

รหัสโครงการ SUT7-709-57-12-12



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สาย  
ภายในอาคารแบบหลายชั้น  
(Development of hybrid techniques for wireless indoor positioning  
systems in multiple-floor building)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-709-57-12-12



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สาย  
ภายในอาคารแบบหลายชั้น  
(Development of hybrid techniques for wireless indoor positioning  
systems in multiple-floor building)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตินา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2560

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ และ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

มีนาคม 2560



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยได้มีการพิจารณาลักษณะของค่าความเข้มสัญญาณที่วัดได้รับได้จาก โนคอ้างอิง ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของบริเวณที่วัตถุอยู่ เพื่อลดความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลหาพิกัดตำแหน่งวัตถุ โดยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้ประยุกต์ใช้การทำงานของเทคนิคกลุ่ม proximity ผสมร่วมกับเทคนิคกลุ่ม scene analysis ซึ่งมีการพิจารณาข้อมูลของสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ให้บริการ เพื่อระบุชั้นที่ตั้งของวัตถุ และคำนวณหาพิกัดที่ตั้งของวัตถุในชั้นนั้นๆ

นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ได้แก่การพัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น ที่สามารถระบุชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ และระบุพิกัดของตำแหน่งวัตถุบนชั้นนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทดสอบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นพบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิคอื่น ทั้งในด้านของความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง รวมถึงความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล



## Abstract

This research presents a study and development of a hybrid technique for the wireless indoor positioning systems in the multiple-floor building. We consider characteristics of the received signal strength, the temperature and the relative humidity of the environment where the target node situates. The aim is to reduce the complexity and the run-time to compute the location of the target node. The proposed wireless indoor positioning technique applies the proximity technique together with the scene analysis technique that specifically takes into account the information of the environment in the service area to help indicate the coordinate of the target node.

Our key contribution is that the proposed wireless indoor positioning technique can efficiently indicate the floor where the target node locates and compute the coordinate where the target node situates on that floor.

Experimental results show that the proposed wireless indoor positioning technique outperform the other techniques in literature in term of the accuracy, the precision and the run-time complexity.

## สารบัญ

### หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อ .....	ข
Abstract .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญภาพ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	3
บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย .....	4
2.2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.3 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร .....	7
2.4 เทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร .....	8
2.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร .....	9
บทที่ 3 เทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น	
3.1 แนวคิดของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น .....	13
3.2 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้เทคนิคแบบผสม .....	14
3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น .....	15
3.2.1.1 แนวคิดของเทคนิคแบบผสม .....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1.2 การประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมในการหาตำแหน่งวัตถุ	19
3.2.2 การทำงานในช่วงออฟไลน์เฟส	22
3.2.2.1 ขั้นตอนการทำงานในช่วงออฟไลน์เฟส	22
3.2.2.2 โครงสร้างฐานข้อมูลตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	25
3.2.3 การทำงานในช่วงออนไลน์เฟส	27
3.2.3.1 ขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปร	27
3.2.3.2 ขั้นตอนการระบุชั้น	31
3.2.3.3 ขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ	35
3.3 การประเมินสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง	39
บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 การสร้างฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์สำหรับเทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น	41
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	41
4.1.2 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากโนคอ้างอิง	42
4.1.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	44
4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคการเลือกชั้น	49
4.2.1 ข้อกำหนดของการทดลอง	49
4.2.2 การวิเคราะห์ผลกรณีที่ 1	50
4.2.3 การวิเคราะห์ผลกรณีที่ 2	51
4.2.4 การทดสอบความถูกต้องของเทคนิคการเลือกชั้น	53
4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในอาคารที่มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น	
4.3.1 การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น	55
4.3.2 การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น	61
4.3.3 การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น	64

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งในอาคารที่มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น.....	70
4.4.1 ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น.....	71
4.4.2 ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น.....	74
4.4.3 ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น.....	76
4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง.....	79
4.5.1 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น.....	80
4.5.2 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น.....	81
4.5.3 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น.....	83
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	87
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	91
ประวัติผู้วิจัย.....	92



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคแบบผสม	15
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแบ่งระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	20
รูปที่ 3.3 แนวคิดของการนำข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมมาใช้ร่วมกับ การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์	21
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทำงานในช่วงออฟไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่ง ไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น	23
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงที่อยู่ภายในอาคาร 3 ชั้น	24
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำงานในช่วงออนไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่ง ไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น	27
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปรในช่วงออนไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสม	29
รูปที่ 3.8 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณ ณ ตำแหน่งวัตถุ	29
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการระบุชั้นของ Sum-RSS floor algorithm	32
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล	34
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ	35
รูปที่ 3.12 แนวคิดของกระบวนการกรองขั้นของขั้นตอนการระบุตำแหน่ง	36
รูปที่ 3.13 แนวคิดของกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของขั้นตอนการระบุตำแหน่ง	36
รูปที่ 3.14 แนวคิดของกระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก $k=4$	38
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการเก็บรวบรวมค่าความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้น	43
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม	44
รูปที่ 4.4 ข้อมูลอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ อาคารบรรณสารในช่วงเวลา 8.00 ถึง 18.00 น.	45
รูปที่ 4.5 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ณ อาคารบรรณสารในช่วงเวลา 8.00 ถึง 18.00 น.	46
รูปที่ 4.6 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมด้วยข้อมูลอุณหภูมิ	47
รูปที่ 4.7 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมด้วยข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์	47

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของงานวิจัยนี้.....	48
รูปที่ 4.9 แผนที่ของอาคารบรรณสาร.....	50
รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณที่ได้จากโนคอ้างอิงทั้ง 50 จุดทดสอบในชั้นที่ 3 (กรณีที่ 1).....	51
รูปที่ 4.11 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จาก โนคอ้างอิงในแต่ละชั้นของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีส้ม (กรณีที่ 2).....	52
รูปที่ 4.12 ช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของอาคาร 3 ชั้นของจุดทดสอบ ที่ไฮไลต์สีแดง (กรณีที่ 2).....	53
รูปที่ 4.13 ช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของอาคาร 6 ชั้นของจุดทดสอบ ที่อยู่บนชั้นที่ 3 (กรณีที่ 2).....	53
รูปที่ 4.14 ความถูกต้องของการระบุชั้นของแต่ละเทคนิค.....	54
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ของอาคารบรรณสาร 2 ชั้น (407 พิกัด).....	57
รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของจุดทดสอบของอาคารบรรณสาร 2 ชั้น (100 จุดทดสอบ).....	58
รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนของแต่ละเทคนิค (กรณีอาคาร 2 ชั้น).....	60
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่อยู่บนชั้นที่ 3 ของอาคารบรรณสาร (178 พิกัด).....	61
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3 ของอาคารบรรณสาร (50 จุดทดสอบ).....	62
รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนของแต่ละเทคนิค (กรณีอาคาร 3 ชั้น).....	63
รูปที่ 4.21 ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ของอาคาร NECTEC 6 ชั้น (1755 พิกัด).....	67
รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนของแต่ละเทคนิค (กรณีอาคาร 6 ชั้น).....	70
รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณี อาคาร 2 ชั้น.....	74
รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณี อาคาร 3 ชั้น.....	76
รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณี อาคาร 6 ชั้น.....	79

## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงคำนิยามของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในเทคนิคแบบผสมฯ ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้.....	16
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างฐานข้อมูลตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ของเทคนิคแบบผสม.....	26
ตารางที่ 3.3 โครงสร้างตารางข้อมูลคิบบิตตำแหน่งวัตถุ.....	30
ตารางที่ 3.4 โครงสร้างตารางข้อมูลพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งวัตถุ.....	31
ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมค่าความเข้มสัญญาณ.....	33
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สายที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนคอ้างอิงของจุดทดสอบ A.....	43
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของตำแหน่งที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม.....	45
ตารางที่ 4.4 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ.....	59
ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างของพิกัดฟิงเกอร์ปรี้นท์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร.....	60
ตารางที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างของพิกัดฟิงเกอร์ปรี้นท์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร.....	63
ตารางที่ 4.7 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ.....	68
ตารางที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างของพิกัดฟิงเกอร์ปรี้นท์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร.....	69
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น.....	72
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น.....	75
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น.....	78
ตารางที่ 4.12 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น.....	81
ตารางที่ 4.13 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น.....	82
ตารางที่ 4.14 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันระบบระบุตำแหน่งวัตถุ (positioning system) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายคือระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System: GPS) แต่ระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดคือไม่สามารถนำมาใช้หาพิกัดตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้ เนื่องจากสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสจะอ่อนตัวลงมากหรือไม่สามารถรับสัญญาณได้เลยที่อุปกรณ์ภาครับที่ตั้งไว้ภายในอาคาร เนื่องจากสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเหมาะสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายนอกอาคาร ซึ่งมีลักษณะการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมมายังวัตถุที่ต้องการหาตำแหน่งเป็นเส้นทางที่ไม่มีสิ่งกีดขวางที่เรียกว่า Line-of-Sight (LOS)

โครงสร้างทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมภายในอาคารนั้นมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าภายนอกอาคารมาก เนื่องจากมีสิ่งกีดขวางการเดินทางของสัญญาณ (Non-Line-of-Sight: NLOS) ดังนั้นระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่จะใช้ภายในอาคารจึงต้องอาศัยเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะใกล้ โดยประยุกต์ใช้เครือข่ายสื่อสารไร้สายมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐาน IEEE 802.11 และ มาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นต้น ส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างของเครือข่ายไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุในอาคารคือ โหนดอ้างอิง (Reference nodes) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณสำหรับใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุจะใช้ข้อมูลสัมพัทธ์ระหว่างโหนดอ้างอิงกับวัตถุที่ต้องการหาตำแหน่ง ข้อมูลดังกล่าวเช่น ระยะห่างระหว่างวัตถุกับโหนดอ้างอิง มุมระหว่างวัตถุกับโหนดอ้างอิง และความแรงสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโหนดอ้างอิง เป็นต้น ข้อมูลสัมพัทธ์ดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์สัญญาณที่วัตถุได้รับจากโหนดอ้างอิง ซึ่งคุณลักษณะของสัญญาณที่มีความแปรปรวนเนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมภายในอาคารมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ

เทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้ข้อมูลสัมพัทธ์ที่ไม่เหมาะสมในการบอกความสัมพันธ์ทางกายภาพระหว่างโหนดอ้างอิงกับวัตถุที่ต้องการหาตำแหน่ง จะส่งผลกระทบต่อระดับความถูกต้อง ความแม่นยำ และความซับซ้อนในการประมวลผลเพื่อคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ ดังนั้นการออกแบบเทคนิคขั้นตอน และการเลือกใช้ข้อมูลสัมพัทธ์ที่เหมาะสม เพื่อให้การคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุเป็นไป

อย่างถูกต้องและไม่ซับซ้อน จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการที่จะสามารถประยุกต์ใช้งานระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้อย่างหลากหลายและมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอการวิจัยและพัฒนาเทคนิคแบบผสมที่มีการพิจารณาข้อมูลสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่อาจมีโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น อาคารที่มีหลายชั้น เพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการระบุตำแหน่ง และลดความซับซ้อนของการประมวลผลเพื่อหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ ซึ่งเทคนิคที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบระบุตำแหน่งไร้สายได้อย่างหลากหลาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร และศึกษาพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมที่สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมโยงลักษณะทางกายภาพภายในอาคาร
2. เพื่อพัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาหลักการการทำงานของเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น
2. ศึกษาพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมที่สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมโยงลักษณะทางกายภาพภายในอาคาร เพื่อนำมาใช้พัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบุตำแหน่งวัตถุผ่านเครือข่ายไร้สาย
3. พัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของเทคนิคแบบผสมดังกล่าว
5. ทดลองและวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น

## 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหลักการการทำงานของเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น

2. ศึกษาพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมที่สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมโยงลักษณะทางกายภาพภายในอาคาร เพื่อนำมาใช้พัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุผ่านเครือข่ายไร้สาย
3. พัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของเทคนิคแบบผสมดังกล่าว
5. สร้างฐานข้อมูลสำหรับการทำงานของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น
6. ทดลองและวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับ : ได้เทคนิคการทำงานแบบใหม่สำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมในการระบุตำแหน่งวัตถุ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการประมวลผลเพื่อหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้จะป็นองค์ความรู้ในการวิจัยและการประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังได้บทความวิจัยที่มีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาศึกษาและวิจัย และได้ผลิตนักวิจัยซึ่งเป็นบัณฑิตระดับปริญญาโทที่มีคุณภาพ และมีประสบการณ์ในการทำงานวิจัยซึ่งสามารถผลิตผลงานที่มีประโยชน์ได้

หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่มีความสนใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานระบบระบุตำแหน่ง ไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น รวมถึงหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ที่ทำหน้าที่ดูแลและควบคุมระบบการทำงานของระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้สำหรับการหาพิกัดตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงานของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 2.1 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย หัวข้อ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.3 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร หัวข้อ 2.4 เทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร และหัวข้อ 2.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

#### 2.1 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารสามารถทำได้โดยอาศัยเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะใกล้ โดยประยุกต์ใช้เครือข่ายสื่อสารไร้สายมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐาน IEEE 802.11 และ มาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นต้น ส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างของเครือข่ายไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุในอาคารคือ โหนดอ้างอิง (Reference nodes) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณสำหรับใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยเทคนิคที่ใช้ในการหาคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุที่ได้มีการพัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ เทคนิคประเภท Triangulation [1-4] เทคนิคประเภท Scene analysis [5-7] และเทคนิคประเภท Proximity [8]

เทคนิคประเภท Triangulation เป็นวิธีที่ประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของสามเหลี่ยมในการคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ ซึ่งมี 2 แนวทางคือ วิธีที่คำนวณหาพิกัดโดยใช้ระยะทางระหว่างวัตถุกับโหนดอ้างอิงต่างๆ เรียกว่า Lateration [1-2] และวิธีที่คำนวณหาพิกัดโดยใช้ค่ามุมระหว่างวัตถุกับโหนดอ้างอิงต่างๆเรียกว่า Angulation [3] ในการหาระยะทางระหว่างวัตถุกับโหนดอ้างอิงเพื่อใช้ในการคำนวณแบบ Lateration สามารถทำได้โดยการแปลงจากค่าความแรงสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโหนดอ้างอิงเป็นค่าระยะทาง [1] หรือแปลงจากเวลาของการเดินทางของสัญญาณจากโหนดอ้างอิงถึงวัตถุเป็นค่าระยะทาง [2] เป็นต้น จากนั้นนำค่าระยะทางระหว่างวัตถุกับโหนดอ้างอิงที่ได้มาคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุโดยใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของสามเหลี่ยม เช่น กฎของคาร์เมอร์ [4] เป็นต้น

ส่วนเทคนิคประเภท Scene analysis เป็นวิธีที่หาพิกัดของตำแหน่งวัตถุโดยการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณที่วัตถุได้รับจากโหนดอ้างอิง เปรียบเทียบกับค่าในฐานข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูล



คุณลักษณะของสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆภายในอาคารที่ได้ทำการจัดเก็บและเตรียมไว้ล่วงหน้า จาก การเปรียบเทียบและจับคู่ลักษณะสัญญาณก็จะได้พิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยเทคนิคที่ใช้สำหรับการ จับคู่ลักษณะสัญญาณได้แก่ การใช้วิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น [5] การใช้วิธีเปรียบเทียบ ระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean distance) [6] และการใช้วิธีเครือข่ายประสาท (Neural networks) [7] เป็นต้น

สำหรับเทคนิคประเภท Proximity นั้นเป็นวิธีการบอกตำแหน่งวัตถุโดยการใช้โนดอ้างอิงใน การตรวจจับการปรากฏของวัตถุทางกายภาพ [8] หรือประเมินจากระดับสัญญาณที่วัตถุได้รับจาก โนดอ้างอิงแล้วประเมินว่าวัตถุอยู่ในรัศมีที่กำหนดไว้ของ โนดอ้างอิงใด [8] โดยมีการกำหนด หมายเลขประจำตัวให้กับ โนดอ้างอิง แล้วเปรียบเทียบว่าสัญญาณที่วัตถุได้รับจากโนดอ้างอิงใดมี ระดับสูงที่สุดแสดงว่าวัตถุอยู่ใกล้กับโนดอ้างอิงนั้น [8]

ในการปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพเทคนิคการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร โดยอาศัยการทำงานผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะไกลนั้น นักวิจัยสามารถประยุกต์ใช้เทคนิค ประเภทต่างๆดังกล่าวรวมกับการทำงานของระบบตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) ที่ ตรวจจับค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร และนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูล สัมพัทธ์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะสัญญาณจากเครือข่ายสื่อสารไร้สาย เพื่อให้ได้เทคนิคแบบผสมที่ สามารถหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.2 ปรัชน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาปรัชน์วรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่างานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาและพัฒนา เทคนิคในการหาพิกัดตำแหน่งวัตถุภายในอาคารโดยใช้เครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะไกลได้รับความ สนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถแบ่งงานวิจัยดังกล่าวตามลักษณะของ โครงสร้างสิ่งแวดล้อมของ อาคารหรือบริเวณที่พิจารณาในการพัฒนาเทคนิคต่างๆ ได้เป็น 3 กลุ่มคือ (1) งานวิจัยที่พิจารณาการ หาพิกัดตำแหน่งวัตถุในพื้นที่ระนาบเดียว กล่าวคือการพิจารณาพื้นที่ชั้นเดียวหรือพื้นที่บางส่วน ภายในชั้นใดชั้นหนึ่งของอาคาร [9-16] (2) งานวิจัยที่พิจารณาพื้นที่ในลักษณะ 3 มิติ โดยมีการระบุ พิกัด  $(x, y, z)$  ภายในบริเวณห้อง [17-19] และ (3) งานวิจัยที่พิจารณาพื้นที่ภายในอาคารแบบหลาย ชั้น [8]

งานวิจัยกลุ่มที่พิจารณาการหาพิกัดตำแหน่งวัตถุในพื้นที่ระนาบเดียว หรือพื้นที่บางส่วน ภายในชั้นใดชั้นหนึ่งของอาคาร [9-16] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุประเภท Triangulation และเทคนิคประเภท Scene analysis ซึ่งงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคประเภท Triangulation ได้แก่ งานวิจัยที่ [9] ระบุตำแหน่งของเป้าหมายด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าความเข้มของ



สัญญาณ โดยแบ่งพื้นที่ของการหาตำแหน่งออกเป็น โซนย่อย (sub-zone) งานวิจัยที่ [10] ได้พัฒนาขั้นตอนการวนซ้ำเกรเดียนต์แบบลดระดับ (descent gradient iteration algorithm) ที่ทำให้สามารถคำนวณตำแหน่งของวัตถุได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น งานวิจัยที่ [11] ใช้ค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength based: RSS based) เพื่อประมาณระยะทางระหว่างวัตถุและโนดอ้างอิง และหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของสามเหลี่ยม สำหรับงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคประเภท Scene analysis ได้แก่ งานวิจัยที่ [12] ซึ่งมีการตรวจสอบคุณสมบัติของค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ และศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะของการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้ง (location fingerprinting) งานวิจัยที่ [13] ให้แนวทางการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ใช้พื้นฐานของการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้งที่จะช่วยเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำ (precision) ให้กับระบบระบุตำแหน่งที่ใช้เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย งานวิจัยที่ [14] ใช้เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้ง และได้พัฒนาวิธีการจับคู่ดัชนีสัญญาณ (Signal Index Pair: SIP) ที่เป็นวิธีการเลือกค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และใช้การประมาณตำแหน่งด้วยวิธีการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด (K-Nearest Neighbor method: KNN method) งานวิจัยที่ [15] ใช้เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้ง โดยใช้วิธีการความน่าจะเป็นภายใต้เงื่อนไข (conditional probability) ของการแจกแจงฮิสโทแกรม (histogram) และงานวิจัยที่ [16] ใช้เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้ง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสภาพคงทน (robustness) ของระบบระบุตำแหน่งเมื่อมีจำนวนของโนดอ้างอิงจำนวนหนึ่งไม่ทำงาน

งานวิจัยกลุ่มที่พิจารณาพื้นที่ในลักษณะ 3 มิติ [17-19] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุประเภท Triangulation และเทคนิคประเภท Scene analysis เช่นเดียวกับงานวิจัยกลุ่มแรก โดยงานวิจัยที่ [17] ใช้เทคนิคประเภท triangulation และทำการจำลองระบบระบุตำแหน่งภายในบริเวณ 3 มิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบุพิกัดของเป้าหมายด้วยเทคนิคการวัดค่ามุมที่สัญญาณเดินทางมาถึง (Angle of Arrival: AOA) งานวิจัยที่ [18] จำลองระบบระบุตำแหน่งภายในบริเวณ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLAB และระบุพิกัดของเป้าหมายด้วยเทคนิคการวัดค่าความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึง (Time Difference of Arrival: TDOA) ส่วนงานวิจัยที่ [19] ใช้เทคนิค scene analysis โดยใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้งในบริเวณ 3 มิติ และหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุด้วยวิธีการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด (K-Nearest Neighbor method: KNN method) ส่วนงานวิจัยที่พิจารณาพื้นที่ภายในอาคารแบบหลายชั้นนั้นมีปรากฏใน [8] ซึ่งได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุประเภท Scene analysis ที่มีการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์

อร์ปรีนที่ติดตั้งในการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยพิจารณาเรื่องการลดการทำงานในขั้นตอนการเก็บข้อมูลในการสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนที่ติดตั้ง

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะให้ความสำคัญเกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิคในการระบุตำแหน่งวัตถุ โดยมีการพิจารณาโครงสร้างสิ่งแวดล้อมของอาคารหรือพื้นที่ในลักษณะต่างๆดังกล่าวแล้ว แต่เทคนิคที่นำเสนออีกเป็นการประยุกต์ใช้วิธีพื้นฐานประเภท Triangulation และ Scene analysis ซึ่งในการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุจะใช้ข้อมูลสัมพัทธ์ระหว่างโนดอ้างอิงกับวัตถุที่ต้องการหาตำแหน่ง ข้อมูลดังกล่าวเช่น ระยะห่างระหว่างวัตถุกับโนดอ้างอิง มุมระหว่างวัตถุกับโนดอ้างอิง และความแรงสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโนดอ้างอิง เป็นต้น ซึ่งยังไม่ได้มีการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของสิ่งแวดล้อมและการทำงานร่วมกับระบบตรวจรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Systems) ที่ตรวจจับค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร และนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลสัมพัทธ์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะสัญญาณจากเครือข่ายสื่อสารไร้สาย เพื่อพัฒนาเทคนิคแบบผสมที่สามารถหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุภายในบริเวณที่มีโครงสร้างพื้นที่ที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น โครงการวิจัยที่นำเสนอนี้จึงมุ่งศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการหาพิกัดตำแหน่งวัตถุสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยจะประยุกต์การทำงานร่วมกับระบบตรวจรู้ไร้สาย เพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ และลดความซับซ้อนของการประมวลผล ซึ่งเทคนิคที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบระบุตำแหน่งไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.3 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารโดยทั่วไป ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 2 ชนิดคือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งจะถูกติดตั้งให้อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร และมีการกำหนดชื่อหรือ Media Access Control address (MAC address) ที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการวัดค่าความเข้มสัญญาณ ซึ่งแต่ละงานวิจัยอาจมีชื่อเรียกของอุปกรณ์ชนิดนี้ที่แตกต่างกัน เช่น งานวิจัย [20] ของ Ali and Hassan (2011) เรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า Beacon งานวิจัย [21] ของ Bernardos et al. (2010) จะเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า anchor node งานวิจัย [22] ของ Fang et al. (2012) จะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า reference sensors ในงานวิจัย [14] ของ Hung et al. (2010) จะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า Base Station (BS) และงานวิจัย [5] ของ Kaemarungsi and Krishnamurthy (2004) เรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้ว่า Access Point (เนื่องจากใช้เทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b) สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า โหนดอ้างอิง (reference node : RN)

อุปกรณ์พื้นฐานชนิดที่สองคือ อุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งที่ตัววัตถุหรือสิ่งที่ต้องการระบุตำแหน่ง ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และมีคุณสมบัติในการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength : RSS) หรือตัวชี้บ่งคุณภาพของการเชื่อมโยง (Link Quality Indicator : LQI) เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยเทคนิคการระบุตำแหน่งชนิดต่าง ๆ ซึ่งแต่ละงานวิจัยอาจมีชื่อเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ที่ต่างกันไป เช่น งานวิจัย [23] ของ Al-Ahmadi et al. (2011) เรียกอุปกรณ์นี้ว่า mobile terminal งานวิจัย [14] ของ Hung et al. (2010) จะเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า Mobile Target (MT) งานวิจัย [24] ของ Mazuelas et al. (2009) เรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า Mobile Station (MS) และงานวิจัย [10] ของ Larranaga et al. (2010) เรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า Blind node สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า โหนดวัตถุ (target node) ซึ่งในส่วนของ การคำนวณหาผลลัพธ์และแสดงผลตำแหน่งวัตถุ สามารถดำเนินการได้ที่ตัวโหนดวัตถุโดยตรง หรืออาจส่งข้อมูลพารามิเตอร์ที่วัดได้ไปดำเนินการที่ส่วนควบคุมกลาง ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบระบบและอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่ง

## 2.4 เทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

เทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารมีหลายประเภทด้วยกัน ตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 (WLAN) ซึ่งได้มีหลายงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีนี้ได้แก่ งานวิจัย [25] ของ Alsehly et al. (2011), งานวิจัย [23] ของ Al-Ahmadi et al. (2011), งานวิจัย [26] ของ Esposito et al. (2009), งานวิจัย [6] ของ Gansemer et al. (2010), งานวิจัย [23] ของ Kaemarungsi (2005), งานวิจัย [27] ของ Kodippili and Dias (2010), งานวิจัย [24] ของ Mazuelas et al. (2009), งานวิจัย [28] ของ Ruppel et al. (2010) และ งานวิจัย [8] ของ Wang et al. (2010) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นเทคโนโลยีการสื่อสาร ไร้สายที่ถูกติดตั้งและใช้งานอยู่แล้วภายในอาคารทั่วไป ซึ่งแต่ละงานวิจัยอาจมีการเลือกใช้ช่วงความถี่ และอัตราการรับส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่เลือกใช้ เช่น อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้งานในช่วงความถี่ 5 GHz มีอัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 54 Mbps อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz มีอัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 11 Mbps อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11g ใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz มีอัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 54 Mbps อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE

802.11n ใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz มีอัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 300 Mbps เป็นต้น

นอกจากเทคโนโลยีข้างต้นแล้ว เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมและสามารถใช้งานได้หลากหลายวัตถุประสงค์คือ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ซึ่งมีคุณสมบัติการตรวจจับค่าทางกายภาพของสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแสง เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวทำงานในช่วงความถี่ 2.4 GHz และมีอัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 250 kbps ได้แก่ งานวิจัย [20] ของ Ali and Hassan (2011), งานวิจัย [19] ของ Bal et al. (2010), งานวิจัย [22] ของ Fang et al. (2012), งานวิจัย [14] ของ Hung et al. (2010), งานวิจัย [16] ของ Khauphung et al. (2008), งานวิจัย [29] ของ Kuflik et al. (2012) และ งานวิจัย [10] ของ Larranaga et al. (2010) เป็นต้น

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีงานวิจัยที่นำเทคโนโลยีในรูปแบบอื่นมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร เช่น งานวิจัย [30] ของ Kim et al. (2013) และ งานวิจัย [31] ของ Yong and Kavehrad (2012) ได้ใช้การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (VLC) ในการระบุตำแหน่งวัตถุ โดยกระบวนการทำงานของเทคโนโลยีประเภทนี้ จะมีการมอดูเลตสัญญาณแสงจากหลอดไฟ LED (ทำหน้าที่เป็นโนดอ้างอิง) เพื่อกำหนดค่า ID ให้กับหลอดไฟ LED แต่ละดวง แทนการใช้ค่า MAC address ของโนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่งวัตถุในแบบทั่วไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าไม่เพียงแต่เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐานต่าง ๆ เท่านั้นที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร แต่การใช้เทคโนโลยีชนิดอื่น ๆ เพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุ ก็เป็นอีกหนึ่งแนวคิดของระบบระบุตำแหน่งวัตถุในปัจจุบัน

## 2.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

ในการเปรียบเทียบสมรรถนะ (performance) ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพและประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ โดยค่าสมรรถนะของการระบุตำแหน่งของปริทัศน์วรรณกรรมมีดังนี้

### 2.5.1 Accuracy

สมรรถนะความถูกต้อง หรือ การบอกระยะความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งวัตถุจริงและตำแหน่งวัตถุที่หาได้จากการคำนวณ ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร หรือฟุต โดยงานวิจัยส่วนมากจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง ด้วยการคิดค้นหรือพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งที่สามารถระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้อย่างถูกต้อง หรือมีค่าความคลาดเคลื่อนที่

ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่มีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ดีมาก ๆ มักจะมี tradeoff ระหว่างสมรรถนะความถูกต้องกับสมรรถนะชนิดอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ความเหมาะสมหรือสมรรถนะที่ยอมรับได้ ระหว่างสมรรถนะความถูกต้องและสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล เป็นต้น

### 2.5.2 Precision

สมรรถนะความแม่นยำ หรือความเที่ยงตรง จะเป็นค่าที่รายงานช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) หรือเปอร์เซ็นต์ของการระบุตำแหน่งที่จะประสบผลสำเร็จ ซึ่งจะใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างระบบระบุตำแหน่งสองระบบ โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อน (Cumulative Distribution Function : CDF) ตัวอย่างเช่น ระบบระบุตำแหน่งชนิด ก. มีความแม่นยำของตำแหน่ง 90 % ภายใน 3.5 เมตร กับระบบระบุตำแหน่งชนิด ข. มีความแม่นยำของตำแหน่ง 90 % ภายใน 5 เมตร ดังนั้นในการเปรียบเทียบความแม่นยำของสองระบบนี้ ระบบระบุตำแหน่งที่ให้ความแม่นยำที่ดีกว่าคือ ระบบระบุตำแหน่งชนิด ก. (การระบุตำแหน่ง 90 ครั้งจาก 100 ครั้งของระบบระบุตำแหน่ง ก. จะมีค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งไม่เกิน 3.5 เมตร) เป็นต้น

### 2.5.3 Run-time complexity

ความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะบอกเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ภายในช่วงการระบุตำแหน่ง หรือระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุต่อหนึ่งตำแหน่ง ถ้าระบบระบุตำแหน่งวัตถุมีความซับซ้อนที่น้อย ระบบระบุตำแหน่งนั้นจะสามารถค้นหาตำแหน่งวัตถุได้รวดเร็วกว่าระบบระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนมาก อีกทั้งการพิจารณาสมรรถนะความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลยังพิจารณาถึงฟังก์ชันการเติบโตทางเวลา (growth in run-time) ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันที่ใช้อธิบายพฤติกรรมแนวโน้มการเติบโตทางเวลาของอัลกอริทึม ที่ช่วยให้เราสามารถประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งถ้าหากขนาด หรือจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบมีมากขึ้น

### 2.5.4 Robustness

ความทนทานของระบบระบุตำแหน่งจะพิจารณาจากระบบที่ยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำที่เพียงพอ หรือยอมรับได้ภายใต้การสถานการณ์ที่ย่ำแย่หรือสภาพแวดล้อมที่แปรปรวน ซึ่งจะพิจารณาจากฟังก์ชันปกติ (function normally) หรือการทำงานได้อย่างปกติ ตัวอย่างเช่น ระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ก. ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 10 โหนดไว้



ภายในอาคาร และที่ตำแหน่ง a. ในช่วงเวลาเช้าสามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้ ทั้ง 10 โนด (เป็นสถานการณ์ปกติ) ถัดมาทำการวัดค่าความเข้มสัญญาณในช่วงเวลาบ่าย ณ ที่ ตำแหน่งเดียวกันพบว่า ไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงตัวครบทั้ง 10 ตัว (เป็น สถานการณ์ไม่ปกติ) ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากโนดอ้างอิงเกิดความเสียหายขึ้น (เช่น งานวิจัย [16] ของ Khauphung et al., 2008) หรืออาจเกิดจากความแปรปรวนของค่าความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายใน อาคาร (เช่น งานวิจัย [6] ของ Gansemer et al., 2010) ดังนั้นในการพิจารณาความทนทานของระบบ นี้ จะพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องและสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ของทั้งสองสถานการณ์ว่า สถานการณ์ที่ไม่ปกติจะยังคงสามารถให้ผลสมรรถนะในการระบุ ตำแหน่ง ได้ใกล้เคียงกับสถานการณ์ปกติมากน้อยเพียงใด เป็นต้น ซึ่งระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่มี สมรรถนะความทนทานที่ดี ระบบระบุตำแหน่งนั้นจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ความ ถูกต้องและความแม่นยำ) ภายใต้อุปกรณ์

### 2.5.5 Scalability

ความยืดหยุ่น หรือความสามารถในการปรับตัว (adaptability) เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถ ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่มีพื้นที่การทดลองขนาดใหญ่ โดยปกติแล้วเมื่อระยะห่างระหว่าง โนดอ้างอิงและโนดวัตถุมากขึ้น ค่าความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงจะมีค่าน้อยลง ดังนั้น ถ้าผู้ออกแบบระบบเลือกตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิงไม่เหมาะสมพอ พื้นที่ภายในอาคาร บางส่วนอาจไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้ ส่งผลให้สมรรถนะความถูกต้อง ของระบบระบุตำแหน่งลดน้อยลง เช่น ในขั้นตอนการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้ เทคนิค RSS-Based จะต้องสามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้อย่างน้อย 3 โนด เป็นต้น หนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาคือ การพิจารณาเลือกตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิง เช่น งานวิจัย [26] ของ Esposito et al. (2009) ได้นำเสนอแนวทางในการเลือกจำนวนและตำแหน่งของโนดอ้างอิงที่ เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สัญญาณจากโนดอ้างอิงสามารถครอบคลุมได้ทั่วทั้งอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้ ผู้ออกแบบระบบยังต้องคำนึงถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ เช่น กำลังส่ง (transmit power) ชนิดของสายอากาศ และโครงสร้างภายในอาคาร (LOS, NLOS) เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะ ในการระบุตำแหน่งให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

### 2.5.6 Cost

Cost ที่เกิดจากระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารสามารถมาจาก cost ที่เกิดจากโครงสร้าง ของระบบ cost ที่เกิดจากการเพิ่มแบนด์วิดท์ (bandwidth) หรืออาจหมายถึง cost ในแง่ของเวลาที่ใช้

ในการติดตั้งอุปกรณ์ การสำรวจพื้นที่ และการเก็บรวบรวมข้อมูล ถ้าหากระบบระบุตำแหน่งใดสามารถนำเทคโนโลยีรับส่งสัญญาณ ไร้สายที่ถูกติดตั้งอยู่แล้วภายในอาคารมาใช้งานได้ ระบบระบุตำแหน่งนั้นจะสามารถประหยัด cost ที่มาจากโครงสร้างของระบบ และ cost ที่มาจากการเพิ่มแบนด์วิดท์ได้ ตัวอย่างเช่น งานวิจัย [13] ของ Kaemarungsi (2005) ได้ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่มีอยู่ภายในอาคาร ซึ่งนอกจากจะใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณข้อมูลแล้ว มันยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุได้อีกด้วย หรืองานวิจัย [8] ของ Wang et al. (2010) ได้นำเสนอวิธีการลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณเพื่อใช้สร้างพิกัดฟังก์ชันปริ้นท์ในช่วงออฟไลน์เฟส ซึ่งเป็นการช่วยลด cost ในแง่ของเวลาที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นต้น นอกจากนี้ในงานวิจัย [20] ของ Ali and Hassan (2011) ยังได้พิจารณา cost ในแง่ของราคาค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สายที่ใช้ต่อหน่วย และพิจารณา cost ในแง่ของการบริโภคพลังงาน (power consumption) ต่อวัน เพื่อคำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายในต่อปี



## บทที่ 3

### เทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สาย ภายในอาคารแบบหลายชั้น

สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นคือ เครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณสำหรับใช้ในกระบวนการวิเคราะห์หาตำแหน่งวัตถุ และเทคนิคที่ใช้สำหรับระบุตำแหน่งของวัตถุ รวมทั้งการเลือกใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ เพื่อจะทำให้ระบบระบุตำแหน่งสามารถบอกตำแหน่งของวัตถุได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และมีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ ซึ่งจะทำให้สามารถค้นหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย หัวข้อ 3.1 แนวคิดของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคาร หัวข้อ 3.2 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคแบบผสม ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น หัวข้อที่ 3.2.2 การทำงานในช่วงออฟไลน์เฟส และหัวข้อ 3.2.3 การทำงานในช่วงออนไลน์เฟส และสุดท้ายหัวข้อ 3.3 การประเมินสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุของงานวิจัยนี้

#### 3.1 แนวคิดของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น

เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพภายในอาคารแบบหลายชั้นมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าภายนอกอาคารมาก เพราะว่ามีสิ่งกีดขวางการเดินทางของสัญญาณ (Non-Line-of-Sight: NLOS) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอเทคนิคที่ใช้เครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะใกล้ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ที่ใช้งานในย่านความถี่สาธารณะสำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial Sciences Medicine band : ISM band) 2.4 GHz ซึ่งมีอัตราการรับส่งข้อมูล 250 kbps ซึ่งเพียงพอสำหรับการส่งข้อมูลที่ใช้ในการทำงานของระบบ นอกจากนี้อุปกรณ์ยังมีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ สามารถสร้างการเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายได้สูงสุด 255 โหนดต่อหนึ่งเครือข่าย และสามารถวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ หรือตัวชี้บอกคุณภาพการเชื่อมโยง (Link Quality Indicator : LQI) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของวัตถุ



เทคนิคแบบผสมสำหรับระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ เป็นการผสมระหว่างการทำงานของเทคนิคกลุ่ม proximity และเทคนิคกลุ่ม scene analysis โดยประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม proximity ในการระบุชั้นที่ตั้งของวัตถุ และประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม scene analysis สำหรับการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุในชั้นนั้นๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าในฐานข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆภายในอาคารที่ได้ทำการจัดเก็บและเตรียมไว้ล่วงหน้า โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของบริเวณที่วัตถุอยู่ ในการเลือกกลุ่มข้อมูลในฐานข้อมูลที่จะนำมาพิจารณาให้เหลือน้อยลง เพื่อลดความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลหาพิกัดตำแหน่งวัตถุ

### 3.2 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้เทคนิคแบบผสม

รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ 4 ส่วน คือ

(1) อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่เรียกว่า โหนดอ้างอิง (Reference Node: RN) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณอ้างอิงสำหรับการประเมินผลเพื่อหาตำแหน่งวัตถุ โดยที่โหนดอ้างอิงนี้จะถูกติดตั้งอยู่ที่จุดต่างๆ ของอาคาร

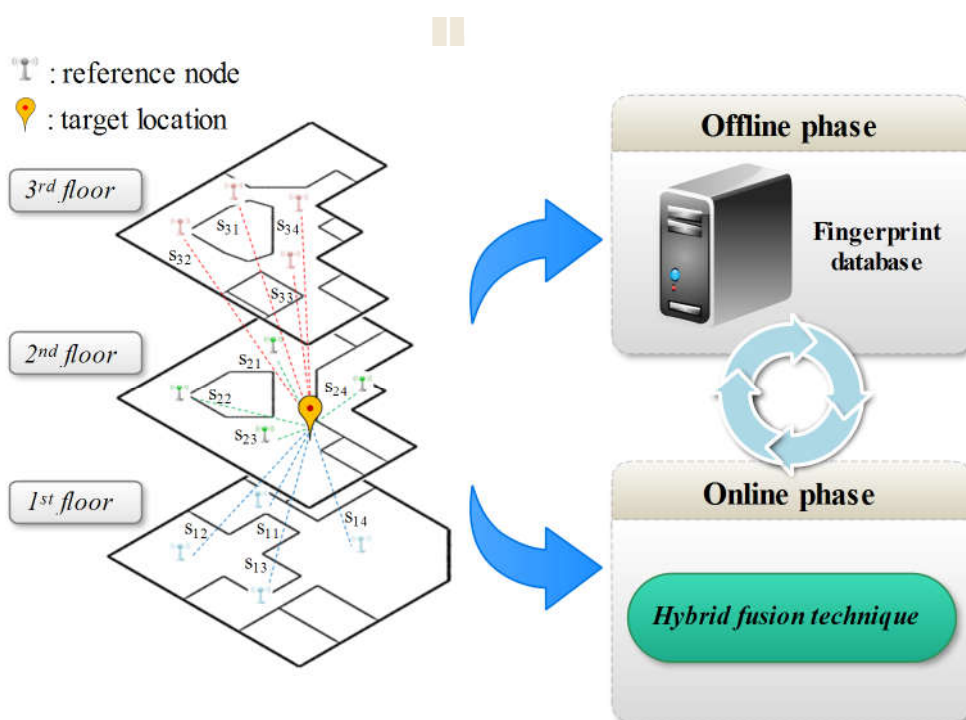
(2) อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่เรียกว่า โหนดวัตถุ (target node) ทำหน้าที่ร้องขอสัญญาณจากโหนดอ้างอิง รวมถึงวัดค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของบริเวณที่วัตถุอยู่ แล้วส่งข้อมูลค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ไปให้หน่วยประมวลผลซึ่งทำหน้าที่วิเคราะห์หาพิกัดของตำแหน่งวัตถุต่อไป จากรูปที่ 3.1 เส้นประแต่ละสี แสดงเส้นทางการรับข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณจากโหนดอ้างอิงในแต่ละชั้น

(3) ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนต์ (fingerprint database) เป็นฐานข้อมูลที่เก็บข้อมูลความแรงสัญญาณ ค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนต์ (fingerprint location) ต่างๆ ซึ่งจะต้องมีการกำหนดให้ครอบคลุมบริเวณให้บริการของระบบ โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนต์ ที่กำหนดเรียกว่า grid spacing จากนั้นค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่ง รวมถึงค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์จะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูล โดยการเก็บข้อมูลเหล่านี้ต้องทำไว้ล่วงหน้า ซึ่งการทำงานในขั้นตอนนี้จัดอยู่ในช่วงออฟไลน์เฟส (offline phase)

(4) หน่วยประมวลผล (processing unit) เป็นส่วนที่ทำการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยใช้เทคนิคแบบผสมที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งให้ชื่อว่า Hybrid fusion technique ซึ่งมีหลักการทำงานคือ ใช้ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของบริเวณที่วัตถุอยู่ ในการเลือกกลุ่มข้อมูลในฐานข้อมูลที่จะนำมาพิจารณาให้เหลือน้อยลง จากนั้นจึง

ทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้กับค่าในฐานข้อมูล ซึ่งการทำงานในขั้นตอนนี้จัดอยู่ในช่วงออนไลน์เฟส (online phase)

เนื้อหาที่เหลือของหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดการทำงานของเทคนิคแบบผสมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น หัวข้อที่ 3.2.2 การทำงานในช่วงออฟไลน์เฟส และหัวข้อ 3.2.3 การทำงานในช่วงออนไลน์เฟส



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคแบบผสม

### 3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น

ในหัวข้อนี้จะอธิบายภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคแบบผสม ประกอบด้วยหัวข้อย่อย 3.2.1.1 แนวคิดของเทคนิคแบบผสม และหัวข้อย่อย 3.2.1.2 การประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมในการหาตำแหน่งวัตถุ

ตารางที่ 3.1 แสดงคำนิยามของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในเทคนิคแบบผสมฯ ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

ตัวแปร	คำนิยาม
$x_o$	คือ พิกัด $x$ ของโนควัตถุ (เมตร)
$y_o$	คือ พิกัด $y$ ของโนควัตถุ (เมตร)
$z_o$	คือ ชั้นอาคารของโนควัตถุ
$x_i$	คือ พิกัด $x$ ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ (เมตร)
$y_i$	คือ พิกัด $y$ ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ (เมตร)
$z_i$	คือ ชั้นอาคารของฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$
$Q(\alpha\%)$	คือ เปอร์เซ็นไทล์ของข้อมูลที่ $\alpha$ เปอร์เซ็นต์
$\alpha$	คือ ค่าควอนไทล์ หรือค่าที่แสดงตำแหน่งของข้อมูล
$F_i$	คือ ตำแหน่งของฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$
$\Omega_i$	คือ เวกเตอร์ของความเข้มสัญญาณที่ฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ รับผิดชอบได้จากโนคอ้างอิงที่ตั้งอยู่ในชั้น 1 ถึง $\phi$
$R_f^i$	คือ เวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ รับผิดชอบได้จากชั้น $f$
$r_{fn}^i$	คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ รับผิดชอบได้จากโนคอ้างอิง $n$ ที่ตั้งอยู่บนชั้น $f$ (dBm)
$\Omega_o$	คือ เวกเตอร์ของความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งวัตถุรับผิดชอบได้จากโนคอ้างอิงที่ตั้งอยู่ในชั้น 1 ถึง $\phi$
$S_f$	คือ เวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งวัตถุรับผิดชอบได้จากชั้น $f$
$s_{fn}$	คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่งวัตถุรับผิดชอบได้จากโนคอ้างอิง $n$ ที่ตั้งอยู่บนชั้น $f$ (dBm)
$T_o$	คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งวัตถุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_i$	คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$H_o$	คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งวัตถุ (%)
$H_i$	คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$ (%)
$L_o$	คือ ระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งวัตถุ
$L_i$	คือ ระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ $i$
$N$	คือ จำนวนของโนคอ้างอิงทั้งหมดในแต่ละชั้น

ตารางที่ 3.1 แสดงคำนิยามของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในเทคนิคแบบผสมฯ ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

ตัวแปร	คำนิยาม
$\phi$	คือ จำนวนของชั้นอาคารทั้งหมดที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่ง (floor)
$g$	คือ ระยะห่างของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนธ์ (grid spacing) (เมตร)
$M$	คือ จำนวนข้อมูลฟังก์เจอร์ปรีนธ์ทั้งหมดในฐานข้อมูล
$M_2$	คือ จำนวนข้อมูลฟังก์เจอร์ปรีนธ์ที่ผ่านกระบวนการกรองชั้น
$M_1$	คือ จำนวนข้อมูลฟังก์เจอร์ปรีนธ์ที่ผ่านกระบวนการกรองชั้นและกระบวนการกรองระดับอนุภูมิภาค
$\Phi(\Lambda_f)$	คือ ช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของชั้นอาคาร $f$
$\gamma_f^\tau$	คือ ผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของการวัดครั้งที่ $\tau$ ของโนดอ้างอิงทุกตัวที่อยู่บนชั้น $f$ (dBm)
$\rho_{fn}^\tau$	คือ ค่าความเข้มสัญญาณของการวัดครั้งที่ $\tau$ ที่รับได้จากโนดอ้างอิง $n$ ที่ตั้งอยู่บนชั้น $f$ (dBm)
$\Gamma$	คือ จำนวนการวัดข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ
$\eta$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลผลรวมความเข้มสัญญาณ (dBm)
$\sigma^2$	คือ ค่าความแปรปรวนของผลรวมความเข้มสัญญาณ (dBm)
$\mu$	คือ ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในช่วงความเชื่อมั่น
$\beta$	คือ ความน่าจะเป็นที่จะประมาณช่วงชุดข้อมูลผิดพลาด
$d_j$	คือ ค่าระยะห่างยูคลิเดียนของพิกัดฟังก์เจอร์ปรีนธ์ $j$
$\delta_u$	คือ ค่าระยะห่างยูคลิเดียนน้อยที่สุดลำดับที่ $u$
$k$	คือ จำนวนตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด
$w_u$	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดลำดับที่ $u$

### 3.2.1.1 แนวคิดของเทคนิคแบบผสม

เทคนิคการระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มเทคนิค triangulation กลุ่มเทคนิค scene analysis และกลุ่มเทคนิค proximity ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคแบบผสมซึ่งเป็นการผสมระหว่างกลุ่มเทคนิค proximity และกลุ่มเทคนิค scene analysis เพื่อระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้น โดยการทำงานของระบบระบุตำแหน่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทำงานคือ ช่วงออฟไลน์เฟสและช่วงออนไลน์เฟส สำหรับในช่วงออฟไลน์เฟสจะเป็นช่วงเตรียมการ โดยจะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลและสร้าง

เป็นฐานข้อมูลตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ ถัดมาในช่วงออนไลน์เฟสจะเป็นช่วงที่ดำเนินการประมวลผลเพื่อหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ ซึ่งจะใช้ข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

การทำงานของเทคนิคแบบผสมที่พัฒนาขึ้น แบ่งขั้นตอนการทำงานเป็น 3 ขั้นตอนคือ

- (1) ขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปร เป็นการกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับระบบ และมีการแบ่งระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (หัวข้อ 3.2.1.2 อธิบายหลักการการแบ่งระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม)
- (2) ขั้นตอนการระบุชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ ขั้นตอนนี้ประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม proximity ในการระบุชั้นวัตถุอยู่ โดยประเมินจากค่าความเข้มสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโนดอ้างอิง ผู้วิจัยให้ชื่ออัลกอริทึมการระบุชั้นที่ได้พัฒนาขึ้น ว่า Sum-RSS floor algorithm โดยอัลกอริทึมนี้พิจารณาช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ของผลรวมความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้น และจะเลือกชั้นที่มีช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความเข้มสัญญาณมากที่สุดเป็นชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ ( $z_0$ ) (หัวข้อ 3.2.3.2 อธิบายขั้นตอนการระบุชั้น)
- (3) ขั้นตอนการระบุพิกัดของวัตถุ ( $x_0, y_0$ ) ในชั้นที่เลือกไว้ในข้อ (2) ซึ่งการทำงานของขั้นตอนนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม scene analysis กล่าวคือจะมีการเปรียบเทียบข้อมูลที่เก็บไว้ในฐานข้อมูลเมื่อประมวลผลหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยขั้นตอนที่ (3) นี้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 กระบวนการคือ (3.1) กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิ (temperature level-filter) (3.2) กระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลีเดียน (calculation euclidean distance) และ (3.3) กระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวน (calculation Weighted K-Nearest Neighbor : WKNN) สุดท้ายจะได้ตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ภายในอาคารแบบหลายชั้น ( $x_0, y_0, z_0$ ) (หัวข้อ 3.2.3.3 อธิบายขั้นตอนการระบุพิกัดของวัตถุ ( $x_0, y_0$ ))

รายละเอียดการทำงานของแต่ละขั้นตอนจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

### 3.2.1.2 การประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมในการหาตำแหน่งวัตถุ

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์นำค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ให้บริการของระบบระบุตำแหน่งวัตถุมาพิจารณาร่วมกับการใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้รับได้จากโนคอ้างอิงเพื่อช่วยในการประมวลผลหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุให้มีสมรรถนะมากยิ่งขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์นั้นประกอบด้วยค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ผู้วิจัยได้นิยามพารามิเตอร์อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ดังต่อไปนี้

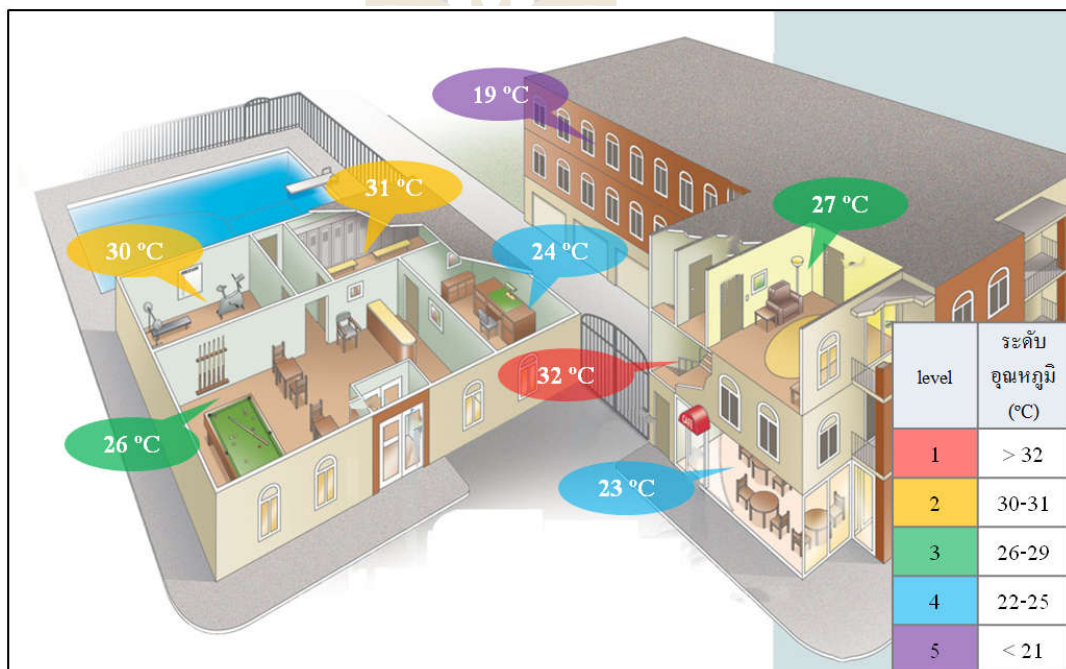
- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (temperature) หมายถึง ระดับความร้อนหรือระดับความเย็นที่สามารถบอกค่าได้เป็นตัวเลขที่แน่นอน มีหน่วยเป็นเคลวิน (Kelvin : K) หรือองศาเซลเซียส (degree Celsius : °C) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้หน่วยองศาเซลเซียส
- ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity: RH) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้น (หรือไอน้ำ) ที่มีอยู่จริงในอากาศ กับปริมาณความชื้นที่อากาศขณะนั้นสามารถรองรับได้ ณ อุณหภูมิที่เดียวกัน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของการแบ่งระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของอาคารทั่วไป จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิของแต่ละห้องมีความแตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมของแต่ละห้องมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างรูปที่ 3.2 แบ่งระดับอุณหภูมิ 5 ระดับคือ

- ระดับอุณหภูมิที่ 1 (แทนด้วยสีแดง) สำหรับพื้นที่ที่มีค่าอุณหภูมิมากกว่า 32 องศาเซลเซียส พื้นที่เหล่านั้นได้แก่ ส่วนที่เป็นบันได คาดฟ้า ระเบียงคอกหรือทางเดินเชื่อมตึก รวมทั้งบริเวณที่เป็นลานจอดรถ เป็นต้น
- ระดับอุณหภูมิที่ 2 (แทนด้วยสีเหลือง) เป็นพื้นที่ที่มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 ถึง 31 องศาเซลเซียส ได้แก่ ห้องออกกำลังกาย ห้องเปลี่ยนเสื้อผ้า และห้องเก็บครุภัณฑ์ เป็นต้น
- ระดับอุณหภูมิที่ 3 (แทนด้วยสีเขียว) เป็นพื้นที่ที่มีระดับอุณหภูมิปานกลางมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 26 ถึง 29 องศาเซลเซียส อาทิเช่น ห้องนั่งเล่น ห้องรับแขก มุมอ่านหนังสือ ห้องโถง ห้องครัว และห้องนอน เป็นต้น
- ระดับอุณหภูมิที่ 4 (แทนด้วยสีฟ้า) เป็นพื้นที่ที่มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 22 ถึง 25 องศาเซลเซียส ได้แก่ ห้องทำงาน ห้องรับประทานอาหาร และห้องประชุม เป็นต้น
- ระดับอุณหภูมิที่ 5 (แทนด้วยสีม่วง) เป็นพื้นที่ที่มีค่าอุณหภูมिन้อยกว่า 21 องศาเซลเซียส ได้แก่ ห้องเซิร์ฟเวอร์ และห้องบ่มเพาะ เป็นต้น

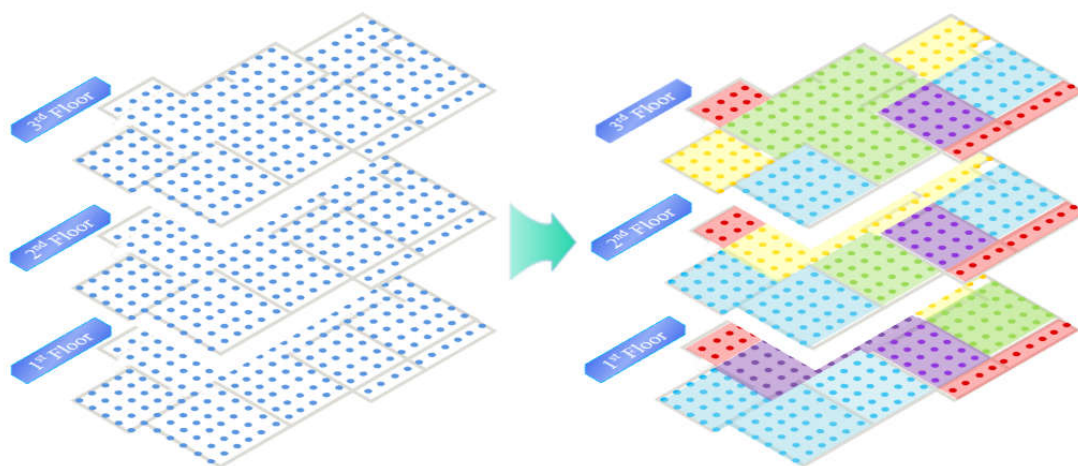


จากตัวอย่างข้างต้นเป็นแนวคิดของการนำค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ เพื่อจำแนกและแบ่งพื้นที่ของสิ่งแวดล้อมที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน อย่างไรก็ตามจากการทดลองเบื้องต้นที่ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์การใช้ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถจัดระดับของสิ่งแวดล้อมได้ทุกสถานการณ์ ตัวอย่างเช่น สภาพภูมิอากาศของวันปรกติจะสามารถวัดค่าอุณหภูมิของพื้นที่ที่อยู่ในห้องแอร์ได้ประมาณ 22 ถึง 25 องศาเซลเซียส (จัดอยู่ในระดับอุณหภูมิที่ 4) แต่ถ้าหากสภาพภูมิอากาศเกิดความแปรปรวน อาทิเช่น ค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของวันนั้นสูงขึ้นกว่าวันอื่น ๆ ในรอบสัปดาห์ ส่งผลให้พื้นที่ภายในอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าปรกติ ดังนั้นการใช้ค่าอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศของงานวิจัยนี้ คือ การนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้ร่วมกับค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมที่เก็บบันทึกได้จากการทดลอง (ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.3) พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์จะแปรผันตามสภาพภูมิอากาศของสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าค่าอุณหภูมิ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำค่าความชื้นสัมพัทธ์มาใช้ร่วมกับค่าอุณหภูมิสำหรับการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เพื่อแก้ปัญหาความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ และทำให้ระบบสามารถจำแนกระดับอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันได้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแบ่งระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

รูปที่ 3.3 แสดงแนวคิดของการนำค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมมาใช้ ร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ จากแผนภาพชั้นอาคารทางด้านซ้ายมือ จุดสีฟ้าแต่ละจุด หมายถึงฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่อยู่ภายในอาคารขนาด 3 ชั้น โดยในแต่ละฟังก์เจอร์จะมีการเก็บรวบรวม ข้อมูลพารามิเตอร์ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้รับได้จากโนดอ้างอิง ซึ่งเป็นรูปแบบการสร้างฐานข้อมูล ฟังก์เจอร์ปริ้นท์ของงานวิจัยทั่วไป แต่สำหรับการสร้างฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ของงานวิจัยนี้ แต่ละ ฟังก์เจอร์จะมีการวัดค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ด้วย เพื่อใช้สำหรับการ จำแนกพื้นที่ของสิ่งแวดล้อมออกเป็นโซน โดยแต่ละโซนมีค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้แนวคิดของการแบ่งระดับอุณหภูมิที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นแต่ละ ฟังก์เจอร์ปริ้นท์จะสามารถจำแนกด้วยระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมได้ซึ่งแทนด้วยสีที่แตกต่างกัน โดยแสดงแผนภาพชั้นอาคารในรูปที่ 3.3 ทางด้านขวามือ



รูปที่ 3.3 แนวคิดของการนำข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมมาใช้ ร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์



### 3.2.2 การทำงานในช่วงออฟไลน์เฟส

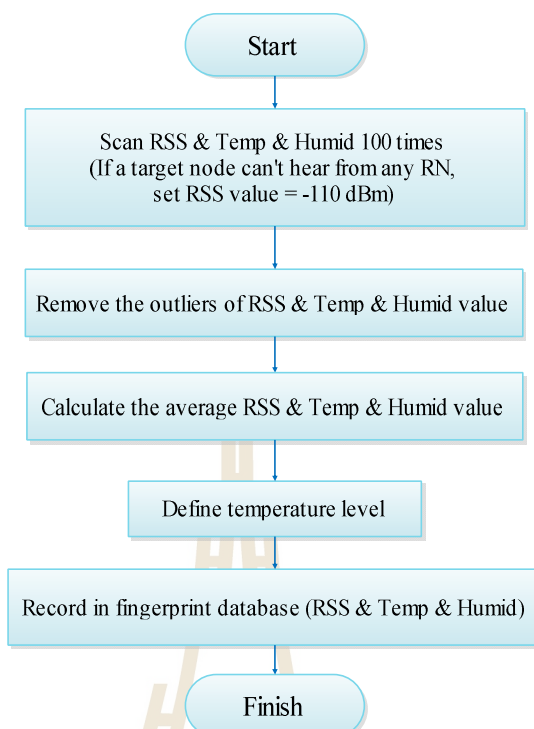
ในขั้นตอนออฟไลน์เฟสเป็นขั้นตอนเตรียมงานก่อนจะระบุตำแหน่งวัตถุ โดยที่ตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ที่กำหนดไว้ จะมีการเก็บบันทึกข้อมูลที่ประกอบด้วย ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จาก โหนดอ้างอิงที่ติดตั้งไว้แล้วในพื้นที่ให้บริการ รวมถึงการเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมด้วย เพื่อนำไปสร้างเป็นฐานข้อมูลที่เรียกว่า ฐานข้อมูลตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์

ในกระบวนการกำหนดตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ (location fingerprint) ที่ใช้เป็นตำแหน่งสำหรับวัดข้อมูลต่าง ๆ นั้น จะถูกกำหนดให้มีระยะห่างแต่ละพิกัดเท่ากัน เรียกระยะดังกล่าวว่า ระยะห่างของตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ (grid spacing:  $g$ ) ในงานวิจัย [13] ของ Kaemarungsi (2005) ได้มีการพิจารณาการระบุตำแหน่งวัตถุภายในบริเวณระนาบเดียว ซึ่งได้มีการทดลองเลือกใช้ระยะห่างของตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ระยะต่างๆ และพบว่า ถ้าระยะห่างของตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์  $g > 1.25$  เมตร จะทำให้ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าระยะห่างของตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์มากเกินไปจะทำให้ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งลดลง และงานวิจัยดังกล่าวยังให้แนวทางในการเลือกจำนวนของโหนดอ้างอิงที่ติดตั้งในอาคารว่า ถ้าหากจำนวนของโหนดอ้างอิงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 โหนด ( $N \geq 4$ ) จะส่งผลให้ระบบระบุตำแหน่งมีความถูกต้องและความแม่นยำเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยที่ผู้วิจัยนำเสนอในโครงการนี้จึงกำหนดระยะห่างของตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ให้มีค่ามากกว่า 1.25 เมตร แต่ไม่เกิน 4 เมตร และในแต่ละชั้นจะทำการติดตั้งโหนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนด

#### 3.2.2.1 ขั้นตอนการทำงานในช่วงออฟไลน์เฟส

รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการทำงานในช่วงออฟไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสมสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยมีลำดับการทำงานดังนี้

- (1) เก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อสร้างฐานข้อมูลตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ ซึ่งจะมีการเก็บบันทึกค่าข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้ ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมจำนวน 100 ครั้งต่อหนึ่งตำแหน่งฟังก์เกอร์ปรีนท์ (ใช้เวลาประมาณ 5 นาทีต่อหนึ่งตำแหน่ง) ในการวัดค่าความเข้มสัญญาณจากโหนดอ้างอิงแต่ละครั้ง ถ้าหากโหนดวัตถุไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโหนดอ้างอิงได้ สาเหตุอาจเกิดจากโหนดอ้างอิงอยู่ไกลจากโหนดวัตถุมาก หรือเส้นทางของการรับส่งสัญญาณอาจถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ภายในอาคาร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจะกำหนดให้ค่าความเข้มสัญญาณในการวัดครั้งนั้นมีค่าเท่ากับ -110 dBm หรืออีกความหมายคือ สัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงมีค่าอ่อนมาก



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทำงานในช่วงออฟไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น

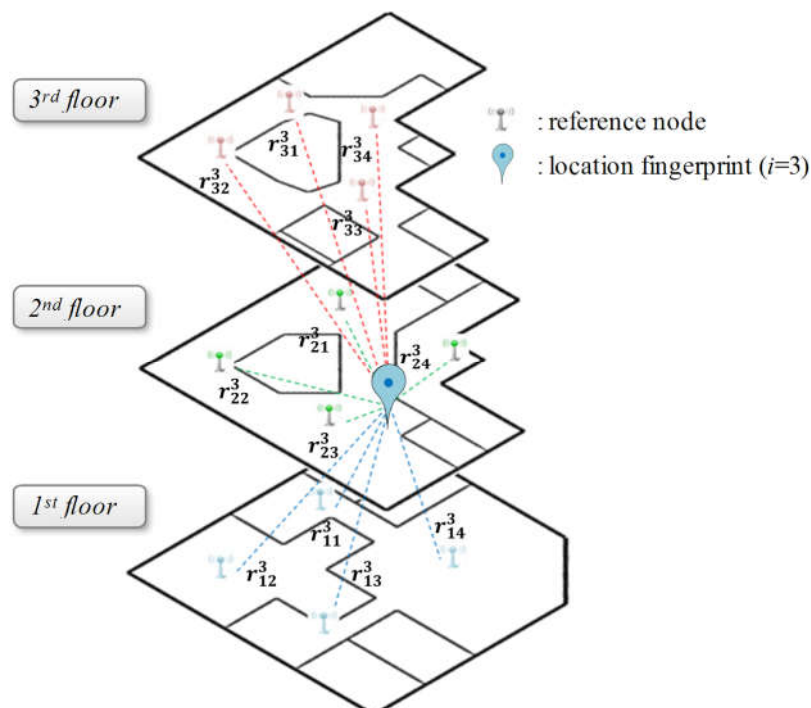
- (2) เมื่อทำการวัดข้อมูลความเข้มสัญญาณ ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ครบจำนวน 100 ครั้งแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการใช้กระบวนการกรองข้อมูล (data filter) เพื่อคัดเลือกรายข้อมูลที่ผิดปกติของชุดข้อมูลนั้น ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จะกรองข้อมูลความเข้มของสัญญาณ ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีเปอร์เซ็นต์ไทล์ (percentile) เพื่อกำจัดค่าผิดปกติ (outliers) ของข้อมูล ถ้าหากข้อมูลความเข้มของสัญญาณ ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมไม่อยู่ในช่วงขอบเขต (bounds) ที่ได้กำหนดไว้ ข้อมูลดังกล่าวจะถูกตัดทิ้งสำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ 90 เปอร์เซนต์ไทล์ (90-percentile) เป็นขอบเขตสูงสุดของชุดข้อมูล และใช้ 10 เปอร์เซนต์ไทล์ (10-percentile) เป็นขอบเขตต่ำสุดของชุดข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น[32] (Jain, 1991)

สมการที่ใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไทล์แสดงดังสมการที่ 3.1 เมื่อ  $Q(\alpha\%)$  หมายถึง เปอร์เซนต์ไทล์ของข้อมูลที่  $\alpha$  เปอร์เซนต์ และ  $num$  หมายถึงจำนวนข้อมูลของชุดข้อมูลนั้น ๆ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 และค่า  $\alpha$  หมายถึง ค่าควอนไทล์ (quantiles) หรือค่าที่แสดงตำแหน่งของชุดข้อมูล

$$Q(\alpha\%) = \left[ (num - 1) \left( \frac{\alpha}{100} \right) + 1 \right]^{th} \text{ element} \quad (3.1)$$

- (3) จากนั้นนำข้อมูลที่ผ่านกระบวนการกรองข้อมูลไปหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล
- (4) ทำการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Define temperature level) โดยนำค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ไปดำเนินการในขั้นตอนการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมตามแนวคิดของหัวข้อที่ 3.2.1.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลระดับอุณหภูมิของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ (สำหรับตัวอย่างการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.3)
- (5) จากนั้นเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้ลงในฐานข้อมูลตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ และสิ้นสุดกระบวนการในขั้นตอนออฟไลน์เฟส

รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงที่อยู่ภายในอาคาร 3 ชั้น เมื่อวงกลมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ 3 ( $i=3$ ) โดยที่มีการติดตั้งโนดอ้างอิงในแต่ละชั้นจำนวน 4 โหนด เส้นประแต่ละเส้นแทนเส้นทางที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่าง โหนดวัตถุและโนดอ้างอิง



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จาก โหนดอ้างอิงที่อยู่ภายในอาคาร 3 ชั้น

### 3.2.2.2 โครงสร้างฐานข้อมูลตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ฐานข้อมูลตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ด้วยเซต  $\{F_1, F_2, \dots, F_p, \dots, F_m\}$  เมื่อ  $m$  หมายถึงจำนวนข้อมูลฟingereอร์ปรีนทร์ โดย  $F_i$  เป็นเวกเตอร์ของข้อมูลของตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$  ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูล 7 อย่างคือ  $[x_i, y_i, z_i, T_i, H_i, L_i, \Omega_i]$  เมื่อ

$x_i$  คือ พิกัด  $x$  ของฐานข้อมูลฟingereอร์ปรีนทร์  $i$

$y_i$  คือ พิกัด  $y$  ของฐานข้อมูลฟingereอร์ปรีนทร์  $i$

$z_i$  คือ ชั้นอาคารของตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$

$T_i$  คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$  มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H_i$  คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$  มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$L_i$  คือ ระดับของอุณหภูมิที่ได้จากการแบ่งระดับอุณหภูมิของตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$

$\Omega_i$  คือ เวกเตอร์ความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$  รับผิดชอบได้จากโหนดอ้างอิงที่ตั้งอยู่ในชั้นที่ 1 ถึงชั้น  $\phi$  ของอาคารที่พิจารณา โดยที่  $\Omega_i = [R_{1i}^i, R_{2i}^i, \dots, R_{\phi i}^i, \dots, R_{\phi i}^i]$  เมื่อ  $R_{fi}^i$  คือ เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$  รับผิดชอบได้จากโหนดอ้างอิงที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  โดยที่  $R_{fi}^i = [r_{f1i}^i, r_{f2i}^i, \dots, r_{fni}^i, \dots, r_{fNi}^i]$  เมื่อ  $r_{fn}^i$  หมายถึงค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์  $i$  รับผิดชอบได้จากโหนดอ้างอิง  $n$  ที่อยู่บนชั้น  $f$  เมื่อ  $N$  หมายถึงจำนวนโหนดอ้างอิงทั้งหมดที่ติดตั้งในแต่ละชั้น และ  $\phi$  หมายถึงจำนวนชั้นของอาคารที่ใช้ระบบระบุตำแหน่ง ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่างฐานข้อมูลตำแหน่งฟingereอร์ปรีนทร์ของเทคนิคแบบผสมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

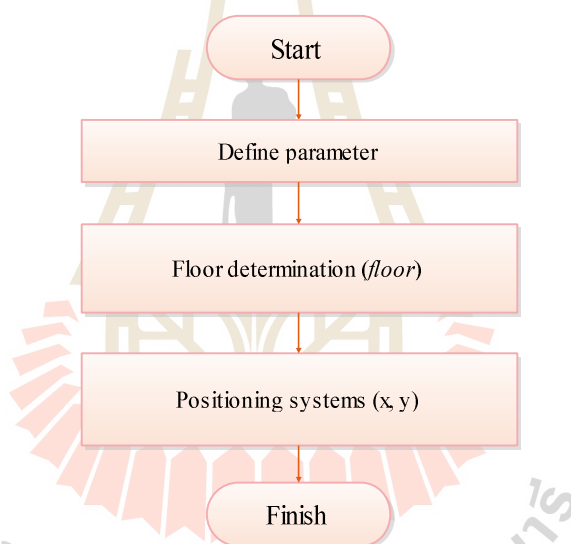
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างฐานข้อมูลตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรินท์ของเทคนิคแบบผสม

พิกัดฟังก์เจอร์ปรินท์ $F_i$	พิกัด $x_i$	พิกัด $y_i$	พิกัด $z_i$	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ $T_i$ (°C)	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์	ระดับอุณหภูมิ $L_i$	เวกเตอร์ค่าเฉลี่ย RSS $R_i$	ค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณที่รับได้ $r_{fn}^i$ (dBm)				
								$n=1$	$n=2$	$n=3$	...	$n=N$
1	$x_1$	$y_1$	$z_1$	$T_1$	$H_1$	$L_1$	$R_1^1$	$r_{11}^1$	$r_{12}^1$	$r_{13}^1$	...	$r_{1N}^1$
							$R_2^1$	$r_{21}^1$	$r_{22}^1$	$r_{23}^1$	...	$r_{2N}^1$
							...	...	...	...	...	...
							$R_{\phi}^1$	$r_{\phi 1}^1$	$r_{\phi 2}^1$	$r_{\phi 3}^1$	...	$r_{\phi N}^1$
2	$x_2$	$y_2$	$z_2$	$T_2$	$H_2$	$L_2$	$R_1^2$	$r_{11}^2$	$r_{12}^2$	$r_{13}^2$	...	$r_{1N}^2$
							$R_2^2$	$r_{21}^2$	$r_{22}^2$	$r_{23}^2$	...	$r_{2N}^2$
							...	...	...	...	...	...
							$R_{\phi}^2$	$r_{\phi 1}^2$	$r_{\phi 2}^2$	$r_{\phi 3}^2$	...	$r_{\phi N}^2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$m$	$x_m$	$y_m$	$z_m$	$T_m$	$H_m$	$L_m$	$R_1^m$	$r_{11}^m$	$r_{12}^m$	$r_{13}^m$	...	$r_{1N}^m$
							$R_2^m$	$r_{21}^m$	$r_{22}^m$	$r_{23}^m$	...	$r_{2N}^m$
							...	...	...	...	...	...
							$R_{\phi}^m$	$r_{\phi 1}^m$	$r_{\phi 2}^m$	$r_{\phi 3}^m$	...	$r_{\phi N}^m$

### 3.2.3 การทำงานในช่วงออนไลน์เฟส

การทำงานในช่วงออนไลน์เฟสเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ในอาคารหลายชั้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคแบบผสม ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้แนวทางการทำงานของเทคนิคกลุ่ม proximity และเทคนิคกลุ่ม scene analysis โดยผู้วิจัยได้ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม proximity ในการระบุชั้นที่วัตถุอยู่ และประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม scene analysis สำหรับการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุในชั้นนั้นๆ ซึ่งทำโดยการเปรียบเทียบค่าของข้อมูลที่วัตถุวัดได้กับค่าในฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนที่ทำการจัดเก็บและเตรียมไว้ล่วงหน้า

รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานในช่วงออนไลน์เฟส ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปร (define parameter) ขั้นตอนการระบุชั้น  $z_0$  (floor determination) และขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ  $x_0, y_0$  (positioning system)



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทำงานในช่วงออนไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น

#### 3.2.3.1 ขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปร

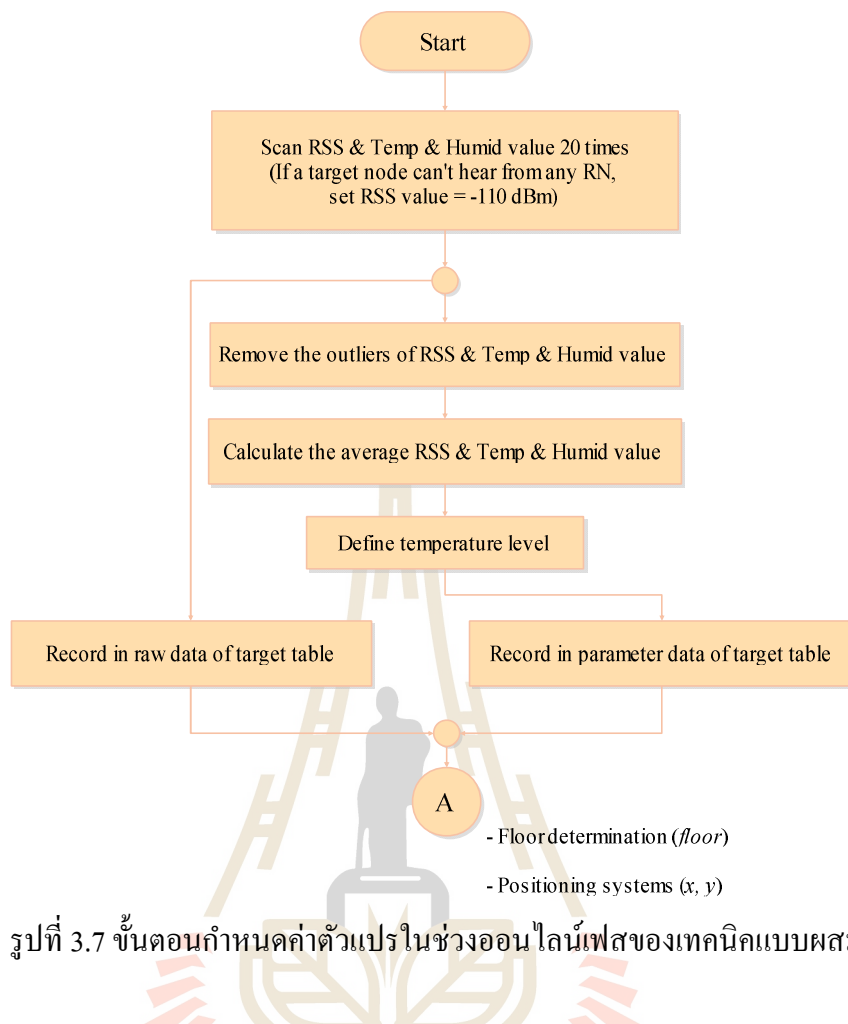
รูปที่ 3.7 แสดงลำดับการทำงานในขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปร ซึ่งเริ่มด้วยการวัดค่าพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งที่วัตถุอยู่ ได้แก่ ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ รวมทั้งกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ จำนวนโนดอ้างอิงทั้งหมดในแต่ละชั้น ( $N$ ) และจำนวนชั้นอาคารที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่ง ( $\phi$ ) เป็นต้น เพื่อป้อนเป็นอินพุตให้กับขั้นตอนการระบุชั้น และการประมวลผลหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุต่อไป

โนด์วัตถุทำการวัดค่าพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งที่วัตถุอยู่ โดยผู้วิจัยกำหนดให้ทำการวัดจำนวน 20 ครั้ง (ประมาณ 1 นาที) เพื่อไม่ให้ใช้เวลาในการวัดนานเกินไป ซึ่งในการวัดค่าความเข้มสัญญาณจากโนด์อ้างอิงแต่ละครั้ง ถ้าหากโนด์วัตถุไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโนด์อ้างอิงได้ จะกำหนดให้ค่าความเข้มสัญญาณในการวัดครั้งนั้นมีค่าเท่ากับ -110 dBm

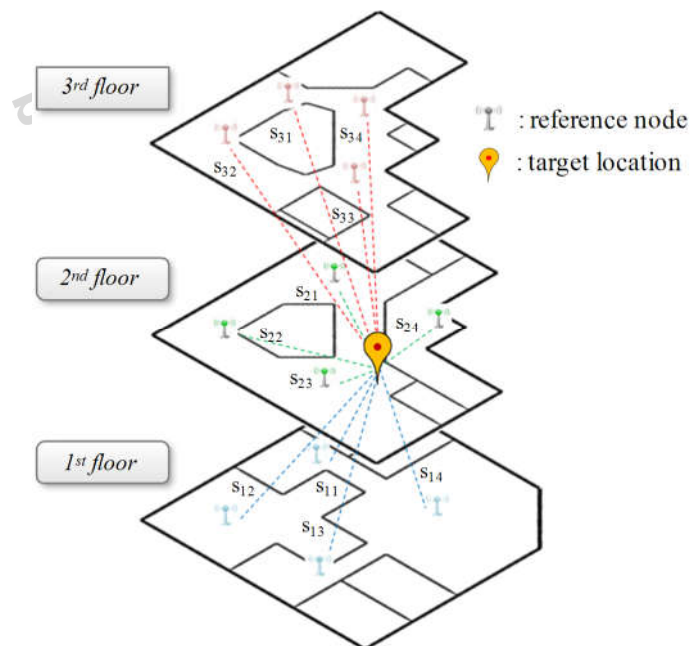
ในขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปรนี้ ผู้วิจัยได้สร้างตารางข้อมูลที่ตำแหน่งวัตถุสองชนิดคือ 1) ตารางข้อมูลดิบของโนด์วัตถุ (table of raw data of target node) และ 2) ตารางข้อมูลพารามิเตอร์ของโนด์วัตถุ (table of parameter data of target node) โดยในตารางข้อมูลดิบของโนด์วัตถุ จะทำการเลือกเก็บบันทึกเฉพาะข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณที่โนด์วัตถุวัดได้ในแต่ละครั้ง ขณะที่ตารางข้อมูลชนิดที่สองคือ ตารางข้อมูลพารามิเตอร์ของโนด์วัตถุจะนำข้อมูลพารามิเตอร์ทั้งหมดที่วัดได้ในแต่ละครั้งซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่ได้รับ ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ไปดำเนินการในกระบวนการกรองข้อมูล โดยใช้ 90 เปอร์เซ็นต์ไทล์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ไทล์ในการกำจัดค่าผิดปกติของข้อมูลออกเช่นเดียวกับการทำงานในขั้นตอนออฟไลน์เฟส (หัวข้อที่ 3.2.2)

จากนั้นนำข้อมูลที่ผ่านกระบวนการกรองข้อมูลไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยของข้อมูลอุณหภูมิ และค่าเฉลี่ยของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ไปจัดระดับของอุณหภูมิ โดยใช้แนวคิดของการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.2.1.2 (จะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.3) เพื่อใช้เป็นข้อมูลระดับอุณหภูมิของตำแหน่งวัตถุ และเก็บบันทึกค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ลงในตารางข้อมูลพารามิเตอร์ของตำแหน่งวัตถุ

รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการวัดค่าความเข้มสัญญาณ ณ ตำแหน่งวัตถุ เมื่อวงกลมสีเหลืองแทนตำแหน่งวัตถุ เส้นประแทนเส้นทางที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลของโนด์วัตถุและโนด์อ้างอิง



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปรในช่วงออนไลน์เฟสของเทคนิคแบบผสม



รูปที่ 3.8 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณ ณ ตำแหน่งวัตถุ



ตารางที่ 3.3 แสดงโครงสร้างตารางข้อมูลดิบที่ตำแหน่งโนดวัตถุ ซึ่งบันทึกค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละครั้ง เมื่อ  $\rho_{fm}^T$  หมายถึงค่าความเข้มสัญญาณของการวัดครั้งที่  $T$  ที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิง  $n$  ที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  และกำหนดให้  $\Gamma$  หมายถึงจำนวนครั้งของการวัดข้อมูลพารามิเตอร์ระบบ (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่า  $\Gamma=20$ )

ส่วนตารางที่ 3.4 แสดงโครงสร้างตารางข้อมูลพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งวัตถุ ซึ่งประกอบด้วย  $[T_o, H_o, L_o, \Omega_o]$  โดยที่  $T_o$  หมายถึงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งวัตถุ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) ตัวแปร  $H_o$  หมายถึงค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ณ ตำแหน่งวัตถุ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ตัวแปร  $L_o$  หมายถึงระดับของอุณหภูมิที่ได้จากการแบ่งระดับอุณหภูมิของตำแหน่งวัตถุ และตัวแปร  $\Omega_o$  คือเวกเตอร์ของความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงที่ตั้งอยู่ในชั้นที่ 1 ถึง  $\phi$  ของอาคารที่พิจารณา โดยที่  $\Omega_o = [S_1, S_2, \dots, S_\phi]$  เมื่อ  $S_f$  คือเวกเตอร์ค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  โดยที่  $S_f = [s_{f1}, s_{f2}, \dots, s_{fn}, \dots, s_{fN}]$  เมื่อ  $s_{fn}$  หมายถึงค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิง  $n$  ที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  เมื่อ  $\phi$  คือจำนวนชั้นของอาคารที่ใช้ระบบระบุตำแหน่ง และ  $N$  คือจำนวนโนดอ้างอิงทั้งหมดที่ติดตั้งในแต่ละชั้น

ตารางที่ 3.3 โครงสร้างตารางข้อมูลดิบที่ตำแหน่งวัตถุ

ค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ $\rho_{fm}^T$ (dBm)													
floor	$f=1$				$f=2$				...	$f=\phi$			
scan	$n=1$	$n=2$	...	$n=N$	$n=1$	$n=2$	...	$n=N$	...	$n=1$	$n=2$	...	$n=N$
1	$\rho_{11}^1$	$\rho_{12}^1$	...	$\rho_{1N}^1$	$\rho_{21}^1$	$\rho_{22}^1$	...	$\rho_{2N}^1$	...	$\rho_{\phi 1}^1$	$\rho_{\phi 2}^1$	...	$\rho_{\phi N}^1$
2	$\rho_{11}^2$	$\rho_{12}^2$	...	$\rho_{1N}^2$	$\rho_{21}^2$	$\rho_{22}^2$	...	$\rho_{2N}^2$	...	$\rho_{\phi 1}^2$	$\rho_{\phi 2}^2$	...	$\rho_{\phi N}^2$
3	$\rho_{11}^3$	$\rho_{12}^3$	...	$\rho_{1N}^3$	$\rho_{21}^3$	$\rho_{22}^3$	...	$\rho_{2N}^3$	...	$\rho_{\phi 1}^3$	$\rho_{\phi 2}^3$	...	$\rho_{\phi N}^3$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\Gamma$	$\rho_{11}^\Gamma$	$\rho_{12}^\Gamma$	...	$\rho_{1N}^\Gamma$	$\rho_{21}^\Gamma$	$\rho_{22}^\Gamma$	...	$\rho_{2N}^\Gamma$	...	$\rho_{\phi 1}^\Gamma$	$\rho_{\phi 2}^\Gamma$	...	$\rho_{\phi N}^\Gamma$

ตารางที่ 3.4 โครงสร้างตารางข้อมูลพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งวัตถุ

ค่าเฉลี่ย อุณหภูมิ $T_o$ (°C)	ค่าเฉลี่ย ความชื้น สัมพัทธ์ $H_o$ (%)	ระดับ อุณหภูมิ $L_o$	เวกเตอร์ ค่าเฉลี่ย RSS $S_f$	ค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณที่รับได้ $S_{fn}$ (dBm)				
				$n=1$	$n=2$	$n=3$	...	$n=N$
$T_o$	$H_o$	$L_o$	$S_1$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	...	$s_{1N}$
			$S_2$	$s_{21}$	$s_{22}$	$s_{23}$	...	$s_{2N}$
			...	...	...	...	...	...
			$S_\phi$	$s_{\phi_1}$	$s_{\phi_2}$	$s_{\phi_3}$	...	$s_{\phi_N}$

### 3.2.3.2 ขั้นตอนการระบุชั้น

การระบุชั้นที่วัตถุอยู่ ( $z_o$ ) เป็นขั้นตอนที่ประยุกต์ใช้แนวทางการทำงานของเทคนิคกลุ่ม proximity ซึ่งใช้หลักการพิจารณาระดับสัญญาณที่วัตถุได้รับจากโนดอ้างอิง แล้วประเมินว่าวัตถุอยู่ในรัศมีที่กำหนดไว้ของโนดอ้างอิงใด [8] โดยมีการกำหนดหมายเลขประจำตัวให้กับโนดอ้างอิงแล้วเปรียบเทียบว่าสัญญาณที่วัตถุได้รับจากโนดอ้างอิงใดมีระดับสูงที่สุดแสดงว่าวัตถุอยู่ใกล้กับโนดอ้างอิงนั้น [8]

เทคนิคการระบุชั้นที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยให้ชื่อว่า Sum-RSS floor algorithm ซึ่งเป็นเทคนิคที่ประยุกต์ใช้แนวทางดังกล่าว และร่วมกับการใช้คุณสมบัติทางสถิติของข้อมูลความแรงสัญญาณ โดยใช้ช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคาร

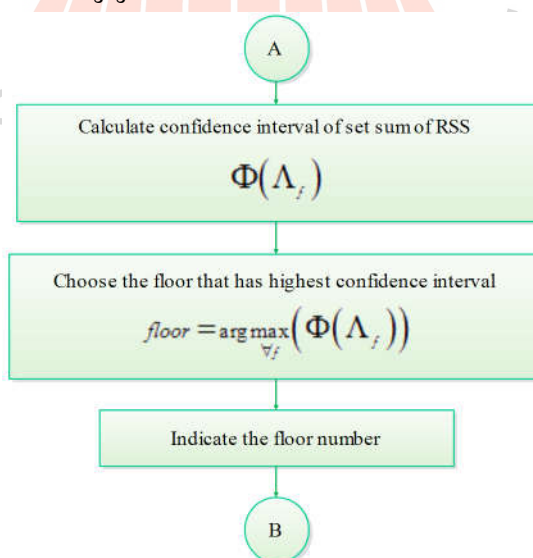
รูปที่ 3.9 แสดงรายละเอียดของขั้นตอนการระบุชั้น โดยหลังจากที่ดำเนินการในขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปรเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือ ขั้นตอนการระบุชั้นอาคาร โดยจะเริ่มจากนำตารางข้อมูลดิบของตำแหน่งวัตถุที่ได้จากการทำงานในขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปร มาคำนวณหาผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของการวัดแต่ละครั้งที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้น โดยจัดกลุ่มเป็นเซตข้อมูลของแต่ละชั้น โดยที่  $\Lambda_f$  คือเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณในชั้น  $f$  ซึ่งมีสมาชิกเป็น  $\{\mathcal{V}_f^1, \mathcal{V}_f^2, \dots, \mathcal{V}_f^{\tau_f}, \dots, \mathcal{V}_f^N\}$  เมื่อ  $\mathcal{V}_f^{\tau_f}$  คือผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของการวัดครั้งที่  $\tau$  ของโนดอ้างอิงทุกตัวที่อยู่บนชั้น  $f$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 เมื่อ  $\rho_{fn}^{\tau}$  หมายถึงค่าความเข้มสัญญาณของการวัดครั้งที่  $\tau$  ที่รับได้จากโนดอ้างอิง  $n$  ที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  เมื่อได้เซตข้อมูลผลรวมค่า

ความเข้มสัญญาณครบทุกชั้นแล้ว ถัดมาจะนำเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของแต่ละชั้น มาคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลที่  $c\%$  โดยจะคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นสองด้าน (two-sided confidence interval) ซึ่งประกอบด้วย ขีดจำกัดบน (upper limit) และขีดจำกัดล่าง (lower limit) ซึ่งใช้บอกโอกาสที่ค่ากลางของข้อมูลจะอยู่ภายในช่วงขอบเขตนี้ เมื่อ  $\Phi(\Lambda_f)$  หมายถึงช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณในชั้น  $f$  และ  $N$  คือจำนวนโนดอ้างอิงทั้งหมดที่ติดตั้งในแต่ละชั้น โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การแจกแจงของข้อมูลแบบที (t-distribution) เนื่องจากมีจำนวนของข้อมูลไม่เกิน 30 ค่า (กำหนดให้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์จำนวน 20 ครั้ง เพื่อให้ใช้เวลาในการวัดค่าไม่นานเกินไป) ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณช่วงความเชื่อมั่นที่มีการแจกแจงแบบทีแสดงดังสมการที่ 3.3 เมื่อ  $\eta$  หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลผลรวมความเข้มสัญญาณ ตัวแปร  $\beta$  หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นที่จะประมาณช่วงชุดข้อมูลผิดพลาด ตัวแปร  $\Gamma$  หมายถึงจำนวนครั้งของการวัดข้อมูลความเข้มสัญญาณ ตัวแปร  $\sigma^2$  หมายถึงค่าความแปรปรวนของชุดข้อมูล และตัวแปร  $\mu$  หมายถึง ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในช่วงความเชื่อมั่น โดยที่  $t_{p,\Gamma}$  สามารถหาได้จากกรคำนวณควอนไทล์ของการแจกแจงแบบทีที่มีความน่าจะเป็น  $P$  เมื่อมีจำนวนข้อมูล  $\Gamma$

$$\gamma_f^T = \sum_{n=1}^N \rho_{fn}^T \quad (3.2)$$

$$P \left( \eta(\Gamma) - t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}} \leq \mu \leq \eta(\Gamma) + t_{[\Gamma-(\beta/2); \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}} \right) \approx 1 - \beta \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3.5 แสดงตารางรหัสเทียม (pseudo code) ของขั้นตอนการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมค่าความเข้มสัญญาณ



- Positioning systems (x, y)

รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการระบุชั้นของ Sum-RSS floor algorithm

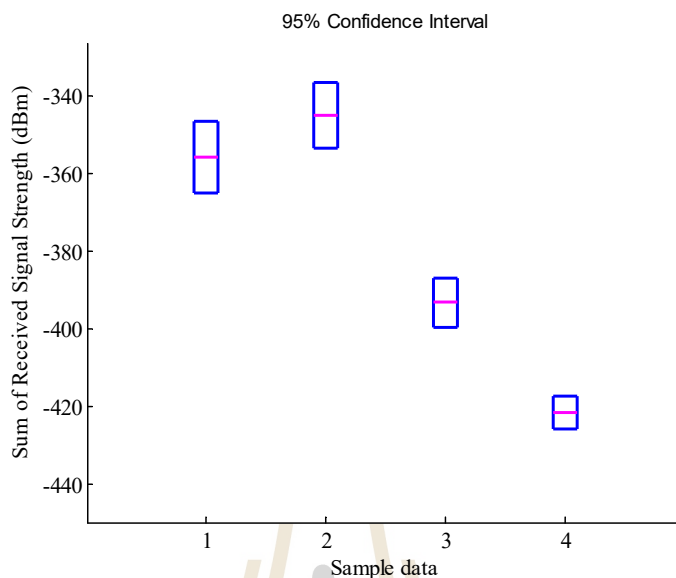
ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมค่าความเข้มสัญญาณ

Input :	Raw data of target
Output :	Floor of target
<p>Select a percent confidence interval <math>c</math> ;</p> <p>Select a raw data of target on <math>f \in \phi</math> ;</p> <p>Repeat</p> <p style="padding-left: 20px;">Repeat</p> <p style="padding-left: 40px;">Repeat</p> <p style="padding-left: 60px;"><math>\gamma_f^\tau = \sum(\rho_{fn}^\tau)</math> for all <math>n = N</math> ;</p> <p style="padding-left: 40px;">Until <math>\tau = \Gamma</math></p> <p style="padding-left: 20px;">Set <math>\Lambda_f = \{ \gamma_f' \text{ to } \gamma_f^\tau \}</math> ;</p> <p style="padding-left: 20px;">Until <math>f = \phi</math></p> <p style="padding-left: 20px;">Calculate <math>\Phi(\Lambda_f)</math> by %ci = <math>c</math> for all <math>f \in \phi</math> ;</p> <p style="padding-left: 20px;">If <math>\Phi(\Lambda_f)</math> of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> is overlap</p> <p style="padding-left: 40px;">then reduce <math>c</math></p> <p style="padding-left: 40px;">else</p> <p style="padding-left: 60px;"><math>c</math> is the percent confidence interval of sum of RSS.</p> <p style="padding-left: 20px;">Until stopping condition = true.</p> <p>Select <math>f</math> highest <math>\Phi(\Lambda_f)</math> is the floor of target that <math>c\%</math> confidence interval.</p>	

เมื่อกำหนดช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณในทุกชั้นแล้ว จากนั้นทำการเลือกชุดข้อมูลที่มีค่าเฉลี่ยของข้อมูลผลรวมความเข้มสัญญาณ 2 อันดับแรกมาพิจารณาสำหรับการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 สามารถทำได้ดังนี้ ถ้าขีดจำกัดล่างของข้อมูลอันดับที่ 1 น้อยกว่าขีดจำกัดบนของข้อมูลอันดับที่ 2 หมายถึง สองชุดข้อมูลนี้เกิดการเหลื่อมกัน (overlap) ของช่วงความเชื่อมั่น ในกรณีนี้จะทำการลดเปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลลง 5% จากช่วงความเชื่อมั่นความเชื่อมั่นเดิม  $c\%$  และคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลใหม่ แต่ถ้าขีดจำกัดล่างของข้อมูลอันดับที่ 1 มากกว่าขีดจำกัดบนของข้อมูลอันดับที่ 2 จะเลือกชั้นอาคารของชุดข้อมูลอันดับที่ 1 เป็นชั้นที่วัตถุประสงค์อยู่ซึ่งมีความเชื่อมั่นที่  $c\%$  สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้เปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล เริ่มต้นที่ 95% ( $c=95$ )

รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล เช่น พิจารณาเปรียบเทียบข้อมูล sample 1 และข้อมูล sample 2 พบว่าช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลมีการเหลื่อมกันในกรณีนี้จะต้องลดค่าเปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่นลง 5% และคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลใหม่จนกว่าช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลจะไม่มีการเหลื่อมกัน ส่วนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูล sample 3 และข้อมูล sample 4 พบว่าช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลไม่มีการเหลื่อมกัน ทำให้สามารถ

บอกได้ว่า ข้อมูล sample 3 มีค่าผลรวมความแรงสัญญาณสูงกว่า sample 4 ดังนั้นชั้น 3 จึงเป็นชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ โดยมีความมั่นใจที่ 95%



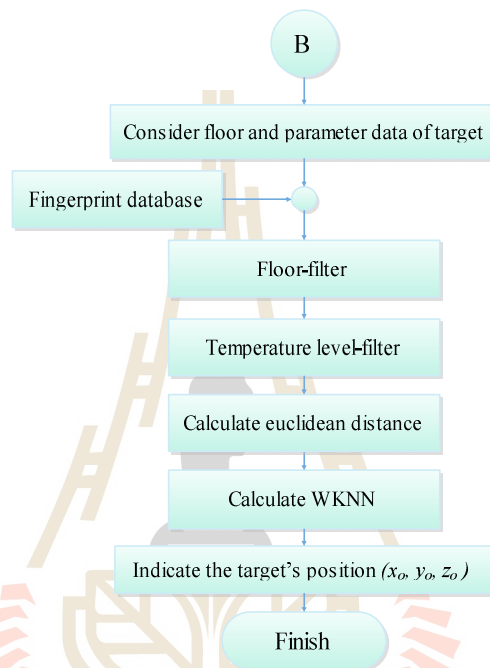
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล

หมายเหตุ การปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่นนั้นจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร  $t_{p, \Gamma}$  ซึ่งเป็นค่าควอนไทล์ของการแจกแจงแบบที่มีความน่าจะเป็น  $P$  เมื่อมีจำนวนข้อมูล  $\Gamma$  และส่งผลให้ขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของเขตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ถ้าลดเปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลลง 5% จะส่งผลให้ตัวแปร  $t_{p, \Gamma}$  มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้ขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของเขตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณแคบลง ส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดการหลอมนกันของข้อมูลอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 มีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การลดค่าเปอร์เซ็นต์ช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลลง 5% จะส่งผลให้การระบุชั้นของวัตถุมีความมั่นใจที่จะระบุชั้นได้ถูกต้องลดลง 5%

ข้อดีของการระบุชั้นด้วยเทคนิค Sum-RSS floor algorithm คือ โครงสร้างทางกายภาพของอาคารแต่ละชั้นไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน ตัวอย่างของลักษณะอาคารเช่น ในอาคารที่มีชั้นต่ำสุดเป็นลานจอดรถ และมีชั้นถัดขึ้นไปเป็นห้องทำงาน ดังนั้นเทคนิคการระบุตำแหน่งนี้จึงสามารถระบุชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ภายในอาคารที่มีลักษณะทั่วไปได้ หมายเหตุในขั้นตอนการระบุชั้นนี้จะถูกข้ามไปถ้าหากการระบุตำแหน่งของวัตถุใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุในบริเวณระนาบเดียว

### 3.2.3.3 ขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ

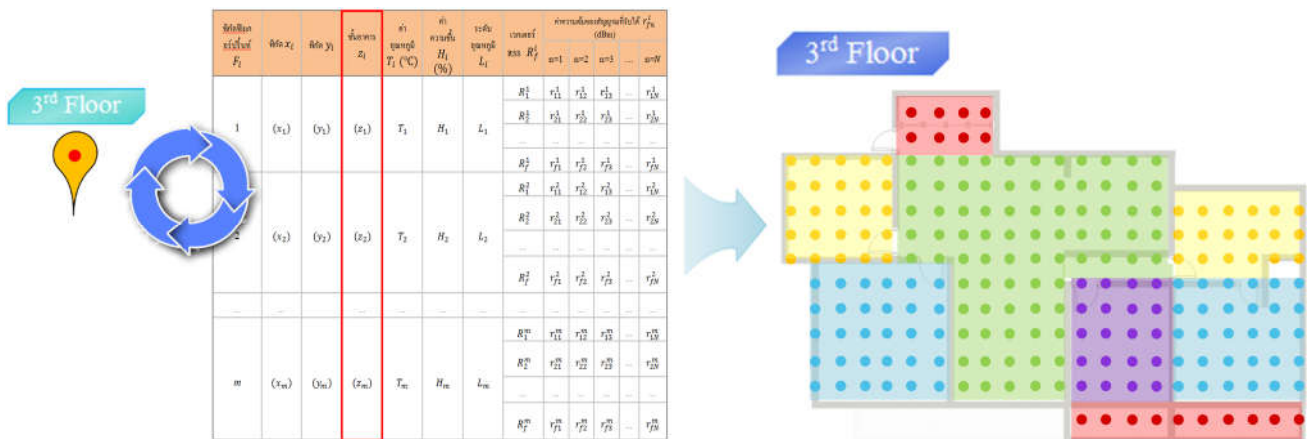
เป็นขั้นตอนที่ทำการประมวลผลหาพิกัด  $(x, y)$  ของวัตถุ รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ โดยการทำงานแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ กระบวนการกรองชั้น (Floor filter) กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิ (Temperature level filter) กระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิดีเนียน (Calculate euclidean distance) และกระบวนการหาดำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวน (Calculate WKNN)



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ

รูปที่ 3.11 แสดงลำดับการทำงานของขั้นตอนการระบุพิกัดวัตถุ โดยเริ่มจากการนำหมายเลขชั้นที่ระบุได้จากขั้นตอนการระบุชั้น (หัวข้อ 3.2.3.2) มาเข้ากระบวนการกรองชั้น ซึ่งเป็นการคัดกรองฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ที่ไม่เข้าพวกออก โดยจะคัดเลือกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีหมายเลขชั้น  $(z_i)$  ตรงกับหมายเลขชั้นของวัตถุ  $(z_0)$  ที่ได้จากขั้นตอนการระบุชั้น จำนวน  $M_2$  พิกัดไปดำเนินการในกระบวนการถัดไป ข้อดีของการทำอย่างนี้คือ ระบบระบุตำแหน่งจะพิจารณาเฉพาะพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่อยู่ในชั้นเดียวกับวัตถุเท่านั้น ซึ่งทำให้ไม่ต้องพิจารณาฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ทั้งหมด  $(M)$  รูปที่ 3.12 แสดงแนวคิดของกระบวนการกรองชั้นของงานวิจัยนี้ หลังจากที่เราทราบหมายเลขชั้นที่วัตถุตั้งอยู่จากขั้นตอนการระบุชั้นแล้ว (เช่น  $z_0=3$ ) จะทำการคัดเลือกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีหมายเลขชั้น  $(z_i=3)$  ซึ่งหมายถึงเลือกพิจารณาเฉพาะฐานข้อมูลพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่อยู่บนชั้นที่ 3 จำนวน  $M_2$  พิกัดเท่านั้น

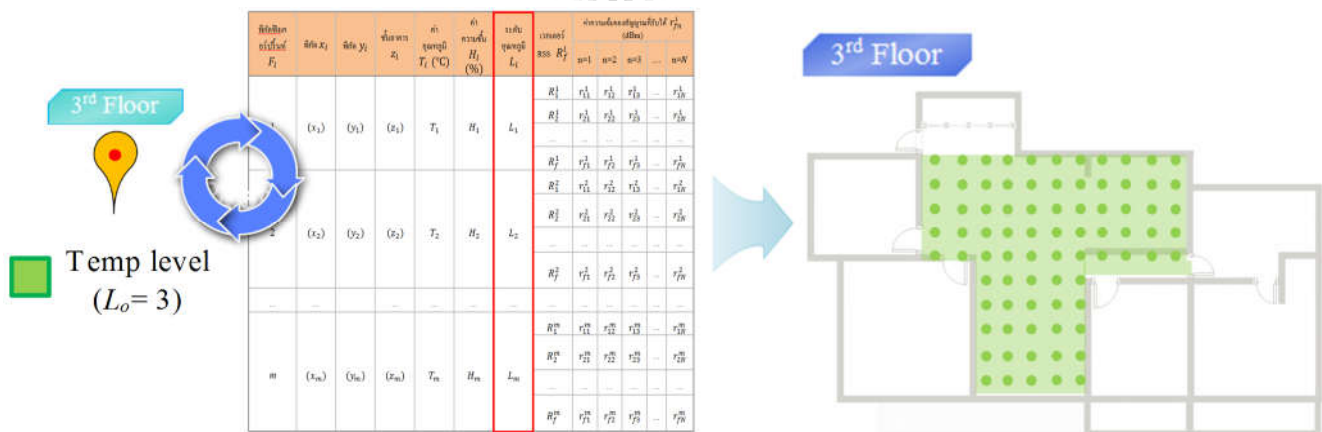




รูปที่ 3.12 แนวคิดของกระบวนการกรองชั้นของขั้นตอนการระบุตำแหน่ง

ถัดมาคือ กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิ จะมีหน้าที่คล้ายกับกระบวนการกรองชั้น แต่จะเลือกพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่มีระดับอุณหภูมิ ( $L$ ) ตรงกับระดับอุณหภูมิของวัตถุ ( $L_o$ ) จำนวน  $M_i$  พิกัดไปดำเนินการในกระบวนการถัดไป ข้อดีของการทำอย่างนี้คือ ระบบระบุตำแหน่งจะพิจารณาเฉพาะพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่มีระดับอุณหภูมิเดียวกับระดับอุณหภูมิของวัตถุเท่านั้น ซึ่งจะช่วยคัดกรองพื้นที่ที่มีระดับอุณหภูมิแตกต่างจากระดับอุณหภูมิของวัตถุออกได้ รูปที่ 3.13 แสดงแนวคิดของกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของงานวิจัยนี้ หลังจากที่ทำดำเนินการในกระบวนการกรองชั้นซึ่งจะเลือกพิจารณาเฉพาะพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่อยู่บนชั้นที่ 3 แล้ว กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิจะทำการคัดเลือกพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่มีระดับอุณหภูมิ (เช่น  $L_i=3$ ) ซึ่งหมายถึงจะเลือกพิจารณาเฉพาะฐานข้อมูลพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่มีระดับอุณหภูมิในระดับที่ 3 จำนวน  $M_i$  พิกัด (แทนด้วยพื้นที่สีเขียวในรูป)

หมายเหตุ จำนวนพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่ผ่านกระบวนการกรองชั้นและผ่านกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิ ( $M_i$ ) จะมีค่าน้อยกว่าจำนวนพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่ผ่านกระบวนการกรองชั้นเพียงอย่างเดียว ( $M_2$ ) และจะมีค่าน้อยกว่าจำนวนพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ทั้งหมด ( $M$ ) (หรือ  $M_1 < M_2 < M$ )



รูปที่ 3.13 แนวคิดของกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของขั้นตอนการระบุตำแหน่ง



ถัดมาคือ กระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิดเดียน ในกระบวนการนี้จะทำหน้าที่คำนวณหาผลต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่รับได้ระหว่างตำแหน่งวัตถุกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์จำนวน  $M_j$  พิกัด ซึ่งจะเป็นการคำนวณหาผลรวมของค่าผลต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณในทุกชั้น สมการคำนวณหาระยะห่างยูคลิดเดียนแสดงได้ดังสมการที่ 3.4 เมื่อ  $d_j$  หมายถึงค่าระยะห่างยูคลิดเดียนของพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์  $j$  จากนั้นจะเลือกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์  $j$  ที่มีค่าระยะห่างยูคลิดเดียน  $d_j$  น้อยที่สุด  $k$  ลำดับแรก และเขียนใหม่เป็น  $\delta_u$  หรือค่าระยะห่างยูคลิดเดียนน้อยที่สุดลำดับที่  $u$  โดยที่  $u$  มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...,  $k$

$$d_j = \sqrt{\sum_{f=1}^{\phi} \left\{ \sum_{n=1}^N (r_{fn}^j - s_{fn})^2 \right\}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\phi$  หมายถึงจำนวนของชั้นอาคารทั้งหมดที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่ง เมื่อ  $N$  หมายถึงจำนวนโนดอ้างอิงทั้งหมดที่ติดตั้งในแต่ละชั้น ตัวแปร  $r_{fn}^i$  หมายถึงค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์  $i$  รับผิดชอบจากโนดอ้างอิง  $n$  ที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  และ  $s_{fn}$  หมายถึงค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณที่โนดวัตถุรับผิดชอบจากโนดอ้างอิง  $n$  ที่ตั้งอยู่บนชั้น  $f$  เมื่อคำนวณหาระยะห่างยูคลิดเดียนสำหรับทุกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์แล้ว จะเลือกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีค่าระยะห่างยูคลิดเดียนน้อยที่สุดจำนวน 4 พิกัดซึ่งกำหนดให้เป็น  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  และ  $\delta_4$  เรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก เป็นการสิ้นสุดกระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิดเดียน

และสุดท้ายของขั้นตอนการระบุตำแหน่งวัตถุคือ กระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวน ในกระบวนการนี้จะคำนวณหาพิกัด  $x$  และพิกัด  $y$  ของโนดวัตถุโดยใช้กระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแสดงดังสมการที่ 3.5 และสมการที่ 3.6 และสมการที่ใช้คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด  $k$  จำนวนแสดงได้ดังสมการที่ 3.7 อ้างอิงจาก [37] ของ Shetty, 2010 เมื่อ  $x_o$  และ  $y_o$  หมายถึงพิกัด  $x$  และพิกัด  $y$  ของตำแหน่งวัตถุ ตัวแปร  $x_u$  และ  $y_u$  หมายถึงพิกัด  $x$  และพิกัด  $y$  ของตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดลำดับที่  $u$  ตัวแปร  $w_u$  หมายถึงค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดลำดับที่  $u$  และ  $\delta_u$  หมายถึงค่าระยะห่างยูคลิดเดียนที่น้อยที่สุดลำดับที่  $u$  ดังนั้นจากการทำงานในกระบวนการนี้จะได้พิกัด  $x$  และพิกัด  $y$  ของวัตถุ และเมื่อรวมกับหมายเลขชั้นที่ได้ทราบก่อนหน้านี้ จะสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ภายในอาคารแบบหลายชั้นได้  $(x_o, y_o, z_o)$

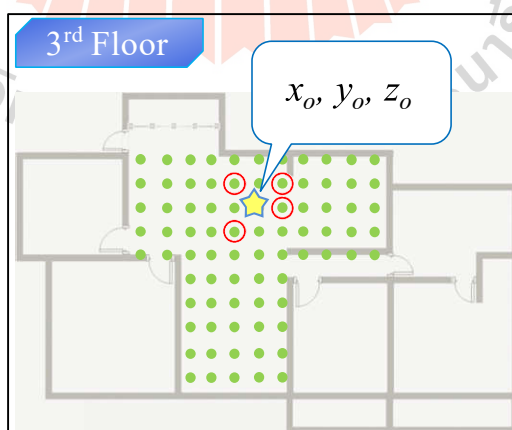
$$x_o = \sum_{u=1}^k x_u \cdot w_u \quad (3.5)$$

$$y_o = \sum_{u=1}^k y_u \cdot w_u \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$w_u = \frac{\left( \frac{1}{\delta_u^2} \right)}{\sum_{v=1}^k \left( \frac{1}{\delta_v^2} \right)} \quad (3.7)$$

รูปที่ 3.14 แสดงแนวคิดของกระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนของงานวิจัยนี้ จุดสีเขียวแทนตำแหน่งฟังก์ชันปริพันธ์ที่อยู่บนชั้นที่ 3 ( $z_o=3$ ) ซึ่งผ่านกระบวนการกรองขั้นและผ่านกระบวนการกรองระดับอนุกรมจำนวน  $M$ , พิกัด สัญลักษณ์วงกลมสีแดงแทนพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่มีค่าระยะห่างยูคลิดเลียนน้อยที่สุด 4 ลำดับแรก ( $\delta_1, \delta_2, \delta_3,$  และ  $\delta_4$ ) และสัญลักษณ์ดาวสีเหลืองแทนพิกัดของวัตถุ ( $x_o, y_o$ ) ที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันจะสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้นได้ ( $x_o, y_o, z_o$ )



รูปที่ 3.14 แนวคิดของกระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k=4$

### 3.3 การประเมินสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง

ในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร ปัจจัยสำคัญที่ผู้พัฒนาระบบควรพิจารณาคือ สมรรถนะของการระบุตำแหน่ง ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพและประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ โดยค่าสมรรถนะของการระบุตำแหน่ง (performance) ของงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง (accuracy) ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง (precision) และความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (run-time complexity)

สำหรับนิยามหรือคำจำกัดความของความถูกต้องคือ การบอกระยะความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งวัตถุจริงกับตำแหน่งวัตถุที่หาได้จากการคำนวณ ตัวอย่างเช่น ระบบระบุตำแหน่งหนึ่งมีค่าความถูกต้องเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุเท่ากับ 5 เมตร หมายถึงระบบระบุตำแหน่งดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย หรือระยะทางที่ผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 5 เมตร เช่น งานวิจัย [34] ของ Chen and Luo (2007) ได้ออกแบบระบบระบุตำแหน่งที่ใช้งานอุปกรณ์เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 โดยได้แสดงสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งด้วยการใช้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุ เป็นต้น

สำหรับนิยามหรือคำจำกัดความของความแม่นยำจะบอกในลักษณะการเปรียบเทียบระหว่างระบบสองระบบ โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อน (Cumulative Distribution Function : CDF) ตัวอย่างเช่น ระบบระบุตำแหน่งชนิด ก. มีความแม่นยำของตำแหน่ง 90 % ภายใน 3.5 เมตร กับระบบระบุตำแหน่งชนิด ข. มีความแม่นยำของตำแหน่ง 90 % ภายใน 5 เมตร ดังนั้นในการเปรียบเทียบความแม่นยำของสองระบบนี้ ระบบระบุตำแหน่งที่ให้ความแม่นยำที่ดีกว่าคือ ระบบระบุตำแหน่งชนิด ก. (การระบุตำแหน่ง 90 ครั้งจาก 100 ครั้งของระบบระบุตำแหน่ง ก. ค่าความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งจะไม่เกิน 3.5 เมตร) เป็นต้น เช่น งานวิจัย [6] ของ Gansemer et al. (2010) ได้เปรียบเทียบสมรรถนะในค้นหาตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งโดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของระบบที่แสดงด้วยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อน เพื่อวิเคราะห์ถึงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของแต่ละเทคนิค และงานวิจัย [20] ของ Ali and Hassan (2011) ได้ทำการประเมินสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีพื้นฐานการทำงานคล้ายคลึงกับเทคนิคระยะห่างยูคลิดีเดียน โดยจะมีการให้คะแนนและเลือกฟังก์ชันการประเมินที่มีค่าความเข้มสัญญาณใกล้เคียงกับค่าความเข้มสัญญาณของวัตถุ แทนการเลือกค่าระยะห่างยูคลิดีเดียนที่น้อยที่สุด เป็นต้น

นิยามหรือคำจำกัดความของความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะบอกเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ หรือระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุต่อหนึ่ง

ตำแหน่ง ถ้าระบบระบุตำแหน่งวัตถุมีความซับซ้อนที่น้อย ระบบนั้นจะสามารถค้นหาตำแหน่งวัตถุได้รวดเร็วกว่าระบบระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนมาก อีกทั้งการพิจารณาสมรรถนะความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลยังพิจารณาถึงฟังก์ชันการเติบโตทางเวลา (growth in run-time) ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันที่ใช้อธิบายพฤติกรรมแนวโน้มการเติบโตทางเวลาของอัลกอริทึม ที่ช่วยให้เราสามารถประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง ถ้าหากขนาด หรือจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบมีมากขึ้น เช่น งานวิจัย [35] ของ Kabir and Kohno (2012) ทำการพิจารณาสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของเทคนิคระบุตำแหน่ง สำหรับกรณีที่จำนวนฟังก์เจอร์ปริ้นท์เพิ่มขึ้น และงานวิจัย [36] ของ Jiao et al. (2009) ได้เปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละเทคนิคระบุตำแหน่งด้วยการพิจารณาความซับซ้อนในการประมวลผล สำหรับกรณีที่จำนวนรอบของการทำงานเพิ่มขึ้น เป็นต้น



## บทที่ 4

### การทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ประกอบไปด้วย ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุ (accuracy) และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุ (precision) และความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (run-time complexity)

เนื้อหาในบทที่ 4 แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 4.1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปρίนทร์สำหรับเทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น หัวข้อ 4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคการเลือกชั้น หัวข้อ 4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในอาคารที่มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น หัวข้อ 4.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งในอาคารที่มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น และหัวข้อ 4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง

#### 4.1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปρίนทร์สำหรับเทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น

ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปρίนทร์สำหรับเทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นประกอบด้วย ค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength : RSS) ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (temperature) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (relative humidity : RH)

เนื้อหาในหัวข้อ 4.1 แบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อย่อย 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง หัวข้อย่อย 4.1.2 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง และหัวข้อย่อย 4.1.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 3 ชนิดคือ MC13224 Sensor Node MC13224 Network Node และ MC13224-LPN ซึ่งทำงานอยู่บนมาตรฐาน IEEE802.15.4 (ZigBee) ของ Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล แต่ละชนิดมีกำลังส่งสูงสุดเท่ากับ +3dBm +2dBm และ +4dBm ตามลำดับ โดยมีชนิดของสายอากาศ 2 ชนิดคือ F-antenna (Inverted F-antenna) และ SMA-antenna (Sub Miniature version "A" connector antenna) โดยโนดวัตถุจะเลือกใช้ MC13224 Sensor Node ขณะที่โนดอ้างอิงจะประกอบด้วย

อุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิด และกำหนดให้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายทุกชนิดให้ทำงานในย่านความถี่ 2.480 GHz (Channel 26) สำหรับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และรายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายแสดงดังตารางที่ 4.1



a. โหนดอ้างอิง



b. โหนดวัตถุ

รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในงานวิจัย

Hardware	Specification	
Sensor node	Manufacturer	Freescale
	Chipset	MC13224V
	Frequency range	2.405 GHz – 2.480 GHz
	Transmit power	Max transmit power (+3,+2,+4dBm)
	Operating channel	CH 26 (2.480 GHz)
	Antenna	Inverted F-antenna, SMA-antenna

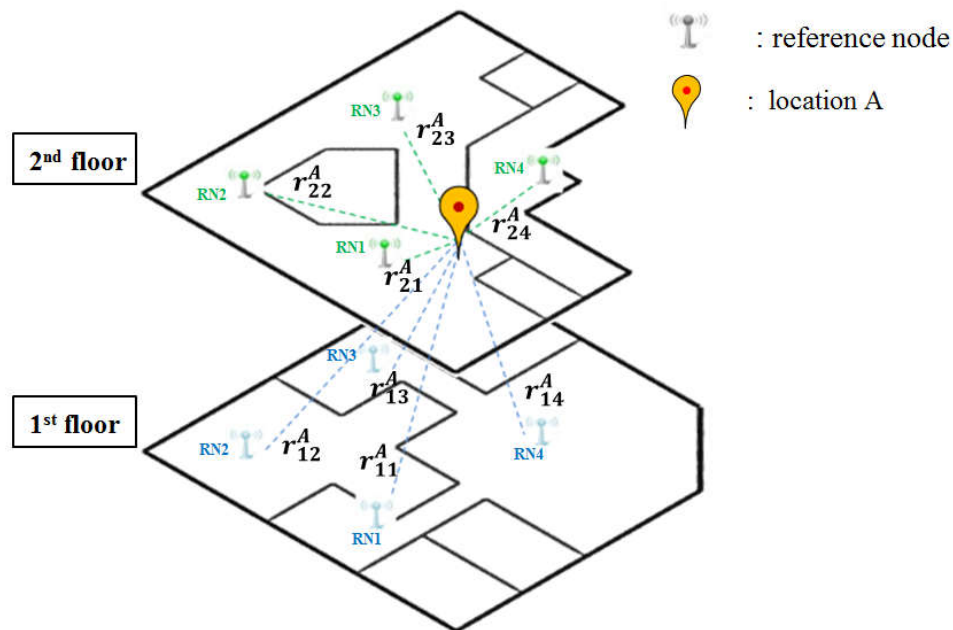
#### 4.1.2 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิง

การวัดความเข้มสัญญาณที่รับได้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้แต่ละชั้นติดตั้งโหนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนด (RN1, RN2, RN3, และ RN4) โดยมีความสูงจากพื้น 2 เมตร กำหนดให้โหนดวัตถุหรือโหนดที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลติดตั้งอยู่บนรถเข็นและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่มีความสูงจากพื้น 0.8 เมตร

ผู้วิจัยได้วัดค่าความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนที่ติดตั้งแต่ละตำแหน่งจำนวน 100 ครั้ง (ใช้เวลาประมาณ 5 นาทีต่อหนึ่งตำแหน่ง) และในแต่ละครั้งของการวัดค่าความเข้มสัญญาณ ถ้าหากโหนดวัตถุไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโหนดอ้างอิงได้ จะกำหนดให้ค่าความเข้มสัญญาณในการวัดครั้งนั้นมีค่าเท่ากับ -110 dBm หรืออีกความหมายคือ สัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงมีค่า

อ่อนมาก จากนั้นเมื่อทำการวัดข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบครบจำนวน 100 ครั้งแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการใช้กระบวนการกรองข้อมูล (data filter) เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลนั้น ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จะกรองข้อมูลด้วยวิธีเปอร์เซ็นต์ไทล์ (percentile) เพื่อกำจัดค่าผิดปกติ (outliers) ของข้อมูลซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และจะนำข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการกรองไปหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลเพื่อใช้สร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ที่ได้จากการวัดจริง

ในการวัดข้อมูลความเข้มของสัญญาณในแต่ละครั้ง จะได้ข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง (reference node : RN) ที่ติดตั้งในพื้นที่การทดลองพร้อมกับชื่อของโนดอ้างอิงนั้น ตัวอย่างการวัดข้อมูลที่จุดทดสอบ A แสดงได้รูปที่ 4.2 และข้อมูลที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูลที่วัดได้จากโนดอ้างอิงที่อยู่ภายในอาคาร เช่น  $r_{23}^A = -95.01$  dBm หมายถึง ที่ตำแหน่ง A สามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงตัวที่ 3 (แทนด้วย RN3) ของชั้นอาคารที่ 2 มีค่าเท่ากับ -95.01 dBm



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการเก็บรวบรวมค่าความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้น

ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงของจุดทดสอบ A

Point A (x, y, z)	Floor	Received Signal Strength (dBm)			
		RN1	RN2	RN3	RN4
(55, 75, 1)	1 <sup>st</sup>	-73.68	-84.57	-89.24	-96.39
	2 <sup>nd</sup>	-91.40	-94.21	-95.01	-98.98



#### 4.1.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในพื้นที่สภาพแวดล้อมจริง เพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยผู้วิจัยได้เก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ณ อาคารบรรณสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 3 โดยเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ทุก ๆ 1 นาทีตั้งแต่เวลา 8.00 ถึง 18.00 น. จำนวน 10 ตำแหน่ง โดยแบ่งออกเป็นตำแหน่งที่อยู่นอกห้องแอร์ 5 ตำแหน่ง และตำแหน่งที่อยู่ภายในห้องแอร์ 5 ตำแหน่ง รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมทั้ง 10 ตำแหน่ง ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมทั้ง 10 ตำแหน่ง รูปที่ 4.4 แสดงข้อมูลอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เก็บบันทึกได้ และรูปที่ 4.5 แสดงข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมที่เก็บบันทึกได้

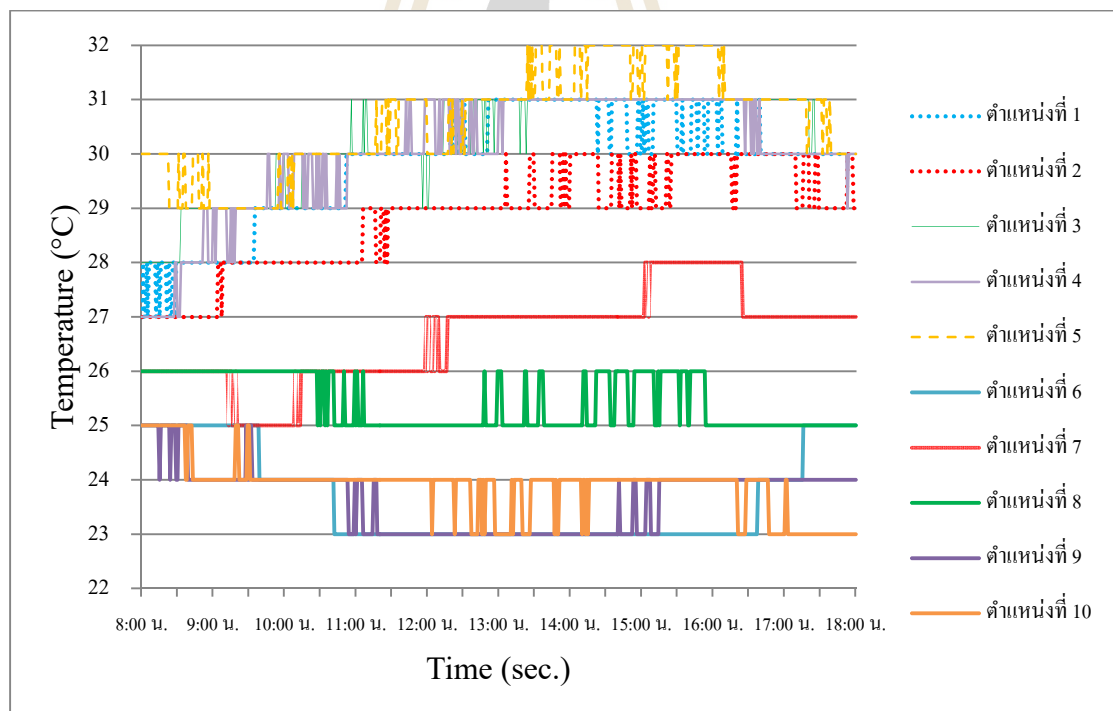


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณาที่ข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกได้ดังรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่า ข้อมูลอุณหภูมิตลอดทั้งวันของตำแหน่งที่อยู่นอกห้องแอร์ (เส้นประ) จะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 27 ถึง 32 องศาเซลเซียส และจะเริ่มคงที่ในช่วงเวลาบ่ายจนถึงเย็น ส่วนค่าอุณหภูมิในช่วงเช้าของตำแหน่งที่อยู่ภายในห้องแอร์ (เส้นทึบ) จะมีแนวโน้มลดลงและจะคงที่จนถึงช่วงเย็น โดยมีค่าอุณหภูมิประมาณ 23 ถึง 26 องศาเซลเซียส ยกเว้นในตำแหน่งที่ 7 (เส้นทึบสีแดง) จะมีแนวโน้มของค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตลอดทั้งวัน (ประมาณ 25 ถึง 28 องศาเซลเซียส) สาเหตุเนื่องมาจากในการบันทึกข้อมูลในวันที่ 7 (หรือตำแหน่งที่ 7) เป็นวันที่มีสภาพอากาศร้อนจัด ซึ่งพื้นที่ภายนอกห้องแอร์มีจะอุณหภูมิสูงประมาณ 32 ถึง 34 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ภายในห้องแอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของตำแหน่งที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์  
ของสิ่งแวดล้อม

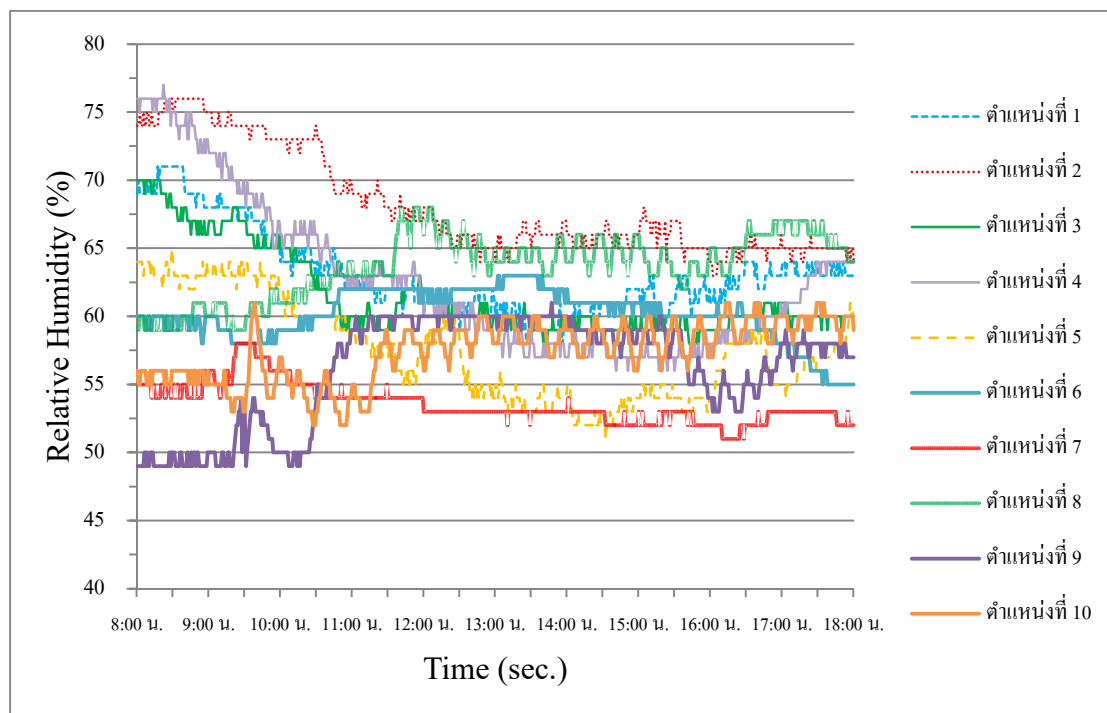
ตำแหน่ง	วัน/วันที่/เดือน/ปี	สภาพภูมิอากาศ	บริเวณ
1	เสาร์/ 16/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	โซนอ่านหนังสือชั้น 1 (ไม่มีแอร์)
2	อาทิตย์/ 17/ มิ.ย./ 55	มีเมฆและลมตลอดวัน	โซนอ่านหนังสือชั้น 1 (ไม่มีแอร์)
3	จันทร์/ 18/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	โซนอ่านหนังสือชั้น 1 (ไม่มีแอร์)
4	พุธ/ 20/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	โซนประตูทางเข้าเก่าชั้น 2 (ไม่มีแอร์)
5	พฤหัสบดี/ 21/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส (แดดแรง)	โซนประตูทางเข้าเก่าชั้น 2 (ไม่มีแอร์)
6	เสาร์/ 23/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ชั้น 1 (ห้องแอร์)
7	อาทิตย์/ 24/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส (แดดแรง)	โซนอ่านหนังสือชั้น 2 (ห้องแอร์)
8	จันทร์/ 25/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	โซนอ่านหนังสือชั้น 2 (ห้องแอร์)
9	อังคาร/ 26/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	โซนอ่านหนังสือชั้น 3 (ห้องแอร์)
10	พุธ/ 27/ มิ.ย./ 55	ท้องฟ้าแจ่มใส	โซนอ่านหนังสือชั้น 3 (ห้องแอร์)



รูปที่ 4.4 ข้อมูลอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ณ อาคารบรรณสารในช่วงเวลา 8.00 ถึง 18.00 น.

พิจารณาที่ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ที่บันทึกได้ในรูปที่ 4.5 ตั้งแต่เวลา 8.00 ถึง 18.00 น. จะสังเกตเห็นว่า ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของตำแหน่งที่อยู่นอกห้องแอร์ (เส้นประ) จะมีแนวโน้มลดลง โดยที่ช่วงเช้าจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงประมาณ 70% ถึง 75% จากนั้นจะลดลงจนถึงช่วง

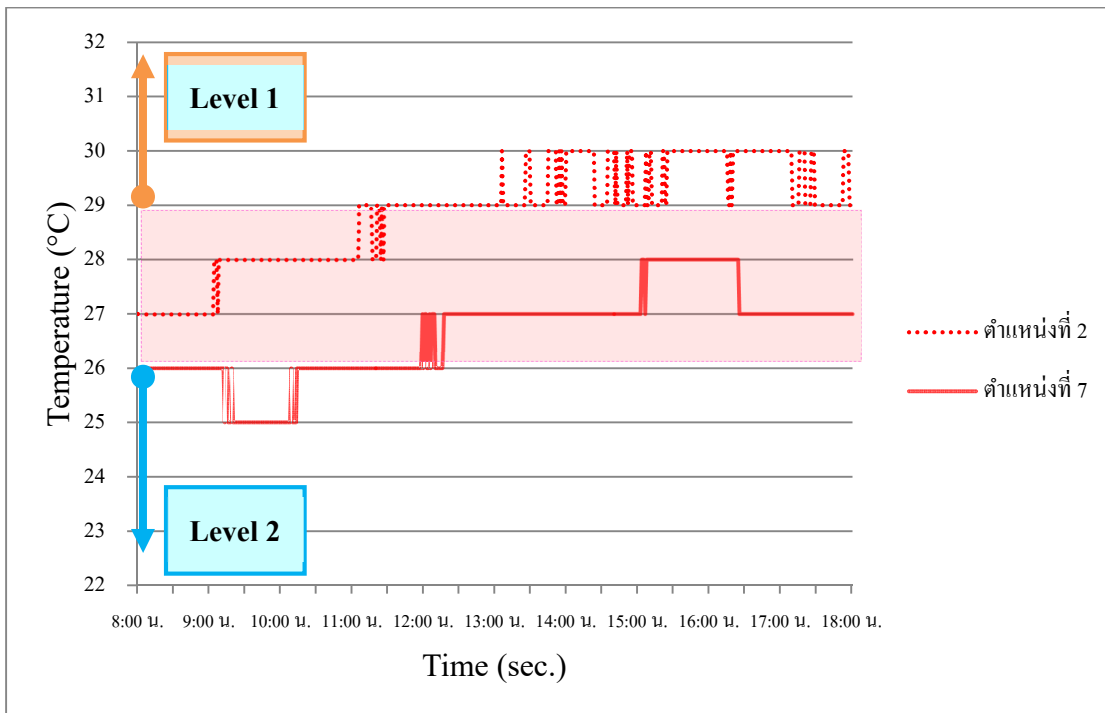
กลางวันและคงที่ประมาณ 60% ถึง 65% ตลอดทั้งวัน ซึ่งแตกต่างข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของตำแหน่งที่อยู่ภายในห้องแอร์ (เส้นทึบ) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ช่วงเช้าจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศประมาณ 50% ถึง 55% จากนั้นค่าความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงกลางวันและคงที่ประมาณ 55% ถึง 60% ตลอดทั้งวัน



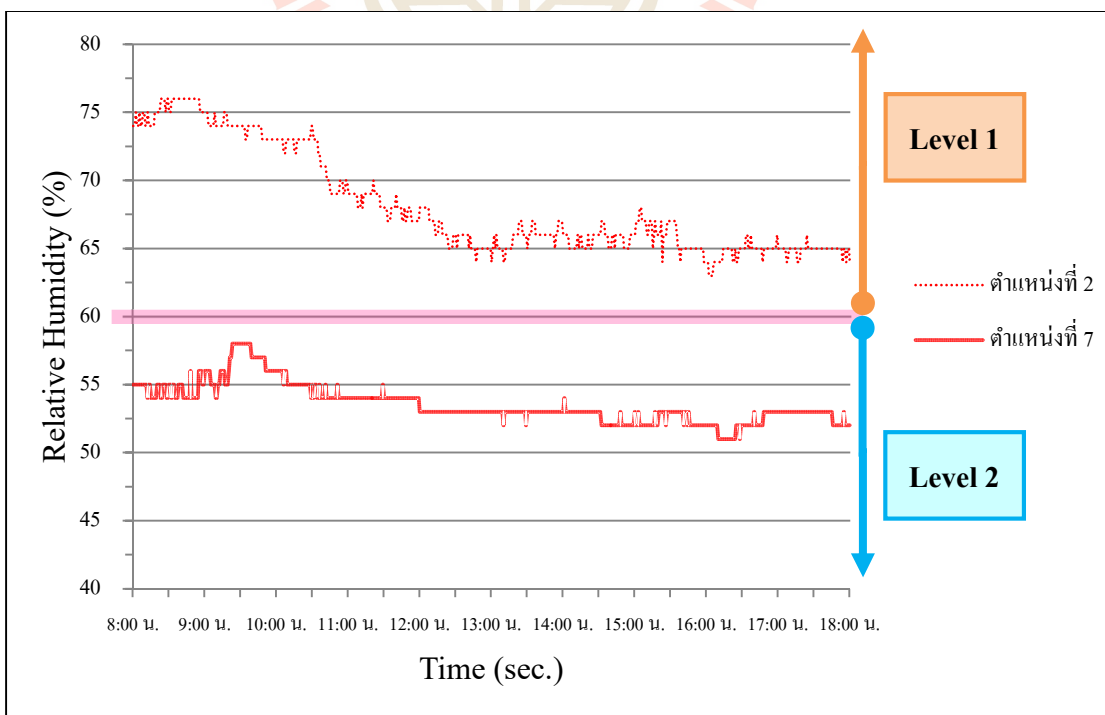
รูปที่ 4.5 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ณ อาคารบรรณสารในช่วงเวลา 8.00 ถึง 18.00 น.

เมื่อพิจารณาสถานการณ์ที่สภาพแวดล้อมเกิดความแปรปรวน เช่น เป็นวันที่มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าวันอื่น ๆ ในรอบสัปดาห์ ในรูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่อยู่ภายในห้องแอร์ตำแหน่งที่ 7 (เส้นทึบสีแดง) มีค่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 28 องศาเซลเซียสซึ่งสูงกว่าวันอื่น ๆ ในรอบสัปดาห์ ส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิของตำแหน่งนี้เกิดการเหลื่อม (overlap) กับช่วงอุณหภูมิของตำแหน่งที่อยู่ภายนอกห้องแอร์ตำแหน่งที่ 2 (เส้นประสีแดง) ที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 27 ถึง 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้เพียงข้อมูลอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะไม่สามารถจำแนกกลุ่มของข้อมูลได้ทุกกรณี แต่เมื่อพิจารณาที่ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของวันที่เกิดความแปรปรวนพบว่า รูปที่ 4.7 ตำแหน่งที่ 7 จะมีความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 60% ตลอดทั้งวัน (มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 53% ถึง 57%) ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 60% ตลอดทั้งวัน (มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 63% ถึง 76%) ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการจัด

ระดับอุณหภูมิให้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถแก้ปัญหาความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศได้อีกด้วย

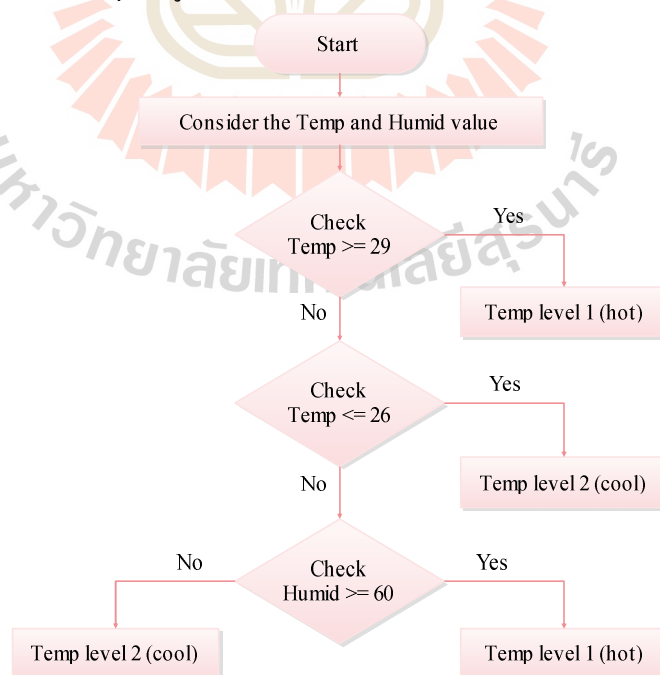


รูปที่ 4.6 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมด้วยข้อมูลอุณหภูมิ



รูปที่ 4.7 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมด้วยข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงตัวอย่างการแบ่งระดับอุณหภูมิ 2 ระดับ จากการเก็บ ณ อาคารบรรณสารในช่วงเวลา 8.00 ถึง 18.00 น. สามารถแบ่งกลุ่มของชุดข้อมูลได้ 2 กลุ่ม คือ ระดับอุณหภูมิที่ 1 (temperature level 1) และระดับอุณหภูมิที่ 2 (temperature level 2) ซึ่งขั้นตอนการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้ดังแผนภาพในรูปที่ 4.8 โดยเริ่มจากการพิจารณาค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมที่ตำแหน่งวัดจุดได้ จากนั้นทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 29 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าตรงตามเงื่อนไขนี้ จะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมจัดอยู่ในระดับอุณหภูมิที่ 1 และจบการทำงาน แต่ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไข จะไปตรวจสอบในขั้นถัดไปว่า ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 26 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าตรงตามเงื่อนไขนี้ จะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมจัดอยู่ในระดับอุณหภูมิที่ 2 และจบการทำงาน แต่ถ้าหากค่าอุณหภูมิไม่ตรงตามเงื่อนไขทั้งสอง อาจหมายถึง สภาพภูมิอากาศขณะที่ทำการวัดข้อมูลเกิดความแปรปรวน ซึ่งการใช้เพียงค่าอุณหภูมิจะไม่สามารถจัดระดับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นในขั้นตอนถัดมาจะทำการพิจารณาข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมว่ามีค่าน้อยกว่า 60% หรือไม่ ถ้าตรงตามเงื่อนไขนี้ จะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมจัดอยู่ในระดับอุณหภูมิที่ 2 แต่ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไข (เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 60%) จะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมจัดอยู่ในระดับอุณหภูมิที่ 1 และสิ้นสุดกระบวนการจัดระดับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของงานวิจัยนี้

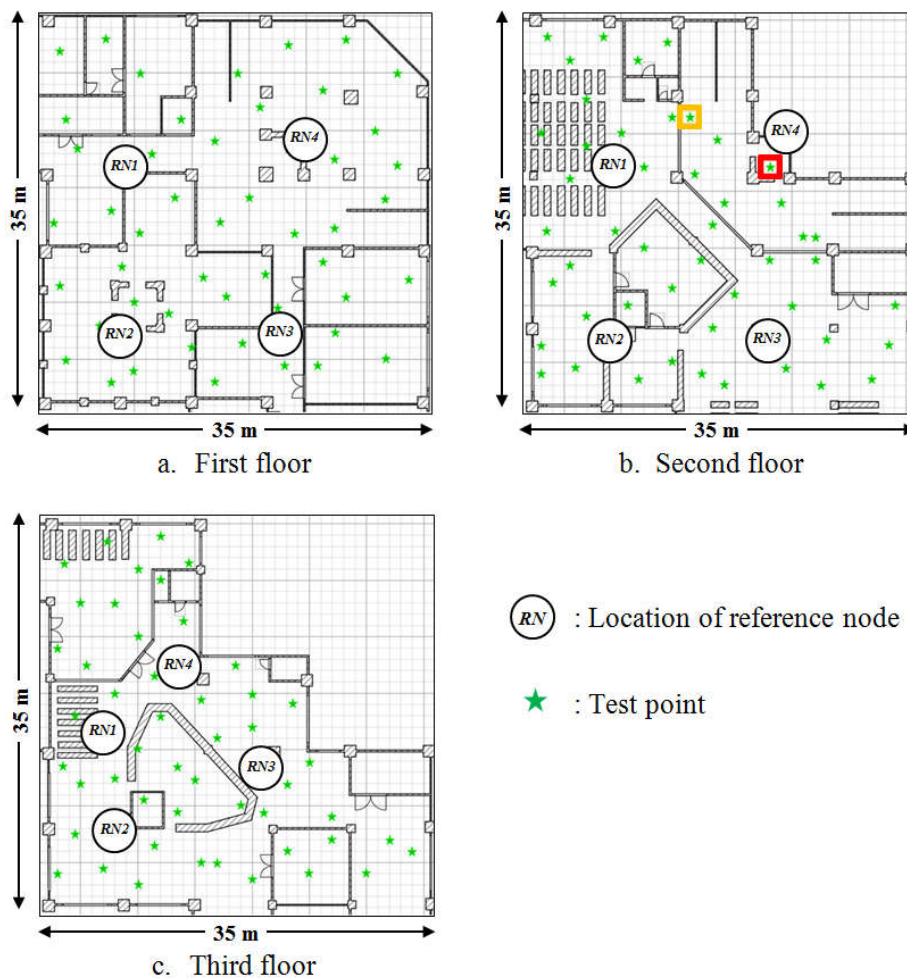
## 4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคการเลือกชั้น

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคที่ใช้สำหรับระบุชั้นของวัตถุ โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคการระบุชั้นชื่อว่า Sum-RSS floor algorithm ซึ่งเป็นเทคนิคการระบุชั้นที่มีความซับซ้อนน้อย ใช้คุณสมบัติของความเข้มสัญญาณที่อยู่ภายในอาคารระบุหมายเลขชั้นของวัตถุ โดยจะทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคการระบุชั้นที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคการระบุชั้นของงานวิจัยอื่น ๆ (เทคนิคจากงานวิจัย [25] Alsehly et al. (2011)) ซึ่งประกอบด้วยเทคนิค Nearest floor algorithm และเทคนิค Group variance algorithm สำหรับขั้นตอนการทำงานของเทคนิค Sum-RSS floor algorithm จะใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่วัดได้ในชั้นตอนออนไลน์เฟส แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติของช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความเข้มสัญญาณที่รับได้ และเลือกชั้นที่วัตถุตั้งอยู่จากชั้นที่ให้ผลรวมความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงมากที่สุด ซึ่งรายละเอียดการทำงานได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 โดยในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคที่ใช้สำหรับระบุชั้นมีหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อย่อย 4.2.1 ข้อกำหนดการทดลอง หัวข้อย่อย 4.2.2 การวิเคราะห์กรณีที่ 1 หัวข้อย่อย 4.2.3 การวิเคราะห์กรณีที่ 2 และหัวข้อย่อย 4.2.4 การทดสอบความถูกต้องของเทคนิคการเลือกชั้น

### 4.2.1 ข้อกำหนดการทดลอง

ทำการทดลองในอาคารบรรณสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 3 ชั้น (1<sup>st</sup> floor 2<sup>nd</sup> floor และ 3<sup>rd</sup> floor) แต่ละชั้นมีขนาดพื้นที่ประมาณ 35 เมตร x 35 เมตร รูปแผนที่ของอาคารบรรณสารแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ในการทดลองเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคที่ใช้ในการระบุชั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 ทำการติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 2 โหนดในแต่ละชั้น และกรณีที่ 2 ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนดในแต่ละชั้น โดยในรูปที่ 4.9a-c แสดงตัวอย่างของสถานการณ์ที่ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนดในแต่ละชั้นแทนด้วยตำแหน่งของวงกลมแต่ละวง ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดพิกัดของจุดทดสอบหรือตำแหน่งของวัตถุจากการสุ่มเลือกจุดทดสอบจำนวน 50 พิกัดในแต่ละชั้น แสดงด้วยสัญลักษณ์ดาวสี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.9a-c





รูปที่ 4.9 แผนที่ของอาคารบรรณสาร

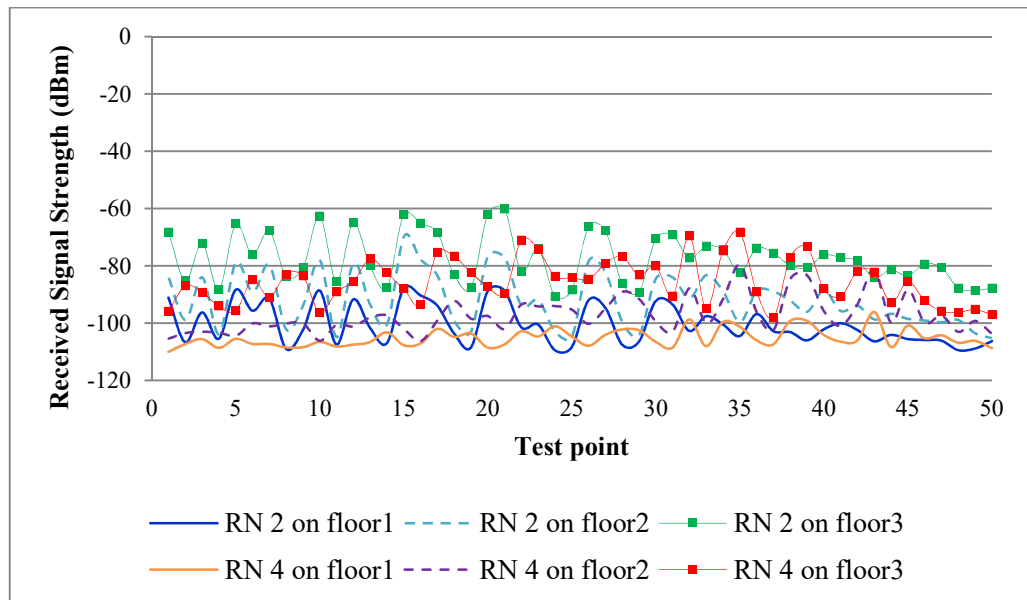
4.2.2 การวิเคราะห์ผลกรณีที่ 1

กรณีที่ 1 ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 2 โนดในแต่ละชั้น จากรูปที่ 4.9 เลือกใช้โนดอ้างอิง RN2 และ RN4 ของแต่ละชั้น และทำการเก็บบันทึกค่าความเข้มสัญญาณทั้ง 50 จุดทดสอบที่อยู่บนชั้นอาคารที่ 3 (ดาวสีเขียวของรูปที่ 4.9c)

รูปที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในชั้นต่าง ๆ ของจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3 โดยเส้นตรง เส้นประ และเส้นจุด แทนค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงที่อยู่ในชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าเส้นจุด (สีเขียวและสีแดง) มีแนวโน้มที่มีความเข้มสัญญาณสูงกว่าเส้นอื่น ๆ ซึ่งหมายถึงความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงของชั้นที่ 3 จะมีค่ามากกว่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงของชั้น 1 และ 2



ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งของวัตถุอยู่บนชั้นที่ 3 และผลที่ได้จากการสังเกตคุณลักษณะนี้ได้ถูกนำไปใช้พัฒนาเทคนิคการระบุชั้นของวัตถุ

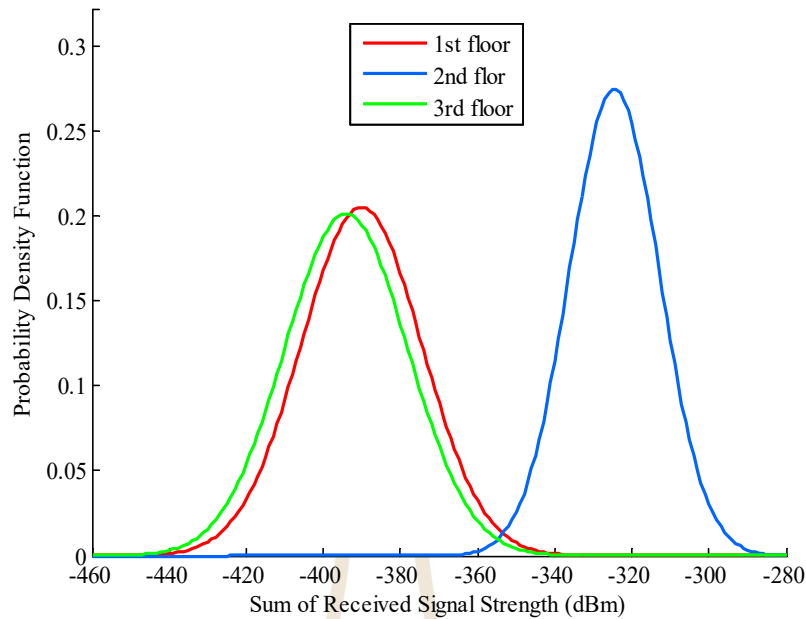


รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของความเข้มสัญญาณที่ได้จากโนดอ้างอิงทั้ง 50 จุดทดสอบ  
ในชั้นที่ 3 (กรณีที่ 1)

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ผลกรณีที่ 2

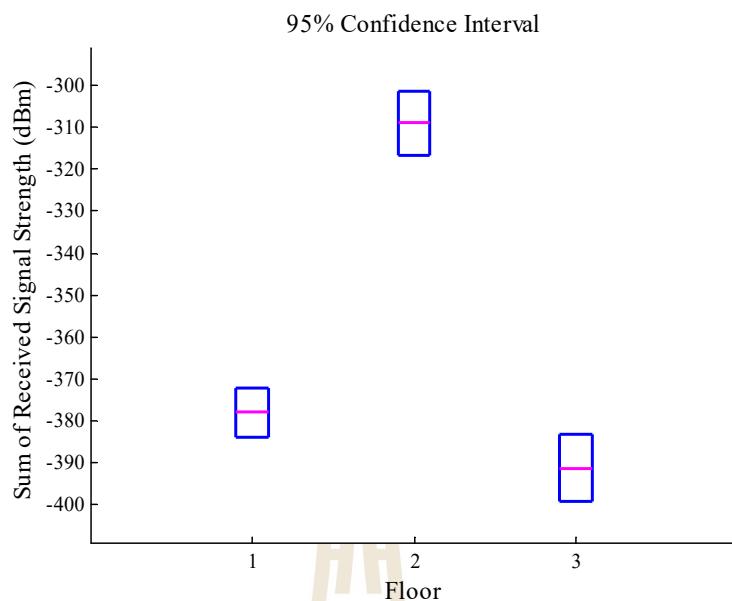
กรณีที่ 2 ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนดในแต่ละชั้นแสดงดังรูปที่ 4.9a-c โดยผู้วิจัยได้สาธิตตัวอย่างของคุณลักษณะความเข้มสัญญาณที่รับได้ซึ่งถูกนำมาใช้พัฒนาเทคนิคระบุชั้นของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีส้ม และสาธิตการระบุหมายเลขชั้นของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีแดงในรูปที่ 4.9b

รูปที่ 4.11 แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในชั้นต่าง ๆ ของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีส้มในรูปที่ 4.9b โดยที่เซตข้อมูลดังกล่าวเป็นเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของการวัด 20 ครั้ง และยังไม่ผ่านกระบวนการกรองข้อมูลจะสังเกตได้ว่า เซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในชั้น 2 (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) จะมากกว่าเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 3 อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งของวัตถุอยู่บนชั้นที่ 2 อีกทั้งยังช่วยยืนยันได้ว่า การนำคุณลักษณะของผลรวมความเข้มสัญญาณที่รับได้มาระบุชั้นของวัตถุจะสามารถบอกชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ได้อย่างถูกต้อง

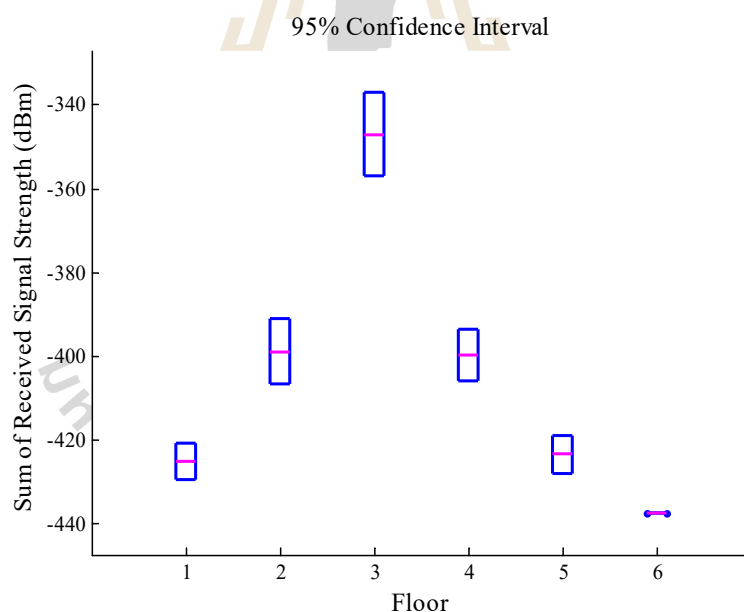


รูปที่ 4.11 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้นของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีส้ม (กรณีที่ 2)

รูปที่ 4.12 แสดงช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้นสำหรับการระบุชั้นของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีแดงในรูปที่ 4.9b ขีดบนและขีดล่างของกล่องหมายถึง ขีดจำกัดบน (upper limit) และขีดจำกัดล่าง (lower limit) ของช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้น ขณะที่ขีดกลางสีชมพูหมายถึง ค่าเฉลี่ยของช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณ ซึ่งใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติทางสถิติของข้อมูลช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความเข้มสัญญาณที่โนดวัดได้รับได้จากโนดอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร โดยเทคนิคระบุชั้นที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่บนชั้นที่ 2 ได้อย่างถูกต้องด้วยความเชื่อมั่นสูงถึง 95% อีกทั้งผู้วิจัยได้ทำการทดลองการระบุชั้นโดยทดสอบกับอาคาร 6 ชั้น (ซึ่งจะกล่าวถัดไปในหัวข้อที่ 4.4.3) รูปที่ 4.13 แสดงช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงติดตั้งอยู่ในอาคาร 6 ชั้น พบว่าเทคนิคระบุชั้นยังคงสามารถระบุชั้นของวัตถุได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจากตัวอย่างในรูปที่ 4.13 เทคนิคการระบุชั้นที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุว่าวัตถุอยู่บนชั้นที่ 3 ที่ความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งเป็นคำตอบที่ถูกต้อง



รูปที่ 4.12 ช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของอาคาร 3 ชั้น  
ของจุดทดสอบที่ไฮไลต์สีแดง (กรณีที่ 2)

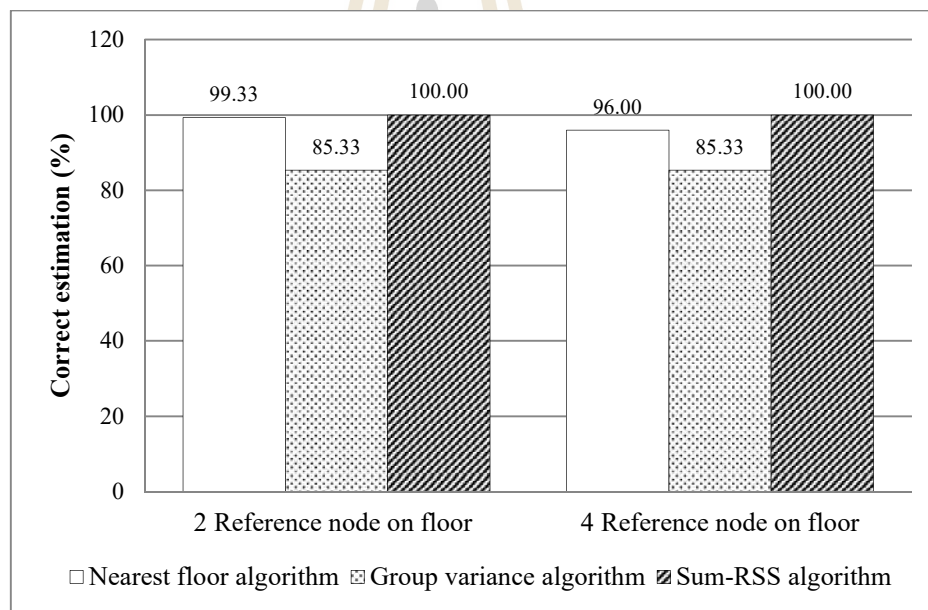


รูปที่ 4.13 ช่วงความเชื่อมั่นของเซตข้อมูลผลรวมค่าความเข้มสัญญาณของอาคาร 6 ชั้น  
ของจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3 (กรณีที่ 2)

#### 4.2.4 การทดสอบความถูกต้องของเทคนิคการเลือกชั้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความถูกต้องของเทคนิคการระบุชั้นที่ได้นำเสนอ โดยทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชั้นของเทคนิคที่ได้นำเสนอ กับเทคนิคการระบุชั้นของงานวิจัยอื่น ประกอบด้วยเทคนิค Nearest floor algorithm และเทคนิค Group variance algorithm

โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเทคนิคการระบุชั้น 2 กรณีคือ กรณีที่ติดตั้งโนดอ้างอิง 2 โนดและ 4 โนด โดยในแต่ละกรณีได้ทำการสุ่มเลือกจุดทดสอบจำนวน 150 จุดทดสอบแบ่งออกเป็นชั้นละ 50 จุดทดสอบ (ดาวสี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.9a-c) เพื่อใช้ทดสอบความถูกต้องในการระบุชั้นของวัตถุ รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชั้นของทั้ง 3 เทคนิคสำหรับทั้ง 2 กรณี โดยจะสังเกตเห็นว่า เทคนิคการระบุชั้นของวัตถุที่ได้นำเสนอ (Sum-RSS floor algorithm) มีสมรรถนะความถูกต้องที่ดีกว่าเทคนิคการระบุชั้นของงานวิจัยอื่นทั้งสองกรณี (Nearest floor algorithm และ Group variance algorithm) โดยที่เทคนิค Sum-RSS floor algorithm จะให้ความถูกต้องในการระบุชั้นสูงถึง 100% ที่ทั้งสองกรณี ขณะที่ Nearest floor algorithm และ Group variance algorithm จะให้ความถูกต้องในการระบุชั้นประมาณ 90% และ 80% ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างทั้ง 2 กรณีจะสังเกตเห็นได้ว่า จำนวนของโนดอ้างอิงที่ติดตั้งในแต่ละชั้นจะมีผลต่อความถูกต้องในการระบุชั้นของเทคนิคอื่น ๆ แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อเทคนิค Sum-RSS floor algorithm ที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 4.14 ความถูกต้องของการระบุชั้นของแต่ละเทคนิค

### 4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในอาคารที่มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น

หัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น (หัวข้อที่ 4.3.1) อาคาร 3 ชั้น (หัวข้อที่ 4.3.2) และอาคาร 6 ชั้น (หัวข้อที่ 4.3.3) ขึ้น โดยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้แก่ เทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น (Hybrid fusion parameter technique) และเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Hybrid RSS parameter technique) เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นที่มีอยู่แล้วได้แก่ เทคนิคระยะห่างยูคลิดีเนียน (Euclidean distance technique) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม (Enhanced Weighted K-Nearest Neighbor method : EWKNN method)

โดยเทคนิคที่ได้พิจารณาเปรียบเทียบมี 5 แบบคือ

- 1) เทคนิคแบบผสมซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 2 ระดับ ใช้ตัวย่อคือ Hy fusion (2TL)
- 2) เทคนิคแบบผสมซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 4 ระดับ ใช้ตัวย่อคือ Hy fusion (4TL)
- 3) เทคนิคแบบผสมที่ใช้พารามิเตอร์ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ ใช้ตัวย่อคือ Hy RSS
- 4) เทคนิคระยะห่างยูคลิดีเนียน ใช้ตัวย่อคือ Euclidean
- 5) เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ใช้ตัวย่อคือ EWKNN

สำหรับกรณีที่ระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น จะใช้เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 5 ระดับแทนการแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 2 และ 4 ระดับ

กำหนดให้การทดลองทั้งสามกรณี (2 ชั้น 3 ชั้น และ 6 ชั้น) ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนดในแต่ละชั้น (RN1, RN2, RN3, และ RN4) โดยกำหนดระยะห่างของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร (grid spacing) และมีข้อกำหนดของการติดตั้งอุปกรณ์เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1

#### 4.3.1 การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น (1<sup>st</sup> floor และ 2<sup>nd</sup> floor) ณ อาคารบรรณสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยแต่ละชั้นมีขนาดพื้นที่ประมาณ 35 เมตร x 35 เมตร และมี

จำนวนพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ทั้งหมด 407 พิกัด และสุ่มเลือกจุดทดสอบ 100 จุดทดสอบ รูปที่ 4.15a-b แสดงพื้นที่การทดลอง ณ อาคารบรรณสารสำหรับกรณีอาคาร 2 ชั้น จุดสีน้ำเงินแทนตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีทั้งหมด 407 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร วงกลมสีส้มแทนตำแหน่งที่ติดตั้งโนคอ้างอิงในแต่ละชั้น และรูปที่ 4.16a-b จุดดาวสีเขียวแทนตำแหน่งของจุดทดสอบทั้ง 100 จุดทดสอบที่ได้จากการสุ่มเลือก

รูปที่ 4.15a-b เป็นฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ โดยมีการแทนพื้นที่ของการจัดระดับอุณหภูมิด้วยสีที่แตกต่างกัน ระดับอุณหภูมิที่ 1 แทนด้วยพื้นที่สีส้มมีค่าอุณหภูมิ  $\geq 30^{\circ}\text{C}$  และค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 71% - 80% ระดับอุณหภูมิที่ 2 แทนด้วยพื้นที่สีเหลืองมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $\geq 26^{\circ}\text{C}$  และ  $\leq 29^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 61% - 70% ระดับอุณหภูมิที่ 3 แทนด้วยพื้นที่สีเขียวมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $\geq 22^{\circ}\text{C}$  และ  $\leq 25^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 51% - 60% และระดับอุณหภูมิที่ 4 แทนด้วยพื้นที่สีฟ้ามีค่าอุณหภูมิ  $\leq 21^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 41% - 50% ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างการจัดระดับอุณหภูมิของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ

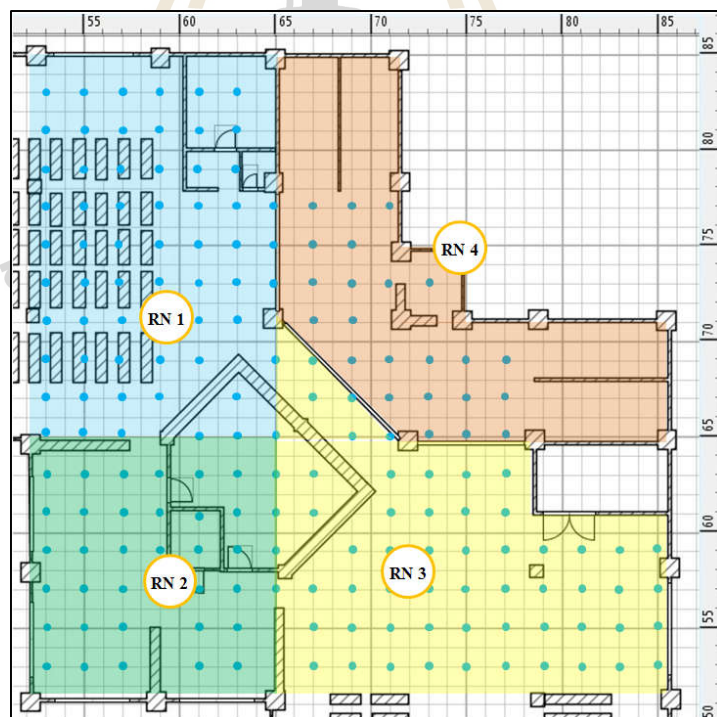
หมายเหตุ ในการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม สำหรับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ที่เป็นเลขทศนิยม จะถูกปัดให้เป็นเลขจำนวนเต็มก่อนแล้วจึงดำเนินการในขั้นตอนการจัดระดับอุณหภูมิ







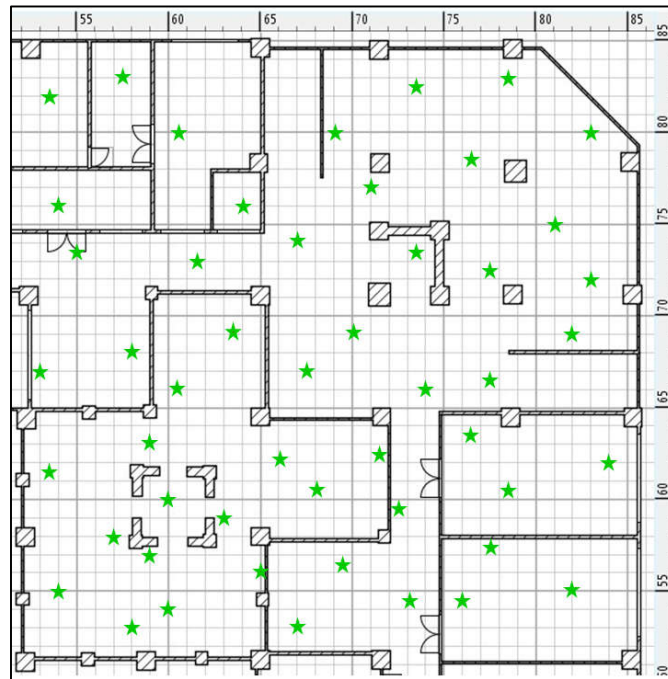
a. First floor (fingerprint 231 points)



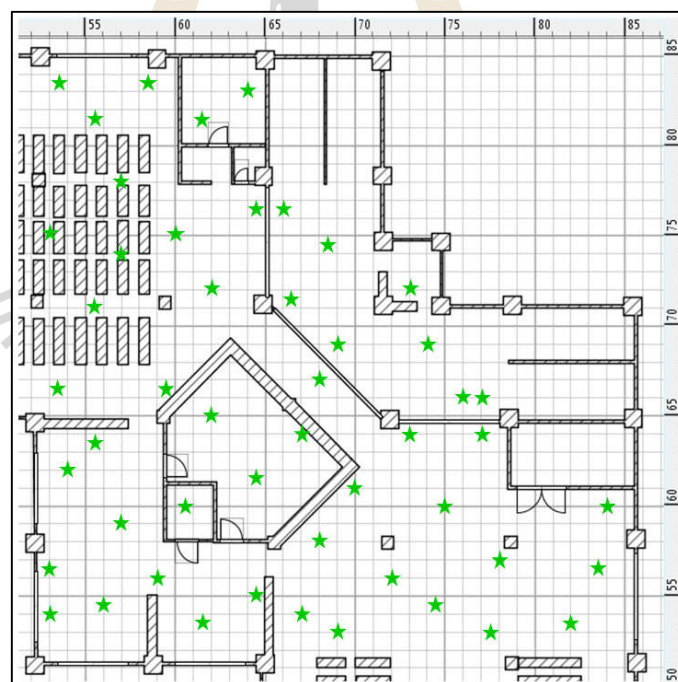
b. Second floor (fingerprint 176 points)

รูปที่ 4.15 ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรั้นท์ของอาคารบรรณสาร 2 ชั้น (407พิกัด)





a. First floor (target 50 points)



b. Second floor (target 50 points)

รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของจุดทดสอบของอาคารบรรณสาร 2 ชั้น (100 จุดทดสอบ)

ตารางที่ 4.4 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้ฟารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ

ระดับอุณหภูมิ	ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (%)
1	$\geq 30$	71% - 80%
2	26 - 29	61% - 70%
3	22 - 25	51% - 60%
4	$\leq 21$	41% - 50%

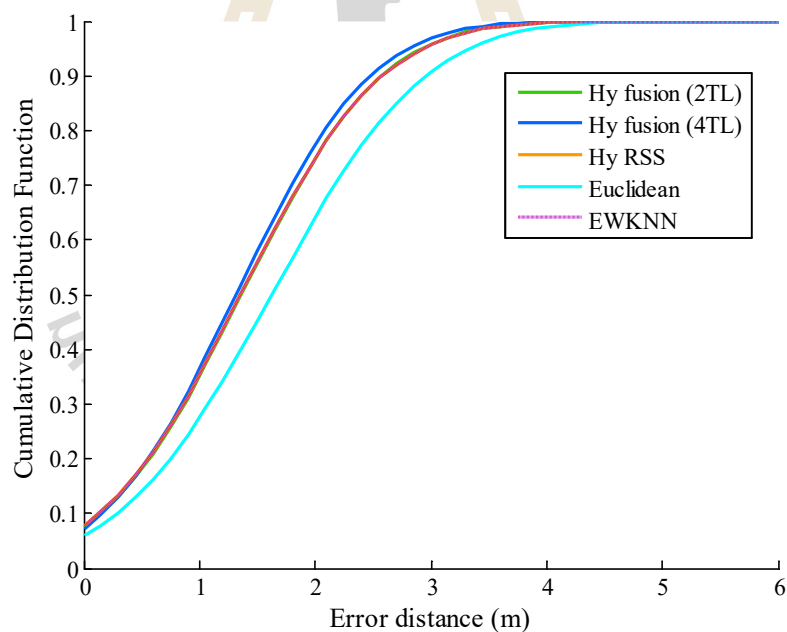
ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้นที่มีจำนวนฟังก์เจอร์ปรีนัท 407 พิกัดและสุ่มเลือกจุดทดสอบจำนวน 100 จุดทดสอบ ซึ่งจะพิจารณาสมรรถนะของ 5 เทคนิค ได้แก่ กลุ่มเทคนิคแบบผสม 3 เทคนิค คือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้ฟารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 2 ระดับ และ 4 ระดับ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้ความเข้มสัญญาณที่รับได้ และกลุ่มเทคนิคพื้นฐาน 2 เทคนิคคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งที่คำนวณได้และตำแหน่งจริงของวัตถุ พบว่ากลุ่มเทคนิคแบบผสมทั้ง 3 เทคนิคจะมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสมรรถนะความถูกต้องดีกว่ากลุ่มเทคนิคพื้นฐาน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 1.22 เมตร ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดประมาณ 4.62 เมตร ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประมาณ 0.02 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.89 เมตร ขณะที่กลุ่มเทคนิคพื้นฐาน มีเทคนิคที่ให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งแย่ที่สุดคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean) มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.57 เมตร ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 6.02 เมตร ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.06 เมตร

เมื่อพิจารณาสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.17 จะสังเกตได้ว่าเทคนิคที่ให้ความแม่นยำที่สุดคือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้ฟารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับแทนด้วยเส้นกราฟสีน้ำเงิน (Hy fusion (4TL)) โดยมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80 % ภายใน 2 เมตร ซึ่งหมายถึงการระบุตำแหน่งวัตถุ 80 ครั้งจาก 100 ครั้งของเทคนิคดังกล่าว จะให้ความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งไม่เกิน 2 เมตร ขณะที่เทคนิคที่ให้ความแม่นยำน้อยที่สุดคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนแทนด้วยเส้นกราฟสีฟ้า (Euclidean) โดยมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80 % ภายในระยะ 2.5 เมตร จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้นของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้

พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับจะให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีที่ใกล้เคียงกับกลุ่มเทคนิคแบบผสม และมีสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งดีกว่าทั้ง 4 เทคนิค

ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างของพิกัดฟังก์ชันปริ้นท์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร

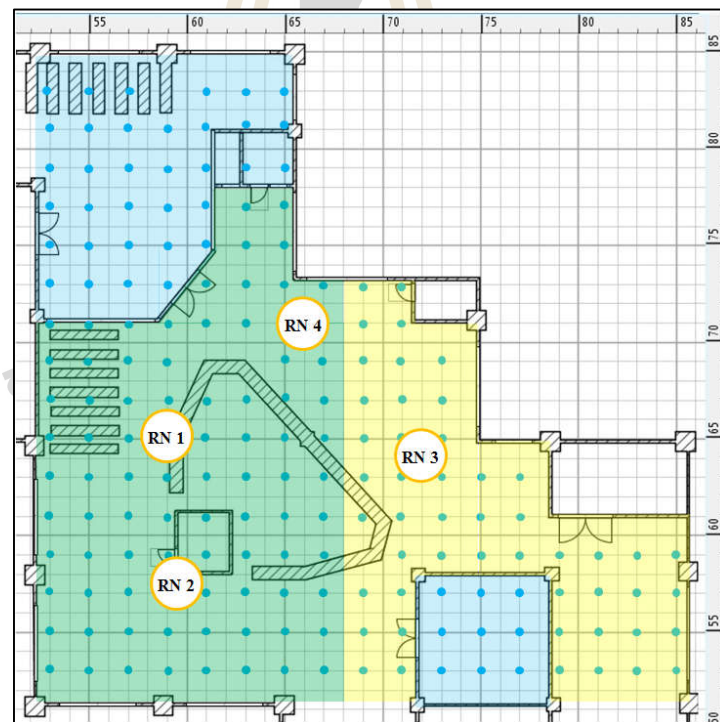
Error distance (m)					
Statistics	Hy fusion (2TL)	Hy fusion (4TL)	Hy RSS	Euclidean	EWKNN
Mean	1.226	1.233	1.218	1.573	1.218
Max	4.623	4.623	4.623	6.021	4.623
Min	0.023	0.023	0.023	0.000	0.023
STD	0.893	0.889	0.903	1.067	0.903



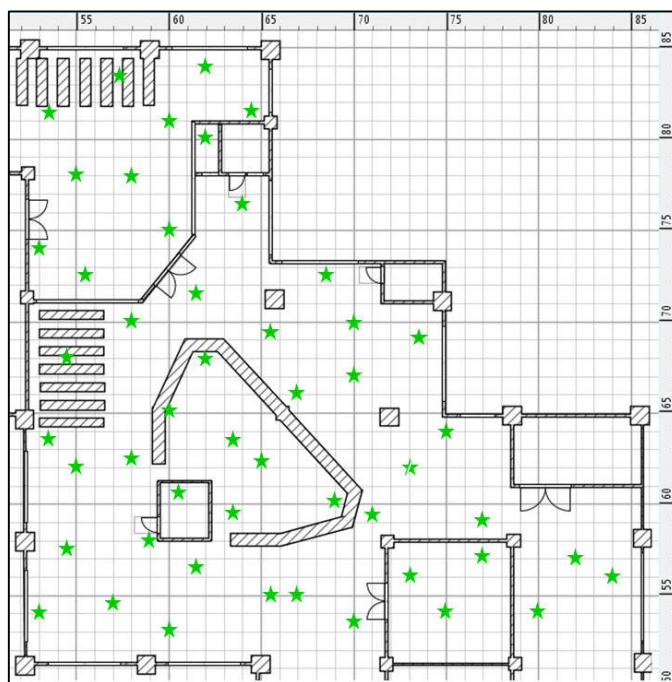
รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนของแต่ละเทคนิค (กรณีอาคาร 2 ชั้น)

#### 4.3.2 การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น (1<sup>st</sup> floor, 2<sup>nd</sup> floor, และ 3<sup>rd</sup> floor) ณ อาคารบรรณสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยแต่ละชั้นมีขนาดพื้นที่ประมาณ 35 เมตร x 35 เมตร โดยมีจำนวนพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์ทั้งหมด 585 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มเลือกจุดทดสอบ 150 จุดทดสอบ โดยใช้พิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์และจุดทดสอบในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.1 ในรูปที่ 4.15a-b สำหรับตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์บนชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 และรูปที่ 4.16a-b สำหรับตำแหน่งของจุดทดสอบบนชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยรูปที่ 4.18 แสดงพื้นที่ของอาคารบรรณสารชั้น 3 ซึ่งมีตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์จำนวน 178 พิกัด และรูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3 จำนวน 50 จุดทดสอบ ในการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น จะมีข้อกำหนดเช่นเดียวกับการจัดระดับอุณหภูมิในหัวข้อที่ 4.4.1



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่อยู่บนชั้นที่ 3 ของอาคารบรรณสาร (178 พิกัด)



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3 ของอาคารบรรณสาร (50 จุดทดสอบ)

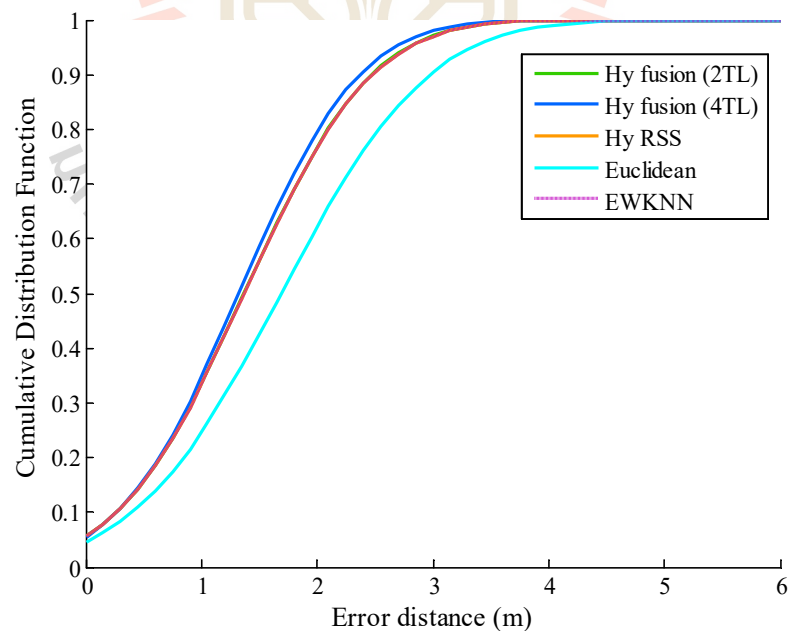
ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้นซึ่งมีจำนวนฟังก์เจอร์ปรีนธ์ 585 พิกัดและสุ่มเลือกจุดทดสอบจำนวน 150 จุดทดสอบ ซึ่งจะพิจารณาสมรรถนะของ 5 เทคนิคเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.1 ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งที่คำนวณได้และตำแหน่งจริงของวัตถุ พบว่ากลุ่มเทคนิคแบบผสมทั้ง 3 เทคนิคจะมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ใกล้เคียงกัน โดยเทคนิคระบุตำแหน่งที่ให้ความถูกต้องที่ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ คือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ (Hy fusion (4TL)) มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.32 เมตร ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 4.69 เมตร ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0.05 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.82 เมตร และพบว่าเทคนิคที่มีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งแย่ที่สุดคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean) มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.69 เมตร ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 5.70 เมตร ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.00 เมตร

เมื่อพิจารณาสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.20 จะสังเกตเห็นได้ว่าเทคนิคที่ให้สมรรถนะความแม่นยำดีที่สุดยังคงเป็นเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับแทนด้วยเส้นกราฟสีน้ำเงิน (Hy fusion (4TL)) โดยมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80 % ภายใน 2 เมตร และ

เทคนิคที่ให้ความแม่นยำน้อยที่สุดคือ เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแทนด้วยเส้นกราฟสีฟ้า (Euclidean) โดยมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80 % ภายในระยะ 2.5 เมตร จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับสามารถให้สมรรถนะทั้งความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งดีกว่าทั้ง 4 เทคนิค

ตารางที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างของพิกัดฟังก์ชันปริ้นท์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร

Error distance (m)					
Statistics	Hy fusion (2TL)	Hy fusion (4TL)	Hy RSS	Euclidean	EWKNN
Mean	1.368	1.322	1.371	1.687	1.371
Max	4.864	4.687	4.864	5.701	4.864
Min	0.048	0.048	0.048	0.000	0.048
STD	0.859	0.819	0.862	1.002	0.862



รูปที่ 4.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนของแต่ละเทคนิค (กรณีอาคาร 3 ชั้น)

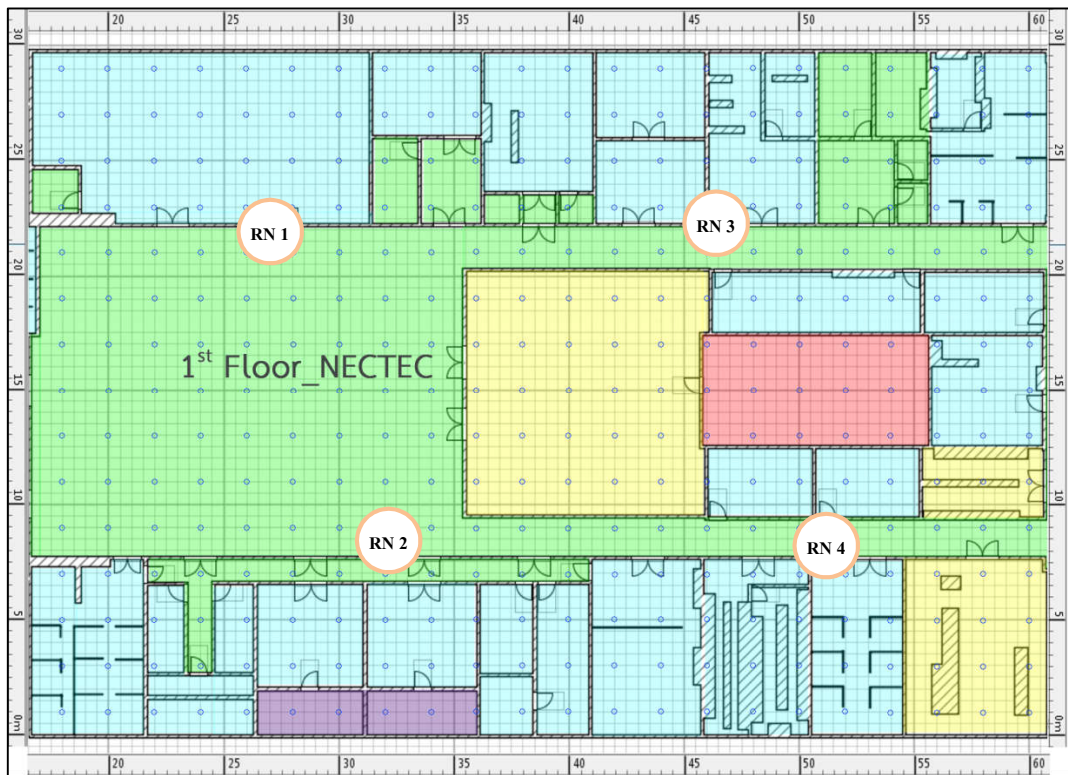


### 4.3.3 การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น

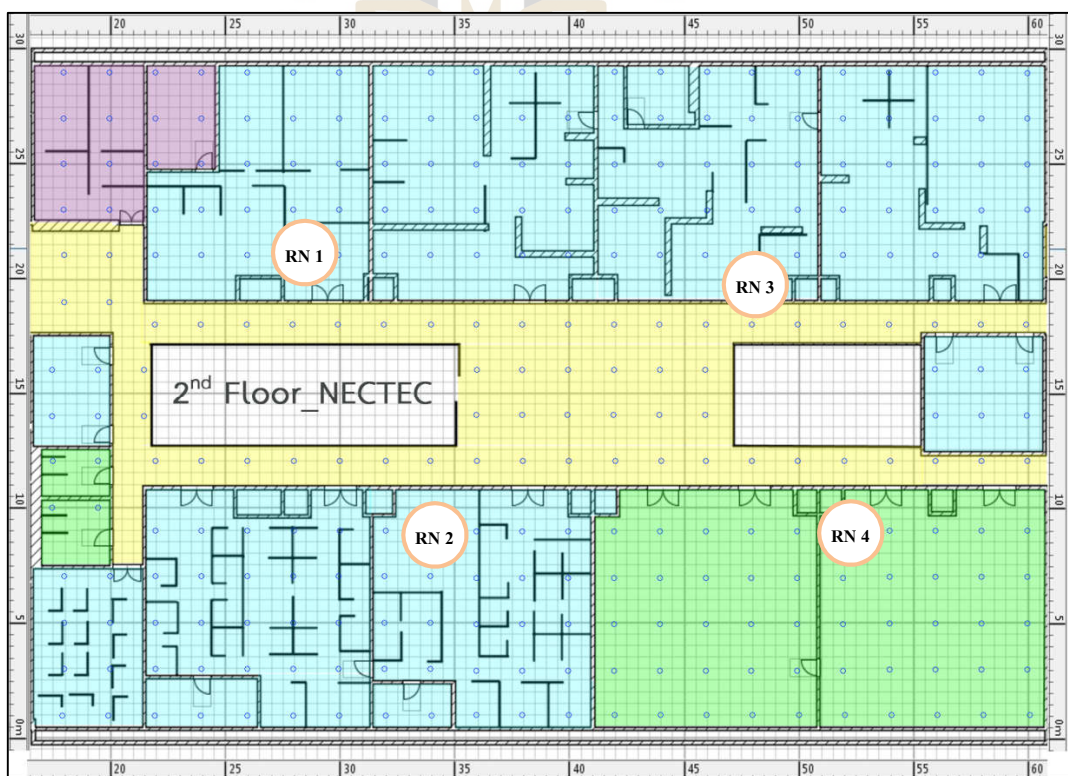
ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งทำการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ซึ่งเป็นอาคาร 6 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดพื้นที่ประมาณ 30 เมตร x 60 เมตร โดยมีจำนวนพิกัดฟิงเกอร์-ปρί้นท์ทั้งหมด 1755 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์ปρί้นท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มเลือกจุดทดสอบ 300 จุดทดสอบ รูปที่ 4.21a-f แสดงพื้นที่การทดลอง ณ อาคาร NECTEC สำหรับกรณีการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น จุดสีน้ำเงินแทนตำแหน่งพิกัดฟิงเกอร์ปρί้นท์ที่มีทั้งหมด 1755 พิกัด วงกลมสีส้มแทนตำแหน่งที่ติดตั้ง โนคอ้างอิงในแต่ละชั้น

จากรูปที่ 4.21a-f เป็นฐานข้อมูลพิกัดฟิงเกอร์ปρί้นท์ของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ โดยมีการแทนพื้นที่ของการจัดระดับอุณหภูมิด้วยสีที่แตกต่างกัน ระดับอุณหภูมิที่ 1 แทนด้วยพื้นที่สีแดงมีค่าอุณหภูมิ  $\geq 32^{\circ}\text{C}$  และค่าความชื้นสัมพัทธ์  $\geq 80\%$  ได้แก่พื้นที่ที่เป็น คาดฟ้า ระเบียงตึก ทางเดินเชื่อมตึก และห้องเครื่องพัสดุ เป็นต้น ระดับอุณหภูมิที่ 2 แทนด้วยพื้นที่สีส้มมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $\geq 30^{\circ}\text{C}$  และ  $\leq 31^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 70% - 79% ได้แก่พื้นที่ที่เป็น ห้องควบคุมไฟฟ้า บันได และห้องเก็บครุภัณฑ์ เป็นต้น ระดับอุณหภูมิที่ 3 แทนด้วยพื้นที่สีเขียวมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $\geq 26^{\circ}\text{C}$  และ  $\leq 29^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 60% - 69% ได้แก่พื้นที่ที่จำพวก ห้องเตรียมอาหาร ห้องน้ำ ห้องถ่ายเอกสาร ห้องพักรออาคาร และโถงทางเดิน เป็นต้น ระดับอุณหภูมิที่ 4 แทนด้วยพื้นที่สีฟ้ามีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $\geq 22^{\circ}\text{C}$  และ  $\leq 25^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50% - 59% พื้นที่ที่อยู่ในระดับอุณหภูมินี้ได้แก่ ห้องประชุม ห้องวิจัยและพัฒนา ห้องเก็บเอกสาร และห้องสื่อสาร เป็นต้น ระดับอุณหภูมิที่ 5 แทนด้วยพื้นที่สีม่วงมีค่าอุณหภูมิ  $\leq 21^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์  $\leq 59\%$  ได้แก่พื้นที่ที่เป็น ศูนย์บ่มเพาะ (incubator) ห้องเซิร์ฟเวอร์ และห้อง UPS (Uninterruptible Power Supply) เป็นต้น ตารางที่ 4.7 แสดงตัวอย่างการจัดระดับอุณหภูมิของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ

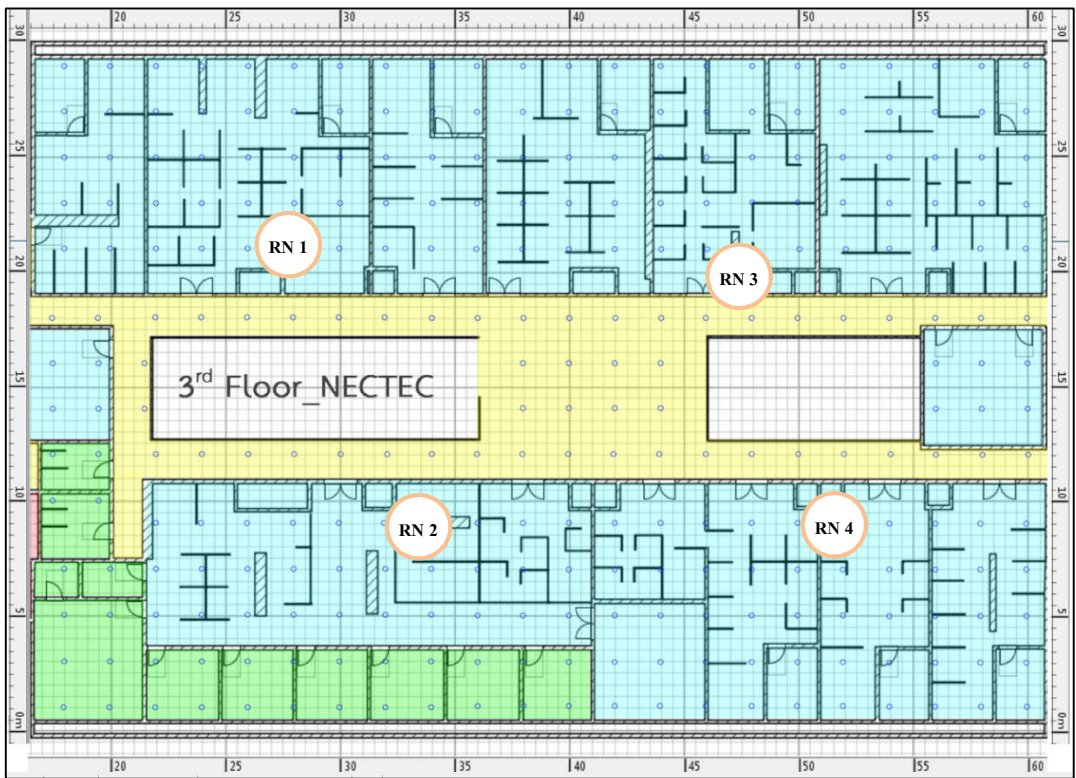




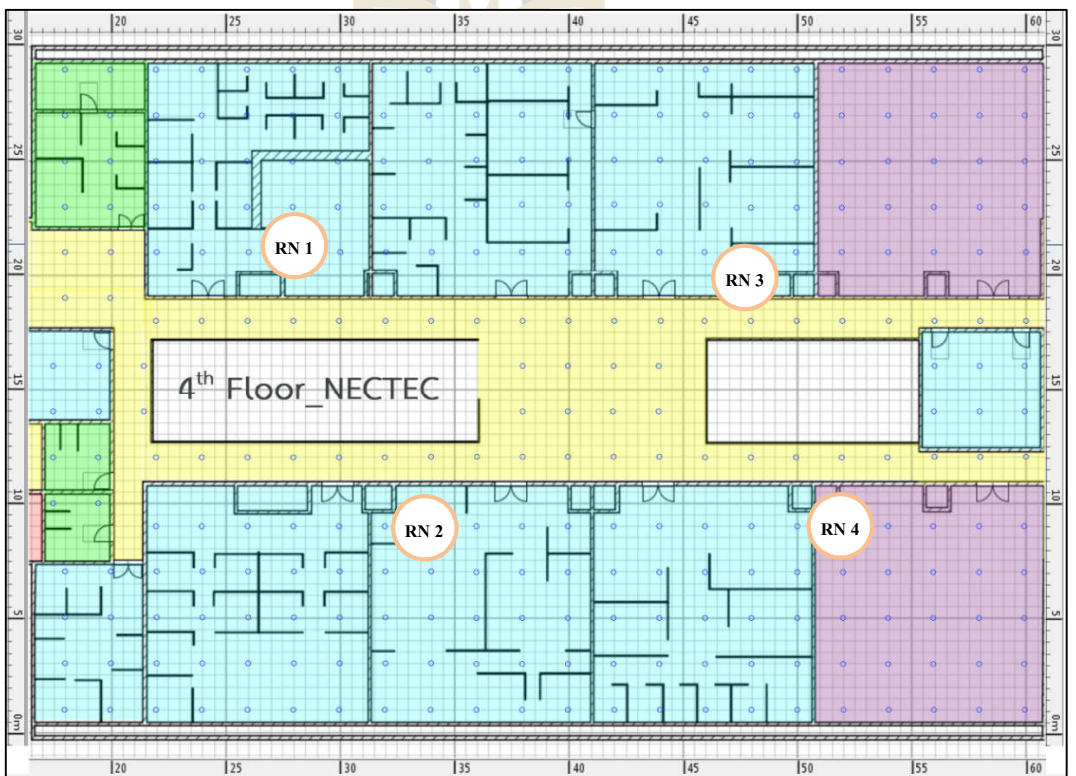
a. First floor (fingerprint 330 points)



b. Second floor (fingerprint 288 points)

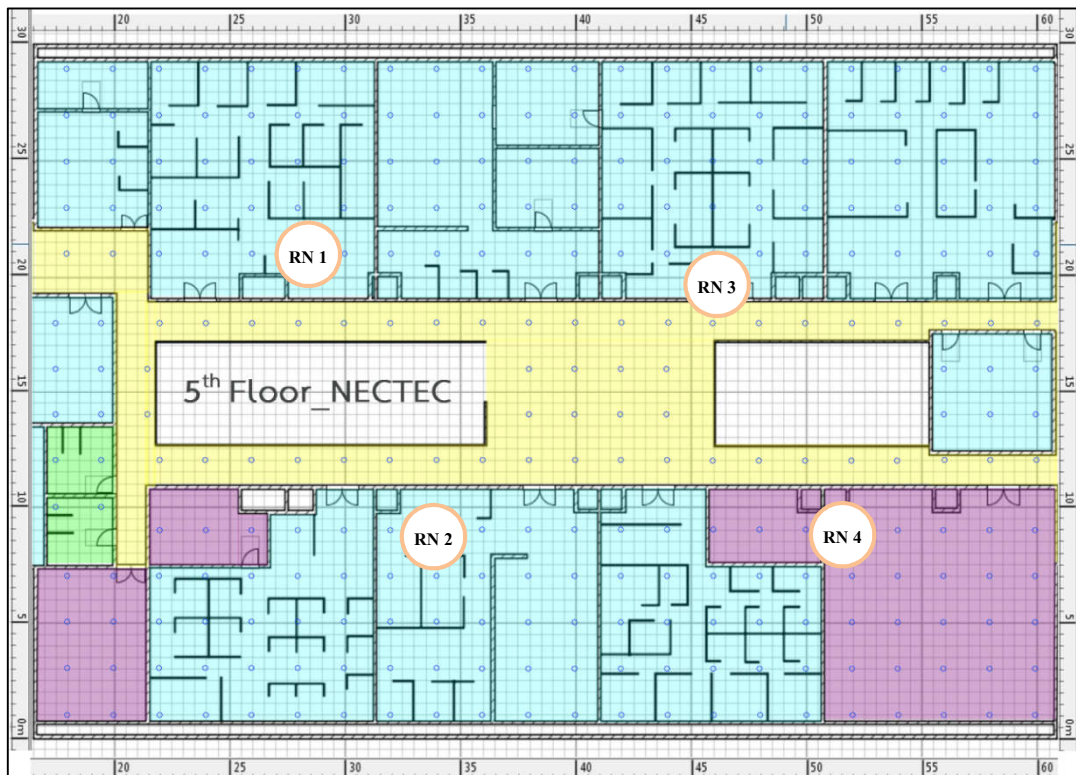


c. Third floor (fingerprint 284 points)

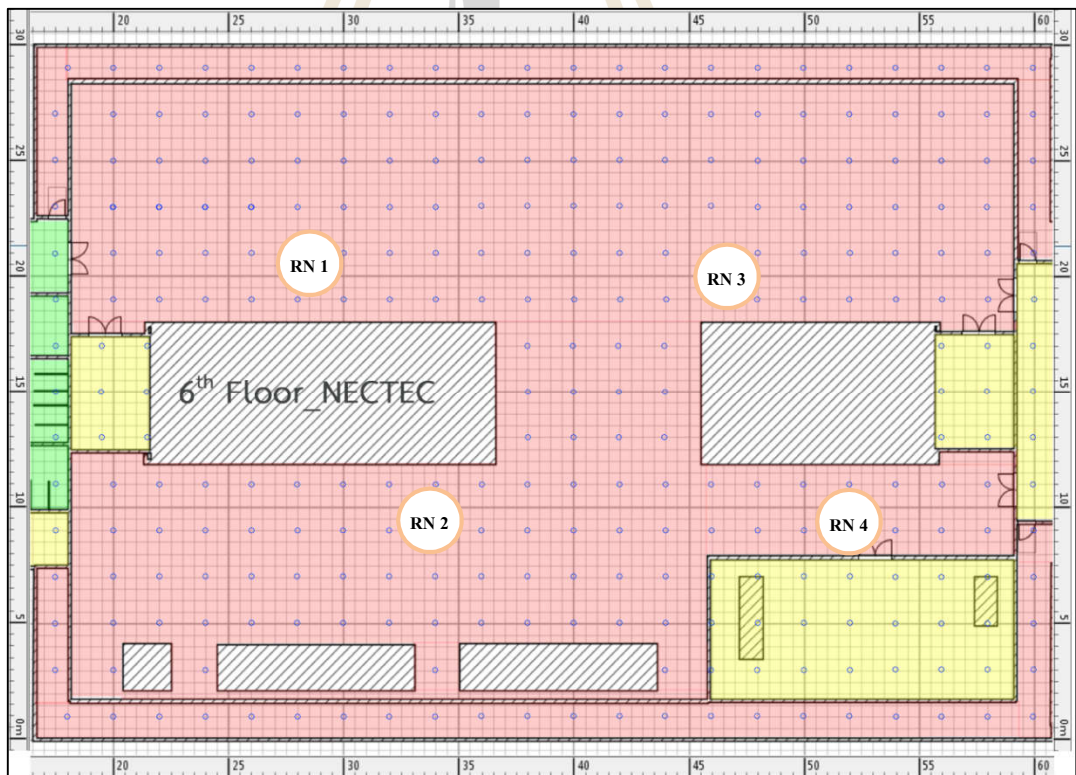


d. Fourth floor (fingerprint 284 points)





e. Fifth floor (fingerprint 284 points)



f. Sixth floor (fingerprint 285 points)

รูปที่ 4.21 ตำแหน่งฟิงเกอร์ปริ้นท์ของอาคาร NECTEC 6 ชั้น (1755 พิกัด)

ตารางที่ 4.7 การจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์  
ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ

ระดับอุณหภูมิ	ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (%)
1	$\geq 32$	$\geq 80\%$
2	30 - 31	70% - 79%
3	26 - 29	60% - 69%
4	22 - 25	50% - 59%
5	$\leq 21$	$\leq 49\%$

ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้อง และความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ของการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น ที่มีจำนวนฟิงเกอร์ปρίนท์ 1775 พิกัด และสุ่มเลือกจุดทดสอบจำนวน 300 จุดทดสอบ ซึ่งพิจารณาสมรรถนะของ 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคแบบผสมที่ใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ เทคนิคแบบผสมที่ใช้ความเข้มสัญญาณที่รับได้ เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งที่คำนวณได้และตำแหน่งจริงของวัตถุ ผลในตารางที่ 4.8 พบว่าเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีสมรรถนะความถูกต้องดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ คือ เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Hy RSS) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม (EWKNN) ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.14 เมตร ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 4.81 เมตร ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0.02 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.81 เมตร และพบว่าเทคนิคที่มีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งแย่ที่สุดคือเทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean) มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.57 เมตร ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 6.27 เมตร ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 0 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.98 เมตร

เมื่อพิจารณาที่ความถูกต้องของเทคนิคแบบผสม 2 เทคนิคที่ประกอบด้วย เทคนิคแบบผสมที่ใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ (Hy fusion (STL)) และเทคนิคแบบผสมที่ใช้พารามิเตอร์ความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Hy RSS) พบว่าทั้งสองเทคนิคมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.18 เมตรและ 1.14 เมตรตามลำดับ จึงอาจสรุปได้ว่า 2 เทคนิคแบบผสมมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเท่ากัน

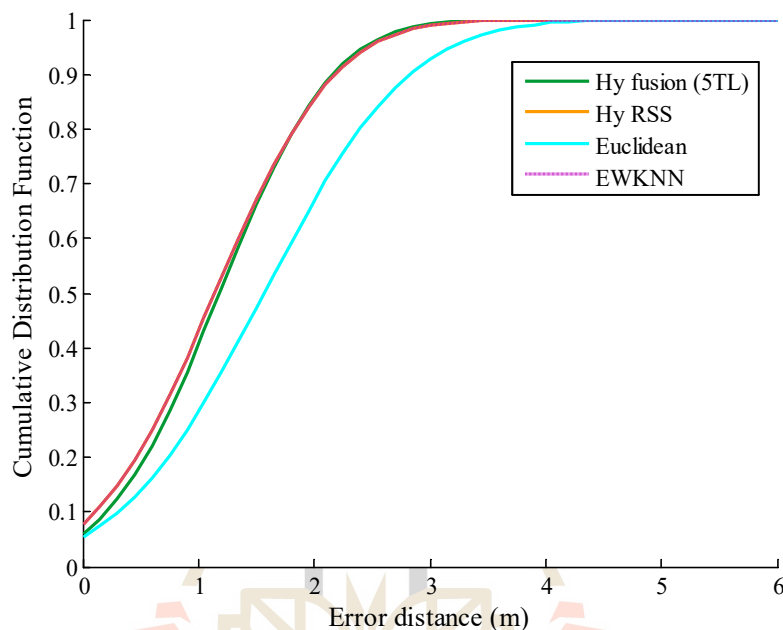
ตารางที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างของพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 2 เมตร

Error distance (m)				
Statistics	Hy fusion (5TL)	Hy RSS	Euclidean	EWKNN
Mean	1.183	1.143	1.567	1.143
Max	4.808	4.808	6.265	4.808
Min	0.064	0.020	0.000	0.020
STD	0.763	0.808	0.984	0.808

เมื่อพิจารณาที่สมรรถนะความแม่นยำของการระบุตำแหน่งจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.22 จะสังเกตได้ว่า สามเทคนิคที่มีสมรรถนะความแม่นยำดีที่สุดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันคือ เทคนิคแบบผสมที่ใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 5 ระดับ (Hy fusion (5TL)) เทคนิคแบบผสมที่ใช้ความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ (Hy RSS) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม (EWKNN) ซึ่งมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80 % ภายใน 1.8 เมตร ซึ่งหมายถึงการระบุตำแหน่งวัตถุ 80 ครั้งจาก 100 ครั้งของทั้งสามเทคนิค จะให้ความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งไม่เกิน 1.8 เมตร ขณะที่เทคนิคที่มีสมรรถนะความแม่นยำน้อยที่สุดคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean) มีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80 % ภายในระยะ 2.3 เมตร

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบข้อสังเกตว่า เมื่อพื้นที่ของการทดลองมีขนาดใหญ่ขึ้น (อาคาร 2 ชั้น อาคาร 3 ชั้น และอาคาร 6 ชั้น) เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกัน (ใช้ค่าอนุภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม) ยังคงมีสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งที่ดี ยิ่งไปกว่านั้น จากผลการทดลองข้างต้นยังแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการระบุชั้นที่พัฒนาขึ้น ซึ่งให้ชื่อว่า Sum-RSS floor algorithm จะสามารถระบุชั้นของวัตถุได้ถูกต้อง 100% (เพื่อนำหมายเลขชั้นมาใช้ในกระบวนการกรองชั้น) อีกทั้ง การใช้ค่าอนุภูมิของสิ่งแวดล้อมร่วมกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกัน (กระบวนการกรองระดับอนุภูมิ) จะสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุทั้งด้านความถูกต้อง และด้านความแม่นยำในการระบุตำแหน่งได้ ซึ่งนอกจากกระบวนการกรองชั้น และกระบวนการกรองระดับอนุภูมิจะช่วยลดจำนวนพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่จะถูกพิจารณาในกระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิเดียนแล้ว มันยังช่วยลดความผิดพลาดในแง่ของการเลือกพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ได้อีกด้วย ซึ่งพิกัดฟังก์ชันปริพันธ์ที่มีหมายเลขชั้นและระดับอนุภูมิแตกต่างกัน

หมายเลขชั้นและระดับอนุภูมิภาคของวัตถุ จะถูกกรองออกและไม่ถูกนำมาพิจารณา อีกทั้งความเท่ากัน (สมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำ) ของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Hy RSS) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม (EWKNN) จะถูกทดสอบด้วยการประเมินความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนของแต่ละเทคนิค (กรณีอาคาร 6 ชั้น)

#### 4.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่ง

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านเวลาของเทคนิคระบุตำแหน่ง โดยจะเป็นการวิเคราะห์ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบผลระหว่าง ผลที่ได้จากการประเมินความซับซ้อนของการทำงาน (evaluating runtime complexity) ในบทที่ 4 กับผลของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (หรือผลของเวลาที่วัดได้จากการทำงานจริง) โดยทำการทดลองภายในอาคาร 2 ชั้น อาคาร 3 ชั้น และอาคาร 6 ชั้น ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ถึงจุดแข็งและจุดอ่อนแต่ละเทคนิคระบุตำแหน่งเมื่อพื้นที่การทดลองมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้ในการเปรียบเทียบประกอบด้วย 5 เทคนิคเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4



#### 4.4.1 ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น ที่มีพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ 407 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์-ปรีนท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มจุดทดสอบจำนวน 100 จุดทดสอบ เพื่อใช้ทดสอบความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการทำงานของ 5 เทคนิคซึ่งประกอบด้วย เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 2 ระดับและ 4 ระดับ (Hy fusion (2TL), Hy fusion (4TL)) เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Hy RSS) เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม (EWKNN) สำหรับการทดสอบสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการทำงาน ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนที่ใช้พิจารณาออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ เวลาในขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปร (define parameter) เวลาในขั้นตอนการระบุชั้น (floor determination) เวลาในขั้นตอนการระบุตำแหน่ง (positioning system) และเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลระบุตำแหน่ง (total operation)

สำหรับในขั้นตอนกำหนดค่าตัวแปรจะมีกระบวนการทำงานที่ชื่อว่า กระบวนการกำหนดค่าตัวแปร ซึ่งมีหน้าที่วัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ ณ ตำแหน่งวัตถุ มีการจัดระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับระบบ ซึ่งการทำงานได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ถัดมาในขั้นตอนการระบุชั้นจะมีกระบวนการที่ชื่อว่า Sum-RSS floor algorithm ซึ่งใช้คุณสมบัติทางสถิติของข้อมูลระบุชั้นของวัตถุ โดยใช้ช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคารเลือกชั้นอาคารที่วัตถุตั้งอยู่ ( $z_0$ ) และขั้นตอนสุดท้าย ขั้นตอนการระบุตำแหน่งวัตถุ สามารถแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการคือ กระบวนการกรองชั้น (floor-filter) กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิ (temp level-filter) กระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิเดียน (calculate euclidean distance) และกระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวน (calculate WKNN) สำหรับกระบวนการกรองชั้นมีหน้าที่ในการคัดเลือกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีหมายเลขชั้นอาคารตรงกับหมายเลขชั้นของวัตถุไปดำเนินการในกระบวนการถัดไป ถัดมากระบวนการกรองระดับอุณหภูมิจะทำหน้าที่คล้ายกับกระบวนการกรองชั้น โดยจะเลือกพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีระดับอุณหภูมิตรงกับระดับอุณหภูมิของวัตถุไปดำเนินการในกระบวนการถัดไป สำหรับกระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิเดียนจะใช้สมการที่ 3.4 ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้คำนวณหาผลต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มสัญญาณ ที่รับได้ระหว่างตำแหน่งวัตถุ โหนดกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ จากนั้นจะเลือกพิกัดพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์  $j$  ที่มีค่าระยะห่างยูคลิเดียน  $d_j$  น้อยที่สุด  $k$  ลำดับแรก และในกระบวนการสุดท้าย กระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$



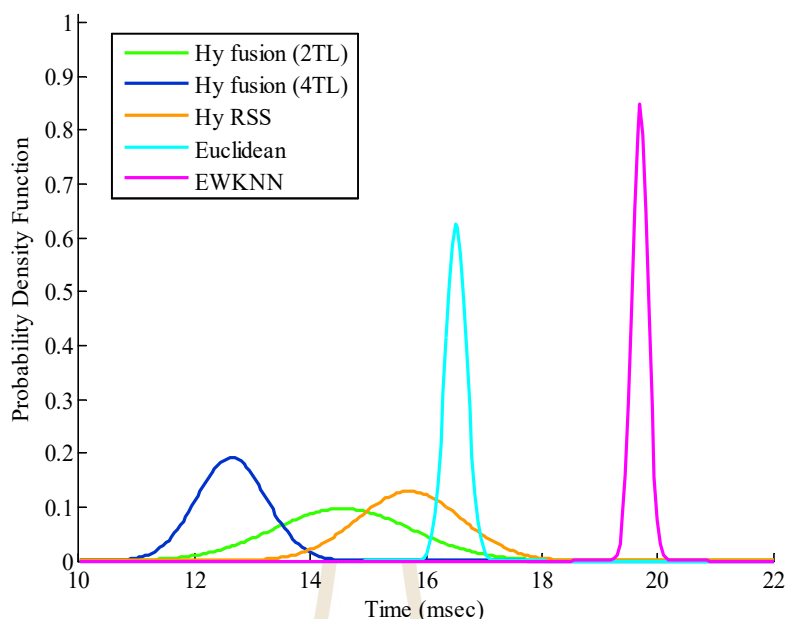
จำนวน มีหน้าที่ในการคำนวณหาพิกัด  $x_0$  และพิกัด  $y_0$  ของโนดวัตถุด้วยกระบวนการหาดำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก 4 จำนวนดังสมการที่ 3.5 สมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7 ในบทที่ 3

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น

Techniques	Statistics	Run-time complexity (msec)			
		Define parameter	Floor determination	Positioning system	Total operation
Hy fusion (2TL)	Mean	0.348	2.638	11.550	14.555
	Max	0.356	2.752	13.245	16.411
	Min	0.344	2.609	8.716	11.685
	SD	0.002	0.023	1.185	1.198
Hy fusion (4TL)	Mean	0.351	2.619	9.654	12.634
	Max	0.357	2.697	11.253	14.310
	Min	0.345	2.595	8.652	11.622
	SD	0.002	0.017	0.593	0.605
Hy RSS	Mean	0.346	2.625	12.734	15.715
	Max	0.353	2.691	14.220	17.295
	Min	0.341	2.594	11.779	14.727
	SD	0.002	0.018	0.882	0.898
Euclidean distance	Mean	0.336	-	16.180	16.518
	Max	0.342	-	16.671	17.015
	Min	0.332	-	15.863	16.221
	SD	0.002	-	0.184	0.184
EWKNN	Mean	0.337	-	19.361	19.699
	Max	0.346	-	19.829	20.169
	Min	0.332	-	19.087	19.421
	SD	0.002	-	0.136	0.136

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น พบว่าเวลาในขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปรของทั้ง 5 เทคนิคมีเวลาเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันคือ 0.34 มิลลิวินาที ถัดมาในขั้นตอนการระบุชั้นของกลุ่มเทคนิคแบบผสมสามเทคนิค ได้แก่ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 2 ระดับและ 4 ระดับ และเทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลใกล้เคียงกันประมาณ 2.62 มิลลิวินาที ถัดมาในขั้นตอนการระบุตำแหน่งวัตถุ เทคนิคที่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุดคือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ โดยมีเวลาเฉลี่ยเท่ากับ 9.65 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคที่ใช้เวลาในขั้นตอนนี้มากที่สุดคือ เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 19.36 มิลลิวินาที และเมื่อพิจารณาที่เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลพบว่า เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ จะใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ยน้อยที่สุดประมาณ 12.63 มิลลิวินาที ขณะที่เทคนิคที่ใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ยมากที่สุดคือ เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมใช้เวลาประมาณ 19.70 มิลลิวินาที

พิจารณารูปที่ 4.23 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณีอาคาร 2 ชั้น (ของ 100 จุดทดสอบ) ช่วยยืนยันให้เห็นว่ากลุ่มเทคนิคแบบผสมจะมีสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผลรวมดีกว่าเทคนิคพื้นฐาน (Euclidean และ EWKNN) ซึ่งเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) จะมีสมรรถนะทางด้านเวลาดีกว่าทุกเทคนิค ขณะที่เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมจะมีสมรรถนะทางด้านเวลาแย่ที่สุด (เส้นกราฟสีเขียว) ดังนั้นจากผลการทดสอบทางด้านเวลาของการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับจะมีความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลน้อยที่สุดเมื่อใช้ค้นหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารขนาด 2 ชั้น



รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผล สำหรับกรณีอาคาร 2 ชั้น

#### 4.4.2 ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น

ทำการทดสอบสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น ที่มีพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ 585 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มจุดทดสอบจำนวน 150 จุดทดสอบ เพื่อใช้ทดสอบความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะแสดงผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของ 5 เทคนิคเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.5.1

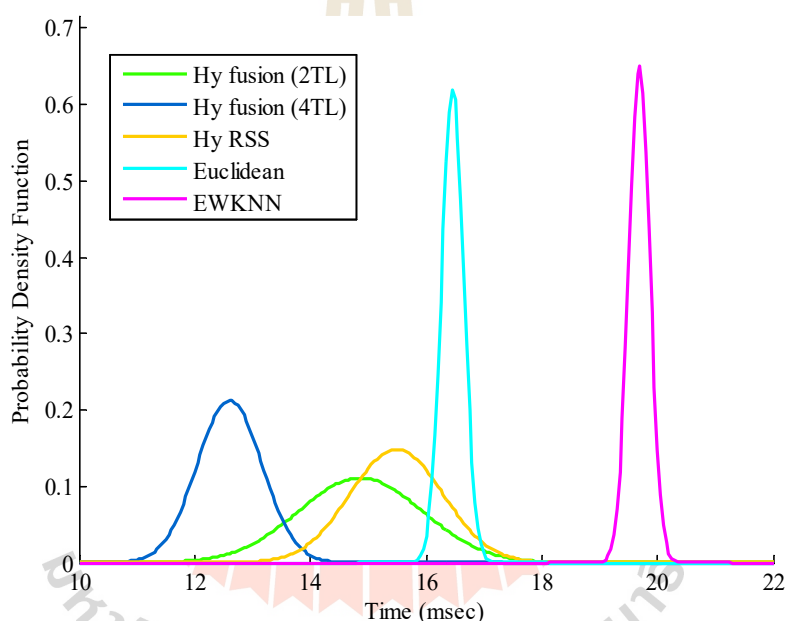
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น พบว่าเวลาในขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปรของทั้ง 5 เทคนิคมีเวลาเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันคือ 0.35 มิลลิวินาที ถัดมาในขั้นตอนการระบุชั้นของกลุ่มเทคนิคแบบผสมสามเทคนิค ได้แก่ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 2 ระดับและ 4 ระดับ และ เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลใกล้เคียงกันประมาณ 2.62 มิลลิวินาที ในขั้นตอนการระบุตำแหน่ง เทคนิคที่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุดคือเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 9.63 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคที่ใช้เวลาในขั้นตอนนี้มากที่สุดคือ เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 19.35 มิลลิวินาที และเมื่อพิจารณาที่เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลพบว่า เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่ง

แบ่งระดับอนุกรมเป็น 4 ระดับ จะใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ยน้อยที่สุดประมาณ 12.60 มิลลิวินาที ขณะที่เทคนิคที่ใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ยมากที่สุดคือ เทคนิคการหาคำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมใช้เวลาประมาณ 19.69 มิลลิวินาที

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น

Techniques	Statistics	Run-time complexity (msec)			
		Define parameter	Floor determination	Positioning system	Total operation
Hy fusion (2TL)	Mean	0.348	2.635	11.867	14.864
	Max	0.356	2.752	13.245	16.411
	Min	0.343	2.602	8.716	11.685
	SD	0.002	0.021	1.069	1.075
Hy fusion (4TL)	Mean	0.350	2.618	9.625	12.604
	Max	0.357	2.701	11.253	14.310
	Min	0.344	2.591	8.652	11.622
	SD	0.002	0.019	0.551	0.561
Hy RSS	Mean	0.346	2.623	12.510	15.489
	Max	0.353	2.691	14.220	17.295
	Min	0.338	2.593	11.779	14.727
	SD	0.002	0.017	0.788	0.802
Euclidean distance	Mean	0.336	-	16.123	16.461
	Max	0.353	-	16.671	17.015
	Min	0.332	-	15.818	16.149
	SD	0.002	-	0.191	0.192
EWKNN	Mean	0.337	-	19.348	19.686
	Max	0.346	-	20.295	20.648
	Min	0.330	-	19.040	19.379
	SD	0.002	-	0.181	0.182

พิจารณารูปที่ 4.24 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณีอาคาร 3 ชั้น (ของ 150 จุดทดสอบ) เป็นอีกครั้งที่กลุ่มเทคนิคแบบผสมจะมีสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผลดีกว่าเทคนิคพื้นฐาน โดยที่เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) จะมีสมรรถนะทางด้านเวลาดีกว่าทุกเทคนิค ขณะที่เทคนิคการหาคำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมยังคงมีสมรรถนะทางด้านเวลาแย่ที่สุด (เส้นกราฟสีเขียว) ดังนั้นจากผลการทดสอบทางด้านเวลาของการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้นสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับจะมีความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลน้อยที่สุดเมื่อใช้ค้นหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารขนาด 3 ชั้น



รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณีอาคาร 3 ชั้น

#### 4.4.3 ความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น

ทำการทดสอบสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น ที่มีพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ 1755 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มจุดทดสอบจำนวน 300 จุดทดสอบ เพื่อใช้ทดสอบความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้การทำงานของ 4 เทคนิคที่ประกอบด้วย เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ (Hy

fusion (STL)) เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มข้นสัญญาณที่รับได้ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน และ เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น พบว่าเวลาในขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปรของทั้ง 4 เทคนิคมีเวลาเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันคือ 0.36 มิลลิวินาที ถึง 0.39 มิลลิวินาที ถัดมาในขั้นตอนการระบุชั้นของกลุ่มเทคนิคแบบผสมสองเทคนิค คือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ และเทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มข้นสัญญาณที่รับได้ มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลใกล้เคียงกัน ประมาณ 4.56 มิลลิวินาที ถึง 6.32 มิลลิวินาที ในขั้นตอนการระบุตำแหน่ง เทคนิคที่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยที่สุดคือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 12.33 มิลลิวินาที ส่วนเทคนิคที่ใช้เวลาในขั้นตอนนี้มากที่สุดคือ เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 108.71 มิลลิวินาที และเมื่อพิจารณาที่เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลพบว่า เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ จะใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ยน้อยที่สุดประมาณ 19.03 มิลลิวินาที ขณะที่เทคนิคที่ใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ยมากที่สุดคือ เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม ใช้เวลาประมาณ 109.09 มิลลิวินาที (แยกว่าประมาณ 5 เท่า)

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ในขั้นตอนการระบุตำแหน่งของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ จุดทดสอบทั้ง 300 จุดทดสอบจะใช้เวลาในการประมวลผลไม่เท่ากัน (สังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในตารางที่ 4.10) สาเหตุเนื่องมาจากการทำงานในกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ที่มีหน้าที่คัดเลือกฟิสิกส์เพอร์ปรีนซ์ที่มีระดับอุณหภูมิตรงกับระดับอุณหภูมิของวัตถุมาพิจารณา ซึ่งบางพื้นที่ของระดับอุณหภูมิที่พิจารณามีขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.21a แสดงฟิสิกส์เพอร์ปรีนซ์ภายในชั้นที่ 1 ของอาคาร NECTEC หลังจากที่ดำเนินการในขั้นตอนระบุชั้น และเลือกฟิสิกส์เพอร์ปรีนซ์ที่อยู่บนชั้นที่ 1 แล้ว ถัดมาจะคัดเลือกฟิสิกส์เพอร์ปรีนซ์ที่มีระดับอุณหภูมิตรงกับระดับอุณหภูมิของวัตถุมาพิจารณา สมมติให้ระดับอุณหภูมิของวัตถุอยู่ในระดับที่ 1 แทนด้วยพื้นที่สีแดงมีค่าอุณหภูมิ  $\geq 32$  °C และค่าความชื้นสัมพัทธ์  $\geq 80\%$  ดังนั้นฟิสิกส์เพอร์ปรีนซ์ที่จะถูกพิจารณาจะมีเพียงแค่ 15 ฟิสิกส์ (จุดสีน้ำเงินของพื้นที่สีแดงในรูปที่ 4.21a) ด้วยเหตุนี้ ช่วงเวลาที่ใช้ในกระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิเดียนจึงลดน้อยลงอย่างมาก (แทนที่การคำนวณหาระยะห่างยูคลิเดียนทั้ง 1755 ฟิสิกส์ของเทคนิคพื้นฐาน) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการนำค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิ

ของสิ่งแวดล้อม และค่าความขึ้นสัมพันธ์ของสิ่งแวดล้อม มาใช้ร่วมกับค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ของการระบุตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกัน

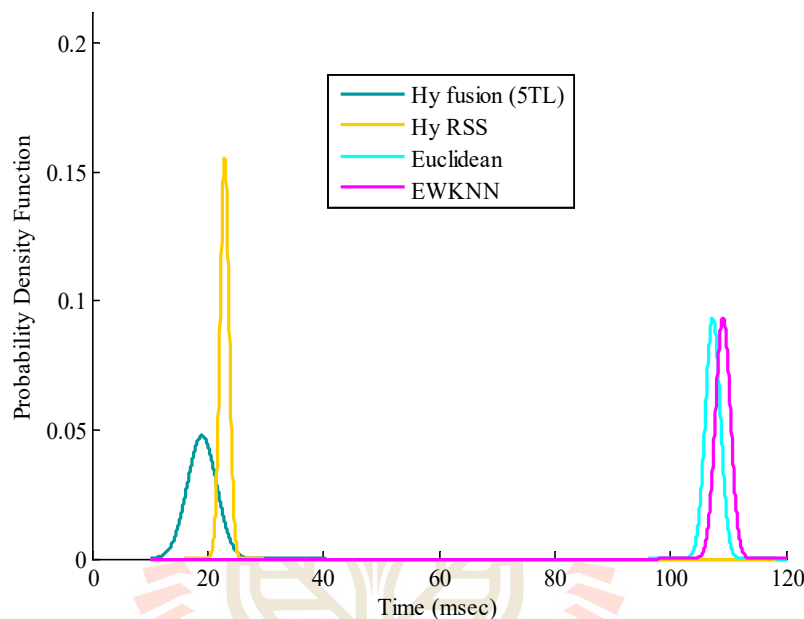
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น

Techniques	Statistics	Run-time complexity (msec)			
		Define parameter	Floor determination	Positioning system	Total operation
Hy fusion (5TL)	Mean	0.367	6.319	12.334	19.030
	Max	0.407	6.715	16.443	23.228
	Min	0.356	4.462	8.482	13.449
	SD	0.010	0.461	2.451	2.530
Hy RSS	Mean	0.391	4.565	17.964	22.931
	Max	0.399	4.712	19.951	24.996
	Min	0.375	4.497	17.271	22.231
	SD	0.003	0.037	0.790	0.778
Euclidean	Mean	0.378	-	106.960	107.340
	Max	0.392	-	111.034	111.411
	Min	0.364	-	104.458	104.846
	SD	0.005	-	1.294	1.292
EWKNN	Mean	0.370	-	108.716	109.089
	Max	0.389	-	114.469	114.929
	Min	0.345	-	104.556	104.940
	SD	0.014	-	1.292	1.286

พิจารณารูปที่ 4.25 พังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลรวมสำหรับกรณีอาคาร 6 ชั้น (ของ 300 จุดทดสอบ) ช่วยยืนยันว่ากลุ่มเทคนิคแบบผสมจะมีสมรรถนะทางด้านเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลดีกว่าเทคนิคพื้นฐาน โดยที่เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุหภูมิเป็น 5 ระดับ (เส้นกราฟสีเขียวเข้ม) จะมีสมรรถนะทางด้านเวลาดีกว่าทุกเทคนิค ขณะที่เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$



จำนวนแบบเสริมยังคงมีสมรรถนะทางด้านเวลาแย่ที่สุด (เส้นกราฟสีชมพู) อีกทั้งการทดลองนี้ยังช่วยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของสมรรถนะทางด้านเวลาของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุว่า ถ้าหากพื้นที่ของการทดลองมีขนาดใหญ่ขึ้น เทคนิคแบบผสมที่พัฒนาขึ้นจะให้สมรรถนะทางด้านเวลาได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับจะมีความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลน้อยที่สุดเมื่อใช้ค้นหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารขนาด 6 ชั้น



รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับกรณีอาคาร 6 ชั้น

#### 4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ประกอบด้วย สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง สมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง และความซับซ้อนหรือสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะทำการสรุปผลสมรรถนะที่ได้จากหัวข้อที่ 4.3 และหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งเป็นการระบุตำแหน่งที่ทำการทดลองภายในอาคาร 2 ชั้น อาคาร 3 ชั้น และอาคาร 6 ชั้น และแต่ละการทดลองได้กำหนดให้ระยะห่างของพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์แต่ละพิกัดมีค่าเท่ากับ 2 เมตร

#### 4.5.1 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้น

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น ที่มีพิกัดฟิงเกอร์ปρίนธ์ 407 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์ปρίนธ์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มจุดทดสอบจำนวน 100 จุดทดสอบ โดยเปรียบเทียบผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของ 5 เทคนิคที่ประกอบด้วย เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุกรมเป็น 2 ระดับและ 4 ระดับ (Hy fusion (2TL), Hy fusion (4TL)) เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Hy RSS) เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม (EWKNN) โดยจะแสดงผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ประกอบด้วย ผลสมรรถนะความถูกต้องหรือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งที่มีหน่วยเป็นเมตร ผลสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งที่ระยะ 2 เมตร และระยะ 3 เมตรมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ผลความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในช่องทางออนไลน์เฟรมมีหน่วยเป็นมิลลิวินาที และผลของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุซึ่งถูกทำให้เป็นค่าบรรทัดฐาน (normalized complexity time)

ตารางที่ 4.12 แสดงผลสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น พบว่าเทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากันและยังมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 1.22 เมตร แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุกรมเป็น 2 ระดับ และ 4 ระดับ ยังคงมีผลสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับสองเทคนิคข้างต้น (มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.226 เมตร และ 1.233 เมตร) เมื่อพิจารณาที่ผลความแม่นยำในการระบุตำแหน่งที่ระยะ 2 เมตร และระยะ 3 เมตร พบว่าเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุกรมเป็น 4 ระดับจะมีสมรรถนะความแม่นยำดีที่สุดทั้งสองระยะคือ 75.75% และ 96.84% ซึ่งหมายถึงการระบุตำแหน่ง 97 ครั้งจาก 100 ครั้งตำแหน่งที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 เมตร (สำหรับการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 2 ชั้นซึ่งแต่ละชั้นมีพื้นที่ขนาด 35 x 35 เมตร) เมื่อพิจารณาที่ผลสมรรถนะความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่งพบว่าเทคนิคที่มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุน้อยที่สุดคือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุกรมเป็น 4 ระดับใช้เวลาประมาณ 12.63 มิลลิวินาที ซึ่งเทคนิคอื่น ๆ จะใช้เวลามากกว่าเทคนิคดังกล่าวหลายเท่า เช่น เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมจะใช้เวลามากกว่า 1.56 เท่า (ใช้เวลาประมาณ 19.699 มิลลิวินาที) เป็นต้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับจะมีสมรรถนะความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดี อีกทั้งยังมีสมรรถนะความแม่นยำและสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ

ตารางที่ 4.12 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้น

Techniques	Accuracy (average error) (m.)	Precision in 2 meters (%)	Precision in 3 meters (%)	Average complexity time (msec.)	Normalized complexity time <sup>1</sup>
Hy fusion (2TL)	1.226	73.32	95.77	14.555	1.15
Hy fusion (4TL)	1.233	75.75	96.84	12.634	1
Hy RSS	1.218	73.32	95.77	15.715	1.24
Euclidean	1.573	62.30	90.71	16.518	1.31
EWKNN	1.218	73.32	95.77	19.699	1.56

หมายเหตุ <sup>1</sup> การทำค่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุให้เป็นบรรทัดฐาน (normalized complexity time) คำนวณได้จาก ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ (average complexity time) หารด้วย 12.634 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุของเทคนิคแบบผสมซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ (Hy fusion (4TL))

#### 4.5.2 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้น

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น ที่มีพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์ 585 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟังก์เจอร์ปริ้นท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มจุดทดสอบจำนวน 150 จุดทดสอบ โดยจะเปรียบเทียบผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของ 5 เทคนิคเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.6.1

ตารางที่ 4.13 แสดงผลสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น พบว่าเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดประมาณ 1.32 เมตร เมื่อพิจารณาที่ผลความแม่นยำในการระบุตำแหน่งที่ระยะ 2 เมตร และระยะ 3 เมตร พบว่าเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 4 ระดับจะมีสมรรถนะความแม่นยำดีที่สุดทั้งสองระยะคือ 77.84% และ 97.98% ซึ่งหมายถึงการระบุตำแหน่ง 98 ครั้งจาก 100 ครั้งตำแหน่งที่

คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 เมตร (สำหรับการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 3 ชั้นซึ่งแต่ละชั้น มีพื้นที่ขนาด 35 x 35 เมตร) เมื่อพิจารณาที่ผลสมรรถนะความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่ง พบว่า เป็นอีกครั้งที่เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 4 ระดับ จะใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่น้อยที่สุดประมาณ 12.60 มิลลิวินาที ซึ่งเทคนิคอื่น ๆ จะใช้เวลามากกว่าเทคนิคดังกล่าวหลายเท่า เช่น เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้

ตารางที่ 4.13 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น

Techniques	Accuracy (average error) (m.)	Precision in 2 meters (%)	Precision in 3 meters (%)	Average complexity time (msec.)	Normalized complexity time <sup>2</sup>
Hy fusion (2TL)	1.368	74.89	97.05	14.864	1.18
Hy fusion (4TL)	1.322	77.84	97.98	12.604	1
Hy RSS	1.371	74.89	97.05	15.489	1.23
Euclidean	1.687	60.34	90.48	16.461	1.31
EWKNN	1.371	74.89	97.05	19.686	1.56

หมายเหตุ <sup>2</sup> การทำค่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุให้เป็นบรรทัดฐาน (normalized complexity time) คำนวณได้จาก ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ (average complexity time) หารด้วย 12.604 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุของเทคนิคแบบผสมซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 4 ระดับ (Hy fusion (4TL))

ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมจะใช้เวลามากกว่า 1.56 เท่า (ใช้เวลาประมาณ 19.686 มิลลิวินาที) เป็นต้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 4 ระดับจะมีสมรรถนะความถูกต้อง สมรรถนะความแม่นยำ และสมรรถนะทางด้านเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ และจะสังเกตได้ว่า เทคนิคที่มีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดีรองลงมาคือ เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 2 ระดับ ดังนั้นถึงแม้ผู้ออกแบบระบบจะเลือกใช้การแบ่งระดับอนุภูมิเพียงแค่สองระดับ (พื้นที่ภายในห้องแอร์และพื้นที่ภายนอกห้องแอร์) เทคนิคที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นยังคงมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ

#### 4.5.3 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้น

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น ที่มีพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์ 1755 พิกัด ซึ่งกำหนดระยะห่างพิกัดฟิงเกอร์ปรีนท์แต่ละพิกัดเท่ากับ 2 เมตร และสุ่มจุดทดสอบจำนวน 300 จุดทดสอบ โดยจะเปรียบเทียบผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของ 4 เทคนิคที่ประกอบด้วย เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ (Hy fusion (5TL)) เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม

ตารางที่ 4.14 แสดงผลสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น พบว่าเทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากันและยังมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 1.14 เมตร แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ ยังคงมีผลสมรรถนะความถูกต้องใกล้เคียงกับสองเทคนิคข้างต้น ซึ่งมีค่าประมาณ 1.18 เมตร เมื่อพิจารณาที่ผลความแม่นยำในการระบุตำแหน่งที่ระยะ 2 เมตร และระยะ 3 เมตร พบว่าเทคนิคแบบผสมทั้งสองเทคนิค (Hy fusion (5TL), Hy RSS) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม จะมีสมรรถนะความแม่นยำเท่ากัน และเป็นค่าความแม่นยำที่ดีที่สุดทั้งสองระยะคือ 84.10% และ 98.92% ซึ่งหมายถึงการระบุตำแหน่ง 99 ครั้งจาก 100 ครั้งตำแหน่งที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 เมตร (สำหรับการระบุตำแหน่งภายในอาคาร 6 ชั้นซึ่งแต่ละชั้นมีพื้นที่ขนาด 30 x 60 เมตร เมตร) เมื่อพิจารณาที่ผลสมรรถนะความซับซ้อนของเทคนิคระบุตำแหน่ง พบว่าเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอุณหภูมิเป็น 5 ระดับจะใช้เวลาเฉลี่ยในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุน้อยที่สุดประมาณ 19.03 มิลลิวินาที ซึ่งเทคนิคอื่น ๆ จะใช้เวลามากกว่าเทคนิคดังกล่าวหลายเท่า เช่น เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมจะใช้เวลามากกว่า 5.73 เท่า (ใช้เวลาประมาณ 109.089 มิลลิวินาที) เป็นต้น

ถึงแม้เทคนิคแบบผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริม จะมีสมรรถนะความถูกต้องและสมรรถนะความแม่นยำเท่ากันทั้ง 3 กรณี (อาคาร 2 ชั้น อาคาร 3 ชั้น และอาคาร 6 ชั้น) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ผลความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งพบว่า เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก  $k$  จำนวนแบบเสริมจะใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่าเทคนิคผสมที่ใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ (มากกว่า 4.76 เท่าสำหรับกรณีอาคาร 6 ชั้น) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดี

ของการประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งด้วยการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ที่จะช่วยจำแนกสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของเทคนิคแบบผสมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น ที่มีการทำงานในขั้นตอนการระบุขั้นและกระบวนการกรองขั้น ซึ่งจะสามารถช่วยลดจำนวนพิกัดฟังก์เจอร์ปรีนซ์ที่ใช้ในกระบวนการคำนวณหาระยะห่างยูคลิเดียน และยังช่วยลดระยะเวลาในการทำงานได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.14 สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 6 ชั้น

Techniques	Accuracy (average error) (m.)	Precision in 2 meters (%)	Precision in 3 meters (%)	Average complexity time (msec.)	Normalized complexity time <sup>3</sup>
Hy fusion (5TL)	1.183	84.10	98.92	19.030	1
Hy RSS	1.143	84.10	98.92	22.931	1.20
Euclidean	1.567	65.14	92.74	107.340	5.64
EWKNN	1.143	84.10	98.92	109.089	5.73

หมายเหตุ<sup>3</sup> การทำค่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุให้เป็นบรรทัดฐาน (normalized complexity time) คำนวณได้จาก ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ (average complexity time) หารด้วย 19.030 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุของเทคนิคแบบผสมซึ่งใช้พารามิเตอร์ของระบบร่วมกันซึ่งแบ่งระดับอนุภูมิเป็น 5 ระดับ (Hy fusion (5TL))



## บทที่ 5

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งผู้วิจัยให้ชื่อว่า Hybrid fusion technique ซึ่งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในนี้ได้ประยุกต์การทำงานของเทคนิคกลุ่ม proximity ผสมร่วมกับเทคนิคกลุ่ม scene analysis เพื่อระบุชั้นที่ตั้งของวัตถุ และคำนวณหาพิกัดที่ตั้งของวัตถุในชั้นนั้นๆ

ในการระบุชั้นที่ตั้งของวัตถุ ได้ประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม proximity ซึ่งเป็นการประเมินจากค่าความเข้มสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโนดอ้างอิง ผู้วิจัยให้ชื่ออัลกอริทึมการระบุชั้นที่ได้พัฒนาขึ้น ว่า Sum-RSS floor algorithm โดยอัลกอริทึมนี้พิจารณาช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ของผลรวมความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้น และจะเลือกชั้นที่มีช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความเข้มสัญญาณมากที่สุดเป็นชั้นที่วัตถุตั้งอยู่

ส่วนการคำนวณหาพิกัดที่ตั้งของวัตถุ นั้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคกลุ่ม scene analysis โดยเปรียบเทียบกับค่าในฐานข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆภายในอาคารที่ได้ทำการจัดเก็บและเตรียมไว้ล่วงหน้า โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของบริเวณที่วัตถุอยู่ ในการเลือกกลุ่มข้อมูลในฐานข้อมูลที่จะนำมาพิจารณาให้เหลือน้อยลง เพื่อลดความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลหาพิกัดตำแหน่งวัตถุ

จากการทดสอบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิค Hybrid fusion technique ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ได้แก่ เทคนิคระยะทางยูคลิเดียน (Euclidean distance technique) และเทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก k จำนวน (Weighted K-Nearest Neighbor method) ดังแสดงในบทที่ 4 ปรากฏว่า เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิคอื่น ทั้งในด้านของความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง (accuracy) ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง (precision) และความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (run-time complexity)

เทคนิคแบบผสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนที่ทำหน้าที่ออกแบบและดูแลควบคุมการทำงานของระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้สำหรับการหาพิกัดตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น นอกจากนี้ยังมีความรู้ที่ได้จากการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมในการระบุตำแหน่งวัตถุ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ



การประมวลผล และเพิ่มความถูกต้องในการหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาระดับปริญญาตรีและวิจัย ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและแก้ปัญหาของระบบระบุตำแหน่งไร้สายภายในอาคารต่อไปได้

ข้อจำกัดของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้คือ ในการประมวลผลเพื่อหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ ต้องใช้ข้อมูลของสิ่งแวดล้อมได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ทำให้ต้องมีการเก็บค่าในช่วง offline phase เพิ่มขึ้น และค่าเหล่านี้ไม่ได้เป็นค่าคงที่ในทุกวันและทุกเวลาของการใช้งาน ทำให้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ และถ้าสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป อาจทำให้ผลลัพธ์ในการระบุตำแหน่งผิดไปได้ อีกทั้งยังต้องมีฐานข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสิ่งแวดล้อม

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรทำการศึกษาพฤติกรรมของค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อค้นหาตัวแปรที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างฤดูกาลหรือช่วงเวลาเพื่อใช้เป็นอินพุตป้อนให้กับระบบระบุตำแหน่ง ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการปรับข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของฐานข้อมูลให้สอดคล้องกับสภาวะปัจจุบันที่ทำการระบุตำแหน่งวัตถุได้ นอกจากนี้งานวิจัยในอนาคตสามารถเพิ่มพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อมอย่างอื่นในการระบุตำแหน่งวัตถุ เช่น การใช้แสงที่มองเห็นได้ (Visible Light : VL) เพื่อจำกัดพื้นที่ห้องของวัตถุซึ่งสามารถหาได้จากการแสดงเอกลักษณ์ (Identification : ID) ของหลอดไฟที่อยู่ภายในห้องนั้น เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- [1] J. Zhou, K.M.-K. Chu and J.K. Y.Ng, "Providing Location Services within a Radio Cellular Network using Ellipse Propagation Model," in Proc. of the 19th International Conference on Advance Information Networks and Applications, Mar. 2005, pp. 559 – 564.
- [2] M. Baunach, R. Kolla, C. Muhlberger, "Beyond Theory: Development of a Real World Localization Application as Low Power WSN," in Proc. of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, 2009, pp. 872 – 879.
- [3] O Akhdar, D Carsenat, C Decroze and T Monediere, "A Simple Technique for Angle of Arrival Measurement," in Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008, pp. 1 – 4.
- [4] K. Habgood and I. Arel, "Revisiting Cramer's Rule for Solving Dense Linear Systems," in Proc. of the 2010 Spring Simulation Multiconference.
- [5] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy "Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting," in Proc. of IEEE INFOCOM, Mar 2004, pp. 1012 – 1022.
- [6] S. Gansemer, U. Großmann and S. Hakobyan, "RSSI-based Euclidean Distance Algorithm for Indoor Positioning adapted for the Use in Dynamically Changing WLAN Environments and Multi-level Buildings," in Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sept 2010, pp. 1 – 6.
- [7] C. Laoudias, D. G. Eliades, P. Kemppi, C. G. Panayiotou, and M. M. Polycarpou, "Indoor Localization Using Neural Networks with Location Fingerprints," in Proc. of the 19th International Conference on Artificial Neural Networks: Part II, 2009, pp. 954 – 963.
- [8] H.Y. Wang, V.W. Zheng, J. Zhao, Q. Yang, "Indoor localization in multi-floor environments with reduced effort," in Proc. of International Conference on Pervasive Computing and Communication, 29 March - 2 April 2010, pp. 244 – 252.
- [9] W.H. Kuo, Y.S. Chen, G.T. Jen, T.W. Lu, "An intelligent positioning approach: RSSI-based indoor and outdoor localization scheme in ZigBee networks," Machine Learning and Cybernetics, vol. 6, 11-14 July 2010, pp. 2754 – 2759.

- [10] J. Larranaga, L. Muguira, J.M. Lopez-Garde, J.I. Vazquez, "An environment adaptive ZigBee-based indoor positioning algorithm," in Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 15-17 September 2010, pp. 1 – 8.
- [11] Y. Lim, J. Park, "Practical indoor positioning system using received signal strength in IEEE 802.15.4 networks," in Proc. of International Conference on Consumer Electronics, 10-14 January 2009, pp. 1 – 2.
- [12] K. Kaemarungsi, P. Krishnamurthy, "Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting," in Proc. of International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 22-26 Aug. 2004, pp. 14 – 23.
- [13] K. Kaemarungsi, "Efficient design of indoor positioning systems based on location fingerprinting," Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, vol. 1, 13-16 June 2005, pp. 181 – 186.
- [14] M.H. Hung, S.S. Lin, J.Y. Cheng, W.L. Chien, : "A ZigBee indoor positioning scheme using signal-index-pair data," in Proc. of International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District, 3-7 May 2010, pp. 548 – 553.
- [15] Q. Yao, F.Y. Wang, H. Gao, K. Wang, H. Zhao, "Location estimation in ZigBee network based on fingerprinting," in Proc. of International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 13-15 December 2007, pp. 1- 6.
- [16] C. Khaiphung, P. Keeratiwintakorn, K. Kaemarungsi, "On robustness of centralized-based location determination using WSN," in Proc. of International Conference on Asia-Pacific Conference on Communications, 14-16 October 2008, pp. 1 – 5.
- [17] K. Yu, Y.J. Guo, "Improving anchor position accuracy for 3-D localization in wireless sensor networks," in Proc. of IEEE International Conference on Communication, 19-23 May 2008, pp. 951 - 955.
- [18] J. Liang, J. Shao, Y. Xu, J. Tan, B.T. Davis, P.L. Bergstrom, "Sensor Network Localization in Constrained 3-D Spaces," in Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 25-28 June 2006, pp. 49 – 54.
- [19] M. Bal, H. Xue, W. Shen, H. Ghenniwa, "A 3-D indoor location tracking and visualization system based on wireless sensor networks," in Proc. of International Conference on Systems Man and Cybernetics, 10-13 October 2010, pp. 1584 – 1590.

- [20] Ali, S.F.M., and Hassan, R., "Local Positioning System Performance Evaluation with Cosine Correlation Similarity Measure", *Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, 2011, pp. 151-156.
- [21] Bernardos, A., Casar, J.R., and Tarrío, P., "Real time calibration for RSS indoor positioning systems", in *Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2010.
- [22] Fang, S.H., Wang, C.H., Huang, T.Y., Yang, C.H., and Chen, Y.S., "An Enhanced ZigBee Indoor Positioning System with an Ensemble Approach", *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, Issue. 4, 2012, pp. 564-567.
- [23] Al-Ahmadi, A.S., Rahman, T.A., Kamarudin, M.R., Jamaluddin, M.H., and Omer, A.I., "Single-Phase Wireless LAN Based Multi-floor Indoor Location Determination System", in *Proc. of IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, 2011, pp. 1057-1062.
- [24] Mazuelas, S., Bahillo, A., Lorenzo, R.M., Fernández, P., Lago, F.A., Garcia, E., Blas, J., and Abril, E.J., "Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 3, Issue. 5, 2009, pp. 821-831.
- [25] Alsehly, F., Arslan, T., and Sevak, Z., "Indoor Positioning with Floor Determination in Multi Story Buildings", in *Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2011, pp. 1-7.
- [26] Esposito, C., Cotroneo, D., and Ficco, M., "Calibrating RSS-based Indoor Positioning Systems", in *Proc. of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 2009, pp. 1-6.
- [27] Kodippili, N.S., and Dias, D., "Integration of Fingerprinting and Trilateration Techniques for Improved Indoor Localization", in *Proc. of International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 2010, pp. 1-6.
- [28] Ruppel, U., Stübbe, K.M., and Zwinger, U., "Indoor Navigation Integration Platform for Firefighting Purposes", in *Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2010, pp. 1-6.

- [29] Kuflik, T., Lanir, J., Dim, E., Wecker, A., Corra, M., Zancanaro, M., and Stock, O., "Indoor Positioning in Cultural Heritage Challenges and a Solution", in Proc. of IEEE 27th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2012, pp. 1-5.
- [30] Kim, H.S., Kim, D.R., Yang, S.H., Son, Y.H., and Han, S.K., "An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique", Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, Issue. 1, 2013, pp. 134-144.
- [31] Yong U.L., and Kavehrad, M., "Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-hoc Wireless Network", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 58, Issue. 4, 2012, pp. 1176-1184
- [32] Jain, R. "Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques for Experimental Measurements Simulation and Modeling", Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
- [33] Shetty, A., "Weighted K-Nearest Neighbor Algorithm as an Object Localization Technique", Master of Science, Electrical and Computer Engineering, The State University of New Jersey, New Brunswick, New Jersey, 2010.
- [34] Chen, Y., and Luo, R., "Design and Implementation of a WiFi-Based Local Locating System", in Proc. of IEEE International Conference on Portable Information Devices, 2007, pp. 1-5.
- [35] Kabir, M.H., and Kohno, R., "A Geolocation Approach Using UWB Deterministic Modeling for Non Line-Of-Sight Conditions", in Proc. of 6th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2012, pp. 1-4.
- [36] Jiao, L., Xing, J.P., and Li, F.Y., "Performance Comparison of Residual Related Algorithms for TOA Positioning in Wireless Terrestrial and Sensor Networks", in Proc. of the 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009, pp. 278-283.

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. K. Maneerat and C. Prommak, “Low Complexity Wireless Indoor Positioning Approaches based on Fingerprinting Techniques,” Proc. of the 25th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), Nov 18-20, 2015.
2. K. Maneerat, C. Prommak, K. Kaemarungsi, “Floor Estimation Algorithm for Wireless Indoor Multi-Story Positioning Systems,” Proc. of the 2014 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology International Conference (ECTI-CON), May 14-17, 2014.



## ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยม) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อ พ.ศ. 2535 ปริญญาโท (Telecommunication Engineering) จาก University of Colorado at Boulder เมื่อ ค.ศ. 1998 และปริญญาเอก (Telecommunication Engineering) จาก University of Pittsburgh เมื่อ ค.ศ. 2004 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเรื่อง Wireless network design, Optical network design, Network optimization และ Heuristic approaches for network design

