

Received: 23 มี.ค. 2569

Revised: 4 มิ.ย. 2569

Accepted: 18 มิ.ย. 2569

ระบบแผนที่นำทางและระบุตำแหน่งภายในอาคาร 60 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

INDOOR NAVIGATION MAP AND INDOOR POSITIONING SYSTEMS FOR THE  
SIXTIETH ANNIVERSARY BUILDING, MAEJO UNIVERSITYวงศ์พัทธ์ นาคม่วง, สนิท สิทธิ, พยุงศักดิ์ เกษมสำราญ และ ปวีณ เชื้อนแก้ว\*  
สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้Wongsaphat Nakmuang, Snit Sitti, Payungsak Kasemsumran  
and Paween Khoenkaw\*Computer Science Department, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai,  
Thailand, 50290

\*Corresponding author: paween\_k@mju.ac.th

## Abstract:

This paper presents the development of a web-based application for indoor navigation and automatic positioning within the 60th Anniversary Building of Maejo University, designed to assist users in efficiently finding routes inside the building. Conventional GPS-based navigation cannot function properly indoors; thus, the proposed system employs a spatial graph data structure combined with Dijkstra's algorithm to compute the shortest path, supporting automatic multi-floor navigation through interactive map visualization. In addition, a real-time indoor positioning method based on Wi-Fi fingerprinting is introduced. Signal strength values collected from wireless access points on both 2.4 GHz and 5 GHz bands are normalized and stored in a database. Experimental evaluation of five similarity measurement techniques demonstrates that the Pearson correlation method provides the best performance, achieving a floor-level accuracy of 99.5% and an average localization error of  $\pm 5.49$  meters. The results confirm that the proposed system is practically applicable for both positioning and navigation within the building.

**Keywords:** Indoor navigation system; shortest path calculation; indoor positioning

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบแผนที่นำทางและระบบระบุตำแหน่งอัตโนมัติภายในอาคาร 60 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน เพื่ออำนวยความสะดวกให้ผู้ใช้งานค้นหาเส้นทางภายในอาคารได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ระบบใช้โครงสร้างข้อมูลกราฟร่วมกับอัลกอริทึมไดจ์สตราเพื่อคำนวณเส้นทางสั้นที่สุด รองรับการนำทางหลายชั้นผ่านการแสดงแผนที่เชิงโต้ตอบ นอกจากนี้ยังนำเสนอการระบุตำแหน่งแบบเวลาจริง ด้วยลักษณะเฉพาะสัญญาณไวไฟย่านความถี่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ ผ่านกระบวนการปรับมาตรฐานข้อมูลเพื่อลดความผันผวน จากการทดสอบวิธีเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะสัญญาณ 5 รูปแบบ พบว่าวิธีสหสัมพันธ์แบบเพียร์สันให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีความแม่นยำระดับชั้นร้อยละ 99.5 และความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งเฉลี่ย  $\pm 5.49$  เมตร ผลการวิจัยสรุปได้ว่าระบบสามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพภายในอาคาร 60 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

**คำสำคัญ :** ระบบแผนที่นำทางภายในอาคาร; การคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุด; การระบุตำแหน่งภายในอาคาร

## 1. บทนำ

ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานสำหรับบริการนำทางสมัยใหม่ อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวออกแบบสำหรับสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง เมื่อใช้งานภายในอาคาร สัญญาณดาวเทียมจะถูกบดบังด้วยวัสดุก่อสร้าง ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ (Signal Attenuation) และการสะท้อนของคลื่น (Multipath Propagation) ส่งผลให้การคำนวณตำแหน่งคลาดเคลื่อนสูง (Zafari et al., 2019) โดยความแม่นยำของ GPS สำหรับผู้ใช้ทั่วไปที่ประมาณ 5–10 เมตรนั้นไม่เพียงพอสำหรับการนำทางภายในอาคาร เพื่อแก้ข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการพัฒนาระบบหาตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning System: IPS) ที่ใช้เทคโนโลยีไวไฟ บลูทูธ หรือเซนเซอร์สมาร์ทโฟนแทนสัญญาณดาวเทียม (Zafari et al., 2019; Simões et al., 2020; Liu et al., 2007) เทคนิค Wi-Fi Fingerprinting ซึ่งอาศัยค่า RSSI จากจุดกระจายสัญญาณเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่สร้างไว้ล่วงหน้า เป็นแนวทางที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว (Bahl & Padmanabhan, 2000; Youssef & Agrawal, 2005; He & Chan, 2016) อาคาร 60 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ มีโครงสร้างหลายชั้นที่ซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบแผนที่นำทางและระบุตำแหน่งภายในอาคารดังกล่าว โดยใช้อัลกอริทึม Dijkstra (Dijkstra, 1959; Hart et al., 1968) สำหรับหาเส้นทางสั้นที่สุด

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบแผนที่และนำทางภายในอาคาร 60 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่รองรับการนำทางแบบหลายชั้น โดยใช้โครงสร้างกราฟและอัลกอริทึม Dijkstra ในการคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุด พร้อมทั้งพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบเวลาจริงด้วยลักษณะเฉพาะสัญญาณไวไฟ ทั้งย่านความถี่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ และประเมินประสิทธิภาพของวิธีเปรียบเทียบความคล้ายของเวกเตอร์สัญญาณ 5 รูปแบบ ได้แก่ แมนฮัตตัน ยูคลิด โคไซน์ สหสัมพันธ์เพียร์สัน และมาฮาลาโนบิส เพื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการระบุตำแหน่งภายในอาคาร

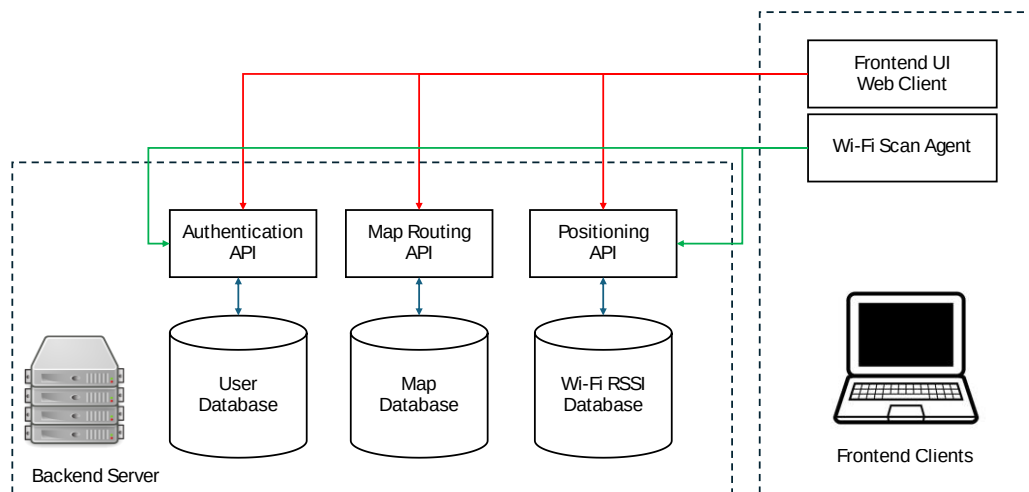
## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนดำเนินการออกเป็น 6 ขั้นตอน เริ่มต้นจากการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบโดยรวม ตามด้วยการสร้างฐานข้อมูลแผนที่ภายในอาคาร พัฒนาขั้นตอนวิธีคำนวณเส้นทาง เก็บและประมวลผลข้อมูลลักษณะเฉพาะสัญญาณไวไฟ พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับแสดงผลแผนที่ และประเมินประสิทธิภาพระบบในขั้นตอนสุดท้าย โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

### 3.1 ภาพรวมของระบบที่นำเสนอ

ระบบที่พัฒนาขึ้นมีสถาปัตยกรรมแบบไคลเอนต์-เซิร์ฟเวอร์ แบ่งออกเป็นสามส่วน ดังแสดงในภาพที่ 1 ได้แก่ ผู้ใช้งาน เซิร์ฟเวอร์ และฐานข้อมูล ผู้ใช้เข้าถึงระบบผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยส่วนติดต่อแสดงแผนที่ภายในอาคาร เมนูปลายทาง และตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ใช้ไคลเอนต์มี Wi-Fi Scan Agent รวบรวมค่า RSSI จาก Access Point แล้วส่งไปยัง API ระบุตำแหน่ง

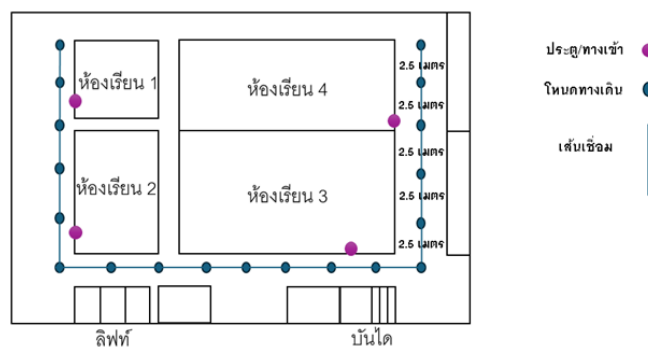
เซิร์ฟเวอร์ทำหน้าที่ประมวลผลผ่านบริการ API สามส่วน ได้แก่ API ตรวจสอบสิทธิ์, API นำทาง (Dijkstra) และ API ระบุตำแหน่ง (Wi-Fi Fingerprinting) โดยติดต่อกับฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์และฐานข้อมูลเวกเตอร์



ภาพที่ 1 ภาพรวมของระบบที่นำเสนอ

### 3.2 การสร้างฐานข้อมูลแผนที่

งานวิจัยนี้แทนโครงสร้างอาคารในรูปแบบกราฟ โดยจุดสำคัญ (ห้อง บันได ลิฟต์) ถูกแทนด้วยโหนด และทางเดินถูกแทนด้วยเส้นเชื่อมที่มีน้ำหนักแทนระยะทางจริง ดังตัวอย่างในภาพที่ 2 ข้อมูลคุณลักษณะ เช่น ชื่อห้อง ประเภทพื้นที่ และหมายเลขชั้น ถูกจัดเก็บร่วมกับโครงสร้างกราฟ



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการแทนแผนที่ของอาคารชั้นที่ 6 ของอาคาร 60 ปี

### 3.3 ขั้นตอนวิธีการหาเส้นทาง

เนื่องจากโครงสร้างเส้นทางภายในอาคารถูกแทนในรูปแบบกราฟ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ อัลกอริทึม Dijkstra ซึ่งเป็น Single Source Shortest Path (SSSP) แบบ Greedy ที่สำรวจโหนดที่ใกล้ที่สุดและสะสมระยะทาง รับประกันเส้นทางน้ำหนักต่ำสุดเมื่อน้ำหนักไม่เป็นลบ พร้อมย้อนรอย (Path Reconstruction) ดังขั้นตอนวิธีที่ 1

ขั้นตอนวิธี 1 การหาเส้นทางสั้นที่สุด

ALGORITHM: DIJKSTRA'S SHORTEST PATH WITH BACKTRACKING

INPUT :G(V, E), s, t

OUTPUT : P

DIJKSTRA(G, s, t)

1. FOR each vertex  $v \in V$  DO  $\text{dist}[v] \leftarrow \infty$  ;  $\text{prev}[v] \leftarrow \text{NULL}$  END FOR
2.  $\text{dist}[s] \leftarrow 0$
3.  $Q \leftarrow$  set of all vertices in  $V$
4. WHILE  $Q \neq \emptyset$  DO
5.     $u \leftarrow$  vertex in  $Q$  with minimum  $\text{dist}[u]$  ; REMOVE  $u$  from  $Q$
6.    IF  $u = t$  THEN BREAK
7.    FOR each neighbor  $v$  of  $u$  DO
8.         $\text{alt} \leftarrow \text{dist}[u] + \text{weight}(u,v)$
9.        IF  $\text{alt} < \text{dist}[v]$  THEN  $\text{dist}[v] \leftarrow \text{alt}$  ;  $\text{prev}[v] \leftarrow u$
10.    END FOR
11. END WHILE
12.  $P \leftarrow$  empty list ;  $u \leftarrow t$
13. WHILE  $u \neq \text{NULL}$  DO
14.    INSERT  $u$  at beginning of  $P$  ;  $u \leftarrow \text{prev}[u]$
15. END WHILE
16. IF first element of  $P \neq s$  THEN RETURN "No path found"
17. RETURN  $P$

### 3.4 การหาตำแหน่งภายในอาคาร

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคลักษณะเฉพาะสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi Fingerprinting) โดยอาศัยค่า อาร์เอสเอสไอ จากจุดกระจายสัญญาณหลายจุดเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลลักษณะเฉพาะสัญญาณ (Fingerprint Database) ที่สร้างไว้ล่วงหน้า (He & Chan, 2016; Bellavista-Parent et al., 2021)

#### 3.4.1 การกำหนดตำแหน่งโหนดสำหรับเก็บข้อมูล

ตำแหน่งโหนดเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการนำทางและการเก็บสัญญาณไวไฟ จำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งโหนดให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน ห่างกันไม่เกิน 2 เมตร และมีสัญญาณที่แตกต่างกันเพียงพอสำหรับการระบุตำแหน่ง

ผู้วิจัยสำรวจผังอาคารทั้ง 6 ชั้น และกำหนดโหนดรวม 324 จุด แบ่งเป็น จุดทางเดิน 157 จุด จุดหน้าประตูห้อง 143 จุด จุดบันได 18 จุด และจุดลิฟต์ 6 จุด โดยคัดเลือก 196 จุดเป็นจุดเก็บลักษณะเฉพาะสัญญาณ ส่วนที่เหลือ 128 จุดทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อในกราฟนำทาง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนโหนดแยกตามชั้นอาคาร

| ชั้น | โหนดทั้งหมด (GeoJSON) | จุดเก็บลักษณะเฉพาะของสัญญาณไวไฟ |
|------|-----------------------|---------------------------------|
| 1    | 60                    | 51                              |
| 2    | 62                    | 40                              |
| 3    | 57                    | 26                              |
| 4    | 63                    | 23                              |
| 5    | 35                    | 17                              |
| 6    | 47                    | 39                              |
| รวม  | 324                   | 196                             |

#### 3.4.2 การเก็บข้อมูลอาร์เอสเอสไอ

การเก็บข้อมูลสัญญาณไวไฟดำเนินการผ่านโปรแกรมกวาดตรวจสัญญาณไวไฟที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมแยกอิสระ เนื่องจากเบราว์เซอร์ไม่อนุญาตให้เข้าถึงข้อมูลบีเอสเอสไอโดยตรง โปรแกรมตรวจจับจุดกระจายสัญญาณรอบจุดอ้างอิงและบันทึกค่า อาร์เอสเอสไอ (dBm) พร้อมบีเอสเอสไอดี ในรูปแบบแฟ้ม JSON

ข้อมูลถูกจัดลำดับชั้นตามชั้นอาคาร ย่านความถี่ และรหัสโหนด แต่ละจุดมีการสแกนซ้ำ 20 รอบ เพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของสัญญาณ (ดังตารางที่ 2) โดยใช้ย่าน 5 GHz เป็นหลัก เนื่องจากมีความเสถียรสูงกว่าย่าน 2.4 GHz สรุปปริมาณข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 3

**ตารางที่ 2** ตัวอย่างข้อมูลค่าความแรงสัญญาณเวกเตอร์ลายนิ้วมือ

| บีเอสเอสไอดี      | อาร์เอสเอสไอ (dBm) |
|-------------------|--------------------|
| 34:8A:12:FB:95:B3 | -57.5              |
| AC:A3:1E:DF:FD:30 | -85.5              |
| AC:A3:1E:E0:1A:A0 | -88.0              |
| AC:A3:1E:DF:FA:30 | -58.0              |
| E8:65:49:A9:CB:32 | -59.0              |

**ตารางที่ 3** สรุปปริมาณข้อมูลสแกน อาร์เอสเอสไอ

| ชั้น       | จำนวนโหนด  | จำนวนตัวอย่าง (Samples) |
|------------|------------|-------------------------|
| 1          | 51         | 1,020                   |
| 2          | 40         | 800                     |
| 3          | 26         | 522                     |
| 4          | 23         | 460                     |
| 5          | 17         | 340                     |
| 6          | 39         | 780                     |
| <b>รวม</b> | <b>196</b> | <b>3,922</b>            |

### 3.4.3 การประมวลผลและการสร้างฐานข้อมูลเวกเตอร์

ข้อมูลดิบจำนวน 3,922 แพ้ม ถูกนำเข้าสู่กระบวนการประมวลผลเพื่อคัดกรองสัญญาณรบกวน และจัดรูปแบบข้อมูลให้อยู่ในลักษณะที่เหมาะสมต่อการสืบค้นและการเปรียบเทียบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การกรองข้อมูล (Data Filtering) ขั้นตอนแรกกรองข้อมูลดิบโดยตรวจสอบรูปแบบบีเอสเอสไอดี เพื่อกรองข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องและสัญญาณจากอุปกรณ์ส่วนบุคคลชั่วคราว (เช่น ฮอตสปอต) จากนั้นรวมข้อมูลจากการสแกน 20 ครั้งด้วยค่ามัธยฐาน (Median Aggregation) สำหรับแต่ละโหนด ข้อมูลจากการสแกนซ้ำ 20 ครั้ง จะถูกนำมารวมกันโดยคำนวณค่ามัธยฐานของค่าอาร์เอสเอสไอ ของแต่ละ บีเอสเอสไอดี ดังสมการที่ 1

$$RSSI_{fingerprint}(n, b) = \text{median}(RSSI_{scan_1}, RSSI_{scan_2}, \dots, RSSI_{scan_k}) \quad (1)$$

โดยที่  $n$  คือรหัสโหนด,  $b$  คือบีเอสเอสไอดี และ  $k$  คือจำนวนครั้งที่สแกนซ้ำ ค่ามัธยฐานทนทานต่อค่าผิดปกติได้ดี ข้อมูลแต่ละโหนดถูกแปลงเป็นเวกเตอร์ขนาด 923 มิติ (5 GHz) และ 868 มิติ (2.4 GHz) มีลักษณะเบาบาง (Sparsity  $\approx 92\%$ ) จากนั้นจัดเก็บลงฐานข้อมูลเวกเตอร์ Qdrant ด้วยดัชนี HNSW (Malkov & Yashunin, 2020) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สถิติของเวกเตอร์คุณลักษณะจำแนกตามย่านความถี่

| ย่านความถี่ | จำนวน บีเอสเอสไอดี (มิติ) | จำนวนจุดกระจายสัญญาณ | ความเบาบางของ<br>เฉลี่ยต่อโหนด | ข้อมูล(Sparsity) |
|-------------|---------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------|
| 5 GHz       | 923                       | 71.7                 |                                | 92.2%            |
| 2.4 GHz     | 868                       | 64.3                 |                                | 92.6%            |

#### 3.4.4 การระบุตำแหน่งปัจจุบัน

ในขั้นตอนการระบุตำแหน่งปัจจุบัน ระบบจะสแกนค่า อาร์เอสเอสไอ ของจุดกระจายสัญญาณทุกตัวที่ตรวจจับได้ในตำแหน่งที่ต้องการค้นหา และนำเวกเตอร์นี้ไปเปรียบเทียบกับเวกเตอร์ทุกโหนดในฐานข้อมูล ดังสมการที่ 2

$$i^* = \underset{i \in \{1, \dots, M\}}{\text{Arg min}} D(F_n, F_i) \quad (2)$$

โดย  $i^*$  คือรหัสโหนดที่ใกล้กับตำแหน่งปัจจุบันมากที่สุด,  $M$  คือจำนวนโหนดในฐานข้อมูล,  $F_n$  คือเวกเตอร์ที่อ่านได้ ณ เวลาปัจจุบัน,  $F_i$  คือเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของโหนดที่  $i$  และ  $D(\cdot)$  คือฟังก์ชันเปรียบเทียบความคล้ายของเวกเตอร์

#### 3.5 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงผลแผนที่

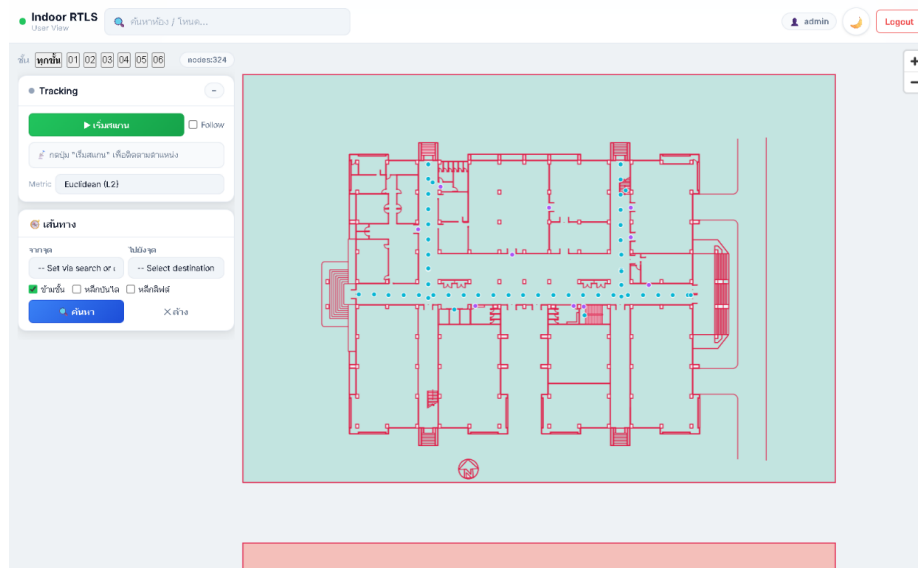
ระบบแผนที่บนเว็บใช้ไลบรารี MapLibre GL JS ซึ่งเป็นเครื่องมือแสดงผลแผนที่บน WebGL ข้อมูลแผนที่ภายในอาคารถูกจัดเก็บในรูปแบบ GeoJSON และแปลงเป็น Vector Tiles ใน



รูปแบบ Protocol Buffer Binary Format (PBF) เพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ต้องส่งและรองรับการซูมที่ระดับต่าง ๆ องค์ประกอบของแผนที่และบทบาทของแต่ละส่วนแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปลักษณะประกอบของแผนที่ภายในอาคาร

| ลำดับ | องค์ประกอบแผนที่         | รูปแบบข้อมูลเชิงพื้นที่         | หน้าที่และบทบาทการทำงานในระบบ                                                                                                               |
|-------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | ขอบเขตพื้นที่และห้อง     | รูปหลายเหลี่ยม                  | ใช้กำหนดขอบเขตพื้นที่ทางกายภาพภายในอาคาร เพื่อแสดงผลเป็นแผนที่พื้นฐานของระบบ และแบ่งสัดส่วนของห้อง โถงทางเดิน หรือพื้นที่ใช้งานประเภทต่าง ๆ |
| 2     | โหนดทางเดินหลัก          | จุด                             | ใช้แทนจุดอ้างอิงบนเส้นทางสัญจรในรูปแบบพิกัด ทำหน้าที่เป็นจุดยอดของโครงข่ายเส้นทางสำหรับการคำนวณเส้นทางภายในอาคาร                            |
| 3     | เส้นทางเชื่อมต่อ         | เส้น                            | ใช้เชื่อมต่อระหว่างโหนดทางเดินเพื่อสร้างโครงข่ายเส้นทางเชิงโทโพโลยี กำหนดความเชื่อมโยง ทิศทาง และระยะทางที่สามารถเดินทางถึงกันได้           |
| 4     | จุดพิกัดทางเข้าห้อง      | จุด                             | ใช้ระบุตำแหน่งทางเข้าของห้องหรือพื้นที่เป้าหมาย เพื่อทำหน้าที่เป็นจุดหมายปลายทางในการแสดงผลการนำทาง                                         |
| 5     | จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้น  | จุด ร่วมกับคุณลักษณะประจำข้อมูล | ใช้แทนโหนดพิเศษประเภทบันไดและลิฟต์ เพื่อรองรับการเปลี่ยนผ่านระหว่างชั้น และทำให้ระบบสามารถคำนวณเส้นทางต่อเนื่องในแนวตั้งได้                 |
| 6     | ตำแหน่งผู้ใช้งานปัจจุบัน | จุดแบบพลวัต                     | ใช้แสดงตำแหน่งปัจจุบันของผู้ใช้งานบนแผนที่แบบเวลาจริง โดยมีการปรับปรุงตำแหน่งอย่างต่อเนื่องตามข้อมูลที่ได้รับจากระบบระบุตำแหน่ง             |
| 7     | เส้นทางนำทางที่คำนวณได้  | เส้นแบบพลวัต                    | ใช้แสดงผลเส้นทางนำทางที่ระบบคำนวณได้ โดยวาดทับบนแผนที่เพื่อแนะนำการเดินทางจากตำแหน่งปัจจุบันไปยังจุดหมายปลายทาง                             |



ภาพที่ 3 ตัวอย่างหน้าจอระบบที่นำเสนอ

### 3.6 การประเมินประสิทธิภาพระบบ

การทดสอบใช้วิธีตรวจสอบแบบเว้นข้อมูลครั้งละหนึ่งตัวอย่าง (Leave-one-out Validation) จำนวน 196 จุดทดสอบ ภายใต้ย่านความถี่ 5 GHz และประเมินมาตรวัดระยะ 5 รูปแบบ ได้แก่ แมนฮัตตัน ยูคลิด โคไซน์ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน และมาฮาลาโนบิส

#### ระยะทางแมนฮัตตัน (Manhattan Distance: L1)

ระยะทางแมนฮัตตันวัดความแตกต่างระหว่างเวกเตอร์สองชุดโดยนำผลต่างสัมบูรณ์ของแต่ละมิติมารวมกัน วิธีนี้เหมาะกับข้อมูลที่ต้องการความเรียบง่ายในการคำนวณและทนทานต่อค่าผิดปกติ คำนวณได้ดังสมการ (3)

$$d_{\text{Manhattan}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (3)$$

#### ระยะทางยูคลิด (Euclidean Distance: L2)

$n$  ระยะทางยูคลิดวัดระยะห่างแบบเส้นตรงระหว่างจุดสองจุดในปริภูมิ  $n$  มิติ โดยพิจารณาผลต่างแต่ละมิติยกกำลังสองรวมกัน แล้วถอดรากที่สอง เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้แพร่หลายในงานจำแนกข้อมูล คำนวณได้ดังสมการ (4)

$$d_{\text{Euclidean}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

### ค่าความคล้ายคลึงโคไซน์ (Cosine Similarity / Cosine Distance)

ค่าความคล้ายคลึงโคไซน์วัดความคล้ายกันของทิศทางระหว่างเวกเตอร์สองชุด โดยพิจารณารูปแบบการเปลี่ยนแปลงมากกว่าขนาด เหมาะกับข้อมูลที่สนใจแนวโน้มมากกว่าค่าสัมบูรณ์ คำนวณได้ดังสมการ (5)

$$d_{\text{Cosine}}(x, y) = \frac{x \cdot y}{|x||y|} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (5)$$

### ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation / Correlation Distance)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันวัดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเวกเตอร์สองชุด โดยพิจารณาว่าค่าของทั้งสองเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันมากน้อยเพียงใด เหมาะกับข้อมูลที่สนใจแนวโน้มเชิงสัมพันธ์ คำนวณได้ดังสมการ (6) และ (7)

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

$$d_{\text{Correlation}}(x, y) = 1 - r(x, y) \quad (7)$$

### ระยะทางมาฮาลาโนบิส (Mahalanobis Distance)

$T$  ระยะทางมาฮาลาโนบิสวัดระยะห่างโดยคำนึงถึงความแปรปรวนและความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูล โดยใช้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance Matrix) ปรับน้ำหนักแต่ละมิติ แตกต่างจากระยะยูคลิดที่มองแต่ละมิติเป็นอิสระ คำนวณได้ดังสมการ (8)

$$d_{\text{Mahalanobis}}(x, y) = \sqrt{(x - y)^T \Sigma^{-1} (x - y)} \quad (8)$$

## 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการประเมินประสิทธิภาพ ระบบได้ประมวลผลข้อมูลความเข้มสัญญาณ อาร์เอสเอสไอ เพื่อคาดการณ์ฟังก์ชันตำแหน่งของผู้ใช้งาน โดยกำหนดตัวชี้วัดที่สะท้อนทั้งความแม่นยำของการระบุตำแหน่งและระดับความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ ผลการประเมินของอัลกอริทึมทั้ง 5 รูปแบบสรุปได้ดังตารางที่ 6

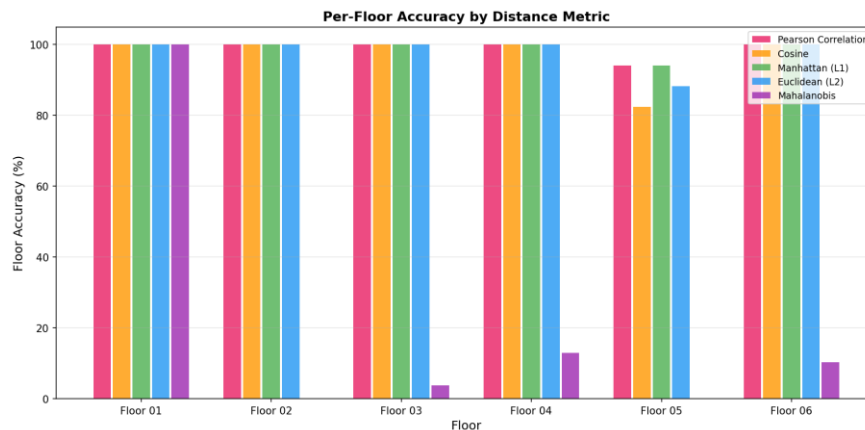
ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งจำแนกตามมาตรวัดระยะ

| มาตรวัดระยะ | ความแม่นยำระดับชั้น | ความแม่นยำพิกัด (< 5 เมตร) | ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน | ความคลาดเคลื่อนสูงสุด | ความคลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 90 |
|-------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| เพียร์สัน   | 99.5%               | 74.0%                      | 5.49 เมตร                | 152.38 เมตร           | 6.03 เมตร                            |
| แมนฮัตตัน   | 99.5%               | 72.4%                      | 5.61 เมตร                | 140.83 เมตร           | 6.03 เมตร                            |
| ยูคลิด      | 99.0%               | 71.9%                      | 6.51 เมตร                | 152.38 เมตร           | 6.03 เมตร                            |
| โคไซน์      | 98.5%               | 71.9%                      | 7.39 เมตร                | 178.80 เมตร           | 6.03 เมตร                            |
| มาฮาลาโนบิส | 28.6%               | 2.6%                       | 160.95 เมตร              | 348.43 เมตร           | 329.93 เมตร                          |

หมายเหตุ ความแม่นยำพิกัดน้อยกว่า 5 เมตร ใช้เป็นตัวแทนของความสามารถในการระบุตำแหน่งระดับห้อง

จากตารางที่ 6 วิธีสหสัมพันธ์เพียร์สันให้ผลดีที่สุดในภาพรวม โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ 5.49 เมตร ความแม่นยำระดับชั้น 99.5% และความแม่นยำพิกัดในระยะ 5 เมตรที่ 74.0% รองลงมาคือวิธีแมนฮัตตันซึ่งให้ผลใกล้เคียงในหลายตัวชี้วัด เกือบทุกมาตรวัด (ยกเว้นมาฮาลาโนบิส) ควบคุมความคลาดเคลื่อนที่เปอร์เซ็นต์ไทม์ 90 ได้ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 6.03 เมตร แสดงว่าระบบรักษาความเสถียรของการระบุตำแหน่งได้ในกรณีส่วนใหญ่

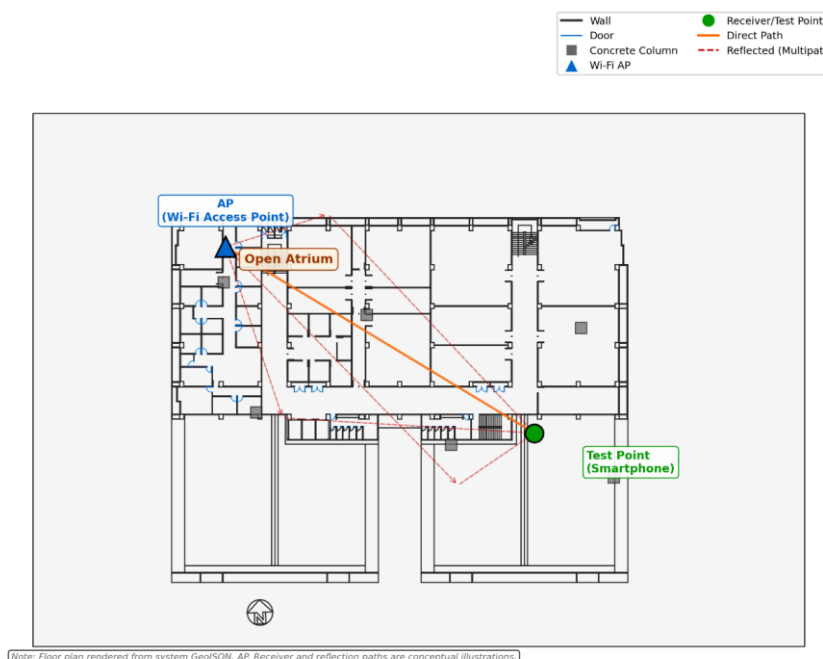
สำหรับผลการทดสอบรายชั้น ระบบระบุชั้นได้ถูกต้อง 100% ในชั้น Floor 01, 02, 04 และ 06 อย่างไรก็ตาม ชั้น Floor 05 มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าชั้นอื่น ดังแสดงในภาพที่ 4 เนื่องจากสภาพกายภาพของชั้นส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ Multipath Effect ทำให้รูปแบบความเข้มสัญญาณเปลี่ยนแปลงจากฐานข้อมูล (Zafari et al., 2019)



ภาพที่ 4 ค่าความถูกต้องของการหาตำแหน่งแยกตามชั้น

ชั้น Floor 05 มีโถงเปิด (Open Atrium) บริเวณกลางชั้น เสาคอนกรีตแบบกริด และเพดานโลหะแบบเปิดเผย ดังแสดงในภาพที่ 5 องค์ประกอบเหล่านี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Multipath Propagation รุนแรงกว่าชั้นอื่น ส่งผลให้เวกเตอร์สัญญาณ ณ จุดทดสอบบางจุดเบี่ยงเบนจากค่าในฐานข้อมูล ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงกว่าปกติในชั้นนี้

Figure 5 Floor 5 Plan of the 60th Anniversary Building, Maejo University (Multipath Propagation Schematic)



ภาพที่ 5 ผังพื้นที่ชั้น 5 ของอาคาร 60 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พร้อมภาพประกอบเชิงแนวคิดของ Multipath Propagation

วิธีเพียร์สันมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีอื่น เนื่องจากพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นมากกว่าความต่างเชิงปริมาณ จึงลดผลกระทบจาก Device Heterogeneity ได้ดี ส่วนวิธีมาฮาลาโนบิสมีข้อจำกัดเมื่อข้อมูลสัญญาณเบาบางและผันผวนสูง ทำให้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมไม่เสถียร

แม้ระบบจะมีความแม่นยำระดับชั้น 99.5% แต่ยังมีจุดที่ความคลาดเคลื่อนสูงผิดปกติ สะท้อนว่าระบบยังไวต่อสัญญาณรบกวนเฉพาะจุด การพัฒนาต่อไปอาจเพิ่ม Kalman Filter หรือข้อกำหนดเชิงกายภาพของเส้นทางเดิน เพื่อลดการกระโดดของตำแหน่งที่ไม่สอดคล้องกับสภาพจริง

## 5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบแผนที่นำทางภายในอาคาร 60 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำเร็จตามวัตถุประสงค์ โดยใช้อัลกอริทึม Dijkstra สำหรับการนำทางหลายชั้น และ Wi-Fi Fingerprinting ร่วมกับฐานข้อมูลเวกเตอร์ Qdrant การประเมิน 5 มาตรการระยะพบว่าวิธีสหสัมพันธ์เพียร์สันให้ผลดีที่สุด ด้วยความแม่นยำระดับชั้น 99.5% และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 5.49 เมตร

เนื่องจากข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีเว็บที่ไม่สามารถวาดตรวจสอบสัญญาณไวไฟได้จากเบราว์เซอร์โดยตรง ผู้วิจัยจึงพัฒนาโปรแกรมตรวจสอบสัญญาณไวไฟแยกอิสระด้วยภาษาไพธอน

### 5.2 ความยั่งยืนของระบบ

ในการใช้งานจริง สภาพแวดล้อมไวไฟอาจเปลี่ยนแปลงจากการย้ายจุดกระจายสัญญาณหรือการปรับโครงสร้างอาคาร ผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางบำรุงรักษา ได้แก่ (1) ปรับปรุงฐานข้อมูลทุก 3-6 เดือน หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และ (2) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติโดยเปรียบเทียบเวกเตอร์ BSSID เพื่ออัปเดตเฉพาะโหนดที่เกี่ยวข้อง

### 5.3 ข้อจำกัดและงานในอนาคต

ระบบยังมีประเด็นที่สามารถพัฒนาต่อ ได้แก่ (1) พัฒนาเป็น PWA หรือแอปพลิเคชันมือถือ (Android/iOS) เพื่อให้ผู้ใช้ไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมตรวจสอบสัญญาณแยกต่างหาก (2) เพิ่ม Kalman Filter หรือ Particle Filter เพื่อลดการกระโดดของตำแหน่ง และ (3) ผสาน IMU Sensor เพื่อทำ Pedestrian Dead Reckoning ร่วมกับ Wi-Fi Fingerprinting

## 6. เอกสารอ้างอิง

- Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. (2000). RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000*, 2, 775–784.
- Bellavista-Parent, V., Torres-Sospedra, J., & Pérez-Navarro, A. (2021). New trends in indoor positioning based on WiFi and machine learning: A systematic review. *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 1–8.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100–107.
- He, S., & Chan, S.-H. G. (2016). Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 466–490.
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 37(6), 1067–1080.
- Malkov, Y. A., & Yashunin, D. A. (2020). Efficient and robust approximate nearest neighbor search using Hierarchical Navigable Small World graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(4), 824–836.
- Simões, W. C. S. S., Machado, G. S., Sales, A. M. A., de Lucena, M. M., Jazdi, N., & de Lucena, V. F. (2020). A review of technologies and techniques for indoor navigation systems for the visually impaired. *Sensors*, 20(14), 3935.
- Youssef, M., & Agrawal, A. (2005). The Horus WLAN location determination system. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '05)* (pp. 205–218).
- Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599