



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบปล่อยตกขวดพลาสติกที่บรรจุน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Computer Simulation Method for Drop Test of Liquid-Filled Plastic Containers

Using Finite Element Method

นามผู้วิจัย นายชาคริต สุวรรณจำรัส

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ธีรพงศ์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์, M.S.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริพร ศศิเมณฑกุล, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วรงค์รัตน์ จันทสาโร, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์เอกชัย จันทสาโร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, D.Phil.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบปล่อยตก
ขวดพลาสติกที่บรรจุน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Computer Simulation Method for Drop Test of
Liquid-Filled Plastic Containers Using Finite Element Method

โดย

นายชาคริต สุวรรณจำรัส

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2552

ชาคริต สุวรรณจรัส 2552: การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบ
ปล่อยตกขวดพลาสติกที่บรรจุน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎี
บัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D. 103 หน้า

คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer-Aided Design) และคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์
(Computer-Aided Engineering) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis)
เป็นวิธีการทางวิศวกรรมที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด ใน
อุตสาหกรรมผลิตขวดพลาสติกสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของขวดก่อนนำไป
ผลิตและทดสอบตามมาตรฐานการปล่อยตก (Drop test) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ
การบรรจุของเหลวภายในขวดพลาสติกซึ่งผลิตจากพลาสติก PET (Polyethylene Terephthalate)
ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบปล่อยตก ตามมาตรฐาน ASTM D2463 และใช้วิธีทดสอบทั้งการ
ทดสอบทางกล และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ MSC/DYTRAN การวิเคราะห์ด้วยวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการกำหนดความแม่นยำ และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของการกำหนด
อัลกอริทึมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (fluid-structure interaction algorithm)
ได้มีการนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองความเค้นไหลขึ้นมาใหม่ (σ_{f-STP}) เพื่อ
อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นฮาร์ดเค้นนิ่ง (hardening stress) กับอัตราความเครียด
(strain rate) ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยยังได้นำเสนอขีดจำกัดการวิบัติเพื่อใช้ในการกำหนดความสูง
วิบัติภายใต้มาตรฐานการทดสอบปล่อยตกของขวดพลาสติกขึ้นมาใหม่ ในการจำลองการทดสอบ
ปล่อยตกขวดพลาสติก ขวดพลาสติกจะถูกเติมน้ำเต็มความจุและครึ่งของความจุ แล้วปล่อยตกจาก
ความสูงที่แตกต่างกันสามระดับ (0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร) การใช้สมการร่วมลากรางเจียน-ออย
เลอร์เรียน (Coupling Lagrangian Eulerian) และใช้แบบจำลองความเค้นไหลที่นำเสนอเพื่อหา
ค่าแรงกระแทก และความเครียดที่ผนังขวด พบว่าค่าแรงกระแทกและความสูงที่ขวดแตกจากการ
วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำที่ยอมรับได้ โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของค่าแรง
กระแทกน้อยกว่า 11.49% และมีค่าคลาดเคลื่อนของค่าความสูงวิบัติน้อยกว่า 9.27%

Chakrit Suvanjumrat 2009: Computer Simulation Method for Drop Test of Liquid-Filled Plastic Containers Using Finite Element Method. Doctor of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Tumrong Puttapitukporn, Ph.D. 103 pages.

The Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Engineering (CAE) in cooperated with Finite Element Analysis (FEA) method are the engineering method that plays an important role in designing of many products of the manufacturing industries. In manufacturing of plastic bottle industries, this method can perform to analyze strength of bottles before manufacture and test under drop test standard. This research was focus on the study of impact effects of liquid-filled plastic bottles, made from Polyethylene Terephthalate (PET), under the ASTM D2463 drop test standard using both experiments and the finite element code MSC/DYTRAN. In FEA, the fluid–structure interaction (FSI) algorithms used to specify appropriate boundary conditions were studied and evaluated their computational times and accuracies. The new mathematical equation, known as the flow stress model (σ_{f-STP}) to describe the relationship between hardening stresses and strain rates, was proposed. Additionally, the new failure criterion to determine the failure height under the drop test standard was developed. In our simulations, plastic bottles were filled with water to the full and half capacities. Then, they were released from three different heights (0.5, 1.0, 1.5 m) to determine impact forces and strains on the surface of bottle. With Coupling Lagrangian Eulerian (CLE) and proposed flow stress model, we found that impact forces and failure heights obtained from FEA yielded the accurate and acceptable results. The percent error of impact forces was less than 11.49%. The percent error of failure heights was less than 9.27%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์ กรรมการวิชาเอก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริพร ศศิณทลกุล กรรมการวิชาเอก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือแผ่นวัดแรงสำหรับทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์วรางค์รัตน์ จันทสาโร และรองศาสตราจารย์เอกชัย จันทสาโร กรรมการวิชาเอก ที่ได้ให้คำแนะนำ และเสนอแนวทางในการปรับปรุงระเบียบวิธีของงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ฐิติวรรณ ศรีนาค อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัยดำเนินต่อเนื่อง และแล้วเสร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ธัญญะ เกียรติวัฒน์ สำหรับความกรุณาให้ข้าพเจ้าได้เป็นอาจารย์สอนในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอขอบคุณ คุณเสกสรรค์ สีนบรลือกุล ผู้จัดการฝ่ายพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการของบริษัทปัญญวัฒนาพลาสติก จำกัด สำหรับความกรุณาในการสนับสนุนเพื่อให้ได้จัดซื้อซอฟต์แวร์ใช้ในงานวิจัย และพัฒนางานวิจัยของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL)

ขอขอบคุณ คุณพ่อประสงค์ คุณแม่สมสุข สุวรรณจรัส คุณพ่อไพจิตร คุณแม่รุณี เอี่ยมจรัส คุณนงลักษณ์ สุวรรณจรัส ภรรยาของข้าพเจ้า พี่ชายทั้งสอง น้องชาย และน้องสาวของข้าพเจ้า สำหรับการสนับสนุน และกำลังใจ ในการทำวิจัย การทำวิทยานิพนธ์ และตลอดไป

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกท่านที่เกี่ยวข้อง และทุกท่านที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ จนสามารถทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ชาคริต สุวรรณจรัส

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	27
ผลการทดลองและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก ภาพเอกสารอุปกรณ์ทดสอบ	95
ภาคผนวก ข ตัวอย่างคำสั่งภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN) เพื่อใช้กรณีของ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่ง บรรจุภายใน	98
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของชุดทดสอบ ก ในการทดสอบปล่อยตกเพื่อวัดแรงกระแทก	29
2	ค่าคุณลักษณะของวัสดุ PET ที่อัตราความเครียด 0.00167 ถึง 0.16667 s ⁻¹	44
3	ค่าความเครียดวิบัติ และความเค้นวิบัติของวัสดุ PET ที่อัตราความเครียด 0.00167 ถึง 0.16667 s ⁻¹	44
4	ค่าคงที่ของสมการ (42) ของวัสดุ PET ที่อัตราความเครียด 0.00167 ถึง 0.16667 s ⁻¹	46
5	ค่าคงที่จากการสวมสมการของสมการ (45)	47
6	ตารางแสดงผลการทดสอบปล่อยตกด้วย วิธี Bruceton Staircase	57
7	แสดงค่าแรงกระแทก และเวลาเกิดแรงกระแทก ของการทดสอบทางกล และ FEA ของชุดบรรจุน้ำเต็มความจุ	61
8	แสดงค่าแรงกระแทก และเวลาเกิดแรงกระแทก ของการทดสอบทางกล และ FEA ของชุดบรรจุน้ำครึ่งของความจุ	65
9	ค่าคงที่ของสมการคราก RPL, ZA, JC และ STP	66
10	รายการแสดงค่า และระยะเวลาหน่วงคลื่นของแรงตกกระแทก และความเครียด สูงสุด	76
11	ค่าคงที่ของสมการ stress-strain relation ของวัสดุ PET	81
12	สรุปค่าแรงกระแทกของการทดสอบทางกลจากการปล่อยตกชุดทดสอบ ก	82
13	สรุปข้อดีและข้อเสียของการใช้แบบจำลองการปล่อยตกใน MSC.Dytran	83

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กราฟความเค้น (stress) ความเครียด (strain) จากการดึงขึ้นตัวอย่างพลาสติกหลายชนิด	6
2 กราฟความเค้นจริง (true stress) ความเครียดจริง (true strain) จากการดึงขึ้นตัวอย่างพลาสติก PET อัตราเครียดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C	7
3 กราฟความเค้นจริง (true stress) ความเครียดจริง (true strain) จากการดึงขึ้นตัวอย่างพลาสติก PET อัตราเครียดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90 °C	7
4 ขั้นตอนการยึดของวัสดุโพลีเมอร์	10
5 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกจากผลการทดสอบปล่อยตกขวด	13
6 กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	14
7 ระบบการสัมผัสและกระแทกของวัตถุ 2 ชิ้น	15
8 ระบบการสัมผัสและกระแทก (ก) แบบจำลอง continuum (ข) FEM	17
9 ขวดทดสอบ ก ความจุ 0.5 ลิตร น้ำหนัก 0.032 กิโลกรัม ผลิตจากวัสดุ PET	25
10 อุปกรณ์วัดแรงกระแทก (ก) แผ่นวัดแรง (ข) ชุดอุปกรณ์ควบคุมการขยายสัญญาณ (amplifier controls)	25
11 เครื่องชั่งน้ำหนัก	25
12 เครื่องดึงทดสอบ (tensile test machine) รุ่น H50KS ของบริษัท Tinius Olsen (HOUNSFIELD), USA.	26
13 การ์ด A/D รุ่น PCL-812PG ของบริษัท Advantech, USA. รับได้ 16 ช่องสัญญาณ และส่งได้ 2 ช่องสัญญาณ	26
14 ตัวอย่างชิ้นทดสอบของ PET ซึ่งตัดจากผนังขวดทดสอบ ก	27
15 แสดงตัวอย่างขดติด strain gauges ที่ระดับความสูง 11.70, 66.60 และ 121.51 มิลลิเมตร วัดจากก้นขวด (จุด P1, P2 และ P3)	30
16 ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดความเครียด (strain) จำนวน 8 ช่องสัญญาณ	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด ประกอบด้วย (ก) ขวดติด strain gauges (ข) ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ค) เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (ง) เครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการ์ด A/D ภายใน (จ) จอรับภาพแสดงโปรแกรมบันทึกค่าความต่างศักย์ และ (ฉ) แผ่นวัดแรง	32
18	แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบ ก และแผ่นวัดแรง	34
19	ตำแหน่งการกำหนด Master-Slave algorithm แบบจำลอง FEM	34
20	(ก) แบบจำลอง FEM ของน้ำ (ข) แบบจำลอง FEM ของขวด (ค) แบบจำลอง FEM ของสมการลาگرانเจียน (LE)	35
21	(ก) แบบจำลอง FEM ของขวด (ข) แบบจำลอง FEM ของขอบเขตของไหล (ค) แบบจำลอง FEM ของสมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE)	36
22	(ก) แบบจำลอง FEM ของน้ำ (ข) แบบจำลองเอลิเมนต์ร่วม (ค) แบบจำลอง FEM ของขวด (ง) แบบจำลอง FEM ของสมการอาร์บิทารี ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE)	37
23	แสดงตำแหน่งเอลิเมนต์ของน้ำ และอากาศของแบบจำลอง FEM ของของไหล (ก) FEM ของของไหลสำหรับ LE และ ALE (ข) FEM ของของไหลสำหรับ CLE	38
24	แสดงตำแหน่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของขวดที่ตรงกับตำแหน่งติด strain gauges ในระดับตำแหน่ง P1, P2 และ P3 ของขวดทดสอบจริง ตามลำดับ	40
25	(ก) ตำแหน่งของเอลิเมนต์ P11 ถึง P18 รอบแกนขวด (ข) ภาพ top view ของขวดแสดงมุมของเอลิเมนต์ P11 ถึง P18	41
26	แสดงลักษณะการยึดของชิ้นทดสอบซึ่งตัดมาจากผนังขวดทดสอบ ก	42
27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริง (true stress-strain curve) ของวัสดุ PET จากการดึงทดสอบที่อัตราความเครียด 4 ค่า	43
28	แสดงคุณลักษณะของวัสดุ PET จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริงของการทดสอบดึง	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิบัติกับอัตราความเครียดจริงของวัสดุ PET จากการดึงทดสอบ	45
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดวิบัติกับอัตราความเครียดจริงของวัสดุ PET จากการดึงทดสอบ	45
31	กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงความเครียดจริงของวัสดุ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการ (42) ของอัตราความเครียด 4 ค่า	46
32	กราฟแสดงผลความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์จากผลการแทนค่าในสมการ (42) ของอัตราความเครียด 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s ⁻¹	46
33	กราฟความเค้นจริงความเครียดจริงของวัสดุ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการ (51) ของอัตราความเครียด 4 ค่า	48
34	กราฟแสดงผลความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ของผลการแทนค่าในสมการ (51) ของอัตราความเครียด 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s ⁻¹	48
35	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบเปล่า (ไม่บรรจุน้ำ) ปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร	49
36	ผลการปลอยตกขวดทดสอบ ก บรรจุน้ำครึ่งความจุปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร	50
37	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร	50
38	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปลอยตกจากความสูง 1.0 เมตร	51
39	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปลอยตกจากความสูง 1.5 เมตร	51
40	ผลการปลอยตกขวดทดสอบ ก บรรจุน้ำเต็มความจุปลอยตกจากความสูง 1.0 เมตร	52
41	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร	52
42	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปลอยตกจากความสูง 1.0 เมตร	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร	53
44	ผลการปล่อยตกของขวดทดสอบ ก บรรจุน้ำเต็มความจุและติด strain gauge ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	54
45	ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุและติด strain gauge ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	55
46	ผลการบันทึกค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุที่จุด P1 ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร (เฉพาะการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 3)	55
47	ผลการบันทึกค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุที่จุด P2 ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	56
48	ผลการบันทึกค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุที่จุด P3 ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	56
49	ขวดทดสอบ ก ที่ถูกทดสอบปล่อยตกการแตกจะเกิดขึ้นที่ก้นขวด	57
50	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	58
51	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร	59
52	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร	59
53	ผลของน้ำบรรจุภายใน (sloshing) การยุบตัวของผนัง (deformation) และค่าความเค้นที่ผนังของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุของแบบจำลอง (ก) LE (ข) CLE และ (ค) ALE ณ เวลาที่ขวดกระแทกกับพื้นจากความสูง 1.0 เมตร	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
54 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกระหว่าง ค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของการปล่อยตกขวดทดสอบ บรรจุน้ำเต็มความจุ	61
55 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการ ทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยตกจาก ความสูง 0.5 เมตร	62
56 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการ ทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยตกจาก ความสูง 1.0 เมตร	63
57 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการ ทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยตกจาก ความสูง 1.5 เมตร	63
58 ผลของน้ำบรรจุภายใน (sloshing) การยุบตัวของผนัง (deformation) และค่าความ เค้นที่ผนังของขวดบรรจุน้ำครึ่งความจุของแบบจำลอง LE, CLE และ ALE ณ เวลาที่ขวดกระแทกกับพื้นจากความสูง 0.5 เมตร	64
59 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (Impact Force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกระหว่าง ค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของการปล่อยตกขวดทดสอบ บรรจุน้ำครึ่งของความจุ	65
60 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของ PET เปรียบเทียบระหว่างผล การทดสอบกับแบบจำลอง RPL ที่อัตราความเครียด 4 ค่า	67
61 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของ PET เปรียบเทียบระหว่างผล การทดสอบกับแบบจำลอง ZA ที่อัตราความเครียด 4 ค่า	67
62 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของ PET เปรียบเทียบระหว่างผล การทดสอบกับแบบจำลอง JC ที่อัตราความเครียด 4 ค่า	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
63	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	68
64	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร	69
65	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร	69
66	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุ	70
67	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเค้นนิ่งของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	70
68	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเค้นนิ่งของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร	71
69	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเค้นนิ่งของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร	71
70	การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเค้นนิ่งของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุ	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
71	แสดงผลการเคลื่อนที่ของน้ำภายในแบบจำลองขวด จากการปล่อยตกความสูง 0.5 เมตร ที่เวลา (ก) 0.5453 วินาที (ข) 0.5468 วินาที (ค) 0.5493 วินาที และ (ง) 0.5532 วินาที	73
72	แสดงผลความเครียด (strain) บริเวณผนังแบบจำลองขวด จากการปล่อยตกความสูง 0.5 เมตร ที่เวลา (ก) 0.5453 วินาที (ข) 0.5468 วินาที (ค) 0.5493 วินาที และ (ง) 0.5532 วินาที	73
73	แสดงผลความเค้น (stress) บริเวณผนังแบบจำลองขวด จากการปล่อยตกความสูง 0.5 เมตร ที่เวลา (ก) 0.5453 วินาที (ข) 0.5468 วินาที (ค) 0.5493 วินาที และ (ง) 0.5532 วินาที	73
74	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยแรงกระทำเทียบกับเวลาของขวดบรรจุน้ำ 5 ใบ กับผลวิเคราะห์ FEA จากการปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร	74
75	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาที่จุด P1 ของขวดบรรจุน้ำกับผลวิเคราะห์ FEA จำนวน 8 เอลิเมนต์ จากการปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร	75
76	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาที่จุด P2 ของขวดบรรจุน้ำกับผลวิเคราะห์ FEA จำนวน 8 เอลิเมนต์ จากการปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร	75
77	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาที่จุด P3 ของขวดบรรจุน้ำกับผลวิเคราะห์ FEA จำนวน 8 เอลิเมนต์ จากการปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร	76
78	การเปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) สูงสุดกับตำแหน่งความสูงของขวดระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับค่าเฉลี่ยของการวิเคราะห์ FEA ที่จุด P1, P2 และ P3 ของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร	77
79	ผลการสวมสมการ (52) เปรียบเทียบกับค่าความเครียดวิบัติของการทดสอบทางกลของอัตราความเครียด 4 ค่า	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
80	ค่าความเค้นสูงสุด และอัตราเครียดสูงสุดของผนังขวดที่เกิดขึ้นจากการจำลองการทดสอบปล่อยตกที่ความสูง 3.00, 3.50, 4.00, 4.25, 4.50 และ 5.00 เมตร	79
81	ผลการวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการทดสอบปล่อยตกจากระดับความสูง 3.00, 3.50, 4.00, 4.25, 4.50 และ 5.00 เมตร	80
82	แสดงวิธีการหาความสูงการแตกของขวดด้วยผลของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	80
83	แสดงอัตราส่วนของแรงกระแทกต่อน้ำหนักที่ความสูง 0.5 เมตร ถึง 1.5 เมตร	83
ภาพผนวกที่		
ก1	ภาพแสดงรายละเอียดของชิ้นทดสอบโพลิเมอร์	96
ก2	แผ่นข้อมูล (data sheet) ของ strain gauge รุ่น KFG-1-120-C1-11L1M2R	97

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ_{f-STP}	=	แบบจำลองความเค้นไหลดของ Suvanjumrat-Thusneyapan-Puttapitukporn
σ_{f-RPL}	=	แบบจำลองความเค้นไหล Rate Power Law
σ_{f-ZA}	=	แบบจำลองความเค้นไหลของ Zerrilli-Armstrong
σ_{f-JC}	=	แบบจำลองความเค้นไหลของ Johnson-Cook
${}^t\overline{\Omega}^n$	=	โดเมนของวัตถุชิ้นที่ n ณ เวลา t ใดๆ
tb_i	=	ส่วนประกอบของเวกเตอร์ body force (tb)
ta_i	=	ส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร่ง (ta)
$\frac{\partial(-)}{\partial(-)}$	=	อนุพันธ์ย่อย
$div(-)$	=	ไดเวอร์เจนซ์ (divergence)
MPDRL	=	Mechanical and Product Design Research Laboratory
A/D	=	Analog to Digital
ch	=	channel
MSC	=	Macneal-Schwendler Corporation
$MAX(-)$	=	ค่าสูงสุดของค่าในภายในวงเล็บ
%Failure	=	percentage failure
$\sum$	=	สัญลักษณ์แทนผลรวม
PP	=	โพลีโพรพิลีน (polypropylene)
LDPE	=	โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene)
$\ln$	=	ลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm)
$\in$	=	สัญลักษณ์แทนการเป็นสมาชิก
ρ	=	ความหนาแน่น (density)
u	=	ความเร็วในทิศทางแกน x
v	=	ความเร็วในทิศทางแกน y
w	=	ความเร็วในทิศทางแกน z
T	=	อุณหภูมิ
λ	=	second viscosity coefficient
$det (-)$	=	ดีเทอร์มิแนนต์ (determinant)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

e_{tot}	=	total energy
p	=	แรงดัน (pressure)
P	=	point
	=	สัญลักษณ์แสดงค่ากึ่งกลางเป็นค่าเฉลี่ย ค่าบนเป็นค่ามากที่สุด และค่าล่างเป็นค่าน้อยที่สุด
$e_{\%}$	=	ค่าเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน
Exp.	=	Experiment
σ_{fail}	=	failure stress
ε_{fail}	=	failure strain

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบปล่อยตกขวดพลาสติกที่ บรรจุน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Computer Simulation Method for Drop Test of Liquid-Filled Plastic Containers Using Finite Element Method

คำนำ

ขวดพลาสติกถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน และในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยใช้ในการบรรจุของเหลว เช่น น้ำดื่ม เครื่องสำอาง น้ำมัน และสารเคมี เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วขวดพลาสติกเหล่านี้ มีกรรมวิธีการผลิตโดยวิธีการเป่าขึ้นรูป (blow molding) ซึ่งใช้โพลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) หรือ โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) เป็นวัสดุสำหรับผลิต ภายหลังผลิตขวดจะถูกสุ่มตามวิธีการประกันคุณภาพเพื่อนำมาทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงวิธีหนึ่ง คือ การปล่อยตก (drop test) เพื่อคุณภาพด้านความปลอดภัย ของลูกค้าในการใช้งาน และการขนส่ง

ปัจจุบันโรงงานผลิตขวดและกระป๋องพลาสติกภายในประเทศสามารถนำเทคโนโลยีทางวิศวกรรม โดยการใช้วิธีคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer-Aided Design, CAD) และวิธีคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ (Computer-Aided Engineering, CAE) ซึ่งความต้องการหลักของโรงงานคือการผลิตขวดพลาสติกให้มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบสากล และมีความต้องการที่สูงขึ้นคือการใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมที่มีอยู่เพื่อเข้าสู่ตลาดการแข่งขันออกแบบและผลิตขวดต่างประเทศ เช่น ตลาดการออกแบบและผลิตกระป๋องน้ำมันเครื่อง การวิเคราะห์ความแข็งแรงของขวดโดยใช้เทคโนโลยีที่มีในปัจจุบัน สามารถใช้ได้เฉพาะวิธีสถิตศาสตร์ (static) กับการทดสอบแรงดัน (pressure test) และการทดสอบภาระด้านบน (top load test) ซึ่งเป็นการจำลองการทดสอบขวดนอกเหนือจากการทดสอบปล่อยตก ในการจำลองการทดสอบปล่อยตก การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบพลศาสตร์ (dynamics) ซึ่งมีความซับซ้อนของปัญหาเนื่องจากตัวแปรของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองการทดสอบปล่อยตกของขวดทดสอบบรรจุน้ำ ศึกษาและวิเคราะห์เพื่อกำหนดสภาวะขอบเขต (boundary condition) ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะการทดสอบทางกล (mechanical test) ประกอบด้วย สภาวะขอบเขตแบบสัมผัสและกระแทก (contact-impact) สภาวะขอบเขตแบบการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของแข็งกับของเหลว (fluid-structure interaction) และได้มีการประดิษฐ์สมการทางคณิตศาสตร์แสดงพฤติกรรมทางกลของวัสดุ เพื่อใช้กับแบบจำลองของขวดพลาสติก

แบบจำลองของการปล่อยตกขวดพลาสติกบรรจุน้ำที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของรูปทรงของขวดในการออกแบบ ความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการผลิต ใช้กำหนดความหนาของผนังขวดก่อนการผลิตจริง และใช้ลดน้ำหนักหรือต้นทุนวัตถุดิบ ทำให้ลดความสิ้นเปลืองของพลังงาน ทรัพยากร และสิ่งแวดล้อมภายในประเทศ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพการผลิตภาชนะบรรจุของเหลวภายในประเทศให้เป็นที่ยอมรับแก่ผู้บริโภคทั่วโลก

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain relation) ในช่วงยืดหยุ่นพลาสติกของพลาสติก (elasto-plastic) เพื่อใช้ในการจำลองการปล่อยดกขวดพลาสติก
2. ทำการศึกษาและวิเคราะห์ทฤษฎีพฤติกรรมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลภายในขวดพลาสติก ที่มีผลต่อการจำลองการปล่อยดกโดยใช้ CAE เพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณ
3. ทำการศึกษาระบวนการบันทึกผลการทดสอบปล่อยดกขวดพลาสติก
4. วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ FEA และการทดสอบ

การตรวจเอกสาร

1. คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

1.1 การทดสอบดึง (tensile test)

วิธีการหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุประเภทโพลิเมอร์ (polymer) เช่น พลาสติก นิยมใช้วิธีการดึงทดสอบ (tensile test) มีมาตรฐานเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกด้วยวิธีการดึง ประกอบด้วย International Organization for Standardization (ISO) 527-1 และ ISO 527-2 และ American Society for Testing Material (ASTM) D638 และ D882 และมีวิธีกำหนดคุณสมบัติทางกลของพลาสติกที่ได้จากการดึงด้วยความเร็วคงที่ ระหว่าง 1 ถึง 500 mm/min โดยเลือกใช้ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งขึ้นกับชนิดของชิ้นทดสอบ (ภาคผนวกที่ ก1) ประกอบด้วย

ความเค้นทางวิศวกรรม (engineering stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (engineering strain) แสดงด้วยสมการ (ASTM D638)

$$\sigma = \frac{W}{A_0} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นทางวิศวกรรม (engineering stress)
 W คือ แรงที่ใช้ดึง (load)
 A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

และ
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(l - l_0)}{l_0} \quad (2)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดทางวิศวกรรม (engineering strain)
 l คือ ความยาวใดๆ ของชิ้นทดสอบระหว่างการยืด
 l_0 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น
 Δl คือ ความยาวของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนแปลงจากการดึง

ความเค้นจริง (true stress) และความเครียดจริง (true strain) แสดงด้วยสมการ (ASTM D638)

$$\sigma_T = \frac{W}{A} \quad (3)$$

เมื่อ σ_T คือ ความเค้นจริง (true stress)
 W คือ แรงที่ใช้ดึง (load)
 A คือ พื้นที่หน้าของชิ้นทดสอบที่เวลาใด ๆ

และ
$$\varepsilon_T = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (4)$$

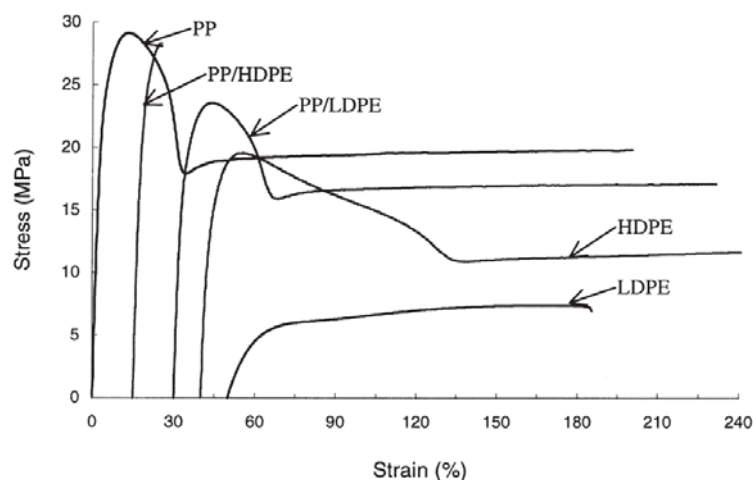
เมื่อ ε_T คือ ความเครียดจริง (true strain)
 l คือ ความยาวใดๆ ของชิ้นทดสอบระหว่างการยืด
 l_0 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริงในพจน์ของความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมสามารถแสดงด้วยสมการ (ASTM D638)

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) = \sigma\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_T = \ln\left(\frac{l_0 + l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6)$$

โพลิเมอร์ประเภทพลาสติก เช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) และ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) จะมีพฤติกรรมที่ได้จากการทดสอบแรงดึง โดยใช้สมการคำนวณค่าความเค้นและความเครียดแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 1 พลาสติกกลุ่มนี้จะมีการยืดมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ และมีจุดคราก (yield point) แสดงให้เห็นได้ชัดเจน (Tai *et al.*, 2000) และ (Shinoda and Bathurst, 2004)



ภาพที่ 1 กราฟความเค้น (stress) ความเครียด (strain) จากการดึงขึ้นตัวอย่างพลาสติกหลายชนิด

ที่มา: Tai *et al.* (2000)

1.2 อัตราความเครียด (strain rate)

ความเร็วในการดึงถูกกำหนดให้มีค่าขึ้นกับคุณสมบัติการยืดของพลาสติก เช่น ยืดน้อยกว่า 20 เท่าให้ใช้อัตราความเครียด (strain rate) 0.1 min^{-1} (ASTM D882) โดยสามารถคำนวณค่าของอัตราความเครียดด้วยสมการ

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{l_0} \quad (7)$$

เมื่อ

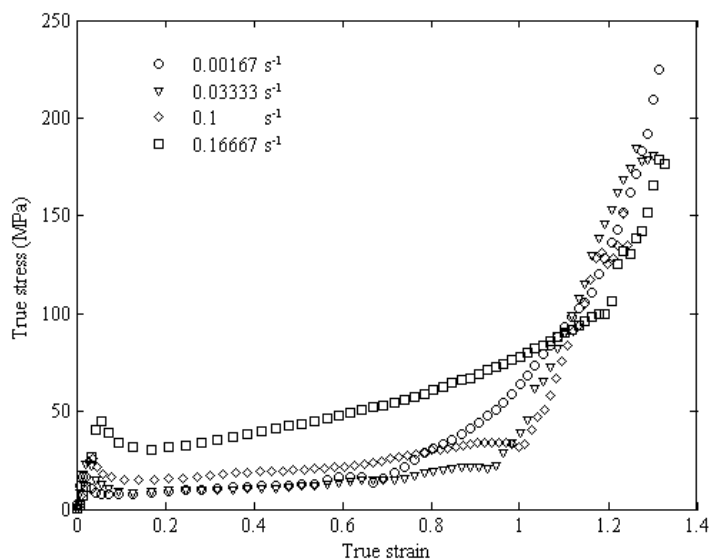
$\dot{\epsilon}$ คือ อัตราความเครียด (strain rate)

V คือ ความเร็วในการดึง

l_0 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น

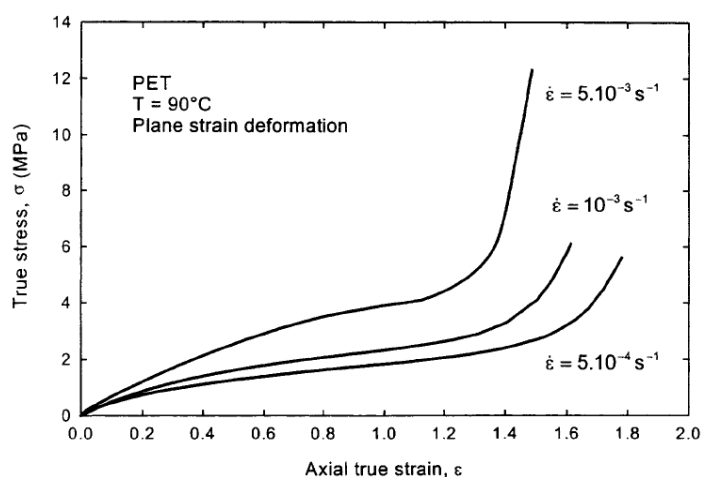
พลาสติกชนิด PET จะแสดงให้เห็นผลกระทบเนื่องมาจากการเปลี่ยนความเร็วในการดึง โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการดึงให้สูงขึ้น (อัตราความเครียดสูงขึ้น) จะทำให้ค่าความเค้นสูงขึ้นที่ความเครียดเดียวกัน (Suvanjumrat *et al.*, 2007, 2008) แสดงในภาพที่ 2 ที่อุณหภูมิทดสอบ 25°C และมีผลกระทบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Buckley

et al., 1996), (Vigny *et al.*, 1999) และ (Matthews *et al.*, 2000) แสดงในภาพที่ 3 ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (90 °C) จุดครากของ PET จะไม่ปรากฏให้เห็น



ภาพที่ 2 กราฟความเค้นจริง (true stress) ความเครียดจริง (true strain) จากการดึงขึ้นตัวอย่างพลาสติก PET อัตราเครียดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C

ที่มา: Suvanjumrat *et al.* (2007, 2008)



ภาพที่ 3 กราฟความเค้นจริง (true stress) ความเครียดจริง (true strain) จากการดึงขึ้นตัวอย่างพลาสติก PET อัตราเครียดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90 °C

ที่มา: Vigny *et al.* (1999)

2. แบบจำลองความเค้นความเครียด (stress-strain model) ของวัสดุ

แบบจำลองความเค้นความเครียด (stress-strain model) ที่ใช้แสดงพฤติกรรมการยืดของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิห้อง (25 °C) โดยแบ่งพฤติกรรมการยืดของวัสดุออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่น (elasticity) และช่วงพลาสติก (plasticity) แสดงด้วยสมการ (Mendelson, 1968) และ (Chakrabarty, 2006)

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (8)$$

และ

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_y \\ \sigma_h(\varepsilon), & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (9)$$

เมื่อ ε_t คือ ความเครียดในช่วงของการยืดทั้งหมด
 ε_e คือ ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น
 ε_p คือ ความเครียดในช่วงพลาสติก
 E คือ ค่าของยังก์โมดูลัส (Young's Modulus)
 $\sigma_h(\varepsilon)$ คือ ฟังก์ชันที่ความเค้นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเครียดมากกว่าความเครียดที่จุดคราก (yield point) หรือ ความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่ง (hardening stress)
 ε_y คือ ความเครียดที่จุดคราก

3. แบบจำลองคราก (yield model) และแบบจำลองความเค้นไหล (flow stress model) ของวัสดุ

วัสดุพลาสติกชนิด PET มีพฤติกรรมการยืดเปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน แบบจำลองคราก (yield model) ที่ใช้แสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของจุดคราก (yield point) ไม่คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียด หรือความเร็วที่ใช้ดึง แสดงด้วยสมการความสัมพันธ์

$$\sigma_y = \sigma_y(\dot{\varepsilon}) \quad (10)$$

เมื่อ σ_y คือ ความเค้นที่จุดคราก (yield stress)

แบบจำลองครากของ Cowper-Symonds (Li and Jones, 2000) ถูกบรรจุไว้ในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran แสดงด้วยสมการ

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \quad (11)$$

เมื่อ σ_y คือ ความเค้นที่จุดคราก (yield stress)
 σ_{y0} คือ ความเค้นที่จุดครากของอัตราความเครียดเริ่มต้น
 D, P คือ ค่าคงที่

แบบจำลองความเค้นไหล (flow stress model) ของวัสดุถูกประดิษฐ์เพื่อใช้แสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีพฤติกรรมของความเค้นเมื่อความเครียดผ่านจุดคราก หรือความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่งของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงตามความเครียดที่มากขึ้น และเปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียด หรือความเร็วที่ใช้ดึง (Banerjee, 2005) แบบจำลองที่มีความเค้นเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้แสดงด้วยสมการ

$$\sigma_f = \sigma_f(\epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (12)$$

เมื่อ σ_f คือ ความเค้นไหล (flow stress)

แบบจำลองความเค้นไหลที่มีใช้กับวิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis) และถูกบรรจุไว้ในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran ประกอบด้วย

แบบจำลอง Rate Power Law (RPL) แสดงด้วยสมการ (MSC.Software corp. (MSC), 2005a)

$$\sigma_{f-RPL} = \text{MAX}(C, A + B\epsilon^n \dot{\epsilon}^m) \quad (13)$$

แบบจำลองของ Zerilli-Armstrong (ZA) แสดงด้วยสมการ (MSC, 2005a)

$$\sigma_{f-ZA} = (A + B\epsilon^n) e^{[C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)]} \quad (14)$$

แบบจำลองของ Johnson-Cook (JC) แสดงด้วยสมการ (MSC, 2005a)

$$\sigma_{f-JC} = (A + B\varepsilon^n)[1 + C \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)] \quad (15)$$

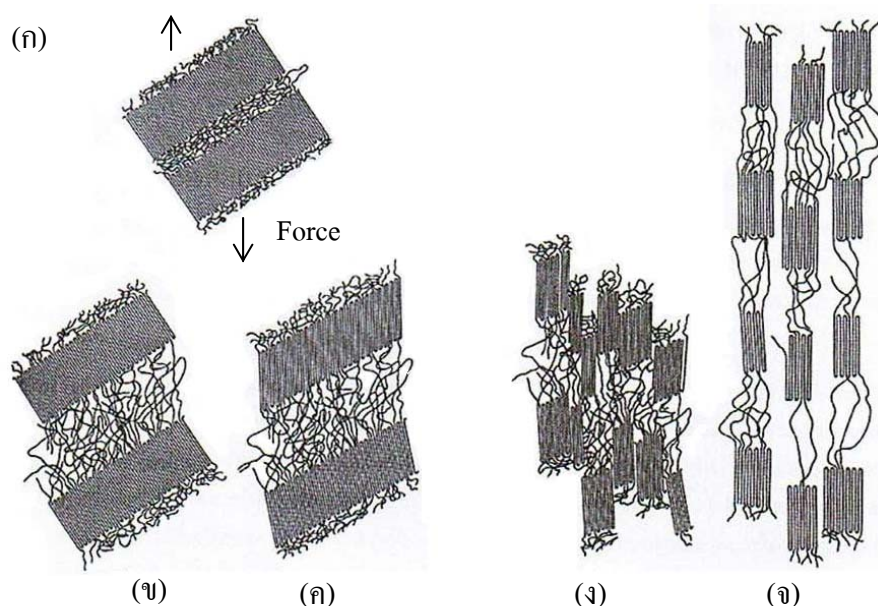
เมื่อ $\dot{\varepsilon}_0$ คือ อัตราความเครียดเริ่มต้น

A และ B คือ ค่าคงที่

C, m และ n คือ จำนวนจริงใดๆ

4. ขีดจำกัดการวิบัติ (failure criteria) ของวัสดุ

วัสดุชนิดโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semicrystalline polymers) มีการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นเส้นสายยาว (chain) พับซ้อนกันเป็นชั้นๆ เมื่อมีแรงกระทำ จะทำให้วัสดุชนิดนี้เกิดการยืดตัวตามทิศทางของแรงกระทำ โดยมีลักษณะการยืดตัวแสดงในภาพที่ 4 ชั้นของโพลิเมอร์จะคลายออก (ภาพที่ 4ก ถึง 4ง) และฉีกขาดจากกันเมื่อสิ้นสุดความยาวของเส้นสายยาวในภาพที่ 4จ (Callister, 2007)



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการยืดของวัสดุโพลิเมอร์เมื่อมีแรงกระทำ

ที่มา: Callister (2007)

การวิบัติ (failure) ของวัสดุสามารถแสดงได้ด้วยการทดสอบดึงขึ้นทดสอบจนขาด ค่าความเค้นและความเครียดสุดท้ายที่วัสดุขาดออกจากกัน คือ ค่าความเค้นวิบัติ (failure stress, σ_{fail}) และค่าความเครียดวิบัติ (failure strain, ϵ_{fail}) ขีดจำกัดการวิบัติของวัสดุ (failure criteria) ที่มีการยึดจนเข้าสู่ช่วงพลาสติกของวัสดุ สามารถกำหนดด้วยแบบจำลองความเครียดวิบัติคงที่ (constant failure strain) โดยกำหนดค่าความเครียดวิบัติเป็นขีดจำกัดการวิบัติของวัสดุ (MSC, 2005a และ Teng and Wierzbicki, 2006) เมื่อค่าความเค้นวิบัติมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบๆ

5. การทดสอบปล่อยตก (drop test) ภาชนะบรรจุของเหลว

จุดประสงค์ของการใช้วิธีทดสอบโดยการปล่อยตก (drop test) ผลิตรักษัชนิคภาชนะสำหรับบรรจุ (containers) เช่น ถัง ก่อ ถัง กระสอบ กระป๋อง และขวด เพื่อต้องการวิเคราะห์ผลกระทบจากกระบวนการผลิต เช่น คุณภาพของวัสดุ คุณภาพของการผลิต และการออกแบบวิธีการทดสอบทำได้โดยนำผลิตภัณฑ์ไปปล่อยตกอิสระจากระดับความสูงที่กำหนดเพื่อวิเคราะห์ความทนทานต่อแรงกระแทก (impact force) สำหรับกระป๋องและขวดพลาสติกนั้นการทดสอบปล่อยตกจะมีวิธีการทดสอบโดยใช้มาตรฐานการทดสอบของ ASTM D2463 และ The Society of The Plastic Industry RPCD-7-1991 ซึ่งมีวิธีการทดสอบปล่อยตก 2 วิธี คือ 1. Static Drop Height และ 2. Bruceton Staircase เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดความปลอดภัย และคุณภาพของขวดและกระป๋องสำหรับบรรจุของเหลวเมื่อถูกนำไปใช้งาน ให้กับผู้บริโภค

วิธี Static Drop Height ทำได้โดยนำขวดจำนวนหนึ่ง เช่น 20 ใบ จากการสุ่ม บรรจุแล้วนำไปปล่อยให้ตกอิสระจากความสูงที่ถูกกำหนด เมื่อขวดถูกทดสอบทั้งหมด ผลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการหาสัดส่วนระหว่างขวดบรรจุที่ทดสอบแล้วแตกต่อขวดบรรจุที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด โดยคำนวณเป็น percentage failure จากผลการทดสอบปล่อยตกจากสมการ

$$\%Failure = (X / N) \times 100 \quad (16)$$

เมื่อ

X คือ จำนวนขวดที่ทดสอบแล้วแตก

N คือ จำนวนขวดที่นำมาทดสอบทั้งหมด

วิธี Bruceton Staircase ทำได้โดยนำขวดจำนวนหนึ่ง เช่น 20 ใบ จากการสุ่ม บรรจุน้ำแล้วนำไปปล่อยให้ตกอิสระจากความสูงที่ถูกกำหนดให้เป็นความสูงเริ่มต้น หากขวดถูกทดสอบแล้วไม่แตกให้เพิ่มความสูงขึ้นไปอีกหนึ่งระดับสำหรับทดสอบขวดใบต่อไป หากขวดถูกทดสอบแล้วแตกให้ลดความสูงลงมาอีกหนึ่งระดับสำหรับทดสอบขวดใบต่อไป ทำเช่นนี้ไปจนครบจำนวนขวดที่ถูกสุ่มนำมาทดสอบ ผลการทดสอบจะถูกนำไปใช้หาความสูงเฉลี่ยของการแตก (mean failure height) เพื่อกำหนดความสามารถทนทานต่อการปล่อยตกของขวด โดยบอกเป็นค่าความสูงเฉลี่ยการแตกของขวด และค่าความเบี่ยงเบน (standard deviation) แสดงในสมการข้างล่างพร้อมตัวอย่างการคำนวณในภาพที่ 5

$$h = h_0 + d[(A/N) \pm 1/2] \quad (17)$$

เมื่อ $A = \sum_{i=0}^{i=k} in_i \quad (18)$

และ $s = 1.620d \frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \quad (19)$

เมื่อ $B = \sum_{i=0}^{i=k} i^2 n_i \quad (20)$

โดย h คือ ความสูงเฉลี่ยการแตกของขวด
 N คือ จำนวนขวดที่ถูกทดสอบแล้วแตกหรือไม่แตกที่ความสูงในการปล่อยตกใดๆ
 d คือ ช่วงกว้างของความสูงใดๆ
 h_i คือ ตำแหน่งของความสูงใดๆ โดยเริ่มต้นที่ h_0
 h_0 คือ ตำแหน่งความสูงต่ำสุดของการปล่อยตกที่มีทั้งขวดแตกและไม่แตก
 i คือ เลขจำนวนเต็มที่ใช้กำกับตำแหน่งความสูง (0, 1, 2, ..., i)
 n_i คือ จำนวนขวดที่ถูกทดสอบแล้วแตก (n_x) และขวดที่ไม่แตก (n_o)
 s คือ ค่าความเบี่ยงเบนของความสูงเฉลี่ยการแตกของขวด

TABLE X1.1 Procedure B

Drop Height, ft	Outcome of Test (X = failure; 0 = non-failure)																				n_x	n_o	i	n_i	in_i	$\hat{p}n_i$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
5	0				0		0												0		0	4	...	...	...	...
6		0		X		X		0		0				0					X		4	4	0	4	0	0
7			X						X		0		X		0			X			4	2	1	4	4	4
8												X				X					2	0	2	2	4	8
Totals																					10 (N_x)	10 (N_o)	...	10 (N)	8 (A)	12 (B)

Ten failed and ten did not fail so either failures or non-failures may be used in the calculation. This illustration has been based on failures (negative sign used).

$$\begin{aligned}
 h_o &= 6, N = N_x = 10, d = 1 \\
 h &= h_o + d(A/N - 1/2) \\
 h &= 6 + 1(8/10 - 1/2) = 6.3 \text{ ft} \\
 s &= 1.62d((NB - A^2/N^2) + 0.029) \\
 s &= (1.62)(1)((10)(12) - (8)(8)/(10) + 0.029) = 0.95 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

ภาพที่ 5 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกจากผลการทดสอบปล่อยตกขวด

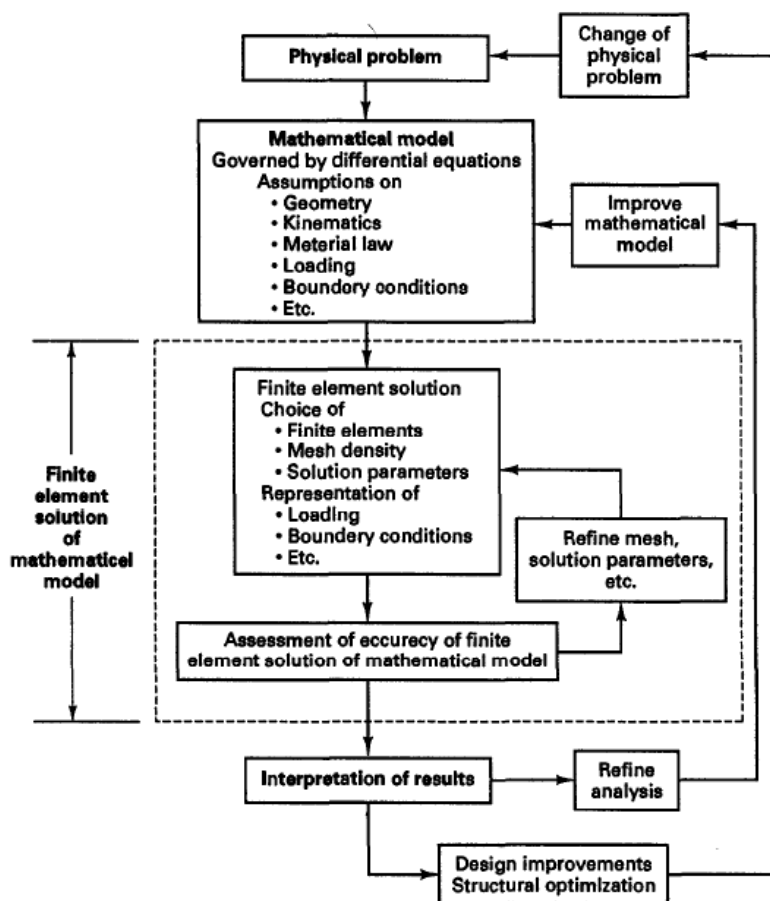
ที่มา: American Society for Testing Material D2463-95

6. วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบปล่อยตกภาชนะที่บรรจุของเหลว

วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีหาผลเฉลยของปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในการแก้ปัญหา ภาพที่ 6 แสดงแผนภาพสรุปกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองการทดสอบปล่อยตกภาชนะบรรจุของเหลว โดยเริ่มต้นจากปัญหาทางฟิสิกส์ (physical problem) ที่สอดคล้องกับสถานะการทดสอบปล่อยตก ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้าง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตขวด แรงกระแทกกระทำขณะตก กระแทกกับพื้น สถานะของการบรรจุน้ำ และสถานะแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิขณะทดสอบ โดยปัญหาทางกายภาพทั้งหมดอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาผลเฉลย ซึ่งผลเฉลยที่ได้จะเป็นที่น่าเชื่อถือเมื่อมีความแม่นยำของผลเฉลย โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากปัญหาทางกายภาพของการทดสอบปล่อยตก ซึ่งหากมีความคลาดเคลื่อนเกินกว่าที่จะยอมรับได้ จะต้องมีการปรับปรุง หรือแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และถ้าหากได้ผลเป็นที่น่าสนใจ วิธีการที่ใช้สามารถนำไปหาจุดเหมาะสม (optimization) ของปัญหาทางกายภาพ เช่น ความหนาของขวด หรือรูปร่างของขวดที่เหมาะสมได้ต่อไป

งานวิจัยของ ชาคริต (2546) และ สัจจาทิพย์และคณะ (2546) ได้ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระป๋องใส่น้ำมันเครื่องสำหรับการทดสอบปล่อยตก ซึ่งมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากงานวิจัยทั้งสองมีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบสถิตศาสตร์ (static) และผลทดสอบทางกลที่ใช้เปรียบเทียบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์มีเพียงความแข็งแรงของกระป๋องจากผลการ

ทดสอบปล่อยตกเท่านั้น โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติการฉีกขาดของวัสดุกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 6 กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ที่มา: Bath (1996)

7. ปัญหาการสัมผัสและกระแทก (contact-impact problems)

การสัมผัสและกระแทก (contact-impact) เป็นปรากฏการณ์ทางด้านพลศาสตร์ที่ซับซ้อน มีผลในกระบวนการผลิต และมีผลต่ออุตสาหกรรมการออกแบบผลิตภัณฑ์ จึงได้มีการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การสัมผัสและกระแทกของวัตถุขึ้น การกระแทกกันของวัตถุตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไปถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Gilardi and Sharf, 2002) สำหรับการทดสอบปล่อยตกปัญหาการสัมผัส

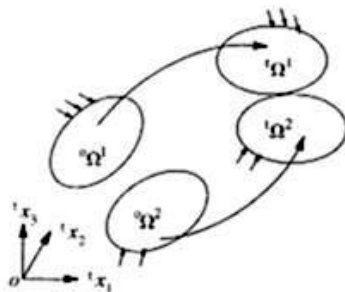
และกระแทกเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นโดยตรง ปรากฏการณ์การสัมผัสและกระแทกจะเกิดขึ้นขณะที่วัตถุซึ่งบรรจุน้ำกระแทกกับพื้น และมีแรงกระแทกกระทำที่จุดสัมผัส

ปรากฏการณ์การกระแทกระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น สามารถแสดงเป็นระบบได้ในภาพที่ 7 วัตถุชิ้นที่ 1 และ 2 มีขอบเขต (boundary) ${}^0\Gamma^1$ และ ${}^0\Gamma^2$ อยู่ในโดเมน (domain) ${}^0\bar{\Omega}^1$ และ ${}^0\bar{\Omega}^2$ ณ เวลาเริ่มต้น $t = 0$ มีพิกัดอ้างอิงติดอยู่กับที่ ${}^t x_1$, ${}^t x_2$ และ ${}^t x_3$ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำวัตถุทั้ง 2 ชิ้นให้เคลื่อนที่เข้าปะทะกันที่เวลา $t > 0$ โดเมนและขอบเขตของวัตถุชิ้นที่ 1 และ 2 จะเปลี่ยนเป็น ${}^t\bar{\Omega}^1$, ${}^t\bar{\Omega}^2$ และ ${}^t\Gamma^1$, ${}^t\Gamma^2$ ตามลำดับ (Zhong, 1993) เพื่อให้สามารถเข้าใจระบบได้ง่าย ปรากฏการณ์ที่ได้สามารถแสดงได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงเวลา $[0, T]$ โดเมนของวัตถุประกอบด้วยปริมาตรภายใน (interior volume) และขอบเขต แสดงได้ด้วยสมการ

$${}^t\bar{\Omega}^n = {}^t\Omega^n \cup {}^t\Gamma^n \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2 \quad (21)$$

และ
$${}^t\Gamma^n = {}^t\Gamma_D^n \cup {}^t\Gamma_F^n \cup {}^t\Gamma_C^n \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2 \quad (22)$$

เมื่อ ${}^t\Omega^n$ คือ ปริมาตรภายใน (interior volume)
 ${}^t\Gamma^n$ คือ ขอบเขตทั้งหมดของวัตถุ (total boundary)
 ${}^t\Gamma_D^n$ คือ ขอบเขตการเคลื่อนที่ (displacement boundary)
 ${}^t\Gamma_F^n$ คือ ขอบเขตการรับภาระ (load boundary)
 ${}^t\Gamma_C^n$ คือ ขอบเขตที่เกิดปรากฏการณ์สัมผัสและกระแทก (contact-impact boundary)



ภาพที่ 7 ระบบการสัมผัสและกระแทกของวัตถุ 2 ชิ้น

ที่มา: Zhong (1993)

7.1 สภาวะการเกิดการสัมผัสและกระแทก (contact-impact condition)

สมการการเคลื่อนที่ของปัญหาการสัมผัสและกระแทก (equation of motion) จะขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นปัญหาทางด้านพลศาสตร์ (dynamics) สามารถแสดงได้ด้วยสมการพื้นฐาน (Zhong, 1993) และ (Quin and He, 1995)

$$\frac{\partial^t \sigma_{ji}}{\partial^t x_j} + {}^t b_i = {}^t \rho^t a_i \quad \text{ใน } {}^t \Omega \quad (23)$$

โดยมีสภาวะการสัมผัสและกระแทก (contact-impact condition) ประกอบด้วย สมการการทะลุผ่านของวัตถุ (penetrate equation) เพื่อป้องกันไม่ให้วัตถุ 2 ชิ้นวิ่งทะลุผ่านกัน (Zhong, 1993), (Quin and He, 1995) และ (Wang *et al.*, 2001)

$$p({}^t x, t) = 0 \quad \text{เมื่อ } {}^t x \in {}^t \Gamma_C^1 \quad (24)$$

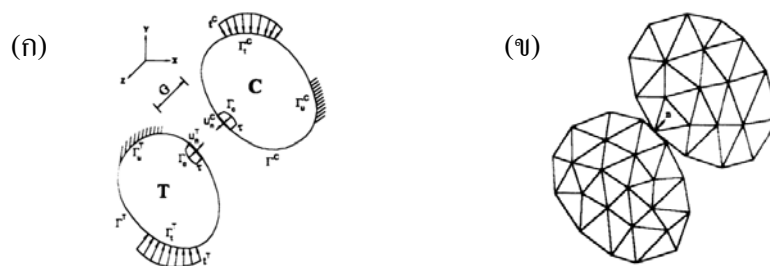
หรือใช้ระยะห่างระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นแสดงเป็นสมการของสภาวะการสัมผัสและกระแทกของวัตถุ (Karaoglan and Noor, 1995), (Pollock and Noor, 1996), (Heinstein *et al.*, 2000) และ (Farahani *et al.*, 2001) แสดงได้ในภาพที่ 8 วัตถุชิ้นที่ 1 (C) และวัตถุชิ้นที่ 2 (T) มีระยะห่าง G (ภาพที่ 8ก) จะเกิดแรงกระแทก (impact force) เมื่อวัตถุทั้งสองเข้าปะทะกัน (ภาพที่ 8ข) โดยมีสมการแสดงสภาวะการสัมผัสและกระแทกของวัตถุ

$$g \geq 0 \quad \text{ใน } {}^t \Gamma_C^n \quad (25)$$

เมื่อ g คือ ระยะห่างระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น (gap)

7.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการกระแทก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ พฤติกรรมของวัสดุ (constitutive equation) สภาวะเริ่มต้น (initial condition) และสภาวะขอบเขต (boundary condition) ซึ่งมีสภาวะการเกิดการสัมผัสและกระแทกรวมอยู่ด้วย สามารถนำมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ด้วยวิธี



ภาพที่ 8 ระบบการสัมผัสและกระแทก (ก) แบบจำลอง continuum (ข) FEM

ที่มา: Farahani *et al.* (2001)

Lagrangian formulation (Zhong, 1993), (Karaoglan and Noor, 1995), (Bath, 1996), (Pollock and Noor, 1996), (Bittencourt and Creus, 1998), (Wang *et al.*, 2001), (Cook *et al.*, 2002) และ (Feng *et al.*, 2002) สำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear analysis) และเกิดการเคลื่อนตัวมาก (large displacement) จากสมการ (23) สามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบทั่วไปได้

$$\{M\} \frac{\partial \{u\}}{\partial t} = \{Q\} - \{F\} + \{F_C\} \quad (26)$$

เมื่อ

$\{M\}$ คือ เมตริกของมวล (mass metric)

$\{u\}$ คือ เมตริกของความเร็ว (velocity metric)

$\{Q\}$ คือ เมตริกของแรงกระทำภายนอก (external load metric)

$\{F\}$ คือ เมตริกของแรงกระทำภายใน (internal load metric)

$\{F_C\}$ คือ เมตริกของแรงกระแทก (nodal contact force metric)

สมการ (26) ร่วมกับสมการสถานะต่างๆ ของปัญหาหาสัมผัสและกระแทกสามารถนำมาหาผลเฉลยได้ และมีวิธีหาผลเฉลยแบบ Implicit method (Stromberg, 2005) หรือแบบ Explicit method (Hu, 1997) และ (Nsiampa *et al.*, 2008)

สำหรับวิธี Explicit มีให้ใช้ในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran โดยการกำหนดความเร็วเริ่มต้น (initial velocity) ให้กับวัตถุ (MSC, 2005a)

8. ปัญหาการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (fluid-structure interaction problems)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (fluid-structure interaction) เป็นปรากฏการณ์ทางด้านพลศาสตร์เช่นกันกับปัญหาการสัมผัสและกระแทก และมีความซับซ้อนของปัญหามาก การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา (Mackerle, 1999)

สำหรับการทดสอบปล่อยตกขวดซึ่งบรรจุน้ำมีความสัมพันธ์กับการเกิดปรากฏการณ์การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างโดยตรง ซึ่งของไหลในการทดสอบได้แก่น้ำ และโครงสร้างได้แก่ผนังของขวดพลาสติกที่ถูกใช้ในการทดสอบ ปริมาณของของไหลซึ่งบรรจุภายในจะเกิดแรงดันกระทำต่อผนังขวดพลาสติกขณะขวดถูกปล่อยตกและกระแทกกับพื้น (Reed, 2000)

8.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของการไหล

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของไหลชนิด viscous flow และ inviscid flow จะจำกัดขอบเขตของการศึกษาด้วยปริมาตรของของไหลเล็กๆ (control volume) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของของไหลในพิกัดหรือระนาบสามมิติ (x, y, z) ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (conservative of mass equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservative of momentum equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (conservative of energy equation) ซึ่งมีแสดงใน Ohtmer (1995), Warsi (1999) และ Lomax *et al.* (2001) เขียนในรูปแบบเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจได้สมการ Navier-Stokes สำหรับการไหลแบบ viscous flow และสมการออยเลอร์ (Euler equation) สำหรับการไหลแบบ inviscid flow เมื่อตัดพจน์ของความหนืด (τ) และอุณหภูมิ (T) ของสมการ (30) ถึง (32)

$$\frac{\partial \{U\}}{\partial t} + \text{div}[R] = 0 \quad (27)$$

และ
$$[R] = [\{F\}, \{G\}, \{H\}] \quad (28)$$

$$\text{เมื่อ } \{U\} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e_{tot} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho wu - \tau_{xz} \\ (\rho e_{tot} + p - \tau_{xx})u - \tau_{xy}v - \tau_{xz}w - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

$$\{G\} = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ \rho wv - \tau_{yz} \\ (\rho e_{tot} + p - \tau_{yy})v - \tau_{yz}w - \tau_{yx}u - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

$$\{H\} = \begin{Bmatrix} \rho w \\ \rho uw - \tau_{zx} \\ \rho vw - \tau_{zy} \\ \rho w^2 + p - \tau_{zz} \\ (\rho e_{tot} + p - \tau_{zz})w - \tau_{zx}u - \tau_{zy}v - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (32)$$

การหาผลเฉลยจะใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite different) สำหรับวิเคราะห์สองมิติ (Anderson , 1995) และวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume) สำหรับวิเคราะห์สามมิติ (Versteeg and Malalasekera, 1995) เพื่อหาผลเฉลยจากสมการ Navier-Stokes และสมการอยเลอร์

8.2 การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (fluid-structure interaction)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง (fluid-structure interaction) สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่ตรงกันกับวิธีที่มีให้ใช้ในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran (Mair, 1995),

(Brown *et al.*, 2002) และ (MSC, 2005a) ประกอบด้วย การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ สมการลากรางเจียน (Lagrangian equation, LE) การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการร่วม ลา-กรางเจียน-ออยเลอร์เรียน (Coupling Lagrangian Eulerian, CLE) และ การใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของสมการอาร์บิทรารีลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)

8.2.1 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการลากรางเจียน (LE)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างโดยการใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของสมการลากรางเจียน (LE) จะใช้วิธีกำหนดให้ของไหลและโครงสร้างสามารถ เคลื่อนที่ได้ในพิกัดอ้างอิง (X, Y, Z) แสดงได้ด้วยสมการเคลื่อนที่ (23) การวิเคราะห์การ เปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติความหนาแน่นของของไหลจะใช้สมการ

$$\rho J = \rho_0 \quad (33)$$

และ

$$J = \det \left(\frac{\partial x_i}{\partial X_j} \right) \quad (34)$$

เมื่อ

- ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (fluid density) ที่เวลาใดๆ
- ρ_0 คือ ความหนาแน่นของของไหลที่เวลาเริ่มต้น
- J คือ ความเครียดเชิงปริมาตร (volumetric strain)
- x_i คือ พิกัดของปริมาตรของของไหล (x, y, z)
- X_j คือ พิกัดอ้างอิงของระบบ

การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างเป็นปัญหาการสัมผัสและกระแทกของวัตถุ โดย กำหนดให้วัตถุชิ้นหนึ่งเป็นของไหล และวัตถุอีกชิ้นหนึ่งเป็นโครงสร้าง ด้วยวิธีการกำหนด คุณสมบัติของของไหลให้กับวัตถุที่เป็นของไหล (น้ำและอากาศ) และกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (material property) ให้กับวัตถุที่เป็นโครงสร้าง ของไหลจะเกิดการปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างด้วย การกำหนดสถานะการเกิดการสัมผัสและกระแทกให้กับของไหลและโครงสร้าง (Benson, 1990) และ (Aquelet *et al.*, 2006) การหาผลเฉลยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

8.2.2 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE) จะใช้วิธีกำหนดให้ของไหลเป็นปริมาตรถูกยึดติดกับที่ (fluid domain) ในพิกัดอ้างอิงของระบบ (X, Y, Z) ของไหลจะเกิดการปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างด้วยการสร้างสมการซึ่งสามารถใช้เพื่อส่งผ่านแรงดัน (pressure) หรือความเร็ว (velocity) ที่จุดสัมผัสกันระหว่างของไหลและโครงสร้าง ซึ่งสมการที่นิยมใช้คือ สมการการปฏิบัติสับเปลี่ยน (operator split equation)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = f \quad (35)$$

และ $\phi(x,0) = \phi_0(x) \quad \text{ที่ } t = 0 \quad (36)$

เมื่อ ϕ คือ สนามตัวแปร (field variable) ใดๆ
 c คือ ค่าคงที่ของความเร็วการไหล
 f คือ ค่าจากแหล่งกำเนิด (source)

โดยสมการ (35) จะถูกแบ่งเป็นสองสมการเพื่อใช้ในการคำนวณ ประกอบด้วย

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = f \quad (37)$$

และ $\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (38)$

สมการ (37) จะใช้สำหรับโครงสร้างซึ่งมีพจน์ของแหล่งกำเนิด (f) โครงสร้างจะมีการเคลื่อนที่หรือบิดเบี้ยวเนื่องจากแหล่งกำเนิดสอดคล้องกับสมการการเคลื่อนที่ (23) โดยพจน์ $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ มีอยู่ในสมการทั้งสอง จะเป็นพจน์ที่ส่งผ่านการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างต่อเนื่องมายังสมการ (38) ซึ่งใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของไหลของของไหลสอดคล้องกับสมการ (27) ถึง (32) เป็นเช่นนี้สลับกัน

ไปตลอดการวิเคราะห์ (Benson, 1997), (Benson and Stainier, 2000), (Souli *et al.*, 2000) และ (Benson and Okazawa, 2004)

8.2.3 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอาร์บิทราลีลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอาร์บิทราลีลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE) ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (conservative of mass equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservative of momentum equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (conservative of energy equation) ในรูปแบบความสัมพันธ์ของความเร็วของของไหล กับความเร็วของโครงสร้าง (Benson, 1992), (Casadei and Potapov, 2001), (Matthies and Steindorf, 2003), (Teixeira and Awruch, 2005) และ (Kim and Shin, 2008)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (-\rho) \text{div}(\mathbf{v}) - (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i) \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (39)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{i,j} - \rho (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (40)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} - \rho (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}_i) \frac{\partial e}{\partial x_j} \quad (41)$$

เมื่อ v_i คือ ความเร็วของของไหลในทิศทางใดๆ
 u_i คือ ความเร็วของโครงสร้างในทิศทางใดๆ

จากสมการ (39) ถึง (41) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง หรือ สมการ ALE ซึ่งใช้กับบริเวณที่สัมผัสกันของของไหลและโครงสร้าง ในส่วนที่เป็นเฉพาะของไหลจะกำหนดให้สมการ (39) ถึง (41) มีความเร็วของโครงสร้างเป็นศูนย์ ($u = 0$) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของของไหล และในส่วนที่เป็นเฉพาะโครงสร้างจะกำหนดให้ความเร็วของของไหลเท่ากับความเร็วของโครงสร้าง ($u = v$) เพื่อวิเคราะห์

การบิดเบี้ยว (deformation) ของโครงสร้างซึ่งถูกแรงกระทำ (Casadei and Halleux, 1995) และ (Casadei *et al.* 2001)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ขวดทดสอบ ก ความจุ 0.5 ลิตร น้ำหนัก 0.032 กิโลกรัม ผลิตจากวัสดุ PET (ภาพที่ 9)
2. แผ่นวัดแรง (force plate) และอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ รุ่น OR6-7 ของบริษัท Advanced Mechanical Technology, Inc. USA. (ภาพที่ 10)
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด ± 0.01 กรัม (ภาพที่ 11)
4. เครื่องดึงทดสอบ (tensile test machine) รุ่น H50KS ของบริษัท Tinius Olsen (HOUNSFIELD), USA. (ภาพที่ 12)
5. กล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว
6. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Pentium IV 3.0 GHz หน่วยความจำ DDRAM PC400 ขนาด 1.0 GB การ์ดแสดงผลหน่วยความจำวีดีโอ 128 MB จอภาพขนาด 17 นิ้ว
7. เครื่องพิมพ์ชนิด Laser
8. ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER ของบริษัท Parametric Technology Corporation, USA.
9. ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.Patran และ MSC.Dytran ของบริษัท MacNeal-Schwendler Corporation, USA.
10. ไมโครมิเตอร์วัดขนาด ความละเอียด ± 0.01 มิลลิเมตร
11. ชุดอุปกรณ์ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อวัดค่าความเครียดของผนังขวดทดสอบ ประกอบด้วย
 - 11.1 strain gauge รุ่น KFG-1-120-C1-11L1M2R ของบริษัท Kyowa Electronic Instruments, Japan. (แผ่นข้อมูลในภาพผนวกที่ ก2)
 - 11.2 ชุดวงจรบริดจ์ วงจรขยายสัญญาณ และวงจรกรองความถี่ (ประดิษฐ์ขึ้นเอง)
 - 11.3 การ์ด A/D รุ่น PCL-812PG ของบริษัท Advantech, USA. (ภาพที่ 13)
 - 11.4 ซอฟต์แวร์ประดิษฐ์เพื่อใช้บันทึกผลการทดสอบ

การทดสอบทางกลได้ใช้อุปกรณ์ทดสอบ ข้อ 2 ที่ติดตั้งอยู่ในคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน การดำเนินการวิเคราะห์ใช้สถานที่และอุปกรณ์ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309-6310 ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน โดยได้รับทุนสนับสนุนเงินในการซื้อซอฟต์แวร์ CAE (ข้อ 9) จากบริษัทปัญญวัฒนาพลาสติก จำกัด



ภาพที่ 9 ขวดทดสอบ ก ความจุ 0.5 ลิตร น้ำหนัก 0.032 กิโลกรัม ผลิตจากวัสดุ PET



(ก)



(ข)

ภาพที่ 10 อุปกรณ์วัดแรงกระแทก (ก) แผ่นวัดแรง (ข) ชุดอุปกรณ์ควบคุมการขยายสัญญาณ (amplifier controls)



ภาพที่ 11 เครื่องชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 12 เครื่องดึงทดสอบ (tensile test machine) รุ่น H50KS ของบริษัท Tinius Olsen (HOUNSFIELD), USA.



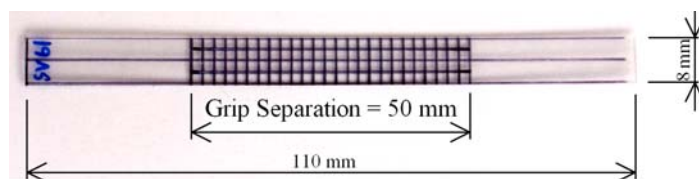
ภาพที่ 13 การ์ด A/D รุ่น PCL-812PG ของบริษัท Advantech, USA. รับได้ 16 ช่องสัญญาณ และส่งได้ 2 ช่องสัญญาณ

วิธีการ

1. การประดิษฐ์สมการ stress-strain relation

1.1 การทดสอบแรงดึงเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ผลิตขวดทดสอบ ก

การทดสอบแรงดึง (tensile test) นี้ใช้วิธีการอ้างอิงจาก American Society for Testing Material D638 และ D882 โดยเลือกตัดชิ้นทดสอบ (specimen) บริเวณที่มีความหนาสม่ำเสมอจากผนังขวดทดสอบ ก ได้ชิ้นทดสอบขนาดความกว้าง 8 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างตัวจับ (grip separation) 50 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 14 ใช้เครื่องดึงทดสอบ (tensile test machine) ดึงชิ้นทดสอบให้ยืดในทิศทางเดียวจนชิ้นทดสอบขาด โดยกำหนดให้มีความเร็วในการยืด 4 ค่า ประกอบด้วย 5, 100, 300 และ 500 มิลลิเมตร/นาที่ ตามลำดับ (เครื่องดึงทดสอบมีค่าการดึงยืดสูงสุด 500 มิลลิเมตร/นาที่) และใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ต่อหนึ่งค่าของความเร็วในการดึง



ภาพที่ 14 ตัวอย่างชิ้นทดสอบของ PET ซึ่งตัดจากผนังขวดทดสอบ ก

1.2 การสร้างสมการความเค้นฮาร์ดเต็นนิง

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (stress) ความเครียด (strain) ในช่วงการเกิดความเค้นมากกว่าช่วงยืดหยุ่น (elasticity) หรือความเครียดมากกว่าความเครียดที่จุดคราก (yield strain) ของพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) ซึ่งค่าความเค้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นภายหลังความเครียดเลยจุดคราก หรือเรียกการเกิดความเค้นลักษณะนี้ว่า ความเค้นฮาร์ดเต็นนิง (hardening stress) และสามารถประดิษฐ์สมการแสดงความสัมพันธ์ คือ

$$\sigma_h = [\sigma_{yl} + (\sigma_{fc} - \sigma_{yl})\epsilon_p^n](1 + \alpha\epsilon_p) \quad (42)$$

เมื่อ

σ_h คือ ความเค้นฮาร์ดเต็นนิง

σ_{yl} คือ ความเค้นที่จุดครากล่าง (lower yield stress)

σ_{fc} คือ ค่าคงที่ของความเค้นไหล (flow stress constant)

n, α คือ ค่าคงที่

ε_p คือ ความเครียดพลาสติก (plastic strain)

1.3 การสร้างสมการความเค้นฮาร์ทเด้นนิ่งสัมพันธ์กับอัตราความเครียด (strain rate)

ลักษณะพฤติกรรมการยืดของ PET ภายหลังจากความเครียดเลยจุดคราก เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วในการดึงยืด ค่าความเค้นฮาร์ทเด้นนิ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จากสมการ (42) ค่าของความเค้นที่จุดครากล่าง (σ_{yl}) และค่าคงที่ของความเค้นไหล (σ_{fc}) จะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นทั้งสองสามารถใช้สมการของแบบจำลองครากของ Cowper-Symonds (สมการ 11) มาประยุกต์ในการแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนค่าความเค้นขึ้นกับการเปลี่ยนอัตราความเครียด (strain rate) ได้ดังสมการ

$$\frac{\sigma_{yl}}{\sigma_{yl0}} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{1/P} \quad (43)$$

$$\frac{\sigma_{fc}}{\sigma_{fc0}} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{1/P} \quad (44)$$

เมื่อ

$\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียด (strain rate)

σ_{yl} คือ ความเค้นที่จุดครากล่าง (lower yield stress) ใดๆ

σ_{yl0} คือ ความเค้นที่จุดครากล่าง (lower yield stress) ที่จุดเริ่มต้น

σ_{fc} คือ ค่าคงที่ของความเค้นไหล (flow stress constant) ใดๆ

σ_{fc0} คือ ค่าคงที่ของความเค้นไหลที่จุดเริ่มต้น

ค่าของค่าความเค้นที่จุดครากล่าง (lower yield stress) ที่จุดเริ่มต้น (σ_{yl0}) และค่าความเค้นเปลี่ยนแปลง (flow stress) ที่จุดเริ่มต้น (σ_{fc0}) จากสมการ (43) และ (44) เป็นค่าคงที่ ดังนั้นแทนสมการ (43) และ (44) ลงในสมการ (42) จะได้สมการความเค้นฮาร์ทเด้นนิ่ง (σ_h) รูปแบบใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราความเครียด หรือ สมการของแบบจำลองความเค้นไหล (σ_f)

$$\sigma_f = [\sigma_{ylo} + (\sigma_{fc0} - \sigma_{ylo})\varepsilon_p^n](1 + \alpha\varepsilon_p) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (45)$$

2. การทดสอบทางกล

2.1 การทดสอบปล่อยตก (drop test) ขวดทดสอบ ก

การทดสอบทางกลโดยการปล่อยตก (drop test) ขวดทดสอบ ก ซึ่งบรรจุน้ำภายใน เพื่อวัดแรงที่กระทำต่อขวดขณะเกิดการกระแทกกับพื้นแข็ง โดยแรงที่ต้องการวัด ประกอบด้วย แรงกระทำจากพื้น หรือ แรงกระแทก (impact force) และแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน

2.1.1 การวัดแรงกระแทก

การทดสอบเพื่อวัดแรงกระแทกสามารถวัดได้โดยตรงโดยใช้แผ่นวัดแรง (force plate) มีวิธีการทดสอบด้วยการเติมน้ำภายในขวด และการปล่อยให้ขวดตกในแนวตั้งที่ระดับความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร โดยการบังคับให้ขวดตั้งตรงเพื่อให้ก้นขวดกระแทกกับแผ่นวัดแรง รายละเอียดของปริมาตรน้ำที่ถูกบรรจุในขวดทดสอบ ก และจำนวนขวดที่ถูกใช้ทดสอบที่ความสูง 0.5 ถึง 1.5 เมตร แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของขวดทดสอบ ก ในการทดสอบปล่อยตกเพื่อวัดแรงกระแทก

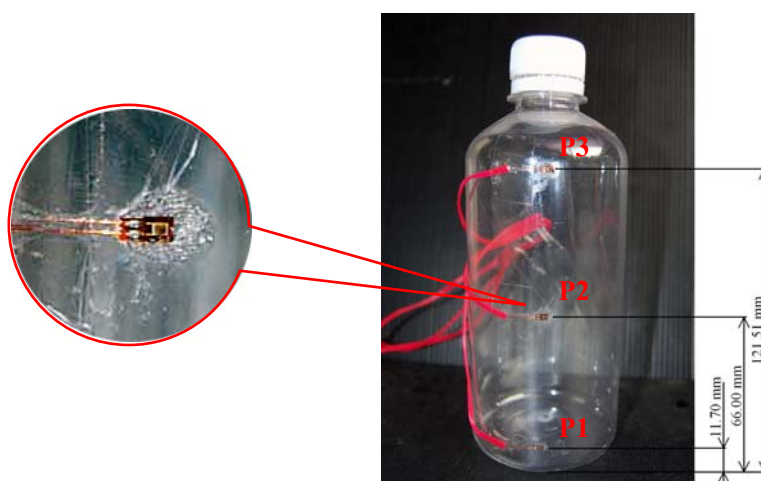
ปริมาตรน้ำบรรจุ (ลิตร)	น้ำหนักรวมของขวดทดสอบ (กรัม)	ระดับความสูงจากแผ่นวัดแรง (เมตร)	จำนวน (ใบ)
0	32	0.5	15
250	284	0.5, 1.0, 1.5	45
500	510	0.5, 1.0, 1.5	45

2.1.2 การวัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน

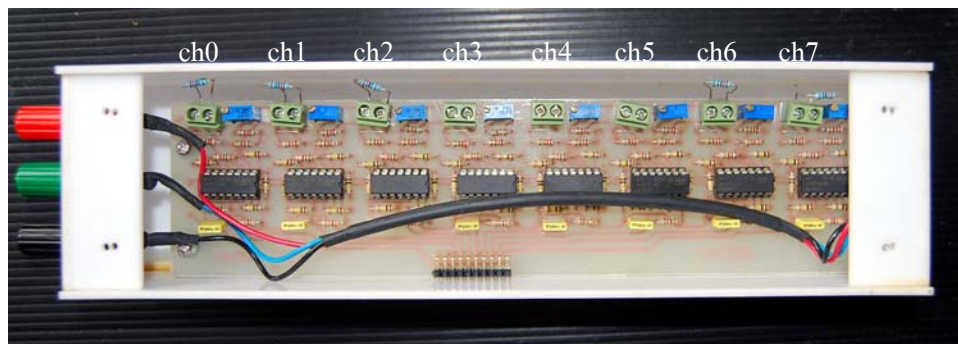
การทดสอบเพื่อวัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายในขวดทดสอบ ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องวัดจากการยึดของผนังด้านนอกของขวดทดสอบ โดยการสร้างเครื่องมือวัดซึ่งประดิษฐ์จากอุปกรณ์ ข้อ 11 หน้า 24 และใช้ strain gauge วัดการยึดของผนัง

ขวดทดสอบ ก ถูกนำมาติด strain gage จำนวน 3 ตัว ต่อขวด 1 ใบ ที่จุด P1, P2 และ P3 มีระดับความสูงวัดจากก้นขวด 11.70, 66.60 และ 121.51 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 15) โดยใช้ขวดจำนวน 5 ใบ และ strain gauge จำนวน 15 ตัว strain gauge แต่ละตัวทำหน้าที่วัดการยึดของผนังขวดทดสอบในทิศทางการขยายของผนังขวดในแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งนั้นๆ strain gauge 1 ตัวจะถูกต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ (Wheatstone bridge) 1 วงจร ผ่านวงจรขยาย 210 เท่า (instrument amplifier) 1 วงจร และผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ (filter) 50 Hz อีก 1 วงจร วงจรทั้งสามจะถูกต่อรวมกันเพื่อบันทึก 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์รวมทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ (channel) กำหนดให้หมายเลขของช่องสัญญาณเริ่มจาก ch0 ถึง ch7 แสดงไว้ในภาพที่ 16

การยึดของผนังขวดทำให้ strain gauge ยึดด้วยและส่งผลให้ความต่างศักย์ (volts) ของวงจรบริดจ์ไม่สมดุล ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ ด้วย



ภาพที่ 15 แสดงตัวอย่างขวดติด strain gauges ที่ระดับความสูง 11.70, 66.60 และ 121.51 มิลลิเมตร วัดจากก้นขวด (จุด P1, P2 และ P3)



ภาพที่ 16 ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดความเครียด (strain) จำนวน 8 ช่องสัญญาณ

โปรแกรมบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ประจักษ์ขึ้น โดยควบคุมการแปลงสัญญาณผ่านการ์ด A/D (อุปกรณ์ ข้อ 11.3 ภาพที่ 13) และค่าความต่างศักย์ที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณหาความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นได้โดยตรง จากสมการ (Kyowa, 2008)

$$\varepsilon = \frac{4E_0}{K_g E} \quad (46)$$

เมื่อ E_0 คือ ความต่างศักย์ของวงจรบริดจ์ที่เปลี่ยนแปลง

K_g คือ gauge factor มีค่า 2.1 (รายละเอียดในภาพผนวกที่ 2ก)

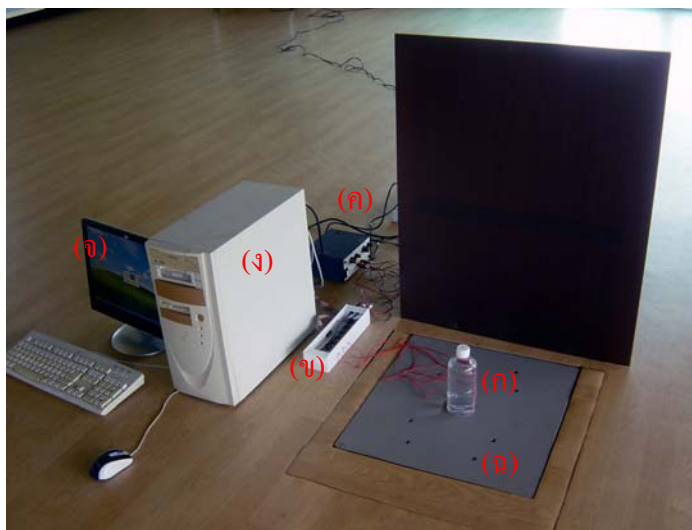
E คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับวงจรบริดจ์มีค่า 9 โวลต์

ขวดทั้ง 5 ใบ ซึ่งติด strain gauge จะบรรจุน้ำเต็มความจุและถูกต่อร่วมกับชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์แสดงในภาพที่ 17ก ถึง ภาพที่ 17จ และนำไปปล่อยให้ตกในแนวดิ่งจากระดับความสูง 0.5 เมตร ด้วยการบังคับให้ขวดตั้งตรง ทำให้ก้นขวดตกกระทบบนแผ่นวัดแรง (ภาพที่ 17ฉ) และวัดแรงกระทบบนพื้นของขวดพร้อมกับค่าความเครียดที่ผนังขวด

2.1.3 การหาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกของขวด

การหาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกของขวดจะใช้วิธี Bruceton Staircase ตามมาตรฐาน ASTM D2463-95 โดยนำขวดจำนวน 20 ใบ บรรจุน้ำเต็มความจุ แล้วนำไปปล่อยให้ตกในแนวดิ่ง เพื่อให้ก้นขวดกระทบบนพื้นจากความสูงเริ่มต้น 3.0 เมตร และเพิ่มความสูงในการปล่อยตกระดัดขึ้น

ละ 0.5 เมตร ผลการทดสอบจะถูกบันทึก และนำไปใช้หาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกของขวด และค่าความเบี่ยงเบน โดยใช้สมการ (17) ถึงสมการ (20)



ภาพที่ 17 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด ประกอบด้วย (ก) ขวดติด strain gauges (ข) ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ค) เครื่องฉายไฟกระพริบ (ง) เครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการ์ด A/D ภายใน (จ) จอรับภาพแสดงโปรแกรมบันทึกค่าความต่างศักย์ และ (ฉ) แผ่นวัดแรง

3. การจำลองการทดสอบปล่อยตกของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการทดสอบปล่อยตกซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางพลศาสตร์ (dynamics) ในงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ MSC. Patran และ MSC.Dytran ในการวิเคราะห์ MSC.Patran เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) หรือ แบบจำลอง FEM และใช้แสดงผลภายหลังการประมวลผลเสร็จสิ้น ซึ่งอยู่ในขั้นตอน pre-processing และ post-processing ของกระบวนการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วน MSC.Dytran นั้นจะเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณเพียงอย่างเดียว ซึ่งอยู่ในขั้นตอน processing ของกระบวนการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (MSC, 2005a และ 2005b) โดยรับข้อมูลที่ใช้ MSC.Patran จัดเตรียมให้ การใช้ MSC.Patran สร้างแบบจำลอง FEM ของการจำลองการปล่อยตกขวดบรรจุน้ำนั้น จะแบ่งแบบจำลอง FEM ออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง (solid) หรือ โครงสร้าง (structure) และส่วนที่เป็นของไหล (fluid)

การสร้างแบบจำลองการปล่อยตกของขวดบรรจุน้ำให้ตรงกับการทดสอบทางกล ส่วนที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย ขวด และ แผ่นวัดแรงหรือพื้นแข็ง ส่วนที่เป็นของไหล ประกอบด้วย น้ำ และอากาศ แบบจำลอง FEM ของขวดและแผ่นวัดแรง จะได้มาจากการใช้ ซอฟต์แวร์ CAD (Computer Aided Design) คือ Pro/ENGINEER สร้างแบบจำลองรูปทรงขวดทดสอบ ก และแผ่นวัดแรง โดยจะสร้างเป็นแบบจำลองของพื้นผิว (surface model) แล้วแปลงไฟล์ให้เป็นไฟล์ IGES เพื่อนำไปใช้กับ MSC.Patran ต่อไป

ใช้ MSC.Patran นำเข้าไฟล์ IGES และสร้างแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบและแผ่นวัดแรง โดยใช้วิธีการแบ่งโครงร่างตาข่าย (mesh) เพื่อสร้างเป็นเอลิเมนต์ชนิดแผ่น (plate หรือ shell element) มีความหนา 0.56 มิลลิเมตร (ทำให้มีน้ำหนักเท่ากับขวดไม่บรรจุน้ำ) ในขั้นต้นเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของเหลวหรือน้ำ กับผนังของขวด จะใช้การสร้างแบบจำลอง FEM ของขวดที่ตัดลักษณะที่ซับซ้อนออกไป เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานกับอัลกอริทึมของการเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของแข็งและของไหล (fluid-structure interaction algorithm)

แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบ ก และแผ่นวัดแรงจะแสดงในภาพที่ 18 แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบ ประกอบด้วย 526 โหนด (จุดเชื่อมต่อ) และ 530 เอลิเมนต์ แบบจำลอง FEM ของแผ่นวัดแรง ประกอบด้วย 100 โหนด (จุดเชื่อมต่อ) และ 121 เอลิเมนต์ ตำแหน่งการจัดวางแบบจำลอง FEM ของขวดและแผ่นวัดแรง เพื่อลดเวลาและการเก็บข้อมูลขณะประมวลผล จะวางขวดให้อยู่ในตำแหน่งสูงกว่าแผ่นวัดแรง 10 มิลลิเมตร และกำหนดความเร็วตั้งต้น (initial velocity, v_i) ให้กับแบบจำลอง FEM ของขวดโดยใช้สมการ

$$v_i = \sqrt{2g(h - y)} \quad (47)$$

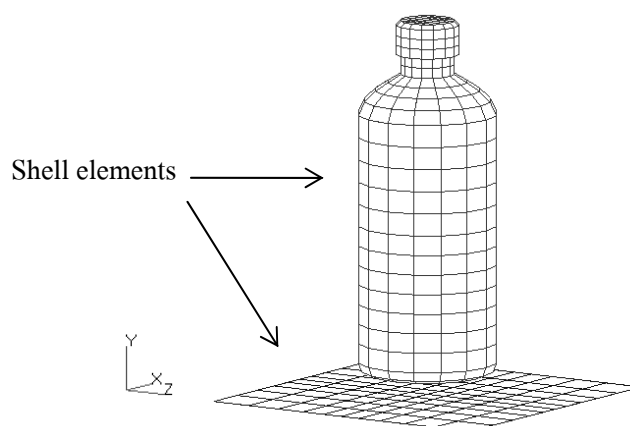
เมื่อ

v_i คือ ความเร็วตั้งต้น

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

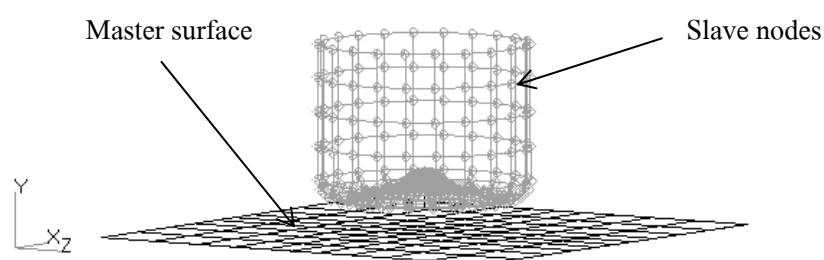
h คือ ความสูงที่ใช้ในการปล่อยตก

y คือ ความสูงของขวดจากพื้นที่ตำแหน่งเริ่มต้นใดๆ



ภาพที่ 18 แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบ ก และแผ่นวัดแรง

แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบและแผ่นวัดแรงกำหนดให้ใช้อัลกอริทึมของการกระทบ (contact algorithm) คือ Master-Slave algorithm โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ของแบบจำลอง FEM ของแผ่นวัดแรงเป็นส่วนของ Master และโหนด (node) ของแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบเป็นส่วนของ Slave (แสดงในภาพที่ 19) และใช้วิธีนี้กับทุกๆ แบบจำลอง FEM เพื่อจำกัดผลกระทบที่แตกต่างของการเลือกใช้อัลกอริทึม (algorithm) ของการกระทบ



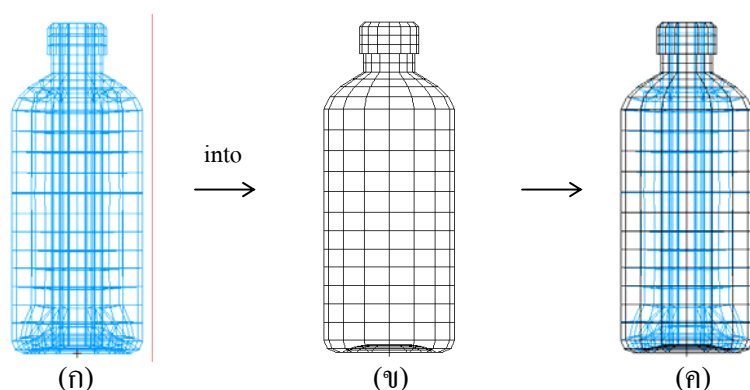
ภาพที่ 19 ตำแหน่งการกำหนด Master-Slave algorithm แบบจำลอง FEM

3.1 การสร้างแบบจำลองการปล่อยตกของสมการลากรานเจียน (LE)

การเลือกวิธีของสมการลากรานเจียน (Lagrangian equation, LE) ในการสร้างความสัมพันธ์ของการเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง โดยการสร้างส่วนที่เป็นน้ำบรรจุภายในขวดทดสอบแสดงในภาพที่ 20 ของแบบจำลองการปล่อยตกขวดบรรจุน้ำโดยใช้สมการลากรานเจียน (Lagrangian equation) มีวิธีการสร้างโดยใช้ซอฟต์แวร์ Pro/ENGINEER สร้าง

แบบจำลองของแข็ง (solid model) เป็นรูปทรงของน้ำที่บรรจุภายในขวด หรือรูปทรงของผิวด้านในขวดที่สัมผัสกับน้ำ แล้วแปลงไฟล์ให้เป็นไฟล์ STEP เพื่อนำไปใช้กับ MSC.Patran

ใช้ MSC.Patran นำเข้าไฟล์ STEP และสร้างแบบจำลอง FEM ของน้ำ โดยใช้วิธีการแบ่งโครงร่างตาข่าย (mesh) เพื่อสร้างเป็นเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมหกหน้า (hexagonal element) แบบจำลอง FEM ของน้ำประกอบด้วย 1,620 โหนด (จุดเชื่อมต่อ) และ 1,320 เอลิเมนต์ (ภาพที่ 20 ก) ซึ่งถูกกำหนดให้วางอยู่ในแบบจำลอง FEM ของขวด (ภาพที่ 20 ค) และกำหนดความเร็วตั้งต้น (initial velocity) ให้กับแบบจำลอง FEM ของน้ำที่ความเร็วเดียวกันกับขวด การเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลอง FEM ของน้ำและแบบจำลอง FEM ของขวด ใช้วิธีเดียวกับแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบและแผ่นวัดแรง โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ของแบบจำลอง FEM ของน้ำเป็นส่วนของ Master และโหนด (node) ของแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบเป็นส่วนของ Slave



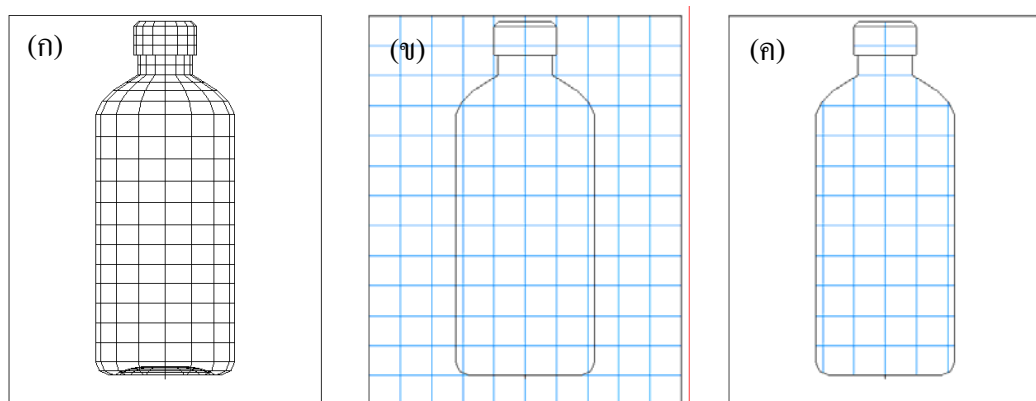
ภาพที่ 20 (ก) แบบจำลอง FEM ของน้ำ (ข) แบบจำลอง FEM ของขวด (ค) แบบจำลอง FEM ของสมการลากรางเจียน (LE)

3.2 การสร้างแบบจำลองการปล่อยตกของสมการร่วม ลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE)

การเลือกใช้วิธีของสมการร่วม ลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน (Coupling Lagrangian Eulerian, CLE) ในการสร้างความสัมพันธ์ของการเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง โดยการสร้างส่วนที่เป็นน้ำบรรจุภายในขวดทดสอบแสดงในภาพที่ 21 ของแบบจำลองการปล่อยตกขวดบรรจุน้ำโดยใช้สมการร่วม ลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน มีวิธีการสร้างโดยใช้ซอฟต์แวร์ MSC.Patran สร้างแบบจำลองของแข็ง (solid model) เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมหกหน้าขนาด

ใหญ่ ให้มีขนาดครอบคลุมแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบและแผ่นวัดแรง แบบจำลองสี่เหลี่ยมหกหน้าขนาดใหญ่นี้ คือ ขอบเขตของของไหล แล้วใช้วิธีการแบ่งโครงร่างตาข่าย (mesh) ย่อยแบบจำลองของขอบเขตของของไหล (fluid domain) เพื่อให้ได้เอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมหกหน้า (hexagonal element) ขนาดเล็กๆ ประกอบด้วย 1,300 เอลิเมนต์เชื่อมต่อกับโหนดจำนวน 1,694 โหนด (จุดเชื่อมต่อ) แสดงในภาพที่ 21ก และ ภาพที่ 21ข

การเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองของน้ำและแบบจำลอง FEM ของขวด ใช้วิธี General Coupling (ชื่อที่ใช้เรียกในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran) ระหว่างความเร็วของน้ำและผนังขวดทดสอบ และใช้ผนังของแบบจำลอง FEM ของขวดเป็นขอบเขตของการกำหนดบริเวณที่เป็นน้ำให้อยู่ภายในขวด โดยใช้ทิศทางซึ่งพุ่งออกของเอลิเมนต์ผนังขวดเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของน้ำ (ภายในหรือภายนอก) ภาพที่ 21ค แสดงภาพการกำหนดให้น้ำถูกบรรจุภายในขวด



ภาพที่ 21 (ก) แบบจำลอง FEM ของขวด (ข) แบบจำลอง FEM ของขอบเขตของไหล
(ค) แบบจำลอง FEM ของสมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE)

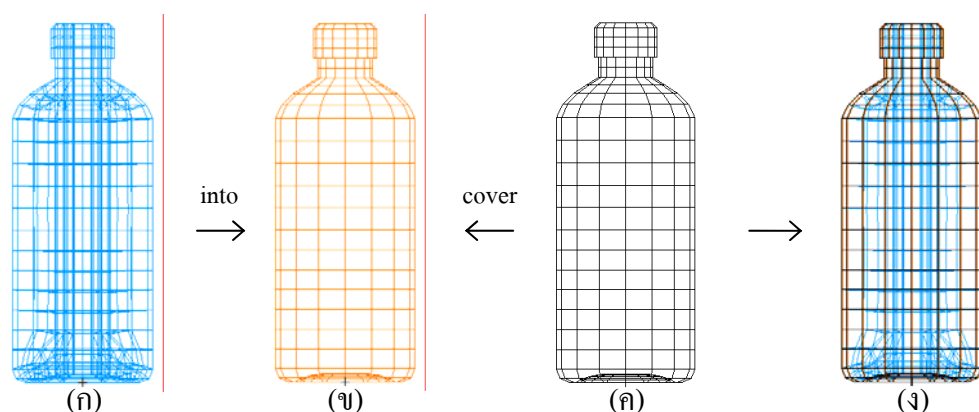
3.3 การสร้างแบบจำลองการปล่อยตกของสมการอาร์บิทารี ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE)

การเลือกใช้วิธีของสมการอาร์บิทารี ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE) ในการสร้างความสัมพันธ์ของการเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง โดยการสร้างส่วนที่เป็นน้ำบรรจุภายในขวดทดสอบแสดงในภาพที่ 22 ของแบบจำลองการปล่อยตกขวดบรรจุน้ำโดยใช้สมการอาร์บิทารี ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน มีวิธีการสร้างคล้ายกับวิธี 3.1 เพียงแต่ในการ

กำหนดให้เกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองของน้ำกับแบบจำลอง FEM ของขวด จะใช้การสร้างเอลิเมนต์ (element) ร่วมซึ่งได้มาจากสมการ ALE แสดงในภาพที่ 22 ข โดยกำหนดให้ขอบเขตของของไหล (fluid domain) มีรูปร่างเป็นผิวด้านในแบบจำลอง FEM ของขวด (ภาพที่ 22 ก) และเอลิเมนต์ของผนังขวดทดสอบเป็นเอลิเมนต์ชนิดแผ่นบาง เพื่อให้แบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบเคลื่อนที่ไปพร้อมกันขอบเขตของของไหล (ภาพที่ 22 ค) ความเร็วเริ่มต้นของแบบจำลองทั้งสามส่วนจะเท่ากัน โดยมีการกำหนดให้มีน้ำบรรจุภายในขวดแสดงในภาพที่ 22 ง

3.4 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับแบบจำลอง FEM

คุณสมบัติของแบบจำลอง FEM ของการปล่อยตก แบ่งออกเป็นการกำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุให้กับแบบจำลอง FEM ซึ่งประกอบด้วย ขวดทดสอบ แผ่นวัดแรง และน้ำคุณสมบัติของวัสดุขวดทดสอบ ก จะใช้การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ PET โดยใช้สมการ $\sigma = E\varepsilon$

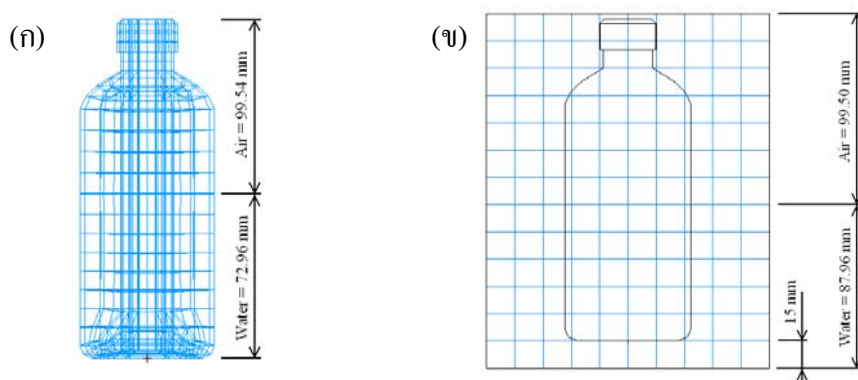


ภาพที่ 22 (ก) แบบจำลอง FEM ของน้ำ (ข) แบบจำลองเอลิเมนต์ร่วม (ค) แบบจำลอง FEM ของขวด (ง) แบบจำลอง FEM ของสมการอาร์บิทรี ลาگرانเจียน-ออยเลอร์เวียน (ALE)

ในช่วงพฤติกรรมการยืดในช่วงยืดหยุ่น มีค่าของยังค์โมดูลัส (Young's Modulus) ได้มาจากค่าเฉลี่ยจากผลการดึงทดสอบ มีค่า 888.41 MPa และใช้สมการ (45) ในช่วงพฤติกรรมการยืดในช่วงพลาสติก โดยค่าคงที่ของสมการได้มาจากผลของการทดลองสร้างสมการความเค้นฮาร์ทเด้นนิ่ง ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราความเครียด คุณสมบัติของแผ่นวัดแรงกำหนดให้เป็นเหล็กแข็ง มีค่ายังค์โมดูลัส 370 GPa คุณสมบัติของน้ำกำหนดให้มีค่าความหนาแน่น 997 kg/m^3 (Cengel and Boles, 2006)

4. การจำลองการทดสอบปล่อยตกของขวดบรรจุน้ำครึ่งหนึ่งของความจุโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการบรรจุน้ำครึ่งหนึ่งของความจุของขวดทดสอบ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้วิธีการกำหนดการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างได้เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลอง FEM ของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุ วิธีการกำหนดให้มีน้ำเป็นครึ่งหนึ่งของความจุ (250 ลิตร) ทำได้โดยการแบ่งแบบจำลองของของไหลเป็นสองส่วน (ส่วนบนและส่วนล่าง) ส่วนล่างกำหนดให้มีความสูง 72.76 มิลลิเมตร สำหรับแบบจำลอง FEM ของสมการลาگرانเจียน (LE) และสมการอาร์บิทรี ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE) แสดงในภาพที่ 23ก และกำหนดให้มีความสูง 87.96 มิลลิเมตร สำหรับแบบจำลอง FEM ของสมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE) ซึ่งมีแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบลอยอยู่ภายในสูงจากพื้นล่างของแบบจำลองของของไหลที่ใช้สมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน 15 มิลลิเมตร (ภาพที่ 23ข) คุณสมบัติของแบบจำลองของของไหลที่ตำแหน่งเริ่มต้นครึ่งล่างเป็นน้ำกำหนดให้มีความหนาแน่น 997 kg/m^3 และครึ่งบนเป็นอากาศกำหนดให้มีความหนาแน่น 1.1855 kg/m^3 (Cengel and Boles, 2006)



ภาพที่ 23 แสดงตำแหน่งเอลิเมนต์ของน้ำ และอากาศของแบบจำลอง FEM ของของไหล (ก) FEM ของของไหลสำหรับ LE และ ALE (ข) FEM ของของไหลสำหรับ CLE

5. การเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการ stress-strain relation

ในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran เดิมมีสมการ stress-strain relation หรือแบบจำลองวัสดุ (material model) ในช่วงของการยึดตั้งแต่จุดครากของวัสดุ คือ แบบจำลองความเค้นไหล ซึ่งที่มีให้เลือกใช้ และสามารถแสดงพฤติกรรมของวัสดุ PET ได้ ประกอบด้วย Rate Power Law (RPL)

model, Zerilli-Armstrong (ZA) model และ Johnson-Cook (JC) model แสดงในสมการ (13), (14) และ (15) ตามลำดับ

ขอบเขตของงานวิจัยในส่วนของการสร้างสมการ stress-strain relation มีจุดประสงค์เพื่อนำมาใช้กับแบบจำลอง FEM ของการปล่อยตก เพื่อแสดงพฤติกรรมทางกลขณะกระทบกับพื้นแข็งของวัสดุโพลิเมอร์ (polymer) ชนิดพลาสติก PET ที่ใช้ผลิตขวด โดยสมการที่ถูกสร้างขึ้นมาสามารถใช้ในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran ได้ แบบจำลองความเค้นไหลที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้ซึ่งได้มาจากสมการ (45) ให้ชื่อว่าแบบจำลองความเค้นไหล STP (Suvanjumrat, Thusneyapan and Puttapitukporn flow stress model) สามารถจัดรูปแบบให้ง่ายต่อความเข้าใจได้ สมการ (48) แบบจำลองความเค้นไหลทั้งหมดจะถูกนำมาใช้กับแบบจำลองการปล่อยตกของขวดที่มีการบรรจุน้ำและใช้สมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรเนียน (CLE) สร้างความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองความเค้นไหลในการวิเคราะห์

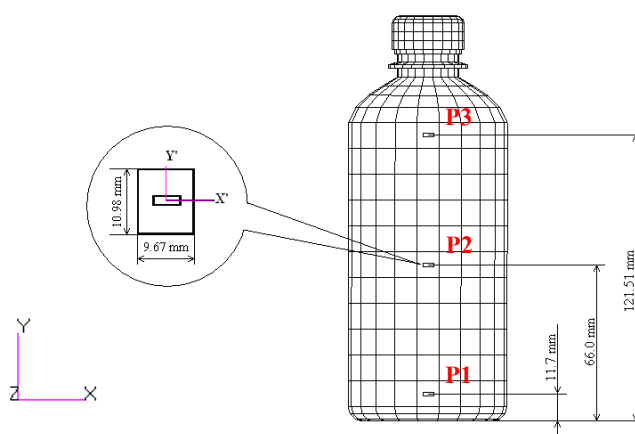
$$\sigma_{f-STP} = A(1 + B\varepsilon)(1 + \varepsilon^n) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (48)$$

เมื่อ A, B, C, m และ n คือ ค่าคงที่ใดๆ

เพื่อแสดงให้เห็นผลกระทบของการกำหนดสมการ stress-strain relation ในแบบจำลองวัสดุที่มีการใช้ผลของการดิ่งทดสอบเฉพาะค่าอัตราความเครียด หรือความเร็วในการดิ่งทดสอบค่าใดค่าหนึ่ง โดยไม่ได้นำพฤติกรรมการยืดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นฮาร์ดเดนนิงสัมพันธ์กับอัตราความเครียด มาใช้กำหนดในแบบจำลองวัสดุของการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองการทดสอบปล่อยตกขวดพลาสติกที่บรรจุน้ำ การวิเคราะห์ทำได้โดยการแทนที่สมการของแบบจำลองความเค้นไหล STP ของวัสดุที่ใช้กับแบบจำลองการปล่อยตกของขวดที่มีการบรรจุน้ำด้วยสมการความเค้นฮาร์ดเดนนิง (สมการ 42) และใช้สมการร่วม ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรเนียน (CLE) สร้างความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง และวิเคราะห์การทดสอบปล่อยตกที่ความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตรตามลำดับ

6. การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์วัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน

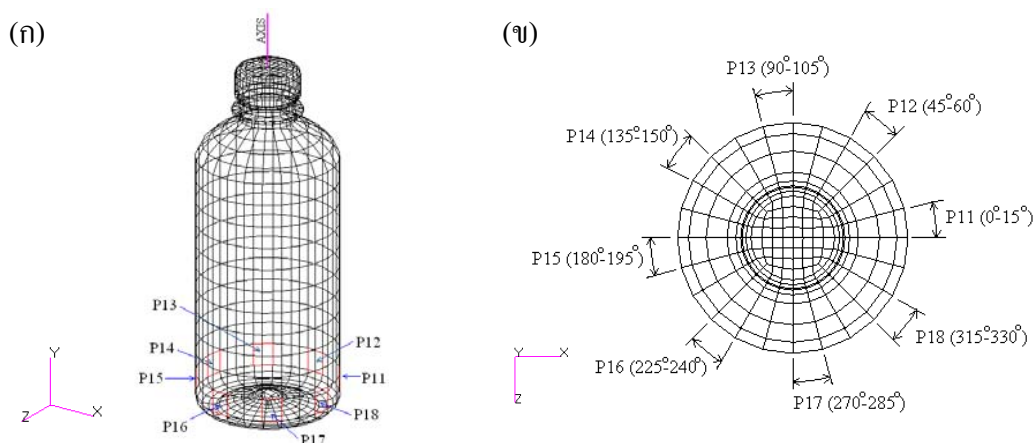
โมเดลชนิดพื้นผิว (surface model) รูปทรงขวดทดสอบ ก จะถูกสร้างใหม่โดยมีรายละเอียดครบถ้วนตรงกับขวดทดสอบจริง ผิวด้านนอกของขวดถูกนำมาใช้โดยแปลงเป็นไฟล์ IGES เพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง FEM ในซอฟต์แวร์ MSC.Patran โมเดลชนิดพื้นผิวของขวดจะถูกแบ่งด้วยเส้นโครงร่าง (mesh) สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม เพื่อสร้างเอลิเมนต์ชนิดแผ่นบาง (shell element) ขนาดเล็ก ๆ จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้สร้างแบบจำลองขวดทั้งหมดมีจำนวน 1,035 เอลิเมนต์ และมี โหนด (node) เชื่อมต่อทั้งหมดจำนวน 1,037 โหนด กำหนดให้เอลิเมนต์มีความหนาสม่ำเสมอทั้งใบ มีค่า 0.56 มิลลิเมตร ซึ่งเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ใช้จะมีพื้นที่มากที่สุด 106.15 ตารางมิลลิเมตร (9.76×10.98 มม.) และมีทิศทางของเอลิเมนต์ คือ X' และ Y' โดยกำหนดให้มีตำแหน่งกึ่งกลางของเอลิเมนต์ที่ตรงกับตำแหน่งติด strain gauge ในระดับเดียวกันกับตำแหน่ง P1, P2 และ P3 ของขวดทดสอบจริงแสดงในภาพที่ 24 ตำแหน่งติด strain gauge จะวางในทิศทาง X' ของเอลิเมนต์ในระดับเดียวกันและตรงกับทิศทางการยึดของ strain gauge แต่ละตัว (ภาพที่ 15) เพื่อแสดงค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hoop strain) ของผนังแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบ แบบจำลอง FEM ของแผ่นวัดแรงและของน้ำกำหนดให้ใช้วิธีของหัวข้อ 3.2



ภาพที่ 24 แสดงตำแหน่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของขวดที่ตรงกับตำแหน่งติด strain gauges ในระดับตำแหน่ง P1, P2 และ P3 ของขวดทดสอบจริง ตามลำดับ

การเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเฉลี่ยของความเครียดในแนวเส้นรอบวงที่จุด P1, P2 และ P3 ของการทดสอบทางกล ค่าความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในแต่ละระดับความสูงของจุดทั้งสาม ได้มาจากการอ่านค่ากึ่งกลางของเอลิเมนต์จำนวน 8 เอลิเมนต์ แต่ละเอลิเมนต์มีความ

กว้างวัดเป็นมุม 15° โดยให้แกน (axis) ของขวดเป็นแกนผ่านจุดศูนย์กลางของขวด ภาพที่ 25 แสดงตัวอย่างตำแหน่งของเอลิเมนต์ หมายเลข P11 ถึง P18 ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับจุด P1 โดยมีเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์อยู่ในตำแหน่งมุมแตกต่างกันรอบแกนของขวด การเปรียบเทียบ จุด P2 และ P3 ใช้การอ่านค่ากึ่งกลางของเอลิเมนต์จำนวน 8 เอลิเมนต์ เช่นเดียวกับจุด P1 โดยมีเอลิเมนต์ในระดับเดียวกับจุด P2 กำหนดให้เป็นเอลิเมนต์หมายเลข P21 ถึง P28 และมีเอลิเมนต์ในระดับเดียวกับจุด P3 กำหนดให้เป็นเอลิเมนต์หมายเลข P31 ถึง P38



ภาพที่ 25 (ก) ตำแหน่งของเอลิเมนต์ P11 ถึง P18 รอบแกนขวด (ข) ภาพ top view ของขวดแสดงมุมของเอลิเมนต์ P11 ถึง P18

7. การกำหนดขีดจำกัดการวิบัติของของขวดทดสอบ ก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ค่าความเค้นวิบัติและความเครียดวิบัติที่ได้จากการดึงทดสอบสามารถนำมากำหนดเป็นขีดจำกัดการวิบัติ (failure criteria) ของขวดทดสอบ ก ได้โดยการใช้ค่าความเครียดวิบัติคงที่ หรือการใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดวิบัติกับอัตราความเครียด แสดงโดยการประยุกต์สมการ exponential (Nakra and Chaudhry, 2004)

$$\sigma_{fail} = Ae^{B\dot{\epsilon}} + C \quad (49)$$

เมื่อ σ_{fail} คือ ความเครียดวิบัติ (failure stress)
 A, B และ C คือ ค่าคงที่ใดๆ

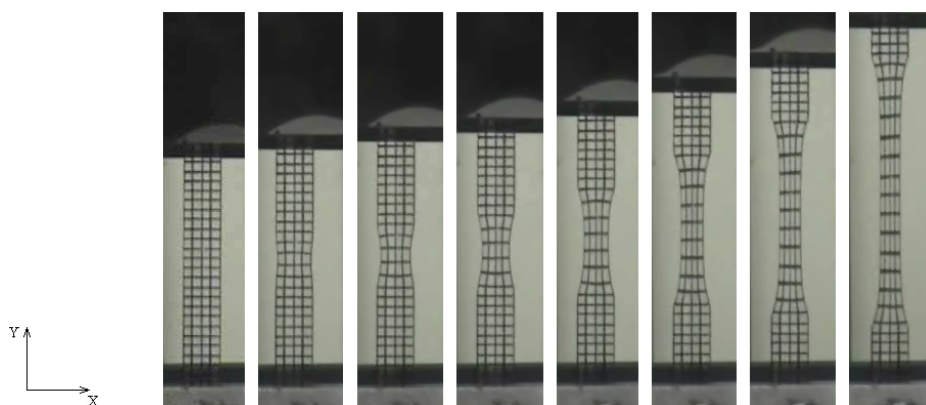
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการประดิษฐ์สมการ stress-strain relation

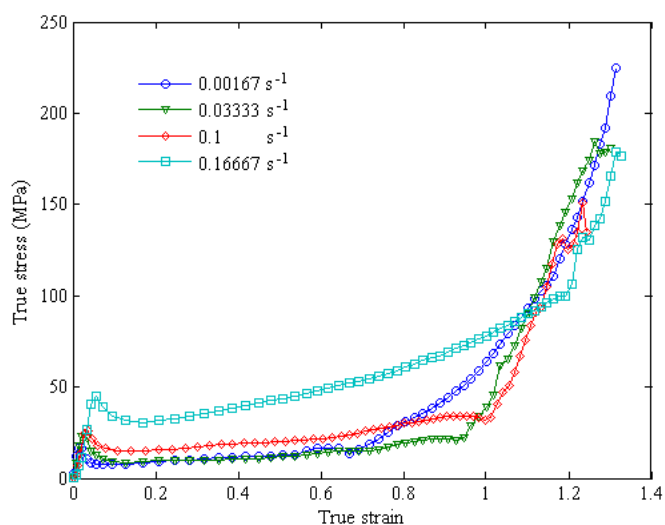
1.1 ผลการทดสอบแรงดึง

ผลการดึงทดสอบสามารถแสดงพฤติกรรมการยืดขึ้นทดสอบ ของผนังขวดทดสอบซึ่งผลิตจากวัสดุ PET แสดงเป็นภาพลำดับเหตุการณ์ในภาพที่ 26 ค่าแรงดึงต่อระยะยืดจะถูกบันทึกและนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (σ) ความเครียด (ε) และอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) ภาพที่ 27 จะแสดงผลเป็นกราฟระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริง

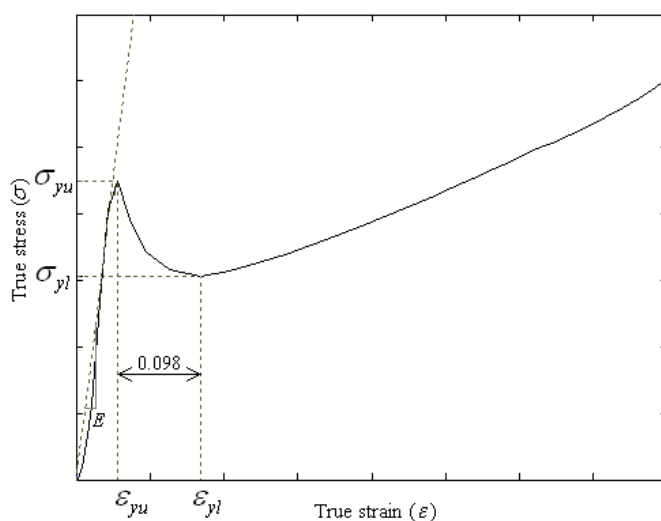
เส้นกราฟหนึ่งเส้นจะแทนด้วยค่าอัตราความเครียดหนึ่งค่า ซึ่งค่าของอัตราความเครียดสามารถใช้สมการ (7) ในการคำนวณ โดยใช้ค่าความเร็วในการยืดจากการทดลอง 4 ค่า ประกอบด้วย 5, 100, 300 และ 500 มิลลิเมตร/นาที ได้ค่าอัตราความเครียดประกอบด้วย 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s^{-1} ตามลำดับ ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้สามารถระบุคุณลักษณะของวัสดุ PET และสามารถระบุค่าของยังก์โมดูลัส (E) และความเค้นที่จุดครากบน (upper yield stress, σ_{yu}) และค่าความเค้นที่จุดครากล่าง (lower yield stress, σ_{yl}) ซึ่งผู้วิจัยกำหนดความเค้นคราก (σ_y) มีค่าเท่ากับค่าความเค้นที่จุดครากล่างเพื่อความปลอดภัยในการวิเคราะห์เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าความเค้นที่จุดครากบนและเกิดภายหลัง โดยมีค่าความเครียดที่จุดครากบน (ε_{yu}) ต่างจากค่าความเครียดที่จุดครากล่าง (ε_{yl}) โดยเล็กน้อยมาก (0.098) แสดงในภาพที่ 28 และแสดงค่าในตารางที่ 2



ภาพที่ 26 แสดงลักษณะการยืดของขึ้นทดสอบซึ่งตัดมาจากผนังขวดทดสอบ ก



ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริง (true stress-strain curve) ของวัสดุ PET จากการดึงทดสอบที่อัตราความเครียด 4 ค่า



ภาพที่ 28 แสดงคุณลักษณะของวัสดุ PET จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริงของการทดสอบดึง

จากภาพที่ 26 กำหนดให้ทิศการยืดตามแนวแรงดึงเป็น Y และทิศการหดตั้งฉากกับทิศการยืดเป็น X ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (ν) สามารถหาได้ (Timoshenko and Goodier, 1970) โดยมีค่าเฉลี่ย 0.495 ชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดทุกชิ้นทดสอบ ของความเร็วการดึงทั้ง 4 ค่า ทำให้สามารถหาค่าความเครียดวิบัติ และความเค้นวิบัติ ณ ตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบถูกดึงจนขาด แสดงได้

ในตารางที่ 3 และแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิบัติกับอัตราการความเครียด และความเครียดวิบัติกับอัตราการความเครียด ได้ในภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าคุณลักษณะของวัสดุ PET ที่อัตราการความเครียด 0.00167 ถึง 0.16667 s⁻¹

Strain Rate, $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	Upper Yield Stress, σ_{yu}	True Strain at Upper Yield	Lower Yield Stress, σ_{yl}	True Strain at Lower Yield	Young's Modulus, E
	(MPa)	Stress, ϵ_{yu}	(MPa)	Stress, ϵ_{yl}	(MPa)
0.00167	17.2384	0.0178	7.5879	0.0807	968.4494
0.03333	24.8725	0.0266	8.5426	0.1213	935.0564
0.10000	26.8926	0.0320	14.8980	0.1549	840.3938
0.16667	44.8603	0.0554	30.4661	0.1706	809.7527

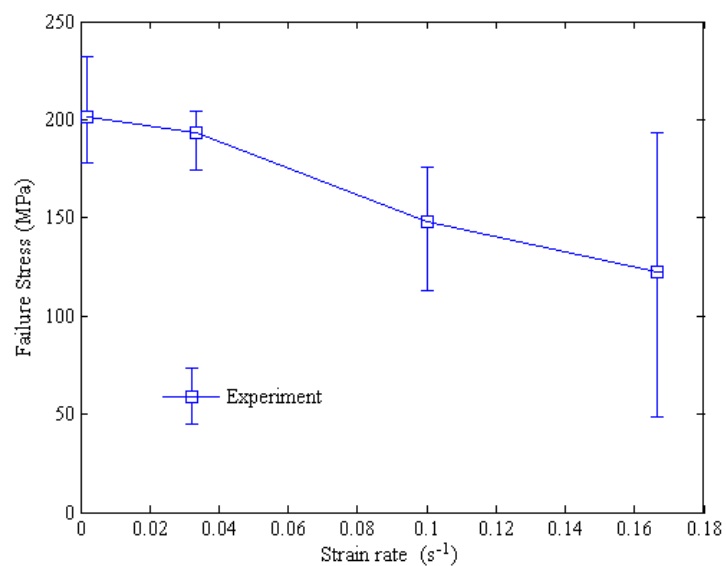
ตารางที่ 3 ค่าความเครียดวิบัติ และความเค้นวิบัติของวัสดุ PET ที่อัตราการความเครียด 0.00167 ถึง 0.16667 s⁻¹

Strain Rate, $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	Failure Stress, σ_{fail} (MPa)			Failure Strain, ϵ_{fail}		
	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean	Minimum
0.00167	193.5743	122.6087	48.3340	1.5041	1.2408	0.9400
0.03333	175.8233	148.3227	113.1903	1.3188	1.2508	1.1817
0.10000	204.5290	193.1297	174.3146	0.9933	0.9342	0.8920
0.16667	232.3326	201.2630	178.2339	1.3244	1.2589	1.1817

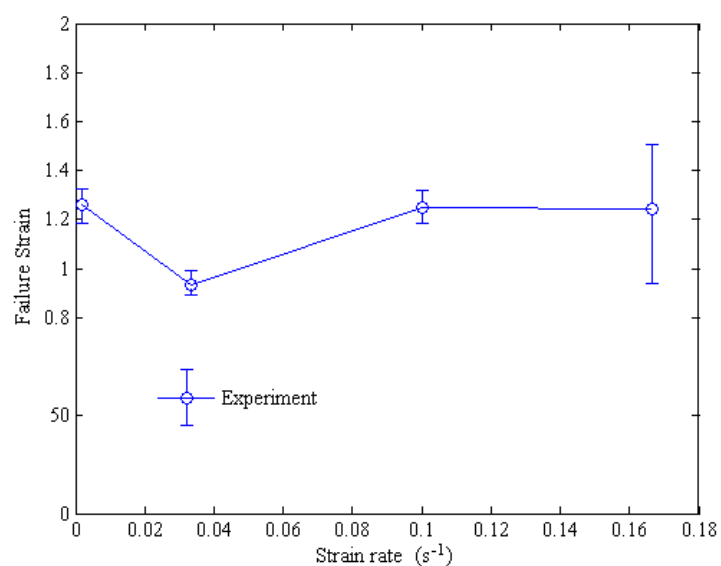
1.2 ผลการสร้างสมการความเค้นฮาร์ทเด้นนิ่ง

จากสมการ (42) ใช้วิธีสวมสมการ (curve fitting) เพื่อหาค่า σ_f, n และ α ที่ค่าอัตราการความเครียดทั้ง 4 ค่า ได้ค่าทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4 นำค่าที่ได้และจากตารางที่ 2 ไปใช้พล็อตสมการ (42) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยแสดงผลการเปรียบเทียบในภาพที่ 31 ซึ่งเริ่มต้นที่จุดความเครียดที่ตำแหน่งความเค้นที่จุดครากล่าง 0.08 และแสดงผลความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนในภาพที่ 32 มีค่าความคลาดเคลื่อนของผลการแทนค่าในช่วง

ความเครียด 0.08 ถึง 0.8 ที่อัตราการความเครียด 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s^{-1} มีค่า 18.88%, 1.06%, -3.13% และ 0.64% ตามลำดับ



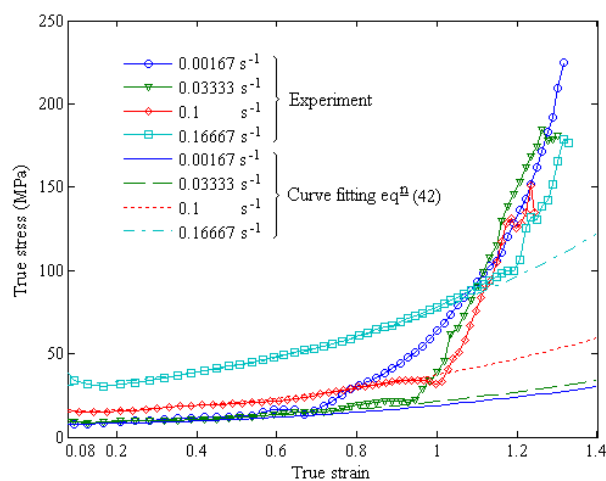
ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิกฤติกับอัตราการความเครียดจริงของวัสดุ PET จากการดึงทดสอบ



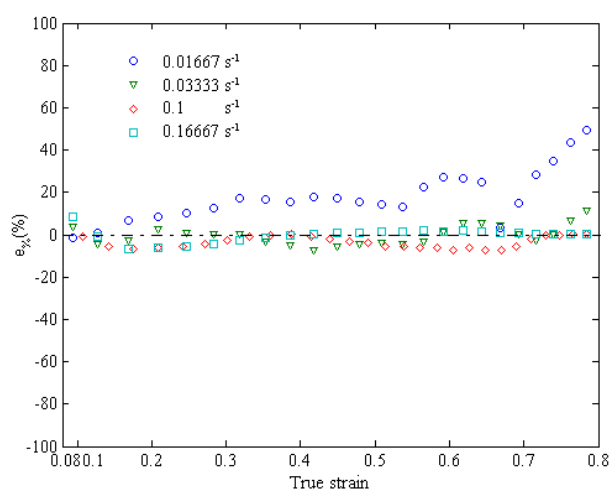
ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดวิกฤติกับอัตราการความเครียดจริงของวัสดุ PET จากการดึงทดสอบ

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการ (42) ของวัสดุ PET ที่อัตราความเครียด 0.00167 ถึง 0.16667 s⁻¹

Strain Rate, $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	Flow Stress, σ_f (MPa)	n	α
0.00167	15.1757	2	0.25
0.03333	17.0852	2	0.25
0.10000	29.7960	2	0.25
0.16667	60.9322	2	0.25



ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงกับความเครียดจริงของวัสดุ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการ (42) ของอัตราความเครียด 4 ค่า



ภาพที่ 32 กราฟแสดงผลความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์จากผลการแทนค่าในสมการ (42) ของอัตราความเครียด 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s⁻¹

1.3 ผลการสร้างสมการความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่งสัมพันธ์กับอัตราความเครียด (strain rate)

จากสมการ (43) และ (44) ใช้วิธีแทนค่าและสวมสมการ (curve fitting) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 2 และ 3 เพื่อหาค่าคงที่ของสมการ (45) ประกอบด้วย σ_{y0} , σ_{fc0} , D และ P ซึ่งค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงที่จากการสวมสมการของสมการ (45)

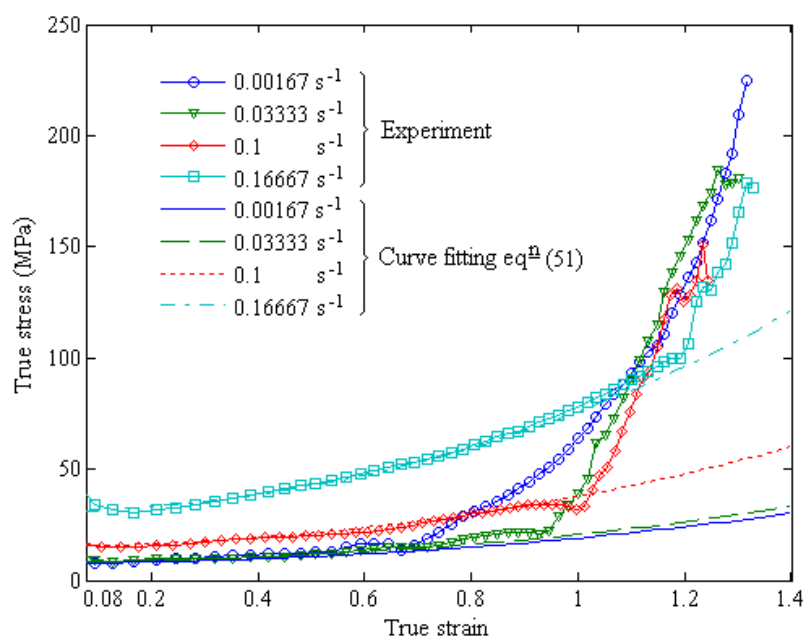
σ_{y0} (MPa)	σ_{fc0} (MPa)	n	α	D	P
7.5865	15.1730	2	0.25	0.1005	0.46

ค่าจากตารางที่ 5 เมื่อนำไปแทนในสมการ (45) จะได้สมการความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่งในรูปแบบของค่าคงที่และของตัวแปรความเครียดช่วงพลาสติก (ε_p) และตัวแปรอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) ซึ่งคือสมการความเค้นไหล ($\sigma_f = \sigma_f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$)

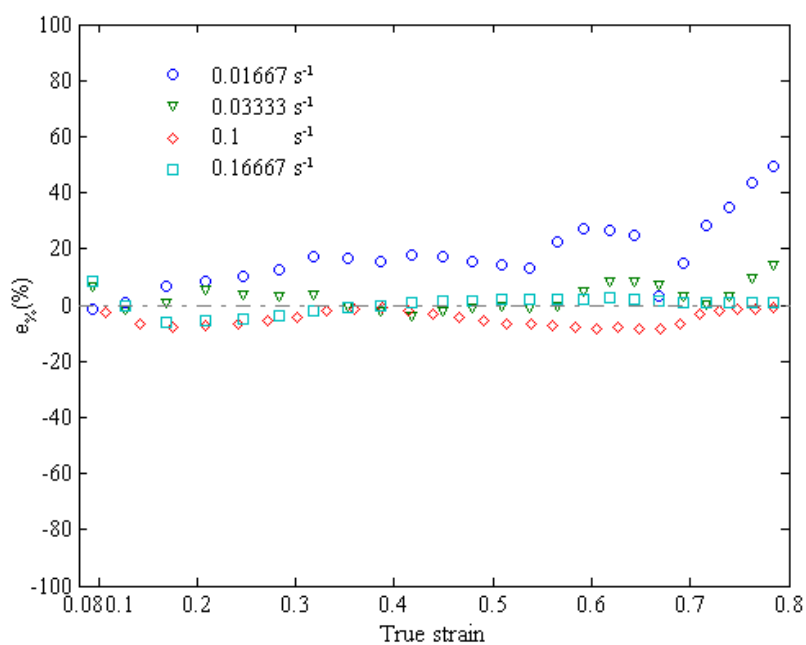
$$\sigma_f = [7.5865 + (15.1730 - 7.5865)\varepsilon_p^2](1 + 0.25\varepsilon_p) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{0.1005} \right)^{0.46} \right] \quad (50)$$

$$\sigma_f = [7.5865 + 7.5865\varepsilon_p^2](1 + 0.25\varepsilon_p) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{0.1005} \right)^{2.17} \right] \quad (\text{MPa}) \quad (51)$$

นำสมการ (51) ไปพล็อตเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของการสวมสมการกับผลการทดสอบแสดงได้ในภาพที่ 33 โดยเริ่มต้นที่จุดความเครียดที่ตำแหน่งความเค้นครากล่าง (lower yield stress) 0.08 และแสดงผลความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนในภาพที่ 34 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการแทนค่าในช่วงความเครียด 0.08 ถึง 0.8 ที่อัตราความเครียด 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s⁻¹ มีค่า 19.68%, 3.45%, -4.45% และ 0.31% ตามลำดับ



ภาพที่ 33 กราฟความเค้นจริงกับความเครียดจริงของวัสดุ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับสมการ (51) ของอัตราความเครียด 4 ค่า

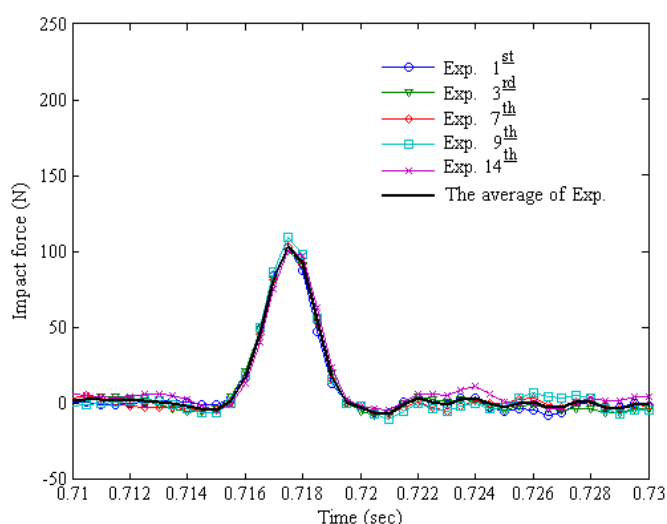


ภาพที่ 34 กราฟแสดงผลความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ของผลการแทนค่าในสมการ (51) ของอัตราความเครียด 0.00167, 0.03333, 0.1 และ 0.16667 s⁻¹

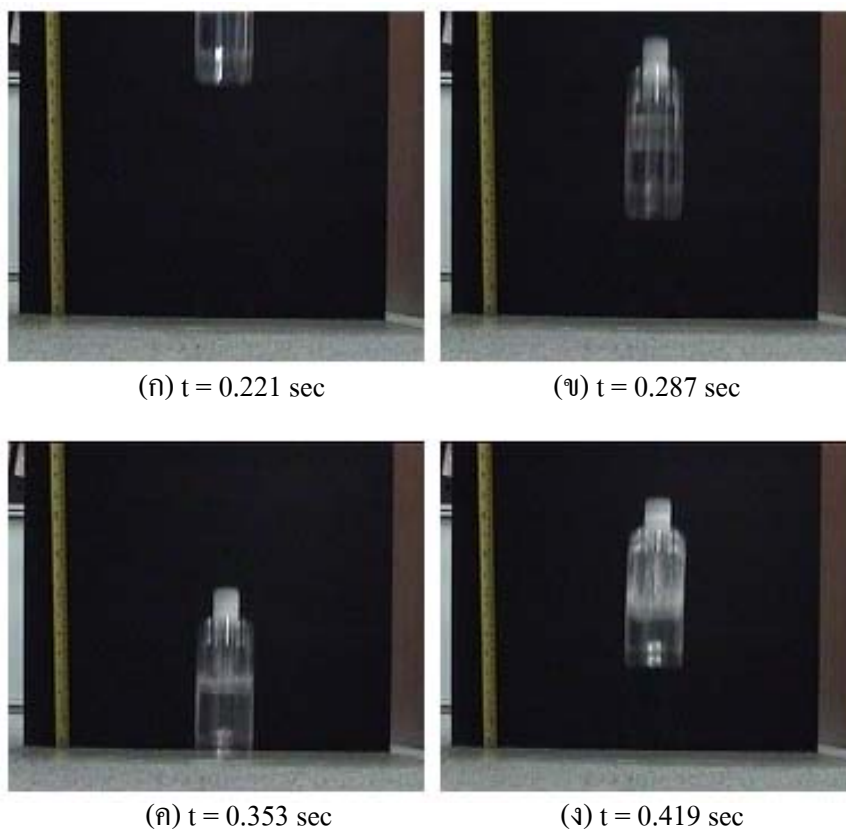
2. ผลการทดสอบปล่อยตก (drop test) ขวดทดสอบ ก

2.1 ผลการวัดแรงกระแทก

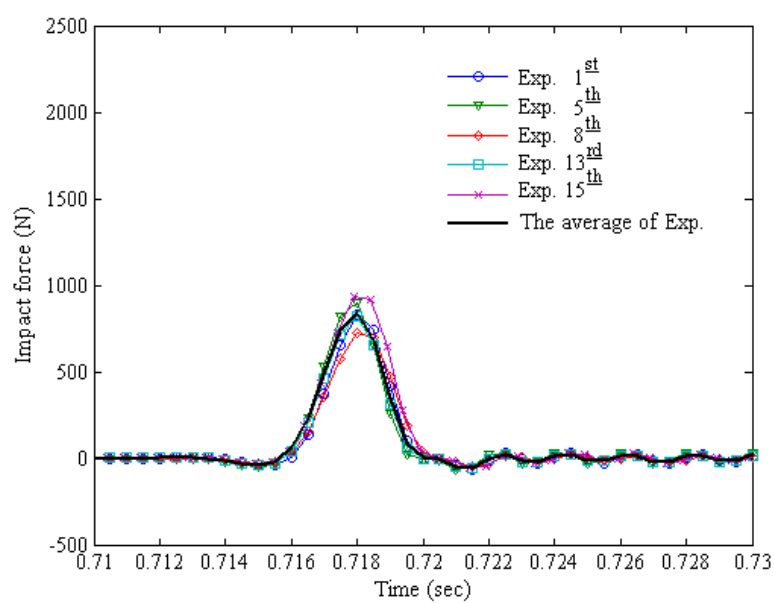
การปล่อยตกเพื่อวัดแรงกระแทกจะใช้ภาพเคลื่อนไหวเพื่อเลือกข้อมูลที่ดี 5 ข้อมูลของการปล่อยตก 15 ครั้ง ที่แต่ละค่าความสูง (0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร) ซึ่งมีวิธีเลือกจากมุมของขวดทดสอบ ก ขณะกระแทกกับแผ่นวัดแรง แนวแกนของขวดจะต้องทำมุมกับเส้นแนวตั้ง (vertical line) ไม่มากกว่า ± 3 องศา (ทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา) ผลการบันทึกค่าแรงกระแทกของขวดเปล่า (ไม่บรรจุน้ำ) ปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร แสดงในภาพที่ 35 สำหรับตัวอย่างของขวดบรรจุน้ำ 250 ลิตร (1/2 ของความจุ) ปล่อยตกจากระดับความสูง 0.5 เมตร แสดงในภาพที่ 36 และผลการบันทึกค่าแรงกระแทกของขวดบรรจุน้ำ 250 ลิตร ปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร แสดงในภาพที่ 37, 38 และ 39 ตามลำดับ พร้อมกับแสดงเส้นแรงกระแทกเฉลี่ยของแรงกระแทกในกราฟแต่ละค่าความสูงของการปล่อยตก ตัวอย่างของขวดบรรจุน้ำ 500 ลิตร (เต็มความจุ) ปล่อยตกจากระดับความสูง 1 เมตร แสดงในภาพที่ 40 และผลการบันทึกค่าแรงกระแทกของขวดบรรจุน้ำ 500 ลิตร ปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร แสดงในภาพที่ 41, 42 และ 43 ตามลำดับ พร้อมกับแสดงเส้นแรงกระแทกเฉลี่ยแรงกระแทกในกราฟของแต่ละค่าความสูงของการปล่อยตก



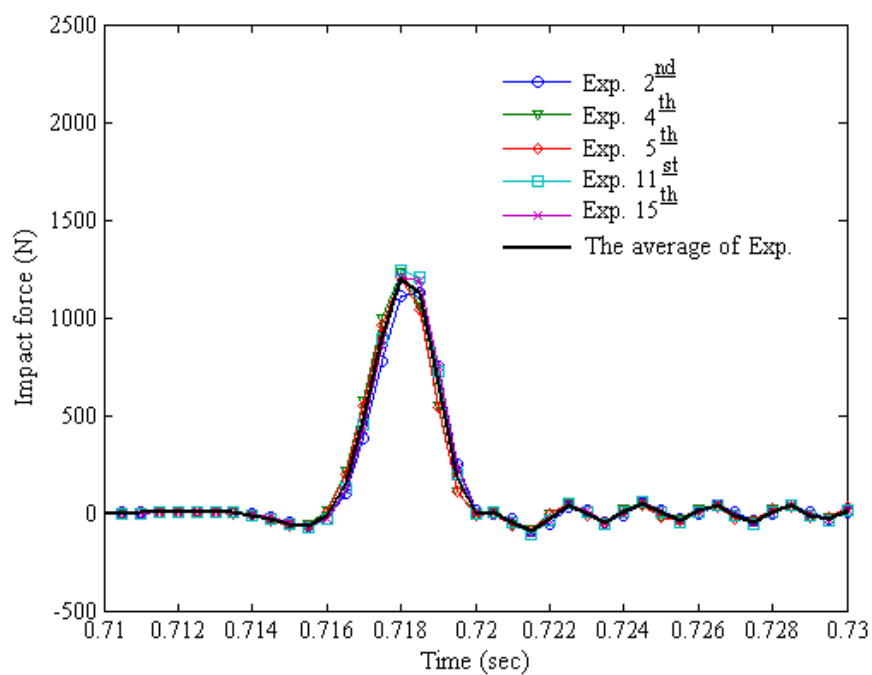
ภาพที่ 35 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบเปล่า (ไม่บรรจุน้ำ) ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



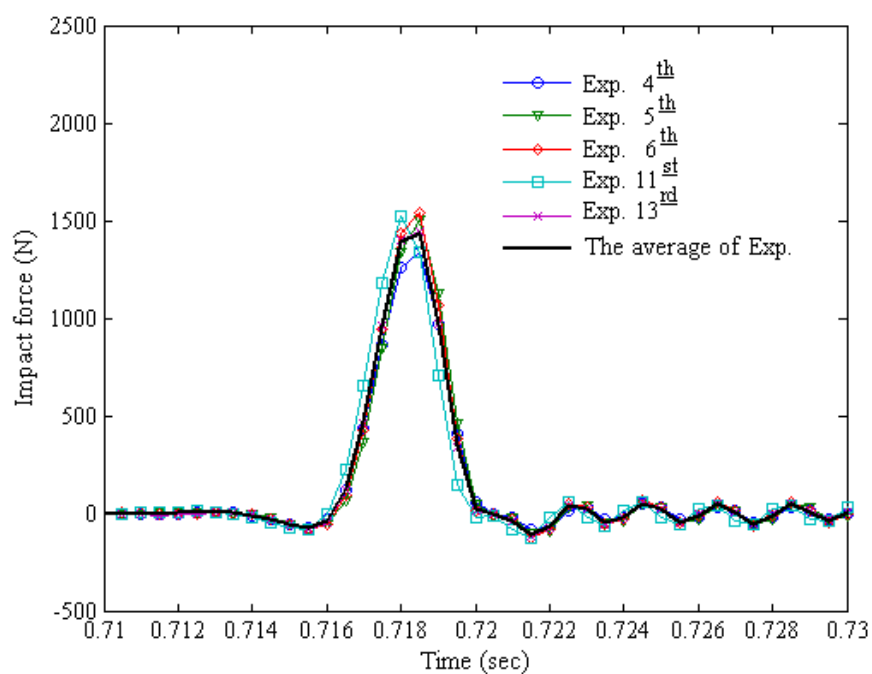
ภาพที่ 36 ผลการปล่อยตกขวดทดสอบ ก บรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยจากความสูง 0.5 เมตร



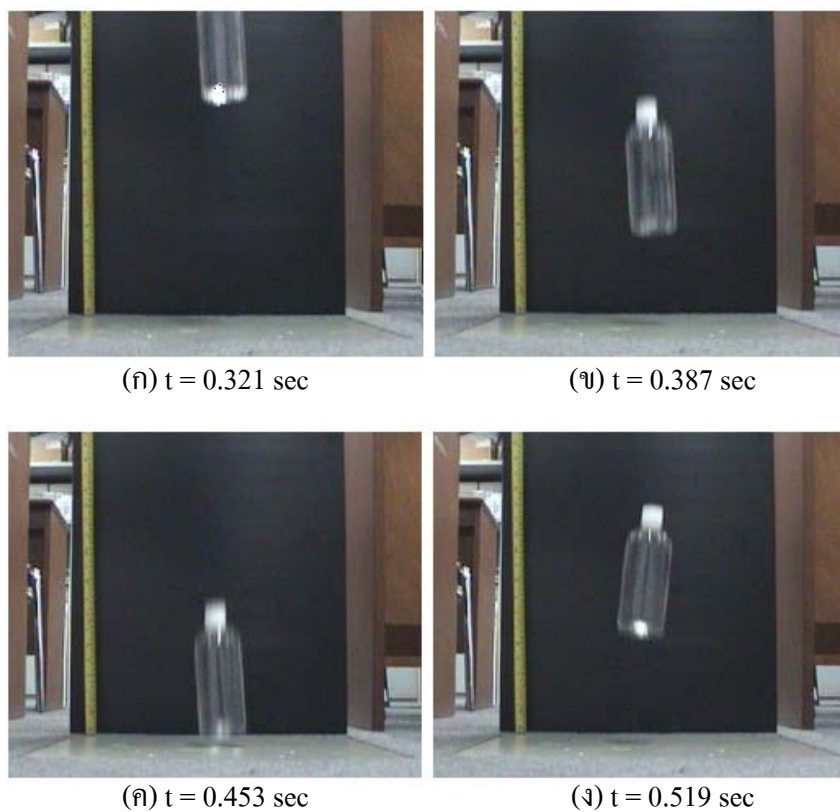
ภาพที่ 37 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยจากความสูง 0.5 เมตร



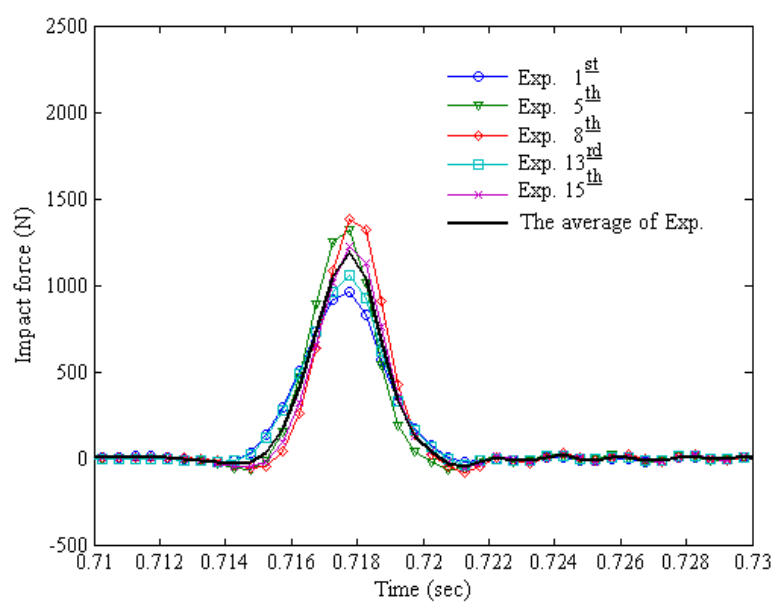
ภาพที่ 38 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความ จุ่มปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร



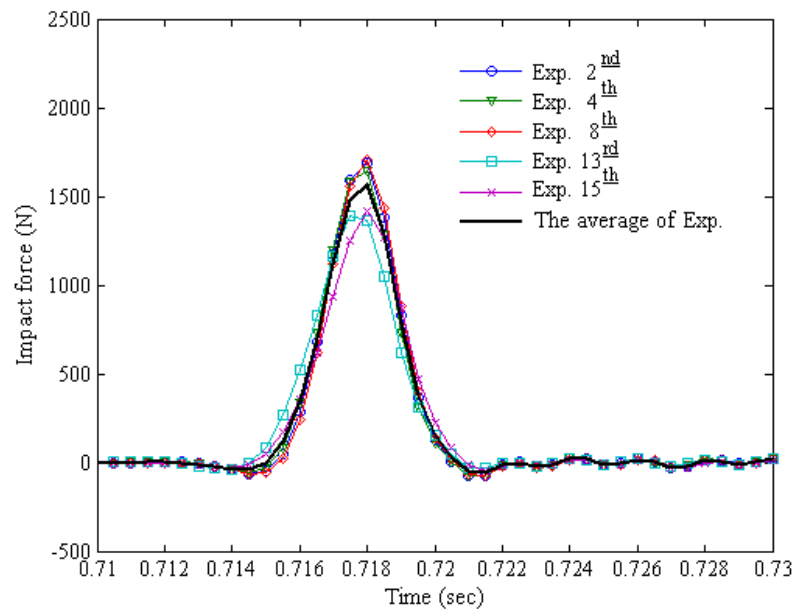
ภาพที่ 39 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความ จุ่มปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร



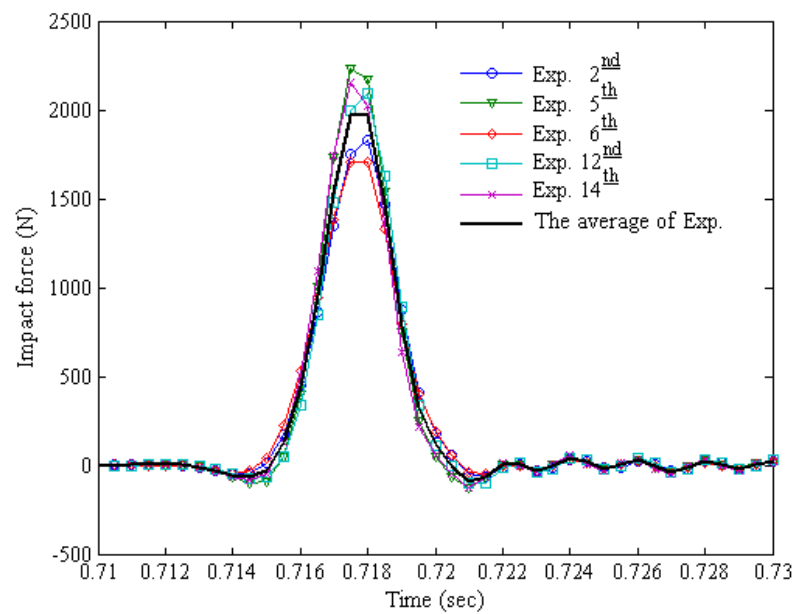
ภาพที่ 40 ผลการปล่อยตกขวดทดสอบ ก บรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยจากความสูง 1.0 เมตร



ภาพที่ 41 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



ภาพที่ 42 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร

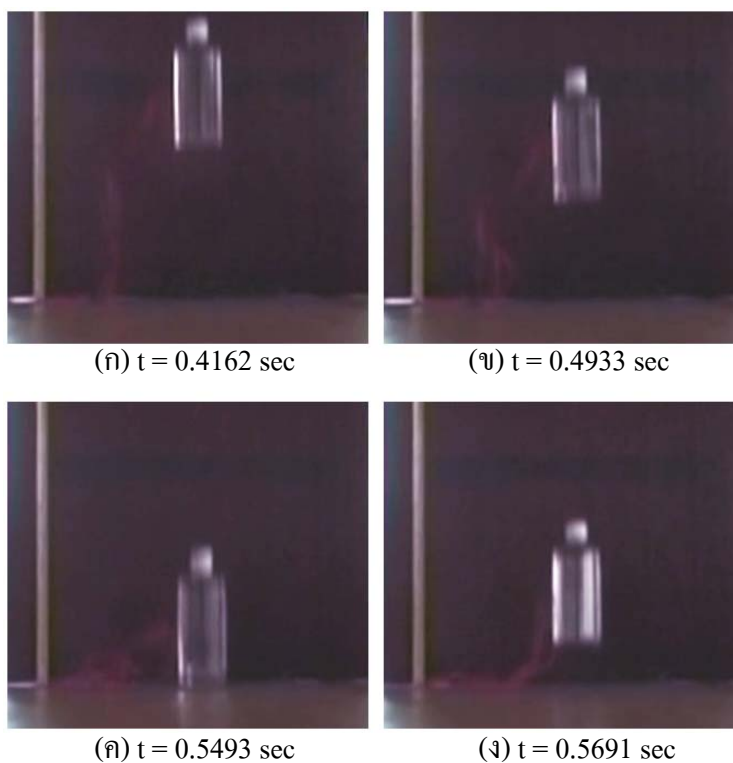


ภาพที่ 43 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร

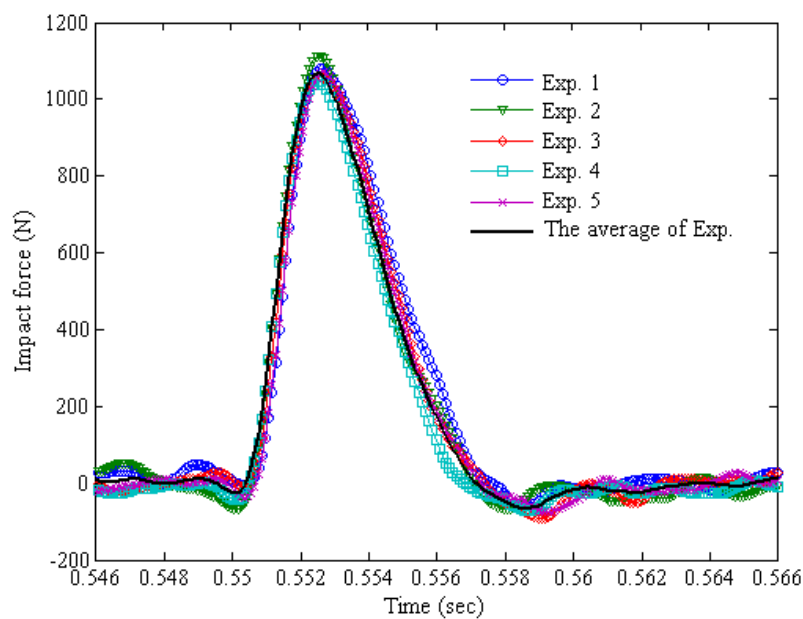
2.2 ผลการวัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน

การปล่อยตกเพื่อวัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน ภาพลำดับเหตุการณ์ ตัวอย่างการปล่อยตกขวดทดสอบ แสดงในภาพที่ 44 ขวดบรรจุน้ำถูกปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร ในแนวดิ่งลงมากระทบกับแผ่นวัดแรงทำให้สามารถวัดแรงตกกระทบบน (impact force) ระหว่างพื้นกับขวด และสามารถแสดงผลบันทึกค่าแรงตกกระทบบนจากการทดสอบปล่อยตกขวดบรรจุน้ำทั้ง 5 ใบ เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตกกระทบบนกับเวลา พร้อมกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งหมดในภาพที่ 45

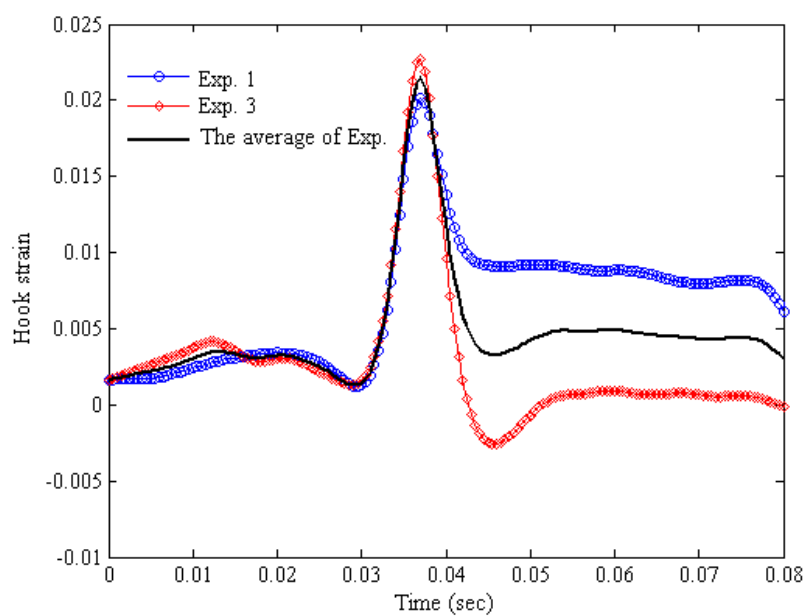
ผลการวัดความเครียดในแนวเส้นรอบวงซึ่งเกิดที่ผนังขวดของการปล่อยตก แสดงผลในภาพที่ 46 ถึง ภาพที่ 48 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวงของขวดทั้ง 5 ใบกับเวลาที่ตำแหน่งวัด P1 ถึง P3 ตามลำดับ พร้อมกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งหมด (ยกเว้นที่ตำแหน่ง P1 ใช้เฉพาะการทดสอบที่ไม่ถูกผลกระทบจากคลื่นรบกวน คือ ครั้งที่ 1 และ 3)



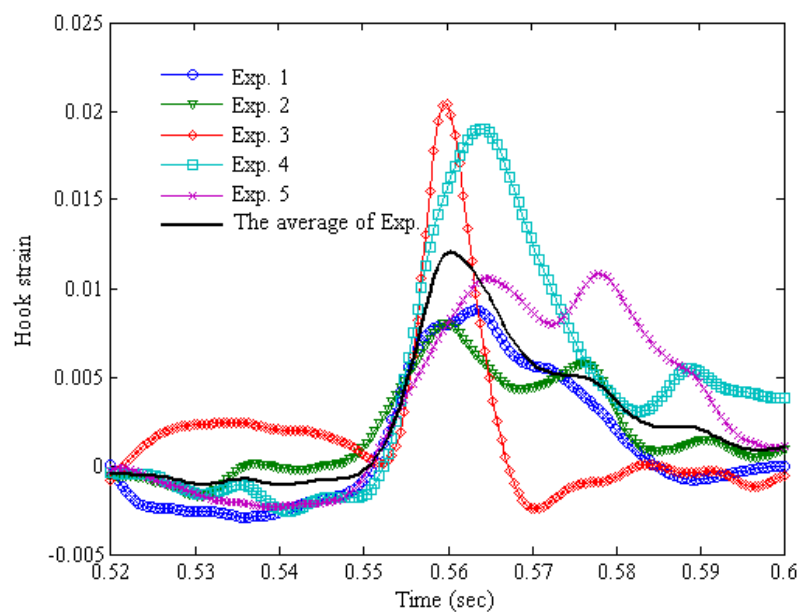
ภาพที่ 44 ผลการปล่อยตกของขวดทดสอบ ก บรรจุน้ำเต็มความจุและติด strain gauge ปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



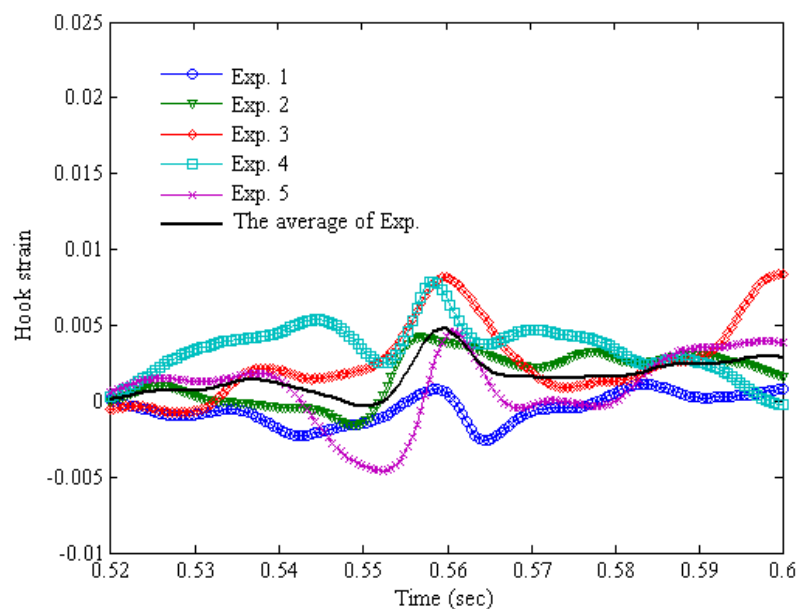
ภาพที่ 45 ผลการบันทึกค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุและติด strain gauge ปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร



ภาพที่ 46 ผลการบันทึกค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุที่จุด P1 ปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร (เฉพาะการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 3)



ภาพที่ 47 ผลการบันทึกค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาของขวดทดสอบ บรรจุน้ำเต็มความจุที่จุด P2 ปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร



ภาพที่ 48 ผลการบันทึกค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาของขวดทดสอบ บรรจุน้ำเต็มความจุที่จุด P3 ปลอยตกจากความสูง 0.5 เมตร

2.3 ผลการหาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกของขวด

การปล่อยขวดทดสอบ ก ซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ ถูกทดสอบปล่อยตกด้วยวิธี Bruceton Staircase โดยกำหนดระดับความสูง 3.0 เมตรเป็นระดับความสูงเริ่มต้น และเพิ่มความสูงครั้งละ 0.5 เมตร เมื่อขวดตกกระแทกพื้นแล้วไม่แตก หรือลดความสูงครั้งละ 0.5 เมตร เมื่อขวดตกกระแทกพื้นแล้วแตก ผลการทดสอบสามารถนำมาบันทึก ระดับความสูงที่ขวดตกกระแทกแล้วแตกและไม่แตกแสดงได้ในตารางที่ 6 และนำไปคำนวณหาค่าความสูงเฉลี่ยการแตกของขวดจากสมการ (17) ได้ $h=4.0+0.5[(14/9)-1/2]$ ซึ่งทำให้ความสูงเฉลี่ยการแตกของขวดทดสอบ ก มีค่าเท่ากับ 4.5278 เมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนคำนวณจากสมการ (19) มีค่า 0.4090 เมตร ขวดทดสอบ ก ที่มีการแตกเกิดขึ้น ภายหลังการทดสอบพบว่า บริเวณก้นขวดจะเป็นบริเวณที่มีการแตก ซึ่งแสดงได้ในภาพที่ 49

ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการทดสอบปล่อยตกด้วย วิธี Bruceton Staircase

Drop height (m)	Outcome of Test (X=failure, O=non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3.0	O																			
3.5		O		O																
4.0			X		O												O			
4.5						O		O		O		O		O		X		O		X
5.0							X		X		X		X		X				X	
																Totals				
																9	11	-	9(N)	14(A)
																			26(B)	

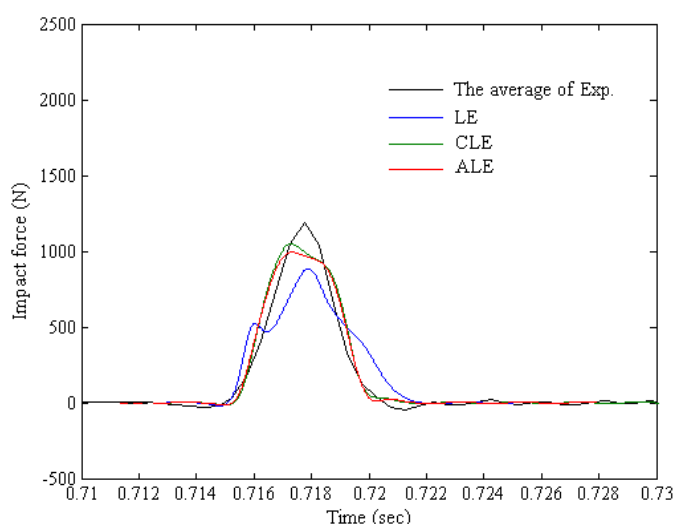


ภาพที่ 49 ขวดทดสอบ ก ที่ถูกทดสอบปล่อยตกการแตกจะเกิดขึ้นที่ก้นขวด

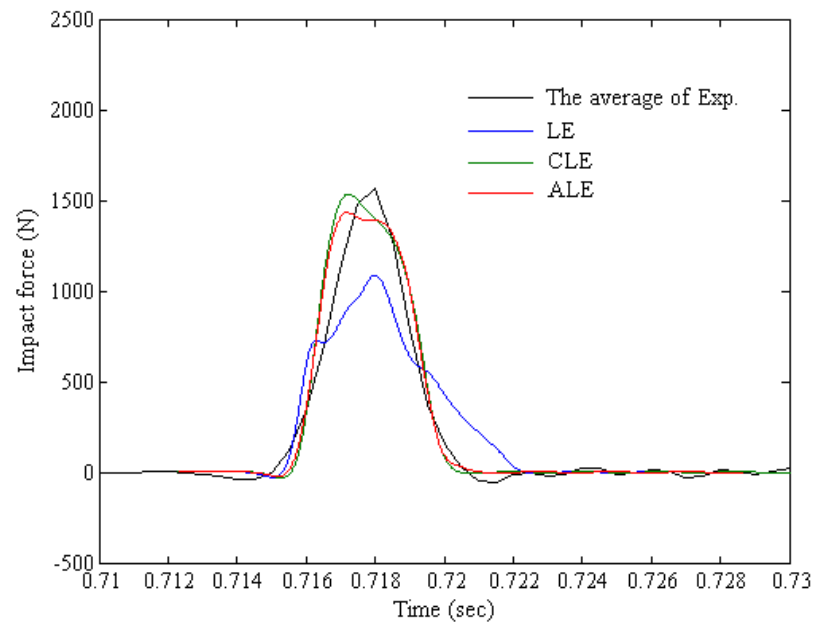
3. ผลการจำลองการทดสอบปล่อยตกของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์ FEA ของแบบจำลองการปล่อยตกขวดทดสอบ ก ซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ โดยกำหนดให้ใช้สมการลากรางเจียน (LE) สมการร่วม ลากรางเจียน-ออยเลอร์เรเนียน (CLE) และสมการอาร์บิทรี ลากรางเจียน-ออยเลอร์เรเนียน (ALE) ในการสร้างความสัมพันธ์ของการเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล โดยใช้กราฟของแรงกระแทกกับเวลา ที่ระดับความสูงปล่อยตก 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร แสดงในภาพที่ 50, 51 และ 52 ตามลำดับ ผลของน้ำบรรจุภายใน (sloshing) การยุบตัวของผนัง (deformation) และค่าความเค้นที่ผนังของขวดของแบบจำลองขวดทั้งสาม ณ เวลาที่ขวดกระแทกกับพื้น แสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 53

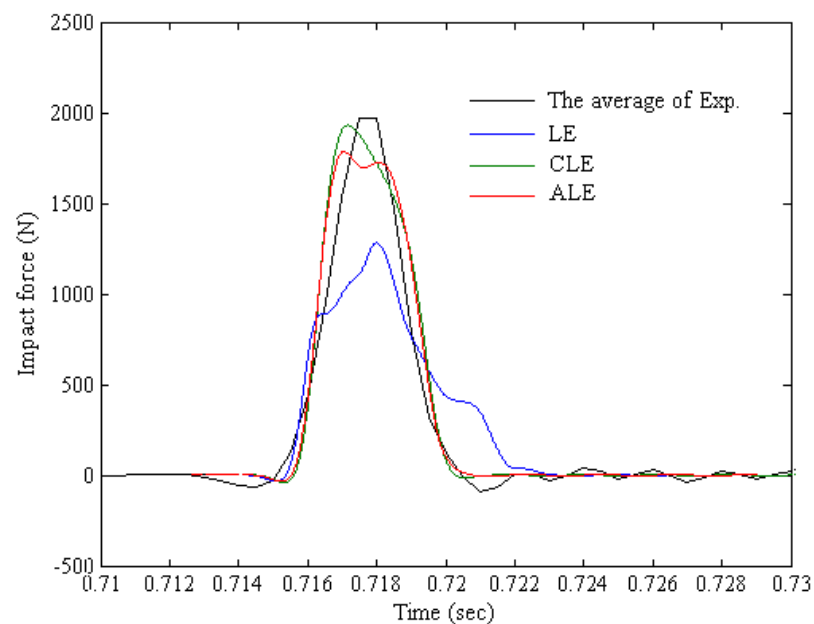
ผลการทดสอบทางกลและผลวิเคราะห์ FEA ทั้งสามวิธี สามารถแสดงค่าเพื่อใช้เปรียบเทียบได้ในตารางที่ 7 โดยแสดงค่าของแรงกระแทกสูงสุดเฉลี่ย (average of maximum impact force) และระยะเวลาการเกิดแรงกระแทก (pulse time) ค่าเฉลี่ยของแรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้จากการทดสอบทางกลเปรียบเทียบกับค่าของผลการวิเคราะห์ FEA ทั้งสามวิธี จากระดับความสูงปล่อยตก 0.5 ถึง 1.5 เมตร แสดงเป็นกราฟได้ในภาพที่ 54 มีค่าคลาดเคลื่อน 30.26%, 5.20% และ 11.26% จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี LE, CLE และ ALE ตามลำดับ



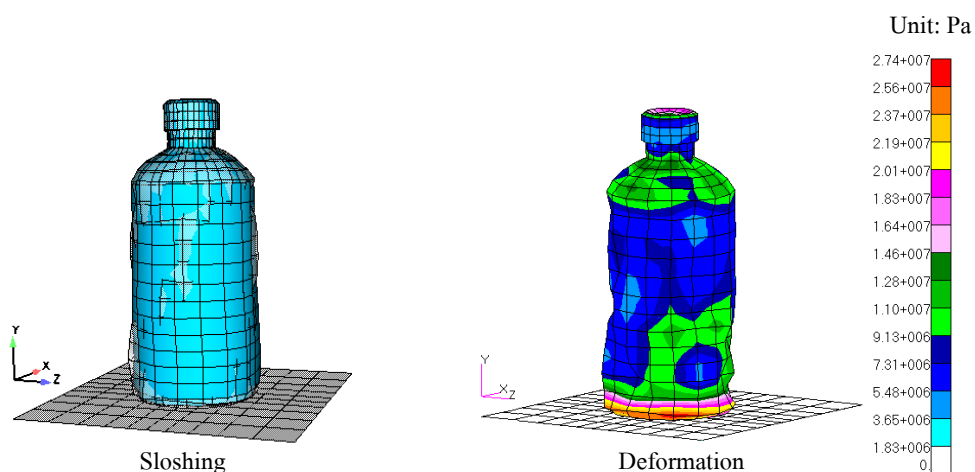
ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



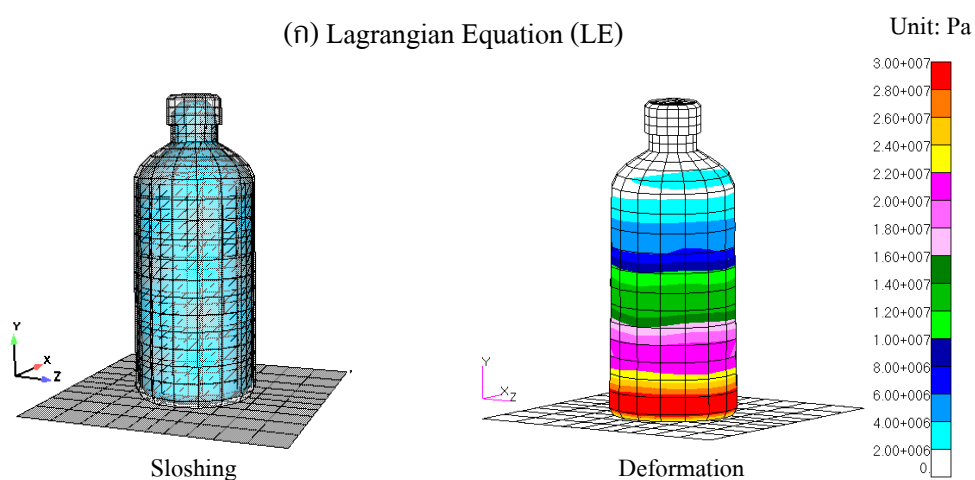
ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร



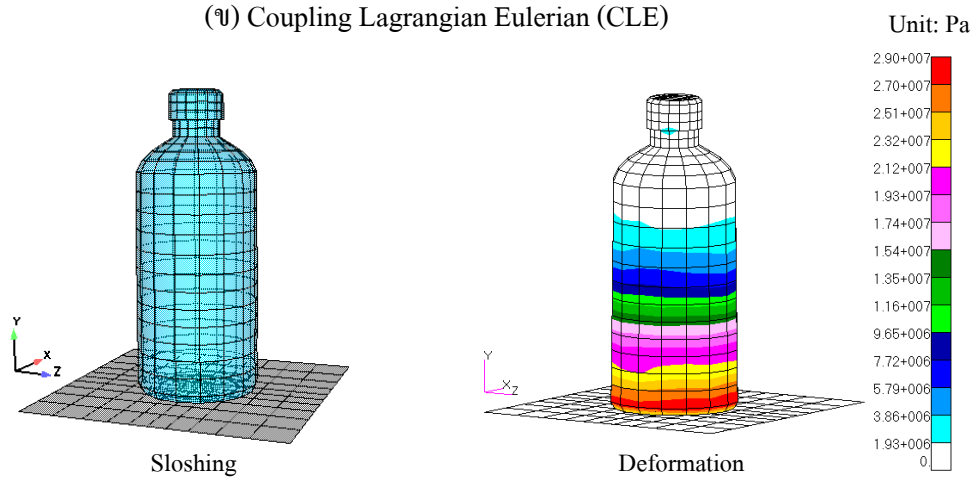
ภาพที่ 52 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร



(ก) Lagrangian Equation (LE)



(ข) Coupling Lagrangian Eulerian (CLE)

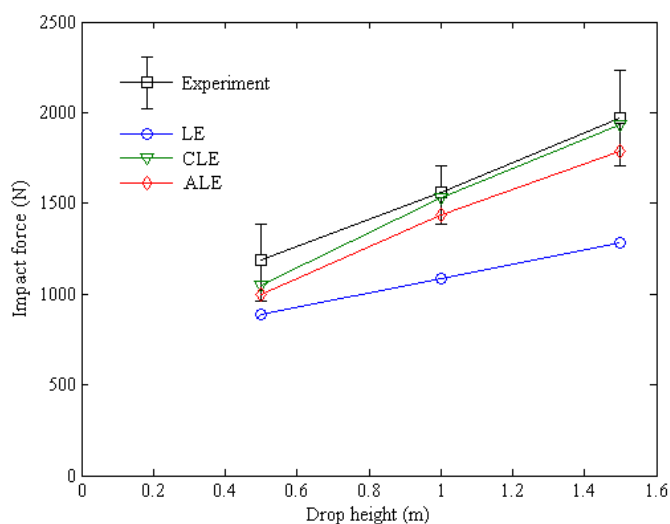


(ค) Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

ภาพที่ 53 ผลของน้ำบรรจุภายใน (sloshing) การยุบตัวของผนัง (deformation) และค่าความเค้นที่ผนังของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุของแบบจำลอง (ก) LE (ข) CLE และ (ค) ALE ณ เวลาที่ขวดกระทบแท่งกับพื้นจากความสูง 1.0 เมตร

ตารางที่ 7 แสดงค่าแรงกระแทก และเวลาเกิดแรงกระแทก ของการทดสอบทางกล และ FEA ของ
ขวดบรรจุน้ำเต็มความจุ

Drop Height (m)	Impact Force (N)				Pulse Time (msec)			
	Exp. (Average)	LE	CLE	ALE	Exp. (Average)	LE	CLE	ALE
0.5	1188.6	885.8	1047.7	994.3	5.5	7	6	6
1.0	1563.8	1087.5	1534.6	1433.1	5.5	7	5.5	5.5
1.5	1967.2	1281.6	1930.2	1788.5	5.5	7	5.5	5.5



ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกระหว่างค่าเฉลี่ย
ของการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของการปล่อยตกขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุ

เวลาของการประมวลผลโดยใช้แบบจำลอง LE, CLE และ ALE ใช้เวลา 16.92 นาที 35.55 นาที และ 16.33 นาที ตามลำดับ

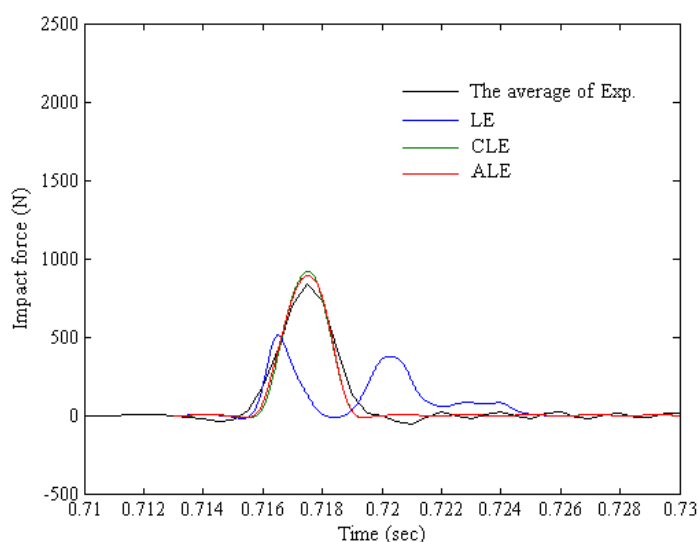
4. ผลการจำลองการทดสอบปล่อยตกของขวดบรรจุน้ำครึ่งหนึ่งของความจุโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์ FEA ของแบบจำลองการปล่อยตกขวดทดสอบ ก ซึ่งบรรจุน้ำครึ่งหนึ่งของความจุ (250 ลิตร) โดยกำหนดให้ใช้สมการลากรางเจียน (LE) สมการร่วม ลากรางเจียน-ฮอยเลอร์

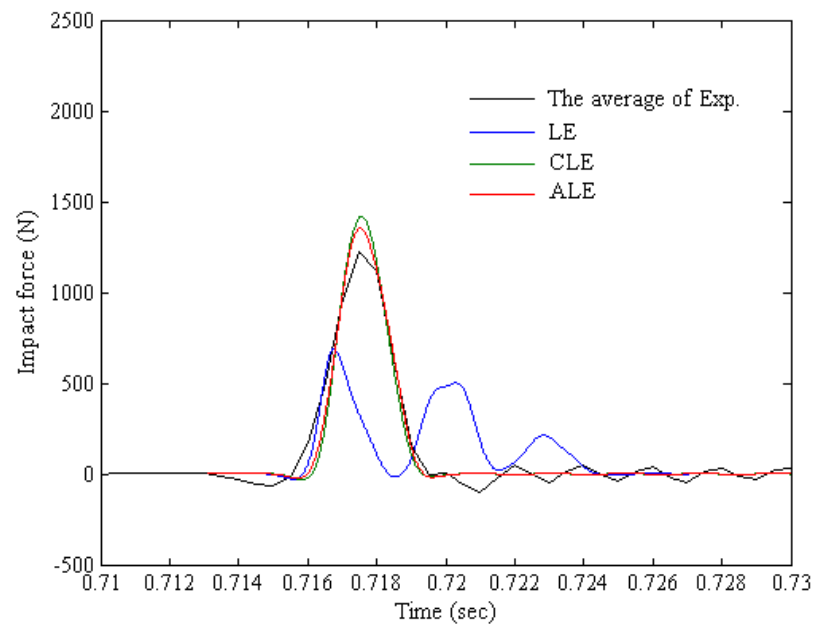
เรียน (CLE) และสมการอาร์บิทรี ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE) ในการสร้างความสัมพันธ์ของการเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล โดยใช้กราฟของแรงกระแทกกับเวลา ที่ระดับความสูงปล่อยตก 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร แสดงในภาพที่ 55, 56 และ 57 ตามลำดับ ผลของน้ำบรรจุภายใน (sloshing) การยุบตัวของผนัง (deformation) และค่าความเค้นที่ผนังของขวดของแบบจำลองขวดทั้งสาม ณ เวลาที่ขวดกระแทกกับพื้น แสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 58

ค่าความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบกับผลวิเคราะห์ FEA สามารถแสดงสรุปได้ในตารางที่ 8 โดยแสดงค่าของแรงกระแทกสูงสุดเฉลี่ย (average of maximum impact force) และระยะเวลาการเกิดแรงกระแทก (pulse time) ของผลการทดสอบทางกล และผลการวิเคราะห์ FEA ทั้งสามวิธี ค่าเฉลี่ยแรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้จากการทดสอบทางกลของการปล่อยตก เปรียบเทียบกับค่าของผลการวิเคราะห์ FEA ทั้งสามวิธี จากระดับความสูงปล่อยตก 0.5 ถึง 1.5 เมตร แสดงเป็นกราฟได้ในภาพที่ 59 มีค่าคลาดเคลื่อน -41.32%, 17.77% และ 12.24% จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี LE, CLE และ ALE ตามลำดับ

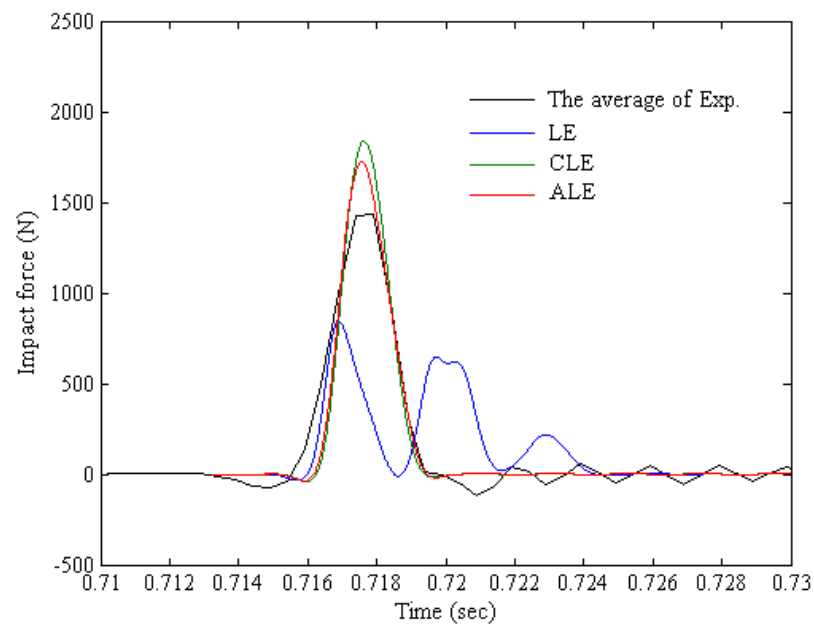
เวลาของการประมวลผลโดยใช้แบบจำลอง LE, CLE และ ALE ใช้เวลา 14.83 นาที 35.30 นาที และ 14.95 นาที ตามลำดับ



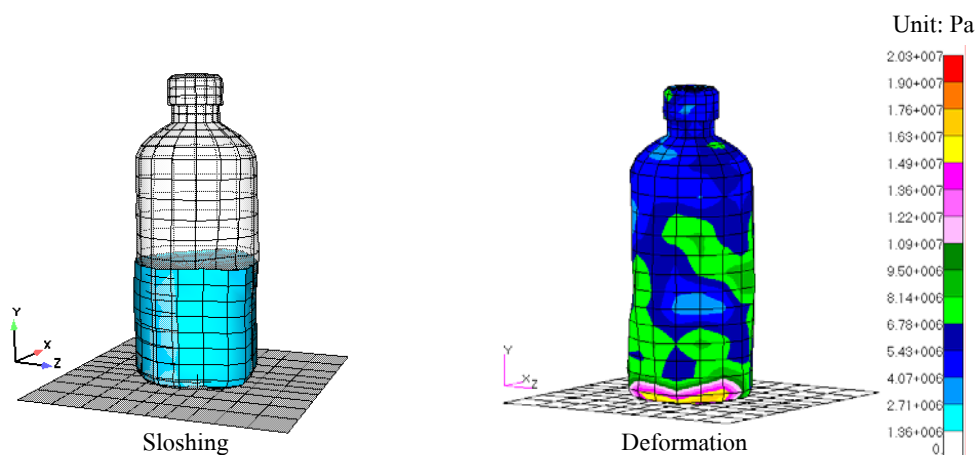
ภาพที่ 55 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



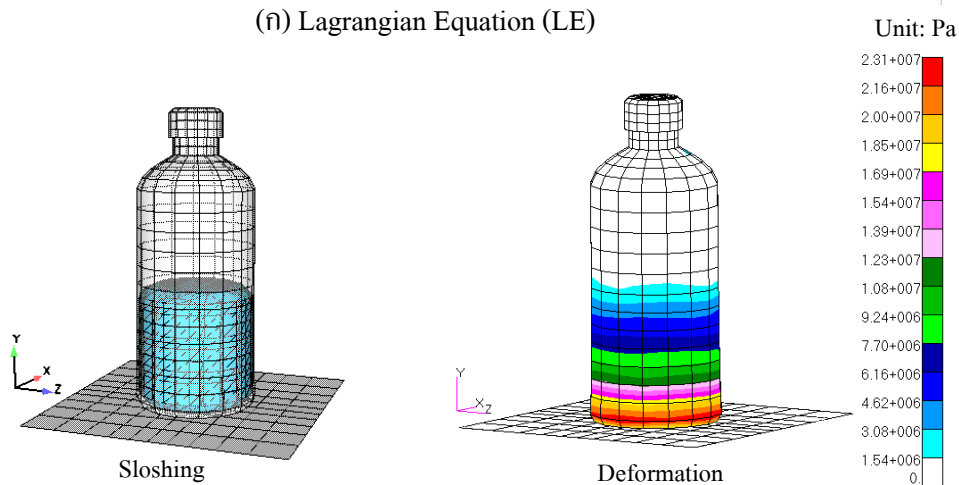
ภาพที่ 56 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร



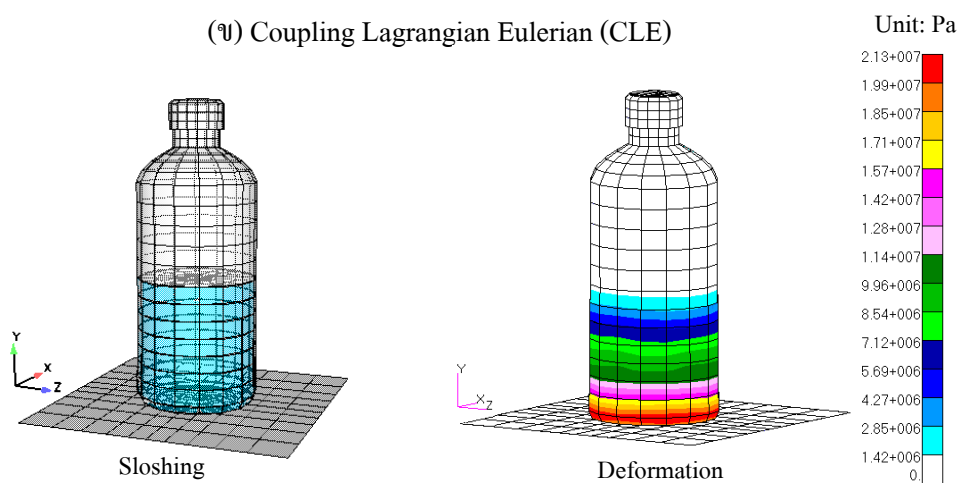
ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร



(ก) Lagrangian Equation (LE)



(ข) Coupling Lagrangian Eulerian (CLE)

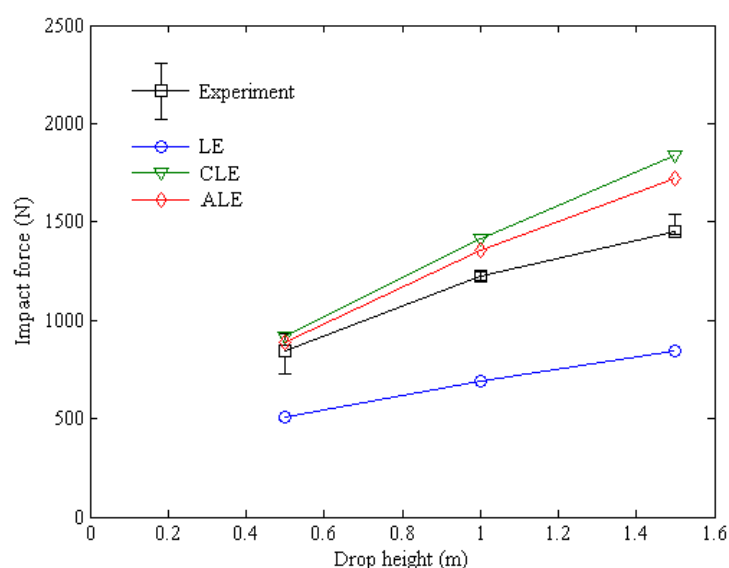


(ค) Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

ภาพที่ 58 ผลของน้ำบรรจุภายใน (sloshing) การยุบตัวของผนัง (deformation) และค่าความเค้นที่ผนังของขวดบรรจุน้ำครึ่งความจุของแบบจำลอง (ก) LE (ข) CLE และ (ค) ALE ณ เวลาที่ขวดกระทบกับพื้นจากความสูง 0.5 เมตร

ตารางที่ 8 แสดงค่าแรงกระแทก และเวลาเกิดแรงกระแทก ของการทดสอบทางกล และ FEA ของขวดบรรจุน้ำครึ่งของความจุ

Drop Height (m)	Impact Force (N)				Pulse Time (msec)			
	Exp. (Average)	LE	CLE	ALE	Exp. (Average)	LE	CLE	ALE
0.5	841.6	510.8	920.9	891.3	6.0	9.5	6.0	6.0
1.0	1226.4	689.3	1417.9	1353.8	6.0	9.5	5.5	5.5
1.5	1451.5	847.3	1837.8	1725.1	6.0	9.5	5.5	5.5



ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (Impact Force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้ FEA ของการปล่อยตกขวดทดสอบบรรจุน้ำครึ่งของความจุ

5. ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการ stress-strain relation

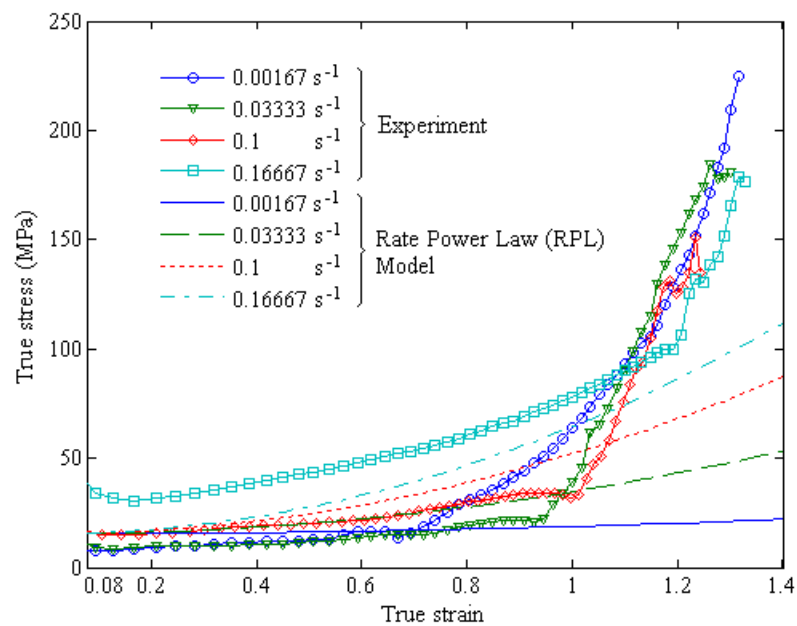
สมการของแบบจำลองความเค้นไหล STP (STP flow stress model) ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น และแบบจำลองในซอฟต์แวร์ MSC.Dytran ซึ่งใช้แทนคุณสมบัติของวัสดุ PET ในช่วงพลาสติก ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อแสดงความแม่นยำ ประกอบด้วยแบบจำลองของ Rate Power Law (RPL) model,

Zerilli-Armstrong (ZA) model และ Johnson-Cook (JC) model ตามลำดับ จากผลการทดสอบแรงดึง สามารถหาค่าคงที่ของสมการของแบบจำลองความเค้น-โหลแสดงได้ในตารางที่ 9 และแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบแรงดึงเป็นกราฟของความเค้นในช่วงความเครียดตั้งแต่ 0.08 ถึง 1.4 ของสมการของแบบจำลอง RPL, ZA และ JC ที่อัตราความเครียด 4 ค่า ได้ในภาพที่ 60, 61 และ 62 ตามลำดับ เมื่อนำแบบจำลองความเค้น-โหลทั้งหมด (RPL, ZA, JC และ STP) ไปใช้ในการวิเคราะห์การปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร ค่าแรงกระแทกที่วิเคราะห์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทางกล แสดงในภาพที่ 63, 64 และ 65 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของแรงกระแทกสูงสุดจากการทดสอบปล่อยตกทางกลที่ระดับความสูงปล่อยตก 0.5 ถึง 1.5 เมตร เปรียบเทียบกับค่าของผลการวิเคราะห์ FEA แสดงเป็นกราฟได้ในภาพที่ 66 มีค่าคลาดเคลื่อน 32.96%, 58.96%, 13.36% และ 1.303% สำหรับแบบจำลองของ RPL, ZA, JC และ STP ตามลำดับ

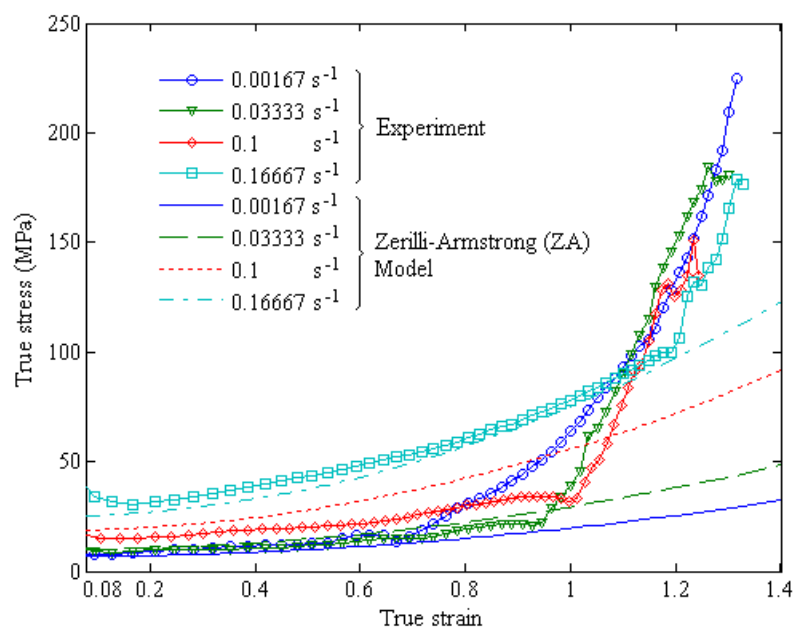
ตารางที่ 9 ค่าคงที่ของสมการคราก RPL, ZA, JC และ STP

Yield Model	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	m	n	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
RPL	15.37	138.93	15.37	0.58	2	0.00167
ZA	6.58	13.15	0.58	-	2	0.00167
JC	4.68	9.35	1.91	-	2	0.00167
STP	7.59	0.25	1.005	0.46	2	0.00167

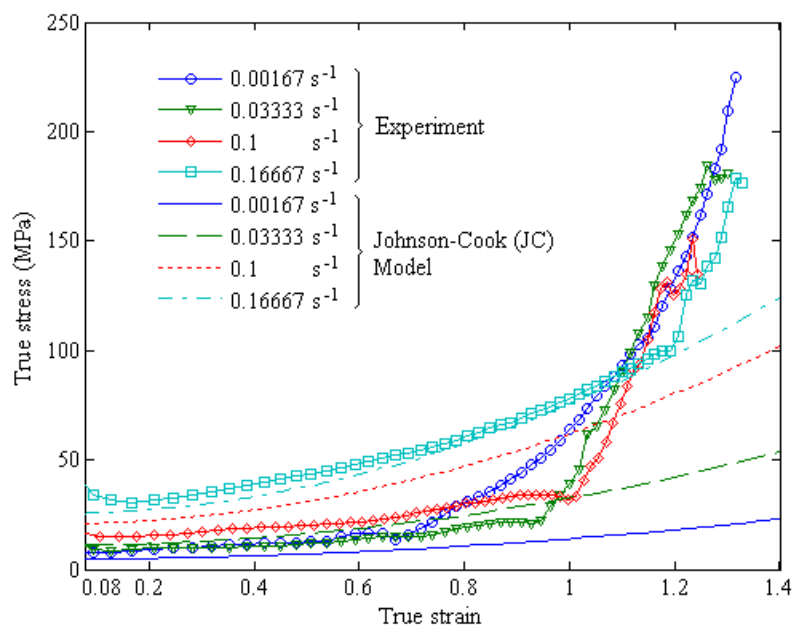
ผลวิเคราะห์การปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร โดยกำหนดสมการ stress-strain relation ด้วยสมการความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่ง (สมการ 42) ที่อัตราความเครียด 0.00167 s⁻¹ ค่าแรงกระแทกที่วิเคราะห์ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ที่กำหนดแบบจำลองวัสดุโดยใช้สมการแบบจำลองความเค้น-โหล STP และค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทางกล แสดงในภาพที่ 67, 68 และ 69 ตามลำดับ ภาพที่ 70 แสดงกราฟของแรงกระแทกกับเวลาเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ FEA โดยใช้แบบจำลองวัสดุด้วยสมการความเค้น-โหล STP และแบบจำลองวัสดุด้วยสมการความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่ง ที่ระดับความสูงปล่อยตก 0.5 ถึง 1.5 เมตร พบว่าสมการความเค้น-โหล STP และสมการความเค้นฮาร์ดเด้นนิ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบทางกลมีค่าน้อยกว่า 1.303% และ 59.22% ตามลำดับ



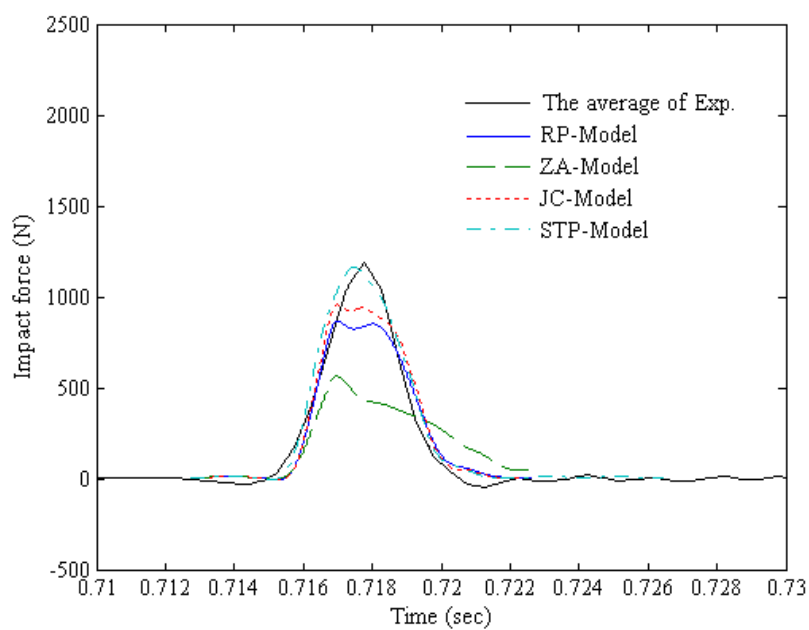
ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงกับความเครียดจริงของ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับแบบจำลอง RPL ที่อัตราความเครียด 4 ค่า



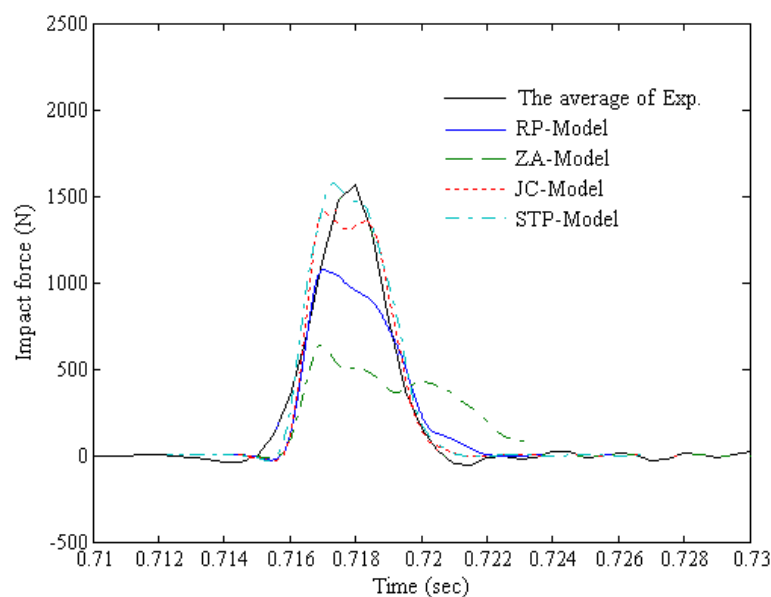
ภาพที่ 61 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงกับความเครียดจริงของ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับแบบจำลอง ZA ที่อัตราความเครียด 4 ค่า



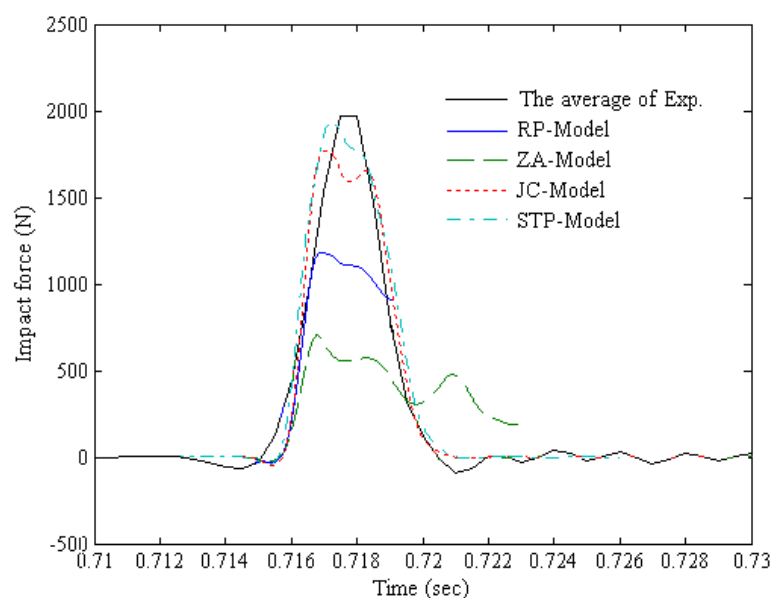
ภาพที่ 62 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงกับความเครียดจริงของ PET เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับแบบจำลอง JC ที่อัตราความเครียด 4 ค่า



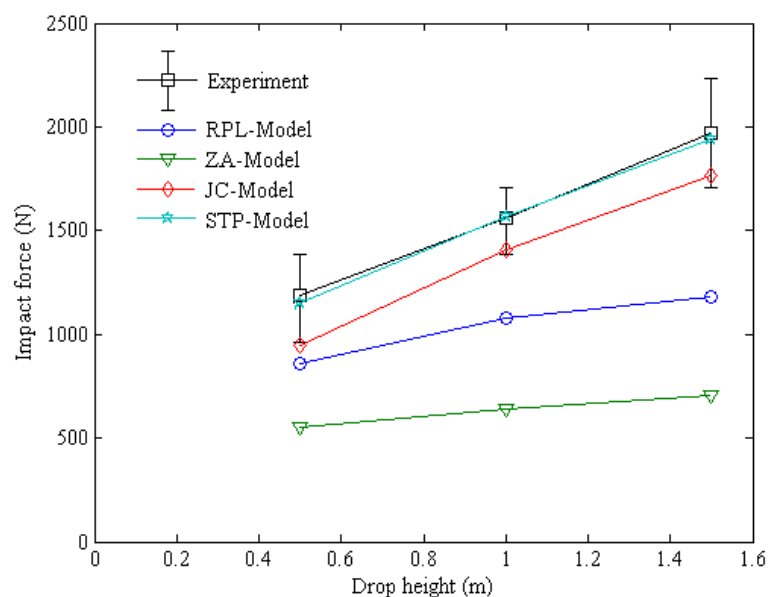
ภาพที่ 63 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



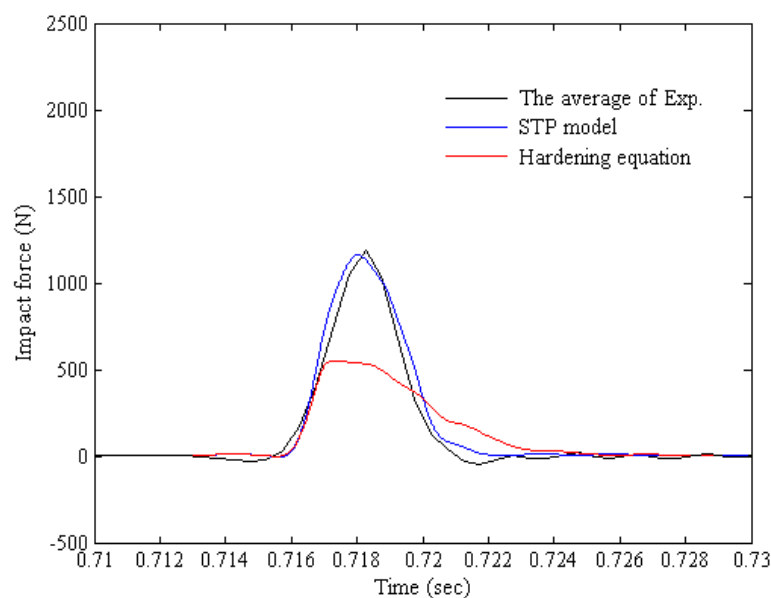
ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้น-โหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็ม ความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร



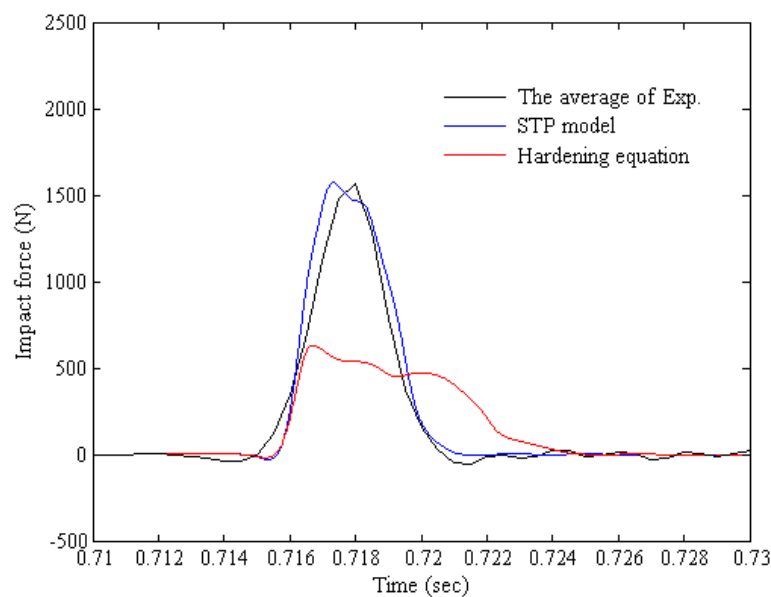
ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้น-โหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็ม ความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร



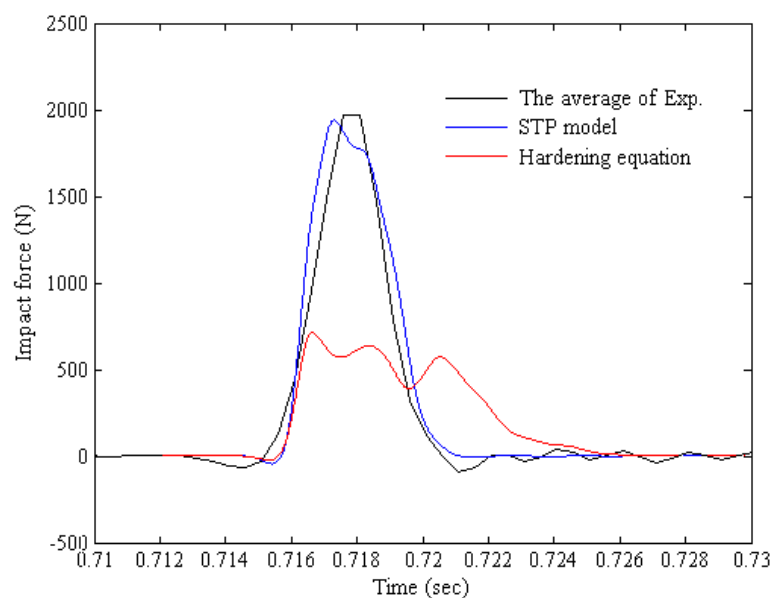
ภาพที่ 66 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกหว่านค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหลของวัสดุทั้งสี่ของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุ



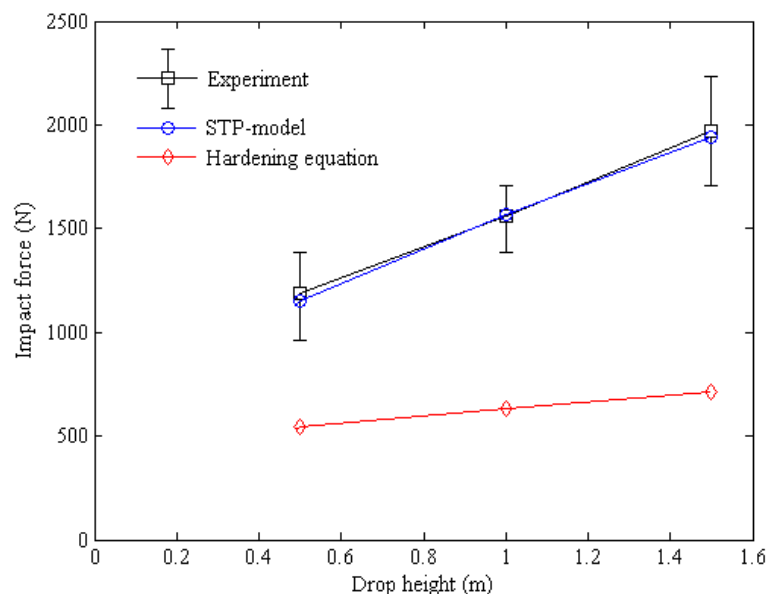
ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเค้นนิ่งของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร



ภาพที่ 68 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเดนนิงของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.0 เมตร



ภาพที่ 69 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) กับเวลาระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเดนนิงของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 1.5 เมตร

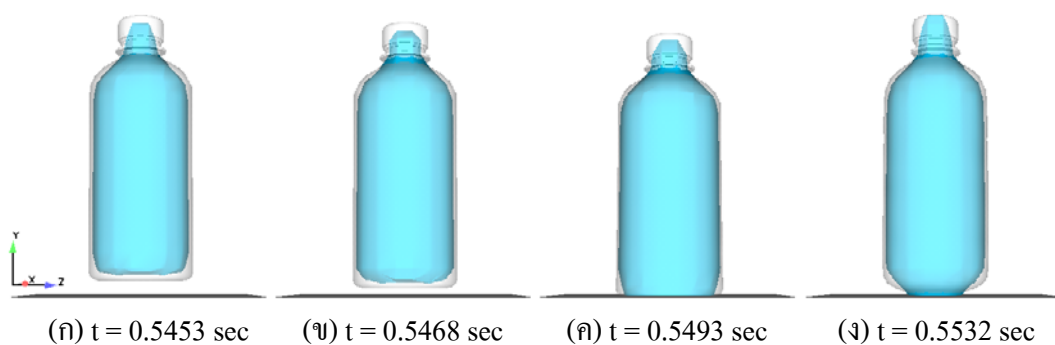


ภาพที่ 70 การเปรียบเทียบค่าแรงกระแทก (impact force) สูงสุดกับระยะปล่อยตกหว่านค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับการใช้แบบจำลองความเค้นไหล STP และสมการฮาร์ดเด้นนิ่งของวัสดุของขวดทดสอบบรรจุน้ำเต็มความจุ

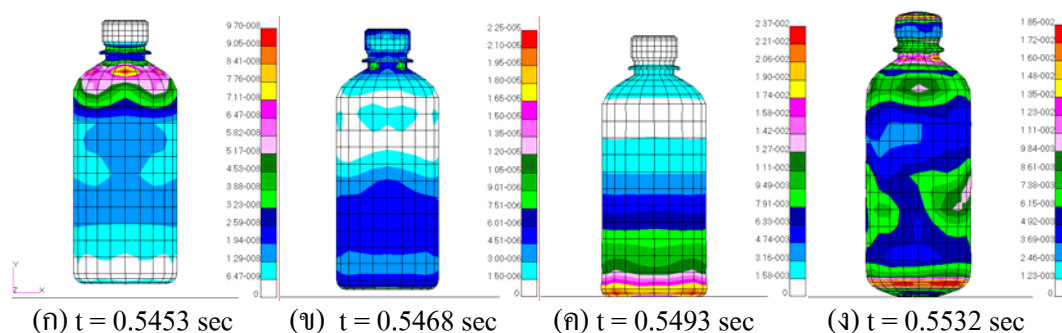
6. ผลการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์วัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน

ผลการวิเคราะห์ FEA ของแบบจำลองการปล่อยตกขวดจากระดับความสูง 0.5 เมตร แสดงผลการเคลื่อนที่ของน้ำภายในขวดที่เวลา 0.5453 วินาที ถึง 0.5532 วินาที ได้ในภาพที่ 71 แสดงผลความเครียดที่ผนังขวดได้ในภาพที่ 72 และแสดงผลความเค้นที่ผนังขวดได้ในภาพที่ 73 ซึ่งความเค้นและความเครียดที่ผนังขวดเกิดจากแรงดันของน้ำภายใน โดยแสดงผลเป็นระดับชั้นสี ค่ามากที่สุดของความเค้นและความเครียด ณ เวลาใดๆ จะแสดงด้วยสีแดง

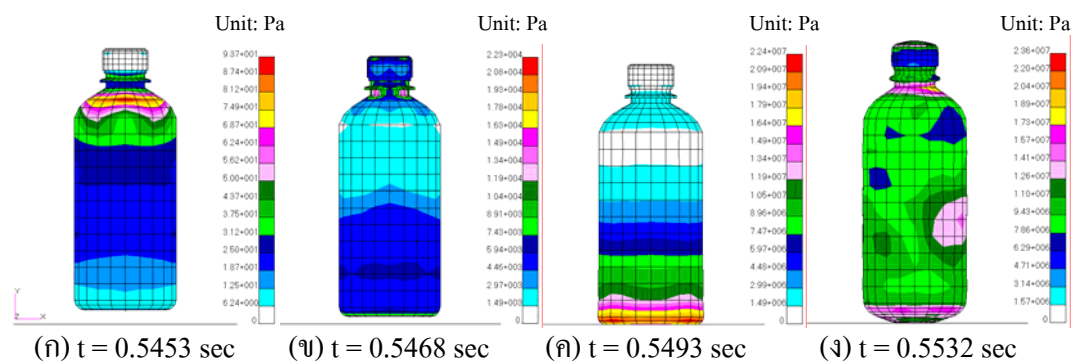
การเกิดความเค้นที่ผนังของขวดไม่สามารถวัดค่าได้จริงด้วยการทดสอบทางกล ดังนั้นการเปรียบเทียบความแม่นยำของการวิเคราะห์ FEA จึงใช้ค่าของแรงตกกระแทก และค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) ที่จุด P1, P2 และ P3 ของผลการทดสอบทางกล การเปรียบเทียบโดยใช้แรงตกกระแทกแสดงในภาพที่ 74



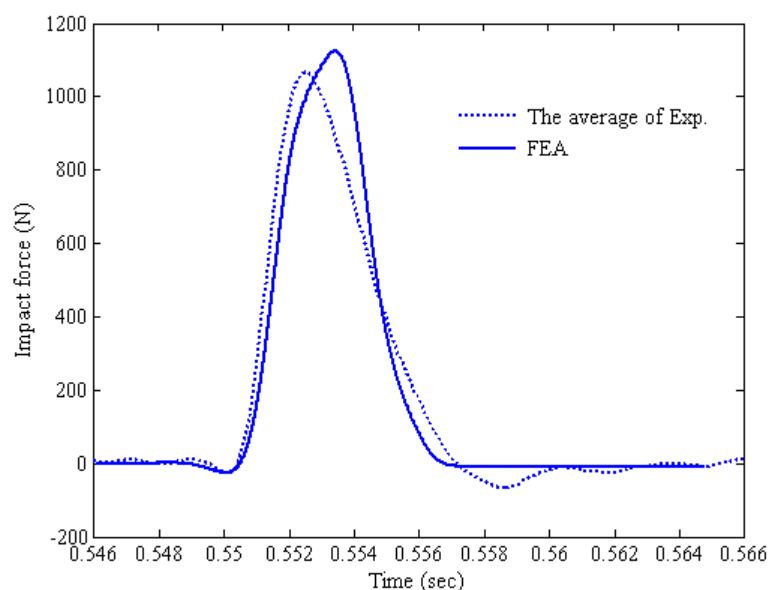
ภาพที่ 71 แสดงผลการเคลื่อนที่ของน้ำภายในแบบจำลองขวด จากการปล่อยตกความสูง 0.5 เมตร ที่เวลา (ก) 0.5453 วินาที (ข) 0.5468 วินาที (ค) 0.5493 วินาที และ (ง) 0.5532 วินาที



ภาพที่ 72 แสดงผลความเครียด (strain) บริเวณผนังแบบจำลองขวด จากการปล่อยตกความสูง 0.5 เมตร ที่เวลา (ก) 0.5453 วินาที (ข) 0.5468 วินาที (ค) 0.5493 วินาที และ (ง) 0.5532 วินาที



ภาพที่ 73 แสดงผลความเค้น (stress) บริเวณผนังแบบจำลองขวด จากการปล่อยตกความสูง 0.5 เมตร ที่เวลา (ก) 0.5453 วินาที (ข) 0.5468 วินาที (ค) 0.5493 วินาที และ (ง) 0.5532 วินาที

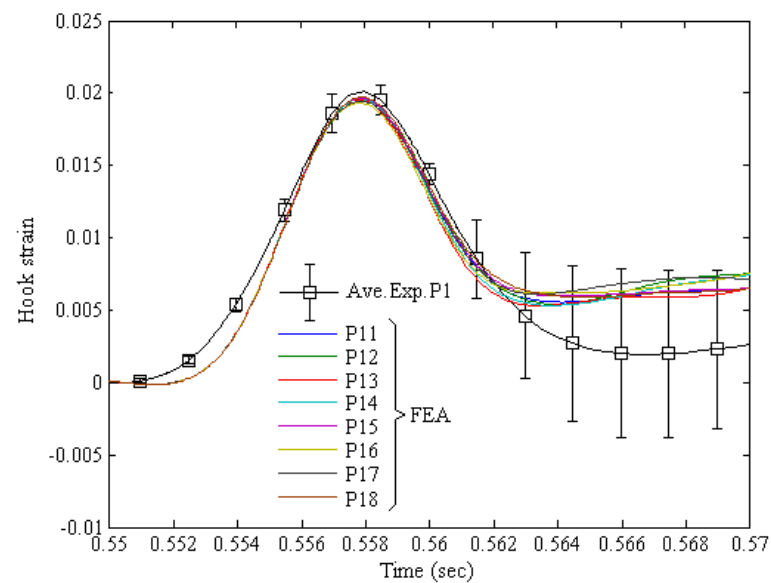


ภาพที่ 74 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยแรงกระแทกกับเวลาของขูดบรรจุน้ำ 5 ใบ กับผลวิเคราะห์ FEA ของแรงกระแทกกับเวลาจากการปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร

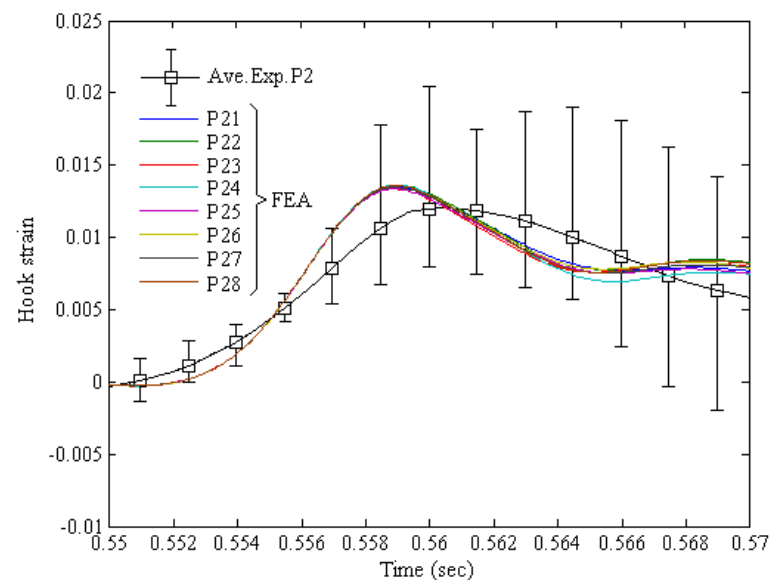
ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวงที่จุด P1 ของการทดสอบทางกลกับค่าที่จุดกึ่งกลางของเอลิเมนต์ P11 ถึง P18 แสดงในภาพที่ 75 เส้นกราฟซึ่งแสดงค่ามากที่สุดและน้อยสุดเป็นเส้นกราฟของการทดสอบทางกล โดยค่าที่อยู่ระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดคือค่าเฉลี่ย เส้นทึบที่มีสีแตกต่างกันเป็นกราฟของผล FEA ของเอลิเมนต์ P11 ถึง P18 และมีเวลาของช่วงแสดงผล เริ่มจากเวลา 0.55 วินาที ถึง 0.57 วินาที

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวงที่จุด P2 และ P3 แสดงเป็นเส้นกราฟลักษณะเดียวกันกับกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวงที่จุด P1 แสดงในภาพที่ 76 และ 77 ตามลำดับ

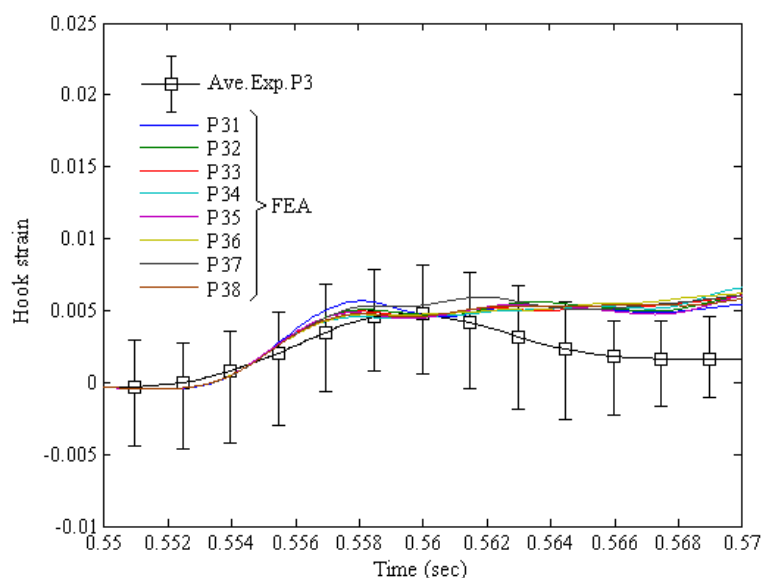
ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบทางกลกับผลวิเคราะห์ FEA สรุปในตารางที่ 10 โดยแสดงค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกล ผลการวิเคราะห์ของแรงตกกระแทก ระยะเวลาการเกิดแรงกระแทก (pulse time) ความเครียดในแนวเส้นรอบวง และระยะเวลาการเกิดความเครียดตั้งแต่เริ่มต้นถึงจุดสูงสุด (front half of pulse time) โดยระยะเวลาของการเกิดความเครียด ตั้งแต่จุดสูงสุดเป็นต้นไปไม่นำมาแสดงเนื่องจากไม่สามารถระบุเวลาสิ้นสุดได้



ภาพที่ 75 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับ เวลาที่จุด P1 ของขดบรรจุน้ำกับผลวิเคราะห์ FEA จำนวน 8 เอลิเมนต์ จากการปล่อยตก ที่ระดับความสูง 0.5 เมตร



ภาพที่ 76 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับ เวลาที่จุด P2 ของขดบรรจุน้ำกับผลวิเคราะห์ FEA จำนวน 8 เอลิเมนต์ จากการปล่อยตก ที่ระดับความสูง 0.5 เมตร

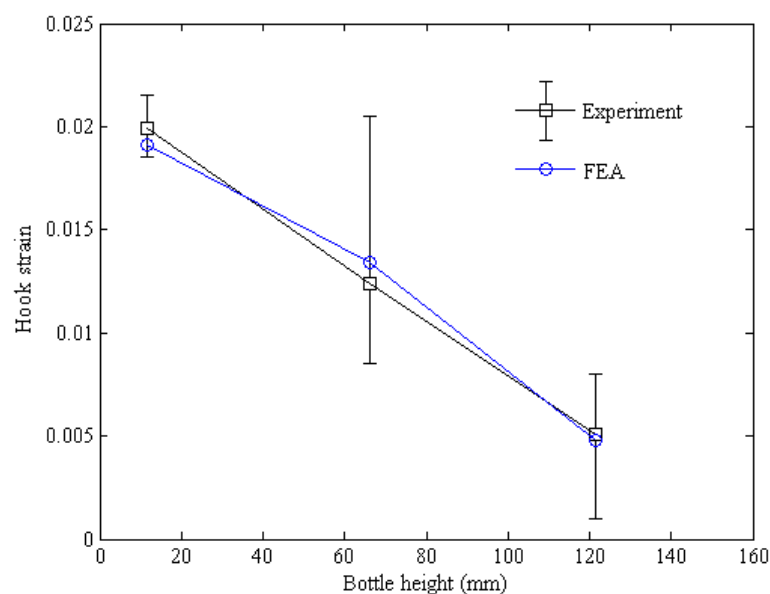


ภาพที่ 77 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) กับเวลาที่จุด P3 ของขอบบรรจุน้ำกับผลวิเคราะห์ FEA จำนวน 8 เอลิเมนต์ จากการปล่อยตกที่ระดับความสูง 0.5 เมตร

ตารางที่ 10 รายการแสดงค่า และระยะเวลาหน้าคลื่นของแรงตกกระแทก และความเครียดสูงสุด

Description	Average Maximum (Unit)		Haft Pulse Time (msec)	
	Experiment	FEA	Experiment	FEA
Impact Force	1075.71 (N)	1124.40 (N)	2.50	3.27
Strain at P1	0.0200	0.0191	8.00	8.04
Strain at P2	0.0124	0.0134	9.91	9.00
Strain at P3	0.0051	0.0048	8.50	8.10

ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงตกกระแทกสูงสุดของผลวิเคราะห์ FEA จากผลการทดสอบทางกลมีค่าน้อยกว่า 4.53% การเปรียบเทียบกับค่าความเค้นในแนวเส้นรอบวงของผลการวิเคราะห์ FEA กับผลการทดสอบทางกลที่จุด P1 ถึง P3 แสดงเป็นกราฟได้ในภาพที่ 78 ค่าความคลาดเคลื่อนของความเครียดในแนวเส้นรอบวงสูงสุดเฉลี่ยที่จุด P1, P2 และ P3 ของผลวิเคราะห์ FEA จากผลการทดสอบทางกลมีค่า -4.50%, 8.06% และ -5.88% ตามลำดับ



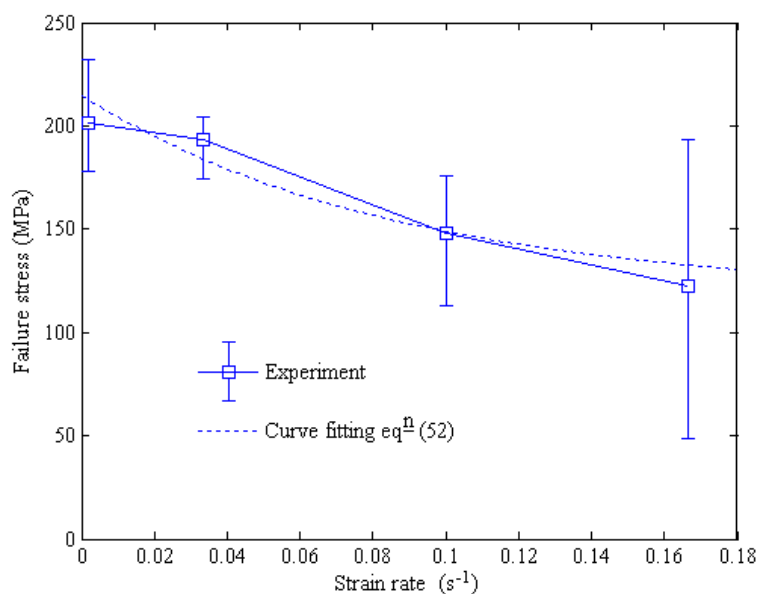
ภาพที่ 78 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง (hook strain) สูงสุดกับตำแหน่งความสูงของขวดระหว่างค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลกับค่าเฉลี่ยของการวิเคราะห์ FEA ที่จุด P1, P2 และ P3 ของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุปล่อยตกจากความสูง 0.5 เมตร

7. ผลการกำหนดขีดจำกัดการวิบัติของของขวดทดสอบ ก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการดึงทดสอบชิ้นทดสอบจนขาดทำให้ได้ค่าความเค้นวิบัติ และความเครียดวิบัติแสดงในภาพที่ 29 และภาพที่ 30 ตามลำดับ ค่าความเครียดวิบัติมีค่าเฉลี่ย 1.17 แต่ไม่สามารถนำมาใช้เป็นขีดจำกัดการวิบัติได้ เนื่องจากค่าความเค้นวิบัติมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง และเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอัตราความเครียด ดังนั้นจากผลการดึงทดสอบค่าความเค้นวิบัติสามารถนำมาสมด้วยสมการ exponential ประยุกต์ (สมการ 49) โดยผลการสวมสมการทำให้ได้สมการ

$$\sigma_{fail} = 95.73e^{-11.63\epsilon} + 119 \quad (52)$$

สมการ (52) สามารถนำไปพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่าความเค้นวิบัติจากผลการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด 4 ค่า แสดงได้ในภาพที่ 79 ผลการสวมสมการมีค่าความคลาดเคลื่อนสะสมโดยเฉลี่ยจากการทดสอบจริง 2.14% ดังนั้นกราฟเส้นประในภาพที่ 79 สามารถนำมากำหนดใช้เป็นขีดจำกัดการวิบัติของขวดทดสอบ ก โดยการอ่านค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ความเค้น

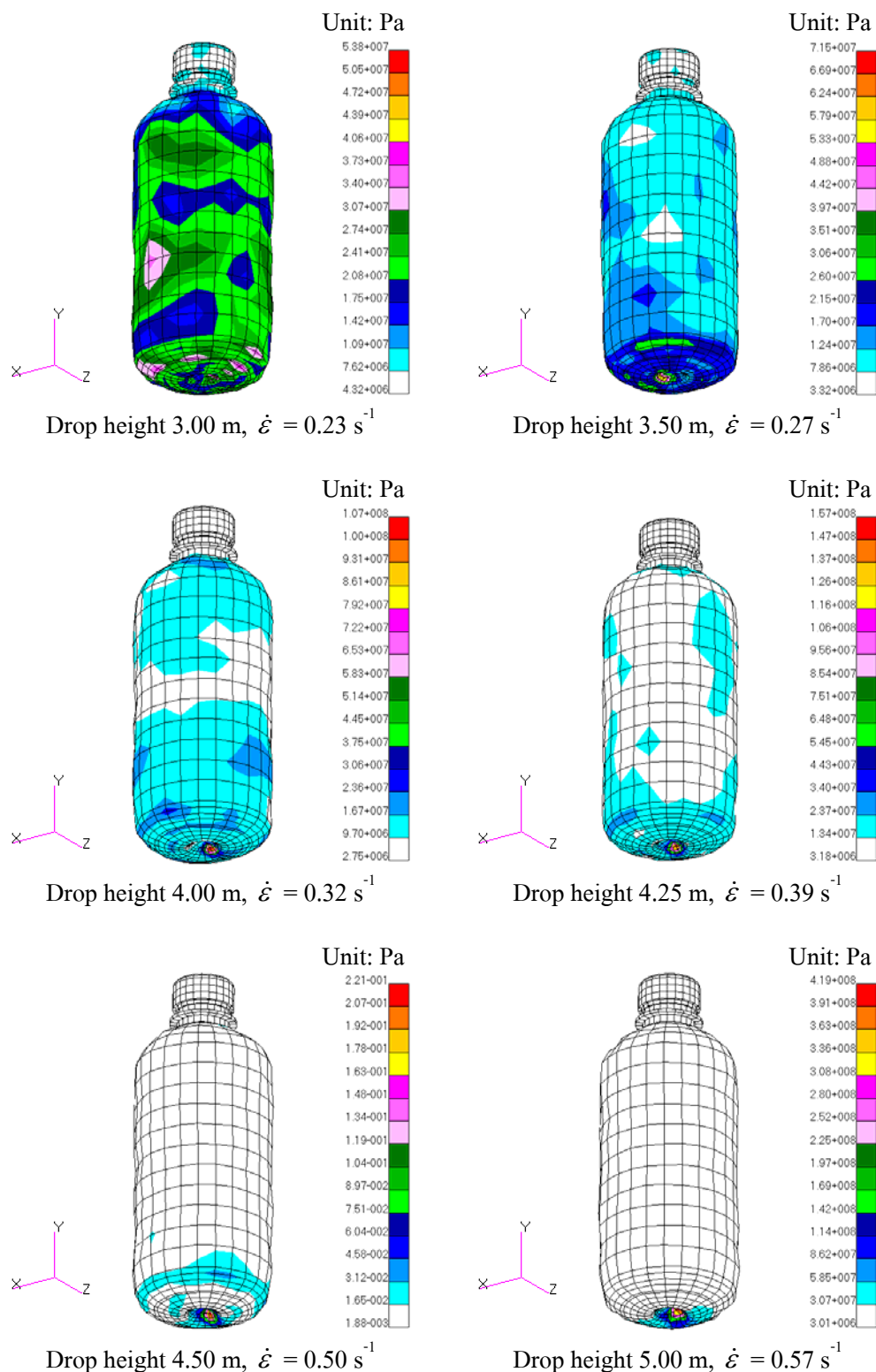


ภาพที่ 79 ผลการสวมสมการ (52) เปรียบเทียบกับค่าความเครียดวิกฤติของการทดสอบทางกลของ อัตราความเครียด 4 ค่า

ด้วยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ทดสอบปล่อยตกที่ความสูงใดๆ หากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผนัง ขวดทดสอบขณะกระแทกพื้นมีค่าอยู่เหนือเส้นสมการ (52) หรือเส้นประที่อัตราความเครียดของ ผนังที่ทำให้เกิดความเค้น ขวดที่ถูกวิเคราะห์จะมีการแตกเมื่อนำไปทดสอบจริงที่ความสูงนั้น

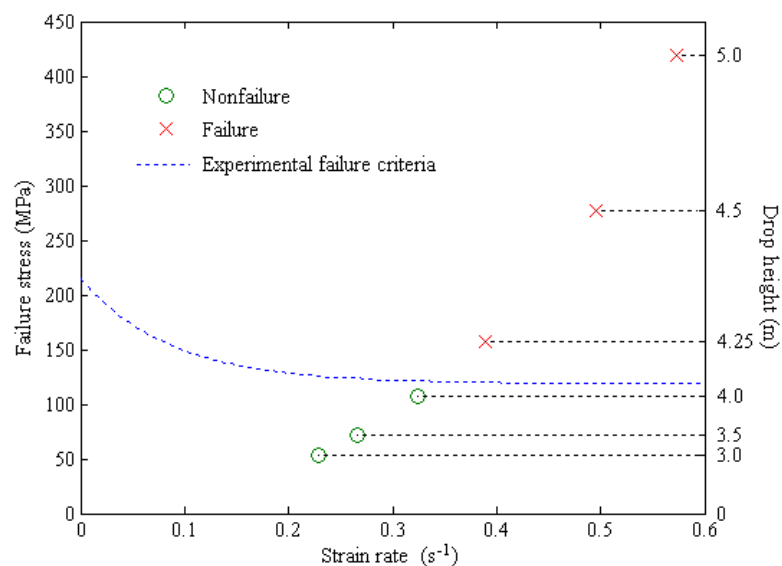
จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการทดสอบปล่อยตกขวดทดสอบ ก ที่ความ สูงปล่อยตก 3, 3.5, 4, 4.25, 4.5 และ 5 เมตร ผลวิเคราะห์การทดสอบสามารถแสดงค่าความเค้น และอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นในภาพที่ 80 โดยความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากบริเวณก้นขวด ค่าความ เค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นสามารถนำมาพลอตจุดลงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิกฤติกับอัตรา ความเครียดเพื่อหาความสูงที่ขวดปล่อยตกแล้วแตกแสดงในภาพที่ 81 ซึ่งความสูงที่ขวดถูกปล่อย ตกแล้วไม่แตกจะแสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลม (O) และความสูงที่ขวดถูกปล่อยตกแล้วแตกจะแสดง ด้วยสัญลักษณ์กากบาท (X)

ค่าของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความสูงของการปล่อยตกจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นเพื่อหาจุดตัดกับกราฟเส้นของสมการ จิตจำกัดความวิบัติของวัสดุ PET (สมการ 52) แสดงในภาพที่ 82 ทำให้สามารถทำนายความสูงที่ ขวดถูกปล่อยตกแล้วแตกได้ที่ระดับความสูง 4.11 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบปล่อยตก

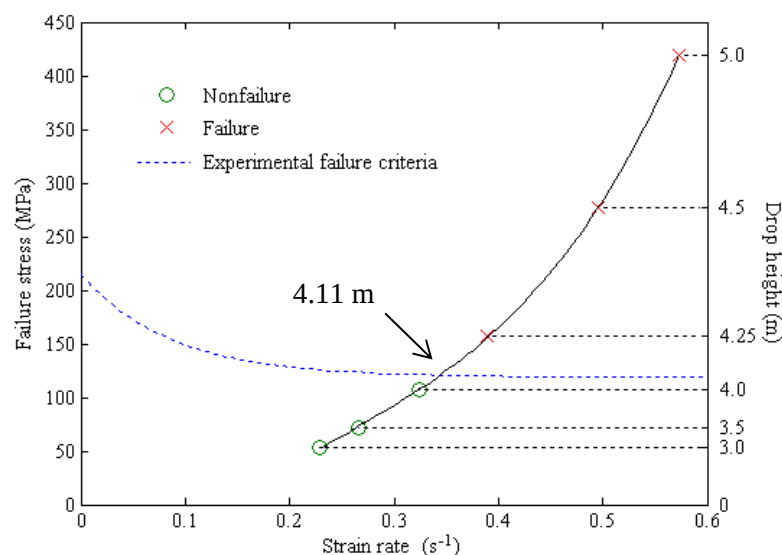


ภาพที่ 80 ค่าความเค้นสูงสุด และอัตราเครียดสูงสุดของผนังขวดที่เกิดขึ้นจากการจำลองการทดสอบปล่อยตกที่ความสูง 3.00, 3.50, 4.00, 4.25, 4.50 และ 5.00 เมตร

ด้วยวิธี Bruceton Staircase ซึ่งมีความสูงเฉลี่ยการแตก มีค่าเท่ากับ 4.5278 ± 0.409 เมตร ค่าความสูงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีค่าอยู่ในช่วงความสูงเฉลี่ยการแตกของการทดสอบปล่อยตก และมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยของการทดสอบทางกลน้อยกว่า 9.27%



ภาพที่ 81 ผลการวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการทดสอบปล่อยตกจากระดับความสูง 3.00, 3.50, 4.00, 4.25, 4.50 และ 5.00 เมตร



ภาพที่ 82 แสดงวิธีการหาความสูงการแตกของขวดด้วยผลของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สมการ stress-strain relation ซึ่งถูกประดิษฐ์ขึ้นสำหรับงานวิจัยสามารถนำไปใช้กับวัสดุโพลีเมอร์ชนิดอื่น ๆ ที่แสดงพฤติกรรมการยืดคล้ายกับพลาสติกชนิด PET โดยแสดงพฤติกรรมการยืดเป็นสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่น และช่วงพลาสติก สมการในช่วงยืดหยุ่นให้ใช้สมการ

$$\sigma = E\varepsilon_e \quad (53)$$

เมื่อ ε_e คือ ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น (elastic strain)
 E คือ ค่าของมอดูลัส (Young's Modulus)

และสมการในช่วงพลาสติก ให้ใช้สมการ

$$\sigma_{f-STP} = A(1 + B\varepsilon_p)(1 + \varepsilon_p^n) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (54)$$

เมื่อ ε_p คือ ความเครียดในช่วงพลาสติก (plastic strain)
 $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียด (strain rate)
 A และ B คือ ค่าคงที่ได้จากค่าของความเค้น
 C, m และ n คือ ค่าคงที่ใดๆ

วิธีการหาค่าคงที่ทำได้โดยการดัดแปลงและใช้วิธีสมสมการ (curve fitting) ผลการดัดแปลงสำหรับวัสดุ PET ที่ใช้ผลิตขวดทดสอบของงานวิจัยนี้มีค่าคงที่ แสดงในตารางที่ 11 และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของความเค้นในช่วงของความเครียด 0.08 ถึง 0.8 ของสมการ (54) จากผลการทดสอบมีค่าน้อยกว่า 4.75%

ตารางที่ 11 ค่าคงที่ของสมการ stress-strain relation ของวัสดุ PET

E (MPa)	A (MPa)	B	C	m	n
888.41	7.59	0.25	1.005	0.46	2

การศึกษาผลของแรงกระแทกที่กระทำกับขวดหรือภาชนะสำหรับบรรจุของเหลวจากการทดสอบปล่อยตก โดยการวัดแรงกระแทกด้วยแผ่นวัดแรง ค่าเฉลี่ยของแรงกระแทกจากการทดสอบที่วัดได้แสดงในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักรวมของขวดเป็น 1.80 เท่า ของน้ำหนักเดิม โดยการบรรจุน้ำเพิ่มขึ้นจาก 250 ลิตร เป็น 500 ลิตร ทำให้มีแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.37 เท่า ของการทดสอบปล่อยตกที่ค่าความสูง 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร แรงกระแทกมีค่ามากกว่าน้ำหนักรวมของขวดบรรจุน้ำเต็มความจุโดยเฉลี่ย 314.45 เท่า และมีค่ามากกว่าน้ำหนักรวมของขวดบรรจุน้ำครึ่งความจุโดยเฉลี่ย 406.1 เท่า

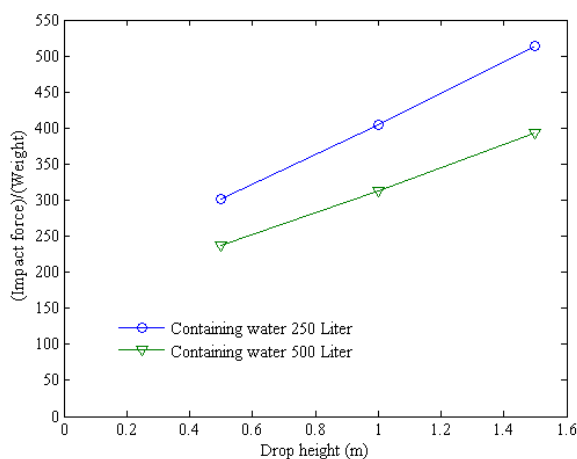
ตารางที่ 12 สรุปค่าแรงกระแทกของการทดสอบทางกลจากการปล่อยตกขวดทดสอบ ก

ความสูง (เมตร)	Average Impact force (N)			Impact force per weight		
	ขวด	ขวด	ขวด	ขวด	ขวด	ขวด
	ไม่บรรจุน้ำ	บรรจุน้ำ 250 ลิตร	บรรจุน้ำ 500 ลิตร	ไม่บรรจุน้ำ	บรรจุน้ำ 250 ลิตร	บรรจุน้ำ 500 ลิตร
0.5	103.14	839.23	1,188.55	32.86	301.23	237.57
1.0	-	1,200.26	1,563.84	-	403.82	312.58
1.5	-	1,429.90	1,967.20	-	513.25	393.2

อัตราส่วนระหว่างแรงกระแทก (impact force) ต่อน้ำหนักรวมของขวดบรรจุน้ำ ($W=mg$) แสดงเป็นกราฟได้ในภาพที่ 83 ทำให้ทราบได้ว่าการบรรจุของเหลวภายในขวดหรือภาชนะไม่เต็มความจุทำให้ขวดหรือภาชนะเหล่านั้นต้องรับแรงกระแทกมากกว่าการบรรจุของเหลวเต็มความจุเมื่อเทียบกับน้ำหนักรวมของขวดบรรจุของเหลว

การศึกษาผลของแรงกระทำจากของเหลวซึ่งถูกบรรจุภายในขวด จากการทดสอบปล่อยตก ไม่สามารถวัดแรงกระทำได้โดยตรงจึงใช้วิธีวัดการยืดของผนังขวด โดยการติด strain gage ที่ผนังขวด เนื่องจากในงานวิจัยได้ทำการทดสอบกับขวดรูปทรงกลม ภายหลังการทดสอบปล่อยตกขวดบรรจุน้ำเต็มความจุ ผลของการทดสอบ ทำให้มั่นใจได้ว่าการกระจายของของเหลวหรือน้ำภายในขวดขณะกระแทกกับพื้น จะพุ่งลงสู่ด้านล่างของขวดปะทะกับก้นขวดและกระจายออกด้านข้าง โดยการกระจายด้านข้างมีผลทำให้ผนังขวดเกิดการยืดตัวมากบริเวณด้านล่างของขวด และการยืดของผนังจะลดลงตามความสูงของขวด ผลของการเคลื่อนตัวอิสระของน้ำซึ่งอยู่ภายในภายหลัง

ปะทะกันขวดจะกระจายออกด้านข้าง แสดงโดยค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวงที่จุด P1, P2 และ P3 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าความเครียดในแนวเส้นรอบวงมีความผันผวนมาก เป็นผลเนื่องจากไม่สามารถควบคุมมุมกระดอนของขวดให้คงที่ได้ จึงทำให้ความเครียดที่เกิดขึ้นจากคลื่นกระแทกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 83 แสดงอัตราส่วนของแรงกระแทกต่อน้ำหนักที่ความสูง 0.5 เมตร ถึง 1.5 เมตร

การสร้างแบบจำลองของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้างสามารถใช้ซอฟต์แวร์ MSC.Dytran กับสมการการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง 3 วิธี ประกอบด้วย 1. สมการลากรางเจียน (LE) 2. สมการร่วม ลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน (CLE) และ 3. สมการอาร์บิทราลีลากรางเจียน-ออยเลอร์เรียน (ALE) โดยสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของการใช้แบบจำลองการปล่อยตกทั้งสามวิธีได้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สรุปข้อดีและข้อเสียของการใช้แบบจำลองการปล่อยตกใน MSC.Dytran

No.	Model	ข้อดี	ข้อเสีย
1	LE	สร้างแบบจำลองได้ง่าย และใช้เวลาในการประมวลผลน้อย (ใช้เวลา 16.92 นาที สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ และใช้เวลา 14.83 นาที สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำครึ่งของความจุ)	ความแม่นยำในการวิเคราะห์น้อย (ความคลาดเคลื่อน 30.26% สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ และความคลาดเคลื่อน -41.32% สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำครึ่งของความจุ)

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Model	ข้อดี	ข้อเสีย
2	CLE	สร้างแบบจำลองได้ง่าย เหมาะกับแบบจำลองของภาชนะที่มีรูปทรงซับซ้อน และมีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง (ความคลาดเคลื่อน 5.20% สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ และความคลาดเคลื่อน 17.77% สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำครึ่งของความจุ)	ใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ (ใช้เวลา 35.55 นาที สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ และใช้เวลา 35.30 นาที สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำครึ่งของความจุ)
3	ALE	ใช้เวลาในการประมวลผลน้อย (ใช้เวลา 16.33 นาที สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ และใช้เวลา 14.95 นาที สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำครึ่งของความจุ) และมีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง (ความคลาดเคลื่อน 11.26% สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำเต็มความจุ และความคลาดเคลื่อน 12.24% สำหรับแบบจำลองซึ่งบรรจุน้ำครึ่งของความจุ)	สร้างแบบจำลองได้ยาก ไม่เหมาะกับแบบจำลองของภาชนะที่มีรูปทรงซับซ้อน

การใช้แบบจำลอง FEM วิเคราะห์การปล่อยตกของซึ่งบรรจุน้ำสามารถนำมาใช้ทดแทนการทดสอบทางกล โดยแบบจำลองที่เหมาะสมควรเป็นแบบจำลอง FEM ของขวดที่มีสมการ stress-strain relation สมการ (53)-(54) และใช้สมการ CLE จำลองการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและโครงสร้าง ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบทางกลเฉลี่ย 11.49%

ขีดจำกัดการวิบัติของวัสดุ PET ไม่สามารถใช้แบบจำลองความเครียดวิบัติคงที่ได้ เนื่องจากค่าความเค้นวิบัติของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอัตราความเครียด จึงกำหนดให้ใช้สมการขีดจำกัดความเค้นวิบัติ (failure stress criteria)

$$\sigma_{fail} = Ae^{B\dot{\epsilon}} + C \quad (55)$$

เมื่อ σ_{fail} คือ ความเครียดวิบัติ (failure stress)
 A, B และ C คือ ค่าคงที่ใดๆ

วิธีการหาค่าคงที่ทำได้โดยการดึงทดสอบและใช้วิธีสวสมการ (curve fitting) ผลการดึงทดสอบสำหรับวัสดุ PET ที่ใช้ผลิตขวดทดสอบของงานวิจัยนี้มีค่าคงที่ $A = 95.73$ MPa, $B = -11.63$ และ $C = 119$ MPa และมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 9.27% เมื่อนำไปใช้ทำนายความสูงที่ขวดทดสอบถูกปล่อยตกแล้วแตก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชาคริต สุวรรณจำรัส. 2546. การจำลองมาตรฐานการทดสอบขวดพลาสติกโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์. 2546. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการออกแบบภาชนะบรรจุของเหลวโดยกรรมวิธีวิศวกรรม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

Anderson, Jr. J.D. 1995. **Computational Fluid Dynamics: the basic with applications.** McGraw-Hill, Singapore.

America Society of Testing Materials. 2001. **Standard test method for drop impact resistance of blow-molded thermoplastic container.** ASTM D 2463-95

_____. 2002. **Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting.** ASTM D 882-02

_____. 2003. **Standard test method for tensile properties of plastic.** ASTM D 638-03

Aquelet, N., M. Souli and L. Olovsson. 2006. Euler-Lagrange coupling with damping effect: Application to slamming problems. **Computer methods in applied mech. and eng.** 195: 110-132.

Bathe, K.J. 1996. **Finite element procedures.** Prentice Hall Inc., USA.

_____, H. Zhang and M.H. Wang. 1995. Finite element analysis of incompressible and compressible fluid flows with free surface and structural interactions. **Computers & Structures.** 56 (2/3): 193-213.

- Banerjee, B. 2005. **An evaluation of plastic flow stress models for the simulation of high temperature and high strain rate deformation of metals.** Utah Engineering.
Available source: <http://www.eng.utah.edu/~banerjee/Papers/CuPlasticCompare.pdf>,
September 9, 2008.
- Benson, J. D. 1990. **Computational methods in lagrangian and eulerian hydrocodes.**
Faculty Directory. Available source:
<http://www.mech.utah.edu/~brannon/public/review.pdf>, September 9, 2008.
- _____. 1992. Computational methods in lagrangian and eulerian hydrocodes. **Computer methods in applied mech. and eng.** 99: 235-394.
- _____. 1997. A mixture theory for contact in multi-material eulerian formulations. **Computer methods in applied mech. and eng.** 140: 59-86.
- _____ and L. Stainier. 1997. An eulerian shell formulation for fluid-structure interaction. **Computer methods in applied mech. and eng.** 187: 571-590.
- Bittencourt, E. and G.J. Creus. 1998. Finite element analysis of three-dimensional contact and impact in large deformation problems. **Computers & Structures.** 69: 219-234.
- Brown, K.H., S.P. Burns and M.A. Christon. 2002. **Sand Rep. SAND2002-1014.**
- Buckley, C.P., D.P. Jonest and D.P. Jone. 1996. Hot-drawing of poly(ethylene terephthalate) under biaxial stress: application of a three-dimensional glass-rubber constitutive model. **Polymer.** 37 (12): 2403-2414.
- Casadei, F. and J.P. Halleux. 1995. An algorithm for permanent fluid-structure interaction in explicit transient dynamics. **Computer methods in applied mech. and eng.** 128: 231-289.

_____, A. Sala and F. Chille. 2001. Transient fluid-structure interaction algorithms for large industrial applications. **Computer methods in applied mech. and eng.** 190: 3081-3110.

_____ and S. Potapov. 2001. Permanent fluid-structure interaction with non-conforming interfaces in fast transient dynamics. **Computer methods in applied mech. and eng.** 193: 4157-4194.

Callister, D.W. 2007. **Material science and engineering: an introduction.** 7th ed. John Willey & Sons Inc., Asia.

Cengel, A.Y. and A.M. Boles. 2006. **Thermodynamics an engineering approach.** 5th ed. The McGeaw-Hill Higher Education, Boston.

Chakrabarty, J. 2006. **Theory of plasticity.** 3rd ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, UK.

Cook, D.R., D.S. Malkus, M.E. Plesha and R.J. Witt. 2002. **Concept and applications of finite element analysis.** 4th ed. John Willey & Son Inc., USA.

Farahani, K., M. Mofid and A. Vafai. 2001. United elements method for general contact-impact problems. **Computer methods in applied mechanics and eng.** 191: 843-860.

Feng, Z.Q., Z. Feng and M. Domaszewski. 2002. Some computational aspects for analysis of low-and high-velocity impact of deformable bodies. **Int. J. of Non-Linear Mechanics.** 37: 1029-1036.

Gilardi, G. and I. Sharf. 2002. Literature survey of contact dynamics modeling. **Mechanism and Machine Theory.** 37: 1213-1239.

- Heinstein W.M., F.J. Mello, S.W. Attaway and T.A. Laursen. 2000. Contact-impact modeling in explicit transient dynamics. **Computer methods in applied mech. and eng.** 187: 621-640.
- Hu, N. 1997. A solution method for dynamic contact problems. **Computers & Structures.** 63 (6): 1053-1063.
- International Organization for Standardization. 1993. **Plastic-Determination of tensile properties Part 1: General principles.** ISO527-1
- _____. 1993. **Plastic-Determination of tensile properties Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.** ISO527-2
- Karaoglan, L. and A.K. Noor. 1995. Dynamic sensitivity analysis of frictional contact/impact response of axisymmetric composite structure. **Computer methods in applied mechanics and eng.** 128: 169-190.
- Kim, J.H. and H.C. Shin. 2008. Application of the ALE technique for the underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank. **Ocean Eng.** 35: 812-822.
- Kyowa. 2008. **Gauge for general stress measurement: KFG.** Gauge for general stress measurement. Available source:
<http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/kfg-01.pdf>, September 9, 2008.
- Li, M.Q. and N. Jones. 2000. On dimensionless number for dynamic plastic response of structural members. **Archive of Applied Mechanics.** 70: 245-254.
- Lomax, H., Pulliam, T.H. and D.W. Zigg. 2001. **Fundamentals of computational fluid dynamics.** Springer, Germany.

- Mackerle, J. 1999. Fluid-structure interaction problems, finite element and boundary element approaches: a bibliography. **Finite Element in Analysis and Design**. 31: 231-240.
- Mair, H.U. 1995. Hydrocode methodologies for underwater explosion structure/medium interaction. 227-248. **In Proceeding of the 66th Shock and Vibration Symposium**. Biloxi, MS.
- Matthews, G.R., A. Ajji, M.M. Dumoulin and R.E. Prud'homme. 2000. The effects of stress relaxation on the structure and orientation of tensile drawn poly(ethylene terephthalate). **Polymer**. 41: 7139-7145.
- Matthies, G. H. and J. Steindorf. 2003. Partitioned strong coupling algorithms for fluid-structure interaction. **Computers & Structures**. 81: 805-812
- Mendelson, A. 1968. **Plasticity: Theory and Application**. Robert E. Krieger Publishing Company Inc., Malabar, Florida.
- MSC.Software Corporation. 2005a. **MSC.Dytran theory manual**. MSC. Software Corporation, USA.
- _____. 2005b. **MSC.Patran reference manuals**. MSC. Software Corporation, USA.
- Nakra, C.B. and K.K. Chaudhry. 2004. **Instrumentation, Measurement and Analysis**. 2nd ed. Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Nsiampa, N., J.P. Ponthot and L. Noels. 2008. Comparative study of numerical explicit schemes for impact problems. **Int. J. of Impact Eng.** 35: 1688-1694.

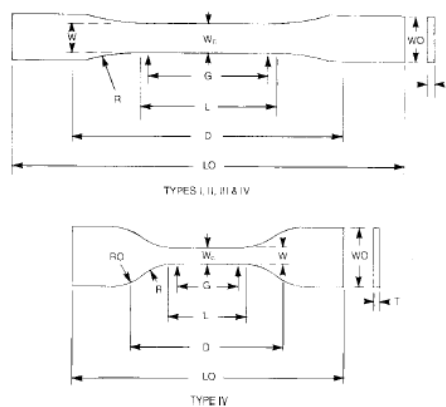
- Ohtmer, O. 1995. **Extending MSC/Dytran for the numerical solution of the navier-stokes equations**. MSC 1995 World Users' Conference Proceedings. Available source: <http://www.mssoftware.com/support/library/conf/wuc95/po5295.pdf>, September 9, 2008.
- Qin, Q.H. and X.Q. He. 1995. Variational principle, FE and MPT for analysis of non-linear impact-contact problem. **Computer methods in applied mechanics and eng.** 122: 205-222.
- Reed, P.E., G. Breedveld and B.C. Lim. 2000. Simulation of the drop impact test for moulded thermoplastic containers. **Int. J. of Impact Eng.** 24: 133-153.
- Shinoda, M. and R.J. Bathurst. 2004. Lateral and axial deformation of PP, HDPE and PET geogrids under tensile load. **Geotextiles and Geomembranes.** 22:205-222.
- Stromberg, N. 2005. An implicit method for frictional contact, impact and rolling. **European J. of Mechanics A/Solids.** 24: 1016-1029.
- Souli, M., A. Ouahsine and L. Lewin. 2000. ALE formulation for fluid-structure interaction problem. **Computer methods in applied mech. and eng.** 190: 659-675.
- Suvanjumrat, C., S. Thusneyapan and T. Puttapitukporn. 2007. A suitable mathematical model of PET for fea drop-test analysis. **KMITL Sci. J.** 7 (2): 6-17.
- _____. 2008. Mathematical representation of strain under strain rates in the plastic region of PET for applications in finite element analysis. 475-481. **In 12th Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE 12)**. Ubon Rajathanee University, Ubon Rajathani.

- Tai, C.M., K.Y. Ropert and C.N. Ng. 2000. Impact behavior of polypropylene/polyethylene blends. **Polymer Testing**. 19: 143-154.
- Teixeira, P.R.F. and A.M. Awruch. 2005. Numerical simulation of fluid-structure interaction using the finite element method. **Computers & Fluids**. 34: 249-273.
- Teng X. and T. Wierzbicki. 2006. Evaluation of six fracture models in high velocity perforation. Eng. **Fracture Mechanics**. 73: 1653-1678.
- The Society of the Plastic Industry. 1991. **Test for drop impact resistance of plastic container**. RPCD-7
- Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier. 1970. **Theory of elasticity**. 3rd ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Versteeg K.H. and W. Malalasekera. 1995. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. Longman Group Ltd., Malaysia.
- Vigny, M., A. Aubert, J.M. Hiver, M. Aboulfaraj and C. G'Sell. 1999. Constitutive viscoplastic behavior of Amorphous PET during plane-strain tensile stretching. **Polymer Eng. And Sci**. 39 (12): 2366-2376.
- Wang, F., J. Cheng and Z. Yao. 2001. FFS contact searching algorithm for dynamic finite element analysis. **Int. J. Numer. Meth. Eng**. 52: 655-672.
- Warsi, Z.U.A. 1999. **Fluid dynamics: theoretical and computational approaches**. 2nd ed. CRC Press LLC. USA.
- Zhang, L., A. Gerstenberger, X. Wang and W.K. Liu. 2004. Immersed finite element method. **Computer methods in applied mech. and eng**. 193: 2051-2067.

Zhong, H.Z. 1993. **Finite-element procedures for contact-Impact problems**. Oxford University Press, New York.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ภาพเอกสารอุปกรณ์ทดสอบ

Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^a

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^b	Type V ^{c,d}	
W—Width of narrow section ^{e,f}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{g,h}
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^c
W ₀ —Width overall, min ^g	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
W ₀ —Width overall, min ^h	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
L ₀ —Length overall, min ^h	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length ⁱ	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^c
G—Gage length ^j	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^j	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^c
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

^a Thickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T , may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

^b For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D 412.

^c The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

$W = 3.18 \pm 0.03$ mm (0.125 ± 0.001 in.),

$L = 9.53 \pm 0.08$ mm (0.375 ± 0.003 in.),

$G = 7.62 \pm 0.02$ mm (0.300 ± 0.001 in.), and

$R = 12.7 \pm 0.08$ mm (0.500 ± 0.003 in.).

The other tolerances are those in the table.

^d Supporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D 1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR D20-1038.

^e The width at the center W_c shall be $+0.00$ mm, -0.10 mm ($+0.000$ in., -0.004 in.) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

^f For molded specimens, a draft of not over 0.13 mm (0.005 in.) may be allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm (0.13 in.) in thickness, and this should be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

^g Overall widths greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips.

^h Overall lengths greater than the minimum indicated may be desirable either to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

ⁱ Test marks or initial extensometer span.

^j When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.

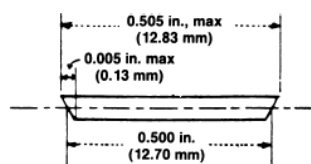


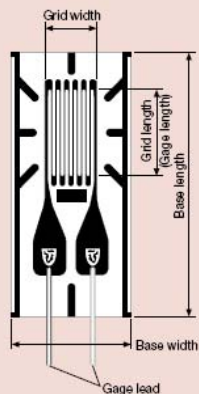
FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

ภาพผนวกที่ ก1 ภาพแสดงรายละเอียดของชิ้นทดสอบโพลิเมอร์

ที่มา: American Society for Testing Material D638

Gages for General Stress Measurement

KFG



- Gage Factor: Approx. 2.1
- Applicable Linear Expansion Coefficients: 5, 11, 16, 23, 27
- Self-temperature-compensation Range: 10 to 100°C

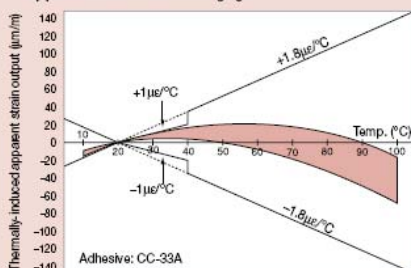
Applicable Adhesives and Operating Temperature Ranges

- CC-33A: -196 to 120°C
- CC-35: -30 to 120°C
- EP-34B: -55 to 150°C
- PC-6: -196 to 150°C

General-purpose Foil Strain Gages

The KFG gages use polyimide resin for the base approximately 13μm thick, ensuring excellent flexibility. Besides indoor measurement, the outstanding moisture resistance lets them effectively perform outdoor measurement. Unless directly exposed to waterdrops, no coating treatment is required.

Typical characteristic curve of thermally-induced apparent strain with KFG gage



- Various lengths and patterns are available to cope with multiple applications.
- Excellent moisture resistance.
- The thin gage base provides less resiliency, and thus ensures excellent workability and easy bonding to curved surfaces.
- Compensated temperature range is as wide as 10 to 100°C and thermal effect in a range of 20 to 40°C is as small as $\pm 1\mu\epsilon/^\circ\text{C}$.
- Strain limit at room temperatures is approximately 5% and fatigue life is 1.2×10^7 times (uniaxial gages), making them suitable for material tests.
- The resistance, gage factor and leadwire cable are labeled.
- Delivered in an airtight package.
- Characteristic values are expressed in accordance with the OIML International Recommendation No. 62.
- Immediate delivery is ensured.

Types, lengths and codes of leadwire cables pre-attached to KFG gages

Type	2 polyester-coated copper wires	3 polyester-coated copper wires	Vinyl-coated flat 2-wire cable		Vinyl-coated flat 3-wire cable		Middle-temperature 2-wire cable	Middle-temperature 3-wire cable
Length	C1, C2, C3, C15, C16, D1, D3, D4, D6, D16, D17, D28, D29, D30, D31	C1, C2, C3, C15, C16, D1, D2, D4, D16, D17, D29, D30, D31	C1, C2, C3, C15, C16, D9, D19, D39	D1, D4, D16, D17, D28, D29, D30	C1, C2, C3, C15, C16, D2, D9, D19, D31, D39	D1, D4, D16, D17, D28, D29, D30	C1, C2, C3, C15, C16, D1, D4, D9, D16, D17, D19, D28, D29, D30, D39	C1, C2, C3, C15, C16, D1, D2, D4, D9, D16, D17, D19, D28, D29, D30, D31, D39
2 cm	N2C2	N2C3						
3	N3C2	N3C3						
4	N4C2	N4C3						
5	N5C2	N5C3						
10	N10C2	N10C3						
15	N15C2	N15C3	L15C2R	L15C2S	L15C3R	L15C3S	R15C2	R15C3
30	N30C2	N30C3	L30C2R	L30C2S	L30C3R	L30C3S	R30C2	R30C3
50	N50C2	N50C3	L50C2R	L50C2S	L50C3R	L50C3S	R50C2	R50C3
1 m	N1M2	N1M3	L1M2R	L1M2S	L1M3R	L1M3S	R1M2	R1M3
2			L2M2R	L2M2S	L2M3R	L2M3S	R2M2	R2M3
3			L3M2R	L3M2S	L3M3R	L3M3S	R3M2	R3M3
4			L4M2R	L4M2S	L4M3R	L4M3S	R4M2	R4M3
5			L5M2R	L5M2S	L5M3R	L5M3S	R5M2	R5M3
6			L6M2R	L6M2S	L6M3R	L6M3S	R6M2	R6M3
8			L8M2R	L8M2S	L8M3R	L8M3S	R8M2	R8M3
10			L10M2R	L10M2S	L10M3R	L10M3S	R10M2	R10M3
15			L15M2R	L15M2S	L15M3R	L15M3S	R15M2	R15M3
20			L20M2R	L20M2S	L20M3R	L20M3S	R20M2	R20M3
30 m			L30M2R	L30M2S	L30M3R	L30M3S	R30M2	R30M3
Opng. temp. range	-196 to 150°C		-10 to 80°C				-100 to 160°C	
Remarks	Twisted for 50cm and 1m long (with some exception)		L-6; L-9 for 6m or longer		L-7; L-10 for 6m or longer		L-11	L-12

ภาพผนวกที่ ก2 แผ่นข้อมูล (data sheet) ของ strain gauge รุ่น KFG-1-120-C1-11L1M2R

ที่มา: Kyowa (2008)

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างคำสั่งภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN) เพื่อใช้กรณีของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
เพื่อวัดแรงกระทำจากของเหลวซึ่งบรรจุภายใน

```

START
CEND
ENDSTEP=35000
CHECK=NO
TITLE= Jobname is: ChPET05M
TLOAD=1
TIC=1
SPC=1
$ Output result for request: b
TYPE (b) = ARCHIVE
ELEMENTS (b) = 1
SET 1 = 1 THRU 1035
ELOUT (b) = EFFPL-MID EFFPL-OUT EFFPL-IN EFFST-MID EFFST-OUT ,
          EFFST-IN TXX-MID TXX-OUT TXX-IN TYY-MID TYY-OUT ,
          TYY-IN TZZ-MID TZZ-OUT TZZ-IN TXY-MID TXY-OUT ,
          TXY-IN TYZ-MID TYZ-OUT TYZ-IN TZX-MID TZX-OUT ,
          TZX-IN EPSXX-MID EPSXX-OUT EPSXX-IN EPSYY-MID ,
          EPSYY-OUT EPSYY-IN EPSZZ-MID EPSZZ-OUT EPSZZ-IN ,
          EPSXY-MID EPSXY-OUT EPSXY-IN EPSYZ-MID EPSYZ-OUT ,
          EPSYZ-IN EPSZX-MID EPSZX-OUT EPSZX-IN ,
          EFFSR-MID EFFSR-OUT EFFSR-IN
STEPS (b) = 0 THRU END BY 100
SAVE (b) = 10000
$ Output result for request: e
TYPE (e) = ARCHIVE
ELEMENTS (e) = 2
SET 2 = 1036 THRU 1236
ELOUT (e) = XVEL YVEL ZVEL MASS PRESSURE FMAT FMATPLT
STEPS (e) = 0 THRU END BY 100
SAVE (e) = 10000

```

```

$ Output result for request: f
TYPE (f) = ARCHIVE
ELEMENTS (f) = 3
SET 3 = 1237 THRU 2537
ELOUT (f) = EFFPL-MID EFFPL-OUT EFFPL-IN EFFST-MID EFFST-OUT ,
          EFFST-IN TXX-MID TXX-OUT TXX-IN TYY-MID TYY-OUT ,
          TYY-IN TZZ-MID TZZ-OUT TZZ-IN EPSXX-MID EPSXX-OUT ,
          EPSXX-IN EPSYY-MID EPSYY-OUT EPSYY-IN EPSZZ-MID ,
          EPSZZ-OUT EPSZZ-IN
STEPS (f) = 0 THRU END BY 100
SAVE (f) = 10000
$ Output result for request: force
TYPE (force) = TIMEHIS
CONTS (force) = 4
SET 4 = ALLCONTACTS
CONTOUT (force) = XFORCE YFORCE ZFORCE FMAGN
TIMES (force) = 0 THRU END BY 1e-6
SAVE (force) = 10000
$----- Parameter Section -----
PARAM,CONTACT,THICK,0.0
PARAM,FASTCOUP
PARAM,INISTEP,0.199E-06
PARAM,MINSTEP,1e-7
$----- BULK DATA SECTION -----
BEGIN BULK
INCLUDE ChPET05M.bdf
$ ----- GRAVITATION -----
TLOAD1      1   444      0
GRAV      444      -9.81   0   1   0
$ ===== PROPERTY SETS =====

```

```

$      *w_b*
PSHELL      1      1 .00056
$      *t_f*
PSHELL      2      2 .01
$      *euler*
PEULER1      3      MMHYDRO      6
$ ===== MATERIAL DEFINITIONS =====
$
$ ----- Material pet id =1
DMAT      1      1288.79      8.88413e+08      0.495
*          1      TRUE          2      +
$ ----- Material steel id =2
DMATEP      2      3960      3.7e+11      0.22
$ ----- Material water id =3
DMAT      3      997      3
EOSPOL      3 2.2e+09
$ ===== Load Cases =====
$ ----- Initial Velocity BC vel -----
SET1      5      1042      THRU      1082      461      THRU      1041      1+
+      THRU      460
TICGP      1      5      YVEL -3.1006
$ ----- Contact : cont
$
CONTACT      3      GRID      SURF      6      1      +
+      V4      TOP      0
$
$ Slave contact surface for cont
SET1      6      1022      THRU      1082      441      THRU      1021      1+
+      THRU      440
$ Master contact surface for cont

```


ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายชาคริต สุวรรณจำรัส
เกิดวันที่	13 กุมภาพันธ์ 2516
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงาน	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน