

โพลาริสโคปขนาดกะทัดรัด แบบตั้งโต๊ะ: การออกแบบ และ การประเมิน

พิเชษฐ์ พิณิจ* ทองสุข หน่ายโย และ ธีระวุฒิ ป้อมสุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10140

E-mail: pichet.pin@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

โพลาริสโคปเป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่สำคัญอันหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาทางด้านโพโตออปติกส์ดี (เชิงเลข) โพลาริสโคปเปิดเผยให้เห็นภาพสนามความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุภายใต้การกระทำของแรงภายนอกได้โดยง่าย บทความนี้นำเสนอการสร้างโพลาริสโคปแบบส่องผ่านใช้แสงโพลาไรซ์ระนาบเพื่อประโยชน์ทางการเรียนการสอนในรายวิชาที่เกี่ยวข้อง เช่น กลศาสตร์วัสดุ (ขั้นสูง), ทฤษฎีความยืดหยุ่น และโพโตออปติกส์ดี โพลาริสโคปนี้ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงสีขาวที่ได้จากหลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) และจอภาพแอลซีดี, ตัวแบบ, แผ่นโพลาไรซ์ และแผ่นวิเคราะห์ นอกจากนี้โพลาริสโคปยังมีขนาดกะทัดรัดและใช้งานได้ง่ายบนโต๊ะในห้องเรียนหรือห้องทดลอง ผลการประเมินคุณภาพการใช้งานในแง่ของการแสดงภาพสนามความเค้นที่สามารถมองเห็นหรือบันทึกได้เมื่อเทียบกับโพลาริสโคปมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยพบว่า โพลาริสโคปที่สร้างขึ้นสามารถแสดงภาพสนามความเค้นออกมาได้ในระดับที่น่าพอใจ นอกจากนี้ผลการประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญและการประเมินความพึงพอใจจากผู้เรียน 25 คน แสดงให้เห็นว่า ชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้นมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดี และผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อชุดโพลาริสโคปอยู่ในเกณฑ์ดี

คำสืบค้น

โพลาริสโคปแบบใช้แสงโพลาไรซ์ระนาบ โพโตออปติกส์ดี (เชิงเลข) ภาพสนามความเค้น

A COMPACT TABLE-TOP POLARISCOPE: DESIGN AND EVALUATION

Pichet Pinit* Thongsuk Naiyo and Theerawoot Pomsuwan

Department of Mechanical Technology Education
Faculty of Industrial Education and Technology
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bangkok, Thailand 10140

E-mail: pichet.pin@kmutt.ac.th

ABSTRACT

A polariscope is important equipment in the study of (digital) photoelasticity. It visually explores the stress field of a body under an external force. This paper presents a construction of a plane polariscope to enhance students' learning in relevant course such as (advanced) mechanics of materials, theory of elasticity, photoelasticity, and other related topics to the stress. The developed polariscope is compact and consists of monochromatic and white light sources: light emitting diode (LED) and computer monitor (LCD type), photoelastic model, polarizer and analyzer. It works simply on the table in classroom or laboratory. Qualitative comparison between the images of stress field given from the developed polariscope and those from the standard one is of acceptability. Further, results of quality evaluation from 4 experts and satisfactory evaluation from 25 participants reveal that the polariscope has overall good quality and participants are satisfactory.

KEYWORDS

plane polariscope, (digital) photoelasticity, image of stress field

I. บทนำ

การศึกษาในสาขากลศาสตร์ประยุกต์ (applied mechanics) ที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นถือเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนทางกลอื่นใด กลศาสตร์ประยุกต์สามารถแบ่งออกได้สามสาขาย่อย คือ วิเคราะห์ความเค้นเชิงวิเคราะห์หรือเชิงทฤษฎี (analytical stress analysis), วิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลอง (experimental stress analysis), และ วิเคราะห์ความเค้นเชิงตัวเลขหรือเชิงคำนวณ (numerical or computational stress analysis) ทั้งสามสาขาย่อยเป็นวิธีการที่เสริมซึ่งกันและกัน (complementary methods) เพื่อการยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์ (data validation) ที่ได้ [1]

ในสามสาขาดังกล่าวนี้ การวิเคราะห์ความเค้นเชิงวิเคราะห์และเชิงทดลองเป็นสาขาที่เกิดขึ้นมาก่อนการวิเคราะห์ความเค้นเชิงตัวเลข [2] การวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลองถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการตรวจสอบผลลัพธ์ทั้งนี้เนื่องด้วยการทดลองจะกระทำบนพื้นฐานของสภาวะจริง ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือภายใต้ข้อจำกัดในเรื่องของความผิดพลาดในการทดลอง (experimental error) มีการประดิษฐ์วิธีการแก้ปัญหาขึ้นหลายวิธีการภายใต้สาขาการวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลอง ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของวิธีการเชิงทดลองแบบใช้เกจวัดความเครียดและไฟโตออลาสติกซิตี

จากตารางที่ 1 เราจะเห็นได้ว่า วิธีการไฟโตออลาสติกซิตีเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการวิเคราะห์ความเค้น ซึ่งเป็นผลให้มันมีนักวิจัยหลายๆ ท่านได้ศึกษาถึงปัญหาและการประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในเชิงลึก [3] การศึกษาดังกล่าวได้นำไปสู่การสร้างโพลาริสโคปเพื่อการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม [4] - [5] ภายใต้ชื่อทางการค้า 'โพลาริสโคปแบบสนามสีเทา' (gray-field polariscope) ที่ผลิตโดยบริษัท Stress Photonics

ตารางที่ 1

ตัวอย่างวิธีการในวิธี
วิเคราะห์ความเค้น
เชิงทดลอง รวมทั้งจุดเด่น
และจุดด้อยของแต่ละ
วิธีการ

วิธีการ	จุดเด่น	จุดด้อย
เกจวัดความเครียด	<ol style="list-style-type: none"> 1. ให้ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปแปลความหมายได้โดยตรง 2. มีให้เลือกใช้หลายรูปแบบและหลายขนาดความยาวเกจ ซึ่งทำให้ประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง 3. มีราคาถูก 4. สามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งแบบเชิงสถิตและเชิงพลวัต 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นวิธีการเชิงจุด 2. ต้องติดตั้งชิ้นงานโดยตรงเพื่อการทำนายสภาวะความเค้นและความเครียด และค่าความเครียดที่วัดได้เป็นของจุดที่วัดที่ผิวชิ้นงานเท่านั้น 3. ให้ค่าความเครียดที่ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเกจและต้องใช้ควบคู่กับอุปกรณ์อ่านหรือบันทึกค่าความเครียดซึ่งมีราคาสูง
ไฟโตออลาสติกซิตี	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นวิธีการเชิงสนาม* 2. แสดงภาพสนามความเค้นที่สัมพันธ์กับผลต่างของความเค้นหลัก ($\sigma_1 - \sigma_2$) และทิศทางความเค้นหลัก θ ได้โดยง่าย 3. สามารถใช้ศึกษาปัญหา 3 มิติ 4. สามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งแบบเชิงสถิตและเชิงพลวัต 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องอาศัยตัวแบบ และจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นหากเป็นตัวแบบรูปทรง 3 มิติ† 2. ต้องอาศัยการคำนวณที่ซับซ้อนเมื่อต้องการแยกความเค้นหลักออกจากกัน 3. ต้องใช้เครื่องมือและ/หรืออุปกรณ์ที่มีราคาสูงหากต้องการวิเคราะห์งานที่มีขนาดใหญ่ (full-scale analysis) ให้มีความเที่ยงตรงสูง

* เป็นจุดเด่นที่ทำให้ไฟโตออลาสติกซิตีเป็นที่นิยมใช้มาจนถึงปัจจุบัน

† ด้วยเทคโนโลยีทางการทำต้นแบบรวดเร็ว (rapid prototyping) จะช่วยให้การทำตัวแบบ 3 มิติเป็นไปได้โดยง่าย ซึ่งก็จะช่วยเพิ่มศักยภาพของไฟโตออลาสติกซิตี [6]

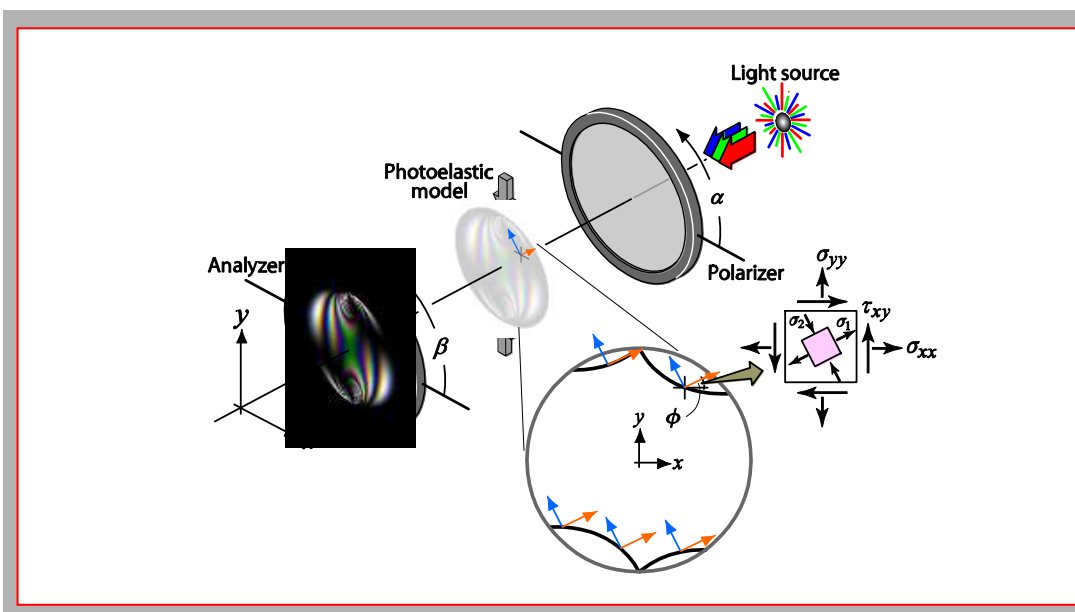
หากพิจารณาในด้านการส่งเสริมการเรียนรู้ให้แก่ผู้เรียนแล้ว การจัดซื้ออุปกรณ์จากบริษัทผู้ผลิตดังกล่าวข้างต้น จำเป็นต้องใช้งบประมาณที่ค่อนข้างสูงและไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุน หากไม่นำไปใช้งานเพื่อการวิจัยด้วยอีกทางหนึ่ง

เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการทางด้านการเรียนการสอนในรายวิชาที่มีความเกี่ยวข้องกับความเค้นและความเครียด คณิต เอลยจรรยา [7] จึงได้สร้างชุดโพลาริสโคปเพื่อใช้ในงานสอนในรายวิชาชั้นส่วนเครื่องจักรกล ชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนได้จริง แต่มีขนาดค่อนข้างใหญ่และมีน้ำหนักมากจึงไม่เหมาะสมต่อการเคลื่อนย้าย จากข้อจำกัดดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะสร้างชุดโพลาริสโคปที่มีขนาดกะทัดรัด, สามารถทำงานได้ง่ายบนโต๊ะ และให้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการทำความเข้าใจแก่ผู้เรียนในเรื่องของสนามความเค้น

II. โครงสร้างของโพลาริสโคปแบบใช้แสงโพลาไรซ์ระนาบ

โพลาริสโคปแบบ โพลาริซ์ระนาบเป็นโพลาริสโคปอย่างง่าย ที่ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง (light source) แผ่นโพลาริซ์ (polarizer) และแผ่นวิเคราะห์ (analyzer) ในการใช้งาน เราจะนำตัวแบบ (model) ไปวางหรือติดตั้งไว้ระหว่างแผ่นโพลาริซ์และแผ่นวิเคราะห์ เมื่อใส่แสงให้กับตัวแบบนั้นแล้วก็จะทำให้เกิดภาพสนามความเค้น โดยที่เราสามารถมองเห็นได้ผ่านแผ่นวิเคราะห์ (รูปที่ 1)

ภาพสนามความเค้นที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยริ้วที่แสดงขนาดของผลต่างความเค้นหลัก ($\sigma_1 - \sigma_2$) และทิศทางของความเค้น θ ริ้วลักษณะแรกมีชื่อเรียกว่า ริ้วไอโซโครมาติก (isochromatic fringe) ซึ่งจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงภายนอกที่มากระทำต่อตัวแบบและจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ ส่วนริ้วลักษณะที่สองนั้นมีชื่อเรียกว่า ริ้วไอโซคลินิก (isoclinic fringe) ซึ่งจะสัมพันธ์กับทิศทางของความเค้นหลักหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ทิศทางของแกนทัศน (optical axis) ของแผ่นโพลาริซ์และแผ่นวิเคราะห์ ดังนั้น ริ้วไอโซคลินิกจะเปลี่ยนตำแหน่งไปตามทิศทางของแกนทัศนดังกล่าวข้างต้น ผู้อ่านสามารถค้นคว้ารายละเอียดเกี่ยวกับโฟโตอิลาสติกซิตีเพิ่มเติมได้ที่ [8]



รูปที่ 1

ภาพกราฟิกของโพลาริสโคปแบบแสงโพลาไรซ์ พร้อมทั้งตัวแบบภายใต้การกระทำของแรงกด โดยที่ α และ β คือมุมระหว่างแกนแสงของโพลาไรซ์และแผ่นวิเคราะห์กับแนวแกน x

III. การออกแบบและสร้างโพลาริสโคป

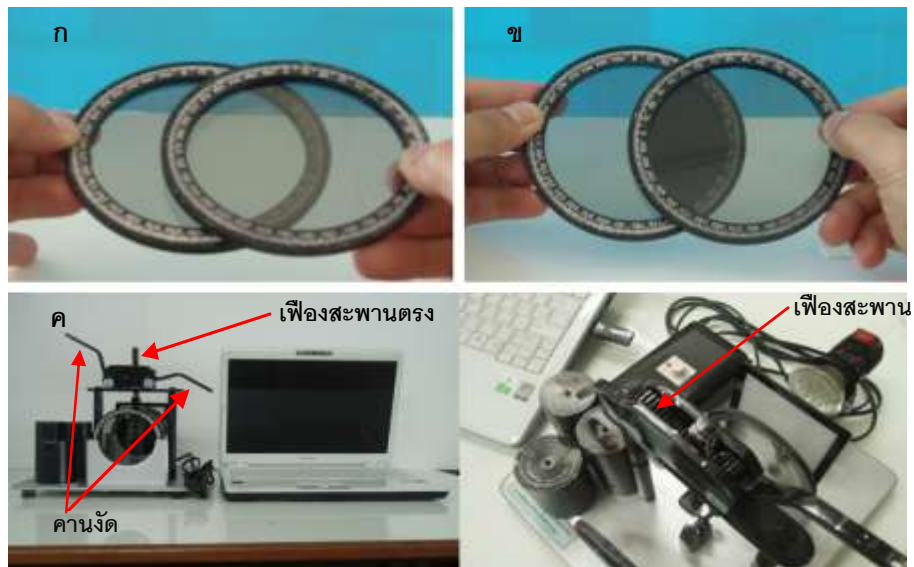
ส่วนสำคัญที่ต้องออกแบบและสร้างก็คือ ชุดยึดแผ่นโพลาลอยด์ (แผ่นโพลาไรซ์และแผ่นวิเคราะห์) แหล่งกำเนิดแสง และชุดใส่ภาชนะให้แก่ตัวแบบ (loading frame) ชุดยึดแผ่นโพลาลอยด์จะต้องมีกลไกที่ทำให้เกิดการหมุนของแผ่นโพลาลอยด์ได้อย่างอิสระ ทั้งนี้เพื่อให้แกนทัศนของแผ่นโพลาลอยด์เปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมได้สะดวก โดยที่ค่าตำแหน่งเชิงมุมที่เปลี่ยนไปสามารถอ่านได้จากสเกล รูปที่ 2 แสดงแผ่นโพลาลอยด์ที่ใส่อยู่ในกรอบวงกลมพร้อมด้วยสเกลอ่านค่ามุม หากแกนทัศนของแผ่นโพลาลอยด์ทั้งสองขนานกัน เราจะสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ (รูปที่ 2ก) อย่างไรก็ตาม หากแกนทัศนตั้งฉากกันแล้วเราก็จะไม่สามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ (รูปที่ 2ข) โพลาริสโคปที่สร้างขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ยี่ห้อ TOSHIBA รุ่น PORTÉGÉ M800 (รูปที่ 2ค)

การสร้างชุดใส่ภาชนะให้ตัวแบบนี้จะอาศัยหลักการของคานงัด กล่าวคือ เมื่อเราใส่ตุ้มน้ำหนักที่ปลายของคานงัดก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของปลายคานอีกด้านหนึ่งที่ถูกเชื่อมติดแบบถาวรกับเฟืองพินเนียน (pinion) ซึ่งขบอยู่กับเฟืองสะพานตรง (rack) ที่เป็นแกนเดียวกับแกนที่ใช้ดึงหรือกดตัวแบบอีกทอดหนึ่ง ขนาดของแรงจริงที่กระทำต่อตัวแบบจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของตุ้มน้ำหนักและความยาวของคานงัด (รูปที่ 2ค) ในที่นี้ใช้อัตราทดของเฟืองซึ่งทำให้ขนาดของแรงจริงเท่ากับสี่เท่าของขนาดของตุ้มน้ำหนักเมื่อคานงัดอยู่ในแนวระดับ

แหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้ให้ทำงานร่วมกับชุดโพลาริสโคปมี 2 แหล่ง คือ (1) แหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากหลอดไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode, LED) จำนวน 20 หลอด ที่มีขนาดกำลังไฟารวม 3 วัตต์ (รูปที่ 3ก) และ (2) แหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากจอภาพแอลซีดี (liquid crystal display, LCD, monitor) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (รูปที่ 3ข) โดยที่แหล่งกำเนิดแสงทั้งสองเป็นแสงสีขาว (white light) สำหรับหลอดไดโอดเปล่งแสงนั้นสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป ฟังสังเกตว่า การใช้จอภาพแบบแอลซีดีเป็นแหล่งกำเนิดแสงทำให้ผู้เรียนสามารถเปลี่ยนสีได้โดยง่ายตามความต้องการ โดยการเปลี่ยนสีฉากหลังของจอภาพ ซึ่งจะช่วยให้ผู้เรียนได้เห็นภาพสนามความเค้นภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่หลายหลาย ทั้งนี้การใช้จอภาพแอลซีดีจะทำให้ได้ภาพสนามความเค้นที่มีความสม่ำเสมอของริ้วสีดีกว่าภาพสนามความเค้นที่ได้จากการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสง เนื่องจากแสงที่ได้จากจอภาพแอลซีดีมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอดีกว่า

รูปที่ 2

(ก) แผ่นโพลาลอยด์
เมื่อแกนทัศนขนานกัน
($0^\circ - 0^\circ$)
(ข) แผ่นโพลาลอยด์
เมื่อแกนทัศนตั้งฉากกัน
($0^\circ - 90^\circ$) และ
(ค) โพลาริสโคปที่สร้างขึ้น
พร้อมกล่อง และเมื่อวาง
เทียบกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล





รูปที่ 3
แหล่งกำเนิดแสง
(ก) ไดโอดเปล่งแสง
(ข) จอภาพแบบแอลซีดี
ของเครื่องคอมพิวเตอร์
ส่วนบุคคล

เนื่องจากขนาดกรอบกลมของหลอดไฟเล็กกว่าขนาดของแผ่นโพลารอยด์ เมื่อนำชุดโพลาริซโคปไปใช้งานจะทำให้เกิดการรวมจุดของแสงบนชิ้นทดลองและส่งผลให้รู้ความเค้นมีสว่างเฉพาะจุด ดังนั้นภาพที่เรามองเห็นหรือบันทึกได้จึงมีความสว่างไม่เท่ากัน เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ภาวะสีอิ่มตัว (situation of saturated color) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการบินที่ภาพด้วยกล้อง กล่าวคือ หากบริเวณใดมีความสว่างมากจะทำให้เกิดการรวมตัวของคลื่นแสงและทำให้ได้ภาพที่รู้สนามความเค้นที่ผิดเพี้ยนไป ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้กระจกเกลี่ยแสง (ground glass) หรือวัสดุอื่นใดที่คุณลักษณะใกล้เคียง วางคั่นไว้ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและแผ่นโพลาริซ (ดูรูปที่ 3ก)

IV. การประเมินชุดโพลาริซโคป

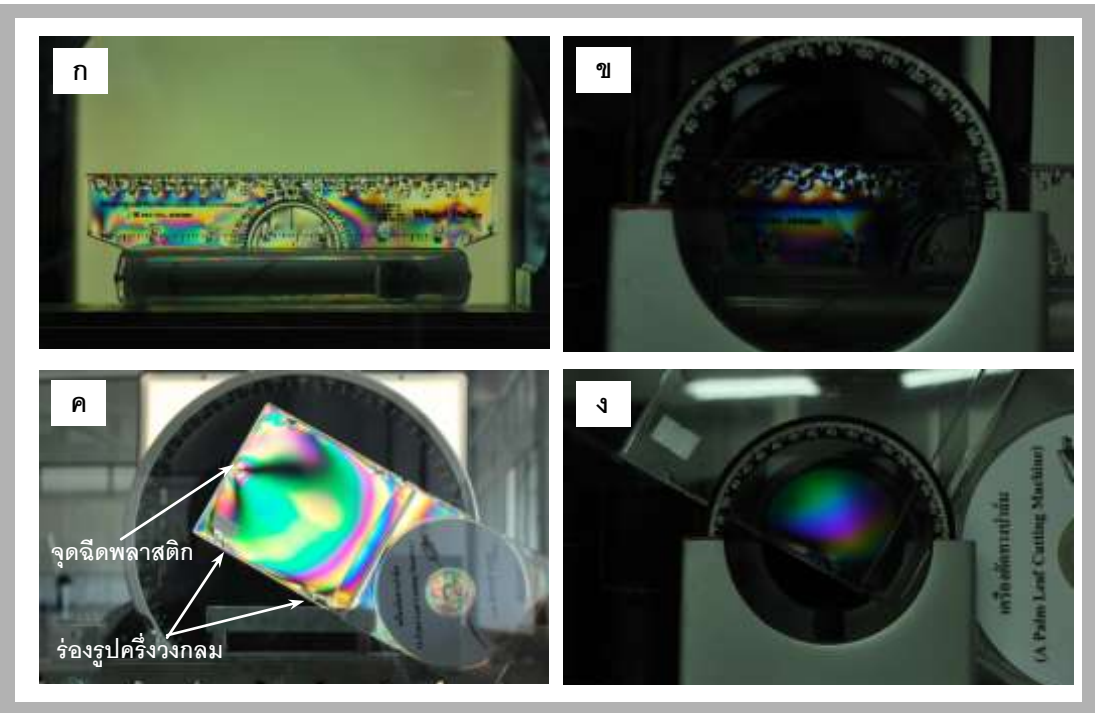
ผู้วิจัยประเมินคุณภาพของชุดโพลาริซโคปที่สร้างขึ้นโดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่สอนอยู่ในสาขาทางด้านกลศาสตร์ประยุกต์ และประเมินความพึงพอใจของผู้เรียนต่อชุดโพลาริซโคป นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ประเมินศักยภาพของชุดโพลาริซโคปโดยอาศัยการเปรียบเทียบลักษณะของภาพรู้สนามความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดลองซึ่งบันทึกได้จากชุดโพลาริซโคปดังกล่าวกับชุดโพลาริซโคปมาตรฐานที่ภาควิชาฯ ได้จัดซื้อมาใช้ประโยชน์ทางการเรียนการสอนและการวิจัย สำหรับรายละเอียดในการประเมินมีดังนี้

4.1 ภาพสนามความเค้นตกค้าง

รูปที่ 4 แสดงภาพสนามความเค้นที่ตกค้างอยู่ในไม้บรรทัดพลาสติกและกล่องพลาสติกใส่แผ่นซีดีที่มีลักษณะริ้วสีแตกต่างกันไปที่บันทึกไว้ด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล DSLR Nikon D60 ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันของพลาสติกหลังจากการฉีดเข้าสู่แบบหล่อ (mold) และปล่อยให้เย็นตัวลง รูปภาพในสดมภ์ทางด้านซ้ายมือเป็นภาพสนามความเค้นตกค้างที่บันทึกได้โดยอาศัยชุดโพลาริซโคปมาตรฐาน ในขณะที่ภาพในสดมภ์ทางด้านขวามือเป็นภาพที่บันทึกได้โดยอาศัยชุดโพลาริซโคปที่สร้างขึ้น จากการสังเกตภาพสนามความเค้น เราจะเห็นได้ว่า ภาพสนามความเค้นทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันมากในด้านของรูปร่างและลักษณะของริ้ว อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อแตกต่างกันอยู่ อาทิเช่น (1) ภาพสนามความเค้นที่บันทึกได้จากชุดโพลาริซโคปที่สร้างขึ้นจะแสดงให้เห็นเฉพาะส่วนทั้งนี้ก็เพราะว่า แผ่นโพลารอยด์ในชุดโพลาริซโคปที่สร้างขึ้นนั้นมีขนาดเล็กกว่าแผ่นโพลารอยด์ในชุดโพลาริซโคปมาตรฐาน (2) ความลาดชันของเฉดสี (color gradients) ทั้งนี้เนื่องด้วย ความยาวคลื่นของแสงองค์ประกอบและกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงสีขาวของชุดโพลาริซโคปทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน และ (3) ช่วงเวลาในการถ่ายภาพ กล่าวคือ รูปที่ 4ค ซึ่งถ่ายไว้ตอนกลางวัน จะได้รับอิทธิพลของแสงธรรมชาติเข้ามายังกล้องถ่ายภาพจนทำให้เกิดภาวะสีอิ่มตัว ในขณะที่รูปที่ 4ง ซึ่งได้ถ่ายไว้ตอนพลบค่ำจะได้รับอิทธิพลของแสงธรรมชาติน้อยกว่า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ภาพสนามความเค้นดังกล่าวแสดงให้เห็น

รูปที่ 4

สนามความเค้นที่บันทึกได้ด้วยกล้องถ่ายภาพเชิงเลขโดยอาศัยชุดโพลาไรสโคปมาตรฐาน (สดมภ์ซ้าย) และ ชุดโพลาไรสโคปที่สร้างขึ้น (สดมภ์ขวา) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสีขาว



เห็นว่า ชุดโพลาไรสโคปที่สร้างขึ้นใช้งานได้จริง อีกทั้งขนาดและรูปร่างโดยรวมของชุดโพลาไรสโคปก็เป็นไปตามมโนทัศน์ที่ได้กำหนดไว้และมีความเหมาะสมต่อการใช้ประกอบการสอนในห้องเรียน อันจะเป็นการส่งเสริมกิจกรรมของผู้เรียน

พิจารณาบริเวณที่มีรูของไม้บรรทัด เราก็จะพบว่า ความเค้นจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือ รังสีมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งในลักษณะของรูปร่าง โดยที่ความลาดชันของเขตสีดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์โดยตรงกับขนาดผลต่างของความเค้นหลัก ($\sigma_1 - \sigma_2$) [8] นอกจากนี้การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของรังสีจะสอดคล้องกับหลักการออกแบบทางด้านรูปร่างเพื่อการลดความหนาแน่นของความเค้น ลดน้ำหนัก และลดปริมาตรของวัสดุที่ใช้ [9]

พิจารณาภาพสนามความเค้นของกล่องพลาสติกใส่แผ่นซีดี เราก็จะเห็นได้ว่า เกิดความหนาแน่นของความเค้นตกค้างในปริมาณที่สูง ณ บริเวณขอบกล่อง โดยเฉพาะจุดที่มีการหล่อให้มีร่องรูปครึ่งวงกลมสำหรับการใส่แผ่นกระดาษ ส่วนบริเวณอื่นที่ห่างออกไป สนามความเค้นค่อนข้างราบเรียบซึ่งแสดงบ่งบอกถึงระดับของความเค้นตกค้างที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ เรายังเห็นจุดยึดพลาสติกเข้าไปในแบบที่บริเวณกึ่งกลางขอบทางด้านซ้ายมือ (รูปที่ 4ค) ซึ่งจะเกิดความเค้นสูงมาก อย่างไรก็ตาม เราสามารถเห็นภาพลักษณะนี้ได้เช่นกันด้วยชุดโพลาไรสโคปที่สร้างขึ้น แต่ผู้วิจัยไม่ได้แสดงภาพในที่นี้

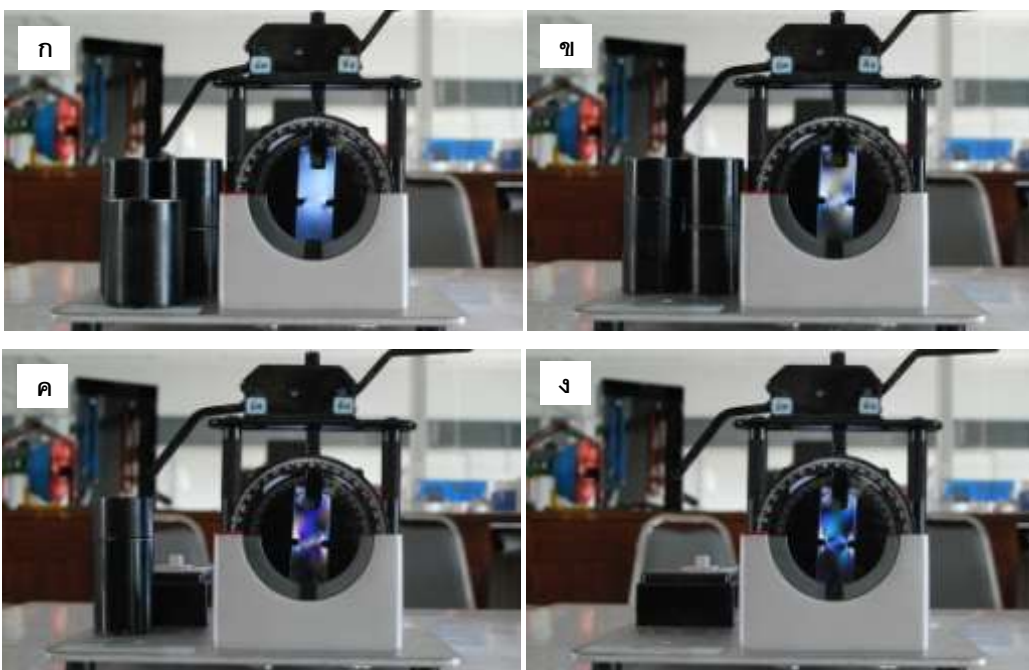
การใช้แผ่นโพลารอยด์ขนาดใหญ่ทำให้เรามองเห็นภาพสนามความเค้นทั่วทั้งชิ้นงาน หากเราสังเกตรูปที่ 4ค อีกครั้ง เราสามารถเห็นพฤติกรรมการไหลของพลาสติกเหลวขณะที่ถูกฉีดเข้าไปในแบบโดยพิจารณาลักษณะอาณาบริเวณกว้างที่เป็นสีเขียวและรังสีชมพู จากภาพจะเห็นได้ว่า พลาสติกเหลวจะเริ่มไหลจากจุดฉีดและกระจายตัวออกไปรอบด้าน แต่เนื่องจากแบบมีลักษณะเป็นสีเขียวล้อมรอบจึงทำให้พลาสติกเหลวที่อยู่ด้านนอกสัมผัสกับขอบของแบบหล่อด้านบนและล่างเร็วกว่าพลาสติกเหลวที่อยู่ตรงกลาง ลักษณะเช่นนี้จะคล้ายคลึงกับการไหลของของเหลวภายในท่อ ดังนั้นเราจึงเห็นพลาสติกเหลวบริเวณที่เป็นสีเขียวแสดงรูปร่างออกมาคล้ายการแพร่ของคลื่นโดยรังสีชมพูเคลื่อนที่นำหน้า

4.2 ภาพสนามความเค้นในวัตถุภายใต้แรงกระทำภายนอก

นอกเหนือจากความเค้นตกค้างที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุแล้ว เมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงภายนอกก็จะทำให้เกิดความเค้นที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความเค้นตกค้าง รูปที่ 5 และ 6 แสดงภาพสนามความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวแบบที่มีร่องบากมนเมื่อได้รับแรงดึงที่ขนาดต่างๆ กันในแนวแกน โดยรูปที่ 5 ได้มาจากการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นหลอดไดโอดเปล่งแสง (ดูรูปที่ 3ก ประกอบ) และรูปที่ 6 ได้มาจากการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจอภาพแอลซีดี (ดูรูปที่ 3ข ประกอบ)

พิจารณารูปที่ 5ก เราจะพบว่า มีความเค้นตกค้างเล็กน้อยในเนื้อวัสดุ ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการสร้างตัวแบบ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับภาพสนามความเค้นตกค้างในรูปที่ 4 เมื่อเราเพิ่มขนาดแรงดึง สนามความเค้นก็จะเปลี่ยนไปโดยมีริ้วสีมากยิ่งขึ้น ยิ่งเราเพิ่มแรงดึงมากขึ้น ยิ่งใด การเปลี่ยนแปลงของริ้วสีก็จะมีมากขึ้นเพียงนั้น (รูปที่ 5ข – 5ง) นอกจากนี้ บริเวณที่เป็นร่องบากโค้งมน ความเค้นจะมีความหนาแน่นมากและลักษณะเช่นนี้จะนำไปสู่สมโนทัศน์เกี่ยวกับตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้น จากการพิจารณารูปที่ 6 จะพบว่า ภาพสนามความเค้นมีความคล้ายคลึงกับภาพสนามความเค้นในรูปที่ 5 มาก อย่างไรก็ตาม ความสว่างของภาพความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากว่า ความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองนั้นมีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนี้เนื่องจากว่า จอภาพแอลซีดีมีขนาดใหญ่จึงทำให้มีแสงผ่านเข้ามายังแผ่นวิเคราะห์โดยตรงโดยไม่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์จึงเป็นผลให้สนามความเค้นโดยรวมมีความสว่างมากกว่า

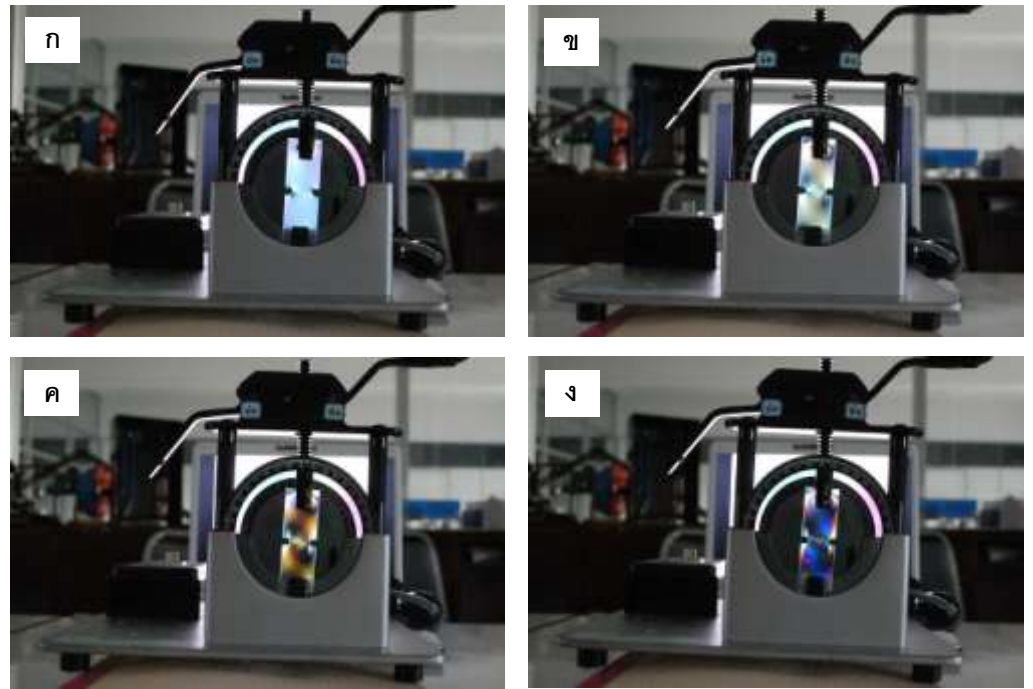
พิจารณารูปที่ 5 และ 6 อีกครั้ง เราจะพบว่า มีความไม่สมมาตรของสนามความเค้นเกิดขึ้นใกล้กับร่องบากโค้งมน โดยลักษณะทางธรรมชาติของปัญหานี้ สนามความเค้นที่เกิดขึ้นจะต้องมีความสมมาตร กล่าวคือ การเกิดขึ้นและลำดับของริ้วสีจะต้องเหมือนกัน ณ บริเวณร่องบาก การเยื้องศูนย์ของปากจับชิ้นงานตัวบนและตัวล่างเป็นสาเหตุสำคัญของความไม่สมมาตรดังกล่าว การเยื้องศูนย์นี้เป็นผลให้เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นในตัวแบบ ผลของโมเมนต์ดัดจะทำให้สภาวะความเค้นจากความเค้นในแนวแกนเดี่ยวกลายเป็นความเค้นผสม



รูปที่ 5
ภาพสนาม ความเค้นที่
เกิดขึ้นในตัวแบบที่มีร่อง
บากโค้งมน (rounded
notch) ตามขนาดแรงดึง
(ก) 0.00 N (ข) 9.81 N
(ค) 19.6 N และ (ง) 29.4
N โดยที่แหล่งกำเนิดแสง
เป็นหลอด
ไดโอดเปล่งแสง

รูปที่ 6

ภาพสนาม ความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวแบบที่มีร่องบากโค้งมน (rounded notch) ตามขนาดแรงดึง (ก) 0.00 N (ข) 9.81 N (ค) 19.6 N และ (ง) 29.4 N โดยที่ แหล่งกำเนิดแสงเป็นจอภาพแอลซีดีของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนบุคคล



4.3 การประเมินชุดโพลาริสโคป

4.3.1 การประเมินคุณภาพ

หลังจากได้ทดลองใช้งานชุดโพลาริสโคปในเบื้องต้นแล้ว ผู้วิจัยได้นำไปให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 4 ท่าน ประเมินหาคุณภาพ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 พิจารณาข้อมูลในตารางที่ 1 จะพบว่าชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้นมีค่าเฉลี่ยในแต่ละด้านดังนี้

- ด้านรูปลักษณะและการออกแบบชุดสาธิตโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.15$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี
 - ด้านความปลอดภัยการใช้งานโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.00$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี
 - ด้านความสะดวกต่อการใช้ชุดทดลองโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.16$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี
 - ด้านการประยุกต์การใช้งานโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.50$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดีมาก
- โดยที่มีค่าเฉลี่ยรวม $\bar{x} = 4.18$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี

ในส่วนของข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ สามารถแยกสรุปเป็นรายชื่อได้ดังนี้

- ควรปรับปรุงโครงสร้างการให้ภาระเพื่อจัดการเบื้องต้นของปากจับชิ้นงาน
- ควรดัดแปลงโครงสร้างเพื่อการติดตั้งอุปกรณ์อ่านค่าแรงแบบตัวเลขเพิ่มเติม
- ควรสร้างบทเรียนทางคอมพิวเตอร์เพื่อให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีควบคู่กันไป

4.3.2 การประเมินความพึงพอใจ

หลังจากผู้เชี่ยวชาญได้ประเมินคุณภาพแล้ว ผู้วิจัยได้นำชุดโพลาริสโคปไปให้ผู้เรียนที่ได้ผ่านการเรียนในรายวิชาการศาสตร์ของแข็ง ซึ่งเป็นนักศึกษาของภาควิชา จำนวน 25 คน ประเมินความพึงพอใจจากการใช้งานชุดโพลาริสโคป ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 2 พิจารณาข้อมูลในตารางที่ 2 จะพบว่า ผลการประเมินชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้นมีค่าเฉลี่ยในแต่ละด้านดังนี้

- ด้านรูปลักษณะและการออกแบบชุดสาธิตโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.36$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี
- ด้านความปลอดภัยการใช้งานโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.46$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี

หัวข้อสำหรับการประเมิน	ระดับความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญ	
	\bar{x}	เกณฑ์
1. รูปลักษณ์และการออกแบบชุดสาธิต		
1.1 โครงสร้างชุดสาธิต	4.00	ดี
1.2 การจัดวางอุปกรณ์ชุดสาธิต	4.00	ดี
1.3 ความดึงดูดความสนใจในชุดสาธิต	4.25	ดี
1.4 ความชัดเจนของตัวอักษรต่างๆ ในชุดสาธิต	4.50	ดีมาก
1.5 ภาพลักษณ์โดยรวมของชุดสาธิต	4.00	ดี
เฉลี่ย	4.15	ดี
2. ความปลอดภัยการใช้งาน		
2.1 ความปลอดภัยในขณะทดลอง	4.00	ดี
2.2 ความปลอดภัยในเครื่องมือชุดทดลอง	4.00	ดี
เฉลี่ย	4.00	ดี
3. ความสะดวกต่อการใช้ชุดทดลอง		
3.1 ความสะดวกต่อการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง	4.25	ดี
3.2 ความสะดวกต่อการทดลอง	4.00	ดี
3.3 ความสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและติดตั้งชุดทดลอง	4.25	ดี
เฉลี่ย	4.16	ดี
4. การประยุกต์การใช้งาน		
4.1 การค้นคว้าต่อยอดความรู้	4.50	ดีมาก
4.2 การนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของความเค็มที่เกิดขึ้นได้จริง	4.50	ดีมาก
เฉลี่ย	4.50	ดีมาก
เฉลี่ยรวม	4.18	ดี

ตารางที่ 1

ผลการประเมินคุณภาพ
ชุดโพลาริสโคปจาก
ผู้เชี่ยวชาญ

- ด้านความสะดวกต่อการใช้ชุดทดลองโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.42$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี
 - ด้านการประยุกต์การใช้งานโดยรวมมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.60$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดีมาก
- โดยที่มีค่าเฉลี่ยรวม $\bar{x} = 4.43$ ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดี

ในส่วนของข้อเสนอแนะจากผู้เรียน สามารถแยกสรุปเป็นรายชื่อได้ดังนี้

- ชิ้นงานหรือตัวแบบที่ใช้ในการทดลองมีรอยขีดข่วนที่ผิวหน้ามากเกินไปและยังมีความเค้นตกค้างเหลืออยู่ ซึ่งมองเห็นได้อย่างชัดเจน ลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลต่อผลการทดลองได้ ดังนั้น ควรเลือกใช้ชิ้นงานที่จะนำมาทดลองให้มีความเหมาะสมมากกว่านี้
- แหล่งกำเนิดแสงแบบหลอดไดโอดเปล่งแสงยังให้ความสว่างที่ไม่เพียงพอหากใช้ชุดโพลาริสโคปในห้องที่มีแสงสว่างจากธรรมชาติ ดังนั้น การใช้หลอดที่มีขนาดกำลังไฟฟ้ามมากขึ้น น่าจะทำให้มองเห็นภาพสนามความเค็มได้ชัดเจนยิ่งขึ้น
- เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็ก ส่งผลให้การอ่านค่าแถบสีทำได้ยาก ควรมีแว่นขยายหรือเลนส์ขยายภาพเพื่อที่จะทำให้มองเห็นภาพสนามความเค็มได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 2

ผลการประเมินความพึงพอใจชุดโพลาริสโคปจากผู้เรียน

หัวข้อสำหรับการประเมิน	ระดับความคิดเห็นของผู้เรียน	
	\bar{x}	เกณฑ์
1. รูปลักษณ์และการออกแบบชุดสาธิต		
1.1 โครงสร้างชุดสาธิต	4.40	ดี
1.2 การจัดวางอุปกรณ์ชุดสาธิต	4.52	ดีมาก
1.3 ความดึงดูดความสนใจในชุดสาธิต	4.36	ดี
1.4 ความชัดเจนของตัวอักษรต่างๆ ในชุดสาธิต	4.28	ดี
1.5 ภาพลักษณ์โดยรวมของชุดสาธิต	4.24	ดี
เฉลี่ย	4.36	ดี
2. ความปลอดภัยการใช้งาน		
2.1 ความปลอดภัยในขณะที่ทดลอง	4.48	ดี
2.2 ความปลอดภัยในเครื่องมือชุดทดลอง	4.44	ดี
เฉลี่ย	4.46	ดี
3. ความสะดวกต่อการใช้ชุดทดลอง		
3.1 ความสะดวกต่อการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง	4.40	ดี
3.2 ความสะดวกต่อการทดลอง	4.36	ดี
3.3 ความสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและติดตั้งชุดทดลอง	4.52	ดีมาก
เฉลี่ย	4.42	ดี
4. การประยุกต์การใช้งาน		
4.1 การค้นคว้าต่อยอดความรู้	4.68	ดีมาก
4.2 การนำไปวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นได้จริง	4.52	ดีมาก
เฉลี่ย	4.60	ดีมาก
เฉลี่ยรวม	4.43	ดี

V. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบ สร้าง และประเมินชุดโพลาริสโคปแบบแสงโพลารีไรซ์ระบบ ชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้นสามารถแสดงภาพสนามความเค้นได้ในระดับที่มีความใกล้เคียงหรือคล้ายคลึงกับภาพสนามความเค้นที่ได้จากชุดโพลาริสโคปมาตรฐาน ผลจากการประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญและความพึงพอใจจากผู้เรียนพบว่า ชุดโพลาริสโคปมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดีและผู้เรียนมีความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ดี และสามารถนำไปใช้งานในด้านการเรียนการสอนได้จริง โดยการอาศัยชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้น ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ในทศน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นจากการทดลองจริงด้วยตนเอง เช่น ความหนาแน่นของความเค้น, อิทธิพลของรูปร่างที่มีต่อการกระจายตัวของความเค้น, ความเค้นตกค้าง และอาณาบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด เป็นต้น โดยที่การทดลองที่เกี่ยวกับความเค้นตกค้างนั้น สามารถทดลองได้โดยง่ายจากสิ่งของที่มีใช้ในชีวิตประจำวัน

เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพของชุดโพลาริสโคปที่สร้างขึ้น ในอนาคตผู้วิจัยจะปรับปรุงโดยการเพิ่มแผ่นสี่เหลี่ยม (quarter-wave plate) เข้าไป ซึ่งจะทำให้ลักษณะของแสงที่ใช้ในการแสดงภาพสนามความเค้นเป็นแบบแสงโพลารีไรซ์วงกลมอันจะช่วยให้เห็นภาพสนามความเค้นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น (ริ้วไอโซคลินิกหายไป) นอกจากนี้เนื่องด้วยกลไกในการใส่แรงให้กับชิ้นส่วนหรือตัวแบบยังมีระยะเว้นบวกร (clearance) ที่มากพอสมควร จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนทั้งในเรื่องของค่าของแรงและแนวของแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วน ดังนั้น การปรับปรุงกลไกดังกล่าวจะช่วยให้ชุดโพลาริสโคปมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] พิเชษฐ์ พิณี, ณัฐพงศ์ ภูพันธ์ และ ตติย์ สังข์งาม, “การไหลของความเค้น: การทดสอบด้วยวิธีการสร้างรอยแตกอย่างง่าย,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, เล่มที่ 1 ฉบับที่ 3, หน้า 27-42, 2552.
- [2] E. A. Patterson, “Digital photoelasticity: principles, practice and potential,” *Strain*, vol. 38, no. 1, pp. 27-39, 2002.
- [3] K. Ramesh, *Digital Photoelasticity: Advanced Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [4] G. Calvert, J. R. Lesniak, and M. Honlet, “Application of modern automated photoelasticity to industrial problems,” *Journal of the British Institute of Non-destructive Testing*, vol. 44, no. 4, pp. 224-248, 2002.
- [5] J. R. Lesniak, M. J. Zickel, C. S. Welch, and D. F. Johnson, “An innovative polariscope for photoelastic analysis,” *Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, pp. 219-224, 1997.
- [6] D. E. Karelekas and A. Agelopoulos, “On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations,” *Material and Design*, vol. 27, no. 2, pp. 100-106, 2006.
- [7] คณิต เฉลยจรรยา, “การสร้างชุดสไลด์เพื่อแสดงการไหลของแนวเส้นความเค้นด้วยวิธีโฟโต้ลาสติก,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 7 ฉบับที่ 2, หน้า 14-24, 2540.
- [8] พิเชษฐ์ พิณี, “ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟโตลาสติกซิตีและโฟโตลาสติกซิตีเชิงเลข,” *วิศวกรรมสาร มช*, เล่มที่ 36 ฉบับที่ 3, หน้า 195-203, 2552.
- [9] V. B. Bhandari, *Introduction to Machine Design*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2001.