

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

โครงสร้างรูปหมวกปิดเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นลักษณะคล้ายหมวกและส่วนที่เป็นแผ่นปิดเรียบ ทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำมาประกบกันและเชื่อมเป็นจุด (Spot Welding) ให้ติดกัน แผ่นเหล็กหรือวัสดุที่นำมาใช้ทำจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ซึ่งเรียกว่า Thin-shell เนื่องจากโครงสร้างรูปหมวกปิดมีคุณสมบัติของการเป็นโครงสร้างกันการชนที่ดี คือสามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้ดี ความสามารถของโครงสร้างในการยุบตัวที่เหมาะสมเมื่อเกิดการกระแทกหรือการชน โดยในการยุบตัวนั้น โครงสร้างควรจะดูดซับแรงกระแทกได้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของตัวเอง [2] เนื่องจากความหนาแน่นนั้นไม่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักมากเกินไป อันจะทำให้เกิดการสั่นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง นอกจากนี้คุณสมบัติที่ดีอีกอย่างหนึ่งของโครงสร้างกันการชนนั้นควรมีอัตราส่วนการยุบตัว (Stroke Ratio) สูงอันจะหมายถึงความสามารถในการซึมซับพลังงานจากการชนที่ดีนั่นเอง

##### 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.D. White, N. Jones, W. Abramowicz [3] นำทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของตนเอง [1] และของนักวิจัยหลายคน ซึ่งนำสมการ Strain Hardening [4] และ Perfectly Plastics [5] มาใช้เปรียบเทียบ ซึ่งนักวิจัยแต่ละคนก็ทำการวิจัยที่มีตัวแปรแตกต่างกันออกไป การวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มของพื้นที่หน้าตัด (A) เมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าภาระเฉลี่ย ( $P_m$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย การทดลองนี้เป็นของ Tani and Funahashi [6], Aya and Takahashi [7] และ Ohkubo [8] แต่ค่าภาระเฉลี่ยที่ได้จะอยู่ในกรอบของสองสมการข้างต้น แต่ผลการทดลองของ Belingardi [9] ใช้ชิ้นงานที่เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำได้ค่าภาระเฉลี่ยสูงกว่าค่าจากทฤษฎี การวิจัยเกี่ยวกับความหนาของ Ohkubo [8] กับทฤษฎี เมื่อความหนาเพิ่ม ค่าภาระเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นได้ดีกว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัด โดยใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด  $a=70$  มิลลิเมตร และ  $b=60$  มิลลิเมตร โดยใช้ความหนา  $t= 1.2, 1.6$  และ  $2.0$  มิลลิเมตร ตามลำดับ Abramowicz and Jones [10] ทำการทดลอง ท่อสี่เหลี่ยม (Square Tube) โดยใช้ ค่า  $L/t$  เป็นตัวแปรที่สนใจ ผลที่ได้ที่ค่า  $L/t$  ระหว่าง 30-

30.5 ให้ค่าภาระเฉลี่ยสูง โดยจะอยู่ในแนวโน้มของค่าทางทฤษฎีที่ใช้ค่าความกว้างของขอบ (f) เท่ากับศูนย์

Omar [11] ใช้ โปรแกรม LS – DYNA3D วิเคราะห์โครงสร้างรูปหมวกปิดเหล็กและอลูมิเนียม ลักษณะเด่นของโครงสร้าง Double hat จะมีค่าภาระเฉลี่ยมากกว่า Top hat อยู่ประมาณ 60% ถ้าโครงสร้างรูปหมวกปิดเป็นวัสดุเดียวกัน

J.D. Reid [12] ทดสอบหาพลังงานดูดซับของโครงสร้างเหล็กรูปหมวกปิด (Midrail) โดยใช้รถ 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ ขนาดกลาง ขนาดเล็ก ตามลำดับ และใช้โครงสร้างรูปหมวกปิด 3 แบบสมมติค่าความหนาหรือ ค่าความเค้น ในกรณีที่สองสมมติทั้งสองค่า ผลที่ได้นำมาหาเส้นแนวทางการออกแบบของโครงสร้างรูปหมวกปิดและผลโดยสรุปคือ ทุกๆ 10% ของการเปลี่ยนแปลงความหนาจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานดูดซับประมาณ 14% และทุกๆ การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของวัสดุ 10% ค่าพลังงานดูดซับเปลี่ยนไป 7.3%

Kum Cheol Shin [13] เป็นการทดสอบท่ออลูมิเนียม ท่อผสม ท่อ hybrid ภายใต้แรงกดในแนวแกนและแรงกดที่ทำให้เกิดการ โกงตัว เพื่อหาค่าพลังงานดูดซับที่เกิดขึ้น ท่อ hybrid จะเป็นการนำท่ออลูมิเนียมหุ้มด้วยท่อคอมโพสิตด้านนอกด้วยมุมการหุ้ม 0/90 0/90 และ 45/45 องศา ตามลำดับที่ความหนา 1 และ 2 มิลลิเมตร ผลจากการทดสอบโดยทำการล๊อคท่อที่ด้านล่างด้านบน ปลดข้ออิสระด้วยเครื่องทดสอบขนาด 250 กิโลนิวตัน ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที กดเป็นระยะ 90 มิลลิเมตรทุกตัว ผลปรากฏว่าท่อ hybrid มุมคอมโพสิต 90 องศาให้ค่าพลังงานดูดซับดีที่สุด ผลของการทดสอบการ โกงตัวโดยการนำท่อมาวางยื่นออกในแนวของแกนแล้วทำการกดลงท่อ hybrid มุม 0 และ 90 องศา ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร ให้ค่าพลังงานดูดซับไม่ต่างกัน แต่ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร มีค่าต่างกันส่วน 0/90 และ 45/45 ไม่ต่างกันเลย

Abdul-Latif [14] การศึกษาพลังงานดูดซับของท่อกลวงโดยใช้โครงสร้างที่แตกต่างกัน ทดลองด้วยการกดตามแนวแกน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดคือ  $\eta$  และ  $\lambda$

$$\eta = \frac{R_m}{t} \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{R_m}{L} \quad (2.2)$$

โดยที่ L = ความยาวของชิ้นทดสอบ

$R_m$  = รัศมีของท่อเฉลี่ย

t = ความหนาของชิ้นทดสอบ

ท่อที่ใช้ทำจากทองแดง (Copper) หรืออลูมิเนียม (Aluminum) ในการทดลองมีวิธีการยึดจับชิ้นงานที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ Fixed-ends, Free-ends, และ Subdivided เป็นการแยกท่อออกเป็นส่วนๆ มีงานบางร่องตรงจุดแบ่งทำด้วยเหล็กแข็ง ขนาดของชิ้นงาน มีดังนี้

$\eta=13.5, 15.5, 19.5, 26.5$   $\lambda=0.1, 0.13, 0.22, 0.33, 0.44, 0.66$  โดยวัสดุไม่มีการทำ Heat Treatment ใดๆ ผลการทดลอง เกิดรูปแบบการเสียหาย 3 รูปแบบ ได้แก่ Axisymmetric mold, Diamond mold, and Mixed mold สำหรับ Free-ends แล้ว  $\lambda=0.44$  ขึ้นไปทำให้เกิด Axisymmetric mold ทั้งหมดไม่ว่า ความเร็วในการกดชิ้นงานเป็นเท่าใดก็ตามนอกจากนี้จะทำให้เกิด Diamond mold, and Mixed mold ซึ่งไม่เกิดผลดีเพราะ ค่าพลังงานดูดซับจะน้อยแต่ถ้าเปลี่ยนเป็น Subdivided จะทำให้เกิด Axisymmetric mold ขึ้นมาแทนที่ สรุปก็คือการเกิดรูปแบบ Axisymmetric mold นี้เป็นผลดีกับค่า  $P_{max}$  และก็ยังส่งผลให้ค่าพลังงานดูดซับดีขึ้น 10% ของกดทดลองแบบ Free-ends

M.D. White, M. Jones [1] เป็นการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาทำนายของผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้วัสดุเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ (Mild Steel) มาตรฐานโครงสร้างรูปหมวกปิดที่มีความยาว 500, 333, 250 และ 160 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความกว้างของขอบ 10, 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร ระยะห่างของรอยเชื่อมเป็น 25 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีค่าความต้านทานความเค้นครากตัว (Yield Strength) 155 MPa และค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate strength) 299 MPa ทั้งหมดโดยรอยเชื่อมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ใช้โหลด 25 ตัน ความเร็ว 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลการทดลอง ชิ้นงานที่มีขนาดสั้นจะเกิดการยุบตัวแบบไม่สมมาตร (Irregular progressive collapse) และสำหรับชิ้นงานยาวเกิดการยุบแบบโค้งตัว (An Euler-type global bending) ความกว้างของขอบที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลังงานดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วยแต่จะทำให้การยุบตัวไม่เสถียร รูปแบบการยุบตัวสามารถศึกษาได้ในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการทดลองของ While และ Jones [1]

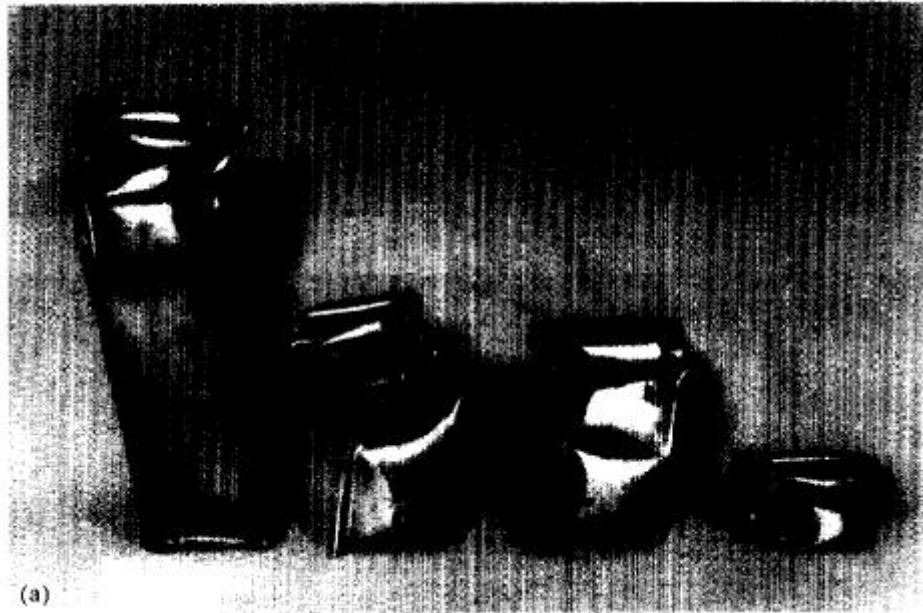
Specimen Number	f (mm)	l (mm)	$\delta_f$ (mm)	$E_a$ (kJ)	$P_m$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	Mode of Failure	No. of lobes
10C	10	500	259	4.742	18.31	47.50	Regular	9
10D	10	333	197	3.725	18.91	51.00	Regular	7
10E	10	250	125	2.473	19.78	50.00	Regular	4
10F	10	166	107	2.146	20.06	48.50	Regular	4
15C	15	500	252	4.201	16.67	48.00	Euler	6
15D	15	333	163	2.818	17.29	49.50	Euler	6
15E	15	250	183	3.146	17.19	50.00	Regular	6
15F	15	166	119	2.094	17.60	50.50	Regular	6
20C	20	500	163	2.831	17.37	55.75	Irregular	5
20D	20	333	240	3.790	15.79	52.50	Regular	9
20E	20	250	146	2.694	18.45	59.00	Irregular	3
20F	20	166	79	1.402	17.75	55.00	Regular	5
25C	25	500	357	5.826	16.32	57.00	Regular	12
25D	25	333	173	3.254	18.81	59.50	Regular	6
25E	25	250	174	2.573	14.79	59.00	Regular	5
25F	25	166	109	2.130	19.54	61.00	Regular	5

G.M. Nagel, D.P. Thambiratnam [15] ทำการจำลองการเคลื่อนไหวและการดูดซับพลังงานของท่อเรียบและบางภายใต้แรงกระทำแนวเฉียง การทดสอบการกระทำของแรงในแนวแกนนั้นเป็นไปได้ว่าจะต้องเกิดการรับแรงในแนวเฉียงเป็นผลกระทบอีกอย่างหนึ่ง จุดประสงค์คือต้องการเปรียบเทียบท่อสี่เหลี่ยมที่ตรงกับเรียวกภายใต้แรงกดเฉียงสำหรับท่อที่มีมุมรับแรง ความเร็วและขนาดที่แตกต่างกัน และได้พบว่าการเพิ่มมุมในการรับแรงจะทำให้ ค่าพลังงานดูดซับและค่าโหลดเฉลี่ย ลดลง

### 2.1.3 ลักษณะการยุบตัวของชิ้นงาน [1]

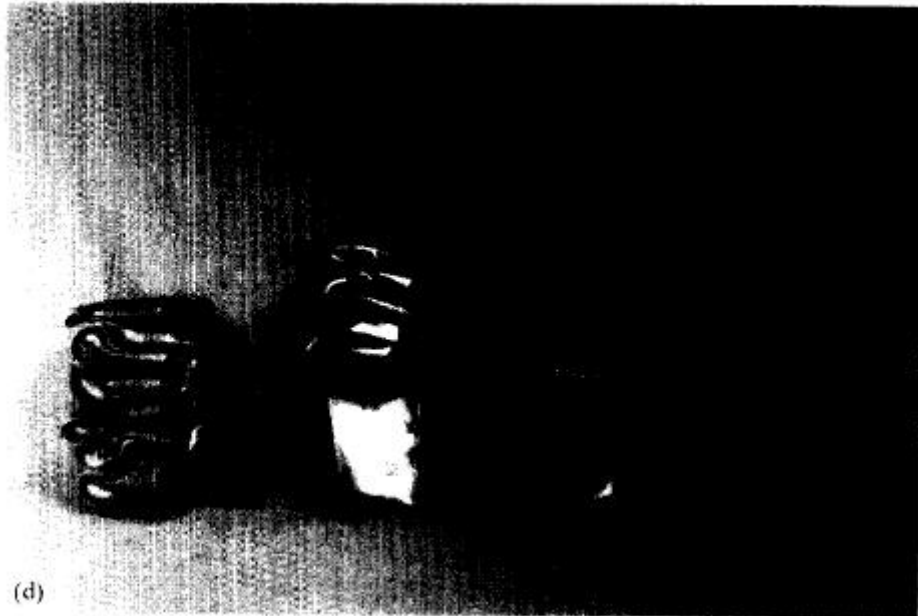
ลักษณะการยุบตัวของโครงสร้างรูปหมวกปิดมีความคล้ายคลึงกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส [5] การนำเสนองานทดลองส่วนมากเป็นการยุบตัวแบบปกติ การเรียกชื่อรูปแบบการยุบตัวนี้มีเรียกกันอยู่หลากหลายแต่เพื่อให้เป็นที่เข้าใจตรงกันจึงให้ความหมายไว้ดังนี้

2.1.3.1 Regular Progressive Collapse (Case 1) เกิดการยุบตัวด้านเดียวและเป็น การยุบตัวแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่2.1 ชั้นงานที่ 1 นับจากซ้ายมือเมื่อ  $f=10$  มิลลิเมตร  $L=500$  มิลลิเมตร



รูปที่2.1 แสดงรูปแบบการยุบตัวของ โครงสร้างรูปหมวกปิดกรณีที่มีขนาด  $f=10$  มิลลิเมตร  $L =500, 333, 250$  และ  $166$  มิลลิเมตร ตามลำดับ

2.1.3.2 Regular Progressive Collapse (Case 2) เกิดการยุบตัวขึ้นทั้งสองด้านและ เป็นการยุบตัวแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่2.2 ชั้นงานที่ 1 นับจากซ้ายมือเมื่อ  $f=25$  มิลลิเมตร  $L=500$  มิลลิเมตร



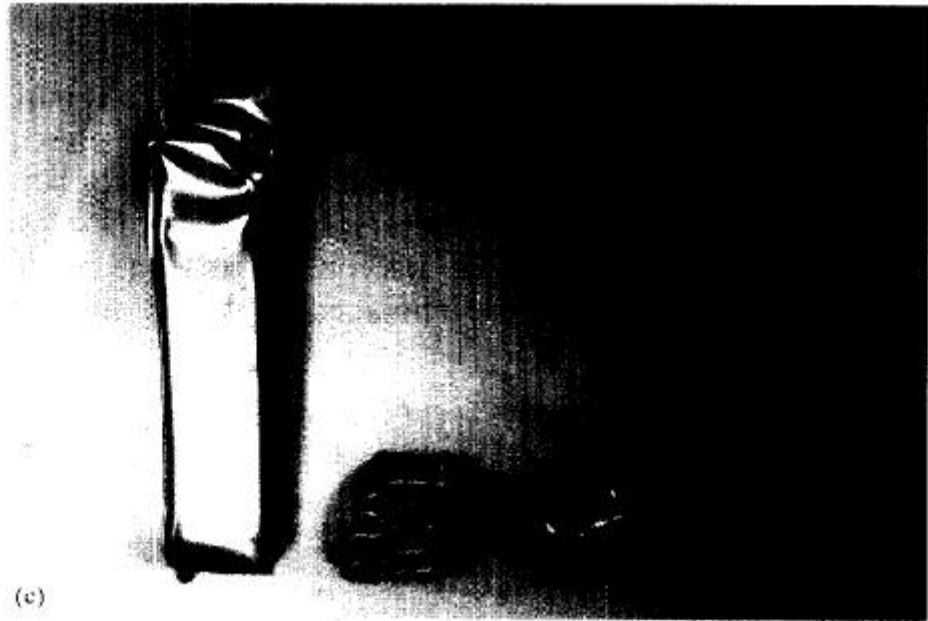
รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการขุดตัวของ โครงสร้างรูปหมวกปิดกรณีที่มีขนาด  $f=25$  มิลลิเมตร  
 $L = 500, 333, 250$  และ  $166$  มิลลิเมตร ตามลำดับ

2.1.3.3 An Euler-type global bending มีการสร้าง lobes แบบปกติขึ้นในหนึ่งด้าน  
แล้วก็เกิดการโก่งตัวขึ้นกรณีนี้เกิดกับชิ้นงานที่มีขนาดยาวดังแสดงในรูปที่ 2.3 ชิ้นงานที่ 1 จาก  
ด้านซ้ายมือ  $f=15$  มิลลิเมตร  $L=500$  มิลลิเมตร



รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการขุดตัวของ โครงสร้างรูปหมวกปิดกรณีที่มีขนาด  $f=15$  มิลลิเมตร  
 $L = 500, 333, 250$  และ  $166$  มิลลิเมตร ตามลำดับ

2.1.3.4 Irregular progressive collapse เกิดกับชิ้นงานสั้นๆเมื่อเกิดการยุบพร้อมกัน ทั้งสองด้านแต่เกิดการยุบตัวแบบไม่สม่ำเสมอขึ้นระหว่างนั้นทำให้มีการแข่งขันกันในการยุบตัวของด้านบนและล่างเป็นสาเหตุให้เกิดการบิดและการโก่งตัวตามมาดังแสดงในรูปที่ 2.4 ชิ้นงานที่ 3 นับจากซ้ายมือ  $f=20$  มิลลิเมตร  $L=250$  มิลลิเมตร



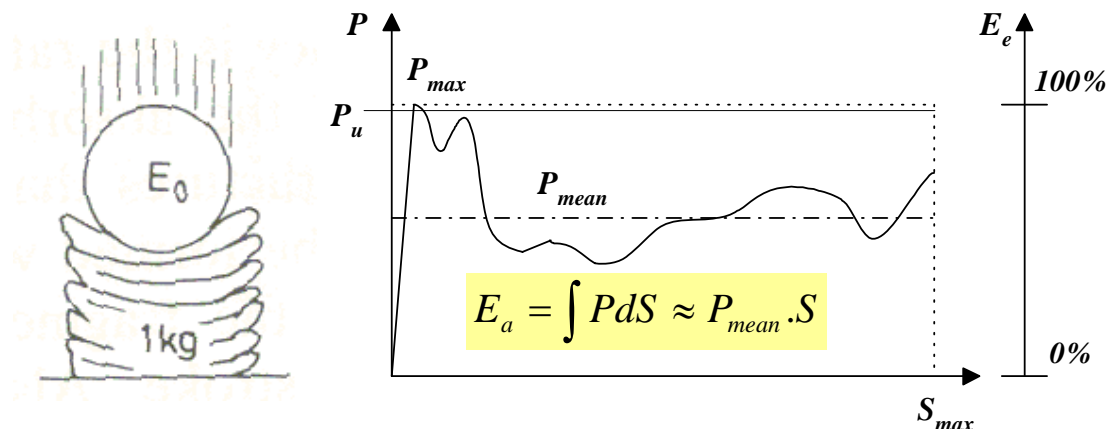
รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการยุบตัวของโครงสร้างรูปหมวกปิดกรณีที่มีขนาด  $f=20$  มิลลิเมตร  $L=500, 333, 250$  และ  $166$  มิลลิเมตร ตามลำดับ

## 2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก

ตัวบ่งชี้สำหรับการทดสอบการรับแรงกระแทกถูกใช้ในการเปรียบเทียบการออกแบบที่มีความแตกต่างกัน การออกแบบที่ดีสามารถที่จะพิจารณาได้โดยการหาค่าพลังงานดูดซับที่เกิดขึ้น ทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างที่รับแรงกระแทก (Crashworthiness) มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวด้วยกัน ซึ่งตัวแปรต่างๆเหล่านี้มักอ้างอิงมาจากกราฟของ Load-Displacement Curve ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และรายละเอียดของตัวแปรแต่ละตัวมีดังนี้ [2]

### 2.2.1 ภาระสูงสุด (Maximum load), $P_{max}$

ภาระสูงสุด ( $P_{max}$ ) หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Load – displacement curve ตลอดช่วงเวลาการเสียหายของชิ้นงาน ค่าของภาระสูงสุดควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและไม่สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้อัตราเร่งไม่คงที่เช่น การลดความเร็วอย่างทันทีทันใดก็จะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ด้วย



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัว (Load - Displacement Curve) เมื่อชิ้นส่วนเกิดการชนกระแทก

### 2.2.2 ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load), $P_{mean}$

ภาระเฉลี่ย ( $P_{mean}$ ) หมายถึง ภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว โดยเปรียบเทียบกับระยะยุบตัว ค่าภาระเฉลี่ยนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปค่าภาระเฉลี่ยควรมีค่าสูงเพื่อให้ได้พลังงานดูดซับที่สูงตามไปด้วย

### 2.2.3 พลังงานดูดซับ (Energy absorption), $E_a$

พลังงานดูดซับ ( $E_a$ ) หมายถึง พลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ตลอดการกระแทกหรือการยุบตัว ซึ่งหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระที่ใช้กับระยะทางที่ชิ้นงานยุบตัวได้ จากรูปที่ 2.5 สามารถหาค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานได้จากสมการที่ (2.3)

$$E_a = \int PdS \quad (2.3)$$

โดยที่  $E_a$  = พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้

$P$  = ภาระที่กระทำกับวัสดุชิ้นงาน

$dS$  = การเปลี่ยนแปลงระยะยุบตัวของชิ้นงาน



แต่เนื่องจากเส้นกราฟของภาระและระยะทางการยุบตัวไม่คงที่สม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่เกิดการชนกระแทก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงแนะนำให้ใช้การประมาณจากค่าภาระเฉลี่ยในการหาค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุโดยใช้สมการที่ (2.4) ในการหาค่าเฉลี่ยของพลังงานดูดซับ

$$E_a = P_{mean} \cdot S \quad (2.4)$$

#### 2.2.4 พลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption), $E_s$

พลังงานดูดซับจำเพาะ ( $E_s$ ) หมายถึง ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างหนึ่งๆ เทียบกับน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ในการหาค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะที่เกิดจากการชนกระแทกนั้น จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการชนกระแทกรวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุด้วย โดยทั่วไปชิ้นงานสามารถที่จะดูดซับพลังงานได้ตามความสามารถของตัวเอง เมื่อชิ้นงานเริ่มดูดซับพลังงานจากการชน กระแทกตัวมันเองจะเริ่มยุบตัวหรือพับตัว (Collapse) จนกระทั่งไม่สามารถที่จะยุบตัวได้อีก นั่นหมายความว่าชิ้นงานหรือวัสดุชิ้นนั้นไม่สามารถที่จะรับแรงกระแทกหรือดูดซับพลังงานได้อีกต่อไป ถ้าเป็นเช่นนั้นแรงที่เหลืออยู่ก็จะส่งตรงไปยังชิ้นส่วนที่เราต้องการปกป้องให้ความปลอดภัยหรือร่างกายของมนุษย์ในห้องผู้โดยสาร ซึ่งโดยปกติแล้วเราจะพิจารณาอัตราการดูดซับพลังงานเทียบกับน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานมีน้ำหนักมากเกินไป กล่าวคือ ถึงแม้ว่าชิ้นงานจะดูดซับพลังงานได้มาก แต่ถ้าชิ้นงานมีน้ำหนักมากก็อาจจะไม่เหมาะสมกับโครงสร้างบางชนิด เช่น โครงสร้างรถยนต์

ดังนั้นค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะจึงหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ดูดซับได้ต่อน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองและสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$E_s = \frac{\int PdS}{mass} \approx \frac{P_{mean} \cdot S}{mass} \quad (2.5)$$

โดยที่  $E_s$  = การดูดซับพลังงานจำเพาะ

$P_{mean}$  = ภาระเฉลี่ย

$S$  = ระยะที่วัสดุชิ้นงานยุบตัวได้จากเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย

## 2.2.5 ประสิทธิภาพการยุบตัว (Stroke efficiency), $SE$

ประสิทธิภาพของการยุบตัว ( $SE$ ) หมายถึง ความสามารถของชิ้นงานในการยุบตัวจากการกระแทกจนชิ้นงานไม่สามารถยุบตัวได้อีก ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนของระยะยุบตัวของชิ้นงานกับความยาวเดิมของชิ้นงานหรือความสูงโดยหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$SE = \frac{S}{h} \quad (2.6)$$

โดยที่  $SE$  = ประสิทธิภาพของการยุบตัวของชิ้นงาน (Stroke efficiency)  
 $S$  = ระยะยุบตัวของ โครงสร้างตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว  
 $h$  = ความยาวเดิมของชิ้นงาน

## 2.3 ความเค้นและความเครียดของวัสดุ

### 2.3.1 ความเค้นและความเครียดทางด้านวิศวกรรม [16]

การทดสอบแรงดึงใช้สำหรับการหาค่ากำลังของวัสดุ ในการทดสอบวัสดุจะถูกดึงจนขาดจากกันในเวลาอันสั้นด้วยอัตราเร่งคงที่ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงจะต้องพิจารณาการเลือกใช้มาตรฐานอย่างรอบคอบ เมื่อทำการทดสอบจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยุบตัว นำค่าทั้งสองมาหาค่าความเค้นและค่าความเครียดโดยอาศัยสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\sigma$  = ค่าความเค้นทางวิศวกรรม  
 $F$  = ค่าแรงที่กระทำตามแนวแกน  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดขวางเริ่มต้น

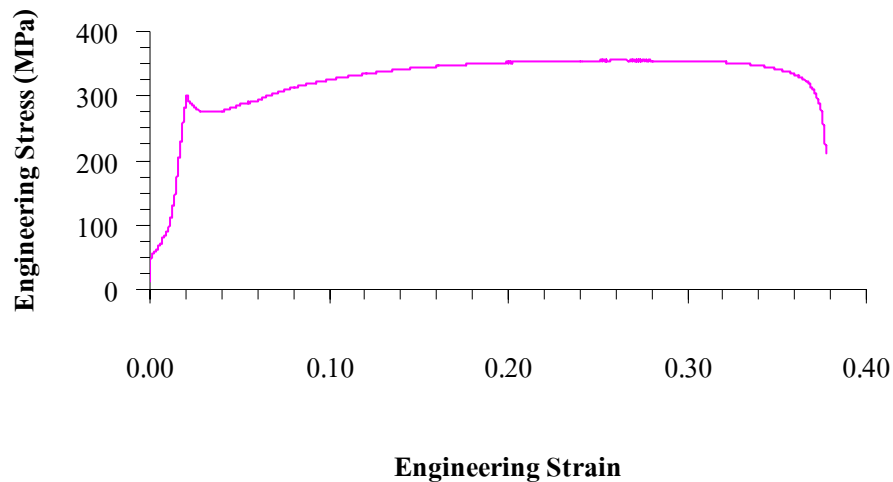
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\varepsilon$  = ค่าความเครียดทางวิศวกรรม

$\Delta l$  = การเปลี่ยนแปลงของความยาวจากการยืดตัว

$l_0$  = ความยาวเดิม

นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะได้กราฟลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม

จากรูปที่ 2.6 จะสามารถหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุได้คือ

ค่าอีลาสติก โมดูลัส (Elastic Modulus),  $E$  เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของวัสดุ ที่เป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดใน 1 มิติ เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (2.9)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.9)$$

ค่าความเค้นคราก (Yield Strength) เป็นค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มีความสำคัญในการออกแบบ ถ้าเอาค่าความเค้นครากออกแบบจะเกิดความปลอดภัยสูง วัสดุที่ผ่านการดึงผ่านจุดนี้จะไม่สามารถคืนรูปเดิมได้

ค่าความเค้นสูงสุด(Ultimate Strength) เป็นค่าสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนที่จะเกิดการเสียหาย จากกราฟการทดสอบด้วยการดึง หาได้โดยการลากเส้นจากจุดสูงสุดของกราฟขนานกับแกนอน ตัดที่แกนของความเค้น ค่านี้ไม่นิยมใช้ในการออกแบบเพราะมีความเสี่ยงถ้าทำงานที่อุณหภูมิสูง

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ปริมาณการยืดตัวที่เกิดในชิ้นงานที่ถูกทดสอบแรงดึงจะ ใช้บอกค่าความเหนียวของวัสดุได้ ความเหนียวของวัสดุมักกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

$$\%elongation = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2.10)$$

เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่ (%Reduction Area) ความเหนียวของวัสดุหรือโลหะอาจ แสดงได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่ ปริมาณนี้มักได้จากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานขนาด ตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว หลังการทดสอบวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ตัดขวางของ ชิ้นงานที่แตกหักที่มีขนาดลดลง ใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นและ สุดท้าย หากค่าของเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ (2.11)

$$\%reduction = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (2.11)$$

### 2.3.2 ความเค้นความเครียดจริง [17]

ค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.7) และค่าความเครียดที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.8) นั้น เรียกว่า ค่าความเค้นและค่าความเครียดทางวิศวกรรมเนื่องจากได้จากประมาณการโดยหาร ด้วย ค่าพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น ( $A_0$ ) แต่ในความเป็นจริงนั้นขนาดหน้าตัดของชิ้นงานขณะทำการ ทดสอบการดึงจะต้องลดลงเรื่อยๆ ไม่คงที่ ดังนั้นจึงเกิดการนิยามความเค้นและความเครียดใหม่ขึ้น เรียกว่า ความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain) โดยความเค้นจริงและ ความเครียดจริงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ หลังจากการเปลี่ยนค่า ความเค้นความเครียดทางวิศวกรรมให้เป็นความเค้นความเครียดจริงแล้ว ลักษณะกราฟของความ เค้นและความเครียดจะเปลี่ยนเป็นดังกราฟในรูปที่ 2.7 ทั้งนี้ค่าความเค้นและความเครียดจริง คือค่า คุณสมบัติของวัสดุที่จะต้องนำไปให้โปรแกรมใช้ประกอบการคำนวณต่อไป

ความเค้นถูกให้ความหมายว่าเป็นอัตราส่วนของแรงต่อพื้นที่

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่จริงหรือพื้นที่ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นๆที่เป็นไปตามภาวะดึง  
 ในทำนองเดียวกันเมื่อการทดสอบการดึงเสร็จสิ้นจะสังเกตเห็นการยืดตัวของแต่ละชั้น ส่วนฐานจะ  
 ยืดเล็กน้อย

$$\epsilon^t = \int_{l_0}^l \frac{1}{l} dl = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.13)$$

สำหรับความค่าของความเครียดทางวิศวกรรม  $e = \epsilon$  เนื่องจาก  $\ln(1-e) = -\epsilon$  สำหรับความเครียดขนาด  
 ใหญ่ อย่างไรก็ตามค่าจะแตกต่างกันอย่างรวดเร็ว

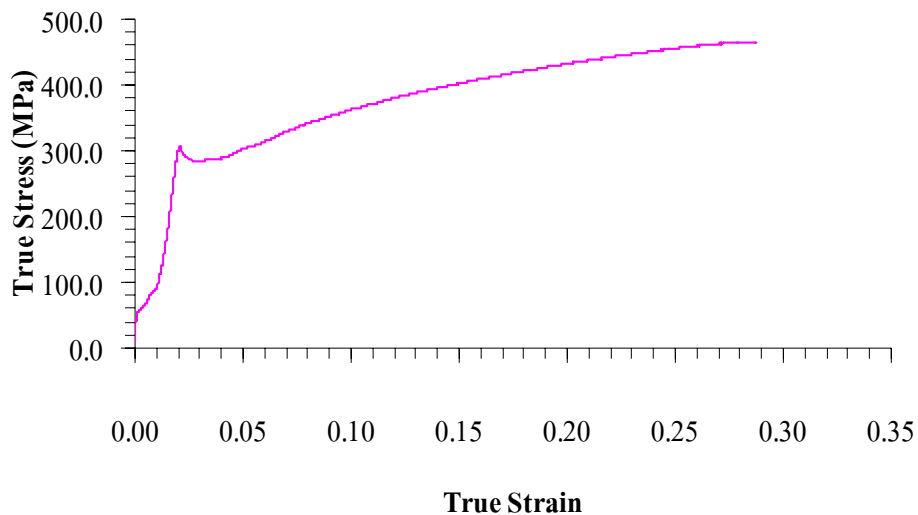
ค่าของ True Strain จะถูกใช้มากเพราะเป็นค่าที่ถูกต้องสำหรับความเครียดที่ทำให้ค่าความเครียดที่  
 เกิดจากการดึงและการกดอัดเท่ากัน

ค่าความเค้นจริง (True Stress) หาได้จาก

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2.14)$$

โดยที่ K = Strength Coefficient

n = Strain hardening exponent



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง

### 2.3.3 การหาค่า Plastic Strain

ในโปรแกรม ABAQUS การใส่ค่าคุณสมบัติเพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องจำเป็นต้องสร้างจุดต่างๆบนกราฟระหว่าง True Stress กับ Plastic Strain จากกราฟในรูปที่ 2.7 เราได้ค่า True Stress การหาค่า Plastic Strain ทำได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\varepsilon^{pl} = \left( \varepsilon^t - \frac{\sigma}{E} \right) \quad (2.15)$$