

เครื่องย้อมสีสไลด์อัตโนมัติและวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

Automatic Slide Staining Machine and Preliminary Tissue Analysis Using Image Analysis Technique

กิริติช สายพัทลุง^{1*} สุขุมล เทรียนทอง¹ รุจิราภา งามสระคู¹ อะเคื้อ กุลประสูติดิлок² และเพชร นันทิวิชิตชัย³

Keeradit Saipattalung^{1*}, Sukhuman Rianthong¹, Rujirapha Ngamsakoo¹,

Akua Kulprasutidilok² and Petch Nantiwichitchai³

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

¹Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

²Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา

³Faculty of Industrial Technology, Chitralada Technology Institute

*Corresponding author: keeradit@pnru.ac.th

Received: May 3, 2024

Revised: July 12, 2024

Accepted: July 18, 2024

บทคัดย่อ

การศึกษานี้แนะนำเสนอเครื่องย้อมสีสไลด์อัตโนมัติและวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ โดยระบบดังกล่าวมีการออกแบบกระบวนการย้อมสีชิ้นเนื้อด้วยวิธีอัตโนมัติซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานทางพยาธิวิทยาคลินิกที่ใช้สารละลายเคมี 7 ชนิด การย้อมสีจะดำเนินการตามขั้นตอนมาตรฐานของห้องปฏิบัติการพยาธิวิทยา โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช กรมแพทย์ทหารอากาศ ประเทศไทย ทั้งนี้การพัฒนาระบบอัตโนมัตินี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดการนำเข้าอุปกรณ์ย้อมสีที่นำมาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงกว่า 1 ล้านบาท โดยระบบที่พัฒนาขึ้นใช้อุปกรณ์และวัสดุภายในประเทศ จึงทำให้มีต้นทุนที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบย้อมสีอัตโนมัติดังกล่าว พบว่า หัวจับสไลด์มีความเร็วในการเคลื่อนที่แกน Y เฉลี่ย 1.95 ถึง 2.04 เซนติเมตรต่อวินาที และแกน X เฉลี่ย 4.51 ถึง 4.99 เซนติเมตรต่อวินาที โดยกระบวนการย้อมสีชิ้นเนื้อจะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 1 ชั่วโมง 26 นาที หลังจากนั้นผู้ปฏิบัติงานจะนำชิ้นเนื้อที่ผ่านการย้อมสี ใส่เข้าไปภายในกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลเพื่อจัดทำภาพนิ่ง และนำภาพนิ่งไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคประมวลผลภาพที่พัฒนาด้วยโปรแกรม Pycham เพื่อระบุตำแหน่งบริเวณที่ชิ้นเนื้ออาจเป็นมะเร็งหรือพยาธิสภาพผิดปกติโดยผลการวิเคราะห์เบื้องต้นตรวจพบตำแหน่งที่อาจเป็นเนื้อร้าย 0 ถึง 5 จุด ขึ้นอยู่กับชิ้นเนื้อแต่ละชิ้น เมื่อประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบย้อมสีอัตโนมัตินี้ คำนวณว่าจุดคุ้มทุนจะอยู่ที่จำนวนการทดสอบชิ้นเนื้อ 156.44 ครั้ง ซึ่งหมายความว่า หากมีการทดสอบชิ้นเนื้อตั้งแต่ 157 ครั้งขึ้นไป ระบบนี้จะสร้างผลกำไรที่เกินกว่าเงินลงทุน อนึ่งควรตระหนักว่าการวิเคราะห์ภาพที่กล่าวถึงนี้เป็นเพียงขั้นตอนการประเมินเบื้องต้น โดยผลวินิจฉัยที่แท้จริงต้องอาศัยการตรวจพิสูจน์ทางห้องปฏิบัติการเพิ่มเติมจากแพทย์ผู้เชี่ยวชาญด้านพยาธิวิทยาคลินิก

คำสำคัญ: ระบบสมองกลฝังตัว ย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อ วิเคราะห์ชิ้นเนื้อ เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ

Abstract

This research presents an automatic slide staining machine and preliminary tissue analysis using image analysis techniques for systematic analysis. The system involves designing a staining process for tissue samples using the H&E (Hematoxylin and Eosin) staining method, a standard pathological technique that utilizes seven chemical solutions. The staining process follows the standard procedures of the Pathology Laboratory at Bhumibol Adulyadej Hospital, Royal Thai Air Force, Thailand. The primary objective of developing this automated system is to reduce the reliance on imported, expensive staining equipment by utilizing locally sourced materials and equipment, resulting in significantly lower costs. Results of testing the efficiency of the automated staining system revealed the following performance: The slide gripper had an average Y-axis movement speed of 1.95–2.04 cm/s and an average X-axis movement speed of 4.51–4.99 cm/s, and the tissue staining process takes an average of 1 hour and 26 minutes to complete. After staining, put the stained tissue into a digital microscope to create a still image and analyze the still image using an image processing technique developed with the Pycham program to identify areas where the tissue might be cancerous or have abnormal pathology. The initial analysis results detect 0 to 5 possible malignant areas, depending on each tissue piece. The cost-benefit analysis for investing in this automated staining system calculated the break-even point to be at 156.44 tissue sample tests. This means that if 157 or more tissue samples are tested, the system will generate profits exceeding the initial investment cost. It is important to note that the image analysis mentioned here is only a preliminary assessment step. The actual diagnosis must rely on further laboratory testing and evaluation by clinical pathology experts.

Keywords: embedded system, slide staining, analysis of biopsy, image processing



บทนำ

เทคโนโลยีส่วนใหญ่เกิดจากภาคอุตสาหกรรมเป็นหลัก คือ การนำเทคโนโลยีมาเพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตควบคุมคุณภาพ (Golnabi, 2007) ลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ซึ่งเทคโนโลยีการประมวลผลภาพ และเทคโนโลยีต่าง ๆ ยังสามารถนำไปประยุกต์ได้ในหลากหลายวงการ เช่น การบริการและความปลอดภัย ปลอดภัย (Prasad, 2020; Duchon, 2017; Rehman, 2021) การแพทย์ การเกษตร (Phiphithirankarn, 2022; Madure, 2019; Muniraj, 2020) เป็นต้น ซึ่งหากกล่าวถึงการนำเทคโนโลยีไปใช้เกิดประโยชน์และมีผู้กระทบต่อการดำรงชีวิตมากที่สุดคือ การนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ในด้านการแพทย์ ซึ่งเทคโนโลยีในการแพทย์มีความก้าวหน้า

อย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากความต้องการในการรักษาโรคที่มีประสิทธิภาพ และรวดเร็ว จึงมีการคิดค้นเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เข้ามาช่วยในการบริการทางการแพทย์ต่อมนุษย์ (Pierrot, 1999; Kulkarni, 2020), การวิเคราะห์โรคมะเร็งด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์ (Pacholczyk, 2012) ทั้งในด้านการตรวจการรักษายาบาลการป้องกันโรคการกายภาพบำบัดและด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งยังสร้างความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องอีกด้วยสำหรับทางการแพทย์ โดยการนำเอาเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาช่วยในการทำงานในแต่ละขั้นตอนซึ่งสามารถทำให้การรักษาพยาบาลสามารถทำได้ถูกต้อง และรวดเร็ว

การนำเอาเทคโนโลยีที่มีทันสมัย เข้ามามีบทบาทอย่างต่อเนื่องในงานที่เกี่ยวกับการแพทย์ เพื่อความรวดเร็วในการรักษา การวิเคราะห์โรค หรือความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน เช่น การใช้แขนกลเพื่อผสมสารเคมี การใช้ ซีเอ็นซี เพื่อดึงเอาซีรัม (Serum) ในเลือด การใช้แขนกลในงานด้านการผ่าตัด การใช้รังสีในการรักษา เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีที่ทันสมัยนั้นมีประโยชน์ แต่ในทางกลับกันเครื่องมือ หรืออุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาสูง ทำให้การเข้าถึงเครื่องมือที่จะใช้ในการรักษาเข้าถึงได้ยาก เช่น เครื่องย้อมชิ้นเนื้อ ซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์โรค โดยเฉพาะโรคมะเร็ง ซึ่งเป็นโรคที่เป็นสาเหตุของการเสียชีวิตอันดับ 1 จากสถิติโดยสถาบันมะเร็งแห่งชาติในปี 2565 พบว่า ประเทศไทยจะมีผู้ป่วยโรคมะเร็งมากกว่า 1 แสนรายต่อปี (เฉลี่ย 400 คนต่อวัน) นอกจากนี้ข้อมูลสำนักพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ในปี 2564 ยังพบว่า โรคมะเร็ง และเนื้องอกต่าง ๆ เป็นกลุ่มโรคที่ทำให้คนไทยเสียชีวิตมากที่สุด (อัตรา 128 คนต่อประชากร 100,000 คน) (Chulalongkorn 9 Airport Hospital, 2024; Medical Digital Division, National Cancer Institute, 2022)

ทางผู้จัดทำจึงมีความประสงค์ที่จะศึกษาการทำงานของเครื่องย้อมชิ้นเนื้อ เพื่อลดความเสี่ยงให้กับมนุษย์ในการทำงานร่วมกันกับสารเคมี และวิเคราะห์ชิ้นเนื้อด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ (image processing) ซึ่งนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การคัดแยกสินค้า (Hamzah, 2022) การแยกแยะความสุกของผลไม้ (Phatchuay, 2022; Hira, 2022) การตรวจสอบจุดเสียหายบนผ้า (Nalawade, 2015; Rajan, 2018) การตรวจสอบและการยืนยันลายเซ็น (Akhila, 2021) หรือการตรวจสอบข้อบกพร่องของแผ่นวงจรพิมพ์ (Hinai, 2019) ซึ่งการประยุกต์ใช้งานในข้างต้น ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์แผ่นสไลด์ชิ้นเนื้อ เพื่อหาจุดที่ต้องสงสัยเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โรค เพื่อความรวดเร็วในการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ โดยกำหนดคุณลักษณะของเครื่องที่ต้องการพัฒนาให้สามารถย้อมแผ่นสไลด์ชิ้นเนื้อพร้อมกันได้ทีละ 10 แผ่น โดยเมื่อทำแผ่นสไลด์แรกสำหรับการย้อมสไลด์ในโถแก้วตำแหน่งตำแหน่งเริ่มต้น กดเริ่มต้นการย้อมเครื่องจะทำการย้อมอัตโนมัติตามขั้นตอนที่วางไว้ เมื่อย้อมสีตามขั้นตอน เครื่องจะส่งข้อความแจ้งเตือนผู้ปฏิบัติงาน

ให้นำแผ่นสไลด์ชิ้นเนื้อไปใส่ในกล่องใส่เข้าไปภายในกล่องจุลทรรศน์ดิจิทัลเพื่อจัดทำภาพนิ่ง และนำภาพนิ่งไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคประมวลผลภาพ เพื่อระบุตำแหน่งบริเวณที่ชิ้นเนื้ออาจเป็นมะเร็งหรือพยาธิสภาพผิดปกติเบื้องต้น จากนั้นส่งภาพที่ได้ไปยังแพทย์พิจารณาอีกครั้ง

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการย้อมสไลด์ และวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องย้อมสไลด์อัตโนมัติ และวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ
3. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบวิเคราะห์ชิ้นเนื้อด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ
4. เพื่อวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการผลิตเครื่องย้อมสไลด์ชิ้นเนื้อภายในประเทศเทียบกับการนำเข้า

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อ วิธีการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อสามารถทำได้หลายรูปแบบแล้วแต่ความต้องการของผู้เชี่ยวชาญ และลักษณะของเซลล์ชนิดนั้น ๆ โดยการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อบางครั้งอาจเกิดการติดสีมากหรือน้อยเกินไปแตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อ ออกมาเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) ไวทอลสแตนนิง (Vital Staining) คือ การย้อมสีที่ใช้กับสิ่งมีชีวิตโดยการฉีดสีเข้าไปในร่างกายของสัตว์ทดลอง หรือผสมสีกับเซลล์ที่ยังมีชีวิตนิยมใช้ในการวิจัย (2) ลูทีนสแตนนิง (Routine Staining) คือ การย้อมสีที่ใช้กับการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการจุลพยาธิวิทยา เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อเพื่อเป็นการรักษาความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงทางพยาธิสภาพของเซลล์เนื้อเยื่อและอวัยวะ (3) สเปเชียลสแตนนิง (Special Staining) คือ วิธีการย้อมสีที่เลือกใช้สำหรับการศึกษาสาเหตุของพยาธิสภาพที่เกิดขึ้นว่ามาจากสิ่งใดหรือสาเหตุใด เช่น การดูแบคทีเรีย เชื้อราหรือสิ่งที่เซลล์สร้างขึ้น โดยขั้นตอนในการย้อมสีชิ้นเนื้อแบบลูทีนสแตนนิงซึ่งมีวิธีการย้อมอยู่ 6 ขั้นตอน (Suvarna, 2012) ดังนี้

1. ดีพาราฟิไนเซชัน (Deparaffinization) ขั้นตอนสำหรับการละลายเทียน (waxmedium) ขั้นตอนการละลายเทียนให้หมดไปจากชิ้นเนื้อเยื่อบนสไลด์ ก่อนการย้อมสี เพราะเทียน จะทำหน้าที่เคลือบเซลล์และส่วนอื่น ๆ ของเนื้อเยื่อไม่ให้ติดสีที่ใช้อย้อม เป็นขั้นตอนแรกในการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อที่ได้จากการทำพาราฟฟินเซชัน (Paraffin Section) เวลาที่ใช้ในการย้อมต่อโล 3 ถึง 5 นาที

2. ไฮเดรชัน (Hydration) ขั้นตอนการล้างน้ำยาไซลีน (Xylene) ขั้นตอนการล้างน้ำยาไซลีนให้หมดไปจากชิ้นเนื้อเยื่อ และเตรียมน้ำสไลด์ชิ้นเนื้อเยื่อเข้าสู่ น้ำยาย้อมสี น้ำยาที่ใช้ในการล้างน้ำยาไซลีน ใช้แอลกอฮอล์ต่างความเข้มข้น โดยเรียงลำดับจากความเข้มข้นสูงเพื่อล้างหรือล้างน้ำยาไซลีนออก โดยทั่วไปจะใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) และแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ซึ่งเวลาที่ใช้ต่อโล 1 ถึง 2 นาที รวม 4 ถึง 8 นาที

3. สแตนนิง (Staining) ขั้นตอนการย้อมสีเนื้อเยื่อบนสไลด์ขั้นตอนการย้อมสีเนื้อเยื่อบนสไลด์ มีวิธีการแตกต่างกันออกไปทั้งวิธีธรรมดา (routine stain) และวิธีการพิเศษ (special stain) และภายหลังการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อจะต้องติดสีย้อมเสมอ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการย้อม 2 ถึง 3 วินาที หรือ 24 ชั่วโมงขึ้นไป ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำยาที่ใช้ในการทดสอบ

4. ดีไฮเดรชัน (Dehydration) ในการย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อ หมายถึง กระบวนการกำจัดน้ำออกจากชิ้นเนื้อที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทางพยาธิวิทยา เพื่อให้สามารถติดและย้อมสีเนื้อเยื่อ ซึ่งแช่ชิ้นเนื้อในแอลกอฮอล์ 70% จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้นเป็น 80% 90% 95% และ 100% โดยเวลาในแต่ละขั้นตอนประมาณ 0.5 นาที ถึง 1 นาที

5. คลีนิง (Cleaning) ขั้นตอนการทำให้สไลด์ไม่มีฟองอากาศ ทำให้ชิ้นเนื้อเยื่อบนสไลด์ปราศจากน้ำและพร้อมกันนั้นจะเป็นสื่อกลางนำตัวละลายให้เข้ากันได้กับน้ำยาเคลือบใสในขั้นตอนการเมาต์ติ้ง ซึ่งเวลาที่ใช้ประมาณ 2 ถึง 3 นาที

6. เมาต์ติ้ง (Mounting) ขั้นตอนในการทำให้กล้องสามารถมองได้ชัดขึ้นซึ่งทำให้เห็นภาพที่ชัดเจน ถูกต้องตามความจริง

ปฏิบัติการในการติดสี ในงานการย้อมสีชิ้นเนื้อเยื่อ

คือ สิ่งที่ควรเข้าใจเพื่อนำไปใช้ในการปฏิบัติงานย้อมสีได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพซึ่งมี 5 ปฏิบัติการ คือ (1) ไดเรกสแตน (Direct Staining) เป็นปฏิบัติการในการติดสีโดยอาศัยคุณสมบัติของสีซึมแทรกเข้าไปในชิ้นเนื้อเยื่อขณะจุ่มชิ้นเนื้อลงในสีนั้น เมื่อชิ้นเนื้อติดสีแล้วจะไม่เปลี่ยนไปติดสีอื่นอีก (2) อินไดเรกสแตน (Indirect Staining) เป็นปฏิบัติการที่ต้องอาศัยตัวกลาง เรียกว่า มอเด้น (Mordants) ช่วยในการติดสีของเนื้อเยื่อซึ่งปกติเป็นสารพวกโลหะหนัก (3) ฟิสิกอลสแตน (Physical Staining) เป็นปฏิบัติการที่ทำให้เกิดการละลายตัวของสีในส่วนประกอบของเซลล์ (4) เคมีคอลสแตนนิง (Chemical Staining) เป็นปฏิบัติการ อ็อกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction) ที่ช่วยให้การติดสีเป็นไปอย่างถูกต้องครบถ้วน (5) แอพซอร์พชันฟานาโนมิน่า (Absorption Phenomena) เป็นปฏิบัติการการติดสีเฉพาะสารประกอบพื้นผิวภายนอกของเซลล์ในเนื้อเยื่อกับสีที่ใช้อย้อม

จุดคุ้มทุน (break-even point) เป็นจุดที่มีผลกำไรเป็นศูนย์ ซึ่งผลกำไร มาจากรายได้ลบค่าใช้จ่าย ดังนั้นจุดคุ้มทุนจึงหมายถึง จุดที่มีรายได้ เท่ากับค่าใช้จ่าย จุดคุ้มทุนทำให้ทราบถึงปริมาณการผลิตที่ทำให้ผลกำไรเป็นศูนย์ ซึ่งการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (break-even analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของต้นทุนรวม (cost) รายได้ (revenue) และผลกำไร (profit) ที่แปรผันไปตามปริมาณการผลิต (volume) บางครั้งเรียกว่า การวิเคราะห์ต้นทุน-ปริมาณการผลิต-ผลกำไร (cost-volume-profit analysis) ชนิดของต้นทุน ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน คือ ต้นทุนคงที่ ต้นทุนแปรผัน และต้นทุนรวม ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมของต้นทุน เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของต้นทุนที่เปลี่ยนไปตามปริมาณการผลิต และต้นทุนที่ไม่เปลี่ยนไปตามปริมาณการผลิต จึงจำเป็นต้องแยกชนิดของต้นทุนคงที่ (fixed cost) และต้นทุนแปรผัน (variable cost) ออกจากกันให้ชัดเจน (Blank, 2012; Sullivan, 2012; Singkarlsiri, 2003; Logisticafe, 2009; (Rijiravanich, 2007; Tongsukawong, 2023) โดยต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่ไม่แปรผันตามปริมาณการผลิต เช่น ต้นทุนการสร้างอาคาร ค่าประกัน เนื่องจากเป็นต้นทุนที่ต้องลงทุนเพื่อดำเนินการในหลายส่วนที่เป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นต้องมี

ไม่ว่าปริมาณการผลิตจะมีมาก มีน้อย หรือไม่มีก็ตาม ส่วน ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่แปรผันตามปริมาณการ ผลิต เช่น ต้นทุนแรงงานทางตรง ต้นทุนวัสดุ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิต ต้นทุนรวม เป็นผลรวมของต้นทุนคงที่ และต้นทุนแปรผัน ทั้งส่วนของการลงทุนที่เป็นปัจจัยพื้นฐานในการสนับสนุนการผลิต และการลงทุนด้านการผลิต ซึ่งการหาปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุน ซึ่งเป็นจุดที่มีกำไร เป็นศูนย์ หรือเป็นจุดที่รายได้เท่ากับต้นทุน ดังภาพ 1

สูตรการคำนวณหาจุดคุ้มทุน จากขั้นตอนการวิเคราะห์จุด คุ้มทุนที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถนำมาเขียนเป็นสูตรการ คำนวณหาจุดคุ้มทุนได้ดังนี้

$$V = vN \quad (1)$$

$$C = F + V = F + vN \quad (2)$$

$$R = pN \quad (3)$$

$$P = R - C \quad (4)$$

ปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุน คือ

$$\therefore N^* = \frac{F}{p - v} \quad (5)$$

กำหนดให้ F = ต้นทุนคงที่

V = ต้นทุนแปรผัน

v = ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

C = ต้นทุน หรือค่าใช้จ่ายรวม

N = ปริมาณการผลิต

R = รายได้

p = ราคาขายต่อหน่วย

P = กำไร

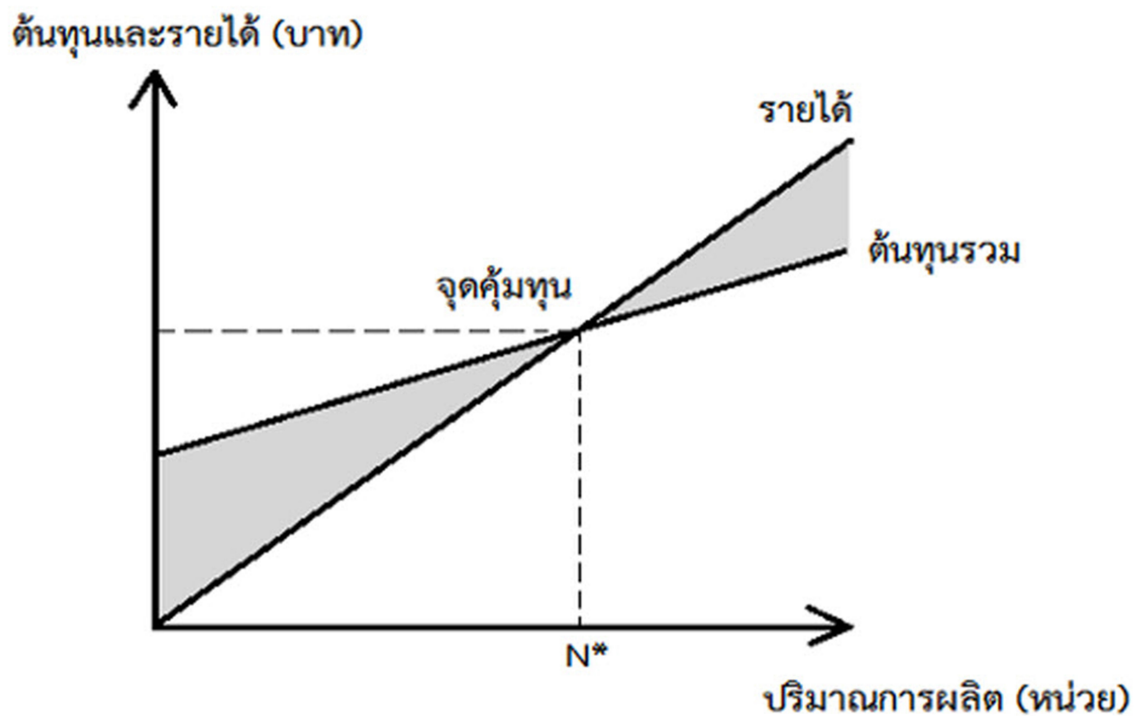
N^* = ปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุน

$p - v$ = ส่วนผลให้ต่อหน่วย
(marginal contribution)

กรอบแนวคิดการวิจัย

แนวคิดการย้อมสีแบ่งออกเป็นโครงสร้างทั้งหมด 3 โครงสร้าง ซึ่งจะแบ่งเป็นโครงสร้างการย้อมสีได้แก่ ปัญหา กระบวนการวิจัย และผลที่ได้จากการวิจัย ดังภาพ 2

จากภาพ 2 รูปแบบการทำงานของเครื่องย้อมสี สไลด์อัตโนมัติและวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิค การวิเคราะห์ภาพ จะเห็นได้ว่า ปัญหาของราคาเครื่องจริงที่ นำเข้าต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงกว่า 1 ล้านบาท (Express Lab Werks, LLC, 2024) และบางโรงพยาบาลไม่มี เครื่องย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อทำให้ต้องส่งชิ้นเนื้อไปตรวจใน โรงพยาบาลที่มีระยะไกล ทำให้ผลวิเคราะห์มีความล่าช้า ผู้ปฏิบัติยังต้องสัมผัสสารเคมีที่ใช้ย้อมสีชิ้นเนื้อโดยตรง นอกจากนี้ยังไม่มีกระบวนการแจ้งเตือนเมื่อจบกระบวนการ โดยการสร้างเครื่องย้อมชิ้นเนื้อต้องศึกษาการทำงานของ สเตปมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์ ราสเบอร์รี่พาย เพื่อควบคุม การทำงานแบบอัตโนมัติ พร้อมการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน ไลน์โดยระบบจะทำการควบคุมให้กระบวนการย้อมทำงาน ตามขั้นตอนจากจุดที่ 1 ไปจนถึงจุดที่ 11 จากนั้นผู้ปฏิบัติ นำแผ่นสไลด์ไปเข้ากล้องจุลทรรศน์ที่สามารถประมวลผล วิเคราะห์ และชี้ตำแหน่งการติดสีที่อาจเป็นโรคได้ ด้วย เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ ซึ่งเครื่องที่พัฒนาขึ้นจะ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องสัมผัสสารเคมีที่ใช้ย้อมสีชิ้นเนื้อ และสามารถวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ โรคของแพทย์ได้



ภาพ 1 จุดคุ้มทุน



ภาพ 2 กรอบแนวคิด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการการย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อทั้งจากข้อมูลปฐมภูมิโดยลงพื้นที่ห้องปฏิบัติการ LAB Pathology หรือห้องชิ้นเนื้อและเซลล์วิทยาของโรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช กรมแพทย์ทหารอากาศ เพื่อสอบถามขั้นตอน และศึกษาวิธีการย้อมชิ้นเนื้อจากเครื่องที่โรงพยาบาลมีอยู่แล้ว และทำการศึกษาจากข้อมูลทุติยภูมิ ซึ่งเป็นการศึกษาการย้อมสีชิ้นเนื้อแบบลูทีนสแตนซึ่งมีวิธีการย้อมอยู่ 6 ขั้นตอน (Suvarna et al., 2012) ซึ่งมีลำดับในการย้อมดังภาพ 3

จากภาพ 3 เป็นขั้นตอนในกระบวนการย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อที่เป็นมาตรฐานของโรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช กรมแพทย์ทหารอากาศ โดยจากขั้นตอนการย้อมสีจะมีการย้อมการย้อมสีนี้ โดยจะเริ่มต้นจากการย้อมในน้ำยาไซลีนไปจนถึงน้ำยาไซลีนอีกครั้ง โดยจะมีการยกแก็สสไลด์ชิ้นเนื้อขึ้นมาพักทุก ๆ 250 วินาที

2. ทำการออกแบบเครื่องย้อมสีสไลด์อัตโนมัติ และวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพตามคุณสมบัติที่ออกแบบไว้ในขั้นต้น

การออกแบบโครงสร้างสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ โครงสร้างของเครื่องย้อมส่วนประกอบของโครงสร้างภายในเครื่องย้อมจะทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ ขนาด 30 มิลลิเมตร x 30 มิลลิเมตร ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ห้อง ห้องที่ 1 สำหรับติดตั้งชุดมอเตอร์แกน X และแกน Y พร้อมทั้งโถสำหรับใส่สารเคมีทั้งหมด 11 โถ ส่วนที่ 2 สำหรับติดตั้งกล้องจุลทรรศน์ขนาดเล็ก โดยโครงสร้างภายในเครื่องย้อมจะทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ ขนาด 30 มิลลิเมตร x 30 มิลลิเมตร ซึ่งโครงสร้างโดยรวมจะมีขนาด 311 มิลลิเมตร x 1,202 มิลลิเมตร x 600 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) และโครงสร้างภายนอกเครื่องย้อมจะทำจากแผ่นเหล็กหนา 2 มิลลิเมตรทำสีดำ และสีเหลือง โดยโครงสร้างภายนอกของเครื่องย้อมจะทำจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ทำสีตามที่กำหนด ซึ่งโครงสร้างหลายส่วนซึ่งโครงสร้างภายนอกจะทำการพับเหล็กให้เป็นไปตามโครงสร้างภายใน ดังภาพ 4

3. ทำการสร้างเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพตามที่

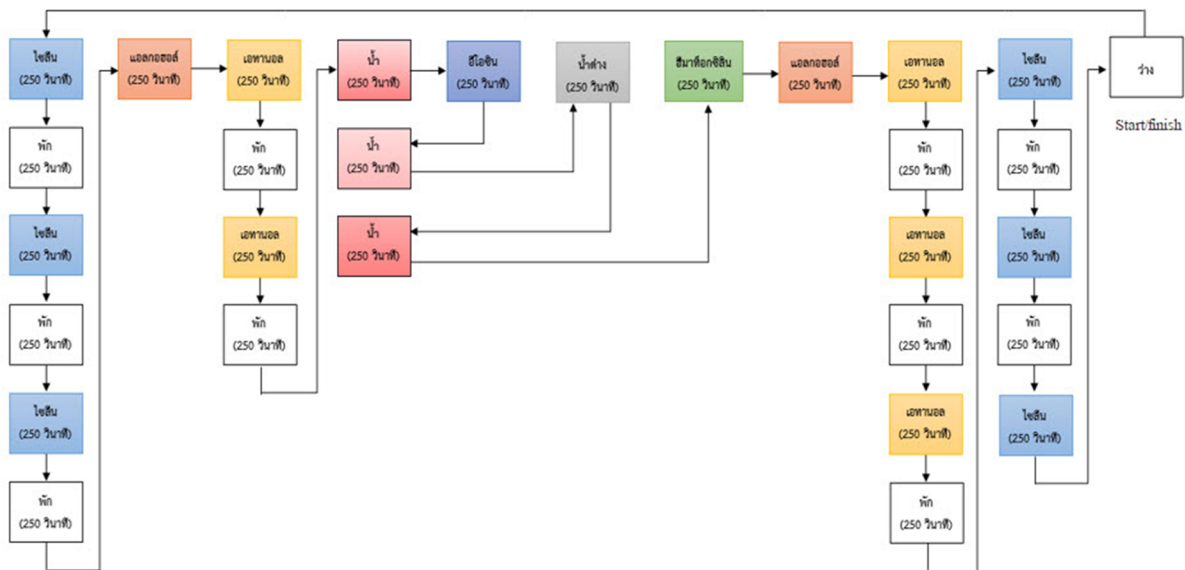
ออกแบบไว้ และติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม (raspberry pi) สเต็ปมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์ มือจับ กล้องจุลทรรศน์ขนาดเล็ก จอสัมผัส จียูไอ (GUI-Graphical User Interface)

4. ออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องย้อม จะเริ่มต้นจากบอร์ดราสเบอร์รี่พายไปยังบอร์ดสเต็ปมอเตอร์ไทร์ฟ ทั้ง 2 ตัว ไปยังจอควบคุม และเชื่อมวงจรไปยังเซอร์โวมอเตอร์ ดังภาพ 5

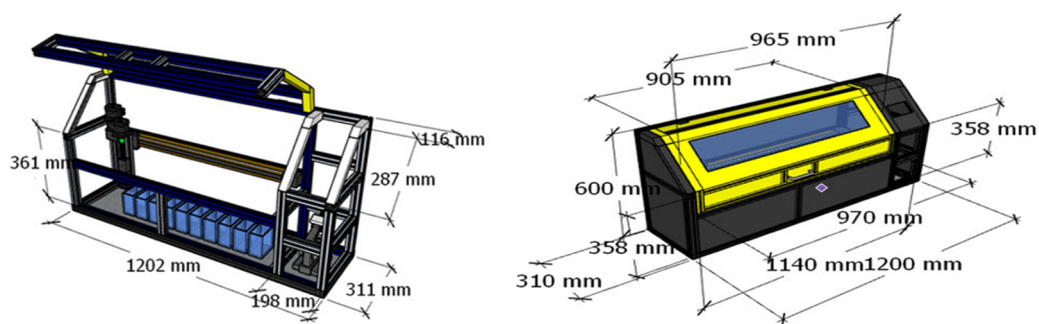
จากภาพ 5 การเชื่อมต่อในส่วนของการควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์ และจอแสดงผล ซึ่งวงจรจะเริ่มต้นจากแหล่งจ่ายขนาด 12 โวลต์ จ่ายไฟให้กับสเต็ปมอเตอร์ไทร์ฟทั้ง 2 ตัว เพื่อควบคุมให้สเต็ปมอเตอร์ให้ทำงาน โดยหน่วยประมวลผลหลักของระบบ คือ บอร์ดราสเบอร์รี่พาย จะทำการเชื่อมต่อสำหรับการควบคุม เซอร์โวมอเตอร์ผ่าน GPIO23 สเต็ปมอเตอร์ไทร์ฟตัวที่ 1 (Dir1) ผ่านขา GPIO35 และ (Pul1) ผ่านขา GPIO37 สเต็ปมอเตอร์ไทร์ฟตัวที่ 2 (Dir2) ผ่านขา GPIO38 และ (Pul2) ผ่านขา GPIO40 และบอร์ดราสเบอร์รี่พายเชื่อมต่อไปยังจอแสดงผล (MISO) ผ่านขา GPIO10 เชื่อมต่อไปยังจอแสดงผล (MOSI) ผ่านขา GPIO9 เชื่อมต่อไปยังจอแสดงผล (SCK) ผ่านขา GPIO11 เชื่อมต่อไปยังจอแสดงผล (IRQ) ผ่านขา GPIO25

5. ทำการทดสอบการทำงานของเครื่องทั้งการทดสอบการเคลื่อนที่ของสเต็ปมอเตอร์ การหยิบจับแก็สแผ่นสไลด์ชิ้นเนื้อ และการทดสอบการย้อมชิ้นเนื้อ ซึ่งชิ้นเนื้อที่นำมาทดสอบจะเป็นชิ้นเนื้อที่โรงพยาบาลภูมิพลจัดเก็บไว้ ซึ่งเป็นชิ้นภายในเต้านมสำหรับการวิเคราะห์ห้มะเร็งเต้านมในเพศหญิง พร้อมการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อด้วยภาพ

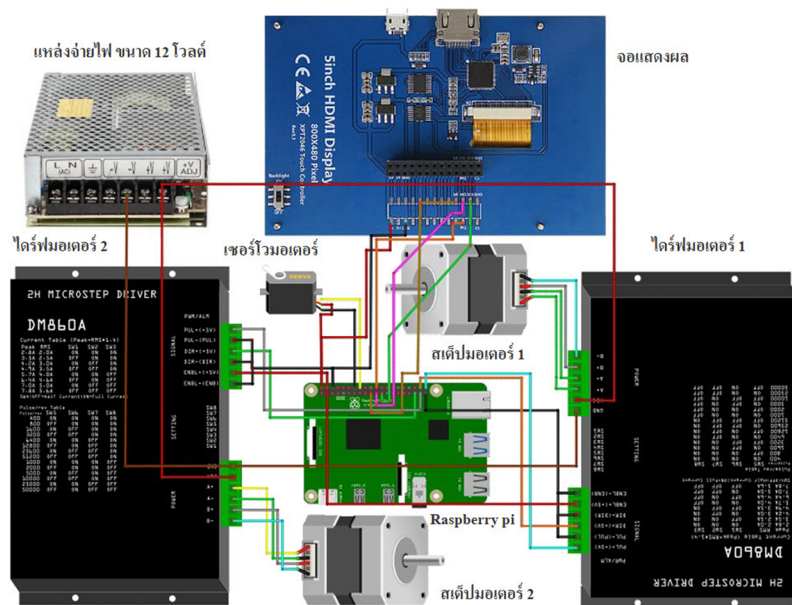
6. สรุปผลการการทำงานของเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ



ภาพ 3 ลำดับการย้อมสีขึ้นเนื้อของเครื่องย้อม



ภาพ 4 โครงสร้างของเครื่องย้อม



ภาพ 5 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องย้อม

ผลการวิจัย

1. เครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ

เป็นการประกอบตามแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งโครงสร้างทำจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ และแผ่นเหล็กหนา 1 มิลลิเมตร โดยความยาวของช่องใส่โถย้อมอยู่ที่ 96.7 เซนติเมตร ช่องติดตั้งจอและวงจรควบคุมภายในอยู่ที่ 20.1 เซนติเมตร ความสูงจากพื้นอยู่ที่ 60 เซนติเมตร ดังภาพ 6(a) และซึ่งรางเลื่อนในแนวแกน X มีความยาว 816 มิลลิเมตร และรางเลื่อนในแนวแกน Y มีความยาว 332 มิลลิเมตร

2. ผลการทดสอบสแตมป์มอเตอร์แกน Y เคลื่อนที่ขึ้นลง

เป็นการทดสอบหาเวลา และความเร็วในการเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์แกน Y เคลื่อนที่จากด้านบนลงด้านล่าง และด้านล่างขึ้นด้านบน ซึ่งได้เวลา และความเร็วเฉลี่ย ดังนี้ (1) ผลการเคลื่อนที่จากด้านบนลงด้านล่าง ซึ่งมีระยะในการเคลื่อนที่อยู่ที่ 15 เซนติเมตรโดยระยะดังกล่าวจะเป็นระยะที่แกนเลื่อนขึ้นเลยขอบของโถแก้ว ซึ่งเป็นระยะของเครื่องที่ทำการออกแบบ ซึ่งใช้เวลาในการเคลื่อนที่เฉลี่ยอยู่ที่ 7.71 วินาที มีความเร็วเฉลี่ย 1.95 เซนติเมตรต่อวินาที (2) ผลการเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นด้านบน ซึ่งมีระยะในการเคลื่อนที่อยู่ที่ 15 เซนติเมตร ซึ่งใช้เวลาในการเคลื่อนที่เฉลี่ยอยู่ที่ 7.37 วินาที มีความเร็วเฉลี่ย 2.04 เซนติเมตรต่อวินาที

3. ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์แกน X

การทดสอบการเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์แกน X ซึ่งเป็นการทดสอบหาเวลา และความเร็วในการเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์แกน X โดยทำการทดสอบสแตมป์มอเตอร์แกน Y เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 0 ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ มีระยะทาง 69.5 เซนติเมตร โดยระยะดังกล่าวจะเป็นระยะที่แกนไปถึงโถแก้วสุดท้ายของการย้อม ซึ่งเป็นระยะของเครื่องที่ทำการออกแบบ ซึ่งผลการทดสอบหาเวลา และความเร็วในการเคลื่อนที่ ดังตาราง 1

จากตาราง 1 การทดสอบการเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์แกน X จากตำแหน่งที่ 0 (Begin) ไปยังตำแหน่ง ต่าง ๆ

ในแต่ละระยะทาง มีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ 4.51 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 4.99 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเกิดจากการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ของโถแก้วที่ใช้ในการย้อมทั้งหมด 11 โถ โดยการทำงานของเครื่องสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้ถูกต้อง

4. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องย้อมตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนสิ้นสุดการทำงาน

การทดสอบการเคลื่อนที่ของระบบตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุด ซึ่งผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของระบบตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุด คือการทดสอบการทำงานเต็มกระบวนการของการย้อมสีสไลด์ ซึ่งใช้เวลาตลอดกระบวนการอยู่ที่ 86 นาที หรือ 1 ชั่วโมง 26 นาที

5. ผลการทำงานของเครื่องย้อมชิ้นเนื้อในกระบวนการย้อมสี และการวิเคราะห์ภาพชิ้นเนื้อหลังจากการย้อมสีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ

จากการทดลองการทำงานเครื่องย้อมชิ้นเนื้อที่ใช้ในกระบวนการย้อมสีชิ้นเนื้อนั้นใช้เวลาในการทำงานตามกระบวนการย้อมสี 86 นาที ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อทั้งหมดจำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 2 สไลด์ จากผู้ปฏิบัติสไลด์ชิ้นเนื้อเอากล่องจุลทรรศน์ดิจิทัลขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องย้อม จากนั้นถ่ายภาพเซลล์นำเอาสู่โปรแกรมวิเคราะห์ภาพบนโปรแกรม Pycham ทำการวิเคราะห์ภาพเพื่อหาตำแหน่งที่น่าสงสัยว่าผิดปกติ เสี่ยงต่อการเป็นโรค โดยพิจารณาจุดที่น่าสงสัยบริเวณที่มีการจับกลุ่มของเซลล์ขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ ดังภาพ 7

จากภาพ 7(a) ภาพ 7(c) ภาพ 7(e) ภาพ 7(g) ภาพ 7(i) ภาพ 7(k) ภาพ 7(m) ภาพ 7(o) ภาพ 7(q) และภาพ 7(s) เป็นภาพสไลด์ชิ้นเนื้อทั้งหมดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ขนาดเล็กสำหรับการถ่ายภาพชิ้นเนื้อหลังจากการย้อมสี จากนั้นนำภาพเข้าโปรแกรม Pycham เพื่อหาตำแหน่งที่น่าสงสัยว่าผิดปกติ เสี่ยงต่อการเป็นโรค โดยภาพ 7(b) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 5 จุด ภาพ 7(d) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด และเกิดฟองอากาศเล็กน้อยบนสไลด์ ภาพ 7(f) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด ภาพ 7(h) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด ภาพ 7(j) มีตำแหน่งที่น่า

สงสัยจำนวน 0 จุด และเกิดพองอากาศเล็กน้อยบนสไลด์ ภาพ 7(l) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด ภาพ 7(n) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด ภาพ 7(p) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 3 จุด ภาพ 7(r) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด ภาพ 7(t) มีตำแหน่งที่น่าสงสัยจำนวน 1 จุด โดยเมื่อภาพเข้าวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสามารถระบุได้เหมือนกันทุกครั้ง

6. ผลการคำนวณหาจุดคุ้มทุนของเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ

เครื่องย้อมสีสไลด์อัตโนมัติและวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สามารถพิจารณาหาจุดคุ้มทุนของเครื่อง ซึ่งการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนของเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ มีรายละเอียดต้นทุนและรายได้ต่าง ๆ ดังนี้

ต้นทุนคงที่ คำนวณมาจากต้นทุนของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ได้แก่ เหล็ก ชุดสแตมป์มอเตอร์ กล้องจุลทรรศน์ โครงสร้าง กล้อง รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 35,200 บาท

ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย ได้แก่ ต้นทุนสารเคมี คิดเป็นเงิน 500 บาทต่อครั้ง ค่าไฟฟ้า 5 ยูนิต์ ๆ ละ 5 บาท คิดเป็นเงิน 25 บาทต่อครั้ง รวมมีต้นทุนแปรผันคือ 525 บาทต่อครั้ง

รายได้ต่อการทดสอบ คือ 750 บาทต่อครั้ง จากสมการที่ 6 สามารถคำนวณหาปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุน ได้ คือ

$$\begin{aligned} N^* &= \frac{F}{p - v} \\ &= \frac{35,200}{750 - 525} \\ &= 156.44 \text{ ครั้ง} \end{aligned} \quad (6)$$

กำหนดให้ F = ต้นทุนคงที่
v = ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

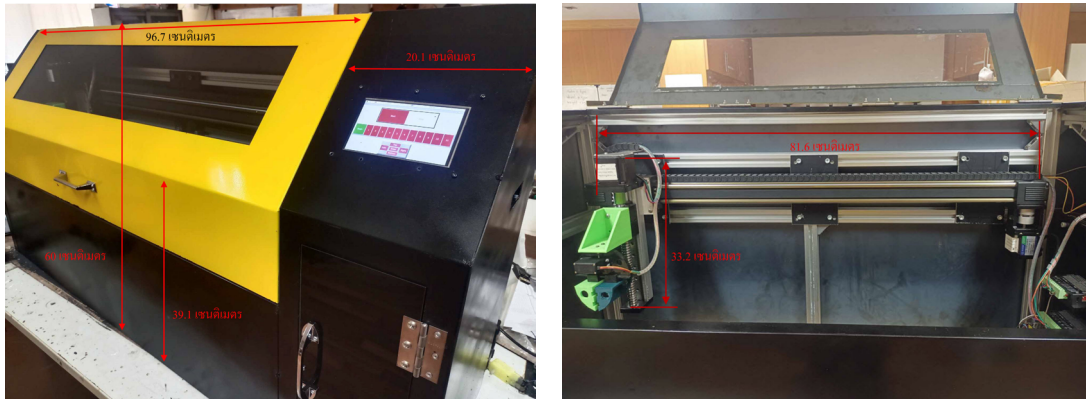
p = ราคาขายต่อหน่วย
N* = ปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุน

จากภาพ 8 จะเห็นได้ว่าปริมาณการผลิต ณ จุดคุ้มทุนคือ 156.44 ครั้ง ซึ่งเป็นจำนวนครั้งของการทดสอบที่ทำให้เงินลงทุนมีค่าเท่ากับรายได้ หากต้องการผลกำไร จะต้องมีการทดสอบขึ้นเนื้อตั้งแต่ 157 ครั้งขึ้นไป

การอภิปรายผล

การเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์ในแนวแกน Y มีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ขึ้นลง 1.95 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 2.04 เซนติเมตรต่อวินาที จากตาราง 1 การเคลื่อนที่ของสแตมป์มอเตอร์ในแนวแกน X จากตำแหน่งที่ 0 (begin) ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ในแต่ละระยะทาง มีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ 4.51 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 4.99 เซนติเมตรต่อวินาที

จากตาราง 2 จะเห็นว่าระยะเวลาในการทำงานของเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพจะใช้เวลาที่ 1 ชั่วโมง 26 นาที เครื่องย้อมสีสไลด์อัตโนมัติและวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ ที่พัฒนาขึ้นสามารถย้อมสีสไลด์ชิ้นเนื้อได้อย่างถูกต้องตามกระบวนการย้อมสีชิ้นเนื้อแบบลูทีนสแตนซึ่งมีวิธีการย้อมอยู่ 6 ขั้นตอน ซึ่งการย้อมมีพองอากาศเกิดขึ้นน้อย ซึ่งทำให้สีย้อมชิ้นเนื้อติดอย่างสม่ำเสมอทั้งชิ้นเนื้อ ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ พิจารณาโรคจากภาพ 7 เป็นการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อที่ย้อมด้วยเครื่องย้อมสีสไลด์อัตโนมัติและวิเคราะห์ชิ้นเนื้อเบื้องต้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ ซึ่งระบบสามารถชี้จุดที่น่าสงสัยว่าผิดปกติ ด้วยการสร้างกรอบรอบจุดที่น่าจะผิดปกติ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเครื่องย้อมจะอยู่ที่ 156.44 ครั้ง ซึ่งเป็นจำนวนครั้งของการทดสอบที่ทำให้เงินลงทุนมีค่าเท่ากับรายได้ หากต้องการผลกำไร จะต้องมีการทดสอบขึ้นเนื้อตั้งแต่ 157 ครั้งขึ้นไป

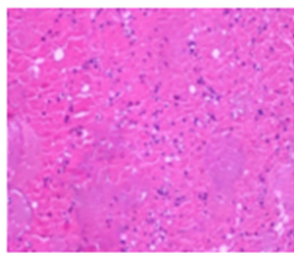


ภาพ 6 เครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ

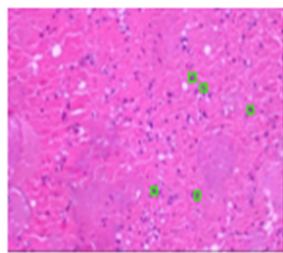
ตาราง 1

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของสแตปมอเตอร์แกน X

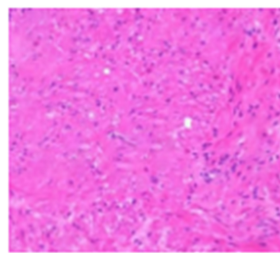
ตำแหน่งเริ่มต้น	ตำแหน่งปลายทาง	ระยะทาง (เซนติเมตร)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)	ความเร็วเฉลี่ย (cm/s)
0	1	4.5	0.99	4.51
0	2	11	2.26	4.87
0	3	17.5	3.51	4.99
0	4	23.5	5.08	4.63
0	5	30	6.61	4.54
0	6	36.5	7.92	4.61
0	7	43.5	9.24	4.71
0	8	50	10.62	4.71
0	9	56.5	11.88	4.76
0	10	63	13.55	4.65
0	11	69.5	14.07	4.94



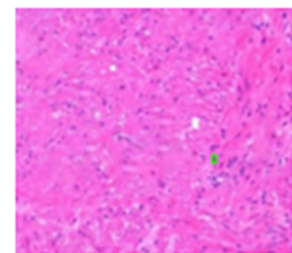
(a) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 1



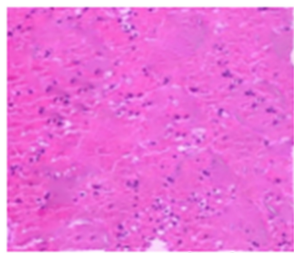
(b) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 1



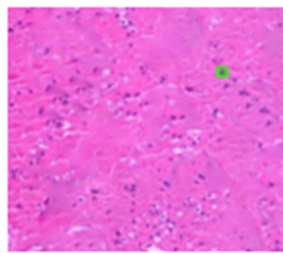
(c) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 2



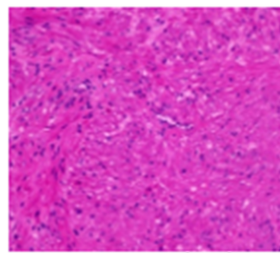
(d) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 2



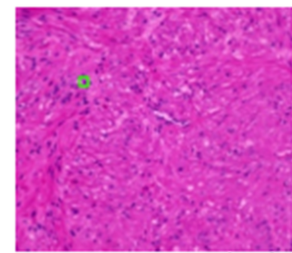
(e) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 3



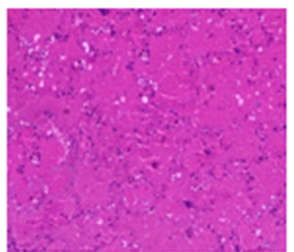
(f) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 3



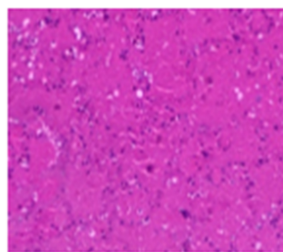
(g) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 4



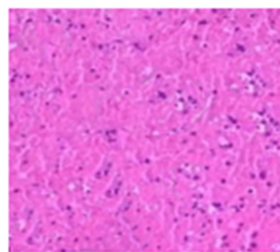
(h) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 4



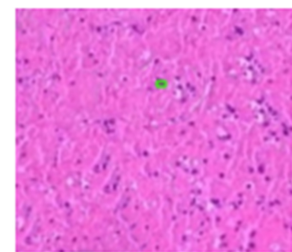
(i) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 5



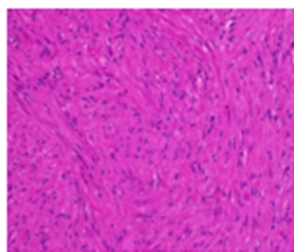
(j) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 5



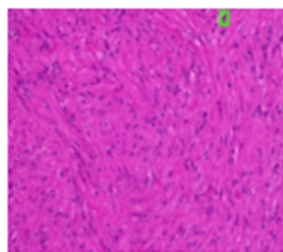
(k) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 6



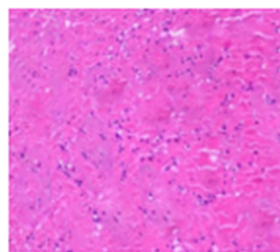
(l) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 6



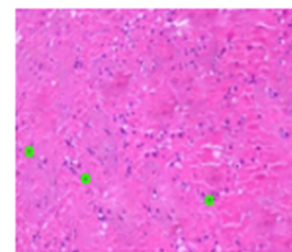
(m) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่
7



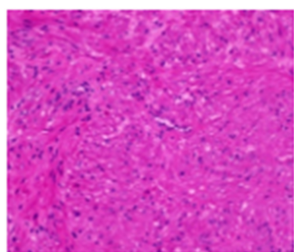
(n) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 7



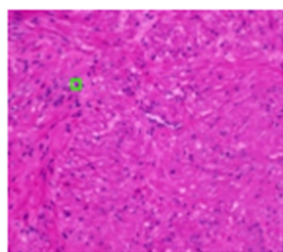
(o) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 8



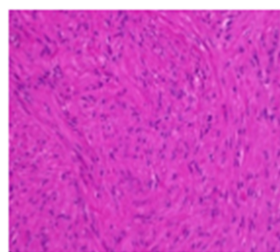
(p) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 8



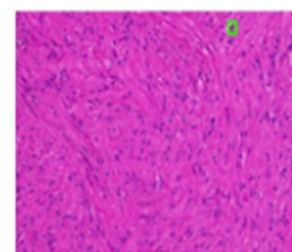
(q) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่ 9



(r) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 9

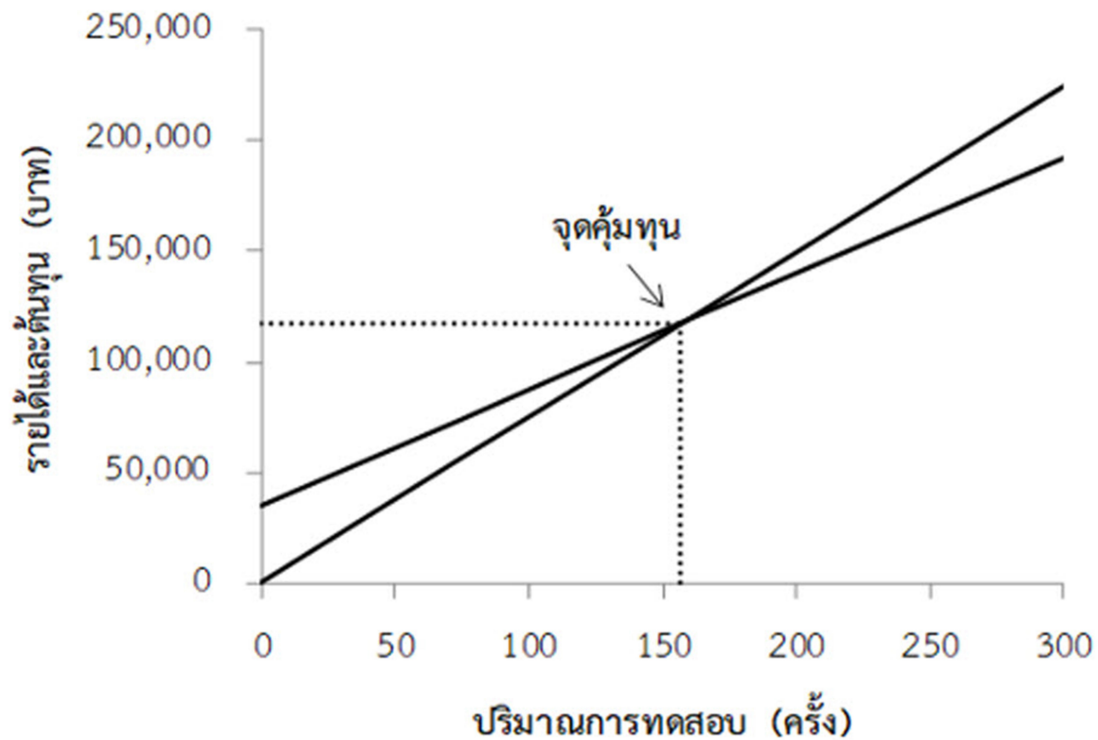


(s) ผลการย้อมสีชิ้นเนื้อที่
10



(t) ผลการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ
สไลด์ที่ 10

ภาพ 7 ผลการย้อมสี และการวิเคราะห์ชิ้นเนื้อ



ภาพ 8 จุดคุ้มทุนของเครื่องย้อม

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดลองการพัฒนาเครื่องย้อมสีสไลด์และวิเคราะห์ชิ้นเนื้ออัตโนมัติทั้งหมดทำงานได้ดีในระดับที่น่าพอใจ สามารถนำไปใช้ในการย้อมสีชิ้นเนื้อได้ แต่ต้องพัฒนาคำสั่งการควบคุมและการทำงานให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ดังนี้ (1) โครงสร้างของเครื่องย้อมควรมีขนาดเล็กลง เนื่องจากน้ำหนักของเครื่องทำให้เครื่องย้ายลำบาก (2) การวิเคราะห์ภาพควรแยกแยะถึงความเสี่ยงของการเกิดโรคแต่ละโรคได้ (3) พิจารณาสเปคมอเตอร์ที่สามารถทำงานในแนวแกน Y ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (4) ควรลดต้นทุนการผลิตเครื่องให้ต่ำกว่า 32,000 บาท โดยปรับเปลี่ยนวัสดุโครงสร้างจากอลูมิเนียมโปรไฟล์เป็นเหล็กกล่องขนาดเล็กแทนเพื่อลดต้นทุนการผลิต

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ปีงบประมาณปี 2566 และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร สำหรับการสนับสนุน ส่งเสริม และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานตลอดโครงการ รวมถึง โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช กรมแพทย์ทหารอากาศ กรุงเทพมหานคร ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานตลอดโครงการ



References

- Akhila, B., Nikhila, G., Lakshmi, A., Jahnvi, G., & Himabindhu, J. (2021). Signature verification using image processing and neural networks. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 9(8), 596-a603. <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2108073.pdf>
- Blank, L., & Tarquin, A. (2012). *Engineering economy* (7th ed.). New York: McGraw – Hill.
- Chulalongkorn 9 Airport Hospital. (2024). *Thailand cancer statistics*. Retrieved from <https://ch9airport.com/th/>. (in Thai)
- Duchon, F., Bucka, P., Szabova, M., Dekan, M., Beno, P., & Tolgyessy, M. (2017). Image processing of motion for security applications. *European Scientific Journal September*, 13(27), 1857–7881. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n27p44>
- Express Lab Werks, LLC. (2024). *Sakura 6131 Tissue-Tek Prisma A1-S Automated Slide Stainer w/ Special Stain*. Retrieved from <https://bit.ly/3YYe2XB>
- Hamzah, A. A., & Abbas, A. F. (2022). Developed an automated design sorting system according to outer edges of object. *The Scientific World Journal*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/9439093>
- Hira, S., & Lande, S. (2022). Detection of fruit ripeness using image processing. *International Journal of Health Sciences*, 6(S6), 3874–3886. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS6.10146>
- Hinai, R., Farh, A., & Hasani, S. A. (2019). Image processing based automatic color object sorting using PLC system. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 7(2), 50-62. <https://bit.ly/4hGhk99>
- Golnabi, H., & Asadpour, A. (2007). Design and application of industrial machine vision systems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 23(6), 630-637. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.02.005>
- Kulkarni, P., Valvi, V., Ukey, S., Bhise, A., & Gosavi, S. (2020). Mechanical arm for amputee. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(6), 1378 – 1380. <https://bit.ly/4faJp73>
- Logisticafe. (2009). *Break-even point*. Retrieved from <http://www.logisticafe.com/2009/09/break-even-point/> (in Thai)
- Madure, O., & Borkar, S. (2019). Analysis of a biomimetic anthropomorphic robotic hand/prosthetic. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 7(10), 1 – 6. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.10001>
- Muniraj, M., Arulmozhiyal, R., & ilakia, T. (2020). Development of sensor-less control of BLDC actuator for agricultural robotic arm. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(4), 514–517. <https://bit.ly/3AHxHSg>
- Medical Digital Division, National Cancer Institute. (2022). *Hospital-based cancer registry Thailand 2021*. Retrieved from https://www.nci.go.th/th/cancer_record/download/HOSPITAL-BASED_2021.pdf (in Thai)
- Nalawade, S., Dabade, P., Adhav, D., & Shingote, M. (2015). Fabric defect detection using image processing techniques. *International Journal for Scientific Research & Development*, 3(1), 628-629. <https://ijsrd.com/Article.php?manuscript=IJSRDV3I1336>

- Prasad, D. V. S., Niharika, Ch., Vishwaja, R., Srinidhi, R., & Preethi, A. (2020). Object detection and tracking using image processing. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 8(6), 398. <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2006056.pdf>
- Phiphithirankarn, P., Sattaso, T., Boonla, W., & Wiriyanamchai, W. (2022). The development of autonomus tomato harvesting robot arm by image processing. *Udonthani Rajabhat university Journal of Sciences and Technology*, 10(1), 143-161. (in Thai)
- Pierrot, F., Dombre, E., Dégoulange, E., Urbain, L., Caron, P., Boudet, S., Gariépy, J., & Mégnien, J. (1999). Hippocrate: A safe robot arm for medical applications with force feedback. *Medical Image Analysis*, 3(3), 285-300. [https://doi.org/10.1016/S1361-8415\(99\)80025-5](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(99)80025-5)
- Pacholczyk, B., Fabiańska, A., Kusińska, R., Potemski, P., Kordek, R., & Jankowski, S. (2012). Analysis of cancer tissues by means of spectroscopic methods. *Contemporary Oncology (Poznan, Poland)*, 16(4), 290–294. <https://doi.org/10.5114/wo.2012.30056>
- Phatchuay, S., Yooyen, A., & Ketcham, M. (2022). Coffee ripeness classification with HSV image processing. *Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal*, 4(3), 369-381. (in Thai)
- Rehman, A. U., Ullah, N., Shehzad, N., & Mohsan, S. A. H. (2021). Image processing based detecting and tracking for security system. *International Journal of Engineering (IJE)*, 13(1), 1 – 11. <https://bit.ly/4fpvE4v>
- Rijiravanich, W., & Ploimekha, S. (2007). *Engineering economics* (10th ed.). Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Rajan, R., & Gopinath, S. (2018). Detection & classification of fabrics defects using image processing and neural network. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 6(2), 170-174. <https://ijcrt.org/papers/IJCRT1813326.pdf>
- Singkarlsiri, C. (2003). *Engineering economics* (3rd ed.). Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (in Thai)
- Sullivan, W. G., Wicks, E. M., & Koelling, C. P. (2012). *Engineering economy* (15th ed.). London: Pearson Education.
- Suvarna, K. S., Layton, C., & Bancroft. (2012). *Bancroft's theory and practice of histological techniques: Expert consult: Online and print* (7th ed.). London: Churchill Livingstone
- Tongsukawong, A. (2023). *Variable costs and cost-volume-profit analysis*. Retrieved from http://home.kku.ac.th/anuton/3526301/Doc_02.pdf (in Thai)

