

1 เครื่องต้นแบบแสดงภาพความเค้นด้วยรอยแตกร้าวในแผ่นพลาสติกใส  
2 ภายใต้การดึงและการดัด : การออกแบบ สร้าง และทดสอบ

3  
4 วิสัฎา ประเสนา<sup>1</sup> ภูริวิจน์ อัครวิรัชกุล<sup>1</sup> และ พิเชษฐ์ พิทธิง<sup>2\*</sup>  
5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140  
6  
7

8 **บทคัดย่อ**

9  
10 ปริมาณความเค้นเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบเพื่อความต้านแรงที่จะทำให้เชื่อมั่นได้ว่าวัตถุ  
11 ไม่เกิดการแตกหัก ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในเชิงความหมายจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง บทความนี้  
12 นำเสนอแนวทางการแสดงการกระจายตัวของความเค้นในวัตถุด้วยวิธีการสร้างรอยแตกร้าวที่จะทำให้  
13 เห็นการกระจายตัวได้เชิงประจักษ์โดยการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องแสดงภาพความเค้น เครื่อง  
14 ดังกล่าวสามารถทดสอบกับชิ้นทดลองพลาสติกใสที่ผ่านการเคลือบด้วยแล็กเกอร์ใสซึ่งจะทำให้เกิดรอย  
15 แตกร้าวภายใต้การดึงและดัด รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแสดงถึงมโนทัศน์ของความเค้นและความเครียด  
16 ความสัมพันธ์ระหว่างกัน และหลักการสำคัญ ภายหลังจากทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดเครื่องแสดง  
17 ภาพความเค้นทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่สะท้อนถึงการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นทดลองที่ถูกเคลือบ  
18 ด้วยแล็กเกอร์ทั้งที่รับภาระดึงและดัด และที่เป็นไปตามหลักการและทฤษฎีในกลศาสตร์ของวัสดุ

19

20

21

22 **คำสำคัญ** : การกระจายตัวของความเค้น / รูปแบบการแตกร้าว / แล็กเกอร์ใส / วิธีความเค้นหลัก

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37 <sup>1</sup> นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

38 <sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

39 **A Stress Visualization Apparatus via Cracks Patterns Appearing in**  
40 **Transparent Plastic Plates due to Tension and Bending:**  
41 **Designing, Building, and Testing**

42  
43 **Wisuda Purasena<sup>1</sup>, Phuriwaj Akarawiratkul<sup>1</sup>, and Pichet Pinit<sup>2\*</sup>**

44  
45 King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

46  
47  
48 **Abstract**

49  
50 Designing machine components for safety requires knowing of stresses induced in those  
51 components due to the external loads to fulfil one mode of design: design for strength or design  
52 against breaking. Deep understanding on the meaning of stresses is essential. This paper  
53 presents the ways to design, build, and test the apparatus that creates crack patterns in the  
54 acrylic specimens coated by lacquer under tensile and bending loads. The crack patterns  
55 address the concepts of stress and strain, their relationship, and other related principles. Upon  
56 testing the specimens, the crack patterns appeared in them reveal some insight into concepts of  
57 stress distribution, stress concentration, stress trajectories, and Saint-venant's principle that  
58 conform to the major principles and theories in Mechanics of Materials.

59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68 **Keywords:** Stress distribution / Crack patterns / Clear lacquer / Stress trajectories

69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  

---

89 <sup>1</sup> Lecturer, Department of Mechanical Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

90 <sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

91 1. บทนำ

92 ความเค้น (stress) ถือเป็นพารามิเตอร์  
93 ออกแบบที่สำคัญสำหรับการออกแบบเพื่อความ  
94 ต้านแรง (design for strength) ความเค้นจะถูก  
95 นำไปใช้เพื่อการเปรียบเทียบกับความต้านแรง  
96 ของวัสดุภายใต้ฟังก์ชันการออกแบบ (design  
97 function) ตามทฤษฎีความเสียหายต่าง ๆ ใน  
98 การออกแบบชิ้นส่วนทางกล [1-4]

99 ในการเรียนการสอนศาสตร์กลศาสตร์  
100 ของแข็ง รายวิชากลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of  
101 Materials) จะเป็นรายวิชาแรกที่น่าเสนอโม  
102 ทัศน์ของความเค้นและความเครียด (strain) ซึ่ง  
103 หมายถึงความเข้มของภาระภายใน (intensity  
104 of internal load) และความเข้มของการเปลี่ยน  
105 รูป (intensity of deformation) ตามลำดับ การ  
106 ประยุกต์ใช้ทั้งสองมโนทัศน์ในการออกแบบ  
107 ชิ้นส่วนทางกลต้องอาศัยกฎของฮุก (Hooke's  
108 law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น  
109 กับความเครียดในช่วงยืดหยุ่น (elastic range)

110 เนื่องด้วยความเค้นเป็นปริมาณสำคัญ  
111 การสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับความเค้น  
112 จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง นักวิจัยหลายท่านที่  
113 อยู่ในศาสตร์ด้านกลศาสตร์ของแข็งและการ  
114 ออกแบบทางกลจึงได้พยายามหาแนวทางที่จะ  
115 ทำให้ผู้เรียนเข้าใจมโนทัศน์ของความเค้นให้  
116 ลึกซึ้งโดยอาศัยแนวทางการแสดงสภาพความ  
117 เค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ [5-11] โดยเฉพาะ  
118 อย่างยิ่งการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ ผล  
119 ของแนวทางข้างต้นช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจมโน  
120 ทัศน์ของความเค้นเพิ่มมากขึ้น

121 บทความฉบับนี้นำเสนอการแสดงผลภาพ  
122 ความเค้นด้วยรอยแตกกร้าวที่สามารถสังเกตเห็น  
123 ด้วยสายตาผ่านการออกแบบ สร้าง และทดสอบ  
124 เครื่องต้นแบบแสดงผลภาพความเค้นซึ่งภาพความ

125 เค้นที่ได้จะสัมพันธ์และเชื่อมโยงกับหลักการ  
126 สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางกลซึ่ง  
127 ไม่ได้ระบุความสัมพันธ์ไว้ให้เห็นได้ชัดเจน [5-  
128 11] การสร้างและออกแบบอาศัยแนวทางเดิมที่  
129 ได้เคยนำเสนอไว้แล้ว [12] อย่างไรก็ตามใน  
130 บทความฉบับนี้ผู้วิจัยสนใจทั้งการดึง (tension)  
131 และดัด (bending)  
132

133 2. มโนทัศน์ของความเค้น

134 2.1 มโนทัศน์สำคัญ

135 เราสามารถแสดงความเค้นอย่างง่ายหรือ  
136 ความเค้นฉากเฉลี่ย (average normal stress)  
137 เป็นสมการได้โดยอาศัยวิธีการตัดส่วน (section)  
138 และหลักการสมดุลแรง (equilibrium) เนื่องจาก  
139 เสถียรภาพสมดุลสถิต (static stability) ได้ดังนี้  
140 (รูปที่ 1)

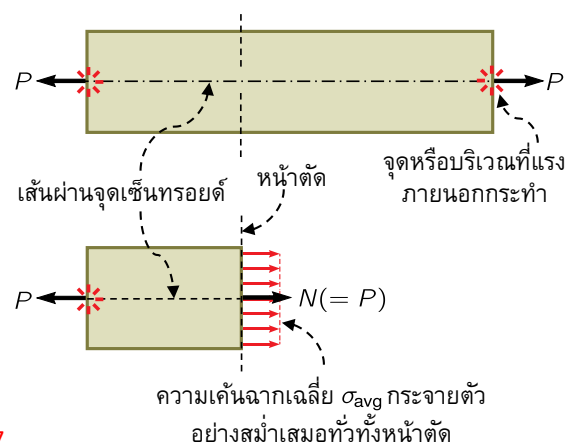
141

142 
$$\sigma_{avg} = \frac{N}{A} \quad (1)$$

143

144 โดยที่  $\sigma_{avg}$  คือ ความเค้นฉากเฉลี่ย,  $N$  คือ แรง  
145 ตั้งฉากภายในที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัด  $A$

146



147

148

149 รูปที่ 1 ภาพจินตนาการของการกระจายตัวของความ  
150 เค้นฉากแบบเอกรูปหรืออย่างสม่ำเสมอทั่วทั้ง  
151 พื้นที่หน้าตัดที่พิจารณา

152 สมมติฐานหลักในการนำสมการ (1) ไปใช้  
 153 คือ ความเค้นจะต้องมีการกระจายตัวแบบเอก  
 154 รูป (uniform distribution) หรืออย่างสม่ำเสมอ  
 155 ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด หากเราตัดส่วนใดส่วนของ  
 156 วัตถุออกมาพิจารณาแล้ว เราสามารถแทนผล  
 157 ของความเค้นนั้นด้วยแรงรวมที่มีขนาดเท่ากับ  
 158  $N (= \sigma_{avg} A)$  และ  $N = P$  (รูปที่ 1)  
 159 เงื่อนไขสำคัญของสมการ (1) ก็คือว่า  
 160 แนวแรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุจะต้องอยู่ใน  
 161 แนวเส้นผ่านจุดเซนทรอยด์ของหน้าตัด และ  
 162 ชั้นส่วนจะต้องมีเสถียรภาพสมดุลสถิตภายใต้  
 163 การกระทำของแรงภายนอกนั้น ซึ่งจะทำให้  
 164 ความเค้นกระจายตัวแบบเอกรูปได้ อย่างไรก็ตาม  
 165 ตามเงื่อนไขดังกล่าวยังไม่เพียงพอจึงต้องมี  
 166 เงื่อนไขเพิ่มเติม ดังนี้ [12]

- 167 • ชั้นส่วนจะต้องมีหน้าตัดเท่ากันตลอด
- 168 ความยาว (prismatic member)
- 169 • ชั้นส่วนทำจากวัสดุเอกพันธ์หรือมีเนื้อ
- 170 เดียวกัน (homogeneous material)
- 171 • หน้าตัดที่พิจารณาจะต้องอยู่ห่างจาก
- 172 จุดที่แรงกระทำ จุดรองรับ และบริเวณ
- 173 ที่ไม่ต่อเนื่องหรือที่มีการเปลี่ยนแปลง
- 174 พื้นที่หน้าตัดอย่างทันทีทันใด

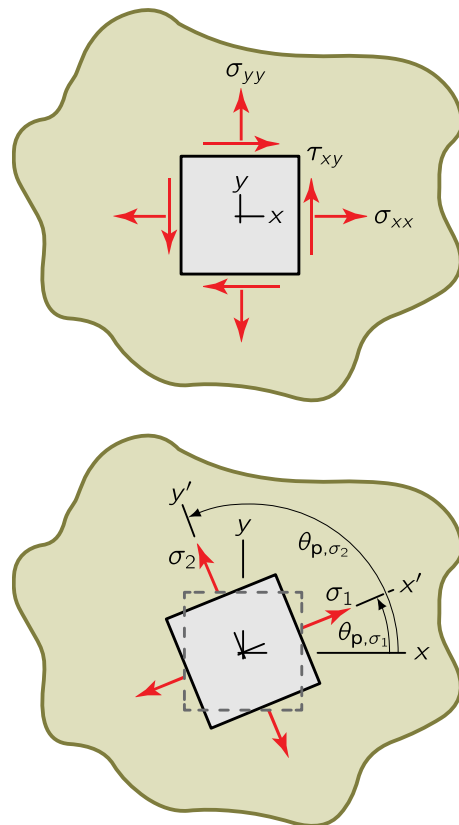
175 จากเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้น เราสรุป  
 176 ได้ว่า หากนำสมการ (1) ไปใช้กับสภาพที่ส่งผล  
 177 ให้เงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งไม่เป็นจริงแล้ว ก็  
 178 ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในค่าความเค้นที่  
 179 คำนวณได้ และส่งผลต่อการออกแบบชิ้นส่วน  
 180 ทางกลเนื่องจากความเค้นเป็นพารามิเตอร์ใน  
 181 การออกแบบเพื่อความต้านแรง

182

183 **3. ความเค้นหลักกับรอยแตกร้าว**

184 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุในรูปแบบ  
 185 รอยแตกร้าวจะขึ้นกับค่าความเค้นหลักและ

186 ทิศทาง (principal stresses and directions) ใน  
 187 กรณีปัญหาความเค้นระนาบ ค่าความเค้นหลัก  
 188 และทิศทางสามารถกำหนดได้โดยความสัมพันธ์  
 189 ดังแสดงในรูปที่ 2  
 190



**ขนาด** 
$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

**ทิศทาง** 
$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}$$

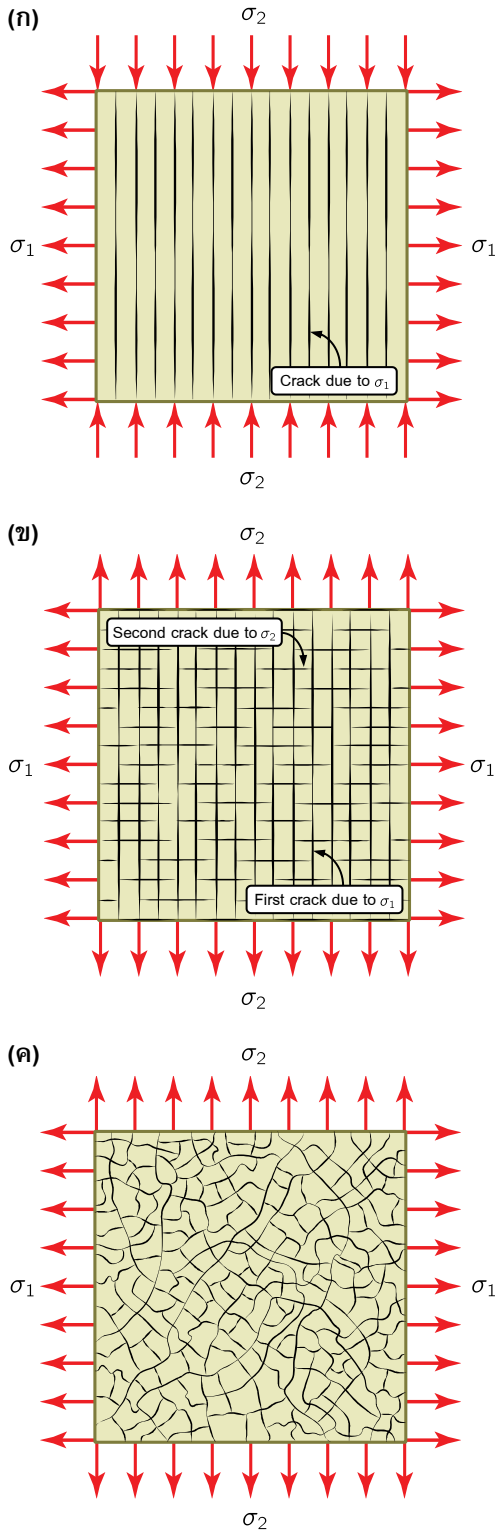
►  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  คือ ความเค้นหลัก ( $\sigma_1 \geq \sigma_2$ )  
 $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  และ  $\tau_{xy}$  คือ องค์ประกอบความเค้น  
 ในแกนอ้างอิง  $x - y$   
 $\theta_p$  คือ มุมที่แสดงทิศทางความเค้นหลัก  
 เทียบกับแกน  $x$  โดยวัดในทิศทาง  
 ทวนเข็มนาฬิกา

191

192

193 **รูปที่ 2** ความเค้นหลักหรือความเค้นค่าสูงสุดและ  
 194 ทิศทางสำหรับสภาพปัญหาความเค้นระนาบ

195	เนื่องด้วยทิศทางความเค้นหลักมีสมการ	229	• $\sigma_1 > 0$ และ $\sigma_2 > 0$ : ในกรณีนี้
196	อยู่ในรูปของฟังก์ชันแทนเจนต์ มุม $\theta_p$ ที่ได้จะมี	230	สภาวะความเค้นจะเป็นแบบดึงสอง
197	สองค่าตามจำนวนความเค้นหลัก ดังนั้นด้วย	231	แนวแกน (biaxial tensile stress) รอย
198	สมการข้างต้นเพียงสมการเดียว การระบุว่ามุม	232	แตกร้าวจะเกิดขึ้นสองรูปแบบโดย
199	$\theta_p$ ค่าใดจะแสดงทิศทางหลักของ $\sigma_1$ ( $\theta_{p,\sigma_1}$ )	233	รูปแบบแรกจะตั้งฉากกับทิศทางของ
200	หรือ $\sigma_2$ ( $\theta_{p,\sigma_2}$ ) จึงเป็นเรื่องที่ยากพอควร แนว	234	$\sigma_1$ (หรือขนานกับทิศทางของ $\sigma_2$ )
201	ทางการแก้ปัญหาด้วยหลากหลายวิธีนี้ผู้เขียน	235	และรูปแบบที่สองจะเกิดขึ้นตามมา
202	ได้อธิบายโดยละเอียดไว้แล้ว [13]	236	โดยจะตั้งฉากกับทิศทางของ $\sigma_2$ (หรือ
203	เนื่องจากความเค้นหลักทั้งสองเป็นความ	237	ขนานกับทิศทางของ $\sigma_1$ ) (รูปที่ 3ข)
204	เค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ จุดหนึ่ง ๆ ในเนื้อวัสดุ	238	รูปแบบรอยแตกร้าวลักษณะนี้มักจะ
205	รอยแตกร้าวจึงแสดงถึงความเสียหายจึงเกิดขึ้น	239	เกิดขึ้น กับภาชนะทรงกระบอกที่รับ
206	เมื่อขนาดของความเค้นหลักมีค่าสูงกว่าความ	240	ความดันภายในจำพวกท่อหรือถัง
207	ต้านแรงของวัสดุ และจะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับ	241	• $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ : ในกรณีนี้รอยแตกร้าวจะ
208	ทิศทางความเค้นหลัก $\sigma_1$ หรือ $\sigma_2$ ซึ่งเป็นไป	242	จะเกิดขึ้นแบบสุ่มและสภาวะความ
209	ตามทฤษฎีทำนายความเสียหายทฤษฎีหนึ่งคือ	243	เค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดหนึ่ง ๆ จะเรียกว่า
210	ทฤษฎีความเค้นฉากสูงสุด (Maximum Normal	244	ไอโซโทรปิก (isotropic) กล่าวคือ ณ
211	Stress Theory - MNST) [1-4]	245	จุดนี้ ทุก ๆ ทิศทางจะเป็นทิศทางหลัก
212	หากพิจารณาวิธีการหนึ่งในการวิเคราะห์	246	[15] สภาพนี้ทำให้ไม่สามารถระบุทิศ
213	ความเค้นเชิงทดลองที่อาศัยหลักการใน MNST	247	ทางการแตกร้าวจได้ และหากพิจารณา
214	คือ วิธีผิวเคลือบเปราะ (brittle coating) [14] วิธี	248	รูปที่ 3ค ลงไปในรายละเอียดก็จะเห็น
215	นี้มีหลักการว่า เมื่อใช้วัสดุหนึ่งเคลือบลงบนผิว	249	ว่า แนวเส้นรอยแตกร้าวจุ่หนึ่ง ๆ ณ
216	ของอีกวัสดุหนึ่งหรือชิ้นทดลองที่สนใจและนำ	250	จุดหนึ่ง ๆ ที่ตัดกัน (intersection) จะ
217	ชิ้นทดลองนั้นไปรับการดัดโดยเฉพาะการดัด ผิว	251	มีทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และ
218	ที่เคลือบไว้ก็จะเกิดการแตกร้าวจขึ้นตามค่าของ	252	การตั้งฉากกันนี้เป็นไปตามทฤษฎีซึ่ง
219	ความเครียดซึ่งสัมพันธ์กับสภาวะความเค้นที่	253	ทำนายได้ด้วยสมการทิศทางของ
220	เกิดขึ้นภายในชิ้นทดลอง ความเค้นที่เกิดขึ้นใน	254	ความเค้นหลัก (รูปที่ 2)
221	ผิวเคลือบหาได้จากความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้น	255	• $\sigma_2 < \sigma_1 < 0$ : ในกรณีนี้สภาวะความ
222	ทดลอง [15-17] รูปแบบรอยแตกร้าวจที่เกิดขึ้นใน	256	เค้นจะเป็นแบบอัดตัวสองแนวแกน
223	ผิวเคลือบแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี	257	(biaxial compressive stress) และ
224	• $\sigma_1 > 0$ และ $\sigma_2 < 0$ : ในกรณีนี้รอย	258	รอยแตกร้าวจจะไม่ปรากฏให้เห็นชัด
225	แตกร้าวจะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวโดย	259	อย่างไรก็ตามหากขนาดของความเค้น
226	รอยแตกร้าวจที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับ	260	กดหรืออัดหลักมีค่ามากพอก็จะทำให้
227	ทิศทางของ $\sigma_1$ หรือขนานกับทิศทาง	261	บริเวณผิวเคลือบแยกตัวหรือหลุดออก
228	ของ $\sigma_2$ (รูปที่ 3ก และ 4 กรณีเก่า)	262	(peel off) จากผิววัสดุ



263  
264

265 รูปที่ 3 รูปแบบรอยแตกร้าวที่สอดคล้องกับขนาดและ  
266 ทิศทางของความเค้นหลัก: (ก)  $\sigma_1 > 0$  และ  
267  $\sigma_2 < 0$  (ข)  $\sigma_1 > 0$  และ  $\sigma_2 > 0$  และ (ค)  
268  $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$  โดยที่กรณีนี้ 4 รอยแตกร้าวจะ  
269 ไม่ปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจน

270 ในชีวิตประจำวัน เราจะพบเห็นสภาพรอย  
271 แตกร้าวในกรณีที่ 1 และ 3 ได้อย่างชัดเจน รูปที่  
272 4 แสดงรอยแตกร้าวในผิวพลาสติกที่ใช้ทำเก้าอี้  
273 และในผิวคอนกรีตฝาท่อระบายน้ำและผิว  
274 กระจาดต้นไม้ที่ทำจากเซรามิก ตามลำดับ รอย  
275 แตกร้าวที่เห็นทั้งหมดเหล่านี้มีชื่อเรียกว่า วิถี  
276 ความเค้นหลัก (principal stress trajectories)  
277 ซึ่งแสดงภาพการแปรเปลี่ยนของทิศทางความ  
278 เค้นหลัก (หรือการไหลของความเค้น) ทั่วทั้ง  
279 พื้นผิววัตถุโดยที่บนวิถีความเค้นหลักเส้นหนึ่ง  
280 ๆ ความเค้นหลักจะมีขนาดคงตัว

281 สำหรับตัวอย่างแนวทางการกำหนดวิถี  
282 ความเค้นหลักทางทฤษฎีของปัญหารูปแบบต่าง  
283 ๆ และแผ่นจานกลมรับแรงเข้มกตามแนวเส้น  
284 ผ่านศูนย์กลาง (diametral disc problem) ผู้อ่าน  
285 สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในงานอื่นใด [18-22]  
286 ส่วนรูปแบบที่ 4 นั้นเราค่อนข้างจะพบเห็นได้  
287 ยากหรือไม่มากนักในชีวิตประจำวัน

288

289 <รูปที่ 4 อาจปรากฏตรงนี้>

290

## 291 4. ความเค้นเนื่องจากการดึงและการดัด

### 292 4.1 ความเค้นเนื่องจากการดึง

293 พิจารณารูปที่ 1 และสมการ (1) อีกครั้ง  
294 โดยกำหนดให้แกนตามแนวยาวของชิ้นทดลอง  
295 เป็นแกน  $x$  และให้สภาพปัญหาเป็นแบบปัญหา  
296 ความเค้นระนาบ (plane stress problem) เรา  
297 จะได้ว่า

298

$$299 \sigma_{xx} = \sigma_{avg} = \frac{N}{A} \quad (2)$$

300

301 เมื่อเป็นปัญหาระนาบ  $\epsilon_{xx} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu\sigma_{yy})$   
302 โดยที่  $\epsilon_{xx}$  คือ ความเครียดฉากในแนวแกน  $x$ ,  
303  $\sigma_{yy} (= 0)$  คือ ความเค้นฉากในแนวแกน  $y$ ,  $E$

304 คือ ค่ายังสัมมอดูลัสของวัสดุที่ใช้ทำชั้นทดลอง  
 305 และ  $\nu$  คือค่าอัตราส่วนปัวซองของ สมการ (2) ใน  
 306 รูปของความเครียด คือ

307

308 
$$\epsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} \quad (3)$$

309

310 ความเครียดในสมการ (3) เป็นความเครียดจาก  
 311 ในเนื้อวัสดุของชั้นทดลองซึ่งเหนียวทำให้เกิด  
 312 ความเครียดมากขึ้นในผิวเคลือบและมีค่าเท่ากัน  
 313 ทั้งนี้ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่า การเคลือบยึดติด  
 314 แน่นเหมือนผิวเคลือบเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุชั้น  
 315 ทดลอง [15-17] ความเครียดจากค่าต่ำสุดที่จะ  
 316 ทำให้ผิวเคลือบเริ่มแยกตัวออกจากกันหรือเกิด  
 317 รอยแตกร้าวขึ้นมีชื่อว่า ความเครียดเทอร์สโอสต์  
 318 (threshold strain)

319 **4.2 ความเค้นเนื่องจากการดัด**

320 พิจารณา **รูปที่ 5** ซึ่งแสดงคานปลายยื่น  
 321 หากกำหนดให้เป็นปัญหาความเค้นระนาบ  
 322 ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีคานพื้นฐาน  
 323 (the elementary beam theory) ณ ผิวด้านบน  
 324 ของคาน ( $c = \frac{h}{2}$ ) หาได้จาก  $\sigma_{xx} = -\frac{My}{I}$  โดย  
 325 ที่  $y = c$  ซึ่งก็คือ

326

327 
$$\sigma_{xx} = \frac{6P(L-x)}{bh^2} \quad (4)$$

328

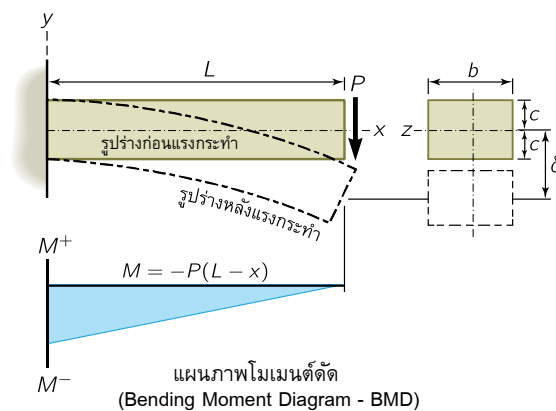
329 ทั้งนี้  $y$  คือ ระยะใด ๆ ที่วัดจากแกนที่กึ่งกลาง  
 330 คานซึ่งเรียกว่า แกนสะเทิน (neutral axis) ถึง  
 331 ผิวบนสุดของคาน,  $h (= 2c)$  คือ ความสูงของ  
 332 คาน,  $b$  คือ ความกว้างหรือความลึกของคาน  
 333 และ  $I (= \frac{bh^3}{12})$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงพื้นที่  
 334 ของหน้าตัดที่พิจารณารอบแกน  $z$

335 เครื่องหมายซึ่งแสดงทิศทางของ  $\sigma_{xx}$  จะ  
 336 ขึ้นกับเครื่องหมายของโมเมนต์ดัด  $M$  และระยะ  
 337  $\pm c$  ตามแนวแกน  $y$  ซึ่งจากสมการ (4)  $\sigma_{xx}$  จะ

338 มีเครื่องหมายบวก (ความเค้นดึง) ขณะที่ผิว

339 ด้านล่างความเค้นจะมีค่าเป็นลบ (ความเค้นอัด)

340



341

342

343 **รูปที่ 5** คานปลายยื่นรับแรงกด  $P$  ที่ปลายด้านหนึ่งซึ่ง

344 ทำให้เกิดระยะโก่ง  $\delta$

345

346 จากความสัมพันธ์ในปัญหาความเค้น

347 ระนาบ ความเครียดที่ผิวบนสุดด้านบนของ

348 คาน คือ

349

350 
$$\epsilon_{xx} = \frac{6P(L-x)}{Ebh^2} \quad (5)$$

351

352 จากการศึกษารูปการโก่งของคาน

353 (beam deflection) ระยะโก่งที่ปลายด้านหนึ่งซึ่ง

354 มีแรง  $P$  กระทำ คือ

355

356 
$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{4PL^3}{Eb^3} \quad (6)$$

357

358 โดยที่  $\delta$  คือ ระยะโก่งที่ปลายคานด้านที่มีแรง  $P$

359 กระทำ และ  $L$  คือ ความยาวของคาน เมื่อรวม

360 สมการ (5) และ (6) เข้าด้วยกัน ผลลัพธ์คือ

361

362 
$$\epsilon_{xx} = \frac{3h\delta}{2L^3}(L-x) \quad (7)$$

363



364 เราสามารถหาค่าความเครียด  $\epsilon_{xx}$  ณ ตำแหน่ง  
 365  $x$  ใด ๆ ที่ผิวคานได้เมื่อทราบค่าแรงกระทำ  $P$   
 366 ด้วยสมการ (5) หรือระยะโก่ง  $\delta$  ด้วยสมการ (7)  
 367 เช่นเดียวกับกรณีของความเค้นเนื่องจากภาระ  
 368 ดิ่ง ความเครียดค่าต่ำสุดที่ได้จากสมการ (5)  
 369 หรือ (7) ที่ทำให้ผิวเคลือบเริ่มแยกตัวออกจาก  
 370 กันก็คือ ความเครียดเทรสโฮลด์  
 371 เนื่องด้วยปัญหานี้เป็นปัญหาหระนาบ และ  
 372 ที่ผิวด้านบนและล่างไม่มีความเค้นเฉือนกระทำ  
 373 ดังนั้นความเค้นบนผิวด้านบนและด้านล่างจึง  
 374 กลายเป็นความเค้นหลักค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด  
 375 คือ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  ตามลำดับ และเช่นเดียวกัน  
 376 ความเครียดที่ได้จากสมการ (5) หรือ (7) ก็จะมี  
 377 เป็นความเครียดหลักค่าสูงสุด คือ  $\epsilon_1 = \epsilon_{xx}$

### 379 5. เครื่องแสดงความเค้นและผลการทดสอบ

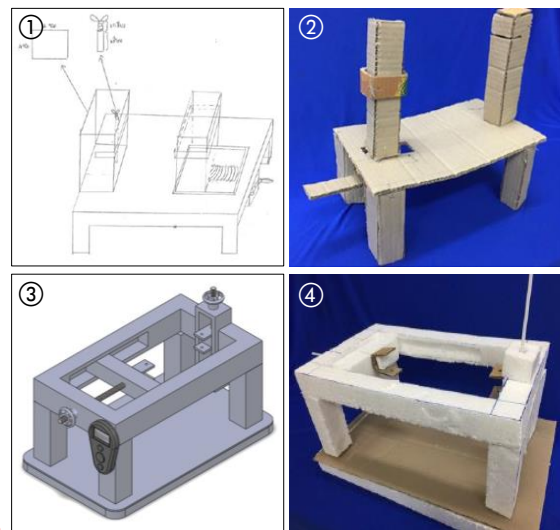
#### 380 5.1 การออกแบบ

381 ผู้วิจัยได้ออกแบบแนวคิดตามลักษณะ  
 382 การรับภาระของชิ้นทดลองที่ได้กำหนดไว้แล้ว  
 383 สองลักษณะกล่าวคือ ภาระดิ่งและภาระดัดซึ่ง  
 384 ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ  
 385 และที่ผิวของวัตถุสามารถแสดงได้ด้วยสมการ  
 386 ต่าง ๆ ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2

387 รูปที่ 6 แสดงภาพแนวคิดการออกแบบ  
 388 (conceptual design) แบบจำลองทางกายภาพ  
 389 ด้วยกระดาษลูกฟูก (model design) แบบจำลอง  
 390 ด้วยคอมพิวเตอร์ (computer design) และแบบ  
 391 จำลองทางกายภาพด้วยโฟมตามขนาดที่ได้  
 392 ออกแบบไว้ด้วยคอมพิวเตอร์ (detail design)  
 393 ตามลำดับ ภาพแนวคิดการออกแบบแสดง  
 394 แนวคิดเบื้องต้นขณะที่แบบจำลองทางกายภาพ  
 395 ด้วยกระดาษลูกฟูกและโฟมทำให้เห็นสภาพ  
 396 ของเครื่องต้นแบบทั้งในมิติทางกายภาพ  
 397 รวมทั้งวิธีการที่จะใส่ภาระให้กับชิ้นทดลองทั้ง

398 แบบดิ่งและดัด ในขั้นตอนนี้ตัวแปรต่าง ๆ  
 399 สามารถถูกปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ ซึ่ง  
 400 เงื่อนไขสำคัญก็คือ มีขนาดกะทัดรัด มีน้ำหนัก  
 401 เบาซึ่งสามารถกำหนดได้ด้วยการเลือกวัสดุ ใช้  
 402 งานง่าย และเคลื่อนย้ายได้สะดวก เราจะเห็นได้  
 403 ว่าแบบจำลองทางกายภาพกับแบบแนวคิดมี  
 404 ความแตกต่างกันมากพอควร ทั้งนี้ขนาดความ  
 405 ยาวของชิ้นทดลอง [12] จะเป็นตัวกำหนดความ  
 406 ยาวของแบบจำลองทางกายภาพ ขั้นตอนต่อไปคือ  
 407 การวาดแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อความ  
 408 สะดวกในการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ การ  
 409 กำหนดวัสดุและคำนวณน้ำหนักโดยประมาณ  
 410 และการสร้าง ทั้งนี้ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจะ  
 411 ได้รับการปรับอีกครั้งตามความเหมาะสมเพื่อให้  
 412 มั่นใจว่าได้ขนาดตามที่ต้องการและสอดคล้อง  
 413 กับเงื่อนไขข้างต้น

414



415

416

417 รูปที่ 6 ภาพร่างหรือแนวคิดการออกแบบ แบบจำลอง  
 418 ทางกายภาพด้วยกระดาษลูกฟูกเพื่อให้เห็นสภาพ  
 419 จริงของแนวคิดซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้  
 420 แบบจำลองที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ และ  
 421 แบบจำลองทางกายภาพด้วยโฟมตามขนาด  
 422 จริงที่ออกแบบไว้ด้วยคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ  
 423 หมายเลข



424 5.2 การสร้าง

425 เมื่อได้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้ว  
426 ชั้นถัดไปก็คือการสร้างตามแบบที่ได้กำหนดไว้  
427 (รูปที่ 6) เพื่อให้เครื่องมีน้ำหนักเบาและแข็งแรง  
428 เพียงพอในการตั้งชั้นทดลองที่ทำจากพลาสติก  
429 อะคริลิกใส วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างคือ อะลูมิเนียม  
430 ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกโดยอาศัยแนวทางในหนังสือ  
431 ของ Ashby [23]

432 รูปที่ 7 แสดงการสร้างเครื่องและสภาพ  
433 เครื่องที่สร้างเสร็จแล้วโดยมีขนาดรวมสูง 190  
434 mm ยาว 450 mm และกว้าง 250 mm ฐานรอง  
435 ทำจากอะลูมิเนียมขนาดยาว 500 mm กว้าง 300  
436 mm และหนา 6 mm พร้อมโครงกรอบที่ทำด้วย  
437 พลาสติกใสเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของสี  
438 แล็กเกอร์สีขณะพ่น อุปกรณ์วัดแรงแบบดิจิทัล  
439 (digital force gauge) ราคาประหยัด และวัสดุ  
440 อื่นเพื่อใช้ในการทดลองซึ่งประกอบด้วยชั้น  
441 ทดลองพลาสติก สีสเปรย์ แล็กเกอร์สีแบบ  
442 กระจ่างพ่นยี่ห้อ Leyland เบอร์ C-75 หน้ากาก  
443 ป้องกันละอองสี ถุงมือ และผ้าเช็ดทำความสะอาด  
444 สะอาด

445 รูปที่ 8 แสดงรูปทรงและขนาดของชั้น  
446 ทดลอง และที่ถูกทำขึ้นตามมาตรฐาน ASTM  
447 D638 Type 3 จากอะคริลิกใส (PMMA) ยี่ห้อ  
448 Moden Glas ซึ่งหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป

449 5.3 การทดสอบ

450 หลังจากสร้างเครื่องเสร็จแล้ว ผู้วิจัยได้  
451 ทดสอบการทำงานโดยใช้ตั้งและตัดชั้นทดลอง  
452 ทั้งสามลักษณะ ขั้นตอนการทดสอบโดยย่อเป็น  
453 ดังนี้

454 1) นำชั้นทดลองใส่เข้ากับตัวเครื่องตาม  
455 ลักษณะของการใส่ภาระ ในกรณีการ  
456 ตั้งจะต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงตั้งเข้า  
457 ไปด้วย (รูปที่ 9)

458 2) ชั้นตัวหมุนตั้งออกเพื่อสร้างแรงตั้งใน  
459 ชั้นทดลองด้วยแรงค่าหนึ่งหากเป็น  
460 การตั้ง หรือชั้นตัวหมุนกดเพื่อสร้าง  
461 ระยะเวลาค่าหนึ่งที่ปลายชั้นทดลองด้า  
462 หนึ่งหากเป็นการตัด (ตารางที่ 1)  
463 3) ครอบตัวเครื่องด้วยโครงกรอบและ  
464 ฟันแล็กเกอร์สีลงบนชั้นทดลองไป-  
465 กลับโดยให้หัวพ่นมีระยะห่างจากชั้น  
466 ทดลองประมาณ 10 cm ทั้งนี้ควรพ่น  
467 ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 25°C  
468 พร้อมใส่หน้ากากป้องกัน  
469 4) รอแล็กเกอร์สีแห้งประมาณ 3 นาที  
470 เพื่อให้เกิดรอยแตกร้าขึ้น จากนั้น  
471 นำชั้นทดลองออกจากตัวเครื่อง  
472



473  
474 รูปที่ 7 การสร้างเครื่องและเครื่องที่ทำเสร็จแล้วพร้อม  
475 ทั้งอุปกรณ์และวัสดุต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและ  
476 จำเป็นต่อการทดลอง  
477

478

479 <รูปที่ 8 อาจปรากฏตรงนี้>

480

481 สำหรับการตัด ระยะโคงที่ปลายชั้นทดลอง

482 แบบ B ในตารางที่ 1 จะเป็นตัวกำหนดแรงกด

483  $P$  ที่ปลายคานตามสมการ (6) คือ  $P = \frac{3EI}{L^3} \delta$

484 โดยกำหนดให้ยังสัมมอดูลัส  $E$  มีค่าประมาณ

485 3.02 GPa [23] และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิง

486 พื้นที่  $I$  จะได้มาจากการคำนวณ ณ หน้าตัดที่

487 อยู่ใกล้จุดยึดแน่น นอกจากนี้แรงดึงในตารางที่

488 1 จะมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของแรงดึงที่ได้มา

489 จากการทดลองในเบื้องต้นที่ทำให้ชั้นทดลอง

490 เสียหายหรือขาดออกจากกัน

491

492 ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองแบบดึงและตัดโดย

493 ลำดับตามรูปแบบชั้นทดลอง (รูปที่ 8)

ชั้นทดลอง	รูปแบบการทดลอง	
	การดึง (N)	การตัดโดยการโคง (mm)*
A	350	-
B	400	60
C	350	-

494 \*ระยะโคง  $\delta$  ใช้กำหนดเพื่อหาค่าแรงกด  $P$  ตามสมการ (6) คือ

495  $P = \frac{3EI}{L^3} \delta$  ซึ่งจะใช้หาค่าความเค้นและความเครียดที่ผิวต่อไป

496 ตามสมการ (4) และสมการ (5) หรือ (7)

497

### 498 6. ผลการทดลองและการอภิปราย

499 หลังจากทดลองตามขั้นตอนที่ระบุไว้ใน

500 ข้อ 4.3 โดยอาศัยข้อมูลต่าง ๆ ในตารางที่ 1

501 แล้ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นรอยแตกร้าวดัง

502 รูปที่ 10

503 ผู้อ่านพึงระลึกว่า รอยแตกร้าวดังเกิดขึ้น

504 เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแล็กเกอร์

505 กับชั้นทดลองภายใต้ความเค้นดึง ซึ่งคล้ายคลึง

506 กันมากกับหลักการวิเคราะห์ความเครียดด้วย

507 วิธีผิวเคลือบเปราะ แม้ว่าการเกิดรอยแตกร้าวดัง

508 จะมีที่มาต่างกัน แต่รูปแบบของรอยแตกร้าวดัง

509 (crack pattern) ที่ใช้เพื่ออธิบายความเค้นและ

510 ความเครียดไม่แตกต่างกัน

511



512

513

514 รูปที่ 9 การทดลองแบบดึงและตัดโดยอาศัยระยะโคงที่

515 ปลายของชั้นทดลองด้านหนึ่ง

516

517 พิจารณารอยแตกร้าวดังในชั้นทดลอง A

518 (ภาระดึง 350 N) เราจะพบว่ารอยแตกร้าวดังจะ

519 เกิดขึ้นถี่มาก ๆ จนเห็นได้อย่างชัดเจนบริเวณ

520 ใกล้ขอบรูปกลม รอยแตกร้าวดังที่เกิดขึ้นสอดคล้อง

521 กับหลักการของเซนต์วีแนนท์ (Saint Venant's

522 principle) ที่กล่าวไว้ว่า [1,24-28]

523

524 “การกระจายตัวของความเค้น ณ

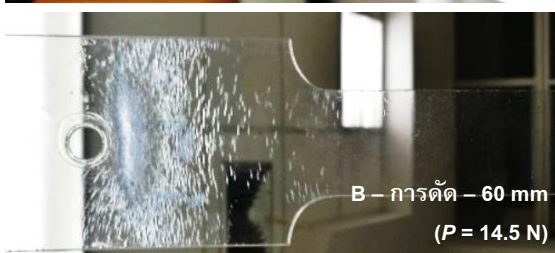
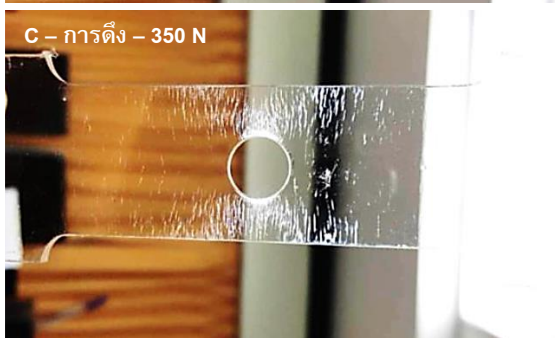
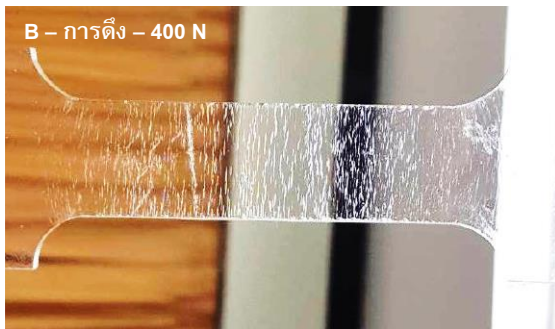
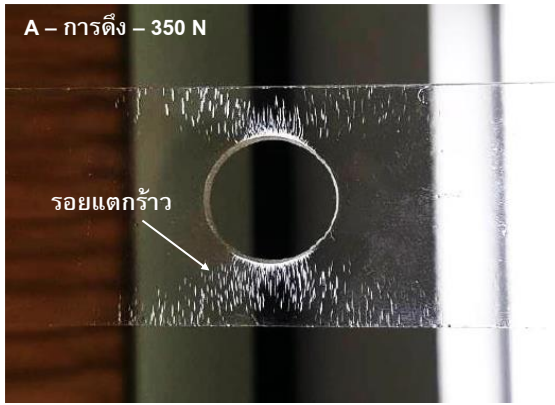
525 ตำแหน่งหนึ่งที่มีระยะห่างเพียงพอจากจุด

526 กระทำ หรือบริเวณที่มีแรงหรือระบบแรงหนึ่ง ๆ

527 ของหน้าตัดของวัตถุ จะไม่ขึ้นกับลักษณะ

528 ของระบบแรงหากแต่จะขึ้นกับผลลัพธ์ของ

529 ระบบแรงเท่านั้น”



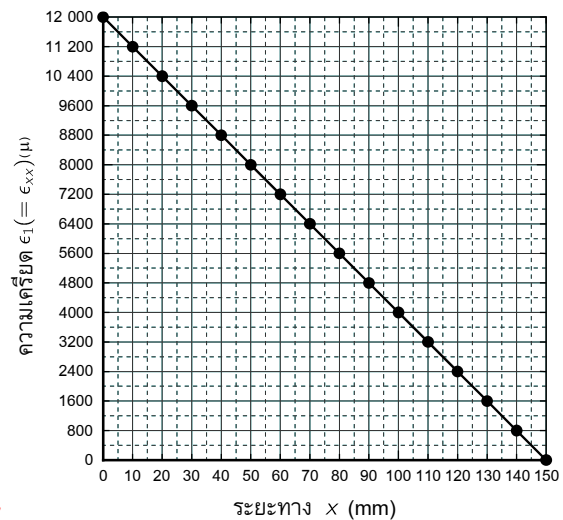
530  
531  
532 **รูปที่ 10** ลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในชิ้นทดลอง A  
533 B และ C ตามลำดับ ทั้งแบบภาระดึง (สามรูป  
534 บน) และภาระตัดโดยแรงกด  $P = 14.5 \text{ N}$  ที่  
535 ปลายชิ้นทดลอง B ซึ่งคำนวณได้จากสมการ  
536 (6) เมื่อ  $\delta = 60 \text{ mm}$  (รูปล่าง)  
537  
538 และทฤษฎีสภาพยืดหยุ่น (theory of elasticity)  
539 และหลักการความหนาแน่นของความเค้น  
540 (stress concentration) ที่ว่า [1,24-29]

541 “ความเค้น ณ บริเวณที่ใกล้เคียงกับ  
542 จุดที่แรงกระทำหรือบริเวณที่เปลี่ยนแปลง  
543 หน้าตัดอย่างกะทันหัน (abrupt change of  
544 cross-sectional areas) จะมีค่าสูงมากกว่า  
545 ความเค้นฉากเฉลี่ย  $\sigma_{avg}$ ”  
546 ซึ่งยืนยันโดยความหนาแน่นของรอยแตกร้าวที่  
547 บริเวณขอบรูกลมด้านบนและด้านล่าง  
548 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เราได้เข้าใจ  
549 ความหมายของค่าตัวประกอบความหนาแน่น  
550 ของความเค้น ( $k$ ) มากขึ้นในกรณีที่ไม่สามารถ  
551 ใช้สมการ (1) ได้ กล่าวคือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้น  
552 ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัดอย่าง  
553 ทันทีทันใด คือ  $\sigma = k\sigma_{avg}$  ในกรณีชิ้นงานที่มีรู  
554 กลมตรงกลางนั้น  $k = 3$  หรือกล่าวได้ว่า ความ  
555 เค้นที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าเป็นสามเท่าของความ  
556 เค้นฉากเฉลี่ย (ความหนาแน่นของรอยแตกร้าว)  
557 ทั้งนี้หลักการทั้งสองมีความสำคัญอย่างยิ่งใน  
558 การออกแบบชิ้นส่วนทางกล [1-4]  
559 พิจารณารอยแตกร้าวอีกครั้ง ณ บริเวณ  
560 ใกล้รูกลมตรงกลางทางด้านซ้ายหรือขวาโดย  
561 เน้นลักษณะความต่อเนื่องของรอยแตกร้าว เรา  
562 จะพบว่า รอยแตกร้าวจะเริ่มจากขอบนอกของ  
563 ชิ้นทดลองและตั้งฉากกับขอบนั้น และโค้งเข้า  
564 หายขอบของรูกลมและก็ตั้งฉากกับขอบโค้ง  
565 เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับกรณีที่ 1  
566  $\sigma_1 > 0$  และ  $\sigma_2 < 0$  ในหัวข้อที่ 3 หรือ**รูปที่ 3ก**  
567 ที่ว่ารอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นโดยมีทิศทางตั้งฉาก  
568 กับทิศทางของ  $\sigma_1$  หรือขนานกับทิศทางของ  $\sigma_2$   
569 ดังนั้นรอยแตกร้าวที่เชื่อมระหว่างขอบนอกของ  
570 ชิ้นทดลองกับขอบโค้งของรูกลมตรงกลางจึง  
571 เป็นวิถีความเค้นหลัก  $\sigma_2$  เนื่องด้วยทิศทางของ  
572  $\sigma_1$  จะขนานกับทิศทางการดึง (**รูปที่ 9**) และการ  
573 โค้งของรอยแตกร้าวก็คือข้อพิสูจน์ของการตั้ง  
574 ฉากซึ่งกันและกันของทิศทางของความเค้นหลัก  
575 (**รูปที่ 2**) เราสามารถมองเห็นความโค้งของรอย



576 แตร้าวนี้ไต้เช่นเตียวกัน ณ บริเวณการตกป่า  
 577 (fillet) ในชั้นทดลอง B ที่รับภาระตั้งซึ่งเหตุผล  
 578 ในการอธิบายก็เป็เหตุผลเตียวกับที่อธิบาย  
 579 ความโค้งของรอยแตร้าวบริเวณขอบของรูกกลม  
 580 หากชั้นทดลองไม่มีรูกกลมหรือความไม  
 581 ต่อเนื่องของหน้าตัดอย่างทันทีทันใด วิถีความ  
 582 เค้นหลัก  $\sigma_2$  ก็จะเป็นเส้นตรง รูปรอยแตร้าวใน  
 583 ชั้นทดลอง B ที่รับภาระตั้ง 400 N เป็นข้อพิสูจน์  
 584 คำกล่าวนี้ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (1) ที่ว่าการ  
 585 กระจายตัวของความเค้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ  
 586 ทั่วหน้าตัด (รูปที่ 1)  
 587 ชั้นทดลอง C ซึ่งรับภาระตั้ง 350 N คือ  
 588 สภาพที่ผสมกันระหว่างชั้นทดลอง A และ B  
 589 ด้วยเหตุนี้รอยแตร้าวที่เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณ  
 590 มากกว่าและมีอาณาบริเวณกว้างขวางกว่ารอย  
 591 แตร้าวในชั้นทดลอง A  
 592 ในกรณีของชั้นทดลอง B ที่รับภาระตัด  
 593 โดยระยะโก่ง 60 mm เราจะพบว่า รอยแตร้าว  
 594 จะเกิดอย่างชัดเจน ณ บริเวณใกล้กับจุดยึดแน่น  
 595 (fixed end) และสภาพรอยแตร้าวจะค่อนข้าง  
 596 บั้นป่วน (irregularity) จนไม่สามารถระบุรูปแบบ  
 597 ได้ [27-28] (รูปที่ 3ค) นอกจากนี้เราจะยังเห็น  
 598 ความโค้งของรอยแตร้าวบริเวณตกป่าอย่าง  
 599 ชัดเจน และถัดจากนั้นไปก็จะมีรอยแตร้าว  
 600 เกิดขึ้นให้เห็น ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่า  
 601 ความเครียดที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดรอยแตร้าว  
 602 (หรือความเครียดเทรสโฮลด์) จะอยู่ที่ระยะ  $x$   
 603 ประมาณ 30 mm โดยวัดจากขอบของแท่นยึด  
 604 ชั้นทดลอง (รูปที่ 8 และ 9) ซึ่งมีค่าประมาณ  
 605 9600  $\mu$  ตามสมการ (7) (รูปที่ 11)  
 606 เนื่องด้วยเป้าหมายสำคัญของงานนี้คือ  
 607 การสร้างเครื่องและทดสอบเพื่อให้เห็นภาพ  
 608 ความเค้นและความเครียดในเชิงประจักษ์ ดังนั้น  
 609 ค่าเชิงตัวเลขใด ๆ ก็ตามจึงยังไม่สามารถนำไป

610 คำนวณได้เนื่องด้วยในการใช้งานในด้านการ  
 611 วิเคราะห์ความเค้นด้วยการทดลองจำเป็นต้องมี  
 612 การสอบเทียบ อย่างไรก็ตามภาพรอยแตร้าวที่  
 613 เกิดขึ้นช่วยทำให้เห็นความหมายของความเค้น  
 614 ความเครียด ความสัมพันธ์ระหว่างกัน และ  
 615 หลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ชัดเจนยิ่งขึ้น  
 616



617  
 618  
 619 รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด  $\epsilon_{xx}$  กับ  
 620 ระยะทางในแนวแกน  $x$  ตามสมการ (7)  
 621  
 622 นอกจากนี้ เราจะเห็นได้ชัดว่ามีรอยแถบ  
 623 สีขาวขุ่นเรียวยาวตามแนวกว้างของชั้นทดลอง  
 624 ใกล้กับรูสลักเกลียวสำหรับจับยึดชั้นทดลอง (รูป  
 625 ที่ 9 และ 10) แถบนั้นเกิดขึ้นจากค่าความเค้น  
 626 และความเครียดมีค่าสูงมากซึ่งเป็นผลมาจาก  
 627 โมเมนต์ตัด ณ บริเวณนั้นมีค่าสูง (รูปที่ 5) ซึ่ง  
 628 ทำนายหรืออธิบายได้ด้วยสมการ (4) (7) (รูปที่  
 629 11) และหลักการของเซนต์วีแนนท์  
 630  
 631 7. บทสรุป และงานในอนาคต  
 632 งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ สร้าง  
 633 และทดสอบเครื่องแสดงภาพความเค้นโดย  
 634 อาศัยรูปแบบรอยแตร้าวที่เกิดขึ้นในชั้นทดลอง  
 635 พลาสติกอะคริลิกใสที่มีรูปทรงต่างกัน สภาพ

636 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเป็นไปตามหลักการใน  
637 ทฤษฎีความเค้นจากสูงสุด (MNST) และให้  
638 ความหมายทางกายภาพของมโนทัศน์ว่าด้วย  
639 ความเค้นและความเครียด และความสัมพันธ์  
640 ระหว่างกันที่ชัดเจนโดยเฉพาะความเค้นตั้งฉาก  
641 เฉลี่ย ความหนาแน่นของความเค้นเนื่องจาก  
642 การเปลี่ยนแปลงขนาดของหน้าตัดของวัตถุอย่าง  
643 ทันทีทันใด และหลักการของเซนตีวิตีแนนท์  
644 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นยังแสดงให้เห็นถึง  
645 ความสำคัญและจำเป็นของสมมติฐานที่ว่าแนว  
646 แรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุต้องผ่านเส้นที่ลาก  
647 ผ่านจุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดและเงื่อนไข  
648 เพิ่มเติม นอกจากนี้การตั้งฉากซึ่งกันและกัน  
649 ของทิศทางความเค้นหลักทั้งสองได้รับการ  
650 ยืนยันด้วยสภาพจริงของรอยแตกร้าวในวัตถุที่  
651 สามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน และเนื่อง  
652 ด้วยรอยแตกร้าวที่ปรากฏขนานกับวิถีความเค้น  
653 หลัก  $\sigma_2$  การได้มาซึ่งวิถีความเค้นหลัก  $\sigma_1$   
654 สามารถกระทำได้อย่างง่ายดายโดยอาศัยการตั้งฉาก  
655 กันของทิศทางความเค้นหลักทั้งสอง  
656 ผู้วิจัยสนใจเครื่องแสดงภาพความเค้น  
657 ด้วยรอยแตกร้าวในหลายประเด็น ดังนี้

- 658 • ปรับปรุงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์  
659 วัดแรงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น
- 660 • เพิ่มเติมการรับภาระในลักษณะอื่น  
661 อาทิ การบิด
- 662 • พัฒนาเป็นชุดทดลองในห้องทดลอง  
663 (laboratory) หรือชุดสื่อการสอนใน  
664 ชั้นเรียน (classroom teaching aid)
- 665 • ค้นหารายละเอียดอื่นใดที่สามารถ  
666 เกาะหรือยึดติดกับผิวโลหะได้ดีและ  
667 เปราะได้โดยง่ายเมื่ออยู่ภายใต้ภาระ  
668 ทั้งนี้เพื่อให้การทดลองเป็นจริงและ  
669 นำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น

## 670 กิตติกรรมประกาศ

671 บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการซึ่ง  
672 ได้รับทุนวิจัยเงินอุดหนุนจากสำนักงานคณะ  
673 กรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เลขรหัส 20562-  
674 2552A30602011 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้  
675 ด้วย

676

### 677 7. เอกสารอ้างอิง

678 1. Mott, R.L., Vavrek, E.M., and Wang,  
679 J., 2004, Machine Elements in Mechanical  
680 Design, 4<sup>th</sup> ed., Pearson, Upper Saddle  
681 River.

682 2. Bhandari, V.B., 2014, Introduction to  
683 Machine Design, 2nd ed., McGrawHill  
684 education, New Delhi.

685 3. Budynas, R.G., and Nisbett, J.K.,  
686 2015, Shigley's Mechanical Engineering  
687 Design, 10<sup>th</sup> ed., McGrawHill education,  
688 NewYork.

689 4. Ugural, A.C., 2015, Mechanical  
690 Design of Machine Components, 2<sup>nd</sup> ed.,  
691 CRC Press, Boca Raton.

692 5. Kadlowec, J., Lockette, P.V.,  
693 Constans, E., Sukumaran, B., and Cleary,  
694 D., 2002, "Hands-on Learning Tools for  
695 Engineering Mechanics," *Proceedings of the*  
696 *2002 American Society for Engineering*  
697 *Education Annual Conference & Exposition*,  
698 Montreal: [http://vision.technion.ac.il/NI/site/](http://vision.technion.ac.il/NI/site/papers/documents/lv02_33.pdf)  
699 [papers/documents/lv02\\_33.pdf](http://vision.technion.ac.il/NI/site/papers/documents/lv02_33.pdf) [2018, May  
700 11].

701 6. Shakerin, S., and Jensen, D., 2000,  
702 "Enhancement of Mechanics Education by  
703 mean of Photoelasticity and Finite Element

- 704 Method,” *International Journal of Mechanical*  
705 *Engineering Education*, 29(4), pp. 307-320.
- 706 7. Linsey, J., Talley, A., White, C.,  
707 Jensen, D., and Wood, K., 2009, “From  
708 Tootsie Rolls to Broken Bones: An  
709 Innovative Approach for Active Learning in  
710 Mechanics of Materials,” *Advances in*  
711 *Engineering Education*, 1(3), pp. 1-23.
- 712 8. Johnsen, E., Nilsen, M., Hjelseth, E.,  
713 and Merschbrock, C., 2016, “Exploring a  
714 simple visualization tool for improving  
715 conceptual understanding of classical beam  
716 theory,” *Procedia Engineering*, 164, pp. 172-  
717 179.
- 718 9. Borchert, R., Jensen, D., and Yates,  
719 D., 1999, “Development and Assessment of  
720 Hands-on and Visualization Modules for  
721 Enhancement of Learning in Mechanics,”  
722 *Proceedings of the 1999 ASEE Annual*  
723 *Conference & Exposition*, Charlotte, North  
724 Carolina: <https://peer.asee.org/7573> [2018,  
725 May 11].
- 726 10. Pinit, P., 2011, “Photoelastic  
727 Simulation towards a Study of a Simply  
728 Supported Rectangular Beam Carrying a  
729 Central Concentrated Force,” *KMUTT*  
730 *Research and Development Journal*, 34(2):  
731 89-103.
- 732 11. Sullivan, R., and Rais-Rohani, M.,  
733 2008, “Design and Application of a Beam  
734 Testing System for Experiential Learning in  
735 Mechanics of Materials,” *Advances in*  
736 *Engineering Education*, 1(4), pp. 1-19.
- 737 12. Pinit, P., Phuphundeuy, N., and  
738 Sungngam, T., 2009, “Flow of Stresses:  
739 Testing with a Simple Crack- Based  
740 Technique,” *Engineering Journal*, 1(3), pp.  
741 27-42. (in Thai)
- 742 13. Pinit, P., 2010, “Directions of  
743 Principal Stresses: Point-Wise and Full-Field  
744 Analyses through a Problem in Theory of  
745 Elasticity,” *Engineering Journal*, 2(1), pp. 1-  
746 20. (in Thai)
- 747 14. Magnaflux Corporation, 1971,  
748 Principles of Stresscoat: Brittle Coating  
749 Experimental Stress Analysis, Chicago.
- 750 15. Srinath, L.S., Raghavan, M.R.,  
751 Lingaiah, K., Gargesha, G., Pant, B., and  
752 Ramachandra, K., 1984, Experimental  
753 Stress Analysis, Tata McGraw-Hill, New  
754 Delhi.
- 755 16. Singh, S., 1996, Applied Stress  
756 Analysis, Khanna, Nai Sarak: Delhi.
- 757 17. Jindal, U.C., 2013, Experimental  
758 Stress Analysis, Pearson Education: New  
759 Delhi.
- 760 18. Kelly, D., and Elsley, M., 1995, “A  
761 Procedure for Determining Load Paths in  
762 Elastic Continua,” *Engineering Computation*,  
763 12(5): 415-424.
- 764 19. Kelly, D., and Tosh, M., 2000,  
765 “Interpreting Load Paths and Stress  
766 Trajectories in Elasticity,” *Engineering*  
767 *Computation*, 17(2): 117-135.
- 768 20. Thamm, F., 2000, “The Role of the  
769 Stress Trajectories as an Aid in the Choice  
770 of the Suitable Shape of Load-Bearing



771 Structural Elements of Engines and  
772 Structure," *Periodica Polytechnica Ser.*  
773 *Mech. Eng.*, 44(1): 171-183.

774 21. Pinit, P., 2009, "Determination of  
775 Stress Trajectories by means of Analytical  
776 Method and Digital Photoelasticity,"  
777 *Proceedings of the 8<sup>th</sup> PSU-Engineering*  
778 *Conference (PEC 7)*, Hatyai, Songkla. (in  
779 Thai)

780 22. Marhadi, K., and Venkataraman,  
781 S., 2009, "Comparison of Quantitative and  
782 Qualitative Information Provided by Different  
783 Structural Load Path Definitions,  
784 " *International Journal for Simulation and*  
785 *Multidisciplinary Design and Optimization*,  
786 3(3): 384-400.

787 23. Ashby, M.F., 2011, *Materials*  
788 *Selection in Mechanical Design*, 4<sup>th</sup> ed.,  
789 Butterworth-Heinemann: Burlington.

790

791

792

793

794

795

796

797

798

799

800

801

802

803 24. Gere, J.M. and Goodno, B.J., 2009,  
804 *Mechanics of Materials*, 7<sup>th</sup> ed., Cengage  
805 Learning, Toronto.

806 25. Vable, M., 2010, *Mechanics of*  
807 *Materials*, 2<sup>nd</sup> ed., Michigan Technological  
808 University.

809 26. Pytel, A. and Kiusalaas, J., 2012,  
810 *Mechanics of Materials*, 2<sup>nd</sup> ed., Cengage  
811 Learning, Stamford.

812 27. Ferdinand, P.B., Johnston Jr., E.R.,  
813 Dewolf, J., and Mazurek, D., 2015,  
814 *Mechanics of Materials*, 7<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill  
815 Education, New York.

816 28. Hibbeler, R.C., 2017, *Mechanics of*  
817 *Materials*, 10<sup>th</sup> ed., Pearson, Hoboken.

818 29. Murakami, Y., 2017, *Theory of*  
819 *Elasticity and Stress Concentration*, John  
820 Wiley & Sons, West Sussex.

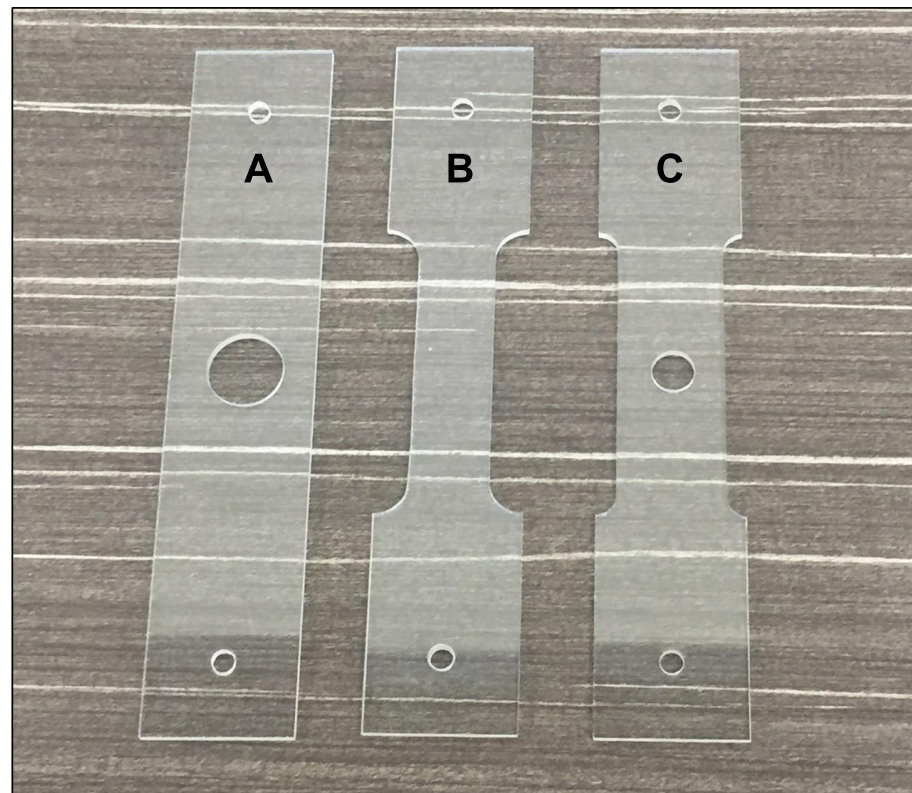
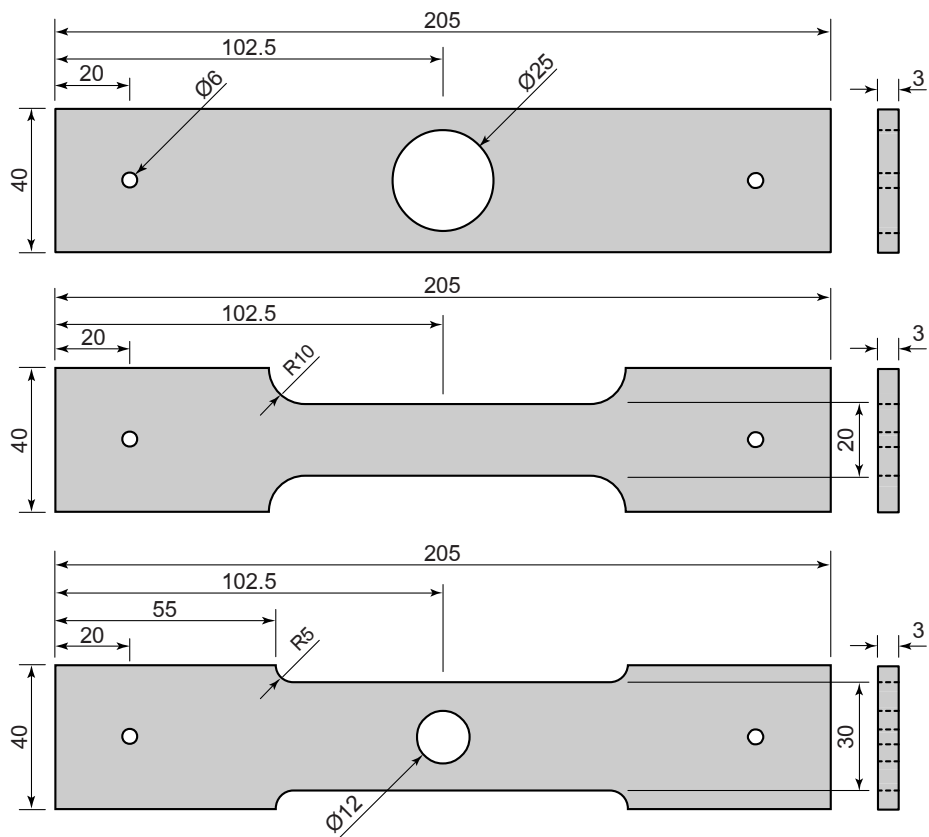
821

822



823  
824  
825

รูปที่ 4 รอยแตกร้าวตามธรรมชาติของผิวคอนกรีต ผิวเคลือบกระถางต้นไม้ และผิวของพรางตึกที่ใช้ทำเก้าอี้อื่นเนื่องจากการกระจายตัวของความเค้นทั่วทั้งผิว



826  
827  
828

รูปที่ 8 ชั้นทดลองพลาสติกที่ทำจากอะครีลิคใสซึ่งมีชื่อว่า Moden Glas และถูกสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D638 Type 3