KKU SCIENCE JOURNAL
Journal Home Page : https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ
Published by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบ Progressive Web Application สำหรับการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่แบบออฟไลน์: กรณีศึกษาการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟโรบัสต้า

Progressive Web Application Geographic Information System for Offline Spatial Data Collection: A Case Study of Robusta Coffee Disease and Pest Survey

นรเทพ ศักดิ์เพชร[1] ชาติรส จิตรักษ์ธรรม[2] วนิดา เพ็ชร์ลมุล[2] วิเลิศวัฒน์ หนูแสง[3] พิกุล สมจิตต์[4] สกรรจ์ รอดคล้าย[4] และ สนิท หฤหรรษวาสิน[5*]

Norathep Sakphet[1], Chatirot Jitrugtham[2], Wanida Petlamul[2], Vilerswat Noosaeng[3], Pikul Somjit[4], Sakan Rodklai[4] and Sanit Haruehansawasin[5*]

[1]สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

[2]สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

[3]บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

[4]สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

[5]ฝ่ายเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา กรุงเทพมหานคร 10300

[1]Major of Computer Education, College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000, Thailand

[2]Major of Agriculture, Faculty of Agricultural Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000, Thailand

[3]The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

[4]Major of Computer Education, Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000, Thailand

[5]Information Technology Division, Chitralada Technology Institute, Bangkok, 10300, Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) แบบ Progressive Web Application (PWA) สำหรับการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่แบบออฟไลน์ โดยมุ่งแก้ปัญหาการเก็บข้อมูลภาคสนามในพื้นที่ห่างไกลที่มีข้อจำกัดด้านสัญญาณอินเทอร์เน็ต กรณีศึกษาการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟโรบัสต้าในอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ระบบถูกพัฒนาด้วยเทคโนโลยี PWA ซึ่งใช้ IndexedDB สำหรับจัดเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ และรองรับการซิงค์ข้อมูลอัตโนมัติเมื่อมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต งานวิจัยนี้ยังนำเสนอ นวัตกรรมการแสดงความแม่นยำของตำแหน่งในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ผู้ใช้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ผลการทดสอบประสิทธิภาพในภาคสนาม พบว่า

*Corresponding Author, E-mail: norathep.sa@skru.ac.th

Received date: 12 May 2025 | Revised date: 23 November 2025 | Accepted date: 24 December 2025
doi: 10.14456/kkuscij.2026.17

ระบบสามารถทำงานได้ 100% ในการติดตามตำแหน่งและบันทึกข้อมูลแม้ไม่มีอินเทอร์เน็ต และสามารถแสดงแผนที่ได้ 95% (ขึ้นอยู่กับการแคชแผนที่ล่วงหน้า) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม (กระดาษร่วมกับเครื่อง GPS) ระบบสามารถ ลดเวลาในการสำรวจได้ 43.4% เพิ่มความแม่นยำของข้อมูล 7.8% เพิ่มความครบถ้วนของข้อมูล 13.2% และประหยัดพลังงานแบตเตอรี่ได้ 49.8% นอกจากนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน 30 คน มีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ในระดับ “มาก” (4.47 จากคะแนนเต็ม 5) ระบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับงานเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่อื่น ๆ เช่น การสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ การจัดการพื้นที่เกษตร หรือการเก็บข้อมูลภัยพิบัติในพื้นที่ห่างไกล โดยเฉพาะในบริบทที่มีข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop a Geographic Information System (GIS) based on a Progressive Web Application (PWA) for offline spatial data collection. It aims to solve the problem of field data collection in remote areas with limited internet signals. This study uses a case study of Robusta coffee disease and pest surveys conducted in Khlong Hoi Khong District, Songkhla Province. The system is developed with PWA technology, which uses IndexedDB for offline data storage and supports automatic data syncing when there is an Internet connection. This research also presents an innovative display of location accuracy in a percentage format to make it easier for users to understand. Field performance tests indicate that the system is 100% effective in tracking location and data recording even without Internet, and 95% of maps can be displayed (subject to pre-caching of maps). The system can reduce survey time by 43.4%, increase data accuracy by 7.8%, increase data completeness by 13.2%, and save battery power. In addition, the satisfaction ratings from 30 users average "Extreme" (4.47 out of 5). The developed system has the potential to be applied to other spatial data collection activities, such as natural resource surveys, agricultural area management, or disaster data collection in remote areas, especially in the context of digital infrastructure constraints

คำสำคัญ: ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เว็บแอปพลิเคชันแบบก้าวหน้า ระบบออฟไลน์ IndexedDB
Keywords: Geographic Information System, Progressive Web Application, Offline System, IndexedDB

บทนำ

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ มีบทบาทสำคัญในการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยเฉพาะในภาคเกษตรกรรมที่ต้องการการติดตามและเฝ้าระวังการระบาดของโรคพืชและแมลงศัตรูพืชอย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม การใช้งาน GIS ในพื้นที่ห่างไกลยังคงเผชิญกับข้อจำกัดสำคัญจากปัญหาสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่ไม่เสถียรหรือไม่มีสัญญาณ ส่งผลให้การเก็บข้อมูลภาคสนามมีอุปสรรคอย่างมาก (Vega *et al*., 2015) กาแฟโรบัสต้า (*Coffea canephora*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคใต้ของประเทศไทย โดยมีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 5,000 ไร่ และสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจประมาณ 200 ล้านบาทต่อปี (กรมวิชาการเกษตร, 2563) อย่างไรก็ตาม การผลิตกาแฟประสบปัญหาจากโรคและแมลงศัตรูพืชที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ โรคราสนิม (*Hemileia vastatrix*) โรคแอนแทรคโนส (*Colletotrichum gloeosporioides*) และมอดเจาะผลกาแฟ (*Hypothenemus hampei*) เป็นศัตรูพืชที่สำคัญ ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายให้กับผลผลิตกาแฟได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในพื้นที่เพาะปลูกกาแฟโรบัสต้าทางภาคใต้ของประเทศไทย (Aristizábal *et al*., 2023; กรมวิชาการเกษตร, 2565) อย่างไรก็ตาม แหล่งเพาะปลูกกาแฟส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่เนินเขาหรือพื้นที่ห่างไกล ซึ่งมีสัญญาณ

โทรศัพท์มือถือและอินเทอร์เน็ตไม่เสถียรหรือไม่มีสัญญาณเลย ปัญหานี้ไม่เพียงเกิดขึ้นในประเทศไทยเท่านั้น แต่เป็นอุปสรรคสำคัญของการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในภาคเกษตรของหลายประเทศทั่วโลก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kamilaris and Prenafeta-Boldú (2018) ที่ได้รวบรวมงานวิจัยจำนวนมากและสรุปว่า ข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานอินเทอร์เน็ตในพื้นที่ห่างไกลเป็นอุปสรรคหลักที่ขัดขวางการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการเกษตร

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะเทคโนโลยีที่สามารถแก้ไขปัญหาข้อจำกัดด้านการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต PWA เป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ผสมผสานจุดเด่นของเว็บไซต์และแอปพลิเคชันมือถือแบบดั้งเดิม (Native application) โดยสามารถทำงานได้แม้ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต มีประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกับ Native application และสามารถติดตั้งบนอุปกรณ์มือถือได้โดยไม่ต้องผ่าน App Store (MDN, 2023) เทคโนโลยี PWA ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วนที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ Service Worker ที่จัดการการแคชและทำงานในพื้นหลัง IndexedDB ที่เก็บข้อมูลในเครื่อง และ Geolocation API ที่ระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ได้แม้ไม่มีอินเทอร์เน็ต จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่า ชนินทร์ (2560) ได้ทำการศึกษาและติดตามศัตรูพืชที่ต้องอาศัยการเก็บข้อมูลพื้นที่อย่างต่อเนื่อง แต่ยังขาดเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ห่างไกลและมีข้อจำกัดด้านการสื่อสาร สำหรับ Sonti (2015) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ GIS ในการจัดการป่าไม้ และชี้ให้เห็นว่ามีข้อจำกัดในการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่มีปัญหาเรื่องการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ส่วน Singh *et al*. (2012) พัฒนาระบบ GIS บนเว็บโดยใช้ IndexedDB สำหรับจัดเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์และซิงโครไนซ์ข้อมูลเมื่อมีการเชื่อมต่อใหม่ ผลการทดสอบแสดงว่าระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ไม่มีอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ Vinueza-Martinez *et al*. (2024) วิเคราะห์แนวโน้มการวิจัยด้าน WebGIS และพบว่าทิศทางในอนาคตกำลังมุ่งสู่การใช้เทคโนโลยีคลาวด์ ปัญญาประดิษฐ์ และการทำงานแบบออฟไลน์เพื่อรองรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกล

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบ PWA ที่สามารถทำงานได้แม้ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตสำหรับการเก็บข้อมูลการระบาดของโรคและแมลงศัตรูกาแฟในพื้นที่อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา การพัฒนาระบบนี้สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ของสหประชาชาติหลายข้อ โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 2 ว่าด้วยการขจัดความหิวโหย บรรลุความมั่นคงทางอาหาร ปรับปรุงโภชนาการ และส่งเสริมเกษตรกรรมที่ยั่งยืน (United Nations, 2015) และเป้าหมายที่ 9 ว่าด้วยการสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่มีความยืดหยุ่น ส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมที่ครอบคลุมและยั่งยืน และส่งเสริมนวัตกรรม (United Nations, 2015) วัตถุประสงค์การวิจัยมีดังนี้ (1) เพื่อพัฒนาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบ Progressive Web Application ที่สามารถทำงานได้แบบออฟไลน์สำหรับการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ (2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบในด้านความสามารถทำงานแบบออฟไลน์ ความแม่นยำของข้อมูล และการใช้พลังงานแบตเตอรี่ในพื้นที่ห่างไกล การวิจัยนี้คาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบติดตามและเฝ้าระวังการระบาดของโรคและแมลงศัตรูกาแฟ ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรและเจ้าหน้าที่สามารถเก็บข้อมูลภาคสนามได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้อยู่ในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ในสาขาอื่น ๆ เช่น การสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ การสำรวจพื้นที่เกษตร หรือการเก็บข้อมูลภัยพิบัติในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การกำหนดและวิเคราะห์ความต้องการ

1.1 สัมภาษณ์นักวิจัยและเจ้าหน้าที่ภาคสนามที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟในพื้นที่อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา จำนวน 10 คน เพื่อวิเคราะห์ความต้องการของระบบ ปัญหาและอุปสรรคในการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยวิธีการเดิม รวมถึงฟังก์ชันการทำงานที่จำเป็นสำหรับระบบใหม่ โดยใช้วิธีเลือกแบบเจาะจง (purposive sampling) ตามแนวคิด Etikan *et al*. (2016)

1.2 สำรวจพื้นที่การปลูกกาแฟในอำเภอคลองหอยโข่ง ซึ่งมีพื้นที่ปลูกกาแฟ 930 ไร่ และเป็นพื้นที่โครงการพัฒนาชุมชนกาแฟของมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา การเลือกพื้นที่นี้มีเหตุผลสามประการ ได้แก่ (1) มีลักษณะภูมิประเทศหลากหลาย ทั้งพื้นที่ราบและเนินเขา เหมาะกับการทดสอบประสิทธิภาพระบบในสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างกัน (2) มีข้อจำกัดด้านสัญญาณอินเทอร์เน็ตในหลายจุด ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดสอบระบบออฟไลน์ และ (3) มหาวิทยาลัยมีโครงการในพื้นที่ ทำให้สามารถเข้าถึงเกษตรกรและประสานงานได้สะดวก เพื่อวิเคราะห์สภาพภูมิประเทศ ความเข้มของสัญญาณอินเทอร์เน็ตและข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

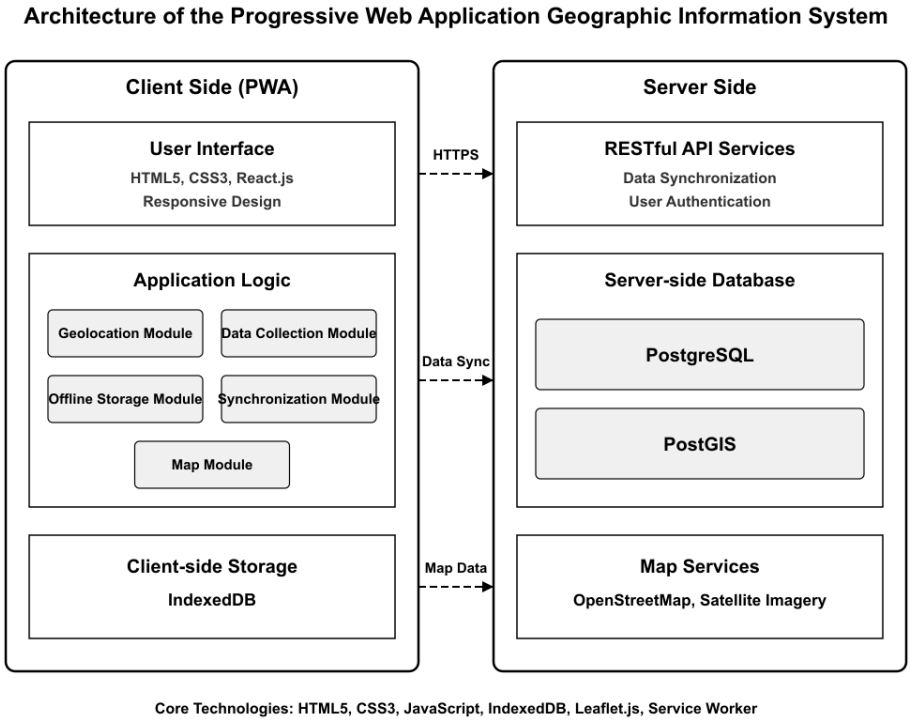
1.3 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับโรคและแมลงศัตรูกาแฟที่พบในพื้นที่ รวมถึงวิธีการสำรวจและการบันทึกข้อมูล

1.4 วิเคราะห์ความต้องการของระบบ จากข้อมูลที่ได้จากข้อ 1.1 - 1.3 รวมถึงการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการศึกษาจากตำรา นำมาวิเคราะห์เนื้อหาโดยจัดหมวดหมู่ความต้องการตามหน้าที่การใช้งาน และจัดลำดับความสำคัญโดยแบ่งเป็น Must have (ความต้องการที่จำเป็น ต้องมีในระบบ) และ Should have (ความต้องการที่ควรมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ) โดยพิจารณาจากความสำคัญต่อการทำงานหลักของระบบและความถี่ที่ถูกกล่าวถึงในการสัมภาษณ์ จัดทำเป็นเอกสารข้อกำหนดความต้องการของระบบ (System Requirements Specification) และนำเสนอกลับไปยังผู้ให้สัมภาษณ์เพื่อยืนยันความถูกต้องและความครบถ้วน สรุปได้ดังนี้ 1) ระบบต้องสามารถทำงานได้ในสภาวะออฟไลน์ (Must have) 2) ระบบต้องสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ (Must have) 3) ระบบต้องประหยัดพลังงานแบตเตอรี่ (Should have) 4) ระบบต้องสามารถบันทึกข้อมูลโรคและแมลงศัตรูกาแฟได้อย่างครบถ้วน ทั้งชนิด ความรุนแรง และพิกัดตำแหน่ง (Must have) 5) ระบบต้องสามารถซิงค์ข้อมูลกับเซิร์ฟเวอร์เมื่อมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Must have) และ 6) ระบบต้องมีส่วนติดต่อผู้ใช้ที่เรียบง่ายและใช้งานได้สะดวกบนอุปกรณ์มือถือ (Should have)

2. การออกแบบและพัฒนาระบบ

2.1 หลักการพัฒนาระบบ การพัฒนาระบบใช้หลักการ Progressive Enhancement โดยเริ่มจากฟังก์ชันพื้นฐานที่ทำงานได้บนทุกเบราว์เซอร์ แล้วเพิ่มความสามารถขั้นสูงสำหรับเบราว์เซอร์ที่รองรับ (Gustafson, 2008) ใช้แนวทาง Agile Development แบบ Iterative เพื่อให้สามารถปรับปรุงระบบได้อย่างต่อเนื่องตามผลการทดสอบ (Sommerville, 2015) และใช้หลักการ Offline-First Design โดยออกแบบให้ระบบทำงานแบบออฟไลน์เป็นหลัก แล้วซิงโครไนซ์ข้อมูลเมื่อมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ตามแนวคิดของ Biørn-Hansen *et al.* (2017)

2.2 สถาปัตยกรรมระบบ ระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นมีสถาปัตยกรรมแบบ Client-Server โดยส่วนของ Client เป็น PWA ที่สามารถทำงานได้ทั้งบนเว็บเบราว์เซอร์และอุปกรณ์มือถือ ส่วน Server ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและให้บริการผ่าน RESTful API สถาปัตยกรรมของระบบแสดงดังรูปที่ 1

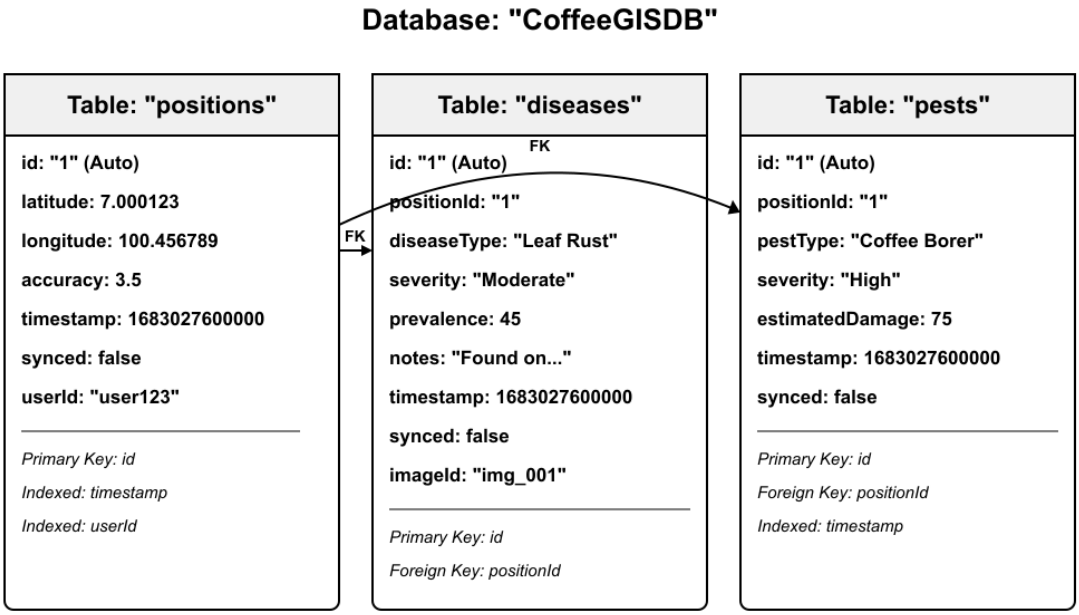


รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมระบบ GIS PWA สำหรับการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่แบบออฟไลน์ แสดงโครงสร้างที่ประกอบด้วย Client Side (ส่วนของผู้ใช้) Server Side (ส่วนของเซิร์ฟเวอร์) และเทคโนโลยีหลักที่ใช้

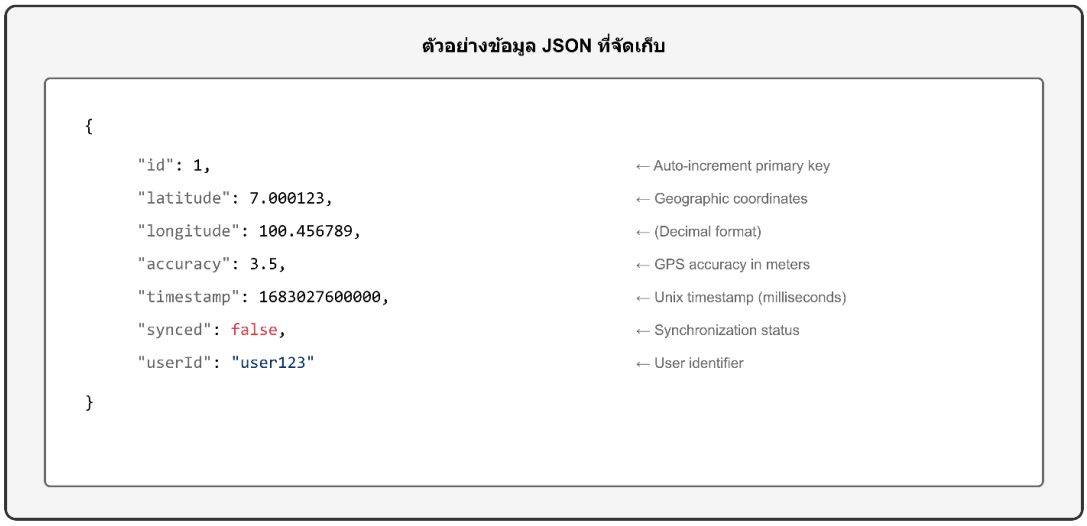
2.3 การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ การพัฒนามีขั้นตอนดังนี้ 1) ออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูล IndexedDB สำหรับจัดเก็บข้อมูลโรคและแมลงศัตรูกาแฟ ประกอบด้วยตารางหลักสามตาราง ได้แก่ (1) Positions สำหรับจัดเก็บข้อมูลตำแหน่ง (2) Diseases สำหรับจัดเก็บข้อมูลโรคกาแฟ และ (3) Pests สำหรับจัดเก็บข้อมูลแมลงศัตรูกาแฟ 2) พัฒนาชั้นการเข้าถึงข้อมูล (Data Access Layer) สำหรับจัดการการเข้าถึงข้อมูลใน IndexedDB 3) พัฒนาระบบการประสานข้อมูล (Synchronization) ระหว่าง IndexedDB กับฐานข้อมูลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Server-side Database) 4) พัฒนาระบบการสำรองข้อมูลและกู้คืนข้อมูล เพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูล 5) กลไกการแสดงแผนที่ในโหมดออฟไลน์ การพัฒนาระบบในครั้งนี้ใช้ Leaflet.js แสดงแผนที่จาก OpenStreetMap โดยอาศัยกลไก Browser HTTP Cache ของเบราว์เซอร์ เมื่อผู้ใช้เปิดแอปพลิเคชันและเลื่อนดูแผนที่ขณะมีอินเทอร์เน็ต เบราว์เซอร์จะแคช map tiles ไว้อัตโนมัติตาม HTTP Cache-Control headers จาก OpenStreetMap server (โดยทั่วไปแคชไว้ 7 - 14 วัน) เมื่อปิดอินเทอร์เน็ต หาก map tiles ของพื้นที่นั้นถูกแคชไว้แล้ว ระบบจะดึงมาแสดงจาก cache โดยไม่ต้องเชื่อมต่อ server

สำหรับแนวทางในการใช้งาน ก่อนออกสำรวจภาคสนาม ผู้ใช้ควรเปิดแอปพลิเคชันขณะมีอินเทอร์เน็ต เลื่อนดูแผนที่ครอบคลุมพื้นที่ที่จะสำรวจทั้งหมด และซูมเข้า-ออกในหลายระดับเพื่อให้เบราว์เซอร์แคช tiles ในทุกระดับซูม จากการทดสอบพบว่าหากดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้น แผนที่จะแสดงได้ 95% ส่วน 5% ที่ไม่แสดงเป็นพื้นที่ขอบเขตที่ไม่ได้เลื่อนดู ดังนั้นการที่ไม่แสดงแผนที่จึงไม่มีผลกระทบกับการทำงานหลัก เนื่องจาก Geolocation API ทำงานผ่าน GPS hardware โดยตรง ระบบยังระบุพิกัดและบันทึกข้อมูลได้ครบถ้วน 100% โดยข้อมูล latitude longitude accuracy ยังแสดงผลเป็นตัวเลขและเปอร์เซ็นต์ สำหรับการพัฒนาในอนาคต อาจใช้ Service Worker caching หรือ Leaflet.offline plugin เพื่อให้ผู้ใช้ดาวน์โหลดแผนที่ล่วงหน้าได้

โครงสร้างข้อมูลใน IndexedDB แสดงตารางข้อมูลและความสัมพันธ์ระหว่างตาราง positions (เก็บข้อมูลตำแหน่ง) diseases (เก็บข้อมูลโรคพืช) และ pests (เก็บข้อมูลศัตรูพืช) ดังแสดงในรูปที่ 2 และการเก็บข้อมูลใน IndexedDB ที่ใช้โครงสร้างแบบ NoSQL ดังรูปที่ 3

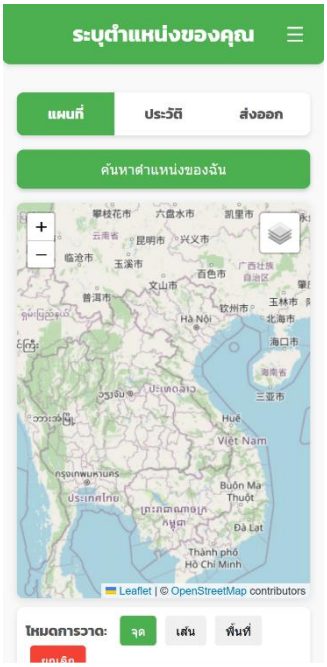


รูปที่ 2 โครงสร้างข้อมูลใน IndexedDB ที่ประกอบด้วยตาราง positions (เก็บข้อมูลตำแหน่ง) diseases (เก็บข้อมูลโรคพืช) และ pests (เก็บข้อมูลศัตรูพืช) ที่มีความสัมพันธ์กันผ่าน foreign key ทำให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

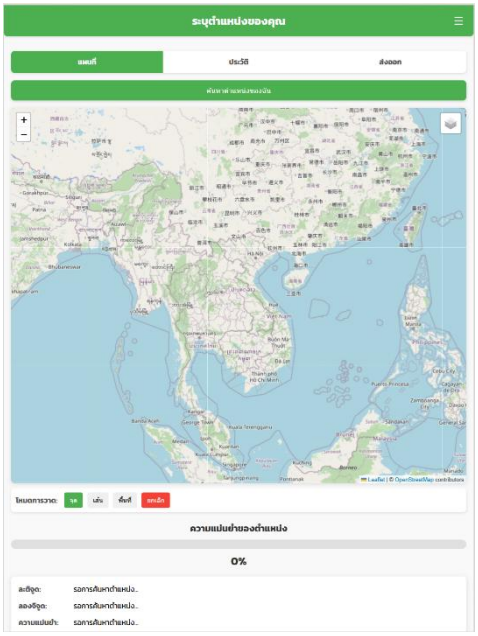


รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลใน IndexedDB แบบ NoSQL พร้อมการจัดเก็บได้หลายรูปแบบข้อมูล ซึ่งช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นและสามารถรองรับโครงสร้างข้อมูลที่ซับซ้อนได้

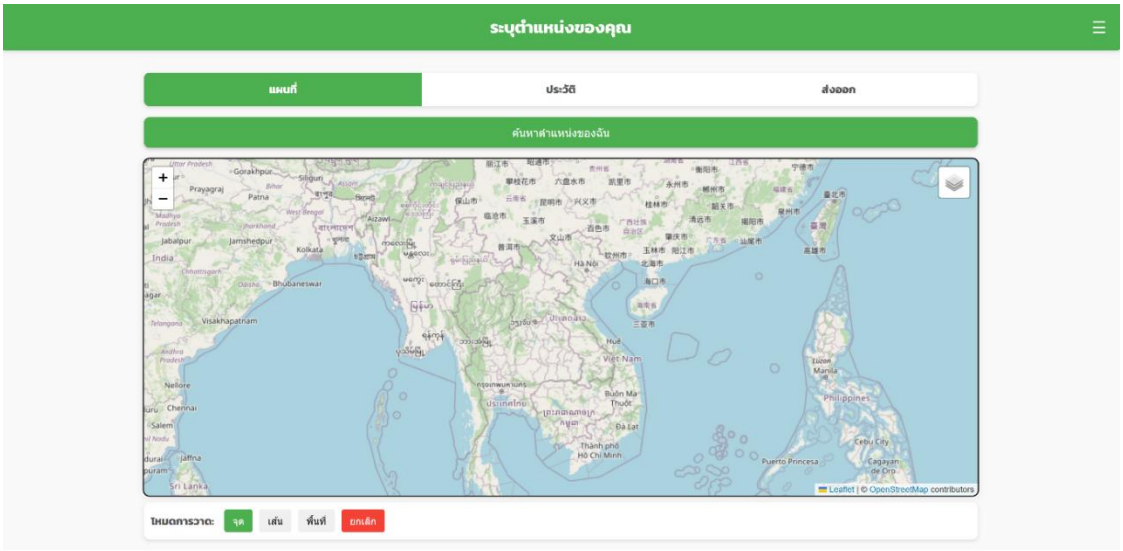
2.4 การพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้ มีขั้นตอนการพัฒนาดังนี้ 1) ออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้แบบ Responsive ด้วย HTML5 และ CSS3 เพื่อให้สามารถใช้งานได้บนทุกขนาดหน้าจอ 2) พัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้ด้วย React.js เพื่อให้มีความยืดหยุ่นและตอบสนองต่อการใช้งานได้รวดเร็ว 3) พัฒนาส่วนแสดงแผนที่ด้วย Leaflet.js ซึ่งเป็นไลบรารีแผนที่ที่มีประสิทธิภาพและรองรับการทำงานแบบออฟไลน์ และ 4) พัฒนาส่วนการบันทึกข้อมูลโรคและแมลงศัตรูกาแฟโดยใช้ฟอร์มที่ออกแบบให้ใช้งานง่ายและรวดเร็ว ระบบได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้บนอุปกรณ์หลากหลายประเภท ซึ่งแสดงการใช้งานบนโทรศัพท์มือถือ (รูปที่ 4) แท็บเล็ต (รูปที่ 5) และโน๊ตบุ๊ค (รูปที่ 6)



รูปที่ 4 การแสดงผลระบบบนอุปกรณ์มือถือ: แสดงการออกแบบที่ตอบสนอง (Responsive) สำหรับหน้าจอเล็ก



รูปที่ 5 การแสดงผลระบบบนแท็บเล็ต: แสดงการจัดวางเนื้อหาที่เหมาะสมกับหน้าจอขนาดกลาง



รูปที่ 6 การแสดงผลระบบบนโน๊ตบุ๊ค แสดงการใช้งานแบบเต็มจอพร้อมการแสดงแผนที่อย่างละเอียด

จากรูปที่ 4 - 6 จะเห็นได้ว่าส่วนติดต่อผู้ใช้งานได้รับการออกแบบให้ปรับตัวตามขนาดหน้าจอ โดยยังคงฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญไว้ครบถ้วน ไม่ว่าจะเป็นการแสดงแผนที่ การบันทึก และการแสดงสถานการณ์ทำงาน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้อย่างสะดวกไม่ว่าจะใช้อุปกรณ์ใดในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

2.4.1 หลักการออกแบบ UI/UX สำหรับงานภาคสนาม เป็นการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) สำหรับระบบนี้คำนึงถึงสภาพแวดล้อมการใช้งานในภาคสนาม ซึ่งมีข้อจำกัดด้านแสงสว่าง ความสะดวกในการสัมผัสหน้าจอ และความจำเป็นต้องใช้งานได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการออกแบบดังนี้ (1) ปุ่มควบคุมมีขนาดใหญ่ไม่น้อยกว่า 48 x 48 พิกเซล ตามมาตรฐาน Material Design ของ Google เพื่อให้สัมผัสได้ง่ายแม้สวมถุงมือหรือใช้งานขณะเดิน (2) ใช้สีสันที่มีความเปรียบต่างสูง (High Contrast) เพื่อมองเห็นได้ชัดเจนภายใต้แสงแดดจ้า โดยเลือกใช้โทนสีน้ำเงิน (#2196F3) สำหรับปุ่มหลัก สีเขียว (#4CAF50) สำหรับการยืนยัน และสีแดง (#F44336) สำหรับการยกเลิก (3) ข้อมูลสำคัญแสดงด้วยตัวอักษรขนาดใหญ่ไม่น้อยกว่า 16 พิกเซล และใช้ฟอนต์ที่อ่านง่าย (Roboto, Sarabun) (4) จัดวางเมนูหลักไว้ที่ด้านล่างของหน้าจอ (Bottom Navigation) เพื่อให้เข้าถึงได้ง่ายด้วยนิ้วหัวแม่มือเมื่อถือมือถือด้วยมือเดียว

2.5 กลไกการระบุตำแหน่งแบบออฟไลน์ ระบบใช้ Geolocation API ของ W3C (W3C, 2022a) ในการระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์โดยเชื่อมต่อกับ GPS hardware ของอุปกรณ์โดยตรง ซึ่งสามารถทำงานได้แม้ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต โดยใช้เมธอด navigator.geolocation.watchPosition() ในการติดตามตำแหน่งแบบต่อเนื่อง การทำงานของระบบมีขั้นตอนดังนี้ เมื่อเว็บแอปพลิเคชันเรียกใช้ watchPosition() เบราว์เซอร์จะขออนุญาตเข้าถึงตำแหน่งจากผู้ใช้และเชื่อมต่อกับ GPS chip โดยตรง GPS chip รับสัญญาณจากดาวเทียม GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) โดยไม่พึ่งอินเทอร์เน็ต จากนั้น GPS chip คำนวณตำแหน่ง (latitude longitude) และความแม่นยำ (accuracy) ตามหลักการ Trilateration แล้วเบราว์เซอร์รับข้อมูลจาก GPS chip และส่งกลับมายัง callback function ในรูปแบบ Position object ทีมวิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพในพื้นที่เปิดโล่งด้วยการปิดการเชื่อมต่อข้อมูลมือถือและ Wi-Fi (โหมดเครื่องบิน) บนอุปกรณ์ Android และเปิดเฉพาะ GPS ผลการทดสอบโดยการบันทึกพิกัด 30 จุด พบว่าระบบสามารถระบุพิกัดได้อย่างต่อเนื่องในโหมดออฟไลน์ โดยมีความแม่นยำอยู่ในช่วง 3 - 8 เมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับงานสำรวจภาคเกษตร

2.5.1 ข้อจำกัดของแพลตฟอร์ม iOS มีข้อจำกัดในการทำงานของ Service Worker และ Geolocation API เมื่ออยู่ในโหมดพื้นหลัง นอกจากนี้เมื่อปิดอินเทอร์เน็ต (โหมดเครื่องบิน) หลังเปิดแอปพลิเคชันไปแล้ว ระบบจะไม่แสดงหน้าจอ UI เนื่องจาก Safari/WebKit บน iOS มีนโยบายเข้มงวดกับ Service Worker และ Cache API มากกว่า Android (Apple Developer, 2023; WebKit, 2018) ด้วยเหตุนี้ การทดสอบภาคสนามจึงใช้อุปกรณ์ Android เป็นหลัก (Samsung Galaxy A series ที่รัน Chrome browser เวอร์ชัน 120 ขึ้นไป) ซึ่งระบบทำงานได้สมบูรณ์ 100% ในโหมดออฟไลน์

2.5.2 แนวทางแก้ไขสำหรับ iOS ในอนาคต อาจพิจารณาพัฒนาเป็น native iOS app ด้วย Swift/SwiftUI หรือใช้ hybrid framework เช่น Capacitor หรือ Cordova ที่รองรับการทำงานแบบออฟไลน์ได้ดีกว่า PWA

2.6 การพัฒนาระบบแสดงความแม่นยำของตำแหน่ง ระบบที่พัฒนาขึ้นมีนวัตกรรมในการแสดงความแม่นยำของตำแหน่งในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้เข้าใจได้ง่ายกว่าการแสดงในหน่วยเมตรแบบดั้งเดิม โดยประยุกต์แนวคิดการแปลความแม่นยำเชิงระยะทางเป็นค่าเชิงคุณภาพตามหลักการของ Zandbergen (2009) และ Merry and Bettinger (2019) ทำให้ระบบมีการคำนวณค่าความแม่นยำเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการ:

$$\text{Accuracy_percentage} = \begin{cases} 100 & \text{if accuracyMeters} \le 10 \\ 0 & \text{if accuracyMeters} \ge 100 \\ 100 - ((\text{accuracyMeters} - 10) / 90 \times 100) & \text{for } 10 < \text{accuracyMeters} < 100 \end{cases}$$

เมื่อ accuracyMeters คือค่าความแม่นยำในหน่วยเมตรที่ได้จาก Geolocation API โดยกำหนดให้ความแม่นยำที่ 10 เมตรหรือน้อยกว่ามีค่าเท่ากับ 100% ความแม่นยำที่ 100 เมตรหรือมากกว่ามีค่าเท่ากับ 0% และค่าระหว่างกลางถูกคำนวณตามสัดส่วนแบบเชิงเส้น เช่น ความแม่นยำ 55 เมตร จะเทียบเท่ากับ 50% เป็นต้น นอกจากนี้ ระบบยังมีการแสดงผลความแม่นยำด้วยแถบสีไล่ระดับและวงกลมบนแผนที่ที่เปลี่ยนสีตามระดับความแม่นยำ ทำให้ผู้ใช้สามารถประเมินความน่าเชื่อถือของตำแหน่งได้อย่างรวดเร็วและเห็นได้ชัดเจน

3. การทดสอบระบบ

3.1 การทดสอบฟังก์ชันการทำงาน (functional testing) ใช้วิธีการทดสอบแบบ Black Box Testing (Nie, 2015) โดยทดสอบฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ของระบบ ดังนี้ 1) การติดตามตำแหน่ง ทดสอบการเริ่มและหยุดการติดตามตำแหน่ง การแสดงความแม่นยำของตำแหน่ง 2) การบันทึกข้อมูลโรคและแมลงศัตรูกาแฟ ทดสอบการบันทึกข้อมูลโรคกาแฟ การบันทึกข้อมูลแมลงศัตรูกาแฟ 3) การแสดงผลข้อมูล ทดสอบการแสดงตำแหน่งบนแผนที่ การแสดงข้อมูลโรคและแมลงศัตรูกาแฟ 4) การจัดการข้อมูล ทดสอบการแก้ไขข้อมูล การลบข้อมูล การล้างข้อมูลทั้งหมด และ 5) การซิงค์ข้อมูล ทดสอบการซิงค์ข้อมูลเมื่อมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต การจัดการความขัดแย้งของข้อมูล

3.2 การทดสอบความใช้งานได้ (usability testing) ก่อนนำระบบไปใช้งานจริง ได้มีการทดสอบการใช้งาน (usability testing) กับเจ้าหน้าที่ภาคสนาม 5 ท่าน โดยให้ทำภารกิจ 3 ภารกิจหลัก ได้แก่ (1) บันทึกตำแหน่งแปลงกาแฟใหม่ (2) ดูข้อมูลแปลงที่บันทึกไว้ (3) ซิงค์ข้อมูลเมื่อกลับมามีอินเทอร์เน็ต สำหรับผลการทดสอบพบว่าผู้ใช้ทุกคนสามารถทำภารกิจทั้ง 3 ข้อสำเร็จได้ภายในเวลาเฉลี่ย 2.5 นาที โดยไม่ต้องอ่านคู่มือการใช้งาน และมีข้อเสนอแนะให้ปรับปรุง 2 ประเด็น คือ (1) เพิ่มไอคอนประกอบข้อความในเมนูเพื่อเพิ่มความเข้าใจ และ (2) แสดงสถานะการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตให้ชัดเจนขึ้น ซึ่งได้นำไปปรับปรุงในเวอร์ชันสุดท้ายที่นำไปทดสอบภาคสนาม

3.3 การทดสอบความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์ ดำเนินการโดยทดสอบการทำงานของระบบในพื้นที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ตเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทดสอบการซิงค์ข้อมูลเมื่อกลับมาเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต รายการทดสอบประกอบด้วย 1) การติดตามตำแหน่งในสภาวะออฟไลน์ 2) การบันทึกข้อมูลในสภาวะออฟไลน์ 3) การแสดงแผนที่ในสภาวะออฟไลน์ (4) การซิงค์ข้อมูลเมื่อกลับมาเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และ 5) ความเสถียรของระบบในการทำงานต่อเนื่อง

3.4 การทดสอบการใช้งานจริง (field testing) ดำเนินการในพื้นที่ปลูกกาแฟโรบัสต้าในอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ซึ่งมีพื้นที่ปลูก 930 ไร่ และมีสภาพภูมิประเทศหลากหลายระหว่างพื้นที่ราบและเนินเขา พื้นที่นี้มีข้อจำกัดด้านสัญญาณอินเทอร์เน็ตในหลายจุด จึงเหมาะสมกับการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ของระบบ โดยนักวิจัยและเจ้าหน้าที่ภาคสนามจำนวน 10 คน มีรายละเอียดดังนี้ 1) กำหนดพื้นที่ทดสอบเป็นแปลงปลูกกาแฟขนาด 10 ไร่ 2) แบ่งผู้ทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 5 คน โดยกลุ่มที่ 1 ใช้ระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้น กลุ่มที่ 2 ใช้วิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม (กระดาษและเครื่อง GPS แยกกัน) นอกจากนี้ยังมีเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟในพื้นที่โครงการจำนวน 10 คน ที่ได้รับการอบรมการใช้งานระบบและทดลองใช้ระบบในการเก็บข้อมูลโรคและแมลงศัตรูในแปลงกาแฟของตนเอง 3) ทำการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟในพื้นที่ทดสอบเป็นเวลา 3 วัน และ 4) เก็บข้อมูลเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการสำรวจ ความแม่นยำของข้อมูล ความครบถ้วนของข้อมูล การใช้พลังงานแบตเตอรี่ และปัญหาที่พบในการใช้งาน ผลการทดสอบระบบในภาคสนามแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้สามารถบันทึกข้อมูลได้สำเร็จในสภาวะออฟไลน์ (รูปที่ 7 - 8)

รูปที่ 7 การทดสอบการบันทึกข้อมูลในสภาวะออฟไลน์: แสดงการทำงานของผู้ทดสอบในพื้นที่ภาคสนามโดยไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต

รูปที่ 8 การทดสอบการแสดงผลข้อมูลในสภาวะออฟไลน์: แสดงการตรวจสอบข้อมูลบนหน้าจอระบบ

4. การประเมินผล

4.1 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ ใช้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยใช้สมการในการวัดประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้:

1) ความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์ > วัดจากประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ตามแนวคิดของ Biørn-Hansen *et al*. (2017) ดังสมการ:

Offline_efficiency = (Successful_offline_operations / Total_operations) × 100%

เมื่อ Successful_offline_operations คือจำนวนปฏิบัติการที่สำเร็จในสภาวะออฟไลน์ และ Total_operations คือ จำนวนปฏิบัติการทั้งหมดที่ทดสอบในสภาวะออฟไลน์

2) ประสิทธิภาพเชิงเวลา > วัดจากการประหยัดเวลาเมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ตามแนวทางการประเมินของ Wang *et al*. (2019) ดังสมการ:

Time_efficiency = ((T_traditional - T_PWA) / T_traditional) × 100%

เมื่อ T_traditional คือเวลาที่ใช้ในการสำรวจด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (32.7 นาที/ไร่) และ T_PWA คือเวลาที่ใช้ในการสำรวจด้วยระบบ PWA (18.5 นาที/ไร่)

3) ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน > วัดจากการประหยัดพลังงานแบตเตอรี่เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ตามวิธีการประเมินของ Feehan *et al*. (2014) ดังสมการ:

Energy_saving = ((E_traditional - E_PWA) / E_traditional) × 100%

เมื่อ E_traditional คือการใช้พลังงานแบตเตอรี่รวมของวิธีการแบบดั้งเดิม (84.2% ต่อวัน) และ E_PWA คือการใช้พลังงานแบตเตอรี่ของระบบ PWA (42.3% ต่อวัน)

4.2 การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ดำเนินการโดยใช้แบบประเมินความพึงพอใจแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert, 1961) โดยกำหนดเกณฑ์การแปลผลค่าเฉลี่ย ดังนี้ 4.51 - 5.00 = ระดับมากที่สุด 3.51 - 4.50 = ระดับมาก 2.51 - 3.50 = ระดับปานกลาง 1.51 - 2.50 = ระดับน้อย และ 1.00 - 1.50 = ระดับน้อยที่สุด (Best and Kahn, 2006) โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติตามหลักการของ Boone and Boone (2012) โดยมีการคำนวณค่าเฉลี่ยความพึงพอใจ (Mean Satisfaction Score) ดังสมการ:

$$MSS = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i$$

คำอธิบายสัญลักษณ์:

MSS คือ ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจ (Mean Satisfaction Score)

R_i คือ คะแนนความพึงพอใจของผู้ใช้คนที่ i ซึ่งมีค่าคะแนนระหว่าง 1 ถึง 5

n คือ จำนวนผู้ใช้งานในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งเท่ากับ 30 คน

$\sum_{i=1}^{n}$ คือ เครื่องหมายรวมผลคะแนนตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึง n

และคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ตามหลักสถิติ (Cox, 2006) ดังสมการ:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(R_i - MSS)^2}$$

คำอธิบายสัญลักษณ์:

s คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง (Standard Deviation)

$n-1$ คือ ระดับความเสรี (Degrees of Freedom) โดยกำหนดให้ $n=30$ ดังนั้น $n-1=29$

เพื่อวัดการกระจายตัวของคะแนนความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน ซึ่งค่า s ที่ต่ำแสดงถึงความสอดคล้องของความคิดเห็นจากผู้ใช้งาน โดยแบบประเมินแบ่งเป็น 5 ด้าน ได้แก่ ความง่ายในการใช้งาน ความเสถียรของระบบ ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ และประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการพัฒนาระบบ GIS แบบ PWA ระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถทำงานได้ทั้งบนเว็บเบราว์เซอร์และอุปกรณ์มือถือ โดยมีคุณสมบัติสำคัญคือสามารถทำงานได้ในสภาวะออฟไลน์ ระบบประกอบด้วยส่วนหลักสี่ส่วน ได้แก่

1.1 ส่วนติดตามตำแหน่ง (Location Tracking) ใช้เทคนิค watchPosition ของ Geolocation API ในการติดตามตำแหน่งแบบต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานแบตเตอรี่ สามารถแสดงความแม่นยำของตำแหน่งเป็นเปอร์เซ็นต์และบันทึกเส้นทางการเดินสำรวจได้

1.2 ส่วนบันทึกข้อมูล (Data Collection) ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลโรคและแมลงศัตรูกาแฟ สามารถบันทึกข้อมูลได้ทั้งชนิด ความรุนแรง ลักษณะอาการ รูปภาพและพิกัดตำแหน่ง นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกข้อมูลเพิ่มเติม เช่น สภาพแวดล้อม การจัดการแปลง และข้อมูลเกษตรกร

1.3 ส่วนแสดงข้อมูล (Data Visualization) ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่บันทึกไว้ในรูปแบบแผนที่และตาราง สามารถแสดงตำแหน่งของโรคและแมลงศัตรูกาแฟ เส้นทางการสำรวจ และข้อมูลสถิติได้ นอกจากนี้ยังสามารถกรองและค้นหาข้อมูลตามเงื่อนไขต่าง ๆ ได้

1.4 ส่วนจัดการข้อมูล (Data Management) ใช้สำหรับจัดการข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ การแก้ไขข้อมูล การลบข้อมูล การนำเข้าและส่งออกข้อมูล

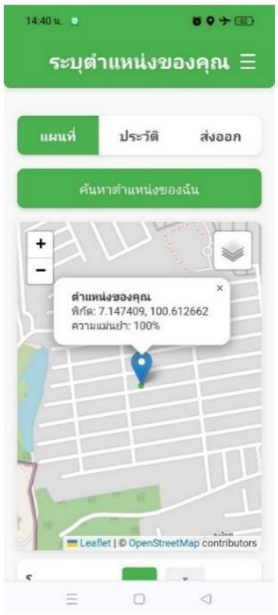
2. ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ
การติดตามตำแหน่งในสภาวะ Offline	ทำงานได้ 100%
การบันทึกข้อมูลในสภาวะ Offline	ทำงานได้ 100%
การแสดงแผนที่ในสภาวะ Offline	ทำงานได้ 95% (ในบางพื้นที่ที่ไม่ได้แคชแผนที่ไว้จะไม่สามารถแสดงแผนที่ได้)
การซิงค์ข้อมูลเมื่อกลับมาเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต	ทำงานได้ 100%
ความเสถียรของระบบในการทำงานต่อเนื่อง	ไม่พบปัญหาการทำงานผิดพลาดหรือการหยุดทำงานของระบบ

จากตารางที่ 1 พบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะออฟไลน์ โดยสามารถติดตามตำแหน่ง บันทึกข้อมูล และซิงค์ข้อมูลได้อย่างถูกต้องครบถ้วน ซึ่งสามารถเห็นรายละเอียดผลการทดสอบความแม่นยำของตำแหน่งในรูปที่ 9 และการทดสอบการแสดงข้อมูลในรูปที่ 10 ที่แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถระบุพิกัดได้ชัดเจนแม้ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ตเพียงการแสดงแผนที่ในบางพื้นที่ที่ไม่ได้แคชไว้ล่วงหน้า

รูปที่ 9 แสดงความแม่นยำของตำแหน่งในสภาวะออฟไลน์: ระบบสามารถระบุค่าพิกัด (ละติจูด ลองติจูด) ความแม่นยำ 3.8 เมตร ซึ่งตามสมการที่กำหนดไว้แปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 100% และทำเครื่องหมายตำแหน่งบนแผนที่ได้ชัดเจน



รูปที่ 10 แสดงข้อมูลการเคลื่อนไหวของผู้ใช้ในสภาวะออฟไลน์: ระบบติดตาม route การเดินทาง บันทึกจุดต่าง ๆ ที่เก็บข้อมูล และแสดงความครบถ้วนของข้อมูล (100%) พร้อมข้อมูลพิกัดที่แม่นยำ

3. ผลการทดสอบการใช้งานจริง

ผลการทดสอบการใช้งานจริงในพื้นที่ปลูกกาแฟโรบัสต้าในอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา เปรียบเทียบระหว่างการใช้ระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นกับการใช้วิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม (กระดาษและเครื่อง GPS แยกกัน) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างระบบ GIS แบบ PWA กับวิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม

รายการเปรียบเทียบ	ระบบ GIS แบบ PWA	วิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม	*t*-value	*p*-value
เวลาที่ใช้ในการสำรวจ (นาที/ไร่)	18.5 ± 3.2	32.7 ± 4.5	6.842	<0.001*
ความแม่นยำของข้อมูล (%)	92.3 ± 2.1	85.6 ± 2.8	5.237	<0.001*
ความครบถ้วนของข้อมูล (%)	98.7 ± 0.8	87.2 ± 3.5	8.971	<0.001*
ความสะดวกในการใช้งาน (คะแนนเฉลี่ยจาก 5)	4.5 ± 0.4	3.2 ± 0.6	5.119	<0.001*
การใช้พลังงานแบตเตอรี่ (% ต่อวัน)	42.3 ± 5.2	84.2 ± 7.3†	13.254	<0.001*

หมายเหตุ: ค่าแสดงในรูปแบบ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

† ผลรวมของการใช้พลังงานแบตเตอรี่ของ GPS (65.8%) และกล้องถ่ายรูป (18.4%)

* มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.001$ โดยใช้การทดสอบค่าที่ (Independent t-test)

การทดสอบ Independent t-test ได้ตรวจสอบข้อสมมุติ ดังนี้ (1) ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ทดสอบด้วย Shapiro-Wilk test ($p > 0.05$) ทั้งสองกลุ่ม (2) ความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่มเท่ากัน ทดสอบด้วย Levene's test ($p > 0.05$) (3) ข้อมูลเป็นอิสระต่อกันโดยแต่ละกลุ่มทดสอบคนละชุดข้อมูล ผู้วิจัยตระหนักดีว่าขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีเพียง 5 คน ซึ่งน้อยกว่าที่แนะนำในทางสถิติ ($n \geq 30$) เนื่องจากข้อจำกัด ด้านบุคลากรที่มีความชำนาญเฉพาะทางในการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนในทุกตัวชี้วัด ($p < 0.001$) ซึ่งสะท้อนประสิทธิภาพที่โดดเด่นของระบบ PWA เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม จากตาราง 2 พบว่า การใช้ระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้วิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมในทุกด้านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) โดยสามารถลดเวลาที่ใช้ในการสำรวจได้ 43.4% เพิ่มความแม่นยำของข้อมูลได้ 7.8% เพิ่มความครบถ้วนของข้อมูลได้ 13.2% และมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่า นอกจากนี้ยังประหยัดพลังงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เครื่อง GPS และกล้องถ่ายรูปแยกกัน

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 สามารถคำนวณประสิทธิภาพของระบบ GIS แบบ PWA เมื่อเทียบกับวิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมได้ดังนี้:

ประสิทธิภาพเชิงเวลา:

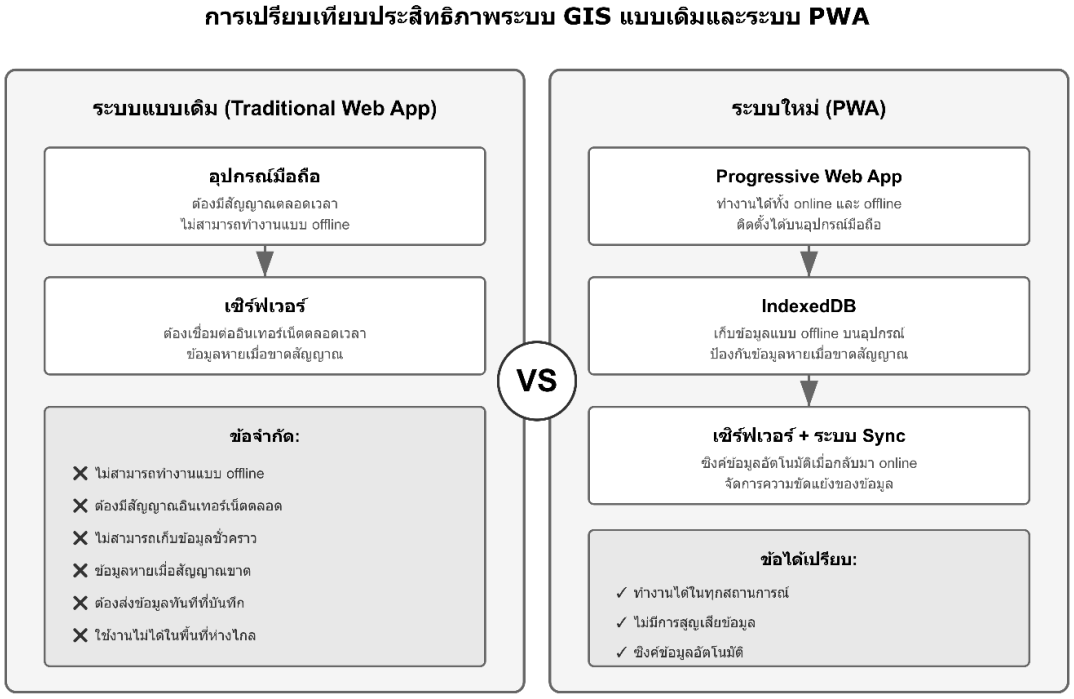
$$\text{Time_efficiency} = ((32.7 - 18.5) / 32.7) \times 100\% = 43.4\%$$

ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน:

$$\text{Energy_saving} = ((84.2 - 42.3) / 84.2) \times 100\% = 49.8\%$$

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นสามารถประหยัดเวลาได้ 43.4% และประหยัดพลังงานแบตเตอรี่ได้ 49.8% เมื่อเทียบกับวิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญเมื่อต้องทำงานในพื้นที่ห่างไกลที่มีข้อจำกัดด้านการชาร์จแบตเตอรี่

สำหรับรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบ GIS แบบเดิมและระบบ PWA โดยเน้นความแตกต่างด้านความสามารถในการทำงานออฟไลน์ การจัดเก็บข้อมูล และการซิงค์ข้อมูลอัตโนมัติ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบ GIS แบบเดิมและระบบ PWA: แสดงความแตกต่างด้านความสามารถในการทำงานออฟไลน์

4. ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จำนวน 30 คน (นักวิจัย 10 คน เจ้าหน้าที่ภาคสนาม 10 คน และเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟ 10 คน) ที่ใช้งานระบบในพื้นที่โครงการ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

รายการประเมินค่าเฉลี่ย	(MSS)	(s)	ระดับความพึงพอใจ
1. ความง่ายในการใช้งาน	4.52	0.51	มากที่สุด
2. ความเสถียรของระบบ	4.35	0.58	มาก
3. ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง	4.41	0.62	มาก
4. ประสิทธิภาพการทำงานแบบ Offline	4.38	0.56	มาก
5. ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งาน	4.67	0.48	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	**4.47**	**0.55**	**มาก**

จากตารางที่ 3 พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยรวม 4.47 ± 0.55 เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า ด้านที่มีความพึงพอใจสูงสุดคือด้านประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งาน (4.67 ± 0.48) รองลงมาคือด้านความง่ายในการใช้งาน (4.52 ± 0.51) ด้านความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง (4.41 ± 0.62) ด้านประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ (4.38 ± 0.56) และด้านความเสถียรของระบบ (4.35 ± 0.58) ตามลำดับ

จากการประเมิน นอกจากคะแนนเชิงปริมาณแล้ว ยังได้รับข้อเสนอแนะเชิงคุณภาพจากผู้ใช้งานเพื่อการปรับปรุงในอนาคต โดยประเด็นที่ได้รับการเสนอแนะประกอบด้วย 1) ควรเพิ่มฟังก์ชันค้นหาจุดสำรวจเดิมบนแผนที่เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบข้อมูล 2) ควรเพิ่มการแสดงสถิติสรุปข้อมูลเบื้องต้นบนหน้าจอหลัก และ 3) ควรปรับปรุงความเร็วในการโหลดแผนที่ครั้งแรก ข้อเสนอแนะเหล่านี้จะนำไปพัฒนาในเวอร์ชันต่อไป

อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาระบบ GIS แบบ PWA สำหรับเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์นี้ถือเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟในพื้นที่ห่างไกลที่สัญญาณอินเทอร์เน็ตไม่เสถียร จุดเด่นของระบบคือความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์ 100% ในส่วนของการติดตามตำแหน่งและบันทึกข้อมูล ซึ่งเป็นข้อดีหลักของเทคโนโลยี PWA ตามที่ Biørn-Hansen *et al.* (2017) ได้กล่าวไว้ การพัฒนาโดยใช้เทคนิค Service Worker กับ IndexedDB ทำให้ระบบทำงานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาอินเทอร์เน็ต เมื่อนำระบบไปใช้งานจริง พบว่าระบบทำงานได้ดีกว่าวิธีเก็บข้อมูลแบบดั้งเดิมในทุกด้าน โดยเวลาที่ใช้ในการสำรวจลดลง 43.4% และประหยัดแบตเตอรี่ได้ 49.8% ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำงานในพื้นที่ห่างไกล สอดคล้องกับที่ Singh *et al*. (2012) พบว่าการพัฒนา GIS บนเว็บด้วยซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สช่วยให้การเก็บข้อมูลภาคสนามมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ ความแม่นยำของข้อมูลเพิ่มขึ้น 7.8% และความครบถ้วนเพิ่มขึ้น 13.2% เมื่อเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งในการติดตามและควบคุมโรคและแมลงศัตรูพืช (Dida, 2022)

เทคนิค watchPosition ของ Geolocation API ที่เลือกใช้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งและประหยัดพลังงานได้มาก ดูได้จากผลการทดสอบการใช้แบตเตอรี่ที่ลดลง (42.3% เทียบกับ 84.2%) การออกแบบให้ระบบแสดงความแม่นยำเป็นเปอร์เซ็นต์ทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจง่ายขึ้น ซึ่งตรงกับแนวคิดของ Zandbergen (2009) และ Merry and Bettinger (2019) ที่แนะนำให้แปลงค่าความแม่นยำทางเทคนิคให้เป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานทั่วไปเข้าใจได้ง่าย จากการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งาน พบว่าอยู่ในระดับมาก (4.47 จาก 5) โดยเฉพาะด้านประโยชน์ที่ได้รับ (4.67) และความง่ายในการใช้งาน (4.52) ซึ่งแสดงว่าระบบตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้งานได้ดี สอดคล้องกับที่ Kamilaris and Prenafeta-Boldú (2018) พบว่าการพัฒนาแอปพลิเคชันที่ใช้ง่ายและตรงกับความต้องการของเกษตรกรจะช่วยให้มีการยอมรับเทคโนโลยีใหม่มากขึ้น

เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ระบบที่พัฒนาขึ้นมีข้อได้เปรียบในด้านการทำงานแบบออฟไลน์และการประหยัดพลังงานโดยใช้เทคนิค watchPosition ของ Geolocation API (W3C, 2022b) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งและประหยัดแบตเตอรี่ รวมถึงการแสดงความแม่นยำเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ทำให้เข้าใจง่าย ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่ไม่มีในงานวิจัยของ Sonti (2015) และ Vinueza-Martinez *et al.* (2024) เมื่อพิจารณาในบริบทของประเทศไทย การจัดการพื้นที่เกษตรในเขตชนบทห่างไกลยังคงเผชิญกับข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล โดยเฉพาะความเสถียรของการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตในพื้นที่แปลงปลูก (ชนินทร์, 2560) ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) แบบดั้งเดิมที่ต้องพึ่งพาเครือข่ายออนไลน์เป็นหลัก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ พบว่ามีข้อได้เปรียบอย่างเด่นชัดในด้านความสามารถทำงานแบบออฟไลน์ (Offline-first) ซึ่งช่วยทลายข้อจำกัดด้านการสื่อสารในพื้นที่ทุรกันดารได้ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ GIS ของหน่วยงานภาครัฐ เช่น ระบบของ GISTDA หรือ Rice GIS ของกรมส่งเสริมการเกษตร ซึ่งมักเป็นระบบขนาดใหญ่และต้องการการลงทุนสูง ระบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นมีความยืดหยุ่นและประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในระดับชุมชนหรือองค์กรขนาดเล็กได้

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกในประเทศไทยที่นำเทคโนโลยี PWA ร่วมกับ Service Worker และ IndexedDB มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบ GIS ที่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบออฟไลน์ 100% ซึ่งเป็นนวัตกรรมสำคัญที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของระบบเดิมและเหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกล

ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับภาคเกษตรของประเทศไทย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ในสาขาอื่น เช่น การสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ การจัดการภัยพิบัติ หรือการสำรวจพื้นที่ป่าไม้ในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการเก็บข้อมูลภาคสนามของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อจำกัดและแนวทางพัฒนาระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ระบบสามารถแสดงแผนที่ในสภาวะออฟไลน์ได้ 95% (ตารางที่ 1) โดยใช้กลไก browser cache ส่วน 5% ที่ไม่แสดงเป็นพื้นที่ใหม่ที่ไม่เคยเข้าถึง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดนี้ไม่กระทบการทำงานหลักเพราะ Geolocation API ทำงานผ่าน GPS โดยตรง ระบบยังระบุพิกัดได้แม่นยำและบันทึกข้อมูลครบถ้วนใน IndexedDB ได้ปกติ นอกจากนี้ยังแสดงพิกัดเป็นตัวเลขและเปอร์เซ็นต์บนหน้าจอ (รูปที่ 9 - 10) ทำให้ผู้ใช้ตรวจสอบตำแหน่งได้แม้ไม่มีแผนที่ ดังนั้นเป็นเพียงข้อจำกัดด้าน Visualization ไม่ใช่ Functionality จากผลการประเมินความพึงพอใจ (ตารางที่ 3) ผู้ใช้ให้คะแนนด้านประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ที่ 4.38 (มาก) แสดงว่าข้อจำกัดนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานจริงอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อจำกัดของการวิจัย การวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการนำผลไปใช้และการวิจัยต่อเนื่อง ดังนี้

1. ขนาดตัวอย่างในการทดสอบภาคสนาม การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ GIS แบบ PWA กับวิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมมีผู้เข้าร่วมเพียง 5 คน/กลุ่ม เนื่องจากข้อจำกัดด้านบุคลากรที่มีความชำนาญในการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟ และข้อจำกัดด้านพื้นที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจน ($p < 0.001$) ในทุกตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ทั้งด้านเวลาที่ใช้ในการสำรวจ ความแม่นยำของข้อมูล ความครบถ้วนของข้อมูลและการใช้พลังงานแบตเตอรี่ การวิจัยในอนาคตควรขยายจำนวนตัวอย่างให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ทางสถิติและสามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในวงกว้างได้มากขึ้น

2. พื้นที่และระยะเวลาในการทดสอบ การทดสอบดำเนินการเฉพาะในพื้นที่ปลูกกาแฟอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศและสภาพอากาศเฉพาะ และทดสอบเป็นระยะเวลา 3 วัน ซึ่งอาจไม่เพียงพอในการประเมินปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานระยะยาว ดังนั้น ผลการทดสอบอาจแตกต่างไปในพื้นที่อื่นที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกันหรือในการใช้งานต่อเนื่องระยะยาวการวิจัย ในอนาคตควรทดสอบในพื้นที่ที่หลากหลายและเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบ

3. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ แม้ว่าระบบจะถูกออกแบบให้สามารถทำงานในสภาวะออฟไลน์ได้ แต่การทดสอบดำเนินการในพื้นที่ที่ยังคงมีสัญญาณอินเทอร์เน็ตเป็นบางช่วง ดังนั้น อาจยังไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพในสภาวะออฟไลน์อย่างสมบูรณ์ได้ การวิจัยในอนาคตควรทดสอบในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ตเลยเป็นระยะเวลานานขึ้น

ข้อจำกัดของเทคโนโลยี PWA เมื่อเทียบกับ Native Application มีหลายประการ ได้แก่ การเริ่มต้นใช้งานที่ซับซ้อนกว่าเนื่องจากผู้ใช้ต้องเข้าผ่าน browser ก่อนจึงจะติดตั้งเป็น PWA ได้ โดย iOS ไม่มี automatic install prompt เหมือน Android ผู้ใช้ต้องใช้ "Add to Home Screen" ใน Safari share menu ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนกว่าและอาจลดอัตราการติดตั้ง (Vinova, 2025; Tigren, 2025) ปริมาณข้อมูลที่จำกัด โดย Cache Storage บน Safari iOS จำกัดที่ประมาณ 50 MB ในขณะที่ IndexedDB สามารถเก็บข้อมูลได้ถึง 500 MB-1 GB ขึ้นอยู่กับพื้นที่ว่างของอุปกรณ์ (MDN, 2025; Love2Dev, 2021) ซึ่งเพียงพอสำหรับงานเก็บข้อมูลภาคสนามทั่วไป แต่อาจไม่เหมาะกับโครงการที่ต้องการเก็บข้อมูลจำนวนมากประสิทธิภาพการประมวลผลต่ำกว่า เนื่องจาก PWA ทำงานผ่าน browser engine จึงช้าในการวิเคราะห์ภาพแบบ real-time หรือแสดงแผนที่ 3D อย่างไรก็ตาม สำหรับงานเก็บข้อมูล 2D และ GPS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพเพียงพอ การเข้าถึง Hardware จำกัด โดย PWA ไม่สามารถใช้ Bluetooth Low Energy NFC หรือ Advanced Camera API ได้เต็มรูปแบบเหมือน Native App (Tigren, 2025; Brainhub, 2025) และการพึ่งพา Browser/Platform โดยเฉพาะ Safari บน iOS มีข้อจำกัดมากกว่า Chrome บน Android สำหรับการพัฒนาในอนาคต อาจปรับปรุงระบบจัดการแคชแผนที่ให้ดีขึ้นโดยใช้ Service Worker caching หรือ Leaflet.offline plugin เพื่อให้ผู้ใช้ดาวน์โหลดแผนที่ล่วงหน้าได้ นอกจากนี้

อาจพัฒนาเป็น native iOS app ด้วย Swift/SwiftUI หรือใช้ hybrid framework เช่น Capacitor หรือ Cordova เพื่อรองรับการทำงานบน iOS ได้ดีขึ้น รวมถึงการเพิ่มฟังก์ชันตามข้อเสนอแนะของผู้ใช้งาน เช่น การค้นหาจุดสำรวจเดิม การแสดงสถิติสรุปข้อมูล และการปรับปรุงความเร็วในการโหลดแผนที่

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบ GIS แบบ Progressive Web Application สำหรับเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่แบบออฟไลน์ที่มีการซิงค์ข้อมูลอัตโนมัติ และประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านต่าง ๆ ทั้งความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์ ความแม่นยำของข้อมูล และการใช้แบตเตอรี่ในพื้นที่ห่างไกล ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำงานได้ทั้งบนเว็บเบราว์เซอร์และอุปกรณ์มือถือ โดยจุดเด่นสำคัญคือทำงานได้แม้ไม่มีอินเทอร์เน็ต ระบบประกอบด้วยสี่ส่วนหลัก และใช้ IndexedDB เป็นฐานข้อมูลหลักสำหรับเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ จากการทดสอบพบว่า ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะออฟไลน์ โดยมีประสิทธิภาพ 100% สำหรับการติดตามตำแหน่งและบันทึกข้อมูล และ 95% สำหรับการแสดงแผนที่

การใช้ระบบ GIS แบบ PWA ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมในทุกด้าน โดยช่วยลดเวลาที่ใช้สำรวจลงไป 43.4% เพิ่มความแม่นยำของข้อมูลได้ 7.8% เพิ่มความครบถ้วนของข้อมูลได้ 13.2% และประหยัดแบตเตอรี่ได้ 49.8% ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญเมื่อทำงานในพื้นที่ห่างไกล ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในระดับมาก โดยมีคะแนนเฉลี่ยรวม 4.47 จาก 5 คะแนนเต็ม โดยเฉพาะด้านประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งาน (4.67) รองลงมาคือด้านความง่ายในการใช้งาน (4.52) ด้านความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง (4.41) ด้านประสิทธิภาพการทำงานแบบออฟไลน์ (4.38) และด้านความเสถียรของระบบ (4.35) ตามลำดับ

นวัตกรรมสำคัญในงานวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบแสดงความแม่นยำเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ทำให้ผู้ใช้เข้าใจง่าย แทนการแสดงความแม่นยำเป็นหน่วยเมตรแบบดั้งเดิม และการใช้เทคนิค watchPosition ของ Geolocation API เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งและประหยัดพลังงาน การพัฒนาระบบ GIS แบบ PWA สำหรับเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่แบบออฟไลน์เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการสำรวจโรคและแมลงศัตรูกาแฟในพื้นที่ห่างไกลที่สัญญาณอินเทอร์เน็ตไม่เสถียร ระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ในด้านอื่น ๆ ได้ เช่น การสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ การสำรวจพื้นที่เกษตร หรือการเก็บข้อมูลภัยพิบัติในพื้นที่ห่างไกล

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการนำผลการวิจัยไปใช้ ควรมีการปรับปรุงฐานข้อมูลโรคและแมลงศัตรูให้เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด การใช้งานระบบเป็นเวลานานควรเตรียมแบตเตอรี่สำรองหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าเสริม และก่อนใช้งานในพื้นที่ห่างไกล ควรแคชแผนที่ของพื้นที่ที่จะทำงานไว้ล่วงหน้า

สำหรับการวิจัยครั้งต่อไป แนะนำให้พัฒนาระบบให้รองรับการทำงานร่วมกับอุปกรณ์เสริม เช่น เซนเซอร์วัดสภาพแวดล้อม กล้องถ่ายภาพความร้อน หรือโดรน พัฒนาระบบการวิเคราะห์ข้อมูลอัตโนมัติ เช่น การวินิจฉัยโรคและแมลงศัตรูพืชจากรูปภาพโดยใช้เทคนิค Machine Learning และศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกับแอปพลิเคชันมือถือแบบเนทีฟ (Native Mobile Application)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟในพื้นที่อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ที่ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณนักวิจัยและเจ้าหน้าที่ภาคสนามทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทดสอบและประเมินระบบ

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. (2563). คู่มือโรคและแมลงศัตรูพืชในประเทศไทย. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมวิชาการเกษตร. (2565). การป้องกันกำจัดมอดเจาะผลกาแฟแบบผสมผสาน. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.

ชนินทร์ ศิริขันตยกุล. (2560). โครงการทดสอบพันธุ์และเทคโนโลยีการผลิตกาแฟโรบัสต้าที่เหมาะสมในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่าง. กรมวิชาการเกษตร.

Apple Developer. (2023). Updates to storage policy. WebKit Blog. Source: https://webkit.org/blog/14403/updates-to-storage-policy/. Retrieved date 7 May 2025.

Aristizábal, L.F., Johnson, M.A., Marino, Y.A., Bayman, P. and Wright, M.G. (2023). Establishing an integrated pest management program for coffee berry borer in Hawaii and Puerto Rico coffee agroecosystems. Insects 14(8): 603. doi: 10.3390/insects14070603.

Best, J.W. and Kahn, J.V. (2006) Research in Education. 10th Edition, Pearson Education Inc., Cape Town.

Biørn-Hansen, Andreas & Majchrzak, Tim A. and Grønli, Tor-Morten. (2017). Progressive Web Apps: The Possible Web-native Unifier for Mobile Development 344 - 351. doi: 10.5220/0006353703440351.

Boone, H.N. and Boone, D.A. (2012). Analyzing Likert data. Journal of Extension 50(2): 1 - 5. doi: 10.34068/joe.50.02.48.

Brainhub. (2025). PWA on iOS – Current status & limitations for users. Source: https://brainhub.eu/library/pwa-on-ios. Retrieved date 6 May 2025.

Cox, D.R. (2006). Principles of statistical inference. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511813559.

Dida, G. (2022). Coffee production: Opportunities, challenges and genetic diversity in Ethiopia. International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences 8(3): 1 - 9. doi: 10.20431/2454-6224.0803001.

Etikan, I., Musa, S.A. and Alkassim, R.S. (2016). Comparison of convenience sampling and purposive sampling. American Journal of Theoretical and Applied Statistics 5(1): 1 - 4. doi: 10.11648/j.ajtas.20160501.11.

Feehan, L.M., Geldman, J., Sayre, E.C., Park, C., Ezzat, A.M., Yoo, J.Y. and Li, L.C. (2018). Accuracy of Fitbit Devices: Systematic Review and Narrative Syntheses of Quantitative Data. JMIR mHealth and uHealth 6(8): e10527. doi: 10.2196/10527.

Gustafson, A. (2008). Understanding Progressive Enhancement. A List Apart. Source: https://alistapart.com/article/understandingprogressiveenhancement/. Retrieved date 6 May 2025.

Kamilaris, A. and Prenafeta-Boldú, F.X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture 147: 70 - 90. doi: 10.1016/j.compag.2018.02.016.

Likert, R. (1961) New Patterns of Management. New York: McGraw-Hill.

Love2Dev. (2021). Progressive web apps on iOS 13 & 14, iPhone & iPad. Source: https://love2dev.com/pwa/ios/. Retrieved date 5 May 2025.

MDN Web Docs. (2023). IndexedDB API. Source: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/IndexedDB_API. Retrieved date 4 May 2025.

MDN Web Docs. (2023). Progressive Web Apps (PWAs). Source: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Progressive_web_apps. Retrieved date 4 May 2025.

Merry, K. and Bettinger, P. (2019). Smartphone GPS accuracy study in an urban environment. PLOS ONE 14(7): e0219890. doi: 10.1371/journal.pone.0219890.

Nie, B. (2015). A study on the second-person narrative in Jennifer Egan's *Black Box*. Open Journal of Social Sciences 3(10): 51 - 58. doi: 10.4236/jss.2015.310008.

Singh, P.S., Chutia, D. and Sudhakar, S. (2012). Development of a Web Based GIS Application for Spatial Natural Resources Information System Using Effective Open Source Software and Standards. Journal of Geographic Information System 4(3): 261 - 266. doi: 10.4236/jgis.2012.43031.

Sommerville, I. (2015). Software engineering (10th ed.). Boston: Pearson Education.

Sonti, S.H. (2015). Application of Geographic Information System (GIS) in Forest Management. Journal of Geography & Natural Disasters 5(3): 145. doi: 10.4172/2167-0587.1000145.

Tigren. (2025). Current progressive web app limitations to iOS users. Source: https://www.tigren.com/blog/progressive-web-app-limitations/. Retrieved date 2 May 2025.

United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations.

Vega, F.E., Infante, F. and Johnson, A.J. (2015). The genus *Hypothenemus*, with emphasis on *H. hampei*, the coffee berry borer. In F.E. Vega & R.W. Hofstetter (Eds.), Bark beetles: Biology and ecology of native and invasive species. Cambridge: Academic Press. 427 - 494.

Vinova. (2025). Navigating Safari/iOS PWA limitations and bugs. Source: https://vinova.sg/navigating-safari-ios-pwa-limitations/. Retrieved date 27 April 2025.

Vinueza-Martinez, J., Correa-Peralta, M., Ramirez-Anormaliza, R., Franco Arias, O. and Vera Paredes, D. (2024). Geographic information systems based on WebGIS architecture: Bibliometric analysis of the current status and research trends. Sustainability 16(15): 6439. doi: 10.3390/su16156439.

W3C. (2022a). Geolocation API specification (2nd ed.). Source: https://www.w3.org/TR/geolocation-API/. Retrieved date 28 April 2025.

W3C. (2022b). Service workers W3C recommendation. Source: https://www.w3.org/TR/service-workers/. Retrieved date 28 April 2025.

Wang, Y., Zhang, H. and Li, D. (2019). Performance assessment of mobile GIS data collection applications: A systematic review. International Journal of Digital Earth 12(6): 671 - 687.

WebKit. (2018). IndexedDB quota changes [Bug 190598]. WebKit Bugzilla. Source: https://bugs.webkit.org/show_bug.cgi?id=190598. Retrieved date 27 April 2025.

Zandbergen, P.A. (2009). Accuracy of iPhone Locations: A Comparison of Assisted GPS, WiFi and Cellular Positioning. Transactions in GIS 13(s1): 5 - 25. doi: 10.1111/j.1467-9671.2009.01152.x.

❑❑❑❑❑