

การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับวิเคราะห์ผลจากแถบตรวจปัสสาวะแบบมาตรฐานด้วยตนเองผ่าน

กล้องสมาร์ทโฟน : U-Health

Development of a Smartphone-Based Application for Self-Analysis of Standard

Urine Test Strips: U-Health

จักรพงศ์ วงศ์ธนภฤตศิริ¹, ณัฐศกรินทร์ แซ่ฮุย¹, ภูมิภัส พรศิริกุล¹

ฐปนวิวัฒน์ ชุกกลิ่น¹, บุญยชนะ ภูระหงษ์²

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช, ตำบลบางจาก, อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช, จังหวัดนครศรีธรรมราช 80330,
ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เขตลาดกระบัง,
กรุงเทพมหานคร 10520, ประเทศไทย

บทคัดย่อ

การตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะ (Urinalysis) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการประเมินสภาวะทางชีวเคมีของร่างกายและวิเคราะห์ความเสี่ยงของสุขภาพ เพราะการตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะเป็นเครื่องมือพื้นฐานทางการแพทย์ที่สำคัญ เนื่องจากปัสสาวะคือของเหลวที่ร่างกายขับออกมาหลังจากผ่านกระบวนการคัดกรองของไต ซึ่งสะท้อนภาพรวมการทำงานของระบบต่าง ๆ ในร่างกายได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการตรวจตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการมักมีข้อจำกัดด้านเวลา ค่าใช้จ่าย และต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชัน "U-Health" ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์แถบตรวจปัสสาวะแบบมาตรฐาน 10 พารามิเตอร์ ผ่านกล้องสมาร์ทโฟน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) ร่วมกับการเทียบสีมาตรฐาน (Color Calibration) เพื่อปรับแก้ค่าแสงและระบุค่าสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีบนแถบตรวจปัสสาวะให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ลดความคลาดเคลื่อนจากสภาพแสงที่แตกต่างกัน แอปพลิเคชัน U-Health ได้รับการออกแบบให้มีอินเทอร์เฟซที่ใช้งานง่าย สามารถประมวลผลข้อมูลสุขภาพและแสดงผลในรูปแบบกราฟแนวโน้ม นอกจากนี้ยังช่วยให้ผู้ใช้งานบันทึกประวัติและติดตามความเปลี่ยนแปลงของสุขภาพตนเองได้อย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบและการพัฒนาพบว่าแอปพลิเคชัน U-Health สามารถประมวลผลและวิเคราะห์แถบตรวจปัสสาวะได้ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานและรวดเร็ว จึงสรุปได้ว่าแอปพลิเคชัน U-Health เป็นนวัตกรรมที่ช่วยลดข้อจำกัดในการเข้าถึงบริการสาธารณสุข รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการเฝ้าระวังสุขภาพเบื้องต้น และสนับสนุนการดูแลสุขภาพเชิงป้องกัน (Preventive Healthcare) อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: แอปพลิเคชัน U-Health, การตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะ, การประมวลผลภาพ, การเทียบสีมาตรฐาน, การดูแลสุขภาพเชิงป้องกัน

บทนำ

ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว การนำเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้ในด้านสุขภาพ (Digital Health) ได้กลายเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ช่วยลดข้อจำกัดด้านระยะเวลาและสถานที่ การตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะ เป็นหนึ่งในตัวบ่งชี้สภาวะทางชีวเคมีของร่างกายที่มีประสิทธิภาพสูง [1] ซึ่งสามารถใช้คัดกรองความเสี่ยงที่อาจจะก่อให้เกิดโรคได้เบื้องต้น เช่น โรคเบาหวาน โรคไต และการติดเชื้อในระบบทางเดินปัสสาวะ อย่างไรก็ตาม การตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการในปัจจุบันยังคงต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ ใช้อุปกรณ์เฉพาะทาง และใช้ระยะเวลาในการับผลตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะนาน ทำให้ประชาชนทั่วไปเข้าถึงบริการตรวจสุขภาพของตนเองได้อย่างจำกัด ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำโครงการจึงได้ริเริ่มโครงการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับวิเคราะห์ผลจากแถบตรวจปัสสาวะแบบมาตรฐานด้วยตนเองผ่านกล้องสมาร์ทโฟน : U-Health โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย ร่วมกับการเทียบสีมาตรฐาน [2] โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันที่สามารถวิเคราะห์ผลจากแถบตรวจปัสสาวะได้อย่างรวดเร็ว ได้ค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน และผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลสุขภาพของตนเองได้ทันที การพัฒนานี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้ผู้ใช้ติดตามความเปลี่ยนแปลงสุขภาพของตนเองได้อย่างใกล้ชิด และยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการสนับสนุนการดูแลสุขภาพเชิงป้องกันอย่างเป็นรูปธรรม

วิธีการดำเนินงาน

การพัฒนาแอปพลิเคชัน U-Health ได้รับการพัฒนาให้ใช้การประมวลผลภาพถ่ายด้วยกล้องสมาร์ทโฟนและเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ:

อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ สมาร์ทโฟน (Oppo f11 pro), แถบตรวจปัสสาวะมาตรฐานแบบ 10 พารามิเตอร์ (URS-10T), ปัสสาวะจำลองสำหรับการทดสอบ และซอฟต์แวร์สำหรับการพัฒนา ได้แก่ Google Colab, Flutter, OpenCV, และ ระบบฐานข้อมูลภายในเครื่อง SQLite (ผ่าน Drift) จัดเก็บข้อมูลแบบ Localfirst บนอุปกรณ์เพื่อความเป็นส่วนตัวของข้อมูลสุขภาพ โดยปัสสาวะจำลองจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Spiking หรือการใช้ Interfering Substances (สารรบกวนปฏิกิริยา) [3] เพื่อจำลองพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้ความง่ายต่อการควบคุม ได้แก่ Glucose (น้ำตาล) ใช้ผง D-Glucose ละลายน้ำกลั่น, Protein (โปรตีน) ใช้ไข่ขาวดิบ ละลายน้ำกลั่น, Blood (เลือด) ใช้เลือดสัตว์เจือจาง, Leukocytes (เม็ดเลือดขาว) ใช้น้ำลายมนุษย์ (Saliva), pH (กรด-ด่าง) ใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Buffer), Specific Gravity (SG) ใช้น้ำกลั่นผสมเกลือแกง (NaCl), Nitrite (ไนไตรต์) ใช้โซเดียมไนไตรต์ (Sodium Nitrite), Ketone (คีโตน) ใช้น้ำยาล้างเล็บที่มีส่วนผสมของ Acetone, Bilirubin (บิลิรูบิน) ใช้ยาฟีนาโซไพริดีน (Phenazopyridine) ผสมกับปัสสาวะ [4], Urobilinogen (ยูโรบิลิโนเจน) ยาปฏิชีวนะกลุ่มซัลฟา เช่น Co-trimoxazole มาบดแล้วละลายน้ำ

2. การพัฒนาซอฟต์แวร์ :

ระบบประมวลผลภาพถูกพัฒนาโดยเริ่มจากการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ประเภท Convolutional Neural Network (CNN) เพื่อคัดกรองคุณภาพของภาพถ่ายแถบตรวจปัสสาวะแบบมาตรฐาน จากนั้นระบบจะตรวจจับมุมทั้งสี่ของแถบตรวจ (Corner Detection) และปรับแก้มุมมองภาพให้เป็นภาพมุมมองด้านบนที่ตั้งฉาก (Perspective Correction) เพื่อให้ตำแหน่งของแผ่นทดสอบย่อยแต่ละช่องคงที่และแม่นยำ แล้วจึงดำเนินการปรับเทียบสีแบบต่อภาพ (Per-shot Color Calibration) โดยใช้แถบสีอ้างอิงมาตรฐานที่พิมพ์อยู่บนบรรจุภัณฑ์ (ขวด) ของแถบตรวจ URS-10T ซึ่งถูกถ่ายอยู่ในเฟรมเดียวกัน

กับแถบตรวจ เนื่องจากแถบสีอ้างอิงและแผ่นทดสอบ อยู่ภายใต้สภาพแสงและกล้องเดียวกันความผิดพลาดของสีอันเกิดจากสภาพแสงจึงหักล้างกัน (Common-mode Cancellation) [5] ทำให้ระบบสามารถเปรียบเทียบสีของแผ่นทดสอบกับแถบสีอ้างอิงได้โดยตรงในปริภูมิสี CIE Lab โดยไม่จำเป็นต้องควบคุมสภาพแสงภายนอกหรือใช้กล้องควบคุมแสง จากนั้นระบบจะแบ่งพื้นที่ที่แผ่นทดสอบย่อย (Pad Segmentation) ออกเป็น 10 ช่อง โดยอาศัยเรขาคณิตของตำแหน่งที่ทราบค่าแน่นอน (Fixed Known Geometry) จากภาพที่ผ่านการปรับมุมมองแล้ว แทนการแบ่งแบบเท่ากันเชิงเส้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำของตำแหน่งแต่ละช่อง ในขั้นตอนสุดท้ายระบบจะสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) ด้วยค่ามัธยฐาน และเทียบกับตารางอ้างอิงสี (LUT Matching) โดยใช้ดัชนีความแตกต่างสี CIEDE2000 [6] โดยมีหลักการทำงานดังนี้:

2.1 คัดกรองคุณภาพภาพ (Image Quality Filtering): ระบบจะนำเข้าภาพถ่ายและใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ในการตรวจสอบความคมชัด ระดับแสง และการตรวจพบขอบอ้างอิงร่วมกับแถบตรวจในเฟรม หากภาพไม่ผ่านเกณฑ์จะแจ้งให้ผู้ใช้ถ่ายภาพใหม่

2.2 การปรับแก้ทัศนมิติ (Corner Detection & Perspective Correction): ค้นหามุมทั้งสี่ของแถบตรวจปัสสาวะและแถบอ้างอิงบนขวด เพื่อคำนวณการปรับบิดมุมมอง (Homography Matrix) ให้กลายเป็นมุมมองด้านบนที่ตั้งฉากและแบนราบ ช่วยขจัดปัญหาความคลาดเคลื่อนจากมุมมองเอียง

2.3 การวิเคราะห์พื้นที่แบบเรขาคณิตคงที่ (Fixed Known Geometry Segmentation): ระบบจะแบ่งส่วนภาพออกเป็นช่องสีบนแถบตรวจจำนวน 10 ช่อง และช่วงสีมาตรฐานบนขวดอ้างอิงโดยคำนวณจากขนาดพิกเซลเชิงเรขาคณิตที่แน่นอน แทนการคาดเดาตำแหน่งพิกเซลแบบสุ่ม

2.4 การชดเชยแสงแบบ Per-shot Color Calibration: แปลงข้อมูลภาพจากระบบสี RGB ไปยังระบบสี CIE L*a*b จากนั้นระบบจะอ่านค่าสีจากขวดอ้างอิงมาตรฐานที่อยู่ภายใต้สภาพแสงเดียวกันมาคำนวณเพื่อหักล้างแสงแปรปรวนภายนอก (Common-mode Cancellation) โดยเทียบเคียงและชดเชยค่าเบี่ยงเบนของโครมาติซิตี (a^* และ b^*)

2.5 การจับคู่และแปรผล (CIE DE2000 Matching): ดึงลักษณะเด่นทางสีโดยเลือกใช้ค่ามัธยฐาน (Median) ของพิกเซลภายในช่องทดสอบแต่ละช่อง เพื่อป้องกันผลกระทบจากฟองอากาศหรือขอบเงา นำมาเปรียบเทียบระยะทางความต่างของสีกับตารางอ้างอิง Look-Up Table (LUT) ด้วยสมการ ΔE_{00} [7] แล้วจำแนกออกมาเป็นเกรดผลตรวจสุขภาพ แสดงผลผ่านอินเทอร์เฟซ และบันทึกประวัติลงฐานข้อมูล SQLite

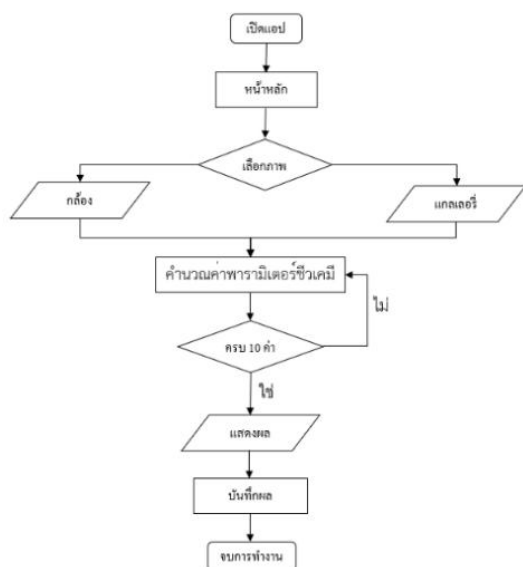
3. การพัฒนาแอปพลิเคชันและการทดสอบ:
ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

3.1 หยดสารละลายที่ผสมไว้ลงในแถบตรวจปัสสาวะ โดยจะทำการทดสอบทีละพารามิเตอร์

3.2 นำแถบตรวจขึ้นมาซับขอบด้านข้างกับกระดาษชำระเบา ๆ เพื่อขจัดสารละลายส่วนเกิน ป้องกันการไหลปนกันของสารเคมีระหว่างช่องทดสอบ

3.3 วางแถบตรวจปัสสาวะขนานติดกับแถบสีอ้างอิงมาตรฐานข้างบรรจุภัณฑ์ (ขวด URS-10T) โดยวางไว้บนระนาบแบนราบเดียวกัน

3.4 เมื่อเวลาผ่านไปครบ 60 วินาทีซึ่งเป็นเวลาที่ปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนสีได้สมบูรณ์และเสถียรที่สุด [8] ดำเนินการเปิดแอปพลิเคชัน U-Health และใช้กล้องสมาร์ทโฟนถ่ายภาพร่วมกันในเฟรมเดียวกัน (Single-Frame Capture) โดยมีระยะห่างประมาณ 15-20 เซนติเมตรในมุมตั้งฉาก 90 องศา เพื่อหลีกเลี่ยงแสงสะท้อนและเงาบัง



ภาพที่ 1 Flowchart การทำงานของแอปพลิเคชัน U-Health

ผลและอภิปรายผล

การประเมินความแม่นยำของระบบใช้วิธีเปรียบเทียบผลการอ่านค่าจากแอปพลิเคชันกับค่าอ้างอิงที่ทราบระดับแน่นอน (Ground Truth) โดยจำลองผลบวกของแต่ละพารามิเตอร์จากสารที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 แล้วนำแถบตรวจที่ได้ไปถ่ายภาพร่วมกับแถบสีอ้างอิงบนบรรจุภัณฑ์ในเฟรมเดียวกันภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน (หลอดไฟวอร์ม แสงขาว และแสงฟลูออเรสเซนต์) และกล้องส마트โฟนหลายรุ่น เพื่อวัดว่าการเปรียบเทียบสีด้วยแถบสีอ้างอิงบนบรรจุภัณฑ์สามารถจำแนกระดับผลได้ถูกต้องเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เปรียบเทียบสี โดยประเมินทั้งความถูกต้องแบบตรงช่อง (Exact-bucket) ความถูกต้องแบบยอมรับช่องข้างเคียง (Adjacent-tolerant) และเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) รายพารามิเตอร์ หมายเหตุ: ผลเชิงปริมาณ เช่น ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) และเมทริกซ์ความสับสนรายพารามิเตอร์อยู่ระหว่างการเก็บข้อมูลจากการทดลองเทียบกับ Ground Truth ตามวิธีข้างต้น และจะเติมค่าที่วัดได้จริงลงในส่วนนี้ ทั้งนี้คาดว่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนสี

ชัดเจน เช่น pH กลูโคส และคีโตน จะให้ความแม่นยำสูงกว่าพารามิเตอร์ที่มีการไล่เฉดสีละเอียด เช่น ความถ่วงจำเพาะ เม็ดเลือดขาว และบิลิรูบิน ซึ่งเป็นข้อจำกัดเชิงหลักการของการเปรียบเทียบด้วยแถบสีบนบรรจุภัณฑ์เมื่อเทียบกับการวัดสีเฉพาะที่ผ่านการปรับเทียบมาแล้ว ในด้านการใช้งานจริงแอปพลิเคชัน U-Health ใช้เวลาประมวลผลเพียง 2-5 วินาทีต่อครั้ง สามารถแสดงผลระดับความเข้มข้นของสารชีวเคมี พร้อมกราฟติดตามแนวโน้มสุขภาพ นอกจากนี้ระบบยังมีความปลอดภัยสูงด้วยการเข้ารหัสข้อมูลมาตรฐาน AES-256 และการยืนยันตัวตนแบบไบโอเมตริกซ์ อินเทอร์เน็ตรองรับผู้สูงอายุผ่านพีเจอาร์ตัวอักษรขนาดใหญ่ ทำให้แอปพลิเคชันนี้เหมาะสมต่อการส่งเสริมการแพทย์ทางไกล (Telemedicine) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดฟังก์ชันหลักของแอปพลิเคชัน U-Health

ลำดับ	ฟังก์ชันหลักของแอปพลิเคชัน	รายละเอียดการทำงาน
1	ระบบอ่านค่าสีจากภาพ	ถ่ายภาพแถบตรวจผ่านกล้องส마트โฟนแล้วประมวลผล
2	ระบบวิเคราะห์ค่าชีวเคมี (10 Biomarkers)	ประเมินค่า pH, Protein, Glucose, Ketone, Bilirubin, Urobilinogen, Nitrite, Leukocytes, Specific Gravity, Blood
3	ระบบจัดเก็บและแสดงแนวโน้มสุขภาพ	แสดงผลย้อนหลังในรูปกราฟและสามารถส่งออกเป็นไฟล์ PDF
4	ระบบความปลอดภัย	เข้ารหัสด้วย AES-256 และยืนยันตัวตนด้วยรหัสผ่าน/ลายนิ้วมือ/Face ID
5	ระบบช่วยเหลือผู้สูงอายุ	มีโหมดตัวอักษรใหญ่ เสียงอ่านผล (TTS) และภาพสัญลักษณ์สีแสดงระดับสุขภาพ

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลแต่ละแบบ

พารามิเตอร์	สถานะสุขภาพตามสุขภาพ (%)		สถานะสุขภาพผิดปกติ (%)		สถานะสุขภาพดี (%)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนความถี่ (s)
	ใช่	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่		
1. pH	88.30%	98.35%	75.00%	91.30%	64.80%	89.75%	76.00%	17.00%
2. Glucose	90.00%	96.71%	70.00%	89.99%	49.50%	96.48%	66.52%	94.39%
3. Protein	75.00%	93.39%	71.70%	95.11%	70.50%	97.45%	72.43%	95.32%
4. Nitrite	71.70%	95.27%	68.30%	99.12%	55.51%	92.11%	65.19%	95.09%
5. Leukocytes	68.40%	95.10%	67.70%	92.60%	69.41%	95.23%	70.80%	94.32%
6. Blood	70.30%	96.77%	63.30%	96.67%	68.45%	87.19%	70.02%	93.64%
7. Specific Grav	71.70%	91.73%	68.30%	96.17%	70.50%	93.78%	63.62%	91.89%
8. Ketone	83.30%	96.73%	71.70%	96.22%	59.15%	93.47%	71.36%	93.47%
9. Bilirubin	75.00%	88.38%	67.70%	88.98%	48.00%	96.33%	67.20%	91.22%
10. Urobilinogen	88.30%	95.64%	75.64%	94.14%	67.18%	95.71%	77.04%	92.39%
เฉลี่ย (Overall)	71.70%	94.31%	68.73%	92.82%	62.23%	93.54%	67.56%	93.56%

สรุปผล

โครงการพัฒนาแอปพลิเคชัน U-Health ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ในการสร้างเครื่องมือคัดกรองสุขภาพเบื้องต้นผ่านสมาร์ทโฟน ระบบสามารถวิเคราะห์แถบตรวจปัสสาวะ 10 พารามิเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและเป็นระบบ โดยอยู่ระหว่างการตรวจสอบความแม่นยำเทียบกับค่าอ้างอิง (Ground Truth) นวัตกรรมนี้ถือเป็นการส่งเสริมแนวคิด Smart Healthcare for All อย่างเป็นรูปธรรม ช่วยลดข้อจำกัดในการเข้าถึงบริการสาธารณสุข และเพิ่มขีดความสามารถในการเฝ้าระวังสุขภาพเชิงป้องกัน (Preventive Healthcare) ในอนาคต โครงการนี้ยังมีศักยภาพในการต่อยอดเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อัจฉริยะแบบสวมใส่ (Smart Wearables) รวมถึงการพัฒนาแบบผู้ช่วยด้านสุขภาพเฉพาะบุคคล (AI Adviser) เพื่อรองรับการประยุกต์ใช้งานในโรงพยาบาลชุมชนได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณครู ฐปนวัฒน์ ชุกกลิ่น อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดการดำเนินงาน และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยชนะ ภู่วะหงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาพิเศษจากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์คำปรึกษาเชิงลึกด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการประมวลผล จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] J. A. Simerville, W. C. Maxted, and J. J. Pahira, "Urinalysis: a comprehensive review," *Am. Fam. Physician*, vol. 71, no. 6, pp. 1153–

1162, Mar. 2005. [Online]. Available:

<https://www.aafp.org/afp/2005/0315/p1153>

[2] R. Yang et al., "Color Space Transformation-Based Smartphone Algorithm for Colorimetric Urinalysis," *ACS Omega*, vol. 3, no. 9, pp.

12141–12146, Sep. 2018. [Online]. Available:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6175489/>

[3] L. B. Khan, H. M. Read, S. R. Ritchie, and T. Proft, "Artificial Urine for Teaching Urinalysis

Concepts and Diagnosis of Urinary Tract

Infection in the Medical Microbiology

Laboratory," *J. Microbiol. Biol. Educ.*, vol. 18,

no. 2, Art. no. e128, Aug. 2017. [Online].

Available:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5577974/>

[4] G. J. Hoilat and C. R. John, "Bilirubinuria," in *StatPearls*. Treasure Island, FL, USA: StatPearls Publishing, 2024. [Online]. Available:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557439/>

[5] A. K. Yetisen et al., "A smartphone algorithm with inter-phone repeatability for the analysis of colorimetric tests," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 196, pp. 156–160, Jun. 2014. [Online]. Available:

<https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.01.077>

[6] G. Sharma, W. Wu, and E. N. Dalal, "The CIEDE2000 color-difference formula:

Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations," *Color*

Res. Appl., vol. 30, no. 1, pp. 21–30, Feb. 2005. [Online]. Available:

<https://hajim.rochester.edu/ece/sites/gsharma/papers/CIEDE2000CRNAFeb05.pdf>



[7] *Colorimetry — Part 6: CIEDE2000 Colour-difference Formula*, ISO/CIE 11664-6:2014,

2014. [Online]. Available:

<https://www.iso.org/standard/63128.html>

[8] *McKesson Urine Reagent Strips Package Insert*, McKesson Medical-Surgical, Richmond,

VA, USA, 2014. [Online]. Available:

[https://imgcdn.mckesson.com/CumulusWeb/Click_and_Learn/1150668003_McKesson_US-](https://imgcdn.mckesson.com/CumulusWeb/Click_and_Learn/1150668003_McKesson_US-U031-041_EN_PI%20103113(4-22-14).pdf)

[U031-041_EN_PI%20103113\(4-22-14\).pdf](https://imgcdn.mckesson.com/CumulusWeb/Click_and_Learn/1150668003_McKesson_US-U031-041_EN_PI%20103113(4-22-14).pdf)