

การวิเคราะห์ความเค้นในวัสดุโปร่งแสงโดยใช้หลักการ ทัศนศาสตร์ควอนตัมและโฟโตอีลาสติกซิตี

ชวกร พงษ์สิริสมบัติ*, รักดี แก้วผดุง, กิตติศักดิ์ บุญขำ
โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย
*Email: chavakorn.pru_g33@mwit.ac.th

บทคัดย่อ

ความเค้นเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานในทางวิศวกรรมซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงและประสิทธิภาพของวัสดุ ในทางปฏิบัติ ความเค้นมักมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอภายในวัสดุ เทคนิคทั่วไปที่ใช้ในการแสดงภาพและประมาณค่าความเค้นคือ โฟโตอีลาสติกซิตี (Photoelasticity) ซึ่งอาศัยการสังเกตรูปแบบของริ้ว (Fringes pattern) ที่เกิดจากความเค้น อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้มีข้อจำกัดอยู่เพียงในบริเวณที่ปรากฏริ้วและมีความละเอียดค่อนข้างต่ำ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอชุดการทดลองที่ใช้หลักการทัศนศาสตร์ควอนตัมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัดความเค้นในวัสดุโปร่งแสง โดยใช้วัสดุแผ่นพอลิเมทิลเมทาครีเลต (PMMA) ซึ่งแสดงสมบัติการหักเหคู่ (Birefringence) เมื่อได้รับความเค้น และใช้ความต่างเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างสองเส้นทางแสงเป็นฐานในการหาค่าความเค้น นอกจากนี้ยังได้นำคู่โฟตอนพันกัน (Entangled photon pairs) และการนับเหตุการณ์พ้อง (Coincidence counting) มาใช้เพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัดและลดสัญญาณรบกวน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดแรงที่กระทำได้จากกรณีการนับเหตุการณ์พ้องแบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม ระบบยังไม่สามารถให้ค่าความเค้นเชิงปริมาณที่แม่นยำหรือรายละเอียดการกระจายตัวของความเค้นได้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์และข้อจำกัดด้านความละเอียด ซึ่งจำเป็นต้องมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อการใช้งานที่กว้างขวางขึ้น

คำสำคัญ ความเค้น, โฟโตอีลาสติกซิตี (Photoelasticity), การหักเหคู่ (Birefringence), ทัศนศาสตร์ควอนตัม, คู่โฟตอนพันกัน, การนับเหตุการณ์พ้อง

1. บทนำ

ในการปฏิบัติทางวิศวกรรม ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับภาระของวัสดุเพื่อป้องกันการล้มเหลว การแตกหัก หรือการเสียรูปอย่างถาวรจนไม่สามารถใช้งานได้ (Boston University, n.d.) ซึ่งสาเหตุหนึ่งของการล้มเหลวคือการสะสมของความเค้น (Stress concentration) (Corrosionpedia, 2018) ความเค้นสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักได้แก่ ความเค้นอัด (Compressive stress) และความเค้นดึง (Tensile stress) (Olson, n.d.)

การวิเคราะห์ความเค้นสามารถทำได้ผ่านสามแนวทางหลัก คือ การวิเคราะห์เชิงวิเคราะห์ (Analytical) เชิงตัวเลข (Numerical) และเชิงทดลอง (Experimental) ซึ่งการวิเคราะห์เชิงทดลองมักถูกมองว่ามีความแม่นยำและสามารถตีความทางกายภาพได้ดีที่สุด โดยหนึ่งในวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ โฟโตอีลาสติกซิตี (Pinit, 2009) ในปัจจุบัน เทคโนโลยีควอนตัมได้ก้าวเข้ามาเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงอนาคต ด้วยแรงบันดาลใจจากความก้าวหน้าเหล่านี้ (Vanita, n.d.)

การศึกษานี้จึงสำรวจการพัฒนาเครื่องมือทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความเค้นของวัสดุโปร่งใส โดยการผสมผสานศาสตร์ควอนตัมเข้ากับหลักการของโฟโตออสติกซิติ เพื่อเพิ่มความละเอียดและความน่าเชื่อถือในการวัดความเค้นให้ก้าวข้ามข้อจำกัดของเทคนิคแบบเดิม

2. วิธีการดำเนินงาน

1 ชุดอุปกรณ์สร้างความเค้น

เตรียมแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ขนาด $5 \times 50 \times 60$ มม³ เพื่อใช้ในการทดลอง โดยทำการเจาะรูวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม. และ 8 มม. ที่บริเวณส่วนปลายด้านบนและด้านล่างของแผ่นตามลำดับ โดยแต่ละรูวางห่างจากขอบวัสดุ 2 มม. ชิ้นงาน PMMA จะถูกติดตั้งบนฐานอะลูมิเนียมและยึดเข้ากับเซนเซอร์วัดแรงแบบสองช่วง (Dual-Range Force Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการให้แรงดึง จะมีการติดตั้งรอกเข้ากับแขนส่วนบนของโครงอะลูมิเนียม ในขณะที่ส่วนล่างจะติดตั้งเกลียวแรง (Turnbuckle) จากนั้นจะคล้องสายเคเบิลจากเซนเซอร์วัดแรงผ่านรอกเพื่อเชื่อมต่อกับเกลียวแรง เมื่อทำการขันเกลียวแรงให้แน่นขึ้น แรงดึงในสายเคเบิลจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นภายในแผ่น PMMA โดยค่าแรงดึงที่



รูปที่ 1 การสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับวัดความเค้น

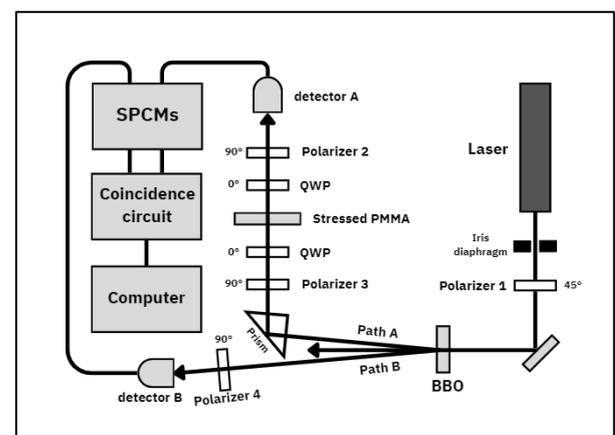
กระทำจะถูกตรวจสอบแบบเรียลไทม์ผ่านเซนเซอร์วัดแรงที่ผ่านการปรับเทียบคาลิเบรตแล้วซึ่งติดตั้งอยู่ในแนวเดียวกับสายเคเบิล

2 ขั้นตอนการทดลอง

ชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้เลเซอร์อุตสาหกรรมติดตั้งบนโต๊ะแสง (Optical table) และให้แสงผ่านไดอะแฟรม (Iris diaphragm) เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากแสงพื้นหลัง ลำแสงจะผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่ 1 ซึ่งปรับมุมไว้ที่ 45 องศา เพื่อสร้างลำแสงโพลาไรซ์ในทิศทางตั้งกล่าว จากนั้นใช้กระจกเงาสท้อนลำแสงเข้าสู่ผลึกเบต้าบาเรียมบอเรต (BBO crystal) ซึ่งผลึก BBO จะทำหน้าที่แบ่งลำแสงออกเป็นสองเส้นทาง โดยแต่ละเส้นทางจะเบี่ยงเบนออกเป็นมุม 3 องศา ผลผลิตที่ได้คือคู่อิพoton พัวพัน (Correlated photon pairs) ที่มีความยาวคลื่น 810 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสองเท่าของความยาวคลื่นเดิม และโฟตอนทั้งสองจะมีสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ

เส้นทางแสงทั้งสองถูกกำหนดให้เป็นเส้นทาง A และเส้นทาง B โดยมีการตั้งค่าผลึก BBO ไว้ที่ 0 องศา เพื่อให้แน่ใจว่าโฟตอนที่ออกมาในทิศทางโพลาไรซ์ที่ 90 องศา

เส้นทาง A (Path A): โฟตอนจะถูกเปลี่ยนทิศทางโดยปริซึมไปยังโพลาไรเซอร์ที่ 2 ซึ่งตั้งค่าไว้ที่ 90 องศา



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง

จากนั้นจะผ่านแผ่นควอเตอร์เวฟ (Quarter-Wave Plate) ที่ 1 ซึ่งตั้งค่าไว้ที่มุม 0 องศา ก่อนจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่น PMMA ในบริเวณที่ต้องการวัดความเค้น หลังจากนั้นโฟตอนจะผ่านแผ่นควอเตอร์เวฟที่ 2 (ตั้งค่าที่มุม 0 องศา) และโพลาริเซอร์ที่ 3 (ตั้งค่าที่มุม 90 องศา) เพื่อรักษาลักษณะโพลาริซ์แบบเส้นตรงที่มุม 90 องศา ก่อนจะถูกเก็บรวบรวมโดยตัวตรวจจับ A (Detector A) ซึ่งเชื่อมต่อกับโมดูลนับโฟตอนเดี่ยว (SPCM) ผ่านสายใยแก้วนำแสง

เส้นทาง B (Path B): โฟตอนจะเคลื่อนที่ผ่านโพลาริเซอร์ที่ 4 (ตั้งค่าที่มุม 90 องศา) และเข้าสู่ตัวตรวจจับ B (Detector B) ซึ่งเชื่อมต่อกับโมดูล SPCM อีกชุดหนึ่ง

โมดูล SPCM ทั้งสองจะเชื่อมต่อเข้ากับวงจรนับเหตุการณ์พ้อง (Coincidence circuit) ซึ่งส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกจำนวนการนับเหตุการณ์พ้อง โดยโมดูล SPCM จะผลิตสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าที่มีความกว้างเชิงเวลาประมาณ 25 นาโนวินาที และวงจรนับเหตุการณ์พ้องจะทำงานภายในหน้าต่างเวลา (Coincidence window) 25 นาโนวินาทีเช่นกัน

ในการทดลองจะเริ่มจากการเปิดเลเซอร์และจัดตำแหน่งอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ทั้งหมดตามที่กำหนดไว้ จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำต่อแผ่น PMMA เริ่มจาก 0 นิวตัน ไปจนถึง 25 นิวตัน โดยเพิ่มขึ้นขั้นละ 5 นิวตัน ในแต่ละระดับของแรง จะทำการบันทึกจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องในช่วงเวลา 10 วินาที จำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นให้ข้อมูลจำนวนการนับเหตุการณ์พ้อง (Coincidence counts) ที่สัมพันธ์กับระดับแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อชิ้นงาน PMMA เพื่อให้เกิดความแม่นยำ จึงได้ทำการบันทึกค่าการวัด 3 ครั้งในแต่ละระดับแรง และคำนวณหา

ค่าเฉลี่ยจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการผันแปรแบบสุ่ม โดยค่าเฉลี่ยเหล่านี้จะใช้เป็นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องและความเค้นที่เกิดขึ้น ถูกสร้างเป็นแบบจำลองโดยพิจารณาจากสมบัติการหักเหคู่ (Birefringence) ของแผ่น PMMA ภายใต้ภาระที่กระทำ เมื่อชิ้นงาน PMMA ได้รับความเค้นทางกล ความต่างเฟสระหว่างแกนเร็ว (Fast axis) และแกนช้า (Slow axis) ของแสงที่ส่องผ่านจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบนี้สะท้อนให้เห็นในจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องที่วัดได้ ซึ่งสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้:

$$N_c = N_p [1 - \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin^2 2\varphi] + N_b \quad (1)$$

เมื่อ N_c แทนจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องที่ได้รับจากตัวตรวจจับ, N_p คือสัญญาณเหตุการณ์พ้องสูงสุด, N_b คือเหตุการณ์พ้องพื้นหลัง (Background coincidence), φ คือมุมที่แกนเร็วและแกนช้าทำกับแกน x และ y , และ δ แทนความต่างเฟสทางแสงที่เกิดจากความเค้น จากนั้นจะสามารถคำนวณหาความเค้นภายในแผ่น PMMA ได้โดยใช้กฎความเค้น-ทัศนศาสตร์ (Stress-optic law):

$$\delta = \frac{2\pi t c}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

เมื่อ $(\sigma_1 - \sigma_2)$ คือความเค้นในชิ้นงาน, t คือความหนาของชิ้นงาน, c คือสัมประสิทธิ์ความเค้น-ทัศนศาสตร์ของ PMMA และ λ คือความยาวคลื่นของโฟตอนพัลส์

เพื่อให้สามารถเชื่อมโยงผลการทดลองเข้ากับคำทำนายทางทฤษฎี ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องจะถูกนำมาปรับพอดี (Fitting) ด้วยแบบจำลองทางตรีโกณมิติ:

$$y = A[1 - \sin^2(Bx + C) \cdot \sin^2(D)] + E \quad (3)$$

เมื่อ x คือแรงที่กระทำ, y คือจำนวนการนับเหตุการณ์ พ้องที่วัดได้, โดยมี A, B, C , และ D เป็นพารามิเตอร์ จากการปรับพอดี้ แบบจำลองนี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ (Periodic modulation) ของ การพ้องของโฟตอนที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการหักเหคู่ที่เกิดจากความเค้น

จากการแทนค่าที่ได้จากการปรับพอดี้ลงในสมการ ที่ (2) จะสามารถประมาณค่าความเค้นที่สัมพันธ์กับ แรงแต่ละระดับได้ ค่าความเค้นที่คำนวณได้นี้จะถูก นำไปเปรียบเทียบกับกราฟกระจายตัวของความเค้นทาง ทฤษฎีตามพารามิเตอร์ของวัสดุ จากนั้นจึงทำการ ตรวจสอบความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและผล ทางทฤษฎี โดยพิจารณาถึงสาเหตุที่เป็นไปได้ เช่น ความละเอียดของอุปกรณ์ (Instrumental resolution), การคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอุปกรณ์ แสง (Optical misalignment) และสัญญาณรบกวนใน การนับโฟตอน

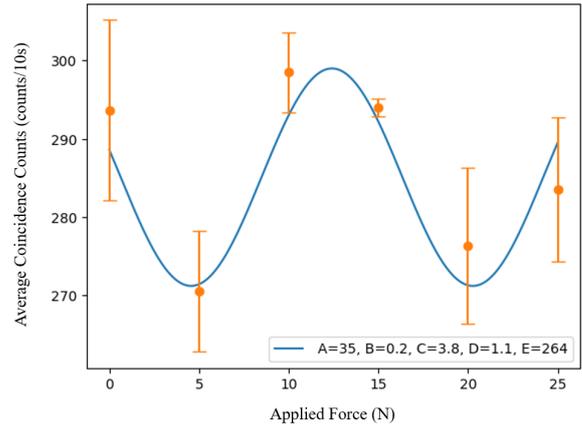
3. ผลและอภิปรายการทดลอง

1 ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลองของจำนวนการนับเหตุการณ์ พ้องภายใต้ระดับแรงต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1 และ รูปที่ 3

แรง (นิวตัน)	ค่าเฉลี่ยจำนวนการนับเหตุการณ์ พ้อง (ครั้งต่อ 10 วินาที)
0	293.7
5	270.5
10	298.5
15	294.5
20	276.3
25	283.5

ตารางที่ 1. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อแผ่น PMMA (นิวตัน) และค่าเฉลี่ยจำนวนการนับเหตุการณ์ พ้อง (ครั้งต่อ 10 วินาที)



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อแผ่น PMMA (นิวตัน) และจำนวนการนับเหตุการณ์ พ้อง ภายใน 10 วินาที (ครั้ง)

สมการที่ได้จากการปรับพอดี้กับกราฟ (Graph fitting) มีดังนี้:

$$y = 35[1 - \sin^2(0.2x + \sin^2(1.1))] + 264 \quad (4)$$

2 การหาค่าความต่างเฟส

ค่าความต่างเฟสคำนวณได้จากการเปรียบเทียบ สมการที่ 1 กับสมการที่ 2 ดังนั้น จึงได้ว่า $0.2x + 3.8 = \frac{\delta}{2}$ ดังนั้น $\delta = 0.4x + 7.6$ เมื่อ δ แทนค่าความต่างเฟส และ x คือแรงที่กระทำ

3. การหาค่าความเค้น (Finding stress value)

ในการคำนวณค่าความเค้น ได้นำค่าความต่างเฟส ไปแทนในสมการที่ 2 เพื่อสร้างสูตรที่อธิบาย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและความเค้นของ วัสดุ: $(\sigma_1 - \sigma_2) = 4.00 \times 10^{-5}x + 7.595 \times 10^{-4}$ เมื่อ $(\sigma_1 - \sigma_2)$ แทนค่าความเค้นของวัสดุ และ x แทน แรงที่กระทำ

กรอบการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าการวัดทาง ทัศนศาสตร์ ควอนตัมโดยใช้เหตุการณ์ พ้อง (Coincidence-based) สามารถนำมาคำนวณเป็นค่า ความเค้นได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นการวางรากฐาน สำหรับการพัฒนาเทคนิคนี้ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นใน อนาคต

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการสาธิตการประยุกต์ใช้การนับโฟตอนแบบเหตุการณ์พ้อง (Coincidence-based photon counting) เพื่อวิเคราะห์ความเค้นในวัสดุโปร่งแสง โดยการใช้โฟตอนพัลส์ที่สร้างจากระบบการ SPDC (Spontaneous Parametric Down-Conversion) ส่งผ่านแผ่น PMMA ที่ได้รับความเค้น ซึ่งทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของจำนวนการนับเหตุการณ์พ้องที่แปรผันตามแรงที่กระทำ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกฎความเค้น-ทัศนศาสตร์ (Stress-optic law) ทำให้สามารถคำนวณผลต่างความเค้นหลัก (Principal stress difference) ภายในชิ้นงานได้

ผลการทดลองยืนยันว่า ค่าผลต่างความเค้นที่คำนวณได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงตามแรงที่กระทำ ซึ่งสอดคล้องกับการทำนายทางทฤษฎี แม้จะพบความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยระหว่างค่าจากการทดลองและค่าทางทฤษฎี แต่ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้มีสาเหตุมาจากข้อจำกัดด้านความละเอียดของเซนเซอร์การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ สัญญาณรบกวนในการนับโฟตอน และความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานชุดอุปกรณ์ที่นำเสนอนี้

เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคโพโตอีลาสติกซีทีแบบดั้งเดิม ซึ่งมีข้อจำกัดอยู่เพียงในบริเวณที่ปรากฏริ้วรอย (Fringe regions) ที่มองเห็นได้ วิธีการนับเหตุการณ์พ้องนี้ช่วยให้สามารถตรวจวัดความเค้นในวัสดุโปร่งแสงได้อย่างละเอียดและครอบคลุมกว่า ดังนั้น เทคนิคนี้จึงถือเป็นก้าวสำคัญสู่การบูรณาการทัศนศาสตร์ควอนตัมเข้ากับกลศาสตร์คลาสสิกในการทดสอบวัสดุ ซึ่งการพัฒนาในอนาคต เช่น การเพิ่มความแม่นยำของเซนเซอร์ การปรับปรุงการจัดวางอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ และการลดสัญญาณรบกวน คาดว่าจะช่วยให้วิธีการนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5. อ้างอิง

- Andrew Olson. (n.d.). *Stress, strain, & strength: An introduction to materials science*. ScienceBuddies. <https://www.sciencebuddies.org/sciencefair-projects/references/stress-strain-strength-an-introduction-to-materials-science>
- Boston University. (n.d.). *Mechanics of materials Stress*. <https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-stress>
- Corrosionpedia. (2018, July 10). *Material failure*. <https://www.corrosionpedia.com/definition/material-failure>
- Manjit, Y., Limpichaipanit, A., & Ngamjarurojana, A. (2021, August). Mechanical analysis of square-shaped PMMA using reflection photoelasticity. *Optics & Laser Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402621006380>
- Pinit, P. (2009). General knowledge of photoelasticity and numerical photoelasticity. *KKU Engineering Journal, 2009(363)*, 195–203. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/TJKM/10766857.pdf>
- Sorphananusak, P. (2021, June 9). *Stress and strain*. Construction Forum. <https://construction-forum.ssi-steel.com/stress-and-strain>
- Vanita, B. (n.d.). *Quantum: The advanced technology and the answer of the future*. Digital Economy Promotion Agency (depa). <https://www.depa.or.th/th/article-view/quantum-the-new-technology>

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร. กิติศักดิ์ บุญขำ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ สำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนที่มีคุณค่าตลอดการดำเนินงาน และขอขอบคุณคณะกรรมการที่ปรึกษา อันประกอบด้วย

ดร.ณภัทร กุศลรัตน์, นายจตุพร พันตรี และ ดร. กมลพร กันทะวงศ์ สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของงานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวสำหรับกำลังใจและการสนับสนุนอย่างต่อเนื่องเสมอมา