การค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

VLC ASSISTED ANT COLONY OPTIMIZATION ROUTING METHOD FOR WAREHOUSE

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-230-110

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

VLC ASSISTED ANT COLONY OPTIMIZATION ROUTING METHOD FOR WAREHOUSE

T148688

กฤษณ์ ศรีวิลาศ
KRIT SRIVILAS

สจพ.
เลขทะเบียน 148688
วัน.เดือน.ปี 14 พ.ย. 2560

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-230-110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VLC ASSISTED ANT COLONY OPTIMIZATION ROUTING METHOD FOR WAREHOUSE

KRIT SRIVILAS

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-230-110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

Thesis Title VLC Assisted Ant Colony Optimization Routing Method for Warehouse

นักศึกษา นายกฤษณ์ ศรีวิลาศ

รหัสประจำตัว 56601108

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-230-110

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.โสมสิริ	จันทรสกุล	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	หล่าสกุล	
ผศ.ดร.สุธีรา	พันธุ์ธีรานุรักษ์	
รศ.ดร.ปิติเขต	สู้รักษา	
ผศ.ดร.พนารัตน์	เชิญถนอมวงศ์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้
นักศึกษา	นายกฤษณ์ ศรีวิลาศ
รหัสประจำตัว	56601108
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เนื่องจากหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการบริหารจัดการคลังสินค้าคือการหยิบสินค้า เป็นขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลามากที่สุดซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการดำเนินงาน นอกจากนี้ในกรณีที่เกิดความแออัดในการหยิบสินค้าเนื่องจากมีผู้หยิบสินค้าหลายคนยิ่งส่งผลให้การใช้เวลาในการดำเนินงานสูงขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการใหม่ในการค้นหาเส้นทางในการหยิบสินค้าสำหรับกรณีมีผู้หยิบสินค้าหลายคน โดยใช้วิธีการค้นหาเส้นทางแบบวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ การทดลองที่ใช้ในการวิจัยกำหนดให้พื้นที่คลังสินค้าเป็นแบบหลายช่องทางเดินในคลังสินค้าวัสดุก่อสร้างแห่งหนึ่ง ซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมนี้สามารถที่จะลดเวลาในการดำเนินงานกรณีที่เกิดความแออัดภายในคลังสินค้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	VLC assisted Ant Colony Optimization Routing Method for Warehouse
Student	Mr.Krit Srivilas
Student ID.	56601108
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Panarat Cherntanomwong

ABSTRACT

One of the most important factors for warehouse management is order picking since it is the most time consuming operation contributing to the overall warehouse operational cost. Moreover, if the picking congestion occurs when there are multiple order pickers, the consumed picking time will increase. Therefore, this paper presents the new routing algorithm to reduce the picking time for multiple pickers. The proposed routing algorithm is based on an Ant Colony Optimization (ACO) assisted with the indoor positioning supported by the Visible Light Communication (VLC) system. To validate the proposed algorithm, the experiment is done in the multiple-block picker-to-part warehouse of the construction material supplier. The experimental results show that the proposed routing algorithm is able to reduce the travelling time leading to reduce the order picking time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ และแนวทางการแก้ปัญหาสำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และให้คำแนะนำในสิ่งต่างๆซึ่งล้วนแต่มีประโยชน์กับการศึกษา ขอขอบคุณพี่น้องพล น้องนก และน้องๆทุกคนในห้องแลป ที่ช่วยเหลือกันมาโดยตลอด

ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ คุณศศิธร กมลสุวรรณ ที่เป็นคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาสำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง

กฤษณ์ ศรีวิลาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูป XI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ 2

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา 2

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับงานวิจัย 3

2.1 กล่าวนำ 3

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับการจัดการคลังสินค้า 3

2.3 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับโปรแกรมระบบบริหารจัดการคลังสินค้า (WMS) 5

2.4 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling salesman problems) 6

2.5 ขั้นตอนวิธีระบบอาณานิคมมด 6

2.5.1 ประวัติวิธีระบบอาณานิคมมด 6

2.5.2 วิธีการค้นหาเส้นทางในการหยิบสินค้า (Routing methods in order-picking) 9

2.6 การระบุพื้นตำแหน่งในร่ม (Indoor positioning system) 12

2.7 พื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication) 13

2.7.1 วิธีการมอดูเลตในมาตรฐาน IEEE 802.15.7 14

2.7.1.1 วิธีการมอดูเลตแบบ OOK 18

2.7.1.2 การมอดูเลตแบบ VPPM 18

2.7.1.3 การมอดูเลตแบบ CSK 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.8 พื้นฐานฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบ 20
2.8.1 แอลอีดี 20
2.8.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ 21
2.8.3 การทำงานของมอสเฟต 23
2.8.4 พื้นฐานวงจรขยายสัญญาณ 24
2.8.4.1 การใช้งานออปแอมป์แบบเปิดวงรอบ (Open Loop) 25
2.8.4.2 โครงสร้างแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ (Non-inverting Configuration) 26
2.8.5 การออกแบบวงจรภาคส่ง 26
2.8.5.1 แบบวงจรภาคส่ง 27
2.8.5.2 การทำงานของซอฟแวร์ภาคส่ง 27
2.8.6 การออกแบบวงจรภาครับ 27
2.8.6.1 การออกแบบวงจรภาครับ 27
2.8.6.2 การทำงานของซอฟแวร์ภาครับ 27
2.9 การออกแบบซอฟแวร์ระบบ 27
2.10 การจัดเตรียมฮาร์ดแวร์สำหรับงานวิจัย 31
2.10.1 การจัดเตรียมฮาร์ดแวร์ภาครับ 31
2.10.2 การจัดเตรียมฮาร์ดแวร์ภาคส่ง 31

บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลองวิจัย 35
3.1 กล่าวนำ 35
3.2 การทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น 35
3.2.1 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน 35
3.2.2 ประสิทธิภาพของความจุในการส่ง (Transmission Capacity) 35
3.2.3 ประสิทธิภาพของอัตราความผิดพลาด 36
3.2.4 เปรียบเทียบการใช้แบนวิดท์ในการสื่อสาร 37
3.2.5 เปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล 37
3.2.6 สภาพแวดล้อมการวิจัย 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3 การทดลองวิจัยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้สำหรับการจัดการคลังสินค้า 38
3.3.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองวิจัย 38
3.3.2 ขอบเขตพื้นที่ทดลองงานวิจัย 38
3.4 การทดลองที่ 1 ทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นภายในคลังสินค้า 42
3.4.1 ระเบียบการทดลองวิจัย 42
3.4.2 การประมวลผลข้อมูลในการตรวจนับความผิดพลาดของแพคเกจข้อมูล 42
3.5 การทดลองที่ 2 ทดลองการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนของวิธีอาณานิคมมดเนื่องจากความหนาแน่น 43
3.6 การทดลองที่ 3 การค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ 44
3.6.1 ระเบียบการทดลองวิจัย 44
3.6.2 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง 45
3.6.3 วิธีการพิจารณาความหนาแน่นในการหยิบสินค้า 45

บทที่ 4 ผลการทดลองวิจัย 47
4.1 กล่าวนำ 47
4.2 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น 47
4.2.1 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบการใช้พลังงาน 48
4.2.2 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความจุในการส่ง 48
4.2.3 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัตราความผิดพลาด 48
4.2.4 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบการใช้แบนวิดท์ในการสื่อสาร 48
4.2.5 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล 50
4.3 ผลการทดลองวิจัยการค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ 51
4.3.1 ผลทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นภายในคลังสินค้า 51
4.3.2 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนของวิธีอาณานิคมมดเนื่องจากความหนาแน่น 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.3 ผลการทดลองวิธีการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้กรณีไม่มีการจัดการความหนาแน่น 57
4.3.3.1 กรณีรายการสินค้า 15 รายการ 57
4.3.3.2 กรณีรายการสินค้า 20 รายการ 62
4.3.3.3 กรณีรายการสินค้า 25 รายการ 66
4.3.4 ผลการทดลองวิธีการค้นหาเส้นทางด้วยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้กรณีมีการจัดการความหนาแน่น 71
4.3.4.1 กรณีรายการสินค้า 15 รายการ 71
4.3.4.2 กรณีรายการสินค้า 20 รายการ 76
4.3.4.3 กรณีรายการสินค้า 25 รายการ 80

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 94
5.1 สรุปผลการวิจัย 94
5.2 ข้อเสนอแนะ 94

เอกสารอ้างอิง 95

ภาคผนวก 97
ภาคผนวก ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 98

ประวัติผู้เขียน 110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การพัฒนาการของ ACO และ ผู้คิดค้น 7
ตารางที่ 2.2 การทำงานของ PHY I 16
ตารางที่ 2.3 การทำงานของ PHY II 17
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติกับ
ออปแอมป์ในทางปฏิบัติ 25
ตารางที่ 3.1 แสดงการทดลองหาค่าฟีโรโมน ที่ระยะเวลาการรอคอยต่างๆ 45
ตารางที่ 3.2 กำหนดรูปแบบการทดลอง 46
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจขอรถเข็นสินค้าคันที่ 1 51
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจขอรถเข็นสินค้าคันที่ 2 51
ตารางที่ 4.3 แสดงระยะทางที่ใช้ในการทดสอบโดยซอฟแวร์ 53
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย 54
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีพบระยะเวลาการรอคอย
5 วินาทีในช่องทางที่ 1 55
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีพบระยะเวลาการรอคอย
10 วินาที ในช่องทางที่ 1 56
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีพบระยะเวลาการรอคอย
20 วินาที ในช่องทางที่ 1 57
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 57
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ 59
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ 60
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 62
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 63
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 65
ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 67
ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ 68
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 69
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 71
ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ 73
ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ 75
ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 76
ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 78
ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 82
ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ 83
ตารางที่ 4.25 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 84
ตารางที่ 4.26 สรุปผลการทดลองกรณี 15 รายการสินค้า 89
ตารางที่ 4.27 สรุปผลการทดลองกรณี 20 รายการสินค้า 90
ตารางที่ 4.28 สรุปผลการทดลองกรณี 25 รายการสินค้า 91
ตารางที่ 4.29 ระยะเวลารวมการทดลองกรณี 15 รายการสินค้า 92
ตารางที่ 430 ระยะเวลารวมการทดลองกรณี 20 รายการสินค้า 92
ตารางที่ 4.31 ระยะเวลารวมการทดลองกรณี 25 รายการสินค้า 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการกิจกรรมพื้นฐานในคลังสินค้า 4
รูปที่ 2.2 การจำลองการหาอาหารของมด 9
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการประมวลผลแบบวิธีอาณานิคมมด 11
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนพิจารณาความหนาแน่นโดยใช้ระยะเวลาการรอคอย 12
รูปที่ 2.5 ความไม่เป็นเชิงเส้นของสายตามนุษย์ในสภาวะแสงที่เปลี่ยนไป 14
รูปที่ 2.6 แผนผังการมอดูเลตแบบพัลส์ 17
รูปที่ 2.7 แผนภาพการส่งแบบ OOK ในรูปแสดงถึงบิตที่ส่งจากชั้นข้อมูลที่สูงกว่า โดยทำการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาดและรักษาระดับสัญญาณ DC 18
รูปที่ 2.8 พื้นฐานการทำงานของ VPPM ซึ่งคล้ายกัน 2-PPM ตามที่แสดงใน (a) สำหรับ 50 เปอร์เซ็นต์ของการมองเห็น และการปรับรอบสัญญาณ (duty cycle) โดยใช้ PWM ในระดับอื่นแสดงใน (b) 18
รูปที่ 2.9 รูปแบบสัญญาณของ VPPM ในระดับ 75 เปอร์เซ็นต์ 19
รูปที่ 2.10 แผนภาพการส่งข้อมูลแบบ VPPM แสดงถึงบิตที่ส่งจากชั้นข้อมูลที่สูงกว่า 19
รูปที่ 2.11 ระนาบของสี CIE1931 บนพิกัด xy เมื่อ x และ y เป็นค่าโครมาติซิตี้ พื้นที่นอกเส้นโค้งเป็นความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นนาโนเมตร ค่าสามหลักเป็นจุดศูนย์กลางของความยาวคลื่นของเจ็ดแถบสีที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.15.7 19
รูปที่ 2.12 แผนภาพของการมอดูเลตแบบ CSK สำหรับ PHY III ข้อมูลจะถูกแยกส่วนเพื่อที่จะสุ่มค่าก่อนทำการเข้ารหัสและเชื่อมโยงกับค่าความเข้มแสงจากนั้นจึงส่งความยาวคลื่นไปยังแหล่งกำเนิดแสงทั้งสาม 20
รูปที่ 2.13 ขาการเชื่อมต่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA48V-10PU 23
รูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ของ ออปแอมป์ 24
รูปที่ 2.15 วงจรเทียบเท่าออปแอมป์ 24
รูปที่ 2.16 การต่อไฟเลี้ยงบวกและลบให้แก่ออปแอมป์ 25
รูปที่ 2.17 วงจรเปรียบเทียบแรงดันกำหนดให้แรงดันตกคร่อมที่ภาคขาออกของออปแอมป์ ขณะที่อิ่มตัวเป็นศูนย์โวลต์ 26
รูปที่ 2.18 วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ (a) และวงจรเทียบเท่า (b) 26
รูปที่ 2.19 แบบวงจรภาคส่ง ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น 27
รูปที่ 2.20 วงจรภาคส่ง 28
รูปที่ 2.21 การทำงานของซอฟต์แวร์ภาคส่ง 28
รูปที่ 2.22 แบบวงจรภาครับ ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ 29
รูปที่ 2.23 วงจรภาครับ ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ 29
รูปที่ 2.24 การทำงานของซอฟต์แวร์ภาครับ 29
รูปที่ 2.25 การทำงานของซอฟต์แวร์ระบบ 30
รูปที่ 2.26 หน้าจอแสดงผลซอฟต์แวร์ฝั่งเซิฟเวอร์ 30
รูปที่ 2.27 หน้าจอแสดงผลซอฟต์แวร์ฝั่งไคลเอนต์ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.28 การติดตั้งวงจรภาครับและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์พกพาบนรถเข็นสินค้า 1 31
รูปที่ 2.29 การติดตั้งวงจรภาครับและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์พกพาบนรถเข็นสินค้า 2 32
รูปที่ 2.30 การติดตั้งวงจรภาคส่งกับหลอดแอลอีดีขนาด 15 วัตต์ 32
รูปที่ 2.31 การติดตั้งวงจรภาคส่งกับหลอดแอลอีดีขนาด 15 วัตต์ 33
รูปที่ 3.1 ผังการสื่อสารในการเปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดการผิดพลาดของข้อมูล 37
รูปที่ 3.2 ภาพสถานที่ใช้ทำการทดลอง 38
รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการติดตั้งภาคส่งในบริเวณคลังสินค้าในจุดน้ำเงิน 39
รูปที่ 3.4 คลังสินค้าวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการทดลอง 39
รูปที่ 3.5 คลังสินค้าวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการทดลอง 40
รูปที่ 3.6 คลังสินค้าวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการทดลอง 40
รูปที่ 3.7 จุดติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่ง 41
รูปที่ 3.8 จุดติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่ง 41
รูปที่ 3.9 วิธีการทดลองหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลในระดับแพคเกจ 42
รูปที่ 3.10 การประมวลผลข้อมูลความผิดพลาดของแพคเกจ 43
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการสุ่มข้อมูลสินค้าในแต่ละช่องทางเดิน 45
รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์ภาครับที่ติดตั้งบนรถเข็นสำหรับหยิบสินค้า 46
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน 47
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุในการส่งข้อมูล 48
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตระหว่าง OOK VPPM และ CSK 49
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้แบนวิดท์ระหว่าง OOK VPPM และ CSK 50
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบวิธีการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดแบบ Reed-Solomon กับ Convolutional code 50
รูปที่ 4.6 ภาพการทดลอง การหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจ 1 51
รูปที่ 4.7 ภาพการทดลอง การหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจ 2 52
รูปที่ 4.8 ภาพการทดลอง การหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจ 3 53
รูปที่ 4.9 ระยะทางจากจุด DEPOT ไปยังจุดต่างๆ 53
รูปที่ 4.10 เส้นทางเดินกรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย 53
รูปที่ 4.11 กราฟค่าของฟีโรโมนในกรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย 54
รูปที่ 4.12 เส้นทางเดินกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 5 วินาทีในช่องทางที่ 1 54
รูปที่ 4.13 กราฟค่าของฟีโรโมนในกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 5 วินาทีในช่องทางที่ 1 55
รูปที่ 4.14 เส้นทางเดินกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 10 วินาทีในช่องทางที่ 1 55
รูปที่ 4.15 กราฟค่าของฟีโรโมนในกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 10 วินาทีในช่องทางที่ 1 56
รูปที่ 4.16 เส้นทางเดินกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 20 วินาที ในช่องทางที่ 1 56
รูปที่ 4.17 กราฟค่าของฟีโรโมนในกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 20 วินาที ในช่องทางที่ 1 57
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 58
รูปที่ 4.20 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 59
รูปที่ 4.21 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ..... 60
รูปที่ 4.22 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ 60
รูปที่ 4.23 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ 60
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ..... 61
รูปที่ 4.25 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ 61
รูปที่ 4.26 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ 62
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ..... 62
รูปที่ 4.28 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 63
รูปที่ 4.29 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 63
รูปที่ 4.30 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ..... 64
รูปที่ 4.31 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 64
รูปที่ 4.32 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 65
รูปที่ 4.33 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ..... 65
รูปที่ 4.34 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 66
รูปที่ 4.35 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 66
รูปที่ 4.36 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ..... 67
รูปที่ 4.37 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 67
รูปที่ 4.38 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 68
รูปที่ 4.39 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ..... 68
รูปที่ 4.40 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ 69
รูปที่ 4.41 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ 69
รูปที่ 4.42 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ..... 70
รูปที่ 4.43 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 70
รูปที่ 4.44 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 71
รูปที่ 4.45 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ..... 72
รูปที่ 4.46 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 72
รูปที่ 4.47 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ 73
รูปที่ 4.48 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ..... 73
รูปที่ 4.49 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ 74
รูปที่ 4.50 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ 74
รูปที่ 4.51 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ..... 75
รูปที่ 4.52 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ 75
รูปที่ 4.53 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ 76

เอกสารนี้มีการสงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.54 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 76
รูปที่ 4.55 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 77
รูปที่ 4.56 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ 77
รูปที่ 4.57 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 78
รูปที่ 4.58 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 78
รูปที่ 4.59 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 79
รูปที่ 4.60 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 79
รูปที่ 4.61 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 80
รูปที่ 4.62 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ 80
รูปที่ 4.63 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 81
รูปที่ 4.64 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 81
รูปที่ 4.65 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ 82
รูปที่ 4.66 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ 82
รูปที่ 4.67 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ 83
รูปที่ 4.68 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ 83
รูปที่ 4.69 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 84
รูปที่ 4.70 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 84
รูปที่ 4.71 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ 85
รูปที่ 4.72 การทดลองกรณี 15 รายการสินค้า 1 85
รูปที่ 4.73 การทดลองกรณี 15 รายการสินค้า 2 86
รูปที่ 4.74 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า 1 86
รูปที่ 4.75 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า 2 87
รูปที่ 4.76 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า 3 87
รูปที่ 4.77 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า 4 87
รูปที่ 4.78 การทดลองกรณี 25 รายการสินค้า 1 88
รูปที่ 4.79 การทดลองกรณี 25 รายการสินค้า 2 88
รูปที่ 4.80 การทดลองกรณี 25 รายการสินค้า 3 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การหยิบสินค้าเป็นขั้นตอนหนึ่ง ในการค้นหาสินค้าจากพื้นที่เก็บที่กำหนดให้เป็นไปตามรายการที่ลูกค้าต้องการ โดยทั่วไปขั้นตอนนี้เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินงานในคลังสินค้า เนื่องจากใช้เวลาเป็นส่วนใหญ่ในการทำงาน ซึ่งถ้าการหยิบสินค้าใช้เวลามาก จะส่งผลกระทบโดยตรงกับความล่าช้าในการจัดส่งสินค้าถึงลูกค้า ดังนั้นการลดเวลาในการดำเนินงานในขั้นตอนการหยิบสินค้าจึงจำเป็นอย่างยิ่ง โดยในการหยิบสินค้าประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนซึ่งส่งผลต่อเวลาการดำเนินงาน เช่นการเดินทางระหว่างพื้นที่เก็บสินค้า การค้นหาสินค้า การหยิบสินค้า และการจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ โดยจากขั้นตอนทั้งหมดการเดินทางระหว่างพื้นที่เก็บสินค้าใช้เวลามากกว่า 50 เปอร์เซนต์ในการทำงานทั้งหมด นอกจากนั้นแล้ว เวลาที่ใช้ในการดำเนินงานยังส่งผลต่อต้นทุนแรงงานที่สูญเสียไป ดังนั้นการลดเวลาในการเดินทางระหว่างพื้นที่เก็บสินค้าเป็นส่วนที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการหยิบสินค้า โดยระบบการหยิบสินค้านั้น ระยะทางเป็นส่วนที่สำคัญต่อเวลาการทำงาน วิธีทั่วไปที่ใช้ในการลดระยะการเดินทางนั้นคือใช้วิธีการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุด โดยในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ระบบบริหารจัดการคลังสินค้าแบบเรียลไทม์ ร่วมกับระบบค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดที่สามารถปรับตัวได้แบบอาณานิคมมด ในการเลือกเส้นทางในการหยิบสินค้า [1] ซึ่งมีความหยืดหยุ่นสูง วิธีอาณานิคมมดนั้นรองรับการทำงานแบบหลายเส้นทาง และพิจารณาคุณภาพของเส้นทางนั้นผ่านขั้นตอนฟีโรโมน [2]

เพื่อที่จะลดระยะทางของผู้หยิบสินค้าโดยใช้วิธีการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งจะพิจารณาทีละรายการสินค้า ในทางปฏิบัติแล้วจะมีหลายผู้หยิบทำงานพร้อมๆกันภายในพื้นที่เดียว ซึ่งจะทำให้เกิดความแออัดขึ้น เมื่อผู้หยิบต้องการที่จะเข้าไปหยิบสินค้าในช่องทางเดินเดียวกัน พร้อมๆกัน ในงานวิจัย [1], [3] ได้ใช้การค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบอาณานิคมมดสำหรับหลายผู้หยิบซึ่งพิจารณาความหนาแน่นนั้น โดยงานวิจัยงานวิจัย [3] ผู้วิจัยได้สรุปว่าเทคนิคที่นำเสนอนั้นได้ระยะเวลาที่สั้นที่สุด และทำงานได้ดีในการรับมือกับความหนาแน่น โดยผลการวิจัยถูกทำอยู่ในรูปแบบของการจำลอง และในงานวิจัย [1] ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบอาณานิคมมดแบบออนไลน์สำหรับหลายผู้หยิบสินค้าและพิจารณาความหนาแน่น โดยเส้นทางเริ่มต้นนั้นจะถูกกำหนดจากอัลกอริทึมแบบอาณานิคมมด และเส้นทางนี้จะถูกกระจายไปยังผู้หยิบอื่นๆ ตามตำแหน่งที่อยู่ปัจจุบัน และ เป้าหมายที่ต้องการหยิบ โดยใช้วิธีการหาตำแหน่งแบบพื้นที่ในร่ม ร่วมกับเทคโนโลยีการแชร์ข้อมูล โดยได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์และสรุปผลว่าสามารถที่จะลดระยะเวลาในการดำเนินงานและสามารถรับมือกับความหนาแน่นได้ อย่างไรก็ตาม ยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เช่นตำแหน่งปัจจุบันและการเลือกเป้าหมายต่อไปนั้น ถูกพิจารณาด้วยวิธีการใด

ในคลังสินค้าเป็นพื้นที่ในร่มซึ่งปกติจะมีการเปิดระบบแสงสว่าง โดยปัจจุบันเทคโนโลยีแอลอีดี นั้นมีราคาถูกลงมากซึ่งเข้ามาทดแทนเทคโนโลยีแบบ หลอดเรืองแสง และหลอดไส้ ในการใช้เป็นระบบให้แสงสว่าง และมีเทคโนโลยีที่เรียกว่าการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งใช้แอลอีดีเป็นแหล่งกำหนดแสงในการส่งข้อมูล [4], [5] ดังนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้สามารถที่จะลดต้นทุนในการพัฒนาระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งระบบแสงสว่างนั้นได้ถูกติดตั้งอยู่แล้วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบัน มากกว่านั้นยังไม่ต้องมีในส่วนของใบอนุญาต ปลอดภัยต่อร่างกาย และไม่มีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาระบบกวนระบบรอบข้าง

ดังนั้นงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดแบบใหม่ ร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เพื่อรับมือกับความหนาแน่นจากหลายผู้หยิบสินค้า โดยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งปัจจุบันของผู้หยิบสินค้า ซึ่งทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าช่องทางเดินในการหยิบสินค้าในแต่ละช่องว่างอยู่หรือไม่ โดยเทคโนโลยีนี้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบไร้สายเพื่อระบุตำแหน่ง เนื่องจากใช้แอลอีดีที่มีการติดตั้งอยู่แล้ว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบระบบบริหารจัดการสินค้าร่วมกับการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด

1.2.2 พัฒนาระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ที่เหมาะสมการใช้งานภายในพื้นที่คลังสินค้า

1.2.3 เพื่อพัฒนาเทคนิคการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดร่วมกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

1.2.4 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

1.2.5 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพระบบการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดร่วมกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยพิจารณาความหนาแน่น และใช้ผู้หยิบสินค้าหลายคน

1.3 หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดร่วมกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยพิจารณาความหนาแน่น และใช้ผู้หยิบสินค้าหลายคน

1.3.2 ผู้วิจัยได้นำเสนอการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น ทำงานร่วมกับระบบบริหารจัดคลังสินค้า

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนของการศึกษาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย หลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบอาณานิคมมด และทฤษฎีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

บทที่ 3 บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัย วิธีการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดร่วมกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยพิจารณาความหนาแน่น

บทที่ 4 บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย และผลการวิเคราะห์ วิธีการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมดร่วมกับระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยพิจารณาความหนาแน่น

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับงานวิจัย

2.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยเริ่มตั้งแต่ความสำคัญของการจัดการคลังสินค้าซึ่งเป็นเหตุจูงใจในการทำงานวิจัยนี้ การนำซอฟต์แวร์บริหารจัดการคลังสินค้ามาใช้งาน ทฤษฎีปัญหาในการจัดการเส้นทางเดิน ประวัติความเป็นมาของวิธีค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด วิธีการหลีกเลี่ยงความหนาแน่นที่งานวิจัยนี้นำเสนอ ประเภทการระบุพื้นตำแหน่งในร่ม ทฤษฎีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ พื้นฐานฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสง และการออกแบบซอฟต์แวร์ระบบที่ใช้ในการทดลอง โดยเนื้อหาทั้งหมดเป็นพื้นฐานและทฤษฎีในการพัฒนาระบบเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับการจัดการคลังสินค้า

การจัดการคลังสินค้า เป็นกิจกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อ การจัดการโลจิสติกส์โดยผ่านกิจกรรมย่อยๆ เกี่ยวกับการบริหารจัดการคลังสินค้า [6] อาทิการเลือกประเภท การเลือกขนาด การเลือกทำเลที่ตั้ง การวางผังคลังสินค้า การวางแผนการเคลื่อนย้ายสินค้าภายในคลังสินค้า รวมทั้งการนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาใช้ในการบริหารคลังสินค้า เป็นต้น ซึ่งระบบการจัดการคลังสินค้าที่มีประสิทธิภาพจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อองค์กรดังนี้

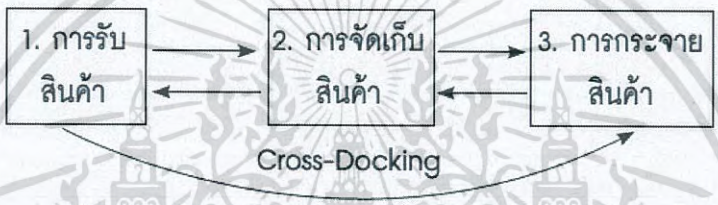
- ทำให้มีการเก็บสะสมวัตถุดิบไว้ในคลังสินค้า และมีจำนวนที่เพียงพอต่อการผลิต และไม่ทำให้การผลิตหยุดชะงัก
- ทำให้มีการกระจายสินค้าออกสู่ตลาดจากผู้ผลิตสู่ผู้บริโภค โดยผู้ผลิตจะเก็บสินค้าสำเร็จรูปไว้ในคลังสินค้าเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป
- เป็นที่เก็บรักษาและสะสมพัสดุสำหรับธุรกิจบริการที่ไม่ จำเป็นต้องเก็บวัตถุดิบในการผลิตสินค้าอย่างไรก็ตามธุรกิจบริการ ก็จำเป็นต้องมีคลังสินค้าไว้เก็บพัสดุ และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินธุรกิจ
- เป็นที่ให้เครดิตกับธุรกิจ กล่าวคือ ผู้ฝากสินค้าที่อยู่ในคลังสินค้าสาธารณะ สามารถนำสินค้านั้นเป็นหลักประกันในการกู้ยืมจากสถาบันการเงิน เช่น ธนาคาร เป็นต้น
- เป็นที่สำหรับให้หน่วยงานของรัฐใช้สำหรับสะสม หรือเก็บรักษาสินค้าที่รัฐบาลต้องการเข้าไปแทรกแซงราคาตลาดสินค้าบางชนิด เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ยางพารา เป็นต้น เพื่อรักษาระดับราคาให้กับเกษตรกร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำให้ประหยัดค่าขนส่ง ในกรณีที่เป็นสินค้าสำเร็จรูปเพื่อรอนำไปจำหน่ายต่อ จะนำสินค้านั้นมารวมที่คลังสินค้าก่อนซึ่งจะทำให้มีการประหยัดค่าขนส่งมากกว่าที่ผู้ผลิตส่งไปที่ร้านจำหน่ายสินค้าโดยตรง

กระบวนการที่สำคัญในการจัดการคลังสินค้า

โดยปกติแล้วคลังสินค้ามีเป้าหมายที่สำคัญคือเป็นสถานที่พักในการเคลื่อนที่ของสินค้าผ่านโซ่อุปทานจนถึงลูกค้าปลายทางซึ่งมีกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญในการบริหารคลังสินค้า 3 กระบวนการประกอบด้วย การรับสินค้า การจัดเก็บสินค้า และการกระจายสินค้า ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.1 กระบวนการกิจกรรมพื้นฐานในคลังสินค้า [6]

- การรับสินค้า ประกอบด้วยกิจกรรม เช่น การขนถ่าย สินค้าจากพาหนะที่นำเข้าคลังสินค้า การตรวจนับสินค้าให้ตรงกับจำนวนที่สั่งซื้อ รวมทั้งการรับสินค้าคืนจากลูกค้า เป็นต้น การรับสินค้าจึงเป็นกิจกรรมพื้นฐานของทุกคลังสินค้าสำหรับการเป็นสถานที่พักสินค้า ถ้ามีการบริหารจัดการการรับสินค้าที่ดี องค์การ จะมั่นใจได้ว่า มีสินค้าเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า ไม่ว่าลูกค้าจะอยู่ส่วนใดของโซ่อุปทานก็ตาม
- การจัดเก็บสินค้า กิจกรรมในการจัดเก็บสินค้า เช่นการวางแผนการเก็บรักษาสินค้าให้มีประสิทธิภาพ การรวบรวมสินค้าที่ได้รับจากการขนส่งจำนวนน้อยหลายๆ ครั้งเข้าด้วยกันเพื่อรวมเป็นสินค้า ขนาดใหญ่ การแยกสินค้าให้มีจำนวนที่เล็กลง (break bulk) เป็นต้น ผู้บริหารควรมีการจัดการการจัดเก็บสินค้าที่ดี เพื่อลดต้นทุนการจัดเก็บ (storage cost) อันจะทำให้ลดต้นทุนขององค์การได้ นอกจากนี้ การจัดเก็บรักษาสินค้าทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มในสินค้า (value added) เมื่อไปถึงปลายทาง
- การหยิบสินค้า เมื่อคลังสินค้าได้รับใบสั่งสินค้าจากลูกค้า (order) เจ้าหน้าที่คลังสินค้าจะต้องออกไปหยิบสินค้าที่กำหนดไว้ตามคำสั่งซื้อ สินค้าอาจอยู่กระจัดกระจายในพื้นที่ต่าง ๆ หลังจากหยิบแล้วจะนำกลับมาที่จุดรับของหรือจุดส่งของ โปรแกรมจะทำการประมวลผลข้อมูลจากฐานข้อมูลและจัดเรียงลำดับก่อนหลังการหยิบ สินค้าตามเงื่อนไขที่กำหนด
- การกระจายสินค้า เป็นกิจกรรมที่ผู้บริหารต้องวางแผนเพื่อให้การกระจายสินค้าตรงตามคุณภาพ(right quality) ตรงตามจำนวน (right quantity) ตรงตามเวลา (right time) ตรงตามสถานที่(right place) และตรงตามเงื่อนไข (right condition) ที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งจะทำ

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ได้ระดับการบริการที่ดีอย่างสม่ำเสมอโดยการกระจายสินค้ามีกิจกรรมที่สำคัญ เช่น การส่งสินค้าให้ผู้ขาย การโอนสินค้าจากคลังสินค้าหนึ่งไปยังอีกคลังสินค้าหนึ่งภายในองค์การเดียวกัน เป็นต้น การกระจายสินค้ายังมีความสัมพันธ์กับงานด้านอื่นๆ อีกด้วย เช่น ด้านการขนส่ง (transportation) ด้านสินค้าคงคลัง (inventory management) เป็นต้น

2.3 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับโปรแกรมระบบบริหารจัดการคลังสินค้า (WMS)

ระบบบริหารคลังสินค้า เป็นระบบที่ครอบคลุมการจัดการทุกอย่างในคลังสินค้า [7] ตัวอย่างเช่น การรับสินค้าด้วยเอกสารการรับสินค้า และจัดพิมพ์แผ่นสติกเกอร์แสดงที่เก็บสินค้าและการสร้างเอกสารรายการหยิบสินค้าเพื่อจัดส่ง เป็นต้น การจัดการของระบบบริหารคลังสินค้าก่อให้เกิดประโยชน์มากมาย เช่น การควบคุมปริมาณการสต๊อกสินค้าดีขึ้น ความสามารถในการติดตามย้อนรอยระดับประสิทธิภาพสูงขึ้น และระบบการรายงานเพื่อผู้บริหารที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมโยงระบบบริหารคลังสินค้าเข้ากับระบบการสั่งซื้อสินค้า และสามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้ ตัวอย่างเช่น ระบบสั่งซื้อสินค้าบนเว็บที่ใช้สำหรับการซื้อของจากที่บ้าน ระบบบริหารคลังสินค้าจะเชื่อมโยงตั้งแต่จุดของการรับคำสั่งซื้อจนกระทั่งถึงการจัดสินค้าเพื่อการจัดส่ง รวมทั้งเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบบัญชีการเงินและระบบควบคุมลูกหนี้ด้วย เป็นต้น

กิจกรรมการรับสินค้า เป็นการตรวจสอบแบบอัตโนมัติโดยการสแกนข้อมูลบนตัวสินค้า กิจกรรมการจัดเก็บสินค้า เป็นการระบุตำแหน่งจัดเก็บแบบอัตโนมัติ กิจกรรมการจัดสินค้าเพื่อเตรียมจัดส่ง เป็นการจัดสินค้าตามลำดับความเร่งด่วน การจัดสินค้าตามระลอกของการหยิบสินค้า การยืนยันการจัดสินค้าแบบเรียลไทม์และการช่วยให้เกิดการเติมเต็มสินค้าได้โดยอัตโนมัติ กิจกรรมการจัดส่ง เป็นการจัดลำดับและการวางแผนการบรรทุก การตรวจสอบแบบอัตโนมัติโดยการสแกนข้อมูลบนตัวสินค้าก่อนส่ง ในกิจกรรมเหล่านี้ แต่ละกิจกรรมจะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบอัตโนมัติ ซึ่งทำให้เกิดกลไกการตรวจสอบในตัวเอง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การเก็บรวบรวมข้อมูลแบบอัตโนมัติ เป็นส่วนสำคัญที่สุดของระบบบริหารคลังสินค้า เพราะกลไกนี้คือการตรวจสอบเพื่อยืนยัน และตรวจสอบความถูกต้องในตัวเอง จึงช่วยป้องกันไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดที่อาจพบได้จากการตรวจสอบโดยคน

ในการพิจารณาระบบบริหารคลังสินค้ามาใช้ในหน่วยงานนั้นผู้ใช้และผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดต้องกำหนดขอบเขตของปัญหาร่วมกัน ในประเด็นต่อไปนี้ ความถูกต้องแม่นยำของสินค้าคงคลัง การลดความผิดพลาดจากการทำงาน ผลิตภาพและการบริหารทรัพยากร การบริการลูกค้า การลดปริมาณการทำงานโดยใช้เอกสาร การจัดการและการควบคุมข้อมูลรวมทั้งต้องมีความเข้าใจในกิจกรรมของคลังสินค้าทั้งภายในตัวกิจกรรมเอง และความเชื่อมโยงระหว่างกิจกรรมบนพื้นฐานการทำงานแบบเดิมที่ปฏิบัติโดยคนเป็นอย่างดี การติดตั้งระบบบริหารคลังสินค้าโดยที่ยังมีความสับสนในการทำงาน จะทำให้ไม่ได้รับประโยชน์จากระบบอัตโนมัติของระบบบริหารคลังสินค้าอย่างที่ควรจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling salesman problems)

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (traveling salesman problem: TSP) [8] เป็นที่รู้จักกันใน นามของปัญหา ทีเอสพี (TSP) เป็นหนึ่งในปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานในการพัฒนาวิธีการในการหาคำตอบให้ดีและเร็ว โดยปัญหา TSP นี้เป็นปัญหาที่ทำการตัดสินใจหาเส้นทางการเดินทางเมื่อมีเมืองหรือสถานที่ที่ต้องเดินทางไปจำนวน N เมือง หรือ N สถานที่ การเดินทางจะเดินทางจากเมืองใดเมืองหนึ่งในจำนวน N เมือง โดยเส้นทางการเดินทางนั้นๆ จะต้องเดินทางผ่านเมืองทุกเมืองใน N และกลับมาที่เมืองที่ทำการเริ่มต้นในการเดินเหมือนการเดินวนรอบ เช่นพนักงานขายเดินทางไปขายสินค้าให้กับลูกค้าจำนวน 10 รายได้แก่เมือง 1 ถึงเมือง 10 โดยเมืองที่ 4 เป็นที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าของพนักงานขายรายนี้ พนักงานขายรายนี้จะเดินทางเริ่มต้นจากเมืองที่ 4 แล้วเดินไปตามเส้นทางดังนี้ 4-1-10-2-9-3-8-7-5-6-4 ซึ่งเป็นการเดินทางจากเมืองที่ 4 ต่อด้วยการเดินทางไปเมืองที่ 1 และ 10 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งลูกค้าทุกรายในจำนวน 10 รายได้รับการเยี่ยมเยียนจากพนักงานขายแล้วพนักงานขายก็ย้อนกลับมาที่เมืองที่ 4 เช่นเดิม โดยปัญหา TSP นี้แยกย่อยออกเป็นปัญหาต่างๆ อีกมากมาย

ปัญหา TSP เป็นปัญหาที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัย เริ่มต้นการพัฒนาปัญหา TSP เกิดขึ้นในช่วง คศ. 1800 โดยนักคณิตศาสตร์ชาวไอแลนด์ ชื่อ W.R.Hamilton และชาวอังกฤษชื่อ Thomas Kirkman ได้สร้างเกมส์ที่ชื่อว่า Icosian ซึ่งพัฒนามาจากพื้นฐานของเกมส์ puzzle ซึ่งเกมส์นี้ ผู้เล่นจะต้องหาวงกลมฮามิโทเนียน (Hamitonian cycle) จากนั้นในช่วง คศ.1930, Karl Menger ชาวเวียนนาได้พัฒนาวิธีการเดินทางจากเมืองที่ใกล้ที่สุดหรือเมืองพรมแดน (nearest neighbour heuristics)

2.5 ขั้นตอนวิธีระบบอาณานิคมมด

2.5.1 ประวัติวิธีระบบอาณานิคมมด

วิธีระบบอาณานิคมมดเป็นขั้นตอนวิธีที่ได้แนวคิดมาจากพฤติกรรมการหาอาหารของมด ซึ่งมดจะค้นหาเส้นทางสั้นที่สุดระหว่างแหล่งอาหารกับรังของมัน [9] ระหว่างที่เดินทางไปกลับระหว่างแหล่งอาหารและรังมดจะทิ้งหลักฐานที่เรียกว่าฟีโรโมน (Pheromone) ไว้บนพื้นเมื่อจะตัดสินใจเลือกทางเดินก็จะเลือกเส้นทางที่มี ฟีโรโมน หนาแน่นมากกว่า การทำงานของขั้นตอนวิธีระบบอาณานิคมมดมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของการทำงาน คือการกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปแบบกราฟ (construction graph) เนื่องจากเส้นทางที่เดินผ่านกราฟอย่างสมบูรณ์จะแทนผลเฉลยของปัญหา

ขั้นตอนวิธีระบบอาณานิคมมด ที่ได้นำเสนอครั้งแรกเรียกว่าระบบมด (Ant System; AS) ซึ่งการทำงานโดยทั่วไป คือ ถ้ากำหนดให้ A แทนเซตของมดทุกตัวและ Sa แทนผลเฉลยที่ถูกสร้างโดยมด เริ่มตนการทำงานจะมีการกำหนดค่าระดับฟีโรโมนให้เท่ากันทุกเส้นทางที่ค่าต่ำ ๆ ค่าหนึ่ง (ph > 0) มดทุกตัวจะสร้างผลเฉลยโดยการเพิ่มส่วนประกอบเข้าไปทีละส่วนในรูปแบบของการเดินทางผ่านไปตามเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดของกราฟ ส่วนประกอบถัดไปที่จะถูกเพิ่มเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลยในระบบมด จะใช้กฎการเลือกเส้นทาง (state transition rule) ซึ่งจะมีพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องใช้ร่วมในการพิจารณาคือ ค่าฟีโรโมน และข้อมูลที่ใช้ในการแก้ปัญหา (heuristic information) เช่น ในกรณีการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem; TSP) ค่าฟีโรโมนก็จะเป็นระดับฟีโรโมน ระหว่างเมือง 2 เมือง (ซึ่งได้มาจากการปรับปรุงค่าจากการทำงานในรอบที่ผ่านมา) ส่วนข้อมูลที่ใช้ในการแก้ปัญหาก็คือระยะทางระหว่างเมือง 2 เมือง และเมื่อมดทุกตัวได้สร้างผลเฉลยเสร็จสมบูรณ์แล้วก็จะมีการปรับปรุงค่า ฟีโรโมน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่า ฟีโรโมนให้กับส่วนประกอบของผลเฉลยที่พบว่ามีคุณภาพดี จากนั้นก็จะมีการวนรอบการทำงานซ้ำจนกระทั่งเงื่อนไขที่กำหนดให้หยุด เช่น เวลาที่กำหนดไว้สูงสุด จำนวนรอบสูงสุด หรือเมื่อผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

มีตัวอย่างของงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ ACO [10] คือ Socha et al. นำ MAX-MIN Ant System (MMAS) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ปรับปรุงจาก ACO โดย Stutzle and Hoos ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสอนซึ่ง Socha al. ก็ได้นำเสนอตารางกราฟ (construction graph) และรูปแบบฟีโรโมนที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหา ขณะที่ Dorigo and Gambardella (1997) ใช้ Ant Colony System (ACS) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ปรับปรุงจาก ACO ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายโดยเปรียบเทียบการทำงานกับขั้นตอนวิธีที่มีการเลียนแบบธรรมชาติอื่นๆ พบว่าส่วนใหญ่แล้ว ACS ให้ผลการทำงานที่ดีกว่า

ตารางที่ 2.1 การพัฒนาการของ ACO และ ผู้คิดค้น [10]

วิธีการ	ผู้คิดค้น
Ant system (AS)	Dorigo, Maniezzo and Colonies(1991)
Elitist ant system (EAS)	Dorigo, Maniezzo and Colonies(1992)
Rank – Based ant system (AS-rank)	Bullnheimer,Harlt and Strauss(1997)
Max-Min ant system (MMAS)	Stutzle and Hoos(1997)
Ant colony system (ACS)	Dorigo and Gambardella(1997)

ระบบมด (Ant system)

ระบบมดได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นโดย [11] Marco Dorigo และคณะซึ่งที่จริงแล้วระบบมดเดิมได้มีอยู่ 3 แบบด้วยกันคือ Ant-density, Ant-quantity และ Ant-cycle (Dorigo et al., 1991; Dorigo and Stutzle, 2004) ระบบ Ant-density และระบบ Ant- quantity นั้นจะมีการอัพเดทสารฟีโรโมนทันทีขณะที่เดินทางจากโหนดหรือเมือง (Node or city) ไปยังเมืองขณะที่ระบบ Ant-cycle นั้นจะอัพเดทสารฟีโรโมนหลังจากที่มดเดินทางครบทุกเมืองแล้ว โดยที่ปริมาณของสารฟีโรโมนที่จะอัพเดทนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ต่อระยะทางหรือคุณภาพของผลเฉลยที่ได้ ท้ายที่สุดแล้วระบบ Ant-density และระบบ Ant-quantity ก็ไม่ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาต่อไปอีก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการหาผลเฉลยหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทางที่น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบ Ant-cycle ดังนั้นในปัจจุบันเมื่อกล่าวถึงระบบมดก็คือระบบ Ant-cycle นั่นเอง

ระบบมดแบบ Elitist (Elitist ant system)

ระบบมดแบบ Elitist เกิดจากการพัฒนาระบบมดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยเรียกการพัฒนานี้ว่า Elitist strategy โดยนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี 1992 โดย Dorigo โดยที่ส่วนการทำงานเริ่มต้นจะเหมือนกับระบบมดแต่จะเพิ่มในส่วนของการเก็บค่าดีที่สุดของแต่ละรอบการคำนวณ (Best so far tour) เพื่อการเพิ่มร่องรอยฟีโรโมน (Update pheromone trail) โดยจะเก็บค่าที่ดีที่สุดของรอบการคำนวณที่หนึ่งแล้ว Update pheromone ซึ่งเส้นทางที่เป็น Best so far tour จะมีพจน์ที่เพิ่มขึ้นมาเพื่อทำให้เส้นทางที่เป็น Best so far tour จะมีปริมาณฟีโรโมนมากกว่าเส้นทางที่มดผ่านปกติทั่วไป (โดยที่เส้นทางที่มดผ่านตัวอื่นจะใช้สมการระบบมด)

ระบบมดแบบ Max-min (Max-min ant system)

ระบบมดแบบ Max-min ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี 1997 โดย Stutzle กับ Hoos โดยที่ทั้งสองคนได้พัฒนามาจากระบบมดซึ่งไปปรับปรุงสี่เรื่อง ดังนี้

- อย่างแรก คือค่าของพจน์ที่เพิ่มขึ้นมาจะมีค่าเป็นหนึ่งส่วนระยะทางก็ต่อเมื่อเป็นรอบที่ดีที่สุดของรอบการคำนวณนั้น ส่วนที่ไม่ใช่เส้นทางที่ดีที่สุดรอบ
- อย่างที่สอง คือการกำหนดช่วงของฟีโรโมนให้อยู่ในช่วงที่สมการกำหนด เพื่อที่เราจะได้จำกัดขอบเขตของเส้นทางที่ดีที่สุดเพียงหนึ่งช่วงเท่านั่น ทำให้หาเส้นทางที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว
- อย่างที่สาม คือค่าฟีโรโมนเริ่มต้นจะมีค่าตัวแปรการระเหยของปริมาณฟีโรโมนไว้ในตอนแรกเลย ซึ่งตรงจุดนี้ก็เป็นอีกจุดหนึ่งที่ Max-Min Ant System ต่างจากระบบมด
- สุดท้าย ถ้าปริมาณฟีโรโมนเริ่มต้น เริ่มมีค่าคงที่หรือไม่มีการเพิ่มขึ้นแล้วก็จะสร้างจำนวนรอบที่แน่นอนสำหรับการคำนวณครั้งต่อไป

ระบบมดแบบ Rank-base (Rank-base ant system)

ระบบมดแบบ Rank-base เป็นอีกตัวหนึ่งที่พัฒนามาจากระบบมดโดยถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Bullnheimer ในปี 1999 โดยที่ (Rank-base ant system: AS-Rank) จะวางจำนวนฟีโรโมนลดลงตามลำดับเส้นทางที่มดเดินผ่าน เช่น เส้นทางที่ดีที่สุดจะมีพจน์ที่เพิ่มขึ้นในสมการมีค่ามากที่สุดเพื่อให้เกิดฟีโรโมนของรอบใหม่มากที่สุดใส่ลำดับกันลงมาซึ่งจะแตกต่างจาก Elitist ant system ที่จะมีพจน์ที่เพิ่มค่า Best so far tour เพียงค่าเดียว ซึ่งขั้นตอนต่างๆ นอกเหนือจากนี้จะเหมือนกับระบบมดและ Elitist ant system ส่วนที่เพิ่มขึ้นมา โดยที่ตัวแปร w จะเป็นค่าที่จัดเก็บลำดับ โดยส่วนใหญ่จะมีค่า w = 6 และค่า r เป็นค่า Rank ของมด โดยถ้า Rank ของมดมากจะทำให้ปริมาณฟีโรโมนลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบอาณานิคมมด (Ant colony system)

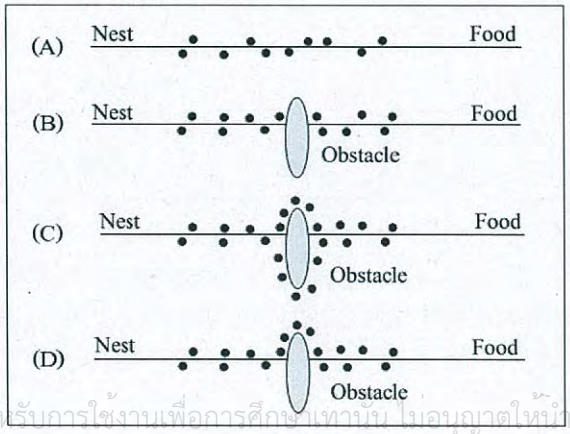
ระบบอาณานิคมมด (Ant colony system: ACS) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของ ระบบมด โดยการปรับปรุงครั้งนี้ต่างจากทุกครั้งที่ผ่านมากล่าวคือ การปรับปรุงครั้งนี้ไม่ได้อยู่บนพื้นฐานของระบบมดอีกต่อไป โดยสร้างกลไกการทำงานใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ACS ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1997 โดย Dorigo และ Gambardella โดยที่มีความต่างจากระบบมดสามหลักการใหญ่ๆ คือ

- ACS จะพัฒนาในส่วนของการจำเส้นทางในการเดินของมด โดยจะทำให้มดมีประสบการณ์ในการจำเส้นทางมากขึ้นและจะมีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกเส้นทางมากขึ้นด้วย
- การระเหยฟีโรโมนและการวางฟีโรโมนจะทำในส่วนที่เป็นเส้นทางที่ดีที่สุดเท่านั้น
- ในแต่ละเส้นทางที่มดเดินผ่านไปนั้น มดจะเอาฟีโรโมนออก เพื่อที่จะทำให้เกิดการเพิ่มเส้นทางหรือโอกาสในการเลือกเส้นทางอื่น

2.5.2 วิธีการค้นหาเส้นทางในการหยิบสินค้า (Routing methods in order- picking)

การกำหนดปัญหาในงานวิจัยจะเป็นการหาลำดับและเส้นทางที่ดีที่สุดในรายการของการหยิบสินค้าภายใต้รูปแบบของคลังสินค้าและวิธีการทำงานที่กำหนด การเพิ่มประสิทธิภาพในค้นหาเส้นทางนั้นจะทำได้โดยเช่น การลดระยะทางในการเดินทางทั้งหมด การลดระยะเวลาการทำงาน หรือการลดต้นทุนของเครื่องมือการขนถ่ายทั้งหมด (Material handling) ซึ่งอัลกอรึทึมหนึ่งที่ถูกใช้ในการหาคำตอบคือ วิธีการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบวิธีอาณานิคมมด (ACO)

วิธีการค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบวิธีอาณานิคมมด (ACO) โดยพฤติกรรมธรรมชาติของมดจะพยายามหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากรังไปยังแหล่งของอาหาร โดยมดจะอาศัยสารเคมีที่เรียกว่าฟีโรโมน [12] ที่มดแต่ละตัวก่อนหน้านี้ปล่อยลงบนพื้น และเมื่อมดตัวหลังเดินตามมาก็จะปรับปรุงฟีโรโมนนี้ลงไปบนพื้นอีก ซึ่งเหตุนี้เองฟีโรโมนจึงเป็นข้อมูลที่สำคัญในการหาเส้นทางจากแหล่งอาหารกลับไปยังรัง ซึ่งอธิบายพฤติกรรมของมดโดยใช้ข้อมูลเรื่องปริมาณของฟีโรโมนในการหาเส้นทางเดินจากรังไปยังแหล่งอาหาร จากรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 การจำลองการหาอาหารของมด [12]

รูปที่ 2.2 (A) มดเดินจากรังไปยังแหล่งอาหารตามเส้นทางปกติพร้อมปล่อยสารฟีโรโมนตามเส้นทาง หลังจากนั้นมีสิ่งกีดขวางมาขวางเส้นทางเดินของมด จากรูปที่ 2.2 (B) มดจะทำการสุ่มเส้นทางเดินไปทางด้านบน และด้านล่างพร้อมปล่อยสารฟีโรโมนตามเส้นทาง จากรูปที่ 2.2 (C) เมื่อเวลาผ่านไปมดจะทำการเลือกเส้นทางตามจำนวนฟีโรโมนที่มีความหนาแน่นตามที่มดตัวอื่นๆ ได้มีการปรับปรุงฟีโรโมนลงบนพื้นก่อนหน้านี้ดังภาพที่ 2.2 (D) และมดจะทำการเลือกเส้นทางเดินเส้นทางด้านบนตลอดไป

โครงสร้างของวิธีอาณานิคมมดแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ

2.5.2.1 กระบวนการกำหนดเส้นทางเดินของมด

ในระบบมดการที่จะสร้างเส้นทางเดินหรือสร้างคำตอบได้นั้น เริ่มแรกมดจะทำการสุ่มเลือกเมืองหรือโหนดเริ่มต้นขึ้นมาก่อนซึ่งการเลือกเมืองหรือโหนดแต่ละครั้งจะใช้กฎความน่าจะเป็น (Probability) ที่จะเลือกเมืองหรือโหนดถัดไปที่เรียกว่ากฎการสุ่มโดยใช้ความน่าจะเป็น (Random proportional rule) ซึ่งความเป็นไปได้ขณะที่มดอยู่เมืองนั้น จะเลือกเมืองถัดไปที่มดตัวที่ k ขณะที่อยู่เมือง x จะเลือกเมืองถัดไปที่ y ดังสมการที่ 2.1

$$p_{xy}^{k}=\frac{\left(\tau_{xy}^{\alpha}\right)\left(\eta_{xy}^{\beta}\right)}{\sum_{z}\in allowed_{x}\left(\tau_{xy}^{\alpha}\right)\left(\eta_{xy}^{\beta}\right)} \tag{2.1}$$

η_{xy} คือ ความน่าสนใจในการเดินทางจากโหนด x ไปยัง y โดยทั่วไปกำหนดให้เป็น $\frac{1}{d_{xy}}$

ซึ่ง d_{xy} คือ ระยะทางระหว่างโหนด x ไปยังโหนด y

τ_{xy} คือ ค่าฟีโรโมนทั้งหมดที่ถูกฝากไว้ในการเดินทางจากโหนด x ไปยัง y

$\alpha \geq 0$ คือค่าควบคุมอิทธิพลของตัวแปร τ_{xy}

$\beta \geq 1$ คือค่าควบคุมอิทธิพลของตัวแปร η_{xy}

2.5.2.2 การอัพเดทฟีโรโมน (Update pheromone)

เมื่อมดทุกตัวได้เดินทางครบทุกเมืองหรือโหนดแล้ว ก็จะสามารถที่จะหาค่าระยะทางทั้งหมดของมดแต่ละตัวได้แล้ว ซึ่งในระบบมด นั้นจะกำหนดให้มดแต่ละตัวมีการเพิ่มปริมาณฟีโรโมน (Update pheromone) บนเส้นทางของมดทุกๆตัวหลังจากที่ได้เดินทางผ่านเส้นทางนั้นๆมาพร้อมกับมีการระเหยของฟีโรโมนในทุกๆเส้นทางด้วย ซึ่งสมการการระเหยของฟีโรโมน ดังสมการที่ 2.2

$$\tau_{xy} \leftarrow (1-\rho)\tau_{xy}+\sum_{k}\Delta\tau_{xy}^{k} \tag{2.2}$$

τ_{xy} คือค่าฟีโรโมนทั้งหมดที่ถูกฝากไว้จากการเดินทางจาก x ไปยัง y

ρ คืออัตราการระเหยของฟีโรโมน

$\Delta\tau_{xy}^{k}$ คือค่าฟีโรโมนที่ถูกฝากไว้โดยมดตัวที่ k^{th} ซึ่งคำนวณจากสมการ 2.3

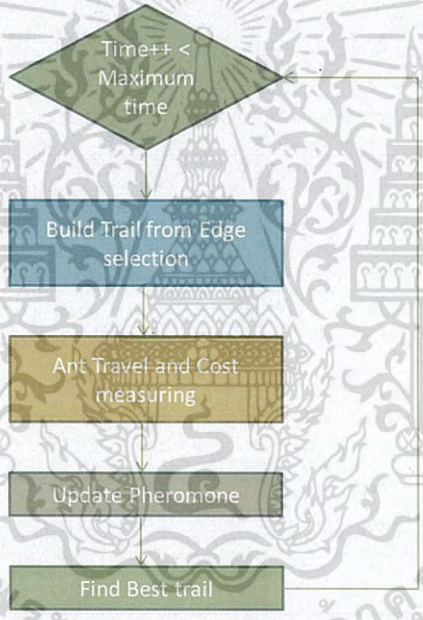
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\tau_{xy}^{k} = \begin{cases} \dfrac{Q}{L_k} & \text{ถ้ามดตัวที่ } k \text{ เดินอยู่ในระหว่างเมืองที่ติดกัน} \\ 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Q คือค่าคงที่กำหนดให้เป็นหนึ่ง

L_k คือระยะการเดินทางรวมของมดตัวที่ k

และวิธีอาณานิคมมดมีขั้นตอนการทำงานสรุปได้ดังรูปที่ 2.3 โดยเริ่มการการสร้างเส้นทางให้กับมดแต่ละตัว จากนั้นทำการเปรียบเทียบระยะทางที่ใช้ของมดแต่ละตัว โดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อทำการอัพเดทฟีโรโมนจากนั้นทำซ้ำเป็นจำนวนรอบตามที่กำหนดโดยคำตอบจะได้เป็นระยะทางที่สั้นที่สุดในระยะเวลาที่กำหนด

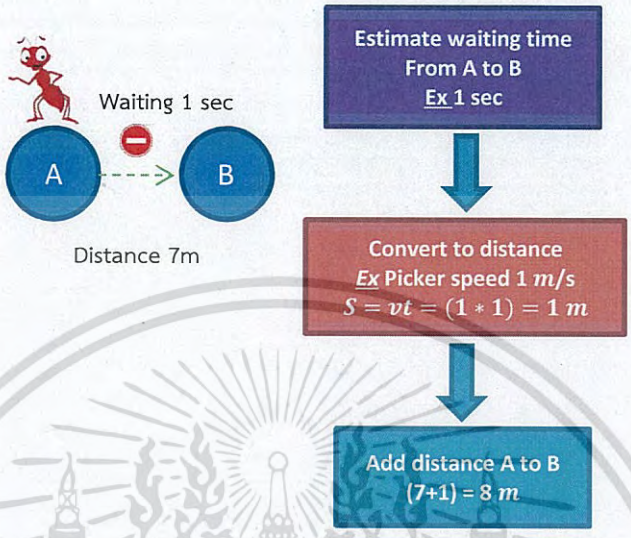


รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการประมวลผลแบบวิธีอาณานิคมมด

2.5.3 การหลีกเลี่ยงความหนาแน่น (Congestion consideration)

ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการพิจารณาต้นทุนในรูปของเวลาการรอคอย [13] เพิ่มเติมนอกจากระยะทางจากตารางกราฟ (construction graph) ซึ่งใช้ในการคำนวณในขั้นตอน กระบวนการกำหนดเส้นทางเดินของมด และการอัพเดทฟีโรโมน โดยเวลาการรอคอยจะถูกอัพเดทเข้าไปในตารางกราฟ เมื่อซอฟต์แวร์แสดงสถานะของผู้หยิบสินค้าตำแหน่งในบริเวณดังกล่าว ผ่านตำแหน่งตัวส่งสัญญาณการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ จะทำให้การค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดแบบอาณานิคมมดมีการนำความหนาแน่นเข้ามาพิจารณาร่วมด้วย โดยตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณจะนำระยะเวลาการรอคอยมาหาค่าระยะทางจากความเร็วของผู้หยิบสินค้าเฉลี่ยซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยสมมติให้เวลาในการรอคอยจากจุด A ไปยัง B เป็น 1 วินาที จากนั้นนำมาคำนวณหาระยะทางจากความเร็วเฉลี่ยในการเดิน 1 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะทางที่เพิ่มขึ้นจาก A ไปยัง B เป็น 1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างขั้นตอนพิจารณาความหนาแน่นโดยใช้ระยะเวลาการรอคอย

2.6 ระบบการระบุพื้นตำแหน่งในอาคาร (Indoor positioning system)

ระบบการระบุพื้นตำแหน่งในอาคาร (Indoor positioning system: IPS) เป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก [14] เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการให้บริการสำหรับมนุษย์และหุ่นยนต์อัตโนมัติเทคโนโลยีสามารถให้ข้อมูลตำแหน่งแก่ผู้ใช้และช่วยค้นหาสินค้าที่ต้องการในห้างสรรพสินค้า และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสถานที่บางแห่ง เช่นคลังสินค้า โรงพยาบาล ล็อบบี้สนามบิน ห้องนิทรรศการ และ พิพิธภัณฑ์

เทคโนโลยีจีพีเอสสามารถให้ข้อมูลตำแหน่งพื้นที่กลางแจ้งได้ดีเช่น การนำทาง การค้นหาจุดสนใจรอบๆบริเวณ รวมไปถึงจากแสดงความหนาแน่นของเส้นทางจราจร [15] อย่างไรก็ตามการระบุพื้นตำแหน่งในร่มยังเป็นข้อจำกัดของเทคโนโลยีจีพีเอสที่ไม่สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพเนื่องจากสัญญาณดาวเทียมถูกบดบังและลดทอนโดยผนัง ดังนั้นผู้ใช้ที่ใช้จีพีเอสในบ้านต้องเผชิญกับข้อผิดพลาดในตำแหน่งมาก รวมทั้งไม่สามารถเชื่อมต่อกับดาวเทียมจีพีเอสได้ทั้งหมด [16] เพื่อหลีกเลี่ยงสถานการณ์เช่นนี้ระบบตำแหน่งไร้สายในอาคารในปัจจุบันส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสองวิธี วิธีแรกคือเทคนิคการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) เช่น ZigBee, Ultra-Wideband (UWB), Bluetooth, Wi-Fi และการระบุความถี่วิทยุ (RFID) วิธีการเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลดทอนและเกิดปัญหามัลติพาธและมีเพียงความถูกต้องแม่นยำในระดับสิบเซนติเมตรไปถึงหลายเมตร [17] และนอกเหนือจากความแม่นยำที่ได้รับจากเทคโนโลยี RF แล้วยังเพิ่มการรบกวนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) และยังมีราคาแพงอีกด้วย

วิธีที่สองคือเทคนิคการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light communication: VLC) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถนำเสนอข้อดีหลายประการที่ไม่มีในวิธีอื่นๆ ประการแรก เทคโนโลยีVLC ใช้โครงสร้างพื้นฐานของโคมไฟที่มีอยู่แล้ว ซึ่งเกิดขึ้นจากไดโอดเปล่งแสงสีขาว (LED) ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ประการที่สองคลื่นแสงมีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RF ซึ่งไม่ค่อยได้รับผลกระทบที่เกิดจากปัญหาหลายเส้นทาง(multipath effect) ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เนื่องจากการลดทอนของสัญญาณจากปัญหามัลติพาธ เป็นเรื่องที่ส่งผลกระทบต่อการสื่อสาร และการวางตำแหน่งของเทคโนโลยีนี้จะให้ความแม่นยำสูงกว่า ประการที่สาม VLC-IPS สามารถรองรับฟังก์ชั่นส่องสว่างและระบุตำแหน่งได้พร้อมๆกัน สุดท้าย VLC ยังมีภูมิคุ้มกันต่อการแทรกแซงจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและไม่มีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสิ่งแวดล้อม จึงสามารถใช้ในสภาพแวดล้อมที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งต้องห้าม ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นระบบตำแหน่งในอาคารบนพื้นฐานของ VLC กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในวงการวิชาการและอุตสาหกรรม

2.7 พื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication: VLC)

VLC เป็นการสื่อสารทางแสงระยะสั้นในย่านความยาวคลื่น 380 ถึง 780 นาโนเมตร ส่งข้อมูลโดยการมอดูเลตความเข้มแสงของแหล่งกำเนิด โดยใช้อุปกรณ์ตัวอย่างเช่น หลอดแอลอีดี และเลเซอร์ไอโอด ซึ่งทำงานได้รวดเร็วกว่าการมองเห็นของมนุษย์ การหันกลับมาสนใจการสื่อสารทางแสงที่มองเห็นได้เนื่องจากการใช้งานอย่างแพร่หลายของแอลอีดี เนื่องจากประสิทธิภาพการใช้พลังงานและเทคโนโลยีขั้นสูงของแอลอีดีที่ใช้เวลาในการสลับการทำงานได้ในระดับนาโนวินาที การสื่อสารไร้สายผ่านคลื่นวิทยุแบบทั่วไปใช้ความถี่ต่ำกว่า 6 GHz แบนด์วิดท์จะถูกใช้หมดไปอย่างรวดเร็วสำหรับการสื่อสารความเร็วสูง แต่สำหรับ VLC มีแบนด์วิดท์ประมาณ 300 THz ซึ่งสามารถส่งข้อมูลในระดับ multi-gigabit-per-second ในระยะทางสั้นได้ ตัวอย่างเช่นการนิยมใช้แอลอีดีแบบอะเรย์ชนิด multiple-input multiple-output (MIMO) อย่างไรก็ตาม การสื่อสารนี้สามารถส่งข้อมูลได้ความเร็วระดับ กิกะบิต/วินาที เพียงใช้แอลอีดีธรรมดา กับไฟโต้ไดโอด ซึ่งดีกว่าเมื่อเทียบกับการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ ที่มีราคาสูงและต้องการพลังงานมากในการส่งข้อมูล สุ่มข้อมูล และประมวลผลในความเร็วระดับนี้

สิ่งที่ท้าทายสำหรับVLC คือการบรรเทาการสั่นไหว และการหรี่ของแหล่งกำเนิดแสง การสั่นไหวนั้นส่งผลถึงความผันผวนของความสว่างของแสง เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลตแหล่งกำเนินแสงที่ใช้ในการสื่อสาร โดยการสั่นไหวที่เห็นได้ชัดเจนนั้นส่งผลกระทบด้านลบต่อการมองเห็นของมนุษย์ เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นไหวที่เห็นได้ชัดเจน การเปลี่ยนแปลงความสว่างจะต้องอยู่ในช่วงเวลาที่มีการสั่นไหวสูงสุด (MFTP) ซึ่งเป็นระยะเวลาสูงสุดที่ความเข้มแสงสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยตามนุษย์ไม่รับรู้ การสั่นไหวที่ดีที่สุดต้องมากกว่า 200 Hz (MFTP < 5 มิลลิวินาที) โดยทั่วไปถือว่าปลอดภัย (เป็นค่าที่ยังมีการขัดแย้งอยู่) [18] ดังนั้นกระบวนการมอดูเลตจึงยังไม่มีข้อกำหนด สำหรับการการสั่นไหวที่เห็นได้ชัดเจนทั้งในเฟรมข้อมูลและระหว่างเฟรมข้อมูล คุณสมบัติรองรับการหรี่เป็นอีกข้อหนึ่งที่ต้องพิจารณาเนื่องจากช่วยให้ประหยัดพลังงานและเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังต้องรักษาการสื่อสารในขณะที่มีการหรี่แสง โดยที่ตามนุษย์ตอบสนองแสงน้อยโดยการขยายรูม่านตาซึ่ง

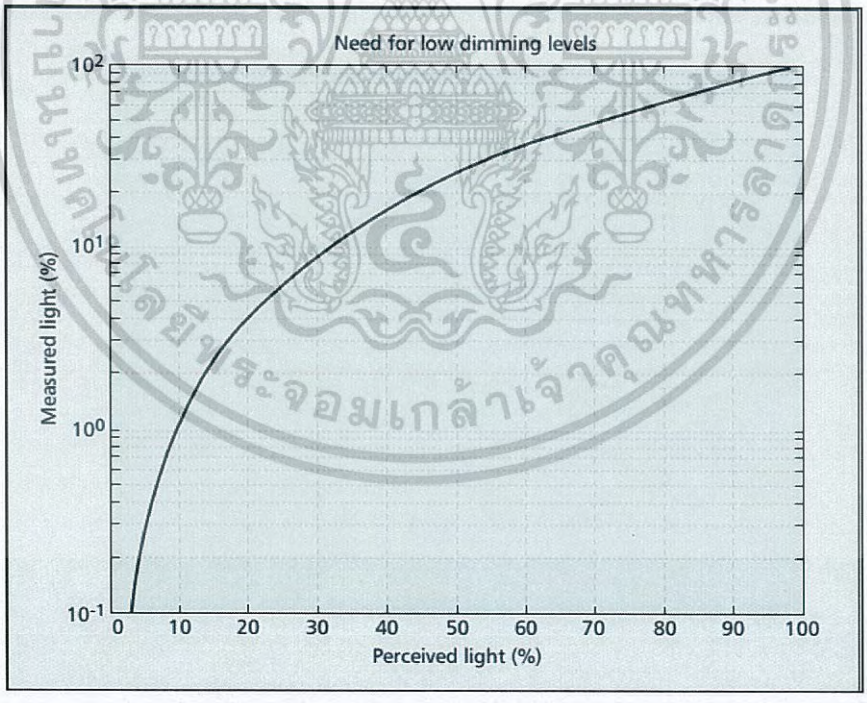
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยให้แสงเข้าสู่ตามากขึ้น การตอบสนองนี้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างการรับรู้และการวัดระดับของแสง โดยความสัมพันธ์ระหว่างการรับรู้และการวัดแสงที่ได้รับคือ

$$PerceivedLight(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{MeasuredLight(\%)}{100}} \qquad (2.4)$$

ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โคมไฟที่หรี่ความสว่างไป 10% ของปริมาณแสงที่ออกมา เป็นแสงที่รับรู้ได้ถูกหรี่ไป 32% ดังนั้นการสนับสนุนการสื่อสารที่รองรับการหรี่ของแหล่งกำเนิดแสงที่มีช่วงกว้าง ปกติจะอยู่ที่ 0.1-100 เปอร์เซ็นต์

VLC เป็นหัวข้อที่สนใจเป็นอย่างมากจากมหาวิทยาลัย บริษัทเอกชน และองค์กรทั่วโลก ในปี 2007 สมาคมอิเลคทรอนิคส์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ ของประเทศญี่ปุ่น (JEITA) ได้เริ่มกำหนดมาตรฐานสำหรับ “Visible light ID system” ในปี 2008 Visible Light Communication Consortium (VLCC) ได้กำหนดคุณสมบัติของมาตรฐาน VLC เป็นแห่งแรก และยังมีโครงการ The Home Gigabit Access project (OMEGA) ในยุโรปซึ่งพัฒนา VLC สำหรับเครือข่ายภายในบ้าน



รูปที่ 2.5 ความไม่เป็นเชิงเส้นของสายตามนุษย์ในสภาวะแสงที่เปลี่ยนไป [4]

2.7.1 วิธีการมอดูเลตในมาตรฐาน IEEE 802.15.7

มาตรฐาน IEEE 802.15.7 แบ่งลักษณ์ทางกายภาพออกเป็น 3 ประเภทสำหรับ VLC คือ PHY I ทำงานที่ความเร็ว 11.67 ถึง 266.6 กิโลบิต/วินาที PHY II ทำงานที่ความเร็ว 1.25 ถึง 96 เม

เอกสารนี้เป็น... ไม่สามารถ... ...การค้า

กะบิต/วินาที และ PHY III ทำงานที่ความเร็ว 12 เมกะบิต/วินาที และ 96 เมกะบิต/วินาที ใน PHY I และ PHY II ถูกกำหนดให้สำหรับแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยวซึ่งรองรับรูปแบบการมอดูเลตแบบออน-ออฟ คีย์อิงค์ (on-off keying: OOK) และ วีพีพีเอ็ม (variable pulse-position: VPPM) ส่วน PHY III ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งกับความถี่ที่ต่างกัน(ความถี่แสง) และรูปแบบการมอดูเลตแบบเฉพาะที่เรียกว่า color shift keying (CSK) ความแตกต่างของรูปแบบการมอดูเลตคือการที่ต้องเลือกระหว่างอัตราการส่งข้อมูลและช่วงของการหรี่ ตัวอย่างเช่นภายใต้เงื่อนไขการหรี่ของการมอดูเลตแบบ OOK จะให้ช่วงการหรี่ที่คงที่ แต่อัตราการส่งข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงจากการชดเชยเวลาขณะที่การมอดูเลตแบบ VPPM ให้อัตราการส่งข้อมูลคงที่ แต่ช่วงการหรี่มีการเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของลูกคลื่นที่ปรับตัว ซึ่งลักษณะทางกายภาพทั้ง 3 รูปแบบถูกสร้างขึ้นมาร่วมกันกับการบรรเทาการสั่นไหวและการหรี่ของแสง

รูปแบบของการทำงานแต่ละลักษณะทางกายภาพ (PHY) ประกอบด้วยกลไกสำหรับ มอดูเลตแหล่งกำเนิดแสง การเข้ารหัสข้อมูลแบบ run length limited (RLL line coding) และการเข้ารหัสช่องสัญญาณสำหรับแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลแบบเอฟอีซี (forward error correction: FEC) การเข้ารหัสข้อมูล RLL เป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาบิต 0 หรือ 1 ทำงานต่อเนื่องซึ่งเป็นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาการสั่นไหว และปัญหาการตรวจสอบ การกู้คืนข้อมูลสัญญาณนาฬิกา (Clock data recovery)

การเข้ารหัสข้อมูล RLL จะทำการสุ่มสัญลักษณ์บิตข้อมูลจากฝั่งอินพุต และรักษาระดับสัญญาณ DC ให้คงที่สำหรับบิต 0 และบิต 1 ทุกรูปแบบในฝั่งเอาต์พุต ตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูล RLL ที่ถูกกำหนดอยู่ในมาตรฐานคือ Manchester,4B6B และ 8B10B ซึ่งมีข้อดีข้อเสีย ระหว่างขนาดของรหัส (Coding overhead) และ ความสะดวกสบายในการนำไปใช้ มาตรฐาน IEEE 802.15.7 นั้นรองรับรูปแบบของ FEC แบบต่างๆได้ดีพอสมควร ภายใต้การทำงานของ CDR การเข้ารหัสช่องสัญญาณเฟรมข้อมูลยาวและสั้น โดยพิจารณาการใช้ ตัวอย่างเช่น สำหรับการใช้งานแบบในร่มที่มีข้อมูลอัตราเร็วสูง และการใช้งานแบบกลางแจ้งที่มีข้อมูลอัตราเร็วต่ำ สำหรับการใช้งานกลางแจ้ง การเข้ารหัสที่ดีจะใช้การตัดแบ่งเป็นรหัส RS และ CC ที่มีการพัฒนาเพื่อเอาชนะการสูญเสียเชิงวิถี (path loss) ซึ่งสัมพันธ์กับระยะทางในการรับส่งข้อมูล และ การที่สัญญาณถูกรบกวนจากแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆเช่นแสงอาทิตย์และแสงจากหลอดไฟนีออน การเข้ารหัสแบบอาร์เอส (Reed-Solomon: RS) และ ซีซี (Convolutional codes: CC) ต้องการกลไกการเข้ารหัสขั้นสูงเช่นการเข้ารหัสแบบแอลดีซีพี (low density parity check: LDPC) ซึ่งรองรับชุดข้อมูลที่สั้น ถอดรหัสได้ยาก มีความซับซ้อนต่ำ และสามารถเชื่อมต่อกับการเข้ารหัสแบบ RLL ได้ดี สำหรับการใช้งานในร่มจะใช้การเข้ารหัสที่ไม่ซับซ้อนมากสำหรับระยะทางสั้น การเข้ารหัส FEC แบบ RS นั้นเหมาะสมมากกว่าที่จะพัฒนาการส่งข้อมูลความเร็วสูง การเข้ารหัสแบบ RS ยังทำงานได้ดีกับการเข้ารหัสแบบ RLL ซึ่งข้อผิดพลาดที่ตรวจพบจาก RLL ข้อมูลที่รับได้จะถูกทำเครื่องหมายและปรับปรุงข้อมูลเพื่อที่จะถอดรหัส RS จึงทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น ประมาณ 1dB สำหรับ PHY I และการเข้ารหัสแบบ RS และแบบ CC สามารถทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นอีก 1 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละโหมดของ PHY จะมีการปรับอัตราสัญญาณนาฬิกาของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะมีการลดทอน(divided down) โดยการเข้ารหัสแบบต่างๆ ส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.2-2.3 โดยแต่ละโหมดมีรายละเอียดดังนี้

- PHY I กำหนดให้สัญญาณนาฬิกาของแหล่งกำเนิดแสงมีความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 400 เฮิรตซ์เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ (LED) เช่น สัญญาณไฟจราจร ต้องการกระแสสูงที่จะขับให้ LED ทำงาน ดังนั้นจึงทำให้การสลับการทำงานนั้นช้าลง
- PHY II กำหนดให้สัญญาณนาฬิกาของแหล่งกำเนิดแสงมีความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 120 เมกะเฮิรตซ์ โดยรองรับการทำงานของ LED ที่ทำงานอย่างรวดเร็วได้ เช่นที่ใช้ในโทรศัพท์มือถือ และอุปกรณ์สื่อสารพกพา
- PHY III กำหนดให้สัญญาณนาฬิกาของแหล่งกำเนิดแสงมีความถี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 24 เมกะเฮิรตซ์ จากการทำงานของแอลอีดีสีขาวที่มีในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.2 การทำงานของ PHY I [18]

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC		Data rate
			Outer code (RS)	Inner code (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	24.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	None	73.3 kb/s
			None	None	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	None	35.56 kb/s
			(15,4)	None	71.11 kb/s
			(15,7)	None	124.4 kb/s
			None	None	266.6 kb/s

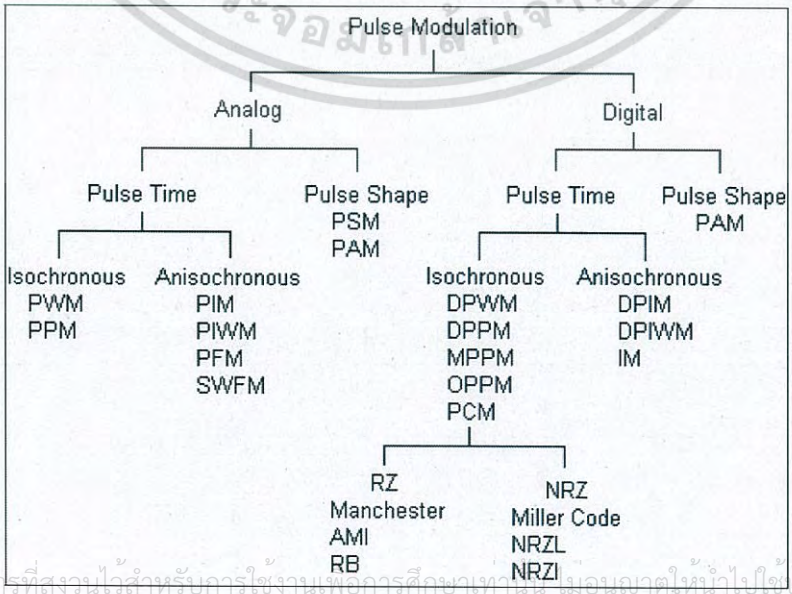
นอกจากนี้มาตรฐาน PHY ยังสนับสนุนการใช้ สัญญาณนาฬิกาของแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน ภายในอุปกรณ์เดียวกัน สำหรับการส่งและรับข้อมูล โดยวงจรฝั่งรับและฝั่งส่งเป็นอิสระต่อกัน โดยโครงสร้างสามารถสื่อสารกันที่อัตราสัญญาณนาฬิกาที่ต่ำกว่าโดยใช้ LEDs ที่ช้าแต่สว่างในขณะที่รับ อัตราสัญญาณนาฬิกาที่สูงกว่าจากอุปกรณ์พกพาที่มี LEDs ที่เร็วกว่าแต่ประสิทธิภาพการทำงานต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การทำงานของ PHY II [18]

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC	Data rate
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
			None	5 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	RS(64,32)	6 Mb/s
			RS(160,128)	9.6 Mb/s
		30 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
			RS(160,128)	19.2 Mb/s
		60 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
			RS(160,128)	38.4 Mb/s
		120 MHz	RS(64,32)	48 Mb/s
			RS(160,128)	76.8 Mb/s
			None	96 Mb/s

ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานเฉลี่ยสามารถสูงขึ้นได้ โดยวิธีการมอดูเลตซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ในช่วงเวลา เป็นตัวสื่อข้อมูลซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 โดยการจำแนกนี้ถูกแบ่งโดยรูปแบบของสเปกตรัม และความต่อเนื่องของสัญญาณสามารถแบ่งย่อยออกเป็น สัญญาณแบบต่อเนื่อง และสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในรูปแบบการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้จะเป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง เรียกว่า (Discrete digital pulse time modulation: PTM) ซึ่งแบบออกเป็นสองกลุ่มคือ Isochronous เป็นการเข้ารหัสข้อมูลตามตำแหน่งและความกว้างของสัญญาณ แต่โครงสร้างสัญลักษณ์จะคงที่ และ Anisochronous เป็นการเข้ารหัสแบบไม่ได้กำหนดสัญลักษณ์คงที่

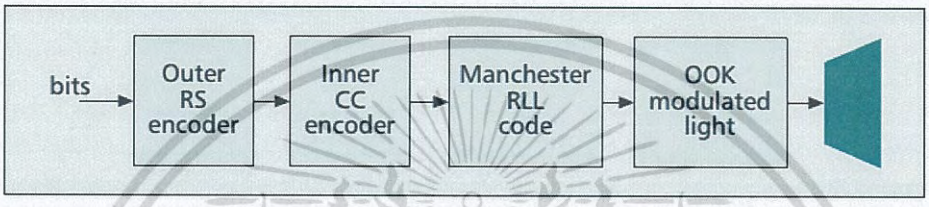


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 แผนผังการมอดูเลตแบบพัลส์ [19]

2.7.1.1 วิธีการมอดูเลตแบบ OOK

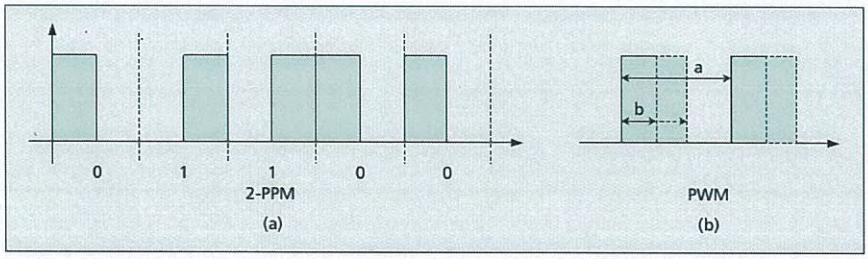
วิธีการมอดูเลตแบบ OOK เป็นรูปแบบมอดูเลตที่นิยมใช้งานในการสื่อสารด้วยแสงมากที่สุดเนื่องจากมีการทำงานที่ง่าย โดยตัวส่งสัญญาณจะส่งสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมในช่วงเวลา 1/Rb (Rb = Bit rate) และใช้พลังงานในการส่ง 2P (P: transmission power) เพื่อแสดงสัญลักษณ์ “หนึ่ง” และไม่ส่งสัญลักษณ์เป็นการแสดงสัญลักษณ์ “ศูนย์” แบนวิดท์ที่ใช้จะอยู่ที่ $R_b=1/T$ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับความกว้างของสัญญาณ โดยได้แสดงแผนภาพการส่งดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพการส่งแบบ OOK ในรูปแสดงถึงบิตที่ส่งจากชั้นข้อมูลที่สูงกว่า โดยทำการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาดและรักษาระดับสัญญาณ DC [4]

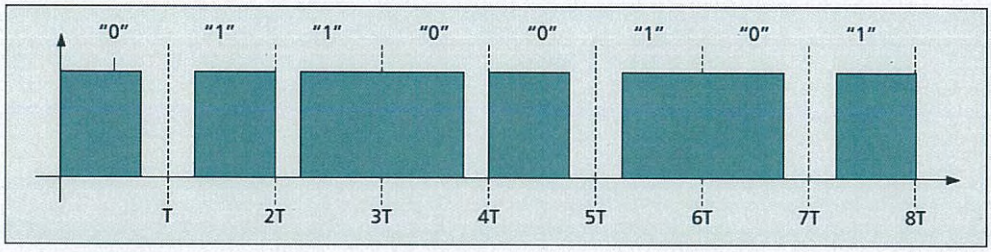
2.7.1.2 การมอดูเลตแบบ VPPM

ในกลุ่มมอดูเลต PTM การมอดูเลตแบบ pulse position modulation (VPPM) ได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยระยะห่างของแต่ละสัญลักษณ์จะอยู่ที่ $T=\log_2(L/R_b)$ โดยที่ L จะมีการเปลี่ยนไปตามแต่ละช่วงเวลา T/L ซึ่งตัวส่งสัญญาณจะส่งสัญลักษณ์ใดสัญลักษณ์หนึ่งในช่วงเวลานั้น โดยถ้า L มีค่ามากกว่า 2 การมอดูเลตแบบนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่าแบบ OOK โดยหลักการแล้วการใช้พลังงานของแหล่งกำเนิดแสงสามารถปรับได้จากขนาดของค่า L ที่เหมาะสมซึ่งจะช่วยเพิ่มแบนวิดท์ ความต้องการแบนวิดท์ของการมอดูเลตแบบ PPM จะขึ้นอยู่กับอัตราบิตเรท R_b ซึ่งเป็นส่วนกลับของระยะห่างระหว่างสัญลักษณ์ ($B=T/L$) ดังรูปที่ 2.8

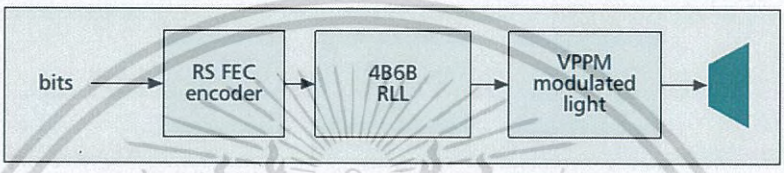


รูปที่ 2.8 พื้นฐานการทำงานของ VPPM ซึ่งคล้ายกัน 2-PPM ตามที่แสดงใน (a) สำหรับ 50 เปอร์เซ็นต์ของการมองเห็น และการปรับรอบสัญญาณ (duty cycle) โดยใช้ PWM ในระดับอื่นแสดงใน (b) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



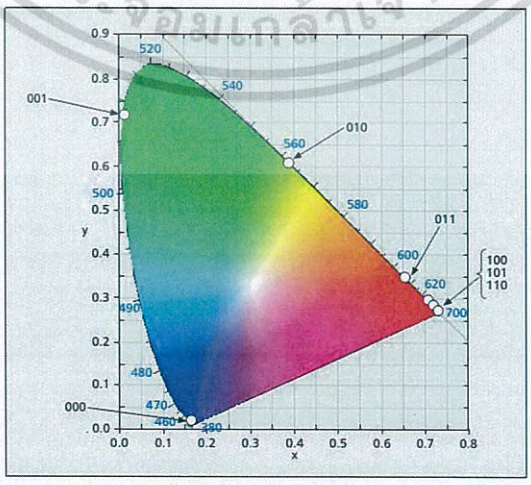
รูปที่ 2.9 รูปแบบสัญญาณของ VPPM ในระดับ 75 เปอร์เซ็นต์ [4]



รูปที่ 2.10 แผนภาพการส่งข้อมูลแบบ VPPM แสดงถึงบิตที่ส่งจากชั้นข้อมูลที่สูงกว่า [4]

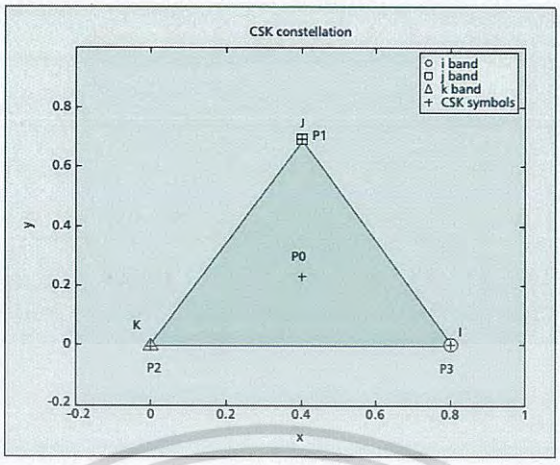
2.7.1.3 การมอดูเลตแบบ CSK

แสงสีขาวจากแอลอีดีถูกสร้างจากการผสมสีที่ต่างกันโดยทั่วไปมี 2 วิธี แอลอีดีสีขาวสามารถสร้างได้โดยการใช้ แอลอีดีสีฟ้ากับสารเรืองแสงสีเหลือง ซึ่งสารเรืองแสงนี้จะตอบสนองการเปลี่ยนแปลงช้า ทำให้แอลอีดีสีขาวสลับการทำงานช้า และอีกวิธีคือ การใช้แอลอีดีสีแดง เขียว และน้ำเงิน ผสมกันจะสามารถตอบสนองการทำงานได้ดีกว่า วิธีการมอดูเลตแบบ CSK คล้ายกับการมอดูเลตแบบเอฟเอสเค (Frequency shift keying: FSK) โดยที่รูปแบบของบิตนั้นถูกเข้ารหัสในรูปแบบของการรวมสี (wavelength) ซึ่งแสดงดังรูป 2.10 ถึง 2.11



รูปที่ 2.11 ระนาบของสี CIE1931 บนพิกัด xy เมื่อ x และ y เป็นค่าโครมาติซิตี้ พื้นที่นอกเส้นโค้งเป็นความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นนาโนเมตร ค่าสามหลักเป็นจุดศูนย์กลางของความยาวคลื่นของเจ็ดแถบสีที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.15.7 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือจำหน่ายในเชิงการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลบข้อความนี้ออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แผนภาพของการมอดูเลตแบบ CSK สำหรับ PHY III ข้อมูลจะถูกแยกส่วนเพื่อที่จะสุ่มค่าก่อนทำการเข้ารหัสและเชื่อมโยงกับค่าความเข้มแสงจากนั้นจึงส่งความยาวคลื่นไปยังแหล่งกำเนิดแสงทั้งสาม [4]

2.8 พื้นฐานฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

2.8.1 แอลอีดี

ไดโอดเปล่งแสง หรือแอลอีดี คือไดโอดที่สามารถเปล่งแสงออกมาได้ แสงที่เปล่งออกมาประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกัน ซึ่งต่างกับแสงธรรมดาที่ตาคนมองเห็น โดยหลอดแอลอีดีสามารถเปล่งแสงได้เมื่อจ่ายกระแสไฟเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างก็ยังดีกว่าหลอดไฟขนาดเล็กทั่วไป แอลอีดีมีลักษณะเหมือนไดโอดทั่วๆไปที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N ประกบกัน มีผิวข้างหนึ่งเรียบเป็นมันคล้ายกระจก เมื่อมีการให้ไบแอสตรงแก่ไดโอดจะทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อรวมกับโฮล (Hole) ใน P ก่อให้เกิดพลังงานในรูปของประจุโฟตอน ซึ่งจะแสดงแสงออกมา การนำแอลอีดีไปประยุกต์ใช้งานส่วนมาใช้ในภาคแสดงผล (LED Display) แอลอีดีโดยทั่วไปมีสองชนิดใหญ่ๆ คือ แอลอีดีชนิดที่ตาคนมองเห็นได้ กับชนิดที่ตาคนมองไม่เห็น ต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาเป็นตัวรับแสงแทน

จากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ ทำให้เทคโนโลยีของแอลอีดีก้าวหน้าอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ได้มีการนำแอลอีดีมาใช้ประโยชน์แพร่หลายมากขึ้น เช่น ในเครื่องคิดเลข สัญญาณจราจร ไฟท้ายรถยนต์ ป้ายสัญญาณต่างๆ ไฟฉาย ไฟให้สัญญาณของประภาคาร จอภาพยนต์ขนาดใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้น หน้าจอของโทรศัพท์มือถือ เกือบทั้งหมดจะให้แสงสว่างด้วยหลอดแอลอีดี

แอลอีดีนับเป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์แบบหนึ่งที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านและจะปล่อยแสงสว่างออกมา ความจริงแล้วแอลอีดีไม่ใช่เรื่องใหม่แต่อย่างใด โดยนักวิทยาศาสตร์ได้สังเกตมาตั้งแต่ปี 2450 ว่าเซมิคอนดักเตอร์จะเปล่งแสงออกมาเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อย่างไรก็ตามแสงที่เปล่งออกมามีปริมาณน้อยมาก จึงทำให้เทคโนโลยีนี้ไม่ได้รับความสนใจการนำเทคโนโลยีแอลอีดี มาใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์โดยเริ่มต้นขึ้นเมื่อนาย Nick Holonyak นักวิจัยแห่งบริษัท GE ประสบความสำเร็จเมื่อปี 2505 ในการประดิษฐ์แอลอีดีที่สามารถเปล่งแสงสีแดงที่มีความสว่างออกมามากพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ทั่วโลกเริ่มมีการตื่นตัววิจัยและพัฒนาในด้านนี้อย่างจริงจัง อย่างไรก็ตามแอลอีดีได้จากการวิจัยและพัฒนาในช่วงนั้นยังเปล่งแสงสว่างน้อยมาก จึงไม่สามารถนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ในรูปให้แสงสว่างได้แต่อย่างใด ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นปุ่มสัญญาณแสงสีต่างๆในอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นต้นว่า หลอดแอลอีดีขนาดเล็กเท่าหัวเข็มหมุดได้ติดตั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สัญญาณว่าเครื่องกำลังเปิดหรือปิด เดิมแสงจากแอลอีดีจะเป็นสีต่างๆไม่ได้เป็นสีขาว จึงมีข้อจำกัดในการนำมาให้แสงสว่างแทนหลอดไฟ สำหรับบุคคลสำคัญที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้คือ นาย Shuji Nakamura แห่งบริษัท Nichia Chemical ของญี่ปุ่น ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์แอลอีดีน้ำเงินที่มีความสว่างจ้า จากนั้นได้นำแอลอีดีสีน้ำเงินไปเคลือบด้วยสารเคลือบเรืองแสงสีเหลือง จะทำให้แสงจากแอลอีดีออกมากลายเป็นสีขาว สามารถนำไปใช้ในรูปให้แสงสว่าง โดยได้เริ่มวางตลาดแอลอีดีสีขาวนับตั้งแต่ปี 2536 เป็นต้นมา ปัจจุบันจากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ ทำให้เทคโนโลยีของแอลอีดีก้าวหน้าอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ได้มีการนำแอลอีดีมาใช้ประโยชน์แพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น ในเครื่องคิดเลข สัญญาณไฟจราจร ไฟท้ายรถยนต์ ป้ายสัญญาณต่างๆ ไฟฉาย จอภาพยนต์ขนาดใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้นหน้าจอของโทรศัพท์มือถือเกือบทั้งหมดให้แสงสว่างด้วยแอลอีดี ตัวอย่างของหลอดแอลอีดีได้แก่ หลอดซุปเปอร์ไบรท์แอลอีดี(Super Bright LED) หลอดสปอตไลท์แอลอีดี (Spotlight LED) และหลอดอัลตราไบรท์แอลอีดี(Ultra-Bright LED)

2.8.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ได้แก่ ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งทั้งหมดถูกบรรจุรวมเข้าไว้ภายใต้ตัวถังเดียวกัน

ซีพียูจะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านคำสั่งที่ระบุไว้ โดยต้องทำการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่า บัสแอดเดรส (address bus) แล้วทำการ อ่านข้อมูลคำสั่งออกมาจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกแอดเดรสนั้นๆจากนั้นทำการ ประมวลผลโดยมีหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นที่พักของข้อมูลที่อยู่ในระหว่างการประมวลผลข้อมูลในการประมวลผลจะส่งผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่าบัสข้อมูล (data bus) แล้วส่งต่อไปยัง อุปกรณ์ภายนอกผ่านทางขาพอร์ตอินพุต และพอร์ตเอาต์พุต

การทดลองวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ATMEGA48V-10PU ขอบริษัท ATMEL ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูง ใช้พลังงานต่ำ และราคาถูก

คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ATMEGA48V-10PU มีดังนี้

- ใช้สถาปัตยกรรมแบบ Advanced RISC
    - 131 powerful instructions – most single clock cycle execution
    - – 32 x 8 general purpose working registers
    - – Fully static operation
    - – Up to 20 MIPS throughput at 20MHz
    - – On-chip 2-cycle multiplier
- ใช้หน่วยความจำแบบ High endurance non-volatile memory segments

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

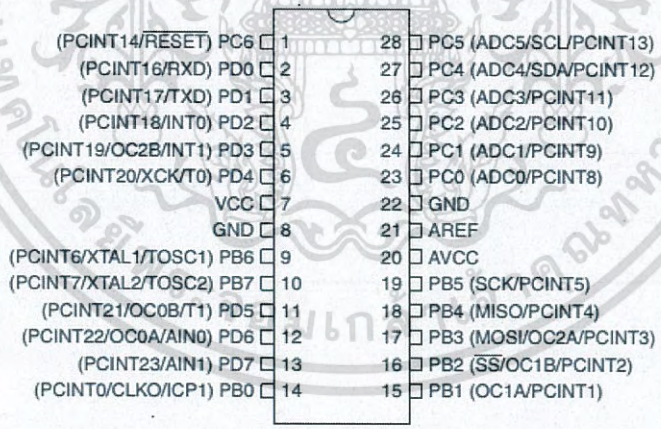
- – 4/8/16 Kbytes of in-system self-programmable flash program memory
- – 256/512/512 bytes EEPROM
- – 512/1K/1Kbytes internal SRAM
- – Write/erase cycles: 10,000 flash/100,000 EEPROM
- – Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C()
- – Optional boot code section with independent lock bits
- In-system programming by on-chip boot program
- True read-while-write operation
- – Programming lock for software security

- มีอุปกรณ์ต่อร่วมภายนอกดังนี้
  - Two 8-bit timer/counters with separate pre-scaler and compare mode
  - One 16-bit timer/counter with separate pre-scaler, compare mode, and capture mode
  - Real time counter with separate oscillator
  - Six PWM channels
  - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
  - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
  - Programmable serial USART
  - Master/slave SPI serial interface
  - Byte-oriented 2-wire serial interface (Philips I2C compatible)
  - Programmable watchdog timer with separate on-chip oscillator
  - On-chip analog comparator
  - Interrupt and wake-up on pin change
- จำนวนช่องอินพุต เอาต์พุต
  - – 23 programmable I/O lines
  - – 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โวลต์เทจในการทำงาน
  - 1.8V - 5.5V
- อุณหภูมิในการทำงาน
  - -40°C to 85°C
- ความเร็วในการประมวลผล
  - 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 10MHz @ 2.7V - 5.5V
- การใช้พลังงาน
  - – Active mode:
  - 250µA at 1MHz, 1.8V
  - 15µA at 32kHz, 1.8V (including oscillator)
  - – Power-down mode:
  - 0.1µA at 1.8V

ผังแสดงขาการเชื่อมต่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA48V-10PU ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ขาการเชื่อมต่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA48V-10PU [20]

2.8.3 การทำงานของมอสเฟต

การทำงานของมอสเฟตเป็นทรานซิสเตอร์ ที่ใช้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ออกไซด์ของโลหะในการทำส่วน GATE นิยมใช้ในวงจรดิจิตอล โดยนำไปสร้างลอจิกเกตต่างๆเพราะมีขนาดเล็กโครงสร้างของมอสเฟต ประกอบด้วยสามส่วน คือ

GATE เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า

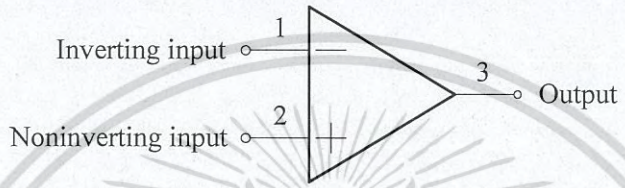
SOURCE เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ

DRAIN เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ

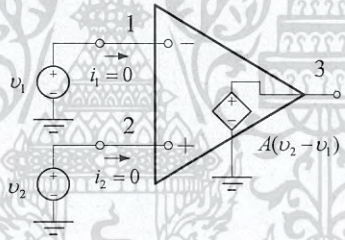
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 พื้นฐานวงจรขยายสัญญาณ

ตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ (Operational Amplifier: OPAMP) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ตอบสนองความถี่ได้กว้างตั้งแต่ DC จนถึงความถี่สูงหลายเมกกะเฮริตซ์ และมีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน สัญลักษณ์ของ ออปแอมป์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 โดยแรงดันที่ขา output เทียบกับกราวด์ในวงจรจะขึ้นอยู่กับผลต่างของแรงดันที่ขา inverting input และขา noninverting input ซึ่งรูปที่ 2.15 แสดงวงจรเทียบเท่าของ ออปแอมป์



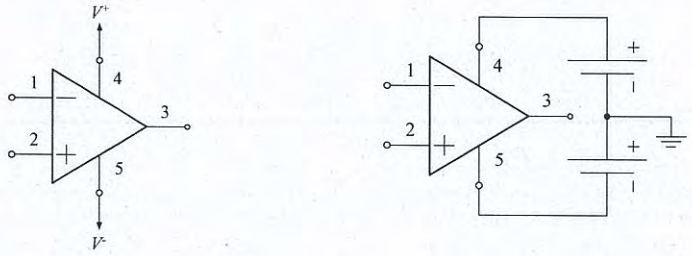
รูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ของ ออปแอมป์ [21]



รูปที่ 2.15 วงจรเทียบเท่าออปแอมป์ [21]

เพื่อให้ออปแอมป์ สามารถทำงานกับไฟ DC และ AC ได้จะต้องให้ไฟเลี้ยงบวกและลบดังรูปที่ 2.16 ออปแอมป์ ตัวแรกออกแบบโดยนาย C. A. Lovell ในห้องทดลองของ Bell Lab เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนปืนใหญ่ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยที่วงจรภายในสร้างขึ้นจากหลอดสุญญากาศจำนวนมาก ต่อมาในปี ค. ศ. 1948 นาย George Philbrick สามารถออกแบบ ออป-แอมป์ ให้มีขนาดกระทัดรัด ทำให้ออปแอมป์ ได้รับความนิยมใช้ในงานคำนวณโดยเป็นส่วนหนึ่งของ Analog Computer เพื่อใช้ในการบวก การลบ การอินทิกรัล และการสเกล ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ Operational amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การต่อไฟเลี้ยงบวกและลบให้แก่ออปแอมป์ [21]

ในต้นทศวรรษที่ 1960 ได้มีการใช้ทรานซิสเตอร์แทนหลอดสุญญากาศ ทำให้ขนาดของตัวออปแอมป์ ลดเหลือเพียงแผ่นวงจรพิมพ์เล็กๆ จึงทำให้มีการใช้งานออปแอมป์แพร่หลายมากขึ้น ไม่ว่าจะในงานปรับแต่งสัญญาณ การใช้งานในเครื่องมือวัดและทดสอบ และระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม

จากความก้าวหน้าในการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) วงจรทั้งหมดของออป-แอมป์สามารถผลิตรวมไว้บนแผ่นซิลิกอนขนาดจิ๋ว ซึ่งจะถูกบรรจุในตัวถังพลาสติกแบบ DIP 8 ขา ไอซีออปแอมป์ยุคแรกคือ เบอร์ 709 ของบริษัท Fairchild ในปี ค. ศ. 1965 และไอซีออปแอมป์ยุคที่สอง คือ เบอร์ 741 ในปี ค. ศ. 1968 โดยออปแอมป์ 741 ยังคงได้รับความนิยมจนถึงปัจจุบัน ราคาของไอซีออปแอมป์นั้นพอๆ กับทรานซิสเตอร์หนึ่งตัว โดยคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติถูกกำหนดดังตารางที่ 2.4

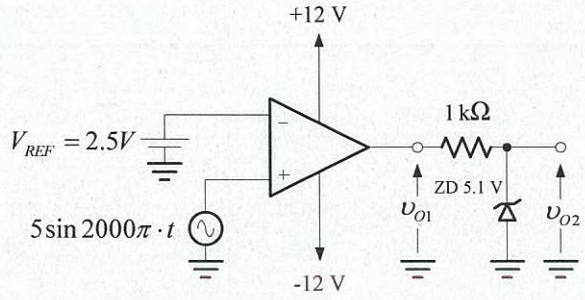
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติกับออปแอมป์ในทางปฏิบัติ

		อุดมคติ	ออปแอมป์ 741
1.อัตราขยายแรงดัน	A_{OL}	∞	200,000 V/V
2.ความต้านทานขาออก	R_o	0	75Ω
3.ความต้านทานขาเข้า	R_i	∞	2 MΩ
4.แบนด์วิธ	BW	∞	1 MHz

2.8.4.1 การใช้งานออปแอมป์แบบเปิดวงรอบ (Open Loop)

เนื่องจากออปแอมป์มีอัตราขยายแรงดันสูงมาก ดังนั้นเมื่อแรงดันที่ขาอินพุตแบบไม่กลับขั้ว (Non-inverting input: NI) มีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาอินพุทแบบกลับขั้ว (inverting input: INV) แรงดันที่ขาเอาต์พุตจะเป็น บวก $+\infty$ แต่เนื่องจากไฟเลี้ยง V^+ ที่จำกัด ดังนั้นแรงดันที่ขาเอาต์พุตของจะประมาณเท่ากับไฟเลี้ยงบวก V^+ นี้ ในทำนองเดียวกันหากแรงดันที่ขา INV สูงกว่าของ NI แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์จะเท่ากับ V^- ดังนั้นออปแอมป์จึงสามารถนำมาใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) ได้ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจรเปรียบเทียบแรงดันกำหนดให้แรงดันตกคร่อมที่ภาคขาออกของออปแอมป์ ขณะที่อิ่มตัวเป็นศูนย์โวลต์ [21]

2.8.4.2 โครงสร้างแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ (Non-inverting Configuration)

วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ (Non-inverting Amplifier) รูปที่ 2.18 เป็นวงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ จุดที่ป้อนสัญญาณอินพุตคือที่ขาอินพุต NI ของออปแอมป์ โดยอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

รูปที่ 2.18 วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ (a) และวงจรเทียบเท่า (b)

2.8.5 การออกแบบวงจรภาคส่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจรภาคส่งของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งคำนึงถึงการติดตั้งที่สะดวกสบายและสามารถทำงานได้ในสภาพพื้นที่การทำงานจริง ผู้วิจัยใช้ไมโครคอนเทรลเลอร์ รุ่น ATMEGA48V-10PU ของบริษัท ATMEL ซึ่งกินพลังงานต่ำและมีประสิทธิภาพสูง ในการส่งสัญญาณดิจิทัลที่ผ่านกระบวนการในลำดับชั้น MAC Layer ไปยังวงจรสวิตช์สัญญาณโดยใช้วงจรมอสเฟตซึ่งสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง และทำการแยกความต่างศักย์ของวงจร (Isolate) ด้วยไอซีออฟโตอสซิเลเตอร์ (PC817) เพื่อป้องกันโมโครคอนโทรลเลอร์จากไฟฟ้าศักย์สูงของแอลอีดี ในอุปกรณ์ภาคส่งสามารถกำหนดหมายเลขประจำตัวโดยใช้สวิตช์แบบ 4 บิต และยังสามารถติดตั้งได้กับแอลอีดีสปอตไลท์รุ่นทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.5.1 แบบวงจรภาคส่ง

วงจรภาคส่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA48V-10PU ของบริษัท ATMEL ทำงานที่ความถี่ 8MHz และรับค่าอินพุตแบบบิตเพื่อใช้เป็นหมายเลขประจำตัวของตัวส่ง ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ส่งแพคเกจข้อมูลในลำดับชั้น MAC ไปยังวงจรสวิตช์ซึ่งรองรับการส่งสัญญาณทั้งแบบ OOK และแบบ VPPM ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังรูปที่ 2.19 และฮาร์ดแวร์ที่ได้พัฒนาตามการออกแบบในรูปที่ 2.20

2.8.5.2 การทำงานของซอฟต์แวร์ภาคส่ง

ซอฟต์แวร์ภาคส่งพัฒนาโดยใช้ภาษาซีและใช้โปรแกรม Code Vision studio ในการพัฒนา เริ่มจากการรับค่าอินพุตแบบบิตเพื่อระบุหมายเลขประจำตัว จากนั้นนำข้อมูลแพคเกจที่ได้ที่ทำการเข้ารหัสแบบ Convolution code เพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้ไปเข้ารหัสแบบ 8B10B เพื่อป้องกันการสั่นไหวของแสง โดยรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 2.21

2.8.6 การออกแบบวงจรภาครับ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจรภาครับโดยใช้ไฟโต้ไดโอดร่วมกับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ (Non-inverting) โดยเลือกใช้ออฟแอมป์ที่อัตราการตอบสนองที่รวดเร็วและรักษาระดับสัญญาณด้วยไอซี Buffer gate และสามารถตั้งค่าการรับแสงที่เหมาะสม

2.8.6.1 การออกแบบวงจรภาครับ

วงจรภาครับออกแบบดังรูปที่ 2.22 และฮาร์ดแวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นดังรูปที่ 2.23

2.8.6.2 การทำงานของซอฟต์แวร์ภาครับ

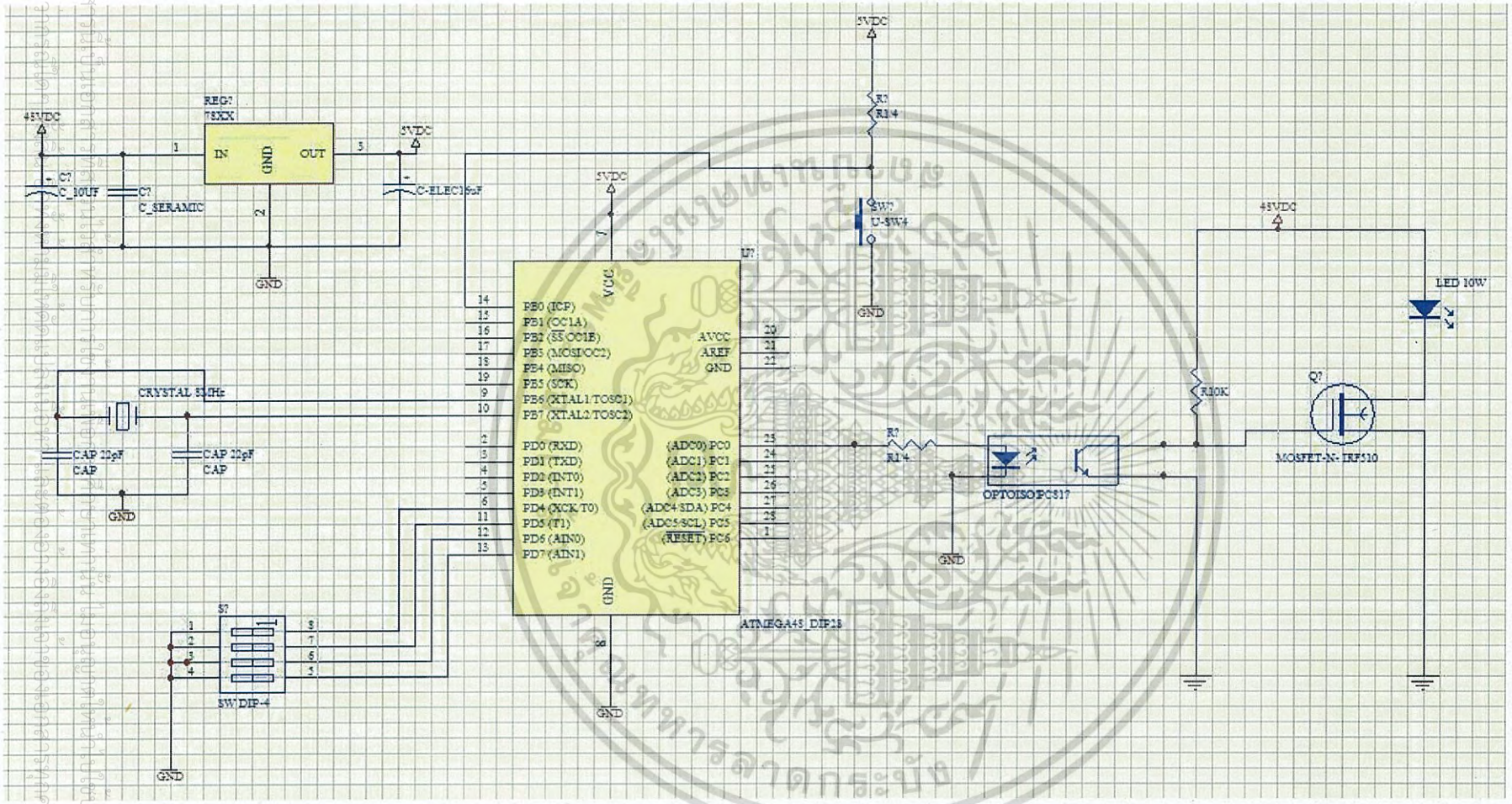
ซอฟต์แวร์ภาครับเริ่มจากการถอดรหัสข้อมูล 8B10B จากนั้นทำการถอดรหัสแบบ Convolutional code เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล จากนั้นซอฟต์แวร์จะส่งข้อมูลรหัสประจำตัวภาคส่งไปยังฐานข้อมูลเพื่อระบุตำแหน่งของภาครับดังรูปที่ 2.24

2.9 การออกแบบซอฟต์แวร์ระบบ

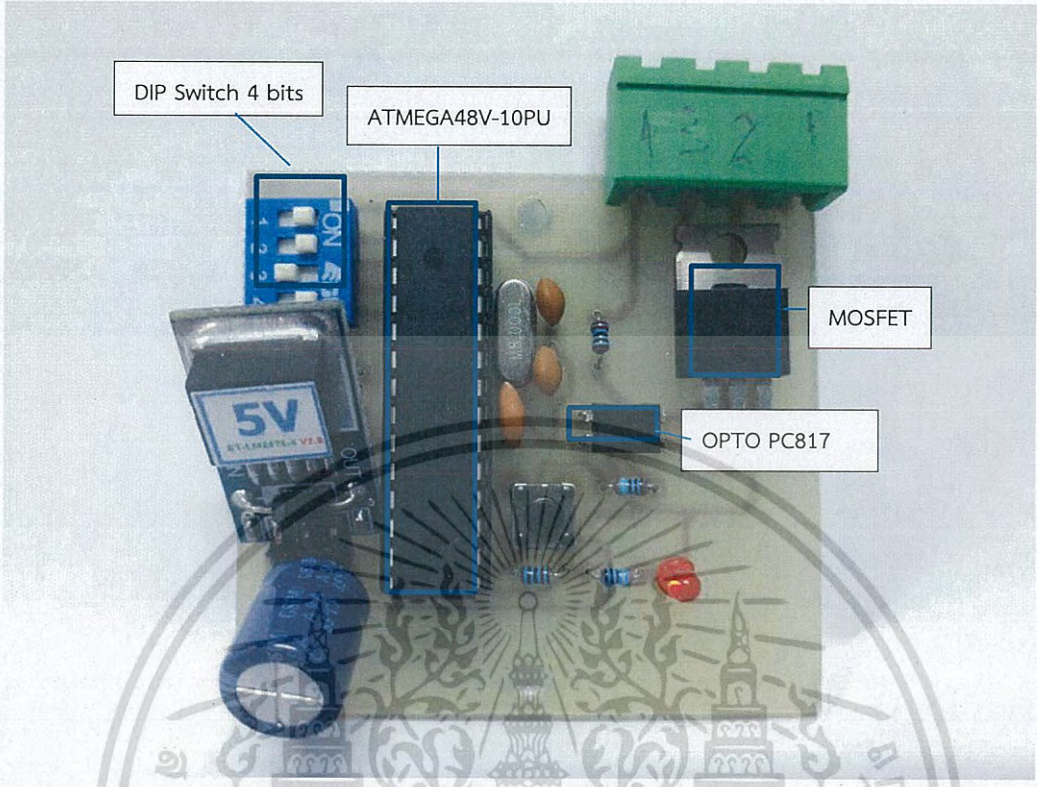
งานวิจัยนี้ใช้สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์แบบไคลเอนต์เซิฟเวอร์ในการพัฒนา โดยในฝั่งเซิฟเวอร์จะประกอบได้ด้วย โมดูลการสร้างรายการขาย โมดูลการค้นหาเส้นทางแบบอาณานิคมมด โมดูลการบริหารจัดการสถานะไคลเอนต์ ในส่วนฝั่งไคลเอนต์จะประกอบไปด้วยโมดูลแสดงรายการขาย พร้อมแผนที่การเดิน และโมดูลการรับข้อมูลจากวงจรภาครับ ระบบถูกพัฒนาโดยใช้เครื่องมือไมโครซอฟ .NET Framework ร่วมกับ ไมโครซอฟต์แวร์ SQL Server

การทำงานของซอฟต์แวร์ตามรูปที่ 2.25 เริ่มจากฝั่งเซิฟเวอร์สามารถเลือกรายการสินค้าเพื่อสร้างใบจัดสินค้า จากนั้นรายการสินค้าจะถูกส่งไปยังโมดูลการค้นหาเส้นทางแบบอณานิคมมดโดยจะมีการนำระยะเวลาการรอคอยจากสถานะตำแหน่งของไคลเอนต์ที่เชื่อมต่อกับวงจรภาครับมาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งส่วนติดต่อผู้ใช้ซอฟต์แวร์ได้พัฒนาดังรูปที่ 2.26 และรูป 2.27

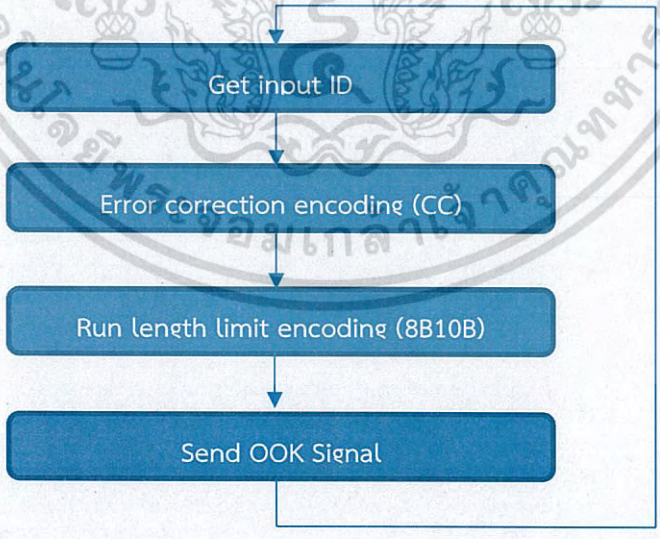
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แบบวงจรภาคส่ง ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น

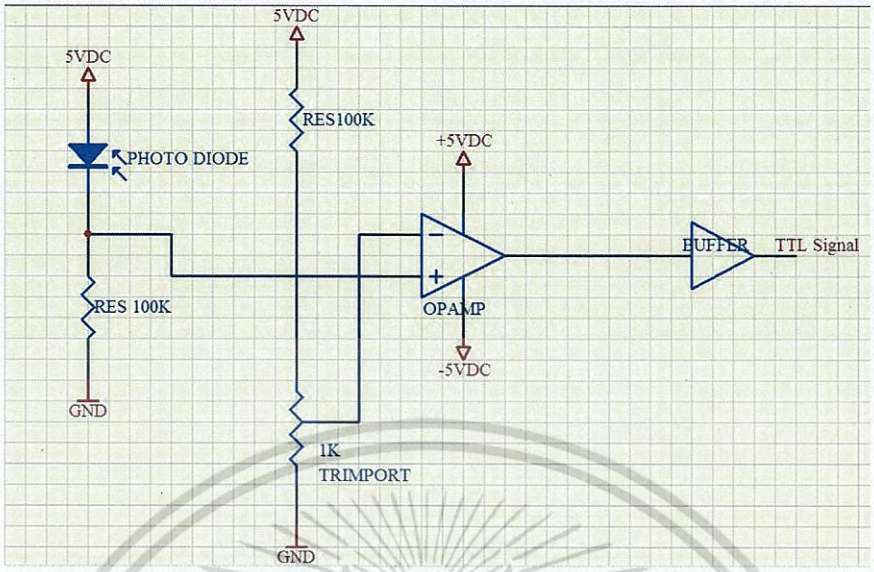


รูปที่ 2.20 วงจรภาคส่ง

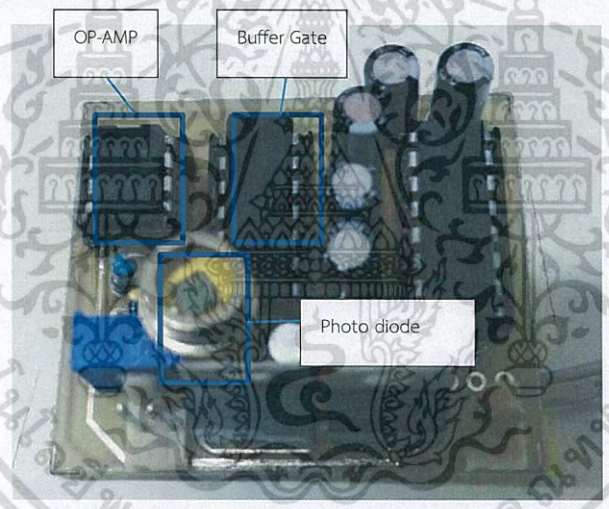


รูปที่ 2.21 การทำงานของซอฟต์แวร์ภาคส่ง

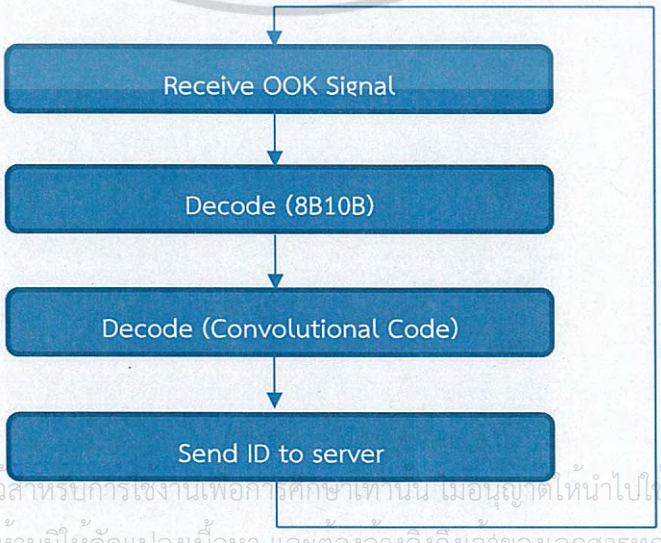
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แบบวงจรภาครับ ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

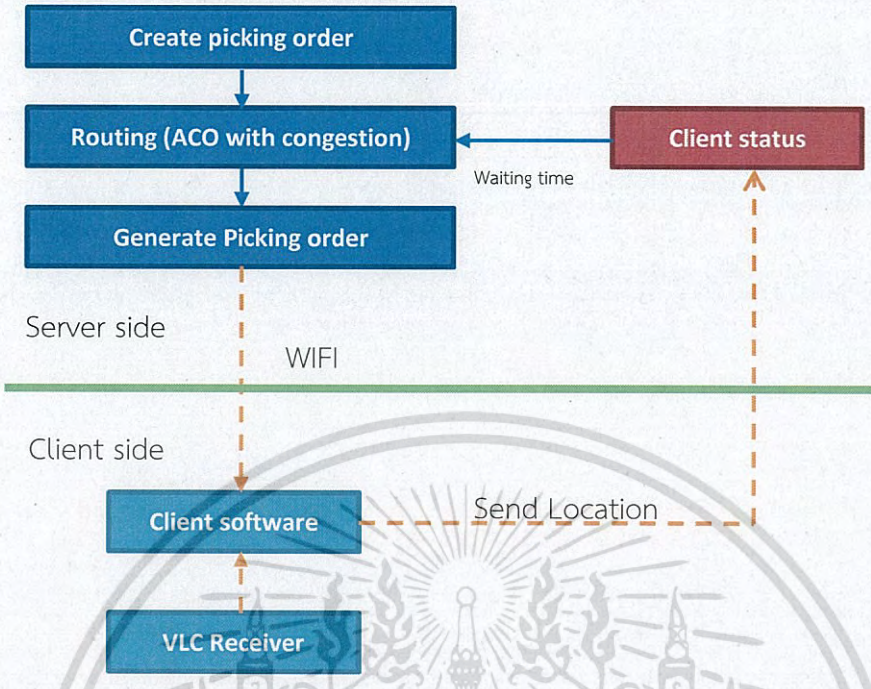


รูปที่ 2.23 วงจรภาครับ ระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

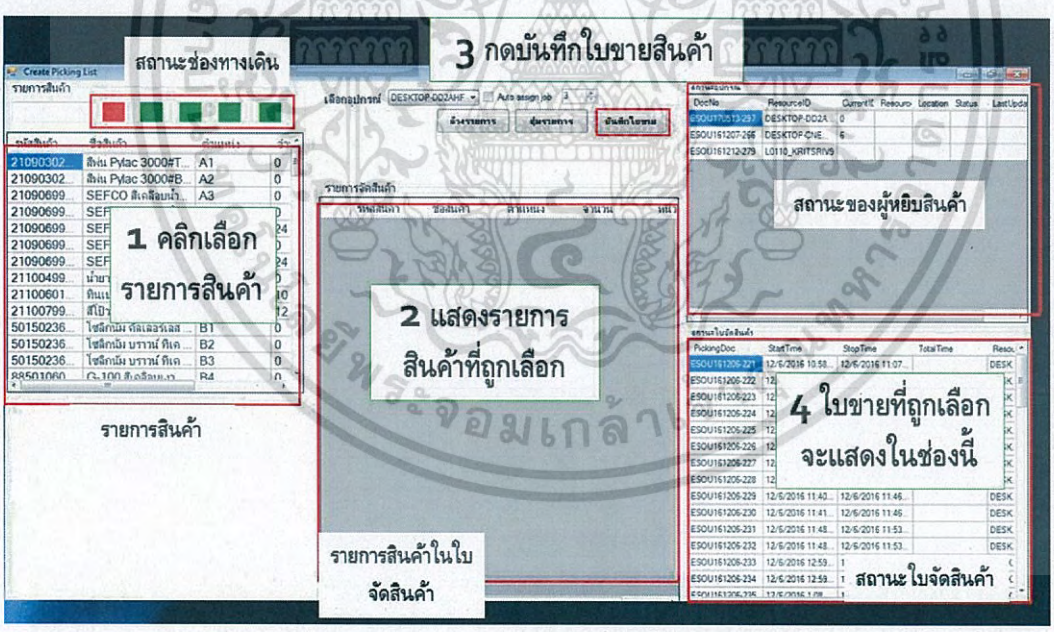


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.24 การทำงานของซอฟต์แวร์ภาครับ

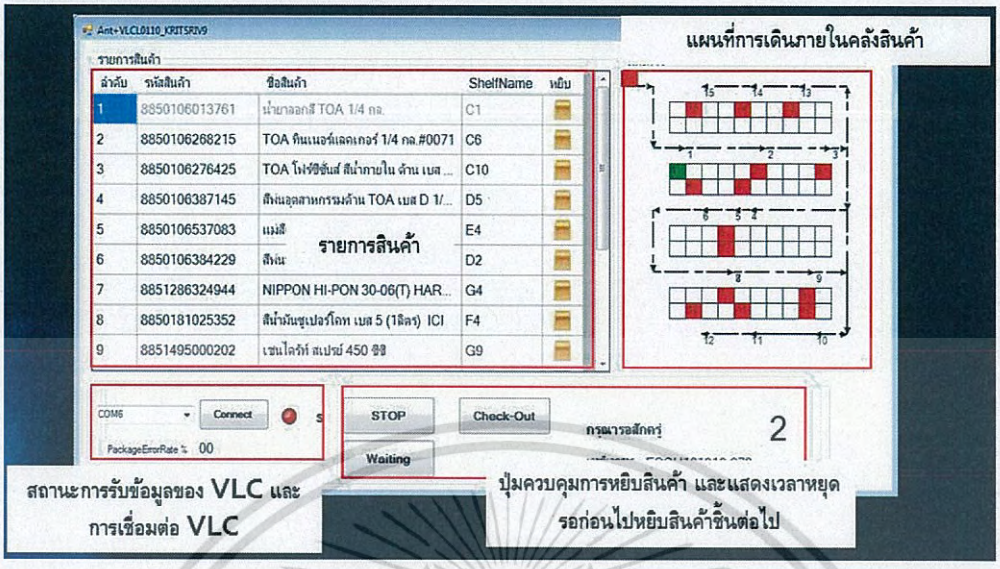


รูปที่ 2.25 การทำงานของซอฟต์แวร์ระบบ



รูปที่ 2.26 หน้าจอแสดงผลซอฟต์แวร์ฝั่งเซิฟเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 หน้าจอแสดงผลซอฟต์แวร์ฝั่งไคลเอนต์

2.10 การจัดเตรียมฮาร์ดแวร์สำหรับงานวิจัย

2.10.1 การจัดเตรียมฮาร์ดแวร์ภาครับ

ฮาร์ดแวร์ภาครับที่ใช้ในการทดลองได้ทำการติดตั้งวงจรภาครับและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์พกพาบนรถเข็นสินค้า เพื่อให้ผู้หยิบสินค้าจำลองสภาพการทำงานจริงดังรูปที่ 2.28 ถึงรูปที่ 2.29

2.10.2 การจัดเตรียมฮาร์ดแวร์ภาคส่ง

ฮาร์ดแวร์ภาคส่งที่ใช้ในการทดลองได้ทำการติดตั้งวงจรภาคส่งกับ หลอดแอลอีดีขนาด 10 วัตต์ จำนวน 10 ชุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.29 ถึงรูปที่ 2.30

รูปที่ 2.28 การติดตั้งวงจรภาครับและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์พกพาบนรถเข็นสินค้า 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.29 การติดตั้งวงจรภาครับและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์พกพาบนรถเข็นสินค้า 2

รูปที่ 2.30 การติดตั้งวงจรภาคส่งกับหลอดแอลอีดีขนาด 15 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.31 การติดตั้งวงจรภาคส่งกับหลอดแอลอีดีขนาด 15 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนการทดลองวิจัย

3.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงาน ความจุในการส่ง ประสิทธิภาพของอัตราความผิดพลาด เปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล และการทดลองวิจัยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ สำหรับการจัดการคลังสินค้า ซึ่งจะกล่าวถึงสภาพแวดล้อมการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และระเบียบการทดลองวิจัย เพื่อใช้ในการหาผลการทดลอง

3.2 การทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น

3.2.1 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน

เนื่องจากการสื่อสารอยู่บนอุปกรณ์เคลื่อนที่และมีข้อกำหนดด้านความปลอดภัยต่อการมองเห็นพลังงานในการส่งจึงต้องมีการจำกัด เพื่อให้ใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าที่สุด [20] สำหรับสัญญาณแบบ OOK สมมุติให้พลังงาน P_1 เป็นพลังงานที่ใช้ส่งพัลส์ “1” จะได้พลังงานเฉลี่ยของสัญญาณแบบ OOK จะเท่ากับ

$$P_{OOK} = \frac{P_1}{2} \tag{3. 1}$$

และเนื่องจากช่วงเวลา 2^M ประกอบได้ด้วย 1 สัญญาลักษณ์ VPPM จะสามารถหาพลังงานเฉลี่ยของ VPPM ได้ดังนี้

$$P_{PPM} = \frac{P_1}{2^M} = \frac{P_{OOK}}{2^{M-1}} \tag{3. 2}$$

แต่ละช่วงเวลา (time slot) จะประกอบไปด้วย 3 สัญลักษณ์ของ CSK ซึ่งจะได้ว่า

$$P_{CSK} = \frac{2P_1}{\left(2^M + 3\right)} = \frac{4P_{OOK}}{\left(2^M + 3\right)} \tag{3. 3}$$

3.2.2 ประสิทธิภาพของความจุในการส่ง (Transmission Capacity)

ขนาดของความจุในการส่งแสดงถึงความสามารถในการส่งข้อมูลต่อช่วงเวลา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการชี้วัดประสิทธิภาพการสื่อสาร โดยความจุในการส่งของการมอดูเลตแบบ OOK, VPPM, CSK ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบภายใต้จำนวนสัญลักษณ์ M จำนวน ขนาดของบิตเรตที่ใช้ในการวัดกำหนดให้เป็น τ ดังนั้นความจุในการส่งของ OOK จะเป็น $\frac{1}{\tau}$ และความยาวเฉลี่ยของสัญลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VPPM จะเท่ากับ $2^M\tau$ และขนาดความยาวเฉลี่ยของ CSK จะเท่ากับ $\left(\frac{2^M-3}{2\tau}\right)$ โดยจำนวนสัญลักษณ์ M แทนข้อมูลแบบไบนารี่ จะหาความสัมพันธ์ของความจุในการส่งได้ดังนี้

$$C_{OOK}=\frac{1}{\tau} \tag{3.4}$$

$$C_{VPPM}=\frac{M}{2^M\tau}=\frac{M}{2^M}C_{OOK} \tag{3.5}$$

$$C_{CSK}=\frac{2M}{(2^M-3)\tau}=\frac{2M}{2^M-3}C_{OOK} \tag{3.6}$$

3.2.3 ประสิทธิภาพของอัตราความผิดพลาด

กำหนดให้การสื่อสารผ่านช่องสัญญาณรบกวนไวต์เกาส์เซียนแบบบวก โดยให้สัญญาณรบกวน $n(t)$ เท่ากับศูนย์และให้ค่าแปรผันเป็น σ_n^2 โดยขนาดแบนวิดท์มีความกว้างมาก เมื่อพัลส์ “1” ถูกส่ง สัญญาณสุ่มที่รับได้จะเป็น $\sqrt{S_t}+n(t)$ และเมื่อพัลส์ “0” ถูกส่งสัญญาณสุ่มที่ได้รับจะเป็น S_t ระดับการตัดสินใจของลอจิกกำหนดให้เป็น b

$P_{1/0}$ คือความน่าจะเป็นในการเกิดสัญลักษณ์ผิดพลาดจาก “1” ไปเป็น “0”

$P_{0/1}$ คือความน่าจะเป็นในการเกิดสัญลักษณ์ผิดพลาดจาก “0” ไปเป็น “1”

ความน่าจะเป็นในความผิดพลาดทั้งสองคือ

$$P_{01}=\left(\frac{1}{2}\right)\left\{1+erf\left[\left(b-\sqrt{S_t}\right)/\sqrt{2\sigma_n^2}\right]\right\} \tag{3. 7}$$

$$P_{10}=\left(\frac{1}{2}\right)\left\{1+erf\left[\left(b-\sqrt{S_t}\right)\right]\right\} \tag{3.8}$$

$$erf(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\pi}\exp(-u^2)du=1-erfc(x) \tag{3.9}$$

และอัตราส่วนความผิดพลาด $P_{se}=P_1P_{0/1}+P_0P_{1/0}$ โดยที่ P_1 และ P_0 คือ ความน่าจะเป็นในการส่งสัญลักษณ์ “1” กับ “0” และ $P_1+P_0=1$ ความผิดพลาดของสัญญาณ OOK จะได้

$$\mathrm{P_{OOK}}=\frac{1}{2}P_{0/1}=\frac{1}{2}P_{1/0}=\frac{1}{2}erfc\left(\frac{\sqrt{S_t/2\sigma_n^2}}{2}\right) \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเงื่อนไขเดียวกัน อัตราส่วนความผิดพลาดของ VPPM และ CSK คือ

$$P_{VPPM} = \frac{1+erf\left[\frac{b-\sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right]+\left(2^M-1\right)\left[1-erf\left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right)\right]}{2^{M+1}} \quad (3.11)$$

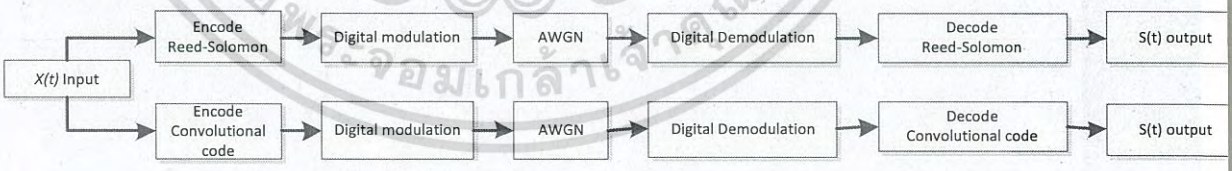
$$P_{CSK} = \frac{1+erf\left[\frac{b-\sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right]+\left(2^M-1\right)\left[1-erf\left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right)\right]}{2^M+3} \quad (3.12)$$

3.2.4 เปรียบเทียบการใช้แบนวิดท์ในการสื่อสาร

เนื่องจาภาครับสัญญาณมีแบนวิดท์ในปริมาณจำกัด รูปแบบการมอดูเลตที่ใช้แบนวิดท์ต่ำจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยกำหนดให้ลำดับของการมอดูเลตของ OOK คือ M และบิตเรทของข้อมูล คือ R_b ฉะนั้นแบนวิดท์ที่ใช้ใน OOK คือ R_b และการมอดูเลตแบบ VPPM คือ $2^M R_b / M$ ส่วนการมอดูเลตแบบ CSK คือ $\left(2^M+3\right)R_b / 2M$

3.2.5 เปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล

การเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE802.15.7 ได้ถูกกำหนดไว้สองรูปแบบคือ การความรหัสแบบอาร์เอส (Reed-Solomon: RS) และการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชั่นนอล (Convolutional Code: CC) โดยการเข้ารหัสแบบ RS จะได้รับความนิยมมากกว่าเนื่องจากไม่ซับซ้อนมากและเหมาะกับการพัฒนาการส่งด้วยความเร็วสูง การเปรียบเทียบเรากำหนดการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณรบกวนไวต์เกาส์เซียนแบบบวก และกำหนดสุ่มค่า $x(t)$ และวัดอัตราความผิดพลาดตาม SNR ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.1 ผังการสื่อสารในการเปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดการผิดพลาดของข้อมูล

3.2.6 สภาพแวดล้อมการวิจัย

การทดลองหาประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น ได้ทำการจำลองการทำงานบนซอฟต์แวร์ MATLAB 2012a ซึ่งทำงานบนระบบปฏิบัติงาน Microsoft Windows 7 โดยฮาร์ดแวร์ที่ใช้ทดลองรายละเอียดดังนี้

- CPU Intel Core i5-4200U 2.3 GHz
- RAM 4 GB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Hard disk 500GB

3.3 การทดลองวิจัยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้สำหรับการจัดการคลังสินค้า

3.3.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองวิจัย

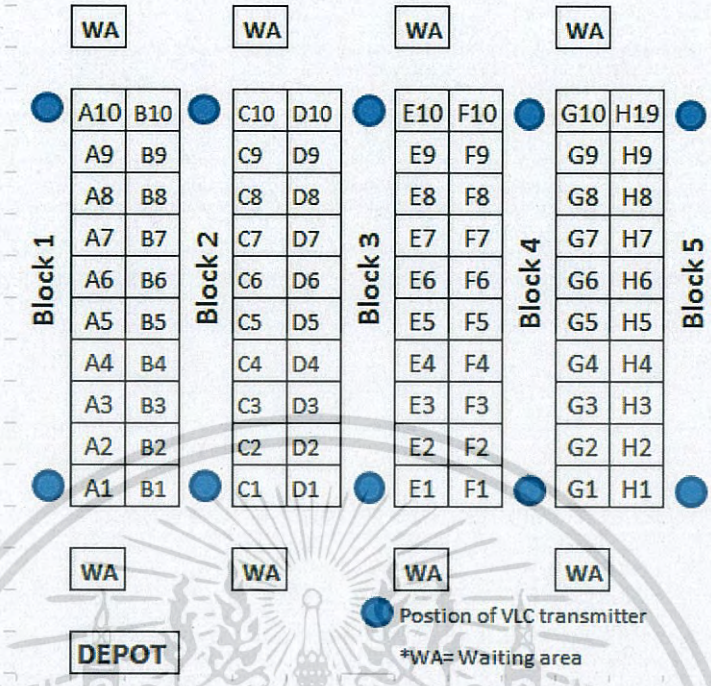
สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารในสภาพพื้นที่การทำงานจริง ได้ใช้พื้นที่คลังสินค้าร้านวัสดุก่อสร้างแห่งหนึ่ง ที่มีรูปแบบคลังสินค้าแบบช่องทางเดินเดี่ยวแคบซึ่งเป็นมาตรฐาน โดยมีชั้นวางสินค้าสูง 4 เมตร และมีช่องทางเดิน 5 ช่องทาง

รูปที่ 3.2 ภาพสถานที่ใช้ทำการทดลอง

3.3.2 ขอบเขตพื้นที่ทดลองงานวิจัย

การทดลองกำหนดพื้นที่คลังสินค้า 135 ตารางเมตร ในรูปแบบคลังสินค้าแบบช่องทางเดินเดี่ยวแคบดังรูปที่ 3.3 โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่งจำนวนทั้งสิ้น 10 ชุด บริเวณจุดน้ำเงินซึ่งอยู่หน้าทางเข้าออกของช่องทางเดินในแต่ละแถว และกำหนดพื้นที่รอคอยอยู่บริเวณหน้าช่องทางเข้าออกในทุกช่องทางเดิน อุปกรณ์ส่งสัญญาณถูกติดตั้งพร้อมหลอดแอลอีดีขนาด 10 วัตต์ที่ความสูง 3 เมตร ซึ่งภาพสถานที่จริงแสดงอยู่ในภาพที่ 3.4 ถึง 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนผังการติดตั้งภาคส่งในบริเวณคลังสินค้าในจุดน้ำเงิน

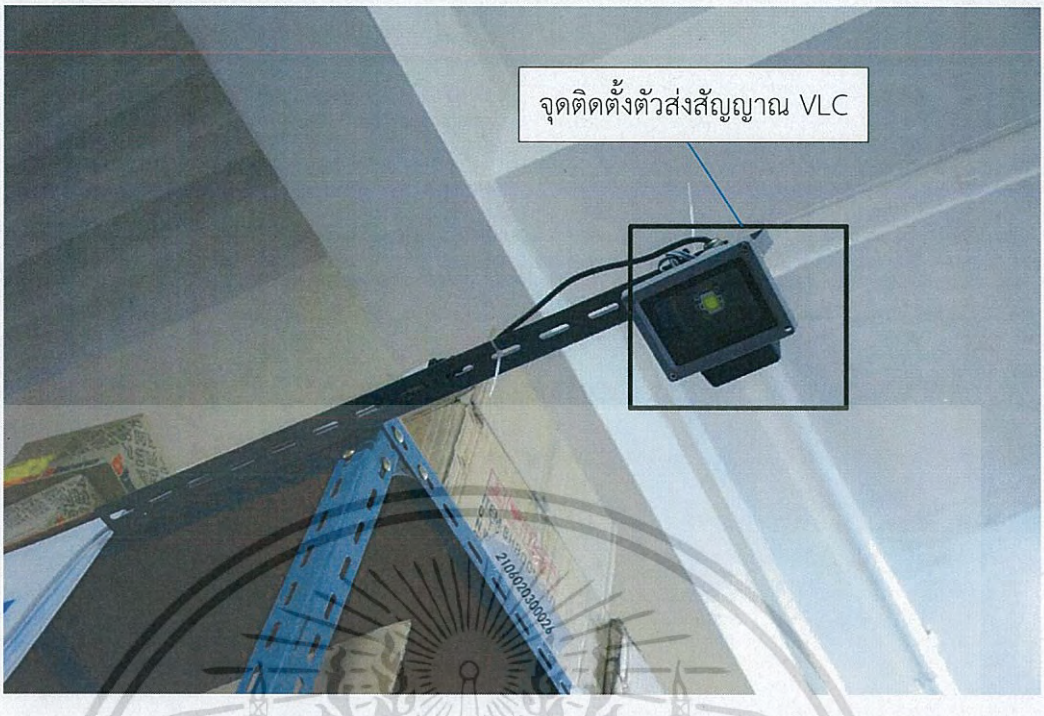
รูปที่ 3.4 คลังสินค้าวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 คลังสินค้าวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.6 คลังสินค้าวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 จุดติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่ง

รูปที่ 3.8 จุดติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองที่ 1 ทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นภายในคลังสินค้า

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลในระดับแพคเกจเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

3.4.1 ระเบียบการทดลองวิจัย

การทดลองจะให้ผู้หยิบสินค้าหยุดในบริเวณอุปกรณ์ส่งสัญญาณทั้ง 10 จุด และบันทึกค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจที่ได้รับตัวอย่างดังรูปที่ 3.9 โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่งอยู่ที่ 75 เซนติเมตร
- ผู้หยิบสินค้าจะต้องหยุดนิ่งเป็นเวลา 10 วินาทีในขณะที่มีการวัดผล
- ผู้หยิบสินค้าจะสามาถทำการทดลองได้ครั้งละ 1 คนต่อจุดส่งสัญญาณ
- ผู้หยิบสินค้าจะต้องทำการทดลองซ้ำทั้งสิ้นจำนวน 3 ครั้ง
- ไม่มีการควบคุมแสงรบกวนจากภายนอกใดๆในการทดลอง
- ผู้หยิบสินค้าบันทึกค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่แสดงผลอยู่บนหน้าซอฟต์แวร์ไคลเอนต์

รูปที่ 3.9 วิธีการทดลองหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลในระดับแพคเกจ

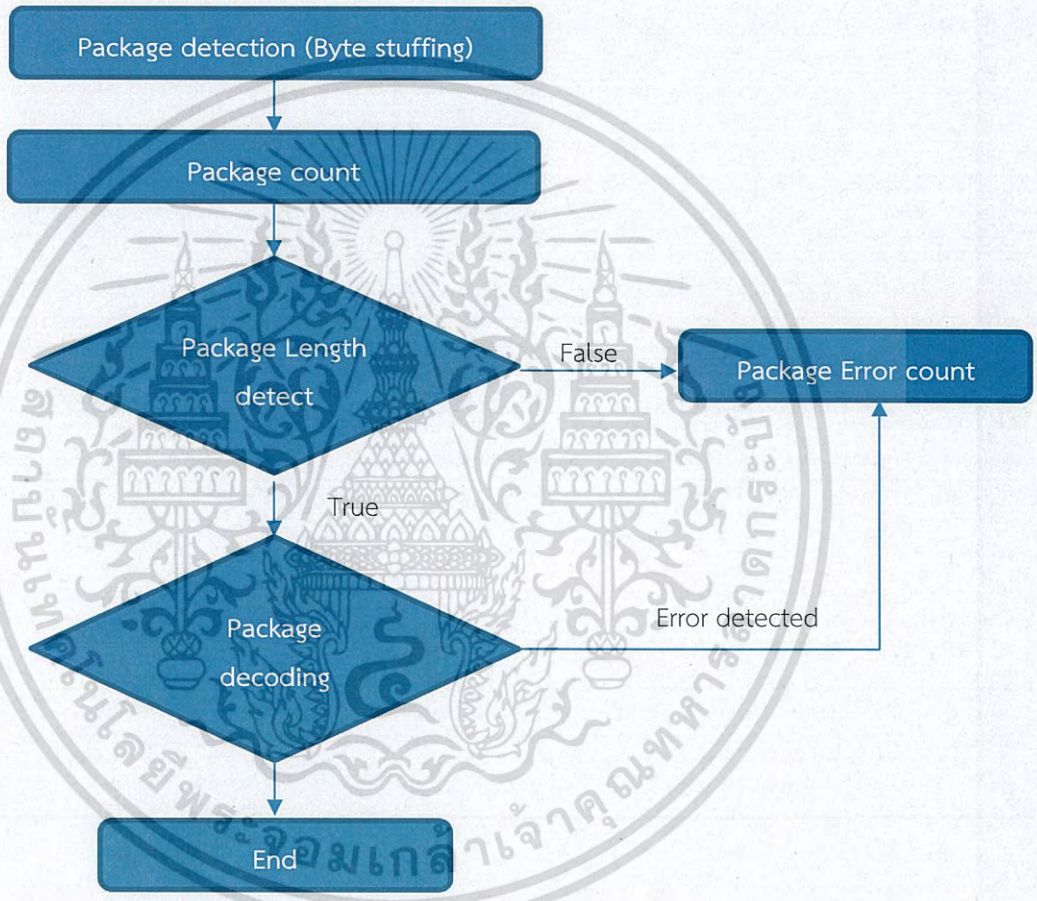
3.4.2 การประมวลผลข้อมูลในการตรวจนับความผิดพลาดของแพคเกจข้อมูล

วิธีการประมวลผลข้อมูลความผิดพลาดของแพคเกจโดยเริ่มการทำการดักจับแพคเกจในระดับไบต์และเริ่มนับจำนวนแพคเกจที่เข้ามา จากนั้นตรวจสอบความความของแพคเกจว่าครบถ้วนหรือไม่ โดยหากความยาวของแพคเกจไม่เป็นไปตามที่กำหนด ถือว่าแพคเกจนั้นเป็นแพคเกจที่มีความ

เอกสารนี้เป็นการสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช

ผิดพลาด หากแพคเกจมีความยาวครบถ้วนก็จะถูกตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล หากข้อมูลมีความผิดพลาดก็จะทำการนับเป็นแพคเกจที่มีความผิดพลาดอีกเช่นกัน โดยซอฟต์แวร์จะทำการนับจำนวนแพคเกจที่มีความผิดพลาดหารกับจำนวนแพคเกจที่เข้ามาทั้งหมดตามสมการ 3.13 และแผนภาพการทำงานของซอฟต์แวร์ประมวลผลดังรูป 3.10

$$PackageErrorRate = \frac{NumberOfPackageError}{TotalPackage} x100 \qquad (3.13)$$



รูปที่ 3.10 การประมวลผลข้อมูลความผิดพลาดของแพคเกจ

3.5 การทดลองที่ 2 ทดลองการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนของวิธีอาณานิคมมดเนื่องจากความหนาแน่นอันเนื่องมาจากการมีผู้หยิบสินค้าหลายคน

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนเนื่องจากความหนาแน่น โดยเรากำหนดความหนาแน่นในรูประยะเวลาการรอคอย ซึ่งทำการกำหนดระยะเวลาการรอคอยดังตาราง ผลลัพธ์การทดลองจะเป็นค่าฟีโรโมนที่เปลี่ยนแปลงและเส้นทางเดินที่วิธีอาณานิคมมดค้นหาให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การทดลองหาค่าฟีโรโมน ที่ระยะเวลาการรอคอยต่างๆ

ระยะเวลาการรอคอย	จำนวนรอบในการค้นหาเส้นทาง
ไม่มีระยะเวลาการรอคอย	200
เวลารอคอย 5 วินาที	200
เวลารอคอย 10 วินาที	200
เวลารอคอย 20 วินาที	200

3.6 การทดลองที่ 3 การค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

ในงานวิจัยนี้เราพิจารณารูปแบบคลังสินค้าแบบช่องทางเดินหยิบสินค้าแบบแคบ (warehouse with narrow pick aisle) โดยใช้คลังสินค้าร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้างแห่งหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะพื้นที่ดังรูปที่ 3.3 และทำการติดตั้งตัวส่งสัญญาณวีแอลซีไว้บริเวณทางเข้าออกในแต่ละช่อง โดยการหยิบสินค้าสามารถที่เดินไปตามช่องทางเดินเพื่อเลือกรายการตามพื้นที่เก็บสินค้าได้ การพิจารณาช่องทางเดินหยิบสินค้าแบบแคบ เนื่องจากเป็นการใช้พื้นภายในคลังสินค้าที่คุ้มค่า ดังนั้นช่องทางเดินในแต่ละช่องนั้นจะอนุญาตให้สามารถเข้าถึงได้ครั้งละ 1 รายการ

3.6.1 ระเบียบการทดลองวิจัย

การทดลองเป็นการหาค่าระยะเวลาในการหยิบสินค้าและระยะทางที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

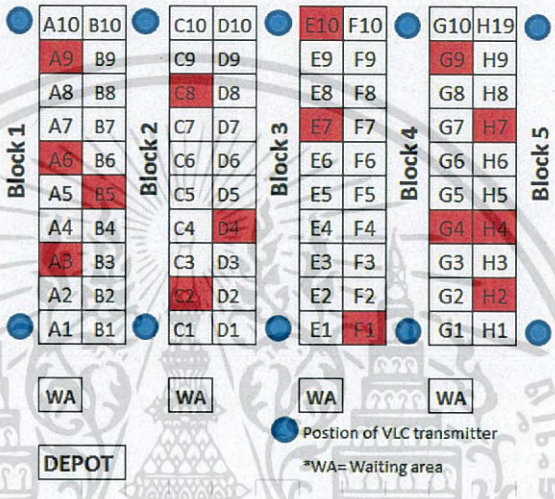
- การหยิบสินค้าแต่ละชิ้นมีความเป็นอิสระต่อกัน
- กำหนดในระยะเวลาในการหยิบสินค้าคงที่
- ไม่มีการกำหนดทิศทางในการเดินในช่องทางเดินแต่ละช่อง
- กำหนดให้มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดในการหยิบสินค้าเป็นจุดเดียวกัน
- การหยิบสินค้าจะทำเดินการทีละรายการ โดยไม่มีการรวมรายการจัดสินค้าอื่นๆเข้ามา

ในกรณีที่ในช่องทางเดินมีรายการอื่นเข้าถึงอยู่จะเกิดเวลารอคอย(Waiting time) ขึ้นซึ่งข้อกำหนดผู้หยิบสินค้า (Picker) จะต้องหยุดรอในพื้นที่ ที่กำหนดตามรูปที่ 3.11 การทดลองจะสุ่มรายการสินค้าในแต่ละช่องทางเดินตามรูปที่5 และเปรียบเทียบข้อมูล ระยะเวลาการ เดินทางทั้งหมด และระยะทางรวมเปรียบเทียบระหว่าง การใช้การค้นหาเส้นทางแบบ วิธีอาณานิคมมด และ วิธีอาณานิคมมดแบบพิจารณาความหนาแน่น ภายในคลังสินค้าตามข้อกำหนดข้างต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ ตามตารางที่ 3.2 และตัวอย่างการสุ่มข้อมูลในการทดลองแสดงดังรูป 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3. 2 กำหนดรูปแบบการทดลอง

	No of item in order	Result
ACO Method	15,20,25	Total travelling time, Distance
ACO Method with congestion consideration	15,20,25	Total travelling time, Distance



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการสุ่มข้อมูลสินค้าในแต่ละช่องทางเดิน

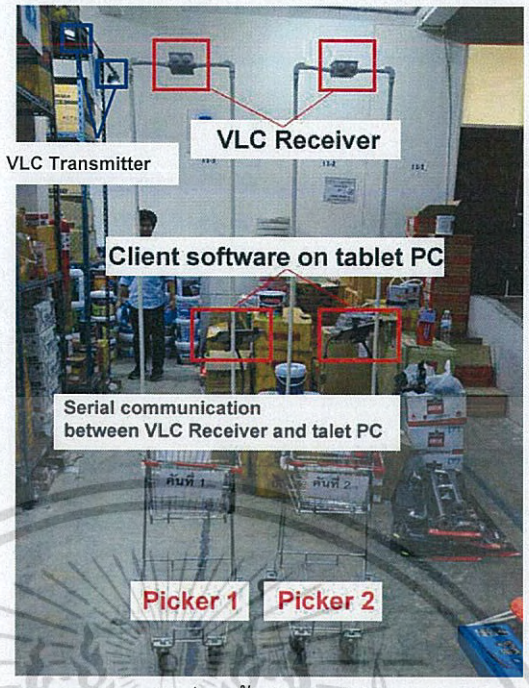
3.6.2 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

การทดลองติดตั้งอุปกรณ์ภาครับและซอฟต์แวร์โคลเอนต์บนรถเข็นสำหรับหยิบสินค้าดังรูปที่ 3.12 โดยผู้หยิบสินค้าจะสามารถเห็นรายการสินค้าได้ผ่านทางซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์

3.6.3 วิธีการพิจารณาความหนาแน่นในการหยิบสินค้า

เพื่อที่จะพิสูจน์กระบวนการดังกล่าว การทดลองจะกำหนดให้ผู้หยิบสินค้าสองคน ได้รับรายการหยิบสินค้าเหมือนกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความหนาแน่นในช่องทางเดินหากไม่มีกลไกในการหลีกเลี่ยง ซึ่งจากระบบที่พัฒนาขึ้นผู้หยิบสินค้าคนที่สองจะได้เส้นทางเดินที่ไม่เหมือนกันซึ่งเป็นการลดเวลาการรอคอยที่เกิดได้ โดยสามารถวิเคราะห์ผลได้จากเส้นทางการเดินทางและฟีโรโมนของเส้นทางเดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ภาครับที่ติดตั้งบนรถเข็นสำหรับหยิบสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองวิจัย

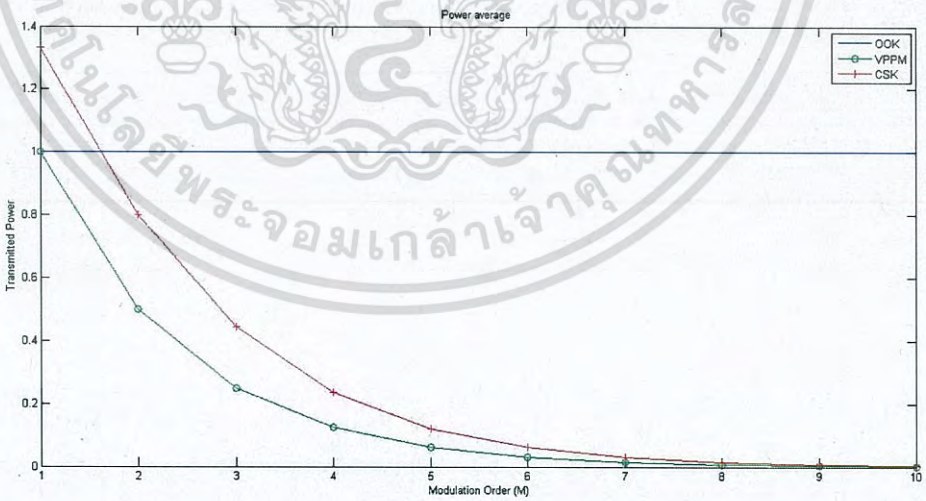
4.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย เรื่องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น ซึ่งมีผลการเปรียบเทียบด้านการใช้พลังงาน ประสิทธิภาพของความจุในการส่ง อัตราความผิดพลาดบิต การใช้แบนวิดท์ในการสื่อสาร การเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล และผลการทดลองวิจัยเรื่อง วิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ สำหรับการจัดการคลังสินค้า ซึ่งมีผลประสิทธิภาพอุปกรณ์การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นภายในคลังสินค้า การทดลองการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนของวิธีอาณานิคมมดเนื่องจากความหนาแน่น และวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

4.2 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็น

4.2.1 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบการใช้พลังงาน

ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างการมอดูเลตแบบ OOK VPPM และ CSK แสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของ VPPM และ CSK ดีกว่า OOK เมื่อค่า M มีค่ามากขึ้น โดยที่ VPPM มีประสิทธิภาพสูงสุดเนื่องจาก CSK ใช้ช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลมากกว่า

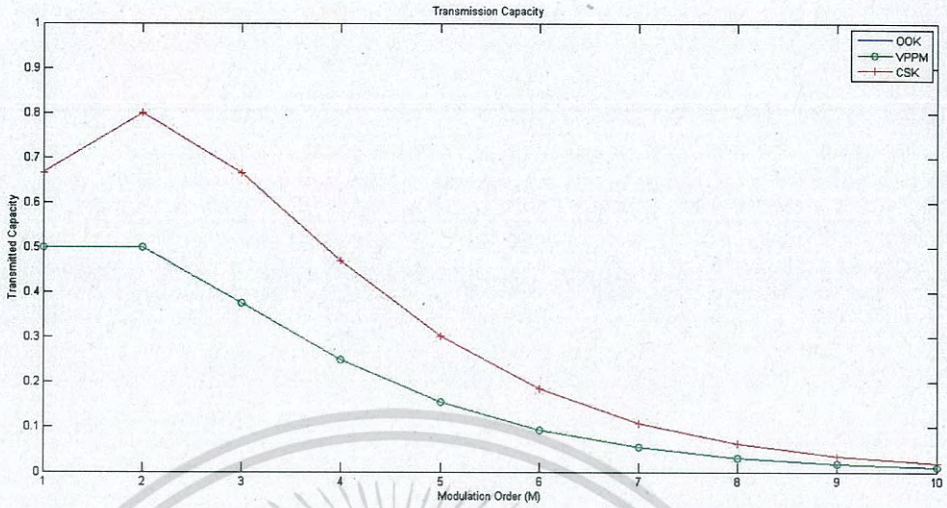


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน

4.2.2 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความจุในการส่ง

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความจุในการส่งระหว่างการมอดูเลตแบบ OOK VPPM และ CSK แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความจุในการส่งข้อมูลแบบ CSK มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากจำนวนช่องสัญญาณในปริมาณที่มากกว่า VPPM และ OOK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุในการส่งข้อมูล

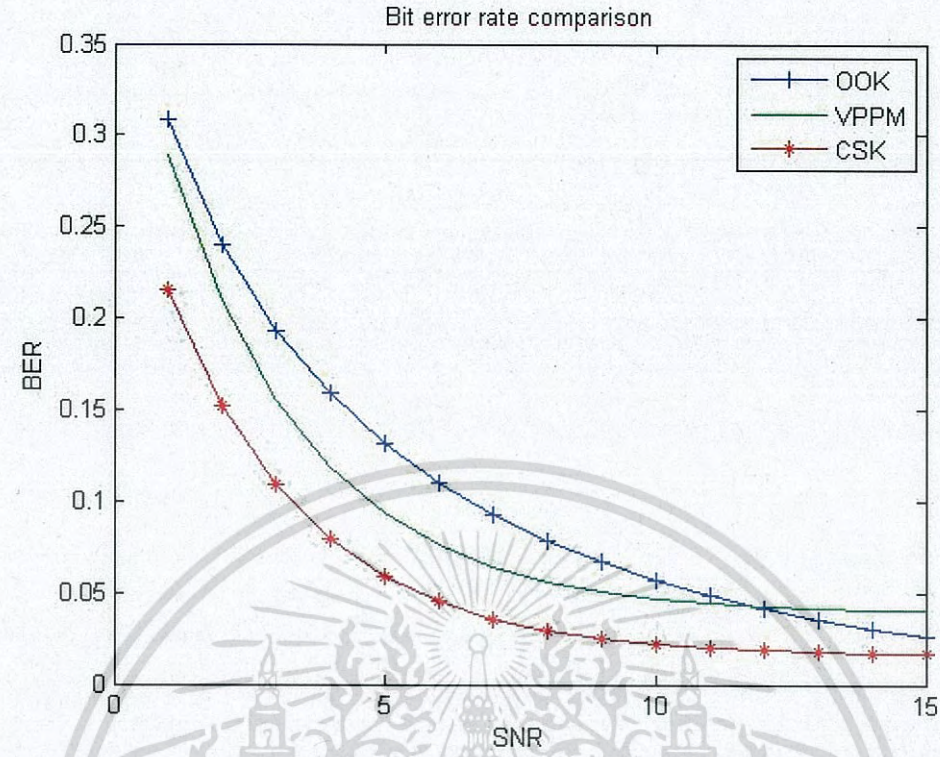
4.2.3 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัตราความผิดพลาด

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัตราความผิดพลาดในการส่งระหว่างการมอดูเลตแบบ OOK VPPM และ CSK แสดงดังรูปที่ 4.3 อัตราความผิดพลาดสัมพันธ์กับค่า SNR โดยที่เมื่อค่า SNR เพิ่มขึ้นค่าความผิดพลาดจะลดลง โดยที่อัตราความผิดพลาดบิตของการมอดูเลตแบบ VPPM สูงกว่า CSK

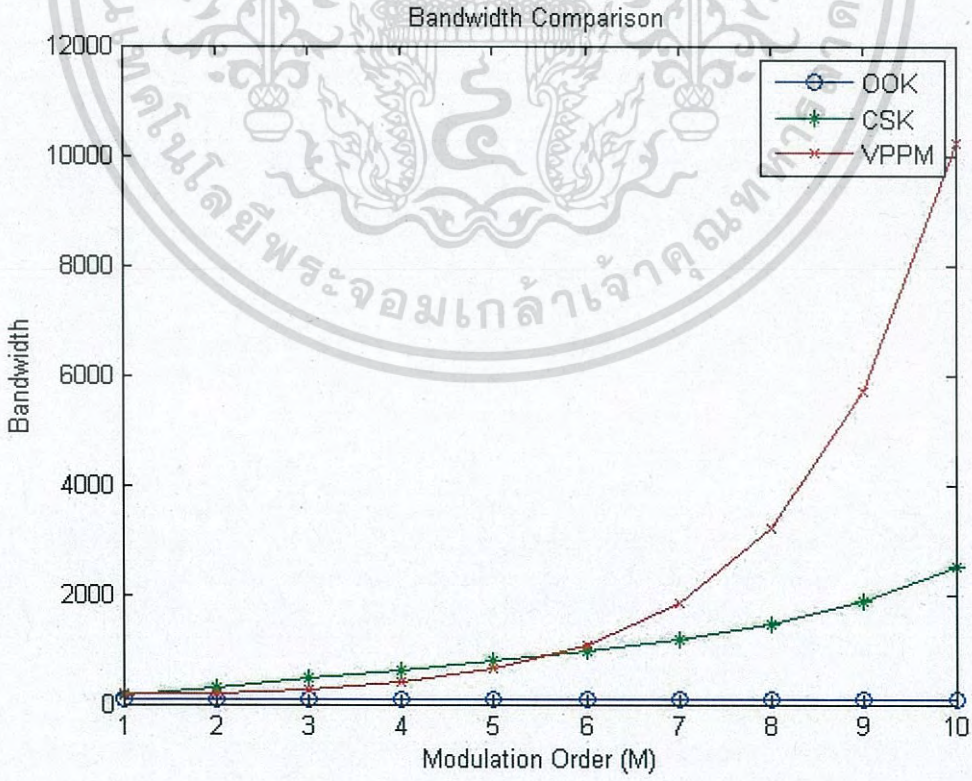
4.2.4 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบการใช้แบนวิดท์ในการสื่อสาร

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้แบนวิดท์ในการสื่อสาร ของการมอดูเลตแบบ OOK VPPM และ CSK แสดงดัง รูปที่ 4.4 จะเห็นว่ารูปแบบการมอดูเลตแบบ CSK มีการใช้แบนวิดท์ที่ต่ำกว่า VPPM ในปริมาณข้อมูลที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดบิตระหว่าง OOK VPPM และ CSK

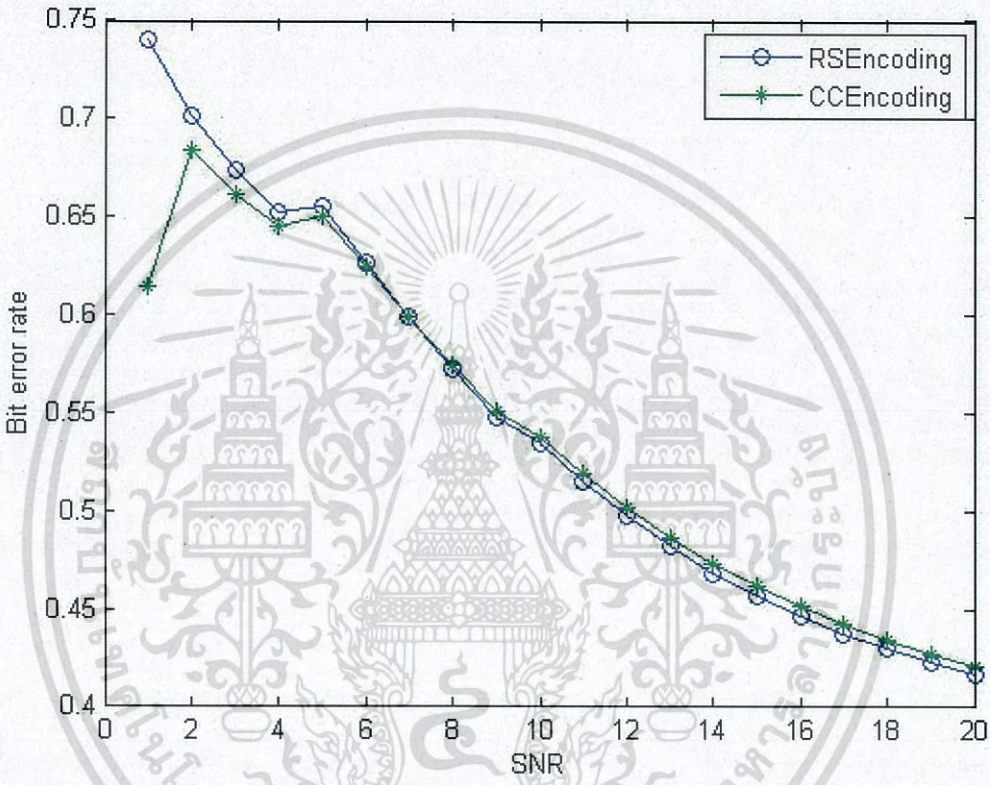


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้แบนวิดท์ระหว่าง OOK VPPM และ CSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการทดลองวิจัยการเปรียบเทียบการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูล

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลของการมอดูเลตแบบ OOK VPPM และ CSK แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราความผิดพลาดของบิตในช่วงค่า SNR ต่ำในส่วนของ Reed-Solomon จะได้เปรียบกว่า Convolutional code เล็กน้อย แต่เมื่อค่า SNR สูงขึ้นค่าอัตราความผิดพลาดของบิตจะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการเข้ารหัสเพื่อลดความผิดพลาดแบบ Reed-Solomon กับ Convolutional code

4.3 ผลการทดลองวิจัยวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้สำหรับการจัดการคลังสินค้า

4.3.1 ผลทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นภายในคลังสินค้า

ผลการทดสอบประสิทธิภาพ VLC ของรถเข็นสินค้าคันที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจขอรถเข็นสินค้าคันที่ 1

จำนวนครั้ง	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10
1	1%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%
2	1%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	1%
3	1%	1%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	1%
4	1%	0%	1%	0%	1%	0%	1%	1%	0%	1%
5	1%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%

ผลการทดสอบประสิทธิภาพ VLC ของรถเข็นสินค้าคันที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจขอรถเข็นสินค้าคันที่ 2

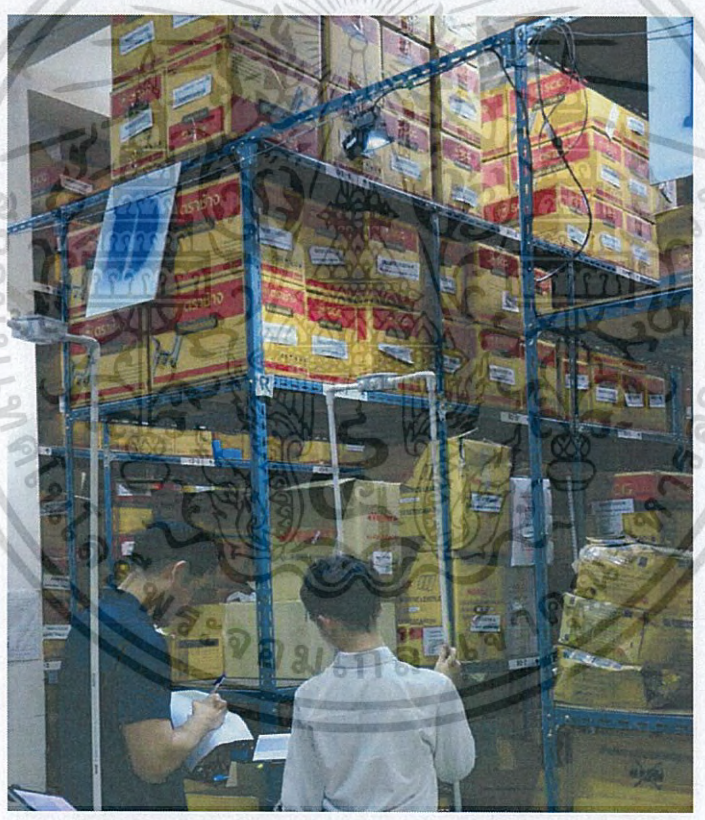
จำนวนครั้ง	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10
1	1%	1%	20%	1%	2%	1%	0%	3%	1%	1%
2	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%
3	1%	1%	3%	1%	0%	1%	3%	1%	1%	1%
4	1%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%
5	1%	2%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	5%	1%

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถรับส่งข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งมีอัตราความผิดพลาดในระดับแพคเกจค่อนข้างต่ำโดยภาพการทดลองแสดงดังในรูป 4.6 ถึง 4.8

รูปที่ 4.6 การทดลอง การหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 การทดลอง การหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจ

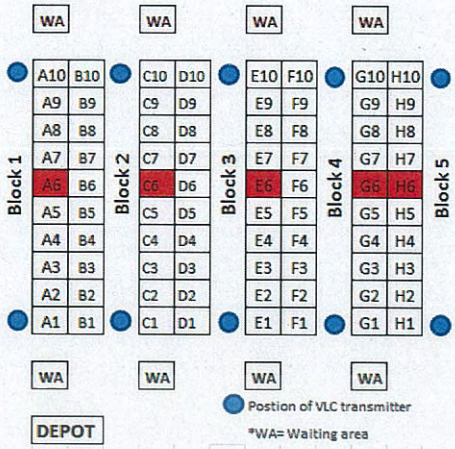


รูปที่ 4.8 การทดลอง การหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของแพคเกจ

4.3.2 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนของวิธีอาณานิคมมดเนื่องจากความหนาแน่น

กำหนดจุดการหยิบสินค้าในทุกช่องทางเดินซึ่งจะได้ระยะทางตามตารางที่ 4.3 และแผนผังการเดินดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



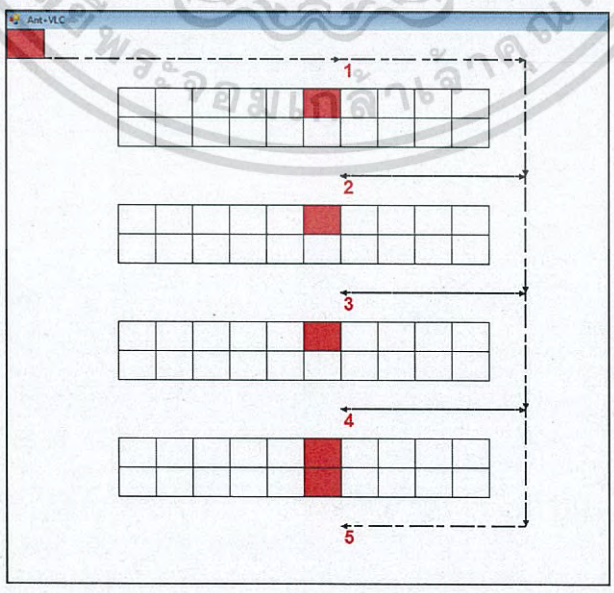
รูปที่ 4.9 ระยะทางจากจุด DEPOT ไปยังจุดต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ระยะทางที่ใช้ในการทดสอบโดยซอฟแวร์

ต้นทาง	ปลายทาง	ระยะทาง (เมตร)
DEPOT	A6	8
DEPOT	C6	11
DEPOT	E6	14
DEPOT	G6	17
DEPOT	H6	18

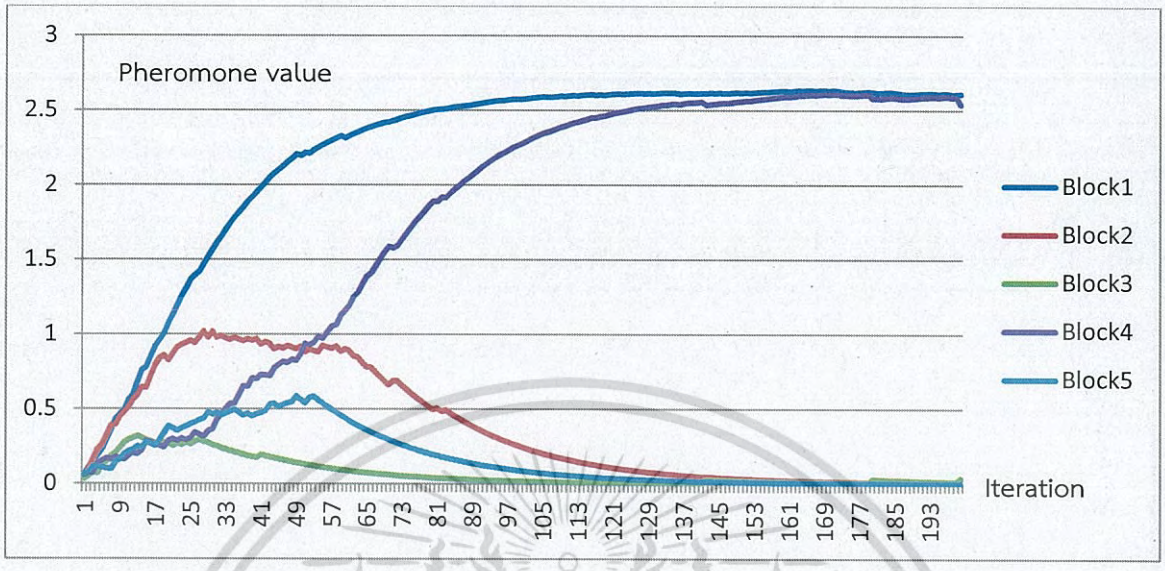
4.3.2.1 ผลการทดลองกรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย

ผลการทดลองแสดงเส้นทางเดินได้ดังรูปที่ 4.10 และผลลัพธ์ของฟีโรโมนในแต่ละช่องทางเดินแสดงในรูปที่ 4.11 ตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.10 เส้นทางเดินกรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



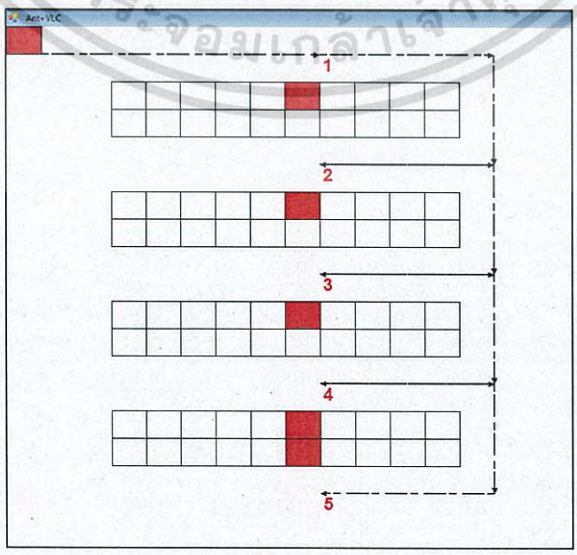
รูปที่ 4.11 ค่าของฟีโรโมนในกรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย

ตารางที่ 4.4 ค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีไม่พบระยะเวลาการรอคอย

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5
ค่าฟีโรโมน	2.609995	0.031127	0.038905	2.539368	0.001588

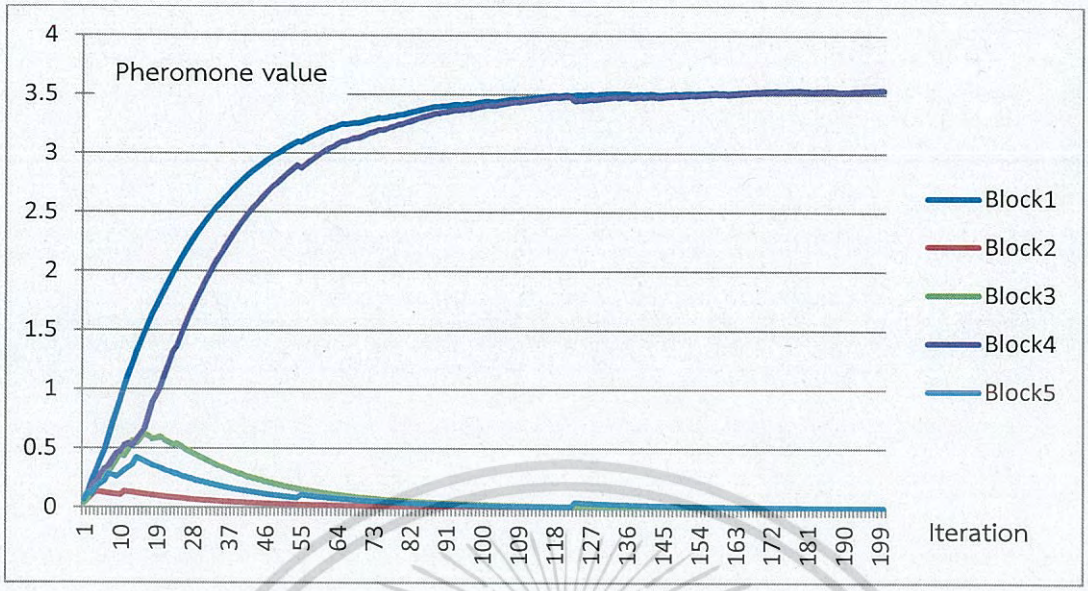
4.3.2.2 ผลการทดลองกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 5 วินาที ในช่องทางที่ 1

ผลการทดลองแสดงเส้นทางเดินได้ดังรูปที่ 4.12 และผลลัพธ์ของฟีโรโมนในแต่ละช่องทางเดินแสดงในรูปที่ 4.13 ตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.12 เส้นทางเดินกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 5 วินาทีในช่องทางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



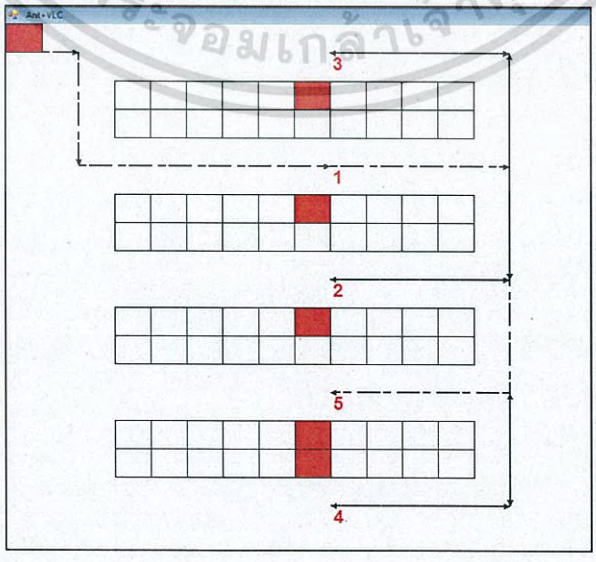
รูปที่ 4.13 ค่าของฟีโรโมนในกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 5 วินาทีในช่องทางที่ 1

ตารางที่ 4.5 ค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีพบระยะเวลาการรอคอย 5 วินาทีในช่องทางที่ 1

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5
ค่าฟีโรโมน	3.541	0.000	0.000	3.539	0.002

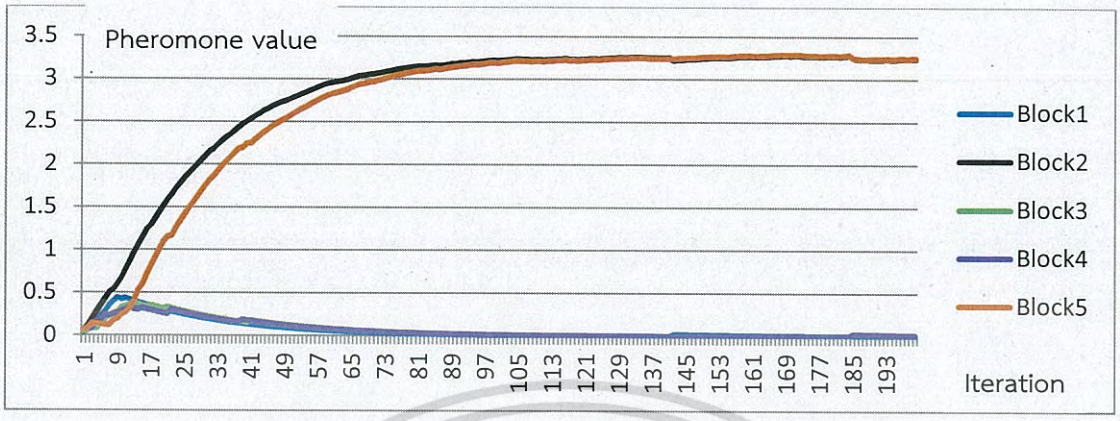
4.3.2.2 กรณีพบระยะเวลาการรอคอย 10 วินาที

ผลการทดลองแสดงเส้นทางเดินได้ดังรูปที่ 4.14 และผลลัพธ์ของฟีโรโมนในแต่ละช่องทางเดินแสดงในรูปที่ 4.15 ตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.14 เส้นทางเดินกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 10 วินาทีในช่องทางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



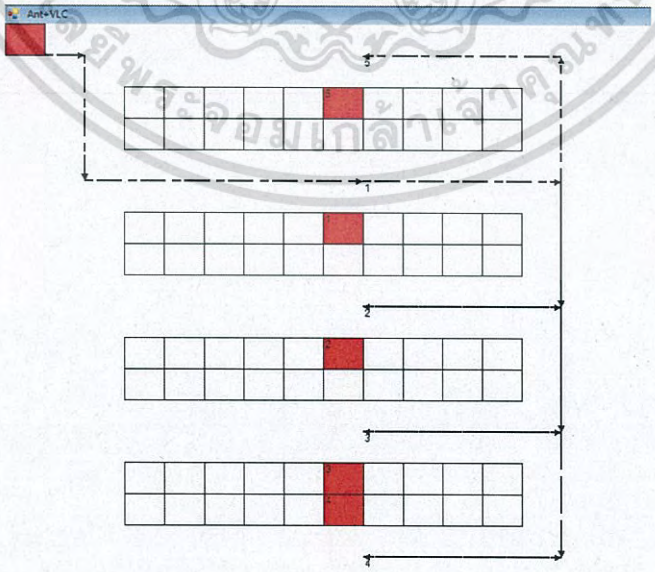
รูปที่ 4.15 ค่าของฟีโรโมนในกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 10 วินาทีในช่องทางที่ 1

ตารางที่ 4.6 ค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีพบระยะเวลาการรอคอย 10 วินาทีในช่องทางที่ 1

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5
ค่าฟีโรโมน	0.003	3.244	0.016	0.016	3.246

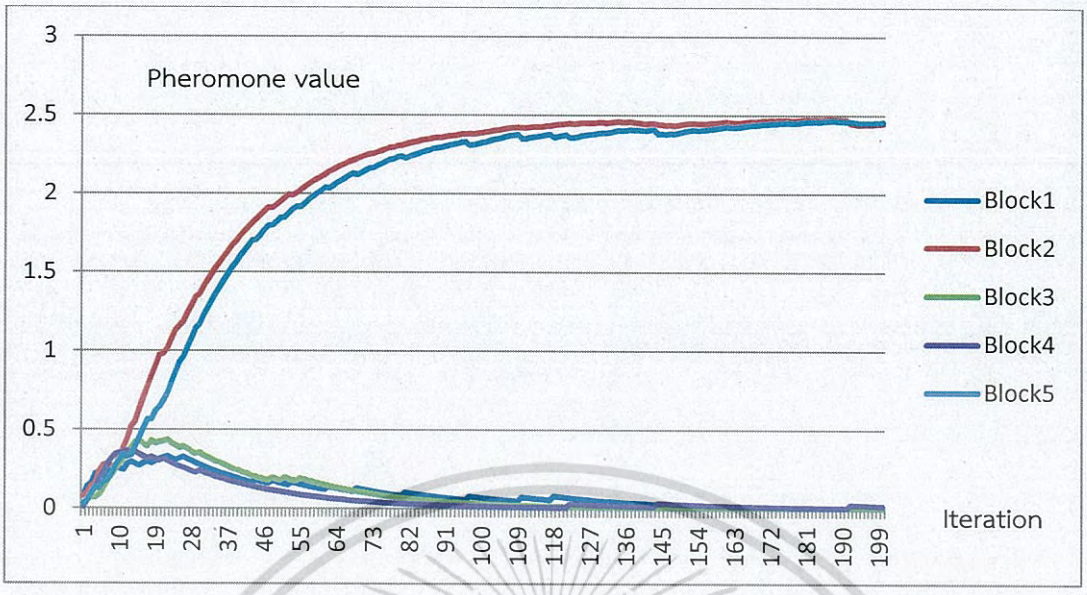
4.3.2.3 กรณีพบระยะเวลาการรอคอย 20 วินาทีในช่องทางที่ 1

ผลการทดลองแสดงเส้นทางเดินได้ดังรูปที่ 4.16 และผลลัพธ์ของฟีโรโมนในแต่ละช่องทางเดินแสดงในรูปที่ 4.17 ตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.16 เส้นทางเดินกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 20 วินาที ในช่องทางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าของฟีโรโมนในกรณีพบระยะเวลาการรอคอย 20 วินาที ในช่องทางที่ 1

ตารางที่ 4.7 ค่าฟีโรโมนสุดท้ายในแต่ช่องทางเดิน กรณีพบระยะเวลาการรอคอย 20 วินาที ในช่องทางที่ 1

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5
ค่าฟีโรโมน	0.003	2.450	0.001	0.019	2.459

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าระยะเวลารอคอยที่เวลา 10 วินาที วิธีอาณานิคมมดซึ่งมีกลไกลตรวจสอบความหนาแน่น จะเปลี่ยนเส้นทางการเดินจากช่องทางที่ 1 ไปยังช่องที่ 2 ก่อน แต่หากระยะเวลาการรอคอยเป็น 5 วินาที จะยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินใดๆ โดยผลการตัดสินใจเลือกเส้นทางเดินนั้นมาจากค่าฟีโรโมนที่เปลี่ยนแปลงไปตามผลการทดลองที่แสดงให้เห็นในรูปที่ รูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.17

4.3.3 ผลการทดลองการค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้กรณีไม่มีการจัดการความหนาแน่น

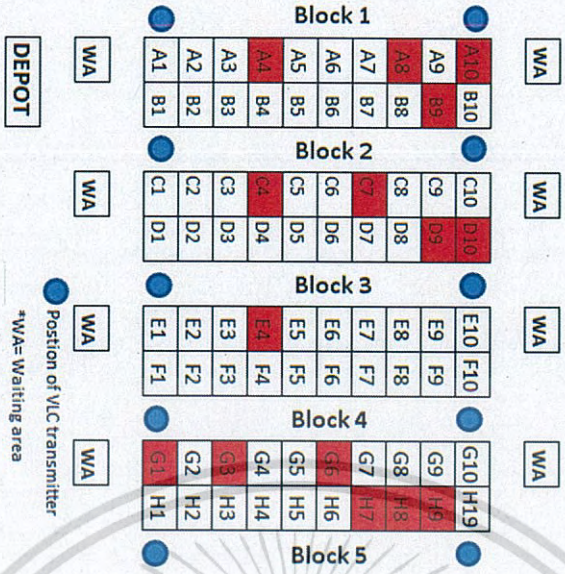
4.3.3.1 กรณีรายการสินค้า 15 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงตามตารางที่ 4.8 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.18 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 ถึง 4.20

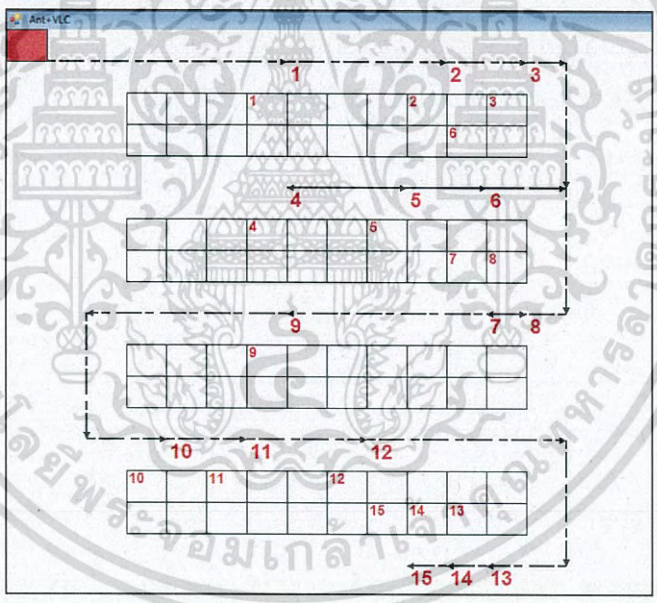
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	513	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	394	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

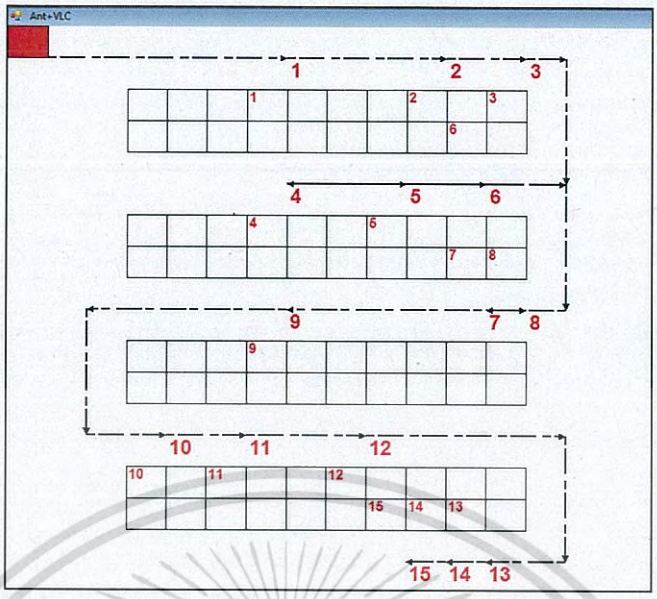


รูปที่ 4.18 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ



รูปที่ 4.19 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



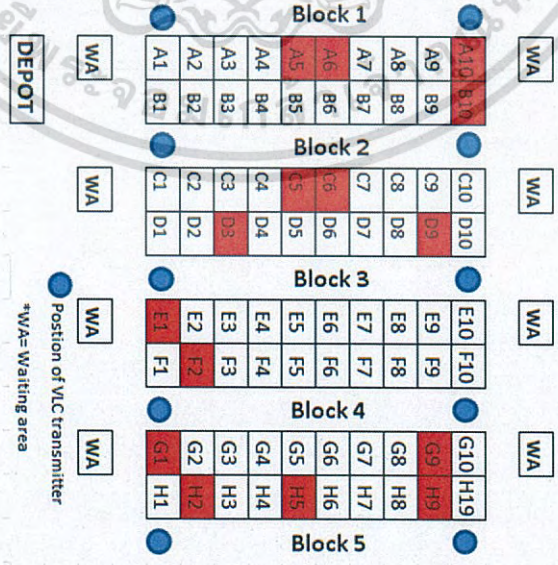
รูปที่ 4.20 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.9 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.22 ถึง 4.23

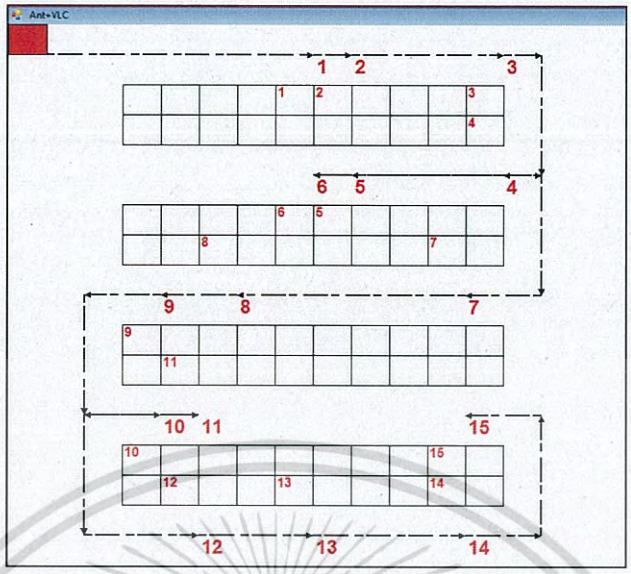
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	513	71
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	394	71

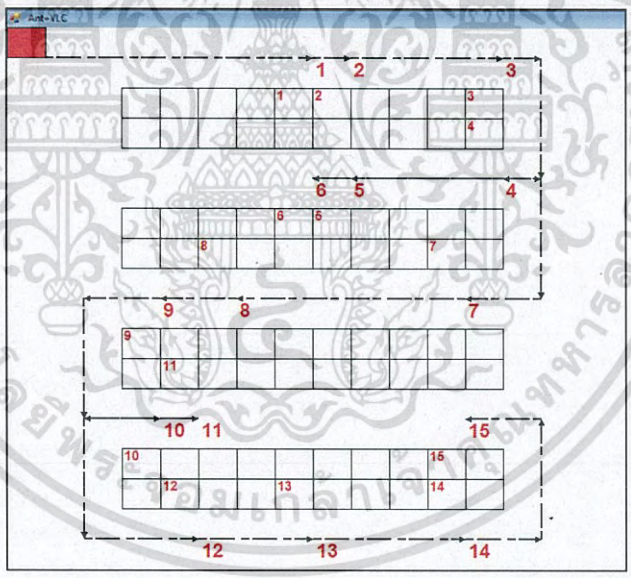


รูปที่ 4.21 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ



รูปที่ 4.23 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ

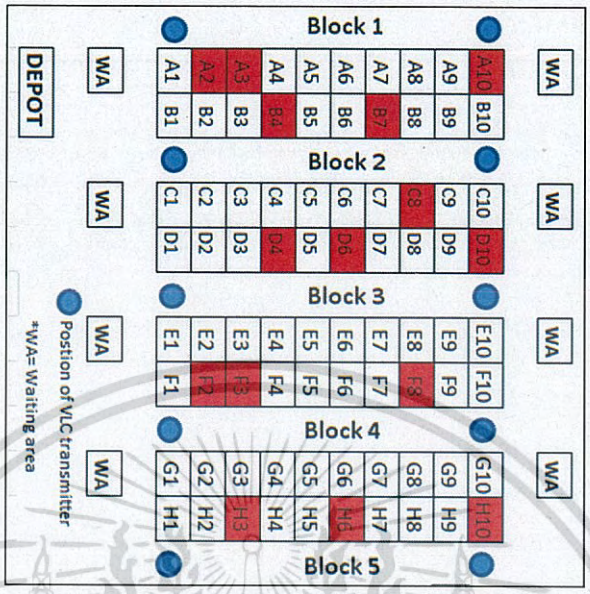
ผลการทดลองครั้งที่ 3

ผลการทดลองครั้งที่ 3 แสดงตามตารางที่ 4.10 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.24 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.25 ถึง 4.26

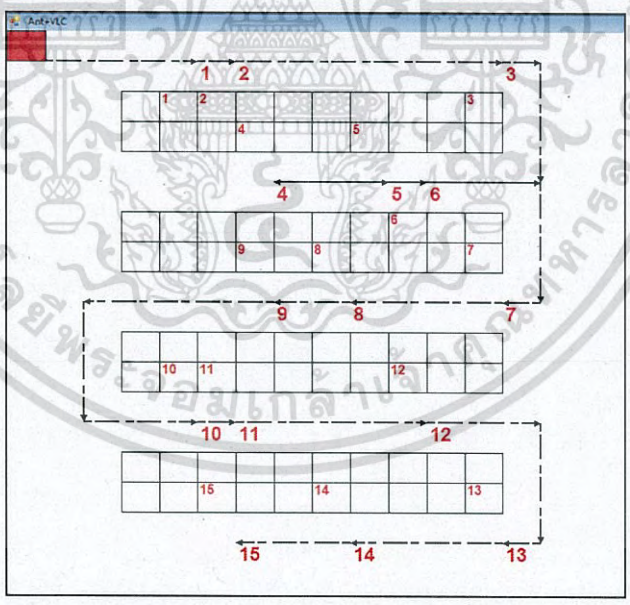
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	513	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	394	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

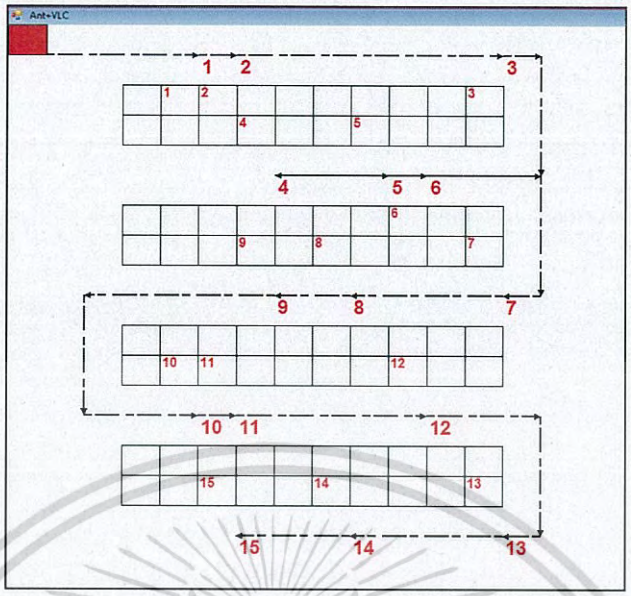


รูปที่ 4.24 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ



รูปที่ 4.25 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ

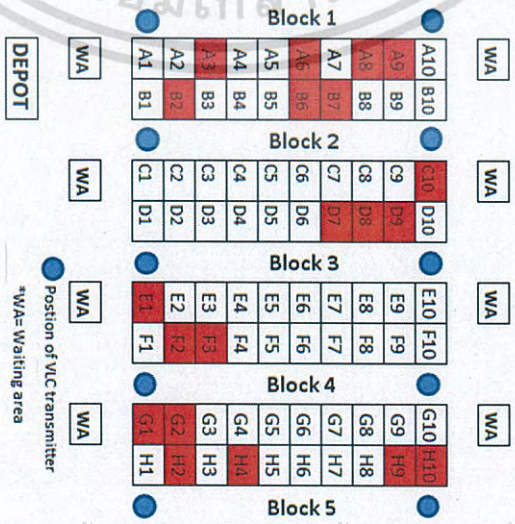
4.3.3.2 กรณีรายการสินค้า 20 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 1

ผลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงตามตารางที่ 4.11 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.27 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.28 ถึง 4.29

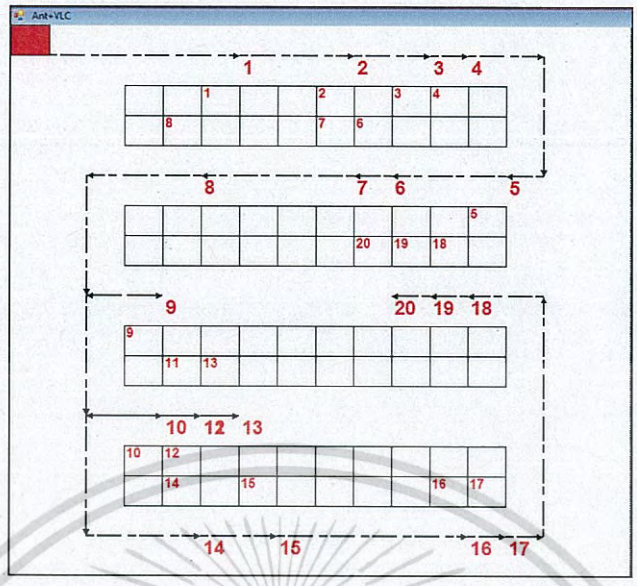
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	320	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	471	70

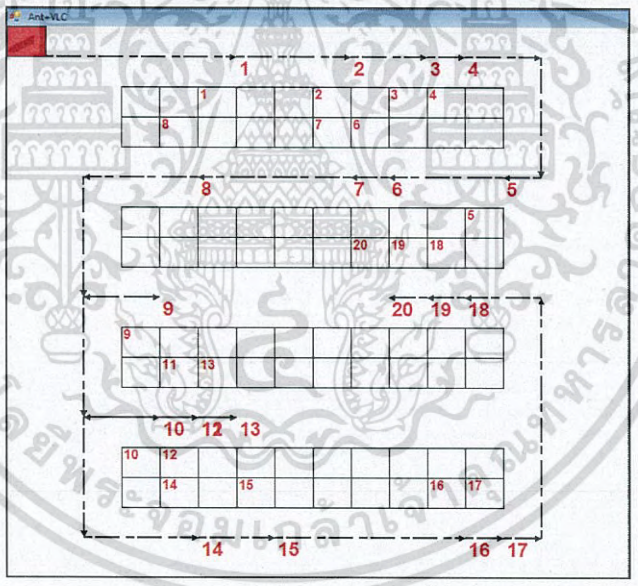


รูปที่ 4.27 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ



รูปที่ 4.29 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ

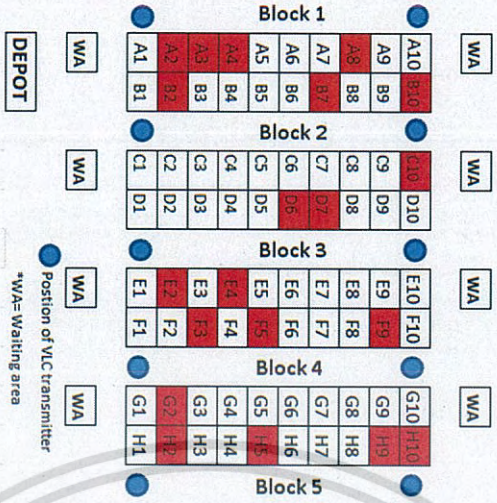
ผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.12 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.30 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.31 ถึง 4.32

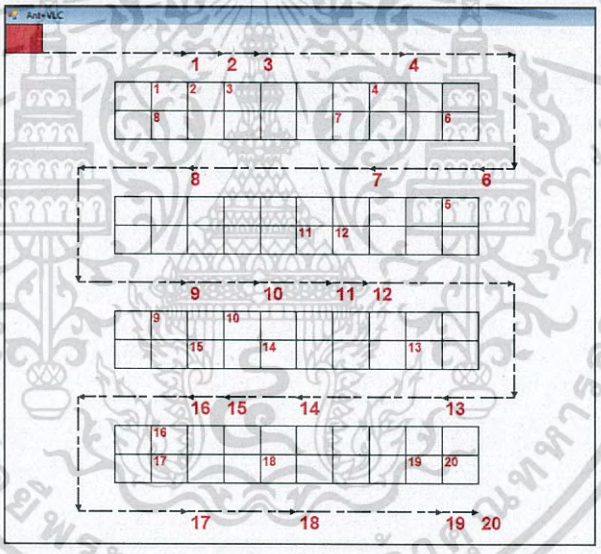
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	500	71
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	463	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

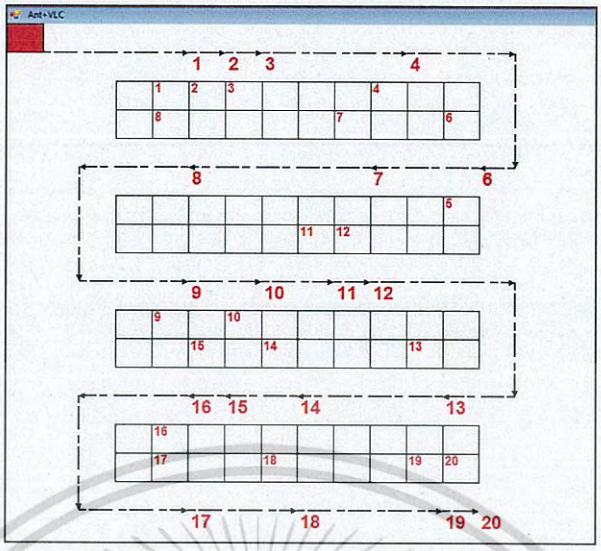


รูปที่ 4.30 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ



รูปที่ 4.31 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



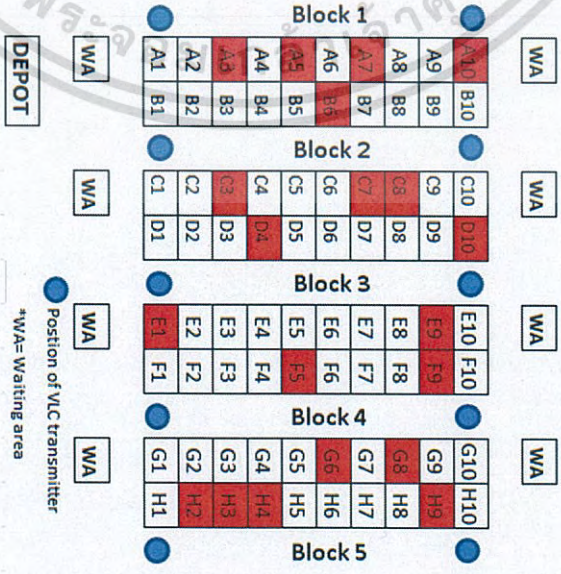
รูปที่ 4.32 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 3

ผลการทดลองครั้งที่ 3 แสดงตามตารางที่ 4.13 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.33 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.34 ถึง 4.35

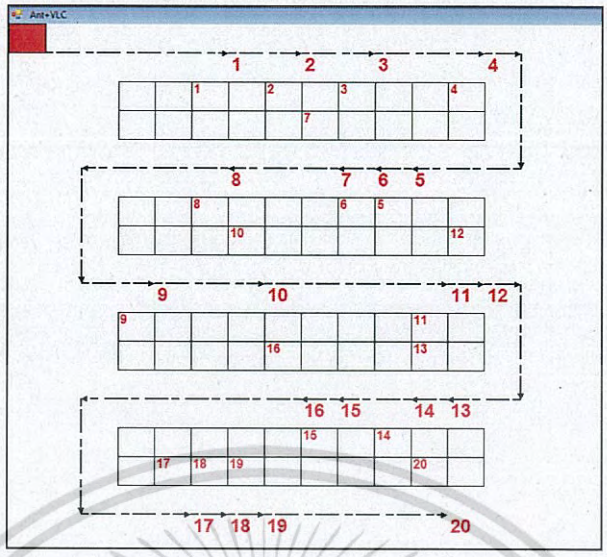
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	290	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	503	70



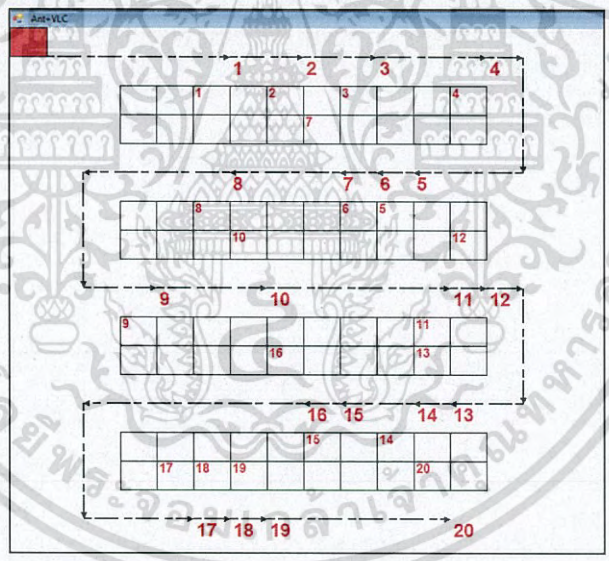
รูปที่ 4.33 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

เส้นทางเดินผู้หยิบสินค้าคนที่ 2



รูปที่ 4.35 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

4.3.3.3 กรณีรายการสินค้า 25 รายการ

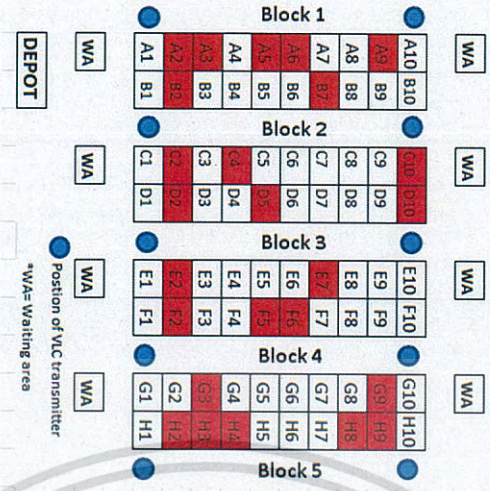
ผลการทดลองครั้งที่ 1

ผลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงตามตารางที่ 4.14 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.36 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.37 ถึง 4.38

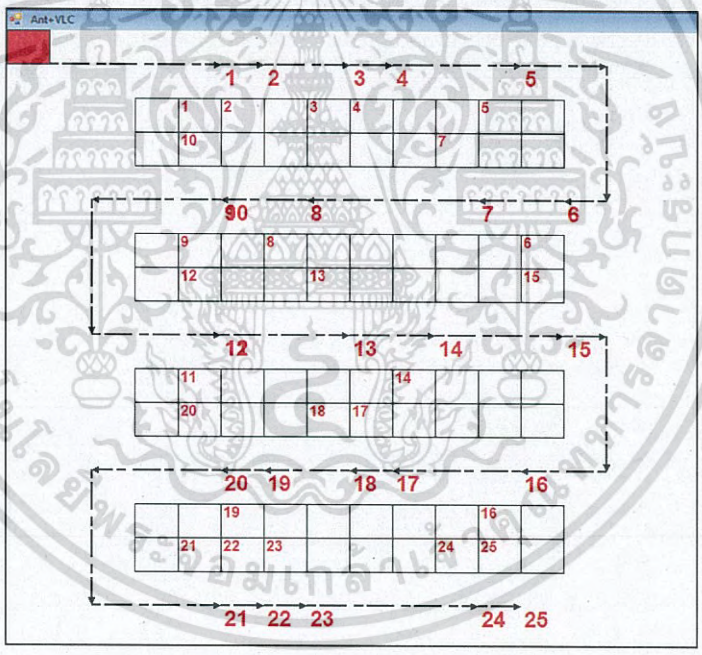
ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	505	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	439	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



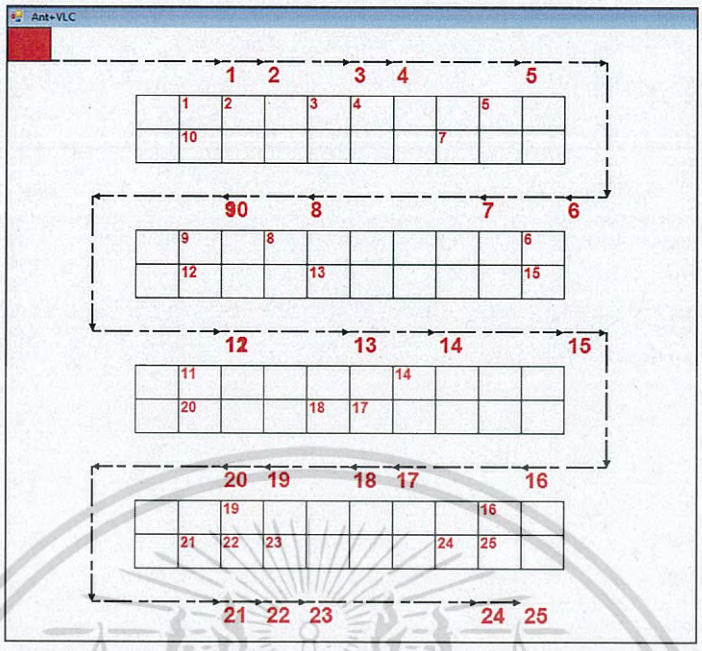
รูปที่ 4.36 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.37 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ

เส้นทางเดินผู้หยิบสินค้าคนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



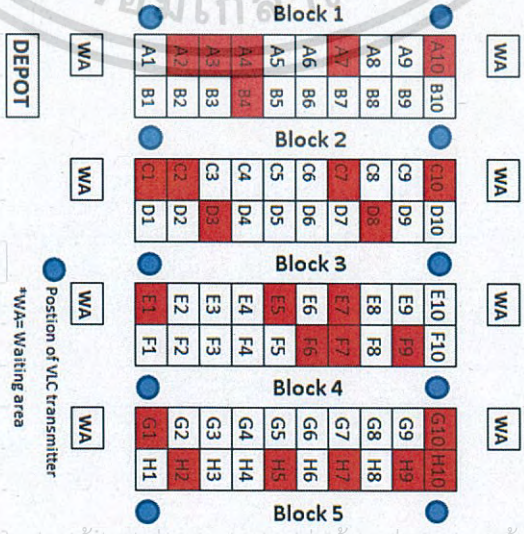
รูปที่ 4.38 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.15 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.39 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.40 ถึง 4.41

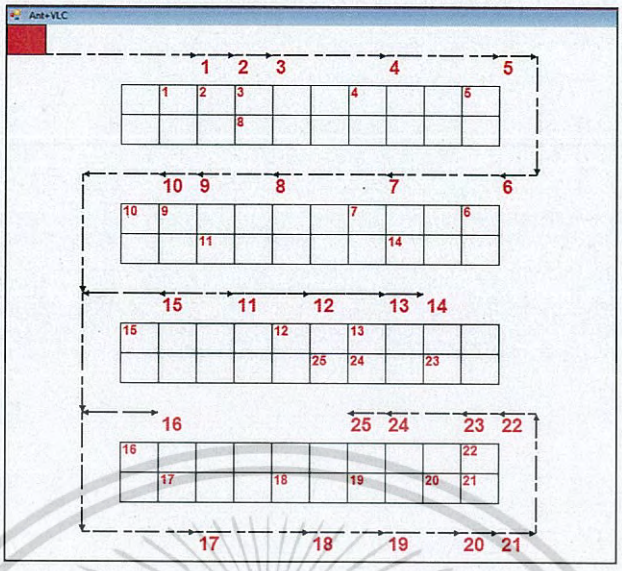
ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	428	77
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	461	77

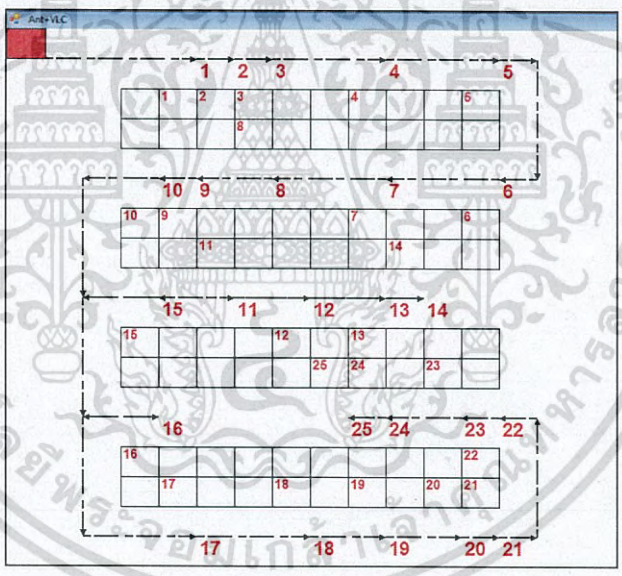


รูปที่ 4.39 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.41 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ

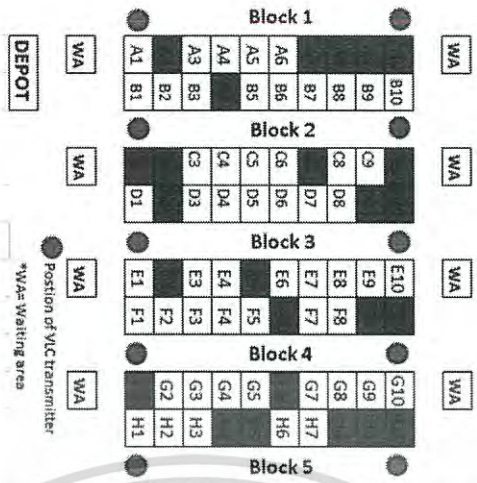
ผลการทดลองครั้งที่ 3

ผลการทดลองครั้งที่ 3 แสดงตามตารางที่ 4.16 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.42 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.43 ถึง 4.44

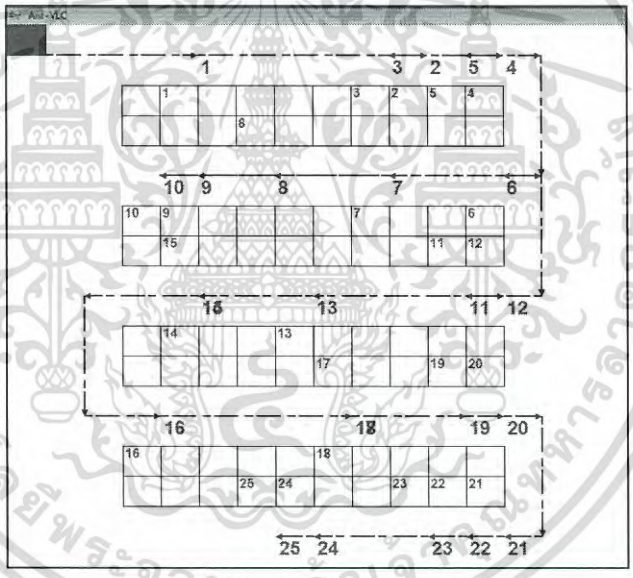
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	487	81
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	467	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

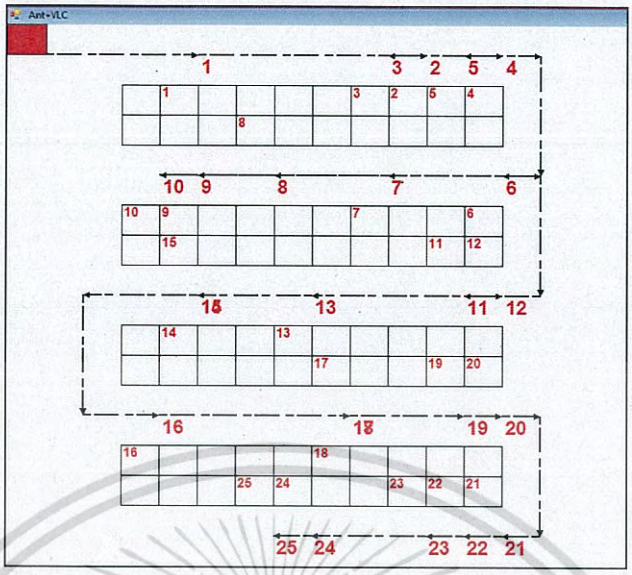


รูปที่ 4.42 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.43 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ

4.3.4 ผลการทดลองการค้นหาเส้นทางในคลังสินค้าด้วยวิธีอาณานิคมร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

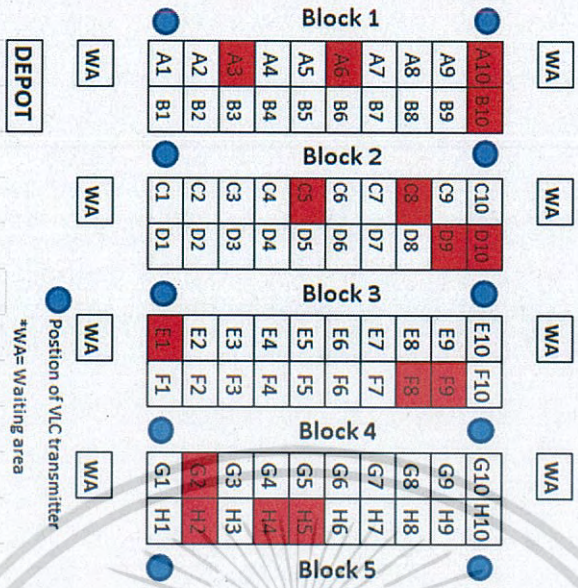
4.3.4.1 กรณีรายการสินค้า 15 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.17 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.45 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.46 ถึง 4.47

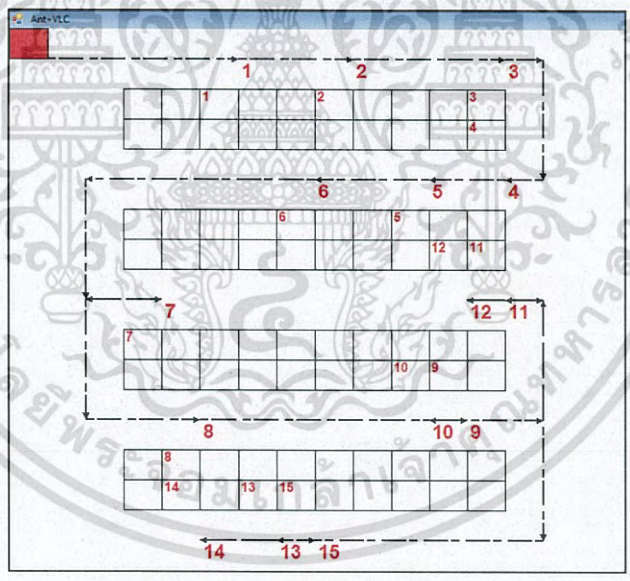
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	313	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	310	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

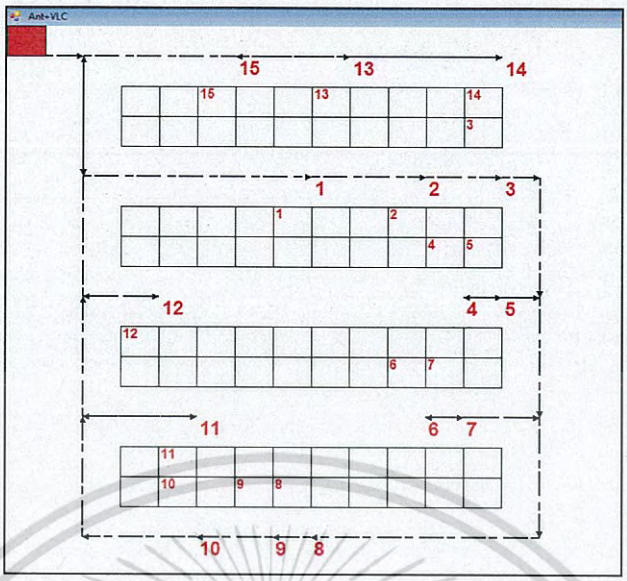


รูปที่ 4.45 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ



รูปที่ 4.46 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



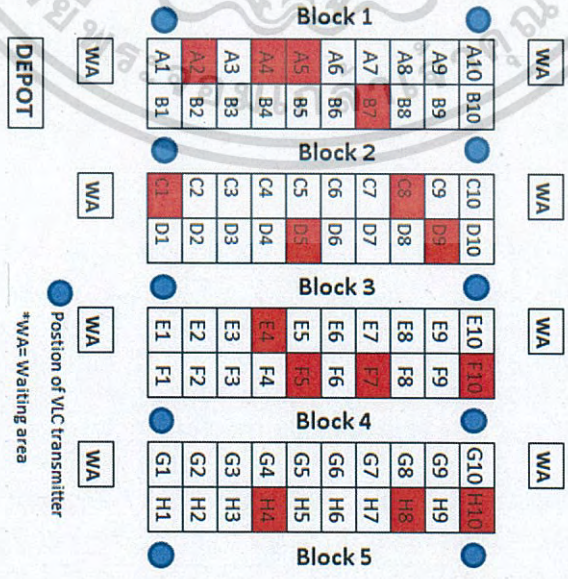
รูปที่ 4.47 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 15 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.18 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.48 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.49 ถึง 4.50

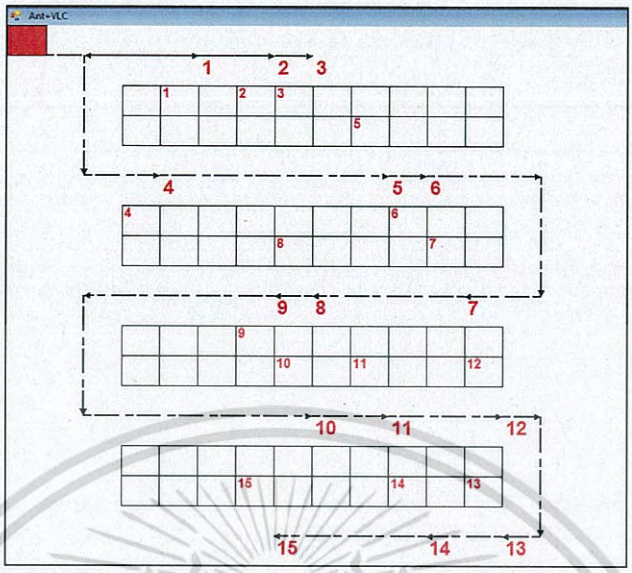
ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	313	72
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	310	88

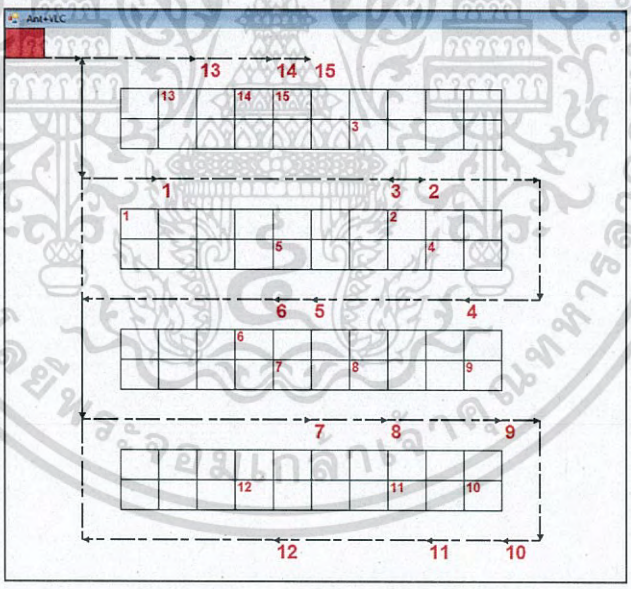


รูปที่ 4.48 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ



รูปที่ 4.50 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 15 รายการ

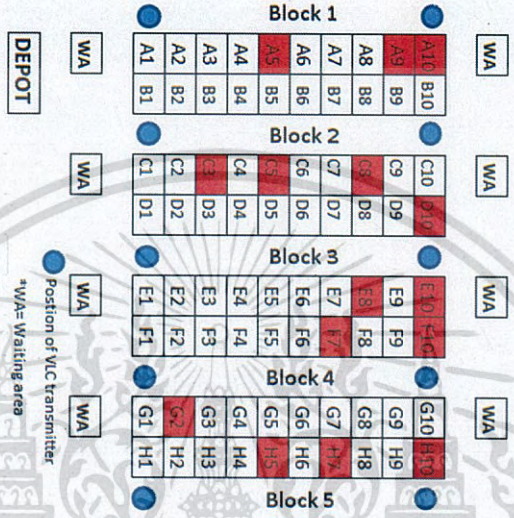
ผลการทดลองครั้งที่ 3

ผลการทดลองครั้งที่ 3 แสดงตามตารางที่ 4.19 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.51 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.52 ถึง 4.53

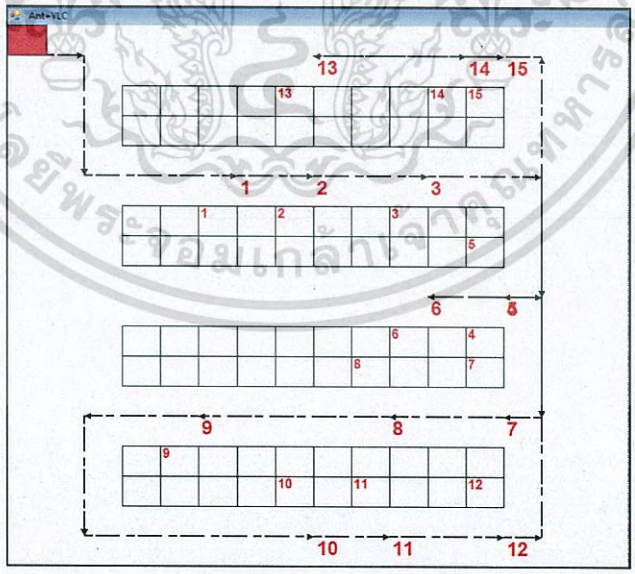
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	313	72
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	310	84

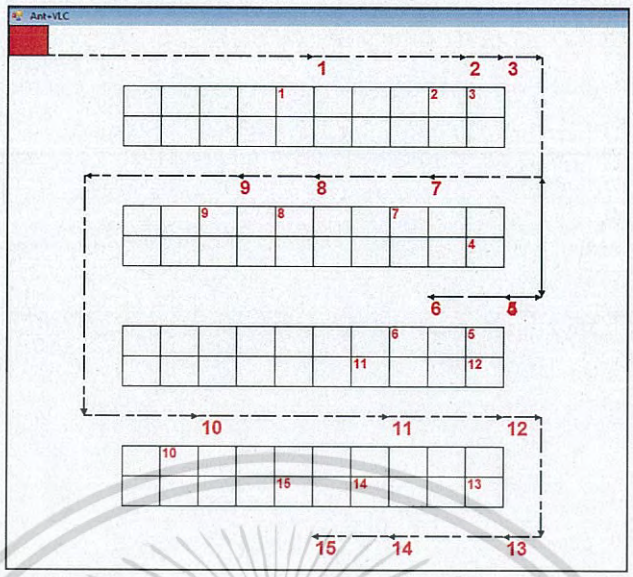


รูปที่ 4.51 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ



รูปที่ 4.52 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 15 รายการ

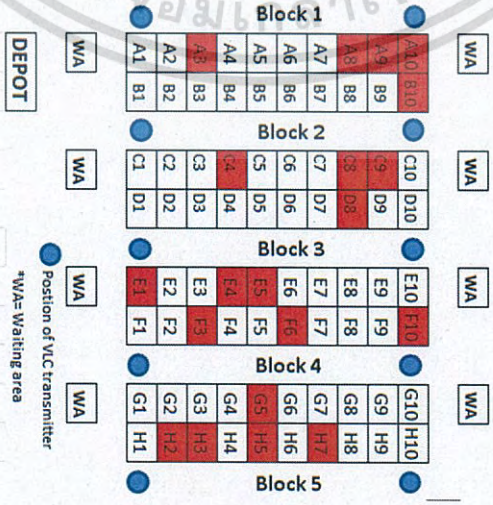
4.3.4.2 กรณีรายการสินค้า 20 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 1

ผลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงตามตารางที่ 4.20 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.54 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.55 ถึง 4.56

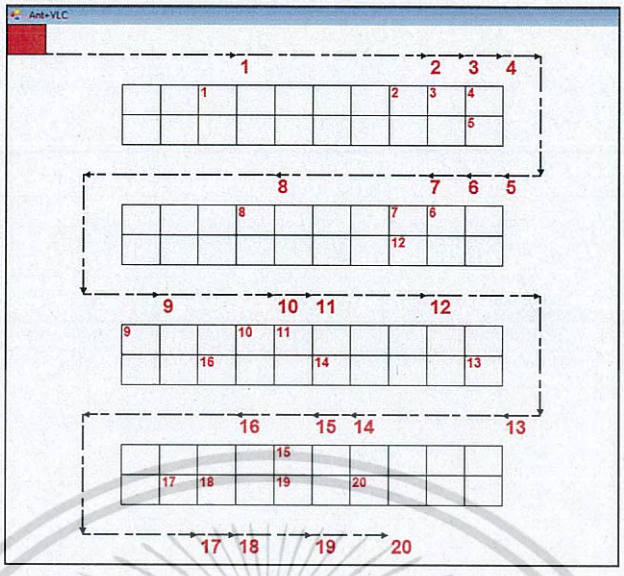
ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	397	68
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	355	146

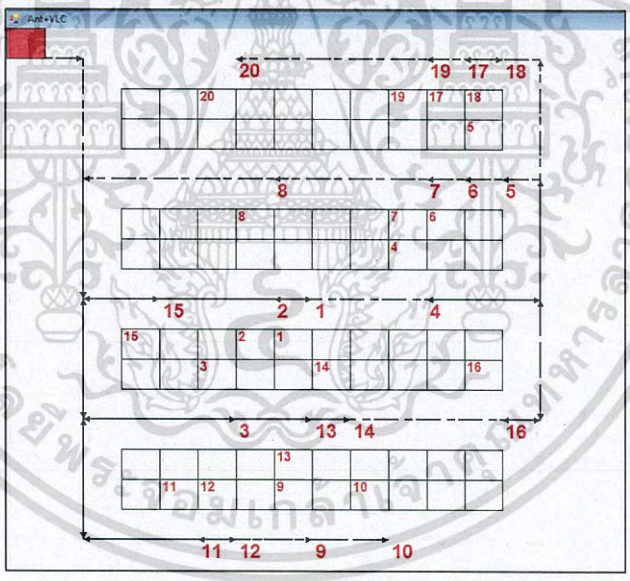


รูปที่ 4.54 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเพื่อประโยชน์ทางการศึกษาด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ



รูปที่ 4.56 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 20 รายการ

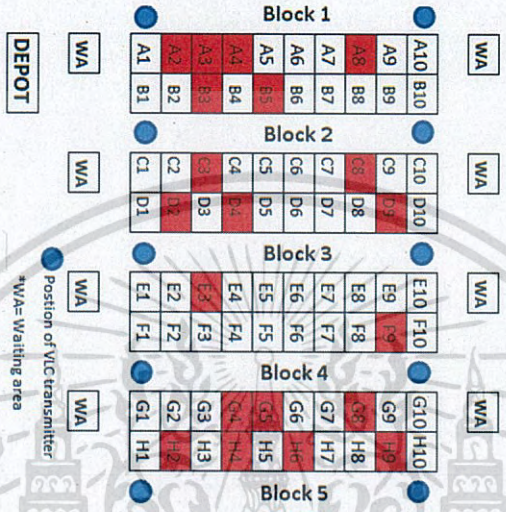
ผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.21 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.57 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.58 ถึง 4.59

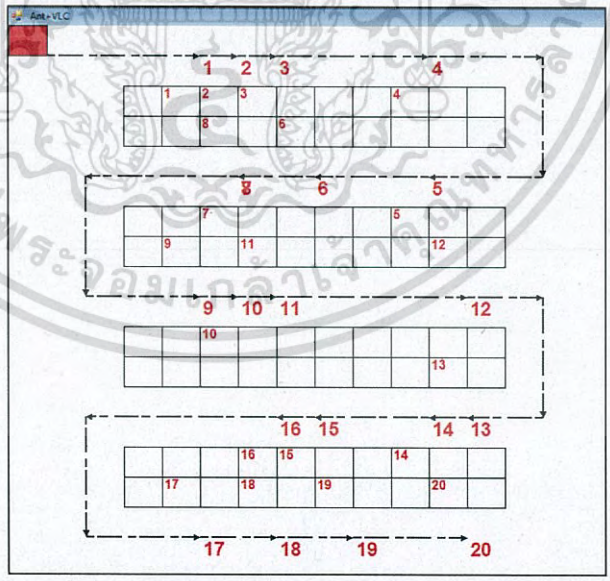
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	359	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	390	127

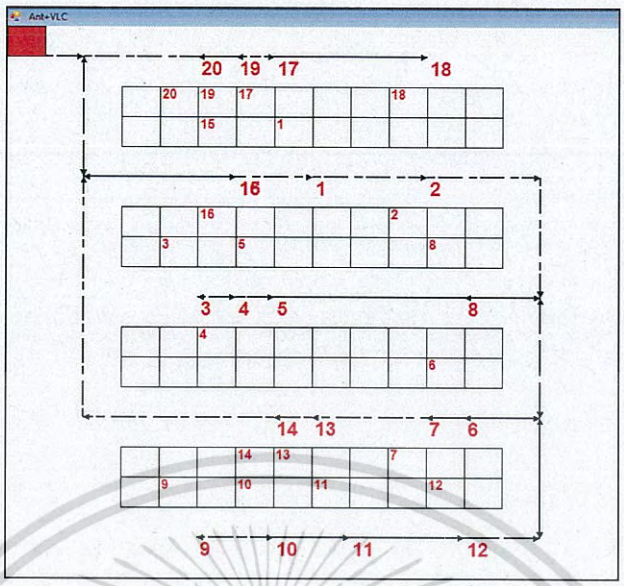


รูปที่ 4.57 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ



รูปที่ 4.58 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



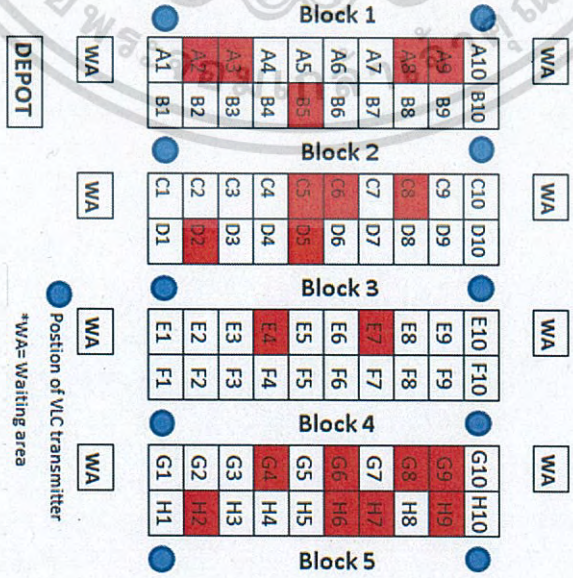
รูปที่ 4.59 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 20 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 3

ผลการทดลองครั้งที่ 3 แสดงตาม โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.60 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.61 ถึง 4.62

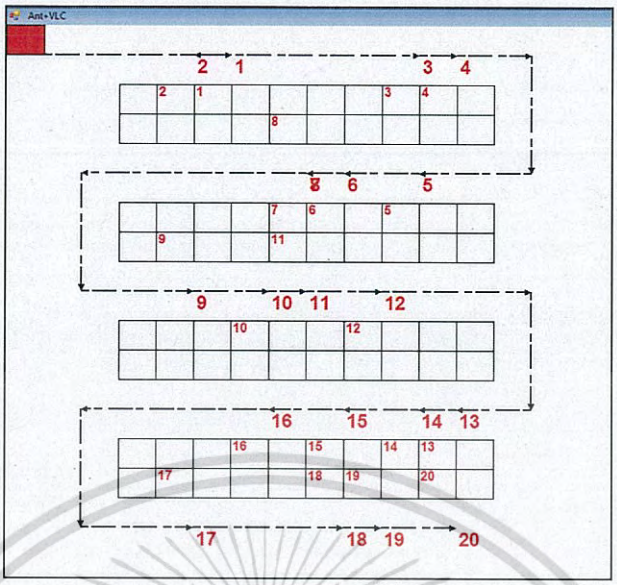
ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	409	72
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	396	133



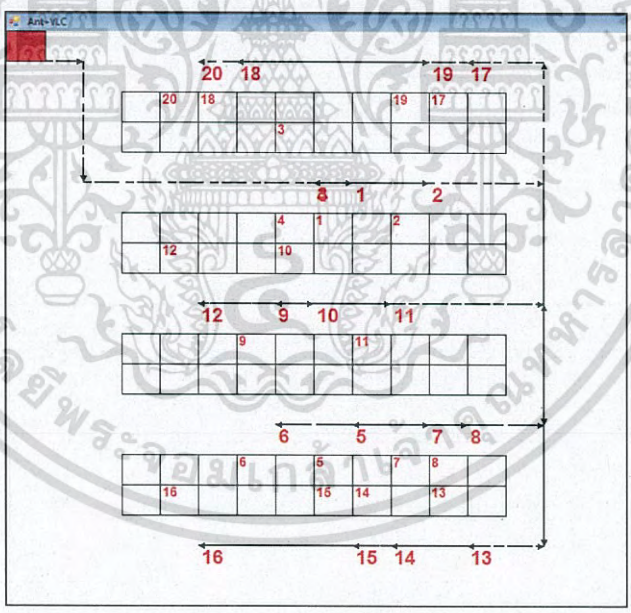
รูปที่ 4.60 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

เส้นทางเดินผู้หยิบสินค้าคนที่ 2



รูปที่ 4.62 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 20 รายการ

4.3.4.3 กรณีรายการสินค้า 25 รายการ

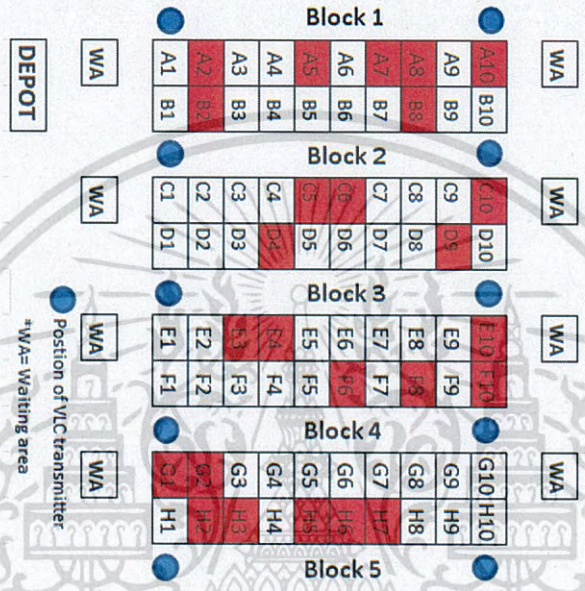
ผลการทดลองครั้งที่ 1

ผลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงตามตารางที่ 4.23 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.63 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.64 ถึง 4.65

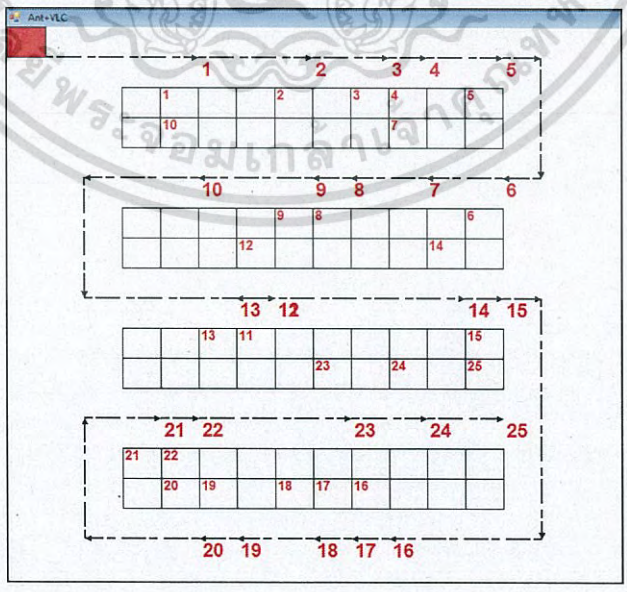
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	422	77
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	430	127



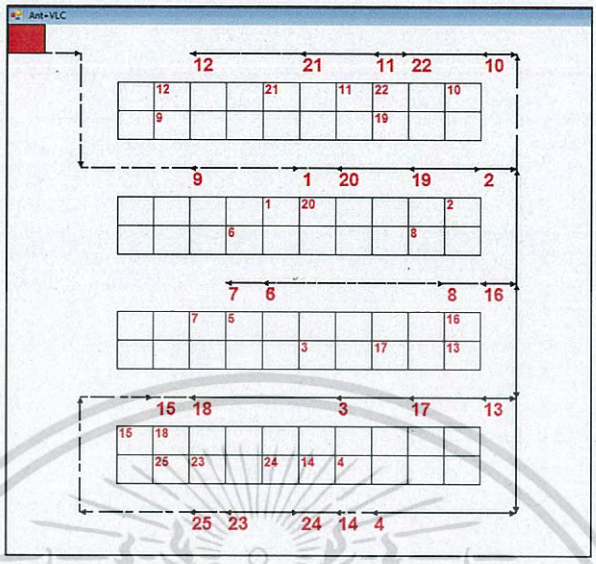
รูปที่ 4.63 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.64 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทางเดินผู้หยิบสินค้าคนที่ 2



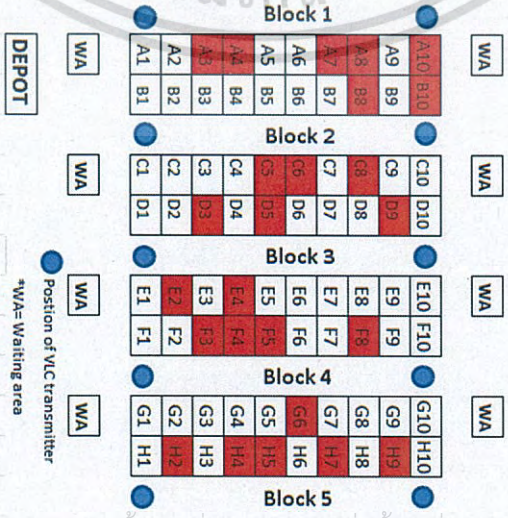
รูปที่ 4.65 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1 รายการสินค้า 25 รายการ

ผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองครั้งที่ 2 แสดงตามตารางที่ 4.24 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.66 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.67 ถึง 4.68

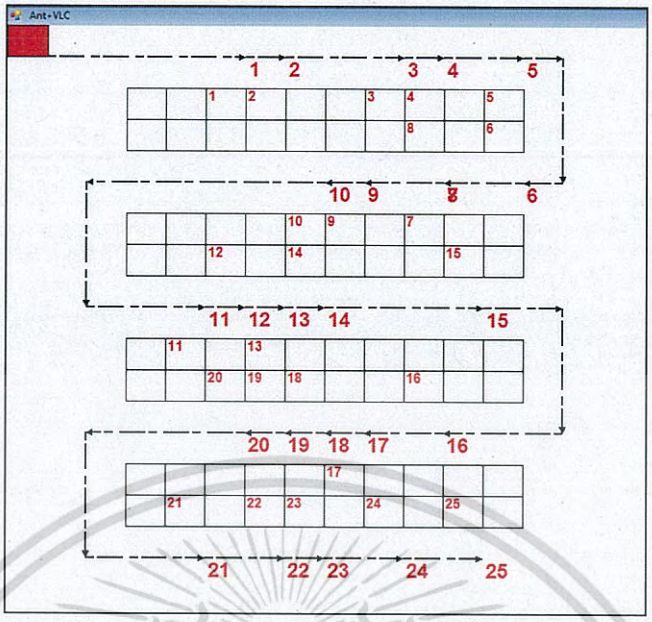
ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	410	70
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	468	143

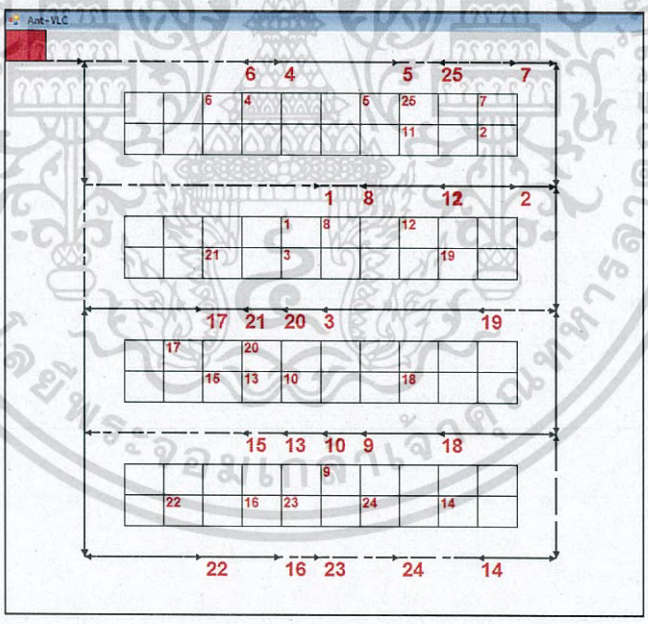


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.66 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.67 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.68 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2 รายการสินค้า 25 รายการ

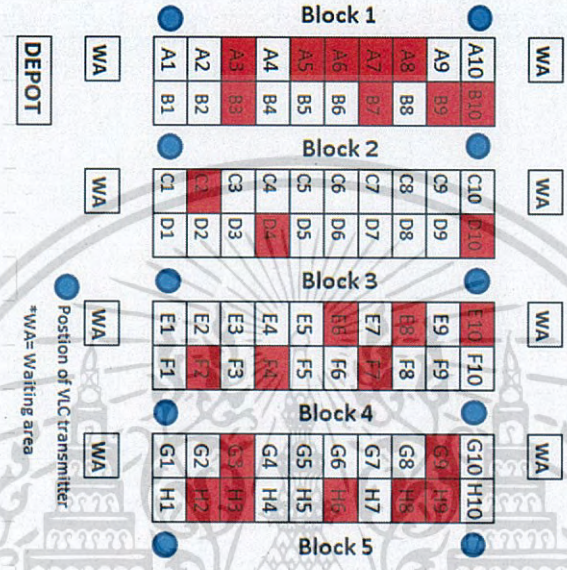
ผลการทดลองครั้งที่ 3

ผลการทดลองครั้งที่ 3 แสดงตามตารางที่ 4.25 โดยรายการสินค้าที่ทำการหยิบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.69 และผลลัพธ์เส้นทางเดินแสดงอยู่ในรูปที่ 4.70 ถึง 4.71

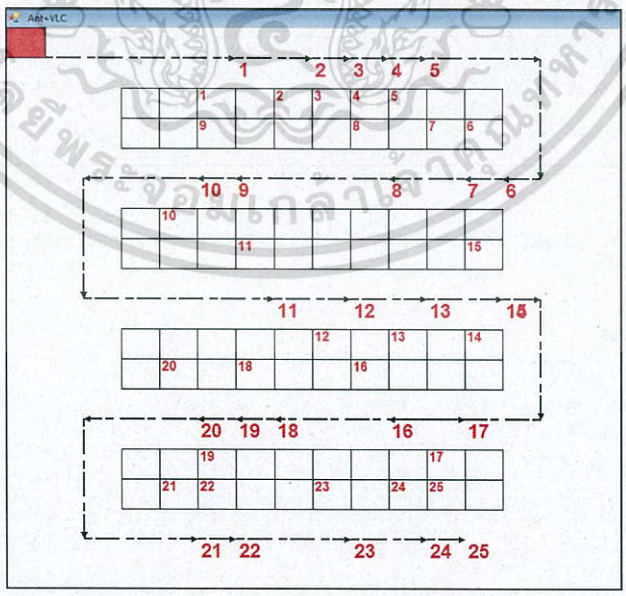
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ผลการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ

ผู้ทดลอง	ระยะเวลา(วินาที)	ระยะการเดินทาง (เมตร)
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 1	420	81
ผู้หยิบสินค้าคนที่ 2	435	154

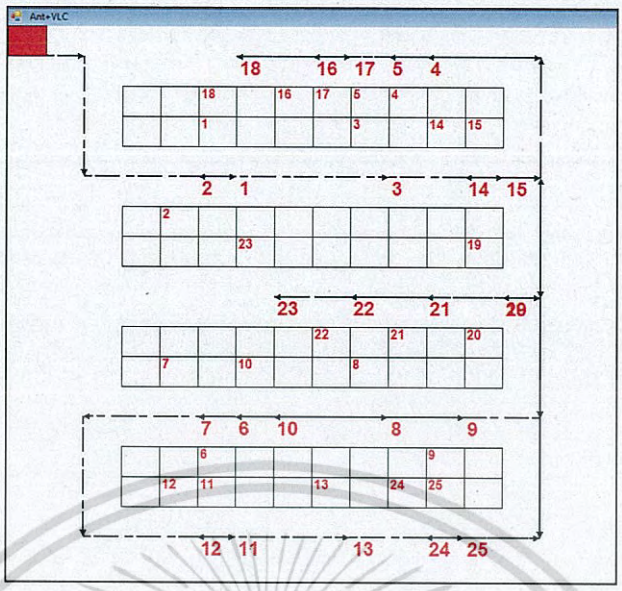


รูปที่ 4.69 ตำแหน่งการสุ่มรายการสินค้าการทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ



รูปที่ 4.70 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 เส้นทางเดินของผู้หยิบสินค้าคนที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3 รายการสินค้า 25 รายการ

ภาพการทดลองกรณี 15 รายการสินค้า

ภาพการทดลองในกรณี 15 รายการสินค้าแสดงดังรูป 4.72 ถึง 4.73

รูปที่ 4.72 การทดลองกรณี 15 รายการสินค้า ขั้นตอนการเดินหยิบสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.73 การทดลองกรณี 15 รายการสินค้า ขั้นตอนการเตรียมอุปกณ์

ภาพการทดลองกรณี 20 รายการสินค้า

ภาพการทดลองในกรณี 20 รายการสินค้าแสดงดังรูป 4.74 ถึง 4.77

รูปที่ 4.74 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า หน้าซอฟตแวร์ส่วนผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.75 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า เตรียมอุปกรณ์ทำการทดลอง

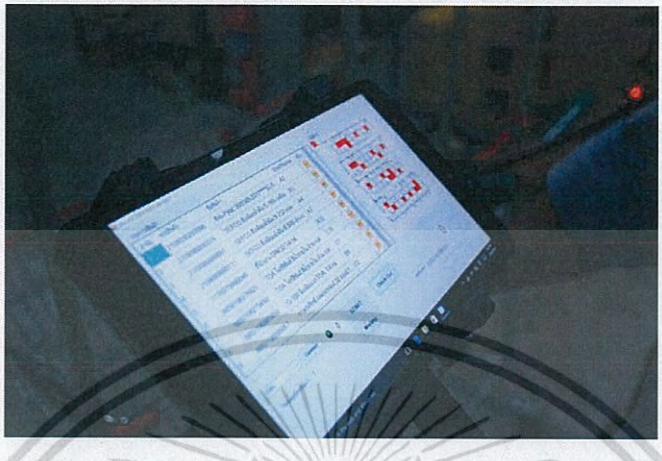
รูปที่ 4.76 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า การเดินหยิบสินค้าในช่องทางเดินของผู้หยิบที่ 1

รูปที่ 4.77 การทดลองกรณี 20 รายการสินค้า การเดินหยิบสินค้าในช่องทางเดินของผู้หยิบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพการทดลองกรณี 25 รายการสินค้า

ภาพการทดลองในกรณี 25 รายการสินค้าแสดงดังรูป 4.78 ถึง 4.80



รูปที่ 4.78 การทดลองกรณี 25 รายการสินค้า 1 หน้าซอฟต์แวร์ส่วนผู้ใช้

รูปที่ 4.79 การทดลองกรณี 25 รายการสินค้า การรอคอยบริเวณหน้าช่องทางเดิน

รูปที่ 4.80 การทดลองกรณี 25 รายการสินค้า การเดินหยิบสินค้าในช่องทางเดินของผู้หยิบที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางสรุปผลการทดลองกรณี 15 รายการสินค้า

ตารางที่ 4.26 สรุปผลการทดลองกรณี 15 รายการสินค้า

		วิธีการค้นหาเส้นทาง	Total travel-time (s)	Distance (m)
การทดลองครั้งที่ 1	Picker 1	ACO	513	70
		VLC Assisted ACO	313	70
	Picker 2	ACO	394	70
		VLC Assisted ACO	310	83
การทดลองครั้งที่ 2	Picker 1	ACO	363	72
		VLC Assisted ACO	356	72
	Picker 2	ACO	410	72
		VLC Assisted ACO	319	88
การทดลองครั้งที่ 3	Picker 1	ACO	286	72
		VLC Assisted ACO	297	72
	Picker 2	ACO	398	72
		VLC Assisted ACO	289	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางสรุปผลการทดลองกรณี 20 รายการสินค้า

ตารางที่ 4.27 สรุปผลการทดลองกรณี 20 รายการสินค้า

		วิธีการค้นหาเส้นทาง	Total travel-time (s)	Distance (m)
การทดลองครั้งที่ 1	Picker 1	ACO	320	70
		VLC Assisted ACO	397	68
	Picker 2	ACO	471	70
		VLC Assisted ACO	355	146
การทดลองครั้งที่ 2	Picker 1	ACO	500	71
		VLC Assisted ACO	359	70
	Picker 2	ACO	463	71
		VLC Assisted ACO	390	127
การทดลองครั้งที่ 3	Picker 1	ACO	290	70
		VLC Assisted ACO	409	72
	Picker 2	ACO	503	70
		VLC Assisted ACO	396	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางสรุปผลการทดลองกรณี 25 รายการสินค้า

ตารางที่ 4.28 สรุปผลการทดลองกรณี 25 รายการสินค้า

		วิธีการค้นหาเส้นทาง	Total travel-time (s)	Distance (m)
การทดลองครั้งที่ 1	Picker 1	ACO	505	70
		VLC Assisted ACO	422	77
	Picker 2	ACO	439	70
		VLC Assisted ACO	430	127
การทดลองครั้งที่ 2	Picker 1	ACO	428	77
		VLC Assisted ACO	410	70
	Picker 2	ACO	461	77
		VLC Assisted ACO	468	143
การทดลองครั้งที่ 3	Picker 1	ACO	487	81
		VLC Assisted ACO	420	70
	Picker 2	ACO	467	81
		VLC Assisted ACO	435	154

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.29 ถึง 4.31 จะเห็นได้ว่า การใช้หลีกเลี่ยงความหนาแน่นโดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ VLCช่วยลดเวลาเฉลี่ย ในกรณีรายการสินค้า 15 รายการต่อใบขายลดลง 20% กรณีรายการสินค้า 20 รายการต่อใบขายลดลง 9% และ กรณีรายการสินค้า 25 รายการต่อใบขายลดลง 7% แสดงให้เห็นว่าการใช้ การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นร่วมกับวิธีอาณานิคมมดนั้นช่วยให้ประสิทธิภาพด้านเวลาภายในคลังสินค้าดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 ระยะเวลารวมการทดลองกรณี 15 รายการสินค้า

	วิธีการค้นหาเส้นทาง	Total travel-time (s)
Sale Order 1 (15 items)	ACO	907
	VLC Assisted ACO	623
Sale Order 2 (15 items)	ACO	773
	VLC Assisted ACO	675
Sale Order 3 (15 items)	ACO	684
	VLC Assisted ACO	586

ตารางที่ 4.30 ระยะเวลารวมการทดลองกรณี 20 รายการสินค้า

	วิธีการค้นหาเส้นทาง	Total travel-time (s)
Sale Order 1 (20 items)	ACO	791
	VLC Assisted ACO	752
Sale Order 2 (20 items)	ACO	963
	VLC Assisted ACO	749
Sale Order 3 (20 items)	ACO	805
	VLC Assisted ACO	793

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.31 ระยะเวลารวมการทดลองกรณี 25 รายการสินค้า

	วิธีการค้นหาเส้นทาง	Total travel-time (s)
Sale Order 1 (25 items)	ACO	944
	VLC Assisted ACO	852
Sale Order 2 (25 items)	ACO	889
	VLC Assisted ACO	878
Sale Order 3 (25 items)	ACO	954
	VLC Assisted ACO	855

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ สำหรับหลายผู้หยิบสินค้า โดยพิจารณาความหนาแน่นของเส้นทางเดิน เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงระยะเวลาการรอคอย การรับรู้ความหนาแน่นนั้นใช้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ในการระบุ สถานะผู้หยิบสินค้าในช่องทางเดิน ซึ่งช่องทางเดินเข้าและออกในแต่ละช่องนั้นถูกติดตั้งอุปกรณ์ภาคส่ง ทำให้สามารถทราบได้ว่าในแต่ละช่องทางเดินนั้นมีผู้หยิบสินค้าอยู่หรือไม่ เพื่อที่จะพิสูจน์สมมติฐานเราได้กำหนดการทดลองเป็นสองส่วนคือหนึ่งการทดลองการเปลี่ยนแปลงฟีโรโมนของวิธีอาณานิคมมด เนื่องจากความหนาแน่น ผลแสดงให้เห็นว่าการที่ระบบรับรู้ระยะเวลาการรอคอยที่จะเกิดขึ้นนั้นจะทำให้ วิธีอาณานิคมมดค้นหาเส้นทางใหม่ทำให้สามารถลดเวลาการรอคอยได้ ส่วนที่สองได้กำหนดการทดลองในคลังสินค้าวัสดุสินค้าแห่งหนึ่ง ที่มีลักษณะหลายช่องทางเดินเดี่ยว แบบแคบ โดยให้ผู้หยิบสินค้านั้นทำงานพร้อมกันในรายการสินค้าเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีอาณานิคมมด กับวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ แสดงให้เห็นว่าวิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้นั้น สามารถทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยในการหยิบสินค้าต่ำลง ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าสามารถลดเวลาการทำงานในกรณีที่มีความหนาแน่นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิธีอาณานิคมมดร่วมกับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ในการจัดการคลังสินค้านั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ซึ่งความท้าทายอยู่ที่ระยะการสื่อสารที่ทำได้ ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง ซึ่งการทดลองนี้ใช้ระยะการสื่อสารที่ 1 เมตร ซึ่งหากเป็นคลังสินค้าที่ใช้รถโฟลค์ลิฟต์ในการหยิบสินค้า อาจจะไม่สะดวกในการทำงาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านเป็นอีกปัจจัยที่จะต้องทำการทดลองเพิ่มเติม เพื่อแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมกับการทำงานภายในคลังสินค้าหลายๆ รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] F. Chen, ·. H. (April 2016). "An ACO-based online routing method for multiple order pickers with congestion consideration in warehouse". **Journal of Intelligent Manufacturing**, *vol. 27 (2)*, 389-408.

[2] M. Subha, a. R. (July-September 2009). "An emerging ant colony optimization routing algorithm (ACORA) for manets". **Journal of Computer Applications**, vol. II, no.3, 29-33.

[3] F. Chen, H. W. (2013). "An ant colony optimization routing algorithm for two order pickers with congestion consideration". **Computers & Industrial Engineering**,vol. 66 (1), 77-85.

[4] J. Gancarz, H. E. (34-41). "Impact of lighting requirements on VLC systems". **IEEE Communications Magazine**, vol. 51, December 2013.

[5] Haruyama, S. (April 2013). "Visible light communication using sustainable LED lights". **ITU Kaleidoscope**: Building Sustainable Communities (K-2013), 1-6.

[6] อาสาทรงธรรม, จ. (ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 (ม.ค.-มี.ค. 2555)). "โลจิสติกส์กับการจัดการคลังสินค้าที่ดี". **วารสารนักบริหาร**, 163-168.

[7] วัฒนานุกูล, จ. (2552). **การจัดการไอทีโลจิสติกส์**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[8] ปิตาคะโส, ร. (2559). **วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างสำหรับแก้ปัญหาการขนส่งโลจิสติกส์**. อุบลราชธานี: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

[9] สุจารี. คณน (2007) **Ant Colony optimization**.
https://www.gotoknow.org/posts/99496

[10] Dorigo M1, Maniezzo V, Colorni A. (29-41). "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents". ". **IEEE Communications Magazine**. 1996;26(1)

[11] M. Dorigo, T. S. (2004). **Ant Colony Optimization**. London England: Massachusetts Institute of Technology.

[12] ราชการ ปรึกษาดี , สุนันทา สดสี.(2012). "การเปรียบเทียบหาเส้นทางที่เหมาะสมโดยวิธีระบบมดและ Dijkstra's Algorithm" ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ **The National Conference on Computing and Information Technology**

[13] W. Lu(2016). "An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations". **European Journal of Operational Research**, 107–122.

[14] W. Guana, b. Y. (2017). "A novel three-dimensional indoor positioning algorithm design based on visible light communication". **Optics Communications**, 282–293.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

[15] W. Gu, W. Z. (2015). "Three dimensional indoor positioning based on visible light with Gaussian mixture sigma-point particle filter technique". **Proc. SPIE Int. Soc. Opt**, 9387.

[16] W. Zhang, M. S. (2014). "Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications". **Opt. Eng.**, 53.

[17] Yang, S.-H. K.-R.-S.-H. (2012). "Indoor positioning system based on visible light using location code". **Proceedings of the 4th International Conference on Communications and Electronics**, ICCE , 360–363.

[18] al, S. B. (1991). "Human Electroretinogram Responses to Video Displays, Fluorescent Lighting and Other High Frequency Sources",. **Optometry and Vision Science**, vol.68,, 645–62.

[19] G. A. Mahdiraji, E. Z. (2006). "Comparison of Selected Digital Modulation Schemes (OOK, PPM and DPIM) for Wireless Optical Communications". **4th Student Conference on Research and Development (SCOReD 2006)**. MALAYSIA.

[20] Datasheet Atmel "ATmega48/88/168" **Atmel** Rev. 2545T-04/11

[21] Patronis, Gene (1987). "Amplifiers". In Glen Ballou. **Handbook for Sound Engineers**: The New Audio Cyclopedia. Howard W. Sams & Co. p. 493

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

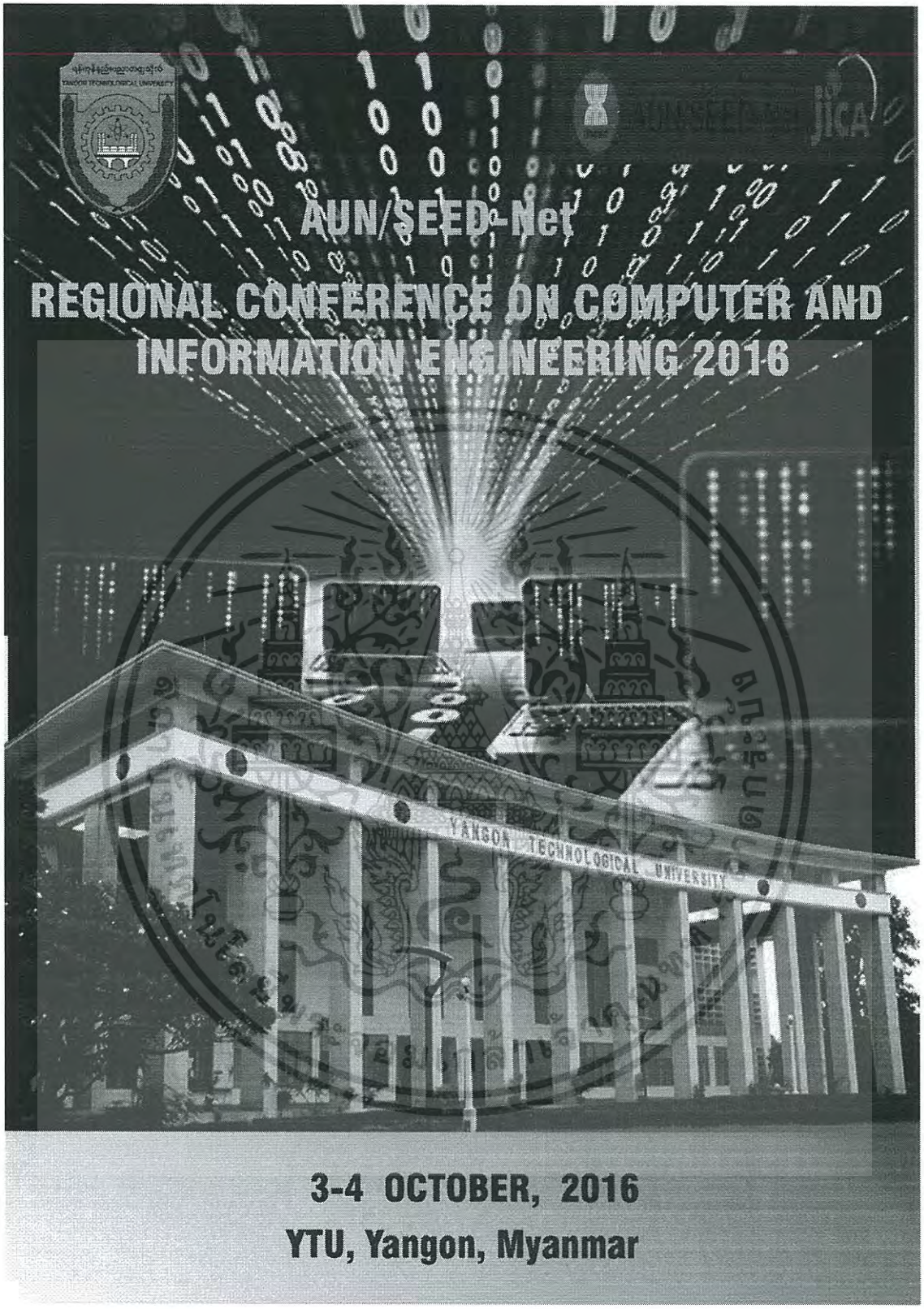
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

งานประชุมวิชาการระดับชาติ

[1] K. Srivilas, P. Namonta and P. Cherntanomwong. "Study on Modulation Method for Visible Light Communication" AUN/SEED-Net Regional Conference for Computer and Information Engineering 2016, Yangon, Myanmar, 2016

[2] K. Srivilas, P. Cherntanomwong "Routing Algorithm in Warehouse with Congestion Consideration using an ACO with VLC Support" 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AUN/SEED-Net Regional Conference for Computer and Information Engineering 2016

Study on Modulation Method for Visible Light Communication

Krit Srivilas
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, KMITL, Thailand
kritsrivilas@hotmail.com

Pornchanok Namonta
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, KMITL, Thailand
smmeaz@hotmail.com

Panarat Cherntanomwong *
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, KMITL, Thailand
panarat.ch@kmitl.ac.th

Abstract

Visible light communication (VLC) has been defined by IEEE 802.15.7. In this paper, modulation, forward error correction (FEC) and run length limited (RLL) techniques for VLC are presented. The average of the transmitted power, bandwidth demand, transmission capacity, and error rate by using the communication layers techniques in IEEE 802.15.7 standard are compared. According to the standard, the modulation techniques include OOK, VPPM and CSK. FEC includes Reed-Solomon and convolutional codes and RLL includes Manchester, 4B6B and 8B10B. It is expected that the results of this study will be useful to develop the effective VLC devices.

Keywords: visible light communication, LED, IEEE 802.15.7

I. Introduction

Recently, visible light communication (VLC) has become an attracting and promising technology for free space wireless access [1]-[3]. It was originally invented as a communication method, using light which is a type of electromagnetic wave as a signal transmission medium.

VLC systems take advantage of light emitting diodes (LED), which can be pulsed at very high speeds without noticeably influencing the lighting output as perceived by the human eye. VLC can be used in a wide range of applications, including wireless local area networks, wireless personal area networks, and vehicular networks [4].

The advantages are cost-effective, license-free, immunity to electromagnetic interference and high security [5]. However, in the terms of practical implementation, VLC has some limitations. It is vulnerability to light interference and the strong premise that a line of sight is required.

There is an IEEE standard which has completed a PHY and MAC standard for Visible Light Communications (VLC). Fig 1 shows the using of VLC for Wireless Personal Area Network (WPAN) in IEEE 802.15.7 standard.

In this paper, we explore the IEEE 802.15.7 standard. Comparing and discussing on each of modulation methods, data encoding techniques for error correction in the standard which will be advantages for further research and the development of VLC communication system.

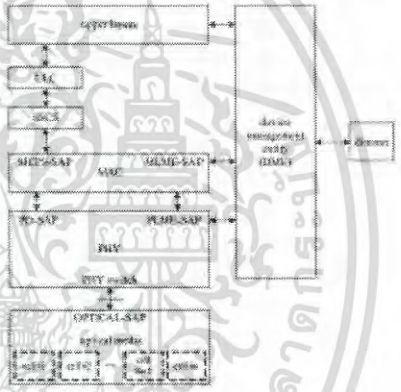


Fig. 1. IEEE 802.15.7 Communication Layer

According to IEEE 802.15.7 standard [6]-[8] significant layers in VLC communication consists of

(i) Upper layers consist of network layer and application layer. All network configuration, manipulation, and message routing are provided in network layer. However, detail of the application layer are not specify in the standard.

* Tel.: (+66) 6-776-1415
Email: panarat.ch@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ii) Logical Link Control (LLC) layer accesses the MAC layer through Service-Specific Convergence Sub-layer (SSCS). The Device Management Entity (DME) communicates with each layer to controls the device.

(iii) Mac layer provides the control for channel access, data reliability, dimming, and avoiding of flicker. The different data encoding is applied for this control such as encoding data for error correction and detection.

(iv) The PHY layer, following the standard, provides in multiple PHY types (Fig 2).

PHY I: This PHY type is intended for outdoor usage with low data rate applications. It uses on-off keying (OOK) and variable pulse position modulation (VPPM) with data rates in the tens to hundreds of kb/s.

PHY II: This PHY type is intended for indoor usage with moderate data rate applications. It uses OOK and VPPM with data rates in the tens to hundreds of Mb/s.

PHY III: This PHY type is intended for the application using color-shift keying (CSK) that have multiple light sources and detectors. It uses CSK with data rates more than 10 Mb/s.

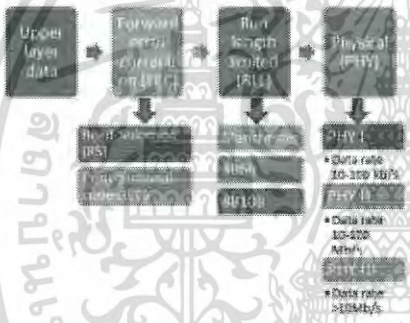


Fig. 2. Communication Layer diagram

2. Modulation methods in IEEE 802.15.7

The performance of power consumption in VLC is improved by modulation which represents the symbol period. The modulation classification is based on the spectral behavior and signal whether the scheme is continuous or discrete. Discrete pulse time modulation (PTM) techniques can be categorized into two groups, Isochronous and Anisochronous. Isochronous scheme encodes data by using either pulse position or pulse width but the structure of overall symbol remains constant. In contrast, Anisochronous scheme does not have fix symbol structure. Therefore, all PTM scheme techniques are suitable for VLC communication [9].

There are 3 types of modulation techniques in IEEE 802.15.7.

2.1 OOK (On-Off Keying)

This modulation technique is popular technique because it is simple to be applied. The transmitter will send the symbol for the time period of $\frac{1}{R_b}$ (R_b = Bit rate) [10] and consume the power of 2P (P = Transmission power) in order to send symbol '1'. In contrast, to send symbol '0', the transmitter will not send any symbol. The bandwidth is approximately $B_b = \frac{1}{\tau}$ which inverses to the pulse width.

2.2 VPPM (Vary Pulse Position Modulation)

This modulation technique is one of the techniques in PTM scheme. In VPPM, each symbol interval is represented by $\tau = log_2(\frac{1}{R_b})$. It is partitioned into L subintervals, or chips, each of duration equals $\frac{\tau}{L}$. The transmitter will send one of the symbols in the particular period of time. If the value of L is greater than 2, the consumed power of VPPM modulation will be less than the consumed power of OOK modulation. The required bandwidth is approximately $B = \frac{1}{\tau}$.

2.3 CSK (Color Shift Keying)

This modulation technique uses red, green and blue LEDs. Each symbol represents in the form of different color wavelengths. This scheme is similar to the frequency shift keying (FSK) modulation [7].

3. Performance Comparison

3.1 Power Consumption

To date, the majority of related applications is applied on the mobile device which has the limitation of power consumption. Therefore, it is important to consider the power consumption of VLC communication related to mobile device. The consumed power for OOK modulation is represented in equation (1) where P_1 is the consumed power for pulse '1' transmission [7],[11],

$$P_{OOK} = P_1/2 \quad (1)$$

Equation (2) shows the power consumption of VPPM modulation,

$$P_{PPM} = \frac{P_1}{2^M} = \frac{P_{OOK}}{2^{M-1}} \quad (2)$$

For CSK modulation, each time slot has 3 symbols, referred to equation (3),

$$P_{CSK} = \frac{3P_1}{(2^M+3)} = \frac{4P_{OOK}}{(2^M+3)} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As can be seen in Fig 3, the power consumption of VPPM and CSK is less than OOK as M increases. Moreover, VPPM is the most effective modulation because CSK uses more channel to transmit the data.

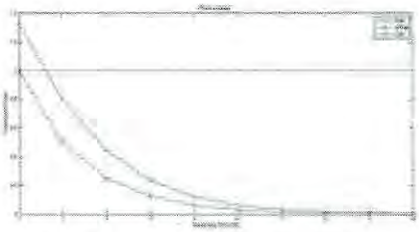


Fig. 3. The power consumption OOK, VPPM, and CSK modulation

3.2 Transmission Capacity

The ability of data transmission in a period of time is the key indicator of the communication performance. It can be represented by transmission capacity. All modulation techniques in this paper is analyzed and compared by using the number of M and the size of bit rate (τ). Equation (4)-(6) shows the transmission capacity of OOK, VPPM and CSK respectively. The data transmission capacity of OOK is $\frac{1}{\tau}$. The average length of VPPM and CSK is $2^M\tau$ and $\left(\frac{2^M-2}{2\tau}\right)$ respectively where M represents the binary data [10].

$$C_{OOK} = \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

$$C_{VPPM} = \frac{M}{2^M\tau} = \frac{M}{2^M}C_{OOK} \quad (5)$$

$$C_{CSK} = \frac{2M}{(2^M-3)\tau} = \frac{2M}{2^M-3}C_{OOK} \quad (6)$$

To conclude, from Fig 4, CSK modulation is the most effective technique because the number of transmission channel is greater than those of VPPM and OOK.

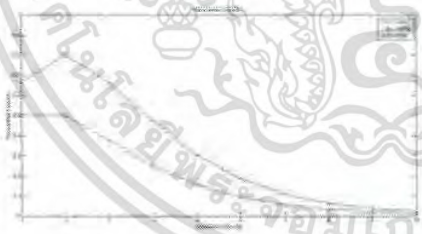


Fig. 4. Transmission Capacity of OOK, VPPM, and CSK modulation

3.3 Bit Error Rate

Assume VLC communication be in Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel.

Determining noise signal ($n(t)$) equals to zero, inverse parameter is σ_n^2 and bandwidth is infinity. When pulse '1' is transmitted, the received sampling signal is $\sqrt{S_t} + n(t)$. When pulse '0' is transmitted, the received sampling signal is S_t.

The probability of the signal error shows in equation (7) and (8) and the error function shows in equation (9).

$$P_{0/1} = \left(\frac{1}{2}\right)[1 + erf[(b - \sqrt{S_t})/\sqrt{2\sigma_n^2}]] \quad (7)$$

$$P_{1/0} = \left(\frac{1}{2}\right)[1 - erf[b/\sqrt{2\sigma_n^2}]] \quad (8)$$

$$\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-u^2)du = 1 - erfc(x) \quad (9)$$

Where b = the decision level of logic.

$P_{1/0}$ = the probability of the signal error from '1' to '0'.

$P_{0/1}$ = the probability of the signal error from '0' to '1'.

The error ratio can be represented in equation (10).

$$P_{er} = P_1P_{0/1} + P_0P_{1/0} \quad (10)$$

Where P_0 and P_1 is the probability of transmission '0' and '1' respectively.

Therefore, the probability of OOK, VPPM, and CSK bit error rate are show in equation (11), (12) and (13), respectively.

$$P_{OOK} = \frac{1}{2}P_{0/1} = \frac{1}{2}P_{1/0} = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{\sqrt{S_t/2\sigma_n^2}}{2}\right) \quad (11)$$

$$P_{VPPM} = \frac{1+erf\left[\frac{b-\sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right]+(2^M-1)\left[1-erf\left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right)\right]}{2^{M+1}} \quad (12)$$

$$P_{CSK} = \frac{1+erf\left[\frac{b-\sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right]+(2^M-1)\left[1-erf\left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}}\right)\right]}{2^{M+3}} \quad (13)$$

In consequence, the bit error rate ration relates to SNR. When SNR is increasing, the bit error rate is decreasing. As can be seen in Fig 5, the number of bit error rate of VPPM modulation is higher than those of CS and OOK modulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

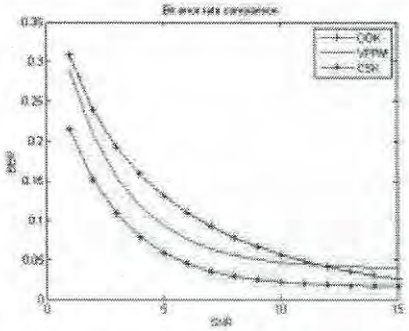


Fig. 5. Bit error rate of OOK, VPPM, and CSK modulation

3.4 Bandwidth (BW)

The communication channel has limited bandwidth. The lower bandwidth modulation, the higher communication effectiveness [10].

$$\text{BW of OOK modulation} = R_b \quad (14)$$

$$\text{BW of VPPM modulation} = \frac{2^M R_b}{M} \quad (15)$$

$$\text{BW of CSK modulation} = \frac{(2^M+3)R_b}{2M} \quad (16)$$

Where M = the sequence of modulation

R_b = bit rate of OOK bandwidth

Fig 6 shows that when the same amount of data is transmitted, CSK modulation uses lower bandwidth than VPPM modulation. While OOK modulation is not related to modulation sequence so the bandwidth is constant.

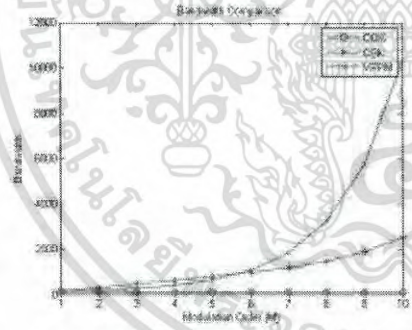


Fig. 6. Bandwidth of OOK, VPPM, and CSK modulation

3.5 Data Encoding

According to IEEE 802.15.7 standard, there are two types of data encoding for error correction which are Reed-Solomon encoding (RS) and Convolutional Code (CC). RS is wildly used because it is simple to implement and also suitable for the high speed communication. In this paper, determining that data is communicated through Additive White Gaussian Noise channel and random signal is $x(t)$. The result is measured from bit error rate when SNR signal increases [12].

To conclude, from Fig 7, CC has bit error rate less than RS while at higher SNR period at low SNR period, it has quite similar bit error rate.

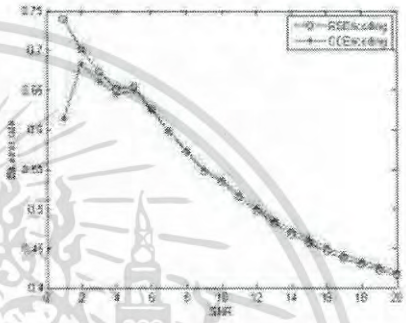


Fig. 7. Data encoding of RS and CC

3.6 Run Length Limited Encoding (RLL)

Due to the effect of average power on the brightness and the light flicker, the encoding for maintain signal is essential for VLC communication. RLL encoding techniques, referred to the IEEE 802.15.7 standard, consist of Manchester, 4B6B and 9B10B. The ease of development is the benefit of Manchester which is appropriate for OOK modulation. 4B6B is easy to be developed and suitable with VPPM modulation but it consumes more bandwidth than 8B10B because it has more overhead bit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Conclusions

The CSK modulation is the most efficient technique in term of capacity and bandwidth usage but it has the most complicate design comparing with other two modulation techniques. The efficiency of VPPM modulation is higher than OOK modulation.

For encoding, the Convolutional Code has lower bit error rate than Reed-Solomon at low SNR period. In term of Run Length Limited encoding, 8B10B is the best technique because of the lower overhead bit and the better light flicker avoiding.

Therefore, the result of this research could be advantages for further research and development of VLC communication system.

References

[1] Y. Wang, et al., High speed WDM VLC system based on multi-band CAP64 with weighted pre-equalization and modified CMMA based postequalization, IEEE Commun. Lett. (2014).

[2] Y. Wang, et al., Network architecture of a high-speed visible light communication local area network, IEEE Photon. Technol. Lett. (2014).

[3] D. O'Brien, et al. Indoor visible light communications: Challenges and prospects, in: Proc. SPIE, vol. 7091, 2008.

[4] J. Hoon Kim, et al. VLC-based location data transferal for smart devices, in press: Optical Switching and Networking, 2016.

[5] N. Chi, J. Shi, Investigation on overlapping interference on VLC networks consisting of multiple LEDs, ICT Express 1 (2015), 63-66.

[6] Tae Gyu Kang, Sang-Kyu Lim, Dae Ho Kim, "IEEE 802.15.7 VLC PHY/MAC Specification Proposal", IEEE P802.15-09-0731-00-0007

[7] Rajagopal, S. ; Roberts, R.D. ; Sang-Kyu Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," Communications Magazine, IEEE Volume:50, Issue: 3 March 2012, pp. 72-82

[8] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 50, no.1, Feb. 2004, pp. 100-07.

[9] Ghafour Amouzad Mahdiraji, Edmond Zahedi, "Comparison of Selected Digital Modulation Schemes (OOK, PPM and DPIM) for Wireless Optical Communications," 4th Student Conference on Research and Development (SCOReD 2006), Shah Alam, Selangor, MALAYSIA, 27-28 June, 2006

[10] Gao Yan, Wu Min, Du Weifeng, "Performance Research of Modulation for Optical Wireless Communication System," JOURNAL OF NETWORKS, VOL. 6, NO. 8, AUGUST 2011

[11] Taissir Youssef Elganimi, "Performance Comparison between OOK, PPM and PAM Modulation Schemes for Free Space Optical (FSO) Communication Systems: Analytical Study," International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 79 – No 11, October 2013

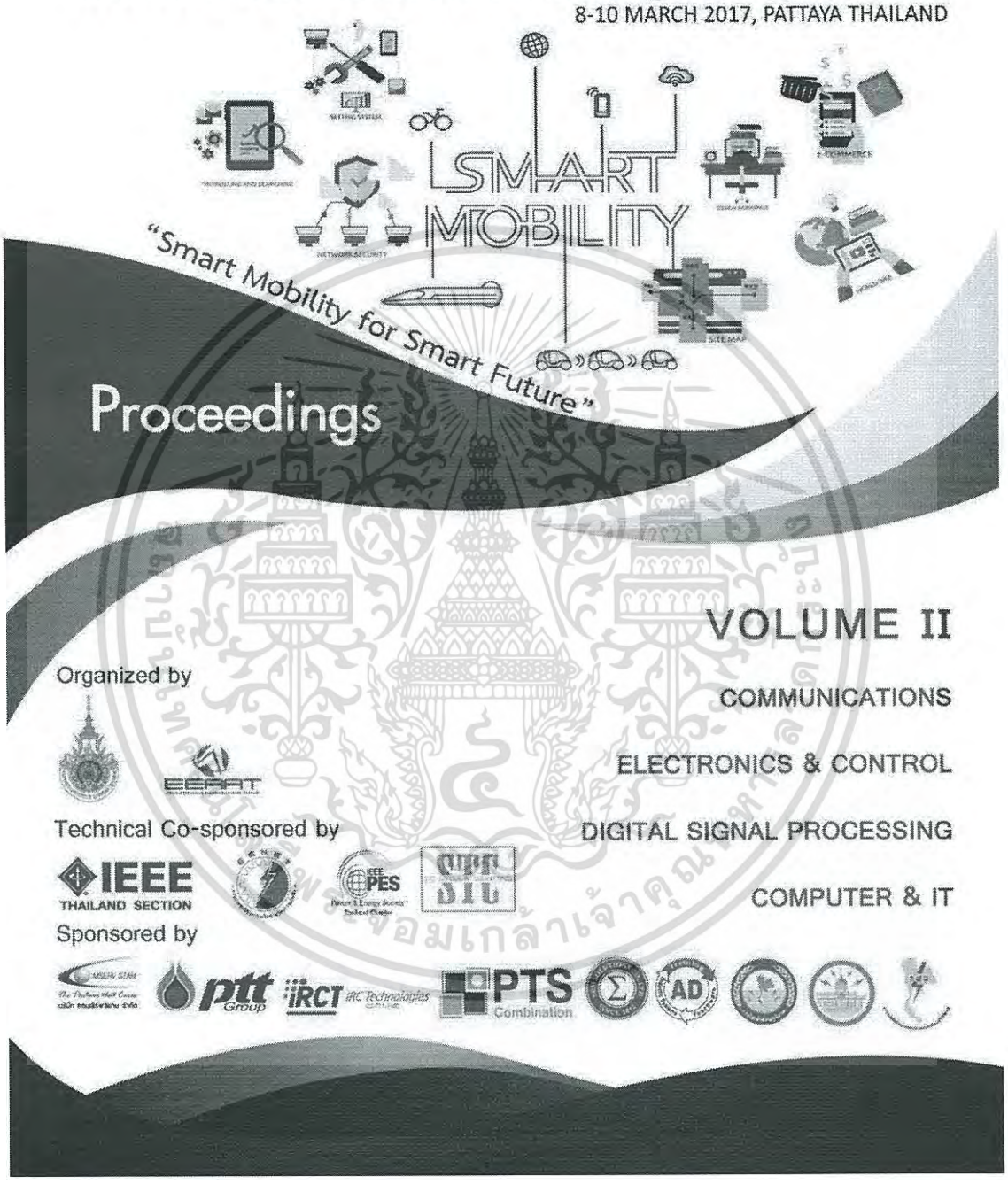
[12] Sanjeev Kumar, Ragini Gupta "Performance Comparison of Different Forward Error Correction Coding Techniques for Wireless Communication Systems" IJCSt Vol. 2, IsSue 3, September 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

iEECON 2017

The 2017 International Electrical Engineering Congress

8-10 MARCH 2017, PATTAYA THAILAND



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CM019

5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

Routing Algorithm in Warehouse with Congestion Consideration using an ACO with VLC Support

Krit Srivilas
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kritsrivilas@hotmail.com

Panarat Cherntanomwong
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
panarat.ch@kmitl.ac.th

Abstract— **One of the most important factors for warehouse management is order picking since it is the most time consuming operation contributing to the overall warehouse operational cost. Moreover, if the picking congestion occurs when there are multiple order pickers, the consumed picking time will increase. Therefore, this paper presents the new routing algorithm to reduce the picking time for multiple pickers. The proposed routing algorithm is based on an Ant Colony Optimization (ACO) combined with the indoor positioning supported by the Visible Light Communication (VLC) system. To validate the proposed algorithm, the experiment is done in the multiple-block picker-to-part warehouse of the construction material supplier. The experimental results show that the proposed routing algorithm is able to reduce the travelling time leading to reduce the order picking time.**

Keywords—order picking; ACO; warehouse management; congestion; VLC

I. Introduction

Order picking is the process of retrieving goods/items from the specified storage locations corresponding to customer orders. In general, it is crucial related to other services in warehouse management, especially in terms of the point of time. If the order picking consumes much time, it may affect to the late shipping to the customer. Therefore, minimizing the order retrieval time is required for order picking. There are many operations contributing to the order retrieval time, such as travelling between storages, items searching, items picking, equipment setting up. Among these operations, travelling is the main part contributing to the order retrieval time since it takes more than 50 percent of overall of the order retrieval time. Additionally, it is considered to be a waste because it costs labor hours with no value adding. Hence, reducing the travelling time is important to improve the performance of order picking. For the picker-to-part system, the travelling distance is proportional to the travelling time. Therefore, the efforts have been taken by researchers for reducing the travelling distance for further reducing the travelling time. One of general used methods for reducing the travelling distance is the pick-routing method and it is also used in this paper. For real time information of warehouse management, order pick routing with dynamical adjustment is considered to be the highest flexible. Recently, ACO-based routing methods were used for order picker in warehouse [1]-[2]. It is because of some reasons: dynamic adjustment (allowing a high adaptation from the current path to the next path), support for multiple paths (able to have multiple order pickers), and link quality (possible to add the connection/link quality into the computation of the pheromone concentration, leading to improve the decision process with respect to the link quality) [3].

To reduce the travelling distance of the order picker using pick-routing methods, most related works were limited to one order picker. Nevertheless, in practice, there will be multiple pickers working simultaneously in the same zone. This will make congestion happen, i.e. when one picker wants to go to the aisle that is now occupied by another picker, or when multiple pickers simultaneously go to the same aisle in opposite directions. In [1]-[2], ACO-based routing algorithms for multiple pickers with congestion consideration were proposed. In [1], the researchers concluded that their proposed techniques achieved the shortest total picking time in most instances and performed well to deal with the congestion. However, the work was proven from simulation. In [2], the researchers further proposed the online routing method based on ACO for multiples order picker with congestion consideration. The default route for each single picker is formed by ACO. Then, the route will be coordinated in real time with the information sharing by other pickers, based on current location, target pick and next target pick by using indoor positioning and information sharing technologies. They conducted the experiment to validate their techniques and concluded that it achieved the reduction in the order service time by dealing with the congestion. However, it is not cleared how the correlated factors, like the current location, target pick and the next target pick, came from.

In the warehouse, it is an indoor environment that always turns on the light. Nowadays, low-cost LEDs will replace the existing fluorescent and incandescent lights for illumination. There is a promising technology called Visible Light Communication (VLC) to use visible lights as a carrier for data communication and LEDs are often used as a light source [4]-[5]. Therefore, VLC can reduce the cost to implement the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

wireless system since the LEDs becomes very low cost and are already installed for illumination. Moreover, it is license-free, harmful less to human, high security and immunity to electromagnetic interference.

Therefore, this paper proposes a new routing algorithm based on ACO combined with the VLC system to cope with congestion from multiple pickers. VLC can be used to provide the current location of pickers, in other words, to check the availability of the aisle, whether it is occupied or not. In this case, it is no need to implement whole wireless system because the LEDs as the light source already exist.

The paper is organized as follows. Section II briefly introduces the ACO based routing algorithm and the VLC technology. Then, the proposed ACO based routing algorithm with the VLC support is explained. Section III illustrates the experiment system and setup. Section IV shows the experiment results compared between the classical ACO based routing method and the proposed method and gives discussion. Finally, this paper is summarized in section V.

II. Propose Rountiong Algorithm base on ACO with VLC support

This section begins with the brief explanation of ACO-based routing algorithm, and is followed by the short introduction to the VLC technology. Then, the concept of ACO-based routing algorithm combined with VLC to deal with the congestion by multiple pickers is explained.

A. Routing Algorithm using ACO

ACO-based routing algorithm is inspired from behavior of ants seeking an optimal path between their colony and source of food [3]. It is the probabilistic technique and can be used to solve the problem of routing in communication networks. The basic concept of ACO for routing is that ants first randomly select the path, and then leave the traces of pheromone as they move. More pheromone on path increases probability of path being followed by other ants.

The k^{th} ant will move from node x to node y with probability [6]

$$P^k_{xy} = (\tau^\alpha_{xy})(\eta^\beta_{xy}) / (\sum_{z \in allowed\ x} (\tau^\alpha_{xy})(\eta^\beta_{xy})), \quad (1)$$

where

τ_{xy} is the amount of pheromone deposited for a state transition xy,

α is a parameter to control the influence of τ_{xy} ($\alpha \geq 0$),

η_{xy} is the desirability of state transition xy,

(a priori knowledge, typically $1/d_{xy}$, where d_{xy} is the distance between x and y, and

β is a parameter to control the influence of η_{xy} ($\beta \geq 1$)

τ_{xy} and η_{xy} represent the attractiveness and trail level for the other possible state transitions.

Amount of pheromone is updated according to

$$\tau_{xy} = (1-\rho)\tau_{xy} + \sum_k \Delta\tau^k_{xy} \quad (2)$$

where

τ_{xy} is the amount of pheromone deposited for a state transition xy,

ρ is the pheromone evaporation coefficient, and

$\Delta\tau^k_{xy}$ is the amount of pheromone deposited by k^{th} ant given by

$$\Delta\tau^k_{xy} = \begin{cases} Q/L_k ; \text{if the } k^{th} \text{ ant travels on a state transition } xy \\ 0; \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

where

Q is the constraint number,

L_k is the total distance for the k^{th} ant.

B. The VLC Technology

VLC uses the visible light of which wavelength of 375nm – 780nm as a carrier to transmit the information [4]. VLC can be used in a wide range of applications, both in indoor and outdoor environment. IEEE 802.15.7 standard has completed a PHY and MAC standard for Visible Light Communications (VLC). Significant layers in VLC communication consists of

i) upper layers consisting of network layer and application layer

ii) Logical Link Control (LLC) accessing between MAC layer and upper layer

iii) Mac layer providing the control for channel access, data reliability, dimming, and avoiding of flicker. The different data encoding is applied for this control such as encoding data for error correction and detection and

iv) PHY layer providing multiple PHY types which have different usage of modulation techniques and different maximum data rate.

In this paper, the OOK modulation of PHY I is employed because of its simplicity.

C. The ACO Routing Algorithm with VLC Support in Congestion Consideration

This paper proposes a routing algorithm based on ACO combined with the VLC system to cope with congestion from multiple pickers. The proposed method is verified by conducting experiment.

Assuming that the distance speed of pickers and the picking time be constant for every pickers and for each state transition. VLC can be used to provide the current location of pickers, in other words, to check the availability of the aisle, whether it is occupied or not.

The system workflow of ACO integrated with VLC to consider routing with congestion is shown in Figure 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

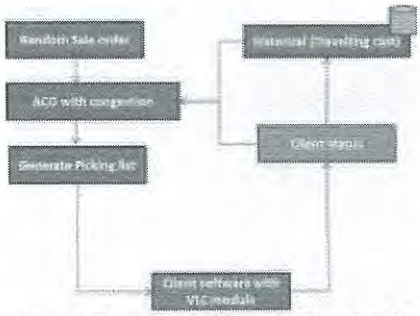


Figure 1 The system workflow of ACO with VLC support for congestion consideration

The software is developed to support the on-line picking system as shown in figure 2-3. Figure 2 shows the software at the server side providing the sale orders for pickers and recording the current locations of pickers according to the VLC system. Figure 3 shows the software for the client (or, picker) side providing the picking route.

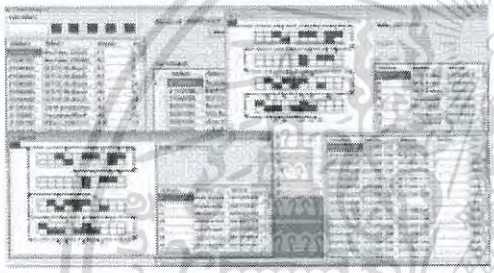


Figure 2 The developed software at the server side providing the picking orders and recording the picker current locations according to the VLC system.

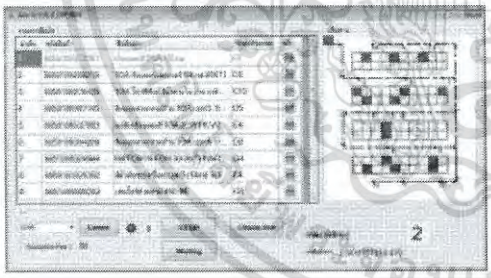


Figure 3 The developed software for the picker side providing the picking route.

III. Experiment System and Setup

A. Warehouse Layout

In general, a typical layout of picker-to-part warehouse with narrow pick aisles is considered in order to increase space utilization which minimizes investment costs. In this paper, the warehouse of the construction material supplier which has the picker-to-part layout is chosen to study and shown in Fig. 4. In the experiment, VLC transmitters are installed at both ends of each aisle to monitor the picker access, as shown in Fig. 4, with the blue circles. Assumptions considered in this paper are as follow:

- Only one picker is allowed in each pick aisle.
- Every route starts from and finishes at the single depot.
- Pickers are able to travel in both cross aisles and pick aisles.
- Within an order, each item is independent of one another items.

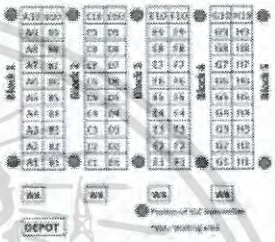


Figure 4 The warehouse layout with narrow pick aisle

B. Experimental Design

In the experiment, for one sale order, we randomly spread picking items in all aisles as shown in Figure 5 for example, with the red blocks. The total travelling time and total travelling distance used by two pickers with the same sale order are estimated. One picker uses the route calculated using the ACO method, while another picker uses the route calculated using the ACO method with the VLC support to consider congestion. Moreover, the experiments are repeated by changing the number of items in one sale order to 15, 20 and 25.

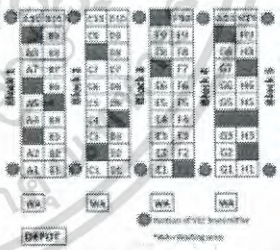


Figure 5 Example of 15 items in one sale order

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 6 show the insallation of the VLC transmitter and equipments used by pickers (clients): one trolley for one picker. Each trolley consists of the VLC receiver and tablet PC equipped with the developed programe as shown in figure 3. Since the VLC is the short range communication which needs the line-of-sight comunication, the VLC receiver is intalled in the same height of the VLC transmitter.

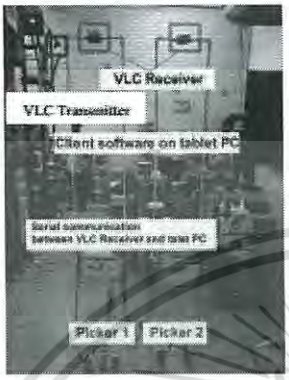


Figure 6 The experimental equipments and setup

C. Picker Congestion Consideration

To validated the proposed method with congestion consideration, the experiments are conducted by assigning two pickers having the same sale order. The same items will be picked by two pickers but the routes are differents. In this case, Picker 2 will know that the first upper row is occupied by Picker 1, then the system recommends Picker 2 to go to the second row for the first item picking. This help reducing the waiting time for Picker 2 if the ACO routing method only used.

IV. Results and Discussion

Because of page limitation, the results of 3 sale orders with 15 items in each are only shown. Table 1 illustrates the experimental results for 3 sale orders and it can be found that for every sale order, both pickers using the ACO based routing algorithm with VLC support use shorter time than using only the ACO routing algorithm, even if for some instances, they travel in longer distance. This is because the picker does not need to wait until another picker finished picking. The system will recommend the picker to go to another direction to pick up other items. The average of the total travelling time from 3 sale orders with 15 items per picking order is improved 20%. The results of sale orders with 20 and 25 items have the same trend of results. Nevertheless, more numbers of items in the sale order, more congestion happens. The averages of the total travel time from 3 sale orders are improved 9% and 7% in the cases of 20 items per order and 25 items per order, respectively.

TABLE I. Experimental Results for 15 Items per Sale Order.

		Routing method	Total travel-time (s)	Distance (m)
Sale Order 1 (15 items)	Picker 1	ACO	513	70
		ACO + VLC	313	70
	Picker 2	ACO	394	76
		ACO + VLC	310	83
Sale Order 2 (15 items)	Picker 1	ACO	513	72
		ACO + VLC	313	72
	Picker 2	ACO	394	72
		ACO + VLC	310	88
Sale Order 3 (15 items)	Picker 1	ACO	513	72
		ACO + VLC	313	72
	Picker 2	ACO	394	72
		ACO + VLC	310	84

V. Conclution

This paper proposes the ACO based routing method for multiple order pickers when the congestion was considered. To reduce the congestion, the availability of the aisle is needed to be known. The VLC system is used to support the routing process. The vacancy status of the aisle can be known by checking whether pickers get in to/get out from the aisle or not, using the VLC system. The experiments are conducted in the multiple-block picker-to-part warehouse of the construction material supplier to validate the proposed method. Assuming that there are two pickers working simultaneously with the same sale order assigned. The results using the classical ACO based routing and using the proposed method with the VLC support are compared. It can be seen that, for all instances, the proposed method can reduce the travelling time of pickers, in other words, to reduce order picking time when congestion occurs.

Acknowledgment

The authors thank the Service Process Management office SCG Cement-Building Materials Co., Ltd for allowing authors to have experiment in the warehouse.

References

[1] F. Chen, H. Wang, C. Qi, and Y. Xie "An ant colony optimization routing algorithm for two order pickers with congestion consideration," Computers & Industrial Engineering, vol. 66 (1), pp. 77-85, September 2013.

[2] F. Chen, · H. Wang, · Y. Xie, and · C. Qi "An ACO-based online routing method for multiple order pickers with congestion consideration in warehouse" Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 27 (2), pp. 389-408, April 2016.

[3] M. Subha, and R. Anitha, "An emerging ant colony optimization routing algorithm (ACORA) for manets," Journal of Computer Applications, vol. II, no.3, pp. 29-33, July-September 2009.

[4] J. Gancarz, H. Elgala, T.D.C. Little, "Impact of lighting requirements on VLC systems," IEEE Communications Magazine, vol. 51, pp. 34-41, December 2013.

[5] S. Haruyama, "Visible light communication using sustainable LED lights," ITU Kaleidoscope: Building Sustainable Communities (K-2013), pp. 1-6, April 2013.

[6] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz "Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Intelligence," Oxford University Press, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกฤษณ์ ศรีวิลาศ
วัน เดือน ปี เกิด	18 ธันวาคม 2530 จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่	174/628 ถนนประชาราษฎร์ สาย 2 บางซื่อ กทม 10800
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีประจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้