

การหล่ออย่างง่ายและการทดสอบสมบัติทางกลและทางแสงของเรซินในประเทศ : กรณีศึกษาการใช้งานเป็นวัสดุในการทดลองด้านโฟโตอิลาสติกซิตี

ธนาภรณ์ สงวนไว¹, จักรกฤษ ครองชื่น¹ และ พิเชษฐ์ พินิจ^{2*}
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

โฟโตอิลาสติกซิตี (แบบส่องผ่าน) เป็นวิธีวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลองที่ต้องอาศัยชิ้นงานหรือชิ้นทดลองที่ทำจากวัสดุโปร่งใส เช่น อีพ็อกซีเรซิน โพลีคาร์บอเนต ฯลฯ โดยปกติวัสดุดังกล่าวมักจะถูกนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งต้องทำให้เสียค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาสมบัติของเรซินในประเทศ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทดแทนวัสดุจากต่างประเทศในการเรียนการสอนและการทดลองหรือวิจัย บทความนี้จึงนำเสนอการทดสอบสมบัติทางแสงและทางกลของตัวอย่างเรซินสองชนิด ได้แก่ เรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะราลด์ที M-1 (Araldite M -1) ซึ่งเป็นเรซินที่ใช้ในการทำต้นแบบรวดเร็ว แผ่นเรซินถูกหล่อขึ้นด้วยกระบวนการอย่างง่าย ชิ้นทดสอบถูกตัดจากแผ่นเรซินหล่อดังกล่าวโดยมีรูปทรงกระดูกสุนัข ซึ่งเป็นประเภท 3 ตามมาตรฐาน ASTM D638 และรูปทรงแผ่นจานกลมรับแรงเข้กดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อหาค่ายังสัมมอดูลัสและค่าคงตัวทางโฟโตอิลาสติกซิตี (ค่าคงตัวรีว-ความเค้นของวัสดุ และค่าดรรชนีบ่งชี้ระดับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน) ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าคงตัวรีวความเค้นของวัสดุ มีค่าสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับค่าคงตัวรีวความเค้นของวัสดุของวัสดุโพลีคาร์บอเนต (polycarbonate) และโฮโมไลท์ 911 (Homolite 911) ซึ่งเป็นวัสดุโปร่งใสที่นิยมใช้ในโฟโตอิลาสติกซิตี

คำสำคัญ : กระบวนการหล่อ / เรซินในประเทศ / โฟโตอิลาสติกซิตี

* Corresponding author : pichet.pin@kmutt.ac.th

1 นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

Simple Casting and Testing of Optical and Mechanical Properties of Domestic-Grade Resins: A Case Study of Their Use as Photoelastic Materials

Thanaporn Sanguanwai¹, Chakkrit Krongchuen¹ and Pichet Pinit^{2*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

(Transmission) photoelasticity – an experiment-based stress analysis – needs specimens made of transparent birefringent materials, e.g., epoxy resin and polycarbonate. Typically, these materials are imported from abroad. Due to their considerable price, use of domestic-grade resins, then, is of practical interest to ease student learning and photoelastic experiments or research. With these goals keeping in mind, this paper presents the results of optical and mechanical investigation on photoelastic parameters using specimens made of two different resins: 024-A and Araldite M-1 (stereolithographic-resin). Resin casting process was that of a simple route. Tests were mechanically and optically carried out on simple specimens cut out of the cast resin plates in the shape of a dog-bone (type 3 of ASTM D638) and a circular disk under diametral compression in order to evaluate their Young's modulus and to calibrate the photoelastic constants – material stress fringe value and figure of merit. The results obtained, especially the material stress fringe value, are comparable to those of polycarbonate and Homolite 911 (materials typically used in photoelasticity), allowing the use of the domestic-grade resins as photoelastic materials.

Keywords : Casting Process / Domestic-grade Resin / Photoelasticity

* Corresponding author : pichet.pin@kmutt.ac.th

¹ Undergraduate student, Department of Mechanical Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

1. บทนำ

ความเสียหาย (failure) ของชิ้นส่วนทางกลที่ใช้ในเครื่องจักรกลและโครงสร้างส่วนมากนั้นเกิดจากความเค้นขณะใช้งาน (in-service stresses) ที่มีค่าสูงเกินกว่าความสามารถวัสดุจะต้านทานไว้ได้ ด้วยเหตุนี้นักวิจัยในสาขาการวิเคราะห์ความเค้นเชิงประยุกต์ (applied stress analysis) จึงมุ่งหาวิธีการต่างๆ เพื่อใช้ทำนายค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนข้างต้นให้แม่นยำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อประโยชน์ด้านการผลิตและเศรษฐศาสตร์ [1]

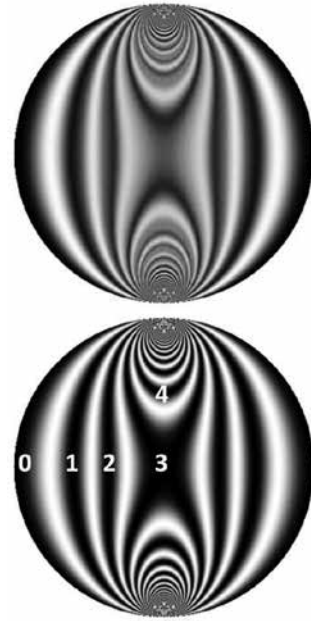
การวิเคราะห์ความเค้นเชิงประยุกต์ประกอบด้วยกลุ่มของวิธีการหลักๆ 3 กลุ่ม คือ 1) การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี 2) การวิเคราะห์เชิงตัวเลข และ 3) การวิเคราะห์เชิงทดลอง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ต่างก็เป็นส่วนเสริมซึ่งกันและกันที่จะทำให้การวิเคราะห์ความเค้นได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและถูกต้องตามต้องการ [2]

โฟโตอีลาสติกซิตี (photoelasticity) เป็นหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลองที่อาศัยหลักการหักเหของแสงที่สัมพันธ์กับความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุโปร่งใสหรือโปร่งแสงที่อยู่ภายใต้การกระทำของภาระภายนอก (external loads) [3] ลักษณะพิเศษของวิธีโฟโตอีลาสติกซิตีก็คือความสามารถที่ทำให้ผู้วิเคราะห์มองเห็นภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นและภาระภายนอกที่มากระทำได้อย่างชัดเจนหรือที่เรียกว่า “สนามความเค้น” (stress field) (รูปที่ 1) โฟโตอีลาสติกซิตีทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถประเมินตำแหน่งความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในชิ้นส่วนทางกลในเบื้องต้นได้โดยง่ายโดยไม่ต้องคำนวณหาค่าความเค้นใดๆ [4]

ด้วยลักษณะพิเศษดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ว่า เป็นเรื่องที่ไม่ยากเกินไปที่เราจะบูรณาการหรือผสมผสานวิธีโฟโตอีลาสติกซิตีเข้าไปในรายวิชาต่างๆ ทางด้านการวิเคราะห์ความเค้นทั้งในระดับอนุปริญญา ปริญญาตรี และบัณฑิตศึกษา เช่น รายวิชาการศาสตร์วัสดุ, วัสดุศาสตร์วัสดุขั้นสูง, ทฤษฎีสภาพยืดหยุ่น และการวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลอง

ภายใต้แนวคิดดังกล่าวนี้ ผู้เรียนน่าจะมีโอกาสเรียนรู้ผ่านการลงมือทำหรือปฏิบัติจริงและมองเห็นความเชื่อมโยงระหว่างสิ่งที่ได้เรียนรู้กับปรากฏการณ์ทางกายภาพซึ่งจะช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจในหลักการได้รวดเร็วยิ่งขึ้น มี

ศักยภาพที่เข้มแข็งด้านการวิเคราะห์ความเค้น และรักในการเป็นนักวิจัยในสาขานี้ต่อไป



รูปที่ 1 รังสนามความเค้นที่เกิดขึ้นในแผ่นจานกลมรับแรงเข้มกดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในห้องทดลอง [2,5] : (บน) ภาพรีวิสิ และ (ล่าง) ภาพรีวิระนาบสีเขียว (green plan) ที่ได้จากการแยกภาพรีวิสิในภาพบนโดยมีอันดับรีวิจำนวนเต็ม N กำกับไว้

โพลาริสโคป (polariscope) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ทำให้เรามองเห็นสนามความเค้น และแบ่งออกได้สองประเภทคือ แบบส่องผ่าน (transmission polariscope) และแบบสะท้อน (reflection polariscope) (การวิจัยโดยใช้แบบสะท้อนอยู่นอกเหนือขอบเขตของบทความฉบับนี้) และใช้ตัวแบบ (model) ที่ทำจากพลาสติกโปร่งใสที่มีสมบัติทางแสงและทางกลที่เหมาะสมกับการนำไปทดลอง เช่น อีพ็อกซีเรซิน โพลีคาร์บอนเนตฯ อย่างไรก็ตาม พลาสติกโปร่งใสดังกล่าวมักจะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศจึงทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมาก หากต้องการให้ผู้เรียนได้เรียนรู้ผ่านการลงมือปฏิบัติจริง

ด้วยแนวคิดและเหตุผลที่กล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะหาวัสดุเรซินราคาถูกในประเทศที่สามารถนำมาสร้างเป็นตัวแบบเพื่อใช้ในการทดลองโฟโตอีลาสติกซิตี

ได้ โดยมีคำถามการวิจัยดังนี้

1) วัสดุเรซินที่ผ่านกระบวนการหล่ออย่างง่ายมีสมบัติทางกลและทางแสงใกล้เคียงหรือแตกต่างมากน้อยเพียงใดกับวัสดุเรซินหรือวัสดุอื่นใดที่นิยมใช้ในโฟโตอิลาสติกซิตี?

2) ด้วยการพิจารณาเชิงคุณภาพแล้ว ความเค้นตกค้าง (residual stress) ในตัวแบบที่ได้จากวัสดุเรซินในข้อ 1) มีค่าในระดับใด และส่งผลต่อการนำวัสดุเรซินนั้นไปใช้งานหรือไม่?

3) วัสดุเรซินที่ผ่านกระบวนการหล่ออย่างง่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในลักษณะอื่นใดได้หรือไม่ อาทิ การหล่อตัวแบบ 3 มิติ?

2. เรซิน

ในการวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้เรซินใสสองชนิดเพื่อนำมาใช้ทดลองและตอบคำถามการวิจัยทั้งสามข้อข้างต้น กล่าวคือ

- เรซินเบอร์ 024-A : เรซินชนิดนี้มีสีใสคล้ายกระจก
- เรซินอะราลด์ M-1 (Araldite M-1) : เรซินชนิดนี้มีสีเหลืองอ่อนหรืออำพัน แต่ก็มีความใสคล้ายกระจกเช่นเดียวกับแบบแรก

เรซินทั้งสองชนิดจะมาพร้อมกับตัวผสมแข็ง (hardener) เรซินชนิดแรกนั้นหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไปและมี

ราคาถูก ส่วนเรซินชนิดที่สองนั้นเป็นเรซินที่นิยมใช้กับเครื่องทำตัวแบบรวดเร็ว (rapid prototyping machine) ซึ่งมีราคาที่สูงกว่าเรซินชนิดแรก อย่างไรก็ตามก็ยังมีราคาถูกกว่าการสั่งซื้อแผ่นเรซินหรือแผ่นโพลีคาร์บอเนตจากต่างประเทศ อีกทั้งการเลือก ใช้เรซินชนิดที่สองนี้ก็เกินไปเพื่อหาข้อมูลในการตอบคำถามการวิจัยข้อที่ 3 ที่คณะผู้วิจัยได้ให้ความสนใจในด้านการขยายขอบเขตการวิจัยจากปัญหา 2 มิติไปเป็น 3 มิติ

3. สมบัติทางแสงและทางกลของวัสดุ และชิ้นงานทดลอง

3.1 สมบัติทางแสงและทางกลของวัสดุ

สมบัติสำคัญของวัสดุที่สามารถนำมาใช้ในการทำตัวแบบนั้นมียู่ด้วยกันสองด้านคือสมบัติทางแสงและทางกล สมบัติทางแสงนั้นสามารถแสดงได้ด้วยค่าคงตัวรีฟ-ความเค้นของวัสดุ (material stress-fringe value, f_{σ}) ส่วนสมบัติทางกลนั้นแสดงได้ด้วยค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus, E) และค่าดรรชนีบ่งชี้ระดับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน (figure of merit, f_M) ตารางที่ 1 แสดงค่าคงตัว f_{σ} , E และ f_M ของวัสดุโปร่งใสชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ทดลองเพื่อการวิเคราะห์ความเค้นทางด้านโฟโตอิลาสติกซิตีได้

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุโปร่งใสที่นิยมใช้ในการทดลองโฟโตอิลาสติกซิตี ซึ่งผ่านการสอบเทียบที่อุณหภูมิห้อง [3]

Material	Young's Modulus (MPa)	Material Stress Fringe Value, f_{σ} (N/(mm·fringe))*	Figure of Merit, f_M (fringe/mm)
Polycarbonate	2,600	8	325
Epoxy	3,300	12	275
Glass	70,000	324	216
Homolite 100	3,900	26	150
Homolite 911	1,700	17	100
Plexiglas (Acrylic glass)	2,800	140	20
Polyurethane	3	0.2	15
Gelatin	0.3	0.1	3

* Material stress-fringe value corresponding to Sodium Vapor light source (589.3 nm)

ค่า f_{σ} เป็นสมบัติประจำตัวของวัสดุที่ใช้ทำตัวแบบ ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง (wave length) ของแหล่งกำเนิดแสง (light source) ที่ติดตั้งอยู่ในโพราลิสโคป และมีความหมายเชิงกายภาพที่บ่งบอกถึงระดับความยากง่าย

ในการเกิดริ้วความเค้นอันเนื่องมาจากภาวะภายนอกกล่าวคือ “หากวัสดุทางโฟโตอิลาสติกซิตีใดๆ ก็ตามมีค่าคงตัวนี้มาก ก็แสดงให้เห็นว่า เราจะต้องใช้แรงหรือภาวะภายนอกในระดับที่มากเป็นสัดส่วนกันที่จะทำให้เกิดริ้วความเค้นขึ้น

หนึ่งริ้วในชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุนั้น”

ค่า f_{σ} เป็นเพียงค่าคงตัวเดียวที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอันดับริ้วความเค้นดังนี้ [3]

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{f_{\sigma} N}{h} \quad (1)$$

โดยที่ $(\sigma_1 - \sigma_2)$ คือผลต่างของค่าความเค้นหลัก N คืออันดับริ้ว และ h คือความหนาของชั้นทดสอบ จากสมการ (1) หากเราทราบค่า f_{σ} และอันดับริ้วที่จุดใดจุดหนึ่งบนชั้นทดสอบ เราก็จะทราบค่าผลต่างความเค้นหลัก ณ จุดนั้นได้

ค่าคงตัว f_M เป็นสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังส์มอดูลัส E กับค่าคงตัว f_{σ} ซึ่งบ่งบอกระดับความสามารถในการรับแรงหรือภาระภายนอกของชั้นทดสอบใดๆ ที่สร้างจากวัสดุโฟโตอีลาสติกซีทีโดยไม่เกิดความเสียหายในลักษณะการคราก (yielding) หรือแบบเสียรูปร่างเฉพาะจุด (local plasticity) ณ บริเวณที่รับแรงนั้น เราสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า “หากวัสดุทางโฟโตอีลาสติกซีทีใดๆ ก็ตามที่ f_M มีค่ามาก ก็จะแสดงให้เห็นว่า ชั้นทดสอบใดก็ตามที่ทำจากวัสดุนั้นจะยอมให้เกิดริ้วความเค้นได้จำนวนหนึ่งก่อนที่ชิ้นส่วนนั้นจะเกิดการเสียหาย”

ค่า f_M สัมพันธ์กับค่า f_{σ} และ E ดังนี้ [5]

$$f_M = \frac{E}{f_{\sigma}} \quad (2)$$

จากสมการ (2) เราจะเห็นได้ว่ายิ่งค่าคงตัว f_M ของวัสดุมีค่ามากเพียงใด วัสดุนั้นก็ยิ่งจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการทดลองทางโฟโตอีลาสติกซีทีมากขึ้นเพียงนั้น กล่าวคือ วัสดุสองชนิดที่มีค่าคงตัว f_{σ} ใกล้เคียงหรือเท่ากัน แต่มีค่า E ไม่เท่ากันแล้ว วัสดุที่มีค่า E มากกว่าก็จะมีความสามารถในการรับภาระมากกว่า กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือว่า วัสดุที่มีค่า E มากกว่าจะทำให้ผู้ทดลองมองเห็นริ้วความเค้นได้เป็นจำนวนมากกว่าวัสดุที่มีค่า E น้อยกว่าโดยไม่เกิดความเสียหาย

พิจารณาตารางที่ 1 เราจะเห็นได้ว่า กระจกและเพล็กซิกลาสต้องการแรงหรือภาระภายนอกที่มีค่ามากเพื่อทำให้เกิดริ้วความเค้นเพียงหนึ่งริ้ว ดังนั้นหากนำกระจกหรือเพล็กซิกลาสมาทำเป็นตัวแบบหรือชิ้นส่วนก็จะไม่

สามารถมองเห็นริ้วความเค้นได้อย่างชัดเจน และในบางกรณีตัวแบบอาจเกิดความเสียหายขึ้นก่อน กล่าวคือเกิดการร้าวหรือแตกหัก ก่อนที่ผู้ทดลองจะให้เห็นริ้วความเค้นขณะที่โพลิยูรีเทนและเจลาตินสามารถเกิดริ้วความเค้นขึ้นได้ทันทีโดยน้ำหนักของตัววัสดุเองโดยไม่ต้องอาศัยแรงหรือภาระภายนอก

แม้ว่าค่า f_M ของกระจกและเพล็กซิกลาสจะมีค่ามากกว่าค่า f_M ของโพลีเอทิลีน 100 และ 911 ซึ่งอาจทำให้เข้าใจว่าสามารถนำไปใช้ในการทดลองทางโฟโตอีลาสติกซีทีได้ แต่เมื่อพิจารณาค่า f_{σ} ประกอบด้วยแล้ว เราจะเห็นว่า กระจกและเพล็กซิกลาสเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นวัสดุในการทดลองทางด้านโฟโตอีลาสติกซีที เนื่องจาก f_{σ} มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ยกเว้นกรณีของผู้ทดลองต้องการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุทั้งสองในเชิงลึก

3.2 ชิ้นงานทดลองและการสอบเทียบ

เนื่องด้วยค่าคงตัวทั้งสองที่ได้กล่าวถึงข้างต้นเป็นสมบัติสำคัญที่มีผลต่อการทดลองและการเกิดริ้วความเค้น (หรือการวิเคราะห์ความเค้น) การหาค่าหรือการได้มาซึ่งค่าคงตัวของเรซินสองชนิดจึงต้องเป็นไปตามระเบียบหรือวิธีการมาตรฐานที่เรียกว่า การสอบเทียบ (calibration) โดยเฉพาะค่าคงตัว f_{σ} ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญในการคำนวณความเค้นและเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคงตัว f_M

ในทางโฟโตอีลาสติกซีที การสอบเทียบมีหลายรูปแบบ ซึ่งต้องใช้ตัวแบบสอบเทียบที่มีรูปร่างต่างกันตามความสัมพันธ์ทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แต่วิธีการนั้นไม่แตกต่างกัน ตัวแบบที่นิยมใช้ในการสอบเทียบมีอยู่สองแบบ คือ

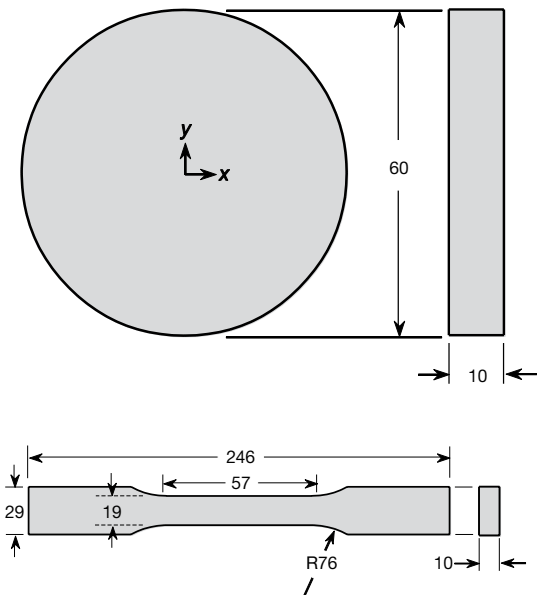
- ตัวแบบแผ่นจานกลมรับแรงเข้มนัดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (a circular disk under diametral-compression loading)
- ตัวแบบคานสี่จุดรับแรงโมเมนต์ดัดล้วน (a four-point bending beam)

ในบทความฉบับนี้ คณะผู้วิจัยได้ตัดสินใจเลือกตัวแบบสอบเทียบแผ่นจานกลมรับแรงเข้มนัดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง สาเหตุที่ทำให้คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวแบบนี้ก็คือ 1) เป็นตัวแบบที่มีผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) จากการพิสูจน์ในทฤษฎีสถาพยืดหยุ่น [3] และ 2) เป็นตัวแบบที่อันดับริ้วซึ่งต้องนำมาใช้ในการหา

ค่าคงตัว f_c นั้นอยู่ที่จุดศูนย์กลางแผ่นจานกลม ซึ่งส่งผลให้ไม่มีอิทธิพลของความเค้นตึงค้ำที่ขอบของตัวแบบอื่น เนื่องจากกระบวนการสร้าง/ผลิตตัวแบบ (manufacturing process) ต่อรู้ความเค้นในบริเวณนั้น

ผลเฉลยแม่นยำตรงของแผ่นจานกลมรับแรงข้มกอดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถแสดงได้ดังนี้ [3]

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{4Pr}{\pi h} \frac{r^2 - (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + r^2)^2 - 4y^2r^2} \quad (3)$$



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดลองที่ใช้สำหรับสอบเทียบเพื่อ (บน) หาค่าคงตัวรีวิว-ความเค้นของวัสดุ (f_c) และ (ล่าง) หาค่ายังสัมมอดูลัส (E) (รูปไม่ได้สัดส่วน และหน่วยวัดเป็น mm)

โดยที่ P คือแรงกด, r คือรัศมี และ x และ y คือตำแหน่งใดๆ ทั้งนี้จุดกำเนิดของแกนอ้างอิงจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นจานกลม (รูปที่ 2)

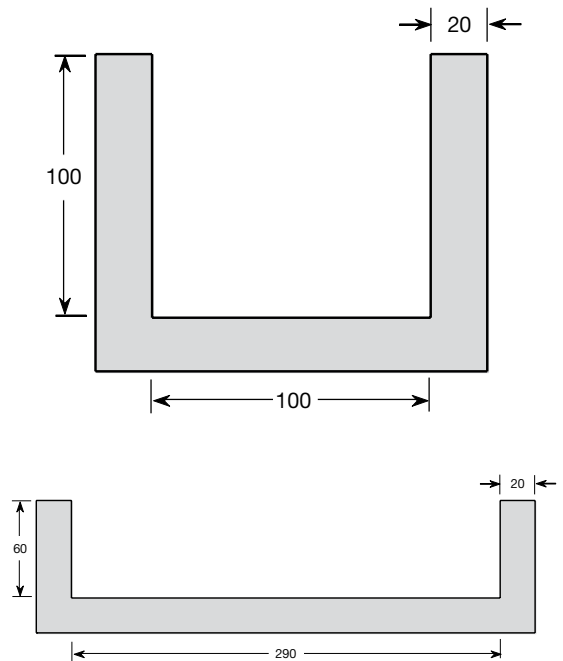
สำหรับการใช้งานวิธีสอบเทียบคานสี่จุดรับแรงโมเมนต์ดัดล้วน นั้นผู้อ่านสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้ในงานวิจัยของวิโรจน์ ลิ้มตระการ [1] ส่วนชิ้นงานทดลองสำหรับการหาค่า E นั้นจะเป็นชิ้นงานที่มีรูปทรงดัมเบลล์ซึ่งทำขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D638 รูปแบบที่ 3 (TYPE 3) โดยมีมิติต่างๆ ด้านความยาวแสดงอยู่ในรูปที่ 2

4. การหล่อเรซินด้วยวิธีการอย่างง่าย

เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดลองตามที่แสดงในรูปที่ 2 จำเป็นอย่างยิ่งที่คณะผู้วิจัยต้องหล่อแผ่นเรซินให้มีขนาดพื้นที่ที่ใหญ่กว่าขนาดจริงของตัวแบบที่ต้องการ ในการนี้คณะผู้วิจัยได้กำหนดลักษณะตัวแบบหล่อ (casting model) ซึ่งทำจากอะลูมิเนียมไว้สองลักษณะ (รูปที่ 3) โดยแผ่นเรซินที่หล่อสำเร็จสำหรับการสร้างตัวแบบแผ่นจานกลมนั้นจะมีพื้นที่การหล่อ 100 mm × 100 mm และหนาประมาณ 10 mm ขณะที่ตัวแบบหล่อที่สองสำหรับขึ้นทดสอบรูปทรงดัมเบลล์นั้นจะมีพื้นที่การหล่อ 60 mm × 290 mm และหนาประมาณ 10 mm

สำหรับการหล่อแผ่นเรซินทั้งสองแบบนี้คณะผู้วิจัยดำเนินการด้วยวิธีอย่างง่ายเป็นเบื้องต้นเพื่อประโยชน์ในการเรียนรู้ของผู้เรียน ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 4)

1) เตรียมตัวแบบหล่อ (รูปที่ 3) โดยใช้กระดาษกาวสองหน้าแบบบางแปะติดที่ตัวแบบหล่อทั้งสองด้าน โดยให้มีความหนาเสมอกัน



รูปที่ 3 มิติต่างๆ ของตัวแบบหล่อที่ทำจากอะลูมิเนียม ซึ่งใช้หล่อเรซินสำหรับ (บน) ตัวแบบแผ่นจานกลมเพื่อการสอบเทียบหาค่าคงตัวทางแสง และ(ล่าง) รูปทรงดัมเบลล์ (รูปไม่ได้สัดส่วน และหน่วยวัดเป็น mm)

2) นำกระจกใสแบบบางแปะติดเข้ากับกระดาษกาสองหน้าที่แปะติดกับตัวแบบหล่อในข้อ 1 อย่างไรก็ตามในกรณีของการหล่อเรซินอะคราไลต์ M-1 ผู้ปฏิบัติต้องปิดแผ่นใสสำหรับถ่ายเอกสารที่กระจกก่อน ทั้งนี้ต้องให้แผ่นใสตั้งตัวมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

3) หนีบกระจกให้รอบตัวแบบหล่อด้วยคลิปหนีบกระดาษขนาดที่เหมาะสม ทั้งนี้อาจหาวัสดุเสริมให้มีความหนาที่เหมาะสมกับแรงหนีบ

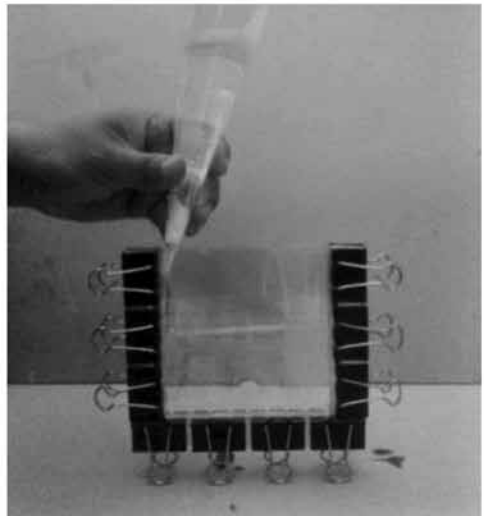
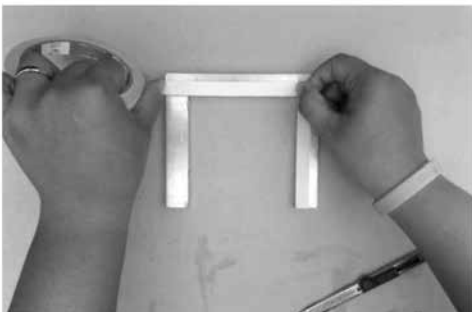
4) ผสมเรซินและตัวผสมแข็งตามอัตราส่วนที่กำหนดกล่าวคือ ใช้ตัวผสมแข็งในสัดส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0.75 และ 10 ของน้ำหนักของเรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะคราไลต์ M-1 ตามลำดับ พร้อมทั้งคนหรือกวนให้เข้ากันอย่างช้าๆ (ทั้งนี้ตัวผสมแข็งของเรซินอะคราไลต์ M-1 คือ เรซินอะคราไลต์ HY 956 ขณะที่ตัวผสมแข็งของเรซินเบอร์ 024-A ไม่สามารถระบุชื่อได้)

5) เทเรซินที่ผสมแล้วใส่ตัวแบบหล่ออย่างช้าๆ เพื่อป้องกันฟองอากาศ

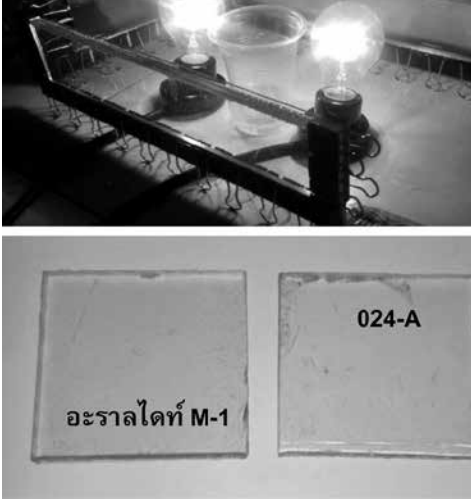
6) นำเรซินในตัวแบบหล่อไปอบเป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน ทั้งนี้เฉพาะเรซินอะคราไลต์ M-1 ให้ปล่อยให้แห้ง ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลาต่อเนื่อง 7 วัน)

7) แกะเรซินออกจากตัวแบบหล่อด้วยความระมัดระวัง

8) ในการทำชิ้นทดสอบตามหัวข้อที่ 3.2 นั้น คณะผู้วิจัยได้หล่อแผ่นเรซินจำนวน 1 แผ่นสำหรับตัวแบบแผ่นจานกลม และจำนวน 5 แผ่นสำหรับตัวแบบรูปทรงดัมเบลล์ ซึ่งรวมทั้งสิ้น 12 แผ่นสำหรับเรซินสองชนิด ตัวแบบที่ตัดด้วยเครื่องตัด (ที่สร้างขึ้นใช้งานเอง) เสร็จเรียบร้อยแล้ว และพร้อมจะนำไปทดสอบต่อไป แสดงอยู่ในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ขั้นตอนการหล่อเรซิน (อ่านจากบนลงล่างตามลำดับ) โดยที่หลอดไฟที่ใช้อบเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของเรซินเป็นหลอดไส้ขนาด 60 W



รูปที่ 4 ขั้นตอนการหล่อเรซิน (อ่านจากบนลงล่างตามลำดับ) โดยที่หลอดไฟที่ใช้อบเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของเรซินเป็นหลอดไส้ขนาด 60 W (ต่อ)



รูปที่ 5 ตัวอย่างที่ได้จากการตัดขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดที่สร้างขึ้นใช้เองในห้องประลอง (ตัวอย่างคานสีเหลืองด้านซ้ายมือไม่ได้ถูกนำมาใช้ทดลองและนำเสนอในบทความฉบับนี้)

5. การทดสอบสมบัติทางแสงและทางกล

5.1 สมบัติทางแสง

จากหัวข้อที่ 3.2 คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวแบบแผ่นจานกลมรับแรงเข้มกดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นตัวแบบสำหรับสอบเทียบหาค่า f_{σ} ซึ่งสามารถหาได้โดยอาศัยสมการ (1) และ (3) โดยกำหนดให้ x และ y ในสมการ (3) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนี้ [3,6]

$$f_{\sigma} = \frac{8}{\pi D} \left(\frac{P}{N} \right) \quad (4)$$

โดยที่ $D (= 2r)$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแบบ (mm)

จากสมการข้างต้นเราจะพบว่าค่าคงตัว f_{σ} จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน P/N ดังนั้นหากเราสามารถหาค่าอัตราส่วนดังกล่าวได้ เราก็จะทราบค่าคงตัว

เราสามารถหาค่าอัตราส่วน P/N ได้ในสามแบบคือ

1) แบบหนึ่งจุด (single point) : แบบนี้ต้องการชุดข้อมูลระหว่างอันดับริ้วจำนวนเต็ม (integral fringe order) N ณ จุดใดจุดหนึ่งในตัวแบบที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งในกรณีนี้คือจุดศูนย์กลางวงกลมกับแรงกด P ที่มีค่ามากพอค่าหนึ่งที่จะทำให้เกิดอันดับริ้วจำนวนเต็ม นั้น (significant fringe) กล่าวคือ (N, P) และจากนั้นก็นำค่าที่ได้ใส่ในสมการข้างต้นเพื่อหาค่าคงตัว f_{σ} ต่อไปพึงสังเกตว่า การใส่แรง P ให้มีค่ามากพอค่าหนึ่งจะทำให้เกิดอันดับริ้วจำนวนเต็มเพียงหนึ่งชุดนั้นก็เพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของความเค้นดกค้ำในชั้นทดสอบอันเนื่องมาจากกระบวนการสร้างขึ้นทดสอบ

2) แบบหลายจุดเชิงเส้น (linear multi-point) : แบบนี้คล้ายกับแบบแรก แต่แตกต่างกันที่แบบนี้ต้องการ

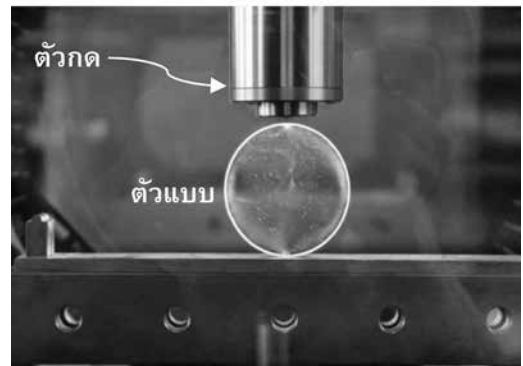
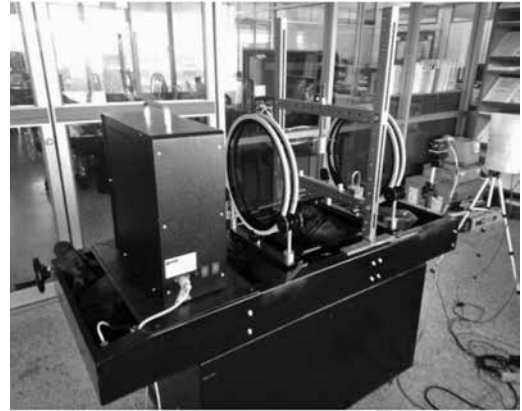
ชุดข้อมูลระหว่างอันดับริ้วจำนวนเต็ม N กับแรงกด P ที่สัมพันธ์กันหลายชุด กล่าวคือ (N_i, P_i) โดย i คือครั้งที่บอกลำดับการบันทึก เริ่มต้นให้บันทึกชุดข้อมูลแรก (N_1, P_1) ในแต่ละครั้งก่อนการบันทึกชุดข้อมูลถัดไปให้เพิ่มอันดับริ้ว $N_{i+1} = N_i + 1$ พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงกด P ซึ่งเมื่อผู้ทดลองทำลักษณะนี้หลายๆ ครั้งก็จะได้ชุดของข้อมูล $(N_1, P_1), (N_2, P_2), (N_3, P_3), \dots (N_n, P_n)$ โดย n คือจำนวนครั้งหรือชุดข้อมูลที่ต้องการ จากนั้นนำชุดข้อมูลทั้งหมดมาพล็อตกราฟ โดยกำหนดให้อันดับริ้วจำนวนเต็ม N เป็นแกนนอนและแรงกด P เป็นแกนตั้ง หลังจากนั้นสร้างเส้นแนวโน้มแบบเส้นตรง (linear line) ของชุดข้อมูลเหล่านี้ ค่าความชันของเส้นตรงดังกล่าวก็คือค่าอัตราส่วน P/N ที่ต้องการ

3) แบบหลายจุดไร้เชิงเส้น (nonlinear multi-point) [7] : แบบนี้คล้ายกับแบบที่สอง แต่มีหลักการที่ต่างกัน กล่าวคือ แบบนี้ต้องการค่าอันดับริ้วจำนวนเต็ม N หลายจุดด้วยแรงกด P ที่มีค่าสูงเพียงพอค่าเดียวที่จะทำให้เกิดริ้วได้หลายริ้ว (มากกว่าสามริ้วขึ้นไป) หลังจากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้สร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการไร้เชิงเส้นด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (least-square methods) และแก้สมการเหล่านี้ด้วยวิธีการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical methods) อาทิ วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) ฯ

ในการนี้คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้การสอบเทียบแบบที่สองเนื่องจากจะให้ค่าที่มีความแม่นยำมากกว่าแบบแรก แม้ว่าจะมีความซับซ้อนมากกว่าก็ตาม นอกจากนี้แม้ว่าแบบที่สามจะให้ความแม่นยำมากกว่าแบบแรกและแบบที่สอง แต่วิธีการมีความซับซ้อนมากและต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนด้วยเช่นกัน

หลังจากได้ตัวแบบสำหรับสอบเทียบแล้ว (รูปที่ 5) คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบเพื่อสอบเทียบหาค่า f_c ตามวิธีการสอบเทียบแบบหลายจุดเชิงเส้นในโพลาริสโคป (รูปที่ 6) โดยออกแรงกดตัวแบบที่ค่าหนึ่งที่ทำให้อันดับริ้วความเค้นตรงกลางตัวแบบเป็นอันดับริ้วจำนวนเต็ม (ดูรูปที่ 1) จากนั้นก็บันทึกค่าแรงกดและอันดับริ้วจำนวนเต็มเหล่านั้น ทั้งสิ้น 4 ชุดข้อมูล (N_i, P_i) โดยเริ่มจาก $(0, 0)$ ทั้งนี้การกำหนดว่าอันดับริ้วตรงกลางตัวแบบเป็นอันดับริ้ว

จำนวนเต็มหรือไม่จะใช้วิธีการเปรียบเทียบกับตาเปล่า (naked eye) ระหว่างริ้วความเค้นจริงในตัวแบบกับริ้วความเค้นจำลอง



รูปที่ 6 โพลาริสโคป (บน) และการวางตัวแบบแผ่นจานกลมรับแรงเค้นกดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในโพลาริสโคป (ล่าง) ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแรงกดอยู่ด้านบนของตัวกด (ไม่แสดงในรูปด้านล่าง)

5.2 สมบัติทางกล และค่าครรชนึ่งขี้ระดับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ในการดำเนินงานหาค่า E คณะผู้วิจัยใช้ชิ้นงานที่มีรูปทรงดัมเบลล์ (รูปที่ 5) ซึ่งได้จัดทำขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D638 ชนิดที่ 3 (TYPE 3) จำนวน 5 ชิ้นต่อหนึ่งชนิดเรซิน รวมทั้งสิ้น 10 ชิ้น และนำไปทดสอบในเครื่องทดสอบแรงดึง (รูปที่ 7) เมื่อได้ค่า E แล้วเราก็สามารถหาค่าครรชนึ่งขี้ระดับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน f_m ได้ตามสมการ (2)

6. ผลลัพธ์การทดลอง

หลังจากดำเนินการสอบเทียบตัวแบบจางกลมในโพลาไรสโคปแล้ว ซึ่งภาพร้าวสนามความเค้นแสดงอยู่ในรูปที่ 8 และ 9 คณะผู้วิจัยบันทึกชุดข้อมูลระหว่างแรงกดและอันดับร้าวจำนวนเต็มได้ดังแสดงในตารางที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นกับชุดข้อมูลดังกล่าว (ตารางที่ 2) และได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3

รูปที่ 8 และ 9 แสดงภาพร้าวความเค้นทั้งสามสีและในระนาบสีเขียว (green plane) ของเรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะคราลไดท์ M-1 ตามลำดับ ทั้งนี้การระบุอันดับร้าวจำนวน ณ ตรงกลางตัวแบบนั้นจะทำการเปรียบเทียบด้วยตาเปล่ากับรูปร่างของอันดับร้าวจำนวนเต็มที่ได้จากการจำลอง (simulation) ซึ่งได้ถูกสร้างขึ้นใช้งานเอง [2,8] ดังตัวอย่าง $N = 3$ (รูปที่ 1)

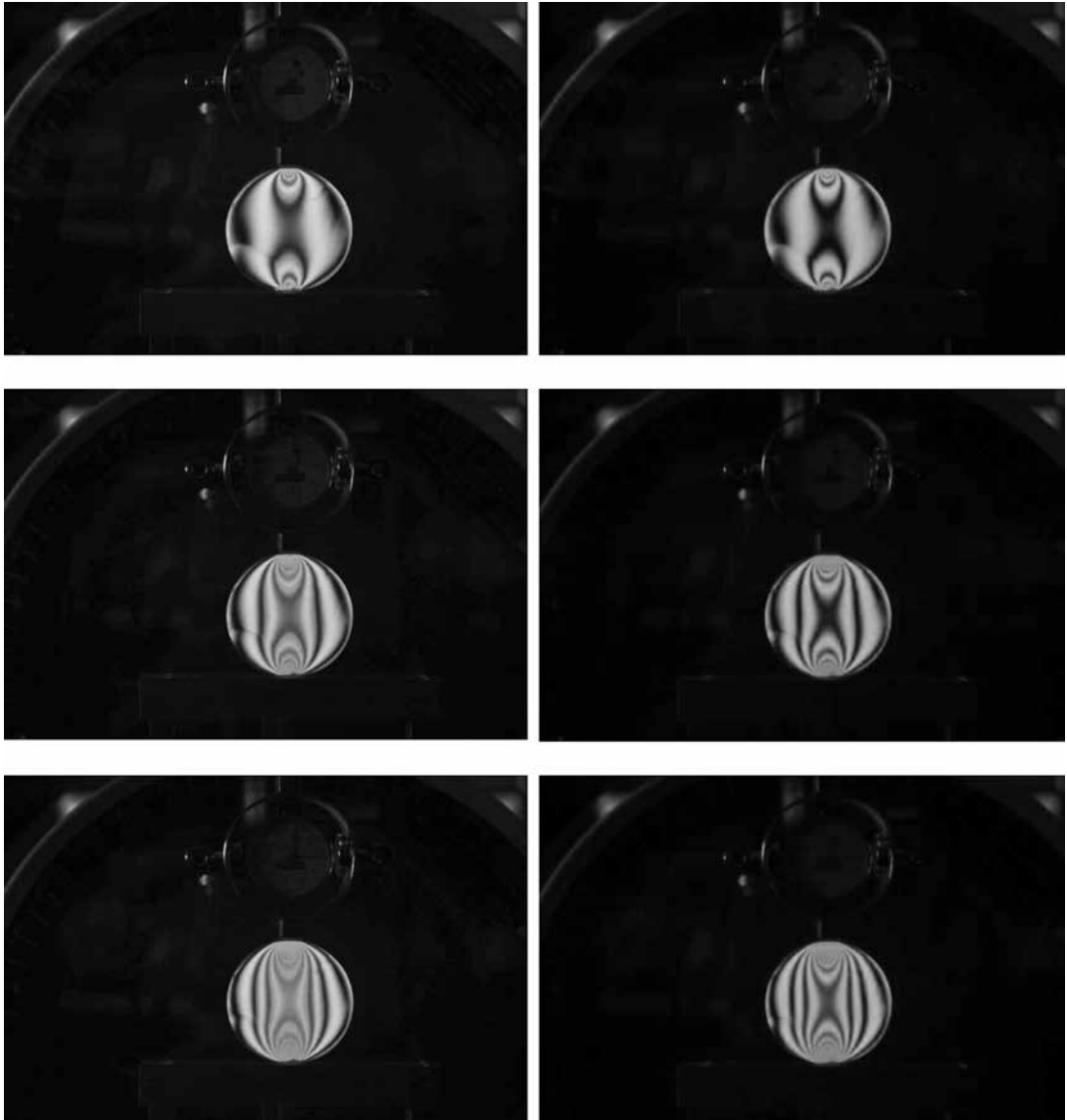
พิจารณากรณีเรซินเบอร์ 024-A และคำนึงถึงความเค้นตกค้าง (residual stress) ในขั้นตอนสอบหรือตัวแบบอันเกิดจากกระบวนการหรือขั้นตอนการสร้าง เราจะได้ค่าอัตราส่วน P/N เท่ากับ 429.42 N/fringe เมื่อนำไปแทนลงในสมการ (4) แล้ว เราจะได้ค่าคงตัว f_0 เท่ากับ 18.22 N/(mm·fringe) ในแนวทางเดียวกันเมื่อเราแทนค่าอัตราส่วน P/N ของเรซินอะคราลไดท์ M-1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 214.95 N/fringe เราก็จะได้ค่าคงตัว f_0 เท่ากับ 9.120 N/(mm·fringe)

พิจารณาตารางที่ 3 อีกครั้ง เราจะพบว่า มีค่าอัตราส่วน P/N อีกกรณีหนึ่งคือ กรณีไม่คำนึงถึงความเค้นตกค้างที่สามารถนำไปใช้ในการหาค่าคงตัว f_0 ได้ (ไม่ได้แสดงในที่นี้) เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วน P/N ของเรซินทั้งสอง (สดมภ์สุดท้ายในตารางที่ 3) แล้วจะเห็นได้ว่ามีค่า

ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยมาก (น้อยกว่าร้อยละ 5) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเราสามารถใช้อัตราส่วน P/N กรณีใดก็ได้



รูปที่ 7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) และการติดตั้งตัวแบบเรซินรูปทรงดัมเบลล์เข้ากับหัวจับในเครื่องทดสอบดึงเพื่อหาค่ายังสัมมอดูลัส E

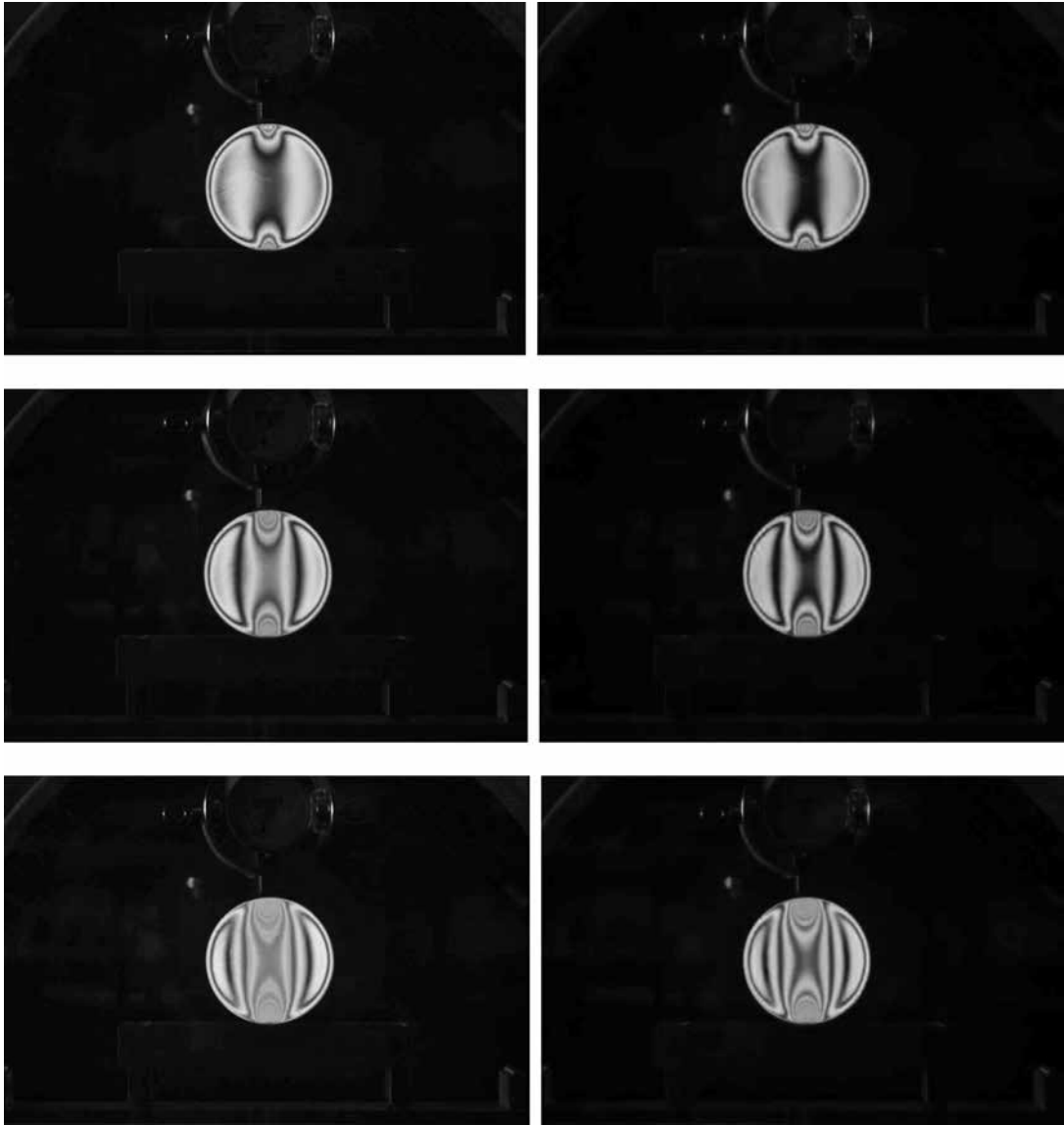


รูปที่ 8 ภาพริ้วสีของสนามความเค้นในแผ่นจานกลมที่ทำจากเรซินเบอร์ 024-A ตามขนาดของแรงกดที่ต่างกัน (ซ้าย) และภาพริ้วในระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการแยกระนาบสีจากภาพริ้วสี (ขวา) ซึ่งแสดงอันดับริ้วจำนวนเต็มตามลำดับจากบนลงล่าง (อันดับริ้ว 1 ถึง 3) เทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2

อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติเราควรเลือกใช้กรณีที่น่าเชื่อถือถึงความเค้นตกค้างเนื่องจากสะท้อนถึงความเป็นจริงมากที่สุด

คณะผู้วิจัยได้ทดสอบหาค่า E ด้วยเครื่อง ทดสอบ UTM (รูปที่ 7) ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 10 และตารางที่ 4 จากข้อมูลในตาราง เราจะได้ค่า E เฉลี่ยของเรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะราลด์ M-1 เท่ากับ 807.42

(± 27.48) MPa และ 638.44 (± 24.29) MPa ตามลำดับ โดยค่าในวงเล็บแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) เมื่อนำค่านัยสัมมอดูลัส E เหล่านี้ไปแทนลงในสมการ (2) พร้อมกับค่าคงตัว f_c ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 เราจะได้ค่าคงตัว f_M เท่ากับ 44.31 fringe/mm สำหรับเรซินเบอร์ 024-A และเท่ากับ 70.00 fringe/mm สำหรับเรซินอะราลด์ M-1



รูปที่ 9 ภาพริ้วสีของสนามความเค้นในแผ่นจานกลมที่ทำจากเรซินอะคราลไดท์ M-1 ตามขนาดของแรงกดที่ต่างกัน (ซ้าย) และภาพริ้วในระนาบสี่เหลี่ยมที่ได้จากการแยกระนาบสีจากภาพริ้วสี (ขวา) ซึ่งแสดงอันดับริ้วจำนวนเต็มตามลำดับจากบนลงล่าง (อันดับริ้ว 1 ถึง 3) เทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอันดับริ้วจำนวนเต็ม N ที่เกิดขึ้น ณ จุดศูนย์กลางแผ่นจานกลมกับแรงข้มกด P ของตัวแบบที่ทำจากเรซินทั้งสองชนิด

อันดับริ้วจำนวนเต็ม N (fringe)	แรงกด P (N)	
	เรซินเบอร์ 024-A	เรซินอะคราลไดท์ M-1
0	0	0
1	416.68	178.16
2	876.66	422.09
3	1282.52	681.85

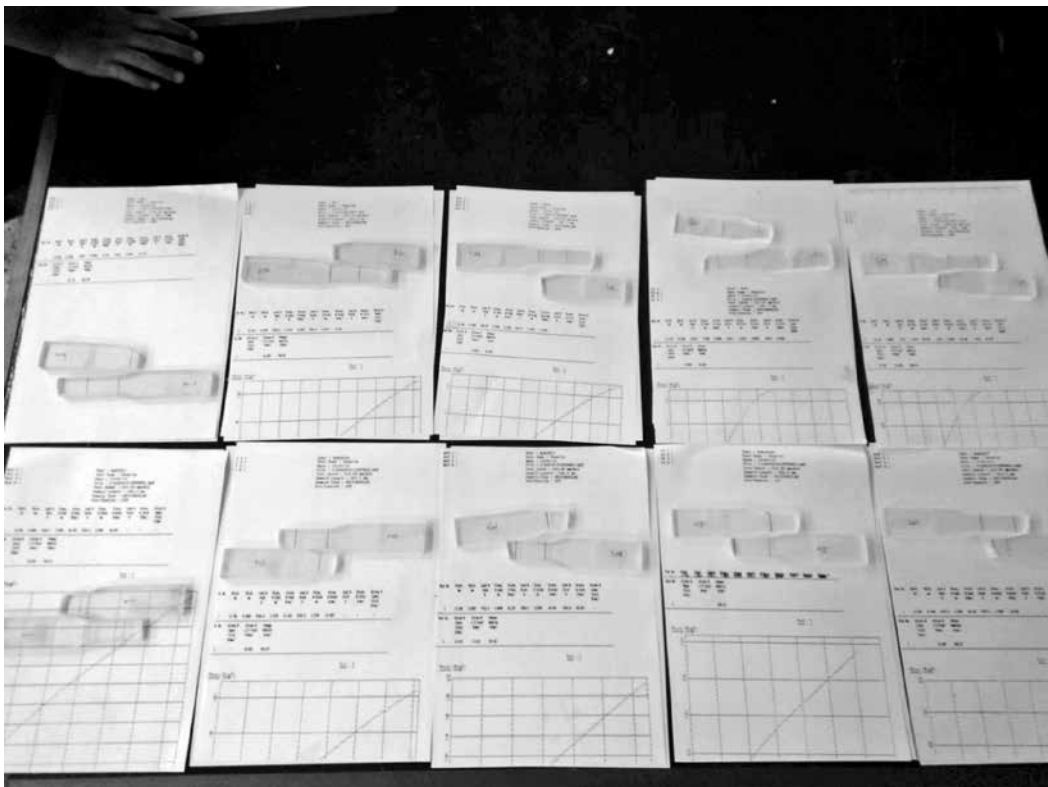
ตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วน P/N ของเรซินทั้งสองชนิดจากสมการเส้นตรงที่ได้จากวิธีการถดถอยเชิงเส้น

ชนิดเรซิน	สมการเส้นตรง ^a (ค่าสัมประสิทธิ์ การกำหนด, F^2)	สมการเส้นตรง ^b (ค่าสัมประสิทธิ์ การกำหนด, F^2)	ค่าอัตราส่วน P/N		ร้อยละ ความคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์ของ ค่าอัตราส่วน P/N (สมมติที่สี่เทียบกับ สมมติที่ห้า)
			จากสมการเส้นตรง ในสมมติที่สองของ แต่ละค่าอันดับรีว ^c	จากสมการ เส้นตรง ในสมมติที่สาม	
024 - A	$P = 430.75N - 2.166$ (0.9995)	$P = 429.83N$ (0.9995)	428.58 (@ $N = 1$)		
			429.66 (@ $N = 2$)		
			430.02 (@ $N = 3$)		
			429.42	429.83	0.09306
อะราลดอท M-1	$P = 228.95N - 22.897$ (0.9932)	$P = 219.14N$ (0.9904)	206.05 (@ $N = 1$)		
			217.50 (@ $N = 2$)		
			221.31 (@ $N = 3$)		
			214.95	219.14	1.91202

a ไม่บังคับให้ตัดจุดกำเนิด (มีความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบ)

b บังคับให้ตัดจุดกำเนิด (ไม่มีความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบ)

c ค่าในตารางได้จากสมการเส้นตรงของแต่ละกรณี โดยหารตลอดด้วยค่าอันดับรีวตลอดทั้งสมการ, แทนค่าอันดับรีวจำนวนเต็มแต่ละค่าซึ่งก็จะทำให้ได้ค่าอัตราส่วน P/N ที่สอดคล้องกัน และจากนั้นก็เฉลี่ยค่าอัตราส่วนทั้งหมด เราก็จะได้ค่าอัตราส่วนที่ต้องการ



รูปที่ 10 ผลการทดสอบดึงชิ้นทดสอบตัวแบบเรซินรูปทรงดัมเบลล์ด้วยเครื่องทดสอบดึง UTM ในรูปที่ 7

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการดึงขึ้นงานรูปทรงดัมเบลล์เพื่อหาค่ายังสัมมอดูลัส

ชนิดเรซิน	ชั้นทดสอบ	ค่ายังสัมมอดูลัสของวัสดุ (MPa)
024 – A	1	818.23
	2	810.27
	3	789.88
	4	768.52
	5	850.22
ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)		807.42 (± 27.48)
อะคราไลต์ M-1	1	665.90
	2	598.87
	3	656.93
	4	623.64
	5	646.90
ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)		638.44 (± 24.29)

7. การวิจารณ์ผลลัพธ์การทดลอง

จากการเปรียบเทียบค่าคงตัว f_c ของเรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะคราไลต์ M-1 ที่ได้จากการสอบเทียบกับค่าคงตัว f_c ของวัสดุที่นิยมใช้ในโฟโตอีลาสติคซิติ (ตารางที่ 1) เราจะเห็นได้ว่าค่าคงตัว f_c ของเรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะคราไลต์ M-1 จะใกล้เคียงกับค่าคงตัว f_c ของโฮโมไลท์ 911 (Homolite 911) และโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) กล่าวคือ 17 N/(mm·fringe) และ 8 N/(mm·fringe) โดยจะมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 7.17 และ 14.00 ตามลำดับ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเรซินและการกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างเรซินกับส่วนผสมแข็งที่ต่างกัน รวมทั้งปัจจัยอื่นใดที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะเวลาการปล่อยให้แข็งตัว, อุณหภูมิอบเรซินขณะอบในกรณีของเรซินเบอร์ 024-A, อุณหภูมิห้อง ฯ

ผู้อ่านสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการสอบเทียบหาค่าคงตัว f_c นั้น คณะผู้วิจัยได้ใช้อันดับริ้วจำนวนเต็มของภาพริ้วในระนาบสีเขียว (รูปที่ 8 และ 9) เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

สาเหตุที่คณะผู้วิจัยทำเช่นนี้ก็ด้วยเหตุผลในข้อที่ว่า เนื่องด้วยค่าคงตัว f_c เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงและภาพริ้วสีที่ได้บันทึกไว้สามารถแยกออกได้เป็นสาม

ระนาบสี คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ดังนั้นเราจึงต้องเลือกใช้ภาพเพียงระนาบสีใดสีหนึ่งเท่านั้นในการสอบเทียบเช่นเดียวกับค่าคงตัว f_c ของวัสดุต่างๆ ในตารางที่ 1 ที่ใช้ความยาวคลื่นแสงของหลอดไฟฮาโลเจน (589.3 nm) หากเราบันทึกภาพริ้วสีด้วยกล้องถ่ายภาพหลากหลายยี่ห้อแล้ว เราก็สามารถหาค่าคงตัว f_c ที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นได้หลากหลายค่า ดังนั้นด้วยภาพริ้วในระนาบสีต่างๆ จึงมีความเป็นไปได้ที่ว่าจะอาจมีความยาวคลื่นค่าหนึ่งที่เราเรียกว่าความยาวคลื่นสมมูล (equivalent wavelength) ที่จะทำให้เราได้ค่าคงตัว f_c มีค่าใกล้เคียงกันหรือดีที่ที่สุดเท่ากัน

ผลการทดสอบหาค่าคงตัว f_c โดยใช้ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นที่ต่างกันและบันทึกโดยกล้องถ่ายภาพหลายยี่ห้อ [3] แสดงให้เห็นว่า ค่าคงตัว f_c ที่หาได้จากวิธีการที่ได้กล่าวข้างต้นโดยเฉพาะวิธีที่สองโดยใช้ภาพระนาบสีเขียวที่แยกจากภาพริ้วสีแดงที่บันทึกไว้ด้วยกล้องถ่ายภาพสองยี่ห้อจะทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นสมมูลที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ภาพริ้วในระนาบสีอื่นๆ หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ริ้วระนาบสีเขียวที่แยกออกจากภาพริ้วสีนั้นเป็นเสมือนภาพริ้วที่บันทึกผ่านตัวกรองสีเขียว (green filter) นั้นเอง

เมื่อพิจารณาค่า E เราจะเห็นได้ว่าค่า E ของเรซินทั้ง

สองชนิดจะมีค่าน้อยกว่าประมาณสามเท่าเมื่อเทียบกับค่า E ของโพลีเอทิลีน 911 และโพลีคาร์บอเนต (ตารางที่ 1) ตามลำดับ ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้ค่าคงตัว f_M ของเรซินทั้งสองชนิดมีค่าน้อย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตามความหมายของค่าคงตัว f_M เราจะเห็นได้ว่าค่าคงตัว f_M ของเรซินอะคริลิก M-1 จะมีค่ามากกว่าค่าคงตัว f_M ของเรซินเบอร์ 024-A ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หากต้องการเลือกใช้เรซินในการทำตัวแบบเพื่อการทดลองด้านโฟโตอีลาสติกซิตีแล้ว เราควรเลือกใช้เรซินอะคริลิก M-1 (แม้ว่าในทางปฏิบัติแล้วราคาของเรซินอะคริลิก M-1 จะสูงกว่าเรซินเบอร์ 024-A ก็ตาม แต่ราคาก็ยังต่ำกว่าการสั่งซื้อเรซินแผ่นจากต่างประเทศ)

อย่างไรก็ดีหากเราประเมินภาพรีวิสนามความเค้น (ภาพสีในรูปที่ 8) ด้วยตาเปล่าแล้วก็สามารถสรุปได้ว่า เราสามารถใช้เรซินเบอร์ 024-A มาทำเป็นชิ้นทดลองได้เช่นกัน หากผู้ที่เกี่ยวข้องข้องมุงเน้นหรือสนใจเกี่ยวกับการเรียนการสอนหรือการประลองในชั้นเรียนมากกว่าการวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้ผู้เรียนเกิดการเรียนได้ดียิ่งขึ้นตามที่กล่าวแล้วข้างต้นในบทนำ

หากเปรียบเทียบค่า E ของเรซินทั้งสองชนิดกับค่า E ของเรซินเบอร์ 5320 ที่ได้ทดสอบไว้แล้ว [9] เราจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า E ของเรซินเบอร์ 024-A จะใกล้เคียงมากกับค่า E ของเรซินเบอร์ 5320 (950 MPa) อย่างไรก็ตามบทความดังกล่าวไม่ได้แสดงรายละเอียดที่ชัดเจนเกี่ยวกับการหาค่าคงตัว f_0 และ f_M ของเรซินเบอร์ 5320

นอกจากข้อสรุปข้างต้นเกี่ยวกับวิธีการเลือกใช้วัสดุแล้ว ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้ทดลองควรให้ความสนใจ กล่าวคือ ความเค้นตกค้างในตัวแบบ เมื่อเปรียบเทียบภาพรีวิสนามความเค้นในรูปที่ 8 และ 9 เราจะเห็นได้ว่า ระดับความเค้นตกค้างในตัวแบบที่ทำจากเรซินอะคริลิก M-1 จะสูงกว่าในตัวแบบที่ทำจากเรซินเบอร์ 024-A และมีผลทำให้รีวิสนามความเค้นผิดเพี้ยนไปจากภาพรีวิสนามความเค้นจำลอง (รูปที่ 1) ด้วยเหตุนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กระบวนการอบอ่อน (annealing) เพิ่มเติมเพื่อลดระดับความเค้นตกค้างหลังจากกระบวนการตัดตัวแบบ

จากการสังเกตขณะหล่อเรซิน คณะผู้วิจัยยังได้พบอีกว่า นับตั้งแต่เรซินอะคริลิก M-1 เริ่มแข็งตัวจนมีอายุ

ประมาณสองวัน ลักษณะของเรซินจะมีความอ่อนนุ่ม (ไม่ติดผิวหนังเมื่อสัมผัส) และสามารถคืนตัวได้ดีหรือมีสภาพความยืดหยุ่นสูงมาก ซึ่งเมื่อทดลองบีบด้วยนิ้วมือและมองผ่านโพลาไรสโคปแล้ว คณะผู้วิจัยสามารถมองเห็นรีวิสนามความเค้นเกิดขึ้นได้โดยง่ายและรีวิสดังกล่าวก็ลดลงหรือเลือนหายไปได้อย่างรวดเร็วเช่นกันเมื่อแรงบีบน้อยลงและปล่อยมือออก

สิ่งที่ได้ค้นพบนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อคณะผู้วิจัยในการที่จะพัฒนาหรือนำไปประยุกต์ ใช้ในโฟโตอีลาสติกซิตีแบบสะท้อน (reflection photoelasticity) ซึ่งต้องใช้แผ่นเรซินบางที่มียืดหยุ่นสูงพอควรเพื่อนำมาเป็นวัสดุเคลือบผิว (coating material) แปะติดกับชิ้นส่วนทางกลจริงเพื่อการวิเคราะห์ความเค้น [3,10-11]

จากการสืบค้นเพิ่มเติมเกี่ยวกับเรซินแผ่นหล่อสำเร็จในประเทศไทย คณะผู้วิจัยพบว่า มีหลากหลายเกรดและราคาที่สามารถจัดหามาประกอบการทดลองหรือการวิจัยได้ (ทั้งนี้ต้องนำมาทดสอบหาค่า f_0 ในแต่ละชนิดของเรซินแผ่น) ด้วยข้อเท็จจริงข้างต้นอาจทำให้ผู้อ่านหลายท่านตั้งข้อสังเกตว่า เมื่อเป็นเช่นนั้นแล้วยังมีความจำเป็นอยู่หรือไม่ที่ต้องหล่อเรซินขึ้นใช้เอง คำตอบก็คือว่ายังมีความจำเป็น กล่าวคือเนื่องด้วยเป้าหมายของการวิจัยครั้งนี้มิได้ยุติลงเพียงแค่การได้มาซึ่งแผ่นเรซินเท่านั้น แต่คณะผู้วิจัยมุ่งมั่นที่จะค้นหาวิธีการหล่อเรซินที่ง่ายที่สุด เพื่อนำวิธีการเหล่านี้ไปเป็นแนวทางในการเรียนการสอนและโดยเฉพาะอย่างยิ่งการหล่อตัวแบบที่เป็นรูปทรงสามมิติของชิ้นส่วนทางกลจริง เช่น ก้านสูบ, ประแจ, สลักเกลียว, เกลียวกำลัง ฯลฯ ซึ่งความมุ่งหวังข้อนี้ของคณะผู้วิจัยได้แฝงอยู่ในคำถามการวิจัยข้อที่สาม

แม้ว่าคณะผู้วิจัยจะแสดงให้เห็นว่าในเบื้องต้น เราสามารถใช้กระบวนการหล่อเรซิน และแผ่นเรซินที่ได้จากการหล่อไปใช้ทำตัวแบบในการทดลองทางโฟโตอีลาสติกซิตีเพื่อประโยชน์ด้านการเรียนการสอนในด้านการวิเคราะห์ความเค้น แต่ในทางปฏิบัติจริงเราสามารถนำแผ่นเรซินเหล่านี้ไปใช้สร้างชิ้นทดลองเพื่องานวิจัยด้านการวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลอง (experimental stress analysis) ในเรื่องต่างๆ ได้ เช่น การแยกความเค้น (stress separation), การคืนรูป/ค่าความเค้น (phase unwrapping of stresses) ทั้งขนาดและทิศทาง,

การสร้างวิถี/เส้นการไหลของความเค้นแบบอัตโนมัติ (automated generation of stress trajectories), การวิเคราะห์ความเค้น 3 มิติด้วยวิธีการแช่แข็งสนามเร็ว ความเค้น (3D stress analysis by stress freezing method) *

อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยยังคงต้องปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการหล่อต่อไปภายใต้หลักการเรียบง่ายแต่ได้เรซินแบบแผ่นหรือแบบรูปทรงต่างๆ ที่มีคุณภาพ รวมทั้งกระบวนการสร้างตัวแบบต่างๆ ซึ่งเป็นแนวทางการทำงานต่อไปในอนาคต

8. ข้อปัญหาที่ค้นพบและทิศทางการทำงานในอนาคต

ด้วยคำถามของการวิจัยทั้งสามข้อที่กล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยได้ดำเนินงานและพบปัญหาหลากหลายประการที่ต้องแก้ไขหรือพัฒนาต่อไปดังนี้

1) แผ่นเรซินที่ได้จากกระบวนการหล่อยังมีความเรียบไม่เพียงพออันเนื่องมาจากอัตราการแข็งตัวของเรซินไม่เท่ากันทั่วทั้งตัวแบบหล่อ อีกทั้งในขณะที่ผู้ทดลองเทเรซินลงในตัวแบบหล่อ การไหลของเรซินทำให้เกิดหน้าคลื่นซ้อนกัน ซึ่งเมื่อเรซินได้แข็งตัวสมบูรณ์แล้วและนำไปวางในโพลาริสโคป ผู้ทดลองก็จะมองเห็นริ้วของหน้าคลื่น (wave front of stress fringe) ที่ซ้อนกันนั้นและริ้วนี้ก็จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของริ้วความเค้นจริงที่เกิดจากภาวะภายนอก ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณหาค่าคงตัว f_c แนวทางการแก้ไขปัญหานี้ก็คือการใช้ห้องหล่อแบบความดัน (pressure pot or chamber) ซึ่งเป็นไปได้ทั้งการจัดซื้อหรือสร้างขึ้นใช้เอง

2) กระบวนการตัดตัวแบบก่อให้เกิดความเค้นตกค้างในระดับสูง แนวทางการแก้ไขปัญหานี้มีสองวิธีวิธีแรกคือการตัดตัวแบบโดยให้มีระยะเว้นห่างจากขนาดจริงพอควร ซึ่งเมื่อตัดแล้วก็จะไม่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างเข้ามาในขอบเขตของขนาดจริงที่ต้องการ และใช้ใบตัดที่มีความละเอียดมากกว่าเดิม และวิธีที่สองคือการนำตัวแบบที่ผ่านการตัดแล้วไปอบอ่อนก่อนนำไปทดลอง

3) การอาศัยความร้อนจากหลอดไฟ (รูปที่ 4) ทำให้เรซินแข็งตัวเร็วขึ้นแต่ก็ก่อให้เกิดความแตกต่างในการกระจายตัวของความเค้นในตัวหล่อทั้งตัวแบบหล่อ ทั้งนี้

เนื่องจากผู้ทดลองไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเรซินกับส่วนผสมแข็ง แนวทางการแก้ไขของปัญหานี้ก็คือการสร้างห้องอบโดยเฉพาะ ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งอบเพื่อให้เรซินแข็งตัว ลดความเค้นตกค้าง และแช่แข็งความเค้นในชิ้นส่วน 3 มิติตามวิธีการแช่แข็งความเค้น

4) แม้ว่าการกำหนดอันดับริ้วจำนวนเต็มที่ใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่ากับรูปร่างของอันดับริ้วจำนวนเต็มที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมซึ่งได้ถูกสร้างขึ้นใช้งานเอง [2,8] จะให้ค่าได้อย่างรวดเร็วก็ตาม วิธีการดังกล่าวก็ยังมีคลาดเคลื่อนเนื่องจากความแตกต่างในเรื่องสายตา ระดับการมองริ้ว และการคาดคะเนของผู้ทดลอง (subjective investigation) ด้วยเหตุดังกล่าวนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการประมวลผลภาพ (image processing) มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยให้การอ่านค่าอันดับริ้วจำนวนเต็มมีความแม่นยำ ความถูกต้อง และความเที่ยงตรง (objective investigation) มากยิ่งขึ้น ซึ่งแนวทางนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยการพัฒนาความสามารถของโปรแกรมที่สร้างขึ้นใช้เองในห้องทดลอง (in-house developed program) เพิ่มเติม [2]

9. สรุปผล

บทความวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับกระบวนการหล่อเรซินอย่างง่ายและการทดสอบหาสมบัติทางแสงและทางกลที่เป็นปัจจัยสำคัญในการหาค่าคงตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลองด้วยวิธีโพโตอิลาสติกซิตี

ด้วยกระบวนการหล่อเรซินและการหาค่าคงตัวต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คณะผู้วิจัยสามารถสรุปผลตามคำถามการวิจัยทั้งสามข้อได้ดังนี้ 1) ค่าคงตัว f_c ของเรซินเบอร์ 024-A และเรซินอะราลด์ที M-1 จะใกล้เคียงกับค่าคงตัว f_c ของไฮโมไลท์ 911 และโพลีคาร์บอนเนต ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำแผ่นเรซินที่ได้จากการหล่อไปใช้งานทดลองได้ 2) ระดับความเค้นตกค้างในตัวแบบที่ทำจากแผ่นเรซิน อะราลด์ที M-1 จะมีค่ามากกว่าระดับความเค้นตกค้างของแผ่นเรซินเบอร์ 024-A และ 3) การสร้างตัวแบบ 3 มิติยังไม่สามารถกระทำได้จริง แต่ผลจากการทดสอบแผ่นเรซินที่ได้จากการหล่อแสดงให้เห็นว่า ความเป็นไปได้สูงมากที่จะดำเนินการหล่อตัวแบบ 3 มิติ

ทั้งนี้ต้องอาศัยห้องทดลองที่มีการควบคุมอย่างเป็นระบบ

10. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.บรรจบ อรชร แห่งภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์การใช้งานเครื่องทดสอบดึง และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์

11. เอกสารอ้างอิง

1. Limtrakarn, W., 2004, "Evaluation of Finite Element Method and Photoelasticity for Solid Mechanics Application," *Proceedings of the 18th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, MENETT, CST25 (In Thai).

2. Pinit, P., 2009, "Development of Windows-based Program for Analysis and Visualization of Two-dimensional Stress Field in Digital Photoelasticity," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 31, pp. 205-212.

3. Ramesh, K., 2000, *Digital Photoelasticity : Advanced Techniques and Applications*, Springer, Germany, p.12.

4. Pinit, P., 2552, "Overview of Photoelasticity and Digital Photoelasticity," *KKU Engineering Journal*, 36 (3), pp. 195-203 (In Thai).

5. Singh, S., 1996, *Applied Stress Analysis*, 3rd ed., Khanna Publisher, India, p. 386.

6. Standardization Project for Optical Techniques of Strain Measurement, "Standard Guide to Transmission Photoelasticity," 2005, http://www.opticalstrain.org/TPEA_standardguide.pdf, [cited 2014 Jan 8].

7. Lei, Z., Yun, H. and Kang, Y., 2009, "Automatic Evaluation of Photoelastic Fringe Constant by the Nonlinear Least-squares Method," *Optics and Laser Technology*, 41 (8), pp. 985-989.

8. Pinit, P., 2011, "Photoelastic Simulation towards a Study of a Simply Supported Rectangular Beam Carrying a Central Concentrated Force," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (2), pp. 91-112.

9. Limtrakarn, W., 2005, "Comparison in the Stress Analysis of 2D Solid Mechanics Problems of Finite Element Method and Photoelasticity," *KMUTT Research and Development Journal*, 28 (1), pp. 75-86.

10. Vishay Precision Group, 2011, "Tech Note TN-702-2 : Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress® Method," http://www.vishaypg.com/docs/11212/11212__tn.pdf, [cited 2014 Jan 8].

11. Vishay Precision Group, 2011, "Tech Note TN-704-2: How to Select Photoelastic Coatings," http://www.vishaypg.com/docs/11213/_11213__t.pdf, [cited 2014 Jan 8].

