

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อมูลของแบบจำลองแบบเต็มใบและแบบครึ่งใบของขวดทดสอบ ก

	แบบจำลอง	Node	Elements	Processing Time (sec)	File Size (MB)
(1)	เต็มใบ	3,100	3,000	398	38.6
(2)	ครึ่งใบ	1,576	1,500	90	19.8
	Ratio (1)/(2)	1.967	2.000	4.422	1.949

5.3 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ FEA

ฟังก์ชันกราฟเส้นตรงของระยะยืด จากผลการทดลองทางกลของภาพที่ 66 และ 67 ในรูปของสมการ

$$\Delta = KP + \Delta_0 \quad (3)$$

โดย Δ คือ ระยะยืด

P คือ แรงดัน

K คือ ค่าความชัน

Δ_0 คือ ค่าระยะยืดเมื่อไม่มีโหลดหรือจุดตัดบนแกนตั้ง

ซึ่งคำนวณจากวิธี Least Squares และค่า Standard Error of The Estimate (SDE หรือ σ_e) ได้ในตารางที่ 5 ค่า SDE นี้ คือ ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลที่กระจายออกจากสมการเส้นตรง ค่าของ SDE เมื่อเป็นศูนย์แสดงว่าสมการเส้นตรงดังกล่าวทับผ่านทุกจุดของข้อมูล เมื่อ SDE เท่ากับ 1 mm แสดงว่า 68% ของจำนวนข้อมูลกระจายอยู่ในบริเวณ ± 1 mm จากสมการเส้นตรง และ 95.5% และ 99.75% ภายในบริเวณ ± 2 mm และ ± 3 mm จากสมการเส้นตรงตามลำดับ

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน ($\bar{e}$) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($\overline{e_p}$) ของผลการวิเคราะห์ FEA จากค่าจริงที่บันทึกได้ตามภาพที่ 66 ถึง 67 และจากสมการเส้นตรงของตารางที่ 5 ในช่วงค่าแรงดัน 16 psi ถึง 30 psi (รวม 8 ค่า) สรุปได้ตามแสดงในตารางที่ 6 โดยค่าความคลาดเคลื่อนจากภาพที่ 66 ถึง 67 คำนวณจาก

$$e = X_{EXP} - X_{FEA} \quad (4)$$

โดย X_{EXP} คือ ค่าจากการทดสอบทางกล

X_{FEA} คือ ค่าจากการวิเคราะห์ FEA

และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (e_p) คำนวณจาก

$$e_p = \left(\frac{X_{EXP} - X_{FEA}}{X_{EXP}} \right) \times 100 \% \quad (5)$$

ตารางที่ 5 ค่าความชัน (K) ค่าจุดตัดบนแกน (Δ_o) และค่า SDE ของขดทดสอบ ก

แกน	$\Delta = KP + \Delta_o$	K (mm/psi)	Δ_o (mm)	SDE (mm)
X การทดสอบทางกล		0.0890	-0.7414	0.0766
X FEA ตามแกน (ครึ่งใบ)		0.0074	0.7557	0.0003
X FEA แบบ Total Translation(ครึ่งใบ)		0.0156	0.6971	0.0180
Z การทดสอบทางกล		0.1746	5.4972	0.1557
Z FEA ตามแกน (ครึ่งใบ)		0.1469	4.7232	0.0527
Z FEA แบบ Total Translation(ครึ่งใบ)		0.1469	4.7232	0.0527

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ FEA ในช่วง 16 psi ถึง 30 psi ของ
ขดทดสอบ ก

แกน		จากภาพที่ 66-67		จากตารางที่ 5	
		$\bar{e}$ (mm)	$\bar{e}_p$ (%)	$\bar{e}_L$ (mm)	$\bar{e}_{LP}$ (%)
X	FEA ตามแกน (ครึ่งใบ)	0.3786	22.2430	0.3789	22.2607
X	FEA แบบ Total Translation (ครึ่งใบ)	0.2478	12.1887	0.2489	12.2204
Z	FEA ตามแกน (ครึ่งใบ)	1.4126	14.8212	1.4121	14.8090
Z	FEA แบบ Total Translation (ครึ่งใบ)	1.4126	14.8212	1.4121	14.8090

ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนจากสมการเส้นตรง (e_L) ของตารางที่ 5 คำนวณจาก

$$e_L = X_{EXP} - (KP + \Delta_0) \quad (6)$$

และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากสมการเส้นตรง (e_{LP}) คำนวณจาก

$$e_{LP} = \left\{ \frac{X_{EXP} - (KP + \Delta_0)}{X_{EXP}} \right\} \times 100 \% \quad (7)$$

ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ($\bar{e}$) ของสมการ 4 ถึง 7 คำนวณจากสมการ

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_1^n e \quad (8)$$

โดย n คือ จำนวนข้อมูล (ในการทดสอบนี้คือ 8)

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ FEA ในแกน X ให้ความคลาดเคลื่อนของค่า K และ Δ_0 ที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแกน Z เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนตามตารางที่ 6 ความคลาดเคลื่อนในแกน X สูงมาก สาเหตุเนื่องจากระยะยึดอยู่ในช่วงน้อยมาก (ต่ำกว่า 1.50 มิลลิเมตร) ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดรวมถึงตำแหน่งและวิธีการ เป็นปัจจัยให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ในการนี้จึงไม่สามารถนำมาใช้อ้างอิงได้ เมื่อพิจารณาผลของแกน Z ในตารางที่ 6 ทั้งผลการวิเคราะห์ FEA แบบตามแกน และแบบ Total Translation ให้ค่าเท่ากัน ส่วนในแกน X ผลแบบ Total Translation ให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าผลแบบตามแกน ข้อมูลดังกล่าวเป็นผลสรุปยืนยันความเหมาะสมในการใช้ระยะยึดจากผลการวิเคราะห์แบบ Total Translation

เนื่องจากค่าความเค้น (Stress) ไม่สามารถวัดได้จริงในการทดลอง ดังนั้นจากผลสรุปที่ได้ในตารางที่ 6 ของความแม่นยำของแบบจำลอง FEM ที่ใช้ รวมถึงค่าคงที่ของวัสดุและวิธีการประมวลผลของโปรแกรม FEA ที่ใช้ (ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 12.19 %) สามารถนำผลของค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ใช้ประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณของค่าความเค้นเนื่องจากเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะยึด โดยมีค่า Young's Modulus และความยาวเป็นตัวแปร

ค่าเฉลี่ยความหนาของผนังขวดทดสอบ ก ที่ระดับความสูงต่ำกว่า 70 % มีความหนาบางกว่าค่าความหนาคงที่ใช้ในการคำนวณ FEA ซึ่งแสดงถึงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงมีค่าสูงกว่าที่คำนวณได้ในภาพที่ 68 และภาพที่ 69 โดยตำแหน่งที่บางที่สุดอยู่ที่ระดับความสูง 10 % ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาคงที่ใช้ใน FEA อยู่ถึง 13 %

ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ขวดทดสอบ ก อยู่ที่บริเวณก้นขวด (แถบสีส้มในภาพที่ 68) ค่าความเค้นที่ได้นี้ จะยังไม่สามารถนำไปใช้กำหนดความหนาของขวดได้ เนื่องจากขวดอาจแตกได้ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบอื่นๆ ซึ่งต้องนำค่าความเค้นของการวิเคราะห์ จากการทดสอบหนึ่งใดๆ ใน 3 การทดสอบที่มีค่าสูงสุด สำหรับใช้กำหนดขนาดความหนาของขวด

6. ผลการวิเคราะห์ทาง FEA ของการทดสอบแรงดันของขวดทดสอบ ข

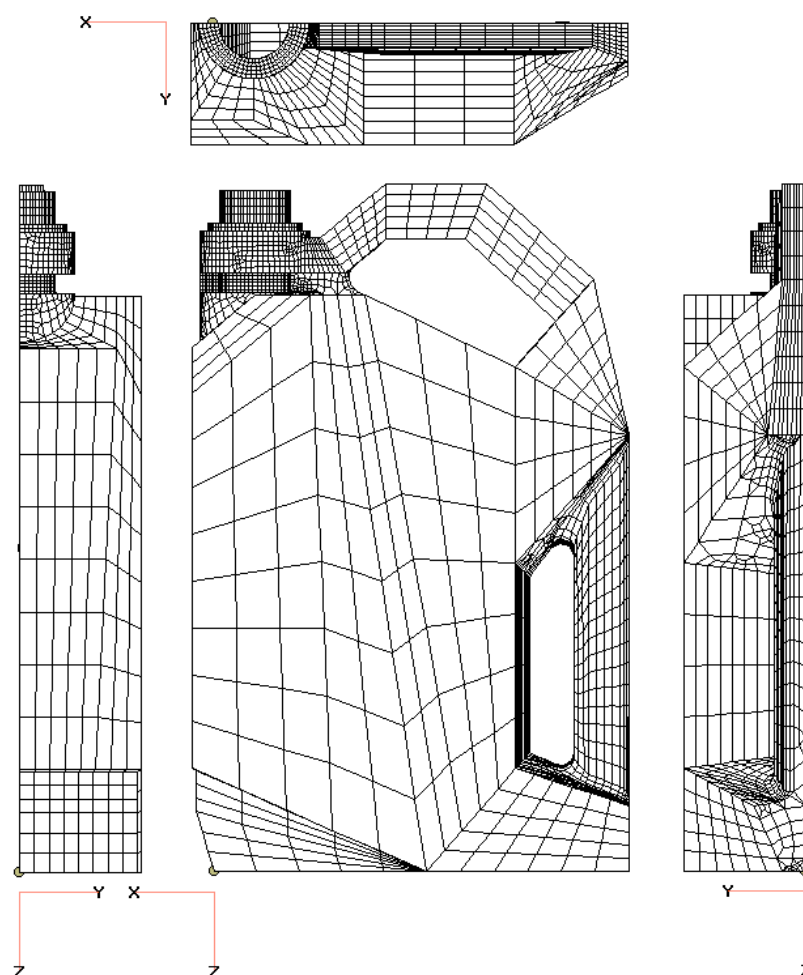
ขวดทดสอบ ข ซึ่งเป็นขวดน้ำมันเครื่องแบบมีหัวด้านบนและด้านข้างขนาด 5.0 ลิตร ใช้แบบจำลอง FEM แบบครึ่งขวดซึ่งประมาณจากรูปทรงจริงโดยไม่ทำรายละเอียดของขอบมนโค้งขนาดเล็กๆ มาจำลอง การแบ่งชิ้นประกอบของแบบจำลอง FEM ได้แสดงในภาพที่ 70 ซึ่งประกอบด้วย 3,500 โหนด และ 3,432 ชิ้นประกอบ ผสมเอลิเมนต์ทั้งแบบรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) โดยมีจำนวนเพียง 2 % ที่เป็นรูปสามเหลี่ยม ทั้งสองเอลิเมนต์เป็นแบบแผ่นผนังบาง (Plate) และคุณสมบัติของวัสดุ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้น ความหนาของชิ้นประกอบสำหรับการวิเคราะห์มี 4 ค่าความหนา คือ 1.3368, 1.3897, 1.4355 และ 1.4815 มิลลิเมตร หรือเมื่อน้ำหนักขวดเป็น 300, 310, 320 และ 330 กรัม ตามลำดับ

6.1 ผลการวิเคราะห์ระยะโป่งตัวของขวดทดสอบ ข

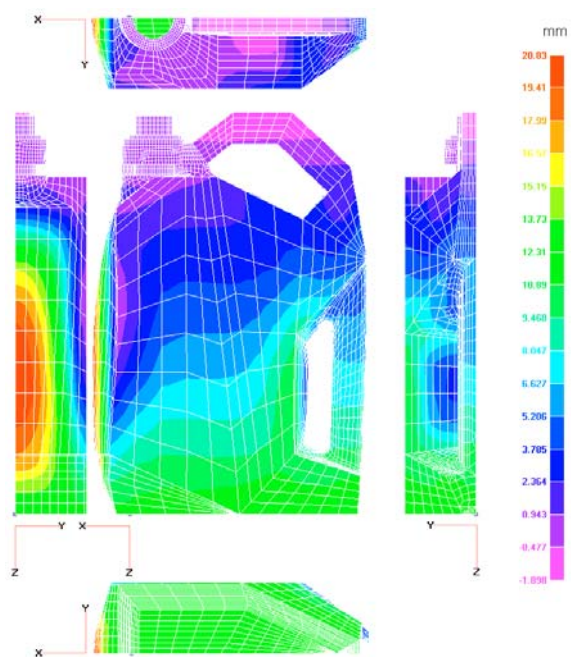
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปทรง ภายใต้การทดสอบแรงดันเมื่อมีแรงดันภายในมีค่า 20 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม ผลการวิเคราะห์ได้แสดงเป็นระดับชั้นสีของการโป่งตัว หรือระยะยืดในแกน X, Y และ Z ในภาพที่ 71, 72 และ 73 ตามลำดับ ภาพที่ 74 แสดงระดับชั้นสีของระยะยืดของการโป่งตัวของขวดแบบ Total Translation ($[X^2+Y^2+Z^2]^{1/2}$) การโป่งตัวของขวดที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระดับสปีนระนาบ XZ ของแบบ Total Translation จากภาพที่ 74 และระยะยืดในแกน X จากภาพที่ 71 จะมีบริเวณระดับชั้นสีของความเค้นที่คล้ายกัน

ผลในทำนองเดียวกันปรากฏขึ้นบนระนาบ XZ ของภาพที่ 72 เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 74 และที่บนระนาบ XY ของภาพที่ 73 เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 74

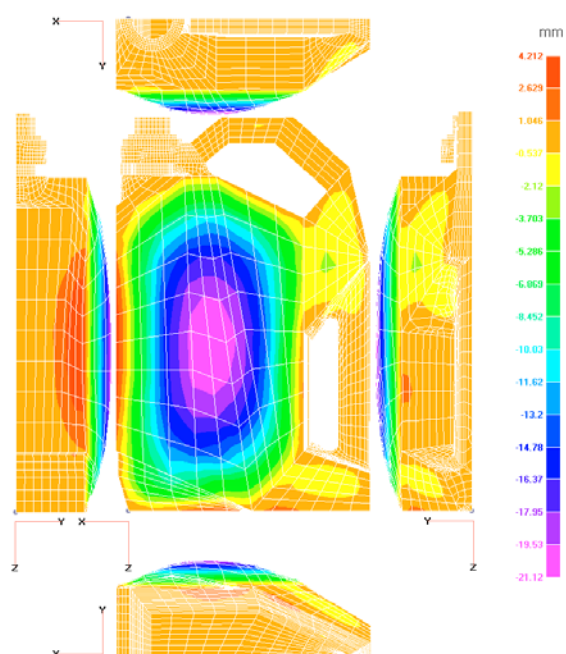
ภาพที่ 75 แสดงกราฟของผลการคำนวณที่ได้จาก FEA ของระยะโพงตัวสูงสุดของขวดทดสอบ ข เปรียบเทียบตามขนาดน้ำหนักของขวด 4 ขนาดที่น้ำหนัก 300, 310, 320 และ 330 กรัม ตามแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ภาพที่ 76 ถึง 79 เป็นกราฟเปรียบเทียบระยะการโพงสูงสุดที่ได้จาก FEA แบบตามแกน (ภาพที่ 75) และแบบ Total Translation เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกลในแกน X, Y และ Z (จากภาพที่ 21 ถึง 23) ของขวดทดสอบ ข ขนาดน้ำหนัก 300, 310, 320 และ 330 กรัม ตามลำดับ



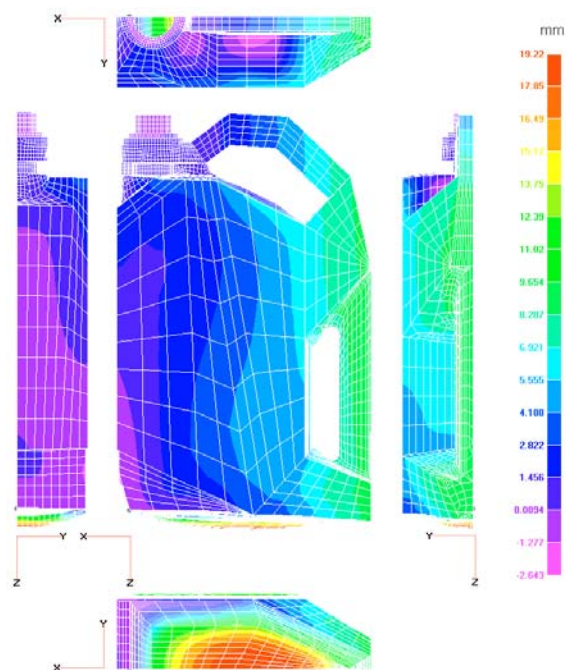
ภาพที่ 70 ลักษณะการแบ่งชั้นประกอบของขวดทดสอบ ข (ขนาด 5.0 ลิตร)



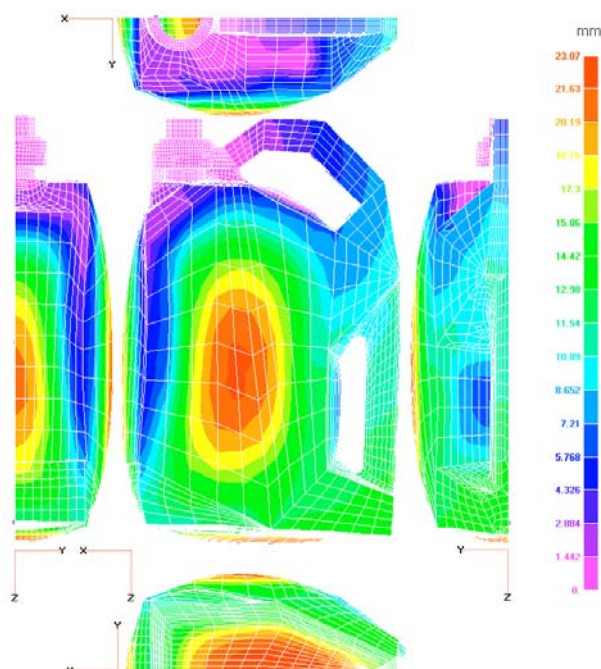
ภาพที่ 71 การโป่งตัวในแกน X ของขวดทดสอบ ข หนา 1.48 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 330 กรัม) ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



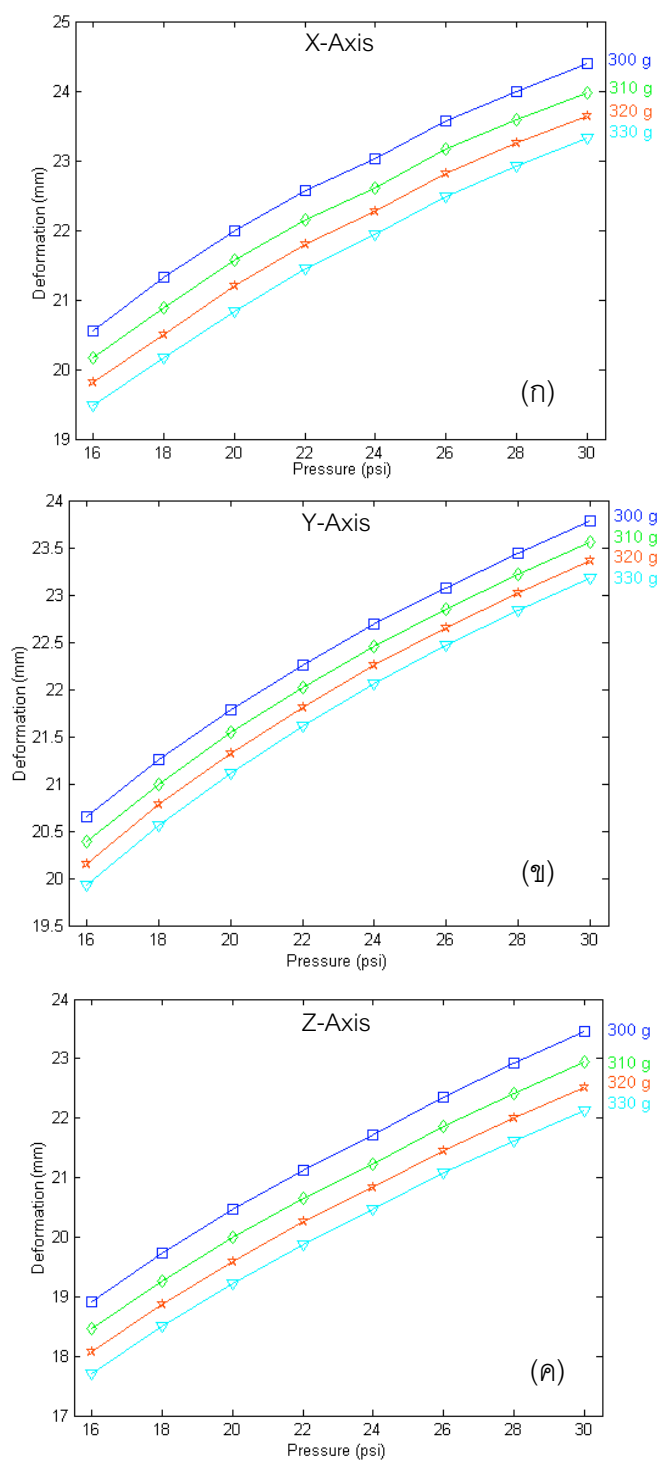
ภาพที่ 72 การโป่งตัวในแกน Y ของขวดทดสอบ ข หนา 1.48 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 330 กรัม) ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



ภาพที่ 73 การโป่งตัวในแกน Z ของขวดทดสอบ ข หนา 1.48 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 330 กรัม) ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว

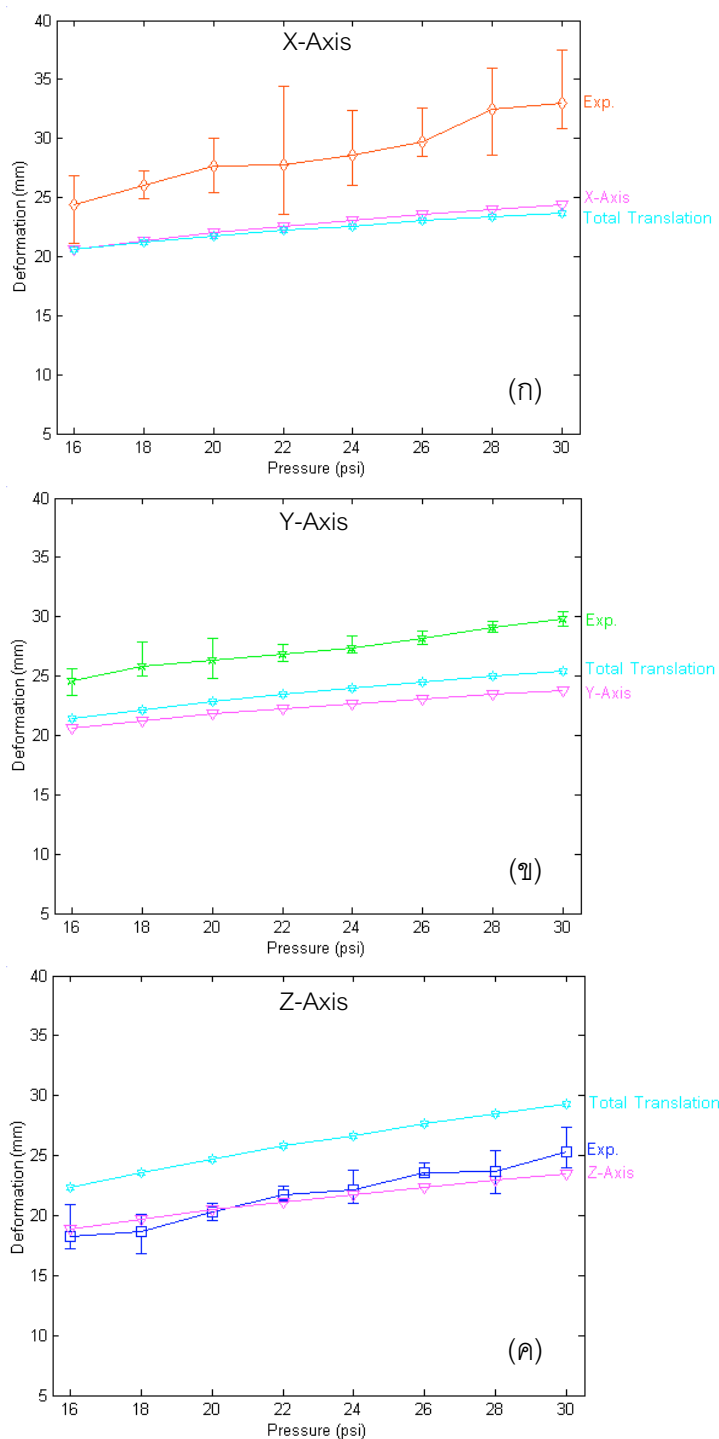


ภาพที่ 74 การโป่งตัวแบบ Total Translation ของขวดทดสอบ ข หนา 1.48 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 330 กรัม) ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



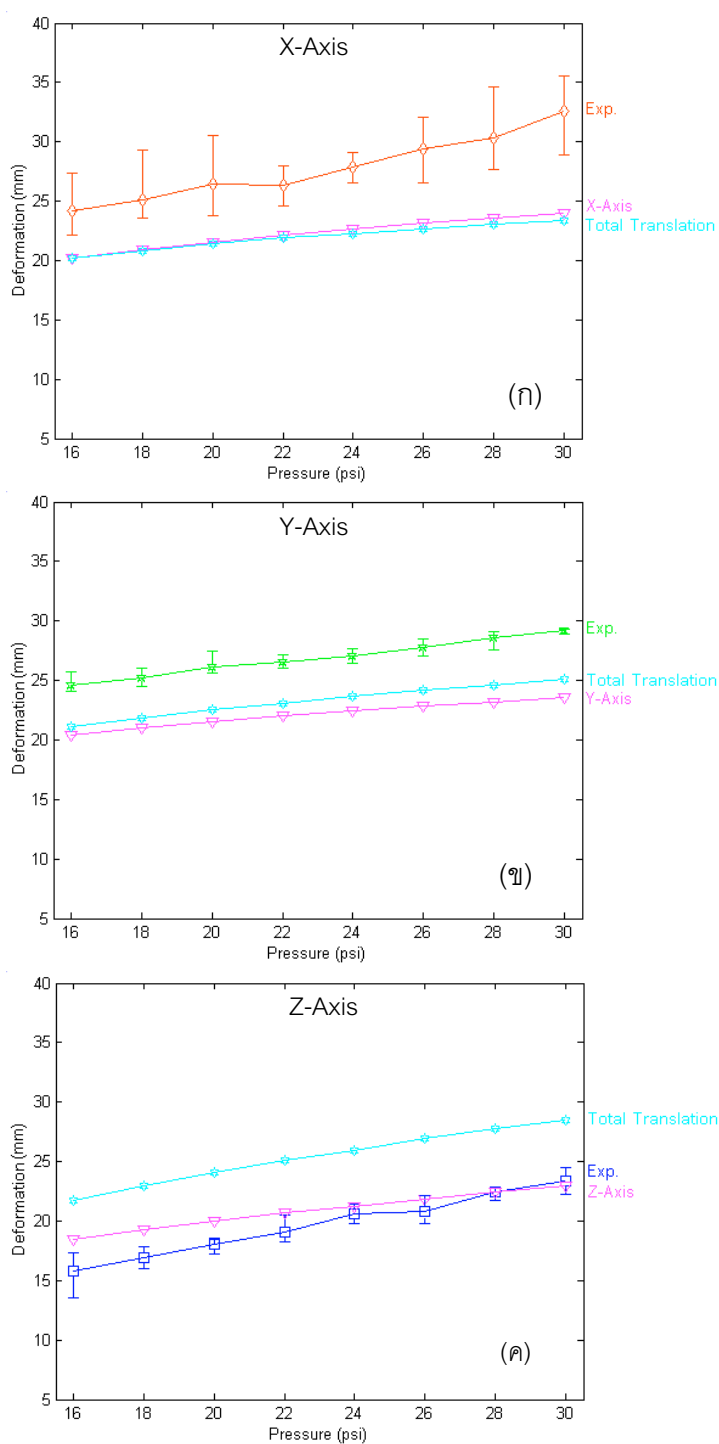
ภาพที่ 75 กราฟแสดงผลจาก FEA ของการโป่งตัวสูงสุด ตามแนวแกน X (ภาพ ก) แนวแกน Y (ภาพ ข) และแนวแกน Z (ภาพ ค) ของขวดทดสอบ ข ขนาด 5 ลิตร น้ำหนัก 300, 310, 320 และ 330 กรัม

ขวดทดสอบ ข 300 กรัม



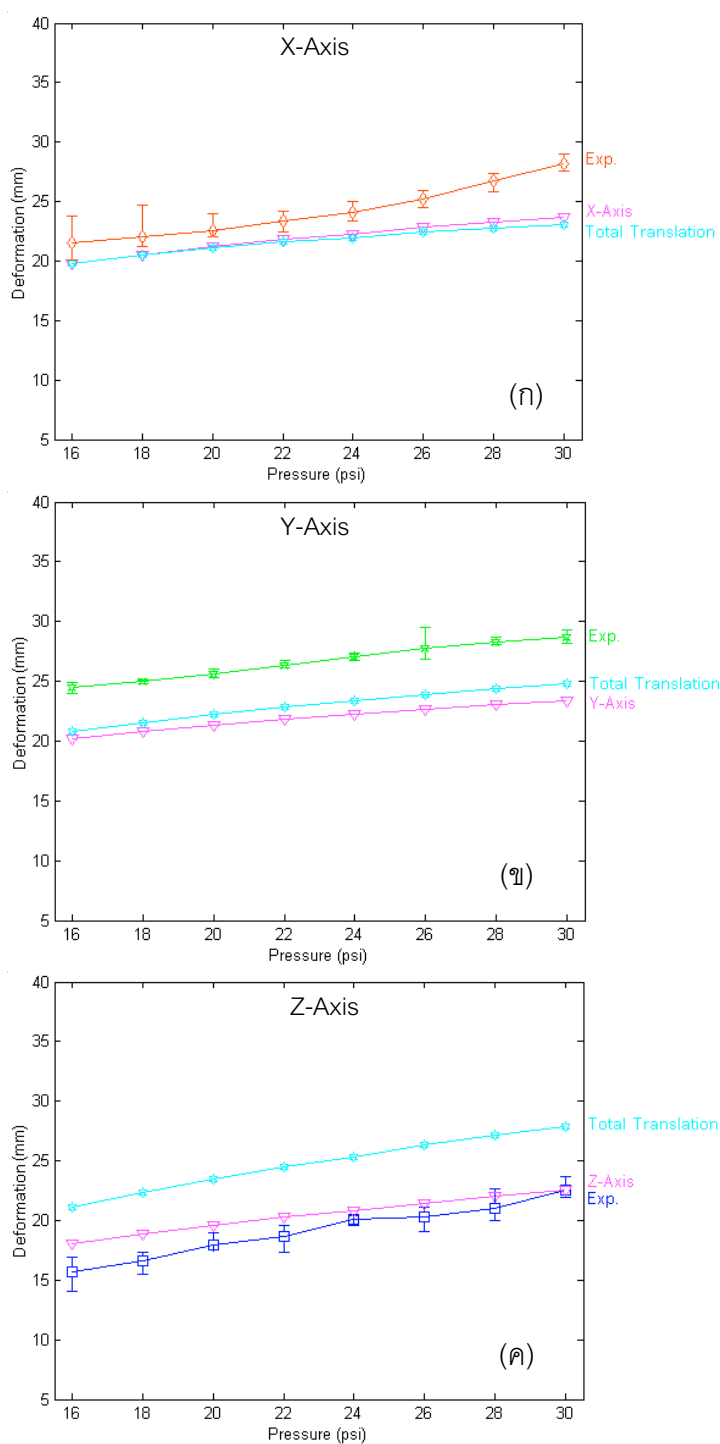
ภาพที่ 76 กราฟเปรียบเทียบระยะโป่งตัวสูงสุดของผลการทดสอบแรงดันระหว่างการทดสอบทาง
กล และจากการวิเคราะห์ FEA ของขวดทดสอบ ข น้ำหนัก 300 กรัม ในแกน X (ภาพ
ก) แกน Y (ภาพ ข) และแกน Z (ภาพ ค)

ขวดทดสอบ ข 310 กรัม



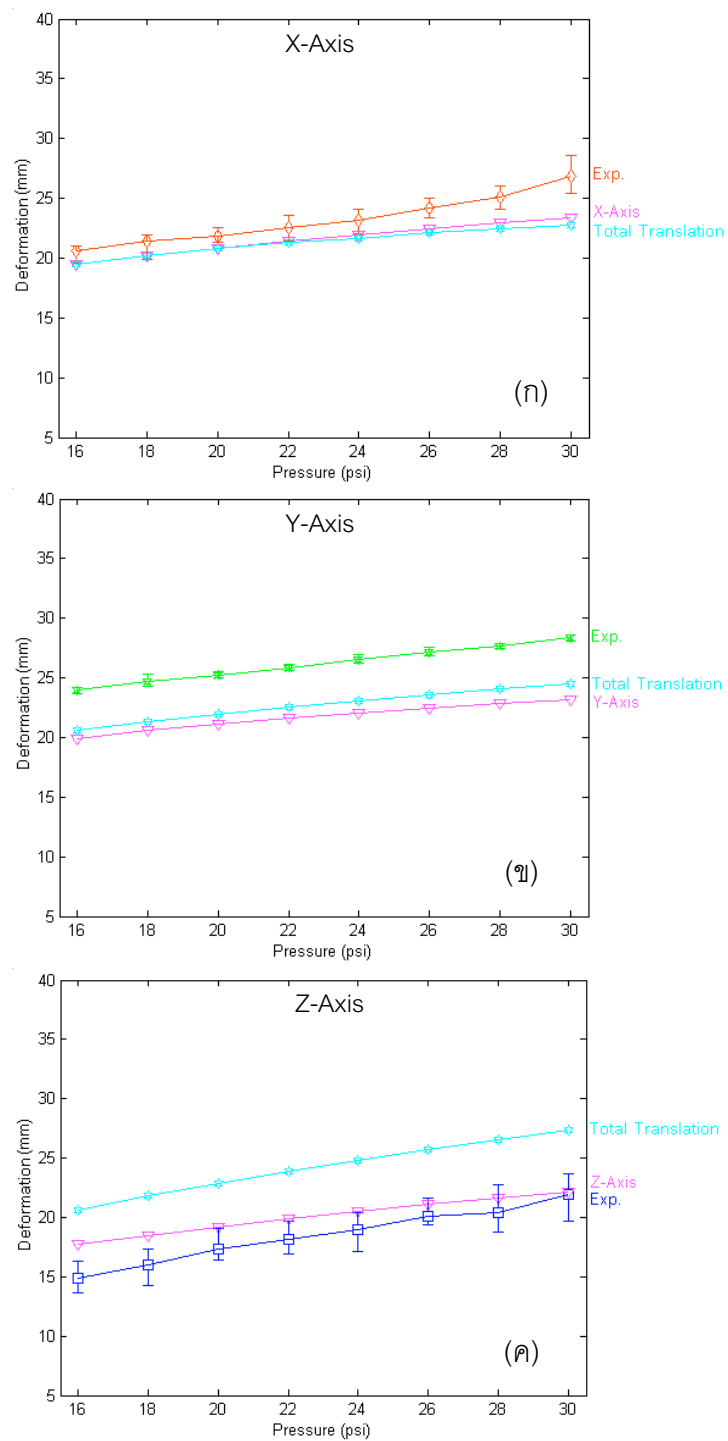
ภาพที่ 77 กราฟเปรียบเทียบระยะโป่งตัวสูงสุดของผลการทดสอบแรงดันระหว่างการทดสอบทาง
กล และจากการวิเคราะห์ FEA ของขวดทดสอบ ข น้ำหนัก 310 กรัม ในแกน X (ภาพ
ก) แกน Y (ภาพ ข) และแกน Z (ภาพ ค)

ขวดทดสอบ ข 320 กรัม



ภาพที่ 78 กราฟเปรียบเทียบระยะโป่งตัวสูงสุดของผลการทดสอบแรงดันระหว่างการทดสอบทาง
กล และจากการวิเคราะห์ FEA ของขวดทดสอบ ข น้ำหนัก 320 กรัม ในแกน X (ภาพ
ก) แกน Y (ภาพ ข) และแกน Z (ภาพ ค)

ขวดทดสอบ ข 330 กรัม



ภาพที่ 79 กราฟเปรียบเทียบระยะโป่งตัวสูงสุดของผลการทดสอบแรงดันระหว่างการทดสอบทาง
กล และจากการวิเคราะห์ FEA ของขวดทดสอบ ข น้ำหนัก 330 กรัม ในแกน X (ภาพ
ก) แกน Y (ภาพ ข) และแกน Z (ภาพ ค)

6.2 ความคลาดเคลื่อนจาก FEA ของขวดทดสอบ ข

ฟังก์ชันกราฟเส้นตรงของระยะยืด และแรงดันตามสมการเส้นตรง $\Delta = KP + \Delta_0$ ของผลการทดสอบทางกล และจาก FEA สามารถสรุปได้ในตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน ($\bar{e}$) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($\bar{e}_p$) จากค่าจริงที่บันทึกได้จากการทดสอบทางกล และจากสมการเส้นตรงของตารางที่ 7 ($\bar{e}_L$ และ $\bar{e}_{LP}$) ในช่วงแรงดัน 16 psi ถึง 30 psi (รวม 8 ค่า) สรุปได้ในตารางที่ 8 จากตารางนี้สามารถสรุปค่าเฉลี่ยของ $\bar{e}_{LP}$ จากขวดทั้ง 4 ขนาด ในแกน X, Y และ Z เท่ากับ 9.03 %, 12.28 % และ 17.68 % ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่าความชัน (K) ค่าจุดตัดบนแกน (Δ_0) และค่า SDE ของขวดทดสอบ ข

ขนาด (กรัม)	แกน	$\Delta = KP + \Delta_0$ (mm)	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
300	X	การทดสอบทางกล	0.5906	15.1218	0.6594
	X	FEA ตามแกน	0.2696	17.8147	0.1518
	Y	การทดสอบทางกล	0.3501	19.2128	0.2109
	Y	FEA ตามแกน	0.2211	18.6183	0.1194
	Z	การทดสอบทางกล	0.5080	10.0310	0.4028
	Z	FEA ตามแกน	0.3221	15.2663	0.1088
310	X	การทดสอบทางกล	0.567	14.7510	0.5895
	X	FEA ตามแกน	0.2704	17.4313	0.1476
	Y	การทดสอบทางกล	0.3245	19.4126	0.1293
	Y	FEA ตามแกน	0.2242	18.3597	0.1194
	Z	การทดสอบทางกล	0.5329	7.3462	0.2616
	Z	FEA ตามแกน	0.3179	14.9304	0.1148

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ขนาด (กรัม)	แกน	$\Delta = KP + \Delta_o$ (mm)	K (mm/psi)	Δ_o (mm)	SDE (mm)
320	X	การทดสอบทางกล	0.4710	13.3780	0.5294
	X	FEA ตามแกน	0.2722	17.0869	0.1424
	Y	การทดสอบทางกล	0.3161	19.3842	0.0961
	Y	FEA ตามแกน	0.2270	18.1372	0.1218
	Z	การทดสอบทางกล	0.4679	8.3288	0.3251
	Z	FEA ตามแกน	0.3153	14.6373	0.1196
330	X	การทดสอบทางกล	0.4158	13.6220	0.4204
	X	FEA ตามแกน	0.2737	16.7608	0.1315
	Y	การทดสอบทางกล	0.3120	19.0289	0.0618
	Y	FEA ตามแกน	0.2298	17.9151	0.1236
	Z	การทดสอบทางกล	0.4811	7.4028	0.2414
	Z	FEA ตามแกน	0.3138	14.3353	0.1203

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของผล FEA ในช่วง 16 psi ถึง 30 psi ของชุดทดสอบ ข

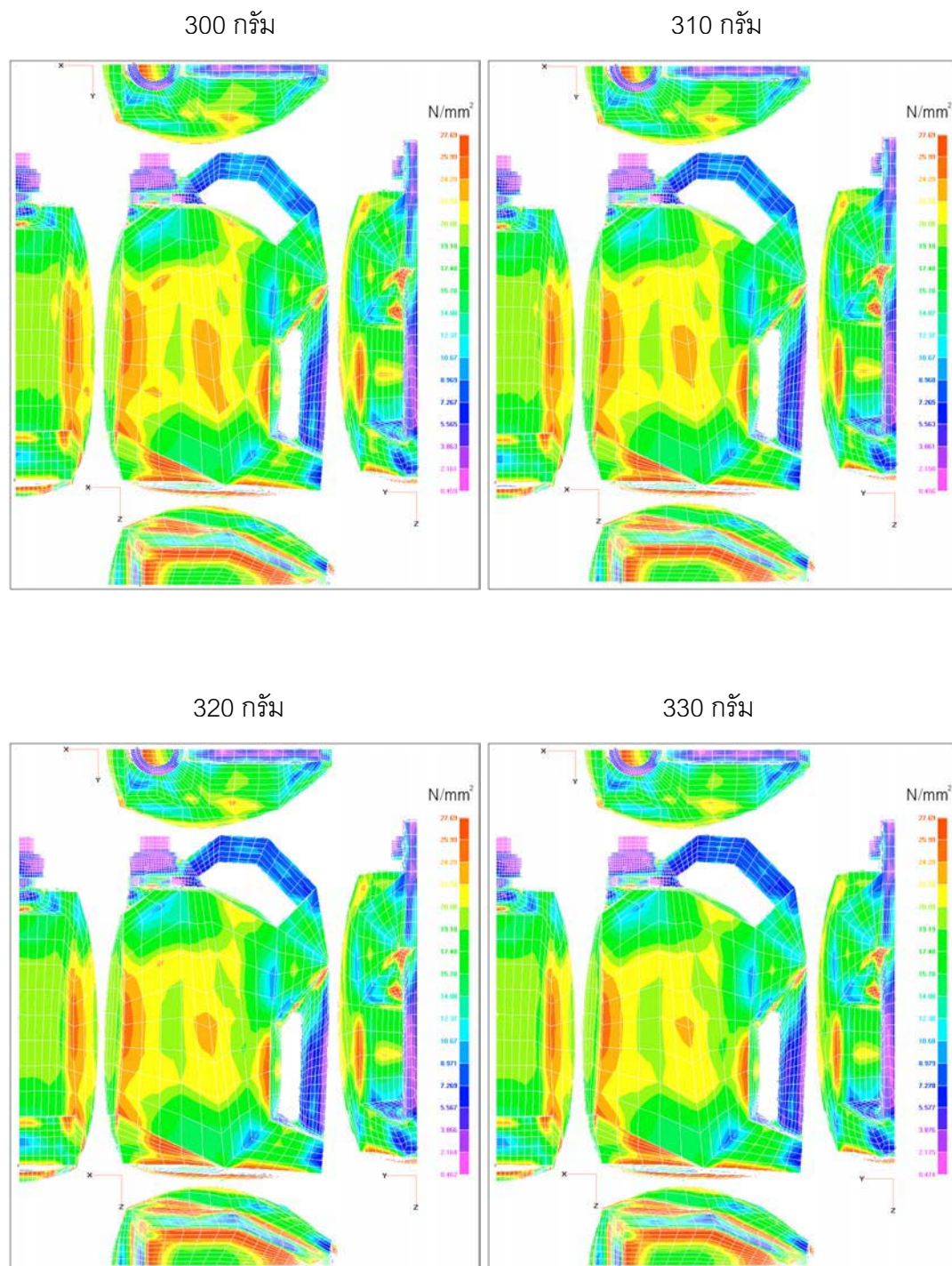
ขนาด (กรัม)	แกน	จากค่าจริง		จากตารางที่ 7	
		$\bar{e}$ (mm)	$\bar{e}_P$ (%)	$\bar{e}_L$ (mm)	$\bar{e}_{LP}$ (%)
300	X	4.6905	15.9745	4.6900	15.9700
	Y	3.5614	12.9767	3.5612	12.9750
	Z	4.2056	23.6084	4.2066	23.6243
310	X	4.1414	14.5567	4.1410	14.5579
	Y	3.3585	12.4395	3.3590	12.4403
	Z	2.6284	14.2914	2.6276	14.2957

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ขนาด (กรัม)	แกน	จากค่าจริง		จากตารางที่ 7	
		$\bar{e}$ (mm)	$\bar{e}_P$ (%)	$\bar{e}_L$ (mm)	$\bar{e}_{LP}$ (%)
320	X	0.8802	3.3117	0.8635	3.2436
	Y	3.2976	12.3243	3.2973	12.3218
	Z	2.8005	15.3063	2.7995	15.3097
330	X	0.5936	2.4453	0.5656	2.3440
	Y	2.9971	11.3963	2.9965	11.3928
	Z	3.0840	17.4692	3.0847	17.4841

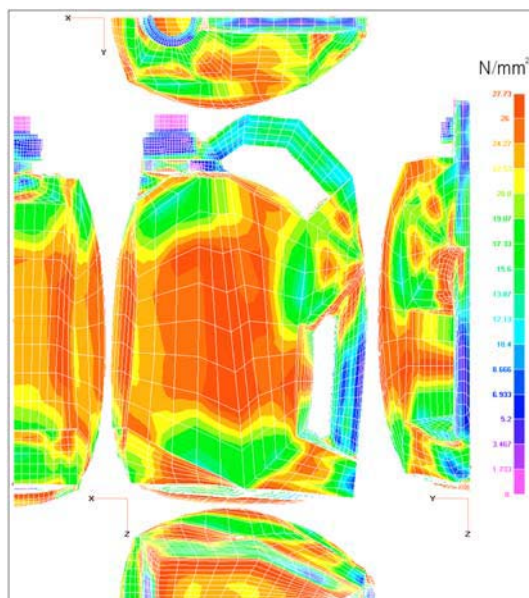
6.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของขวดทดสอบ ข

ผลการวิเคราะห์ FEA ของความเค้นที่บริเวณใดๆ ของผนังขวด ได้แสดงเป็นระดับชั้นสี เฉพาะที่แรงดัน 20 psi (ภาพที่ 80) และ 30 psi (ภาพที่ 81) ของขวดทดสอบ ข ทั้ง 4 ขนาดน้ำหนัก ความเค้นที่แรงดันต่ำจะมีตำแหน่งชั้นสีที่ไม่แตกต่างกันมากระหว่างขวดทั้ง 4 ขนาดโดยมีความเค้นสูงสุดอยู่บริเวณขอบและมุม ที่แรงดันสูงพบว่าสัดส่วนของพื้นที่ที่มีความเค้นสูงจะเพิ่มบริเวณมากขึ้น ความเค้นสูงที่แรงดันสูงนอกจากจะปรากฏที่ขอบและมุมแล้วยังเกิดที่บริเวณ กลางๆ ของผนังด้านขนานกับระนาบ XZ โดยกราฟของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณใดๆ ของขวดทดสอบทั้ง 4 ขนาด ที่แรงดันทดสอบ 16 ถึง 30 psi ได้แสดงในภาพที่ 82 กราฟของรูป ภาพนี้แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าความเค้นคลาก ($\sigma_y = 27.5 \text{ N/mm}^2$) ของ HDPE ทุกค่าแรงดันทดสอบ ตั้งแต่ค่าแรงดันทดสอบต่ำสุดที่ 16 psi โดยความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ 30 psi มีค่าน้อยกว่าความเค้นแตก ($\sigma_B = 34.3 \text{ N/mm}^2$)

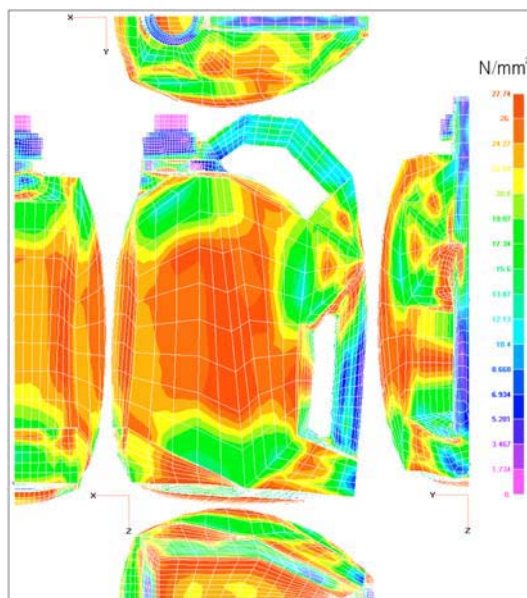


ภาพที่ 80 ความเค้นที่บริเวณต่างๆ ภายใต้แรงดัน 20 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม

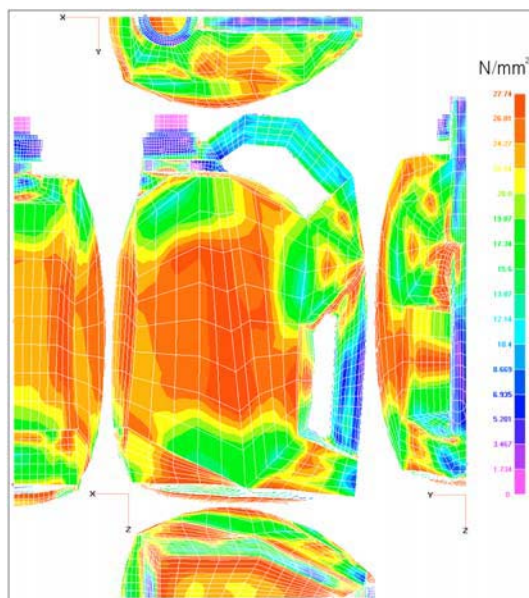
300 กรัม



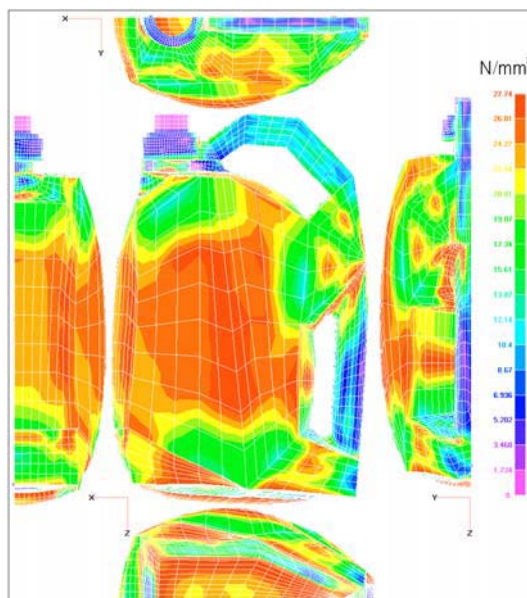
310 กรัม



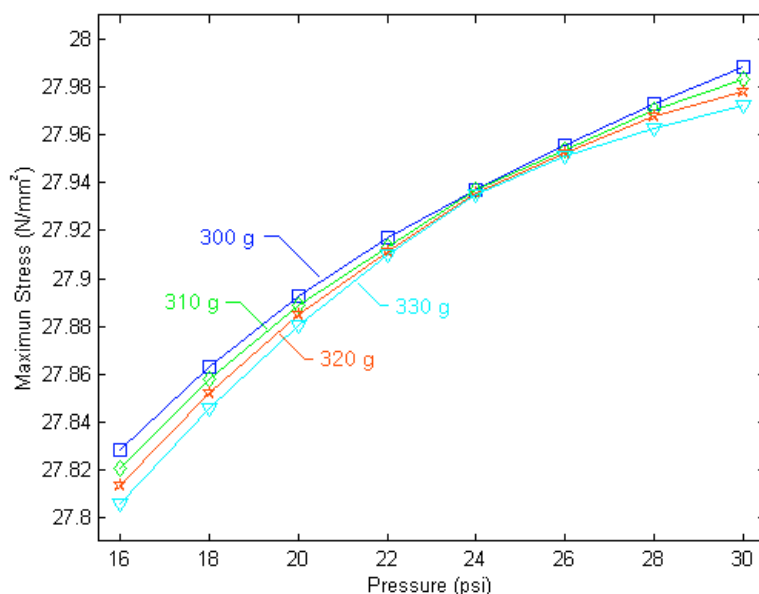
320 กรัม



330 กรัม



ภาพที่ 81 ความเค้นที่บริเวณต่างๆ ภายใต้แรงดัน 30 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม



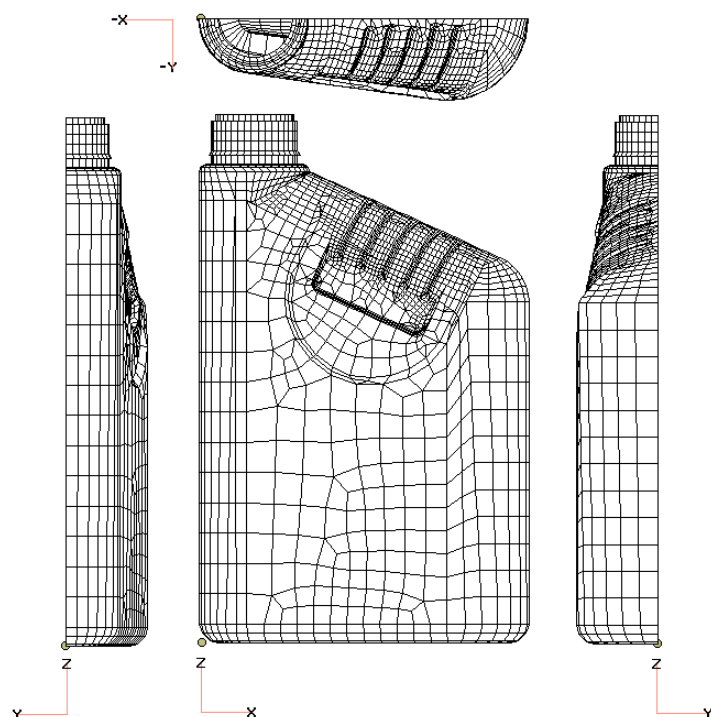
ภาพที่ 82 กราฟแสดงความเค้นสูงสุด ณ บริเวณใดๆ ของขวดทดสอบ ข ภายใต้แรงดัน 16 ถึง 30 psi

7. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบแรงดันของขวดทดสอบ ค

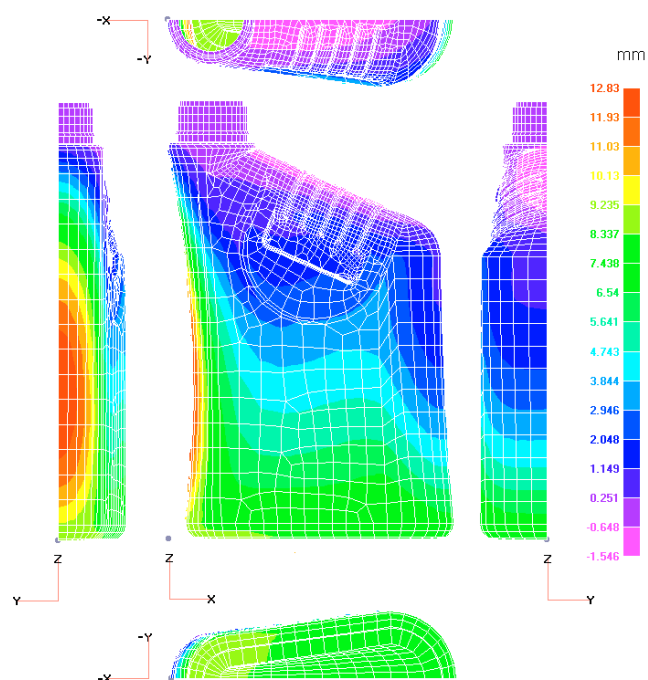
ขวดทดสอบ ค ซึ่งเป็นขวดน้ำมันเครื่องแบบมีลวดลายสำหรับมือจับขนาด 1.0 ลิตร น้ำหนัก 70.0 กรัม ใช้แบบจำลอง FEM แบบครึ่งใบโดยมีการแบ่งชิ้นส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 83 ซึ่งประกอบด้วย 1,997 โหนด และ 1,972 ชิ้นประกอบ โดย 99 % ของชิ้นประกอบเป็นแบบรูปสี่เหลี่ยม และที่เหลือเป็นแบบรูปสามเหลี่ยม คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นของ HDPE เช่นเดียวกับขวดทดสอบ ก และ ข ความหนาของชิ้นประกอบ คือ 0.9996 มิลลิเมตร ตลอดทั้งใบ

7.1 ผลการวิเคราะห์ระยะโป่งตัวของขวดทดสอบ ค

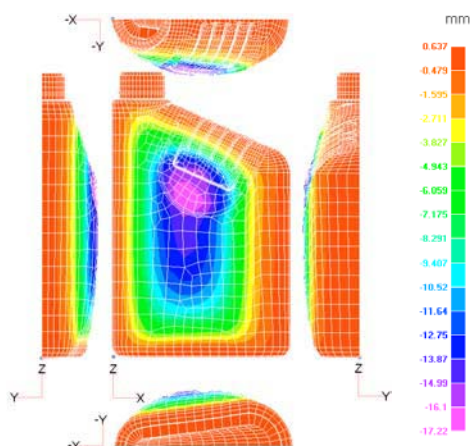
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ระยะโป่งตัวแบบตามแกน X, Y, Z และ แบบ Total Translation เป็นระดับชั้นสี่ภายใต้แรงดัน 20 psi ได้แสดงในภาพที่ 84 ถึง 87 ตามลำดับ ภาพที่ 88 เปรียบเทียบผลการทดสอบทางกล (จากภาพที่ 25) และจาก FEA ที่แรงดัน 16 psi ถึง 30 psi ของระยะโป่งตัวแบบตามแกน และแบบ Total Translation ในแนวแกน X, Y และ Z



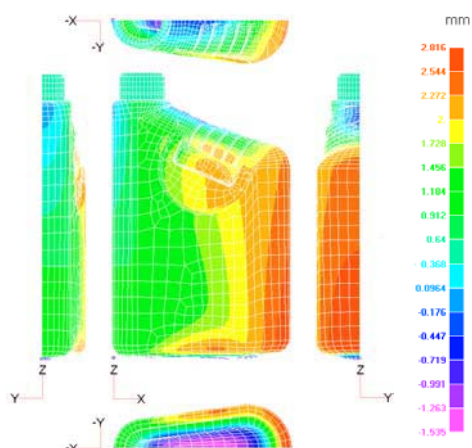
ภาพที่ 83 ลักษณะการแบ่งชิ้นประกอบครึ่งใบของขวดทดสอบ ค (ขนาด 1.0 ลิตร)



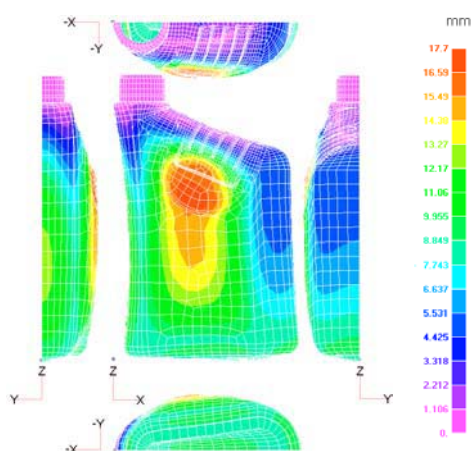
ภาพที่ 84 การโป่งตัวในแกน X ของขวดทดสอบ ค หนา 0.9996 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 70.0 กรัม)
ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



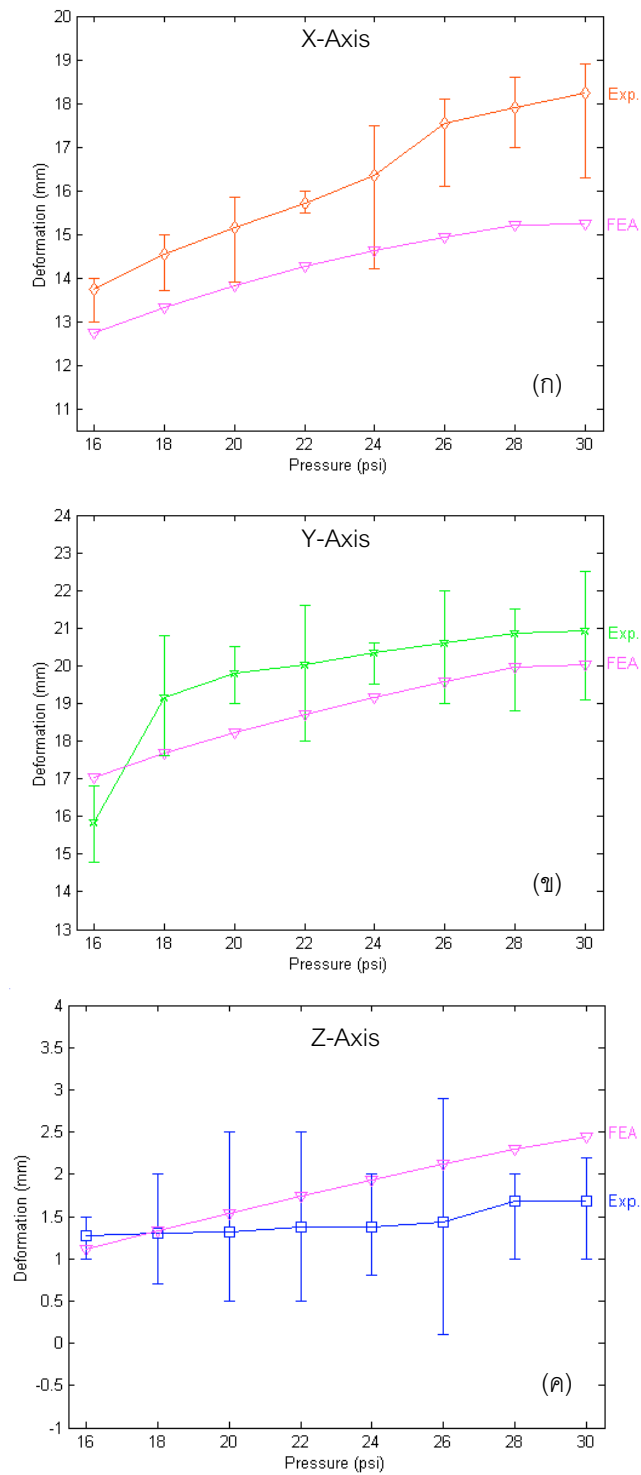
ภาพที่ 85 การโป่งตัวในแกน Y ของขวดทดสอบ ค หนา 0.9996 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 70.0 กรัม)
ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



ภาพที่ 86 การโป่งตัวในแกน Z ของขวดทดสอบ ค หนา 0.9996 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 70.0 กรัม)
ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



ภาพที่ 87 การโป่งตัวแบบ Total Translation ของขวดทดสอบ ค หนา 0.9996 มิลลิเมตร (น้ำหนัก 70.0 กรัม)
ภายใต้แรงดัน 20 ปอนด์/ตารางนิ้ว



ภาพที่ 88 กราฟเปรียบเทียบระยะโป่งตัวสูงสุดของผลการทดสอบแรงดันระหว่างการทดสอบทาง
 กล และจากการวิเคราะห์ FEA ของขวดทดสอบ ค น้ำหนัก 70 กรัม ในแกน X (ภาพ
 ก) แกน Y (ภาพ ข) และแกน Z (ภาพ ค)

7.2 ความคลาดเคลื่อนจาก FEA ของขวดทดสอบ ค

ฟังก์ชันกราฟเส้นตรงของระยะยืด และแรงดันตามสมการเส้นตรง $\Delta = KP + \Delta_o$ ของผลการทดสอบทางกล และจาก FEA สามารถสรุปได้ในตารางที่ 9

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน ($\bar{e}$) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ($\bar{e}_p$) จากค่าจริงที่บันทึกได้จากการทดสอบทางกล และจากสมการเส้นตรงของตารางที่ 9 ($\bar{e}_L$ และ $\bar{e}_{LP}$) ในช่วงแรงดัน 16 psi ถึง 30 psi (รวม 8 ค่า) สรุปได้ในตารางที่ 10 ความคลาดเคลื่อนในแกน Z สูงกว่าปกติเนื่องจากการยึดของกันขวดต่ำ และวัดให้เที่ยงตรงได้โดยยาก

ตารางที่ 9 ค่าความชัน (K) ค่าจุดตัดบนแกน (Δ_o) และค่า SDE ของขวดทดสอบ ค

แกน	$\Delta = KP + \Delta_o$ (mm)	K (mm/psi)	Δ_o (mm)	SDE (mm)
X	การทดสอบทางกล	0.3326	8.5249	0.2045
X	FEA ตามแกน	0.1768	10.1683	0.2033
Y	การทดสอบทางกล	0.2784	13.2982	1.0208
Y	FEA ตามแกน	0.2200	13.7367	0.1822
Z	การทดสอบทางกล	0.0313	0.7124	0.0722
Z	FEA ตามแกน	0.0961	-0.3988	0.0262

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของผล FEA ในช่วง 16 psi ถึง 30 psi ของขวดทดสอบ ค

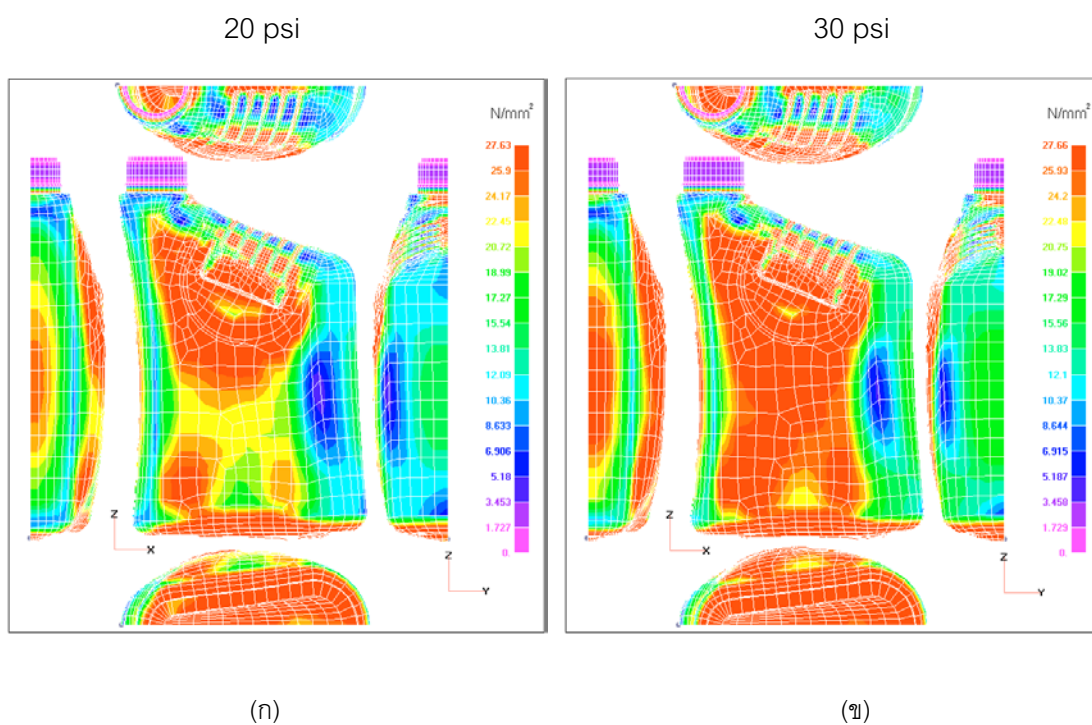
แกน	จากค่าจริง		จากตารางที่ 7	
	$\bar{e}$ (mm)	$\bar{e}_p$ (%)	$\bar{e}_L$ (mm)	$\bar{e}_{LP}$ (%)
X	1.8775	11.3169	1.9141	11.5191
Y	1.1998	6.1616	1.2537	6.4685
Z	0.4209	28.2380	0.4118	27.4985

7.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของขวดทดสอบ ค

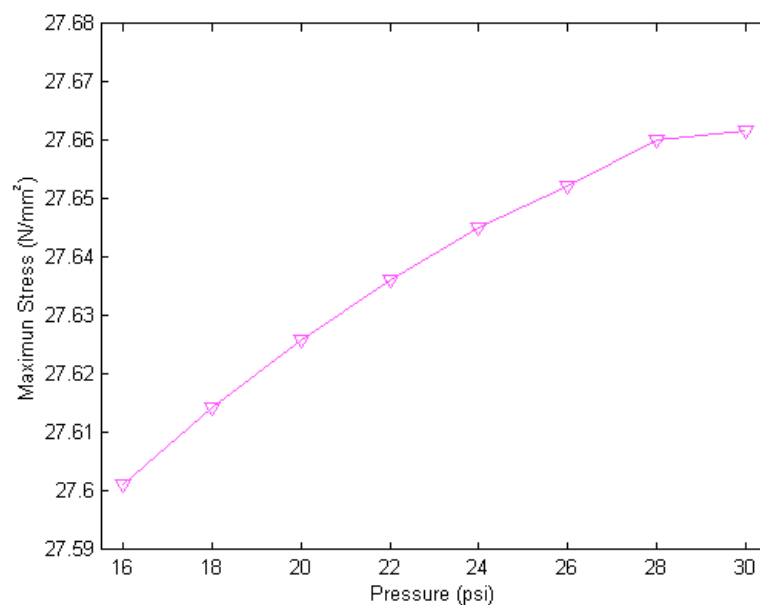
ผลการวิเคราะห์ FEA ของความเค้นที่บริเวณใดๆ ของผนังขวดทดสอบ ได้แสดงเป็นระดับชั้นสีที่แรงดันทดสอบที่ 20 psi (ภาพที่ 89ก) และ 30 psi (ภาพที่ 89ข) ในส่วนของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณใดๆ ของขวดทดสอบ ค ที่แรงดันทดสอบ 16 ถึง 30 psi ได้แสดงในภาพที่ 90 กราฟของภาพที่ 90 นี้ แสดงความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะอยู่ตามบริเวณขอบที่สัมผัสพื้นของก้นขวด และบริเวณมือจับ เมื่อแรงดันเพิ่มมากขึ้นสัดส่วนพื้นที่ที่มีความเค้นสูงสุดจะเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะผนังด้านระนาบ XZ และผนังแนวด้านกว้าง (ระนาบ YZ) ซีกด้านปากขวด นอกจากนี้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณใดๆ ของผนังขวดมีค่าสูงกว่าความเค้นคลากเช่นเดียวกับผลที่ได้ของขวดทดสอบ ก และ ข

8. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบภาระด้านบนของขวดทดสอบ ก

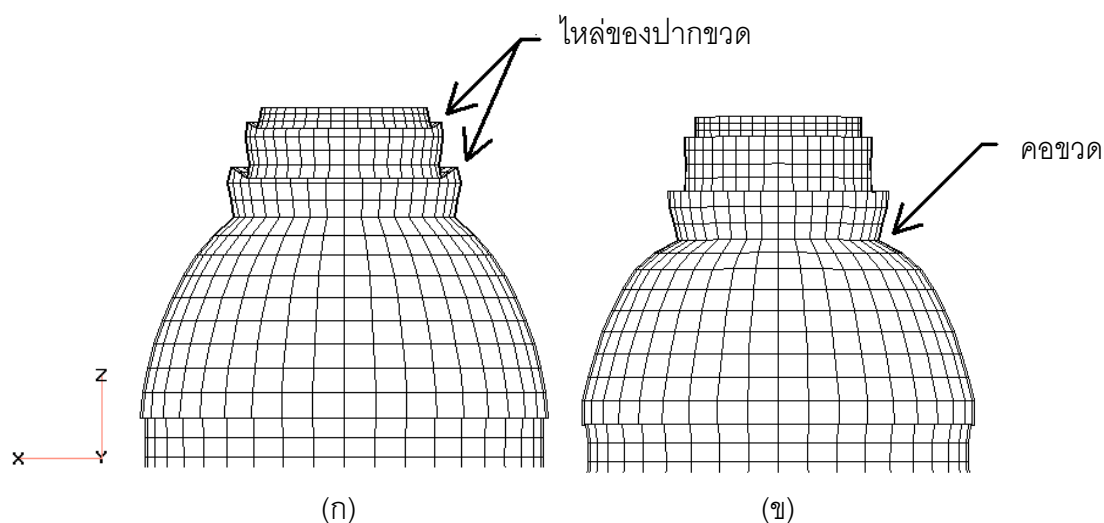
แบบจำลอง FEM แบบครึ่งใบของขวดทดสอบ ก ที่ใช้ในผลการทดลอง หัวข้อที่ 5 ได้นำมาใช้สำหรับจำลองการทดสอบภาระด้านบน โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ปากขวดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ทุกแกน (หรือให้เป็นแบบ Fix) และกำหนดภาระที่พื้นผิวของก้นขวดที่สัมผัสพื้น เนื่องจากในการทดสอบจริง เป็นการกดบนฝาปิดขวด (ภาพที่ 26) ดังนั้นจึงต้องจำลองเงื่อนไขขอบเขตทั้งบนขอบผิวด้านบนของขวดและบนไหล่ของปากขวดที่ผิวของขอบของฝาปิดขวดสัมผัส ภาพที่ 91 เปรียบเทียบการยุบตัวที่เกิดขึ้น โดยในภาพ ก เป็นกรณีที่กำหนดจุดตรงที่ขอบผิวด้านบนสุดเพียงบริเวณเดียว และภาพ ข ที่บริเวณขอบผิวด้านบนและที่ไหล่ของปากขวด โดยขยายขนาดของระยะยุบเป็น 2 เท่าของผลวิเคราะห์จริง ซึ่งจะเห็นว่าข้อกำหนดภาระในภาพที่ 91ก เกิดการยุบตัวที่ไหล่ทั้งสองของปากขวดซึ่งผิดไปจากการทดลองทางกล ซึ่งเกิดขึ้นที่คอขวดและที่ตัวขวดดังแสดงในภาพที่ 91ข เหตุผลที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระตรงข้ามกับการทดสอบทางกล เนื่องจากผิวที่ก้นขวดสัมผัสพื้นเกิดการเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลาง ทำให้เกิดลักษณะการม้วนตัวของผิวที่ก้นขวด ดังแสดงในภาพที่ 92 โดยมีจุดศูนย์กลางของก้นขวดลอยเหนือพื้น



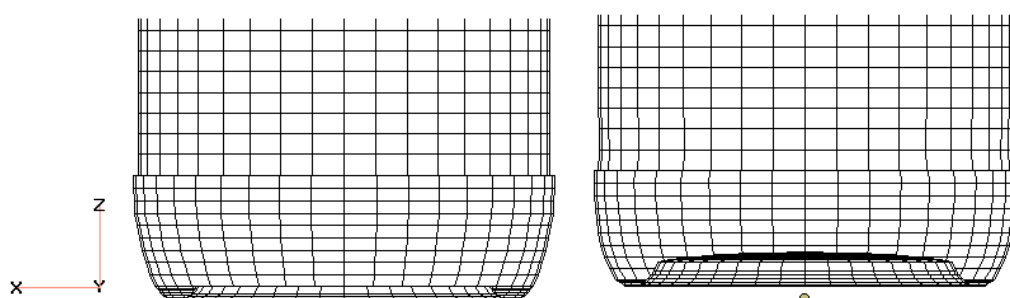
ภาพที่ 89 ผลการคำนวณความเค้น (Stress) จาก FEA แสดงเป็นระดับชั้นสีที่แรงดันภายใน
(ก) 20 psi และ (ข) 30 psi



ภาพที่ 90 กราฟแสดงความเค้นสูงสุด ณ บริเวณใดๆ ของขวดทดสอบ ค ภายใต้แรงดัน 16 ถึง
30 psi



ภาพที่ 91 เปรียบเทียบเป็นการยุบตัวของขวดทดสอบ ก เมื่อมีภาระที่ขอบผิวด้านบนเท่านั้น (ภาพ ก) และที่ขอบผิวด้านบนและไห่ขวด (ภาพ ข)



ภาพที่ 92 การม้วนตัวของผิวที่ก้นขวด

8.1 ผลการวิเคราะห์ระยะยุบตัวของขวดทดสอบ ก

การวิเคราะห์ FEA ของระยะยุบตัวจากการทดสอบภาระด้านบน ได้จำลองที่ภาระตั้งแต่ 5 psi (หรือเทียบเท่าภาระเป็นน้ำหนักเท่ากับ 10.96 กิโลกรัม) ถึง 17 psi (37.26 กิโลกรัม) และได้กำหนดคุณสมบัติของ HDPE เป็นแบบการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) และการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (Non-Linear ตามคุณสมบัติแสดงในภาพที่ 11) ภาพที่ 93 แสดงระยะยุบตัวในแกน Z เป็นระดับชั้นสีของทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นเฉพาะที่ภาระเท่ากับ 11 psi และ 15 psi ใน

ภาพนี้แสดงลักษณะของชั้นสีที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกัน โดยที่ภาวะสูงกว่าเกิดระยะยุบตัวที่ตำแหน่งต่างๆ มากกว่า

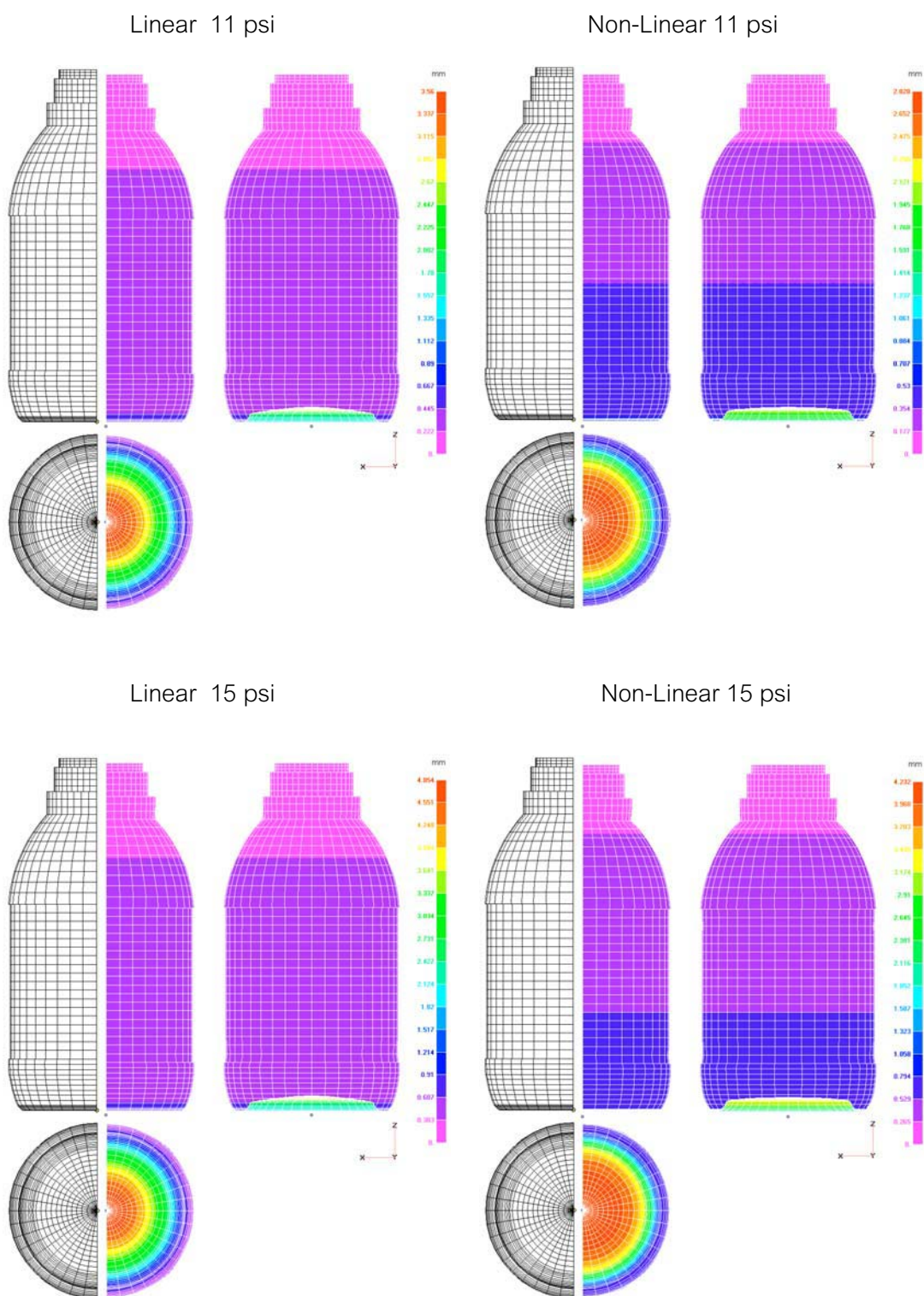
ผลการวิเคราะห์การยุบตัวของขอบของภาพที่ 93 บริเวณระดับชั้นสีที่เป็นสีน้ำเงินคือขนาดที่ยุบตัวจริง ในขณะที่สีส้มที่กั้นขอบมีระยะเปลี่ยนแปลงสูงที่สุดซึ่งแสดงการเกิดการม้วนตัวของผิวของกั้นขอบเข้าหาจุดศูนย์กลาง กราฟของระยะยุบตัวของปากขอบที่ภาวะตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi ของผลการทดสอบทางกล (ภาพที่ 26) และผลจาก FEA ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ได้แสดงในภาพที่ 94

กราฟของภาพที่ 94 ที่แรงดัน 11 psi (ค่าทดสอบมาตรฐาน) แสดงระยะยุบตัวจากการทดสอบทางกลเท่ากับ 2.14 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดในมาตรฐานการทดสอบ ในขณะที่ผล FEA แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นให้ค่าระยะยุบตัวเท่ากับ 1.29 มิลลิเมตร และ 1.49 มิลลิเมตร ตามลำดับ

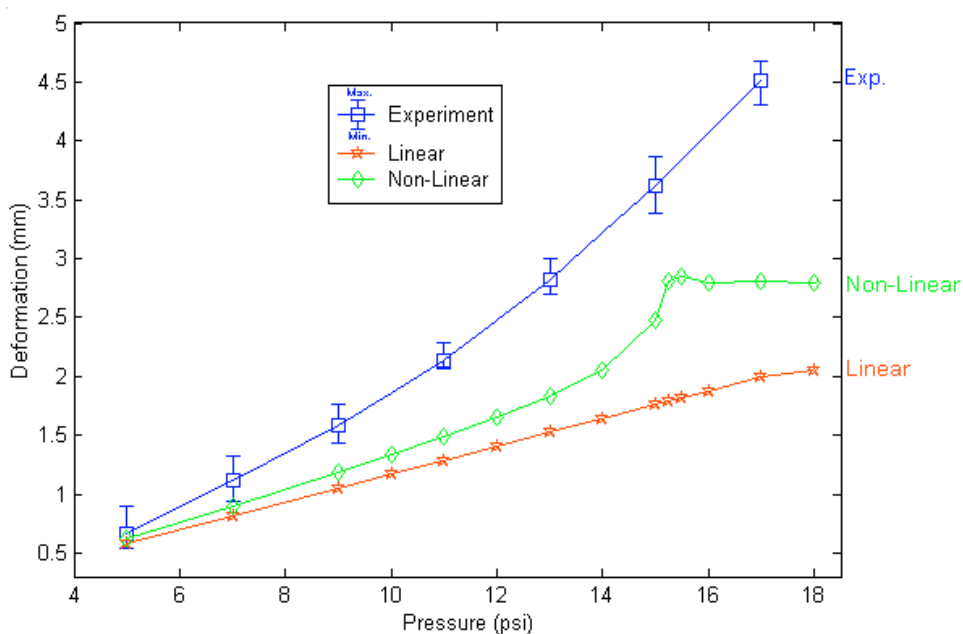
8.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของขอบทดสอบ ก

การวิเคราะห์ FEA ของค่าความเค้นจากการทดสอบภา然大ันบนในช่วงภาวะตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi โดยกำหนดให้คุณสมบัติของ HDPE เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยภาพที่ 95 แสดงค่าความเค้นที่บริเวณใดๆ ของขอบเป็นระดับชั้นสีเฉพาะที่ภาวะ 11 psi และ 15 psi

กราฟของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณใดๆ ที่ภาวะตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi จากผลการวิเคราะห์ FEA ของแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้แสดงในภาพที่ 96 โดยกราฟของการวิเคราะห์ FEA แบบไม่เชิงเส้นแสดงความไม่ต่อเนื่องเมื่อความเค้นถึงระดับของความเค้นคลากของวัสดุ



ภาพที่ 93 ระยะยุบตัวในแกน Z ของขวดทดสอบ ก ที่ภาระ 11 psi และ 15 psi ของแบบจำลองแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Non-Linear)

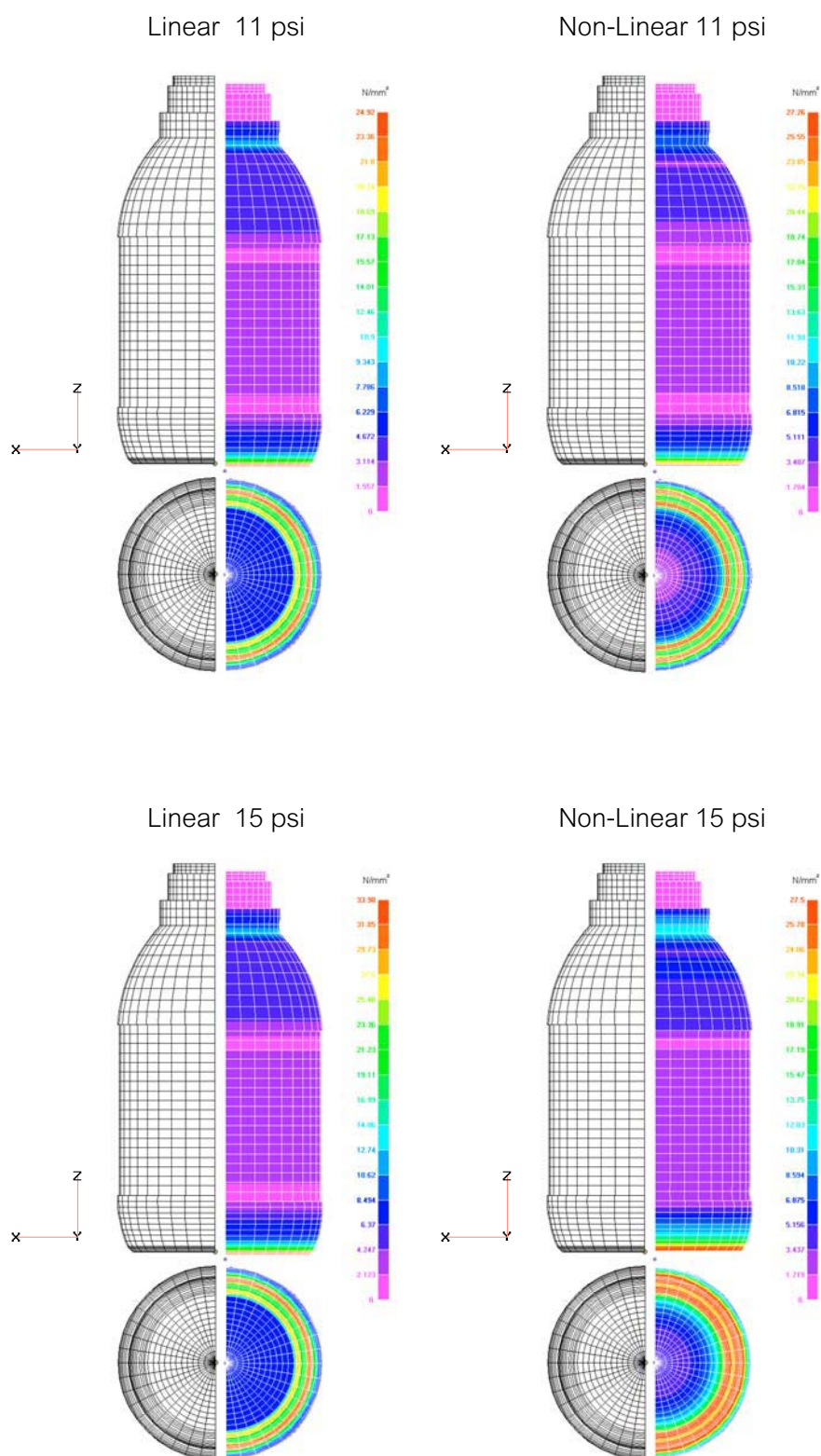


ภาพที่ 94 เปรียบเทียบระยะยุบของปากขวดของขวดทดสอบ ก ระหว่างผลการทดสอบทางกล และผล FEA ที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) และแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear)

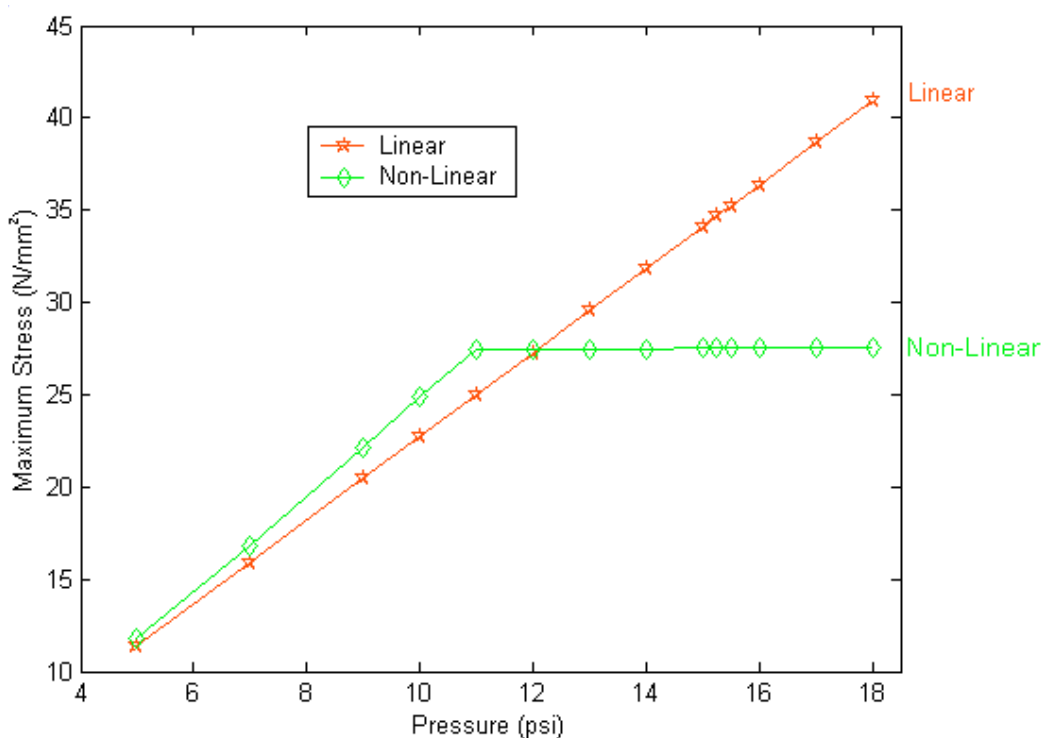
8.3 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ภาระด้านบนของขวดทดสอบ ก

จากภาพที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระที่กระทำที่ปากขวดจาก 5 psi ถึง 17 psi ของการทดสอบทางกลเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงภาระต่ำที่ 5 psi ถึง 9 psi และ เป็นแบบไม่เชิงเส้นในช่วง 9 psi ถึง 17 psi ในขณะที่แบบจำลองที่ให้ HDPE มีคุณสมบัติเชิงเส้น มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตลอดจาก 5 psi ถึง 18 psi และใช้เวลาในการประมวลผลสั้นกว่าส่วนผลจากแบบจำลองที่ให้ HDPE มีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นมีความสัมพันธ์ ของระยะยุบตัวเทียบกับภาระ แยกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ก. แบบเชิงเส้นในช่วง 5 psi ถึง 11 psi
- ข. แบบไม่เชิงเส้นในช่วง 11 psi ถึง 15 psi
- ค. แบบคงที่เมื่อภาระมากกว่า 15 psi



ภาพที่ 95 ค่าความเค้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi (24.11 kg) และ 15 psi (32.87 kg) ของขวดทดสอบ ก



ภาพที่ 96 เปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดของขวดทดสอบ ก ระหว่างผลวิเคราะห์ FEA ที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Non-Linear)

ตารางที่ 11 แสดงผลเปรียบเทียบในช่วงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระในช่วงเชิงเส้นในรูปสมการเส้นตรง $\Delta = KP + \Delta_0$ จาก 5 psi ถึง 11 psi

ตารางที่ 12 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์จาก FEA เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล จากข้อมูลของภาพที่ 94 ในช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (ที่ภาระจาก 5 psi ถึง 11 psi) และจากสมการเส้นตรงตามตารางที่ 11 ตารางที่ 13 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (11 psi ถึง 17 psi)

จากตารางที่ 12 และ 13 แสดงการกำหนดให้วัสดุ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าเมื่อให้ HDPE เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่ภาระหรือโหลดต่ำมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่โหลดสูง

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้นของระยะยุบในช่วง 5 psi ถึง 11 psi ของขวดทดสอบ ก

$\Delta = KP + \Delta_0$	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
การทดสอบทางกล	0.2444	-0.5792	3.7717
แบบ HDPE เชิงเส้น	0.1172	-9.66×10^{-5}	4.4897
แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.1478	-0.1472	4.3254

ตารางที่ 12 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ของขวดทดสอบ ก

ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน							
	แบบ HDPE เชิงเส้น				แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น			
	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)
5	0.07	0.07	11.21	11.23	0.04	0.07	5.91	10.33
7	0.30	0.30	27.05	27.02	0.23	0.24	20.55	21.05
9	0.53	0.53	33.41	33.42	0.40	0.40	25.32	25.32
11	0.85	0.85	39.65	39.65	0.65	0.66	30.20	30.78
เฉลี่ย	0.44	0.44	27.83	27.83	0.33	0.34	20.49	21.87

ค่าความเค้นตามภาพที่ 96 แสดงขดเริ่มเปลี่ยนพฤติกรรมจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi (24.11 kg) ซึ่งมีค่าความเค้นเท่ากับค่าความเค้นคลาก (Yield Stress) ที่ 27.47 N/mm^2 ตามกำหนดในภาพที่ 11 ความเค้นสูงสุดของขดทดสอบ ก ภายใต้การทดสอบภาระด้านบน ปรากฏที่ขอบผิวที่กั้นขดที่สัมผัสกับพื้น (ภาพที่ 95) เนื่องจากความหนาของผนังขดไม่เท่ากันตลอดทั่วทั้งใบ (ภาพที่ 50) โดยที่กั้นขดเป็น 5% บางกว่า และที่ปากขดเป็น 80% หนากว่า ดังนั้นความเค้นสูงสุดที่พื้นผิวของขอบของกั้นขดจะต่ำกว่าความเป็นจริง และที่ปากขดจะสูงกว่าความเป็นจริง ช่วงความเค้นที่มากกว่าความเค้นคลาก ความเค้นที่เกิดขึ้นยังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างน้อยๆ กับการเปลี่ยนแปลงของภาระที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 13 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ของขดทดสอบ ก

ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
	แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
	e (mm)	e_p (%)	e (mm)	e_p (%)
11	0.85	39.65	0.65	30.20
13	1.30	45.96	0.99	35.04
15	1.86	51.44	1.14	31.41
17	2.52	55.89	1.71	37.78
เฉลี่ย	1.63	48.23	1.12	33.60

9. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบภาระด้านบนของขวดทดสอบ ข

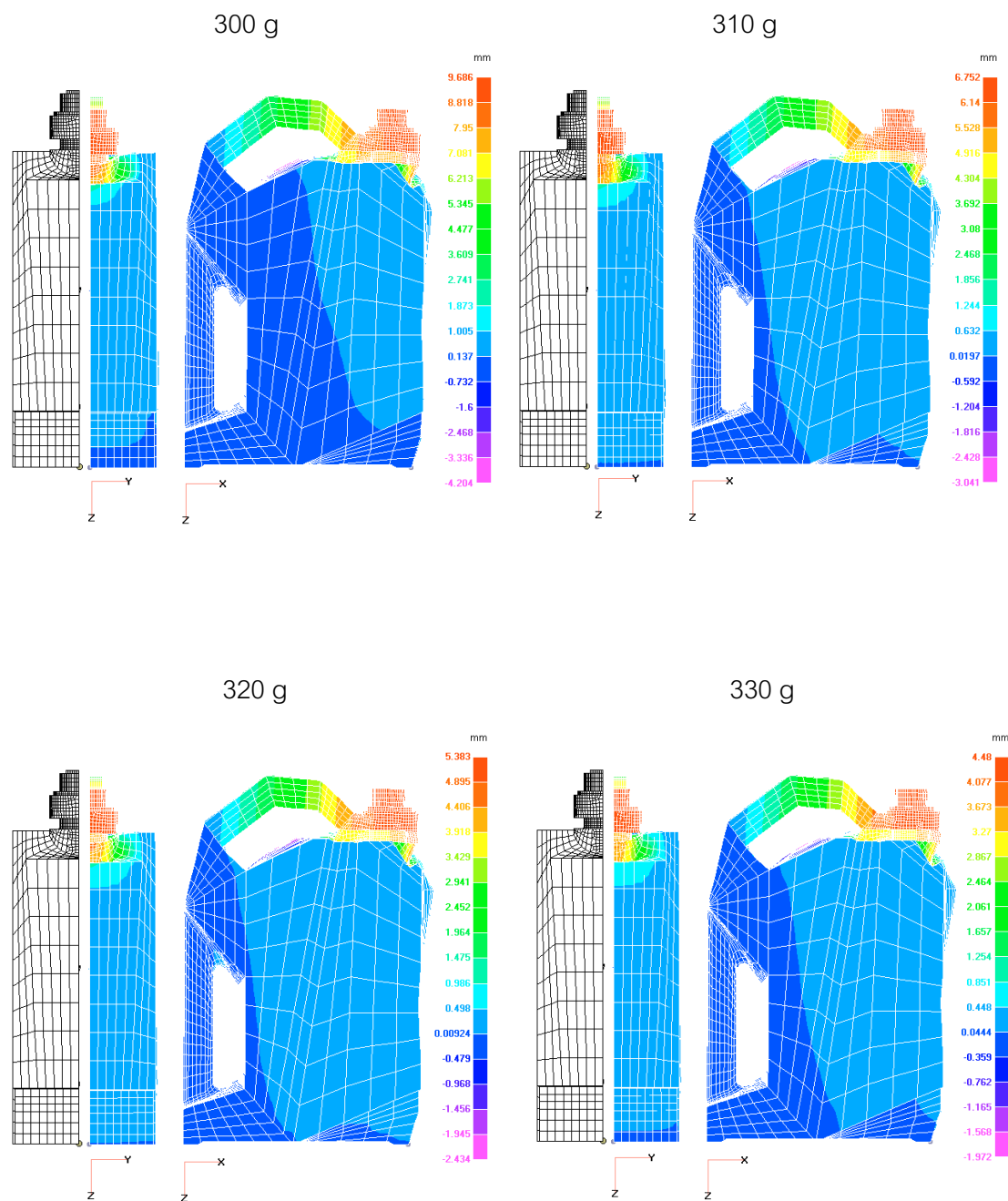
แบบจำลอง FEM แบบครึ่งใบของขวดทดสอบ ข ดังที่ได้ใช้ในผลการทดลองหัวข้อที่ 6 ได้นำมาใช้โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวของก้นขวดที่สัมผัสพื้นเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ และกำหนดภาระที่ปากขวดและที่ไหล่ของปากขวด (ลักษณะการกำหนดแบบตรงข้ามกับของขวดทดสอบ ก) สำหรับขวดทดสอบ ข นี้ได้ทำการวิเคราะห์ขวดทดสอบจำนวน 4 ขนาดน้ำหนักเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดัน

9.1 ผลการวิเคราะห์ระยะยุบตัวของขวดทดสอบ ข

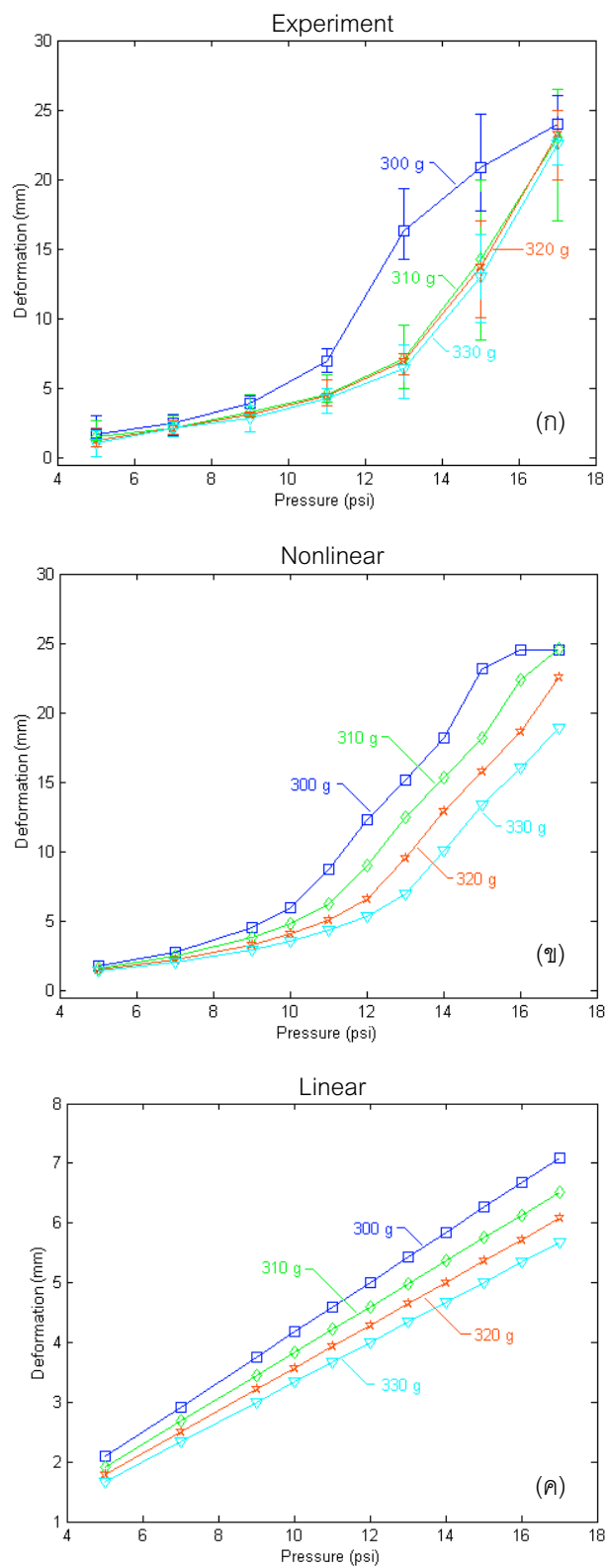
การวิเคราะห์ FEA ของระยะยุบตัวจากภาระด้านบนได้ทดสอบที่ภาระตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi และกำหนดคุณสมบัติของ HDPE เป็นแบบการยืดหยุ่นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ภาพที่ 97 แสดงระยะยุบตัวในแกน Z เป็นระดับชั้นสี่ของแบบไม่เชิงเส้น ที่ภาระเท่ากับ 11 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม ภาพสามภาพของแต่ละขนาดน้ำหนักประกอบด้วย ภาพซ้ายแสดงในขณะที่ไม่มีการเอื้อมมองจากภายนอก ภาพกลางแสดงการยุบตัวภายใต้ภาระที่กำหนดเอื้อมมองจากภายนอก และภาพขวาแสดงการยุบตัวเอื้อมมองจากภายในขวด โดยขยายขนาดของระยะยุบเป็น 2 เท่าของผลวิเคราะห์จริง ในภาพนี้แสดงสภาพการยุบตัวเกิดขึ้นชัดเจนที่บริเวณคอขวด ซึ่งได้ผลคล้ายคลึงกับการทดสอบจริงดังแสดงในภาพที่ 28 การม้วนตัวที่ผิวของก้นขวดของขวดทดสอบ ข ไม่ปรากฏในการทดสอบทางกลและจากการวิเคราะห์ FEA

ภาพที่ 98 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของขวดทดสอบ ข ทั้ง 4 ขนาด โดยภาพ ก ของผลการทดลองทางกล (จากภาพที่ 28) ภาพ ข จากผล FEA แบบไม่เชิงเส้น และภาพ ค จากผล FEA แบบเชิงเส้น

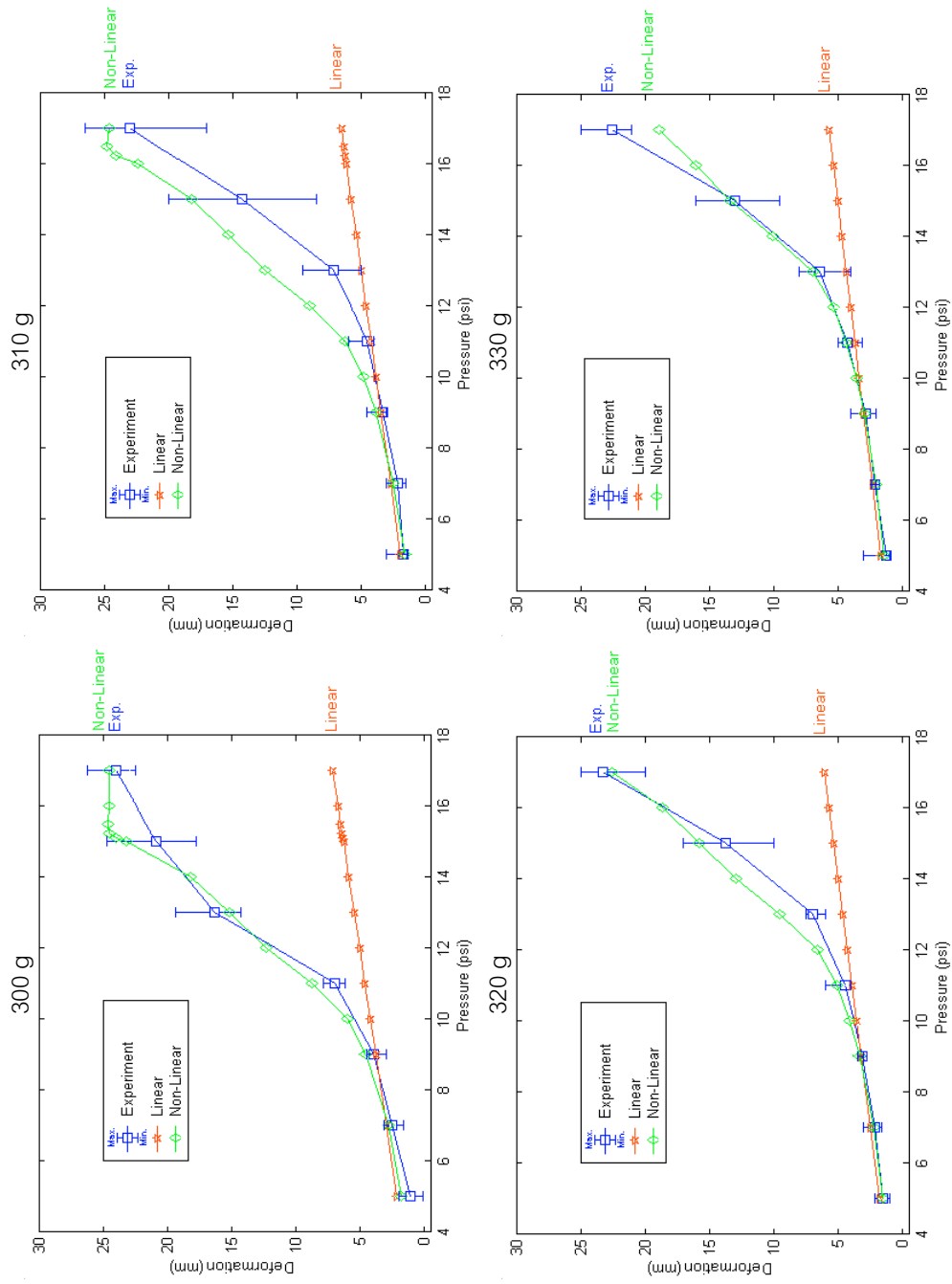
กราฟของระยะยุบตัวที่ภาระตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi ของผลการทดสอบทางกล (ภาพที่ 28) และผลจาก FEA ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นของขวดทดสอบทั้ง 4 ขนาด ได้แสดงเปรียบเทียบตามขนาดของขวดทดสอบในภาพที่ 99



ภาพที่ 97 ระยะยุบตัวแบบไม่เชิงเส้นในแกน Z ที่ภาระ 11 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม โดยรูปซ้ายและรูปกลางของแต่ละขนาดน้ำหนักเปรียบเทียบเมื่อไม่มีภาระและมีภาระ และภาพขวาแสดงเมื่อมีภาระโดยมองจากด้านในขวด



ภาพที่ 98 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของขวดทดสอบ ข ทั้ง 4 ขนาด แยกตามผลการทดลอง

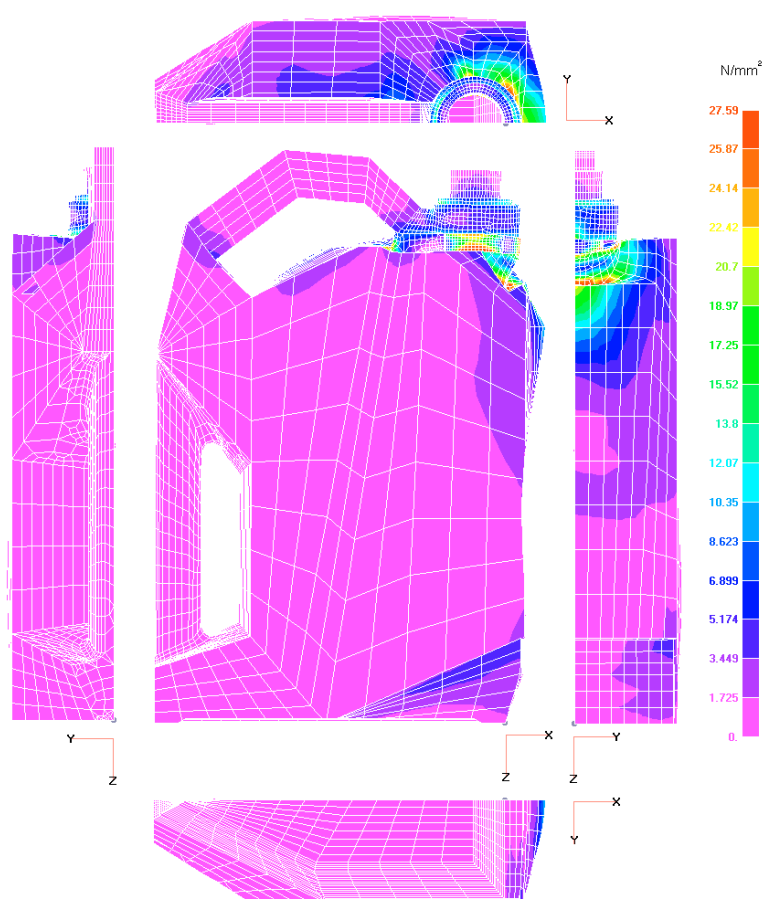


ภาพที่ ๑๑ เปรียบเทียบระบบระบุตัวของการทดสอบทางกล และผลจาก FEA ของขวดทดสอบ ข

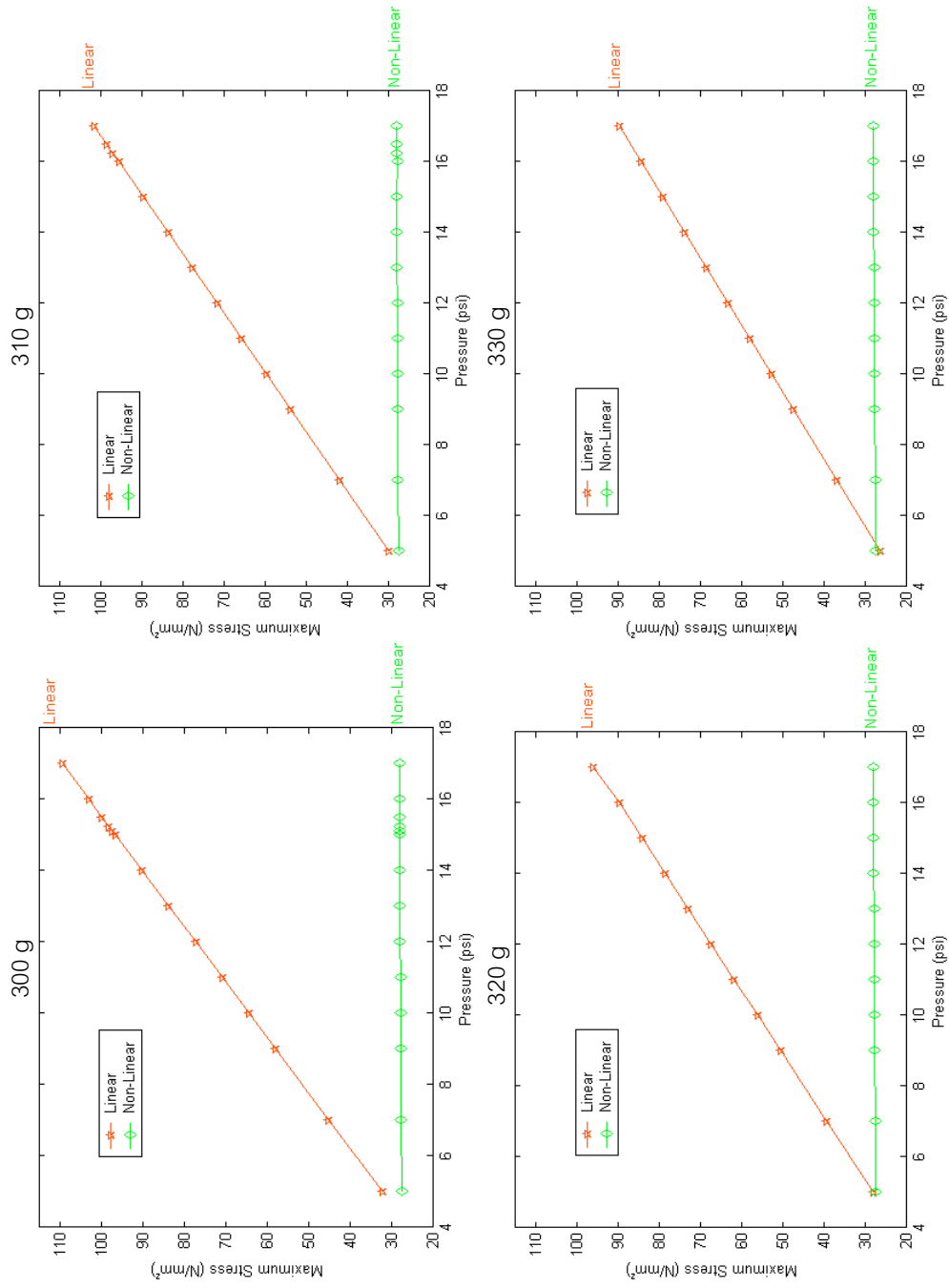
9.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของขวดทดสอบ ข

ตัวอย่างของผลการวิเคราะห์ FEA ของค่าความเค้นจากภาระด้านบนของขวดทดสอบ ข แสดงเป็นระดับชั้นสี ที่ภาระเท่ากับ 11 psi จากขวดขนาด 330 กรัม ซึ่งเป็นภาระที่ใช้ในการทดสอบจริง และเป็นขนาดของขวดที่ใช้ผลิตจริงของแบบจำลองที่ให้ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้นได้แสดงในภาพที่ 100

กราฟของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณใดๆ ที่ภาระตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi จากผลการวิเคราะห์ FEA ของขวดทดสอบ ข ทั้ง 4 ขนาด ได้แสดงดังภาพที่ 101 ในภาพนี้แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าความเค้นคลากทุกค่าภาระที่ทดสอบ



ภาพที่ 100 ค่าความเค้นที่ 11 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม



ภาพที่ 101 เปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดระหว่างผลการวิเคราะห์ FEA แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ของขวดทดสอบ ขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม

9.3 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ภาระด้านบนของขวดทดสอบ ข

ภาพที่ 98ก แสดงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระที่กระทำที่ปากขวดจาก 5 psi ถึง 17 psi ของการทดสอบทางกล โดยช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นไม่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนในขวดทดสอบ ข โดยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเป็นช่วงแคบ คือ ในช่วงภาระต่ำจาก 5 psi ถึง 9 psi ในขวดขนาด 300 กรัม ช่วงเชิงเส้นนี้จะกว้างขึ้นเมื่อน้ำหนักของขวดมากขึ้นโดยขวดทดสอบ ข ขนาด 310, 320 และ 330 กรัม มีช่วงกว้างถึงประมาณ 11 psi โดยผลการวิเคราะห์ FEA เมื่อให้ HDPE เป็นแบบเชิงเส้น (ภาพที่ 99) ให้ผลสอดคล้องตามสรุปดังกล่าวเช่นกัน ผลการวิเคราะห์ FEA เมื่อให้ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้น (ภาพที่ 98ข) ให้ความสัมพันธ์มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับผลการทดสอบทางกล

ตารางที่ 14 แสดงผลเปรียบเทียบในช่วงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระในช่วงเชิงเส้นในรูปสมการเส้นตรง $\Delta = KP + \Delta_0$ จาก 5 psi ถึง 9 psi ของขวดขนาด 300 กรัม และจาก 5 psi ถึง 11 psi ของขวดขนาด 310, 320 และ 330 กรัม ตารางที่ 15 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระแบบไม่เชิงเส้นในช่วงแรงดันทดสอบทั้งหมด (จาก 5 psi ถึง 17 psi) โดยสมการแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้เป็นสมการ Quadratic ซึ่งมีสมการของระยะยุบตัว (Δ) ในรูปของ

$$\Delta = CP^2 + KP + \Delta_0 \quad (9)$$

โดย C = ค่าคงที่ และ

K และ Δ_0 เป็นค่าคงที่เช่นเดียวกับสมการ 3

ค่า C , K และ Δ_0 คำนวณจากวิธี Least Squares

ตารางที่ 16 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์จาก FEA เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกลจากข้อมูลของภาพที่ 99 ในช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (ที่ภาระจาก 5 psi ถึง 11 psi) และจากสมการเส้นตรงตามตารางที่ 14

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้นของระยะยุบในช่วง 5 psi ถึง 9 psi ของขวดทดสอบ
ข ขนาด 300 กรัม และ 5 psi ถึง 11 psi ของขวดทดสอบ ข ขนาด 310, 320 และ
330 กรัม

ขนาด	$\Delta = KP + \Delta_0$	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
300	การทดสอบทางกล	0.7043	-2.4551	0.0094
300	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.4176	0.0001	0.0001
300	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.6962	-1.8527	0.2813
310	การทดสอบทางกล	0.4800	-0.9400	0.3098
310	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.3835	0.0001	0.0002
310	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.7619	-2.5813	0.5623
320	การทดสอบทางกล	0.4835	-1.0605	0.2234
320	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.3575	0.0002	0.0007
320	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.5963	-1.7452	0.3654
330	การทดสอบทางกล	0.4925	-1.3275	0.2218
330	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.3339	0.43×10^{-4}	0.0002
330	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.4880	-1.2300	0.2531

ตารางที่ 17 แสดงความคลาดเคลื่อนของภาระทั้งหมดจาก 5 psi ถึง 17 psi เมื่อใช้สมการ
ไม่เชิงเส้น (สมการที่ 9) โดยใช้ผลจากตารางที่ 15 ค่าความคลาดเคลื่อนนี้คำนวณจากสมการ

$$e_Q = X_{EXP} - (CP^2 + KP + \Delta_0) \quad (10)$$

และ

$$e_{QP} = \frac{e_Q}{e_{EXP}} \times 100\% \quad (11)$$

โดย e_Q = ความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้สมการไม่เชิงเส้น

X_{EXP} = ค่าจากผลการทดสอบทางกล

ตารางที่ 18 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (11 psi ถึง 17 psi) จากตารางที่ 16 ถึง 18 แสดงการกำหนดให้วัสดุ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าเมื่อให้ HDPE เป็นแบบเชิงเส้น โดยมีแนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่ช่วงภาระหรือโหลดมีค่าน้อย ๆ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่เกิดขึ้นน้อยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดสูง นอกจากนี้ผลที่ได้แสดงความคลาดเคลื่อนมากในจุดที่มีน้ำหนักน้อย

ค่าความเค้นตามภาพที่ 101 แสดงจุดเริ่มเปลี่ยนพฤติกรรมจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi (24.11 kg) ซึ่งมีค่าความเค้นเท่ากับค่าความเค้นคลาด (Yield Stress) ที่ 27.47 N/mm^2 ตามกำหนดในภาพที่ 11 ความเค้นสูงสุดของจุดทดสอบ ข ภายใต้ภาระด้านบนปรากฏที่บริเวณคอขวดด้านหน้า (ภาพที่ 100)

ตารางที่ 15 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในช่วง 5 psi ถึง 17 psi ของจุดทดสอบ ข

ขนาด	$\Delta = CP^2 + KP + \Delta_0$	C (mm/psi ²)	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
300	การทดสอบทางกล	0.1103	-0.3200	-0.8043	1.9558
300	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.0000	0.4176	0.0001	0.0002
300	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.1113	-0.3104	-0.3114	1.8886
310	การทดสอบทางกล	0.2211	-3.2202	13.1277	1.0655
310	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.0000	0.3835	1.13×10^{-4}	0.0002
310	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.1709	-1.8074	6.3787	0.6287
320	การทดสอบทางกล	0.2254	-3.3118	13.4414	1.1813
320	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.0000	0.3575	1.31×10^{-4}	0.0005
320	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.1822	-2.2839	8.7311	0.4623
330	การทดสอบทางกล	0.2208	-3.2636	13.1306	1.2999
330	แบบ HDPE เชิงเส้น	0.0000	0.3339	0.43×10^{-4}	0.0002
330	แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.1612	-2.1329	8.5088	0.6817

ตารางที่ 16 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ของขวด

ทดสอบ ข

ขนาด (กรัม)	ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน							
		แบบ HDPE เชิงเส้น				แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น			
		e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)
300	5	-0.51	-0.51	-47.57	-47.57	-0.34	-0.28	-31.45	-26.09
300	7	-0.46	-0.46	-18.49	-18.49	-0.32	-0.55	-13.13	-22.44
300	9	0.13	0.13	3.31	3.31	-0.64	-0.53	-16.49	-13.53
	เฉลี่ย	-0.28	-0.28	-20.92	-20.92	-0.43	-0.45	-20.36	-20.69
310	5	-0.22	-0.22	-12.81	-12.80	0.11	0.47	6.47	27.75
310	7	-0.58	-0.58	-27.84	-27.84	-0.35	-0.65	-16.67	-31.05
310	9	-0.15	-0.15	-4.60	-4.59	-0.49	-0.98	-14.96	-29.57
310	11	0.28	0.28	6.25	6.25	-1.72	-1.30	-38.25	-28.88
	เฉลี่ย	-0.17	-0.17	-9.75	-9.74	-0.61	-0.61	-15.85	-15.44
320	5	-0.27	-0.27	-17.59	-17.61	0.04	0.28	2.81	18.66
320	7	-0.35	-0.35	-16.39	-16.40	-0.07	-0.28	-3.13	-12.97
320	9	-0.07	-0.07	-2.13	-2.15	-0.17	-0.47	-5.40	-14.97
320	11	0.48	0.48	10.84	10.82	-0.67	-0.40	-15.30	-9.16
	เฉลี่ย	-0.05	-0.05	-6.32	-6.34	-0.22	-0.22	-5.25	-4.61
330	5	-0.44	-0.44	-35.73	-35.74	-0.15	0.02	-12.08	1.63
330	7	-0.24	-0.24	-11.30	-11.30	0.06	-0.09	3.06	-4.10
330	9	-0.15	-0.15	-5.07	-5.07	-0.10	-0.30	-3.38	-10.56
330	11	0.59	0.59	13.78	13.78	-0.06	0.12	-1.52	2.86
	เฉลี่ย	-0.06	-0.06	-9.58	-9.58	-0.06	-0.06	-3.48	-2.54

ตารางที่ 17 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ของขวด
ทดสอบ ข

ขนาด (กรัม)	ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
		แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
		e_Q (mm)	e_{QP} (%)	e_Q (mm)	e_{QP} (%)
300	5	-0.51	-47.58	0.15	14.10
300	7	-0.46	-18.50	-0.50	-20.37
300	9	0.13	3.31	-2.02	-52.05
300	11	2.32	33.55	-2.83	-40.92
300	13	10.90	66.75	1.86	11.42
300	15	14.56	69.92	0.75	3.61
300	17	16.90	70.42	-2.58	-10.74
	เฉลี่ย	6.26	25.41	-0.74	-13.56
310	5	-0.22	-12.80	0.09	5.05
310	7	-0.58	-27.84	-0.001	-0.05
310	9	-0.15	-4.59	-0.66	-19.85
310	11	0.28	6.25	-2.68	-59.47
310	13	2.11	29.78	-4.66	-65.70
310	15	8.55	59.77	-3.42	-23.92
310	17	16.48	71.65	-2.04	-8.88
	เฉลี่ย	3.78	17.46	-1.91	-24.69
320	5	-0.27	-17.61	-0.35	-22.80
320	7	-0.35	-16.40	0.48	22.25
320	9	-0.07	-2.15	0.22	6.85
320	11	0.48	10.82	-1.24	-28.22
320	13	2.33	33.42	-2.85	-40.86
320	15	8.40	61.03	-1.71	-12.41
320	17	17.15	73.84	0.67	2.88
	เฉลี่ย	3.95	20.42	-0.68	-10.33

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ขนาด (กรัม)	ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
		แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
		e_Q (mm)	e_{QP} (%)	e_Q (mm)	e_{QP} (%)
330	5	-0.44	-35.74	-0.64	-52.38
330	7	-0.24	-11.30	0.62	29.65
330	9	-0.15	-5.07	0.49	17.14
330	11	0.59	13.78	-0.29	-6.86
330	13	2.04	31.96	-1.64	-25.77
330	15	7.97	61.41	0.19	1.50
330	17	16.88	74.84	3.72	16.51
	เฉลี่ย	3.81	18.55	0.35	-2.89

ตารางที่ 18 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ของขวดทดสอบ ข

ขนาด (กรัม)	ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
		แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
		e (mm)	e_P (%)	e (mm)	e_P (%)
300	11	2.32	33.55	-1.83	-26.52
300	13	10.90	66.75	1.20	7.32
300	15	14.56	69.92	-2.34	-11.25
300	17	16.90	70.42	-0.53	-2.20
	เฉลี่ย	11.17	60.16	-0.88	-8.16
310	11	0.28	6.25	-1.72	-38.25
310	13	2.11	29.78	-5.37	-75.70
310	15	8.55	59.77	-3.91	-27.37
310	17	16.48	71.65	-1.63	-7.10
	เฉลี่ย	6.86	41.86	-3.16	-37.10

ตารางที่ 18 (ต่อ)

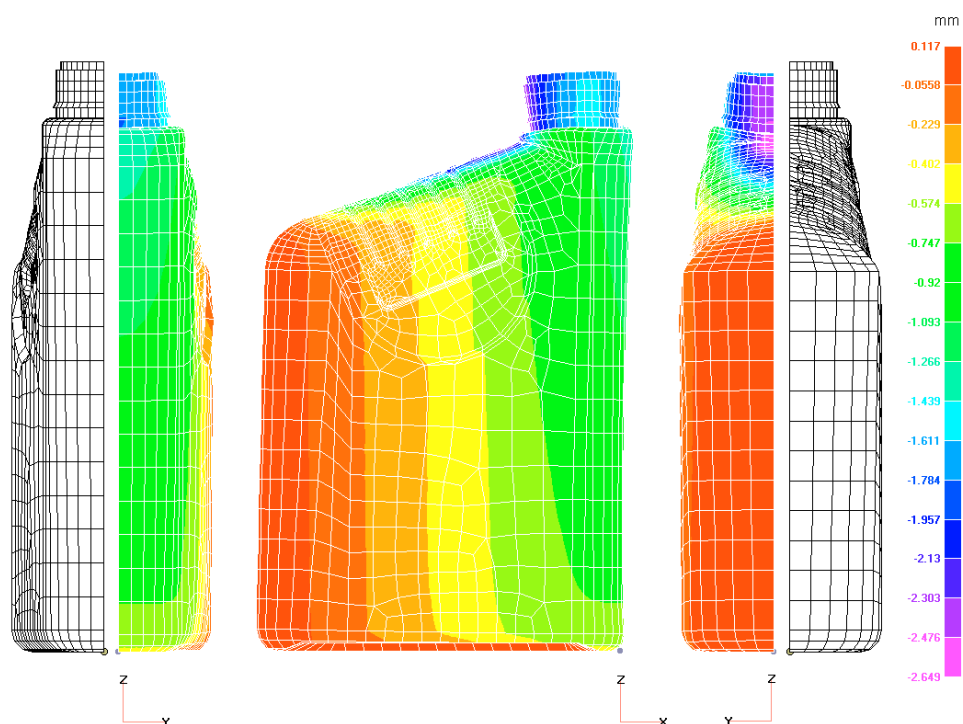
ขนาด (กรัม)	ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
		แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
		e (mm)	e_p (%)	e (mm)	e_p (%)
320	11	0.48	10.84	-0.67	-15.30
320	13	2.33	33.42	-2.58	-37.00
320	15	8.40	61.03	-1.98	-14.38
320	17	17.15	73.84	0.67	2.87
	เฉลี่ย	7.09	44.78	-1.14	-15.95
330	11	0.59	13.78	-0.06	-1.52
330	13	2.04	31.97	-0.61	-9.54
330	15	7.97	61.42	-0.35	-2.70
330	17	16.88	74.84	3.68	16.31
	เฉลี่ย	6.87	45.50	0.66	0.64

10. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบภาระด้านบนของขวดทดสอบ ค

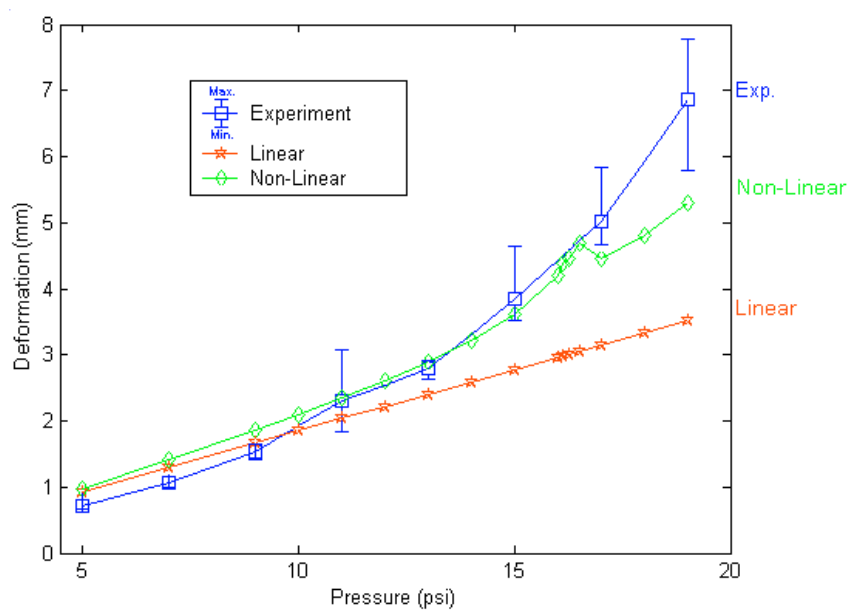
แบบจำลอง FEM แบบครึ่งใบของขวดทดสอบ ค ดังที่ได้ใช้ในผลการทดลองหัวข้อที่ 7 ได้นำมาใช้โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวของก้นขวดที่สัมผัสพื้นเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ และกำหนดภาระที่ปากขวดและที่ไหล่ของปากขวด (ลักษณะการกำหนดแบบเดียวกับของขวดทดสอบ ก)

10.1 ผลการวิเคราะห์ระยะยุบตัวของขวดทดสอบ ค

การวิเคราะห์ FEA ของระยะยุบตัวจากภาระด้านบนได้ทดสอบที่ภาระตั้งแต่ 5 psi ถึง 19 psi และกำหนดคุณสมบัติของ HDPE เป็นแบบการยืดหยุ่นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ภาพที่ 102 แสดงระยะยุบตัวในแกน Z เป็นระดับชั้นสีของแบบไม่เชิงเส้น ที่ภาระเท่ากับ 11 psi ของขวดทดสอบ ค ขนาด 70.0 กรัม กราฟของระยะยุบที่ภาระ ตั้งแต่ 5 psi ถึง 17 psi ของผลทดสอบทางกล (ภาพที่ 30) และผลจาก FEA ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้แสดงในภาพที่ 103



ภาพที่ 102 ระยะยุบตัวแบบไม่เชิงเส้นในแกน Z ที่ภาระ 11 psi ของขวดทดสอบ ค

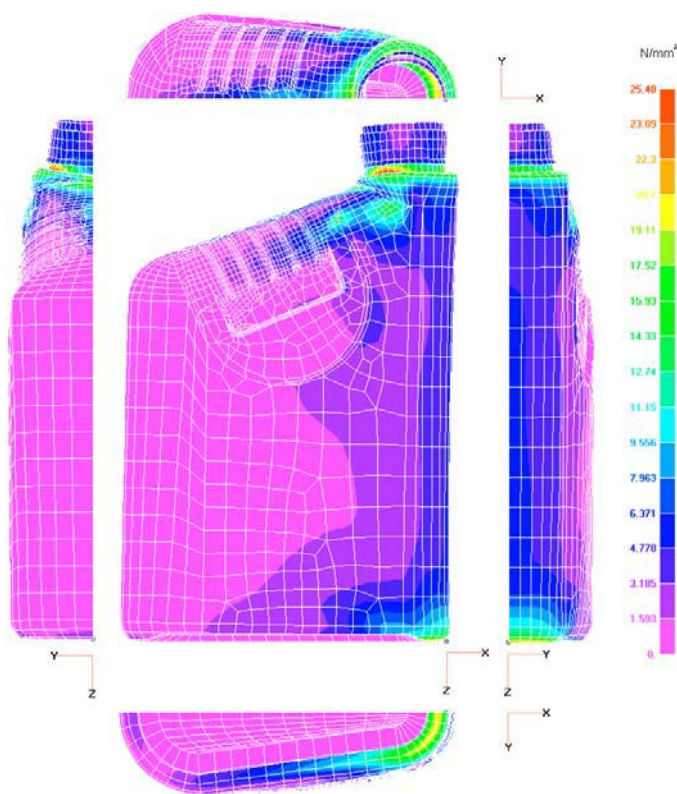


ภาพที่ 103 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของผลการทดสอบทางกลและผลจาก FEA ของขวดทดสอบ ค

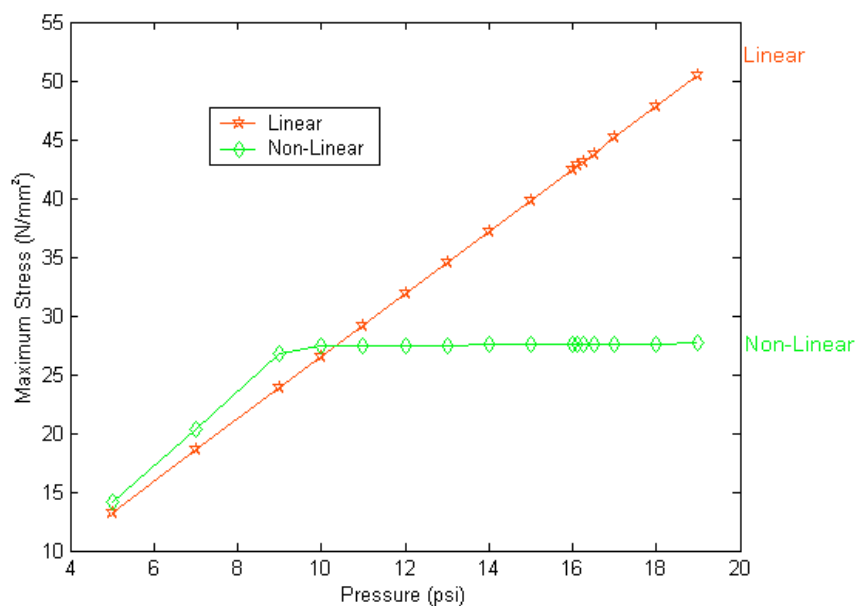
10.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของขวดทดสอบ ค

ตัวอย่างของผลการวิเคราะห์ FEA ของค่าความเค้นจากภาระด้านบนของขวดทดสอบ ค แสดงเป็นระดับชั้นสีที่ภาระเท่ากับ 11 psi ของแบบจำลองที่กำหนดใช้คุณสมบัติของ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้น ได้แสดงในภาพที่ 104 และกราฟของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณใดๆ ที่ภาระ 5 psi ถึง 19 psi จากผลการทดลอง FEA ได้แสดงในภาพที่ 105

กราฟของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณใดๆ ที่ภาระตั้งแต่ 5 psi ถึง 19 psi จากผลการวิเคราะห์ FEA ของแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้แสดงในภาพที่ 105



ภาพที่ 104 ค่าความเค้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi ของขวดทดสอบ ค



ภาพที่ 105 เปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดระหว่างผลวิเคราะห์ FEA ที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ของขวดทดสอบ ค

10.3 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ภาระด้านบนของขวดทดสอบ ค

จากภาพที่ 103 แสดงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระที่กระทำที่ปากขวดจาก 5 psi ถึง 19 psi ของการทดสอบทางกลเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงภาระต่ำที่ 5 psi ถึง 13 psi และเป็นแบบไม่เชิงเส้นในช่วง 13 psi ถึง 19 psi ในขณะที่แบบจำลองที่ให้ HDPE มีคุณสมบัติเชิงเส้น มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตลอดจาก 5 psi ถึง 19 psi ส่วนผลจากแบบจำลองที่ให้ HDPE มีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นมีความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวเทียบกับภาระ แยกได้เป็น 2 ช่วง คือ

- ก. แบบเชิงเส้นในช่วง 5 psi ถึง 13 psi
- ข. แบบไม่เชิงเส้นในช่วง 13 psi ถึง 19 psi

ตารางที่ 19 แสดงผลเปรียบเทียบในช่วงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระในช่วงเชิงเส้นในรูปสมการเส้นตรง $\Delta = KP + \Delta_0$ จาก 5 psi ถึง 13 psi ตารางที่ 20 แสดงผลเปรียบเทียบ

ความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระแบบไม่เชิงเส้นในช่วงแรงดันทดสอบทั้งหมด (จาก 5 psi ถึง 19 psi) โดยสมการแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ คือ สมการ 9

ตารางที่ 21 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์จาก FEA เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกลจากข้อมูลของภาพที่ 103 ในช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (ที่ภาระจาก 5 psi ถึง 13 psi) ตารางที่ 22 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (13 psi ถึง 19 psi)

ตารางที่ 23 แสดงความคลาดเคลื่อนของภาระทั้งหมดจาก 5 psi ถึง 19 psi เมื่อใช้สมการไม่เชิงเส้น (สมการที่ 9) โดยใช้ผลจากตารางที่ 20 ค่าความคลาดเคลื่อนนี้คำนวณจากสมการ 10 และ 11

จากตารางที่ 21 และ 23 แสดงการกำหนดให้วัสดุ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าเมื่อให้ HDPE เป็นแบบเชิงเส้น โดยเฉพาะในช่วงที่มีภาระหรือโหลดสูง

ค่าความเค้นตามภาพที่ 105 แสดงจุดเริ่มเปลี่ยนพฤติกรรมจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi (24.11 kg) ซึ่งมีค่าความเค้นเท่ากับค่าความเค้นคลาก (Yield Stress) ที่ 27.47 N/mm^2 ตามกำหนดในภาพที่ 11 ความเค้นสูงสุดของขวดทดสอบ ค ภายใต้อาภาระด้านบนปรากฏที่บริเวณคอขวด (ภาพที่ 104)

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบความสัมพันธ์เชิงเส้นของระยะยุบในช่วง 5 psi ถึง 13 psi ของขวดทดสอบ ค

$\Delta = KP + \Delta_0$	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
การทดสอบทางกล	0.4176	1.9920	5.0788
แบบ HDPE เชิงเส้น	0.1851	2.053×10^{-5}	3.232×10^{-5}
แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.3047	-0.7995	0.2495

ตารางที่ 20 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในช่วง 5 psi ถึง 19 psi ของขวดทดสอบ ค

$\Delta = CP^2 + KP + \Delta_0$	C (mm/psi ²)	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
การทดสอบทางกล	0.0261	-0.2082	1.2148	0.1697
แบบ HDPE เชิงเส้น	0.0000	0.1851	2.053×10^{-5}	0.0005
แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.0106	0.0502	0.5044	0.0388

ตารางที่ 21 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ของขวดทดสอบ ค

ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน							
	แบบ HDPE เชิงเส้น				แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น			
	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)
5	-0.21	-0.21	-28.52	-28.54	-0.26	-0.004	-36.25	-0.56
7	-0.23	-0.23	-21.07	-21.10	-0.34	-0.26	-31.78	-24.62
9	-0.13	-0.13	-8.51	-8.53	-0.33	-0.41	-21.17	-26.57
11	0.27	0.27	11.87	11.86	-0.04	-0.24	-1.65	-10.48
13	0.38	0.38	13.61	13.60	-0.12	-0.38	-4.13	-13.52
เฉลี่ย	0.02	0.02	-6.52	-6.54	-0.22	-0.26	-18.99	-15.15

ตารางที่ 22 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ของขวด
ทดสอบ ค

ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน							
	แบบ HDPE เชิงเส้น				แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น			
	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)	e (mm)	e_L (mm)	e_P (%)	e_{LP} (%)
13	0.38	0.38	13.61	13.60	-0.12	-0.38	-4.13	-13.52
15	1.07	1.07	27.90	27.88	0.24	0.08	6.21	2.05
17	1.87	1.87	37.33	37.32	0.57	0.64	11.37	12.74
19	3.34	3.34	48.74	48.73	1.57	1.87	22.84	27.26
เฉลี่ย	1.67	1.67	31.90	31.88	0.57	0.55	9.07	7.13

ตารางที่ 23 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ของขวด
ทดสอบ ค

ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
	แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
	e_Q (mm)	e_{QP} (%)	e_Q (mm)	e_{QP} (%)
5	-0.2055	-28.5445	-0.3004	-41.7222
7	-0.2257	-21.0954	-0.3052	-28.5234
9	-0.1309	-8.5290	-0.2798	-18.2280
11	0.2739	11.8562	-0.0292	-1.2641
13	0.3787	13.5971	-0.1634	-5.8672
15	1.0735	27.8826	0.2076	5.3922
17	1.8733	37.3163	0.5988	11.9283
19	3.3431	48.7329	1.5752	22.9621
เฉลี่ย	0.7975	10.1520	0.1630	-6.9153

11. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบภาระด้านบนของขวดทดสอบ ง

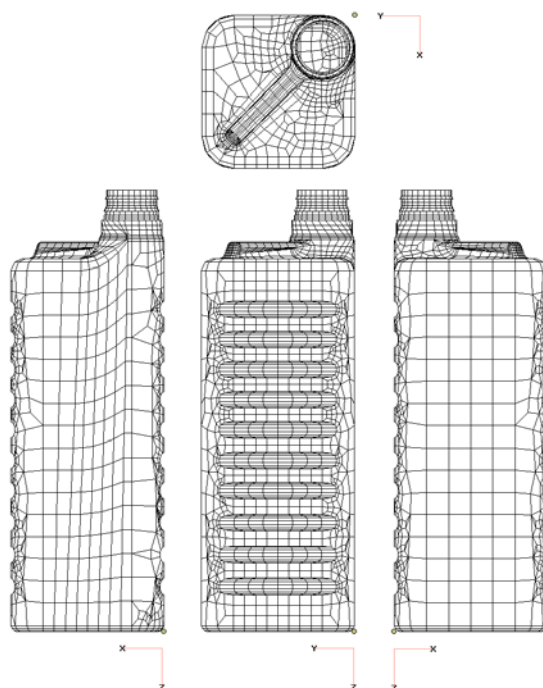
แบบจำลองของขวดทดสอบ ง มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ได้จำลองแบบ FEM เป็นแบบเต็มใบโดยมีการแบ่งชิ้นประกอบดังแสดงในภาพที่ 106 ซึ่งประกอบด้วย 4,001 โหนด และ 4,096 ชิ้นประกอบ ผสมชิ้นประกอบทั้งแบบรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม โดยมีจำนวนเพียง 1 % เป็นชิ้นประกอบรูปสามเหลี่ยม และกำหนดความหนาของชิ้นประกอบเท่ากับ 1.1504 มิลลิเมตร ตลอดทั้งใบ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็น HDPE การจำลองการทดสอบภาระด้านบนที่แบบ FEM ของขวดทดสอบ ง นี้ ได้กำหนดภาระที่ปากขวดและที่ไหล่ของปากขวด และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวของกันขวดที่สัมผัสพื้นให้เป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่

11.1 ผลการวิเคราะห์ระยะยุบตัวของขวดทดสอบ ง

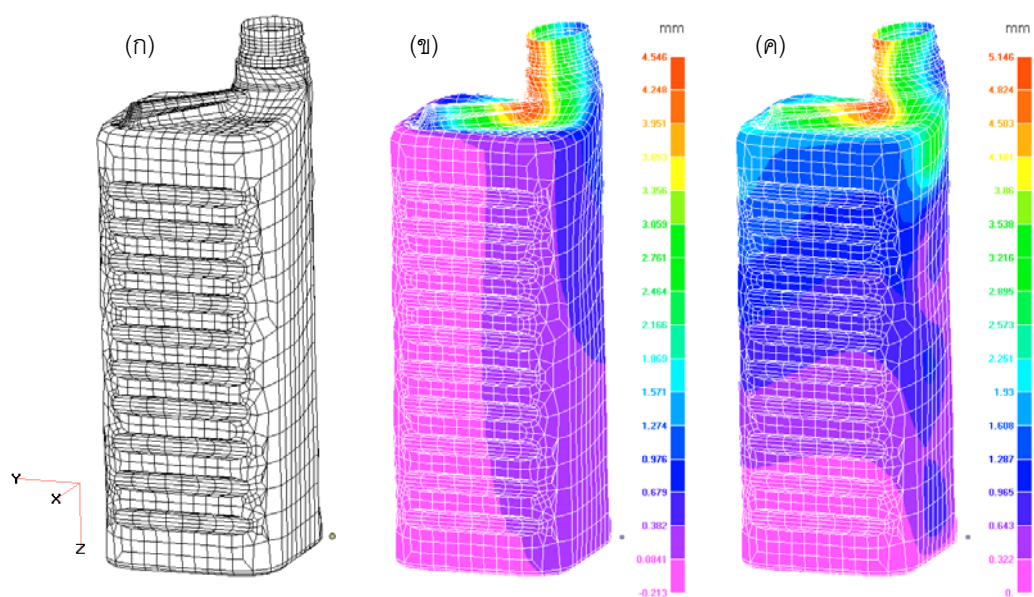
การวิเคราะห์ FEA ของระยะยุบตัวเนื่องจากภาระด้านบนที่ภาระ 5 psi ถึง 13 psi โดยใช้คุณสมบัติของ HDPE เป็นแบบการยืดหยุ่นเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ภาพที่ 107 แสดงระยะยุบตัวในแกน Z (ภาพกลาง) และ Total Translation (ภาพขวา) เป็นระดับชั้นสีของขวดทดสอบ ง เมื่อวัสดุเป็นแบบไม่เชิงเส้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi ในภาพนี้จะเห็นสภาพลักษณะการยุบตัวที่คอขวดมีลักษณะคล้ายคลึงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงจากการทดสอบทางกล ดังเปรียบเทียบได้จากภาพที่ 32 กราฟของระยะยุบตัวที่ภาระ 5 psi ถึง 13 psi ของผลการวิเคราะห์ FEA ทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล (ภาพที่ 33) ได้แสดงในภาพที่ 108

11.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของขวดทดสอบ ง

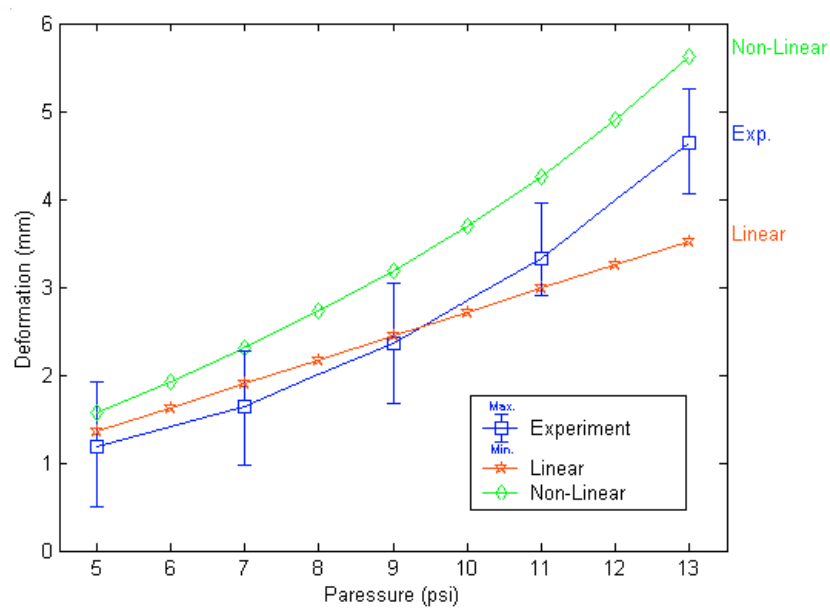
ภาพที่ 109 แสดงตัวอย่างของค่าความเค้นเป็นระดับชั้นสีภายใต้ภาระเท่ากับ 11 psi เมื่อวัสดุเป็นแบบไม่เชิงเส้น ภาพที่ 110 แสดงกราฟของค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณใดๆ ที่ภาระ 5 psi ถึง 13 psi ของ HDPE แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น



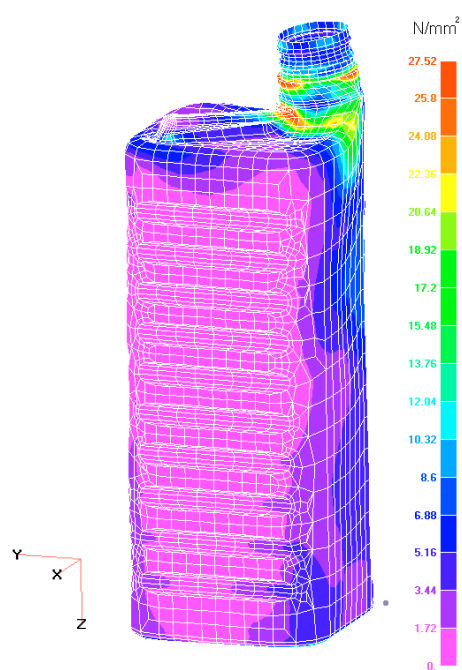
ภาพที่ 106 ลักษณะการแบ่งชิ้นประกอบของขวดทดสอบ ง (ขนาด 1.0 ลิตร)



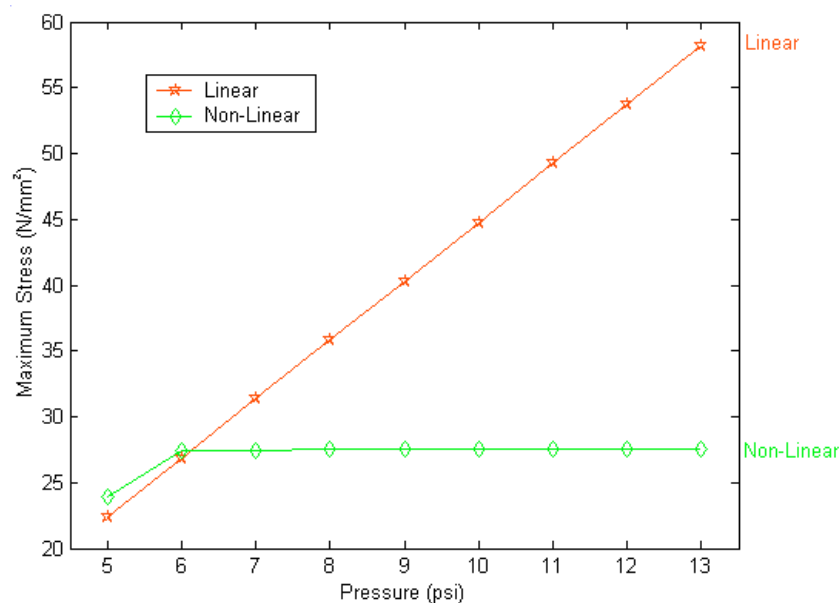
ภาพที่ 107 (ก) ขวดทดสอบ ง เมื่อไม่มีภาระ (ข) และ (ค) ขวดระยะยุบตัวแบบไม่เชิงเส้นที่ภาระ 11 psi ของขวดทดสอบ ง ในแกน Z แบบตามแกน (ในแกน Z) และแบบ Total Translation ตามลำดับ



ภาพที่ 108 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของผลการทดสอบทางกลและผลจาก FEA ของขวดทดสอบ ง



ภาพที่ 109 ค่าความเค้นที่ภาระเท่ากับ 11 psi ของขวดทดสอบ ง



ภาพที่ 110 เปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดระหว่างผลวิเคราะห์ FEA ที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ของขวดทดสอบ ง

11.3 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์การกระด้างบนของขวดทดสอบ ง

ภาพที่ 108 แสดงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระที่กระทำที่ปากขวดจาก 5 psi ถึง 13 psi ของการทดสอบทางกล โดยช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนในขวดทดสอบ ง ผลการวิเคราะห์ FEA เมื่อให้ HDPE เป็นแบบไม่เชิงเส้นให้ความสัมพันธ์มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับผลการทดสอบทางกล โดยมีค่า Offset สูงกว่าประมาณ 5 มม.

ตารางที่ 24 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระแบบไม่เชิงเส้นในช่วงแรงดันทดสอบทั้งหมด (จาก 5 psi ถึง 13 psi) โดยสมการแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ คือสมการ 9 ตารางที่ 25 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (5 psi ถึง 13 psi)

ตารางที่ 24 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในช่วง 5 psi ถึง 13 psi ของขวดทดสอบ ง

$\Delta = CP^2 + KP + \Delta_0$	C (mm/psi ²)	K (mm/psi)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
การทดสอบทางกล	0.0349	-0.1975	1.3066	0.0200
แบบ HDPE เชิงเส้น	0.0000	0.2712	-0.0001	0.0007
แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	0.0255	0.0448	0.7187	0.0397

ตารางที่ 25 ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยุบตัว ช่วงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของขวดทดสอบ ง

ความดัน (psi)	ความคลาดเคลื่อน			
	แบบ HDPE เชิงเส้น		แบบ HDPE ไม่เชิงเส้น	
	e_Q (mm)	e_{QP} (%)	e_Q (mm)	e_{QP} (%)
5	-0.1719	-14.5186	-0.3962	-33.4628
7	-0.2543	-15.4684	-0.6378	-38.7956
9	-0.0807	-3.4195	-0.8274	-35.0593
11	0.3489	10.4712	-0.965	-28.9616
13	1.1145	24.0194	-0.9706	-20.9181
เฉลี่ย	0.1913	0.2168	-0.7594	-31.4395

12. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบการปล่อยตก

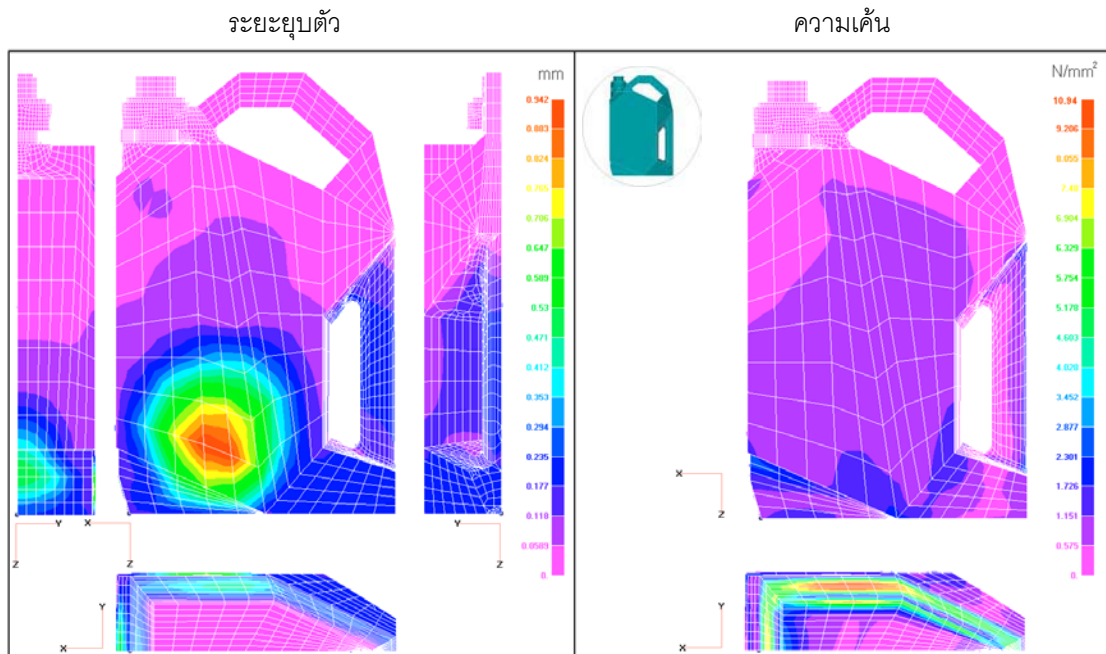
แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบ ข, ค และ ง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบในเบื้องต้นได้นำมาใช้ในการทดสอบการปล่อยตก โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบตรึงที่บริเวณตรงข้ามกับตำแหน่งที่ขวดกระทบพื้น และแรงที่เกิดจากการปล่อยตกที่ความสูงต่างๆ ตามรายละเอียดในหัวข้อวิธีการข้อ 4.3 หน้าที่ 31 และ 32 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการทดสอบทางกลไม่สามารถกระทำได้โดยตรง นอกจากการตรวจสอบการปริแตก และสภาพ

ลักษณะการยุบของผนังขวดภายหลังการปล่อยตก นอกจากนี้ในการทดสอบทางกลการบังคับ และตรวจสอบมุมตกกระทบและจุดกระทบพื้นให้ได้มุมและตำแหน่งเดียวกันไม่สามารถกระทำได้อย่างสม่ำเสมอและแม่นยำเหมือนกับการวิเคราะห์ FEA

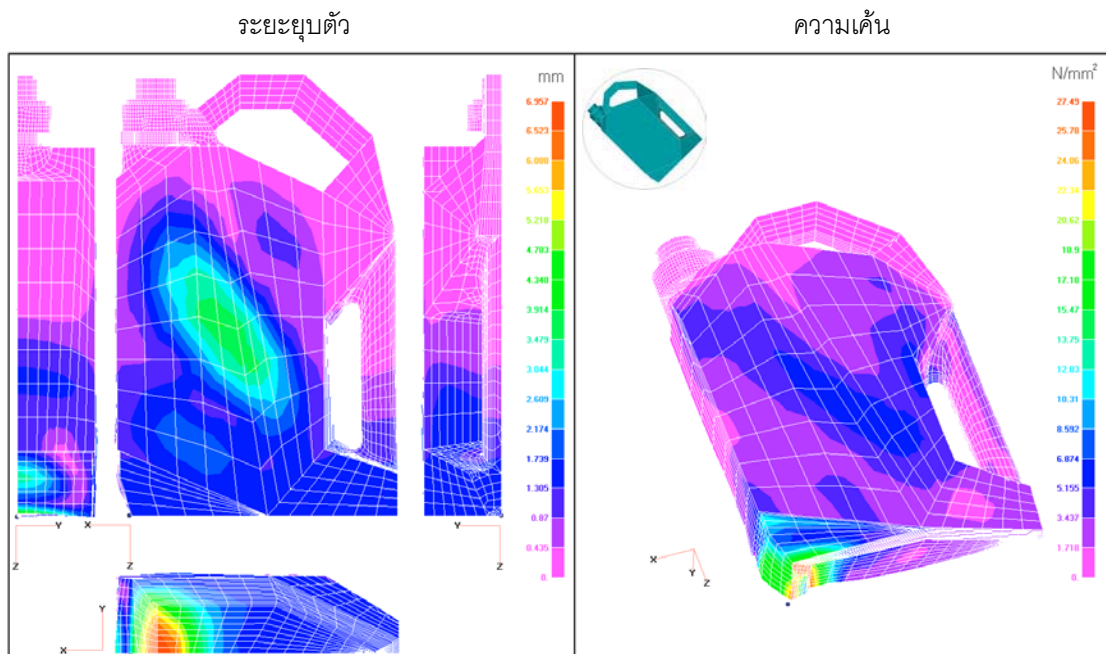
12.1 ผลการวิเคราะห์การปล่อยตกของขวดทดสอบ ข

ภาพที่ 111 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ FEA ของสภาพการยุบตัวของผนังขวดทดสอบ ขนาด 330 กรัม โดยระดับชั้นสีแสดงระยะยุบตัวแบบ Total Translation (ภาพซ้าย) และค่าความเค้น (ภาพขวา) เมื่อจำลองการปล่อยตกตามเงื่อนไข 1 ที่ระดับความสูง 2.4 เมตร ภาพที่ 112 ถึง 114 แสดงผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกับของภาพที่ 111 แต่ตามเงื่อนไขการปล่อยตกที่ 2ก, 2ข และ 3ก ตามลำดับ ภาพที่ 115 แสดงกราฟของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณใดๆ ของขวดทดสอบ ที่ระดับความสูงการปล่อยตก 1.8 เมตร ถึง 4.2 เมตร (ตามตารางที่ 3) ของทั้ง 4 เงื่อนไขของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม

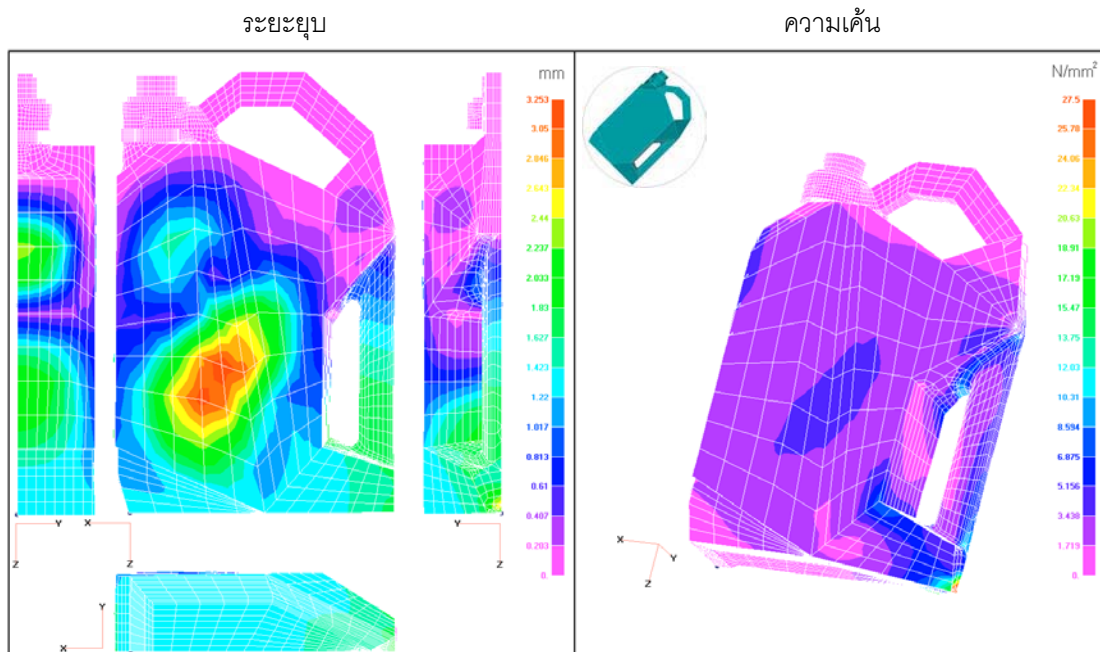
จากกราฟของภาพที่ 115 แสดงเงื่อนไขการปล่อยตกที่ 2ก, 2ข และ 3ก ให้ค่าความเค้นสูงเท่าเทียมกันทุกระดับความสูงการปล่อยตก โดยมีความเค้นสูงสุดมากกว่าค่าความเค้นคลาก และต่ำกว่าค่าความเค้นแตกตั้งแต่ระดับความสูงเริ่มต้นที่ 1.8 เมตร ในขณะที่การปล่อยตกตามเงื่อนไข 1 ได้ผลของค่าความเค้นต่ำกว่า (ประมาณ 1.8 ถึง 3 เท่า) เมื่อเทียบกับเงื่อนไขทั้ง 3 และค่าความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงการปล่อยตก สำหรับขวดทดสอบ ข มีระดับความสูงการปล่อยตกตามมาตรฐานการทดสอบอยู่ที่ 2.4 เมตร ทั้ง 4 เงื่อนไขการปล่อยตกแสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ ณ บริเวณขวดที่กระทบพื้น การเปรียบเทียบสภาพผนังที่เกิดการยุบตัวจากผลการทดสอบทางกล (ภาพที่ 34 ถึง 37) และจากการวิเคราะห์ FEA (ภาพที่ 111 ถึง 114) ไม่สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรง เนื่องจากข้อสมมุติฐานของ FEA ที่กำหนดใช้ผลการวิเคราะห์แบบ Static ในขณะที่ขวดกระทบพื้น แต่ผลการทดสอบทางกล คือ การยุบตัวของขวดกระทบพื้นแล้ว ซึ่งไม่มีแรงใดๆ มากระทำ ดังนั้นจึงอยู่ในสภาพที่ไม่มีมีความเค้นเกิดขึ้น การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการประมาณโดยวิธีที่ได้นำมาใช้ในการวิจัยนี้สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ระดับสูง (High End) ที่มีโมดูลเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์การกระทบซึ่งมีราคาแพงมาก



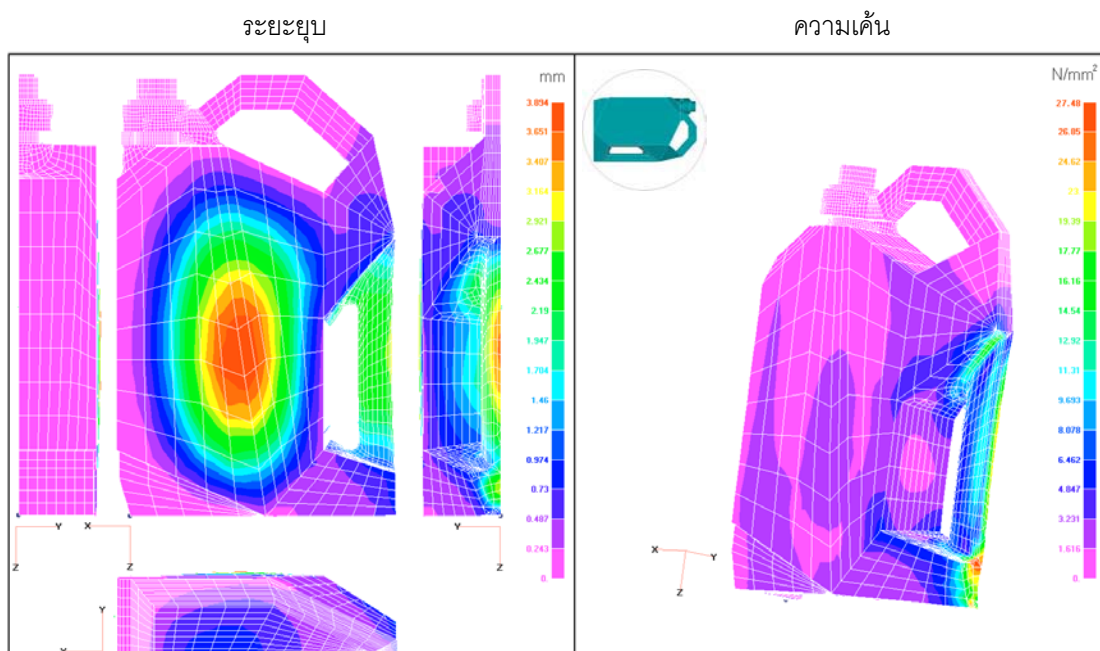
ภาพที่ 111 ระยะยุบตัว (ภาพซ้าย) และความเค้น (ภาพขวา) ของผลการวิเคราะห์การปล่อยตก
เงื่อนไข 1 ที่ความสูง 2.4 เมตร ของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม



ภาพที่ 112 ระยะยุบตัว (ภาพซ้าย) และความเค้น (ภาพขวา) ของผลการวิเคราะห์การปล่อยตก
เงื่อนไข 2ก ที่ความสูง 2.4 เมตร ของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม



ภาพที่ 113 ระยะยุบตัว (ภาพซ้าย) และความเค้น (ภาพขวา) ของผลการวิเคราะห์การปล่อยตก
เงื่อนไข 2x ที่ความสูง 2.4 เมตร ของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม



ภาพที่ 114 ระยะยุบตัว (ภาพซ้าย) และความเค้น (ภาพขวา) ของผลการวิเคราะห์การปล่อยตก
เงื่อนไข 3ก ที่ความสูง 2.4 เมตร ของขวดทดสอบ ข ขนาด 330 กรัม