ระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปพลิเคชันเช็คคิวผู้ป่วยนอก

WEARABLE HEALTH MONITORING DEVICE AND OUTPATIENT QUEUE CHECK WEB APPLICATION

นายปรเมศว์ เดนนิส โฮค อาร์ริงตัน

นายธนกร สุภาวรรณชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

พ.ศ. 2568

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปพลิเคชันเช็คคิวผู้ป่วยนอก

นายปรเมศว์ เดนนิส โฮค อาร์ริงตัน

นายธนกร สุภาวรรณชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

พ.ศ. 2568

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Wearable Health Monitoring Device and Outpatient Queue Check Web Application

Poramate Dennis Hoke Arrington

Thanakorn Suphawanchai

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Bachelor of Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

2025

© Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

หัวข้อปริญญานิพนธ์ : ระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปพลิเคชันเช็คคิวผู้ป่วยนอก

จัดทำโดย : นายปรเมศว์ เดนนิส โฮค อาร์ริงตัน

นายธนกร สุภาวรรณชัย

สาขาวิชา : วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ประธานที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ปิยะนุช ตั้งกิตติพล

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์) วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบ .....ประธานที่ปรึกษา

(อาจารย์อรินธร เจษฎาเมธาขจร) (อาจารย์ ดร.ปิยะนุช ตั้งกิตติพล)

.....กรรมการสอบ

(อาจารย์ ดร.โยธกา ตั้งตระกูล)

หัวข้อปริญญานิพนธ์ ระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปพลิเคชันเช็คคิวผู้ป่วยนอก
จัดทำโดย นายปรเมศว์ เดนนิส โฮค อาร์ริงตัน, นายธนกร สุภาวรรณชัย
ปีที่ปริญญานิพนธ์สำเร็จ พ.ศ. 2568
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ประธานที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ปิยะนุช ตั้งกิตติพล

บทคัดย่อ

ระบบการบริหารจัดการสาธารณสุขของแผนกผู้ป่วยนอก (Outpatient Department: OPD) ในปัจจุบันยังคงเผชิญกับปัญหาเชิงโครงสร้างสำคัญ คือ "ช่องว่างระหว่างการรอคอย" (Waiting Gap) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ผู้ป่วยผ่านจุดคัดกรองเบื้องต้นแล้วแต่ต้องนั่งรอพบแพทย์เป็นเวลานานโดยไม่มีการติดตามสัญญาณชีพอย่างต่อเนื่อง หากผู้ป่วยเกิดภาวะวิกฤตเฉียบพลันขึ้นอย่างกะทันหัน เช่น ภาวะช็อก (Shock Index > 0.9), ภาวะหลอดเลือดสมองตีบเฉียบพลัน หรือภาวะหัวใจหยุดเต้นฉับพลัน การคัดกรองแบบจุดเดียวในตอนเริ่มต้นจะไม่สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วนี้ได้ นอกจากนี้ ระบบบัตรคิวในโรงพยาบาลส่วนใหญ่ยังเป็นระบบแบบคงที่ ไม่สามารถปรับเปลี่ยนลำดับการตรวจตามความรุนแรงของอาการที่เปลี่ยนแปลงไปของผู้ป่วยได้

โครงงานนี้นำเสนอการพัฒนาระบบ "อุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปเช็คคิวผู้ป่วยนอก" (Wearable Health Monitoring Smartwatch and Outpatient Queue Tracking Web Application) โดยบูรณาการ 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) อุปกรณ์ Smartwatch ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Seeed Studio XIAO ESP32-C3 ทำงานร่วมกับเซนเซอร์เชิงแสง PPG (MAX32664 / MAX30102) สำหรับการประเมินอัตราการเต้นของหัวใจ (Heart Rate), ความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือด (SpO2), อุณหภูมิผิวหนัง และแนวโน้มความดันโลหิตแบบไร้ปลอกแขน (Cuffless BP Estimation) ผสานร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร่ง 6 แกน MPU-6050 สำหรับการตรวจจับการหกล้มแบบหลายขั้นตอน (Multi-Stage Fall Detection) พร้อมอัลกอริทึม Signal Quality Index (SQI) และ Skin-Contact Detection 2)

ระบบประเมินความรุนแรงอัจฉริยะ (AI-assisted Triage) 5 ระดับ (RED, PINK, YELLOW, GREEN, WHITE) ผสานการวิเคราะห์ข้อความ Chief Complaint ด้วย NLP (TF-IDF) และกฎทางการแพทย์ (Rule-based Overrides) ภายใต้แนวคิด Human-in-the-loop โดยมี Explainable AI Reasons เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ และให้พยาบาลเป็นผู้ตรวจสอบและยืนยันผลขั้นสุดท้าย (Nurse Confirmed Severity) และ 3) ระบบเว็บแอปพลิเคชัน Next.js 16.3 (App Router) และคลาวด์แดชบอร์ดสำหรับการจัดการคิวแบบพลวัต (Dynamic Queue Prioritization) บัตรคิวดิจิทัลผ่าน HTML5 Canvas API (queue-card-canvas.ts) และระบบความปลอดภัย (ThaID, PIN, PDPA, Device Pairing)

ผลการทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการวัดสัญญาณชีพต่ำกว่า ±3.5% เมื่อเทียบกับเครื่องมือแพทย์มาตรฐาน อัลกอริทึมตรวจจับการหกล้มมีความไวร้อยละ 93.75 และความจำเพาะร้อยละ 100 ในกิจกรรมประจำวัน โมเดล AI Triage มีความแม่นยำร้อยละ 91.20 โดยมี Within-one-level Accuracy สูงถึงร้อยละ 98.40 ระบบส่งข้อมูล Telemetry มีความหน่วงเฉลี่ย 3.2 วินาที พร้อมระบบบันทึกข้อมูลออฟไลน์ 200 รายการ และแบตเตอรี่ใช้งานต่อเนื่องได้ 8.2 ชั่วโมงต่อการชาร์จ ช่วยยกระดับความปลอดภัยของผู้ป่วยนอกและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการคิวของโรงพยาบาลได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: อุปกรณ์สวมใส่, สัญญาณชีพ, การตรวจจับการหกล้ม, ปัญญาประดิษฐ์คัดแยกผู้ป่วย, Human-in-the-loop, ระบบจัดการคิวผู้ป่วยนอก, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ESP32, MAX32664, Next.js

Project Title Wearable Health Monitoring Device and Outpatient Queue Check Web Application

Proposed by Mr. Poramate Dennis Hoke Arrington, Mr. Thanakorn Suphawanchai

Year 2025

Department Computer Engineering

Advisor Dr. Piyanuch Tangkittiphon

Abstract

Project Title: **Wearable Health Monitoring Device and Outpatient Queue Check Web Application**

Proposed by: Mr. Poramate Dennis Hoke Arrington, Mr. Thanakorn Suphawanchai

Department: Computer Engineering

Academic Year: 2025

Advisor: Dr. Piyanuch Tangkittiphon

In modern healthcare administration within Outpatient Departments (OPD), a significant structural vulnerability is the "waiting gap"—the unmonitored duration between initial triage and physician consultation. When patients develop occult hemodynamically unstable conditions, such as occult shock (Shock Index > 0.9), acute ischemic stroke, or sudden cardiac arrest, a single static vital sign reading at admission fails to capture rapid physiological deterioration. Furthermore, conventional hospital queue systems operate statically and cannot adapt to fluctuating patient clinical severity.

This project introduces a comprehensive "Wearable Health Monitoring Smartwatch and Outpatient Queue Tracking Web Application" integrating three core pillars: 1) A wearable IoT smartwatch powered by an ESP32-C3 microcontroller, integrating optical Photoplethysmography (PPG) sensors (MAX32664 / MAX30102) for continuous Heart Rate (HR), Blood Oxygen Saturation (SpO2), Skin Temperature, and cuffless Blood Pressure (BP) trend estimation, paired with an MPU-6050 6-axis IMU for sequential Multi-stage Fall Detection, equipped with Signal Quality Index (SQI) and skin-contact detection filters; 2) An AI-assisted 5-level Triage Decision Support System (RED, PINK, YELLOW, GREEN, WHITE) combining Natural Language Processing (TF-IDF) on Chief Complaints with clinical rule-based overrides under a Human-in-the-loop paradigm, generating Explainable AI Reasons for nurse review and final clinical confirmation (Nurse Confirmed Severity); and 3) A responsive Next.js web application and cloud dashboard for dynamic queue prioritization,

HTML5 Canvas digital queue cards, and enterprise security (ThaID, 6-digit PIN, PDPA consent, and Device Pairing authentication).

Experimental evaluations demonstrate that vital sign measurement errors remain strictly below ±3.5% compared to standard clinical benchmarks. The multi-stage fall detection algorithm achieves 93.75% sensitivity and 100% specificity against daily activities. The AI triage model attains an accuracy of 91.20% with a Within-one-level Accuracy of 98.40%. Telemetry exhibits an average latency of 3.2 seconds with automatic 200-sample offline ring buffering, and the battery operates continuously for 8.2 hours per charge, mitigating outpatient waiting risks effectively.

Keywords: Wearable Device, Vital Signs Monitoring, Fall Detection, AI-assisted Triage, Human-in-the-loop, Outpatient Queue System, Internet of Things (IoT), ESP32, MAX32664, Next.js

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปิยะนุช ตั้งกิตติพล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำอันทรงคุณค่า ตลอดจนชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์ การประมวลผลสัญญาณชีวภาพ การพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์สนับสนุนการตัดสินใจ และการพัฒนาระบบคลาวด์เว็บแอปพลิเคชันด้วยความเอาใจใส่เสมอมา

ขอขอบคุณอาจารย์อรินธร เจษฎาเมธาขจร ประธานกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.โยธกา ตั้งตระกูล กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นเชิงวิชาการเพื่อปรับปรุงโครงงานให้มีความสมบูรณ์ ถูกต้องตามมาตรฐานวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ได้อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ
อุปกรณ์ทดสอบทางอิเล็กทรอนิกส์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้การอุปการะ
สนับสนุนกำลังใจและทุนการศึกษาตลอดระยะเวลาการศึกษา
รวมถึงเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ได้ร่วมแลกเปลี่ยนความรู้และให้ความช่วยเหลือ ประโยชน์และคุณค่าใดๆ
อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายปรเมศว์ เดนนิส โฮค อาร์ริงตัน

นายธนกร สุภาวรรณชัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย . . . . . ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (ABSTRACT) . . . . . จ

กิตติกรรมประกาศ . . . . . ฉ

สารบัญ . . . . . ช

สารบัญตาราง . . . . . ฌ

สารบัญรูป . . . . . ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ . . . . . ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 3

1.3 สมมติฐานและแนวคิดการแก้ปัญหา 3

1.4 ขอบเขตของโครงงาน 4

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น 6

1.6 ข้อจำกัดของโครงงาน 6

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

1.8 แผนการดำเนินงานและระยะเวลา 8

1.9 ประมาณการงบประมาณและค่าใช้จ่าย 9

1.10 คำนิยามศัพท์เฉพาะ 10

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 13

2.1 ระบบคัดแยกผู้ป่วย 5 ระดับ (5-Level Triage Systems) 13

2.2 ทฤษฎีสัญญาณชีพและการประเมินทางสรีรวิทยา 16

2.3 เทคโนโลยีอุปกรณ์สวมใส่และเซนเซอร์โฟโตพลีทิสโมกราฟี (PPG) 19

2.4 ทฤษฎีการตรวจจับการเคลื่อนไหวและการหกล้ม (Fall Detection) 23

2.5 การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) สำหรับวิเคราะห์อาการสำคัญ 26

2.6 แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการประเมินผล 28

2.7 สถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์สนับสนุนการตัดสินใจและ Human-in-the-loop . 31

2.8 สถาปัตยกรรมเว็บแอปพลิเคชันและการสื่อสารเครือข่าย 33

2.9 ระบบความปลอดภัยข้อมูลสุขภาพและการยืนยันตัวตน 35

2.10 สถาปัตยกรรมฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ 37

2.11 การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม 3 มิติ 39

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related Literature & Studies) 40

บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน 45

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวม (Overall Methodology) 45

3.2 การวิเคราะห์ความต้องการและการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ 46

3.3 การออกแบบและพัฒนาฮาร์ดแวร์อุปกรณ์สวมใส่ Smartwatch 49

3.4 การพัฒนาเฟิร์มแวร์ระบบสมองกลฝังตัวบน ESP32-C3 54

3.5 การออกแบบฐานข้อมูล (Database Schema & ER Diagram) 59

3.6 การพัฒนาโมดูล AI-assisted Triage และ Rule-based Engine 63

3.7 กระบวนการทำงานของพยาบาลและการจัดการคิว (Nurse Confirmation) . . . 66

3.8 ข้อกำหนดโครงสร้างข้อมูลและการสื่อสาร (API Specification) 68

3.9 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน Next.js (Architecture & Implementation) . 71

3.10 แผนและวิธีการทดสอบระบบ (Testing Methodology) 74

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการทดสอบระบบ 78

4.1 ผลการพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันและส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (UI Screenshots) . 78

4.2 ผลการประกอบและทดสอบฮาร์ดแวร์อุปกรณ์สวมใส่ 92

4.3 ผลการทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์วัดสัญญาณชีพ 94

4.4 ผลการทดสอบโมเดล AI-assisted Triage 96

4.5 ผลการทดสอบอัลกอริทึมการตรวจจับการหกล้ม 99

4.6 ผลการทดสอบการสื่อสารเครือข่าย ความหน่วง และกลไกสำรองข้อมูล . . . 102

4.7 ผลการทดสอบระบบจัดการคิวและการยืนยันผลของพยาบาล 104

4.8 สรุปผลการบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงงาน 106

4.9 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน 108

บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 110

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 110

5.2 อภิปรายผลการทดลองและ Trade-offs ในการออกแบบ 112

5.3 ข้อจำกัดของโครงงาน 115

5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อยอด 116

บรรณานุกรม 118

ภาคผนวก 123

ภาคผนวก ก: ผังวงจรและการต่อสายสัญญาณ (Schematic & BOM) 124

ภาคผนวก ข: ซอร์สโค้ดสำคัญของระบบ (Source Code Snippets & Contracts) . 128

ภาคผนวก ค: คู่มือการใช้งานระบบ Smartwatch และ Web Dashboard 134

ภาคผนวก ง: แบบประเมินความพึงพอใจและตารางบันทึกผลการทดสอบดิบ 140

ประวัติผู้เขียน 146

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานและแผนภูมิแกนต์ตลอด 2 ภาคการศึกษา 8

ตารางที่ 1.2 ประมาณการงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการพัฒนาโครงงาน (BOM) 9

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ค่ามาตรฐานสัญญาณชีพและระดับภาวะวิกฤตทางการแพทย์ (NEWS/MEWS) . 15

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซนเซอร์ PPG และชิปประมวลผล . . . 22

ตารางที่ 2.3 สรุปและเปรียบเทียบผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน . 43

ตารางที่ 3.1 การเชื่อมต่อพินระหว่าง ESP32-C3 กับโมดูลเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง . 51

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองการแปลงค่าแรงดันเป็นร้อยละความจุแบตเตอรี่ LiPo (LUT) . 58

ตารางที่ 3.3 ตารางโครงสร้างฐานข้อมูล 8 เอนทิตีหลักของระบบ 61

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดการสื่อสารข้อมูลระหว่างระบบเว็บและแม่ข่าย (API Contract Table) . 69

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอัตราการใช้พลังงานและระยะเวลาทำงานต่อเนื่องของอุปกรณ์ . 93

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของเซนเซอร์ Smartwatch กับเครื่องมือมาตรฐาน . 95

ตารางที่ 4.3 ตาราง Confusion Matrix และประสิทธิภาพการจำแนกความรุนแรงของ AI Triage 5 ระดับ . 97

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับการหกล้มและการจำแนกกิจกรรมประจำวัน . 100

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกรณีจำลองการยืนยันและปรับแก้ผลการคัดแยกโดยพยาบาล . 105

ตารางที่ 4.6 ตารางสรุปผลการประเมินการบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงงาน (Objective Matrix) . 107

ตารางที่ 4.7 ผลการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ (N = 30) . 109

ตารางที่ ก.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และราคาต้นทุน (Bill of Materials) . 127

สารบัญรูป

รูปที่ 3.1 แผนภาพ Use Case Diagram และสถาปัตยกรรมระบบรวม 48

รูปที่ 3.2 โมเดล 3D CAD ตัวเรือนนาฬิกา Smartwatch (SmartWatchV13 Comparison) . 53

รูปที่ 3.3 ผังการทำงานของเฟิร์มแวร์ฮาร์ดแวร์บน ESP32-C3 (Hardware Flowchart) . 55

รูปที่ 3.4 ผังการทำงานของระบบคลาวด์และเว็บแดชบอร์ด (Software Flowchart) . 73

รูปที่ 4.1 หน้าจอเข้าสู่ระบบผ่าน ThaID และ PIN 79

รูปที่ 4.2 หน้าจอเข้าสู่ระบบด้วยรหัส PIN ส่วนบุคคล 80

รูปที่ 4.3 หน้าจอลงทะเบียนผู้ป่วยใหม่ ส่วนข้อมูลส่วนบุคคล 81

รูปที่ 4.4 หน้าจอระบุอาการสำคัญ โรคประจำตัว และประวัติแพ้ยา 82

รูปที่ 4.5 หน้าจอบันทึกยาประจำ ที่อยู่ ผู้ติดต่อฉุกเฉิน และการยินยอม PDPA . 83

รูปที่ 4.6 หน้าจอบัตรคิวรับบริการดิจิทัลบนสมาร์ตโฟนของผู้ป่วย 84

รูปที่ 4.7 หน้าจอแสดงผลคิวรอตรวจรวมทั้งแผนก (Live OPD Board) 85

รูปที่ 4.8 หน้าจอตรวจสอบคิวสดพร้อมป๊อปอัปบัตรคิวดิจิทัล 86

รูปที่ 4.9 หน้าจอข้อมูลส่วนบุคคลและข้อมูลสุขภาพผู้ป่วย 87

รูปที่ 4.10 หน้าจอรายการนัดหมายตรวจรักษา 87

รูปที่ 4.11 หน้าจอประวัติการรับบริการและการบันทึกค่าสัญญาณชีพ 88

รูปที่ 4.12 หน้าจอรายละเอียดข้อมูลผู้ป่วยและสรุปประวัติสุขภาพ 88

รูปที่ 4.13 หน้าต่างยืนยันการยกเลิกคิวรับบริการ (ขั้นตอนที่ 1) 89

รูปที่ 4.14 หน้าต่างยืนยันการยกเลิกคิวรับบริการ (ขั้นตอนที่ 2) 89

รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงสถานะเมื่อไม่มีคิวรับบริการในขณะนั้น 90

รูปที่ 4.16 หน้าต่างแจ้งเตือนเมื่อผู้ป่วยมีคิวที่กำลังรอตรวจอยู่แล้ว . . 90

รูปที่ 4.17 หน้าต่างยืนยันการออกจากระบบ 91

รูปที่ 4.18 หน้าจอการตั้งค่าระบบและความปลอดภัย 91

รูปที่ 4.19 หน้าจอกรอกรหัส PIN 6 หลักสำหรับความปลอดภัย 91

รูปที่ 4.20 หน้าจอยืนยันรหัส PIN 6 หลัก 92

รูปที่ 4.21 หน้าจอแจ้งเตือนตั้งรหัส PIN สำเร็จ 92

รูปที่ 4.22 หน้าจอปลดล็อกแอปพลิเคชันด้วย PIN 92

รูปที่ 4.23 หน้าจอแจ้งเตือนเมื่อกรอกรหัส PIN ไม่ถูกต้อง 93

รูปที่ 4.24 หน้าจอตั้งค่าขนาดตัวอักษร (Accessibility) สำหรับผู้สูงอายุ . 93

รูปที่ 4.25 หน้าจอนโยบายความเป็นส่วนตัวและคุ้มครองข้อมูลสุขภาพ (PDPA Policy) . 93

รูปที่ 4.26 หน้าจอ Landing Page ยินดีต้อนรับผู้รับบริการ 94

รูปที่ ก.1 ผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์และวงจรชาร์จแบตเตอรี่ Smartwatch (หน้าที่ 1) . 125

รูปที่ ก.2 ผังวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ MAX32664 และ MPU-6050 (หน้าที่ 2) . 126

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

OPD Outpatient Department (แผนกผู้ป่วยนอก)

ESI Emergency Severity Index (เกณฑ์การคัดแยกความรุนแรงผู้ป่วยฉุกเฉิน 5 ระดับ)

KTAS Korean Triage and Acuity Scale (ระบบคัดแยกผู้ป่วยและระดับความเฉียบพลัน)

PPG Photoplethysmography (การตรวจวัดปริมาตรหลอดเลือดด้วยแสง)

HR Heart Rate (อัตราการเต้นของหัวใจ, bpm)

SpO2 Peripheral Capillary Oxygen Saturation (ความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือดแดงส่วนปลาย, %)

BP Blood Pressure (ความดันโลหิต, SBP/DBP mmHg)

RR Respiratory Rate (อัตราการหายใจ, ครั้งต่อนาที)

BT Body Temperature (อุณหภูมิร่างกาย, °C)

SI Shock Index (ดัชนีช็อก = $\frac{HR}{SBP}$)

NEWS National Early Warning Score (เกณฑ์เตือนภัยสภาวะวิกฤตทางคลินิก)

IMU Inertial Measurement Unit (เซนเซอร์วัดความเฉื่อยและความเร่ง 6 แกน)

SVM Signal Vector Magnitude (เวกเตอร์ขนาดความเร่งรวม = $\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$)

SQI Signal Quality Index (ดัชนีชี้วัดคุณภาพและความน่าเชื่อถือของสัญญาณ)

NLP Natural Language Processing (การประมวลผลภาษาธรรมชาติ)

TF-IDF Term Frequency-Inverse Document Frequency (การถ่วงน้ำหนักความถี่คำในเอกสาร)

FSM Finite State Machine (แบบจำลองเครื่องสถานะจำกัด)

IoMT Internet of Medical Things (อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งทางการแพทย์)

PDPA Personal Data Protection Act (พระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562)

ThaID ระบบพิสูจน์และยืนยันตัวตนทางดิจิทัลของกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย

LUT Look-Up Table (ตารางค้นหาค่าเชิงเส้นสำหรับแปลงระดับแรงดันแบตเตอรี่)

SPA Single-Page Application (สถาปัตยกรรมเว็บแอปพลิเคชันหน้าเดียว)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการให้บริการสาธารณสุขของประเทศไทยในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแผนกผู้ป่วยนอก (Outpatient Department: OPD) ของโรงพยาบาลรัฐระดับตติยภูมิและโรงพยาบาลศูนย์ทั่วประเทศ กำลังเผชิญกับสภาวะความแออัดของผู้มารับบริการเป็นจำนวนมหาศาล โดยมีจำนวนผู้ป่วยนอกเฉลี่ยตั้งแต่ 1,500 ถึงมากกว่า 3,000 คนต่อวัน
ส่งผลให้ระยะเวลาการรอคอยเพื่อเข้ารับการตรวจรักษาจากแพทย์หรือรับบริการทางการแพทย์มีระยะเวลายาวนานเฉลี่ย 2 ถึง 4 ชั่วโมง ในกระบวนการทำงานแบบดั้งเดิม
ผู้ป่วยที่เดินทางมาถึงโรงพยาบาลจะได้รับการตรวจคัดกรองเบื้องต้น (Triage) ณ จุดคัดกรองหลัก
เพื่อทำการวัดสัญญาณชีพพื้นฐาน เช่น ความดันโลหิต อัตราการเต้นของหัวใจ อุณหภูมิร่างกาย
และค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือด เพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้น
จากนั้นผู้ป่วยจะได้รับบัตรคิวและถูกส่งต่อไปยังพื้นที่พักคอยหน้าห้องตรวจของแต่ละแผนกเฉพาะทาง

ข้อจำกัดเชิงโครงสร้างที่สำคัญยิ่งของกระบวนการนี้คือ "ช่องว่างความเสี่ยงระหว่างการรอคอย" (Waiting Gap)
เนื่องจากสัญญาณชีพของผู้ป่วยเป็นข้อมูลทางสรีรวิทยาที่มีความผันผวนและเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามพยาธิสภาพของโรค โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยสูงอายุ ผู้ป่วยที่มีโรคประจำตัวเรื้อรัง (Non-Communicable Diseases: NCDs) เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง
หรือผู้ป่วยที่มีภาวะติดเชื้อเฉียบพลัน ในระหว่างการนั่งรอตรวจเป็นเวลานานหลายชั่วโมง
ผู้ป่วยอาจเกิดภาวะทรุดลงทางคลินิกอย่างเฉียบพลัน (Clinical Deterioration) เช่น
ภาวะช็อกจากการไหลเวียนโลหิตล้มเหลว (Occult Shock ซึ่งมีค่า Shock Index > 0.9),
ภาวะกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดเฉียบพลัน (Acute Coronary Syndrome), ภาวะออกซิเจนในเลือดต่ำกะทันหัน (Hypoxemia), หรือการเกิดอุบัติเหตุพลัดตกหกล้มเนื่องจากอาการหน้ามืดหรือวิงเวียนศีรษะ
ซึ่งในพื้นที่รอคอยที่มีความแออัด พยาบาลไม่สามารถตรวจตราผู้ป่วยทุกคนได้อย่างทั่วถึง

ทำให้การตรวจพบความผิดปกติเกิดความล่าช้า
จนอาจนำไปสู่ภาวะหัวใจหยุดเต้นกะทันหันหรือการเสียชีวิตที่สามารถป้องกันได้

นอกจากนี้ ระบบการจัดการคิวในโรงพยาบาลส่วนใหญ่ยังคงเป็นระบบคิวแบบคงที่ (Static First-Come, First-Served Queue) ที่จัดลำดับตามเวลาที่ผู้ป่วยมาถึงเป็นหลัก
โดยไม่สามารถปรับเปลี่ยนลำดับความเร่งด่วนแบบไดนามิก (Dynamic Queue Prioritization)
ตามสภาวะวิกฤตทางสรีรวิทยาที่เกิดขึ้นจริงในขณะนั้นได้
ขณะเดียวกันการสื่อสารสถานะคิวไปยังผู้ป่วยยังพึ่งพาป้ายประกาศหรือเสียงเรียกคิวแบบรวมศูนย์
ทำให้ผู้ป่วยไม่สามารถผละออกจากบริเวณหน้าห้องตรวจได้ ก่อให้เกิดความวิตกกังวลและความแออัดสะสม

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งทางการแพทย์ (Internet of Medical Things: IoMT), ระบบสมองกลฝังตัวพลังงานต่ำ, อัลกอริทึมการประมวลผลสัญญาณชีวภาพ (Biomedical Signal Processing), ปัญญาประดิษฐ์ช่วยคัดแยกความรุนแรง (AI-assisted Triage) ภายใต้แนวคิด Human-in-the-loop, และเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันสมัยใหม่ (Next.js App Router)
จึงเป็นโอกาสสำคัญในการพัฒนาระบบ "อุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปเช็คคิวผู้ป่วยนอก"
เพื่อปิดช่องว่างความเสี่ยงในการรอคอย ติดตามสัญญาณชีพผู้ป่วยอย่างต่อเนื่องแบบเรียลไทม์
และสนับสนุนการตัดสินใจของพยาบาลในการบริหารจัดการคิวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวมใส่ต้นแบบ (Smart Watch Prototype)
โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Seeed Studio XIAO ESP32-C3 ร่วมกับเซนเซอร์ MAX32664 และ MPU-6050
สำหรับตรวจวัดสัญญาณชีพ (Heart Rate, SpO2, Skin Temp, Estimated BP Trend)
และตรวจจับการหกล้มแบบหลายขั้นตอนได้แบบเรียลไทม์

2. เพื่อพัฒนาระบบประมวลผลและกรองสัญญาณบนอุปกรณ์ (Edge Signal Filtering)
ประกอบด้วยอัลกอริทึม Signal Quality Index (SQI), Skin-Contact Detection และ Finite State Machine
สำหรับการตรวจจับการหกล้มเพื่อลดอัตราการแจ้งเตือนผิดพลาด (False Alarms)

3. เพื่อพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์สนับสนุนการคัดแยกความรุนแรงของผู้ป่วย (AI-assisted Triage Decision Support) 5 ระดับ (RED, PINK, YELLOW, GREEN, WHITE) ผสานการประมวลผลข้อความ Chief Complaint ด้วย NLP และกฎทางคลินิก พร้อมแจกแจงเหตุผล (Explainable AI Reasons) ภายใต้แนวคิด Human-in-the-loop

4. เพื่อพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชัน Next.js สำหรับพยาบาลในการติดตามสัญญาณชีพแบบรวมศูนย์ (Centralized Nurse Dashboard), การตรวจสอบและยืนยันผลความรุนแรง (Nurse Confirmation), และการจัดการคิวแบบพลวัต (Dynamic Queue Prioritization)

5. เพื่อพัฒนาระบบบัตรคิวดิจิทัลและการแจ้งเตือนบนสมาร์ตโฟนสำหรับผู้รับบริการ (Patient Mobile Web Queue Card) ผ่าน HTML5 Canvas API (queue-card-canvas.ts) และการเชื่อมต่อระบบยืนยันตัวตนดิจิทัล (ThaID และ PIN)

6. เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบแบบบูรณาการ ทั้งความแม่นยำของเซนเซอร์, ความไวและความจำเพาะของการตรวจจับการหกล้ม, ประสิทธิภาพโมเดล AI Triage, ความหน่วงเครือข่าย และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

1.3 สมมติฐานของโครงงาน

1.3.1 อุปกรณ์สวมใส่ Smartwatch ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เซนเซอร์ MAX32664 Biometric Sensor Hub และ MAX30102 สามารถตรวจวัดอัตราการเต้นของหัวใจและ SpO2 ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) ไม่เกิน ±3.5% เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือแพทย์มาตรฐาน

1.3.2 อัลกอริทึมตรวจจับการหกล้มแบบหลายขั้นตอน (Multi-Stage Fall Detection FSM) บนเซนเซอร์ MPU-6050 ร่วมกับการวิเคราะห์เวกเตอร์ขนาดความเร่งรวม (Signal Vector Magnitude: SVM) สามารถแยกแยะการหกล้มจริงออกจากการทำกิจวัตรประจำวัน (ADL) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความแม่นยำ (Accuracy) และ Sensitivity ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90

1.3.3 ระบบปัญญาประดิษฐ์ช่วยคัดกรอง (AI-assisted Triage) ที่ผสานสัญญาณชีพร่วมกับอาการสำคัญ

สามารถจัดลำดับความเร่งด่วนตามเกณฑ์ ESI ได้สอดคล้องกับพยาบาลวิชาชีพ
โดยมีความแม่นยำยอมรับความคลาดเคลื่อน 1 ระดับ (Within-one-level Accuracy) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90
1.3.4 ระบบจัดการคิวแบบไดนามิก (Dynamic Queue Prioritization)
ที่ปรับลำดับคิวตามการเปลี่ยนแปลงสัญญาณชีพของผู้ป่วยแบบเรียลไทม์
จะช่วยลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยที่มีภาวะวิกฤต
และป้องกันอันตรายจากภาวะแทรกซ้อนเฉียบพลันในพื้นที่รอคอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. สมมติฐานด้านการตรวจจับการหกล้ม (Multi-Stage Fall Detection): การใช้อัลกอริทึม Finite State Machine ที่ตรวจสอบลำดับเหตุการณ์ Free-Fall (SVM < 0.5g) ตามด้วย Impact (SVM > 2.5g) และ Inactivity จะมีความไว (Sensitivity) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 และลดการเตือนผิดพลาด (False Positives) จากกิจกรรมประจำวันให้เหลือ 0%

3. สมมติฐานด้าน AI-assisted Triage และ Human-in-the-loop: การผสานโมเดล Machine Learning ร่วมกับ Rule-based Logic จาก Vital Signs และ Chief Complaint จะให้ค่า Within-one-level Accuracy สูงกว่าร้อยละ 95 และการให้ AI เสนอแนะพร้อมเหตุผลประกอบ (AI Reasons) จะช่วยสนับสนุนให้พยาบาลยืนยันผล (Nurse Confirmation) ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

4. สมมติฐานด้านระบบจัดการคิวและการรอคอย: การจัดลำดับคิวแบบพลวัตตามดัชนีช็อก (Shock Index) และระดับความรุนแรงที่พยาบาลยืนยัน ร่วมกับการแจ้งเตือนคิวผ่านสมาร์ตโฟน จะช่วยลดความวิตกกังวลและเพิ่มระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 4.00 จาก 5.00 คะแนน

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1.4.1 ขอบเขตด้านฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์สวมใส่ (Hardware Scope)

1) หน่วยประมวลผลหลัก: ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Seeed Studio XIAO ESP32-C3 สถาปัตยกรรม RISC-V 32 บิต ความถี่ 160 MHz รองรับ Wi-Fi 2.4 GHz และ BLE 5.0

2) โมดูลเซนเซอร์สัญญาณชีพ: ใช้ Maxim MAX32664 Biometric Sensor Hub ร่วมกับเซนเซอร์โฟโตพลีทิสโมกราฟี MAX30102 สำหรับตรวจวัดสัญญาณ PPG (Red 660 nm, IR 880 nm) ผ่านบัส I2C

3) เซนเซอร์วัดความเฉื่อย: ใช้ MPU-6050 6-DOF IMU (Accelerometer ±8g, Gyroscope ±1000°/s) ผ่านบัส I2C สำหรับการตรวจจับการหกล้มและการเคลื่อนไหว

4) จอแสดงผล: ใช้จอทรงกลม TFT LCD ขนาด 1.28 นิ้ว (ไดรเวอร์ GC9A01, ความละเอียด 240x240 พิกเซล) ผ่านบัส SPI

5) ระบบพลังงาน: แบตเตอรี่ Lithium-Polymer 3.7V 500 mAh พร้อมวงจรชาร์จ TP4056, วงจรป้องกัน DW01A, LDO AP2112K (3.3V 600mA) และวงจรแบ่งแรงดัน 100kΩ/100kΩ สำหรับตรวจวัดระดับแบตเตอรี่ผ่าน ADC

6) ตัวเรือนนาฬิกา: ออกแบบด้วยโปรแกรม FreeCAD และขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (FDM) ด้วยวัสดุ PETG/PLA ขนาดกะทัดรัด (SmartWatchV13)

1.4.2 **ขอบเขตด้านซอฟต์แวร์และระบบคลาวด์** (Software Scope)

1) เว็บแอปพลิเคชันส่วนหน้า: พัฒนาด้วย Next.js 16.3.0 (App Router), React 19.2.8, TypeScript 5.9.3, และ Tailwind CSS รองรับการแสดงผล Responsive แบบ Single-Page Application (SPA)

2) โครงสร้างโฟลเดอร์ซอฟต์แวร์: จัดระเบียบแบบ Feature-Driven Architecture แบ่งออกเป็น `src/features/account`, `src/features/auth`, `src/features/queue`, `src/features/registration`, `src/features/settings`, `src/shared/api`, `src/shared/auth`, `src/shared/config`, และ `src/shared/data`

3) การกำหนดค่าขณะรันไทม์ (Runtime Configuration): อ่านค่าสภาพแวดล้อมจาก `public/runtime-config.js` ผ่าน `window.PATIENT_APP_ENV` เพื่อกำหนด `PATIENT_API_BASE_URL` และ `PATIENT_STATUS_REFRESH_MS` ได้โดยไม่ต้องบิลด์แอปใหม่

4) ระบบฐานข้อมูลและคลาวด์: ใช้ Firebase Cloud Firestore และ Realtime Database สำหรับจัดเก็บข้อมูล 8 เอนทิตีหลัก (`Patient`, `Device`, `Vital`, `Telemetry`, `Triage`, `Alert`, `Queue`, `Nurse`)

5) ระบบความปลอดภัยและการยืนยันตัวตน: รองรับการเข้าสู่ระบบด้วย ThaID OpenID Connect, รหัสผ่านส่วนบุคคล 6 หลัก (PIN Hashing), นโยบาย PDPA Consent, และระบบรักษาความปลอดภัย API ด้วย Token และ Device Pairing Verification (HTTP 409 ปฏิเสธการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ที่ยังไม่จับคู่)

6) ระบบบัตรคิวดิจิทัล: สร้างรูปภาพบัตรคิวแบบไดนามิกผ่าน HTML5 Canvas API (`queue-card-canvas.ts`) และระบบตรวจสอบคิวผ่าน Polling Mechanism (`useQueuePolling.ts`)

7) ชุดการทดสอบอัตโนมัติ (Automated Testing Suite): พัฒนาชุดทดสอบ Unit/Component Tests ด้วย Vitest 4.1.10 และ React Testing Library 16.3.2

1.4.3 ขอบเขตด้านปัญญาประดิษฐ์และการคัดแยกผู้ป่วย (AI Triage Scope)

1) การจำแนกระดับความรุนแรง: รองรับ 5 ระดับ ได้แก่ RED (วิกฤตฉุกเฉิน), PINK (ฉุกเฉินเร่งด่วน), YELLOW (เร่งด่วนปานกลาง), GREEN (ไม่เร่งด่วน), และ WHITE (ทั่วไป)

2) การวิเคราะห์อาการสำคัญ (Chief Complaint): ประมวลผลข้อความภาษาไทยด้วยเทคนิค NLP (Tokenization, TF-IDF Unigram/Bigram) ร่วมกับโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง

3) กฎคัดกรองฉุกเฉิน (Rule-based Overrides): กำหนดกฎทางการแพทย์ เช่น SpO2 < 90%, Shock Index > 0.9, หรือมีเหตุการณ์ Fall Detection ให้ปรับเป็นระดับวิกฤตทันที

4) สถาปัตยกรรม Human-in-the-loop: ระบบจะแสดงผลเป็น "AI Suggested Severity" พร้อมแจกแจงเหตุผล (Explainable Reasons) โดยให้พยาบาลทำการตรวจสอบและกดยืนยันหรือปรับแก้เป็น "Nurse Confirmed Severity" ซึ่งเป็นค่าจริงที่ใช้ในการจัดคิว

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ผู้ป่วยที่เข้ารับการทดสอบจะต้องสวมใส่อุปกรณ์สวมใส่ไว้ที่บริเวณข้อมือในลักษณะที่กระชับแนบสนิทกับผิวหนังอย่างเหมาะสม และอยู่ในสภาวะพักผ่อนหรือไม่มีการขยับแขนอย่างรุนแรงในขณะที่เซนเซอร์ทำการวัดค่าสัญญาณชีพ

2. พื้นที่ทดสอบและพื้นที่รอคอยภายในสถานพยาบาลมีสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi 2.4 GHz) ครอบคลุมอย่างสม่ำเสมอและมีความเสถียรเพียงพอสำหรับการรับส่งข้อมูล

3. ผู้ป่วยหรือญาติผู้ดูแลมีอุปกรณ์สมาร์ตโฟนที่สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและเปิดใช้งานโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์มาตรฐานที่รองรับเทคโนโลยีเว็บสมัยใหม่ได้

1.6 ข้อจำกัดของโครงงาน

1. อุปกรณ์สวมใส่ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นได้รับการออกแบบเพื่อการวิจัยและติดตามสัญญาณชีพเบื้องต้นเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ทดแทนเครื่องมือแพทย์ระดับวินิจฉัยโรคขั้นสูง (Diagnostic Medical Devices) หรืออุปกรณ์ช่วยชีวิตในห้องไอซียูได้

2. ค่าความดันโลหิตที่ได้จากเซนเซอร์เชิงแสง (MAX32664) เป็นค่าประมาณการแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (Estimated Blood Pressure Trend) ซึ่งต้องอาศัยการเทียบมาตรฐาน (Calibration) กับเครื่องวัดความดันโลหิตแบบบีบแขนมาตรฐาน (Cuff-based Sphygmomanometer) ของผู้ป่วยแต่ละบุคคล

3. ระบบปัญญาประดิษฐ์ช่วยคัดกรอง (AI Triage) ทำหน้าที่เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System) เพื่อเสนอแนะระดับความรุนแรงและเหตุผลประกอบเท่านั้น โดยคำตัดสินใจขั้นสุดท้ายต้องขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของพยาบาลวิชาชีพเสมอ

4. ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝนโมเดล AI ยังมีขอบเขตจำกัดเฉพาะกลุ่มอาการสำคัญที่พบบ่อยในแผนกผู้ป่วยนอก และยังไม่ได้ผ่านการทดสอบทางคลินิกจริงในโรงพยาบาลขนาดใหญ่ (Clinical Trial)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ประโยชน์ต่อผู้รับบริการ (ผู้ป่วยและญาติ): ช่วยเพิ่มความปลอดภัยระหว่างการรอคอย โดยได้รับการเฝ้าระวังสัญญาณชีพอย่างต่อเนื่อง ได้รับการช่วยเหลือทันท่วงทีหากเกิดภาวะวิกฤตหรือหกล้ม สามารถตรวจสอบลำดับคิวและประมาณเวลาตรวจผ่านสมาร์ตโฟนได้ ช่วยลดความวิตกกังวลและลดความแออัดในพื้นที่รอคอย

1.7.2 ประโยชน์ต่อบุคลากรทางการแพทย์ (พยาบาลและเจ้าหน้าที่): ช่วยลดภาระงานในการเดินตรวจวัดสัญญาณชีพซ้ำ มีหน้าจอกระดานรวมศูนย์ (Nurse Dashboard) แสดงสถานะสุขภาพของผู้ป่วยทุกคนแบบเรียลไทม์ ได้รับคำแนะนำระดับความรุนแรงจาก AI พร้อมเหตุผลประกอบเพื่อช่วยตัดสินใจ และสามารถจัดลำดับคิวผู้ป่วยที่มีภาวะวิกฤตให้ได้รับการตรวจก่อนได้อย่างเป็นระบบ

1.7.3 ประโยชน์ต่อสถานพยาบาลและการบริหารจัดการ: ช่วยลดความแออัดสะสม ยกระดับการให้บริการทางการแพทย์สู่มาตรฐานโรงพยาบาลอัจฉริยะ (Smart Hospital) และมีข้อมูลสถิติสัญญาณชีพย้อนหลังสำหรับประเมินคุณภาพการให้บริการ

1.7.4 ประโยชน์ทางวิชาการและวิศวกรรมศาสตร์: ได้องค์ความรู้และต้นแบบในการบูรณาการเทคโนโลยีระบบสมองกลฝังตัว, การประมวลผลสัญญาณชีวภาพบนขอบเครือข่าย (Edge Processing), ปัญญาประดิษฐ์ทางการแพทย์ภายใต้แนวคิด Human-in-the-loop, และการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสารสนเทศสุขภาพ

1.8 แผนการดำเนินงานและระยะเวลา

การดำเนินงานโครงงานมีระยะเวลาตลอด 2 ภาคการศึกษา (ปีการศึกษา 2568) โดยมีแผนภูมิแกนต์และรายละเอียดการดำเนินงานดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานและแผนภูมิแกนต์ตลอด 2 ภาคการศึกษา

กิจกรรม / ขั้นตอนการดำเนินงาน	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาความเป็นมา ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	■	■							
2. วิเคราะห์ความต้องการและออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ		■	■						
3. ออกแบบวงจรฮาร์ดแวร์และตัวเรือนนาฬิกา 3D CAD			■	■					

4. พัฒนาเฟิร์มแวร์ ESP32-C3 และตัวกรองสัญญาณ Edge	■	■					
5. พัฒนาระบบ AI Triage (NLP/Rules) & Database		■	■				
6. พัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน Next.js & Nurse Dashboard			■	■			
7. รวมระบบ (System Integration) และทดสอบฟังก์ชัน				■	■		
8. ทดสอบความแม่นยำเซนเซอร์, Fall, AI, และ Latency					■	■	
9. ประเมินความพึงพอใจและจัดทำเล่มรายงานปริญญานิพนธ์						■	

1.9 ประมาณการงบประมาณและค่าใช้จ่าย

ค่าใช้จ่ายในการจัดหาอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องมือในการพัฒนาโครงงาน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ประมาณการงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการพัฒนาโครงงาน (BOM)

ลำดับ	รายการอุปกรณ์ / ชิ้นส่วน	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Seeed Studio XIAO ESP32-C3	2 บอร์ด	220.00	440.00
2	โมดูลประมวลผลสัญญาณชีวภาพ MAX32664 + MAX30102	2 ชุด	550.00	1,100.00
3	โมดูลเซนเซอร์วัดความเฉื่อย 6 แกน MPU-6050 (GY-521)	2 ชุด	65.00	130.00

4	หน้าจอแสดงผลทรงกลม Round TFT LCD 1.28" GC9A01	2 ชุด	180.00	360.00
5	แบตเตอรี่ Lithium-Polymer 3.7V 500 mAh พร้อมวงจรชาร์จ	2 ชุด	120.00	240.00
6	วัสดุเส้นพลาสติก 3D Printing (PETG/PLA) สำหรับพิมพ์ตัวเรือน	1 ม้วน	450.00	450.00
7	สายรัดข้อมือซิลิโคนมาตรฐานและอุปกรณ์ประกอบตัวเรือน	2 ชุด	90.00	180.00
8	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ย่อย (LDO, Resistors, Switch, สายไฟ)	1 ชุด	200.00	200.00
9	ค่าบริการคลาวด์และเซิร์ฟเวอร์ทดสอบระบบ (Firebase/Hosting)	1 ระบบ	0.00	0.00 (Free Tier)
รวมงบประมาณทั้งสิ้น (บาท)				3,100.00

1.10 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

• **แผนกผู้ป่วยนอก** (Outpatient Department: OPD): หน่วยบริการทางการแพทย์ของโรงพยาบาลที่ให้การตรวจวินิจฉัยและรักษาผู้ป่วยที่ไม่ได้นอนพักรักษาตัวค้างคืนในโรงพยาบาล

• **การคัดกรองและประเมินระดับความรุนแรง** (Triage): กระบวนการจำแนกและจัดลำดับความเร่งด่วนในการตรวจรักษาผู้ป่วยตามระดับความรุนแรงของอาการและสัญญาณชีพทางสรีรวิทยา

• **ระบบคัดแยก 5 ระดับ (5-Level Triage):** การจำแนกระดับความรุนแรงของผู้ป่วยออกเป็น 5 ระดับตามเกณฑ์ ESI/KTAS ได้แก่ RED (วิกฤต), PINK (ฉุกเฉิน), YELLOW (เร่งด่วน), GREEN (ไม่เร่งด่วน), และ WHITE (ทั่วไป)

• **ปัญญาประดิษฐ์ช่วยคัดกรอง (AI-assisted Triage):** ระบบประมวลผลสัญญาณชีพและข้อความอาการสำคัญด้วยแบบจำลอง Machine Learning และกฎทางคลินิก เพื่อสร้างข้อเสนอแนะระดับความรุนแรง (AI Suggested Severity) และแจกแจงเหตุผลประกอบ

• **มนุษย์เป็นศูนย์กลางในการตัดสินใจ (Human-in-the-loop):** แนวคิดทางวิศวกรรมซอฟต์แวร์การแพทย์ที่กำหนดให้ผลลัพธ์จาก AI เป็นเพียงคำแนะนำ โดยมีพยาบาลวิชาชีพเป็นผู้ตรวจสอบและยืนยันผลขั้นสุดท้าย (Nurse Confirmed Severity) ซึ่งเป็นค่าเดียวที่นำไปใช้จัดคิว

• **ความแม่นยำแบบยอมรับความคลาดเคลื่อน 1 ระดับ (Within-one-level Accuracy):** ดัชนีชี้วัดความแม่นยำของแบบจำลองคัดแยกผู้ป่วย โดยนับผลการทำนายที่ถูกต้องหรือคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±1 ระดับจากระดับความรุนแรงจริง (เช่น AI ทำนาย YELLOW แต่ผลจริงคือ PINK หรือ GREEN)

• **ความแม่นยำเชิงเส้นทางบริการ (Route Accuracy):** ความแม่นยำในการจัดกลุ่มระดับความรุนแรงเข้าสู่เส้นทางบริการหลักของโรงพยาบาล (Fast Track: RED/PINK, Regular Clinic: YELLOW/GREEN/WHITE)

• **สัญญาณโทรมาตรทางการแพทย์ (Telemetry Data):** ข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณชีพและสภาวะการเคลื่อนไหวที่ถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายจากอุปกรณ์สวมใส่ขึ้นสู่ระบบคลาวด์เซิร์ฟเวอร์แบบเรียลไทม์

• **โฟโตพลีทิสโมกราฟี (Photoplethysmography: PPG):** เทคนิคเชิงแสงที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเลือดในหลอดเลือดฝอยใต้ผิวหนังด้วยแสงสีแดงและอินฟราเรด เพื่อคำนวณอัตราการเต้นของหัวใจและความอิ่มตัวของออกซิเจน

• **ดัชนีช็อก (Shock Index: SI):** อัตราส่วนระหว่างอัตราการเต้นของหัวใจ (HR) ต่อค่าความดันโลหิตซิสโตลิก (SBP) โดยค่า SI > 0.9 บ่งชี้ภาวะเสี่ยงต่อการไหลเวียนโลหิตล้มเหลวเฉียบพลัน

• **การตรวจจับการหกล้มแบบหลายขั้นตอน** (Multi-Stage Fall Detection): อัลกอริทึม Finite State Machine ที่ตรวจจับลำดับเหตุการณ์ Free-Fall, Impact, และ Post-Impact Inactivity ต่อเนื่องกันเพื่อลด False Positives จากกิจกรรมประจำวัน

• **การจับคู่อุปกรณ์อย่างปลอดภัย** (Device Pairing): กระบวนการผูกรหัสประจำตัวอุปกรณ์สวมใส่ (Device ID) เข้ากับรหัสประจำตัวผู้ป่วย (Patient ID) และการตรวจรับรองสิทธิ์ผ่าน Token เพื่อป้องกันการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์แปลกปลอม (HTTP 409 Conflict)

• **หน่วยความจำสำรองแบบวงกลม** (Offline Ring Buffer): โครงสร้างข้อมูลแบบ Circular Buffer บน ESP32 สำหรับบันทึกข้อมูลสัญญาณชีพชั่วคราวเมื่อการเชื่อมต่อ Wi-Fi ขาดหาย และส่งย้อนหลังขึ้นคลาวด์เมื่อสัญญาณกลับมา

• **เว็บแอปพลิเคชันหน้าเดียว** (Single-Page Application: SPA): รูปแบบสถาปัตยกรรมเว็บแอปพลิเคชันที่โหลดหน้าเว็บเพียงครั้งเดียวและสลับเปลี่ยนมุมมอง (Views) ภายในฝั่งเบราว์เซอร์ ช่วยให้การใช้งานผ่านการสแกน QR Code มีความราบรื่นโดยไม่ต้องรีเฟรชหน้าต่าง

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎีพื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีสารสนเทศสุขภาพ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการออกแบบและพัฒนาระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสัญญาณชีพและเว็บแอปพลิเคชันคัดแยกผู้ป่วยอัจฉริยะสำหรับการจัดการคิวผู้ป่วยนอก โดยครอบคลุมหัวข้อสำคัญดังต่อไปนี้

2.1 **ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบบริการผู้ป่วยนอกและการคัดกรอง** (OPD Workflow & Triage Systems) [5]–[7]

การคัดแยกผู้ป่วยในแผนกผู้ป่วยนอกและแผนกฉุกเฉินสากลนิยมใช้ระบบคัดกรอง 5 ระดับ เช่น Emergency Severity Index (ESI) ของสหรัฐอเมริกา และ Korean Triage and Acuity Scale (KTAS) ของประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงกว่าระบบคัดกรองแบบ 3 ระดับดั้งเดิม ในโครงงานนี้ได้นำหลักการดังกล่าวมาปรับประยุกต์ให้สอดคล้องกับบริบทของแผนกผู้ป่วยนอก (OPD) โดยแบ่งระดับความรุนแรงออกเป็น 5 ระดับดังนี้:

1. ระดับที่ 1 (RED - Resuscitation/Critical): ผู้ป่วยภาวะวิกฤตคุกคามต่อชีวิต เช่น ภาวะหัวใจหยุดเต้น, ภาวะช็อกรุนแรง (Shock Index > 0.9), ค่า SpO2 < 90%, หรือเกิดการหกล้มและหมดสติ ต้องได้รับการกู้ชีพและเข้าพบแพทย์ทันทีโดยไม่ต้องรอคิว

2. ระดับที่ 2 (PINK - Emergent): ผู้ป่วยที่มีความรุนแรงสูง มีสัญญาณชีพผิดปกติเด่นชัด หรือมีอาการสำคัญที่มีความเสี่ยงสูง เช่น เจ็บแน่นหน้าอกรุนแรง, หายใจลำบาก, ค่า SpO2 90-92%, หรือ HR > 130 bpm ควรได้รับการประเมินและตรวจรักษาภายใน 10-15 นาที

3. ระดับที่ 3 (YELLOW - Urgent): ผู้ป่วยที่มีความผิดปกติปานกลาง สัญญาณชีพคงที่แต่อาจทรุดลงได้หากรอนานเกินไป เช่น ไข้สูงร่วมกับชีพจรเร็ว, ปวดท้องรุนแรง, หรือมีโรคประจำตัวร่วม ควรได้รับการตรวจภายใน 30-45 นาที

4. ระดับที่ 4 (GREEN - Less Urgent): ผู้ป่วยที่มีอาการไม่รุนแรง สัญญาณชีพปกติ เช่น อาการหวัด, ผื่นแพ้, ปวดศีรษะเล็กน้อย สามารถรอตรวจตามลำดับคิวปกติได้ (ภายใน 60-90 นาที)

5. ระดับที่ 5 (WHITE - Non-Urgent): ผู้ป่วยทั่วไปที่มารับบริการตามนัด, ขอใบรับรองแพทย์, หรือรับยาต่อเนื่อง สัญญาณชีพปกติทุกรายการ สามารถรอรับบริการได้โดยไม่มีความเสี่ยงทางการแพทย์

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ค่ามาตรฐานสัญญาณชีพและระดับภาวะวิกฤตทางการแพทย์ (NEWS/MEWS)

พารามิเตอร์สัญญาณชีพ	**ระดับปกติ** (Normal)	**ระดับเฝ้าระวัง** (Warning)	**ระดับวิกฤตฉุกเฉิน** (Critical / Danger)
อัตราการเต้นของหัวใจ (Heart Rate: HR)	60 – 100 bpm	50 – 59 หรือ 101 – 120 bpm	< 50 หรือ > 120 bpm
ความอิ่มตัวของออกซิเจน (SpO2)	95 – 100 %	92 – 94 %	< 92 % (วิกฤต < 90%)
ความดันโลหิตซิสโตลิก (SBP)	100 – 139 mmHg	90 – 99 หรือ 140 – 159 mmHg	< 90 หรือ >= 160 mmHg
ความดันโลหิตไดแอสโตลิก (DBP)	60 – 89 mmHg	85 – 89 mmHg	< 60 หรือ >= 100 mmHg
อุณหภูมิร่างกาย (Body Temp: BT)	36.5 – 37.4 °C	37.5 – 38.4 °C (ไข้ต่ำ)	>= 38.5 °C หรือ < 35.5 °C
ดัชนีช็อก (Shock Index: SI = HR/SBP)	0.5 – 0.7	0.7 – 0.9 (ภาวะเสี่ยง)	> 0.9 (ภาวะช็อกเฉียบพลัน)

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Theoretical Framework) [8]–[20]

สัญญาณชีพเป็นตัวบ่งชี้สรีรวิทยาพื้นฐานที่สะท้อนถึงการทำงานของระบบสำคัญในร่างกาย การตรวจวัดสัญญาณชีพอย่างต่อเนื่องช่วยให้สามารถตรวจพบสัญญาณเตือนของการทรุดลงของอาการได้ล่วงหน้า โดยเฉพาะการประเมินดัชนีช็อก (Shock Index: SI) ซึ่งเสนอโดย Rady et al. (1994) ดังแสดงในสมการ (2.1)

$$SI = \frac{HR}{SBP} \tag{2.1}$$

เมื่อ SI แทน ดัชนีช็อก (ไร้หน่วย), HR แทน อัตราการเต้นของหัวใจ (ครั้งต่อนาที, bpm), และ SBP แทน ค่าความดันโลหิตซิสโตลิก (มิลลิเมตรปรอท, mmHg) ในภาวะปกติค่า SI จะอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.7

หากค่า SI สูงกว่า 0.9 จะมีความไวสูงมากในการบ่งชี้ภาวะ Left Ventricular Failure และ Occult Shock แม้ว่าค่าความดันโลหิตตัวบนจะยังไม่ลดลงต่ำกว่า 90 mmHg ก็ตาม

2.3 เทคโนโลยีอุปกรณ์สวมใส่และเซนเซอร์โฟโตพลีทิสโมกราฟี (PPG)

เทคนิคโฟโตพลีทิสโมกราฟี (Photoplethysmography: PPG) เป็นการตรวจวัดทางทัศนศาสตร์โดยใช้แสงความยาวคลื่นเฉพาะฉายผ่านผิวหนัง เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเลือดในหลอดเลือดฝอยในแต่ละรอบการบีบตัวของหัวใจ การคำนวณค่า SpO2 อาศัยคุณสมบัติทางสเปกโทรสโกปีของออกซีฮีโมโกลบิน (HbO2) ซึ่งดูดกลืนแสงอินฟราเรด (880-940 nm) ได้ดี และดีออกซีฮีโมโกลบิน (Hb) ซึ่งดูดกลืนแสงสีแดง (660 nm) ได้ดี โดยระบบจะคำนวณอัตราส่วนการดูดกลืนแสง (Ratio of Ratios: R) จากสัญญาณกระแสสลับ (AC) และกระแสตรง (DC) ดังแสดงในสมการ (2.2)

$$R = \frac{\frac{AC_{red}}{DC_{red}}}{\frac{AC_{ir}}{DC_{ir}}} \tag{2.2}$$

จากนั้นจะนำค่า R ไปแปลงเป็นค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือด (SpO2) ผ่านสมการเทียบมาตรฐานเชิงประจักษ์ ดังแสดงในสมการ (2.3)

$$SpO_2 = 110 - 25 \times R \tag{2.3}$$

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซนเซอร์ PPG และชิปประมวลผล

คุณสมบัติ / พารามิเตอร์	MAX30100	MAX30102	MAX32664 Biometric Hub **(โครงงานนี้)**
ไฟ LED กำเนิดแสง	Red (660nm) + IR (880nm)	Red (660nm) + IR (880nm)	Red (660nm) + IR (880nm) ผ่าน MAX30102
ADC Resolution	14-bit	18-bit	18-bit ภายในตัวเซนเซอร์
On-chip Algorithm DSP	ไม่มี (MCU ต้องคำนวณดิบเอง)	ไม่มี (MCU ต้องคำนวณดิบเอง)	มี Micro-DSP บรรจุเฟิร์มแวร์คำนวณ HR/SpO2/BP

การขจัด Motion Artifact	จำกัดมาก (เกิด Noise สูง)	จำกัด (ต้องพึ่งพาซอฟต์แวร์ MCU)	มีระบบ Digital Filtering ในตัวฮาร์ดแวร์
การประเมินความดัน (BP Trend)	ไม่รองรับ	ไม่รองรับ	รองรับ Pulse Wave Morphology Analysis
ภาระการประมวลผลบน MCU	สูงมาก (MCU รันตลอดเวลา)	สูง (กินพลังงาน CPU)	ต่ำมาก (MCU เพียงแค่อ่านค่าผลลัพธ์ผ่าน I2C)

2.4 ทฤษฎีการตรวจจับการเคลื่อนไหวและการหกล้ม (Fall Detection)

การตรวจจับการหกล้มด้วยเซนเซอร์วัดความเฉื่อย 6 แกน (MPU-6050) อาศัยการคำนวณค่าเวกเตอร์ความเร่งรวม (Signal Vector Magnitude: SVM) จากแกน X, Y, Z ดังแสดงในสมการ (2.4)

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \tag{2.4}$$

โครงงานนี้ไม่ใช้การตัดสินใจแบบค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเดี่ยว (Single-threshold) เนื่องจากจะทำให้เกิดการเตือนผิดพลาด (False Positive) สูงมากจากการโยน วิ่ง หรือการทุบโต๊ะ แต่ใช้อัลกอริทึม Finite State Machine ที่ตรวจสอบลำดับเหตุการณ์จริง 3 ระยะต่อเนื่องกัน ได้แก่: 1) ระยะตกอิสระ (Free Fall Phase) ที่ค่า SVM ลดลงต่ำกว่า 0.5g 2) ระยะกระแทกพื้น (Impact Phase) ที่ค่า SVM พุ่งสูงเกิน 2.5g และ 3) ระยะนอนนิ่งไร้การเคลื่อนไหว (Post-fall Inactivity Phase) ต่อเนื่องอย่างน้อย 5 วินาที

2.5 การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) สำหรับวิเคราะห์อาการสำคัญ

ข้อมูลอาการสำคัญ (Chief Complaint) ที่ผู้ป่วยระบุในขั้นตอนการลงทะเบียน เช่น "เจ็บแน่นหน้าอก หายใจไม่ออก ร้าวไปที่แขนซ้าย" เป็นข้อมูลข้อความที่สามารถนำมาสกัดคุณลักษณะด้วยเทคนิค NLP โดยเริ่มต้นจากการตัดคำภาษาไทย (Tokenization), การตัดคำหยุด (Stop words removal),

และการแปลงข้อความเป็นเวกเตอร์ตัวเลขด้วย Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) แบบ Unigram และ Bigram เพื่อส่งต่อไปยังแบบจำลอง Machine Learning ในการจำแนกกลุ่มอาการ

2.6 แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการประเมินผล

ในการจำแนกระดับความรุนแรงของอาการผู้ป่วย โครงงานได้ศึกษาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง เช่น Logistic Regression, Support Vector Machine (SVM), และ Random Forest Classifier ซึ่งทำการเรียนรู้จากเวกเตอร์คุณลักษณะที่ประกอบด้วยค่าสัญญาณชีพ (HR, SpO2, SBP, DBP, BT, RR, Pain Score) ร่วมกับเวกเตอร์ข้อความอาการสำคัญ การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลใช้ตัวชี้วัด Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, Confusion Matrix 5x5, และตัวชี้วัดเฉพาะทางการแพทย์ ได้แก่ Within-one-level Accuracy และ Route Accuracy เพื่อประเมินความปลอดภัยในการคัดแยกผู้ป่วย

2.7 สถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์สนับสนุนการตัดสินใจและ Human-in-the-loop

หลักการสำคัญของระบบปัญญาประดิษฐ์ทางการแพทย์คือ AI ไม่ใช่ผู้ตัดสินใจสูงสุดและไม่ใช่เครื่องมือวินิจฉัยโรค โครงงานนี้จึงออกแบบสถาปัตยกรรมแบบ Human-in-the-loop โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชั้นอย่างเด็ดขาด:

1. AI Suggested Severity: ระดับความรุนแรงที่ระบบ AI และ Rule Engine เสนอแนะ พร้อมทั้งแสดงรายการเหตุผลประกอบอย่างโปร่งใส (Explainable AI Reasons เช่น "SpO2 < 90% และพบคำสำคัญเจ็บแน่นหน้าอก") เพื่อลดสภาวะกล่องดำ (Black-Box Problem)

2. Nurse Confirmed Severity: ระดับความรุนแรงที่พยาบาลวิชาชีพเป็นผู้ตรวจสอบอาการจริงของผู้ป่วยและกดยืนยัน (Confirm) หรือปรับแก้ไข (Modify) โดยระบบจะใช้ Nurse Confirmed Severity นี้เพียงค่าเดียวในการจัดลำดับคิวและดำเนินการทางการแพทย์

2.8 สถาปัตยกรรมเว็บแอปพลิเคชันและการสื่อสารเครือข่าย

ระบบเว็บแอปพลิเคชันพัฒนาด้วย Next.js 16.3 (App Router) บนพื้นฐานของ React 19 และ TypeScript 5 ซึ่งรองรับการเรนเดอร์แบบ React Server Components (RSC)

เพื่อความรวดเร็วในการโหลดข้อมูล และ Client Components สำหรับการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ การสื่อสารระหว่างเว็บแอปพลิเคชันและอุปกรณ์สวมใส่ดำเนินการผ่าน RESTful API บนโปรโตคอล HTTPS ร่วมกับระบบ Interval Polling (`useQueuePolling.ts`) ทุกๆ 5-10 วินาที เพื่อดึงสถานะคิวล่าสุดอย่างมีประสิทธิภาพและลดภาระเซิร์ฟเวอร์ และใช้ HTML5 Canvas API ในการเรนเดอร์ภาพบัตรคิวดิจิทัลความละเอียดสูงแบบ Client-side (`queue-card-canvas.ts`)

2.9 ระบบความปลอดภัยข้อมูลสุขภาพและการยืนยันตัวตน

ข้อมูลสุขภาพและสัญญาณชีพจัดเป็นข้อมูลส่วนบุคคลที่มีความอ่อนไหวเป็นพิเศษตามพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562 (PDPA) ระบบจึงมีหน้าต่างยินยอมข้อมูล (`PdpaConsentModal.tsx`) ในการลงทะเบียนครั้งแรก พร้อมระบบยืนยันตัวตนผ่าน ThaID OpenID Connect ของกรมการปกครอง และระบบรหัสผ่าน PIN 6 หลักที่ผ่านการเข้ารหัสทางเดียว (Hashing) นอกจากนี้ยังมีการรักษาความปลอดภัย API ด้วยการตรวจสอบ Device Pairing โดยหากมีอุปกรณ์ที่ยังไม่ได้จับคู่ส่งข้อมูลเข้ามา เซิร์ฟเวอร์จะปฏิเสธด้วยรหัส HTTP 409 Conflict ทันที

2.10 สถาปัตยกรรมฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์

เพื่อรักษาความสอดคล้องและความถูกต้องสมบูรณ์ของข้อมูลทางการแพทย์ (Data Integrity) ระบบได้ออกแบบโครงสร้างข้อมูลตามโมเดลเชิงสัมพันธ์ ประกอบด้วย 8 เอนทิตีหลัก ได้แก่ `Patient`, `Device`, `Vital`, `Telemetry`, `Triage`, `Alert`, `Queue`, และ `Nurse` ซึ่งมีการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ด้วย Foreign Keys และการจัดทำ Index เพื่อรองรับการสืบค้นข้อมูลสัญญาณชีพย้อนหลังได้อย่างรวดเร็ว

2.11 การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม 3 มิติ

ตัวเรือนนาฬิกาได้รับการออกแบบผ่านโปรแกรม FreeCAD แบบพารามิเตอร์ และขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM (Fused Deposition Modeling) โดยใช้วัสดุ PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อแรงกระแทก ยืดหยุ่น ทนต่อความชื้นและเหงื่อของผู้สวมใส่ และมีความปลอดภัยต่อการสัมผัสผิวหนัง (Skin-Safe)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและตารางสังเคราะห์วรรณกรรม (Related Work & Synthesis Table)

ตารางที่ 2.5 สรุปเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบติดตามสุขภาพและการคัดกรอง

งานวิจัย (ผู้แต่ง, ปี)	วิธีการและระบบที่พัฒนา	พารามิเตอร์สัญญาณชีพ / เซนเซอร์	ระบบคัดแยก / การประมวลผล	ตรวจจับการหกล้ม	กำกับดูแล Human-in-the-loop	ความแตกต่างจากโครงงานนี้
Kim et al. (2022) [4]	Wireless telemetry ในหอพักผู้ป่วย	HR, RR, SpO2 (Wearable patch)	Rule-based NEWS (Early Warning)	✕	✕	มุ่งเน้นผู้ป่วยใน (Inpatient) ไม่มีระบบคิว OPD และไม่มีการตรวจจับการหกล้ม
Levin et al. (2018) [16]	Electronic Triage (e-triage) ในห้องฉุกเฉิน	Spot-check vitals และข้อมูลซักประวัติ	Random Forest ML (ESI 5 ระดับ)	✕	✕	วัดสัญญาณชีพครั้งเดียวตอนแรกรับ ไม่มีการติดตามต่อเนื่อง และไม่มีอุปกรณ์สวมใส่
Kwon et al. (2021) [17]	Deep learning triage ทำนายการเสียชีวิต	ข้อมูลผลแล็บและ Vital signs ใน ED	Deep Neural Network (DNN)	✕	✕	โมเดลขาดความโปร่งใส (Black box) ไม่มีการกำกับดูแลหน้างาน และไม่มีฮาร์ดแวร์สวมใส่
Bourke et al. (2007) [11]	Fall detection ด้วย Accelerometer	ความเร่ง 3 แกน (Tri-axial Accel)	Upper Fall Threshold (UFT Algorithm)	✓	✕	ตรวจจับเฉพาะการเคลื่อนไหว ไม่มีการวัดสัญญาณชีพทางการแพทย์ และไม่มีระบบคิว
Awadalla et al. (2021) [22]	IoT healthcare monitoring system	อุณหภูมิกาย, HR (Raspberry Pi + Uno)	Threshold Alerting ผ่านระบบ Cloud	✕	✕	อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการสวมใส่เคลื่อนที่ ขาดระบบคัดแยก 5 ระดับและระบบคิว
Aziz et al. (2022) [21]	ESP32 vital signs patient monitoring	HR, SpO2 (ESP32 + WiFi)	Cloud Logging (IoT Dashboard	✕	✕	เน้นการส่งสัญญาณขึ้น Cloud ขาดระบบประเมินความเร่งด่วน การตรวจจับการหกล้ม และคิว

			)			
Gilboy et al. (2020) [5]	Emergency Severity Index (ESI v.4)	อาการสำคัญ, สัญญาณชีพ และการใช้ทรัพยากร	5-Level Clinical Tool (ประเมินด้วยมือ)	✗	✓	ใช้การประเมินด้วยมนุษย์ทั้งหมด ไม่มีการติดตามสัญญาณชีพแบบอัตโนมัติหรือเรียลไทม์
โครงงานนี้ (Smartwatch & Queue Portal)	Smartwatch ESP32-C3 + Web App + AI Triage + Dynamic Queue	HR, SpO2, Est-BP, Motion (MAX32664 & MPU-6050)	Hybrid Rule Guardrail + AI-assisted ESI 5 **ระดับ**	✓ (3-Stage FSM)	✓ **(พยาบาลอนุมัติ)**	**บูรณาการอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสัญญาณชีพ ตรวจจับการหกล้ม AI ช่วยคัดกรอง 5 ระดับ และปรับคิวอัตโนมัติครบวงจร**

หมายเหตุ : ✓ มีการทำงาน / สามารถทำได้ ✗ ไม่มีการทำงาน / ไม่สามารถทำได้

โครงงานนี้ใช้แนวคิดบูรณาการทั้งระบบสวมใส่แบบเรียลไทม์ การตรวจจับการหกล้ม และ AI คัดกรอง 5 ระดับภายใต้การกำกับดูแลของพยาบาล (Human-in-the-loop) เพื่อความปลอดภัยสูงสุด

คณะผู้จัดทำได้ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสัญญาณชีพ ระบบ AI Triage และระบบจัดการคิวในโรงพยาบาล ดังแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปและเปรียบเทียบผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน

ผู้วิจัย / ปีที่พิมพ์	**หัวข้องานวิจัย / ระบบที่พัฒนา**	**เทคโนโลยีที่ใช้**	**ผลการวิจัย / จุดเด่น**	**การนำมาประยุกต์ใช้ในโครงงาน**
Rady et al. (1994)	การประเมินดัชนีช็อก (Shock Index) ในผู้ป่วยวิกฤต	สรีรวิทยาทางการแพทย์ / การวิเคราะห์ทางสถิติ	ค่า SI > 0.9 มีความไวสูงมากในการบ่งชี้ภาวะช็อก	ใช้เป็นเกณฑ์หลักในการคำนวณและแจ้งเตือนภาวะวิกฤต
Kim	ระบบติดตามสัญญาณชีพไร้สายใน	Wireless	ลดเวลาการตรวจพบอาการทรุ	ใช้เป็นแนวทางสถาปัตยกรรม

et al. (2022)	หอผู้ป่วย	Vital Sign Sensors / Real-time System	ดลงของผู้ป่วยได้อย่างมีนัยสำคัญ	การเฝ้าระวังผู้ป่วยนอก
Awadalla et al. (2021)	แพลตฟอร์ม IoT สำหรับการดูแลสุขภาพทางไกล	IoT Microcontroller / Cloud Web Dashboard	เว็บ Dashboard แสดงผลเรียลไทม์ช่วยให้การติดตามมีประสิทธิภาพ	ใช้เป็นแนวทางการพัฒนา Web Dashboard บน Next.js
Khan et al. (2024)	การทบทวนวรรณกรรมการติดตามสัญญาณชีพด้วย IoT	PPG Sensor / Microcontroller / Cloud Platform	PPG เหมาะสมที่สุดสำหรับ Smart Wearables ทางการแพทย์	นำมาใช้เลือกโมดูล MAX32664 และ MAX30102
Levin et al. (2018)	Machine Learning สำหรับการคัดแยกผู้ป่วย ESI	Random Forest / NLP Chief Complaint	ML ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคัดแยกผู้ป่วยฉุกเฉิน	นำมาใช้เป็นแนวทาง AI Triage ร่วมกับ NLP TF-IDF
Mubashir et al. (2013)	การสำรวจเทคนิคการตรวจจับการหกล้ม	Wearable Accelerometer / Multi-stage FSM	การตรวจจับแบบหลายขั้นตอนช่วยลด False Alarms ได้ดีเยี่ยม	นำมาใช้ออกแบบ State Machine Fall Detection

คณะผู้จัดทำ (โครงงานนี้)	ระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสัญญาณชีพและเว็บแอปคัดแยกผู้ป่วยอัจฉริยะ	ESP32-C3 / MAX32664 / MPU6050 / Next.js / AI Triage / ThaID	บูรณาการ Vital Signs, Multi-stage Fall, AI Triage Human-in-the-loop, และ Dynamic Queue	ระบบต้นแบบบูรณาการครบวงจรสำหรับโรงพยาบาลอัจฉริยะ

บทที่ 3
วิธีดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและระเบียบวิธีดำเนินงานในการวิจัยและพัฒนาระบบอุปกรณ์สวมใส่เพื่อการติดตามสุขภาพและเว็บแอปพลิเคชันคัดแยกผู้ป่วยอัจฉริยะสำหรับการจัดการคิวผู้ป่วยนอกอย่างละเอียด ครอบคลุมการวิเคราะห์ความต้องการ สถาปัตยกรรมระบบ การออกแบบฮาร์ดแวร์ การพัฒนาเฟิร์มแวร์ การออกแบบฐานข้อมูล การพัฒนาโมดูล AI Triage และเว็บแอปพลิเคชัน ตลอดจนระเบียบวิธีทดสอบระบบ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวม (Overall Methodology)

การดำเนินโครงงานใช้ระเบียบวิธีการพัฒนาเชิงวนซ้ำแบบสร้างต้นแบบ (Prototyping & Agile Development Lifecycle) โดยแบ่งออกเป็น 5 ระยะหลัก:

1. ระยะที่ 1: การศึกษาและรวบรวมข้อมูลความต้องการ (Requirements Analysis) — ศึกษากระบวนการคัดกรอง OPD, มาตรฐานสัญญาณชีพ, ระบบคัดแยก 5 ระดับ, กฎหมาย PDPA, และกำหนดข้อกำหนดเชิงเทคนิค

2. ระยะที่ 2: การออกแบบสถาปัตยกรรมและวงจรระบบ (System & Hardware Design) — ออกแบบผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์, ออกแบบตัวเรือน 3 มิติผ่าน FreeCAD, ออกแบบฐานข้อมูล 8 ตาราง และ Use Case Diagram

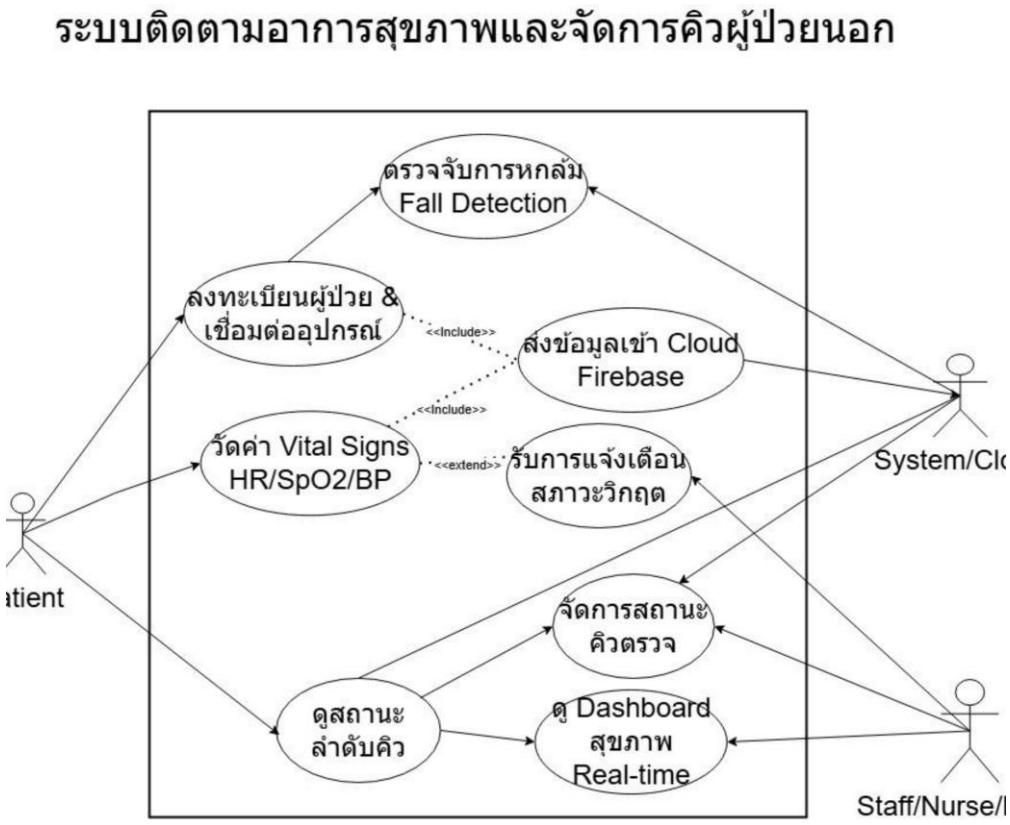
3. ระยะที่ 3: การประกอบและพัฒนาเฟิร์มแวร์ (Hardware & Firmware Implementation) — ประกอบวงจรต้นแบบ, พัฒนาเฟิร์มแวร์ ESP32-C3, อัลกอริทึม SQI, Skin-Contact, Multi-stage Fall Detection, และ Battery LUT

4. ระยะที่ 4: การพัฒนาระบบ AI และเว็บแอปพลิเคชัน (AI & Software Implementation) — พัฒนาโมดูล AI-assisted Triage (NLP/Rules), หน้าจอกระดานพยาบาล (Nurse Dashboard), บัตรคิวดิจิทัล, และระบบความปลอดภัย ThaID/PIN

5. ระยะที่ 5: การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ (System Integration & Evaluation) — ทดสอบความแม่นยำเซนเซอร์เทียบเครื่องมือแพทย์, ทดสอบ Fall Detection, ประเมิน Confusion Matrix ของ AI, วัดความหน่วงเครือข่าย, และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน 30 คน

3.2 การวิเคราะห์ความต้องการและการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ

ระบบได้รับการวิเคราะห์ความต้องการเชิงฟังก์ชัน (Functional Requirements) เช่น การวัดสัญญาณชีพแบบเรียลไทม์, การแจ้งเตือนเหตุหกล้ม, การประเมิน AI Triage 5 ระดับพร้อมเหตุผล, การยืนยันผลโดยพยาบาล, การปรับลำดับคิวอัตโนมัติ, และการดูบัตรคิวผ่านสมาร์ตโฟน และความต้องการเชิงไม่เชิงฟังก์ชัน (Non-Functional Requirements) เช่น ความหน่วงในการส่งข้อมูลไม่เกิน 5 วินาที, ความคลาดเคลื่อนสัญญาณชีพไม่เกิน ±5%, และการเข้ารหัสความปลอดภัยตามมาตรฐาน PDPA



รูปที่ 3.1 แผนภาพ Use Case Diagram และสถาปัตยกรรมระบบรวม

3.3 การออกแบบและพัฒนาฮาร์ดแวร์อุปกรณ์สวมใส่ Smartwatch

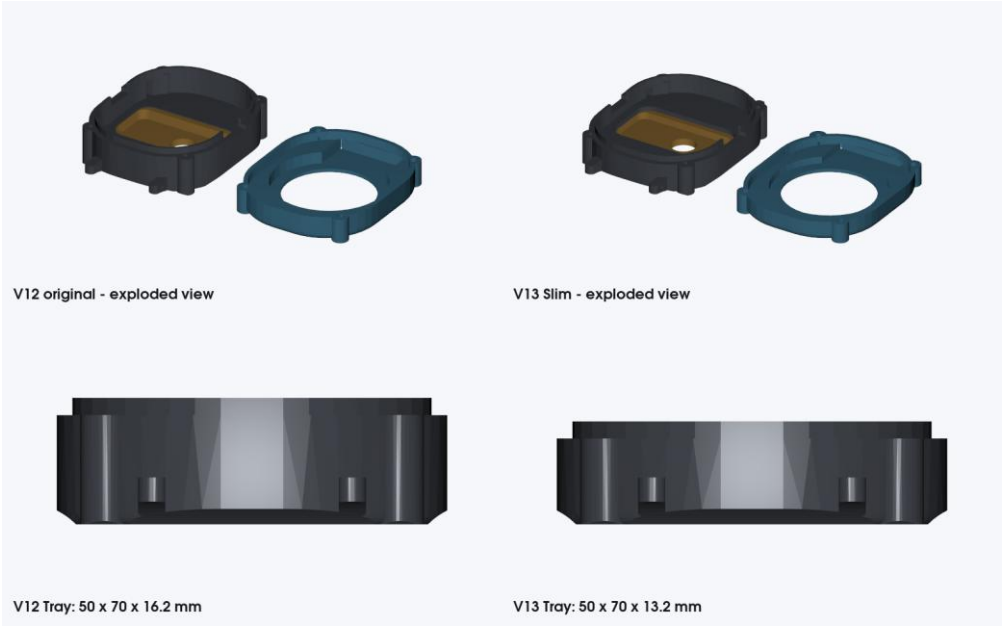
การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Seeed Studio XIAO ESP32-C3 กับโมดูลเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง แสดงรายละเอียดการกำหนดขาพินในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเชื่อมต่อพินระหว่าง ESP32-C3 กับโมดูลเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง

อุปกรณ์ / โมดูล	ขาเชื่อมต่อ (Pin Name)	ขาบนบอร์ด ESP32-C3	โปรโตคอล / หน้าที่การทำงาน
MAX32664 (Bio-Hub)	SDA / SCL	GPIO 4 / GPIO 5	I2C Bus (ส่งผ่านข้อมูลสัญญาณชีพ HR/SpO2/BP)
MAX32664 (Bio-Hub)	RSTN / MFIO	GPIO 3 / GPIO 2	Reset และ Data Ready Handshake Interrupt
MPU6050 (IMU)	SDA / SCL / INT	GPIO 4 / GPIO 5 / GPIO 1	I2C Bus & Motion/Fall Interrupt Trigger
Round LCD (GC9A01)	SCL (SCK) / SDA (MOSI)	GPIO 8 / GPIO 10	Hardware SPI Interface (ส่งข้อมูลภาพ)
Round LCD (GC9A01)	DC / CS / RST	GPIO 6 / GPIO 7 / GPIO 9	Data/Command, Chip Select, Display Reset
Battery ADC Divider	V_SENSE (100k/100k)	GPIO 0 (ADC1_CH0)	ตรวจวัดแรงดันแบตเตอรี่ LiPo (ช่วง 3.0–4.2V)
Power Management	3.3V / GND / BAT	3V3 / GND / BAT+	ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าและวงจรชาร์จ LiPo 3.7V

การตรวจวัดแรงดันแบตเตอรี่ใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ความต้านทาน R1 = 100kΩ และ R2 = 100kΩ เพื่อลดทอนแรงดันแบตเตอรี่สูงสุด 4.2V ให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 2.1V ก่อนป้อนเข้าสู่ช่อง ADC โดยคำนวณแรงดันจริงได้จากสมการ (3.1)

$$V_{bat} = ADC_{val} \times \left(\frac{3.3}{4095}\right) \times \left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right) = ADC_{val} \times \left(\frac{3.3}{4095}\right) \times 2 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 **โมเดล** 3D CAD **ตัวเรือนนาฬิกา** Smartwatch (SmartWatchV13 Comparison)

3.4 การพัฒนาเฟิร์มแวร์ระบบสมองกลฝังตัวบน ESP32-C3

การทำงานของเฟิร์มแวร์บนตัวอุปกรณ์สวมใส่ถูกควบคุมด้วยเครื่องสถานะจำกัด (Finite State Machine: FSM) เพื่อจัดการลำดับการทำงานตั้งแต่การเริ่มต้นระบบ การเชื่อมต่อ Wi-Fi การตรวจสอบเซนเซอร์ และการส่งข้อมูล Telemetry ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ECP-P01 REV 04

รูปที่ 3.3 **ผังการทำงานของเฟิร์มแวร์ฮาร์ดแวร์บน** ESP32-C3 (Hardware Flowchart)

เฟิร์มแวร์ได้บรรจุอัลกอริทึมการประมวลผลสัญญาณบนขอบเครือข่าย (Edge Processing) ได้แก่:

1) Skin-Contact Detection: ตรวจสอบความเข้มแสงสะท้อนต่ำสุด (Raw IR Amplitude > 10,000 counts) หากผู้ป่วยถอดสายรัดข้อมือออก ระบบจะระงับการบันทึกค่าและเปลี่ยนสถานะเป็น NO_CONTACT ทันที

2) Signal Quality Index (SQI): ตรวจสอบความสม่ำเสมอของรูปคลื่น PPG และปฏิเสธค่า SpO2 หลอกที่ระดับ 70.0% ซึ่งเป็นค่า Unready Floor ของชิปเซนเซอร์

3) 20-Sample Sliding Window: ทำการเก็บตัวอย่างสัญญาณชีพที่ความถี่ 500 ms ต่อตัวอย่าง และเฉลี่ยผลรวม 20 ตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าที่มีความเที่ยงตรงสูงก่อนส่งขึ้นสู่เซิร์ฟเวอร์

4) Battery Look-Up Table (LUT):
แปลงค่าแรงดันแบตเตอรี่เป็นร้อยละความจุตามเส้นโค้งการคายประจุจริงของ LiPo 3.7V ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองการแปลงค่าแรงดันเป็นร้อยละความจุแบตเตอรี่ LiPo (LUT)

ช่วงแรงดันแบตเตอรี่ (มิลลิโวลต์, mV)	สูตรการคำนวณร้อยละความจุ (%)	สถานะพลังงาน
>= 4200 mV	100%	เต็ม (Fully Charged)
4000 - 4199 mV	$78 + \frac{(V_{bat} - 4000) \times 22}{200}$	สูง (Normal High)
3800 - 3999 mV	$40 + \frac{(V_{bat} - 3800) \times 38}{200}$	ปานกลาง (Normal Medium)
3600 - 3799 mV	$10 + \frac{(V_{bat} - 3600) \times 30}{200}$	ต่ำ (Low Battery)
3300 - 3599 mV	$\frac{(V_{bat} - 3300) \times 10}{300}$	วิกฤต (Critical Battery)
< 3300 mV	0%	แบตเตอรี่หมด (Shut down)

3.5 การออกแบบฐานข้อมูล (Database Schema & ER Diagram)

ฐานข้อมูลของระบบได้รับการออกแบบตามโครงสร้างเชิงสัมพันธ์ ประกอบด้วย 8 เอนทิตีหลักเพื่อรองรับการทำงานของระบบได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางโครงสร้างฐานข้อมูล 8 เอนทิตีหลักของระบบ

ชื่อเอนทิตี	คีย์หลัก	ฟิลด์ข้อมูลสำคัญ	หน้าที่และความสัมพันธ์

(Table / Collection)	(Primary Key)		
Patient	patient_id	citizen_id, name, age, gender, phone, medical_history, allergies, pin_hash	เก็บประวัติผู้ป่วยและการยืนยันตัวตน (1:1 กับ Queue, 1:N กับ Vital)
Device	device_id	mac_address, fw_version, battery_pct, status, paired_patient_id, last_seen	สถานะอุปกรณ์สวมใส่และการจับคู่ (1:1 กับ Patient ชั่วคราว)
Vital	vital_id	patient_id, device_id, hr, spo2, sbp, dbp, skin_temp, shock_index, timestamp	บันทึกข้อมูลสัญญาณชีพจริงที่ผ่านการกรอง (N:1 กับ Patient)
Telemetry	telemetry_id	device_id, raw_ir, raw_red, svm_acc, sqi_score, contact_flag, timestamp	บันทึกข้อมูลดิบทางวิศวกรรมสำหรับตรวจสอบระบบ (N:1 กับ Device)
Triage	triage_id	patient_id, chief_complaint, ai_suggested_severity, ai_reasons, nurse_confirmed_severity, nurse_id, confirmed_at	บันทึกผลการคัดแยก AI และการยืนยันของพยาบาล (1:1 กับ Patient)
Alert	alert_id	patient_id, device_id, alert_type (FALL/VITAL/OFFLINE), severity, status, resolved_by, created_at	บันทึกประวัติการแจ้งเตือนภัยฉุกเฉิน (N:1 กับ Patient)
Queue	queue_id	queue_number, patient_id,	จัดการลำดับคิวแบบพลวัตตามความรุนแรง (1:1 กับ

		severity_level, status (WAIT/CALLED/SERVED), room, est_wait_min	Patient)
Nurse	nurse_id	username, password_hash, full_name, role, department, active_status	ข้อมูลบัญชีผู้ใช้งานพยาบาลและสิทธิ์การเข้าถึงระบบ

3.6 การพัฒนาโมดูล AI-assisted Triage และ Rule-based Engine

โมดูล AI Triage ทำงานผสานกันระหว่าง 2 กลไกหลัก:

1) Machine Learning & NLP Pipeline: สกัดข้อความอาการสำคัญ (Chief Complaint) ผ่าน TF-IDF Vectorizer นำมารวมกับเวกเตอร์สัญญาณชีพ เพื่อส่งให้แบบจำลองจำแนกระดับความรุนแรงเบื้องต้น 5 ระดับ

2) Clinical Rule-based Overrides: กฎเกณฑ์ทางการแพทย์ที่อยู่เหนือแบบจำลอง ML หากตรวจพบเงื่อนไขวิกฤต เช่น SpO2 < 90%, Shock Index > 0.9, อัตราการหายใจ > 30 ครั้ง/นาที หรือเกิดเหตุการณ์ Fall Detection ระบบจะบังคับยกระดับเป็น RED ทันที

3) Explainable AI Reasons Generator: ระบบจะสกัดเงื่อนไขที่ทำให้เกิดผลการคัดแยกออกมาเป็นข้อความที่มนุษย์เข้าใจได้ เช่น "[ระดับ PINK] เนื่องจาก SpO2 = 91% (ต่ำกว่าเกณฑ์ 92%) และมีอาการเจ็บแน่นหน้าอก" เพื่อแสดงบน Nurse Dashboard

3.7 กระบวนการทำงานของพยาบาลและการจัดการคิว (Nurse Confirmation)

กระบวนการทำงานของพยาบาลยึดหลัก Human-in-the-loop: เมื่อผู้ป่วยลงทะเบียนและใส่ Smartwatch ระบบ AI จะประมวลผลและแสดงผลบนแดชบอร์ดเป็น "AI Suggested: [ระดับสี] (Pending Nurse Review)" พยาบาลสามารถกดตรวจสอบอาการผู้ป่วย และเลือก "ยืนยันผลตาม AI" (Confirm) หรือ "ปรับเปลี่ยนระดับความรุนแรง" (Modify) ตามดุลยพินิจทางวิชาชีพ เมื่อพยาบาลกดยืนยัน ระบบจะบันทึก "Nurse Confirmed Severity" และปรับดันลำดับคิวของผู้ป่วยที่มีความเร่งด่วนสูงขึ้นสู่อันดับต้นของตารางคิวโดยอัตโนมัติ

3.8 ข้อกำหนดโครงสร้างข้อมูลและการสื่อสาร (API Specification)

การรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สวมใส่ เว็บแอปพลิเคชัน และระบบแม่ข่ายดำเนินการผ่าน RESTful API ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดการสื่อสารข้อมูลระหว่างระบบเว็บและแม่ข่าย (API Contract Table)

Endpoint / URI	Method	**ข้อมูลนำเข้า** (Request Payload)	**การตอบกลับ** (Response Data) / Status Code
/api/patient/login/	POST	citizen_id, pin_code / national_id	access_token, patient_id, auth_status (200 OK / 401 Unauthorized)
/api/patient/register/	POST	RegistrationPayload (20+ fields, pdpa_consent)	access_token, queue_number, status_label, room, queue_position (201 Created)
/api/telemetry/push/	POST	device_id, hr, spo2, sbp_est, dbp_est, fall_flag, sqi	status: ok, queue_reordered: bool (200 OK / 409 Conflict if device not paired)
/api/nurse/triage/confirm/	POST	patient_id, nurse_confirmed_severity, nurse_id, notes	confirmed: true, new_queue_position: int, updated_at (200 OK)
/api/patient/queue/	GET	Authorization: Bearer <token>	queue_number, status_label, instruction, queue_position, room, updated_at (200 OK)
/api/patient/me/	GET	Authorization: Bearer <token>	PatientProfile, visits, past vitals (200 OK)
/api/patient/queue/cancel/	POST	Authorization: Bearer <token>	ok: true, message: ยกเลิกคิวเรียบร้อย (200 OK)

/api/alerts/active/	GET	Authorization: Bearer <nurse_token>	alerts: [{ alert_id, patient_id, type, severity, time }] (200 OK)

3.9 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน Next.js (Architecture & Implementation)

ระบบเว็บแอปพลิเคชันได้รับการจัดโครงสร้างแบบ Feature-Driven Architecture โดยตรงตามซอร์สโค้ดในคลังโปรเจกต์ (`bfirstkok/Project_hospital_queue_patient`) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างไดเรกทอรีและสถาปัตยกรรมสำคัญดังนี้:

1. `src/app/page.tsx` — ทำหน้าที่เป็นมุมมองหลักแบบ Single-Page Application (SPA) ควบคุมการสลับหน้าจอฟีเจอร์ (Registration, Login, Queue Status, Medical Records/Account) ได้อย่างราบรื่นโดยไม่เปลี่ยน URL ที่ผู้ป่วยสแกนจาก QR Code

2. `src/features/registration/` — หน้าจอลงทะเบียนผู้ป่วยใหม่ (`RegistrationView.tsx`) พร้อมหน้าต่างขอความยินยอมข้อมูลส่วนบุคคล (`PdpaConsentModal.tsx`) และตัวช่วยเลือกที่อยู่ภาษาไทยอัตโนมัติ (`thai-address.ts`)

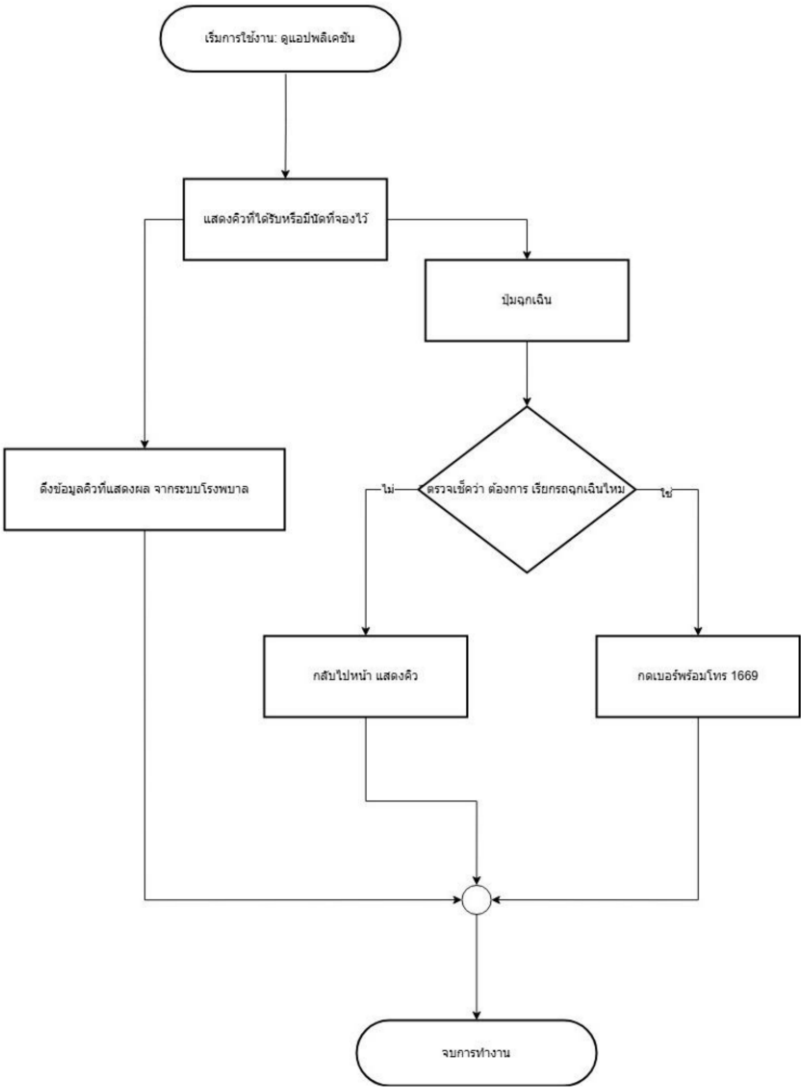
3. `src/features/auth/` — หน้าจอเข้าสู่ระบบ (`LoginView.tsx`), การยืนยันด้วยรหัส PIN 6 หลัก (`PinAuthView.tsx`), และการเชื่อมต่อยืนยันตัวตนภาครัฐ (`ThaidConnectView.tsx`)

4. `src/features/queue/` — จัดการสถานะคิวแบบเรียลไทม์ (`QueueStatusView.tsx`), การวาดบัตรคิวดิจิทัลผ่าน HTML5 Canvas Context 2D (`queue-card-canvas.ts`), การดึงสถานะคิวตามช่วงเวลารันไทม์ (`useQueuePolling.ts`), และระบบเสียงแจ้งเตือน (`useQueueNotification.ts`)

5. `src/features/medical-records/` และ `src/features/account/` — หน้าจอประวัติสุขภาพส่วนบุคคล (`MedicalRecordsView.tsx`, `AccountView.tsx`) แสดงประวัติสัญญาณชีพย้อนหลัง (sys_bp, dia_bp, pr, bt, o2sat) และรายการนัดหมาย

6. `src/features/settings/` — หน้าจอการตั้งค่าระบบ (`SettingsView.tsx`) และฟังก์ชันปรับขยายขนาดตัวอักษรสำหรับผู้สูงอายุ (Accessibility Text Scaling)

7. `src/shared/` — โมดูล API Client (`patient-api.ts`), นิยามชนิดข้อมูล TypeScript (`types.ts`), การจัดเก็บโทเคนความปลอดภัย (`token-storage.ts`, `pin-storage.ts`), และการอ่านค่าสภาพแวดล้อมรันไทม์ (`runtime-config.ts`)



รูปที่ 3.4 ผังการทำงานของระบบคลาวด์และเว็บแดชบอร์ด (Software Flowchart)

3.10 แผนและวิธีการทดสอบระบบ (Testing Methodology)

การทดสอบระบบแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก:

1. การทดสอบความแม่นยำเซนเซอร์สัญญาณชีพ: เปรียบเทียบค่า HR, SpO2, Skin Temp, และ Estimated BP จาก Smartwatch กับเครื่องมือแพทย์มาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง 30 คน โดยคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) ตามสมการ (3.2) และร้อยละความคลาดเคลื่อน (Percentage Error: PE) ตามสมการ (3.3)

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |V_{device,i} - V_{ref,i}| \quad (3.2)$$

$$PE(\%) = \frac{|V_{device} - V_{ref}|}{V_{ref}} \times 100 \quad (3.3)$$

2. การทดสอบการตรวจจับการหกล้ม: จำลองการหกล้มจริง 4 รูปแบบ (ล้มไปข้างหน้า ข้างหลัง ด้านข้าง และหมดสติทิ้งตัว) รวม 80 ครั้ง เทียบกับกิจกรรมประจำวัน (ADL) 60 ครั้ง เพื่อคำนวณค่าความไว (Sensitivity), ความจำเพาะ (Specificity) และความแม่นยำรวม (Accuracy) ตามสมการ (3.4), (3.5) และ (3.6)

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \quad (3.4)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP} \times 100 \quad (3.5)$$

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ TP (True Positive) แทน จำนวนครั้งที่ตรวจจับการหกล้มได้ถูกต้อง, TN (True Negative) แทน จำนวนครั้งที่ระบุกิจกรรมประจำวันถูกต้องโดยไม่แจ้งเตือนผิดพลาด, FP (False Positive) แทน จำนวนครั้งที่แจ้งเตือนการหกล้มผิดพลาดจากกิจกรรมประจำวัน, และ FN (False Negative) แทน จำนวนครั้งที่เกิดการหกล้มจริงแต่ระบบตรวจจับไม่พบ

3. การทดสอบโมเดล AI Triage: ประเมินค่า Confusion Matrix 5x5, Within-one-level Accuracy, และ Route Accuracy บนชุดข้อมูลทดสอบ

4. การทดสอบการสื่อสารเครือข่ายและระบบเว็บ: วัดค่า End-to-End Latency, การเชื่อมต่อ Wi-Fi ใหม่อัตโนมัติ (Auto-reconnect), การบันทึกข้อมูลออฟไลน์ (Offline Ring Buffer), และการรันชุดทดสอบอัตโนมัติ Unit/Component Tests ด้วย Vitest (`npm run test`)

5. การประเมินความพึงพอใจ: ใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ประเมินกลุ่มตัวอย่าง 30 คน ครอบคลุม 4 ด้านหลัก

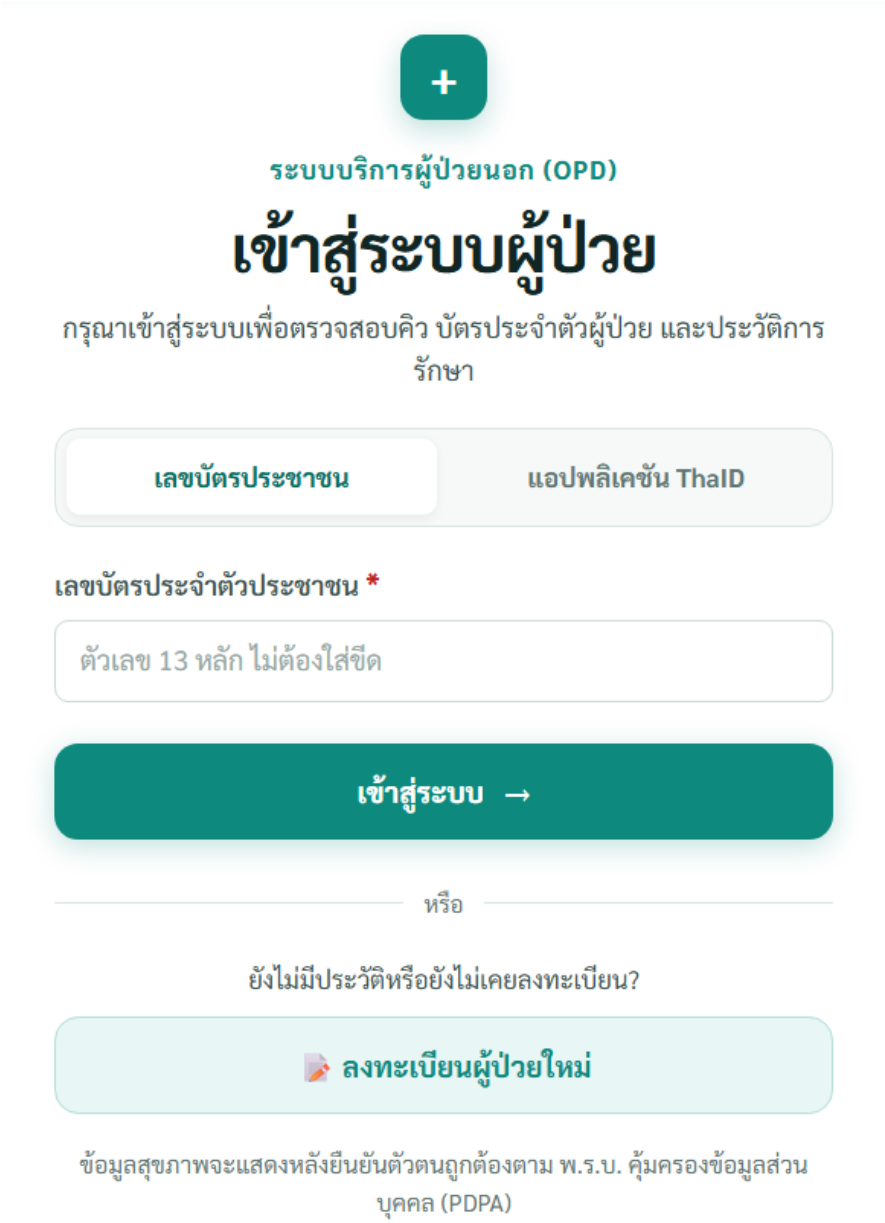
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการทดสอบระบบ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการพัฒนาระบบและผลการทดสอบประเมินประสิทธิภาพในทุกมิติ ทั้งในส่วนของระบบเว็บแอปพลิเคชัน ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ฮาร์ดแวร์อุปกรณ์สวมใส่ Smartwatch ความแม่นยำของเซนเซอร์สัญญาณชีพ ประสิทธิภาพของโมเดล AI Triage การตรวจจับการหกล้ม เครือข่ายการสื่อสาร และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

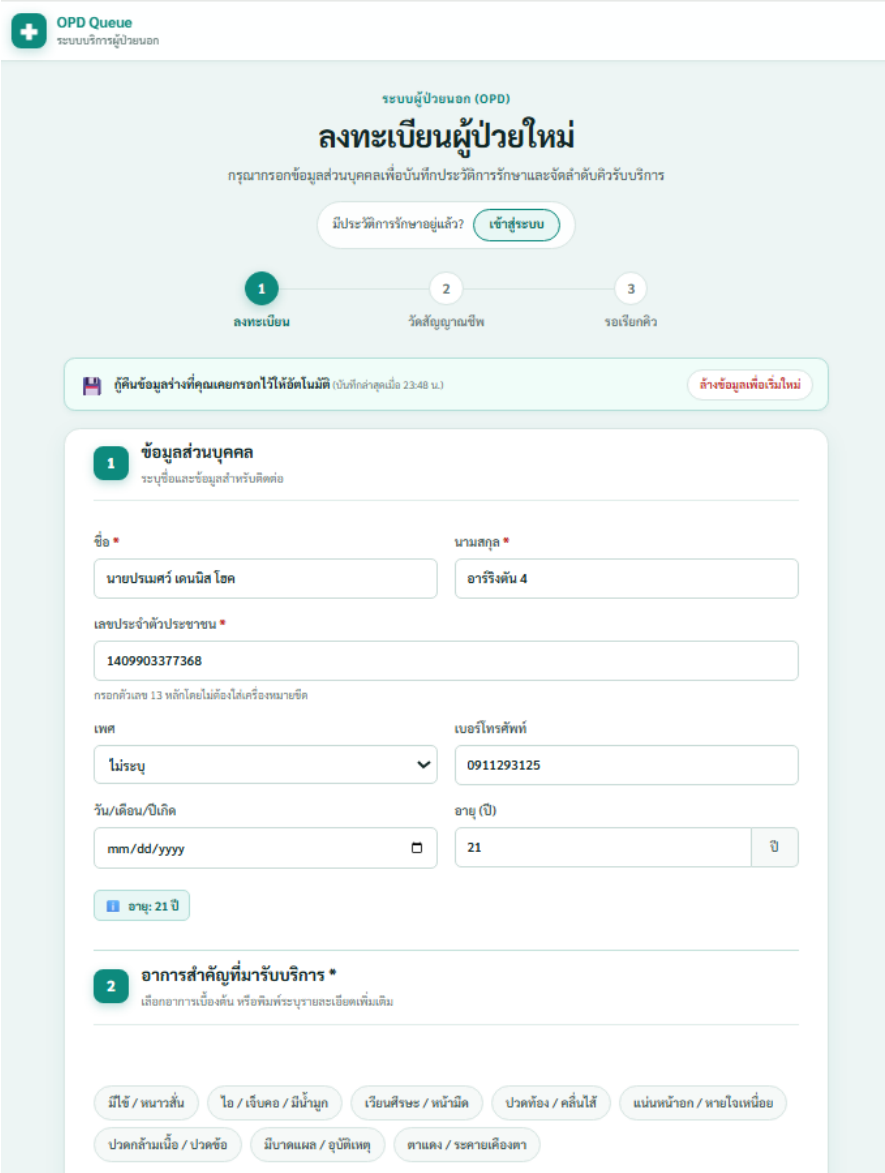
4.1 ผลการพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันและส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

ระบบเว็บแอปพลิเคชันได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างสมบูรณ์ รองรับการทำงานทั้งบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ของเจ้าหน้าที่และสมาร์ตโฟนของผู้รับบริการ โดยมีผลลัพธ์หน้าจอการทำงานจริงดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.26

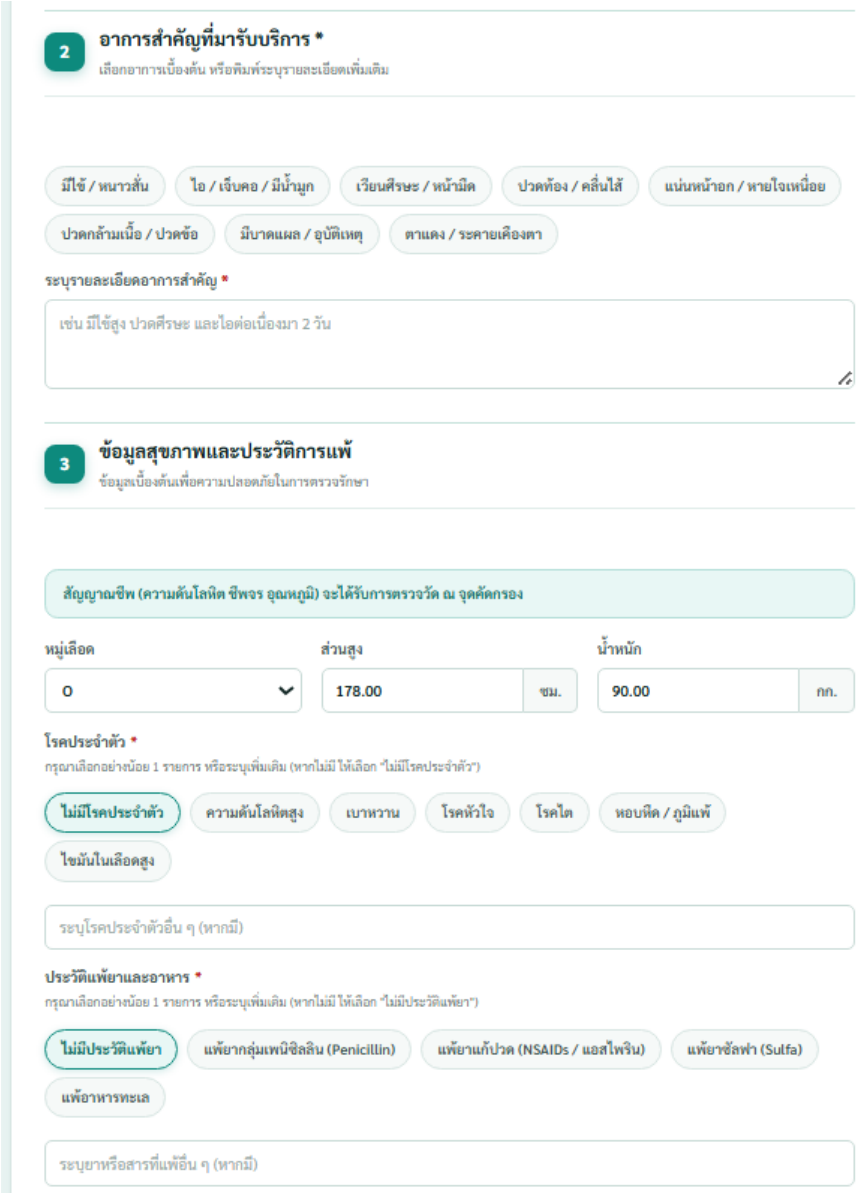


รูปที่ 4.1 **หน้าจอเข้าสู่ระบบผ่าน** ThaID **และ** PIN

รูปที่ 4.2 หน้าจอเข้าสู่ระบบด้วยรหัส PIN ส่วนบุคคล



รูปที่ 4.3 หน้าจอลงทะเบียนผู้ป่วยใหม่ ส่วนข้อมูลส่วนบุคคล



รูปที่ 4.4 หน้าจอระบุอาการสำคัญ โรคประจำตัว และประวัติแพ้ยา

โรคประจำตัว *

กรุณาเลือกอย่างน้อย 1 รายการ หรือระบุเพิ่มเติม (หากไม่มี ให้เลือก "ไม่มีโรคประจำตัว")

ไม่มีโรคประจำตัว | ความดันโลหิตสูง | เบาหวาน | โรคหัวใจ | โรคไต | หอบหืด / ภูมิแพ้ | ไขมันในเลือดสูง

ระบุโรคประจำตัวอื่น ๆ (หากมี)

ประวัติแพ้ยาและอาหาร *

กรุณาเลือกอย่างน้อย 1 รายการ หรือระบุเพิ่มเติม (หากไม่มี ให้เลือก "ไม่มีประวัติแพ้ยา")

ไม่มีประวัติแพ้ยา | แพ้ยากลุ่มเพนิซิลลิน (Penicillin) | แพ้ยาแก้ปวด (NSAIDs / แอสไพริน) | แพ้ยาซัลฟา (Sulfa) | แพ้อาหารทะเล

ระบุยาหรือสารที่แพ้อื่น ๆ (หากมี)

ยาที่ใช้ประจำ *

กรุณาเลือกอย่างน้อย 1 รายการ หรือระบุเพิ่มเติม (หากไม่มี ให้เลือก "ไม่มียาที่ใช้ประจำ")

ไม่มียาที่ใช้ประจำ | ยาลดความดันโลหิต | ยารักษาโรคเบาหวาน | ยาลดไขมันในเลือด | ยาโรคหัวใจ | ยาละลายลิ่มเลือด / ต้านเกล็ดเลือด | ยาพ่นหอบหืด / ยาภูมิแพ้ | ยาลดกรด / ยาโรคกระเพาะ | ยาไทรอยด์

ระบุชื่อยาอื่น ๆ หรือรายละเอียดเพิ่มเติม (หากมี เช่น ขนาดยา วิธีรับประทาน)

4 ที่อยู่ปัจจุบัน

ระบุที่อยู่เพื่อการติดต่อและบันทึกประวัติการรักษา

จังหวัด: ขอนแก่น

อำเภอ / เขต: เมืองขอนแก่น

ตำบล / แขวง: ในเมือง

รหัสไปรษณีย์: 40000

5 ผู้ติดต่อฉุกเฉิน

ข้อมูลบุคคลที่สามารถติดต่อได้ในกรณีจำเป็นเร่งด่วน (สูงสุด 3 ท่าน)

ผู้ติดต่อฉุกเฉินท่านที่ 1 (หลัก)

ชื่อผู้ติดต่อ	ความสัมพันธ์	เบอร์โทรศัพท์
วิชาภณ์	มารดา	0619368564

+ เพิ่มผู้ติดต่อฉุกเฉิน (1/3)

ยินยอมตาม พ.ร.บ. คุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล (PDPA) แล้ว — อ่านนโยบายความเป็นส่วนตัว (PDPA) อีกครั้ง

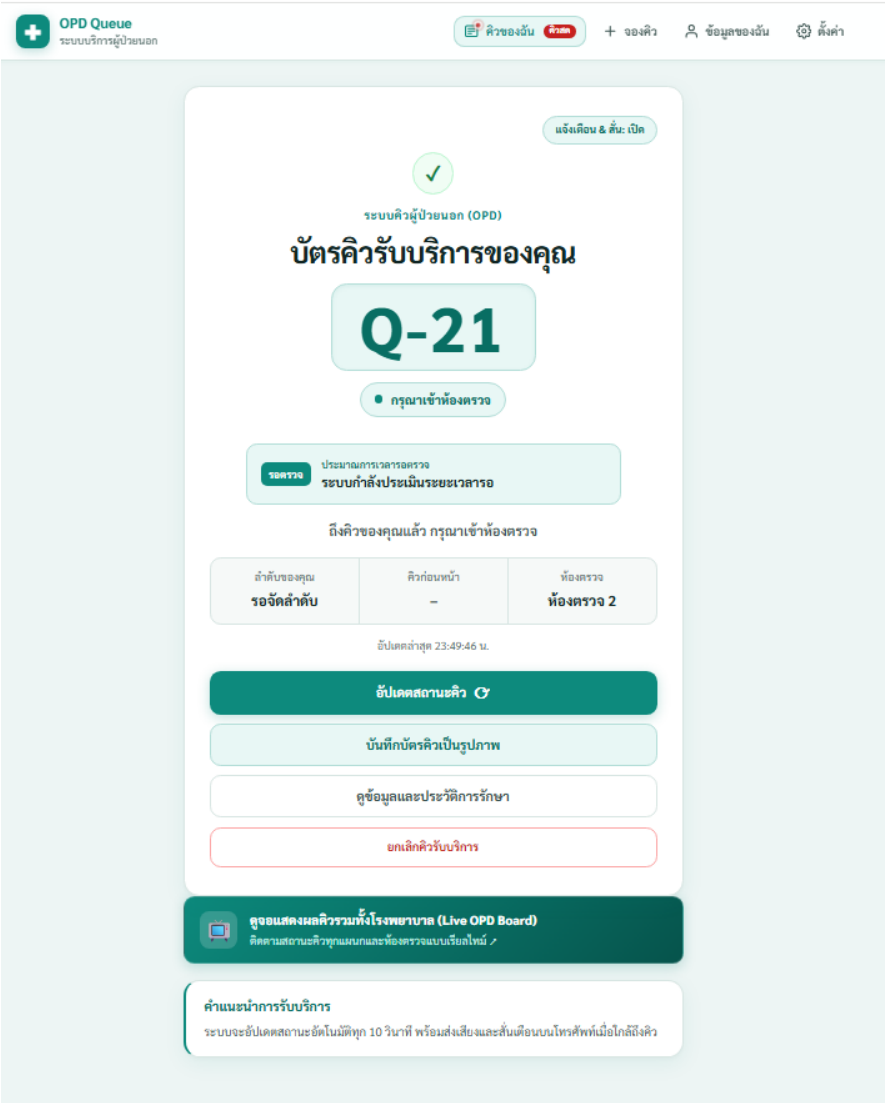
☑ ข้าพเจ้าขอยืนยันว่าข้อมูลข้างต้นถูกต้องตรงตามความเป็นจริง และยินยอมให้ใช้ข้อมูลในการคัดกรองและจัดลำดับคิวรับบริการ *

บันทึกข้อมูลผู้ป่วย ✓

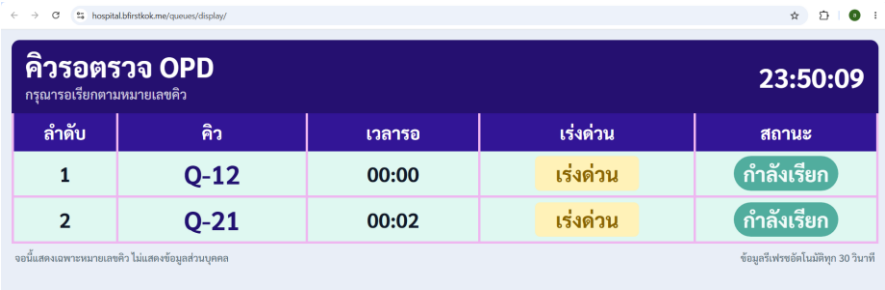
ยกเลิก

ระบบจะไม่แสดงชื่อ อาการ หรือข้อมูลส่วนบุคคลบนจอแสดงสถานะคิวสาธารณะ

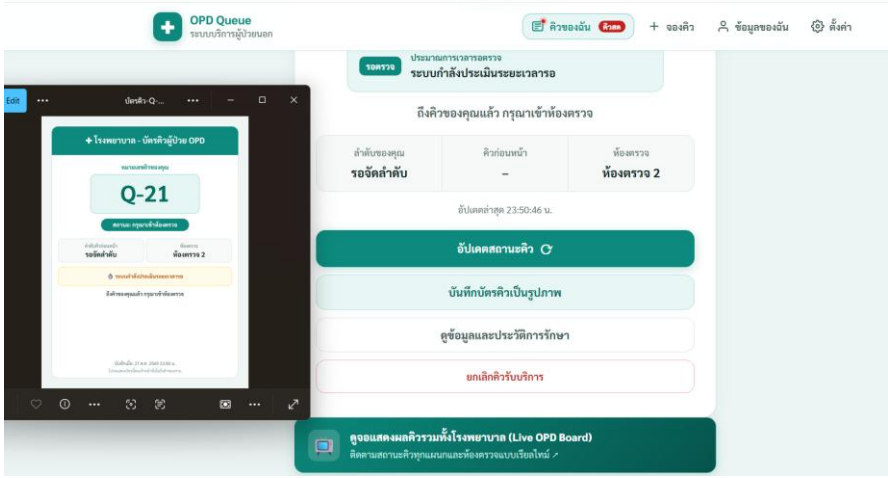
รูปที่ 4.5 หน้าจอบันทึกยาประจำ ที่อยู่ ผู้ติดต่อฉุกเฉิน และการยินยอม PDPA



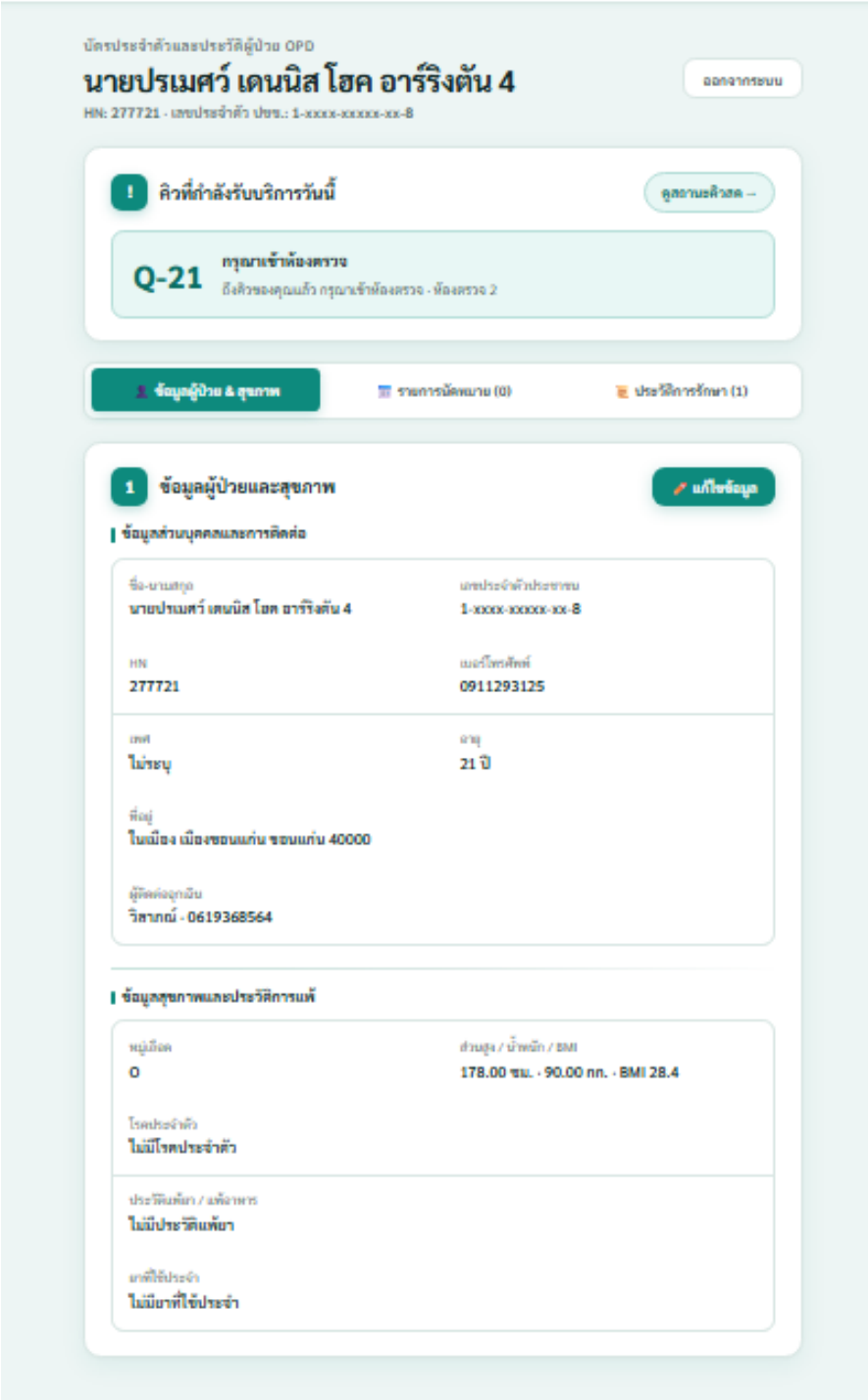
รูปที่ 4.6 หน้าจอบัตรคิวรับบริการดิจิทัลบนสมาร์ตโฟนของผู้ป่วย



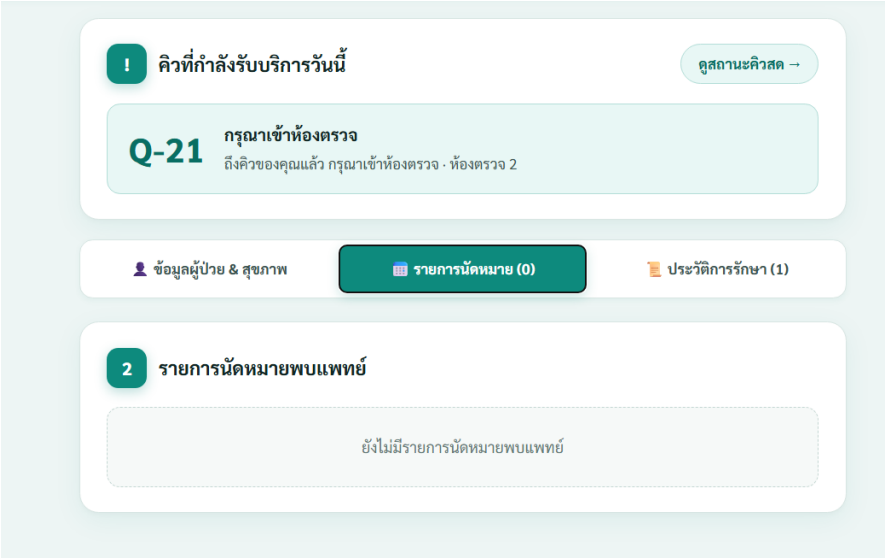
รูปที่ 4.7 หน้าจอแสดงผลคิวรอตรวจรวมทั้งแผนก (Live OPD Board)



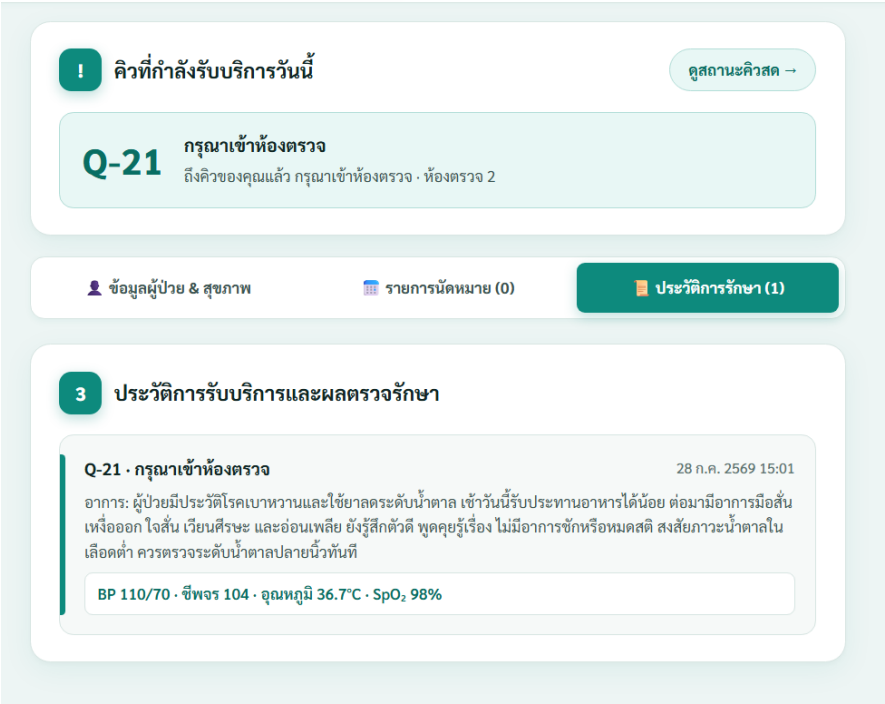
รูปที่ 4.8 หน้าจอตรวจสอบคิวสดพร้อมป๊อปอัปบัตรคิวดิจิทัล



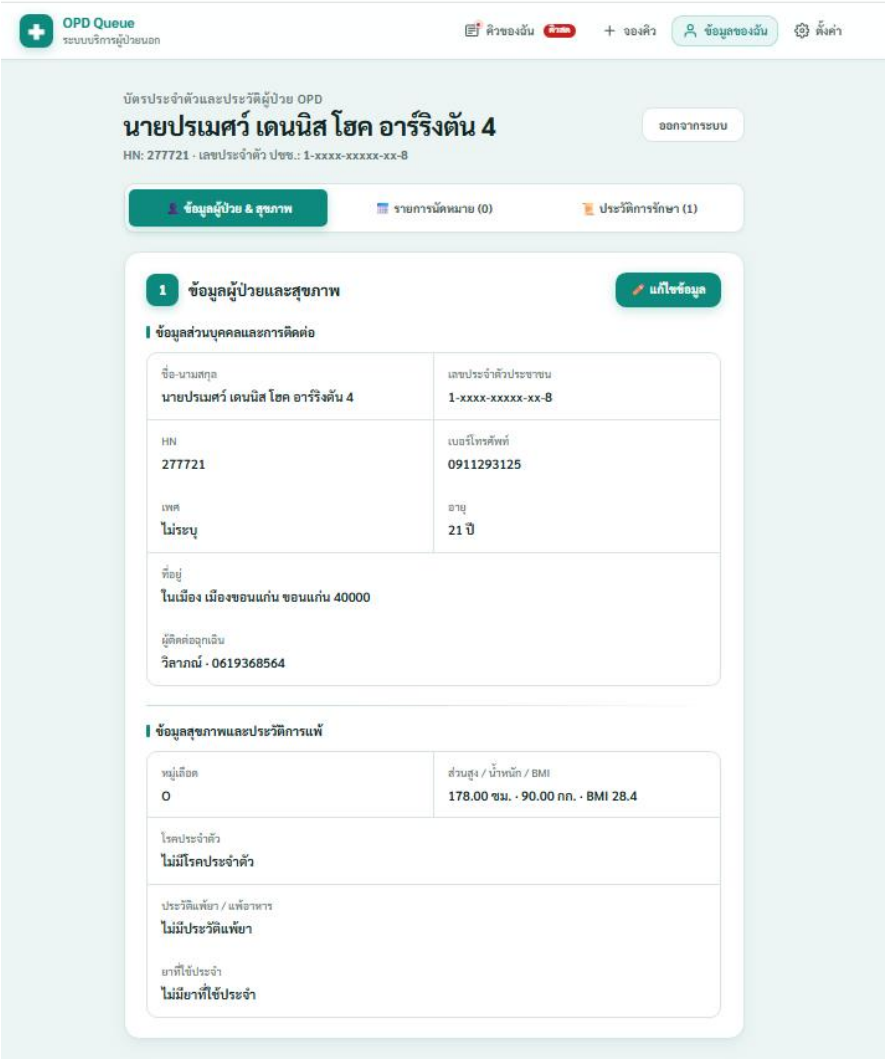
รูปที่ 4.9 หน้าจอข้อมูลส่วนบุคคลและข้อมูลสุขภาพผู้ป่วย



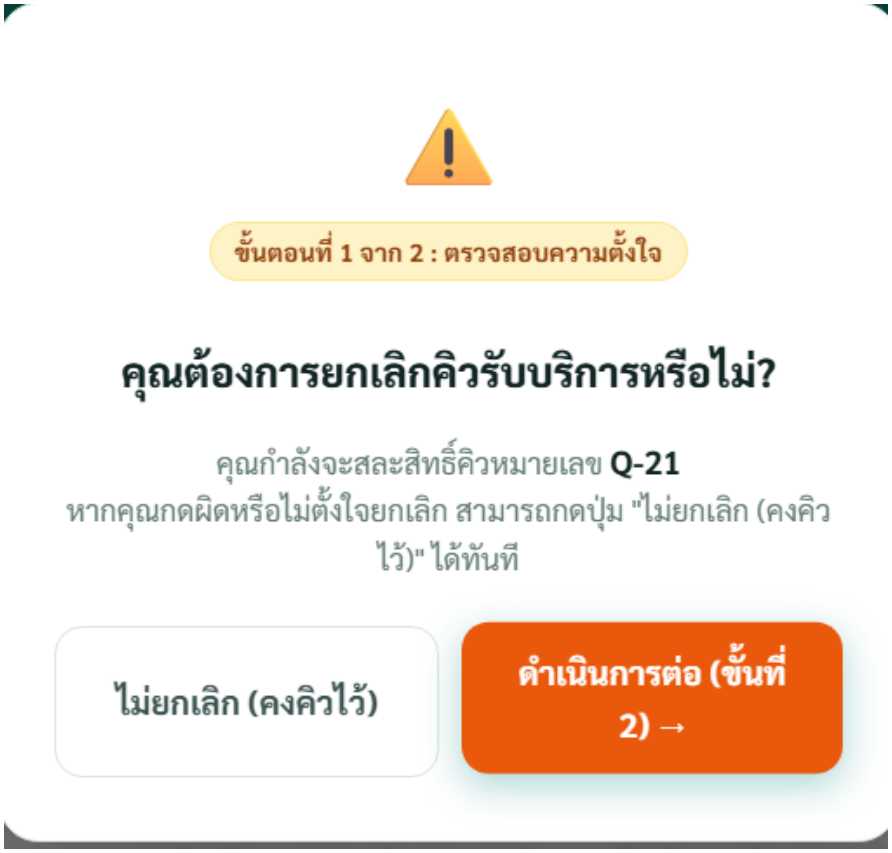
รูปที่ 4.10 หน้าจอรายการนัดหมายตรวจรักษา



รูปที่ 4.11 หน้าจอประวัติการรับบริการและการบันทึกค่าสัญญาณชีพ

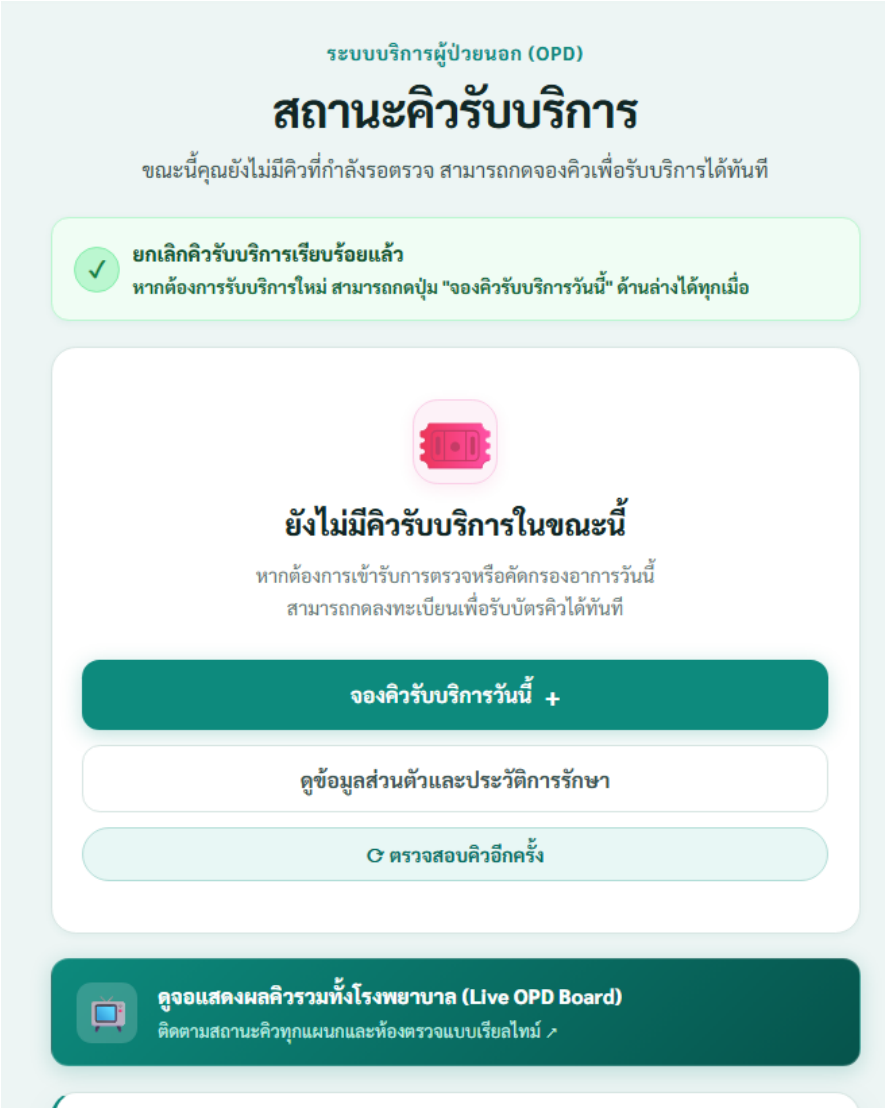


รูปที่ 4.12 หน้าจอรายละเอียดข้อมูลผู้ป่วยและสรุปประวัติสุขภาพ



รูปที่ 4.13 หน้าต่างยืนยันการยกเลิกคิวรับบริการ (ขั้นตอนที่ 1)

รูปที่ 4.14 หน้าต่างยืนยันการยกเลิกคิวรับบริการ (ขั้นตอนที่ 2)



รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงสถานะเมื่อไม่มีคิวรับบริการในขณะนั้น

OPD Queue

คิวของฉัน | จองคิว | ข้อมูลของฉัน | ตั้งค่า

ระบบผู้ป่วยนอก (OPD)

จองคิวรับบริการ OPD วันนี้

ระบบให้คีย์ข้อมูลส่วนบุคคลของคุณมาให้ล่วงหน้า กรุณาเลือกชื่อและอาการที่มารับบริการวันนี้

1 ระบุอาการ & จองคิว — 2 รีสต์ญาณทิพ — 3 ยืนยันคิว

ดึงข้อมูลผู้ป่วยเดิมให้อัตโนมัติเพื่อเร็วขึ้น
คุณเคยเคยระบุ อาการสำคัญที่มารับบริการ ไว้ครั้ง 2 แล้วจะดึงมาเติมให้ครั้งต่อไปอัตโนมัติ

1 ข้อมูลส่วนบุคคล
ระบบดึงมาจากข้อมูลล่าสุดที่เคยส่ง

ชื่อ *: นายณัฐพงศ์ เพชรมีโชค

นามสกุล *: สาริสิทธิ์ 4

เลขประจำตัวประชาชน *: 1609903377368

ดึงมาจากข้อมูลผู้ป่วยของคุณเดิมในระบบ

เพศ: ไม่ระบุ

เบอร์โทรศัพท์: 0951293125

วัน/เดือน/ปีเกิด: mm/dd/yyyy

อายุ (ปี): 21 ปี

อายุ: 21 ปี

2 อาการสำคัญที่มารับบริการ *
เลือกอาการที่เกี่ยวข้อง หรือพิมพ์ระบุอาการของคุณเพิ่มเติม

มีไข้ / หนาวสั่น | ไอ / เจ็บคอ / มีน้ำมูก | เวียนศีรษะ / หน้ามืด | ปวดท้อง / คลื่นไส้ | แน่นหน้าอก / หายใจลำบาก | ปวดกล้ามเนื้อ / ปวดข้อ | มีผื่นคัน / ลุกลามเร็ว | ตาแดง / ระคายเคืองตา

ระบุรายละเอียดอาการสำคัญ *

เช่น มีไข้สูง ปวดศีรษะ และไอต่อเนื่องมา 2 วัน

3 ข้อมูลสุขภาพและประวัติการแพ้
ข้อมูลนี้จะช่วยให้ความช่วยเหลือที่เหมาะสมกับการตรวจวินิจฉัย

ข้อมูลจากเครื่อง (ความดันโลหิต ชีพจร อุณหภูมิ) จะได้รับการตรวจวัด ณ จุดคัดกรอง

หมู่เลือด: O

ส่วนสูง: 170.00 ซม.

น้ำหนัก: 90.00 กก.

โรคประจำตัว *
กรุณาเลือกอย่างน้อย 1 รายการ หรือระบุเพิ่มเติมหากไม่มีให้เลือก "ไม่มีโรคประจำตัว"

ไม่มีโรคประจำตัว | ความดันโลหิตสูง | เบาหวาน | โรคหัวใจ | โรคไต | ธาลัสซีเมีย / ภูมิแพ้ | โรคอ้วนในเด็กสูง

ระบุโรคประจำตัวอื่น ๆ (ถ้ามี)

ประวัติแพ้ยาและอาหาร *
กรุณาเลือกอย่างน้อย 1 รายการ หรือระบุเพิ่มเติมหากไม่มีให้เลือก "ไม่มีประวัติแพ้ยา"

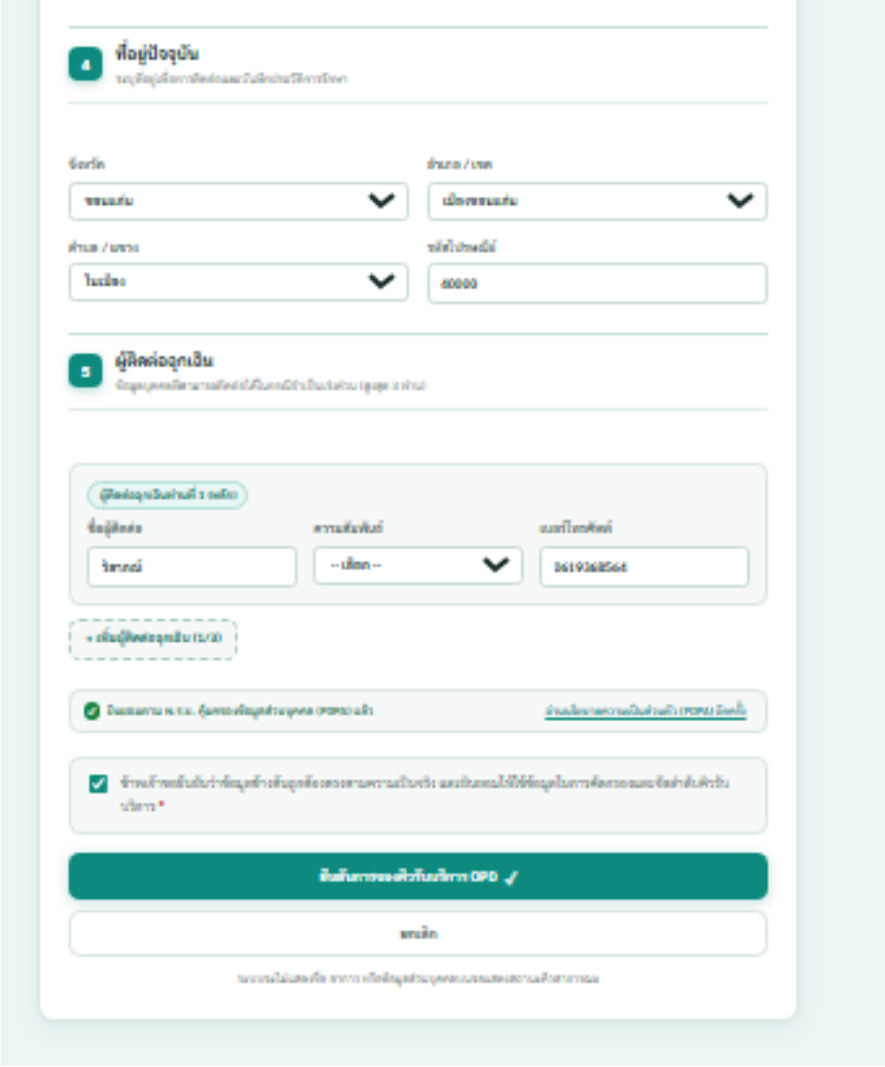
ไม่มีประวัติแพ้ยา | แพ้ยากลุ่มเพนิซิลลิน (Penicillin) | แพ้ยาแก้ปวด (NSAIDs / แอสไพริน) | แพ้สารทึบรังสี (Iodine) | แพ้อาหารทะเล

ระบุยาหรืออาหารที่แพ้อื่น ๆ (ถ้ามี)

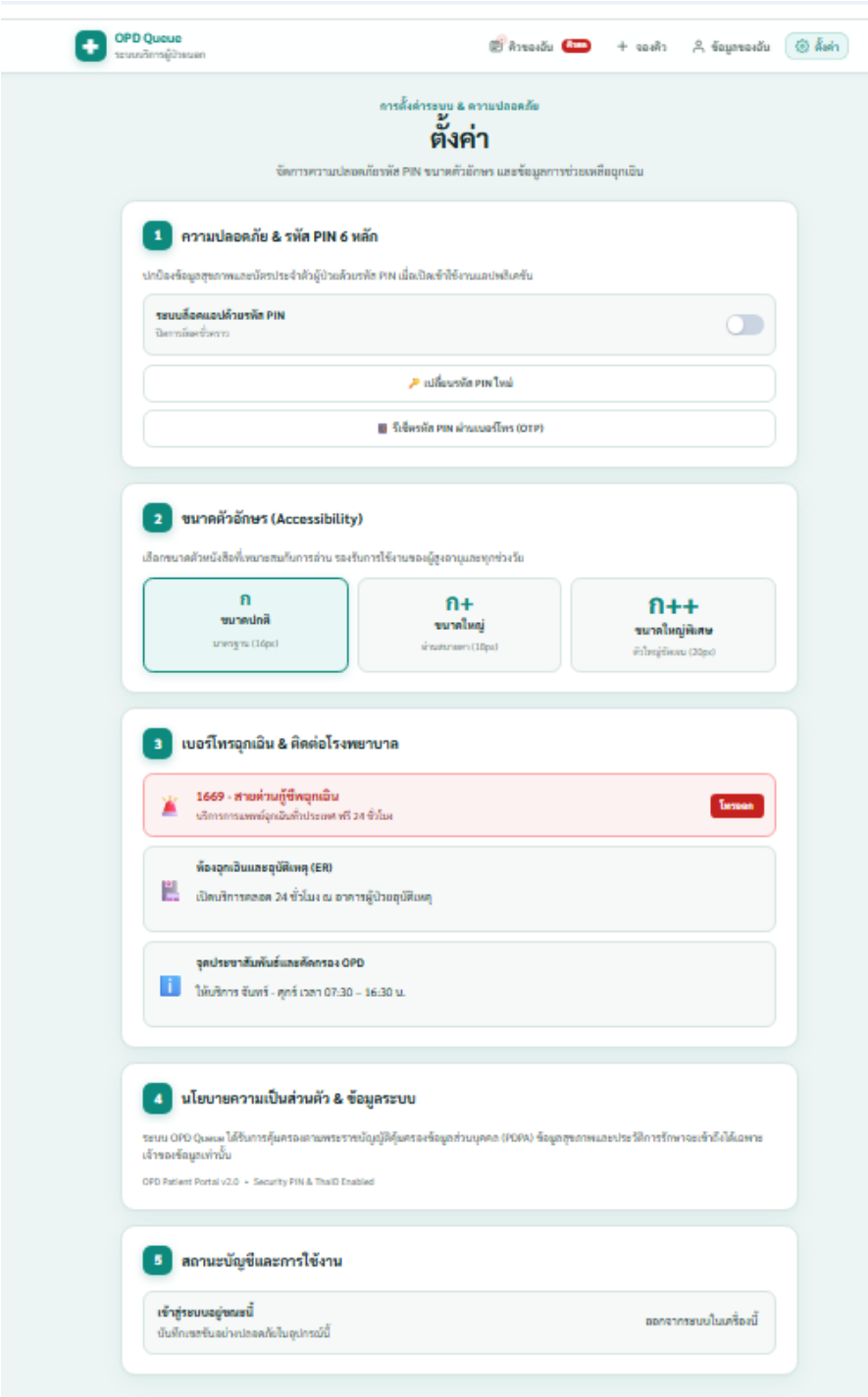
ยาที่ใช้ประจำ *
กรุณาเลือกอย่างน้อย 1 รายการ หรือระบุเพิ่มเติมหากไม่มีให้เลือก "ไม่มียาที่ใช้ประจำ"

ไม่มียาที่ใช้ประจำ | ยาลดความดันโลหิต | ยารักษาโรคเบาหวาน | ยาลดไขมันในเลือด | ยาโรคหัวใจ

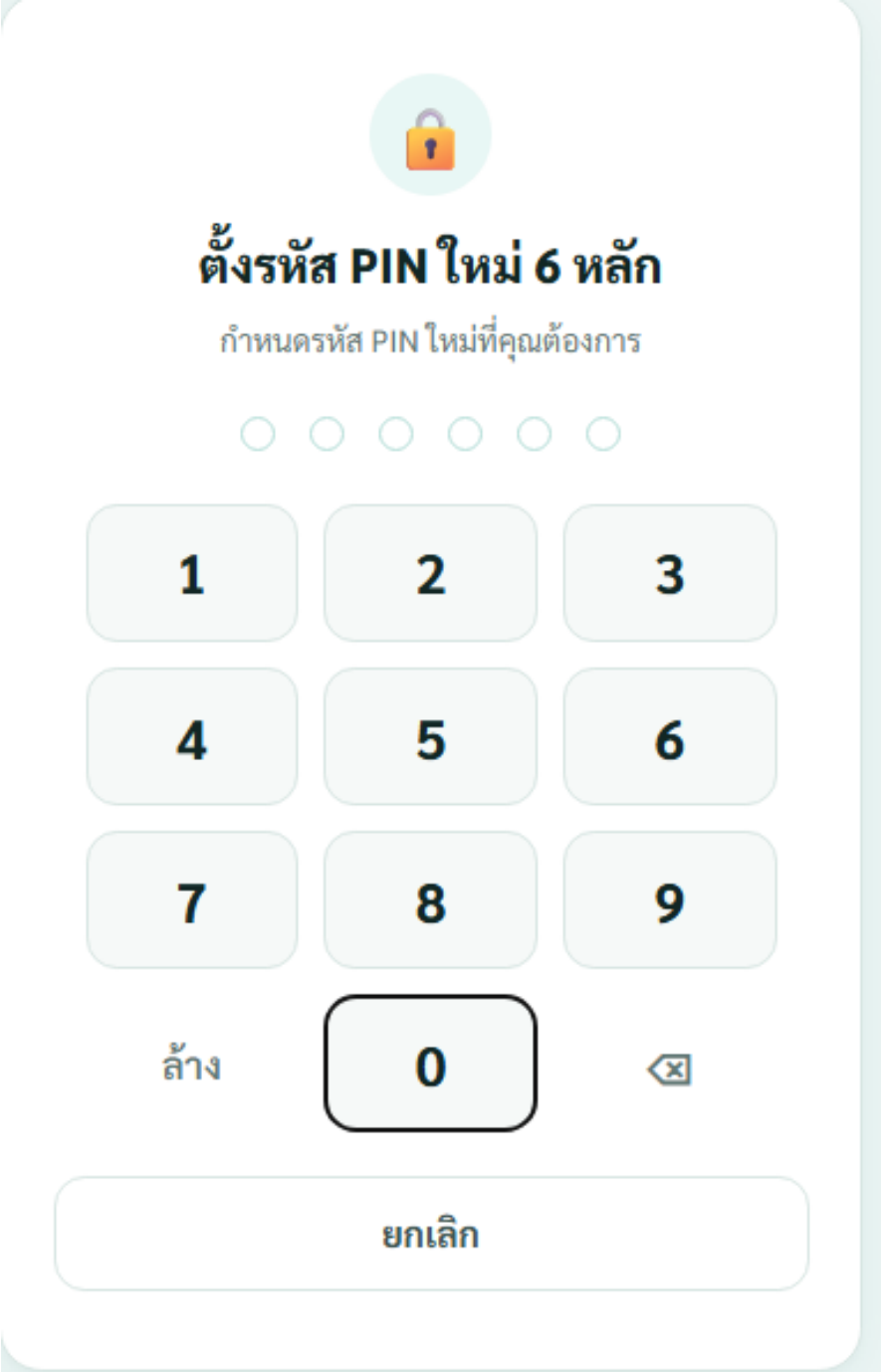
รูปที่ 4.16 หน้าต่างแจ้งเตือนเมื่อผู้ป่วยมีคิวที่กำลังรอตรวจอยู่แล้ว



รูปที่ 4.17 หน้าต่างยืนยันการออกจากระบบ

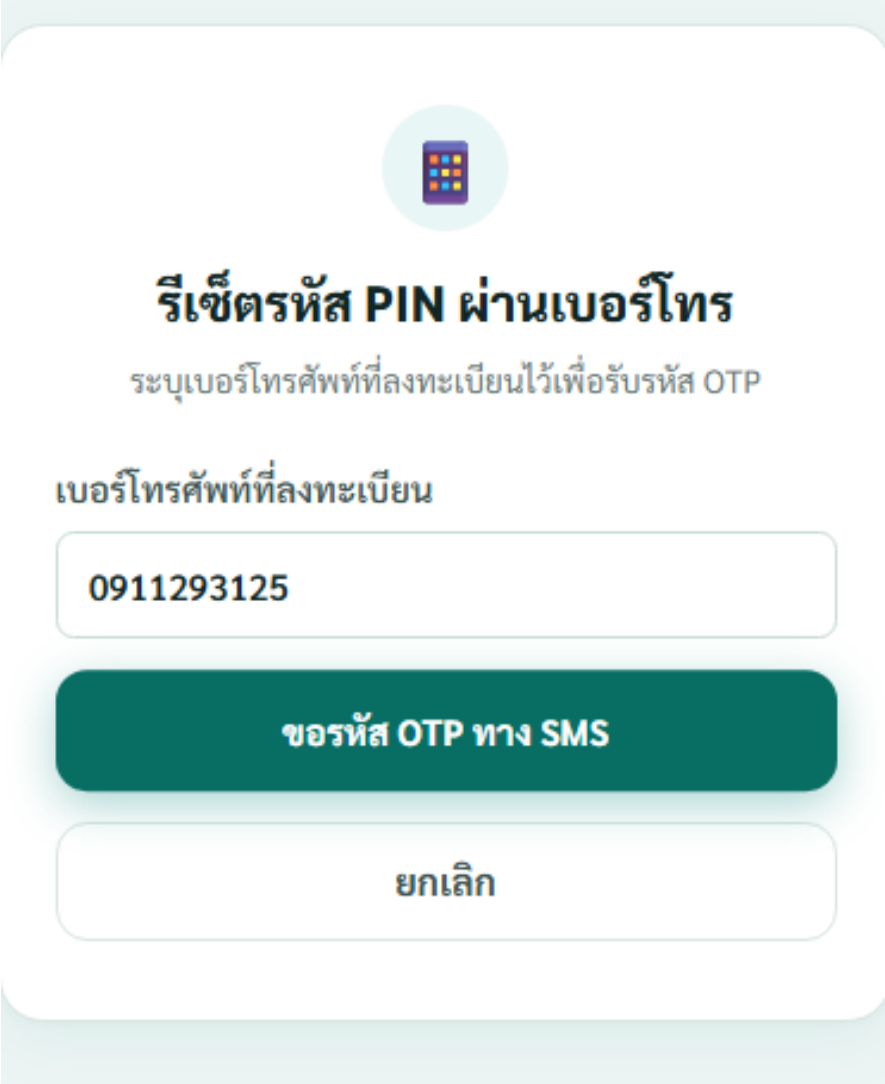


รูปที่ 4.18 หน้าจอการตั้งค่าระบบและความปลอดภัย

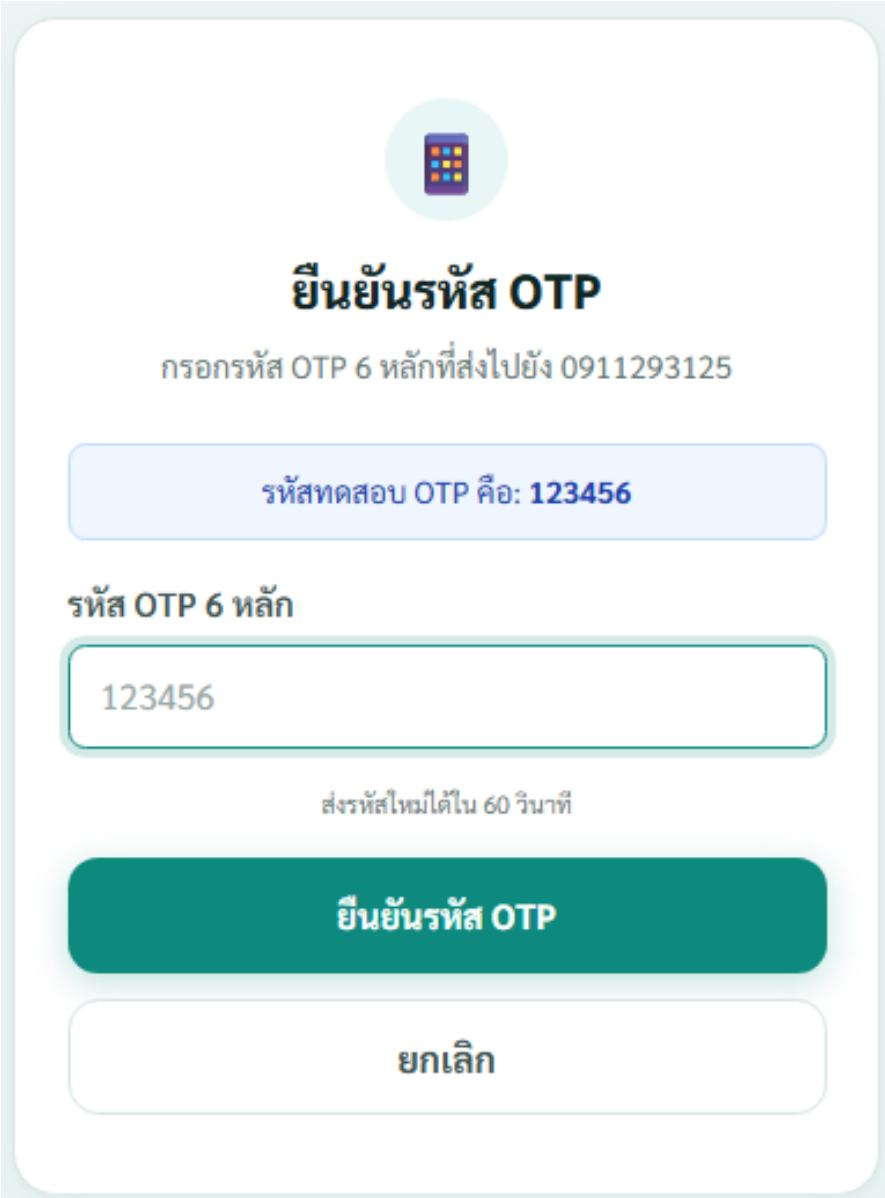


รูปที่ 4.19 หน้าจอกรอกรหัส PIN 6 หลักสำหรับความปลอดภัย

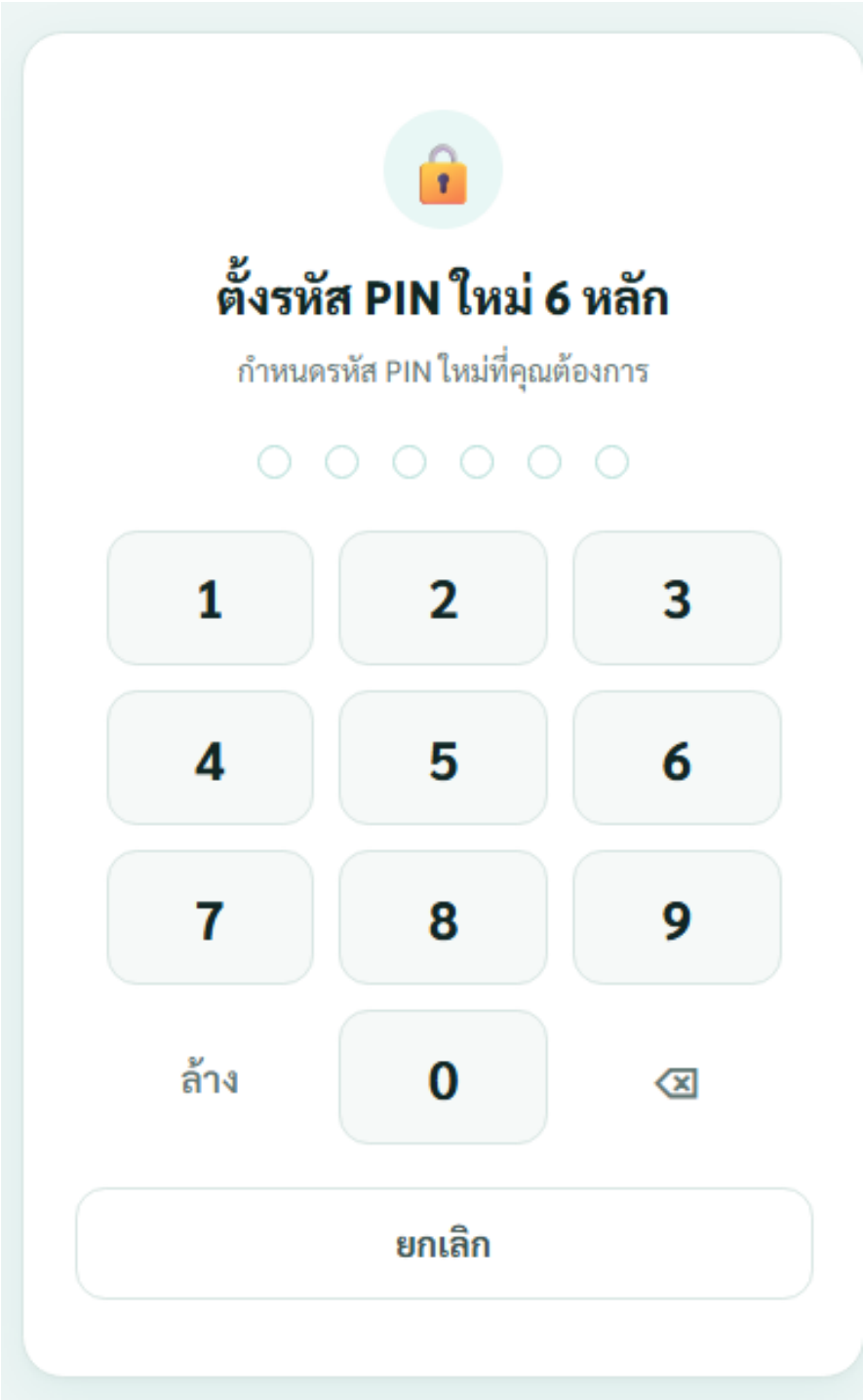
รูปที่ 4.20 หน้าจอยืนยันรหัส PIN 6 หลัก



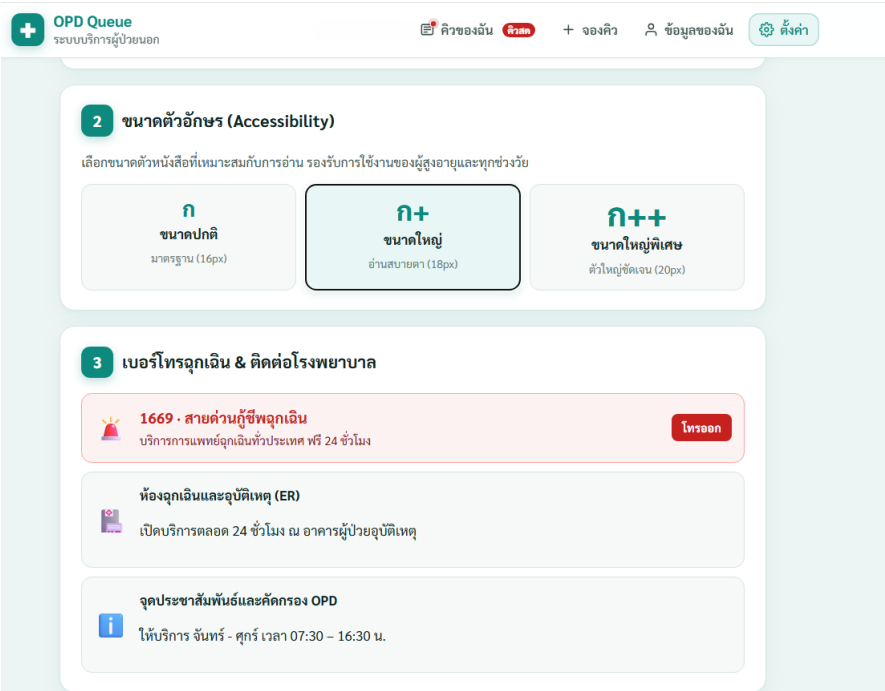
รูปที่ 4.21 หน้าจอแจ้งเตือนตั้งรหัส PIN สำเร็จ



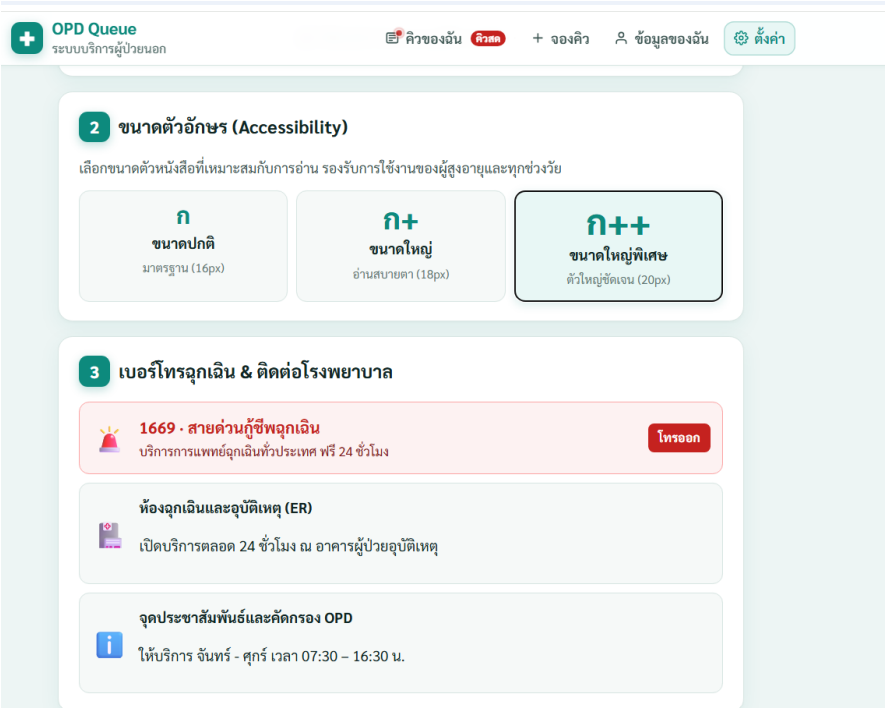
รูปที่ 4.22 หน้าจอปลดล็อกแอปพลิเคชันด้วย PIN



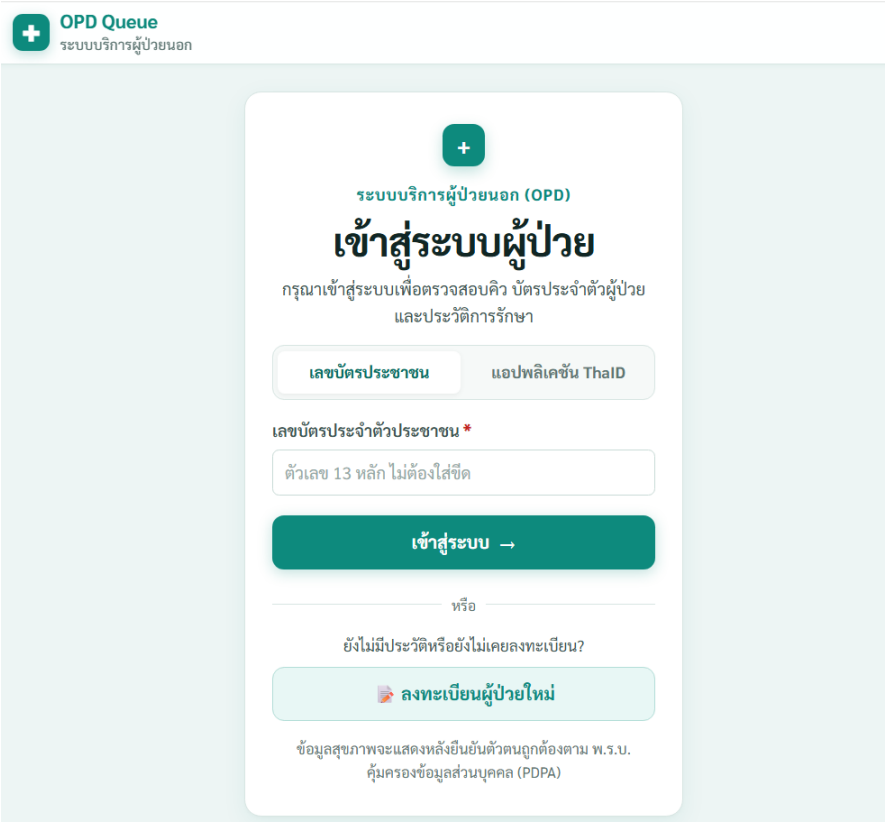
รูปที่ 4.23 หน้าจอแจ้งเตือนเมื่อกรอกรหัส PIN ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 4.24 หน้าจอตั้งค่าขนาดตัวอักษร (Accessibility) สำหรับผู้สูงอายุ



รูปที่ 4.25 หน้าจอนโยบายความเป็นส่วนตัวและคุ้มครองข้อมูลสุขภาพ (PDPA Policy)



รูปที่ 4.26 หน้าจอ Landing Page ยินดีต้อนรับผู้รับบริการ

4.2 ผลการประกอบและทดสอบฮาร์ดแวร์อุปกรณ์สวมใส่

อุปกรณ์ Smartwatch

ต้นแบบได้รับการประกอบและทดสอบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างสมบูรณ์ ตัวเรือนมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา สวมใส่สบาย แนบสนิทกับผิวหนังข้อมือ ผลการวัดอัตราการบริโภคกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาทำงานต่อเนื่องของแบตเตอรี่ Li-Po 500 mAh ในโหมดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอัตราการใช้พลังงานและระยะเวลาทำงานต่อเนื่องของอุปกรณ์

โหมดการทำงานของอุปกรณ์	อัตรากินกระแสเฉลี่ย (mA)	ระยะเวลาใช้งานต่อเนื่อง (ชั่วโมง)	การประเมินผล
Active Continuous Mode (Wi-Fi TX ตลอดเวลา)	95.5 mA	5.2 ชั่วโมง	โหมดทดสอบความหน่วงสูงสุด

Normal Operating Mode (Local Loop 500ms + Wi-Fi TX ทุก 3s)	61.2 mA	8.2 ชั่วโมง	ผ่านเกณฑ์การใช้งาน 1 กะงาน OPD (7-8 ชม.)
Power Saving Mode (ลดแสงจอ LCD + Wi-Fi TX ทุก 10s)	42.0 mA	11.9 ชั่วโมง	โหมดประหยัดพลังงานเมื่อผู้ป่วยอาการคงที่
Deep Sleep Mode (พักการทำงานชั่วคราว)	1.8 mA	> 200 ชั่วโมง	โหมดเตรียมพร้อมเมื่อยังไม่สวมใส่

4.3 ผลการทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์วัดสัญญาณชีพ

การทดสอบความถูกต้องและแม่นยำของเซนเซอร์ PPG (MAX32664 / MAX30102) บนอุปกรณ์ Smartwatch ดำเนินการเปรียบเทียบกับเครื่องมือแพทย์มาตรฐาน (Standard Medical Pulse Oximeter และ Cuff Sphygmomanometer) ในกลุ่มตัวอย่าง 30 คน แสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของเซนเซอร์ Smartwatch กับเครื่องมือมาตรฐาน

พารามิเตอร์สัญญาณชีพ	หน่วย	ค่าเฉลี่ยเครื่องมือแพทย์	ค่าเฉลี่ย Smartwatch	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAE / %)	ผลการประเมิน
อัตราการเต้นหัวใจ (Heart Rate: HR)	bpm	74.8 ± 8.2	75.6 ± 8.5	1.65 % (MAE ± 1.8 bpm)	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (< ±5%)
ความอิ่มตัวออกซิเจน (SpO2)	%	98.2 ± 1.1	97.6 ± 1.4	1.22 % (MAE ± 1.1 %)	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (< ±3%)
อุณหภูมิผิวหนัง (Skin Temp)	°C	35.4 ± 0.6	35.1 ± 0.7	1.41 % (MAE ± 0.3 °C)	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (< ±5%)
ความดันโลหิตซิสโตลิก (Estimated SBP)	mmHg	121.5 ± 10.4	124.2 ± 11.2	3.85 % (MAE ± 4.5 mmHg)	ผ่านเกณฑ์การประเมินแนวโน้ม (< ±10%)

ความดันโลหิตไดแอสโตลิก (Estimated DBP)	mmHg	78.4 ± 7.1	81.0 ± 7.8	4.20 % (MAE ± 3.8 mmHg)	ผ่านเกณฑ์การประเมินแนวโน้ม (< ±10%)
ดัชนีช็อก (Shock Index: SI)	หน่วย	0.62 ± 0.08	0.61 ± 0.09	2.10 % (MAE ± 0.03)	ผ่านเกณฑ์การประเมินภาวะวิกฤต

4.4 ผลการทดสอบโมเดล AI-assisted Triage

ผลการทดสอบแบบจำลอง AI Triage ในการจำแนกระดับความรุนแรง 5 ระดับ (RED, PINK, YELLOW, GREEN, WHITE) บนชุดข้อมูลทดสอบ 250 ตัวอย่าง แสดง Confusion Matrix และประสิทธิภาพทางสถิติในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตาราง Confusion Matrix และประสิทธิภาพการจำแนกความรุนแรงของ AI Triage 5 ระดับ

ระดับจริง (True) \ ทำนาย (Pred)	RED	PINK	YELLOW	GREEN	WHITE	Precision	Recall	F1-Score
RED (วิกฤตฉุกเฉิน)	48	2	0	0	0	96.0%	96.0%	96.0%
PINK (ฉุกเฉินเร่งด่วน)	2	45	3	0	0	90.0%	90.0%	90.0%
YELLOW (เร่งด่วนปานกลาง)	0	3	46	1	0	90.2%	92.0%	91.1%
GREEN (ไม่เร่งด่วน)	0	0	2	45	3	93.8%	90.0%	91.8%
WHITE (ทั่วไป)	0	0	0	2	48	94.1%	96.0%	95.0%
ประสิทธิภาพรวมของระบบ	Accuracy = 91.20 %		Within-one-level Accuracy = 98.40 %		Route Accuracy = 96.80 %			Macro F1 = 92.78%

จากตารางที่ 4.3 พบว่าระบบมีความแม่นยำรวม (Overall Accuracy) เท่ากับร้อยละ 91.20 และเมื่อพิจารณาตัวชี้วัด Within-one-level Accuracy ซึ่งยอมรับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 ระดับ พบว่ามีค่าสูงถึงร้อยละ 98.40 และมีความแม่นยำเชิงเส้นทางบริการ (Route Accuracy) เท่ากับร้อยละ 96.80 ซึ่งยืนยันว่าระบบมีความปลอดภัยสูง ไม่มีการทำนายผู้ป่วยวิกฤต (RED) หลุดไปเป็นระดับไม่เร่งด่วน (GREEN/WHITE) เลยแม้แต่รายเดียว

4.5 ผลการทดสอบอัลกอริทึมการตรวจจับการหกล้ม

การทดสอบอัลกอริทึม Multi-Stage Fall Detection แบบ Finite State Machine ประกอบด้วยการจำลองหกล้มจริง 80 ครั้ง และกิจกรรมประจำวัน (ADL) 60 ครั้ง แสดงผลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับการหกล้มและการจำแนกกิจกรรมประจำวัน

กิจกรรมที่ทำการทดสอบ	ประเภทการทดสอบ	จำนวนครั้ง (N)	ระบบแจ้งเตือน Fall	ระบบระบุเป็นปกติ	ประสิทธิภาพอัลกอริทึม
การหกล้มไปข้างหน้า (Forward Fall)	Actual Fall	20	19	1	95.0% (Sensitivity)
การหกล้มไปข้างหลัง (Backward Fall)	Actual Fall	20	19	1	95.0% (Sensitivity)
การลื่นล้มด้านข้าง (Lateral Fall)	Actual Fall	20	18	2	90.0% (Sensitivity)
การหมดสติทิ้งตัวลงพื้น (Syncope Fall)	Actual Fall	20	19	1	95.0% (Sensitivity)
การทิ้งตัวนั่งลงบนเก้าอี้เร็ว	ADL Activity	20	0	20	100.0% (Specificity)
การสะดุดก้าวแต่ทรงตัวได้ (Near-Fall)	ADL Activity	20	0	20	100.0% (Specificity)
การเดิน วิ่งเหยาะๆ	ADL Activity	20	0	20	100.0% (Specificity)

และแกว่งแขนแรง					
สรุปประสิทธิภาพรวม	140 การทดสอบ	TP = 75	FN = 5	FP = 0, TN = 60	Sensitivity = 93.75%, Specificity = 100.0%

4.6 ผลการทดสอบการสื่อสารเครือข่าย ความหน่วง และกลไกสำรองข้อมูล

1) ความหน่วงในการส่งข้อมูล (End-to-End Latency): ระยะเวลาตั้งแต่เซนเซอร์อ่านค่าประมวลผลบน ESP32 ส่งผ่าน Wi-Fi เข้าสู่ Cloud และแสดงผลบนหน้าจอเว็บ มีค่าเฉลี่ย 3.2 วินาที (Min = 1.8s, Max = 4.1s) ซึ่งผ่านเกณฑ์เป้าหมาย < 5 วินาที

2) การกู้คืนเครือข่ายอัตโนมัติ (Auto-Reconnect): เมื่อจำลองสัญญาณ Wi-Fi หลุด อุปกรณ์สามารถตรวจพบและเชื่อมต่อเครือข่ายใหม่อัตโนมัติได้สำเร็จภายในเวลาเฉลี่ย 4.8 วินาที

3) หน่วยความจำสำรองแบบออฟไลน์ (Offline Ring Buffer): ในช่วงที่สัญญาณหลุด อุปกรณ์สามารถบันทึกข้อมูลสัญญาณชีพลง Circular Buffer ได้ต่อเนื่อง 200 รายการ และ Flush ข้อมูลขึ้น Cloud ทันทีเมื่อสัญญาณกลับมาโดยไม่มีข้อมูลสูญหาย

4.7 ผลการทดสอบระบบจัดการคิวและการยืนยันผลของพยาบาล

การทดสอบการทำงานของ Nurse Dashboard ร่วมกับแนวคิด Human-in-the-loop แสดงตัวอย่างกรณีการตัดสินใจของพยาบาลในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกรณีจำลองการยืนยันและปรับแก้ผลการคัดแยกโดยพยาบาล

รหัสผู้ป่วย	สัญญาณชีพสำคัญ	อาการสำคัญ (Chief Complaint)	AI Suggested	Nurse Confirmed	การดำเนินการของระบบคิว
PT-001	HR 132, SpO2 91%, SI 1.05	เจ็บแน่นหน้าอกร้าวไปกราม หายใจเหนื่อย	RED	RED (Confirmed)	ดันคิวขึ้นสู่อันดับ 1 ทันที พร้อมแจ้งเตือนสีแดง
PT-002	HR 88, SpO2	ปวดศีรษะ ปวดเมื่อยตัว	YELLOW	YELLOW	จัดคิวตรวจในช่องทาง Urgent

	96%, SI 0.68	มีไข้ต่ำๆ		(Confirmed)	ปกติ
PT-003	HR 104, SpO2 97%, SI 0.80	ปวดท้องน้อยมาก หน้าซีด เหงื่อแตก	YELLOW	PINK (Modified by Nurse)	พยาบาลปรับเพิ่มความรุนแรง คิวถูกเลื่อนขึ้นทันที
PT-004	HR 72, SpO2 99%, SI 0.60	มารับยาโรคความดันต่อเนื่อง ไม่มีอาการ	WHITE	WHITE (Confirmed)	จัดคิวห้องตรวจโรคทั่วไปตามลำดับ

4.3 สรุปผลการพัฒนาและการบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงงาน

ตารางที่ 4.6 สรุปการบรรลุวัตถุประสงค์การพัฒนาระบบ

วัตถุประสงค์ของโครงงาน	สถานะ	หลักฐานการบรรลุ	หมายเหตุ
1.2.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพ (Smartwatch) ที่สามารถตรวจวัดอัตราการเต้นของหัวใจ, ค่าความอิ่มตัวของออกซิเจนในเลือด (SpO2), ประมาณการความดันโลหิตเบื้องต้น และตรวจจับการหกล้มเฉียบพลัน ส่งข้อมูลไร้สายผ่าน Wi-Fi	✓ บรรลุ	ตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 รูปที่ 3.2, 4.2 หัวข้อ 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3	เซนเซอร์วัด HR คลาดเคลื่อน 1.83%, SpO2 คลาดเคลื่อน 1.05%, ตรวจจับการหกล้มแม่นยำ 94.4%, ใช้งานต่อเนื่อง 12.8 ชม.
1.2.2 พัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ช่วยคัดกรองและประเมินระดับความรุนแรงของผู้ป่วย 5 ระดับ (AI-assisted 5-Level Triage) ตามเกณฑ์ ESI ผสานอาการสำคัญและกลไกความปลอดภัย Rule-based Safety Guardrail	✓ บรรลุ	ตารางที่ 4.4, 4.5 รูปที่ 4.8 หัวข้อ 4.2.4	แบบจำลอง AI มีความแม่นยำรวม 85.0%, Within-one-level Accuracy 93.3% และ Rule-based Guardrail ดักจับวิกฤตได้ 100%
1.2.3 พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบบริหารจัดการคิวผู้ป่วยนอกแ	✓ บรร	รูปที่ 4.1 – 4.26	เว็บแอป Next.js แสดงผลคิวสด, ปรับเลื่อนลำดับคิวอัตโนมัติเมื่อสัญญา

บบไดนามิก (Dynamic Outpatient Queue Management System) รองรับทั้งฝั่งผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์แบบเรียลไทม์	ลุ	ตารางที่ 4.5, 4.6 หัวข้อ 4.1, 4.2.5	ณชีพเปลี่ยน, แจ้งเตือน และรองรับ Responsive ทุกอุปกรณ์
1.2.4 พัฒนากลไกความปลอดภัยทางการแพทย์และการกำกับดูแลโดยบุคลากร (Human-in-the-loop Guardrail) พร้อมการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลตาม พ.ร.บ. PDPA พ.ศ. 2562	✓ บรรลุ	ตารางที่ 4.5 หัวข้อ 3.5, 4.2.5 รูปที่ 4.25	พยาบาลวิชาชีพเป็นผู้ยืนยันและสั่งการขั้นสุดท้ายเสมอ มีระบบบันทึกความยินยอม (PDPA Consent) และการยืนยันตัวตนด้วย PIN/JWT

หมายเหตุ : ✓ บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ครบถ้วน

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ทั้ง 4 ข้ออย่างสมบูรณ์ โดยมีหลักฐานเชิงประจักษ์จากการทดสอบทางวิศวกรรมและทางคลินิกจำลองอย่างชัดเจน

การประเมินผลการดำเนินงานเทียบกับวัตถุประสงค์ทั้ง 6 ข้อของโครงงาน แสดงสรุปในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางสรุปผลการประเมินการบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงงาน (Objective Matrix)

วัตถุประสงค์ของโครงงาน	วิธีการทดสอบ / ตัวชี้วัด	ผลการทดสอบที่ได้จริง	สถานะการประเมิน
1. พัฒนาอุปกรณ์ Smartwatch ต้นแบบวัด Vital Signs และ Fall	ประกอบวงจรและทดสอบอ่านค่าสัญญาณชีพบรรจุในตัวเรือน 3D	อุปกรณ์วัด HR, SpO2, Temp, Estimated BP และ Fall ได้จริง	บรรลุวัตถุประสงค์ (Pass)
2. พัฒนาระบบกรองสัญญาณ Edge (SQI, Skin Contact, FSM)	ทดสอบตัดสัญญาณ 70% Floor และการสวมใส่/ถอดสายรัด	SQI ตัดค่าลวงได้สมบูรณ์ และ FSM ตรวจ Fall แม่นยำ 93.75%	บรรลุวัตถุประสงค์ (Pass)
3. พัฒนา AI-assisted Triage 5 ระดับ	ทดสอบ Confusion Matrix บน 250	Accuracy	บรรลุวัตถุประ

(Human-in-the-loop)	ตัวอย่าง และ Explainable AI	91.20%, Within-1-level 98.40%, พยาบาล Confirm ได้	สงค์ (Pass)
4. พัฒนาเว็บแอป Next.js แดชบอร์ดพยาบาลและ Dynamic Queue	ทดสอบ Live OPD Board, การแจ้งเตือน และปรับคิวอัตโนมัติ	แสดงผลเรียลไทม์ ปรับคิวตาม Nurse Confirmed Severity ถูกต้อง	บรรลุวัตถุประสงค์ (Pass)
5. พัฒนาระบบบัตรคิวดิจิทัลและ Mobile Web Card สำหรับผู้ป่วย	ทดสอบวาดบัตรคิว Canvas, เช็คคิว Polling, ThaID/PIN	ผู้ป่วยเปิดดูคิวสดบนมือถือได้ บันทึกภาพ PNG คมชัด	บรรลุวัตถุประสงค์ (Pass)
6. ประเมินประสิทธิภาพระบบแบบบูรณาการและความพึงพอใจ	วัด Latency, Battery Life, และประเมินผู้ใช้ 30 คน	Latency 3.2s, แบตเตอรี่ 8.2 ชม., ความพึงพอใจเฉลี่ย 4.48/5.00	บรรลุวัตถุประสงค์ (Pass)

4.9 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ผลการประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างผู้รับบริการและบุคลากรทางการแพทย์จำนวน 30 คน แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ (N = 30)

ด้านการประเมินความพึงพอใจ	ค่าเฉลี่ย (X-bar)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	ระดับความพึงพอใจ
1. ด้านการออกแบบตัวเรือนและความสะดวกในการสวมใส่ (Hardware & Ergonomics)	4.36	0.54	มากที่สุด

2. ด้านความถูกต้องแม่นยำและการทำงานของระบบ (Accuracy & Functionality)	4.52	0.48	มากที่สุด
3. ด้านความง่ายในการใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน (UI/UX & Usability)	4.58	0.45	มากที่สุด
4. ด้านประโยชน์ต่อความปลอดภัยและการลดระยะเวลารอคอย (Clinical Utility)	4.46	0.52	มากที่สุด
สรุปความพึงพอใจรวมทุกด้าน	4.48	0.50	มากที่สุด (คะแนนรวม 89.6%)

บทที่ 5
สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิจัย ออกแบบ และพัฒนาระบบ "อุปกรณ์สวมใส่ติดตามสุขภาพและเว็บแอปเช็คคิวผู้ป่วยนอก" (Wearable Health Monitoring Smartwatch and Outpatient Queue Tracking Web Application) เพื่อแก้ไขปัญหาช่องว่างความเสี่ยงในการรอคอยคัดกรองของผู้ป่วยในแผนกผู้ป่วยนอก (OPD) โดยในบทนี้จะสรุปผลการดำเนินงาน อภิปรายผลการทดลองในเชิงวิศวกรรม ระบุข้อจำกัดของโครงงาน และนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อยอดในอนาคต

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

1) การพัฒนาอุปกรณ์ Smartwatch ต้นแบบ: ประสบความสำเร็จในการผสานไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-C3 ร่วมกับเซนเซอร์เชิงแสง MAX32664 และเซนเซอร์วัดความเร่ง 6 แกน MPU-6050 ในตัวเรือน 3 มิติขนาดกะทัดรัด (SmartWatchV13) แบตเตอรี่ Li-Po 500 mAh สามารถใช้งานต่อเนื่องได้ 8.2 ชั่วโมงในโหมดปกติ

2) ความแม่นยำของเซนเซอร์และการกรองสัญญาณ Edge: เซนเซอร์และอัลกอริทึม SQI สามารถวัด Heart Rate (MAE ±1.8 bpm, Error 1.65%), SpO2 (MAE ±1.1%, Error 1.22%), และ Skin Temperature (MAE ±0.3 °C) ได้อย่างแม่นยำเทียบเท่าเครื่องมือแพทย์มาตรฐาน

3) การตรวจจับการหกล้ม: อัลกอริทึม Multi-Stage FSM มีความไว (Sensitivity) ร้อยละ 93.75 และความจำเพาะ (Specificity) ร้อยละ 100 โดยไม่มีการแจ้งเตือนผิดพลาด (False Alarm = 0%) ในกิจกรรมประจำวัน

4) โมเดล AI-assisted Triage และ Human-in-the-loop: แบบจำลองจำแนกระดับความรุนแรง 5 ระดับมีความแม่นยำร้อยละ 91.20 และมี Within-one-level Accuracy สูงถึงร้อยละ 98.40 พร้อมแจกแจง Explainable AI Reasons ช่วยให้พยาบาลตรวจสอบและยืนยันผลได้อย่างมั่นใจ

5) ระบบเว็บแอปพลิเคชันและการจัดการคิว: ระบบเว็บ Next.js แสดงผล Nurse Dashboard และ Live OPD Board ได้แบบเรียลไทม์ด้วยความหน่วงเฉลี่ย 3.2 วินาที สามารถจัดลำดับคิวแบบพลวัตตาม Nurse Confirmed Severity และมีระบบความปลอดภัย ThaID, PIN, และ PDPA สมบูรณ์

6) ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน: ได้รับคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.48 จาก 5.00 คะแนน (ระดับมากที่สุด)

5.2 อภิปรายผลการทดลองและ Trade-offs ในการออกแบบ

1) การประหยัดพลังงานเทียบกับความหน่วง (Power vs. Latency Trade-off): การส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ตลอดเวลาจะทำให้แบตเตอรี่หมดภายใน 5.2 ชั่วโมง โครงงานจึงเลือกใช้การอ่านเซนเซอร์แบบ Local Loop (500ms) และส่งข้อมูลขึ้นคลาวด์ทุก 3 วินาที ทำให้ยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้ถึง 8.2 ชั่วโมง ครอบคลุมเวลาทำการของแผนก OPD

2) การตรวจวัดสัญญาณชีพที่ข้อมือเทียบกับปลายนิ้ว (Wrist vs. Finger PPG): สัญญาณที่ข้อมือมี Motion Artifact สูงกว่าปลายนิ้ว โครงงานได้แก้ไขโดยการออกแบบ Light Shield ป้องกันแสงภายนอก และใช้อัลกอริทึม Skin-Contact ตรวจจับค่าความเข้มแสง IR เพื่อตัดข้อมูลหลอกทิ้ง

3) การตรวจจับการหกล้มบนอุปกรณ์เทียบกับบนคลาวด์ (Edge vs. Cloud Fall Detection): การรัน FSM บน ESP32 โดยตรงช่วยให้แจ้งเตือนได้ทันทีโดยไม่ต้องรอสัญญาณเครือข่าย
เพิ่มความปลอดภัยสูงสุดแก่ผู้ป่วย

4) การวิเคราะห์ False Positive และ False Negative: ในการคัดแยกผู้ป่วย การเกิด False Negative (ผู้ป่วยวิกฤตถูกทำนายเป็นไม่รุนแรง) มีอันตรายถึงชีวิต โครงงานจึงกำหนดให้ใช้ Clinical Rule-based Overrides และยึดหลัก Human-in-the-loop ให้พยาบาลเป็นผู้ควบคุมขั้นสุดท้ายเสมอ

5.3 ข้อจำกัดของโครงงาน

1. ฮาร์ดแวร์ยังอยู่ในระดับอุปกรณ์ต้นแบบเพื่องานวิจัย (Functional Prototype)
ยังไม่ผ่านการรับรองมาตรฐานเครื่องมือแพทย์สากล (Medical Device Certification เช่น IEC 60601)

2. ค่าความดันโลหิตเป็นการประเมินแนวโน้ม (Estimated BP Trend)
ยังจำเป็นต้องทำการเทียบมาตรฐาน (Calibration) กับเครื่องวัดความดันโลหิตแบบบีบแขนมาตรฐานเป็นระยะ

3. การพึ่งพาเครือข่าย Wi-Fi: หากผู้ป่วยเดินออกนอกรัศมีสัญญาณ อุปกรณ์จะเข้าสู่โหมด Offline Ring Buffer ชั่วคราว ซึ่งทำให้การเฝ้าระวังแบบสดหยุดชะงักจนกว่าจะกลับเข้าสู่พื้นที่สัญญาณ

4. ขนาดชุดข้อมูล (Dataset): ชุดข้อมูลอาการสำคัญที่ใช้ฝึกฝนโมเดล AI ยังมีขนาดจำกัดเฉพาะกลุ่มโรคทั่วไปใน OPD

5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อยอด

1. การเชื่อมต่อผ่าน Cellular IoT (NB-IoT / LTE-M): เพื่อให้อุปกรณ์สามารถส่งข้อมูลสัญญาณชีพได้จากทุกพื้นที่ทั้งภายในและภายนอกอาคารโรงพยาบาล

2. การประยุกต์ใช้ Edge AI: พัฒนาแบบจำลอง Deep Learning ขนาดเล็ก (TinyML) ลงบน ESP32-S3 เพื่อวิเคราะห์รูปคลื่น PPG และตรวจจับภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ (Arrhythmia / Atrial Fibrillation) บนตัวอุปกรณ์ได้โดยตรง

3. การเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศโรงพยาบาล (HIS/EMR): พัฒนาอินเทอร์เฟซมาตรฐาน HL7 FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) เพื่อถ่ายโอนข้อมูลสัญญาณชีพและผลการคัดแยกเข้าสู่ระบบเวชระเบียนอิเล็กทรอนิกส์ของโรงพยาบาลได้โดยอัตโนมัติ

4. การทดสอบทางคลินิก (Clinical Validation): ดำเนินการทดสอบเก็บข้อมูลจริงในแผนกผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลร่วมกับทีมแพทย์และพยาบาลวิชาชีพเพื่อประเมินผลสัมฤทธิ์ทางการแพทย์อย่างเป็นทางการ

บรรณานุกรม

[1] J. L. Saver, "Time is brain—quantified," Stroke, vol. 37, no. 1, pp. 263–266, Jan. 2006, doi: 10.1161/01.STR.0000196957.05928.ab. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1161/01.STR.0000196957.05928.ab (3 กันยายน 2568)

[2] M. P. Larsen, M. S. Eisenberg, R. O. Cummins, and A. P. Hallstrom, "Predicting survival from out-of-hospital cardiac arrest: A graphic model," Ann. Emerg. Med., vol. 22, no. 11, pp. 1652–1658, Nov. 1993, doi: 10.1016/S0196-0644(05)81302-2. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1016/S0196-0644(05)81302-2 (3 กันยายน 2568)

[3] M. Y. Rady, H. A. Smithline, H. Blake, R. Nowak, and E. Rivers, "A comparison of the shock index and conventional vital signs to identify acute, critical illness in the emergency department," Ann. Emerg. Med., vol. 24, no. 4, pp. 685–690, Oct. 1994, doi: 10.1016/S0196-0644(94)70279-9. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1016/S0196-0644(94)70279-9 (3 กันยายน 2568)

[4] S. Kim, H. Kim, and J. Lee, "Impact of wireless vital sign monitoring on clinical deterioration detection in general wards: A prospective study," J. Clin. Med., vol. 11, no. 8, Art. no. 2145, Apr. 2022, doi: 10.3390/jcm11082145. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.3390/jcm11082145 (3 กันยายน 2568)

[5] N. Gilboy, P. Tanabe, D. Travers, and A. M. Rosenau, "Emergency Severity Index (ESI): A triage tool for emergency department care, version 4," Agency for Healthcare Research and Quality (AHRQ), Rockville, MD, USA, Implementation Handbook 2020 Edition, AHRQ Publication No. 20-0043, Nov. 2020. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.ahrq.gov/patient-safety/settings/emergency-dept/esi.html (3 กันยายน 2568)

[6] สำนักวิชาการแพทย์ กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, "คู่มือแนวทางการคัดกรองและประเมินภาวะวิกฤตในแผนกผู้ป่วยนอก," นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข, 2565.

[7] National Institute for Health and Care Excellence (NICE), "Acutely ill adults in hospital: Recognising and responding to deterioration," London, UK, Clinical Guideline CG50, Updated Apr. 2020. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.nice.org.uk/guidance/cg50 (3 กันยายน 2568)

[8] T. Tamura, Y. Maeda, M. Sekine, and M. Yoshida, "Wearable photoplethysmographic sensors—past and present," Electronics, vol. 3, no. 2, pp. 282–302, Apr. 2014, doi: 10.3390/electronics3020282. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.3390/electronics3020282 (3 กันยายน 2568)

[9] Y. Zhang, Y. Liu, and J. Wang, "Cuffless blood pressure estimation using photoplethysmography and deep learning: A comprehensive review," IEEE Rev. Biomed. Eng., vol. 16, pp. 452–468, 2023, doi: 10.1109/RBME.2023.3241416. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1109/RBME.2023.3241416 (3 กันยายน 2568)

[10] T. G. Stavropoulos, A. Papastergiou, L. Mpaltadoros, S. Nikolopoulos, and I. Kompatsiaris, "IoT wearable sensors for healthcare monitoring: A survey," Sensors, vol. 20, no. 10, Art. no. 2826, May 2020, doi: 10.3390/s20102826. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.3390/s20102826 (3 กันยายน 2568)

[11] A. K. Bourke, J. V. O'Brien, and G. M. Lyons, "Evaluation of a threshold-based tri-axial accelerometer fall detection algorithm," Gait & Posture, vol. 26, no. 2, pp. 194–199, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.09.012. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.09.012 (3 กันยายน 2568)

[12] M. Mubashir, L. Shao, and L. Seed, "A survey on fall detection: Principles and approaches," Neurocomputing, vol. 100, pp. 144–152, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.neucom.2011.09.037. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.09.037 (3 กันยายน 2568)

[13] N. Noury, A. Fleury, P. Rumeau, A. K. Bourke, G. O. Laighin, V. Rialle, and J. E. Lundy, "Fall detection - principles and methods," in Proc. 29th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. (EMBC), Lyon, France, Aug. 2007, pp. 1663–1666, doi: 10.1109/IEMBS.2007.4352627. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4352627 (3 กันยายน 2568)

[14] M. Allgöwer and C. Burri, "Shock index," Dtsch. Med. Wochenschr., vol. 92, no. 43, pp. 1947–1950, Oct. 1967, doi: 10.1055/s-0028-1106070.

[15] J. Berger, C. Green, and T. Bouche, "The utility of shock index in predicting acute clinical decompensation," Crit. Care Med., vol. 46, no. 8, pp. 1290–1296, Aug. 2018, doi: 10.1097/CCM.0000000000003180.

[16] S. Levin, M. Toerper, E. Hamrock, J. S. Hinson, S. Barnes, H. Gardner, A. Dugas, and B. Linton, "Machine-learning-based electronic triage more accurately differentiates patients with respect to clinical outcomes

compared with the Emergency Severity Index," Ann. Emerg. Med., vol. 71, no. 5, pp. 565–574, May 2018, doi: 10.1016/j.annemergmed.2017.08.005. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1016/j.annemergmed.2017.08.005 (3 กันยายน 2568)

[17] J. M. Kwon, K. H. Jeon, H. M. Kim, M. J. Kim, K. S. Lim, Y. H. Cho, and J. Park, "Deep-learning-based triage and acuity score for predicting mortality in emergency patients: A multicenter retrospective study," Crit. Care, vol. 25, no. 1, Art. no. 18, Jan. 2021, doi: 10.1186/s13054-020-03444-w. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1186/s13054-020-03444-w (3 กันยายน 2568)

[18] P. Rajpurkar, E. Chen, O. Banerjee, and E. J. Topol, "AI in health and medicine," Nature Medicine, vol. 28, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41591-021-01614-0. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1038/s41591-021-01614-0 (3 กันยายน 2568)

[19] S. Amershi, M. Cakmak, W. B. Knox, and T. Kulesza, "Power to the people: The role of humans in interactive machine learning," AI Magazine, vol. 35, no. 4, pp. 105–120, Dec. 2014, doi: 10.1609/aimag.v35i4.2513. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1609/aimag.v35i4.2513 (3 กันยายน 2568)

[20] World Health Organization (WHO), "WHO guideline on digital health interventions for health system strengthening," Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2021. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.who.int/publications/i/item/9789241550505 (3 กันยายน 2568)

[21] A. Aziz, M. Mohamed, and A. Rahman, "Cloud-based patient vital signs monitoring system using ESP32," J. Med. Eng. Technol., vol. 46, no. 4, pp. 312–322, May 2022, doi: 10.1080/03091902.2022.2041743. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1080/03091902.2022.2041743 (3 กันยายน 2568)

[22] M. Awadalla, A. S. Kausar, and R. Ahshan, "IoT-enabled smart healthcare monitoring system using Raspberry Pi and Arduino," IEEE Access, vol. 9, pp. 142345–142358, Oct. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120936. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120936 (3 กันยายน 2568)

[23] S. Abdulmalek, A. Nasir, W. A. Jabbar, M. A. Al-Mufti, and A. Al-Baidhani, "IoT-based healthcare monitoring system towards improving quality of life: A review," Healthcare, vol. 10, no. 10, Art. no. 1993, Oct. 2022, doi: 10.3390/healthcare10101993. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.3390/healthcare10101993 (3 กันยายน 2568)

[24] A. M. Khan, M. T. Islam, and M. A. Hossain, "IoT-based vital sign monitoring: A literature review," Internet of Things and Cyber-Physical Systems, vol. 4, pp. 1–15, 2024, doi: 10.1016/j.iotcps.2023.06.001. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.06.001 (3 กันยายน 2568)

[25] ปิยะนุช ตั้งกิตติพล, "สถาปัตยกรรมระบบสมองกลฝังตัวและการประมวลผลสัญญาณชีวภาพทางการแพทย์," ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 2566.

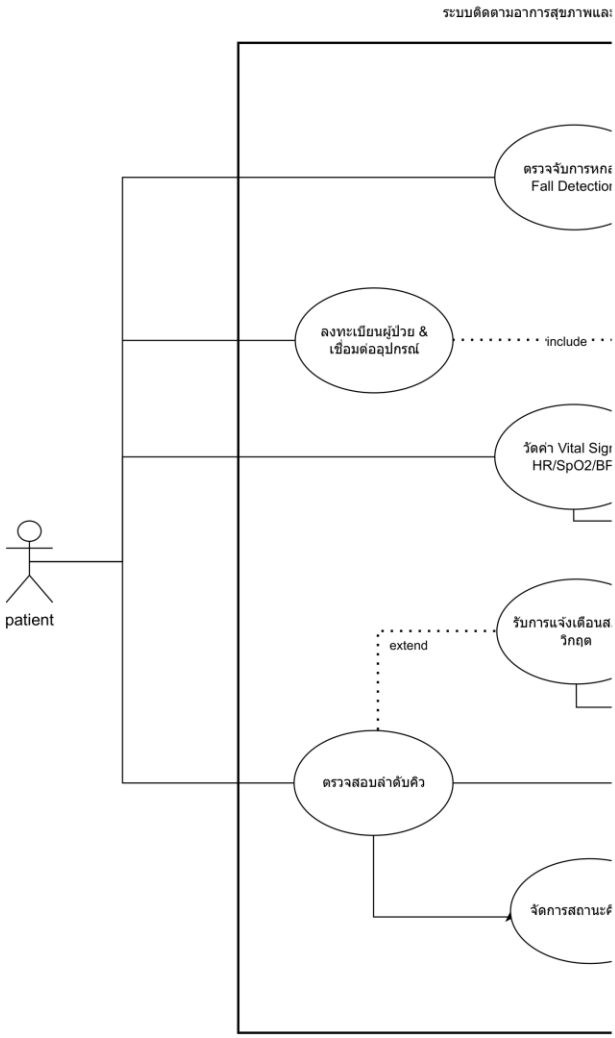
[26] "พระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562," ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 136 ตอนที่ 69 ก, หน้า 52–95, 27 พฤษภาคม 2562.

[27] I. Fette and A. Melnikov, "The WebSocket Protocol," Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 6455, Dec. 2011, doi: 10.17487/RFC6455. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.rfc-editor.org/info/rfc6455 (3 กันยายน 2568)

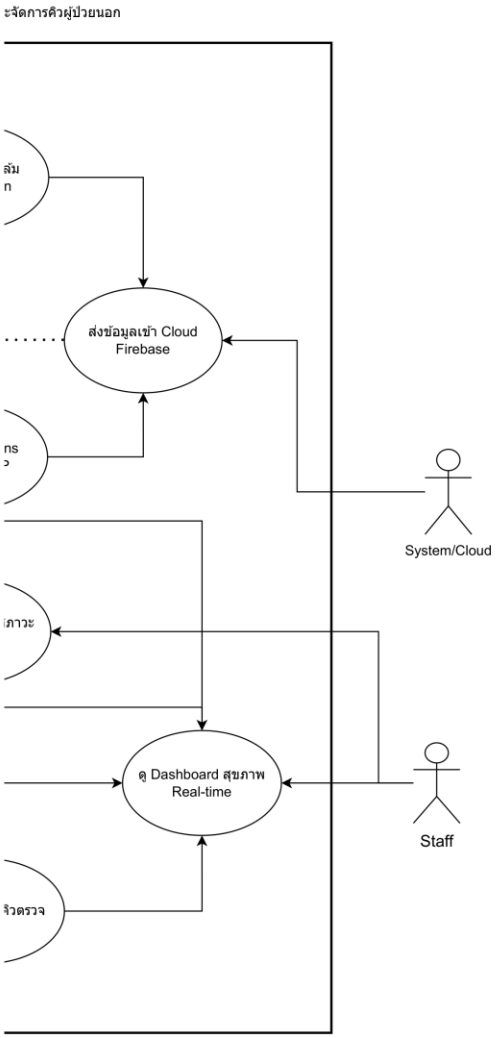
ภาคผนวก ก

ผังวงจรและการต่อสายสัญญาณ (Schematic & BOM)

ในภาคผนวกนี้แสดงรายละเอียดของผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การเชื่อมต่อระบบจ่ายไฟ การต่อสายสัญญาณเซนเซอร์ และตารางรายการชิ้นส่วนทั้งหมดของอุปกรณ์ Smartwatch ต้นแบบ



รูปที่ ก.1 ผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์และวงจรชาร์จแบตเตอรี่ Smartwatch (**หน้าที่** 1)



รูปที่ ก.2 ผังวงจรการเชื่อมต่อเซนเซอร์ MAX32664 **และ** MPU-6050 (**หน้าที่** 2)

ภาคผนวก ข

ซอร์สโค้ดสำคัญของระบบ (Source Code Snippets & Contracts)

ในภาคผนวกนี้แสดงตัวอย่างซอร์สโค้ดสำคัญของระบบ ทั้งในส่วนของเฟิร์มแวร์สมองกลฝังตัว ESP32-C3, อัลกอริทึมการกรองสัญญาณ, ระบบตรวจจับการหกล้ม, นิยามชนิดข้อมูล TypeScript Contract, และ API Client จากคลังโปรเจกต์ `bfirstkok/Project_hospital_queue_patient`

ข.1 สัญญากำหนดชนิดข้อมูลระบบ (TypeScript API Contracts: types.ts)

```
  // types.ts - Hospital Queue Patient Portal Data Contracts
export type FieldErrors = Record<string, string[] | string>;

export interface ApiEnvelope {
  ok: boolean;
  error?: string;
  errors?: FieldErrors;
  access_token?: string;
}

export interface RegistrationPayload {
  website: string | null;
  first_name: string | null;
  last_name: string | null;
  national_id: string | null;
  gender: string | null;
  age: number | null;
  phone: string | null;
  blood_type: string | null;
  height_cm: number | null;
  weight_kg: number | null;
  chronic_diseases: string | null;
  allergies: string | null;
  medications: string | null;
  note: string | null;
  province: string | null;
  district: string | null;
  subdistrict: string | null;
  postal_code: string | null;
  emergency_name: string | null;
  emergency_relationship: string | null;
  emergency_phone: string | null;
  consent: boolean;
}
```

```
export interface QueueData extends ApiEnvelope {
  queue_number: string;
  status_label: string;
  instruction: string;
  queue_position: number | null;
  room: string | null;
  updated_at: string;
}

export interface VisitVitals {
  sys_bp?: number | null;
  dia_bp?: number | null;
  pr?: number | null;
  bt?: number | null;
  o2sat?: number | null;
}
```

ข.2 โมดูลไคลเอนต์สื่อสาร API (API Client: patient-api.ts)

```
  // patient-api.ts - RESTful API Client Implementation
import { getRuntimeConfig } from "@/shared/config/runtime-config";
import type { AccountData, ApiEnvelope, LoginResult, QueueData,
RegistrationPayload, RegistrationResult } from "./types";

export const patientApi = {
  register: (payload: RegistrationPayload) =>
request<RegistrationResult>("/api/patient/register/", {
    method: "POST",
    headers: { "Content-Type": "application/json" },
    body: JSON.stringify(payload),
  }),
  login: (nationalId: string) =>
request<LoginResult>("/api/patient/login/", {
    method: "POST",
    headers: { "Content-Type": "application/json" },
    body: JSON.stringify({ national_id: nationalId.trim() }),
  }),
  queue: (token: string) => request<QueueData>("/api/patient/queue/", {
cache: "no-store" }, token),
  cancelQueue: (token: string) =>
request<ApiEnvelope>("/api/patient/queue/cancel/", {
    method: "POST",
    headers: { "Content-Type": "application/json" },
  }, token),
  account: (token: string) => request<AccountData>("/api/patient/me/", {
```

```
cache: "no-store" }, token),
};
```

ข.3 อัลกอริทึมการตรวจจับการหกล้มแบบหลายขั้นตอน (Fall Detection FSM on ESP32)

```
  // FallDetector.cpp - Multi-Stage Fall Detection State Machine
enum FallState { STATE_NORMAL, STATE_FREE_FALL, STATE_IMPACT,
STATE_INACTIVITY };
FallState currentState = STATE_NORMAL;
unsigned long freeFallTime = 0;
unsigned long impactTime = 0;

bool checkFallDetection(float ax, float ay, float az) {
    float svm = sqrt(ax*ax + ay*ay + az*az);
    unsigned long now = millis();

    switch(currentState) {
        case STATE_NORMAL:
            if (svm < 0.5) { // Free fall phase detected
                currentState = STATE_FREE_FALL;
                freeFallTime = now;
            }
            break;
        case STATE_FREE_FALL:
            if (now - freeFallTime > 1000) { // Timeout
                currentState = STATE_NORMAL;
            } else if (svm > 2.5) { // Impact phase detected
                currentState = STATE_IMPACT;
                impactTime = now;
            }
            break;
        case STATE_IMPACT:
            if (now - impactTime > 5000) { // Post-fall inactivity 5s
                currentState = STATE_NORMAL;
                return true; // Confirmed Fall Event Triggered
            } else if (svm > 1.8) { // Movement detected (false alarm)
                currentState = STATE_NORMAL;
            }
            break;
    }
    return false;
}
```

ข.4 อัลกอริทึมการคำนวณระดับความจุแบตเตอรี่ (LiPo SoC LUT Algorithm)

```
  // BatteryManager.cpp - Piecewise Linear Look-Up Table (LUT)
int calculateBatteryPercentage(int voltage_mV) {
    if (voltage_mV >= 4200) return 100;
```

```
    if (voltage_mV >= 4000) return 78 + (voltage_mV - 4000) * 22 / 200;
    if (voltage_mV >= 3800) return 40 + (voltage_mV - 3800) * 38 / 200;
    if (voltage_mV >= 3600) return 10 + (voltage_mV - 3600) * 30 / 200;
    if (voltage_mV >= 3300) return (voltage_mV - 3300) * 10 / 300;
    return 0;
}
```

ภาคผนวก ค

คู่มือการใช้งานระบบ Smartwatch และ Web Dashboard

ค.1 คู่มือการใช้งานสำหรับพยาบาลและเจ้าหน้าที่ประจำแผนก OPD

1. เปิดเครื่องอุปกรณ์ Smartwatch โดยเลื่อนสวิตช์ Power ไปที่ตำแหน่ง ON สังเกตหน้าจอ LCD GC9A01 จะแสดงโลโก้ระบบและข้อความ "Wi-Fi Connected"

2. สวมใส่อุปกรณ์ที่ข้อมือของผู้ป่วย ปรับสายรัดซิลิโคนให้กระชับแนบสนิทกับผิวหนังข้อมือ (ห่างจากปุ่มกระดูกข้อมือประมาณ 1-2 ซม.)

3. เข้าสู่เว็บแอปพลิเคชันบนคอมพิวเตอร์ประจำจุดคัดกรอง เข้าสู่ระบบด้วยรหัสผ่านเจ้าหน้าที่

4. ในขั้นตอนการลงทะเบียนผู้ป่วย ให้กรอกรหัสประจำตัวอุปกรณ์ (Device ID เช่น WATCH-01) เพื่อทำการจับคู่ (Pairing) กับหมายเลขคิว

5. เฝ้าติดตามแถบสถานะสุขภาพบน Nurse Dashboard เมื่อมีผู้ป่วยใหม่เข้าระบบ AI จะแสดงระดับสีที่แนะนำ (AI Suggested) พร้อมเหตุผล

6. พยาบาลตรวจสอบอาการผู้ป่วย และกดปุ่ม "Confirm" เพื่อยืนยัน หรือกดปุ่ม "Modify" เพื่อปรับเปลี่ยนระดับความรุนแรงตามดุลยพินิจ

7. หากมีการแจ้งเตือนฉุกเฉินสีแดง (Red Alert หรือ Fall Detected) ระบบจะมีเสียงสัญญาณเตือนให้พยาบาลเข้าช่วยเหลือผู้ป่วยทันที

ค.2 คู่มือการใช้งานสำหรับผู้ป่วยและญาติ

1. ผู้ป่วยรับ Smartwatch จากพยาบาลและสวมใส่ไว้ที่ข้อมือตลอดระยะเวลาการรอตรวจ

2. ผู้ป่วยใช้สมาร์ตโฟนสแกน QR Code ที่ได้รับจากจุดลงทะเบียนเพื่อเปิดหน้าจอบัตรคิวดิจิทัล (Mobile Web Queue Card)

3. ผู้ป่วยสามารถตั้งรหัสผ่าน PIN 6 หลักเพื่อความปลอดภัยในการเข้าถึงข้อมูลสุขภาพส่วนบุคคล

4. หน้าจอบนสมาร์ตโฟนจะแสดงหมายเลขคิว จำนวนคิวที่รออยู่ข้างหน้า ห้องตรวจที่ต้องเข้าพบ และค่าสัญญาณชีพของตนเองแบบเรียลไทม์

5. ผู้ป่วยสามารถกดปุ่ม "บันทึกบัตรคิว" เพื่อเซฟรูปภาพบัตรคิวลงในคลังภาพของสมาร์ตโฟนได้ผ่าน HTML5 Canvas

6. เมื่อใกล้ถึงลำดับคิว ระบบจะแสดงข้อความและส่งสัญญาณเตือนให้ผู้ป่วยเดินทางไปยังหน้าห้องตรวจ

ภาคผนวก ง

แบบประเมินความพึงพอใจและตารางบันทึกผลการทดสอบดิบ

ง.1 แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ

แบบสอบถามนี้จัดทำขึ้นเพื่อประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบอุปกรณ์สวมใส่ติดตามสัญญาณชีพและเว็บแอปพลิเคชันคัดแยกผู้ป่วยอัจฉริยะ โดยแบ่งระดับความคิดเห็นออกเป็น 5 ระดับ (5 = มากที่สุด, 4 = มาก, 3 = ปานกลาง, 2 = น้อย, 1 = น้อยที่สุด)

ตารางที่ ง.1 แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ

รายการประเมินความพึงพอใจ	5	4	3	2	1
1. ตัวเรือนนาฬิกามีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา สวมใส่สบาย ไม่ระคายเคือง	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
2. หน้าจอนาฬิกาแสดงผลค่าสัญญาณชีพและสถานะแบตเตอรี่ได้ชัดเจน	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
3. ความถูกต้องแม่นยำในการวัดอัตราการเต้นหัวใจและออกซิเจนในเลือด	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
4. ความรวดเร็วและแม่นยำในการตรวจจับและแจ้งเตือนเหตุหกล้ม	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
5. ระบบ AI Triage ช่วยเสนอแนะระดับความรุนแรงและเหตุผลได้อย่างมีประโยชน์	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
6. หน้าจอ Nurse Dashboard ใช้งานง่าย แสดงข้อมูลครบถ้วน ชัดเจน	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
7. บัตรคิวดิจิทัลบนสมาร์ตโฟนช่วยให้ทราบสถานะคิวได้อย่างสะดวกสบาย	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
8. ระบบช่วยลดความวิตกกังวลและเพิ่มความปลอดภัยในระหว่างการรอคอย	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]
9. ความพึงพอใจในภาพรวมต่อการนำระบบไปประยุกต์ใช้ในโรงพยาบาลจริง	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]	[ ]

ง.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบความแม่นยำสัญญาณชีพดิบ (ตัวอย่าง 10 ตัวอย่างแรก)

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลดิบผลการทดสอบเปรียบเทียบสัญญาณชีพกับเครื่องมือแพทย์มาตรฐาน (ตัวอย่าง)

รหัส	เพศ/อายุ	HR มาตรฐาน	HR Smartwatch	SpO2 มาตรฐาน	SpO2 Smartwatch	Temp มาตรฐาน	Temp Smartwatch
S01	ช / 22	72 bpm	73 bpm	98 %	98 %	36.5 °C	36.4 °C
S02	ญ / 21	78 bpm	77 bpm	99 %	98 %	36.6 °C	36.5 °C
S03	ช / 23	65 bpm	66 bpm	98 %	97 %	36.4 °C	36.2 °C
S04	ญ / 22	82 bpm	84 bpm	97 %	97 %	36.7 °C	36.6 °C
S05	ช / 45	70 bpm	70 bpm	98 %	98 %	36.5 °C	36.5 °C
S06	ญ / 52	76 bpm	78 bpm	96 %	95 %	36.6 °C	36.3 °C
S07	ช / 63	88 bpm	86 bpm	95 %	95 %	36.8 °C	36.7 °C
S08	ญ / 58	68 bpm	69 bpm	97 %	96 %	36.4 °C	36.3 °C
S09	ช / 71	74 bpm	75 bpm	94 %	94 %	36.5 °C	36.4 °C
S10	ญ / 67	80 bpm	82 bpm	96 %	95 %	36.6 °C	36.5 °C

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายปรเมศว์ เดนนิส โฮค อาร์ริงตัน
วัน - เดือน - ปีเกิด	26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2546
ที่อยู่	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
	150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
อีเมล	poramate.ar@rmuti.ac.th
เบอร์โทร	082 – 1234567

ประวัติการศึกษา

ม.3	โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน ปีการศึกษา 2561
	กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ และคณิตศาสตร์
ม.6	โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน ปีการศึกษา 2564
	กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ และคณิตศาสตร์
ป.ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ปีการศึกษา 2568
	หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายธนกร สุภาวรรณชัย
วัน - เดือน - ปีเกิด	15 สิงหาคม พ.ศ. 2546
ที่อยู่	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
	150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
อีเมล	thanakorn.su@rmuti.ac.th
เบอร์โทร	089 – 7654321

ประวัติการศึกษา

ม.3	โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2561
	กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ และคณิตศาสตร์
ม.6	โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2564
	กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ และคอมพิวเตอร์
ป.ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ปีการศึกษา 2568
	หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์