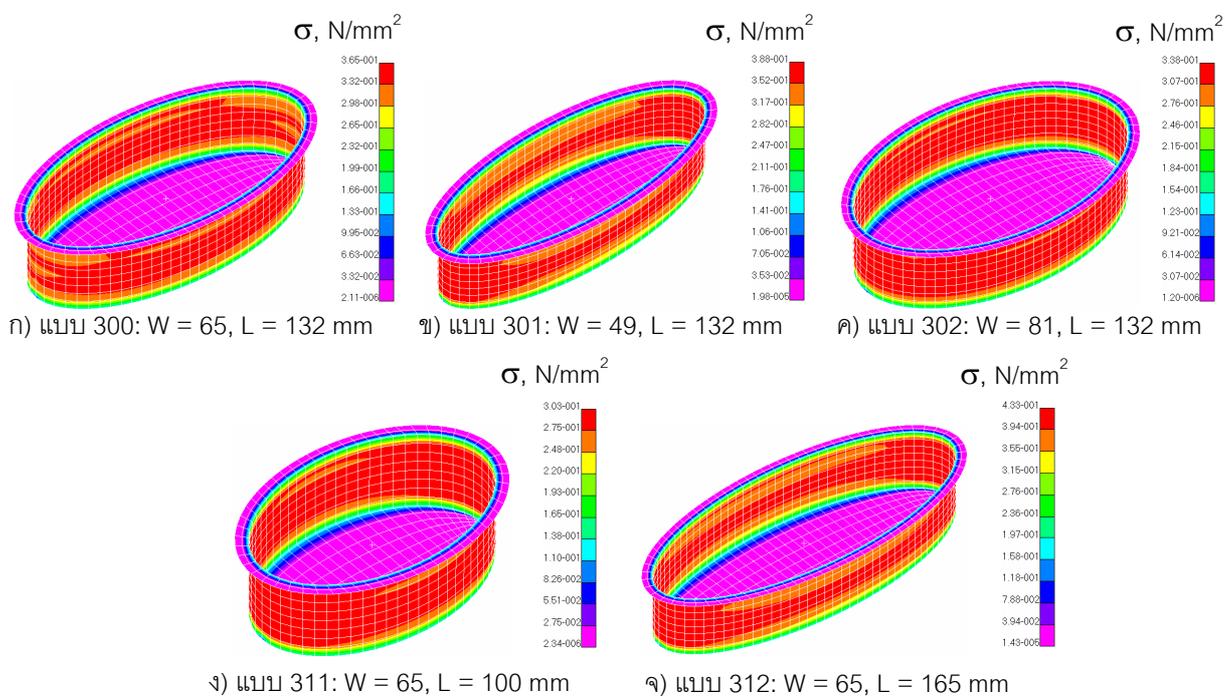
ภาพที่ 127 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) โดยรูปทรงมี F/m สูงสุด คือ แบบ 311 และ δ_z/m น้อยสุด คือ แบบ 312 และมีผลแบบเดียวกันสำหรับ F/V_c และ δ_z/V_c ดังนั้นประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์รูปวงรีขนาดต่างๆ (W และ L) จะได้ประสิทธิภาพดีอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าต้องการ F/m สูงจะทำให้ δ_z/m สูงตามไปด้วย



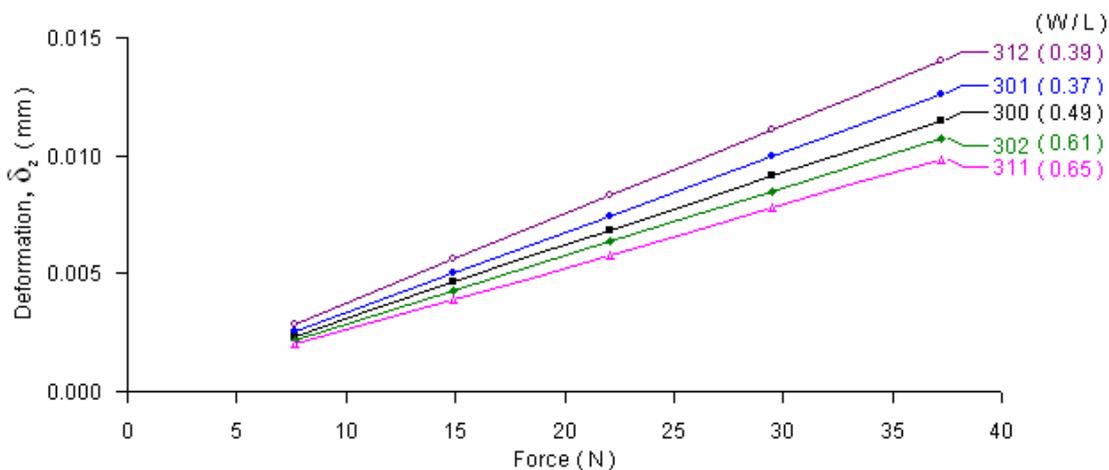
ภาพที่ 122 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



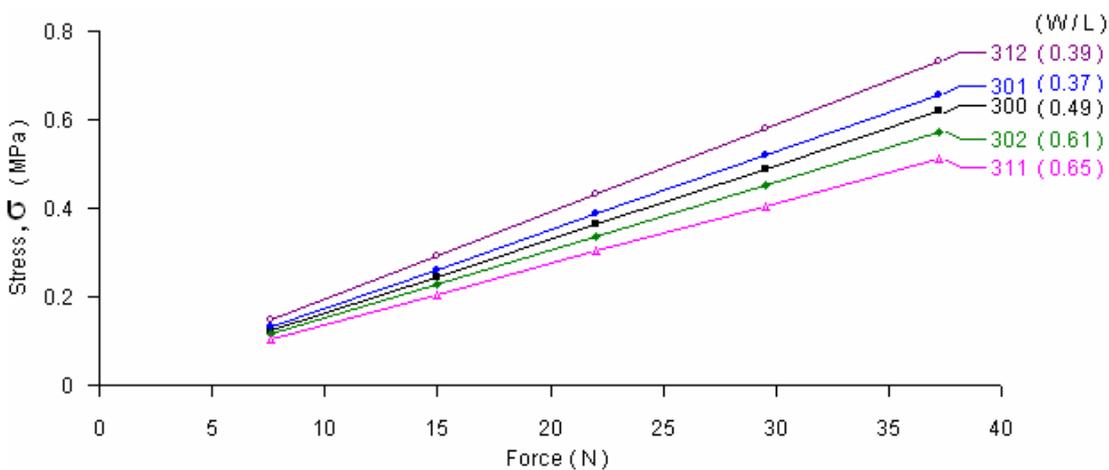
ภาพที่ 123 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



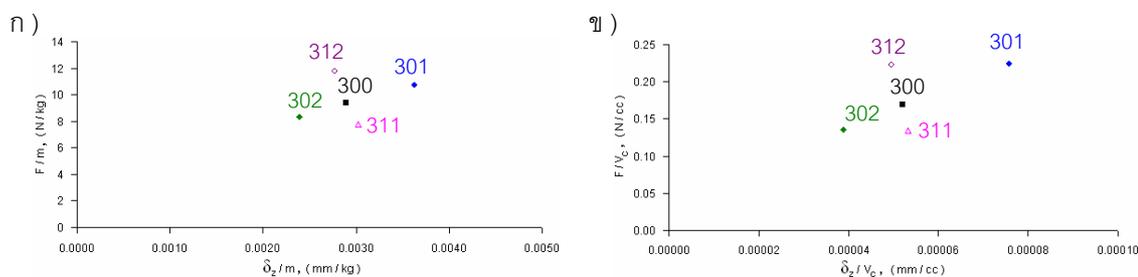
ภาพที่ 124 ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 125 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312



ภาพที่ 126 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312



ภาพที่ 127 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 300 ถึง 302 และ 311 ถึง 312

11. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเปลี่ยนความสูง

11.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N เมื่อรูปทรง 300 เปลี่ยนความสูง (H) (แบบ 321 ค่า H = 25 mm และ 322 ค่า H = 41 mm) ได้แสดงในภาพที่ 128 การเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุด (Magnitude) เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ (สีแดง) ซึ่งเป็นการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z ซึ่งเหมือนกับ แบบ 300 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) มีลักษณะเหมือนกับแบบ 300 (ภาพที่ 129)

11.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

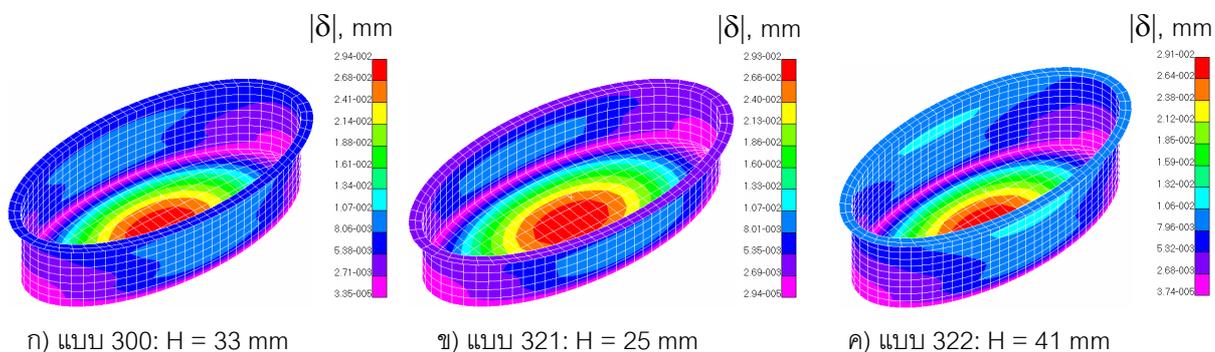
ความเค้น ของรูปทรง 300 เมื่อเปลี่ยนค่า H พบว่าเกิดความเค้นสูงสุดที่บริเวณผนังด้านข้างของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับแบบ 300 (ภาพที่ 130 เมื่อภายใต้ภาระด้านบนเท่ากับ 22.06 N)

11.3 การเปรียบเทียบผล FEA เมื่อเปลี่ยนความสูง ของรูปทรงวงรี

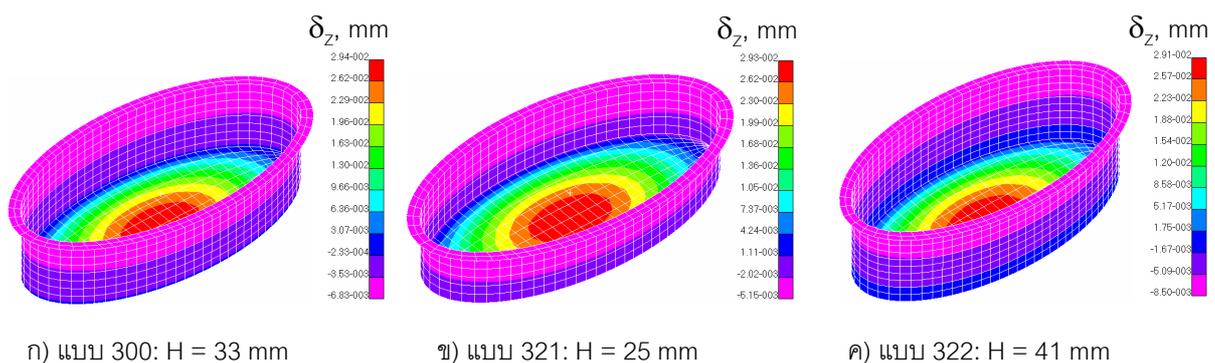
ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322 ได้สรุปเป็นกราฟ (ในภาพที่ 131) จากกราฟแสดงรูปทรงแบบ 322 (H = 41 mm) มีค่า δ_z มากที่สุด หรือรูปทรงวงรีที่มีความสูงมาก จะทำให้เกิด δ_z มากตามไปด้วย

ความเค้นสูงสุดเทียบกับภาระด้านบน (σ vs F) ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322 ได้สรุปเป็นกราฟ ในภาพที่ 132 โดย σ สูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วง 5 แรงทดสอบทั้ง 3 ความสูง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่อภาระด้านบนมีค่ามาก แบบ 300 มีความเค้นสูงสุด รองลงมาคือ แบบ 322 และ 321 ซึ่งแสดงความเค้น ไม่สัมพันธ์แบบผกผันกับความสูง

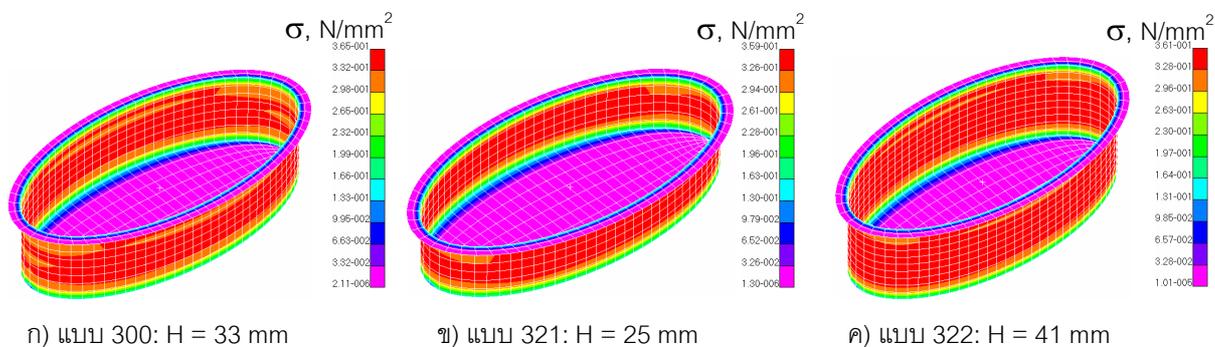
ภาพที่ 133 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (η) และ เชิงความจุ (χ) โดยรูปทรงมีทั้ง F/m สูงสุด และ δ_z/m น้อยสุด (ประสิทธิภาพเชิงน้ำหนักดีที่สุด) คือ แบบ 321 หรือรูปทรงวงรีที่มีค่าความสูงน้อย ส่วนประสิทธิภาพเชิงความจุจะไม่สัมพันธ์ กับความสูง



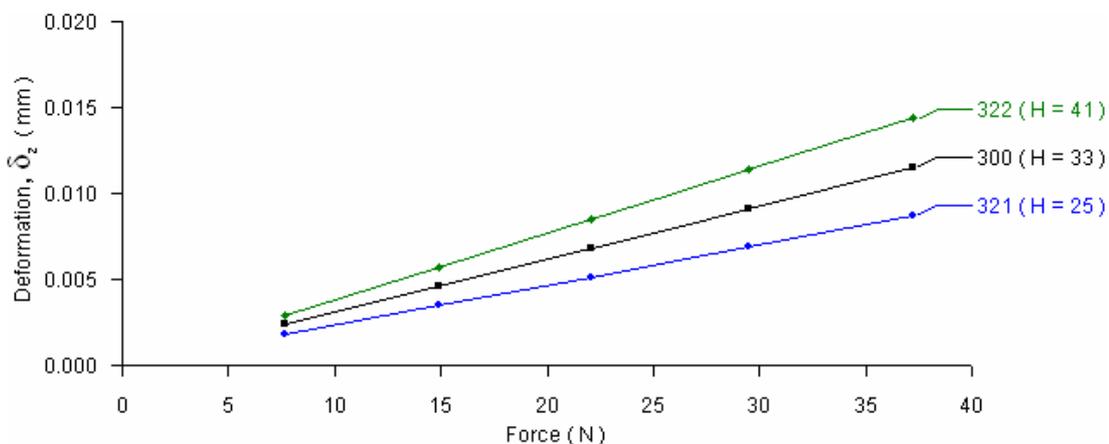
ภาพที่ 128 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



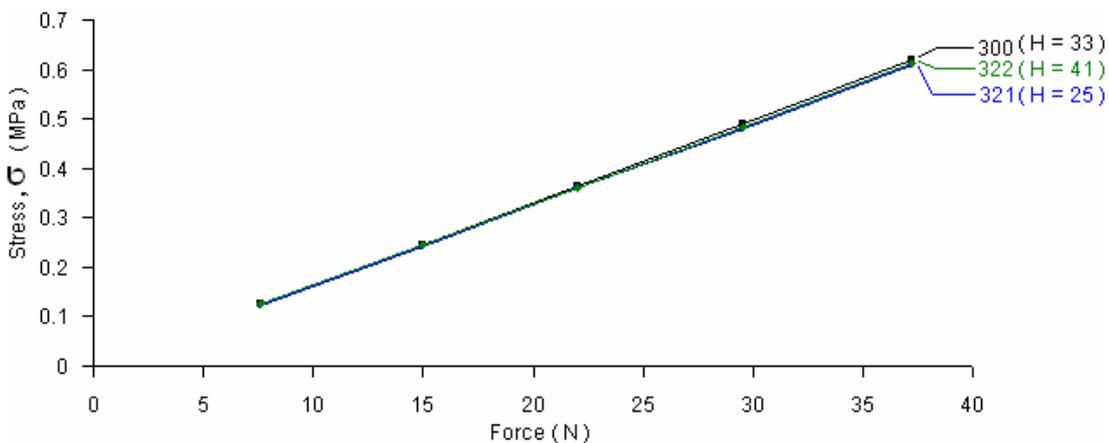
ภาพที่ 129 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



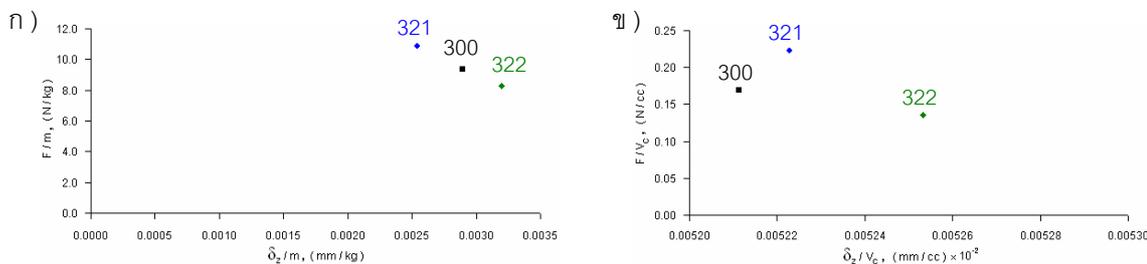
ภาพที่ 130 ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 300, 321 และ 322 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 131 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322



ภาพที่ 132 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322



ภาพที่ 133 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 300, 321 และ 322

12. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเพิ่มขอบมลที่ฐาน

12.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ เมื่อภาวะด้านบน เท่ากับ 22.06 N เมื่อรูปทรง 300 มีขอบมลที่ขอบฐาน โดยมีรัศมีของขอบมล R_E เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm (แบบ 341, 342 และ 343) ได้แสดงในภาพที่ 134 การเปลี่ยนตำแหน่ง ($|\delta|$) มากที่สุด (สีแดง) เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z ผลแสดงระยะยุบตามแกน Z (δ_z) มีลักษณะเหมือนกับแบบ 300 (ภาพที่ 135)

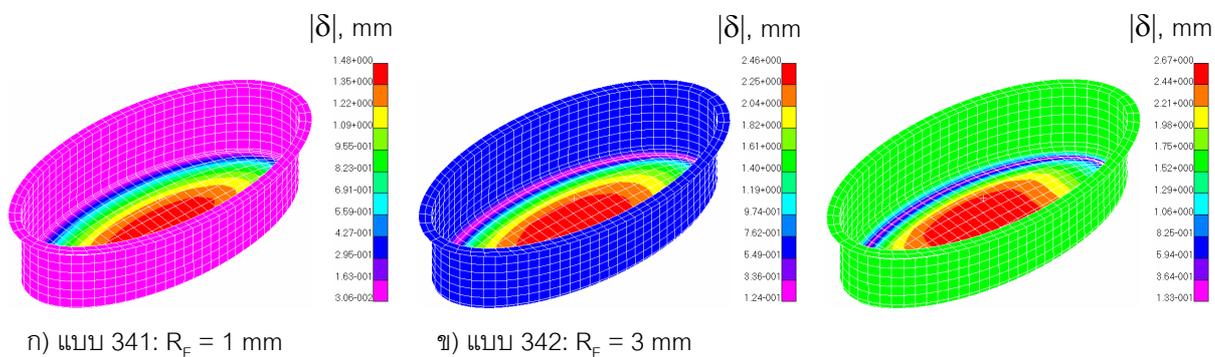
12.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

ความเค้นสูงสุด ของรูปทรง 341 ถึง 343 เกิดที่บริเวณปลายด้านแหลม ของฐานบรรจุภัณฑ์ ซึ่งแตกต่างจากแบบ 300 ที่เกิดบริเวณกลางผนังด้านยาวของบรรจุภัณฑ์ ภาพที่ 136 แสดงความเค้น ภายใต้ภาวะด้านบน เท่ากับ 22.06 N

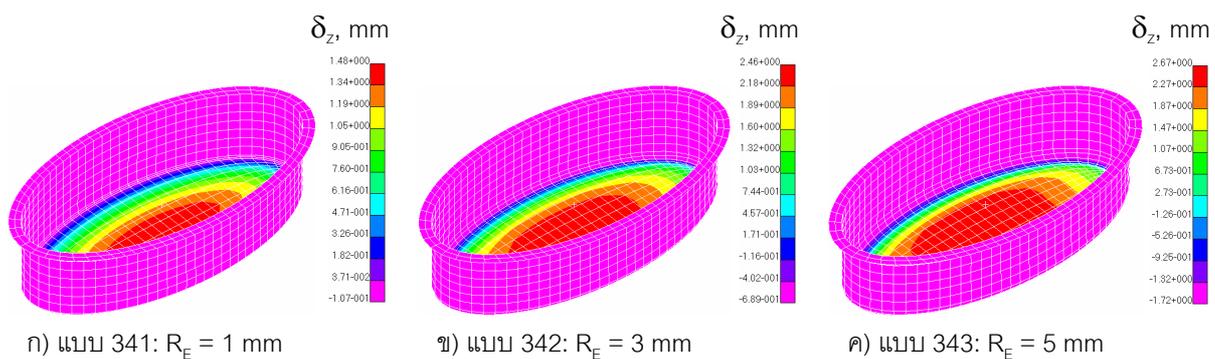
12.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรงวงรี เมื่อมีขอบมลที่ฐาน

ระยะยุบตามแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (F) ของบรรจุภัณฑ์รูปทรงวงรี ที่มีค่า R_E เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm (แบบ 341 ถึง 343) ภายใต้ภาวะ เท่ากับ 7.6 N ถึง 37.2 N สามารถสรุปเป็นกราฟได้ในภาพที่ 137 ความเค้นสูงสุด เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (F) ได้แสดงเป็นกราฟในภาพที่ 138 ทั้ง δ_z และ σ พบว่าจะมีค่ามาก เมื่อมี R_E มาก ซึ่งเป็นผลเช่นเดียวกับรูปทรงอื่นๆ (สี่เหลี่ยม และทรงกระบอก)

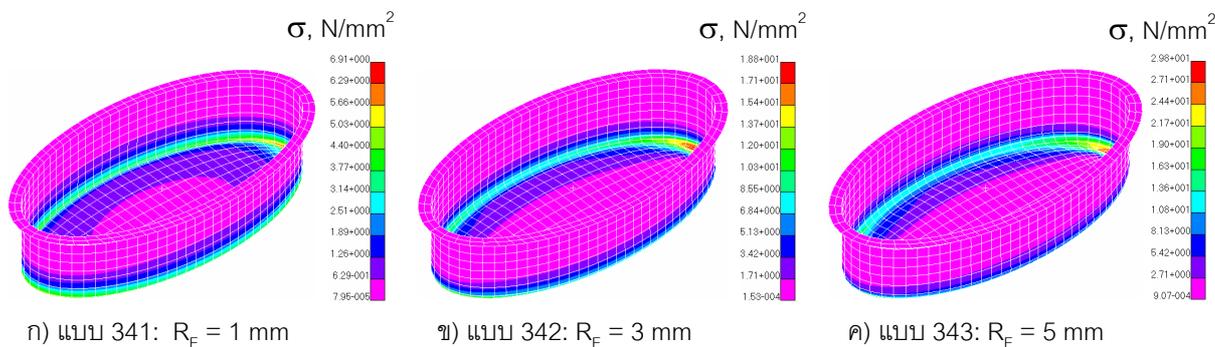
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs δ_z/m) ได้แสดงในภาพที่ 139 โดยรูปทรงที่แข็งแรง (มี F/m สูงสุด) คือ แบบ 343 (R_E มากสุด) ดังนั้นรูปทรงวงรีที่มีค่า R_E มาก (แบบ 343) ทำให้ F/m และ F/V_c สูงเป็นสัดส่วนกับค่า R_E แต่ในทางกลับกันเป็นผลให้ δ_z/m และ δ_z/V_c (หรือระยะยุบ) มากตามไปด้วย



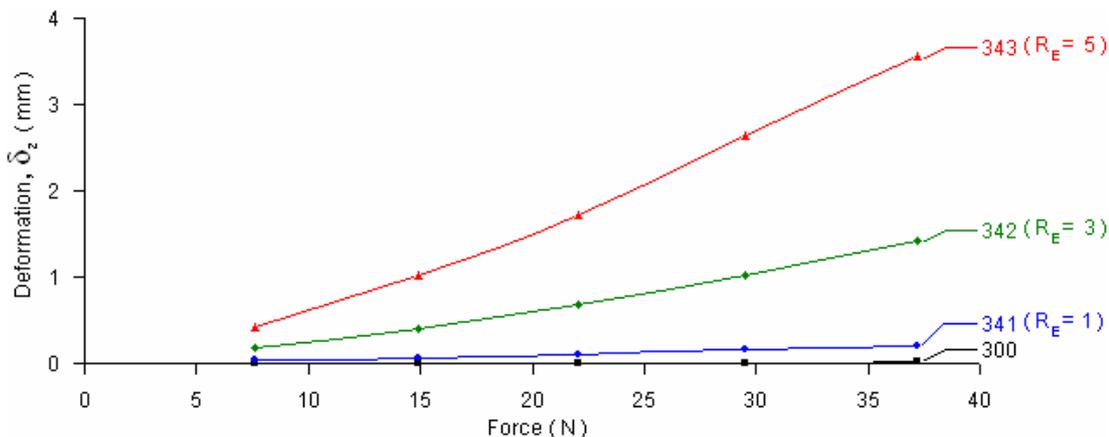
ภาพที่ 134 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



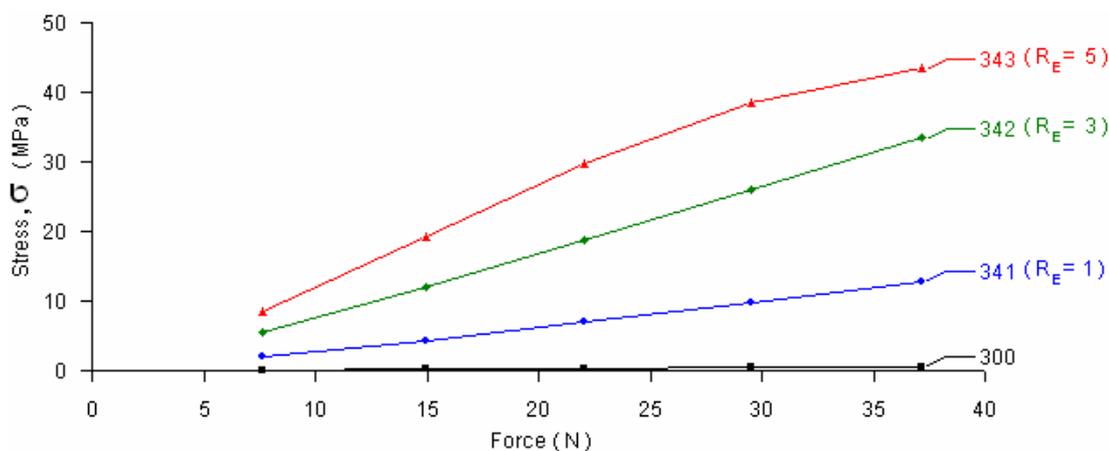
ภาพที่ 135 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



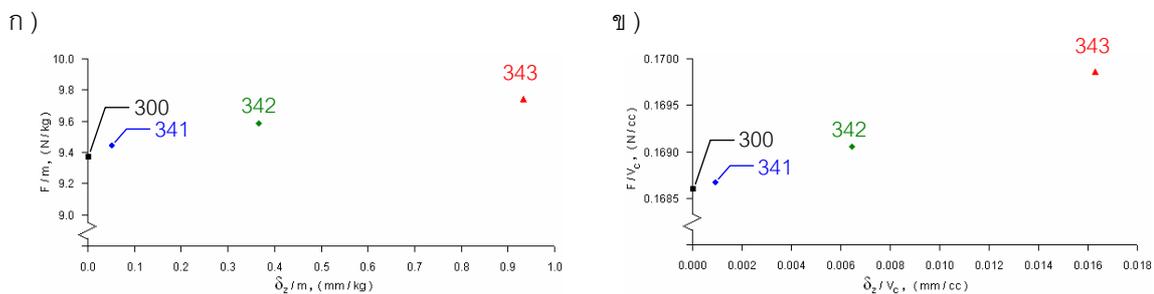
ภาพที่ 136 ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 137 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300 และ 341 ถึง 343



ภาพที่ 138 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300 และ 341 ถึง 343



ภาพที่ 139 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 300, 341 และ 343

13. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงวงรีเมื่อเปลี่ยนความชัน

13.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาระด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N เมื่อผนังของรูปทรงวงรี มีมุมความชัน หรือ θ เท่ากับ 1° , 3° และ 5° (แบบ 361, 362 และ 363 ตามลำดับ) ได้แสดงในภาพที่ 140 การเปลี่ยนตำแหน่งรวมเกิดมากที่สุดที่บริเวณฐานซึ่งเป็นการโก่งโค้งขึ้นในทิศ +Z (สีแดง) ซึ่งเหมือนกับแบบ 300 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z, δ_z (ภาพที่ 141) มีลักษณะเหมือนกับแบบ 300

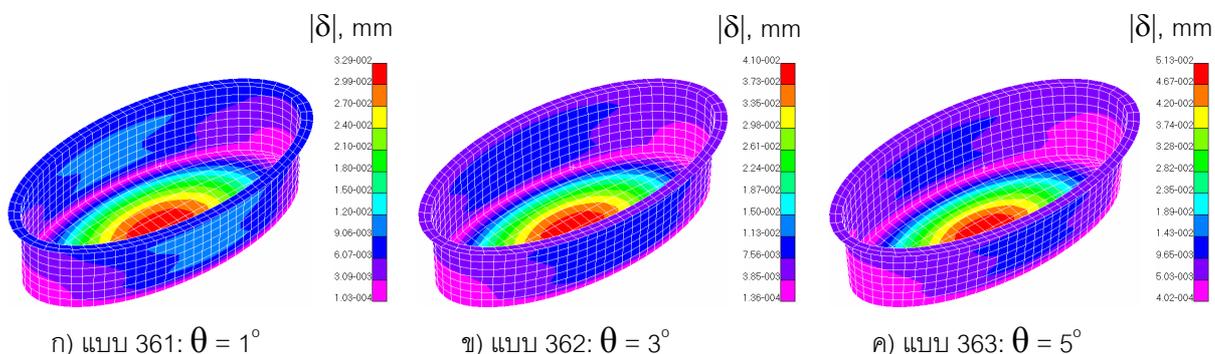
13.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาระด้านบน

ตัวอย่างภาพแสดงค่าความเค้น ของรูปทรง 361, 362 และ 363 ได้แสดงในภาพที่ 142 ภาพนี้แสดงมีความเค้นสูงสุด (สีแดง) เกิดที่ตำแหน่งและมีลักษณะเหมือนกับรูปทรงแบบ 300 คือ เกิดความเค้นสูงสุดที่บริเวณกลางผนังด้านยาวของบรรจุภัณฑ์

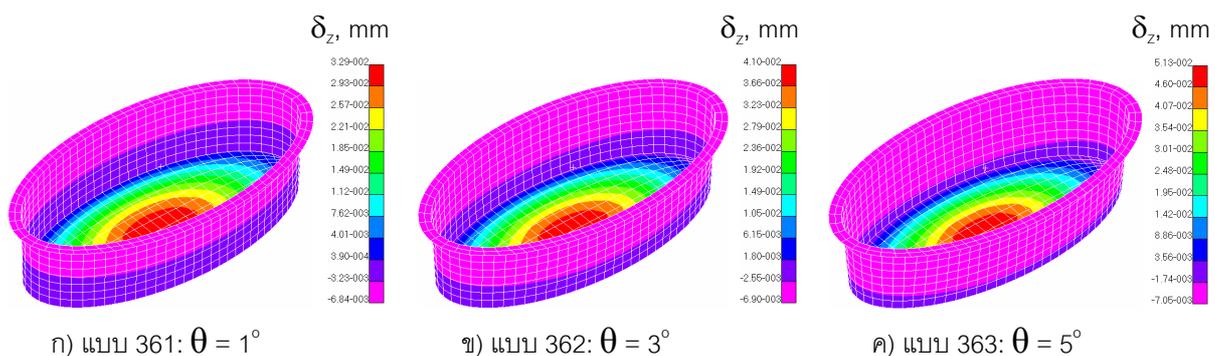
13.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรง 100 เมื่อมีมุมความชัน

ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรง แบบ 300, 361, 362 และ 363 ได้สรุปเป็นกราฟในภาพที่ 143 จากกราฟแสดงรูปทรงแบบ 363 ซึ่งมีมุมความชันมากที่สุด ($\theta = 5^\circ$) มีระยะยุบ δ_z มากที่สุด รองมาคือ แบบ 362 ส่วนแบบ 361 และแบบ 100 มีค่าระยะยุบ δ_z ใกล้เคียงกัน ผลความเค้นสูงสุด (σ) เมื่อเทียบกับภาระด้านบน (F) ของรูปทรงแบบ 300, และ 361 ถึง 363 ได้สรุปเป็นกราฟในภาพที่ 144 โดยผล σ ที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของ δ_z

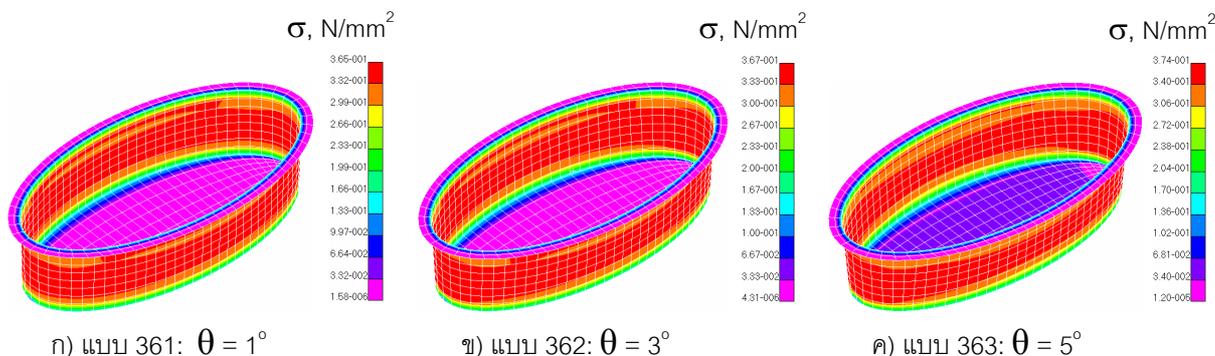
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs δ_z/m) ได้สรุปใน ภาพที่ 145 เมื่อพิจารณารูปทรงที่แข็งแรง มี F/m สูงสุด คือ แบบ 363 ($\theta = 5^\circ$) แต่มี δ_z/m มากตามไปด้วย ในขณะที่รูปทรงแบบ 300 ซึ่งเป็นรูปทรงพื้นฐาน มีค่า F/m น้อยที่สุด และ δ_z/m น้อยที่สุด ดังนั้นรูปทรงวงรีที่มีค่าความชันของผนัง (θ) มาก จะมี F/m และ δ_z/m มาก แต่ส่งผลให้ δ_z/m และ δ_z/V_c (หรือระยะยุบ) มากตามไปด้วย



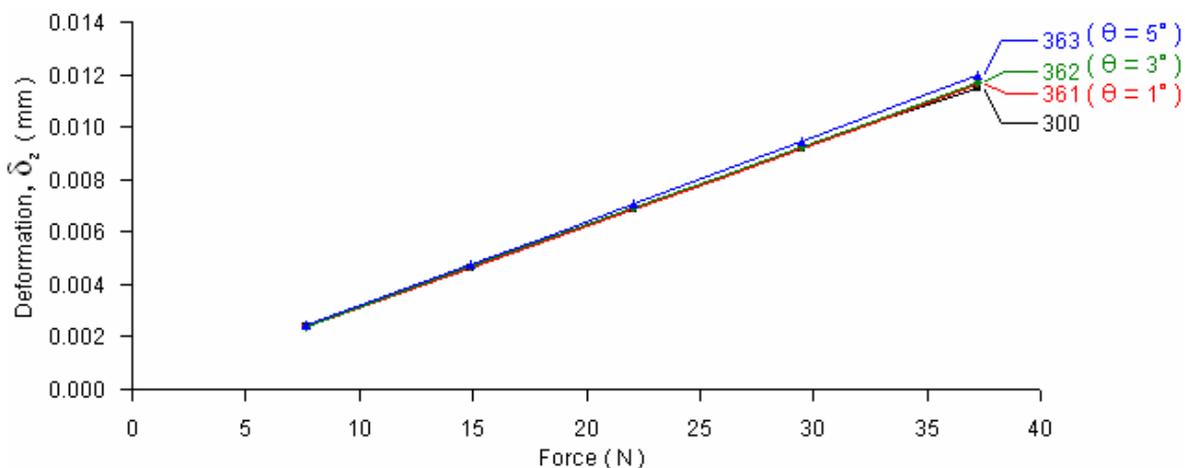
ภาพที่ 140 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 361 ถึง 363 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



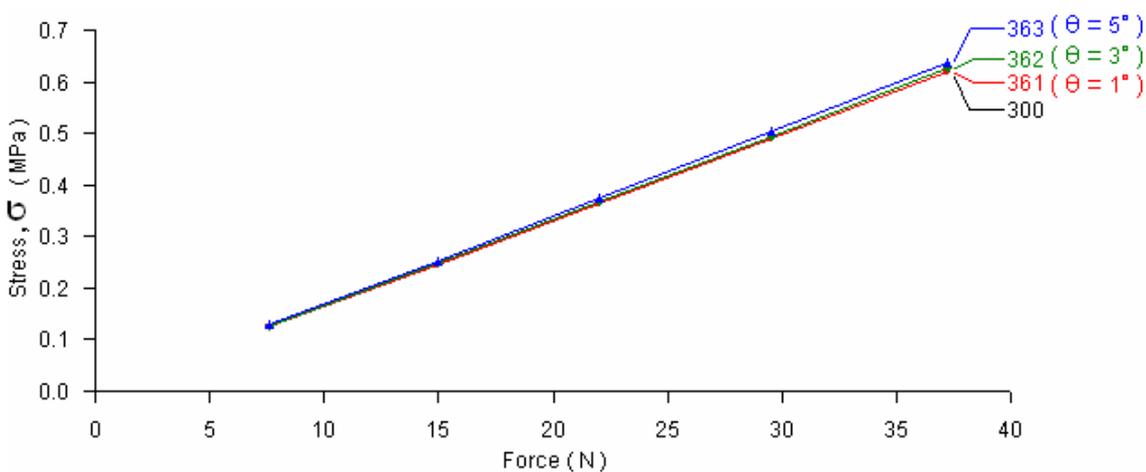
ภาพที่ 141 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 361 ถึง 363 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



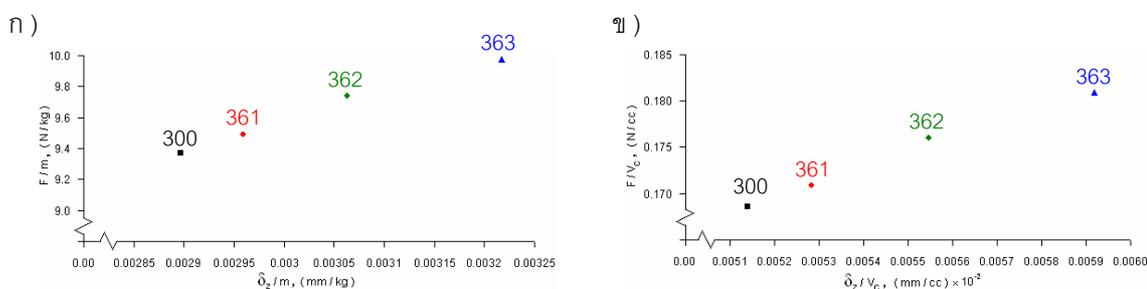
ภาพที่ 142 ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 341 ถึง 343 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 143 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 300 และแบบ 361 ถึง 363



ภาพที่ 144 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 300 และแบบ 361 ถึง 363



ภาพที่ 145 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 300, 361 และ 363

14. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงหกเหลี่ยมเมื่อมีขอบมด

14.1 ผลวิเคราะห์ห้ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

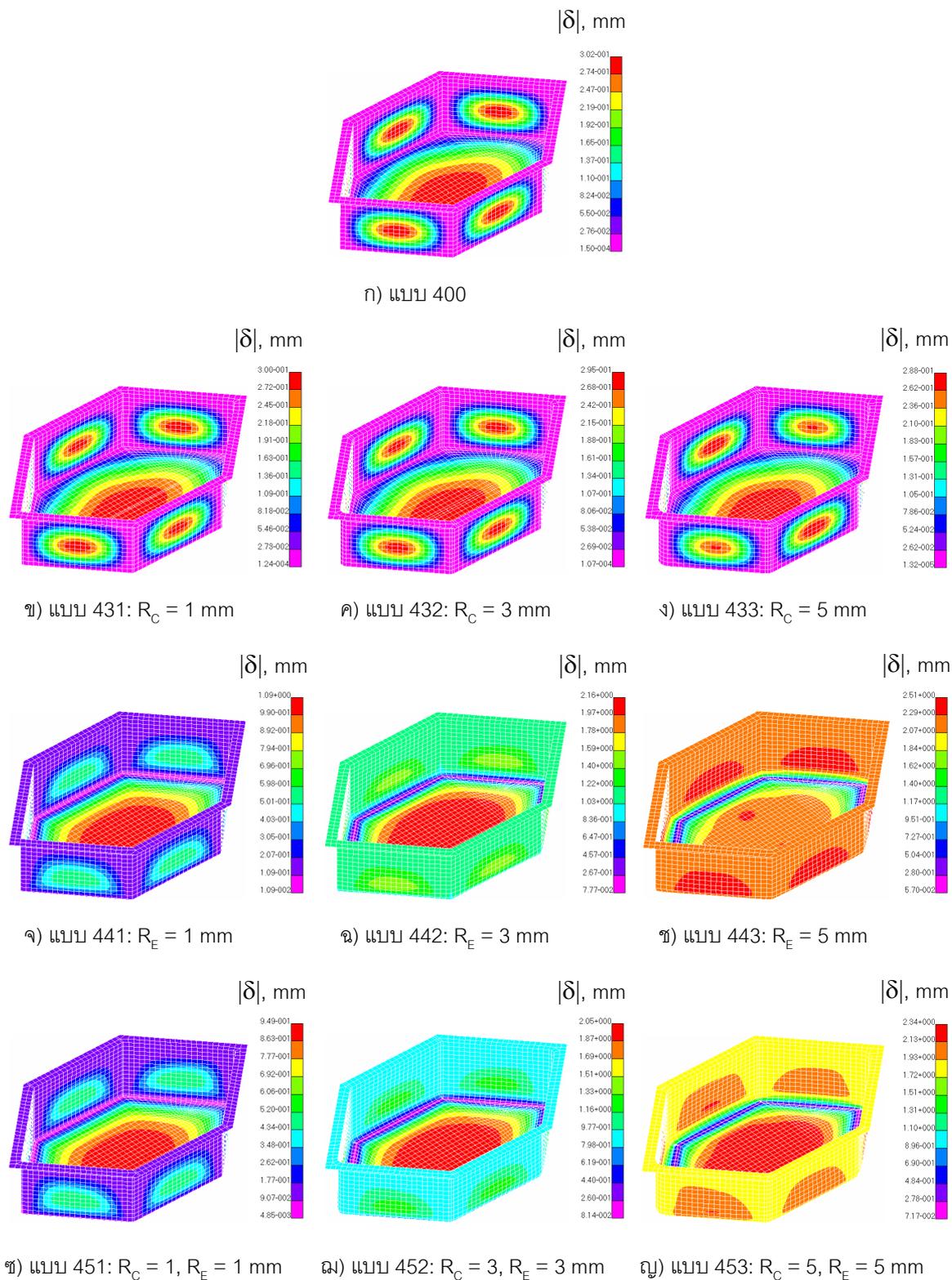
ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ห้ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาวะด้านบน เท่ากับ 22.06 N เมื่อรูปทรง 400 มีขอบมดที่มุมของทั้ง 6 มุม เมื่อมีค่า R_C เท่ากับ 1, 3 และ 5 mm (แบบ 431, 432 และ 433) ได้แสดงในภาพที่ 146 เมื่อมีขอบมดที่ขอบฐาน โดยมีค่า R_E เท่ากับ 1, 3, และ 5 mm (แบบ 441, 442 และ 443) ได้แสดงในภาพที่ 146 และรูปทรงที่มี $R_C = R_E$ เท่ากับ 1, 3, และ 5 mm (แบบ 451, 452 และ 453) ได้แสดงในภาพที่ 146 โดยทุกรูปทรง มีการเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุด (สีแดง) เกิดขึ้นที่ตำแหน่งและมีลักษณะคล้ายกับ แบบ 400 ยกเว้นแบบ 443 ที่เกิดบริเวณส่วนล่างของผนังด้านข้าง การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_Z) ทุกรูปทรงให้ผลเหมือนกับแบบ 400 ดังแสดงในภาพที่ 147

14.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

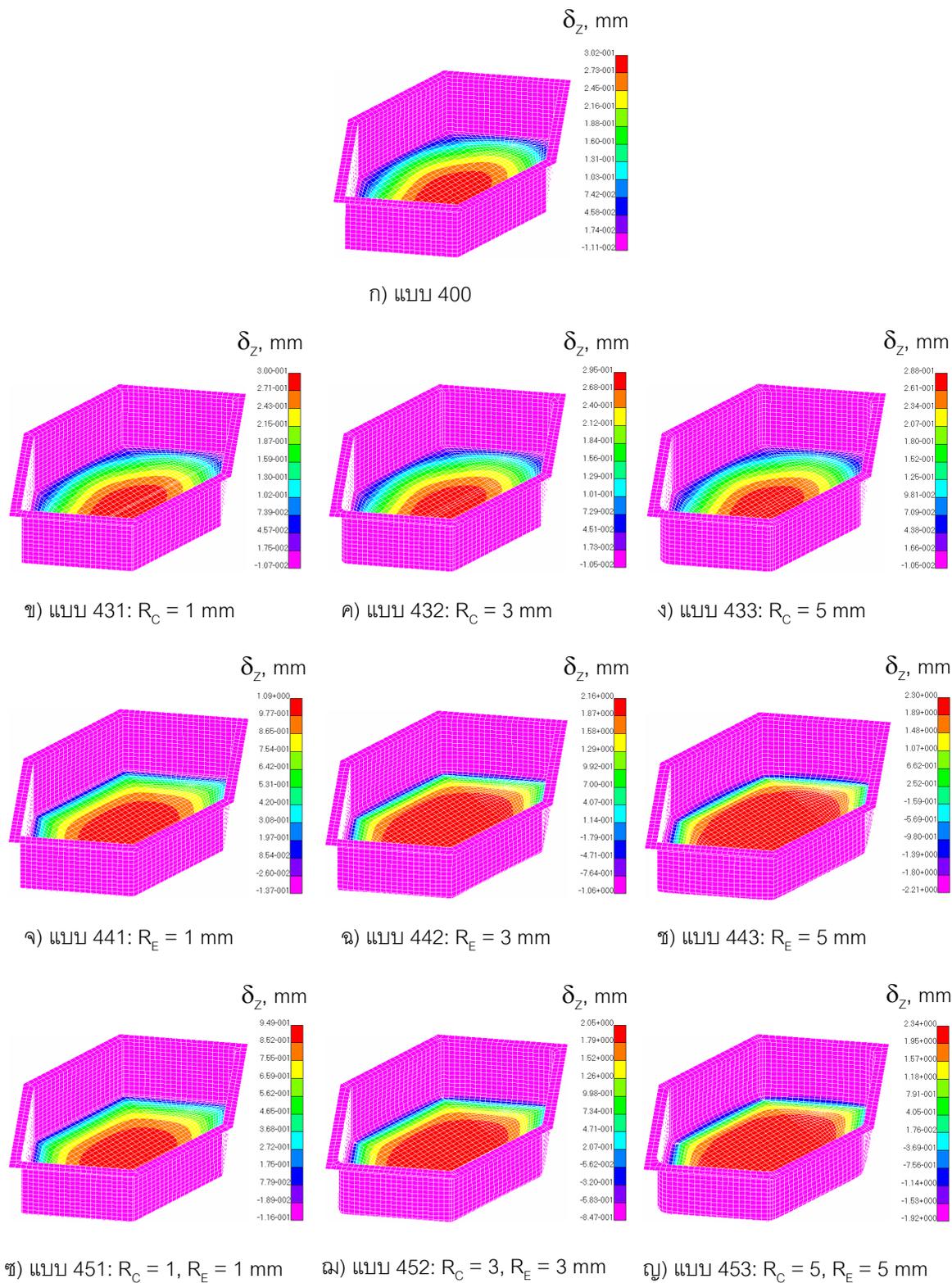
ความเค้นของบรรจุภัณฑ์ แบบ 431 ถึง 433 ($R_C = 1, 3$ และ 5 mm) มีความเค้นสูงสุด (สีแดง) เกิดที่ตำแหน่งและมีลักษณะเหมือนกับแบบ 400 คือ ที่บริเวณรอยต่อของผนังทั้ง 6 ด้าน (ภาพที่ 148ก ถึง 148ง) แต่รูปทรงแบบ 441 ถึง 443 ($R_E = 1, 3$ และ 5 mm) และ 451 ถึง 453 ($R_C = R_E = 1, 3$ และ 5 mm) มีผลต่างจากแบบ 400 โดยมีความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมทั้ง 6 มุม ตรงฐานของชิ้นงานตามแสดงในภาพที่ 148จ ถึง 148ญ

14.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรงหกเหลี่ยม เมื่อมีขอบมด

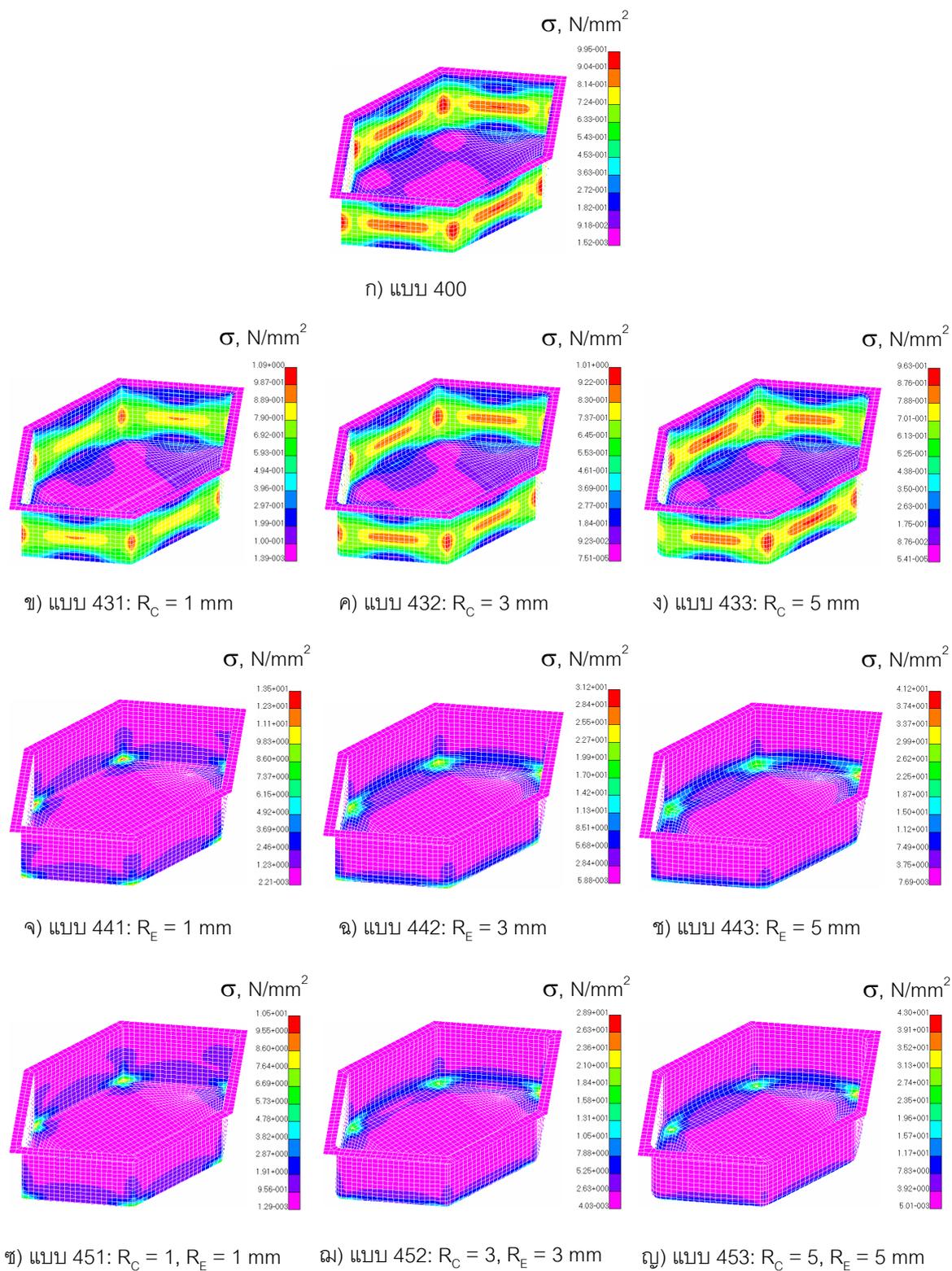
ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_Z) เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (F) ของรูปทรงแบบ 400, 431 ถึง 433, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453 ได้สรุปเป็นกราฟตามแสดงในภาพที่ 149 และ 150 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุด กับภาวะด้านบน (σ vs F) ของทั้ง 10 แบบได้แสดง ในภาพที่ 151 และ 152 จากผลที่ได้ พบว่า การเพิ่ม R_C ทำให้ δ_Z และ σ ต่ำลง ในขณะที่การเพิ่มค่า R_E ทำให้ δ_Z และ σ สูงขึ้น และสำหรับกรณีที่มี $R_C = R_E$ การเพิ่มค่า R ทั้งสอง เป็นผลให้ δ_Z และ σ สูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มค่า R_E ค่าเดียว



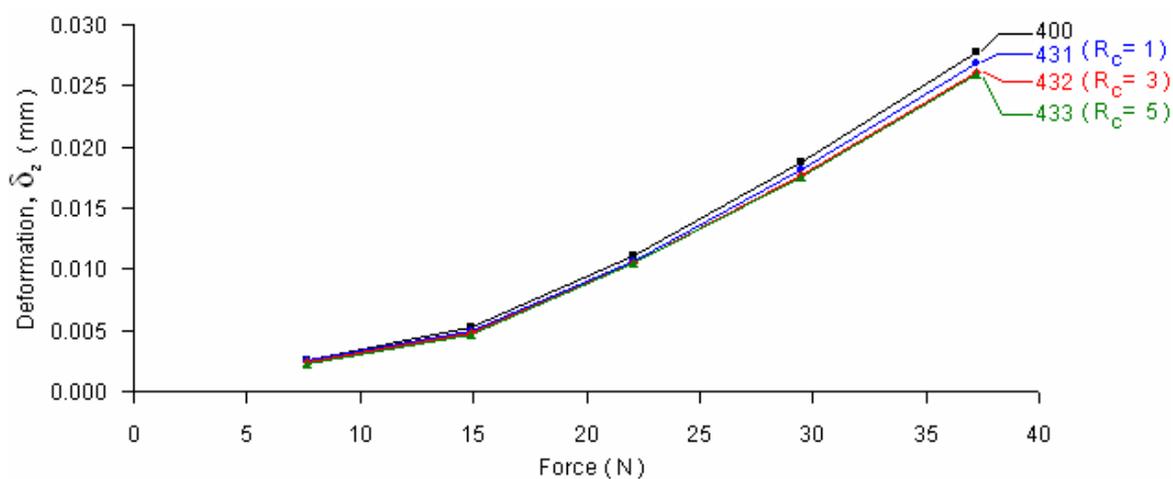
ภาพที่ 146 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 400 ถึง 453
เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



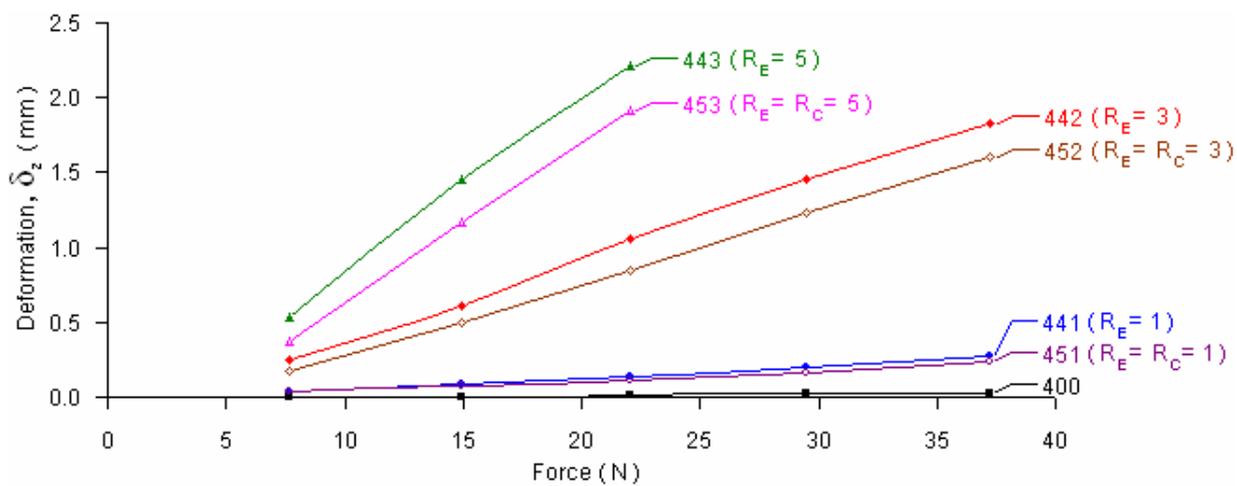
ภาพที่ 147 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 400 ถึง 453 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



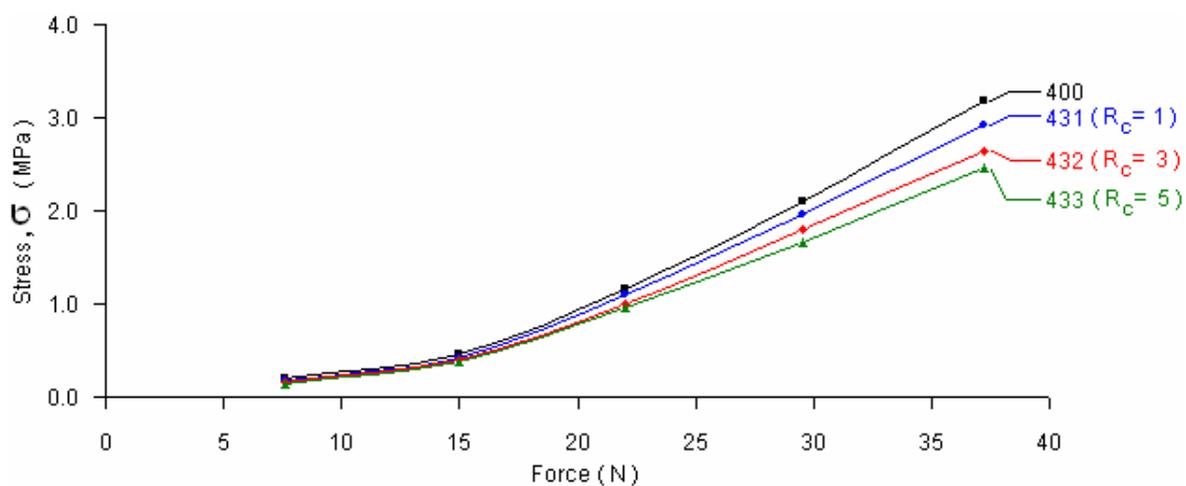
ภาพที่ 148 ความเค้นของรูปทรง แบบ 400 ถึง 453 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



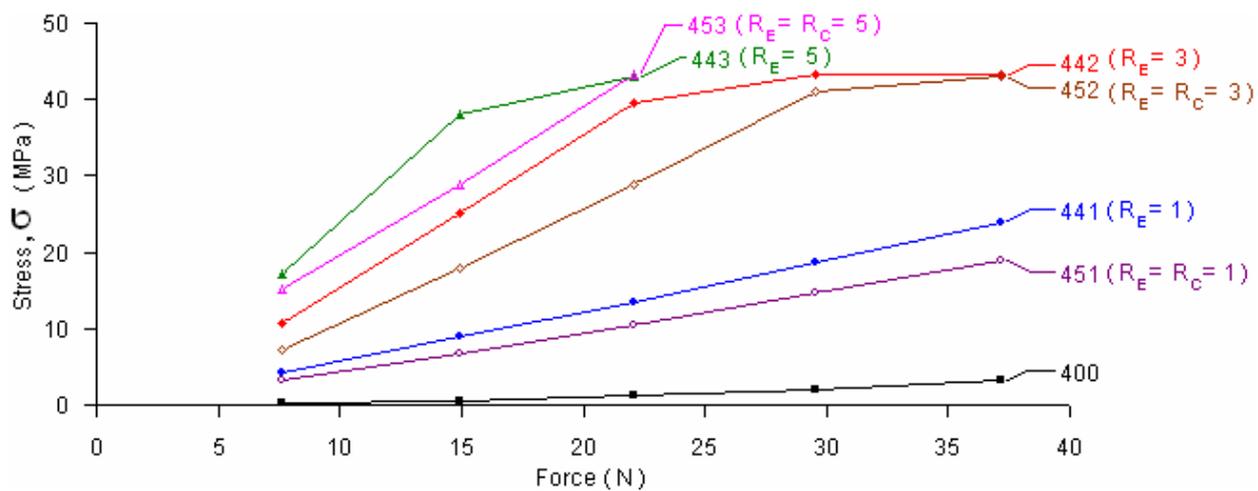
ภาพที่ 149 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 400 และ 431 ถึง 433



ภาพที่ 150 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 400, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453



ภาพที่ 151 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 400 และ 431 ถึง 433

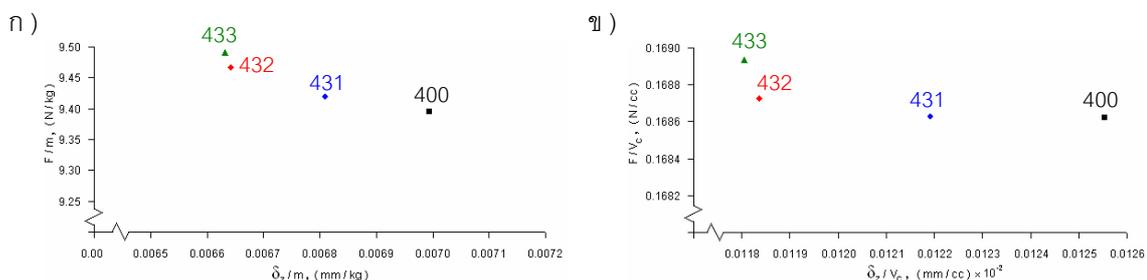


ภาพที่ 152 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 400, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453

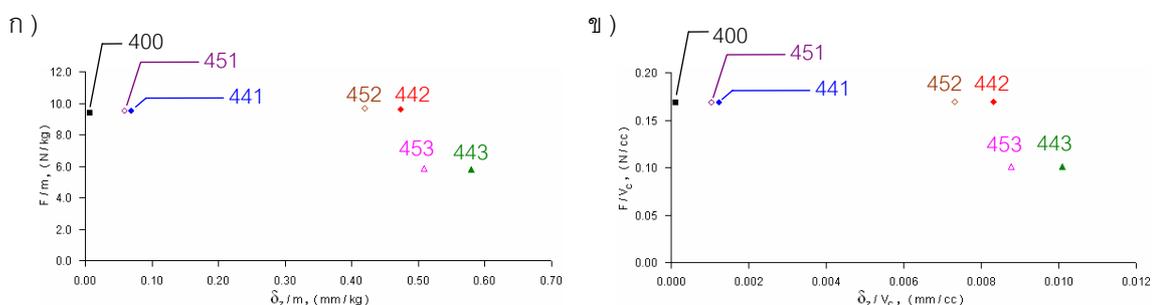
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs σ_z/m) ของทั้ง 10 รูปแบบ ได้พล็อตสรุปใน ภาพที่ 153 และ 154 โดยการเปรียบเทียบนี้เป็นการอ้างอิงภายใต้ภาวะด้านบนสูงสุด ของแต่ละรูปทรงที่สามารถรับได้ ประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุ (F/V_C เทียบกับ δ_z/V_C) ได้แสดงในภาพที่ 153ข และ 153ข

กลุ่มรูปทรงที่แข็งแรง (มี F/m สูงสุด) ได้แก่ แบบ 433 ($R_C = 5$ mm) และมีระยะยุบต่อน้ำหนัก (δ_z/m) น้อยที่สุด ในขณะที่รูปทรงแบบ 443 ($R_E = 5$ mm) มีค่า F/m น้อยที่สุด และ δ_z/m มากที่สุด นอกจากนี้รูปทรงที่มี R_E (44X และ 45X) เป็นกลุ่มที่มี F/m ต่ำ และ δ_z/m มาก

โดยสรุปการเพิ่มค่า R_C ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น (F/m และ F/V_C สูง ในขณะที่เดียวกัน δ_z/m และ δ_z/V_C ต่ำ) ส่วนค่า R_E ที่มากขึ้นส่งผลเสียให้ทั้ง F/m และ F/V_C ต่ำลง รวมถึง δ_z/m และ δ_z/V_C สูงขึ้น สำหรับกรณีที่ $R_C = R_E$ เมื่อเพิ่มค่า ทำให้ได้ผลในการทำงานเดียวกันกับการเพิ่มค่า R_E



ภาพที่ 153 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 400 และ 431 ถึง 433



ภาพที่ 154 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรงแบบ 400, 441 ถึง 443 และ 451 ถึง 453

15. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยมเมื่อมี Rib ที่ฐาน

15.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว ($|\delta|$) ภายใต้ภาวะด้านบนเท่ากับ 22.06 N ของรูปทรงแบบ 100 เมื่อมี Rib ที่ฐาน เป็นแบบ 1710 ถึง 1770 ได้แสดงในภาพที่ 155

โดยรูปทรงแบบ 1720 ถึง 1770 มีลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุด (สีแดง) เหมือนกับแบบ 100 คือ เกิดที่บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาว ในขณะที่แบบ 1710 มีการเปลี่ยนตำแหน่งรวมมากที่สุดที่บริเวณฐาน เมื่อพิจารณาเพิ่มเติม พบว่าแบบที่มี Rib ตัดกันที่จุดกึ่งกลางของฐาน (แบบ 1710, 1740 และ 1750) มี $|\delta|$ มากที่สุดตัดดังกล่าว การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของแบบ 1710 ถึง 1730, 1750 และ 1770 ได้แสดงในภาพที่ 156 โดยแบบ 1710 1740 และ 1750 มี δ_z มากที่สุดที่บริเวณจุดตัดของ Rib และของแบบ 1760 และ 1770 เกิด δ_z มากที่สุดตามแนว Rib ที่ฐาน

ระยะยุบ δ_z ในภาพที่ 150 แสดงรูปทรง 1720 ถึง 1770 มีระยะยุบของขอบบนด้านยาวโค้งโค้งลงตรงกลางของขอบ คล้ายกับการโค้งของคาน หรือระยะยุบที่มุมทั้งสี่ และขอบด้านสั้นมีระยะน้อยกว่าของขอบด้านยาว

15.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

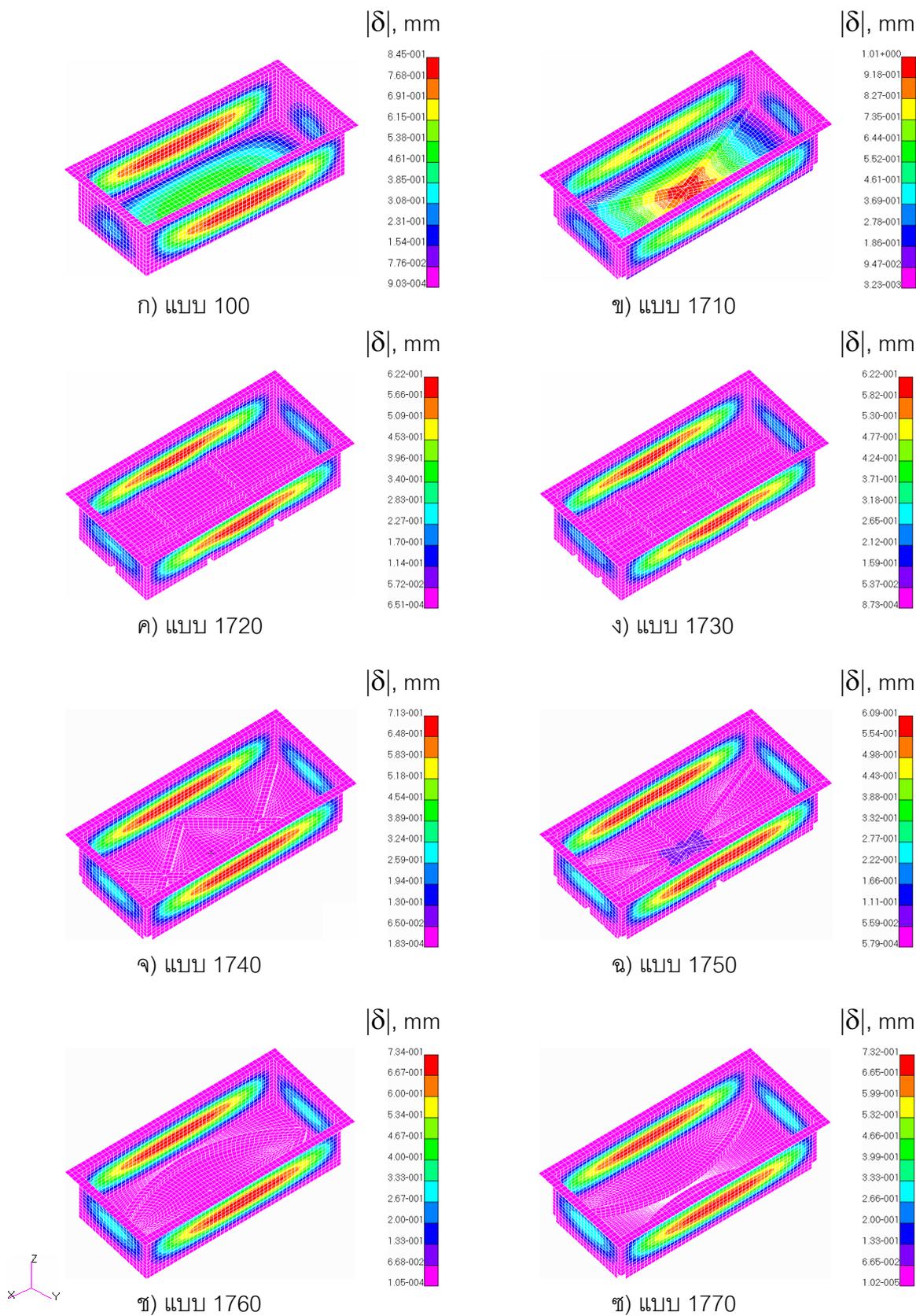
ภาพตัวอย่างแสดงความเค้นของบรรจุภัณฑ์แบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 ได้แสดงในภาพที่ 157 โดยความเค้นสูงสุด (สีแดง) ของแบบ 1710 ถึง 1770 เกิดที่ตำแหน่ง และมีลักษณะคล้ายกับแบบ 100 คือ ที่บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาว

15.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อมี Rib ที่ฐาน

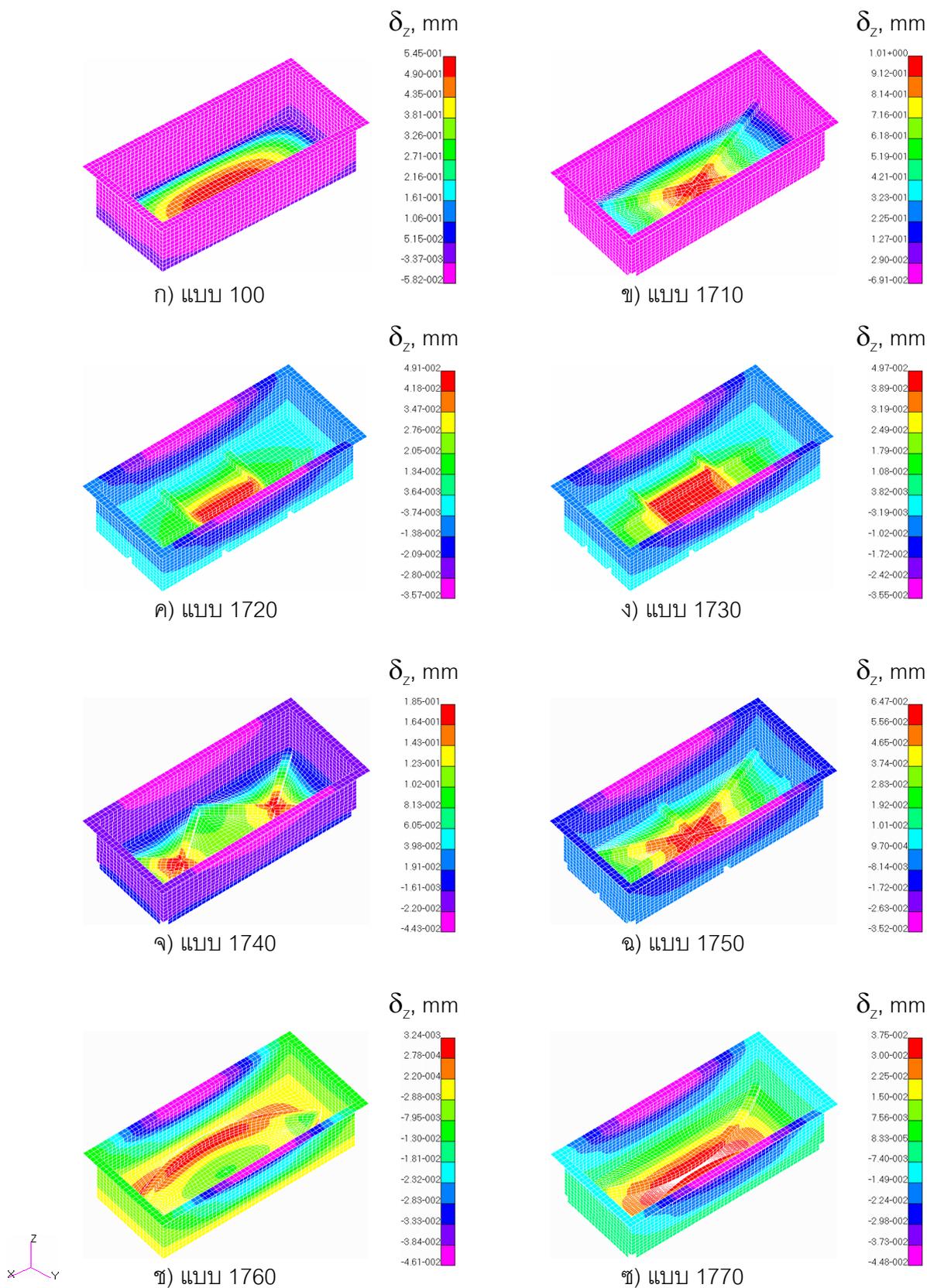
ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน ของรูปทรงสี่เหลี่ยม แบบ 1710 ถึง 1770 เปรียบเทียบกับแบบ 100 ได้สรุปเป็นกราฟในภาพที่ 158 และกราฟความสัมพัทธ์

ของความเค้นสูงสุด กับภาระด้าบน (σ vs F) ของทั้ง 8 แบบได้แสดง ในภาพที่ 159 จากทั้งสองภาพแสดงกราฟของ δ_z และ σ มีผลใกล้เคียงกันมาก กล่าวคือ แบบ 1710, 100 และ 1760 มี δ_z และ σ สูงตามลำดับ และแบบ 1750 มี δ_z และ σ ต่ำสุด ตามด้วย 1730 และ 1720 ตามลำดับ โดยแบบ 1750 เป็นแบบที่มี Rib ตั้งฉาก และทแยงตัดกันที่กึ่งกลางฐาน และแบบ 1730 เป็นแบบ Rib ที่ตั้งฉากกัน ซึ่งเมื่อสังเกตจะพบว่าทั้ง 3 แบบ (1750, 1730 และ 1720) ต่างมี Rib ในแนวความยาว หรือความกว้างของพื้นที่ฐาน

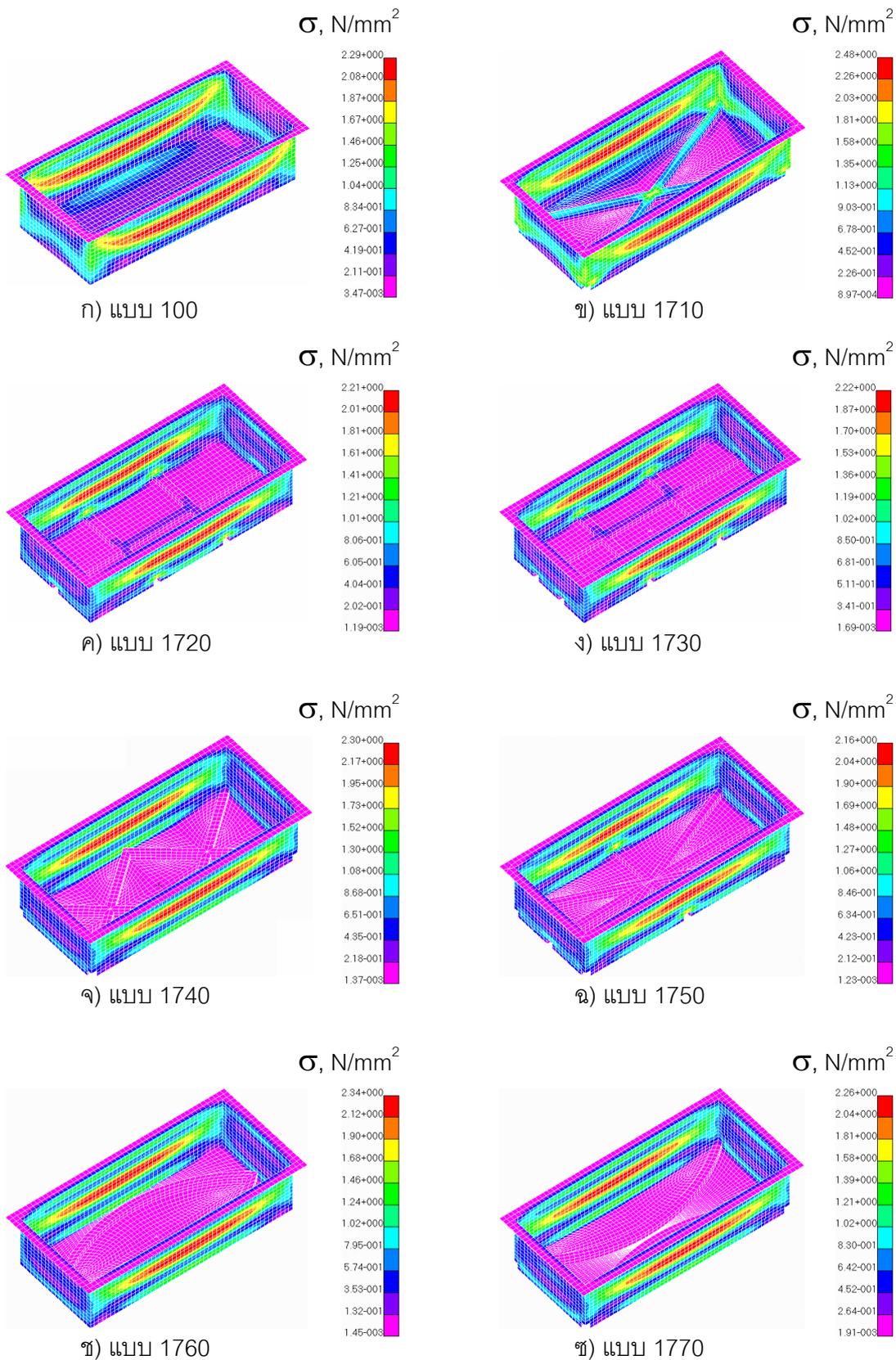
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs δ_z/m) ได้สรุปใน ภาพที่ 160ก เมื่อพิจารณารูปทรงที่แข็งแรง โดยมีค่า F/m สูงสุด คือ แบบ 100 ซึ่งเป็นแบบจำลองรูปทรงพื้นฐาน และเป็นแบบที่มีน้ำหนักน้อยสุด แต่แบบ 100 มี δ_z/m มากที่สุดด้วย ดังนั้นผล F/m ของบรรจุภัณฑ์สี่เหลี่ยมที่มี Rib ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์นั้นๆ รูปทรงที่มี δ_z/m และ δ_z/V_c น้อยที่สุด (ภาพที่ 160ข) คือ แบบ 1750 ตามด้วย 1730 และ 1720 ตามลำดับ



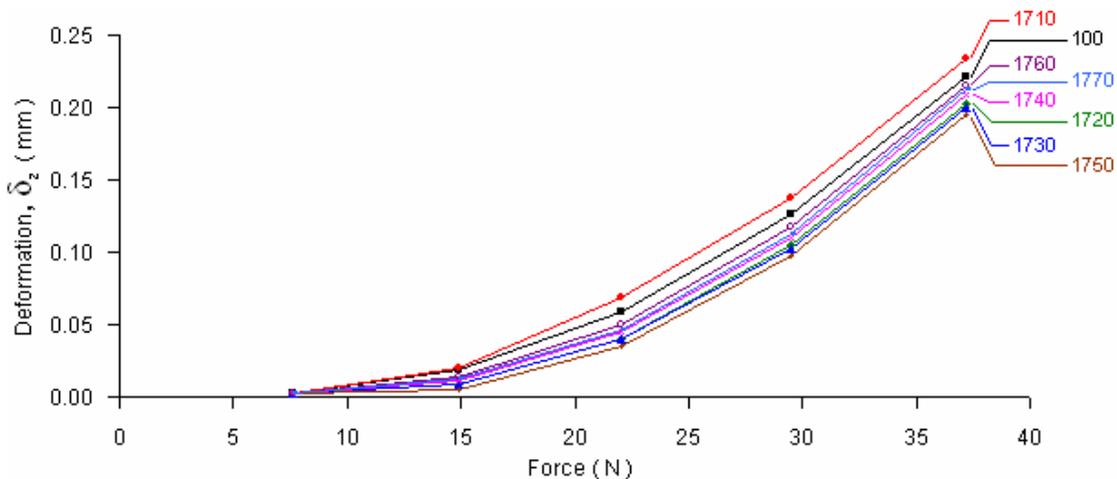
ภาพที่ 155 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 เมื่อ
 ภาระด้าบบน เท่ากับ 22.06 N



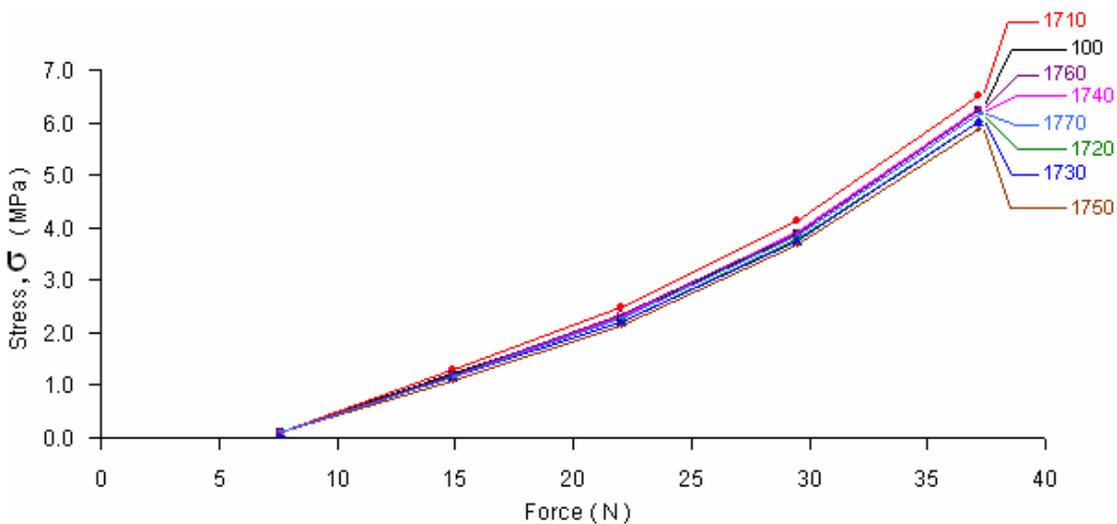
ภาพที่ 156 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 เมื่อภาระด้าบนบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 157 ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1710 ถึง 1770 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N

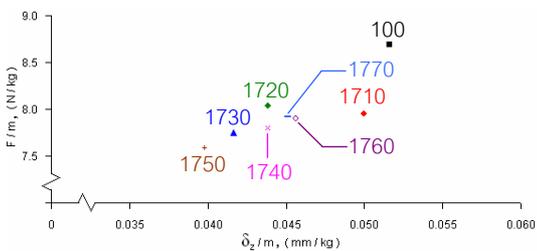


ภาพที่ 158 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1710 ถึง 1770

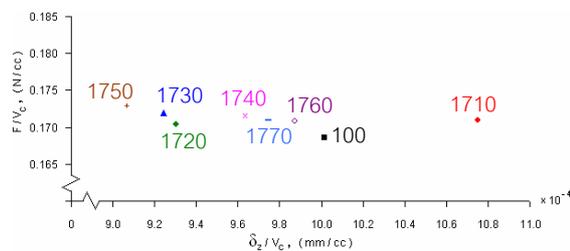


ภาพที่ 159 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1710 ถึง 1770

ก)



ข)



ภาพที่ 160 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 100 และ 1710 ถึง 1770

16. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1710 เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib

16.1 ผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาวะด้านบนเท่ากับ 22.06 N ของรูปทรงที่มี Rib ตามแบบ 1710 เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ rib (แบบ 1711 ถึง 1715) ได้แสดงในภาพที่ 161 โดยรูปทรงแบบ 1713 มีลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งรวมเหมือนกับแบบ 1710 คือ เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ และที่ผนังด้านยาว โดยบรรจุภัณฑ์แบบ 1710 ถึง 1713 มีค่ามากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของฐาน ในขณะที่แบบ 1714 และ 1715 มีลักษณะคล้ายกัน คือ ที่บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาว

การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) พบว่าทุกรูปแบบ (1710 ถึง 1715) มีลักษณะคล้ายกันทั้งหมด (ภาพที่ 162) คือ ที่จุดกึ่งกลางของฐาน

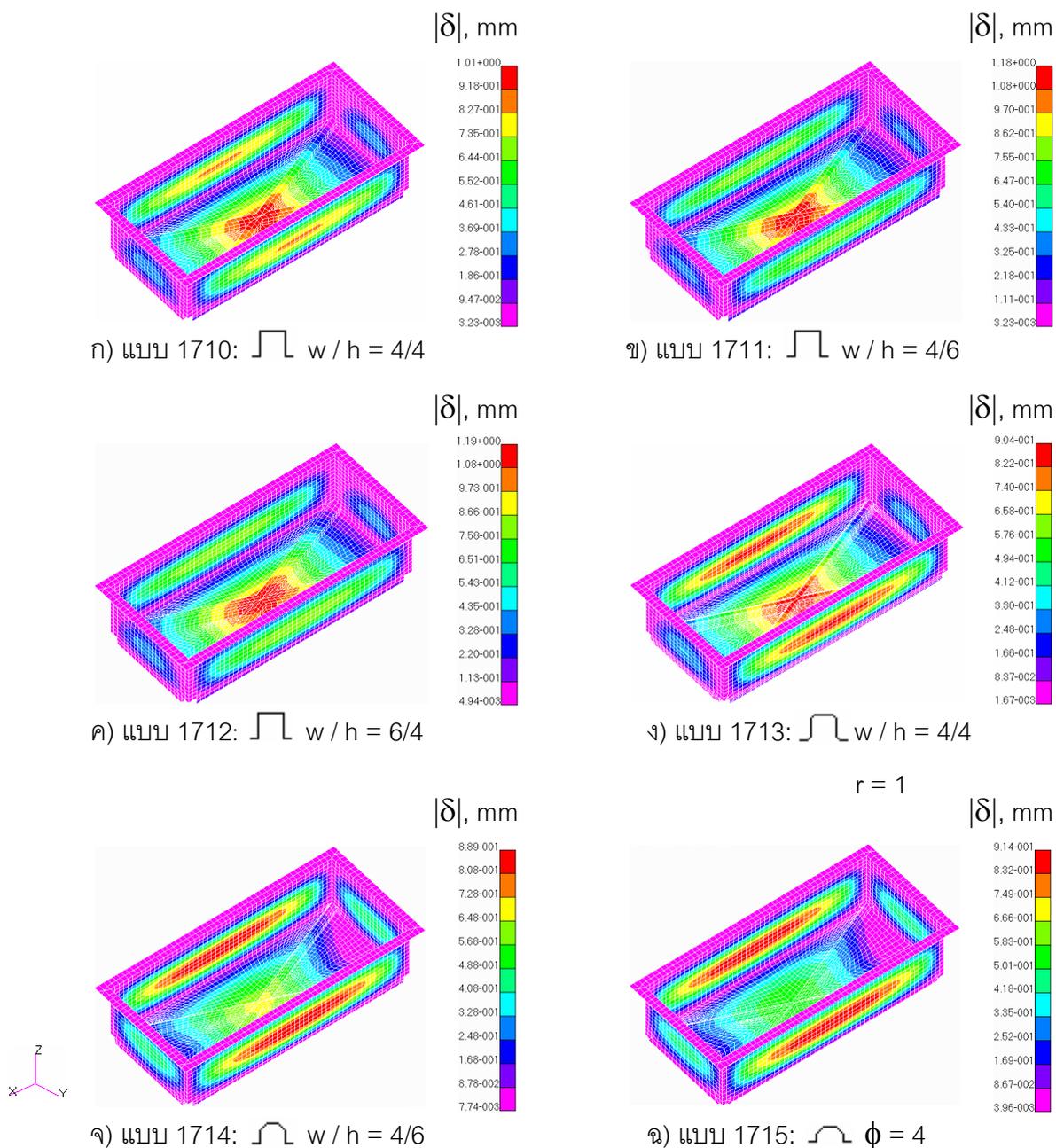
16.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงความเค้น ของบรรจุภัณฑ์ แบบ 1711 ถึง 1715 ได้แสดงในภาพที่ 163 โดยความเค้นสูงสุดของทั้ง 5 แบบ ปรากฏที่ตำแหน่ง และมีลักษณะคล้ายกับแบบ 1710 คือ มีความเค้นสูงสุดที่กึ่งกลางของบริเวณผนังด้านยาว

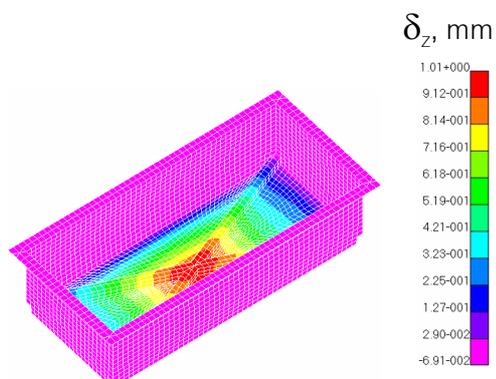
16.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรง 1710 เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib

ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (F) ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 ได้สรุปเป็นกราฟในภาพที่ 164 และกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุด กับภาวะด้านบน (σ vs F) ของทั้ง 6 แบบ ได้แสดงในภาพที่ 165 จากทั้งสองภาพแสดงกราฟของ δ_z และ σ ให้ผลในทำนองเดียวกัน คือ แบบ 1712 มี δ_z และ σ สูงสุด ตามด้วย 1711, 1710, 1713, 1714 และ 1715 ตามลำดับ ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของ rib ที่เป็นรูปครึ่งวงกลม มี δ_z และ σ ต่ำ หรือ rib ที่มีโค้งดีกว่า แบบสี่เหลี่ยม

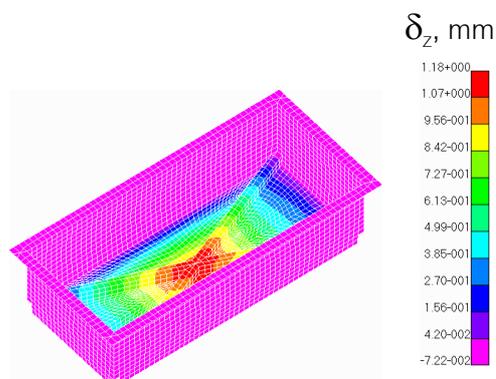
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรง (F/m vs δ_z/m) ได้สรุปใน ภาพที่ 166ก เมื่อพิจารณารูปทรงที่แข็งแรง รูปทรงที่มีค่า F/m สูงสุด คือแบบ 1715 (แบบครึ่งวงกลม) และจัดว่ามีค่า δ_z/m น้อยด้วย เช่นเดียวกับประสิทธิภาพเชิงความจุ (ภาพที่ 166ข) Rib พื้นี่หน้าตัดเป็นโค้งครึ่งวงกลม (1715 และ 1714) มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบเหลี่ยม



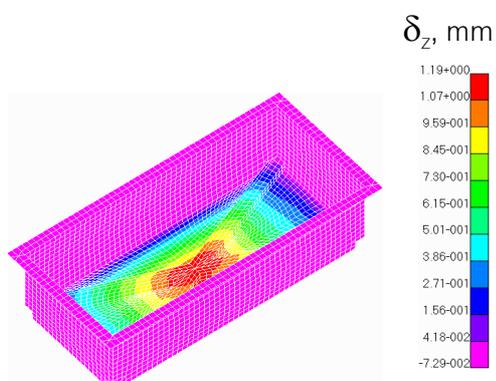
ภาพที่ 161 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



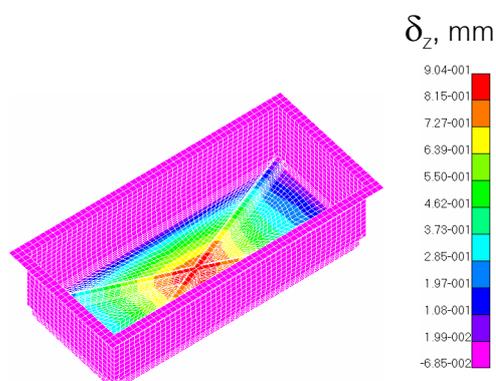
ก) แบบ 1710: $w/h = 4/4$



ข) แบบ 1711: $w/h = 4/6$

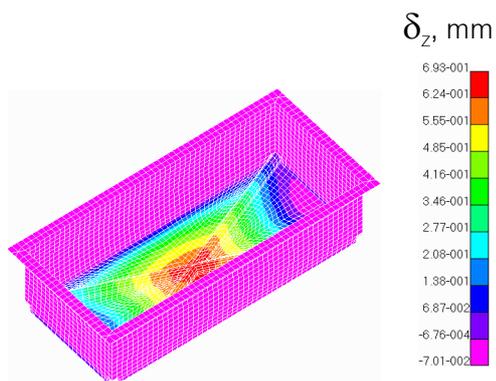


ค) แบบ 1712: $w/h = 6/4$

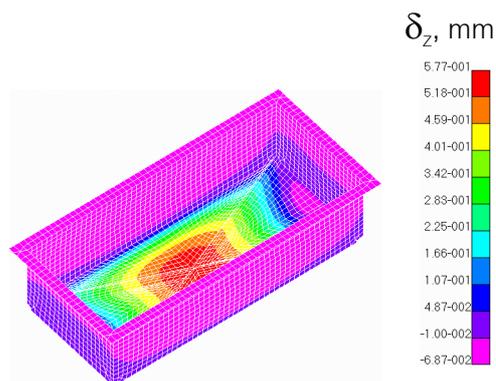


ง) แบบ 1713: $w/h = 4/4$

$r = 1$

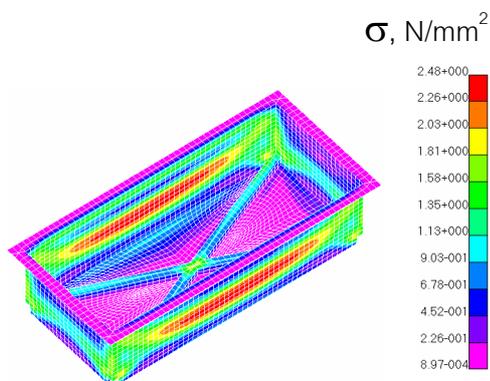


จ) แบบ 1714: $w/h = 4/6$

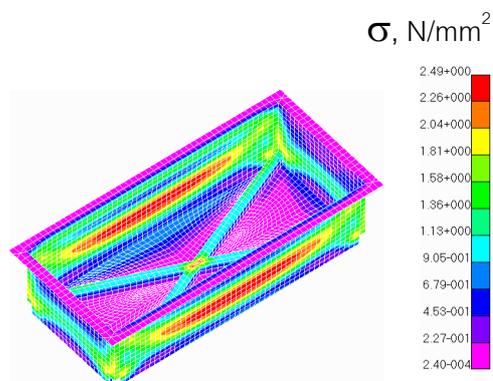


ฉ) แบบ 1715: $\phi = 4$

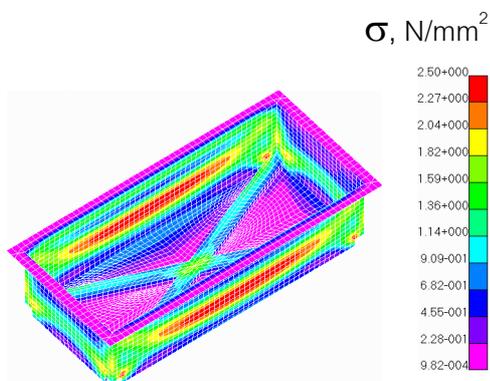
ภาพที่ 162 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



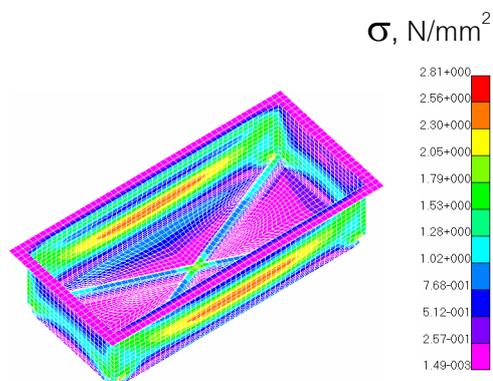
ก) แบบ 1710: $w/h = 4/4$



ข) แบบ 1711: $w/h = 4/6$

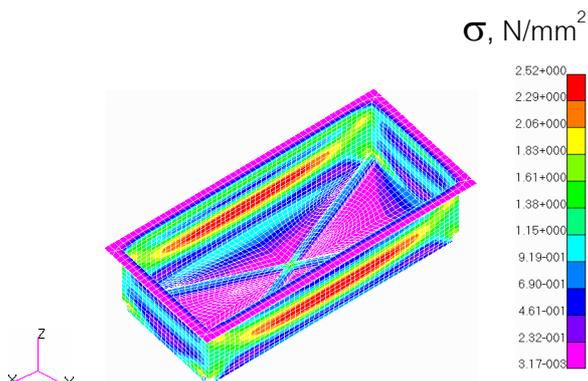


ค) แบบ 1712: $w/h = 6/4$

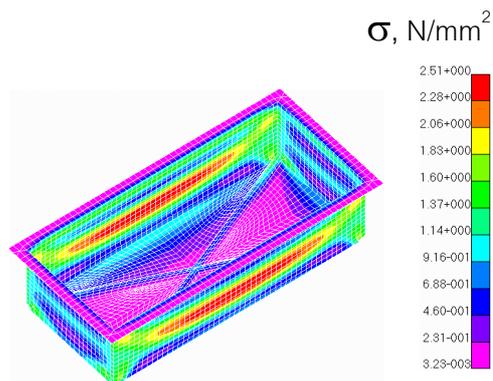


ง) แบบ 1713: $w/h = 4/4$

$r = 1$

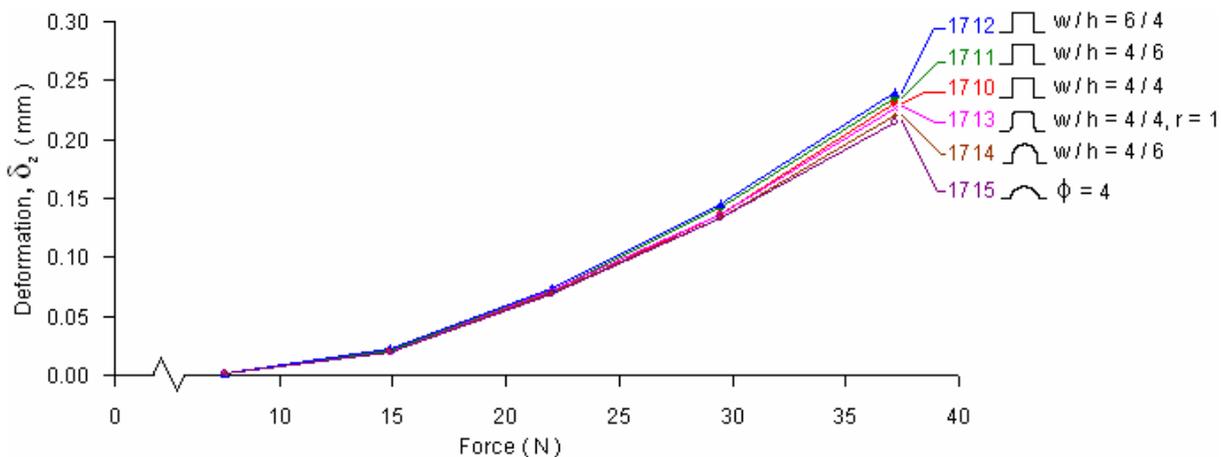


จ) แบบ 1714: $w/h = 4/6$

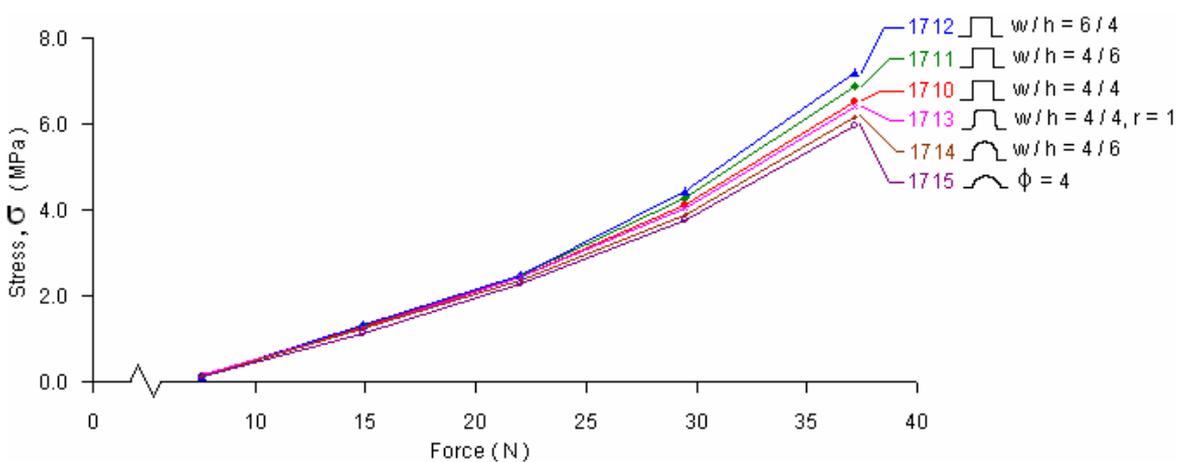


ฉ) แบบ 1715: $\phi = 4$

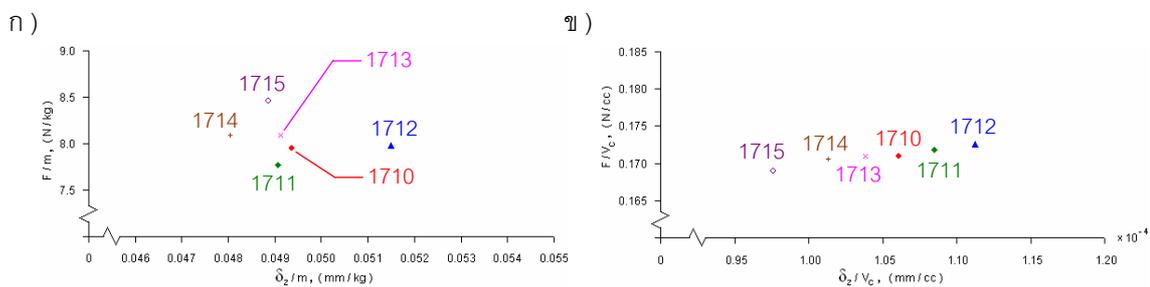
ภาพที่ 163 ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 1710 ถึง 1715 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 164 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 1710 ถึง 1715



ภาพที่ 165 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 1710 ถึง 1715



ภาพที่ 166 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 1710 ถึง 1715

17. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อมี Rib ที่ผนัง

17.1 ผลวิเคราะห์ห้ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ห้ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาวะด้านบนเท่ากับ 22.06 N ของรูปทรง 100 เมื่อมี Rib ที่ผนังด้านข้าง (แบบ 1810, 1820 และ 1830) ได้แสดงในภาพที่ 167 โดยในแต่ละรูปแบบ มีลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งรวมแตกต่างกัน เช่น แบบ 1810 (rib ตั้งฉากกับฐาน) เกิดที่บริเวณฐานของบรจจุภัณฑ์ ในขณะที่บรจจุภัณฑ์แบบ 1820 (rib รอบ 4 ผนัง หรือขนานกับฐาน) เกิดที่บริเวณขอบด้านบนของรูปทรง และแบบ 1830 (รูปกากบาท) เกิดที่บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านยาวที่ตัว rib ส่วนผลการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) พบว่าทุกรูปแบบ (1810 ถึง 1830) มีลักษณะคล้ายกับแบบ 100 (ภาพที่ 168) คือ เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของฐาน

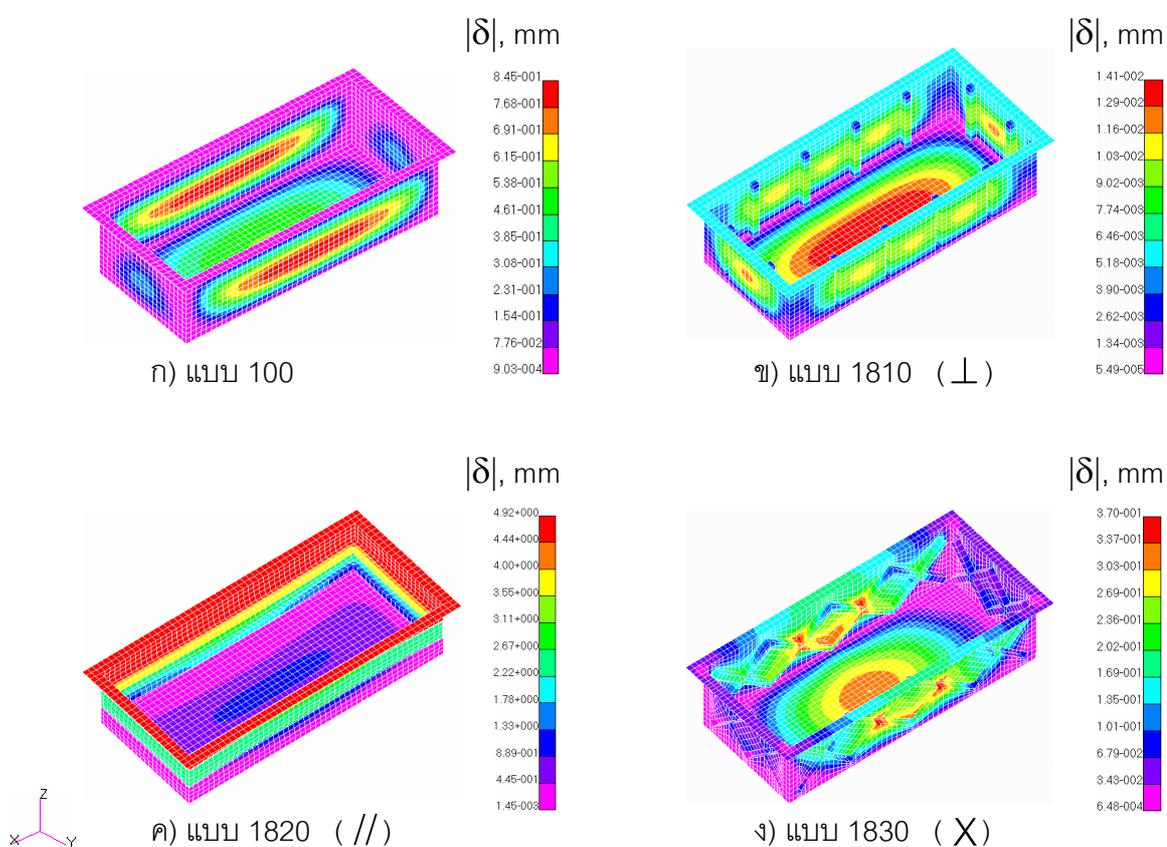
17.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงความเค้นสูงสุด ของบรจจุภัณฑ์ แบบ 1810, 1820 และ 1830 ได้แสดงในภาพที่ 169 โดยความเค้นสูงสุดเกิดที่ตำแหน่งแตกต่างกัน โดยแบบ 1810 มีความเค้นสูงสุดตลอดแนวผนังด้านยาว ในขณะที่ แบบ 1820 เกิดที่ rib บริเวณมุมที่ผนังด้านสั้น และยาวต่อกัน และแบบ 1830 เกิดที่บริเวณมุมด้านบน

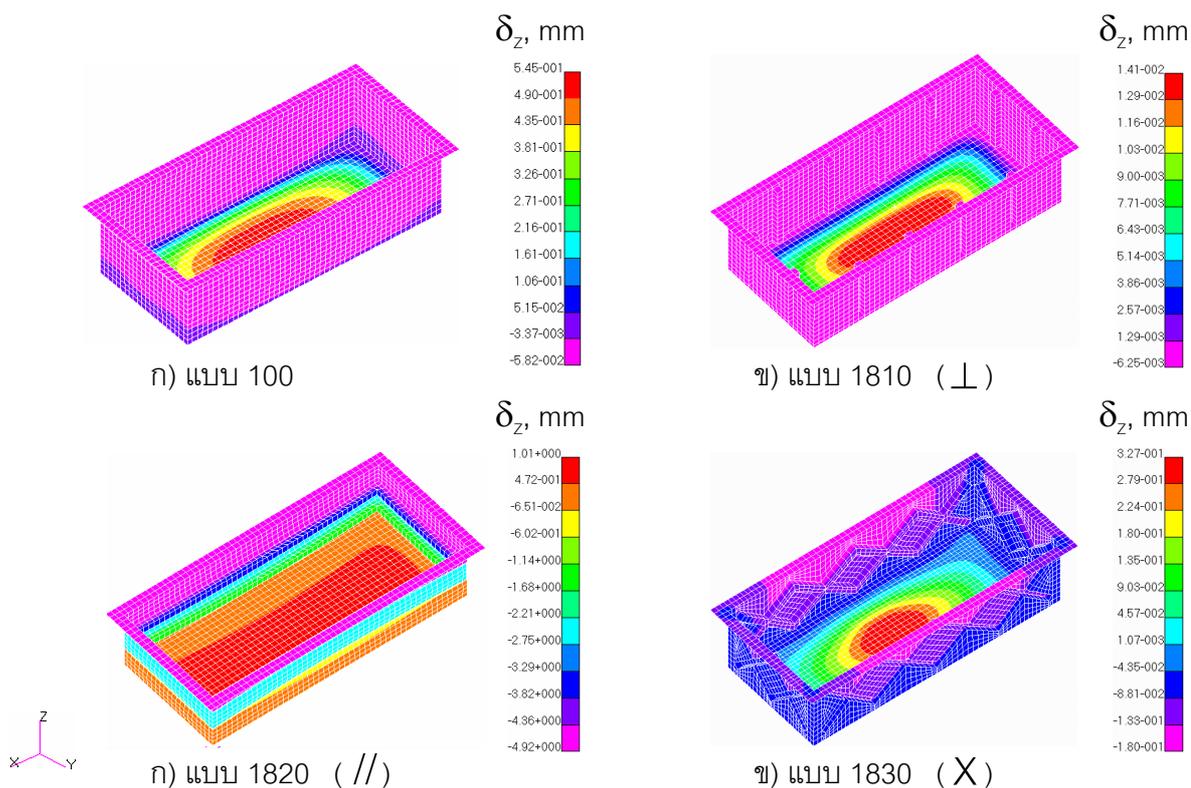
17.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อมี Rib ที่ผนัง

ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (F) ของรูปทรง 1810, 1820 และ 1830 เปรียบเทียบกับแบบ 100 ได้แสดงเป็นกราฟในภาพที่ 170 และกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุด กับภาวะด้านบน (σ vs F) ของทั้ง 4 แบบได้แสดงในภาพที่ 171 โดยทั้งสองกราฟแสดง rib แบบ 1820 มีทั้ง σ_z และ σ สูงสุด รองลงมาคือ แบบ 1830, 100 และ 1810 ตามลำดับ

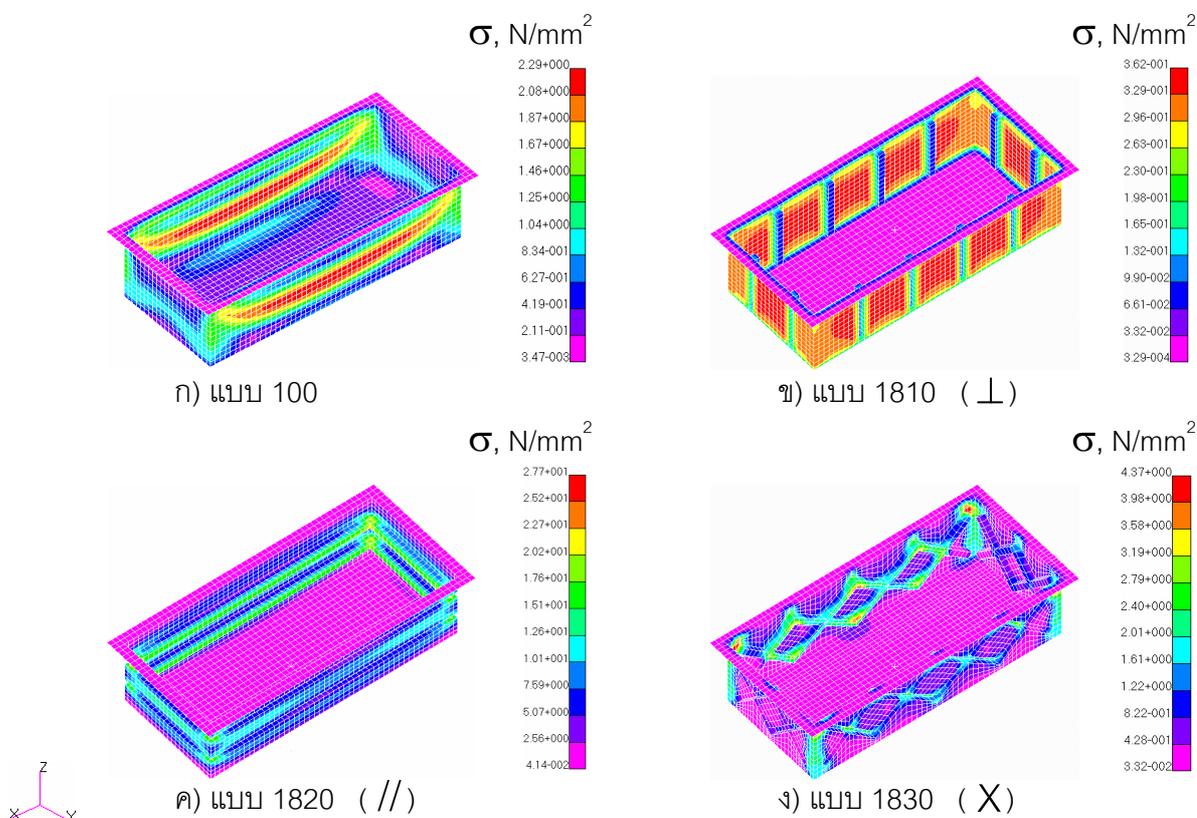
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จากการพล็อตของ F/m vs δ_z/m และ F/V_c vs δ_z/V_c (ภาพที่ 172ก และ 172ข) พบว่ารูปทรง 1820 มีค่า F/m ต่ำสุด และยังมีค่า δ_z/m และ δ_z/V_c สูงสุด ดังนั้น rib ที่ล้อมรอบผนัง และขนานกับฐาน มีความแข็งแรงน้อยสุด โดย rib บนผนังที่ตั้งฉากกับฐาน (แบบ 1810) มีค่า δ_z/m และ δ_z/V_c ต่ำมาก และเนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่าแบบ 100 จึงมี F/m ต่ำรองจาก แบบ 100 ส่วนรูปทรงที่มีค่า F/m สูงสุดคือแบบ 100 ซึ่งเป็นรูปทรงพื้นฐาน



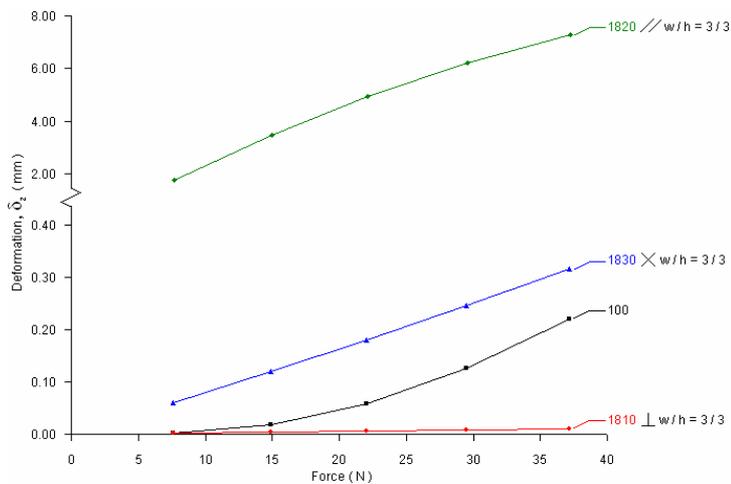
ภาพที่ 167 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830



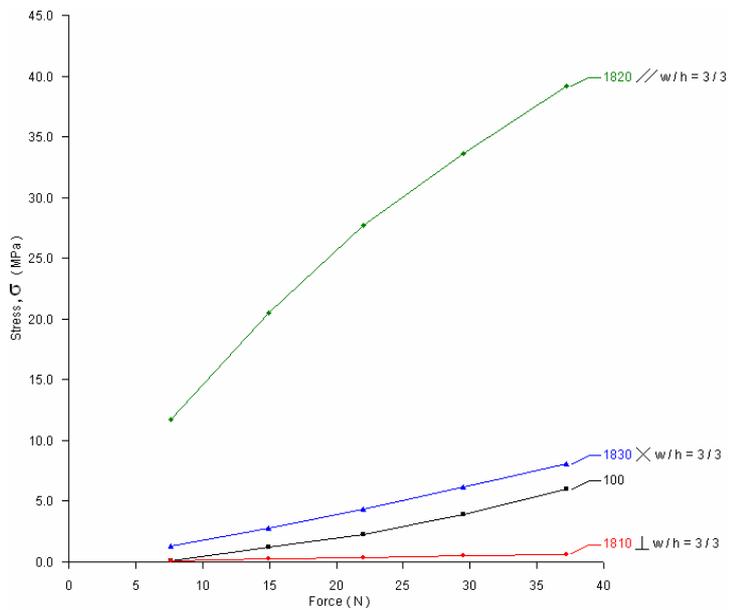
ภาพที่ 168 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830



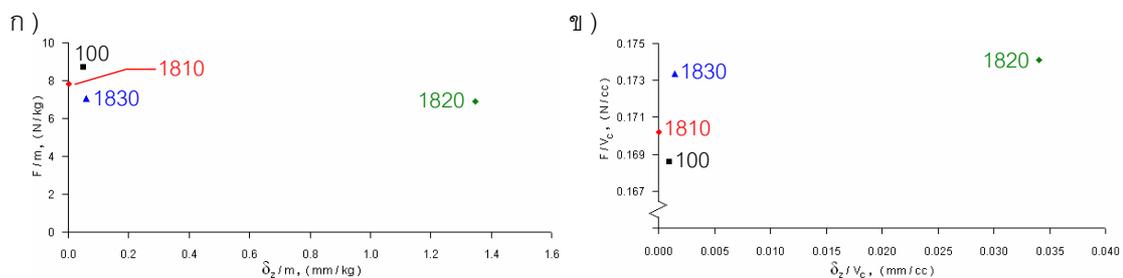
ภาพที่ 169 ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 100 และ 1810 ถึง 1830



ภาพที่ 170 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1810 ถึง 1830



ภาพที่ 171 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 100 และ 1810 ถึง 1830



ภาพที่ 172 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 100 และ 1810 ถึง 1830

18. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1810 เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib

18.1 ผลวิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาวะด้านบนเท่ากับ 22.06 N ของรูปทรง 1810 เมื่อมีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib (แบบ 1811 ถึง 1815) ได้แสดงในภาพที่ 173 โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของทั้ง 5 แบบมีลักษณะเหมือนกับรูปทรง 1810 และเกิดมากที่สุดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ ส่วนผลการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) พบว่าทุกรูปแบบ (1811 ถึง 1815) มีลักษณะคล้ายกับแบบ 1810 (ภาพที่ 174)

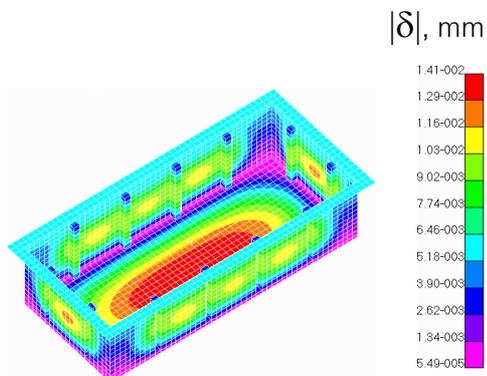
18.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงการเกิดความเค้นสูงสุด ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 ได้แสดงในภาพที่ 175 โดยความเค้นสูงสุดของทั้ง 5 แบบ (1811 ถึง 1815) มีลักษณะคล้ายกับแบบ 1810 คือ มีความเค้นสูงสุดที่บริเวณผิวที่อยู่ระหว่าง rib ของผนังด้านข้าง โดยแบบ 1813 (มีขอบมล) เกิดความเค้นสูงสุดที่ส่วนบนของ rib ที่มีขนาดสูงมากเมื่อเทียบกับที่ผนัง จึงทำให้ความเค้นของผนังที่อยู่ระดับสี่เหลี่ยม

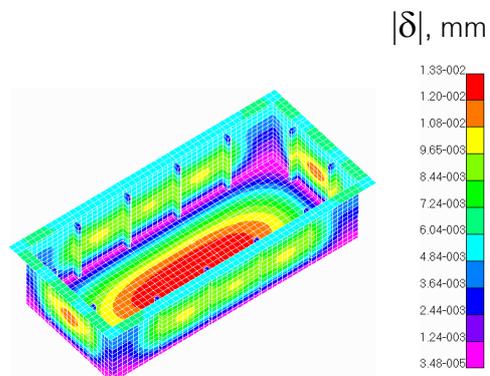
18.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ rib

ระยะยุบตามแนวแกน Z (δ_z) เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (F) ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 ได้แสดงเป็นกราฟในภาพที่ 176 และกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุด กับภาวะด้านบน (σ vs F) ของทั้ง 6 แบบ ได้แสดงในภาพที่ 177 โดยทั้งสองกราฟแสดงแบบ 1811 (rib ที่มีพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีความสูงมากกว่าความกว้าง) มี δ_z และ σ ต่ำสุด

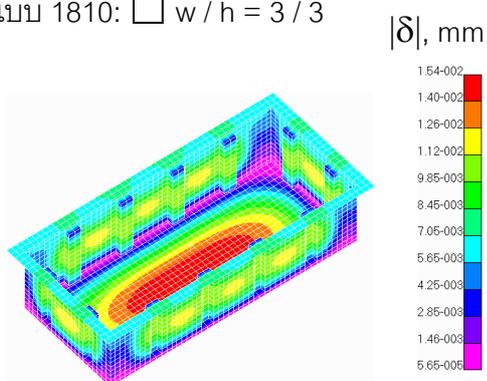
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากพล็อตของ F/m vs δ_z/m และ F/V_c vs δ_z/V_c (ภาพที่ 178ก และ 178ข) พบว่าแบบ 1815 (หน้าตัดของ rib แบบครึ่งวงกลม) มี F/m สูงสุด แต่มี δ_z/m มากด้วย โดยที่แบบ 1811 มี δ_z/m และ δ_z/V_c น้อยสุด



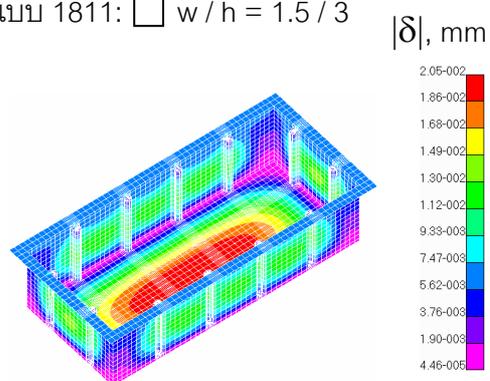
ก) แบบ 1810: □ w / h = 3 / 3



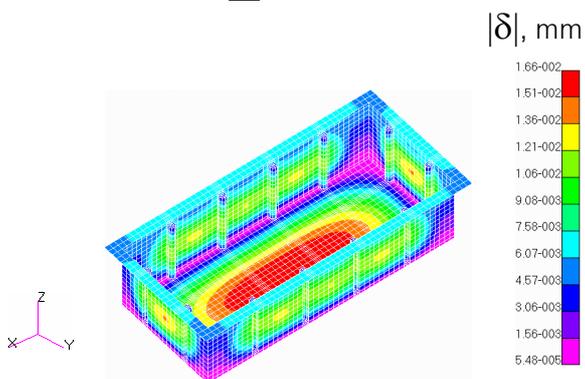
ข) แบบ 1811: □ w / h = 1.5 / 3



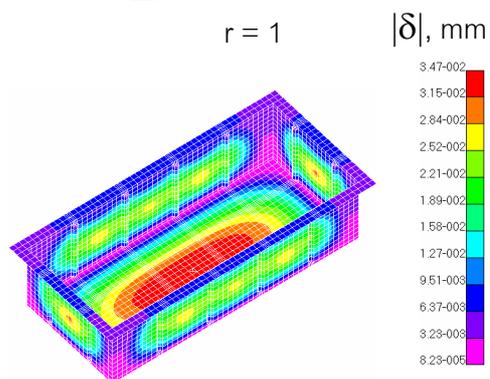
ค) แบบ 1812: □ w / h = 6 / 3



ง) แบบ 1813: □ w / h = 3 / 3

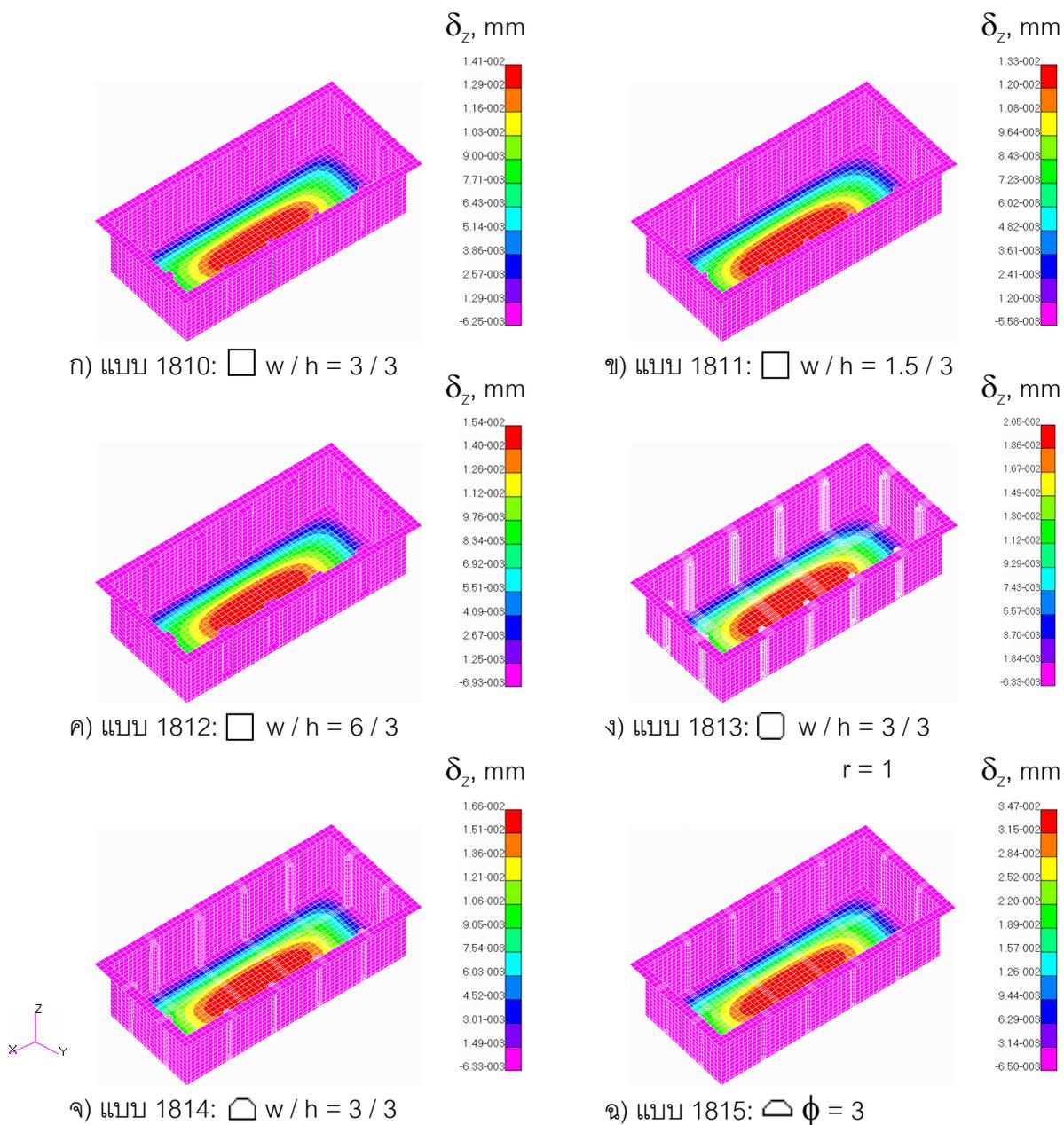


จ) แบบ 1814: □ w / h = 3 / 3

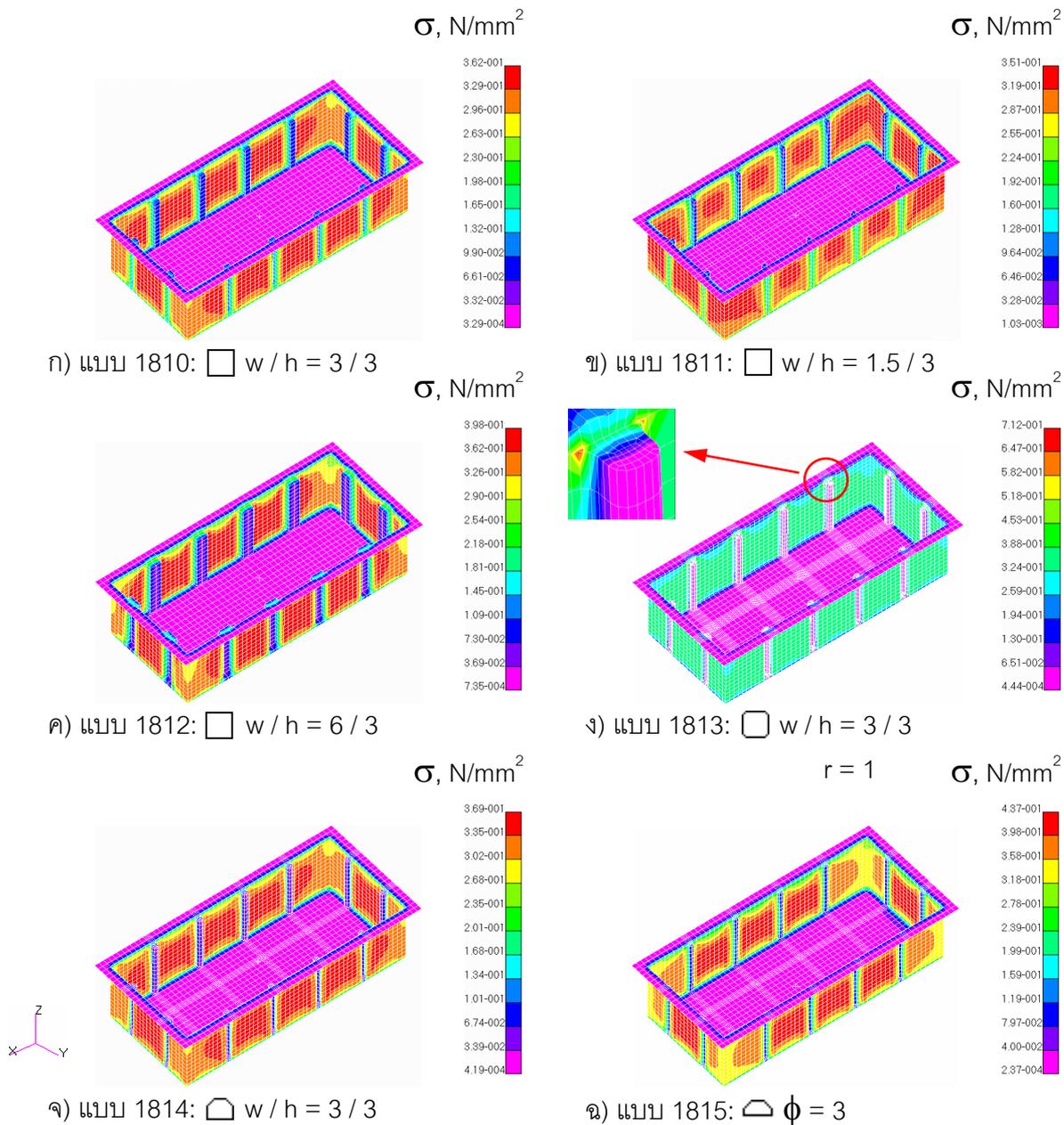


ฉ) แบบ 1815: ⊂ ϕ = 3

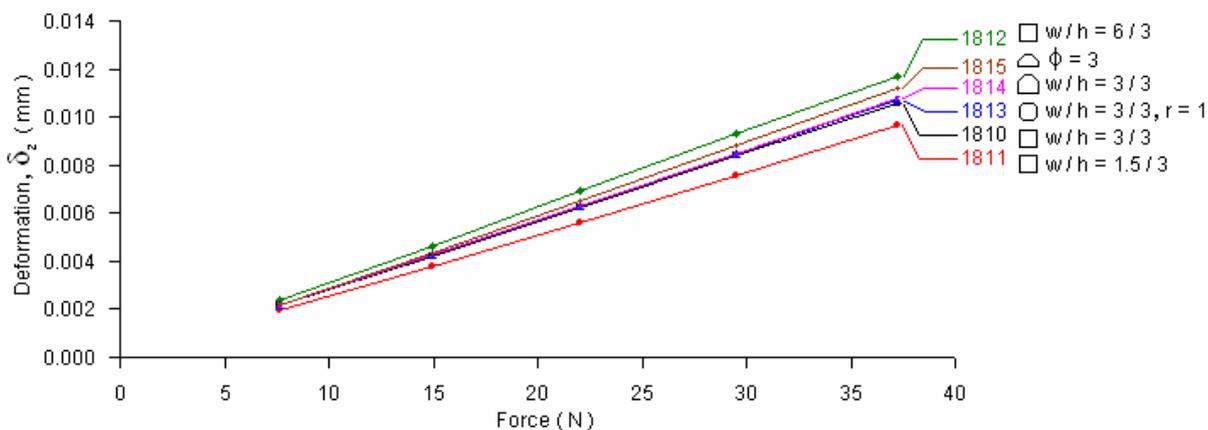
ภาพที่ 173 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 เมื่อ
ภาระด้าบนบน เท่ากับ 22.06 N



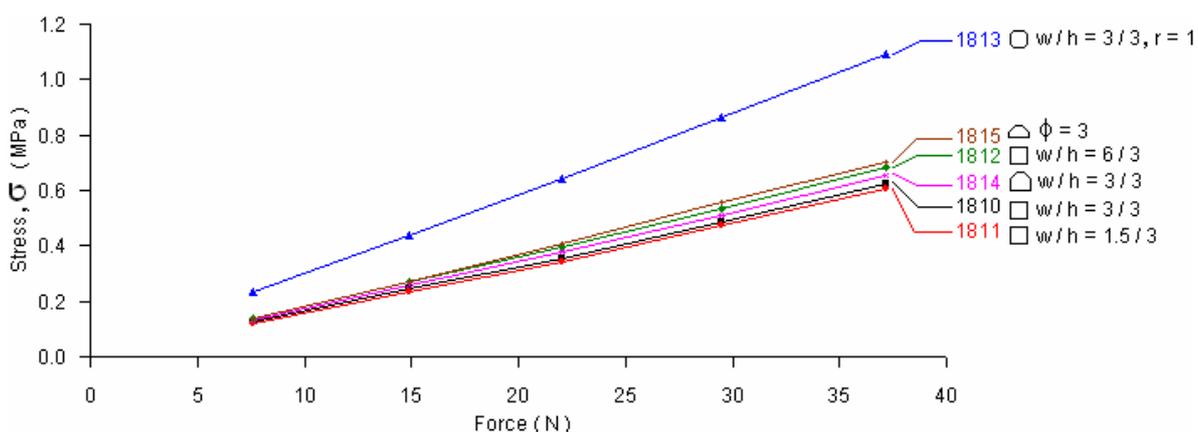
ภาพที่ 174 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



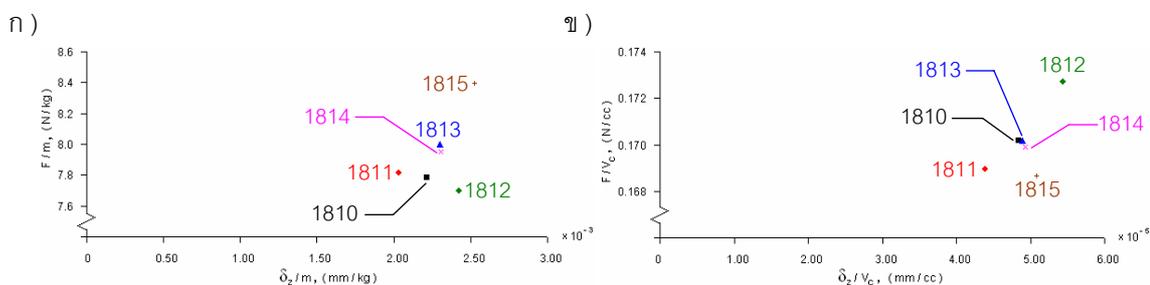
ภาพที่ 175 ความเค้น (σ) ของรูปทรงแบบ 1810 ถึง 1815 เมื่อภาระด้านบน เท่ากับ 22.06 N



ภาพที่ 176 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 1810 ถึง 1815



ภาพที่ 177 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 1810 ถึง 1815



ภาพที่ 178 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 1810 ถึง 1815

19. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนจำนวน Rib

19.1 ผลวิเคราะห์ระยะยุบตัว เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงผล FEA วิเคราะห์ระยะยุบตัว $|\delta|$ ภายใต้ภาวะด้านบนเท่ากับ 22.06 N เมื่อมีจำนวน Rib เพิ่มขึ้น (แบบ 1816 และ 1821 เมื่อเทียบกับแบบ 1810 และ 1820 ตามลำดับ) ได้แสดงในภาพที่ 179 โดยเมื่อมีการเพิ่มจำนวน rib มากขึ้น ลักษณะของการเปลี่ยนตำแหน่งรวมยังคงเดิม (แบบ 1816 เกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ ในขณะที่แบบ 1821 เกิดที่บริเวณขอบด้านบน) ส่วนผลการเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) พบว่าทุกแบบเกิดที่บริเวณฐานของบรรจุภัณฑ์ (ภาพที่ 180)

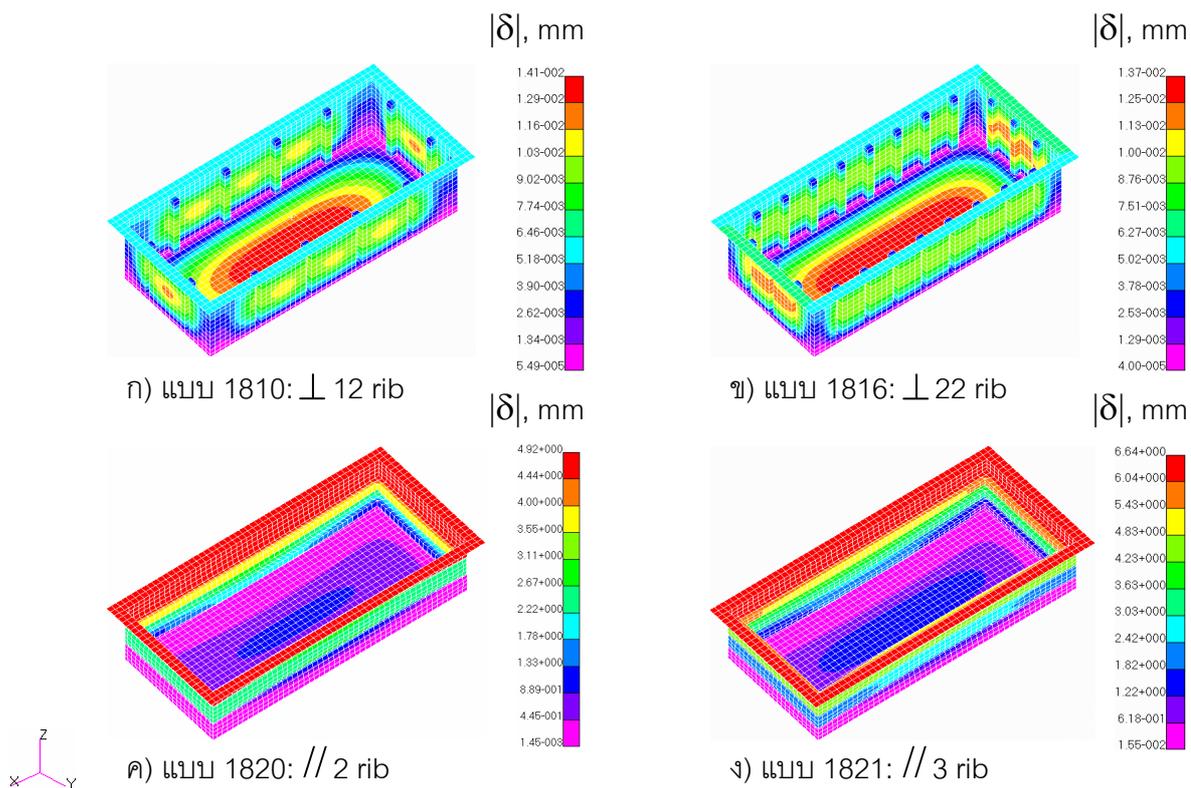
19.2 ผล FEA วิเคราะห์ความเค้น เนื่องจากภาวะด้านบน

ภาพตัวอย่างแสดงความเค้นสูงสุดได้แสดงในภาพที่ 181 โดยแบบที่มี rib ตั้งฉากกับฐาน (1810 และ 1816) มีความเค้นสูงที่ผิวระหว่าง rib ส่วนแบบ rib ขนานกับฐานมีความเค้นสูง เกิดที่ rib ที่มุมของผนัง และตามแนวความยาวของ rib ที่ผนังด้านยาว

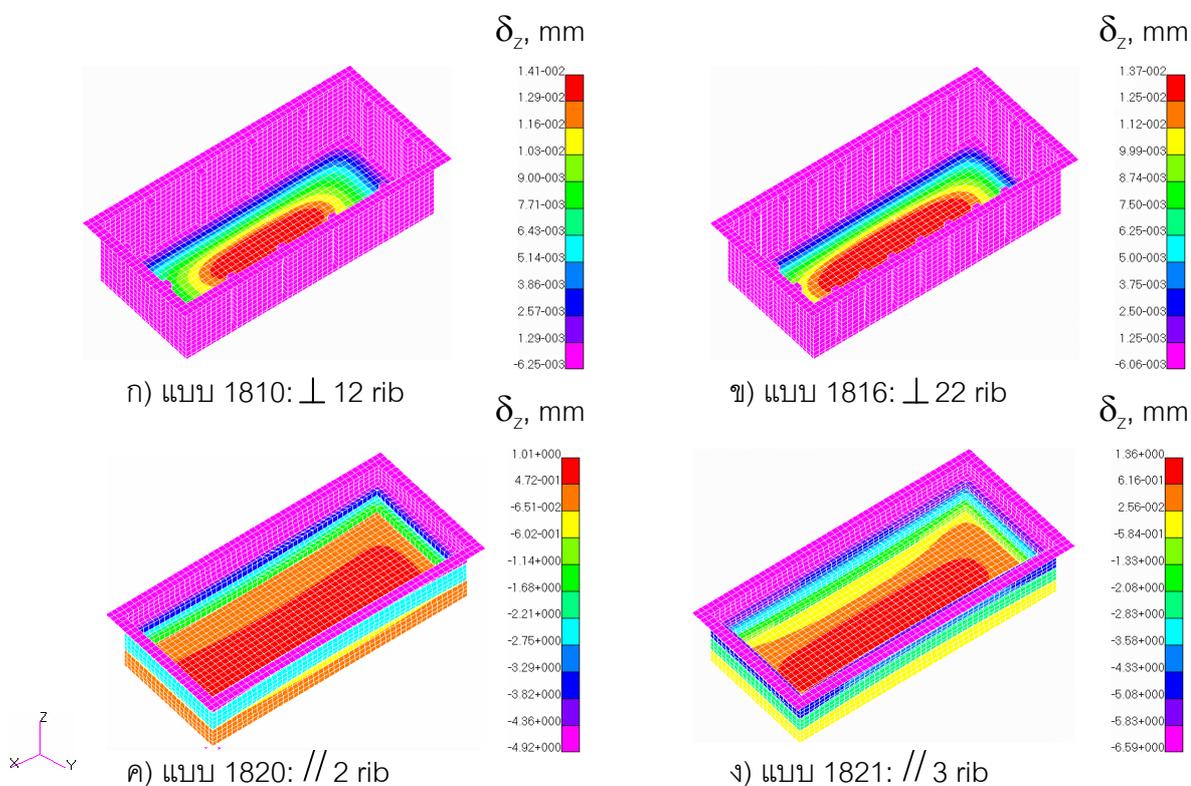
19.3 การเปรียบเทียบผล FEA ของรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อเปลี่ยนจำนวน Rib เพิ่มขึ้น

ระยะยุบตามแนวแกน Z เมื่อเทียบกับภาวะด้านบน (δ_z vs F) ของรูปทรงแบบ 1816 เปรียบเทียบกับ 1810 และ 1821 เปรียบเทียบกับ 1820 ได้สรุปเป็นกราฟในภาพที่ 182ก และ ข ตามลำดับ กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุด กับภาวะด้านบน (σ vs F) ได้แสดงในภาพที่ 183ก และ ข โดยการเพิ่มจำนวน rib ในแนวตั้งฉากกับฐาน มีผลให้ δ_z ต่ำลง แต่ σ สูงขึ้น ส่วนจำนวน rib ในแนวขนานที่เพิ่มขึ้นทำให้ δ_z มากขึ้น แต่ σ ลดลง

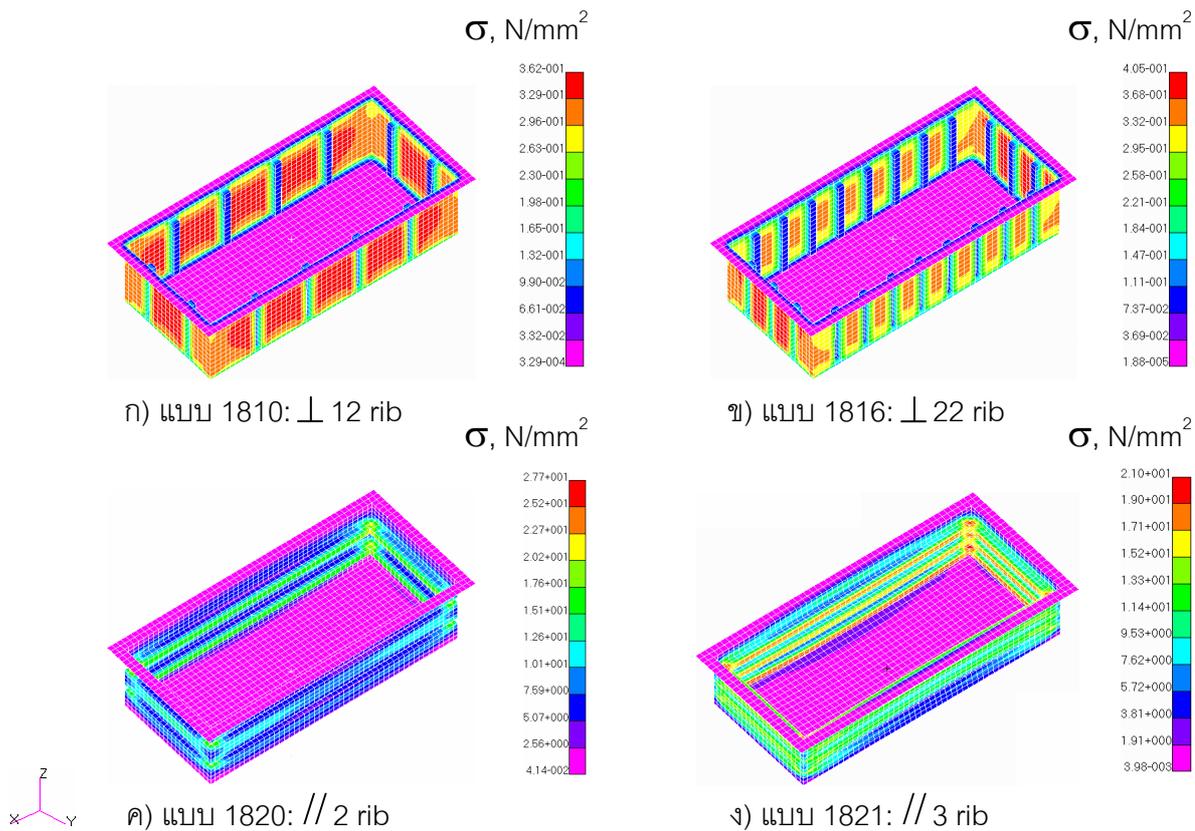
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากพล็อตของ F/m vs δ_z/m และ F/V_c vs δ_z/V_c ได้แสดงในภาพที่ 184ก และ ข ตามลำดับ โดยสรุป การเพิ่มจำนวน rib ทั้งแบบตั้งฉาก และแบบขนาน ไม่ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น



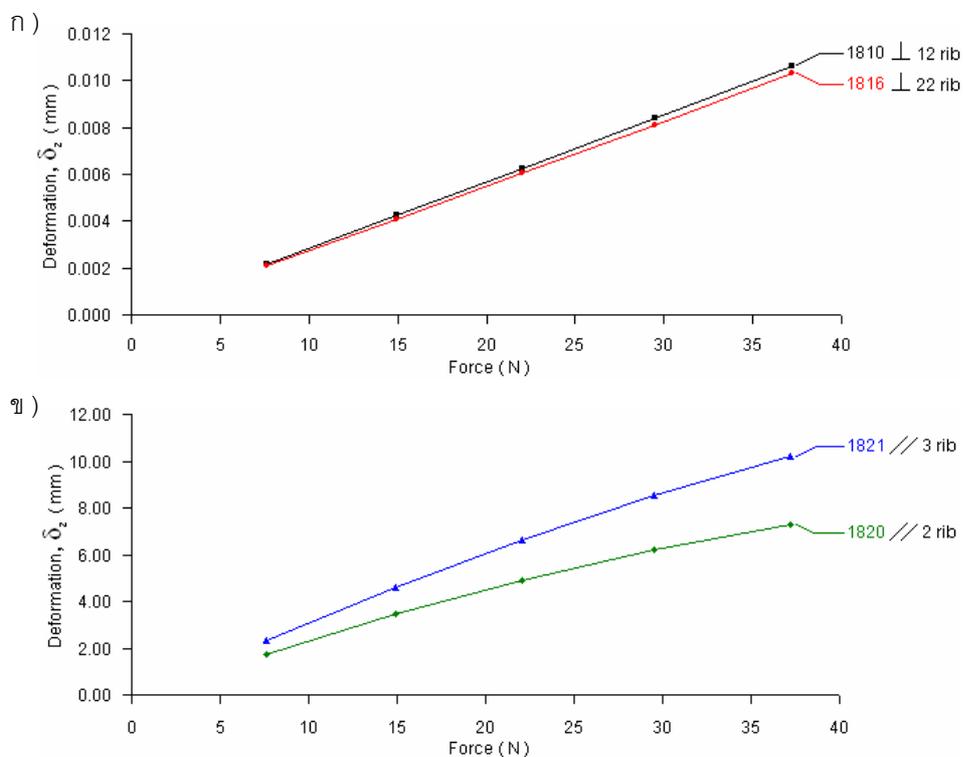
ภาพที่ 179 การเปลี่ยนตำแหน่งรวม $|\delta|$ ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821



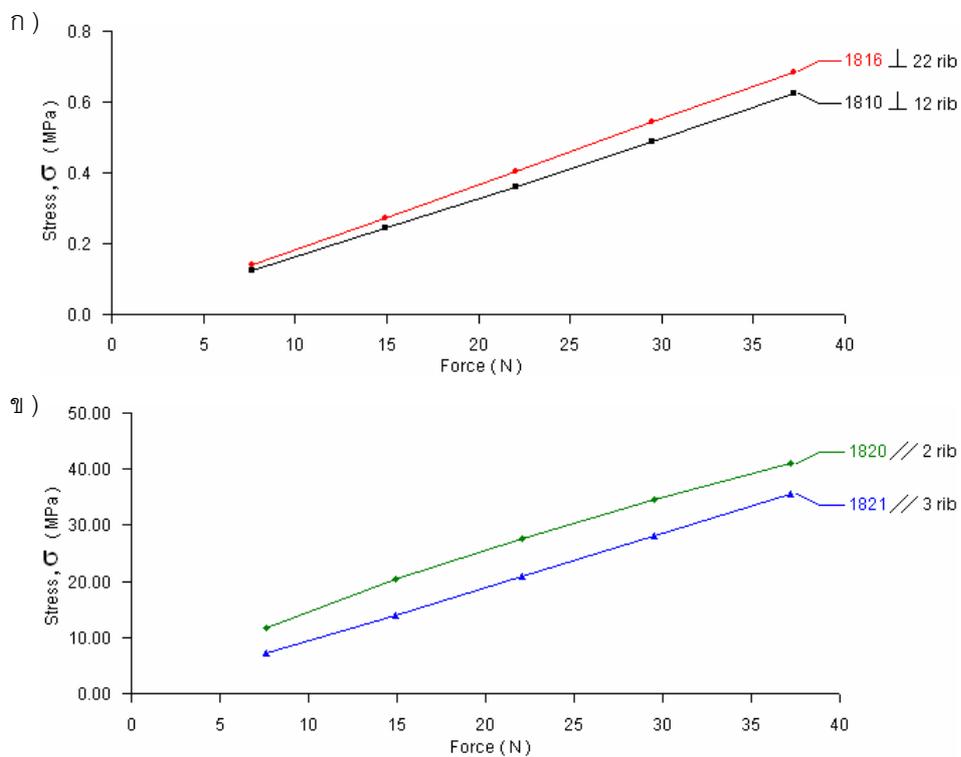
ภาพที่ 180 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแกน Z (δ_z) ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821



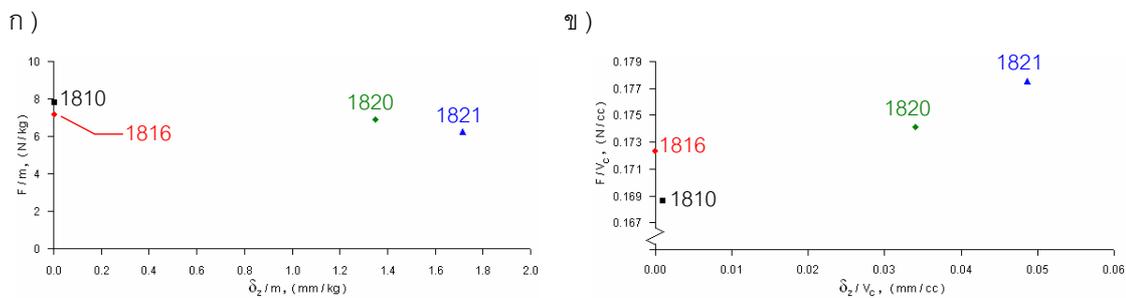
ภาพที่ 181 ความเค้น (σ) ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821



ภาพที่ 182 กราฟ δ_z vs F ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821



ภาพที่ 183 กราฟ σ vs F ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821



ภาพที่ 184 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงน้ำหนัก (ก) และ เชิงความจุ (ข) ของรูปทรง แบบ 1810, 1816, 1820 และ 1821

20. ผลสรุปแนวทางการออกแบบ บรรจุภัณฑ์รูปทรงต่างๆ

แนวทางการออกแบบบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ผลิต โดยการขึ้นรูปรีด สามารถสรุปเป็นตาราง โดยนำผลจากผลการวิจัย และวิจารณ์ ในหัวข้อที่ 5 ถึง 19 ได้ตามแสดงในตารางที่ 14 ถึง 22 โดยได้สรุปจากผลการจำลองการยุบตัว และความเค้นอันเนื่องมาจาก ภาระด้านบนโดยใช้ FEA ของภาชนะรูปทรงต่างๆ ที่มีความหนาผนังเท่ากับ 0.2 mm ขนาดของภาชนะที่มีพื้นที่ฐาน ตั้งแต่ 2916 ถึง 15500 mm² ความสูง 33 ถึง 50 mm และวัสดุเป็น Polystyrene (PS)

โดยความเค้นสูงกว่าจัดเป็นข้อด้อยของภาชนะรูปทรงนั้นๆ และ δ_z ที่มีค่าลดลงมากกว่า จัดเป็นจุดด้อยของภาชนะรูปทรงนั้น ตัวอย่างเช่น

σ แสดง ✓ หมายถึง ความเค้นมีค่าต่ำลง หรือทำให้ภาชนะมีความแข็งแรงมากขึ้น

δ_z แสดง ✓ หมายถึง ระยะเวลาตามแกนความสูงมีค่าต่ำลง หรือภาชนะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

F/m หรือ F/V_C แสดง ✓ หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง แรงต่อน้ำหนัก หรือ แรงต่อปริมาตร ความจุ มีค่าสูงขึ้น หรือภาชนะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

δ_z/m หรือ δ_z/V_C แสดง ✓ หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง ระยะเวลาตามแกนความสูงต่อน้ำหนัก หรือ ระยะเวลาตามแกนความสูงต่อปริมาตรความจุ มีค่าต่ำลง หรือภาชนะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 14 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยม

รูปทรง	เพิ่มค่า	σ	F/m	F/V _C	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_C
สี่เหลี่ยม	W	✓	✗	✗	✓	✓	✓
	L	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	W/L = 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	H	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	R _C	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	R _E	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	R _E = R _C	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	θ	✗	✓	✓	✗	✗	✗

ตารางที่ 15 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุกฎเกณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงกระบอกร

รูปทรง	เพิ่มค่า	σ	F/m	F/V _C	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_C
กระบอกร	ϕ	✓	✗	✗	✓	✓	✓
	H	✗	✗	✗	✗	✗	✓
	R _E	✗	✓	✓	✗	✗	✗
	θ	✗	✓	✓	✗	✗	✗

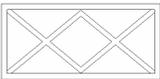
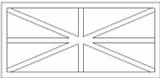
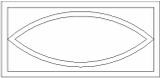
ตารางที่ 16 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุกฎเกณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงวงรี

รูปทรง	เพิ่มค่า	σ	F/m	F/V _C	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_C
วงรี	W	✓	✗	✗	✓	✓	✓
	L	✗	✓	✓	✗	✓	✓
	H	=	✗	✗	✗	✗	✗
	R _E	✗	✓	✓	✗	✗	✗
	θ	✗	✓	✓	✗	✗	✗

ตารางที่ 17 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุกฎเกณฑ์เมื่อเพิ่มค่าตัวแปร เทียบกับรูปทรงหกเหลี่ยม

รูปทรง	เพิ่มค่า	σ	F/m	F/V _C	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_C
หกเหลี่ยม	R _C	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	R _E	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	R _C = R _E	✗	✗	✗	✗	✗	✗

ตารางที่ 18 แสดงประสิทธิภาพของบรจกัณฑ์เมื่อมี Rib ที่ฐาน เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยม

รูปทรง	เพิ่ม Rib ฐาน	σ	F/m	F/V _c	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_c
สี่เหลี่ยม		×	×	✓	×	✓	×
		✓	×	✓	✓	✓	✓
		✓	×	✓	✓	✓	✓
		=	×	✓	✓	✓	✓
		✓	×	✓	✓	✓	✓
		=	×	✓	✓	✓	✓
		✓	×	✓	✓	✓	✓

ตารางที่ 19 แสดงประสิทธิภาพของบรจกัณฑ์เมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1710

รูปทรง	เพิ่มค่า	σ	F/m	F/V _c	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_c
สี่เหลี่ยม	 w/h = 4/6	×	×	✓	×	✓	×
	 w/h = 6/4	×	✓	✓	×	×	×
	 w/h = 4/4 r = 1	✓	✓	=	✓	✓	✓
	 w/h = 4/6	✓	✓	×	✓	✓	✓
	 $\phi = 4$	✓	✓	×	✓	✓	✓

ตารางที่ 20 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุก้อนที่มี Rib ที่ผนังเทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยม

รูปทรง	เพิ่ม Rib ผนัง	σ	F/m	F/V_c	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_c
สี่เหลี่ยม	\perp w/h = 3/3	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	// w/h = 3/3	✗	✗	✓	✗	✗	✗
	X w/h = 3/3	✗	✗	✓	✗	✗	✗

ตารางที่ 21 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุก้อนเมื่อเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของ Rib เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1810

รูปทรง	เพิ่มค่า	σ	F/m	F/V_c	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_c
สี่เหลี่ยม	\square w/h = 1.5/3	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	\square w/h = 6/3	✗	✗	✓	✗	✗	✗
	\square w/h = 3/3	✗	✓	=	=	✗	=
	r = 1						
	\square w/h = 3/3	✗	✓	✗	=	✗	✗
\square $\phi = 3$	✗	✓	✗	✗	✗	✗	

ตารางที่ 22 แสดงประสิทธิภาพของบรรจุก้อนเมื่อเปลี่ยนจำนวน Rib เทียบกับรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบ 1810 และ 1820

รูปทรง	เพิ่ม Rib ผนัง	σ	F/m	F/V_c	δ_z	δ_z/m	δ_z/V_c
สี่เหลี่ยม	\perp 22 rib	✗	✗	✓	✓	=	✓
	// 3 rib	✓	✗	✓	✗	✗	✗

สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการทดสอบทางกล ของบรรจุภัณฑ์แบบ A และ B ใช้เป็นผลอ้างอิงเพื่อประเมินความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ FEA ซึ่งได้สร้างแบบจำลอง เป็นแบบผนังบาง (Shell) มีลักษณะเอลิเมนต์ แบบ Quad โดยมีค่าความหนาคงที่ เท่ากับ 0.2 mm และกำหนดวัสดุเป็นพลาสติก ชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene: PS) โดยแบบจำลองได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบต่างๆ จำนวน 9 รูปแบบ โดยแบ่งเป็นการกำหนดภาระ 3 แบบ และกำหนดขอบเขตเงื่อนไข 5 แบบ พบว่าแบบจำลองที่กำหนดภาระ และขอบเขตเงื่อนไขแบบ Fixed 4 มุม: (D – Distributed Load) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยคาดคะเนความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.02 ถึง 6.44% เมื่อเป็นมาตรฐานสี่เหลี่ยม

จากผลการประเมินความแม่นยำสามารถนำมาใช้เป็นข้อกำหนดพื้นฐานในการวิเคราะห์บรรจุภัณฑ์ที่ได้ปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพความแข็งแรง เช่น H , W , L , ϕ , R_E , R_C และ θ เป็นต้น โดยรูปทรงที่มีค่าประสิทธิภาพเชิงมวล (F/m) หรือประสิทธิภาพเชิงความจุ (F/V_C) สูงสุด และระยะยุบต่อน้ำหนัก (δ_z/m) หรือระยะยุบเชิงความจุ (δ_z/V_C) น้อยที่สุด แสดงว่ารูปทรงนั้นมีประสิทธิภาพความแข็งแรงมากที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชาคริต สุวรรณจำรัส. 2546. การจำลองมาตรฐานการทดสอบขดพลาสติกโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชลิต อรรถคำภีร์วงศ์. 2549. การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทิพากร พรพันธุ์ไพบลูย์. 2548. อิทธิพลของรูปทรงต่อความแข็งแรงของขดพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทานตวรรณ เต็กชุ่น และคณะ. 2544. พลาสติก 1. สกายบุ๊กส์, กรุงเทพฯ
- ธัญญา เกียรติวัฒน์. 2541. เอกสารประกอบการบรรยายวิชาวิธีขึ้นประกอบจำกัดในการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลของของไหล. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สังจาทิพย์ ทศนีย์พันธุ์. 2545ก. การจัดระบบ CAD/CAM/CAE ให้เหมาะสมกับธุรกิจ ตอนที่ 1. ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม 9 (1): 106-111.
- _____. 2545ข. การจัดระบบ CAD/CAM/CAE ให้เหมาะสมกับธุรกิจ ตอนที่ 2. ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม 9 (2): 73-79.
- _____. 2545ค. โซลิตโมเดล เทคโนโลยีที่แท้จริงสำหรับการออกแบบ. วิศวกรรมสาร 55 (7): 37-43.
- _____. 2546. เอกสารประกอบการบรรยายวิชาแคลคูลัสสำหรับวิศวกรรมเครื่องกล I. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Donald, V.R. and David, P.D. 1991. **Design with Plastics and Composites : A Handbook.**

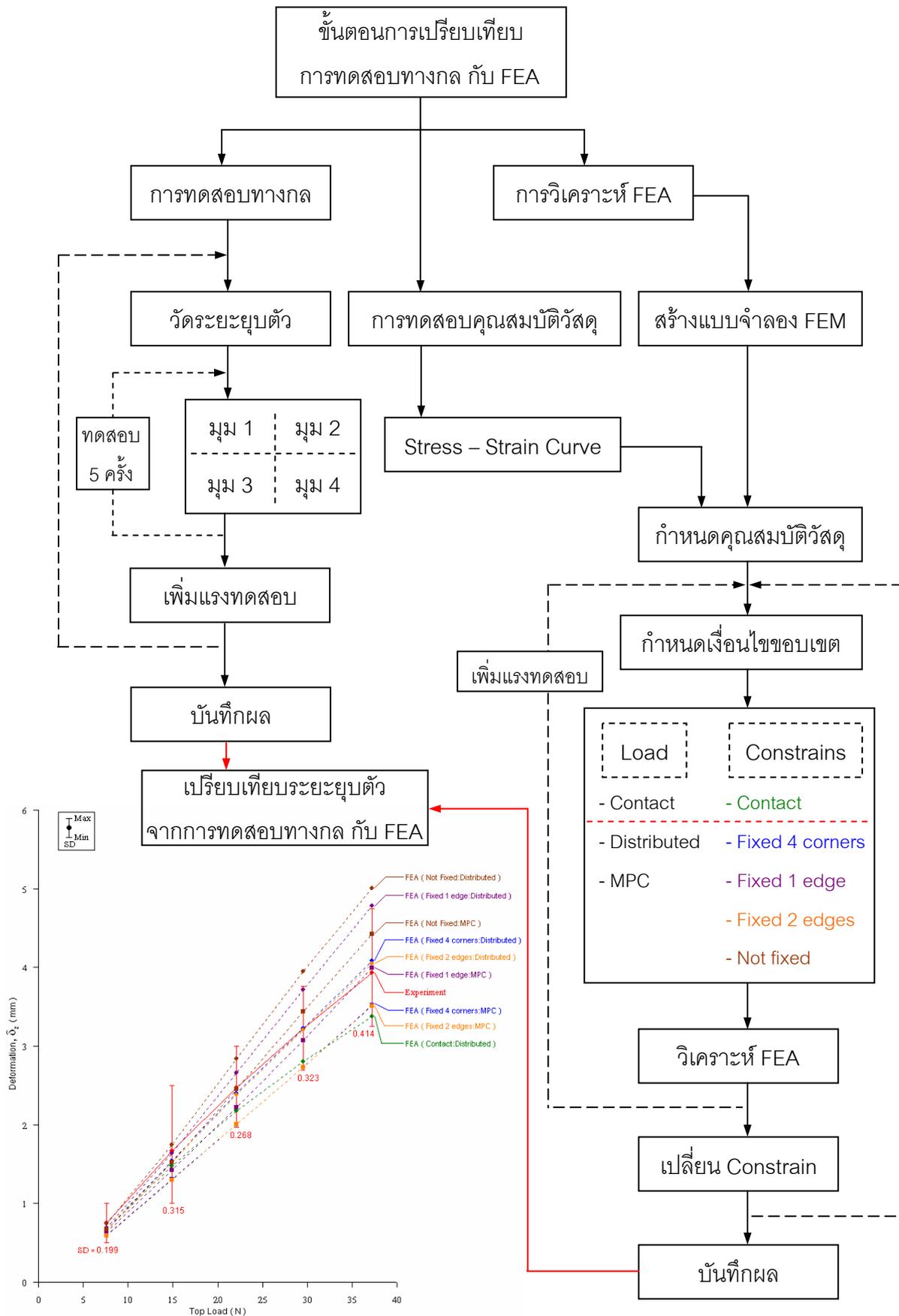
Van Nostrand Reinhold, New York

James, L.T. 1987. **Thermoforming.** Carl Hanser Verlag, Munich

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการเปรียบเทียบการทดสอบทางกล กับ FEA



ภาคผนวก ข

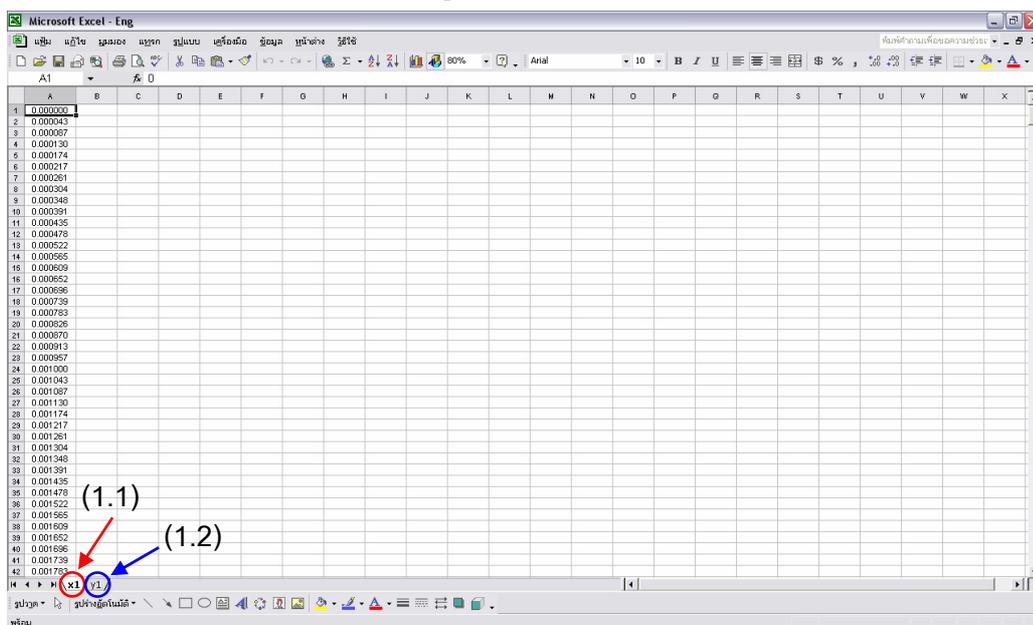
ขั้นตอนการรองสัญญาณความถี่ โดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB

ขั้นตอนการกรงของสัญญาณความถี่ โดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB

1. เปิดโปรแกรม Microsoft Excel

1.1 แผ่นงานที่ 1 ใส่ข้อมูลค่า X1 (Strain Value)

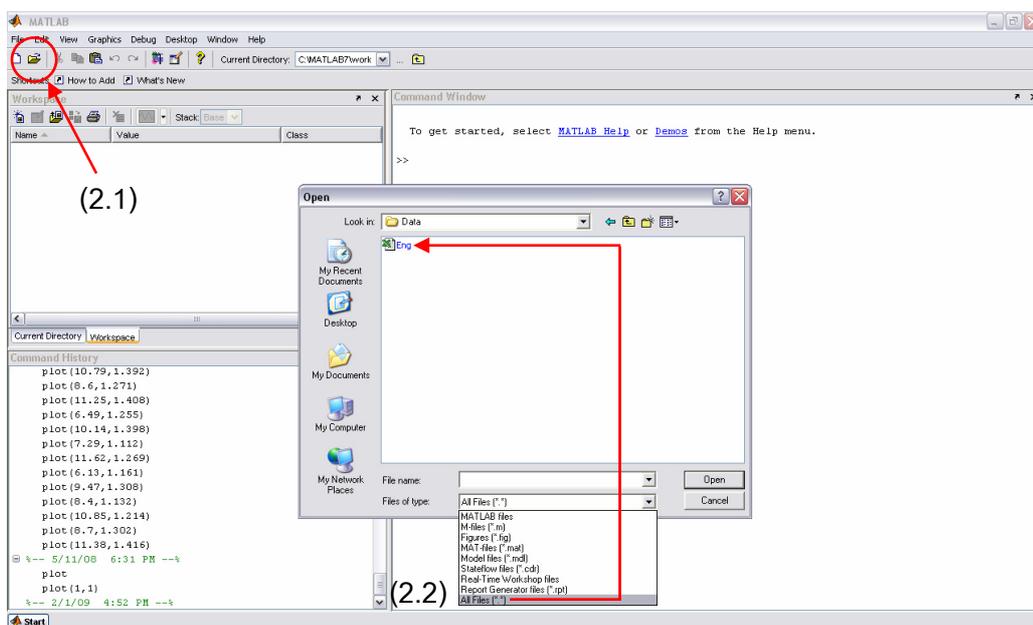
1.2 แผ่นงานที่ 2 ใส่ข้อมูลค่า Y1 (Stress Value)



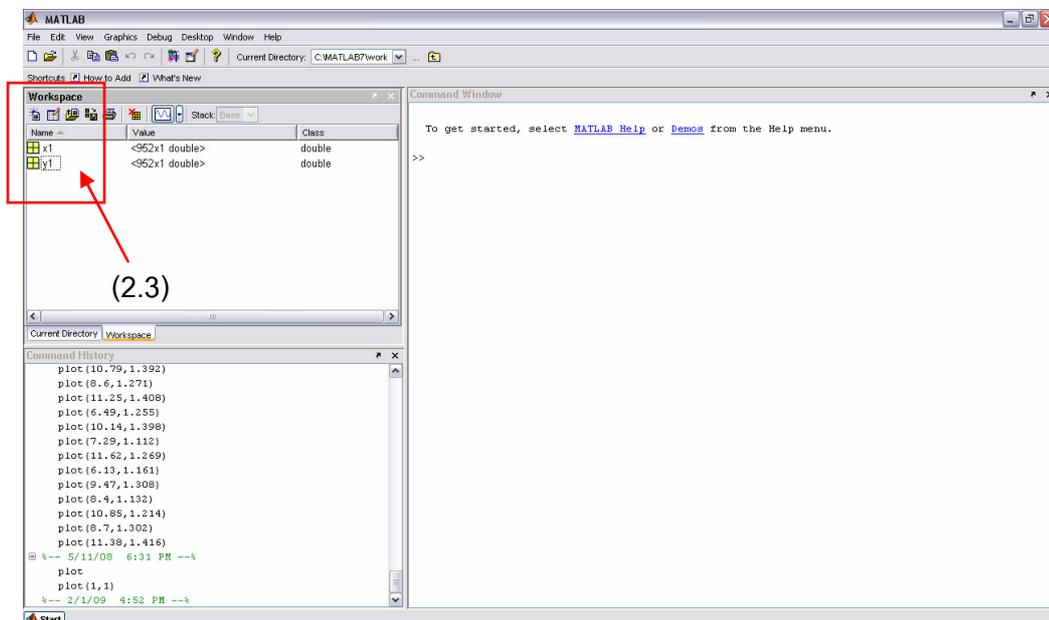
2. เปิดโปรแกรม MATLAB

2.1 คลิกที่ Open

2.2 Files of type เลือก All File → เลือก Excel file จากหัวข้อที่ 1



2.3 ที่ Workspace จะแสดงข้อมูลค่า X1 และ Y1 <row x column>

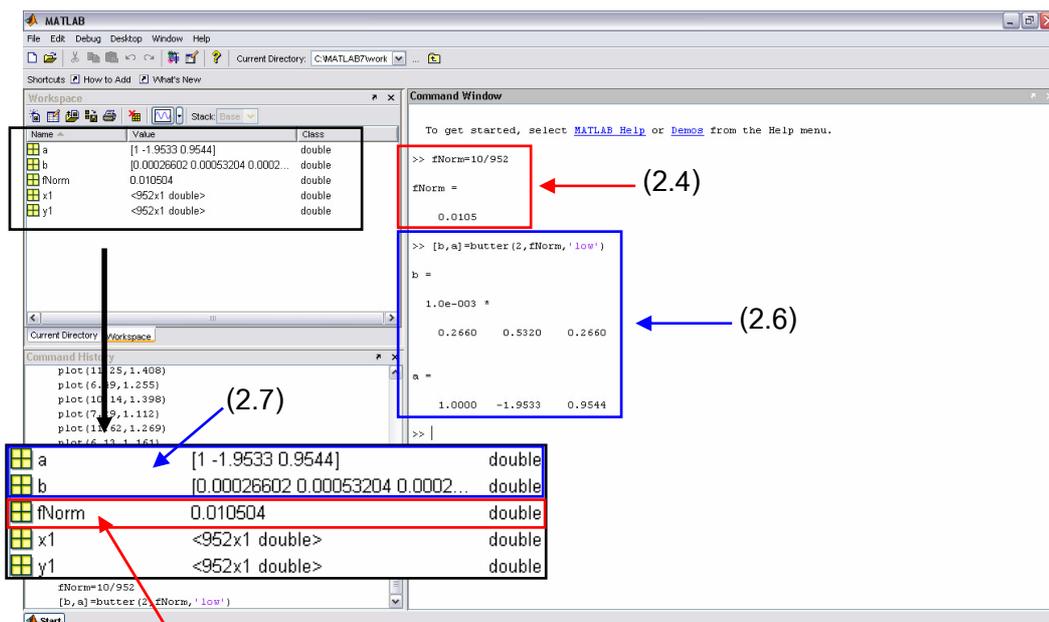


2.4 ที่ Command Window พิมพ์ `fNorm=10/952` <cut-off 10 Hz> กด Enter

2.5 ที่ Workspace จะแสดงค่า `fNorm`

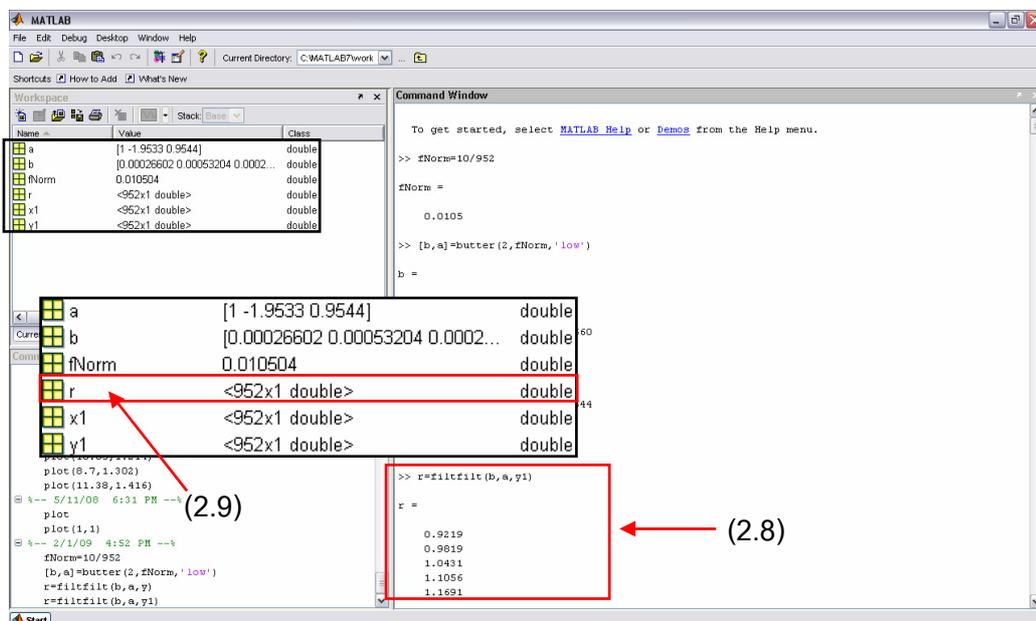
2.6 ที่ Command Window พิมพ์ `[b,a]=butter(2,fNorm,'low')` กด Enter

2.7 ที่ Workspace จะแสดงค่า `a` และ `b`



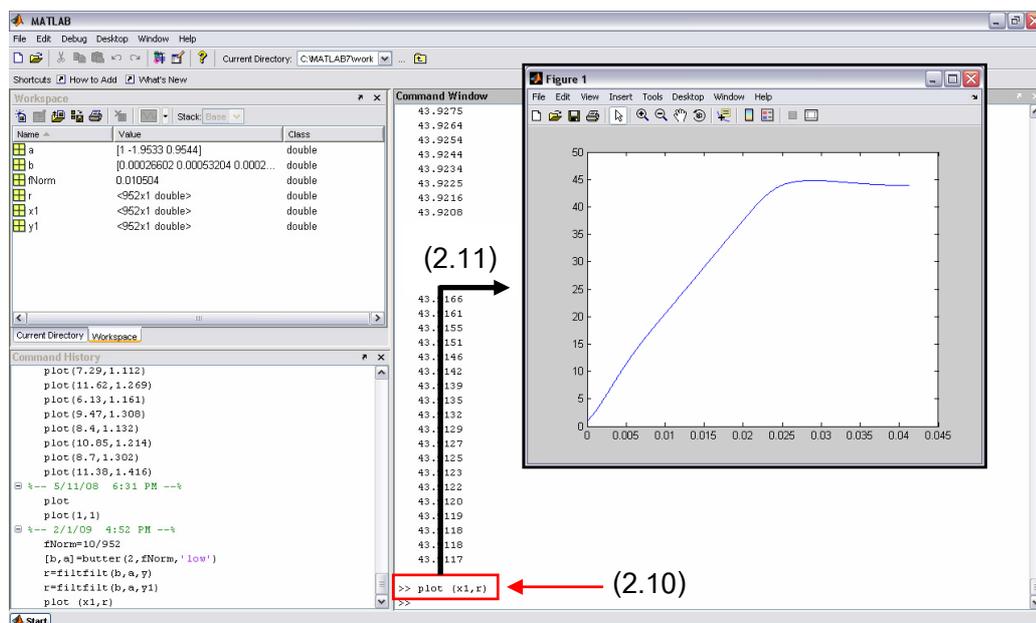
2.8 ที่ Command Window พิมพ์ `r=filzfilt(b, a, Y1)` กด Enter

2.9 ที่ Workspace จะแสดงค่า r โดยที่จำนวน matrix จะเท่ากับ Y1



2.10 ที่ Command Window พิมพ์ `plot(x1, r)` กด Enter

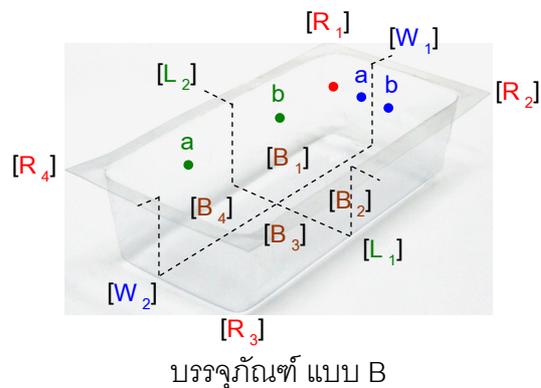
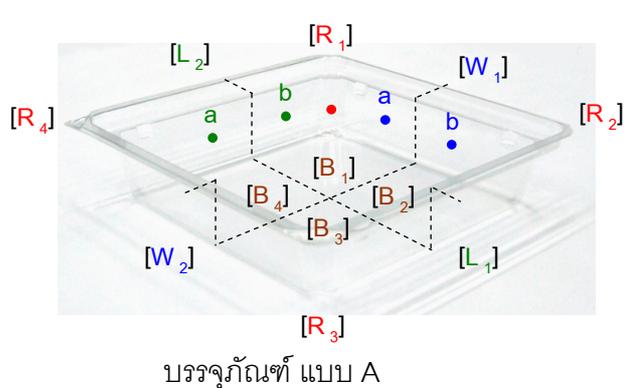
2.11 ที่ Figure 1 จะแสดงกราฟที่พล็อตค่าระหว่าง X1 กับค่า r



ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ย ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A และ B

การคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ย ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A และ B



ตารางผนวกที่ ค1 แสดงค่าความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ แบบ A

No.	Radius				Wide				Length				Base			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	W ₁		W ₂		L ₁		L ₂		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
					a	b	a	b	a	b	a	b				
1	0.18	0.17	0.18	0.18	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.21	0.20	0.20
2	0.18	0.18	0.18	0.17	0.20	0.21	0.22	0.21	0.21	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
3	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20
4	0.17	0.17	0.17	0.18	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20
5	0.18	0.18	0.17	0.18	0.21	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20

T_{avg} = 0.197 mm

ตารางผนวกที่ ค2 แสดงค่าความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์ แบบ B

No.	Radius				Wide				Length				Base			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	W ₁		W ₂		L ₁		L ₂		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
					a	b	a	b	a	b	a	b				
1	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
2	0.18	0.17	0.18	0.18	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20
3	0.18	0.18	0.19	0.18	0.21	0.21	0.20	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20
4	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20	0.21	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
5	0.18	0.18	0.17	0.17	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21

T_{avg} = 0.198 mm

หมายเหตุ ค่าความหนาเฉลี่ยคำนวณจาก $T_{avg} = \frac{(R_{avg} + W_{avg} + L_{avg} + B_{avg})}{5}$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	ประพันธ์ ธรรมนนทิกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ประถมศึกษาจากโรงเรียนสารสาสน์พิทยา มัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนวัดสุทธิวราราม มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดสุทธิวราราม วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ประจำแผนกบำรุงรักษาเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (โรงไฟฟ้าวังน้อย)
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	รางวัลโครงงานวิศวกรรมดีเด่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2546