การทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก

นายจักษุเทพ ตี้กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREDICTION OF BUILDING EVACUATION RESULTS USING A LEARNING ALGORITHM TO SIMULATE BUILDING BLOCKS

Mr. Jaksuthep Teekul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Computer Science
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก
โดย	นายจักษุเทพ ตี้กุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกรี สินธุภิญโญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระ เหมืองสิน)

………………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกรี สินธุภิญโญ)

…………………………………………… กรรมการ
(ดร. นัททีนิภานันท์)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เด่นดวง ประดับสุวรรณ)

จักษุเทพ ตี้กุล : การทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก. (PREDICTION OF BUILDING EVACUATION RESULTS USING A LEARNING ALGORITHM TO SIMULATE BUILDING BLOCKS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. สุกรี สินธุภิญโญ, 86 หน้า.

ปัจจุบันการจำลองการอพยพออกจากอาคารมีการพัฒนาวิธีการจำลองพฤติกรรมในการอพยพของมนุษย์ให้เสมือนจริงมากยิ่งขึ้น หนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมคือการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนโดยนำคุณลักษณะของมนุษย์ เช่น เพศหรืออายุ มาร่วมพิจารณา โดยการจำลองพฤติกรรมให้เสมือนจริงนั้นจำเป็นต้องมีการประมวลผลข้อมูลจำนวนมากและใช้เวลาในการทำนายผลลัพธ์การอพยพที่ยาวนาน ในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการทำนายเวลาในการอพยพโดยใช้วิธีการเรียนรู้จากบิลดิงบล็อก โดยไม่ต้องจำลองการอพยพใหม่ทั้งหมด จากการทดลองพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดเวลาในการทำนายผลลัพธ์การอพยพโดยที่ยังคงได้ผลลัพธ์การทำนายที่ใกล้เคียงกับการทำนายเวลาในการอพยพด้วยวิธีจำลองการอพยพใหม่

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต..

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..................

ปีการศึกษา 2554

5171407021 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEYWORDS : SIMULATION / EVACUATION / BUILDING BLOCK / PREDICTION

JAKSUTHEP TEEKUL : PREDICTION OF BUILDING EVACUATION RESULTS USING A LEARNING ALGORITHM TO SIMULATE BUILDING BLOCKS. ADVISOR : ASST.PROF. SUKREE SINTHUPINYO, Ph.D., 86 pp.

Nowadays building an evacuation simulation system has been developed to simulate human behavior in emergency circumstance to be more realistic. Some evacuation simulation applications use human properties, such as gender or age etc., to make it look like real situation. This leads to the situation, in which much more information must be processed and to long time processing to get result of simulation. This research proposes a new method to predict evacuation time without rerunning the simulation using learnable building block. Our proposed method can preserve correctness of evacuation time result.

Department : Computer Engineering Student's Signature ....

Field of Study : Computer Science Advisor's Signature ....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างยิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกรี สินธุภิญโญ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ แนะนำแนวทางการวิจัย ตรวจสอบ ให้คำแนะนำ และสนับสนุนเป็นอย่างดี จนทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จออกมาด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระ เหมืองสิน ดร. นัทที นิภานันท์ และ ดร. เด่นดวง ประดับสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลา ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุด ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อน ๆ ทุกคน ที่คอยติดตามให้กำลังใจและสนับสนุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งภรรยาอันเป็นที่รักที่ค่อยให้การสนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังกายโดยตลอดเสมอมา รวมถึงท่านอื่น ๆ ที่มิได้กล่าวชื่อไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ
กิตติกรรมประกาศ...ฉ
สารบัญ..ช
สารบัญตาราง..ฌ
สารบัญภาพ ....ฏ
บทที่ 1 บทนำ..1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย...3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..3
1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 4
1.7 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์..4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี...5
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 10
บทที่ 3 วิธีการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก...........22
3.1 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก 22
3.2 การออกแบบบิลดิงบล็อก 23
3.3 การสร้างข้อมูลการอพยพเพื่อใช้ในการสร้างโมเดลทำนายผลการอพยพ 25
3.4 การนำโมเดลการทำนายไปใช้ทำนายผลการอพยพจากอาคาร 27

หน้า

บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง.......... 30

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 30

4.2 สถานการณ์ที่ใช้ในการทดลอง 30

4.3 วิธีการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบ.......... 39

4.4 ผลการทดลอง.......... 40

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 50

5.1 สรุปผลการวิจัย.......... 50

5.2 สิ่งที่ได้จากการวิจัย 56

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ.......... 56

รายการอ้างอิง.......... 57

ภาคผนวก 59

ภาคผนวก ก 60

ภาคผนวก ข 75

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.......... 86

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงช่วงของค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการอพยพ 12
ตารางที่ 2 แสดงค่ารัศมีของวงกลมของตัวแทนที่ใช้ในการจำลองและความเร็วของตัวแทนแต่ละประเภท 16
ตารางที่ 3 กลุ่มความมั่นใจของทางออกที่ใช้ในการเลือกทางออก 21
ตารางที่ 4 ขอบเขตค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของห้อง 24
ตารางที่ 5 ขอบเขตค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของทางเดิน 25
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบโมเดลการทำนายด้วยวิธีการทดสอบไขว้ข้ามสิบพับ 26
ตารางที่ 7 แสดงคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของห้องที่ใช้ในการทดลอง 31
ตารางที่ 8 แสดงคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารที่ใช้ในการทดลอง 32
ตารางที่ 9 แสดงค่าคุณลักษณะกายภาพของแผนผังในอาคาร 34
ตารางที่ 10 แสดงค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกที่แตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์ 34
ตารางที่ 11 แสดงค่าคุณลักษณะทางกายภาพของแผนผังของอาคารที่มีห้องจำนวน 20 ห้อง 38
ตารางที่ 12 แสดงค่าคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้องและขนาดของประตูทางออกหนีไฟ 39
ตารางที่ 13 แสดงผลการทดลองในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง 44
ตารางที่ 14 แสดงผลการทดลองในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร 45
ตารางที่ 15 แสดงผลการทดลองในกรณีที่จำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง 46
ตารางที่ 16 แสดงผลการทดลองในกรณีที่ปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ 48
ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์การทดสอบทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกันของการทดลองระดับบิลดิงบล็อกเดียวของห้อง 51
ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์การทดสอบทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกันของการทดลองระดับบิลดิงบล็อกเดียวของทางเดิน 51
ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง 61
ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน ... 67
ตารางที่ 21 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง 76

หน้า

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ.. 80

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของตัวแทนในสิ่งแวดล้อมจำลอง 6
ภาพที่ 2 เพอร์เซปตรอนหน่วยการทำงานที่ย่อยที่สุดในนิวรอบเน็ตเวิร์ก 7
ภาพที่ 3 โครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์ก 8
ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างบล็อกของโครงสร้างพื้นที่ภายในสนามบิน 9
ภาพที่ 5 แสดงสถาปัตยกรรมของ GRNNFA โมเดล 12
ภาพที่ 6 แผนผังอาคารหลักที่ใช้ในการทดลอง 13
ภาพที่ 7 แผนผังอาคารทั่วไปที่มีความซับซ้อนมากกว่า 13
ภาพที่ 8 แสดงบิลดิงบล็อกของพื้นที่ภายในสนามบินที่ประกอบขึ้นจากบิลดิงบล็อกอื่นๆ 14
ภาพที่ 9 แสดงแผนผังของอาคารความสูง 3 ชั้นที่ใช้ในการทดลองการจำลองการอพยพโดยใช้ระบบกระจายตัว 15
ภาพที่ 10 แสดงแนวคิดของโมเดลแรงจากสังคม 16
ภาพที่ 11 แสดงลักษณะของตัวแทนที่ใช้วงกลมสามวงแสดงลักษณะของร่างกาย 17
ภาพที่ 12 แสดงนิยามของเวกเตอร์ RC และ $Rsoc$ 20
ภาพที่ 13 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก 22
ภาพที่ 14 ตัวอย่างบิลดิงบล็อกของห้อง 23
ภาพที่ 15 ตัวอย่างบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร 25
ภาพที่ 16 แสดงตัวอย่างการแปลงแผนผังอาคารเป็นกราฟของบิวดิงบล็อกกรณีเมื่อมีห้องสองห้องเชื่อมต่อกับทางเดินภายในอาคาร 27
ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างการแปลงแผนผังอาคารเป็นกราฟของบิวดิงบล็อกกรณีเมื่อมีห้องสามห้องเชื่อมต่อกับทางเดินภายในอาคาร 27
ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่างการแปลงทางเดินภายในอาคารที่มีความยาวมากกว่าสิบเมตร 28
ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างกราฟของบิลดิงบล็อกที่ใช้ในขั้นตอนการทำนายผลการอพยพของแต่ละบิลดิงบล็อก 29
ภาพที่ 20 (ก) แสดงภาพแผนผังอาคารที่ใช้ในการทดลอง (ข) แสดงภาพกราฟของบิลดิงบล็อกที่แปลงจากแผนผังอาคาร 35

หน้า

ภาพที่ 21 แสดงแผนผังอาคารที่ใช้ในการทดลองกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง 36
ภาพที่ 22 แสดงกราฟของบิลดิงบล็อกที่แปลงมาจากแผนผังของอาคารต้นแบบ 36
ภาพที่ 23 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 2 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง 36
ภาพที่ 24 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 8 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง 37
ภาพที่ 25 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 16 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง 37
ภาพที่ 26 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 20 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง 38
ภาพที่ 27 แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นจำนวนคงที่แต่แปรผันค่าคุณลักษณะของประชากรเทียบระหว่างวิธี FDS+EVAC กับวิธีบิลดิงบล็อก+NN... 52
ภาพที่ 28 แผนภาพแสดงผลเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และขนาดของทางออกหนีไฟด้วยวิธี FDS+EVAC 53
ภาพที่ 29 แผนภาพแสดงผลเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และขนาดของทางออกหนีไฟด้วยวิธีบิลดิงบล็อก+NN 53
ภาพที่ 30 แผนภาพแสดงผลการทำนายเวลาในการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นจำนวนคงที่แต่แปรผันค่าคุณลักษณะของประชากร 54
ภาพที่ 31 แผนภาพแสดงผลการทำนายเวลาในการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และคุณลักษณะของประชากร เทียบระหว่างวิธี FDS+EVAC และวิธีบิลดิงบล็อก+NN.. 55
ภาพที่ 32 แสดงสถานการณ์จำลองที่มีประชากรกระจุกตัวเมื่อมีประชากรรวมตัวมากเกินไป 55

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนำนี้จะแบ่งเป็นเจ็ดหัวข้อย่อย กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินการวิจัย ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย และผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ ตามลำดับ ดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจำลองการอพยพออกจากอาคาร (building evacuation simulation) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวางแผนการอพยพเมื่อมีเหตุฉุกเฉินเกิดขึ้น เนื่องจากการซ้อมอพยพในสถานที่จริงนั้นต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและไม่สามารถทำได้บ่อยครั้ง เนื่องจากต้องอาศัยความร่วมมือจากบุคคลที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก และในบางกรณีสถานที่หรืออาคารนั้นยังไม่พร้อมให้ทำการซ้อมอพยพในสถานที่จริงได้ เช่น การวางแผนการอพยพในขั้นตอนการออกแบบสถาปัตยกรรมของอาคารก่อนการก่อสร้าง ดังนั้นการวางแผนการอพยพจึงนิยมใช้เครื่องมือในการจำลองการอพยพเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการอพยพจากอาคารเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน ส่งผลให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการอพยพในปัจจุบันนั้น พยายามมุ่งเน้นให้การจำลองการอพยพได้ผลออกมาเสมือนจริงมากที่สุด โดยนำเสนอวิธีต่างๆ เช่น การจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฝูงชน (crowd simulation) หรือ รูปแบบวิธีการตัดสินใจของมนุษย์ (human decision making model) เป็นต้น โดยที่วิธีการที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันว่าสามารถจำลองได้ผลลัพธ์เสมือนจริงวิธีหนึ่งก็คือ วิธีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน (agent based simulation)

วิธีการจำลองโดยอาศัยตัวแทนเป็นพื้นฐานเป็นวิธีการที่จำลองการเคลื่อนที่ของมนุษย์โดยสร้างตัวแทนขึ้นมาแทนมนุษย์จริง ๆ แล้วกำหนดคุณสมบัติของตัวแทนที่อยู่ในสถานการณ์จำลองแต่ละตัวแทนให้มีความแตกต่างกันในด้านวิธีการตัดสินใจ คุณลักษณะทางกายภาพ และความรู้ความสามารถในการหาเส้นทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่มนุษย์แต่ละคนจะมีความรู้และคุณสมบัติต่าง ๆ กันไป ทำให้วิธีการจำลองวิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมของมนุษย์ซึ่งมีความซับซ้อน แต่การจำลองด้วยวิธีนี้มีข้อเสียคือจำนวนข้อมูลที่ต้องประมวลผลมีจำนวนมาก โดยเฉพาะในกรณีที่เราต้องการจำลองสถานการณ์ที่มีประชากรอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น เช่น วิธีโพรงข่ายออโตมาตา (cellular automata) [1] เนื่องจากในขณะที่ดำเนินการจำลองสถานการณ์นั้น แต่ละตัวแทนต้องทำการรับรู้ข้อมูลใหม่จาก

สิ่งแวดล้อม และทำการประมวลผลเพื่อทำการตัดสินใจใหม่ว่าจะทำสิ่งใดต่อไป เมื่อจำนวนตัวแทนมากขึ้นการประมวลผลก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ส่งผลให้ในการจำลองสถานการณ์ที่มีประชากรจำนวนมาก ซึ่งมักจะเป็นกรณีที่เราสนใจในการศึกษานั้น ต้องใช้ระยะเวลายาวนานในการรอผลการจำลองสถานการณ์รูปแบบหนึ่ง ๆ ซึ่งปรกติในการวางแผนการอพยพนั้น มักต้องการจำลองสถานการณ์ในหลาย ๆรูปแบบหรือหลาย ๆ สถานการณ์ เพื่อที่จะทำการวางแผนป้องกันได้อย่างถี่ถ้วน เช่น จำลองการอพยพเมื่อมีไฟไหม้ที่ชั้นล่างสุดของอาคาร จำลองการอพยพเมื่อมีไฟไหม้ที่กลางอาคาร จำลองการอพยพเมื่อจำนวนประชากรในอาคารมีจำนวนต่าง ๆ กัน หรือจำลองการอพยพเมื่อสัดส่วนของประเภทของประชากรในอาคารมีค่าต่าง ๆ กัน ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานการณ์ใหม่ในแผนผังอาคารเดิม จึงต้องรอผลการจำลองซึ่งอาจใช้เวลานานในการจำลองจนเสร็จสิ้นในแต่ละรอบ ทำให้การวางแผนการอพยพจากอาคารเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

งานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการจำลองการอพยพที่ให้ผลลัพธ์การจำลองการอพยพ เช่น ระยะเวลาในการอพยพ หรือ จำนวนผู้เสียชีวิตในสถานการณ์ที่กำหนดขึ้น ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยการเรียนรู้บิลดิงบล็อกของพื้นที่พื้นฐานของอาคาร เช่น บิลดิงบล็อกของห้อง บิลดิงบล็อกของทางเดิน เป็นต้น วิธีการในการจำลองเริ่มจาก การกำหนดบิลดิงบล็อกพื้นที่พื้นฐานของอาคาร การสร้างข้อมูลชุดเรียนรู้ของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทด้วยการจำลองการอพยพโดยใช้โปรแกรมตัวจำลอง (simulator) การสร้างโมเดลด้วยวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) ในการทำนายผลการจำลองของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภท การประกอบผลลัพธ์ของบิลดิงบล็อกตามแผนผังโครงสร้างอาคาร

โดยการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อกนั้นทำให้เราสามารถจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกันได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการจำลองการอพยพใหม่ทั้งหมด ส่งผลให้ลดเวลาในการรอผลการจำลองและลดปริมาณการประมวลผลข้อมูลได้อย่างมาก อีกทั้งวิธีการนี้ยังสามารถนำมาปรับใช้กับข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลการอพยพจากอาคารในสถานการณ์จริง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถหาได้ยากเนื่องจากเหตุการณ์การอพยพนั้นเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งและเป็นข้อมูลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยนำข้อมูลจริงนี้มาใช้แทนข้อมูลที่ได้จากการจำลองการอพยพโดยการใช้โปรแกรมตัวจำลองเพื่อสร้างโมเดลในการทำนายผลการอพยพของบิลดิงบล็อกที่อ้างอิงจากพฤติกรรมของมนุษย์จริง ซึ่งจะส่งผลให้การทำนายการอพยพนั้นได้ผลลัพธ์ที่เสมือนจริงมากยิ่งขึ้นได้อีกวิธีหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการในการหาผลการอพยพโดยใช้วิธีการทำนายด้วยการรู้จำผลการอพยพของบิลดิงบล็อกของอาคาร เพื่อลดเวลาในการรอผลลัพธ์จากวิธีการจำลองการอพยพ โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการทำนายที่นำเสนอยังมีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการจำลองการอพยพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- งานวิจัยจะพิจารณาการอพยพจากอาคารในกรณีที่มีผู้อพยพจะต้องอพยพโดยใช้ทางออกหนีไฟเท่านั้น และทางหนีไฟมีเพียงทางออกเดียว
- งานวิจัยจะไม่นำส่วนของควันไฟและอันตรายที่เกิดจากไฟมาเกี่ยวข้อง
- งานวิจัยพิจารณาเฉพาะการจำลองการอพยพในอาคารที่มีชั้นเดียวเท่านั้น
- งานวิจัยจะไม่นำส่วนของการเสียชีวิตของผู้อพยพมาเกี่ยวข้อง
- งานวิจัยจะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ผู้อพยพเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันเท่านั้น จะไม่พิจารณากรณีที่ผู้อพยพบางส่วนเคลื่อนที่สวนทางกับเส้นทางอพยพหลัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย คือนำเสนอวิธีการในการหาผลการอพยพที่มีความถูกต้อง แต่ใช้เวลาในการรอผลลัพธ์น้อยลง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการจัดการอพยพได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนสถานการณ์ได้หลากหลายโดยไม่ต้องรอผลการอพยพในกรณีที่ปรับเปลี่ยนเป็นเวลานาน อีกทั้งยังสนับสนุนการจำลองที่มีความละเอียดสูงในการกำหนดค่าคุณลักษณะของสถานการณ์ ทำให้มีลักษณะคล้ายกับสถานการณ์จริงมากยิ่งขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งเป็นเจ็ดขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการจำลองการอพยพ
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานนิวรอลเน็ตเวิร์ก
3. ออกแบบการทดลอง
4. พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง
5. ทดสอบวิธีการที่นำเสนอ
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง
7. สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้ บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา รวมถึงวัตถุประสงค์ของการวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดลองและผลการทดลอง และบทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุปและอภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.7 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เป็นบทความทางวิชาการในหัวข้อเรื่อง “การทำนายเวลาในการอพยพออกจากอาคารโดยการประยุกต์ใช้วิธีการบิลดิงบล็อก” [2] โดยนายจักษุเทพ ตี้กุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกรี สินธุภิญโญ ในงานประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีและสารสนเทศ (NCCIT2012) ครั้งที่ 8 ณ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย วันที่ 9-10 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 และ ในหัวข้อเรื่อง “Predicting evacuation time using learnable building block method” [3] โดยนายจักษุเทพ ตี้กุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกรี สินธุภิญโญ ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ “ECTI-CON 2012” ณ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ประเทศไทย วันที่ 16 – 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

แนวคิดและทฤษฎีที่จะอธิบายในการวิจัยนี้ แบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ทฤษฎีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน ทฤษฎีนิวรอลเน็ตเวิร์ก และทฤษฎีการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อก

2.1.1 **ทฤษฎีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน** (agent based simulation)

ทฤษฎีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการจำลองการอพยพ เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการจำลองในระดับที่มีความละเอียดสูง (microscopic) ซึ่งเหมาะสมกับการจำลองพฤติกรรมของมนุษย์ [1] วิธีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนสามารถกำหนดคุณลักษณะของตัวแทนที่อยู่ในสถานการณ์จำลองให้มีลักษณะแตกต่างกันไป (heterogeneous) ทำให้การจำลองฝูงชนมีลักษณะเหมือนจริงมากขึ้น เนื่องจากธรรมชาติของมนุษย์แต่ละคนนั้นมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านกายภาพ เช่น อายุ เพศ ความพิการทางอวัยวะต่างๆ ความแตกต่างทางด้านความคิด เช่น ความสามารถในการตัดสินใจในภาวะคับขันของเด็กกับผู้ใหญ่ย่อมแตกต่างกัน ดังนั้น การจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจำลองอพยพในสถานการณ์ที่เราต้องการวิเคราะห์หาความสามารถในการการอพยพของอาคารเพื่อให้ได้การจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะคล้ายกับความเป็นจริงมากที่สุด อีกทั้งข้อมูลที่เราต้องการทราบ อาทิเช่น อัตราการไหลออกจากพื้นที่ จำนวนผู้บาดเจ็บและเสียชีวิต ซึ่งการจำลองด้วยวิธีนี้สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอในการนำไปใช้วางแผนการอพยพได้

ขั้นตอนการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน มีดังนี้ [4]

1. ระบุประเภทของตัวแทนและกำหนดคุณลักษณะของตัวแทน เช่น กำหนดขนาดของตัวแทน ความสามารถในการเคลื่อนที่ของแต่ละตัวแทน จำนวนตัวแทนแต่ละประเภท เป็นต้น

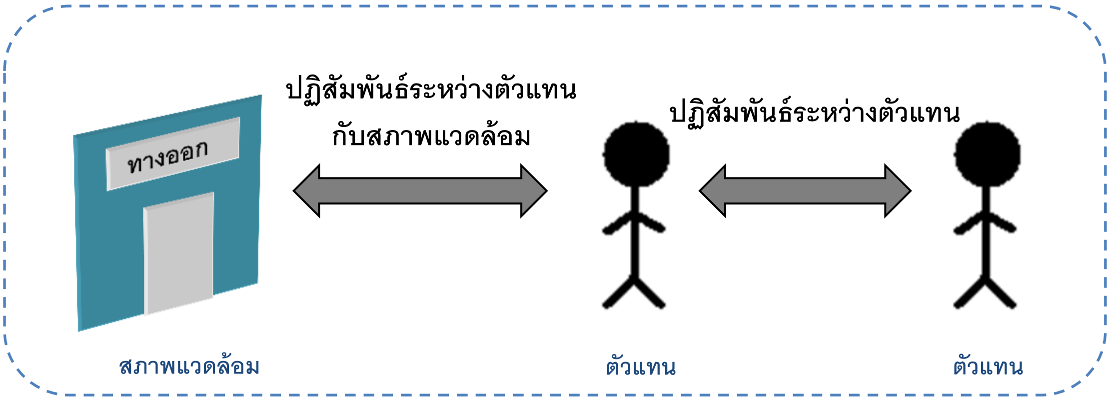
2. สร้างสภาพแวดล้อมที่จะให้ตัวแทนอยู่และสามารถปฏิสัมพันธ์ได้ เช่น สร้างอาคารจำลองขึ้นมาตามแผนผังของอาคารจริง เป็นต้น

3. ระบุวิธีการในการกำหนดพฤติกรรมของตัวแทนเมื่อตัวแทนมีการปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม เช่น เมื่อตัวแทนได้รับข้อมูลจากตัวแทนอื่นเกี่ยวกับเส้นทางหนีไฟ ตัวแทนจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้รับข้อมูล เป็นต้น

4. ระบุวิธีการในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแทน เงื่อนไขในการปฏิสัมพันธ์ว่าสามารถปฏิสัมพันธ์กันอย่างไร เช่น ตัวแทนสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลเส้นทางการหนีไฟให้แก่กันและกันได้เมื่อมีระยะระหว่างตัวแทนทั้งสองน้อยกว่าหนึ่งเมตร เป็นต้น

5. ดำเนินการจำลองตามสภาพแวดล้อม และตัวแทนที่กำหนดขึ้นมาในขั้นตอนข้างต้น

ภาพที่ 1 แสดงแผนภาพการทำงานของตัวแทนในสิ่งแวดล้อมจำลองเมื่อใช้วิธีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน



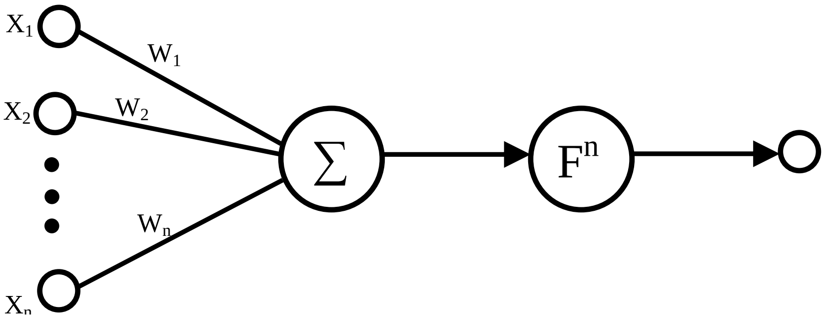
ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของตัวแทนในสิ่งแวดล้อมจำลอง

2.1.2 นิวรอลเน็ตเวิร์ก [5]

นิวรอลเน็ตเวิร์กหรือโครงข่ายประสาทเทียม เป็นวิธีการเรียนรู้ของเครื่องแบบหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างของแบบจำลองเลียนแบบการทำงานของสมองของมนุษย์ เพื่อนำแบบจำลองที่ได้นี้มาใช้ในเพื่อจำแนกกลุ่มของข้อมูล หรือใช้ในการทำนายค่าผลลัพธ์ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยโครงสร้างของแบบจำลองที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์นั้นประกอบไปด้วย โหนด (node) ซึ่งเลียนแบบมาจากเซลล์ประสาทของมนุษย์ และเส้นเชื่อมระหว่างโหนด (edge) ซึ่งมีทั้งเส้นที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตเลียนแบบมาจากใยประสาทนำเข้า (dendrite) และแกนประสาทนำออก (axon) ซึ่งเป็นส่วนปลายประสาทที่เชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่น ๆ ในสมองมนุษย์

การทำงานในสมองของคนเราจะเริ่มจากการกระตุ้นโดยไฟฟ้าเคมีไปยังเซลล์ประสาทใด ๆ ผ่านใยประสาทนำเข้า ซึ่งจะเป็นส่วนที่รับกระแสไฟฟ้าเคมีเข้ามาประมวลผลในเซลล์ประสาท หลังจากนั้นจะส่งผลลัพธ์ที่ได้ไปยังเซลล์ประสาทอื่น ๆ ที่เชื่อมต่อกันผ่านทางแกนประสาทนำออก

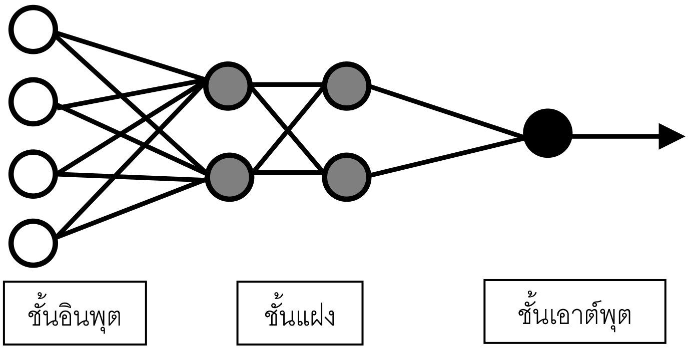
เช่นเดียวกับในสมองมนุษย์ โครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์กที่ประกอบไปด้วยโหนดและเส้นเชื่อมนั้นจะประกอบกันเป็นหนึ่งเพอร์เซปตรอน (perceptron) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เพอร์เซปตรอนหน่วยการทำงานที่ย่อยที่สุดในนิวรอลเน็ตเวิร์ก

ในเพอร์เซปตรอนหนึ่ง ๆ จะประกอบไปด้วยอินพุต หรือข้อมูลที่นำเข้ามาประมวลผลซึ่งจะส่งเข้ามาพร้อมกับถูกปรับค่าตามค่าน้ำหนัก (weight) ของแต่ละเส้นที่กำกับอยู่ ข้อมูลที่นำเข้ามาทั้งหมดจะรวมกันที่หน่วยผลรวม (summation unit) ค่าผลรวมที่ได้นี้จะนำไปพิจารณาเป็นข้อมูลออกตามฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ซึ่งมีหลายฟังก์ชันให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมกับปัญหาแต่ละประเภท เช่น ฟังก์ชันไบนารี (binary function) ฟังก์ชันสองขั้ว (bipolar function) และ ฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กเพื่อทำนายเวลาในการอพยพ ซึ่งค่าเอาต์พุตที่ได้เป็นจำนวนจริง จึงเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น

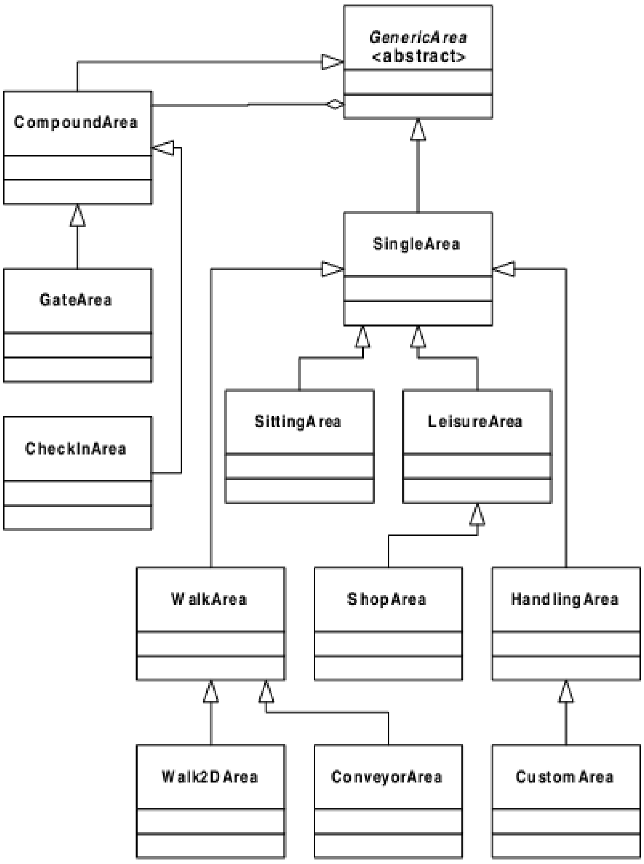
การสร้างแบบจำลองด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์กเพื่อแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน จะใช้เพอร์เซปตรอนหลาย ๆ โหนดมาต่อกันเป็นโครงสร้างดังแสดงในรูปภาพที่ 3 โดยแบ่งเพอร์เซปตรอนออกเป็นสามชั้นคือ ชั้นอินพุต (input layer) ชั้นแฝง (hidden layer) และชั้นเอาต์พุต (output layer) โดยจำนวนโหนดของชั้นอินพุตนั้นมักจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของคุณลักษณะที่ใช้พิจารณา ส่วนจำนวนโหนดและจำนวนชั้นของชั้นแฝงนั้นเป็นค่าไม่ตายตัวขึ้นกับปัญหาและการปรับแต่งในการทดลอง โดยสิ่งที่จะได้จากการฝึกฝนแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์กคือโครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์กพร้อมทั้งค่าน้ำหนักสำหรับแต่ละเส้นเชื่อมที่สามารถตอบโจทย์ของปัญหานั้น ๆ ได้



ภาพที่ 3 โครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์ก

2.1.3 **ทฤษฎีการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อก** (Simulation using building blocks)

การจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อกถูกคิดค้นขึ้นโดย Valentin และ Verbraeck [6] โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลองให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในกรณีที่สถานการณ์จำลองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน เพื่อลดระยะเวลาในการสร้างแบบจำลองและสามารถปรับเปลี่ยนสถานการณ์ในการจำลองได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยวิธีการในการทำการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อกจะมีวิธีการคล้ายกันกับการออกแบบซอฟท์แวร์เชิงวัตถุ (object-oriented) ซึ่งจะทำการแบ่งองค์ประกอบหลักของสถานการณ์ที่ต้องการจำลองออกเป็นบล็อกแต่ละบล็อกจะมีคุณลักษณะ (attribute) และ เมท็อด (method) ของตัวเอง โดยแต่ละบล็อกสามารถทำการสืบทอดคุณสมบัติ (inherite) จากบล็อกอื่นได้และ สามารถประกอบขึ้นโดยอาศัยบล็อกๆ หลายประเภท เข้าไว้ด้วยกัน (aggregation)



ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างบล็อกของโครงสร้างพื้นที่ภายในสนามบิน

จากภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างให้เห็นว่าบล็อกของบิลดิงบล็อกทุกชนิด มีพื้นฐานมากจากบล็อกของพื้นที่ทั่วไป (generic area) ซึ่งบล็อกที่สืบทอดโดยตรงมี 2 บล็อกคือ

1. **พื้นที่เดี่ยว** (single area) ซึ่งเป็นบล็อกที่แสดงพื้นที่ที่เป็นหน่วยย่อยที่สุด มีหน้าที่ความรับผิดชอบเพียงแค่แบบเดียวเช่น บล็อกของพื้นที่สำหรับนั่ง บล็อกของพื้นที่ทางเดิน (walking area) เป็นต้น

2. **พื้นที่รวม** (compound area) ซึ่งเป็นบล็อกที่แสดงพื้นที่ที่ประกอบขึ้นจากพื้นที่เดี่ยว หรือ พื้นที่รวมหลายบล็อกเข้าด้วยกัน เช่น บล็อกของพื้นที่ประตูสัญญาณ (gate area) บล็อกของพื้นที่เช็คอิน (check in area)

หลังจากที่เราได้กำหนดชนิดของบิลดิงบล็อกแล้วนั้น เราจะนำไปสร้างโมเดลในการจำลองโดยการนำบิลดิงบล็อกมาประกอบขึ้นตามสถานการณ์ที่เราต้องการจำลอง โดยกำหนดคุณลักษณะและพฤติกรรมตามรูปแบบของสถานการณ์

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายผลการอพยพด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อกประกอบไปด้วย 4 ส่วน ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการอพยพโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กในการทำนายผลการอพยพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการอพยพโดยใช้ระบบกระจายตัว และโปรแกรมการจำลองการอพยพ Fire Dynamics Simulation with Evacuation (FDS+Evac)

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการอพยพโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทน

งานวิจัยที่ใช้วิธีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนเพื่อใช้ในการจำลองอพยพนั้นมีอยู่หลากหลายงานวิจัย เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมของมนุษย์และให้ผลการจำลองออกมาเสมือนจริง เนื่องจากวิธีการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนเป็นวิธีการจำลองในระดับที่มีความละเอียดสูง (microscopic simulation) ซึ่งสามารถจำลองลักษณะของมนุษย์ซึ่งมีความแตกต่างกัน (heterogeneous) ซึ่งมีความเหมาะสมมากกว่าวิธีการจำลองฝูงชนที่มีในระดับภาพรวม (macroscopic simulation) เช่น การใช้วิธีทฤษฎีของไหล (fluid-dynamic model) มาใช้ในการกำหนดวิธีการเคลื่อนที่ของฝูงชน [1] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนเพื่อใช้ในการจำลองการอพยพเพื่อจำลองกรณีศึกษาเมื่อมีเหตุการณ์ฉุกเฉินในสถานการณ์ที่แตกต่างกันได้ อาทิเช่น งานวิจัยของ N. Zarboutis และ N.Marmaras [7] จำลองกรณีการอพยพเมื่อมีอัคคีภัยเกิดขึ้นในสถานีรถไฟใต้ดิน งานวิจัยของ Shendarkar, Vasudevan, Lee และ Son [8] นำเสนอวิธีการในการนำเอาทฤษฎี BDI (belief-desire-intention) มาใช้จำลองสถานการณ์เมื่อมีเหตุการณ์ผู้ก่อการร้ายโจมตี เป็นต้น

งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องมักเป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้การจำลองการอพยพให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น งานวิจัยของ Christensen และ Sasaki [9] ที่จำลองสถานการณ์ฉุกเฉินกรณีที่มีผู้พิการร่วมอยู่ในเหตุการณ์ พบว่าจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของฝูงชนโดยรวมช้าลง งานวิจัยของ Henein และ White [10] ศึกษาเกี่ยวกับแรงผลักระหว่างผู้อพยพและการบาดเจ็บที่อาจจะเกิดขึ้นส่งผลให้การจำลองการอพยพมีความเหมือนจริงมากยิ่งขึ้น งานวิจัยของ Shendarkar, Vasudevan, Lee และ Son [8] เสนอวิธีการในการใช้ความเป็นจริงเสมือน (Virtual reality) ในการฝึกฝนตัวแทน BDI เมื่อมีเหตุการณ์ฉุกเฉินเกิดขึ้น เพื่อให้การตัดสินใจในการเลือกเส้นทางของผู้อพยพในโลกจำลองเป็นไปตามพฤติกรรมที่ได้เรียนรู้จากมนุษย์ งานวิจัยของ Pelechano, Allbeck และ Badler [11] เสนอวิธีการนำการจำลองการอพยพเมื่อมี

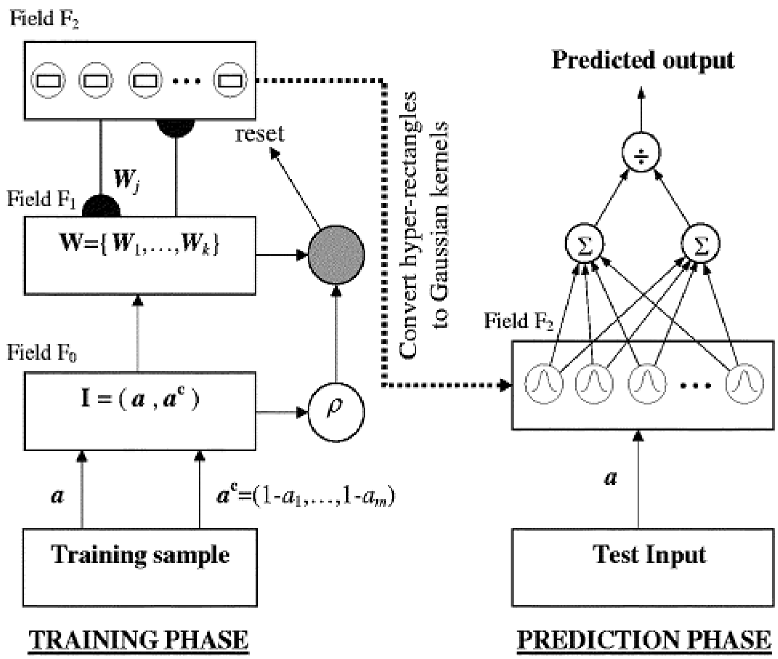
ปริมาณประชากรหนาแน่นโดยผสานวิธีการแบบพื้นฐานจากกฎ (rules based) และ โมเดลแรงจากสังคม (social force model) [12] เข้าด้วยกัน งานวิจัยของ Pelechano, O'Brien, Silverman, Badler [13] นำเสนอวิธีการในการเพิ่มส่วนของจิตวิทยาเข้าไปเพื่อใช้ในการหาเส้นทางของผู้อพยพ ร่วมถึงเพิ่มการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้และกำหนดหน้าที่ของแต่ละผู้อพยพให้แตกต่างกันทำให้มีพฤติกรรมที่แตกต่างกันไปด้วย

งานวิจัยบางงานศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนการอพยพเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การอพยพได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยของ Hajibabai, Delavar, Malek และ Frank [14] นำเสนอวิธีการในการหาเส้นทางการอพยพที่ดีที่สุด งานวิจัยของ Murakami, Minami, Kawasoe และ Ishida [15] ทำการจำลองเพื่อทดสอบวิธีการอพยพแบบใช้วิธีอพยพตามบุคคล (follow-me) เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการดังกล่าวเพิ่มประสิทธิภาพในการอพยพได้ดีกว่าวิธีอพยพตามเส้นทางที่กำหนด (follow-direction)

ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพยายามเพิ่มรายละเอียดในการจำลองฝูงชนเพื่อให้ผลการจำลองเหมือนจริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งผลที่ตามมานั่นคือ การประมวลผลข้อมูลที่ต้องการมากขึ้นเนื่องจากมีค่าตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการตัดสินใจเพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมของฝูงชนมีมากขึ้น

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กในการทำนายผลการอพยพ

งานวิจัยที่มีการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กในการทำนายผลการอพยพ เช่น งานวิจัยของ Lee, Lim, Yuen และ Lo [16] ที่นำเสนอวิธีการผสมผสานระหว่างเจอเนอรัลรีเกรซชันนิวรอลเน็ตเวิร์ก (general regression neural network หรือ GRNN) [17] และทฤษฎีฟัซซี่อะแด็ปทีปเรโซแนนซ์ (adaptive fuzzy resonance หรือ FA) และเรียกวิธีการนี้ว่า GRNNFA โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีที่มีความทนทานต่อข้อมูลที่รบกวน และลดปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการสร้างโมเดลในการทำนายและปริมาณการประมวลผลข้อมูลโดยใช้ทฤษฎี FA ในการแบ่งกลุ่มของชุดเรียนรู้ออกเป็นกลุ่มเพื่อลดปริมาณโหนดที่เกิดขึ้นในชั้นของหน่วยแบบแผน (pattern units) ดังแสดงสถาปัตยกรรมของโมเดลในภาพที่ 5



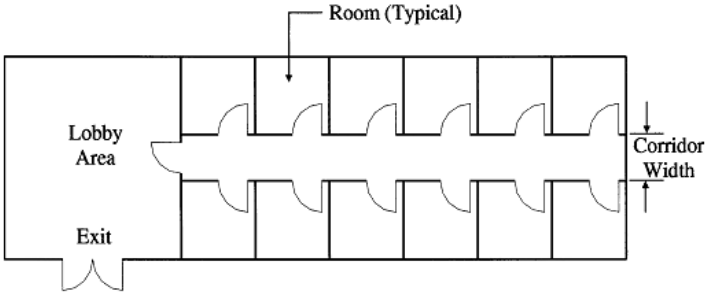
ภาพที่ 5 แสดงสถาปัตยกรรมของ GRNNFA โมเดล

จากนั้นจึงนำหน่วยแบบแผนที่ได้ไปใช้ใน GRNN โมเดลเพื่อใช้ในการทำนายผล โดยได้ทำการทดสอบทฤษฎีที่นำเสนอโดยการนำมาทำนายผลการอพยพในสถานบันเทิงคาราโอเกะ โดยใช้ตัวแปรสามชนิดในการทำนายผลการอพยพนั้นคือ ขนาดของพื้นที่ล็อบบี้ ขนาดความกว้างของทางเดิน และจำนวนห้อง จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรทั้งสามค่าเพื่อทำการจำลองการอพยพ แล้วนำผลของการจำลองด้วยวิธีการที่นำเสนอมาสร้างโมเดลในการทำนาย ซึ่งช่วงของค่าของตัวแปรทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 1

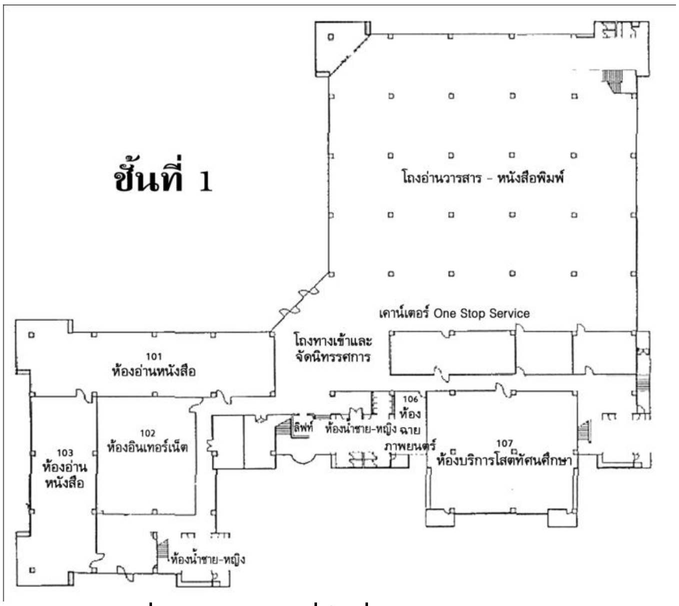
ตารางที่ 1 แสดงช่วงของค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการอพยพ

ชนิดตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
จำนวนของห้อง	4	22
ความกว้างของทางเดิน (มม.)	1,050	1,400
ขนาดของพื้นที่ล็อบบี้ (ตร.ม.)	15	35

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายจะเป็นเวลาที่ใช้ในการอพยพ ซึ่งในการทดลองจะพิจารณาลักษณะของแผนผังอาคารเพียงแบบเดียวเท่านั้นดังแสดงในภาพที่ 6 ทำให้งานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมลักษณะของแผนผังอาคารแบบอื่น ๆ ซึ่งอาจมีความซับซ้อนมากกว่าดังแสดงในภาพที่ 7 เนื่องจากรูปแบบของแผนผังอาคารที่ซับซ้อนย่อมมีผลต่อการอพยพออกจากอาคาร



ภาพที่ 6 แผนผังอาคารหลักที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 7 แผนผังอาคารทั่วไปที่มีความซับซ้อนมากกว่า

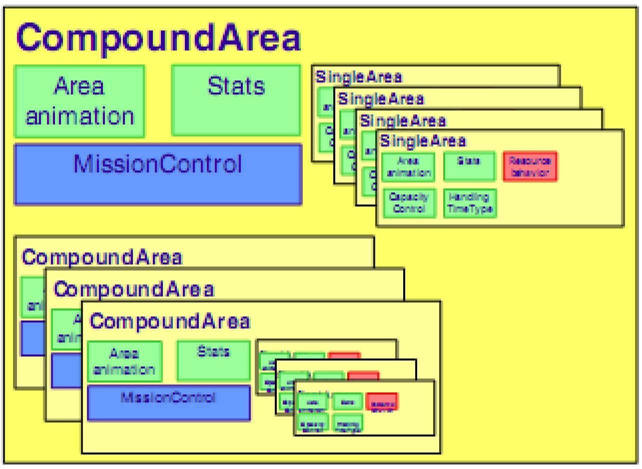
2.2.3 **งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อก** (building block simulation)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกันการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อก เช่น งานวิจัยของ Verbraeck และ Valentin [6] ซึ่งนำวิธีการดังกล่าวไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ภายในสนามบินเพื่อวัดประสิทธิภาพของการจัดการของสนามบิน โดยทำการแบ่งประเภทของบิลดิงบล็อกออกเป็น 4 กลุ่มหลักคือ

1. บิลดิงบล็อกของพื้นที่ภายในสนามบิน
2. บิลดิงบล็อกของผู้โดยสารหรือกลุ่มผู้คน
3. บิลดิงบล็อกของพฤติกรรมของผู้โดยสาร
4. บิลดิงบล็อกของส่วนควบคุม

ซึ่งทั้ง 4 ส่วนจะมีคุณลักษณะ หน้าที่ ความรับผิดชอบ และรายละเอียดแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น บิลดิงบล็อกของพื้นที่ภายในสนามบินที่ทำหน้าที่ในการระบุลักษณะของพื้นที่ใน

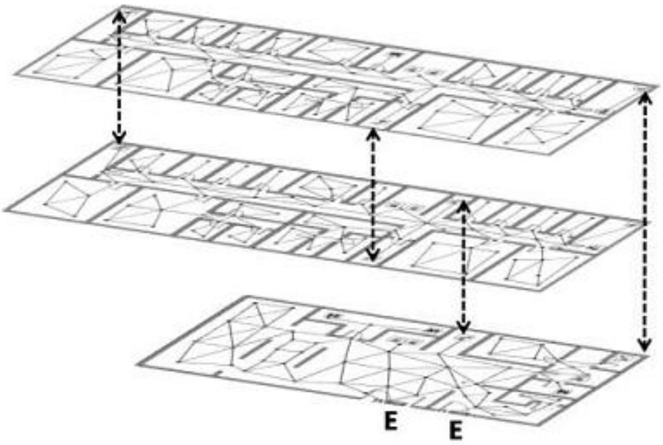
อาคารสนามบิน โดยแต่ละบิลดิงบล็อกจะถูกสร้างขึ้นตามชนิดของพื้นที่ที่แตกต่างกันในสนามบิน เช่น ส่วนเช็คอิน ประตูขึ้นเครื่อง ซึ่งแต่ละบิลดิงบล็อกย่อย สามารถนำมาประกอบกันเพื่อสร้างพื้นที่แบบใหม่ได้ ซึ่งเป็นข้อดีหลักในการทำการจำลองโดยใช้บิลดิงบล็อก เนื่องจากทำให้บิลดิงบล็อกที่ถูกสร้างขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ในกรณีที่ต้องการจำลองสถานการณ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น ต้องการจำลองสถานการณ์ในสนามบินแห่งอื่นๆ



ภาพที่ 8 แสดงบิลดิงบล็อกของพื้นที่ภายในสนามบินที่ประกอบขึ้นจากบิลดิงบล็อกอื่นๆ

2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการอพยพโดยใช้ระบบกระจายตัว (distributed system)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการอพยพโดยใช้ระบบกระจายตัวมีจุดประสงค์หลักในการวิจัยเพื่อลดเวลาในการรอผลการจำลองอพยพ โดยอาศัยข้อดีหลักของระบบกระจายตัวคือการนำคอมพิวเตอร์จำนวนมากเข้ามาช่วยในการประมวลผลการจำลองการอพยพ เหตุผลหลักในการพยายามลดเวลาในการรอผลเนื่องจากในบางครั้งการจำลองการอพยพถูกนำไปใช้ประกอบในสถานการณ์การอพยพจริง เพื่อช่วยให้ผู้ที่ติดอยู่ในที่ประสบภัยและหน่วยกู้ภัยสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาใช้ในการตัดสินใจในสถานการณ์จริง ดังนั้นหากผลลัพธ์ที่ได้นั้นไม่ทันการณ์หรือไม่เป็นไปตามเวลาจริง (real time) ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการอพยพอาจไม่มีประโยชน์ในการตัดสินใจ งานวิจัยของ Dimakis, Filippoupolitis และ Gelenbe [18] ได้ทำการสร้างเครื่องมือในการจำลองการอพยพโดยใช้หลักของระบบกระจายตัว โดยมีสมมุติฐานว่าในแต่ละชั้นของอาคารที่จะทำการจำลองนั้น เราสามารถจำลองการอพยพบนคอมพิวเตอร์คนละเครื่องได้ เนื่องจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นนั้นไม่มีผลต่อเหตุการณ์ของการจำลองในชั้นอื่นๆ ยกเว้นกรณีที่ผู้อพยพเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ของชั้นหนึ่งไปยังพื้นที่อีกชั้นหนึ่ง



ภาพที่ 9 แสดงแผนผังของอาคารความสูง 3 ชั้นที่ใช้ในการทดลองการจำลองการอพยพโดยใช้ระบบกระจายตัว

2.2.5 โปรแกรมการจำลองการอพยพ Fire Dynamics Simulation with Evacuation (FDS+Evac) [19]

โปรแกรมการจำลองการอพยพ Fire Dynamics Simulation with Evacuation หรือ FDS+Evac เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแบบโอเพนซอร์ส (open source) โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการจำลองเหตุการณ์ไฟไหม้และการอพยพภายในอาคาร โดยโปรแกรมนั้นจะใช้วิธีการจำลองการอพยพโดยใช้พื้นฐานจากตัวแทนเพื่อกำหนดคุณลักษณะของตัวแทนในการจำลองการอพยพ โดยทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในการเคลื่อนที่ของตัวแทนจะใช้โมเดลแรงจากซึ่งนำเสนอโดย Helbing และคณะ [12] ร่วมกับวิธีการกำหนดลักษณะของตัวแทนด้วยวงกลมสามวง นำเสนอโดย Langston และคณะ [20] เพื่อเพิ่มความเสมือนจริงยิ่งขึ้น โดยสาเหตุที่งานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้โปรแกรม FDS+Evac ในการทำการทดลองและเปรียบเทียบผลเนื่องจาก

1. เป็นโปรแกรมแบบโอเพนซอร์ส จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้งานอีกทั้งยังสามารถทราบถึงทฤษฎีที่ใช้ในการจำลองการอพยพ ซึ่งโปรแกรมการอพยพที่ทำพัฒนาอยู่ในเชิงพาณิชย์นั้นมักมีราคาแพงและเข้าถึงได้ยาก

2. โปรแกรมมีการทดสอบเปรียบเทียบกับโปรแกรมการจำลองการอพยพที่พัฒนาในเชิงพาณิชย์ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในแวดวงงานวิจัยจำลองการอพยพ เช่น โปรแกรม Exodus [21] และโปรแกรม Simulex [22] ซึ่งรายละเอียดผลการเปรียบเทียบและทดสอบโปรแกรม FDS+Evac กับโปรแกรมการจำลองอพยพอื่นๆ แสดงอยู่ในการเอกสาร Fire Dynamics Simulators with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User’s Guide [19]

3. โปรแกรมใช้วิธีการจำลองการอพยพโดยใช้พื้นฐานแบบตัวแทนโดยผู้ใช้สามารถกำหนดคุณลักษณะของตัวแทนเช่น เพศ อายุ และความตระหนักรู้ทางออก ซึ่งเหมาะสมกับ

งานวิจัยฉบับนี้ซึ่งมุ่งเน้นการจำลองการอพยพที่มีความเสมือนจริงที่เกิดจากค่าคุณลักษณะของตัวแทนที่แตกต่างกันในสถานการณ์

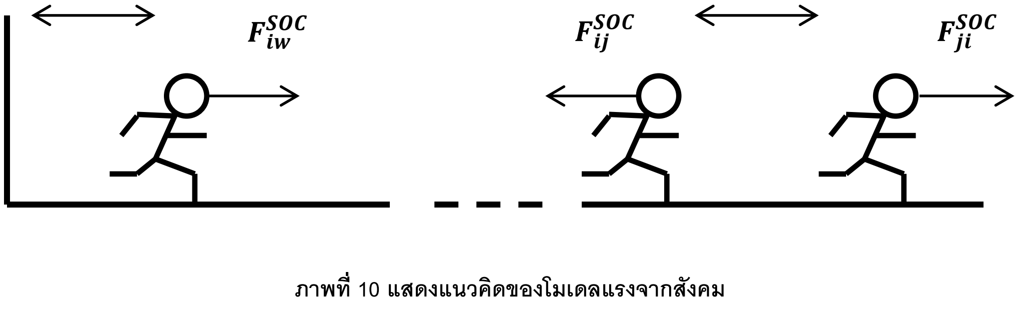
การจำลองการอพยพของโปรแกรม FDS+Evac มีทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้สองทฤษฎีคือ ทฤษฎีโมเดลแรงจากสังคมและทฤษฎีการเลือกทางออก (exit selection)

2.2.5.1 **ทฤษฎีโมเดลแรงจากสังคม**

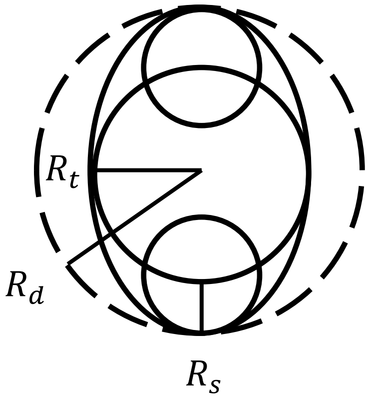
ทฤษฎีโมเดลแรงจากสังคมเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของตัวแทนโดยการพิจารณาแรงที่มากระทำกับตัวแทนทั้งในส่วนของแรงที่เกิดจากด้านกายภาพ เช่น แรงจากการปะทะกับสิ่งอื่น และแรงที่เกิดจากด้านจิตวิทยา เช่น แรงที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม เช่น ไฟ กำแพง หรือแรงที่เกิดจากตัวแทนที่อยู่โดยรอบ ภาพที่ 10 แสดงถึงแนวคิดของโมเดลแรงจากสังคม ลักษณะของตัวแทนที่ใช้จะแสดงโดยใช้วงกลมสามวงซึ่งเป็นวิธีการที่นำเสนอโดย Langston [21] ดังแสดงในภาพที่ 11 และมีค่าคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่ารัศมีของวงกลมของตัวแทนที่ใช้ในการจำลองและความเร็วของตัวแทนแต่ละประเภท

ประเภทของตัวแทน	R_d (เมตร)	R_t/R_d	R_t/R_d	R_t/R_d	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
ผู้ใหญ่	0.255±0.035	0.5882	0.3725	0.6275	1.25±0.30
ชาย	0.270±0.020	0.5926	0.3704	0.6296	1.35±0.20
หญิง	0.240±0.020	0.5833	0.3750	0.6250	1.15±0.20
เด็ก	0.210±0.015	0.5714	0.3333	0.6667	0.90±0.30
ผู้สูงอายุ	0.250±0.020	0.6000	0.3600	0.6400	0.80±0.30



ภาพที่ 10 แสดงแนวคิดของโมเดลแรงจากสังคม



ภาพที่ 11 แสดงลักษณะของตัวแทนที่ใช้วงกลมสามวงแสดงลักษณะของร่างกาย

ตัวแทนแต่ละตัวแทนจะมีสมการในการกำหนดการเคลื่อนที่ดังแสดงในสมการที่ 1

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

โดยที่

$x_i(t)$แทนตำแหน่งของตัวแทน i ณ เวลา t

$f_i(t)$เป็นแรงโดยรอบที่กระทำต่อตัวแทน i

m_i คือมวลของตัวแทน และ

$\varepsilon_i(t)$ เป็นแรงผันแปรเล็กน้อยที่เกิดจากการสุ่มค่า ขณะที่ความเร็วของตัวแทน i หาได้จาก $v_i(t) = dx_i/dt$

แรงทั้งหมดที่กระทำต่อตัวแทน i นั้นประกอบด้วยหลายส่วนดังแสดงในสมการที่ 2

$$f_i = \frac{m_i}{T_i}(v_i^0 - v_i) + \sum_{j \neq i}(f_{ij}^{SOC} + f_{ij}^{c} + f_{ij}^{att}) + \sum_w \left(f_{iw}^{SOC} + f_{iw}^{c}\right) + \sum_k f_{ik}^{att} \quad (2)$$

โดยที่ผลรวมแรกนั้นเป็นแรงที่เกิดจากการกระทำระหว่างตัวแทนกับตัวแทน ผลรวมระหว่าง w เป็นแรงระหว่างตัวแทนกับกำแพง และผลรวมสุดท้าย f_{ik}^{att} เป็นแรงระหว่างตัวแทนกับสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น แรงผลักระหว่างตัวแทนกับไฟ เป็นต้น ในส่วนพจน์แรกในสมการเป็นแรงจูงใจในการอพยพของตัวแทน ตัวแทนแต่ละตัวจะเดินด้วยความเร็วที่กำหนดให้คือ

$v_i^0 = |\mathrm{v}_i^0|$ ไปยังประตูหรือตัวแทนอื่น โดยที่ทิศทางนั้นถูกกำหนดอยู่ใน v_i^0 T_i เป็นค่าเวลาผ่อนคลาย (Relaxation Time) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดแรงจูงใจที่จะทำให้ตัวแทนเร่งความเร็วไปสู่ความเร็วที่ต้องการ

แรงระหว่างตัวแทนกับตัวแทนที่แสดงอยู่ในสมการที่ 2 ประกอบด้วยสามส่วน โดยในส่วนแรงจากสังคม f_{ij}^{SOC} นั้นจะใช้สมการที่นำเสนอโดย Hebling และคณะ[12] ดังแสดงในสมการที่ 3

$$f_{ij}^{SOC} = A_i e^{-\frac{d_{ij}-r_{ij}}{B_i}} (\lambda_i + (1-\lambda_i)\frac{1+cos\varphi_{ij}}{2}) n_{ij} \qquad (3)$$

โดยที่ d_{ij}คือระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางวงกลมของตัวแทนที่พิจารณา r_{ij} เป็นผลรวมของรัศมีของวงกลมของตัวแทน และเวกเตอร์ n_{ij} เป็นเวกเตอร์ที่ลากจากตัวแทน j ไปยังตัวแทน i ในส่วนของการแสดงตัวแทนด้วยวงกลมสามวง วงกลมที่ใช้ในสมการที่ 3 เป็นวงกลมของตัวแทนทั้งสองที่อยู่ใกล้กันมากที่สุด มุม φ_{ij} เป็นมุมระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแทน i ที่เป็นตัวแทนที่รับแรงกระทำกับตัวแทน j ค่าตัวแปร A และ B เป็นค่าแสดงถึงความเข้มและขอบเขตการขยายของแรง ถ้า λ_i= 1 หมายความแรงที่กระทำสมมาตร และถ้า 0 < λ_i < 1 แสดงว่าแรงทางด้านหน้าของตัวแทนมีค่ามากกว่าแรงจากด้านหลัง ในส่วนของแรงระหว่างตัวแทนกับกำแพง f_{iw}^{SOC} มีวิธีการคำนวณด้วยวิธีเดียวกันแต่ค่าคงที่ A_i B_i และ λ_i มีค่าแตกต่างออกไป

ส่วนของแรงที่เกิดจากการสัมผัสทางกายภาพระหว่างตัวแทน f_{ij}^c นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$f_{ij}^c = (k_{ij}(r_{ij} - d_{ij}) + c_d \Delta v_{ij}^n)\mathrm{n}_{ij} + K_{ij}(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ij}^t \mathrm{t}_{ij} \qquad (4)$$

โดยที่ Δv_{ij}^t เป็นค่าความแตกต่างของเวกเตอร์ความเร็วที่ตั้งฉากของวงกลมที่สัมผัสกัน ค่า Δv_{ij}^n เป็นค่าความแตกต่างของความเร็วปรกติ และเวกเตอร์ t_{ij} เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากของวงกลมที่สัมผัสกัน ซึ่งแรงนี้จะถูกนำไปคำนวณก็ต่อเมื่อวงกลมของตัวแทนมีการสัมผัสกัน เช่น $r_{ij} - d_{ij}$ > 0 โดยค่าความเข้มของความยืดหยุ่นของรัศมีถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ k_{ij} และค่าความเข้มของแรงเสียดทานถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ K_{ij} ค่าแรงหน่วงทางกายภาพถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ c_d ในกรณีแรงที่เกิดจากการสัมผัสทางกายภาพระหว่างตัวแทนกับกำแพงมีวิธีการคำนวณด้วยวิธีเดียวกันและใช้ค่าคงที่ค่าเดียวกัน

ค่า f_{ij}^{att} สามารถใช้เมื่อมีการดึงดูดหรือผลักดันระหว่างตัวแทนกับตัวแทนเช่น พฤติกรรมการเคลื่อนที่เป็นฝูงหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างเด็กกับผู้ใหญ่ หรือสามารถใช้ในการเคลื่อนที่แบบจับคู่ เช่นการจับคู่กันเข้าไปในตึกของนักผจญเพลิงเป็นต้น

แรงทั้งหมดที่เป็นส่วนประกอบในสมการที่ 2 นั้นเป็นแรงที่เกิดจะขึ้นเมื่ออยู่ในระยะใกล้เท่านั้นและการเชื่อมต่อต้องอยู่ในระยะที่สามารถมองเห็นได้

ในส่วนของการคำนวณหาทิศทางการหมุนของตัวแทนของแต่ละตัวแทนนั้นสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 5

$$I_i^z \frac{d^2\varphi_i(t)}{dt^2} = M_i^z(t) + n_i^z(t) \tag{5}$$

โดยที่ $\varphi_i(t)$ เป็นมุมของตัวแทน i ณ เวลา t I_i^z เป็นโมเมนต์ความเฉื่อย $n_i^z(t)$ เป็นค่าทอร์คขนาดเล็กที่เกิดจากการสุ่มค่า และ $M_i^z(t)$ เป็นผลรวมของทอร์คโดยรอบที่กระทำกับตัวแทนคำนวณด้วยสมการที่ 6

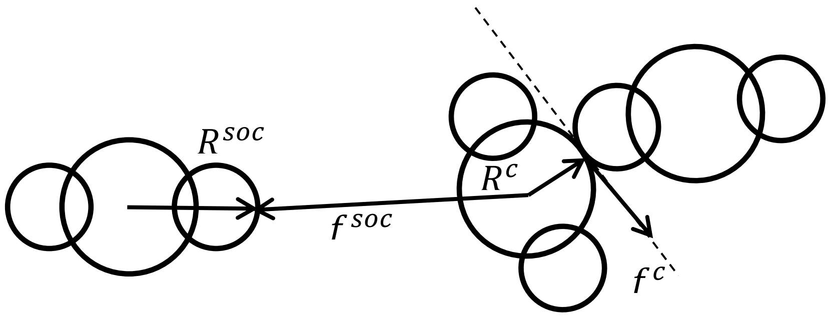
$$M_i^z(t) = M_i^c(t) + M_i^{SOC}(t) + M_i^T(t) \tag{6}$$

โดยที่ M_i^c M_i^{SOC} และ M_i^T เป็นทอร์คของสิ่งที่สัมผัส ทอร์คจากสังคม และทอร์คของแรงจูงใจตามลำดับ

ทอร์คของสิ่งที่สัมผัสสามารถคำนวณด้วยสมการที่ 7

$$M_i^c = \sum_{j \neq i} (R_i^c \times f_{ij}^c) \tag{7}$$

โดยที่ R_i^c เป็นค่าเวกเตอร์ของรัศมีซึ่งเริ่มจากจุดกึ่งกลางของตัวแทน i ไปยังจุดที่สัมผัสดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงนิยามของเวกเตอร์ R^C และ R^{soc}

ทอร์คจากสังคมสามารถคำนวณด้วยสมการที่ 8

$$M_i^{soc} = \sum_{j \neq i}(R_i^{soc} \times f_{ij}^{soc}) \quad (8)$$

โดยที่พิจารณาจากวงกลมที่อยู่ใกล้กัน เวกเตอร์ R_i^{soc}เริ่มจากจุดกึ่งกลางของตัวแทน i ไปยังจุดสัมผัสของแรงจากสังคมดังแสดงในภาพที่ 12 ในส่วนของทอร์คของแรงจูงใจซึ่งจะใช้เพื่อหาแรงที่ต้องกระทำเพื่อไปยังมุมที่ต้องการ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 9

$$M_i^T(t) = \frac{I_i^z}{T_i^z}\left(\frac{\varphi_i(t) - \varphi_i^0}{\pi}\omega^0 - \omega_i(t)\right) \quad (9)$$

โดยที่ ω^0เป็นค่าความเร็วเชิงมุมเป้าหมายในการหมุนตัวแทน $\omega_i(t) = d\varphi_i/dt$ เป็นความเร็วเชิงมุมของตัวแทน i $\varphi_i(t)$เป็นมุมปัจจุบันและ $\varphi_i(t)$ เป็นมุมเป้าหมาย เช่น มุมที่ v_i^0 ชี้ไปสู่ เป็นต้น

2.2.5.2 ทฤษฎีการเลือกทางออก

โปรแกรมตัวจำลอง FDS+Evac ใช้ทฤษฎีเกม (game theory) และ วิธีการตอบสนองแบบแปรผันที่ดีที่สุด (best response dynamic) [24,25] ในการกำหนดวิธีการในการหาทางออกของผู้อพยพ โดยผู้อพยพจะสังเกตหาตำแหน่งและการกระทำของผู้อพยพคนอื่นๆและทำการเลือกทางออกที่ใช้ประมาณการว่าจะใช้เวลาน้อยที่สุด โดยทำการประมาณการเวลาในการอพยพทั้งหมดจากผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้เดินและเวลาในการรอคิวทางออก อีกทั้งยังมีองค์ประกอบอื่นที่ใช้ประกอบในการตัดสินใจเลือกทางออกนั้นคือ เงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับไฟ ความคุ้นเคยกับทางออก และการมองเห็นทางออก โดยค่าความคุ้นเคยกับทางออกนั้นสามารถกำหนดได้ในการ

จำลองการอพยพ โดยกำหนดค่าความตระหนักรู้ให้กับตัวแทนที่ใช้ในการจำลอง โดยมีงานวิจัยทางด้านจิตวิทยา [26,27] สนับสนุนว่าความคุ้นเคยกับทางออกเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกทางออกเพื่ออพยพเนื่องจากการใช้ทางออกที่ไม่คุ้นเคยทำให้มีแนวโน้มที่ต้องใช้เส้นทางที่ไม่รู้จักมาก่อนซึ่งทำให้ผู้อพยพรู้สึกว่าไม่ปลอดภัย จากองค์ประกอบสามส่วนที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแบ่งกลุ่มของทางออกได้เป็นเจ็ดกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเรียงจากกลุ่มทางออกที่มั่นใจมากที่สุดไปยังกลุ่มทางออกที่ไม่มีความมั่นใจ โดยเงื่อนไขที่รบกวนจะพิจารณาจากข้อมูลไฟไหม้ในการจำลองการอพยพ จากนั้นขั้นตอนในการเลือกทางออกจะประกอบไปด้วยสองขั้นตอนคือ เริ่มจากแบ่งทางออกออกเป็นเจ็ดกลุ่มดังที่กล่าวมาแล้วทำการเลือกทางออกจากกลุ่มที่มั่นใจมากที่สุดโดยที่ใช้เวลาในการอพยพน้อยที่สุด

ตารางที่ 3 กลุ่มความมั่นใจของทางออกที่ใช้ในการเลือกทางออก

กลุ่มความมั่นใจ	**สามารถมองเห็นได้**	**มีความคุ้นเคย**	**เงื่อนไขที่รบกวน**
1	ใช่	ใช่	ไม่มี
2	ไม่ใช่	ใช่	ไม่มี
3	ใช่	ไม่ใช่	ไม่มี
4	ใช่	ใช่	มี
5	ไม่ใช่	ใช่	มี
6	ใช่	ไม่ใช่	มี
ไม่มีความมั่นใจ	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ไม่มี
ไม่มีความมั่นใจ	ไม่ใช่	ไม่ใช่	มี

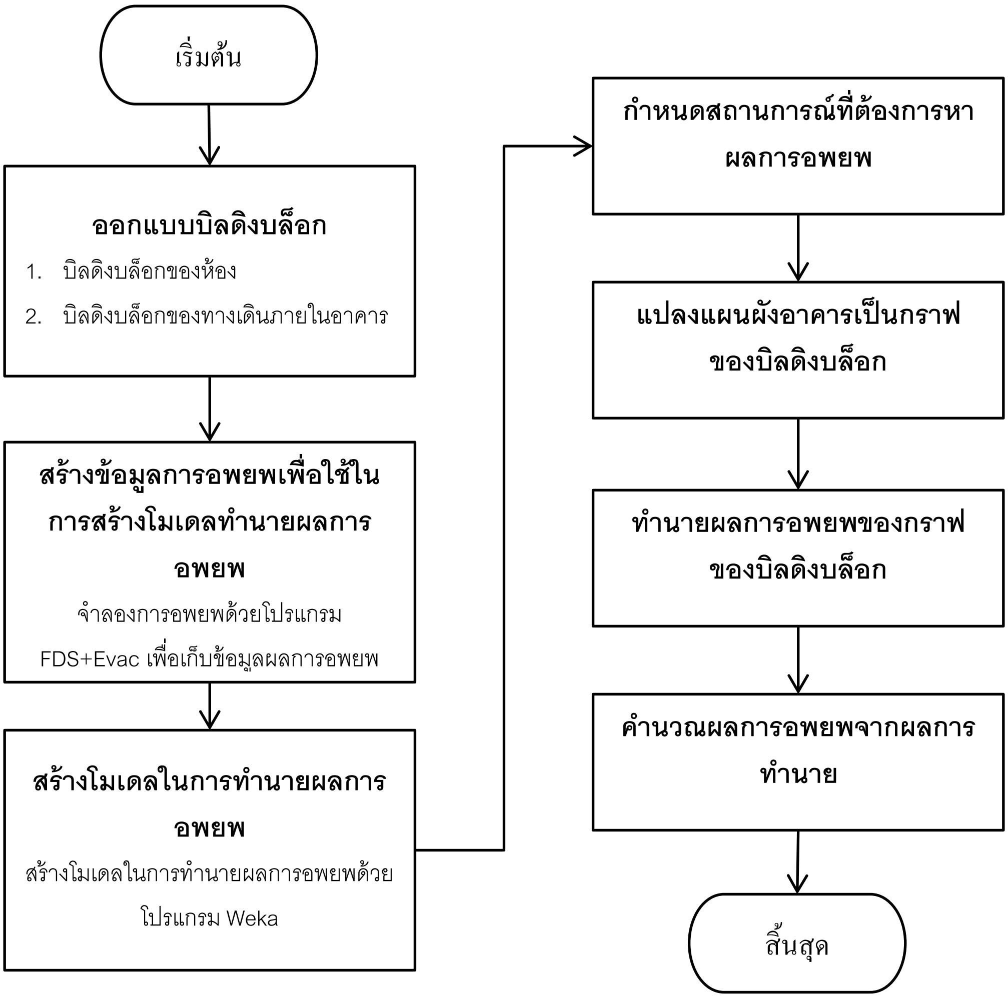
บทที่ 3
วิธีการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก โดยประกอบด้วยแผนภูมิสายงาน (flow chart) แสดงขั้นตอนย่อย และอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของวิธีการทำนายที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบบิลดิงบล็อก การสร้างข้อมูลการอพยพเพื่อใช้ในการสร้างโมเดลทำนายผลการอพยพ การสร้างโมเดลทำนายการอพยพ และการนำโมเดลการทำนายไปใช้ทำนายการอพยพจากอาคาร

3.1 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก

ในภาพที่ 13 แสดงแผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนทั้งหมดในการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก

ภาพที่ 13 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก



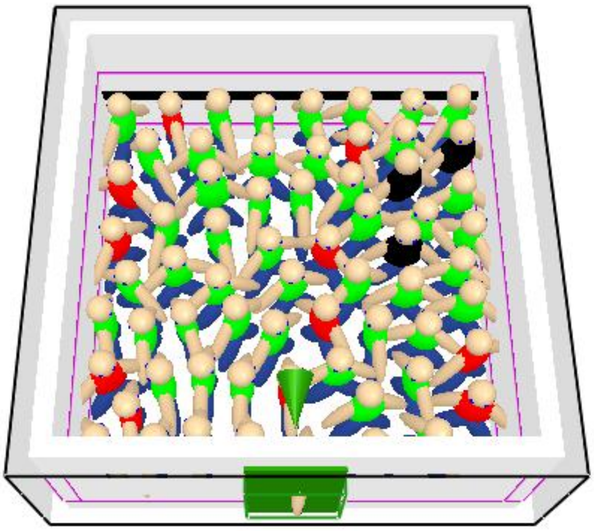
3.2 การออกแบบบิลดิงบล็อก

งานวิจัยนี้ได้แบ่งพื้นที่ในอาคารออกเป็นบิลดิงบล็อก 2 ประเภท คือ บิลดิงบล็อกของห้อง และบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 บิลดิงบล็อกของห้อง

นิยามของบิลดิงบล็อกของห้องในงานวิจัยนี้คือพื้นที่ที่มีกำแพงล้อมรอบและมีประตูทางออกจากห้องได้เพียงทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 14 และมีคุณลักษณะดังนี้

- **พื้นที่ของห้อง** มีหน่วยเป็นตารางเมตร
- **ความกว้างประตู** มีหน่วยเป็นเมตร
- **ความหนาแน่นของประชากร** มีหน่วยเป็นคนต่อตารางเมตร
- **อัตราส่วนของเพศของประชากร** เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนประชากรชายต่อประชากรทั้งหมดในบิลดิงบล็อก โดยที่มีค่าระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 หากประชากรในบิลดิงบล็อกเป็นเพศหญิงทั้งหมด ค่าอัตราส่วนจะมีค่าเป็น 0.0 แต่หากประชากรในบิลดิงบล็อกทั้งหมดเป็นชาย ค่าอัตราส่วนจะมีค่าเป็น 1.0
- **อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออก** เป็นอัตราส่วนระหว่างประชากรที่ทราบทางออกต่อประชากรทั้งหมดในบิลดิงบล็อก โดยที่มีค่าระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 หากประชากรในบิลดิงบล็อกทั้งหมดไม่ทราบทางออกเลย ค่าอัตราส่วนจะมีค่าเป็น 0.0 แต่หากประชากรในบิลดิงบล็อกทั้งหมดทราบทางออก ค่าอัตราส่วนจะมีค่าเป็น 1.0



ภาพที่ 14 ตัวอย่างบิลดิงบล็อกของห้อง

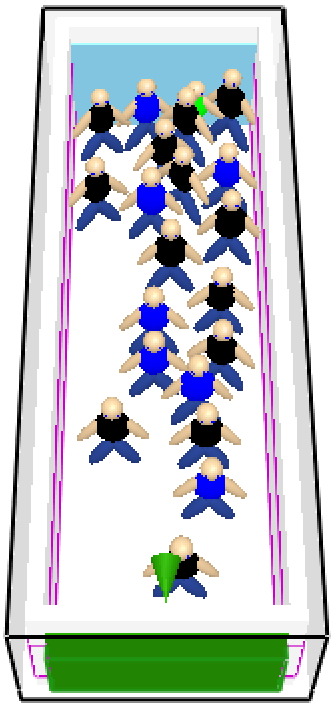
ตารางที่ 4 ขอบเขตค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของห้อง

ชื่อของคุณลักษณะ	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พื้นที่ของห้อง	ตร.ม.	9	100
ความกว้างประตู	เมตร	1.2	10
ความหนาแน่นของประชากร	คน/ตร.ม.	0.1	4.0
อัตราส่วนของเพศของประชากร	-	0.0	1.0
อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออก	-	0.0	1.0

3.2.2 บิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร

นิยามของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารในงานวิจัยนี้คือพื้นที่ที่มีทางเข้าหนึ่งทาง ซึ่งความกว้างของทางเข้ามีขนาดเท่ากับความกว้างของทางเดินเสมอ และมีทางออกหนึ่งทางซึ่งความกว้างของทางออกสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสถานการณ์ ดังแสดงในภาพที่ 15 และมีคุณลักษณะดังนี้

- **ความยาว** มีหน่วยเป็นเมตร
- **ความกว้าง** มีหน่วยเป็นเมตร
- **ความกว้างประตูทางออก** มีหน่วยเป็นเมตร
- **อัตราประชากรไหลเข้า** เป็นอัตราความเร็วของประชากรที่เข้าสู่บิลดิงบล็อก หน่วยเป็นคนต่อวินาที
- **อัตราส่วนของเพศของประชากร** มีความหมายเช่นเดียวกันกับบิลดิงบล็อกของห้อง แต่เป็นอัตราส่วนของประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อก
- **จำนวนประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อก** หน่วยเป็นคน
- **อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออก** มีความหมายเช่นเดียวกับในบิลดิงบล็อกของห้อง แต่เป็นอัตราส่วนของประชากรที่เข้าสู่บิลดิงบล็อก



ภาพที่15 ตัวอย่างบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร

ตารางที่ 5 ขอบเขตค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ชื่อของคุณลักษณะ	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ความยาว	เมตร	3	10
ความกว้าง	เมตร	3	10
ความกว้างประตูทางออก	เมตร	3	10
อัตราส่วนของเพศของประชากร	-	0.0	1.0
อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออก	-	0.0	1.0
จำนวนประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อก	คน	10	1,000
อัตราประชากรไหลเข้า	คน/วินาที	1.0	6.0

3.3 การสร้างข้อมูลการอพยพเพื่อใช้ในการสร้างโมเดลทำนายผลการอพยพ

สุ่มสร้างบิลดิงบล็อกตัวอย่างที่จะนำมาใช้ในการฝึกฝนโมเดลเพื่อทำนายเวลาในการอพยพ โดยกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของบิลดิงบล็อกซึ่งมีเขตของค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกทั้งสองประเภทแสดงดังตารางที่ 4 และ 5 โดยสุ่มสร้างบิลดิงบล็อกประเภทละ 5,000 ตัวอย่าง โดย

ชุดของบิลดิงบล็อกที่สร้างขึ้นมานั้น จะถูกนำไปจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม FDS+Evac [19] เพื่อหาเวลาที่ใช้ในการอพยพแล้วนำข้อมูลที่ได้ ไปใช้เป็นข้อมูลชุดเรียนรู้ (training data) ในการสร้างโมเดลในการทำนายเวลาในการอพยพสำหรับบิลดิงบล็อกแต่ละประเภท โดยการแปลงค่าคุณลักษณะในแต่ละบิลดิงบล็อกอยู่ในรูปเวกเตอร์ของอินพุทเพื่อใช้ในการสร้างโมเดลในการทำนาย

ข้อมูลเวลาการอพยพของบิลดิงบล็อกที่ได้และค่าคุณลักษณะของแต่ละบิลดิงบล็อกจะนำมาใช้ร่วมกันเป็นข้อมูลชุดฝึกฝนเพื่อใช้สร้างโมเดลเพื่อทำนายข้อมูลในการอพยพ ด้วยวิธีการนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนโดยใช้โปรแกรม Weka [21] โดยโมเดลของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทประกอบไปด้วย

1. โมเดลทำนายเวลาที่ใช้ในการอพยพออกจากบิลดิงบล็อก
2. โมเดลที่ทำนายค่าอัตราการไหลออกของประชากร ซึ่งจะนำไปใช้เป็นอัตราการไหลเข้าของบิลดิงบล็อกที่อยู่ถัดไป

โดยเวลาที่ได้จากการทำนายการอพยพออกจากบิลดิงบล็อกนั้น จะเป็นเวลาที่ประชากรคนสุดท้ายใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากบิลดิงบล็อก ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอพยพจากอาคารในสถานการณ์หนึ่ง ๆ นั้นหาได้จากเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาที่ประชากรคนสุดท้ายออกจากอาคาร การคำนวณเวลาการอพยพออกจากอาคารจึงสนใจที่ประชากรคนสุดท้ายเป็นหลัก

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบโมเดลการทำนายทั้งสี่โมเดลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการทดสอบไขว้ข้ามสิบพับ (ten folds cross-validation) ด้วยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (root mean squared error)

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบโมเดลการทำนายด้วยวิธีการทดสอบไขว้ข้ามสิบพับ

ชนิดของบิลดิงบล็อก	ผลลัพธ์ของโมเดลทำนาย	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยลำลังสอง
ห้อง	เวลาในการอพยพ	2.57
	อัตราการไหลออกของประชากร	0.37
ทางเดินในอาคาร	เวลาในการอพยพ	4.95
	อัตราการไหลออกของประชากร	0.13

3.4 การนำโมเดลการทำนายไปใช้ทำนายผลการอพยพจากอาคาร

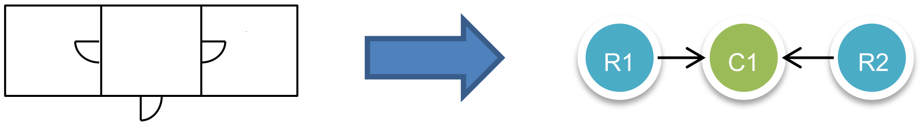
การนำโมเดลการทำนายที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนก่อนหน้ามาใช้ในการทำนายการอพยพจากอาคารทำได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 กำหนดสถานการณ์ที่ต้องการหาผลการอพยพ

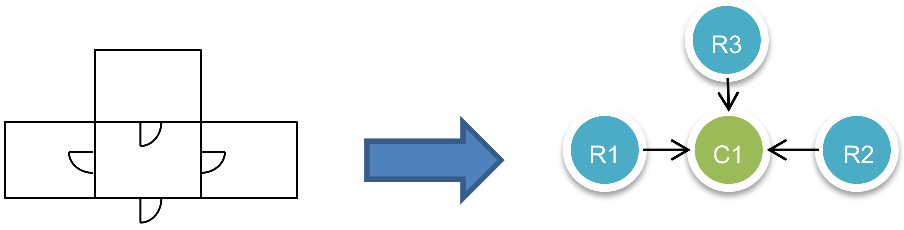
กำหนดสถานการณ์ที่ต้องการจำลอง โดยทำการเลือกแผนผังอาคารที่ต้องการใช้ในการจำลองและทำการกำหนดค่าคุณลักษณะของสถานการณ์ดังแสดงอยู่ใน 3.2.1 และ 3.2.2

3.4.2 แปลงแผนผังอาคารเป็นกราฟของบิลดิงบล็อก

นำแผนผังอาคารต้นแบบที่ต้องการทำการหาผลการอพยพมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของกราฟของบิลดิงบล็อก โดยขึ้นตามชนิดของพื้นที่ จากนั้นทำการเชื่อมต่อระหว่างบิลดิงบล็อกตามรูปแบบการเชื่อมต่อของแผนผังอาคาร จากภาพที่ 16 แสดงตัวอย่างการแปลงแผนผังอาคารเป็นกราฟของบิลดิงบล็อกกรณีเมื่อมีห้องสองห้องเชื่อมต่อกับทางเดินภายในอาคาร และภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างกรณีเมื่อมีห้องสามห้องเชื่อมต่อกับทางเดินภายในอาคาร

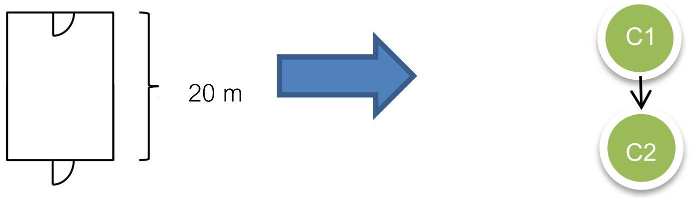


ภาพที่16 แสดงตัวอย่างการแปลงแผนผังอาคารเป็นกราฟของบิวดิงบล็อกกรณีเมื่อมีห้องสองห้องเชื่อมต่อกับทางเดินภายในอาคาร



ภาพที่17 แสดงตัวอย่างการแปลงแผนผังอาคารเป็นกราฟของบิวดิงบล็อกกรณีเมื่อมีห้องสามห้องเชื่อมต่อกับทางเดินภายในอาคาร

ในกรณีที่ทางเดินภายในอาคารมีความยาวมากกว่า 10 เมตรซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่เรากำหนดให้สำหรับบิลดิงบล็อกของทางเดินภายในอาคาร เราสามารถแปลงทางเดินภายในอาคารนี้ออกเป็นสองบิลดิงบล็อกของทางเดินภายในอาคารที่เชื่อมต่อกันได้ ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่างการแปลงทางเดินภายในอาคารที่มีความยาวมากกว่าสิบเมตร

จากรูปภาพที่ 16 17 และ 18 วงกลมที่ขึ้นต้นด้วยตัว R แสดงถึงบิลดิงบล็อกของห้องและวงกลมที่ขึ้นต้นด้วยตัว C แสดงถึงบิลดิงบล็อกของทางเดินภายในอาคาร เมื่อแผนผังอาคารได้ถูกแปลงเป็นกราฟของบิลดิงบล็อกเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการกำหนดค่าคุณลักษณะทางกายภาพของแต่ละบิลดิงบล็อกตามค่าคุณลักษณะที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2

3.4.3 **ทำนายผลการอพยพของแต่ละบิลดิงบล็อก**

เริ่มทำนายผลการอพยพของแต่ละบิลดิงบล็อกโดยเริ่มจากบิลดิงบล็อกที่มีระยะทางห่างจากประตูหนีไฟมากที่สุด โดยการนำค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกนั้นๆ ไปทำนายผลการอพยพโดยใช้โมเดลที่สร้างขึ้นมาใช้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะได้มาสองค่านั้นคือ

1. เวลาในการอพยพออกจากบิลดิงบล็อก
2. อัตราประชากรไหลออกจากบิลดิงบล็อก

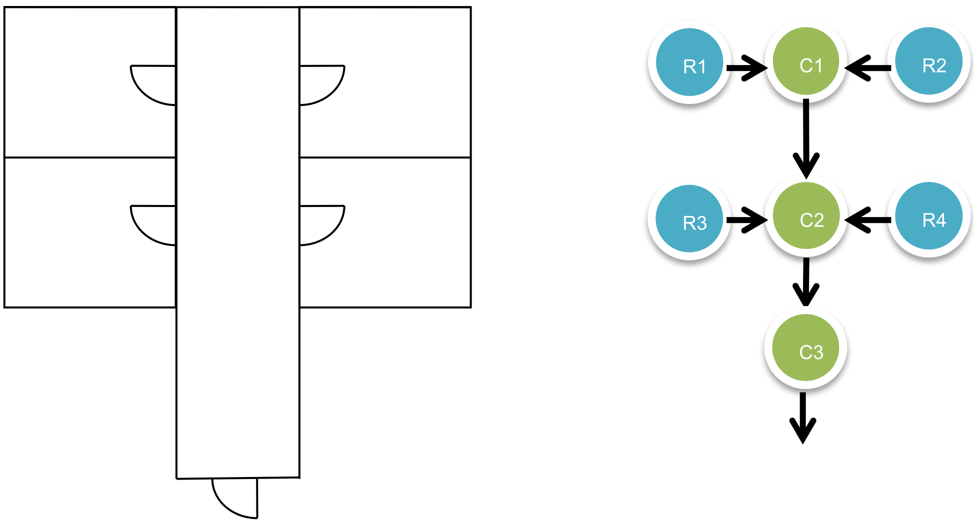
จากนั้นไล่ทำการทำนายไปยังแต่ละบิลดิงบล็อกไปจนถึงบิลดิงบล็อก สุดท้ายซึ่งเป็นบิลดิงบล็อกที่มีประตูหนีไฟ ยกตัวอย่างเช่นหากกราฟของบิลดิงบล็อกที่ต้องการทำนายหาผลการอพยพเป็นดังภาพที่ 19 จะเริ่มทำการทำนายจากบิลดิงบล็อก R1 และ R2 จากนั้นนำค่าอัตราประชากรไหลออกจากบิลดิงบล็อกที่ได้จากการทำนายของบิลดิงบล็อก R1 และ R2 มาเป็นค่าอัตราประชากรไหลเข้าของบิลดิงบล็อก C1 โดยค่าอัตราประชากรไหลเข้าของบิลดิงบล็อกใดๆ จะเท่ากับผลรวมของอัตราประชากรไหลออกของบิลดิงบล็อกก่อนหน้าที่เชื่อมต่อด้วยดังแสดงในสมการ (10)

$$\text{อัตราประชากรไหลเข้า} = \sum_{i \in \{\text{บิลดิงบล็อกก่อนหน้าที่เชื่อมต่อ}\}} \text{อัตราประชากรไหลออก}_i \qquad (10)$$

จากสมการที่ (10) อัตราประชากรไหลเข้ารวมของบิลดิงบล็อก C1 จึงคำนวณได้จากผลรวมระหว่างอัตราประชากรไหลออกจากบิลดิงบล็อก R1 และ R2

เมื่อบิลดิงบล็อก C1 ได้ค่าอัตราการไหลเข้ามาจากการคำนวณแล้ว จึงทำการทำนายผลการอพยพของบิลดิงบล็อก C1 เช่นเดียวกับการทำนายหาผลการอพยพของบิลดิงบล็อก R1 และ R2 จากนั้นทำนายผลการอพยพของบิลดิงบล็อก R3 และ R4 เพื่อนำอัตราประชากรไหลออกของทั้งสองบิลดิงบล็อก มาคำนวณหา อัตราประชากรไหลเข้าของบิลดิงบล็อก C2 โดยคำนวณจากผลรวมระหว่างอัตราประชากรไหลออกของบิลดิงบล็อก R3 R4 และ C1

ทำซ้ำเช่นนี้ไปจนถึงบิลดิงบล็อก C3 ซึ่งเป็นบิลดิงบล็อกที่มีประตูหนีไฟจึงเป็นการจบขั้นตอนการทำนายผลการอพยพของผังอาคารนี้



ภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างกราฟของบิลดิงบล็อกที่ใช้ในขั้นตอนการทำนายผลการอพยพของแต่ละบิลดิงบล็อก

3.4.4 คำนวณหาเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอพยพออกจากอาคาร

เวลาทั้งหมดที่ใช้การอพยพออกจากอาคารสามารถหาได้โดยการหาเส้นทางที่ยาวที่สุดในอาคารเมื่อวัดจากระยะห่างจากประตูหนีไฟ จากนั้นนำบิลดิงบล็อกที่อยู่ในเส้นทางมาคำนวณหาเวลาทั้งหมดโดยการคำนวณจากการหาผลรวมของเวลาในการอพยพออกจากแต่ละบิลดิงบล็อกที่อยู่ในเส้นทางที่ยาวที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$\text{เวลาในการอพยพออกจากอาคาร} = \sum_{i \in \{\text{บิลดิงบล็อกที่อยู่ในเส้นทางที่ยาวที่สุด}\}} \text{เวลาในการอพยพ}_i \qquad (11)$$

ยกตัวอย่างเช่น จากกราฟของบิลดิงบล็อกดังแสดงในภาพที่ 19 สามารถคำนวณได้จากผลรวมระหว่างเวลาในการอพยพออกจากบิลดิงบล็อกของบิลดิงบล็อก R1 C1 C2 และ C3

บทที่ 4
วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย วิธีการทดลองในงานวิจัย การออกแบบการทดลอง ขั้นตอนในการทดลอง การวิเคราะห์และทดสอบผลการทดลอง

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ประกอบไปด้วยเครื่องมือทางด้านฮาร์ดแวร์ และ ซอฟต์แวร์ ดังนี้

4.1.1 ฮาร์ดแวร์ (hardware)

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i7 3.4 GHz หน่วยความจำ 8 GB

4.1.2 ซอฟต์แวร์ (software) และไลบรารี (library)

- โปรแกรม Fire Dynamics Simulator with Evacuation (FDS+Evac) เพื่อใช้ในการจำลองการอพยพจากอาคาร
- โปรแกรม Weka เพื่อใช้ในการสร้างโมเดลในการทำนายผลการอพยพ
- โปรแกรม Visual Studio 2011 เพื่อใช้พัฒนาโปรแกรมในการทำนายผลการอพยพด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อรู้จำบิลดิงบล็อก โดยใช้ภาษา C++
- ไลบรารี Qt Framework เพื่อใช้ในการสร้างหน้าต่างตอบโต้กับผู้ใช้งานสำหรับโปรแกรมในการทำนายผลการอพยพ

4.2 สถานการณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองในการวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองในสองระดับ คือ การทดลองในระดับบิลดิงบล็อกเดียว และ การทดลองในระดับอาคารที่ประกอบขึ้นจากหลายบิลดิงบล็อก

4.2.1 การทดลองในระดับบิลดิงบล็อกเดียว

การทดลองในระดับบิลดิงบล็อกเดียวมีจุดประสงค์ในทดลองเพื่อวัดค่าความแม่นยำโมเดลในการทำนายในแต่ละประเภทของบิลดิงบล็อก เพื่อทดสอบว่าโมเดลการทำนายของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทนั้น สามารถทำนายผลการอพยพถูกต้องครอบคลุมทุกสถานการณ์ที่เป็นไปได้ภายใต้ขอบเขตของค่าคุณลักษณะที่กำหนด โดยการนำโมเดลการทำนายของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทที่สร้างขึ้นดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 มาทดสอบประสิทธิภาพ โดยทำนายค่าการอพยพของ

ข้อมูลชุดทดสอบ (test data) ได้แก่ ชุดทดสอบประเภทบิลดิงบล็อกของห้องจำนวน 11 ตัวอย่าง และชุดทดสอบประเภทประเภทบิลดิงบล็อกของทางเดินจำนวน 15 ตัวอย่างที่มีคุณลักษณะดังตารางที่ 7 และ 8 โดยในการทดลองได้ทดสอบเมื่อคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกมีความหลากหลาย และวัดผลลัพธ์เทียบกับการนำบิลดิงบล็อกไปทำการจำลองสถานการณ์ใหม่โดยใช้โปรแกรม FDS+Evac โดยจะทำการจำลองสถานการณ์ในแต่ละตัวอย่าง 10 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม FDS+Evac นั้นถึงแม้ว่าจะเป็นสถานการณ์เดียวกัน แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแต่ละครั้งอาจไม่เท่ากันเนื่องจากมีการสุ่มค่าบางค่าเช่น ตำแหน่งของตัวแทน ทำให้ส่งผลต่อผลการจำลองแต่ละครั้ง

ตารางที่ 7 แสดงคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของห้องที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่	ชื่อคุณลักษณะ				
	พื้นที่ของห้อง (ตร.ม)	ความกว้างประตู (เมตร)	ความหนาแน่นของประชากร (คน/ตร.ม.)	อัตราส่วนของเพศของประชากร (-)	อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออก (-)
1	36.0	3.0	2.0	0.5	0.5
2	16.0	3.0	2.0	0.5	0.5
3	64.0	3.0	2.0	0.5	0.5
4	36.0	1.2	2.0	0.5	0.5
5	36.0	6.0	2.0	0.5	0.5
6	36.0	3.0	0.5	0.5	0.5
7	36.0	3.0	3.5	0.5	0.5
8	36.0	3.0	2.0	0.0	0.5
9	36.0	3.0	2.0	1.0	0.5
10	36.0	3.0	2.0	0.5	0.0
11	36.0	3.0	2.0	0.5	1.0

ตารางที่ 8 แสดงคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่	ชื่อของคุณลักษณะ						
	ความยาว (เมตร)	ความกว้าง (เมตร)	ความกว้างประตูทางออก (เมตร)	อัตราส่วนของเพศของประชากร (-)	อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออก (-)	จำนวนประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อก (คน)	อัตราประชากรไหลเข้า (คน/วินาที)
1	6.0	6.0	3.0	0.5	0.5	60	2.0
2	3.0	6.0	3.0	0.5	0.5	60	2.0
3	9.0	6.0	3.0	0.5	0.5	60	2.0
4	6.0	3.0	3.0	0.5	0.5	60	2.0
5	6.0	9.0	3.0	0.5	0.5	60	2.0
6	6.0	6.0	1.2	0.5	0.5	60	2.0
7	6.0	6.0	6.0	0.5	0.5	60	2.0
8	6.0	6.0	3.0	0.0	0.5	60	2.0
9	6.0	6.0	3.0	1.0	0.5	60	2.0
10	6.0	6.0	3.0	0.5	0.0	60	2.0
11	6.0	6.0	3.0	0.5	1.0	60	2.0
12	6.0	6.0	3.0	0.5	0.5	30	2.0
13	6.0	6.0	3.0	0.5	0.5	90	2.0
14	6.0	6.0	3.0	0.5	0.5	60	0.5
15	6.0	6.0	3.0	0.5	0.5	60	3.5

4.2.2 การทดลองในระดับอาคารที่ประกอบขึ้นจากหลายบิลดิงบล็อก

การทดลองในระดับอาคารโดยสร้างแผนผังของอาคารซึ่งประกอบขึ้นจากบิลดิงบล็อกหลาย ๆ บิลดิงบล็อกเชื่อมต่อกัน โดยได้แบ่งการทดลองเป็น สองกรณีคือ

กรณีที่ 1: การทดลองโดยจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่ แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

การทดลองโดยกำหนดให้จำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง มีจุดประสงค์ในการทดลองเพื่อทดสอบว่าค่าคุณลักษณะของประชากรส่งผลโดยตรงต่อเวลาที่ใช้ในการอพยพและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเพื่อหาผลลัพธ์ของการจำลองการอพยพ รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพความถูกต้องในการทำนายผลการอพยพด้วยวิธีการทำนายบิลดิงบล็อกที่และครอบคลุมทุกสถานการณ์ที่เป็นไปได้ภายใต้ขอบเขตของค่าคุณลักษณะที่กำหนด

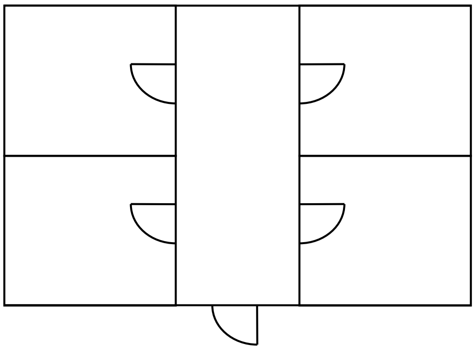
ขั้นตอนในการทดลองกรณีนี้ เริ่มจากกำหนดอาคารที่นำมาใช้ทำการทดลองเป็นอาคารที่มีห้องจำนวน 4 ห้องและมีทางเดินภายในตรงกลางซึ่งพาไปสู่ทางหนีไฟ จากนั้นนำผังอาคารมาแปลงเป็นกราฟของบิลดิงบล็อกดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งแต่ละบิลดิงบล็อกจะมีประเภทและค่าคุณลักษณะทางกายภาพตามแผนผังของอาคารที่เป็นต้นแบบดังแสดงในตารางที่ 9 โดยสร้างสถานการณ์จำลองขึ้นมา 10 ตัวอย่าง โดยค่าคุณลักษณะของประชากรในบิลดิงบล็อกจะถูกปรับเปลี่ยนไปในแต่ละตัวอย่างดังแสดงอยู่ในตารางที่ 10 โดยมีตัวอย่างพื้นฐานคือ ความหนาแน่นของประชากรแต่ละห้องเป็น 0.2 คนต่อตารางเมตร. หรือหมายถึง 5 คน ต่อห้อง มีอัตราส่วนของเพศของประชากรในแต่ละห้องเป็น 0.5 หรือหมายถึงแต่ละห้องจะมีประชากรครึ่งหนึ่งเป็นชายอีกครึ่งหนึ่งเป็นหญิง และอัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกในแต่ละห้องเป็น 0.5 หรือหมายถึงประชากรครึ่งหนึ่งรู้ทางออก อีกครึ่งหนึ่งไม่รู้ทางออก จากนั้นนำโมเดลในการทำนายค่าการอพยพที่สร้างขึ้นจากบิลดิงบล็อกมาทำนายเวลาในการอพยพออกจากอาคาร เพื่อวัดผลโดยเปรียบเทียบผลการทำนายเวลาในการอพยพโดยใช้โมเดลที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการที่นำเสนอ เทียบกับเวลาที่ได้จากการจำลองการอพยพออกจากอาคารด้วยโปรแกรม FDS+Evac รวมถึงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของทั้งสองวิธี

ตารางที่ 9 แสดงค่าคุณลักษณะกายภาพของแผนผังในอาคาร

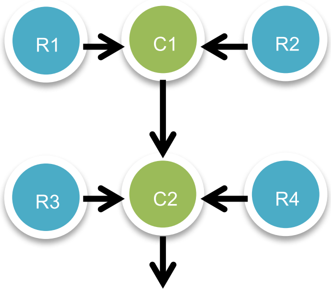
ชื่อของคุณลักษณะ	ค่า	หน่วย
พื้นที่ของห้อง	25	ตร.ม.
ขนาดประตูของห้อง	1.2	เมตร
ความยาวของทางเดิน	10	เมตร
ขนาดความกว้างของทางเดิน	3	เมตร
ความกว้างของประตูหนีไฟ	3	เมตร

ตารางที่ 10 แสดงค่าคุณลักษณะของบิลดิงบล็อกที่แตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์

ตัวอย่างที่	ชื่อของคุณลักษณะ		
	ความหนาแน่นของประชากรในแต่ละห้อง (คน/ตร.ม.)	อัตราส่วนของเพศของประชากรในแต่ละห้อง (-)	อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกในแต่ละห้อง (-)
1	0.2	0.5	0.5
2	0.1	0.5	0.5
3	0.3	0.5	0.5
4	0.2	0.0	0.5
5	0.2	1.0	0.5
6	0.2	0.5	0.0
7	0.2	0.5	1.0



(ก)



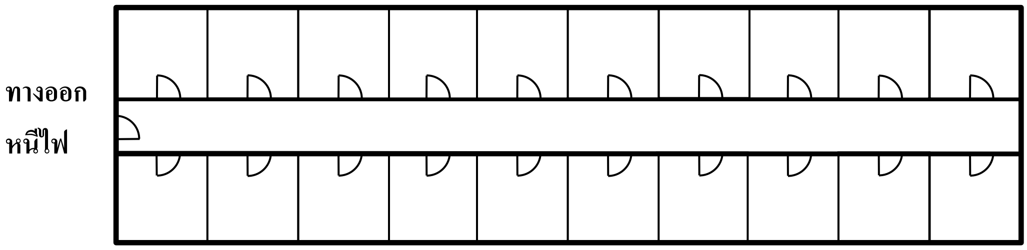
(ข)

ภาพที่ 20 (ก) แสดงภาพแผนผังอาคารที่ใช้ในการทดลอง (ข) แสดงภาพกราฟของบิลดิงบล็อกที่แปลงจากแผนผังอาคาร

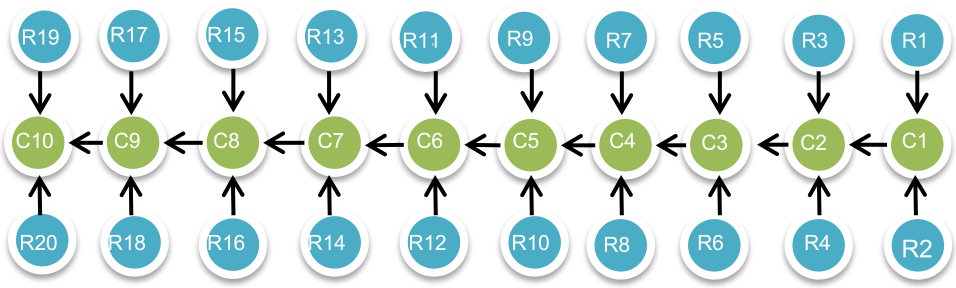
กรณีที่ 2: การทดลองโดยที่ปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของทางออกหนีไฟ

การทดลองโดยปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของทางออกหนีไฟ มีจุดประสงค์ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพวิธีการทำนายผลการอพยพด้วยบิลดิงบล็อกที่นำเสนอว่าสามารถทำนายผลการอพยพได้ถูกต้องและครอบคลุมในกรณีที่จำนวนประชากรและขนาดของประตูหนีไฟมีความหลากหลาย รวมถึงทดสอบว่าจำนวนประชากรและขนาดของประตูหนีไปผลต่อเวลาที่ใช้ในการอพยพและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเพื่อหาผลลัพธ์ในการจำลองการอพยพ โดยคงค่าคุณลักษณะของประชากรไว้เป็นค่าคงที่ที่มีค่าเป็นกลางซึ่งมักจะเป็นกรณีที่ผู้ใช้งานต้องการนำไปใช้จริง ซึ่งแผนผังอาคารที่นำมาใช้ในการทดลองกรณีนี้นั้นเป็นแผนผังของอาคารทั่วไปที่นิยมใช้ในอาคารที่อยู่อาศัยเช่น หอพัก และ คอนโดมิเนียม

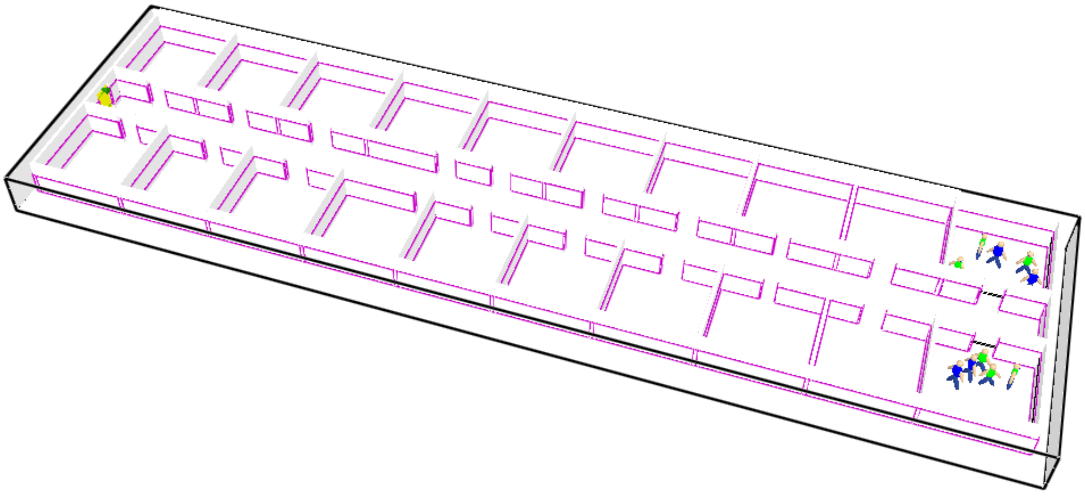
ขั้นตอนในการทดลองกรณีนี้เริ่มจากกำหนดแผนผังอาคารที่นำมาใช้ทำการทดลองในกรณีนี้เป็นอาคารที่มีห้องจำนวน 20 ห้องและมีทางเดินภายในตรงกลางซึ่งพาไปสู่ทางหนีไฟ จากนั้นจะทำการนำผังอาคารมาแปลงเป็นกราฟของบิลดิงบล็อกดังแสดงในภาพที่ 21 และ 22 ซึ่งค่าคุณลักษณะทางกายภาพของแผนผังของอาคารที่เป็นต้นแบบดังแสดงในตารางที่ 11 จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่ออกเป็น 4 กรณีคือ มีประชากรอยู่ใน 2 ห้อง 8 ห้อง 16 ห้อง และ 20 ห้อง ดังแสดงในภาพที่ 23 24 25 และ 26 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละกรณี จะทำการปรับเปลี่ยนค่าขนาดของประตูหนีไฟเป็นสามสถานการณ์ คือ 1.2 2.0 และ 3 เมตร ซึ่งค่าคุณลักษณะของแต่ละสถานการณ์แสดงอยู่ในตารางที่ 12 แล้วโมเดลในการทำนายค่าการอพยพที่สร้างขึ้นจากบิลดิงบล็อกมาทำนายเวลาในการอพยพออกจากอาคาร



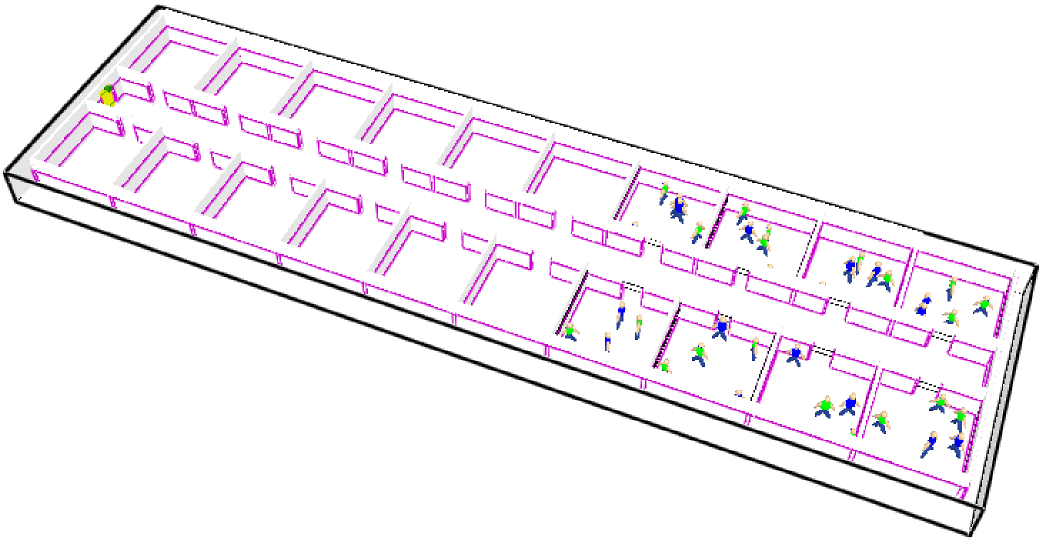
ภาพที่ 21 แสดงแผนผังอาคารที่ใช้ในการทดลองกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง



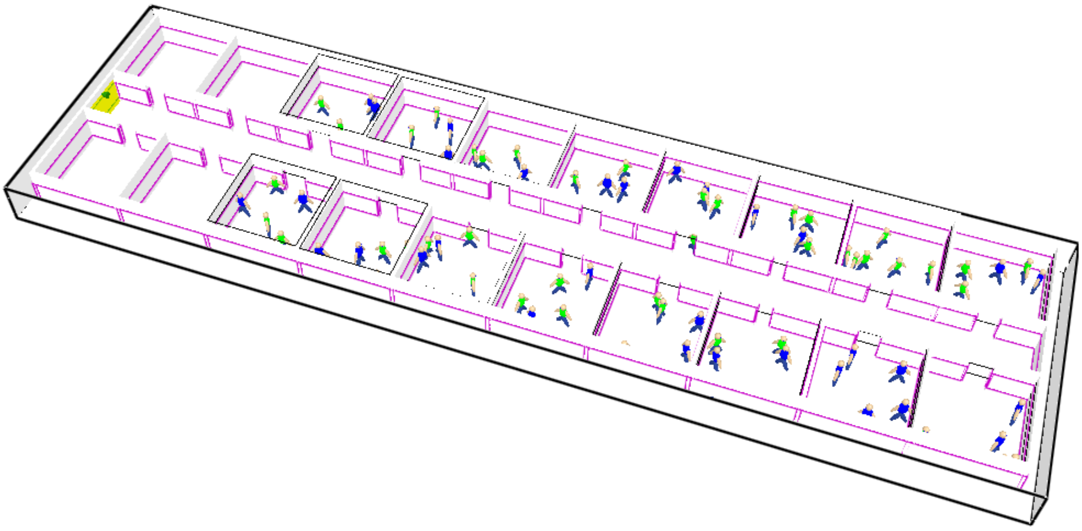
ภาพที่ 22 แสดงกราฟของบิลดิงบล็อกที่แปลงมาจากแผนผังของอาคารต้นแบบ



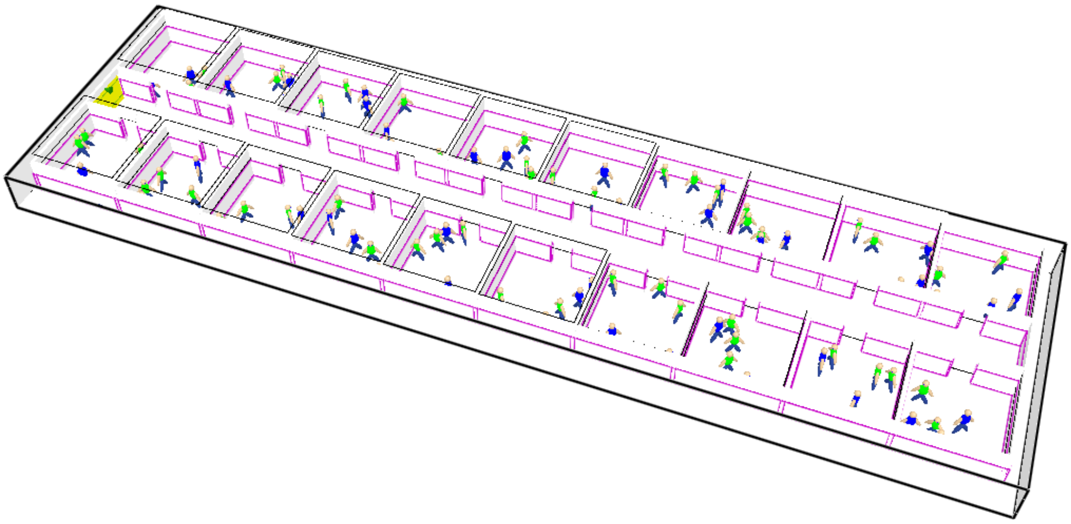
ภาพที่ 23 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 2 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง



ภาพที่ 24 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 8 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง



ภาพที่ 25 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 16 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง



ภาพที่ 26 แสดงการจำลองจากอาคารที่มีประชากรอยู่ใน 20 ห้อง จากห้องทั้งหมด 20 ห้อง

ตารางที่ 11 แสดงค่าคุณลักษณะทางกายภาพของแผนผังของอาคารที่มีห้องจำนวน 20 ห้อง

ชื่อของคุณลักษณะ	หน่วย	ค่า
ขนาดของประตูห้อง	เมตร	1.2
ความกว้างของห้อง	เมตร	5
ความยาวของห้อง	เมตร	5
ความกว้างทางเดินภายในอาคาร	เมตร	3

ตารางที่ 12 แสดงค่าคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้องและขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่างที่	ชื่อของคุณลักษณะ				
	จำนวนห้องที่มีประชากร (ห้อง)	ความหนาแน่นของประชากรในแต่ละห้อง (คน/ตร.ม.)	อัตราส่วนของเพศของประชากรในแต่ละห้อง (-)	อัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกในแต่ละห้อง (-)	ขนาดของทางออกหนีไฟ (เมตร)
1	2	0.2	0.5	0.5	1.2
2	2	0.2	0.5	0.5	2.0
3	2	0.2	0.5	0.5	3.0
4	8	0.2	0.5	0.5	1.2
5	8	0.2	0.5	0.5	2.0
6	8	0.2	0.5	0.5	3.0
7	16	0.2	0.5	0.5	1.2
8	16	0.2	0.5	0.5	2.0
9	16	0.2	0.5	0.5	3.0
10	20	0.2	0.5	0.5	1.2
11	20	0.2	0.5	0.5	2.0
12	20	0.2	0.5	0.5	3.0

4.3 วิธีการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบ

เปรียบเทียบผลการอพยพระหว่างวิธีการจำลองการอพยพโดยใช้โปรแกรม FDS+Evac กับวิธีการทำนายผลการอพยพด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อรู้จำบิลดิงบล็อก โดยใช้แผนผังอาคารและกำหนดค่าคุณสมบัติของแต่ละสถานการณ์จำลองดังแสดงในหัวข้อ 4.2 จากนั้นนำสถานการณ์จำลองที่สร้างขึ้นมาหาผลการอพยพโดยใช้โปรแกรม FDS+Evac จำลองการอพยพโดยทำการจำลองซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการอพยพและเวลาในการประมวลผล แล้วนำค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีการทำนายผลการอพยพด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อรู้จำบิลดิงบล็อกด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

4.4 ผลการทดลอง

ในที่นี้แบ่งผลการทดลองออกเป็นสองระดับตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 4.2 คือ ผลการทดลองในระดับบิลดิงบล็อกเดียว และในระดับอาคารที่ประกอบขึ้นจากหลายบิลดิงบล็อก

4.4.1 ผลการทดลองในระดับบิลดิงบล็อกเดียว

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลลัพธ์การทำนายเวลาในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทระหว่างวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac กับวิธีการทำนายเวลาที่ใช้ในการอพยพที่สร้างจากบิลดิงบล็อก โดยทำกาจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม FDS+Evac ซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยของเวลาในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยค่าเฉลี่ยผลลัพธ์เวลาที่ใช้ในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาในการประมวลเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง แสดงอยู่ในตารางที่ 13 และ 14 และผลการทดลองโดยละเอียดการทดลองแสดงอยู่ในภาคผนวก ก ผลการทดลองโดยละเอียดของการเปรียบเทียบการจำลองการอพยพในระดับบิลดิงบล็อกเดียว

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในส่วนของเวลาที่ใช้ในการอพยพในกรณีบิลดิงบล็อกของห้อง จากตารางที่ 13 ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะในตัวอย่างต่างๆ ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอพยพแตกต่างกันออกไป โดยในตัวอย่างที่ 2 1 และ 3 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าพื้นที่ของห้องให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 16 36 และ 64 ตารางเมตรตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพมากขึ้นเมื่อพื้นที่ของห้องมีขนาดมากขึ้น คือ 31.49 37.49 และ 47.85 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 30.81 38.00 และ 48.48 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 4 1 และ 5 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของประตูให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 1.2 3.0 และ 3.0 เมตร ตามลำดับพบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพน้อยลงเมื่อค่าความกว้างของประตูมีขนาดมากขึ้น คือ 61.35 37.49 และ 33.36 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 64.36 38.00 และ 32.42 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 6 1 และ 7 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของประชากรให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.5 2.0 และ 3.5 คนต่อตารางเมตรตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการ

อพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพสูงขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นของประชากรมีค่ามากขึ้น คือ 31.48 37.49 และ 46.59 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 30.31 38.00 และ 43.48 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 8 1 และ 9 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของเพศของประชากรให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพน้อยลงเมื่อค่าอัตราส่วนของเพศของประชากรมีค่ามากขึ้นหรือหมายถึงมีอัตราส่วนของประชากรชายต่อประชากรทั้งหมดมากขึ้น คือ 38.29 37.49 และ 36.43 วินาที ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 38.47 38.00 และ 37.60 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 10 1 และ 11 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มของเวลาในการอพยพไม่ชัดเจนเมื่อค่าอัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกมีค่ามากขึ้น คือ 36.86 37.49 และ 36.50 วินาทีตามลำดับ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอพบว่าเมื่ออัตราการตระหนักรู้ทางออกเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอพยพจากการทำนายมีแนวโน้มที่จะลดลง คือ 38.31 38.00 และ 37.68 วินาทีตามลำดับ

กรณีของเวลาที่ใช้ในการอพยพในกรณีบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร จากตารางที่ 14 ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะในตัวอย่างต่างๆ ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอพยพแตกต่างกันออกไป โดยในตัวอย่างที่ 2 1 และ 3 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความยาวของทางเดินในอาคารให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 3.0 6.0 และ 9.0 เมตรตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac พบว่ามีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพมากขึ้นเมื่อความยาวของทางเดินในอาคารมากขึ้น คือ 3.79 6.16 และ 8.64 วินาทีตามลำดับ โดยที่เวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 3.40 6.05 และ 8.45 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 4 1 และ 5 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของทางเดินในอาคารให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 3.0 6.0 และ 9.0 เมตรตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac พบว่าแนวโน้มเวลาในการอพยพไม่

ชัดเจนเมื่อความยาวของทางเดินในอาคารมากขึ้น คือ 6.20 6.16 และ 6.31 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนเช่นเดียวกัน คือ 5.88 6.05 และ 4.97 วินาทีตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากค่าความกว้างของทางเดินในอาคารจะส่งผลในบางกรณีเช่นจำนวนประชากรหนาแน่นเป็นต้น

ในตัวอย่างที่ 6 1 และ 7 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างประตูทางออกของทางเดินในอาคารให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 1.2 3.0 และ 6.0 เมตรตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพน้อยลงเมื่อความกว้างประตูทางออกของทางเดินในอาคารมากขึ้น คือ 10.47 6.16 และ 5.99 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 24.33 6.05 และ 5.66 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 8 1 และ 9 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของเพศของประชากรให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพน้อยลงเมื่ออัตราส่วนของเพศของประชากรมากขึ้น คือ 6.46 6.16 และ 5.62 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 6.52 6.05 และ 5.57 วินาทีตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกรณีบิลดิงบล็อกของห้องที่เมื่อประชากรชายมีมากจำทำให้เวลาในการอพยพน้อยลง

ในตัวอย่างที่ 10 1 และ 11 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนการตระหนักรู้ทางออกให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มเวลาในการอพยพไม่ชัดเจนเมื่ออัตราส่วนการตระหนักรู้ทางออกมากขึ้น คือ 6.08 6.16 และ 6.17 วินาทีตามลำดับ แต่เวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอพบว่าแนวโน้มเวลาในการอพยพมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการตระหนักรู้ทางออกมากขึ้น คือ 6.26 6.05 และ 5.83 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 12 1 และ 13 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าจำนวนประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อกให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพลดลงจำนวนประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อกมากขึ้น คือ 6.20 6.16 และ 6.10 วินาทีตามลำดับ แต่เวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอพบว่าแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าจำนวนประชากรที่เข้ามาสู่บิลดิงบล็อกมากขึ้น คือ 6.02 6.05 และ 6.08 วินาที

ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในตัวอย่างที่ 12 1 และ13 ที่ใช้ในการทดลองเป็นกรณีประชากรสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้โดยไม่มีการประจุกตัวที่ประตูทางออก ทำให้ถึงแม้จำนวนประชากรทั้งหมดจะมีมากขึ้นแต่เวลาเฉลี่ยที่ประชากรคนสุดท้ายใช้ในการออกจากบิลดิงบล็อกไม่มากขึ้นตาม

ในตัวอย่างที่ 14 1 และ 15 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราประชากรไหลเข้าให้แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างคือ 0.5 2.0 และ 3.5 คนต่อวินาที ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพมากขึ้นเมื่ออัตราประชากรไหลเข้ามากขึ้น คือ 5.87 6.16 และ 6.34 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ 5.15 6.05 และ 6.86 วินาทีตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลเข้ามากขึ้นทำให้มีแนวโน้มที่จะมีประชากรกะจุกตัวที่ทางออกสูงขึ้น ทำให้เวลาที่ประชากรใช้ในการรอที่ทางออกสูงขึ้นตาม

เมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยเวลาในการอพยพจากตัวอย่างทั้งหมดในแต่ละชนิดของบิลดิงบล็อก พบว่าในกรณีของบิลดิงบล็อกของห้องค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเวลาในการอพยพอยู่ที่ -0.28% หรือเฉลี่ยอยู่ที่ -0.20 วินาที ซึ่งมีความแตกต่างน้อยมาก และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลมีค่าลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 95.48% หรือลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 7.72 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลลดลงเป็นอย่างมาก เช่นเดียวกันกับในกรณีของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารที่มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเวลาในการอพยพอยู่ที่ -3.31% หรือเฉลี่ยอยู่ที่ -0.52 วินาที ซึ่งมีความแตกต่างน้อยมากเช่นกัน และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลมีค่าลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ -89.17% หรือลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 5.39 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลลดลงเป็นอย่างมากเช่นเดียวกัน

ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล จากการทดลองพบว่าในกรณีที่ทำนายผลการอพยพด้วยบิลดิงบล็อกนั้นจะใช้เวลาประมวลผลเป็นค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการทำนายใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนในการทำนายจึงใช้เวลาในการคำนวณเท่าเดิมในกรณีที่ใช้โมเดลเดิม แต่ในส่วนของการจำลองการอพยพนั้นเวลาในการประมวลผลจะแปรผันตามปริมาณข้อมูลที่ต้องคำนวณและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลซึ่งในกรณีบิลดิงบล็อกของห้องนั้นตัวอย่างที่ 3 ของบิลดิงบล็อกของห้องใช้เวลาในการประมวลผลมากสุดเนื่องจากมีตัวแทนที่ต้องทำการจำลองในตัวอย่างนี้มากที่สุด คือ 204 คน เนื่องจากห้องมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นของประชากรอยู่ที่ 0.5 คนต่อตารางเมตร ทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลที่มากตามกัน และกรณีบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารนั้น ตัวอย่างที่ 14 ของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารใช้เวลาในการประมวลผลมากสุดเนื่องจากอัตราไหลประชากรไหลเข้ามีค่าต่ำสุดคือ 0.5 คนต่อวินาที และมี

ประชากรเท่ากับ 60 คน ทำให้ต้องใช้เวลานานในการจำลองจนประชากรคนสุดท้ายเคลื่อนที่ออกจากบิลดิงบล็อกนี้

ตารางที่ 13 แสดงผลการทดลองในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	**เวลาเฉลี่ยในการอพยพ (วินาที)**				**เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)**			
	จำลองด้วย FDS	**ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก**	**ความแตกต่าง**	**%ความแตกต่าง**	**จำลองด้วย FDS**	**ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก**	**ความแตกต่าง**	**%ความแตกต่าง**
1	37.49	38.00	-0.51	-1.35	7.27	0.31	6.96	95.74
2	31.49	30.81	0.68	2.16	3.33	0.31	3.02	90.69
3	47.85	48.48	-0.63	-1.32	14.37	0.31	14.06	97.84
4	61.35	64.36	-3.01	-4.91	11.39	0.31	11.08	97.28
5	33.36	32.42	0.94	2.81	6.30	0.31	5.99	95.08
6	31.48	30.31	1.17	3.71	4.65	0.31	4.34	93.33
7	46.59	43.48	3.11	6.67	11.99	0.31	11.68	97.41
8	38.29	38.47	-0.18	-0.47	7.49	0.31	7.18	95.86
9	36.43	37.60	-1.17	-3.21	7.31	0.31	7.00	95.76
10	36.86	38.31	-1.45	-3.93	7.13	0.31	6.82	95.65
11	36.50	37.68	-1.19	-3.25	7.09	0.31	6.78	95.63
ค่าเฉลี่ย	39.79	39.99	-0.20	-0.28	8.03	0.31	7.72	95.48

ตารางที่ 14 แสดงผลการทดลองในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคาร

ตัวอย่าง	เวลาเฉลี่ยในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	6.16	6.05	0.11	1.71	5.27	0.56	4.71	89.37
2	3.79	3.40	0.39	10.34	3.18	0.56	2.62	82.39
3	8.64	8.45	0.19	2.23	7.63	0.56	7.07	92.66
4	6.20	5.88	0.32	5.08	3.52	0.56	2.96	84.09
5	6.31	4.97	1.34	21.22	7.53	0.56	6.97	92.56
6	10.47	21.33	-10.86	-103.76	6.67	0.56	6.11	91.60
7	5.99	5.66	0.32	5.43	5.25	0.56	4.69	89.33
8	6.46	6.52	-0.06	-0.96	5.32	0.56	4.76	89.47
9	5.62	5.57	0.05	0.82	5.33	0.56	4.77	89.49
10	6.08	6.26	-0.19	-3.05	5.26	0.56	4.70	89.35
11	6.07	5.83	0.24	3.94	5.20	0.56	4.64	89.23
12	6.20	6.02	0.18	2.87	3.46	0.56	2.90	83.82
13	6.10	6.08	0.02	0.38	7.26	0.56	6.70	92.29
14	5.87	5.15	0.72	12.31	14.43	0.56	13.87	96.12
15	6.34	6.86	-0.52	-8.15	3.95	0.56	3.39	85.82
ค่าเฉลี่ย	6.42	6.94	-0.52	-3.31	5.95	0.56	5.39	89.17

4.4.2 ผลการทดลองในระดับอาคารที่ประกอบขึ้นจากหลายบิลดิงบล็อก

ผลการทดลองแบ่งออกเป็นสองกรณี ดังนี้

ผลการทดลองกรณีที่ 1: จำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่ แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลลัพธ์การทำนายเวลาในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทระหว่างวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac กับวิธีการทำนายเวลาที่ใช้ในการอพยพที่สร้างจากบิลดิงบล็อกใน 7 ตัวอย่าง เมื่อมีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง โดยทำการจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม FDS+Evac ซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยของเวลาในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยค่าเฉลี่ยผลลัพธ์เวลาที่ใช้ในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาในการประมวลเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง แสดงอยู่ในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 แสดงผลการทดลองในกรณีที่จำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

ตัวอย่าง	เวลาเฉลี่ยในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	38.16	39.60	-1.44	-3.77	81.01	7.46	73.55	90.79
2	36.81	37.84	-1.03	-2.80	77.94	7.46	70.48	90.43
3	40.49	40.91	-0.42	-1.04	86.06	7.46	78.60	91.33
4	38.22	40.40	-2.18	-5.70	81.10	7.46	73.64	90.80
5	37.58	38.40	-0.82	-2.18	79.78	7.46	72.32	90.65
6	37.07	39.35	-2.28	-6.15	80.84	7.46	73.38	90.77
7	40.34	39.73	0.61	1.51	89.27	7.46	81.81	91.64
ค่าเฉลี่ย	38.38	39.46	-1.08	-2.88	82.29	7.46	74.83	90.92

จากตารางผลการทดลองพบว่าการปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะของประชากรส่งผลต่อเวลาในการอพยพ โดยในตัวอย่างที่ 2 1 และ 3 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของประชากรในแต่ละห้องเป็น 0.1 0.2 และ 0.3 คนต่อตารางเมตร หรือหมายถึงมีจำนวนคน 3 5 และ 8 คนตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพมากขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นของประชากรในแต่ละห้องมากขึ้น คือ 36.81 38.16 และ 40.49 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ 37.84 39.60 และ 40.91 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 4 1 และ 5 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของเพศของประชากรในแต่ละห้องเป็น 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพน้อยลงเมื่ออัตราส่วนของเพศของประชากรในแต่ละห้องมากขึ้น คือ 38.22 38.16 และ 37.58 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ 39.35 39.60 และ 39.73 วินาทีตามลำดับ

ในตัวอย่างที่ 6 1 และ 7 ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกในแต่ละห้องเป็น 0.0 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพเฉลี่ยที่ได้จากการทำการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac มีแนวโน้มจะใช้เวลาในการอพยพมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการตระหนักรู้ทางออกในแต่ละห้องมากขึ้น คือ 37.07 38.16 และ 40.34 วินาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ 40.40 39.60 และ 38.40 วินาทีตามลำดับ

เมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยเวลาในการอพยพของทั้ง 7 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเวลาในการอพยพอยู่ที่ -2.88% หรือเฉลี่ยอยู่ที่ -1.08 วินาที ซึ่งมีความแตกต่างน้อยมาก ทำให้พิสูจน์ได้ว่าในกรณีที่นำบิลดิงบล็อกมาประกอบกันเพื่อทำนายหาผลการอพยพจากอาคารไม่ได้ทำให้ผลการอพยพมีค่าคลาดเคลื่อนไปมากกว่าในระดับบิลดิงบล็อกเดียว เมื่อประชากรในอาคารมีอยู่ไม่มาก ในส่วนเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนั้นมีค่าลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 90.92% หรือลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 74.83 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลลดลงเป็นอย่างมาก โดยที่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลเมื่อใช้วิธีการทำนายผลการอพยพที่นำเสนอไม่ทำให้เวลาเพิ่มขึ้นเมื่อมี

การปรับเปลี่ยนค่าคุณลักษณะของประชากรในสถานการณ์ที่มีจำนวนบิลดิงบล็อกที่ต้องทำนายเท่ากัน ซึ่งในกรณีนี้คือ 6 บิลดิงบล็อก

ผลการทดลองกรณีที่ 2: ปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลลัพธ์การทำนายเวลาในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของบิลดิงบล็อกแต่ละประเภทระหว่างวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac กับวิธีการทำนายเวลาที่ใช้ในการอพยพที่สร้างจากบิลดิงบล็อกใน 12 ตัวอย่าง เมื่อมีจำนวนห้องที่มีประชากรและขนาดของประตูทางออกหนีไฟแตกต่างกัน โดยทำการจำลองการอพยพด้วยโปรแกรม FDS+Evac ซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยของเวลาในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยค่าเฉลี่ยผลลัพธ์เวลาที่ใช้ในการอพยพและค่าเฉลี่ยเวลาในการประมวลเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง แสดงอยู่ในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงผลการทดลองในกรณีที่ปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	เวลาเฉลี่ยในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	77.72	73.17	4.55	5.85	191.96	18.78	173.18	90.22
2	76.31	74.32	1.99	2.61	190.68	18.78	171.90	90.15
3	75.86	74.28	1.58	2.08	189.31	18.78	170.53	90.08
4	82.16	95.10	-12.94	-15.75	204.41	24.88	179.53	87.83
5	77.10	83.00	-5.90	-7.65	190.95	24.88	166.07	86.97
6	77.57	83.20	-5.63	-7.26	191.03	24.88	166.15	86.98
7	90.70	96.12	-5.42	-5.98	228.56	37.54	191.02	83.58
8	75.76	92.45	-16.69	-22.03	192.13	37.54	154.59	80.46
9	76.12	88.03	-11.91	-15.65	192.81	37.54	155.27	80.53
10	93.31	90.46	2.85	3.05	236.32	38.13	198.19	83.87
11	77.22	90.79	-13.57	-17.57	196.11	38.13	157.98	80.56
12	76.44	92.93	-16.49	-21.57	194.15	38.13	156.02	80.36
ค่าเฉลี่ย	79.69	86.15	-6.46	-8.32	199.87	29.83	170.04	85.13

จากตารางผลการทดลองพบว่าค่าขนาดของทางอออกหนีไฟมีผลต่อการเวลาที่ใช้ในการอพยพในระดับอาคารเมื่อทำการลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac โดยที่เวลาในการอพยพจะน้อยลงเมื่อขนาดของทางออกหนีไฟมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่จำนวนห้องทีมีประชากรเท่ากัน เช่นตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 ซึ่งมีจำนวนห้องทีมีประชากรกรอยู่ทั้งหมด 8 ห้อง ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนขนาดของทางออกหนีไฟเป็น 1.2 2.0 และ 3.0 เมตรตามลำดับ พบว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac อยู่ที่ 77.72 76.31 และ 75.86 วินาที แต่ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac ในกรณีที่จำนวนห้องที่มีประชากรเป็น 8 และ 16 ห้อง พบว่าแนวโน้มเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนาย มีค่าลดลงเมื่อขนาดของทางออกหนีไฟมีค่ามากขึ้น แต่ในกรณีที่จำนวนห้องที่มีประชากรเป็น 2 ห้อง กลับพบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายในตัวอย่างที่มีขนาดของทางออกหนีไฟเล็กที่สุด คือ 1.2 เมตรกลับได้ผลการทำนายเวลาที่ใช้ในการอพยพน้อยที่สุด และในกรณีที่จำนวนห้องที่มีประชากรเป็น 20 ห้อง กลับพบว่าเวลาที่ใช้ในการอพยพที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อขนาดของประตูห้องมากขึ้น

และเมื่อทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเวลาในการอพยพของทั้ง 12 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเวลาในการอพยพอยู่ที่ -8.32% หรือเฉลี่ยอยู่ที่ -6.46 วินาที ซึ่งมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อดูในแต่ละตัวอย่างจะพบว่าในบางตัวอย่างมีค่าความแตกต่างอยู่สูงมากเช่นกรณีที่ 8 ที่มีค่าความแตกต่างอยู่ -16.69 วินาทีหรือ -22.03% ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าแตกต่างมีแนวโน้มจะสูงขึ้นเมื่อจำนวนห้องที่มีประชากรมีค่ามากขึ้น

ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลพบว่าในกรณีที่มีจำนวนห้องที่มีประชากรเท่ากันเวลาที่ใช้ในการประมวลผลด้วยวิธีการทำนายที่นำเสนอไม่ได้ทำให้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นแต่จะแปรตามจำนวนห้องที่มีประชากร เนื่องจากเมื่อมีจำนวนห้องที่มีประชากรมากขึ้น จำนวนบิลดิงบล็อกที่ต้องทำนายก็มีมากขึ้นตาม แต่ทั้งนี้วิธีการทำนายที่นำเสนอก็ยังคงใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าวิธีการจำลองการอพยพใหม่ โดยที่ในตัวอย่างที่ลดเวลาได้มากที่สุดคือตัวอย่างที่ 1 ซึ่งลดได้ถึง 90.22% หรือ 173.18 วินาที หรือใช้เวลาน้อยลงกว่าเดิมถึง 10 เท่า

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่าการทำนายผลการอพยพในระดับบิลดิงบล็อกเดียว วิธีการที่นำเสนอสามารถทำนายผลการอพยพเทียบกับข้อมูลชุดเรียนรู้ที่ได้จากโปรแกรม FDS+Evac ได้ค่อนข้างแม่นยำ ซึ่งในกรณีของบิลดิงบล็อกของห้องมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างของเวลาในการอพยพอยู่ที่ -0.20 วินาที หรือ -0.28% และกรณีของบิลดิงบล็อกของทางเดินในอาคารมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างอยู่ที่ -0.52 วินาที หรือ -3.31%

เมื่อทำการทดสอบทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกัน (Paired T-test) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นการทดสอบค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยทำการทดสอบแบบสองทาง (two-tail) บนสมมติฐานหลักที่ว่าผลลัพธ์เวลาที่ได้จากการจำลองด้วย FDS และการทำนายผลด้วยวิธีที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน ดังสมการที่ (12) ที่ความเชื่อมั่น 95%

$$
\begin{aligned}
H0: \mu 1 &= \mu 2 \\
H1: \mu 1 &\neq \mu 2
\end{aligned}
\tag{12}
$$

ได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์การทดลอง ดังนี้

ในระดับบิลดิงบล็อกเดียวของห้อง ผลลัพธ์การวิเคราะห์ดังตารางที่ 17 พบว่าค่า P(T<=t) ของการทดสอบแบบสองทางเท่ากับ 0.69 ซึ่งแสดงว่ารับสมมติฐานหลักคือผลการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอไม่แตกต่างกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P > 0.05)

ในระดับบิลดิงบล็อกเดียวของทางเดิน ผลลัพธ์การวิเคราะห์ดังตารางที่ 18 พบว่าค่า P(T<=t) ของการทดสอบแบบสองทางเท่ากับ 0.5 ซึ่งแสดงว่ารับสมมติฐานหลักคือผลการทำนายด้วยวิธีการที่นำเสนอไม่แตกต่างกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+Evac อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P > 0.05)

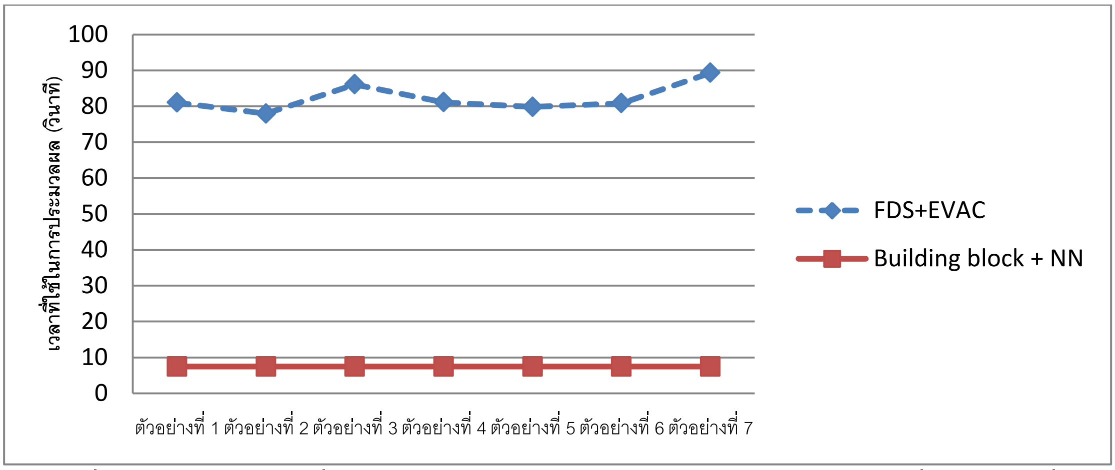
ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์การทดสอบทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกันของการทดลองระดับบิลดิงบล็อกเดียวของห้อง

	การจำลองด้วย FDS	*การทำนายด้วยบิลดิงบล็อก*
Mean	39.79	39.99
Variance	79.34	93.36
Observations	11	11
Pearson Correlation	0.987890354	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	10	
t Stat	-0.415844886	
P(T<=t) one-tail	0.343153346	
t Critical one-tail	1.812461123	
P(T<=t) two-tail	0.686306691	
t Critical two-tail	2.228138852	

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์การทดสอบทีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกันของการทดลองระดับบิลดิงบล็อกเดียวของทางเดิน

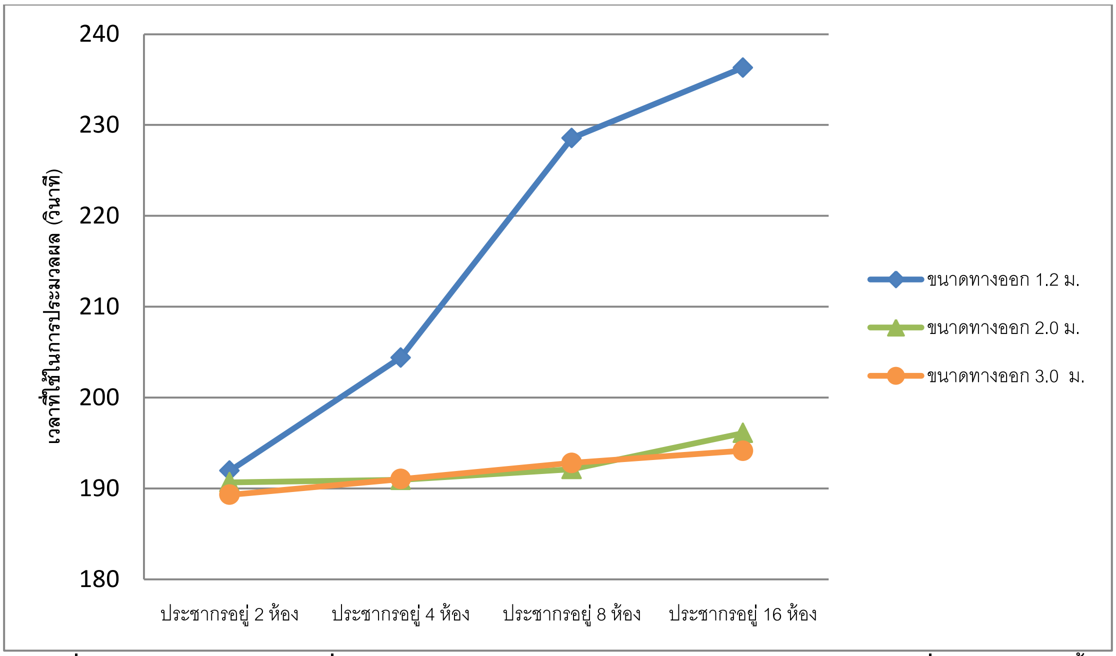
	การจำลองด้วย FDS	*การทำนายด้วยบิลดิงบล็อก*
Mean	6.42	6.94
Variance	2.14	16.99
Observations	15	15
Pearson Correlation	0.893221168	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	14	
t Stat	-0.691617958	
P(T<=t) one-tail	0.250243341	
t Critical one-tail	1.761310136	
P(T<=t) two-tail	0.500486681	
t Critical two-tail	2.144786688	

ในแง่ของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ พบว่าวิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถลดเวลาในการรอผลการอพยพได้เป็นอย่างมาก โดยในกรณีที่ดีที่สุดสามารถลดเวลาในการรอได้ประมาณ 10 เท่า โดยที่เวลาในการคำนวณในกรณีที่จำนวนบิลดิงบล็อกที่มีประชากรอยู่เท่ากันจะใช้เวลาใกล้เคียงกัน โดยกราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นจำนวนคงที่แต่แปรผันค่าคุณลักษณะของประชากรเทียบระหว่างวิธี FDS+EVAC กับวิธีการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก ดังแสดงอยู่ในภาพรูปภาพที่ 27

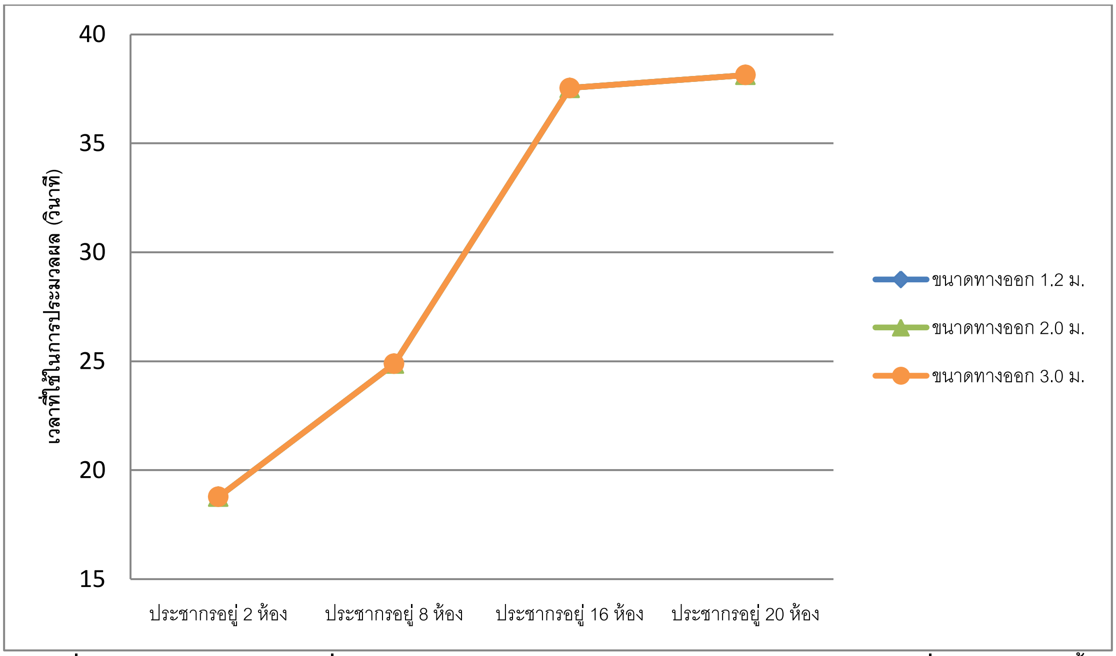


ภาพที่ 27 แผนภาพแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นจำนวนคงที่แต่แปรผันค่าคุณลักษณะของประชากรเทียบระหว่างวิธี FDS+EVAC กับวิธีบิลดิงบล็อก+NN

และกราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และขนาดของทางออกหนีไฟด้วยวิธีการจำลองโดยใช้โปรแกรม FDS+EVAC แสดงอยู่ในรูปภาพที่ 28 และวิธีการทำนายผลการอพยพจากอาคารด้วยวิธีการเรียนรู้เพื่อจำลองบิลดิงบล็อก แสดงอยู่ในรูปภาพที่ 29

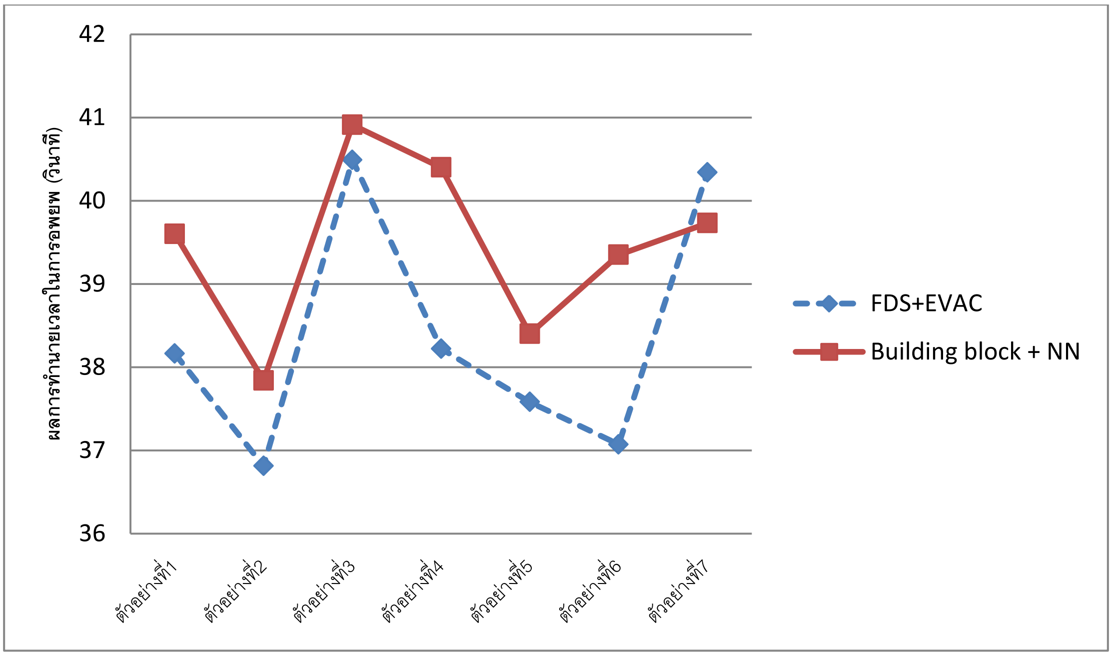


ภาพที่ 28 **แผนภาพแสดงผลเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และขนาดของทางออกหนีไฟด้วยวิธีการจำลองโดยใช้โปรแกรม** FDS+EVAC

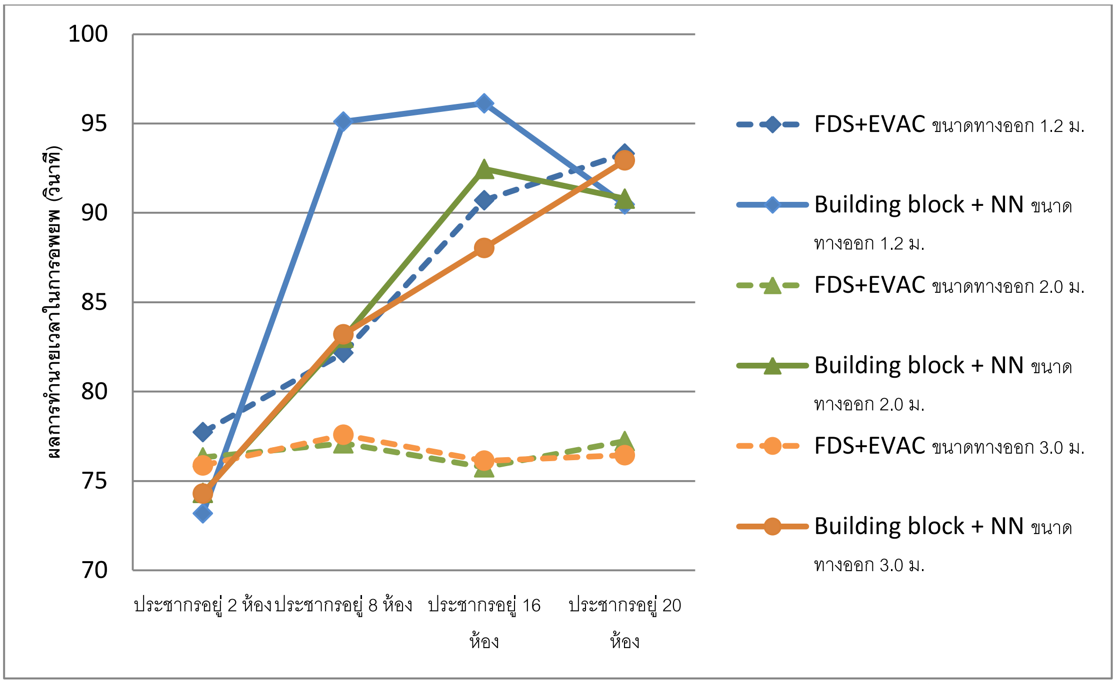


ภาพที่ 29 **แผนภาพแสดงผลเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการจำลองการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และขนาดของทางออกหนีไฟด้วยวิธีบิลดิงบล็อก**+NN

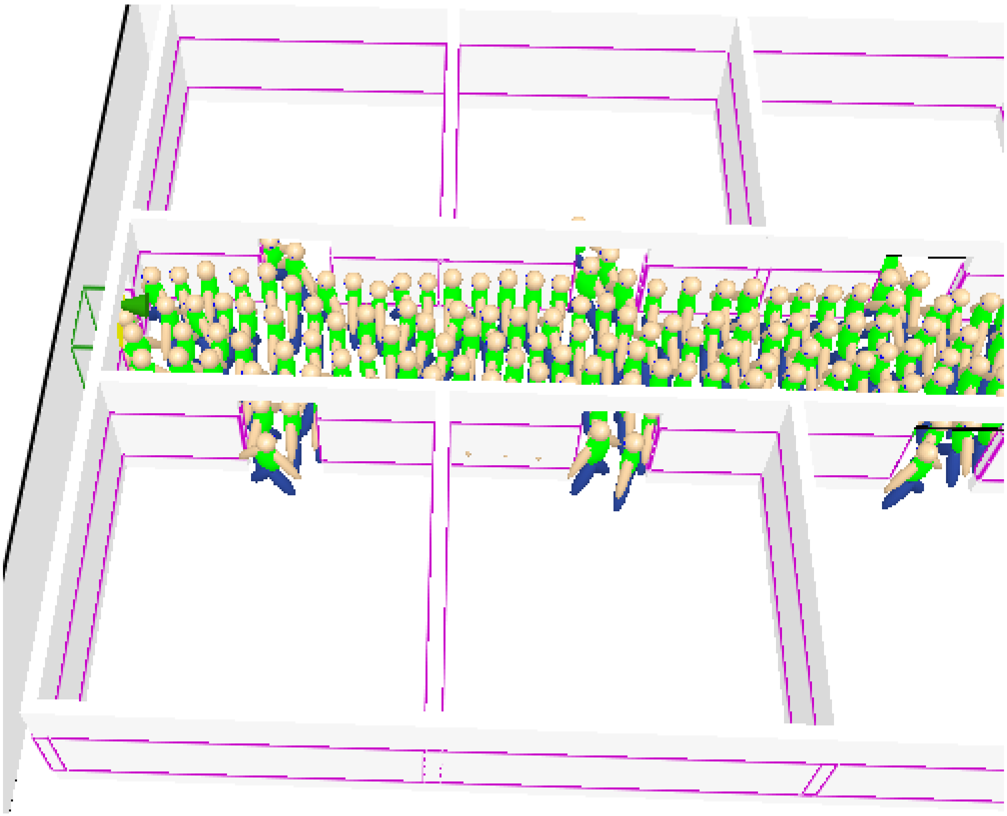
ในส่วนของผลการทำนายเวลาในการอพยพในระดับอาคารที่ประกอบขึ้นจากหลายบิลดิงบล็อก ถึงแม้ว่าแนวโน้มในการทำนายเวลาในการอพยพจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทำนายด้วยโปรแกรม FDS+EVAC ดังแสดงในกราฟในรูปภาพที่ 30 และ 31 แต่ผลลัพธ์ที่ได้ในตัวอย่างที่ให้ค่าจำนวนของห้องที่มีประชากรเป็นค่าคงที่ พบว่าค่าความแตกต่างที่น้อยที่สุดคือตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีค่าความแตกต่างอยู่ที่ -0.42 วินาที หรือ -1.04% และมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยในทุกกรณีอยู่ที่ -1.08 วินาทีหรือ -2.88% ซึ่งค่าความแตกต่างน้อยมาก ส่วนในกรณีที่ปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของทางออกหนีไฟ พบว่าค่าความความแตกต่างที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 1.25 วินาทีหรือ 2.08% และมีแนวโน้มว่าค่าความแตกต่างจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของห้องที่มีประชากรเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความแตกต่างที่มากขึ้นเกิดขึ้นจากเมื่อมีจำนวนของห้องที่มีประชากรมากขึ้น ทำให้เกิดจุดรวมตัวของประชากรหลายจุดซึ่งบางครั้งเกิดการกระจุกตัวของประชากรทำให้ประชากรในบิลดิงบล็อกก่อนหน้าไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังบิลดิงบล็อกที่อยู่ติดกันได้ ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 32 ซึ่งชุดตัวอย่างที่เรานำมาสร้างโมเดลในการทำนายผลการอพยพไม่ได้ครอบคลุมกรณีดังกล่าว ทำให้มีค่าแตกต่างสูงขึ้น



ภาพที่ 30 แผนภาพแสดงผลการทำนายเวลาในการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นจำนวนคงที่แต่แปรผันค่าคุณลักษณะของประชากร



ภาพที่ 31 แผนภาพแสดงผลการทำนายเวลาในการอพยพในสถานการณ์ตัวอย่างเมื่อมีการแปรผันทั้งจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่และคุณลักษณะของประชากร เทียบระหว่างวิธีการจำลองโดยใช้โปรแกรม FDS+EVAC และวิธีบิลดิงบล็อก+NN



ภาพที่ 32 แสดงสถานการณ์จำลองที่มีประชากรกระจุกตัวเมื่อมีประชากรรวมตัวมากเกินไป

5.2 สิ่งที่ได้จากการวิจัย

- งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการทำนายผลการอพยพที่สามารถลดเวลาในการรอผลการจำลองเทียบกับวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม FDS+EVAC ได้เป็นอย่างมาก
- วิธีการเรียนรู้ของเครื่องด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมในการนำไปใช้สร้างแบบจำลองในการทำนายผลการอพยพ
- วิธีการในการคำนวณอัตราการไหลเข้าแบบง่าย โดยการรวมอัตราการไหลออกของทุกบิลดิง-บล็อกที่อยู่ก่อนหน้านั้นเป็นวิธีที่ง่ายและใช้เวลาในการคำนวณน้อยมาก แต่ยังให้ผลลัพธ์ที่ไม่เสมือนจริง จึงควรหาวิธีการในการคำนวณที่เหมาะสมยิ่งขึ้นต่อไป

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ

เนื่องจากวิธีการที่นำเสนอนี้เป็นวิธีการใหม่จึงมีแง่มุมให้พัฒนาต่อได้อีกมาก เช่น จากผลการทดลองพบว่าในแง่ของความถูกต้องในการทำนายเวลาในการอพยพ ยังมีค่าความผิดพลาดสูงในบางกรณี เช่น ในกรณีที่มีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่มีค่าที่สูงขึ้น โดยแนวทางในการพัฒนาต่อเพื่อให้การทำนายเวลาในการอพยพแม่นยำมากยิ่งขึ้นนั้น ควรศึกษากรณีเมื่อมีการกระจุกตัวของประชากรในทางแยกต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อบิลดิงบล็อกโดยรอบมาประกอบการคำนวณ รวมทั้งแนวทางในการหาโมเดลหรือฟังก์ชันในการทำนายหาค่าอัตราการไหลเข้ารวมที่เพื่อมาใช้แทนวิธีการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผนผังอาคารที่มีความซับซ้อนไม่มากเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในเบื้องต้น ในการพัฒนาต่ออาจจะทดลองในแผนผังอาคารที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นเพื่อทดสอบว่าวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับแผนผังอาคารโดยทั่วไป โดยเฉพาะเมื่ออาคารที่มีหลายชั้น อาจทำการเพิ่มบิลดิงบล็อกประเภทบันไดเพื่อให้สามารถทำนายผลการอพยพในอาคารที่มีหลายชั้นได้ รวมถึงกรณีที่มีทางออกมากกว่าสองทางซึ่งปัจจุบันยังไม่ครอบคลุม อาจทำการพัฒนาต่อโดยการเพิ่มบิลดิงบล็อกทางแยกเพื่อให้สามารถแบ่งประชากรออกไปในหลายๆ เส้นทางได้

รายการอ้างอิง

[1] Xiaoping, Z., Tingkuan, Z., and Mengting, L. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. Building and Environment Volume 44, Issue 3 (2009) : 437-445.

[2] จักษุเทพ ตี้กุล และ สุกรี สินธุภิญโญ. การทำนายเวลาในการอพยพออกจากอาคารโดยการประยุกต์ใช้วิธีการบิลดิงบล็อก. ใน รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีและสารสนเทศ ครั้งที่ 8, หน้า 217-223. 9-10 พฤษภาคม 2555 ณ จังหวัดชลบุรี, 2555.

[3] Teekul, J., and Sinthupinyo, S. Predicting evacuation time using learnable building block method. In Proceedings of ECTI-CON 2011, 16-18 May 2012, 2012.

[4] Macal, C.M. and North, M.J. Tutorial on agent-based modeling and simulation PART 2: How to model with agents. In Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 73-83. 2006.

[5] Mitchell, T. M. Machine Learning. Singapore. 1997.

[6] Valentin E., and Verbraeck, A. Simulation using building blocks. In A Proceedings conference on AI, simulation and planning, 65-71. 2002.

[7] Zarboutis, N., and Marmaras, N. Design of formative evacuation plans using agent-based simulation. Safety Science 45,9 (2007) : 920-940.

[8] Shendarkar, A., Vasudevan, K., Lee, S., and Son, Y.J. Crowd simulation for emergency response using BDI agent based on virtual reality. In Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 545-553. 2006.

[9] Christensen, K., and Sasaki, Y. Agent-based emergency evacuation simulation with Individuals with disabilities in the population. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 11,3 (2008) : 9.

[10] Henein, C.M., and White, T. Agent-based modeling of forces in crowds. Lecture notes in computer science (2005) : 173-184.

[11] Pelechano, N., Allbeck, J.M., and Badler, N. I. Controlling individual agents in high-density crowd simulation. In Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, 2007.

[12] Helbing, D., and Molnar, P. Social force model for pedestrian dynamics. Physical Review E 51 (1995) : 4282-4286.

[13] Pelechano, N., O'Brien, K., Silverman, B. and Badler, N. Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication. In First International Workshop on Crowd Simulation, 21-30. 2005.

[14] Hajibabai, L., Delavar, M.R., Malek, M.R., and Frank, A.U. Agent-Based Simulation of Spatial Cognition and Wayfinding in Building Fire Emergency Evacuation. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography (2007) : 255-270.

[15] Murakami, Y., Minami, K., Kawasoe, T., and Ishida, T. Multi-Agent Simulation for Crisis Management. In Proceedings of the IEEE Workshop on Knowledge Media Networking, 135-139. 2002.

[16] Lim, C.P., Yuen, R.K.K., Lo, S.M . A Hybrid Neural Network Model for Noisy Data Regression. IEEE Transactions on systems, man and cybernatics 34,2 (April 2004) : 951-960.

[17] Specht, D. A General Regression Neural Network. IEEE transactions on neural network 2,6 (November 1991) : 568-576.

[18] Dimakis, N., Filippoupolitis, A., and Gelenbe, E. Distributed Building Evacuation Simulator for Smart Emergency Management. The Computer Journal 53,9 (November 2010) : 1384-1400.

[19] McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., and Floy, J. Fire Dynamics Simulator with Evacuation:FSD + EvacTechnical reference and User's Guide. VTT Technical research centre of Finland, 2010.

[20] Langston, P.A., Masling, R., and Asmar, B.N.. Crowd dynamics discrete element multi-circle. Safety Science 44 (2006) : 395-417.

[21] Gwynne, S., Galea, E.R., Lawrence, P., and Filippidis, L.. buildingEXODUS technical manual V4.00, 2004.

[21] Integrated Environmental Solutions Ltd.Integrated Environmental Solutions Ltd.. Simulex User Guide – Virtual Environment 5.8, 2009.

[22] Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., and Witten, I. H. The WEKA Data Mining Software: An Update. SIGKDD Explorations 11,1 (2009) : 10-18.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองโดยละเอียดของการเปรียบเทียบการจำลองการอพยพ ในระดับบิลดิงบล็อกเดียว

ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	1	37.39	38.00	-0.61	-1.63	7.26	0.31	6.95	95.73
	2	38.94	38.00	0.94	2.41	7.46	0.31	7.15	95.85
	3	35.45	38.00	-2.55	-7.19	6.80	0.31	6.49	95.44
	4	38.17	38.00	0.17	0.45	7.35	0.31	7.04	95.78
	5	36.99	38.00	-1.01	-2.73	7.72	0.31	7.41	95.98
	6	38.35	38.00	0.35	0.91	7.29	0.31	6.98	95.75
	7	38.18	38.00	0.18	0.47	7.34	0.31	7.03	95.78
	8	38.39	38.00	0.39	1.02	7.29	0.31	6.98	95.75
	9	37.94	38.00	-0.06	-0.16	7.31	0.31	7.00	95.76
	10	35.12	38.00	-2.88	-8.20	6.75	0.31	6.44	95.41
2	1	31.54	30.81	0.73	2.31	3.34	0.31	3.03	90.73
	2	31.80	30.81	0.99	3.11	3.37	0.31	3.06	90.79
	3	31.46	30.81	0.65	2.07	3.23	0.31	2.92	90.40
	4	31.90	30.81	1.09	3.42	3.37	0.31	3.06	90.80
	5	30.09	30.81	-0.72	-2.39	3.23	0.31	2.92	90.39
	6	32.14	30.81	1.33	4.14	3.33	0.31	3.02	90.69
	7	30.49	30.81	-0.32	-1.05	3.21	0.31	2.90	90.35
	8	33.89	30.81	3.08	9.09	3.62	0.31	3.31	91.44
	9	30.99	30.81	0.18	0.58	3.30	0.31	2.99	90.60
	10	30.60	30.81	-0.21	-0.69	3.27	0.31	2.96	90.51

ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
3	1	48.08	48.48	-0.40	-0.83	14.45	0.31	14.14	97.85
	2	48.51	48.48	0.03	0.06	14.44	0.31	14.13	97.85
	3	48.47	48.48	-0.01	-0.02	14.62	0.31	14.31	97.88
	4	47.31	48.48	-1.17	-2.47	14.31	0.31	14.00	97.83
	5	47.40	48.48	-1.08	-2.28	14.22	0.31	13.91	97.82
	6	46.05	48.48	-2.43	-5.28	13.98	0.31	13.67	97.78
	7	47.65	48.48	-0.83	-1.74	14.26	0.31	13.95	97.83
	8	48.05	48.48	-0.43	-0.89	14.55	0.31	14.24	97.87
	9	49.72	48.48	1.24	2.49	14.77	0.31	14.46	97.90
	10	47.26	48.48	-1.22	-2.58	14.12	0.31	13.81	97.80
4	1	61.83	64.36	-2.53	-4.09	11.48	0.31	11.17	97.30
	2	59.85	64.36	-4.51	-7.54	11.44	0.31	11.13	97.29
	3	64.42	64.36	0.06	0.09	11.79	0.31	11.48	97.37
	4	58.15	64.36	-6.21	-10.68	10.56	0.31	10.25	97.06
	5	61.51	64.36	-2.85	-4.63	11.23	0.31	10.92	97.24
	6	60.80	64.36	-3.56	-5.86	11.39	0.31	11.08	97.28
	7	61.06	64.36	-3.30	-5.40	11.68	0.31	11.37	97.35
	8	62.57	64.36	-1.79	-2.86	11.58	0.31	11.27	97.32
	9	62.57	64.36	-1.79	-2.86	11.47	0.31	11.16	97.30
	10	60.69	64.36	-3.67	-6.05	11.24	0.31	10.93	97.24

ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
5	1	31.45	32.42	-0.97	-3.08	5.98	0.31	5.67	94.82
	2	32.50	32.42	0.08	0.25	6.94	0.31	6.63	95.53
	3	32.43	32.42	0.01	0.03	6.15	0.31	5.84	94.96
	4	33.63	32.42	1.21	3.60	6.20	0.31	5.89	95.00
	5	32.61	32.42	0.19	0.58	6.18	0.31	5.87	94.98
	6	35.56	32.42	3.14	8.83	6.43	0.31	6.12	95.18
	7	33.70	32.42	1.28	3.80	6.39	0.31	6.08	95.15
	8	34.17	32.42	1.75	5.12	6.26	0.31	5.95	95.05
	9	34.42	32.42	2.00	5.81	6.41	0.31	6.10	95.16
	10	33.11	32.42	0.69	2.08	6.14	0.31	5.83	94.95
6	1	30.73	30.31	0.42	1.37	4.58	0.31	4.27	93.23
	2	32.54	30.31	2.23	6.85	4.80	0.31	4.49	93.54
	3	31.51	30.31	1.20	3.81	4.66	0.31	4.35	93.35
	4	31.56	30.31	1.25	3.96	4.68	0.31	4.37	93.38
	5	30.39	30.31	0.08	0.26	4.48	0.31	4.17	93.08
	6	33.02	30.31	2.71	8.21	4.79	0.31	4.48	93.53
	7	30.42	30.31	0.11	0.36	4.55	0.31	4.24	93.19
	8	33.11	30.31	2.80	8.46	4.87	0.31	4.56	93.63
	9	32.10	30.31	1.79	5.58	4.68	0.31	4.37	93.38
	10	29.39	30.31	-0.92	-3.13	4.37	0.31	4.06	92.91

ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
7	1	47.83	43.48	4.35	9.09	11.85	0.31	11.54	97.38
	2	48.14	43.48	4.66	9.68	12.31	0.31	12.00	97.48
	3	46.90	43.48	3.42	7.29	11.96	0.31	11.65	97.41
	4	45.72	43.48	2.24	4.90	11.79	0.31	11.48	97.37
	5	46.88	43.48	3.40	7.25	12.15	0.31	11.84	97.45
	6	46.42	43.48	2.94	6.33	11.69	0.31	11.38	97.35
	7	46.27	43.48	2.79	6.03	11.54	0.31	11.23	97.31
	8	46.65	43.48	3.17	6.80	11.92	0.31	11.61	97.40
	9	45.20	43.48	1.72	3.81	11.55	0.31	11.24	97.32
	10	45.85	43.48	2.37	5.17	13.15	0.31	12.84	97.64
8	1	38.53	38.47	0.06	0.16	7.40	0.31	7.09	95.81
	2	40.19	38.47	1.72	4.28	7.66	0.31	7.35	95.95
	3	37.44	38.47	-1.03	-2.75	7.23	0.31	6.92	95.71
	4	37.76	38.47	-0.71	-1.88	7.93	0.31	7.62	96.09
	5	38.21	38.47	-0.26	-0.68	7.25	0.31	6.94	95.72
	6	38.14	38.47	-0.33	-0.87	7.26	0.31	6.95	95.73
	7	38.72	38.47	0.25	0.65	7.42	0.31	7.11	95.82
	8	37.27	38.47	-1.20	-3.22	7.33	0.31	7.02	95.77
	9	36.98	38.47	-1.49	-4.03	7.83	0.31	7.52	96.04
	10	39.65	38.47	1.18	2.98	7.56	0.31	7.25	95.90

ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
9	1	36.40	37.60	-1.20	-3.30	7.99	0.31	7.68	96.12
	2	35.32	37.60	-2.28	-6.46	6.71	0.31	6.40	95.38
	3	35.00	37.60	-2.60	-7.43	6.85	0.31	6.54	95.47
	4	36.67	37.60	-0.93	-2.54	7.49	0.31	7.18	95.86
	5	36.08	37.60	-1.52	-4.21	6.96	0.31	6.65	95.55
	6	36.85	37.60	-0.75	-2.04	7.73	0.31	7.42	95.99
	7	36.71	37.60	-0.89	-2.42	7.23	0.31	6.92	95.71
	8	36.30	37.60	-1.30	-3.58	7.77	0.31	7.46	96.01
	9	37.78	37.60	0.18	0.48	7.29	0.31	6.98	95.75
	10	37.19	37.60	-0.41	-1.10	7.12	0.31	6.81	95.65
10	1	36.66	38.31	-1.65	-4.50	7.00	0.31	6.69	95.57
	2	37.61	38.31	-0.70	-1.86	7.26	0.31	6.95	95.73
	3	36.51	38.31	-1.80	-4.93	7.19	0.31	6.88	95.69
	4	37.07	38.31	-1.24	-3.35	7.11	0.31	6.80	95.64
	5	35.74	38.31	-2.57	-7.19	6.94	0.31	6.63	95.53
	6	37.38	38.31	-0.93	-2.49	7.22	0.31	6.91	95.71
	7	36.58	38.31	-1.73	-4.73	7.34	0.31	7.03	95.78
	8	37.35	38.31	-0.96	-2.57	7.14	0.31	6.83	95.66
	9	37.72	38.31	-0.59	-1.56	7.12	0.31	6.81	95.65
	10	35.99	38.31	-2.32	-6.45	6.96	0.31	6.65	95.55

ตารางที่ 19 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
11	1	37.30	37.68	-0.38	-1.02	7.21	0.31	6.90	95.70
	2	34.42	37.68	-3.26	-9.47	6.66	0.31	6.35	95.35
	3	36.83	37.68	-0.85	-2.31	7.73	0.31	7.42	95.99
	4	36.14	37.68	-1.54	-4.26	6.89	0.31	6.58	95.50
	5	36.83	37.68	-0.85	-2.31	6.96	0.31	6.65	95.55
	6	37.80	37.68	0.12	0.32	7.36	0.31	7.05	95.79
	7	36.95	37.68	-0.73	-1.98	7.33	0.31	7.02	95.77
	8	35.94	37.68	-1.74	-4.84	6.86	0.31	6.55	95.48
	9	35.55	37.68	-2.13	-5.99	6.80	0.31	6.49	95.44
	10	37.19	37.68	-0.49	-1.32	7.12	0.31	6.81	95.65
ค่าเฉลี่ย		39.79	39.99	-0.20	-0.36	8.03	0.31	7.72	95.47

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	1	6.15	6.05	0.10	1.63	5.38	0.56	4.82	89.59
	2	6.20	6.05	0.15	2.42	5.4	0.56	4.84	89.63
	3	6.06	6.05	0.01	0.17	5.18	0.56	4.62	89.19
	4	6.08	6.05	0.03	0.49	5.14	0.56	4.58	89.11
	5	6.29	6.05	0.24	3.82	5.24	0.56	4.68	89.31
	6	6.15	6.05	0.10	1.63	5.24	0.56	4.68	89.31
	7	6.04	6.05	-0.01	-0.17	5.24	0.56	4.68	89.31
	8	6.22	6.05	0.17	2.73	5.2	0.56	4.64	89.23
	9	6.19	6.05	0.14	2.26	5.26	0.56	4.70	89.35
	10	6.17	6.05	0.12	1.94	5.39	0.56	4.83	89.61
2	1	3.83	3.40	0.43	11.23	3.16	0.56	2.60	82.28
	2	3.83	3.40	0.43	11.23	3.18	0.56	2.62	82.39
	3	3.79	3.40	0.39	10.29	3.19	0.56	2.63	82.45
	4	3.76	3.40	0.36	9.57	3.20	0.56	2.64	82.50
	5	3.78	3.40	0.38	10.05	3.23	0.56	2.67	82.66
	6	3.68	3.40	0.28	7.61	3.13	0.56	2.57	82.11
	7	3.74	3.40	0.34	9.09	3.16	0.56	2.60	82.28
	8	3.84	3.40	0.44	11.46	3.18	0.56	2.62	82.39
	9	3.79	3.40	0.39	10.29	3.20	0.56	2.64	82.50
	10	3.88	3.40	0.48	12.37	3.19	0.56	2.63	82.45

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
3	1	8.50	8.45	0.05	0.59	7.55	0.56	6.99	92.58
	2	8.72	8.45	0.27	3.10	7.97	0.56	7.41	92.97
	3	8.60	8.45	0.15	1.74	7.6	0.56	7.04	92.63
	4	8.79	8.45	0.34	3.87	7.65	0.56	7.09	92.68
	5	8.54	8.45	0.09	1.05	7.6	0.56	7.04	92.63
	6	8.46	8.45	0.01	0.12	7.59	0.56	7.03	92.62
	7	8.82	8.45	0.37	4.20	7.68	0.56	7.12	92.71
	8	8.60	8.45	0.15	1.74	7.41	0.56	6.85	92.44
	9	8.68	8.45	0.23	2.65	7.6	0.56	7.04	92.63
	10	8.72	8.45	0.27	3.10	7.63	0.56	7.07	92.66
4	1	6.15	5.88	0.27	4.39	3.45	0.56	2.89	83.77
	2	6.41	5.88	0.53	8.27	3.58	0.56	3.02	84.36
	3	6.37	5.88	0.49	7.69	3.48	0.56	2.92	83.91
	4	6.20	5.88	0.32	5.16	3.61	0.56	3.05	84.49
	5	6.09	5.88	0.21	3.45	3.47	0.56	2.91	83.86
	6	6.25	5.88	0.37	5.92	3.50	0.56	2.94	84.00
	7	6.19	5.88	0.31	5.01	3.52	0.56	2.96	84.09
	8	6.17	5.88	0.29	4.70	3.52	0.56	2.96	84.09
	9	6.11	5.88	0.23	3.76	3.61	0.56	3.05	84.49
	10	6.01	5.88	0.13	2.16	3.48	0.56	2.92	83.91

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
5	1	6.34	4.97	1.37	21.61	7.58	0.56	7.02	92.61
	2	6.25	4.97	1.28	20.48	7.48	0.56	6.92	92.51
	3	6.36	4.97	1.39	21.86	7.38	0.56	6.82	92.41
	4	6.44	4.97	1.47	22.83	7.53	0.56	6.97	92.56
	5	6.55	4.97	1.58	24.12	7.75	0.56	7.19	92.77
	6	6.19	4.97	1.22	19.71	7.48	0.56	6.92	92.51
	7	6.11	4.97	1.14	18.66	7.39	0.56	6.83	92.42
	8	6.23	4.97	1.26	20.22	7.51	0.56	6.95	92.54
	9	6.28	4.97	1.31	20.86	7.52	0.56	6.96	92.55
	10	6.34	4.97	1.37	21.61	7.71	0.56	7.15	92.74
6	1	10.48	21.33	-10.85	-103.53	6.81	0.56	6.25	91.78
	2	11.32	21.33	-10.01	-88.43	6.85	0.56	6.29	91.82
	3	9.38	21.33	-11.95	-127.40	6.35	0.56	5.79	91.18
	4	10.28	21.33	-11.05	-107.49	6.56	0.56	6.00	91.46
	5	10.62	21.33	-10.71	-100.85	6.81	0.56	6.25	91.78
	6	10.64	21.33	-10.69	-100.47	6.81	0.56	6.25	91.78
	7	11.28	21.33	-10.05	-89.10	6.77	0.56	6.21	91.73
	8	10.97	21.33	-10.36	-94.44	6.77	0.56	6.21	91.73
	9	10.10	21.33	-11.23	-111.19	6.47	0.56	5.91	91.34
	10	9.61	21.33	-11.72	-121.96	6.47	0.56	5.91	91.34

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
7	1	5.92	5.66	0.26	4.39	5.10	0.56	4.54	89.02
	2	5.96	5.66	0.30	5.03	5.13	0.56	4.57	89.08
	3	5.99	5.66	0.33	5.51	5.26	0.56	4.70	89.35
	4	5.90	5.66	0.24	4.07	5.37	0.56	4.81	89.57
	5	6.13	5.66	0.47	7.67	5.13	0.56	4.57	89.08
	6	5.90	5.66	0.24	4.07	5.29	0.56	4.73	89.41
	7	6.07	5.66	0.41	6.75	5.11	0.56	4.55	89.04
	8	6.01	5.66	0.35	5.82	5.36	0.56	4.80	89.55
	9	5.92	5.66	0.26	4.39	5.12	0.56	4.56	89.06
	10	6.05	5.66	0.39	6.45	5.62	0.56	5.06	90.04
8	1	6.43	6.52	-0.09	-1.40	5.32	0.56	4.76	89.47
	2	6.48	6.52	-0.04	-0.62	5.33	0.56	4.77	89.49
	3	6.40	6.52	-0.12	-1.87	5.29	0.56	4.73	89.41
	4	6.33	6.52	-0.19	-3.00	5.31	0.56	4.75	89.45
	5	6.44	6.52	-0.08	-1.24	5.34	0.56	4.78	89.51
	6	6.35	6.52	-0.17	-2.68	5.29	0.56	4.73	89.41
	7	6.43	6.52	-0.09	-1.40	5.34	0.56	4.78	89.51
	8	6.46	6.52	-0.06	-0.93	5.26	0.56	4.70	89.35
	9	6.61	6.52	0.09	1.36	5.36	0.56	4.80	89.55
	10	6.65	6.52	0.13	1.95	5.31	0.56	4.75	89.45

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
9	1	5.63	5.57	0.06	1.07	5.24	0.56	4.68	89.31
	2	5.65	5.57	0.08	1.42	5.17	0.56	4.61	89.17
	3	5.65	5.57	0.08	1.42	5.14	0.56	4.58	89.11
	4	5.77	5.57	0.20	3.47	5.27	0.56	4.71	89.37
	5	5.60	5.57	0.03	0.54	5.93	0.56	5.37	90.56
	6	5.71	5.57	0.14	2.45	5.46	0.56	4.90	89.74
	7	5.58	5.57	0.01	0.18	5.66	0.56	5.10	90.11
	8	5.51	5.57	-0.06	-1.09	4.98	0.56	4.42	88.76
	9	5.56	5.57	-0.01	-0.18	5.32	0.56	4.76	89.47
	10	5.50	5.57	-0.07	-1.27	5.11	0.56	4.55	89.04
10	1	5.98	6.26	-0.28	-4.68	5.26	0.56	4.70	89.35
	2	6.05	6.26	-0.21	-3.47	5.22	0.56	4.66	89.27
	3	5.90	6.26	-0.36	-6.10	5.20	0.56	4.64	89.23
	4	6.10	6.26	-0.16	-2.62	5.20	0.56	4.64	89.23
	5	6.16	6.26	-0.10	-1.62	5.14	0.56	4.58	89.11
	6	6.14	6.26	-0.12	-1.95	5.37	0.56	4.81	89.57
	7	6.03	6.26	-0.23	-3.81	5.24	0.56	4.68	89.31
	8	6.14	6.26	-0.12	-1.95	5.38	0.56	4.82	89.59
	9	6.09	6.26	-0.17	-2.79	5.39	0.56	4.83	89.61
	10	6.16	6.26	-0.10	-1.62	5.23	0.56	4.67	89.29

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
11	1	6.01	5.83	0.18	3.00	5.22	0.56	4.66	89.27
	2	6.19	5.83	0.36	5.82	5.19	0.56	4.63	89.21
	3	6.08	5.83	0.25	4.11	5.12	0.56	4.56	89.06
	4	5.99	5.83	0.16	2.67	5.11	0.56	4.55	89.04
	5	6.18	5.83	0.35	5.66	5.23	0.56	4.67	89.29
	6	5.97	5.83	0.14	2.35	5.23	0.56	4.67	89.29
	7	6.10	5.83	0.27	4.43	5.19	0.56	4.63	89.21
	8	6.07	5.83	0.24	3.95	5.17	0.56	4.61	89.17
	9	5.94	5.83	0.11	1.85	5.29	0.56	4.73	89.41
	10	6.16	5.83	0.33	5.36	5.28	0.56	4.72	89.39
12	1	6.04	6.02	0.02	0.33	3.41	0.56	2.85	83.58
	2	6.14	6.02	0.12	1.95	3.41	0.56	2.85	83.58
	3	6.15	6.02	0.13	2.11	3.45	0.56	2.89	83.77
	4	6.21	6.02	0.19	3.06	3.50	0.56	2.94	84.00
	5	5.91	6.02	-0.11	-1.86	3.42	0.56	2.86	83.63
	6	6.21	6.02	0.19	3.06	3.42	0.56	2.86	83.63
	7	6.71	6.02	0.69	10.28	3.48	0.56	2.92	83.91
	8	6.08	6.02	0.06	0.99	3.48	0.56	2.92	83.91
	9	6.36	6.02	0.34	5.35	3.55	0.56	2.99	84.23
	10	6.17	6.02	0.15	2.43	3.49	0.56	2.93	83.95

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
13	1	6.17	6.08	0.09	1.46	7.22	0.56	6.66	92.24
	2	6.05	6.08	-0.03	-0.50	7.20	0.56	6.64	92.22
	3	6.03	6.08	-0.05	-0.83	7.24	0.56	6.68	92.27
	4	6.03	6.08	-0.05	-0.83	7.22	0.56	6.66	92.24
	5	6.03	6.08	-0.05	-0.83	7.23	0.56	6.67	92.25
	6	6.16	6.08	0.08	1.30	7.27	0.56	6.71	92.30
	7	6.15	6.08	0.07	1.14	7.29	0.56	6.73	92.32
	8	6.16	6.08	0.08	1.30	7.35	0.56	6.79	92.38
	9	6.09	6.08	0.01	0.16	7.31	0.56	6.75	92.34
	10	6.16	6.08	0.08	1.30	7.29	0.56	6.73	92.32
14	1	5.83	5.15	0.68	11.66	14.44	0.56	13.88	96.12
	2	5.95	5.15	0.80	13.45	14.39	0.56	13.83	96.11
	3	5.89	5.15	0.74	12.56	14.43	0.56	13.87	96.12
	4	5.87	5.15	0.72	12.27	14.35	0.56	13.79	96.10
	5	5.89	5.15	0.74	12.56	14.45	0.56	13.89	96.12
	6	5.85	5.15	0.70	11.97	14.43	0.56	13.87	96.12
	7	5.93	5.15	0.78	13.15	14.46	0.56	13.90	96.13
	8	5.80	5.15	0.65	11.21	14.44	0.56	13.88	96.12
	9	5.84	5.15	0.69	11.82	14.41	0.56	13.85	96.11
	10	5.88	5.15	0.73	12.41	14.48	0.56	13.92	96.13

ตารางที่ 20 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีบิลดิงบล็อกเดียวของบิลดิงบล็อกของทางเดิน

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
15	1	6.49	6.86	-0.37	-5.70	3.91	0.56	3.35	85.68
	2	6.44	6.86	-0.42	-6.52	4.67	0.56	4.11	88.01
	3	6.46	6.86	-0.40	-6.19	3.78	0.56	3.22	85.19
	4	6.09	6.86	-0.77	-12.64	3.80	0.56	3.24	85.26
	5	6.27	6.86	-0.59	-9.41	3.86	0.56	3.30	85.49
	6	6.25	6.86	-0.61	-9.76	3.78	0.56	3.22	85.19
	7	6.24	6.86	-0.62	-9.94	3.80	0.56	3.24	85.26
	8	6.37	6.86	-0.49	-7.69	3.80	0.56	3.24	85.26
	9	6.49	6.86	-0.37	-5.70	4.17	0.56	3.61	86.56
	10	6.33	6.86	-0.53	-8.37	3.90	0.56	3.34	85.64
ค่าเฉลี่ย		6.42	6.94	-0.52	-3.38	5.95	0.56	5.39	89.17

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองโดยละเอียดของการเปรียบเทียบการจำลองการอพยพในระดับหลายบิลดิงบล็อก

ตารางที่ 21 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	1	37.04	39.60	-2.56	-6.91	79.89	7.46	72.43	90.66
	2	38.07	39.60	-1.53	-4.02	80.57	7.46	73.11	90.74
	3	40.75	39.60	1.15	2.82	85.82	7.46	78.36	91.31
	4	35.99	39.60	-3.61	-10.03	76.49	7.46	69.03	90.25
	5	40.74	39.60	1.14	2.80	85.92	7.46	78.46	91.32
	6	40.04	39.60	0.44	1.10	84.53	7.46	77.07	91.17
	7	39.19	39.60	-0.41	-1.05	82.97	7.46	75.51	91.01
	8	35.20	39.60	-4.40	-12.50	75.56	7.46	68.10	90.13
	9	36.63	39.60	-2.97	-8.11	77.85	7.46	70.39	90.42
	10	37.91	39.60	-1.69	-4.46	80.52	7.46	73.06	90.74
2	1	34.70	37.84	-3.14	-9.05	73.78	7.46	66.32	89.89
	2	38.33	37.84	0.49	1.28	80.99	7.46	73.53	90.79
	3	32.02	37.84	-5.82	-18.18	68.53	7.46	61.07	89.11
	4	32.54	37.84	-5.30	-16.29	69.54	7.46	62.08	89.27
	5	39.52	37.84	1.68	4.25	83.32	7.46	75.86	91.05
	6	37.31	37.84	-0.53	-1.42	78.77	7.46	71.31	90.53
	7	39.17	37.84	1.33	3.40	82.62	7.46	75.16	90.97
	8	39.01	37.84	1.17	3.00	82.20	7.46	74.74	90.92
	9	37.80	37.84	-0.04	-0.11	79.95	7.46	72.49	90.67
	10	37.68	37.84	-0.16	-0.42	79.71	7.46	72.25	90.64

ตารางที่ 21 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
3	1	40.67	40.91	-0.24	-0.59	86.99	7.46	79.53	91.42
	2	39.64	40.91	-1.27	-3.20	87.74	7.46	80.28	91.50
	3	40.72	40.91	-0.19	-0.47	83.91	7.46	76.45	91.11
	4	42.63	40.91	1.72	4.03	90.54	7.46	83.08	91.76
	5	37.89	40.91	-3.02	-7.97	80.64	7.46	73.18	90.75
	6	42.70	40.91	1.79	4.19	90.69	7.46	83.23	91.77
	7	41.98	40.91	1.07	2.55	88.68	7.46	81.22	91.59
	8	40.37	40.91	-0.54	-1.34	85.63	7.46	78.17	91.29
	9	36.54	40.91	-4.37	-11.96	77.87	7.46	70.41	90.42
	10	41.72	40.91	0.81	1.94	87.94	7.46	80.48	91.52
4	1	39.75	40.40	-0.65	-1.64	84.84	7.46	77.38	91.21
	2	38.55	40.40	-1.85	-4.80	81.72	7.46	74.26	90.87
	3	38.84	40.40	-1.56	-4.02	82.80	7.46	75.34	90.99
	4	39.15	40.40	-1.25	-3.19	82.80	7.46	75.34	90.99
	5	36.43	40.40	-3.97	-10.90	77.46	7.46	70.00	90.37
	6	36.10	40.40	-4.30	-11.91	76.70	7.46	69.24	90.27
	7	36.93	40.40	-3.47	-9.40	78.34	7.46	70.88	90.48
	8	37.27	40.40	-3.13	-8.40	79.11	7.46	71.65	90.57
	9	39.50	40.40	-0.90	-2.28	83.37	7.46	75.91	91.05
	10	39.67	40.40	-0.73	-1.84	83.82	7.46	76.36	91.10

ตารางที่ 21 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
5	1	35.75	38.40	-2.65	-7.41	76.87	7.46	69.41	90.30
	2	34.36	38.40	-4.04	-11.76	73.40	7.46	65.94	89.84
	3	38.69	38.40	0.29	0.75	81.89	7.46	74.43	90.89
	4	42.65	38.40	4.25	9.96	89.54	7.46	82.08	91.67
	5	34.98	38.40	-3.42	-9.78	74.54	7.46	67.08	89.99
	6	34.84	38.40	-3.56	-10.22	74.23	7.46	66.77	89.95
	7	40.97	38.40	2.57	6.27	86.37	7.46	78.91	91.36
	8	38.22	38.40	-0.18	-0.47	80.98	7.46	73.52	90.79
	9	36.32	38.40	-2.08	-5.73	77.35	7.46	69.89	90.36
	10	39.03	38.40	0.63	1.61	82.66	7.46	75.20	90.98
6	1	37.04	39.35	-2.31	-6.24	80.95	7.46	73.49	90.78
	2	37.85	39.35	-1.50	-3.96	82.48	7.46	75.02	90.96
	3	36.88	39.35	-2.47	-6.70	80.44	7.46	72.98	90.73
	4	35.30	39.35	-4.05	-11.47	77.36	7.46	69.90	90.36
	5	36.59	39.35	-2.76	-7.54	79.86	7.46	72.40	90.66
	6	37.40	39.35	-1.95	-5.21	80.88	7.46	73.42	90.78
	7	37.83	39.35	-1.52	-4.02	82.44	7.46	74.98	90.95
	8	37.71	39.35	-1.64	-4.35	82.22	7.46	74.76	90.93
	9	36.27	39.35	-3.08	-8.49	79.23	7.46	71.77	90.58
	10	37.86	39.35	-1.49	-3.94	82.50	7.46	75.04	90.96

ตารางที่ 21 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่เป็นค่าคงที่แต่ปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของประชากรที่อยู่ในห้อง

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
7	1	44.45	39.73	4.72	10.62	95.88	7.46	88.42	92.22
	2	41.76	39.73	2.03	4.86	90.38	7.46	82.92	91.75
	3	38.14	39.73	-1.59	-4.17	83.71	7.46	76.25	91.09
	4	39.62	39.73	-0.11	-0.28	88.20	7.46	80.74	91.54
	5	37.08	39.73	-2.65	-7.15	82.97	7.46	75.51	91.01
	6	39.82	39.73	0.09	0.23	89.15	7.46	81.69	91.63
	7	39.19	39.73	-0.54	-1.38	87.73	7.46	80.27	91.50
	8	41.80	39.73	2.07	4.95	93.35	7.46	85.89	92.01
	9	44.36	39.73	4.63	10.44	98.20	7.46	90.74	92.40
	10	37.18	39.73	-2.55	-6.86	83.18	7.46	75.72	91.03

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
1	1	83.02	73.17	9.85	11.86	205.84	18.78	187.06	90.88
	2	75.14	73.17	1.97	2.62	185.27	18.78	166.49	89.86
	3	77.10	73.17	3.93	5.10	190.18	18.78	171.40	90.13
	4	75.65	73.17	2.48	3.28	186.59	18.78	167.81	89.94
	5	77.84	73.17	4.67	6.00	191.88	18.78	173.10	90.21
	6	79.64	73.17	6.47	8.12	196.16	18.78	177.38	90.43
	7	73.55	73.17	0.38	0.52	181.46	18.78	162.68	89.65
	8	82.01	73.17	8.84	10.78	204.47	18.78	185.69	90.82
	9	73.29	73.17	0.12	0.16	180.88	18.78	162.10	89.62
	10	79.99	73.17	6.82	8.53	196.89	18.78	178.11	90.46
2	1	75.78	74.32	1.46	1.93	189.13	18.78	170.35	90.07
	2	74.65	74.32	0.33	0.44	186.48	18.78	167.70	89.93
	3	78.64	74.32	4.32	5.49	195.70	18.78	176.92	90.40
	4	80.80	74.32	6.48	8.02	204.31	18.78	185.53	90.81
	5	73.41	74.32	-0.91	-1.24	183.90	18.78	165.12	89.79
	6	71.02	74.32	-3.30	-4.65	177.67	18.78	158.89	89.43
	7	79.16	74.32	4.84	6.11	197.27	18.78	178.49	90.48
	8	71.21	74.32	-3.11	-4.37	177.92	18.78	159.14	89.44
	9	82.55	74.32	8.23	9.97	205.29	18.78	186.51	90.85
	10	75.86	74.32	1.54	2.03	189.16	18.78	170.38	90.07

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
3	1	73.34	74.28	-0.94	-1.28	182.93	18.78	164.15	89.73
	2	79.29	74.28	5.01	6.32	197.78	18.78	179.00	90.50
	3	76.50	74.28	2.22	2.90	191.24	18.78	172.46	90.18
	4	71.30	74.28	-2.98	-4.18	178.40	18.78	159.62	89.47
	5	68.53	74.28	-5.75	-8.39	171.67	18.78	152.89	89.06
	6	84.47	74.28	10.19	12.06	210.11	18.78	191.33	91.06
	7	75.40	74.28	1.12	1.49	188.21	18.78	169.43	90.02
	8	75.86	74.28	1.58	2.08	188.99	18.78	170.21	90.06
	9	74.25	74.28	-0.03	-0.04	185.51	18.78	166.73	89.88
	10	79.67	74.28	5.39	6.77	198.27	18.78	179.49	90.53
4	1	82.24	95.10	-12.86	-15.64	204.65	24.88	179.77	87.84
	2	79.58	95.10	-15.52	-19.50	198.61	24.88	173.73	87.47
	3	80.67	95.10	-14.43	-17.89	201.22	24.88	176.34	87.64
	4	82.08	95.10	-13.02	-15.86	204.60	24.88	179.72	87.84
	5	81.72	95.10	-13.38	-16.37	203.52	24.88	178.64	87.78
	6	83.30	95.10	-11.80	-14.17	207.40	24.88	182.52	88.00
	7	82.53	95.10	-12.57	-15.23	202.96	24.88	178.08	87.74
	8	81.43	95.10	-13.67	-16.79	202.72	24.88	177.84	87.73
	9	84.82	95.10	-10.28	-12.12	211.22	24.88	186.34	88.22
	10	83.24	95.10	-11.86	-14.25	207.25	24.88	182.37	88.00

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
5	1	75.50	83.00	-7.50	-9.93	186.31	24.88	161.43	86.65
	2	77.59	83.00	-5.41	-6.97	191.44	24.88	166.56	87.00
	3	71.22	83.00	-11.78	-16.54	178.25	24.88	153.37	86.04
	4	77.05	83.00	-5.95	-7.72	192.34	24.88	167.46	87.06
	5	82.94	83.00	-0.06	-0.07	206.87	24.88	181.99	87.97
	6	74.07	83.00	-8.93	-12.06	183.24	24.88	158.36	86.42
	7	75.50	83.00	-7.50	-9.93	186.38	24.88	161.50	86.65
	8	74.30	83.00	-8.70	-11.71	183.42	24.88	158.54	86.44
	9	81.32	83.00	-1.68	-2.07	200.61	24.88	175.73	87.60
	10	81.54	83.00	-1.46	-1.79	200.69	24.88	175.81	87.60
6	1	76.54	83.20	-6.66	-8.70	188.77	24.88	163.89	86.82
	2	78.77	83.20	-4.43	-5.62	193.80	24.88	168.92	87.16
	3	83.35	83.20	0.15	0.18	204.62	24.88	179.74	87.84
	4	75.50	83.20	-7.70	-10.20	186.19	24.88	161.31	86.64
	5	82.20	83.20	-1.00	-1.22	202.13	24.88	177.25	87.69
	6	76.11	83.20	-7.09	-9.32	187.64	24.88	162.76	86.74
	7	79.99	83.20	-3.21	-4.01	196.70	24.88	171.82	87.35
	8	72.29	83.20	-10.91	-15.09	178.48	24.88	153.60	86.06
	9	77.92	83.20	-5.28	-6.78	191.80	24.88	166.92	87.03
	10	73.00	83.20	-10.20	-13.97	180.18	24.88	155.30	86.19

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
7	1	89.65	96.12	-6.47	-7.22	226.36	37.54	188.82	83.42
	2	89.52	96.12	-6.60	-7.37	225.68	37.54	188.14	83.37
	3	92.92	96.12	-3.20	-3.44	231.24	37.54	193.70	83.77
	4	91.07	96.12	-5.05	-5.55	229.76	37.54	192.22	83.66
	5	92.88	96.12	-3.24	-3.49	234.17	37.54	196.63	83.97
	6	90.42	96.12	-5.70	-6.30	228.32	37.54	190.78	83.56
	7	90.69	96.12	-5.43	-5.99	229.23	37.54	191.69	83.62
	8	89.09	96.12	-7.03	-7.89	224.90	37.54	187.36	83.31
	9	91.83	96.12	-4.29	-4.67	231.47	37.54	193.93	83.78
	10	88.93	96.12	-7.19	-8.09	224.42	37.54	186.88	83.27
8	1	75.16	92.45	-17.29	-23.00	190.85	37.54	153.31	80.33
	2	73.22	92.45	-19.23	-26.26	186.16	37.54	148.62	79.83
	3	80.33	92.45	-12.12	-15.09	203.35	37.54	165.81	81.54
	4	73.94	92.45	-18.51	-25.03	187.78	37.54	150.24	80.01
	5	76.11	92.45	-16.34	-21.47	192.76	37.54	155.22	80.53
	6	77.63	92.45	-14.82	-19.09	196.42	37.54	158.88	80.89
	7	82.38	92.45	-10.07	-12.22	207.95	37.54	170.41	81.95
	8	75.01	92.45	-17.44	-23.25	190.11	37.54	152.57	80.25
	9	69.48	92.45	-22.97	-33.06	177.18	37.54	139.64	78.81
	10	74.30	92.45	-18.15	-24.43	188.70	37.54	151.16	80.11

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
9	1	81.46	88.03	-6.57	-8.07	205.31	37.54	167.77	81.72
	2	72.96	88.03	-15.07	-20.66	185.46	37.54	147.92	79.76
	3	77.01	88.03	-11.02	-14.31	195.46	37.54	157.92	80.79
	4	71.45	88.03	-16.58	-23.21	181.60	37.54	144.06	79.33
	5	74.66	88.03	-13.37	-17.91	189.17	37.54	151.63	80.15
	6	75.62	88.03	-12.41	-16.41	191.59	37.54	154.05	80.41
	7	77.62	88.03	-10.41	-13.41	196.49	37.54	158.95	80.89
	8	80.69	88.03	-7.34	-9.10	204.11	37.54	166.57	81.61
	9	75.73	88.03	-12.30	-16.24	191.82	37.54	154.28	80.43
	10	73.96	88.03	-14.07	-19.02	187.15	37.54	149.61	79.94
10	1	92.43	90.46	1.97	2.13	234.46	38.13	196.33	83.74
	2	93.07	90.46	2.61	2.80	235.43	38.13	197.30	83.80
	3	95.28	90.46	4.82	5.06	241.13	38.13	203.00	84.19
	4	92.67	90.46	2.21	2.38	234.97	38.13	196.84	83.77
	5	95.00	90.46	4.54	4.78	240.82	38.13	202.69	84.17
	6	94.69	90.46	4.23	4.47	239.68	38.13	201.55	84.09
	7	90.46	90.46	0.00	0.00	229.39	38.13	191.26	83.38
	8	94.59	90.46	4.13	4.37	239.46	38.13	201.33	84.08
	9	92.53	90.46	2.07	2.24	234.41	38.13	196.28	83.73
	10	92.36	90.46	1.90	2.06	233.51	38.13	195.38	83.67

ตารางที่ 22 ผลการทดลองโดยละเอียดในกรณีปรับเปลี่ยนจำนวนห้องที่มีประชากรอยู่รวมถึงปรับเปลี่ยนขนาดของประตูทางออกหนีไฟ

ตัวอย่าง	ทดลองครั้งที่	เวลาในการอพยพ (วินาที)				เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผล (วินาที)			
		จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง	จำลองด้วย FDS	ทำนายด้วยบิลดิงบล็อก	ความแตกต่าง	%ความแตกต่าง
11	1	80.67	90.79	-10.12	-12.54	204.71	38.13	166.58	81.37
	2	73.74	90.79	-17.05	-23.12	187.70	38.13	149.57	79.69
	3	80.30	90.79	-10.49	-13.06	203.62	38.13	165.49	81.27
	4	75.92	90.79	-14.87	-19.59	192.83	38.13	154.70	80.23
	5	72.24	90.79	-18.55	-25.68	183.88	38.13	145.75	79.26
	6	77.78	90.79	-13.01	-16.73	197.42	38.13	159.29	80.69
	7	78.29	90.79	-12.50	-15.97	198.77	38.13	160.64	80.82
	8	79.36	90.79	-11.43	-14.40	200.91	38.13	162.78	81.02
	9	72.28	90.79	-18.51	-25.61	184.57	38.13	146.44	79.34
	10	81.66	90.79	-9.13	-11.18	206.67	38.13	168.54	81.55
12	1	74.29	92.93	-18.64	-25.09	188.93	38.13	150.80	79.82
	2	73.77	92.93	-19.16	-25.97	188.18	38.13	150.05	79.74
	3	83.97	92.93	-8.96	-10.67	212.19	38.13	174.06	82.03
	4	79.70	92.93	-13.23	-16.60	201.42	38.13	163.29	81.07
	5	74.12	92.93	-18.81	-25.38	187.98	38.13	149.85	79.72
	6	72.51	92.93	-20.42	-28.16	184.43	38.13	146.30	79.32
	7	71.99	92.93	-20.94	-29.09	183.56	38.13	145.43	79.23
	8	85.56	92.93	-7.37	-8.61	216.99	38.13	178.86	82.43
	9	72.74	92.93	-20.19	-27.76	185.43	38.13	147.30	79.44
	10	75.77	92.93	-17.16	-22.65	192.36	38.13	154.23	80.18

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักษุเทพ ตี้กุล เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551