



รายงานการวิจัย

การออกแบบตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมในเครือข่ายเมชไร้สายที่ให้บริการ  
ภายในตัวอาคาร

**Optimal Design of Node Location in an Indoor WMN**

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การออกแบบตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมในเครือข่ายเมชไร้สายที่ให้บริการ  
ภายในตัวอาคาร

**Optimal Design of Node Location in an Indoor WMN**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2554

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาในที่ปรึกษาของผู้วิจัยที่ช่วยเก็บผลการทดลองดังรายนามต่อไปนี้ นางสาวสุกัญญา ชาญรัมย์ นางสาวนฤนาถ เขียวหวาน นางสาวมีนา หลุมทอง และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ ภา อูซารสกุล สำหรับคำแนะนำในเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2554

## บทคัดย่อ

เครือข่ายเมฆไร้สาย (Wireless Mesh Networks : WMNs) คือ กลุ่มของโหนดไร้สายที่ติดต่อกันผ่านคลื่นวิทยุ ดังนั้นในความเป็นจริงแล้วจะมีข้อจำกัดเรื่องของระยะทางและสิ่งกีดขวางที่จะทำให้คลื่นวิทยุส่งไปไม่ถึงเป้าหมายที่ต้องการ โดยเฉพาะการส่งข้อมูลภายในอาคาร เนื่องจากส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นบ้านเรือนหรืออาคารสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ มักจะมีการฝังวัสดุที่เป็นเหล็กเอาไว้ภายใน ซึ่งมีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุ ทำให้คลื่นวิทยุไม่สามารถส่งผ่านตัวกลางเหล่านี้ได้อย่างสะดวก ภาครับก็จะรับสัญญาณด้วยระดับกำลังสัญญาณที่ต่ำกว่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ามีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ในด้านสมรรถนะต่าง ๆ เช่น การหาจุดสมดุลระหว่างปริมาณงาน (Throughput) และตำแหน่งที่ตั้งโหนด การพิจารณาปริมาณงานในการส่งต่อหลาย ๆ ครั้ง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีปริทัศน์วรรณกรรมใดนำเสนอผลกระทบจากสิ่งกีดขวางมาพิจารณา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งกีดขวางเหล่านั้นต่อสมรรถนะของเครือข่ายโดยพิจารณาจาก ค่าความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) ที่มีผลต่อความสำเร็จในการส่งข้อมูล ซึ่งตัวแปรที่สนใจนี้ในทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะเท่ากันเสมอไม่ว่าโหนดจะติดตั้งอยู่ในบริเวณใดก็ตาม แต่ตามความเป็นจริงค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ น่าจะมีผลมาจากปัจจัยภายนอกหลาย ๆ อย่าง โดยในงานงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์และออกแบบตำแหน่งโหนดที่สามารถติดตั้งภายในอาคาร และมีปริมาณงานที่ดีที่สุดได้ ภายใต้ข้อจำกัดของกำลังงานส่งที่เท่า ๆ กันในแต่ละโหนดได้

## **Abstract**

Wireless Mesh Networks : WMNs is a group of wireless nodes connecting each other by radio wave transmission. Therefore, the signal quality depends on distance and obstruction, especially sending information inside the building. Most of houses or buildings have the metal or conductive materials as the main part of constructions. This causes the effect on wireless signals when they are sent through those constructions and also it cannot be avoided for indoor communications. In literatures, there are many researches working on WMNs but it is hardly seen that any work reports the effect of obstructions on WMN performance. In this thesis, the relation between the received signal strength and the probability of successful transmission has been measured in order to utilize this result as the obstruction effect and take it in the analysis of WMN performance. This thesis also presents the method to design of node locations for indoor WMNs by concerning the throughput performance.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย .....	2
1.4 ผลสำเร็จของโครงการ .....	3
1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ โครงการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีแถวคอย.....	6
2.1 กล่าวนำ .....	6
2.2 แนวคิดของทฤษฎีแถวคอย.....	6
2.2.1 องค์ประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอย.....	7
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบแถวคอย.....	7
2.2.3 รูปแบบการบริการ.....	8
2.2.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแบบจำลองแถวคอย .....	8
2.3 ระบบการเข้าแถวคอยแบบ M/M/1/K.....	9
2.3.1 ความน่าจะเป็นที่มีผู้ให้บริการในระบบ j คน .....	10
2.3.2 ค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ .....	14
2.3.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในระบบ .....	16
2.4 กล่าวท้ายบท.....	18
บทที่ 3 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายเมฆไร้สาย.....	19

3.1	กล่าวนำ .....	19
3.2	โครงสร้างของเครือข่ายเมฆไร้สาย .....	20
3.2.1	โครงสร้างแบบโครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมฆไร้สาย .....	20
3.2.2	โครงสร้างของเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมฆไร้สาย.....	21
3.2.3	โครงสร้างเครือข่ายเมฆไร้สายแบบไฮบริด .....	22
3.2.4	มาตรฐาน IEEE802.11s.....	23
3.3	การวิเคราะห์สมรรถนะด้วยทฤษฎีแถวคอย.....	24
3.3.1	การคำนวณหาปริมาณงานในระบบ .....	24
3.3.2	การเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้ระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง .....	30
3.4	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครือข่ายเมฆไร้สาย.....	32
3.4.1	ความแรงของสัญญาณ .....	32
3.4.2	แบบจำลองการสูญเสียกำลังของสัญญาณ .....	36
3.4.3	การทดสอบผลกระทบของสิ่งกีดขวาง ต่อปริมาณงาน .....	37
3.5	กล่าวท้ายบท.....	40
บทที่ 4	การออกแบบตำแหน่งโหนดที่เหมาะสม .....	41
4.1	กล่าวนำ .....	41
4.2	การวิเคราะห์ปริมาณงานที่เท่าเทียมกันของแต่ละโหนด .....	41
4.2.1	การทดสอบเพื่อหาปริมาณงานที่เท่าเทียมกันของแต่ละโหนด.....	50
4.3	การออกแบบโหนดโดยพิจารณาระยะห่างระหว่างโหนด .....	51
4.3.1	ตัวอย่างการทดสอบด้านระยะทาง.....	53
4.4	การออกแบบโหนดโดยพิจารณาอัตราการส่งข้อมูล.....	57
4.5	การหาวิธีการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสม .....	58
4.5.1	การทดสอบเพื่อหาวิธีการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนด .....	58
4.5.2	การออกแบบและติดตั้งเครือข่ายเมฆไร้สายให้มีประสิทธิภาพ .....	63
4.6	กล่าวท้ายบท.....	63
บทที่ 5	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1	สรุปงานวิจัย .....	64
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	67
	บรรณานุกรม.....	68

ภาคผนวก ก การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	71
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	75
ประวัติผู้วิจัย.....	94



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบแถวคอยแบบ M/M/1/K.....10

รูปที่ 2-2 แสดงความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัวสำหรับค่าของปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบกรณีที่ปริมาณทราฟฟิกในระบบน้อยกว่า 1.....13

รูปที่ 2-3 แสดงความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัวสำหรับค่าของปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบเท่ากับ 1 .....13

รูปที่ 2-4 แสดงความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัวสำหรับค่าของปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบกรณีมากกว่า 1 .....14

รูปที่ 3-1 การเชื่อมต่อเครือข่ายเมฆไร้สาย.....21

รูปที่ 3-2 การเชื่อมต่อเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมฆไร้สาย .....22

รูปที่ 3-3 การเชื่อมต่อเครือข่ายเมฆแบบไฮบริด.....22

รูปที่ 3-4 ตัวอย่างของสิ่งกีดขวางจากโหนดถึงตัวปล่อยสัญญาณ .....25

รูปที่ 3-5 แบบจำลอง M/M/1/K ของเครือข่ายเมฆไร้สาย.....25

รูปที่ 3-6 ตัวอย่างของการกำหนดตำแหน่งของโหนด .....26

รูปที่ 3-7 รูปแบบการจำลองระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย (Liu, T and Liao, W.(2008)) .....31

รูปที่ 3-8 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานที่ได้จากโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง.....32

รูปที่ 3-9 แสดงการทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ (อ้างอิงจาก การหาค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากค่าความแรงของสัญญาณ 2552) .....35

รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประมาณความสูญเสียของข้อมูล (Packet Loss, %) และความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) (อ้างอิงจาก การหาค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากค่าความแรงของสัญญาณ 2552).....35

รูปที่ 3-11 อาคารวิชาการชั้น 4 ที่ใช้ในการทดสอบ.....38

รูปที่ 3-12 รูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดในอาคารวิชาการชั้น 4.....38

รูปที่ 3-13 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานเปรียบเทียบระหว่างการคิดและไม่คิดสิ่งกีดขวาง .....39

รูปที่ 4-1 ประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลของ  $Q_r$  และประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลของ  $Q_s$  .42

รูปที่ 4-2 ตัวอย่างการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดและเส้นทางในการส่งข้อมูล.....50

รูปที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานที่เท่าเทียมกันและไม่เท่าเทียมกัน.....51

รูปที่ 4-4 แสดงตัวอย่างในการออกแบบวางตำแหน่งของโหนด.....	53
รูปที่ 4-5 การกระจายสัญญาณของจุดเข้าถึงสัญญาณ $d_1$ $d_2$ และ $d_3$ .....	56
รูปที่ 4-6 อาคารวิชาการชั้น 4 ที่ใช้ในการทดสอบ.....	59
รูปที่ 4-7 รูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดและแสดงเส้นทางในการส่งข้อมูล.....	59
รูปที่ 4-8 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 1.....	60
รูปที่ 4-9 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 2.....	60
รูปที่ 4-10 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 3.....	61
รูปที่ 4-11 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 4.....	61
รูปที่ 4-12 ปริมาณงานรวมของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 1 2 3 และ 4.....	62

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้ระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง .....31

ตารางที่ 3-2 ค่า MSE เมื่อใช้การประมาณค่าจากฟังก์ชันต่างๆ .....34

ตารางที่ 3-3 ค่าพารามิเตอร์ของ จุดเข้าถึงสัญญาณภายในบริเวณอาคารวิชาการชั้นที่ 4 .....36

ตารางที่ 3-4 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้จากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง .....39

ตารางที่ 3-5 แสดงค่าการลดทอนเนื่องจากสิ่งกีดขวาง .....39

ตารางที่ 4-1 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้จากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง .....50

ตารางที่ 4-2 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองหาปริมาณงานที่ของการเลือกวางตำแหน่งแบบที่ 1 2 3 และ 4 ....62

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network) กำลังเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อบริษัทและองค์กรต่างๆ ทั้งนี้ เป็นเพราะระบบอำนวยความสะดวกสบายในการต่อเชื่อมเครือข่าย ทำให้สามารถส่งข้อมูลข่าวสารหรือใช้บริการอินเทอร์เน็ตจากที่ใดก็ตามที่มีจุดให้บริการไร้สายอยู่ เมื่อประกอบกับในปัจจุบันนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาสมัยใหม่นิยมรวมระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายไว้ภายในทำให้การเติบโตของอุตสาหกรรมเครือข่ายนี้ไปอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากการขยายพื้นที่ให้บริการของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในระบบเครือข่ายหนึ่งๆ ไม่สามารถขยายได้กว้างเท่าที่ต้องการ เพราะถูกกำหนดด้วยค่าใช้จ่ายและการสูญเสียของสายเคเบิลที่เชื่อมต่อระหว่างจุดเข้าถึงเครือข่าย (Access Point) และอุปกรณ์ต่อเชื่อมเข้าเครือข่าย ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีใหม่ที่ไม่ต้องใช้สายเคเบิลเชื่อมต่อที่จุดเข้าถึงเครือข่าย เทคโนโลยีที่กล่าวถึงนี้คือเครือข่ายเมชไร้สาย (Wireless Mesh Network : WMN) ข้อดีที่เห็นได้ชัดคือเครือข่ายนี้ไม่ต้องใช้สายเคเบิลทำให้ไม่มีข้อจำกัดถึงขนาดพื้นที่ในการให้บริการสามารถขยายการให้บริการในพื้นที่กว้างเท่าใดก็ได้ที่ระบบเครือข่ายหนึ่งๆ จะรองรับได้ โครงการวิจัยนี้จึงให้ความสนใจศึกษาปัญหาในการขยายพื้นที่ให้บริการ โดยที่ไม่ต้องใช้สายเคเบิล ซึ่งประเด็นปัญหาในงานวิจัยนี้ถือว่าสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2553) ในยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 1 กลยุทธ์การวิจัยที่ 7 แผนงานวิจัยที่ 1 เรื่องการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะและพัฒนาศักยภาพขีดความสามารถทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร และการไม่ใช้สายเคเบิลนี้ถือว่าเป็นการลดขยะที่มีผลต่อโลกร้อนจึงทำให้โครงการวิจัยนี้สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาล นโยบายเร่งด่วนที่ดำเนินการในปีแรก ในหัวข้อ 1.19 เร่งรัดมาตรการและโครงการเพื่อบรรเทาผลกระทบจากวิกฤติโลกร้อน แต่ทว่าการออกแบบจุดติดตั้งของโหนดในระบบเครือข่ายเมชไร้สายนั้นยังคงเป็นปัญหาที่ไม่มีผลเฉลยอยู่ในขณะนี้ จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า งานวิจัยในด้านนี้จะสมมุติลักษณะของพื้นที่ให้บริการเป็นอุดมคติคือทุกตำแหน่งมีการลดทอนสัญญาณที่คงที่ ทั้งๆที่ในความเป็นจริงแล้วแต่ละตำแหน่งมีการลดทอนที่ต่างๆ กัน และแปรผันกับตำแหน่งของจุดติดตั้งโหนดโดยตรง นอกจากนี้ในสถานการณ์ที่อยู่ภายในตัวอาคาร สัญญาณในระบบจะได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมมากกว่าภายนอกอาคาร เพราะสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร อาทิเช่น ผนัง กำแพง โถง ฝ้าเพดาน สิ่งเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อสัญญาณที่ส่งหากัน

ระหว่างจุดเข้าถึงเครือข่ายสองจุด ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะนำสิ่งแวดล้อมภายในอาคารเข้ามาประยุกต์กับการออกแบบระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย และสามารถค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับจุดติดตั้งโหนดในระบบนี้

ผลสำเร็จของโครงการวิจัยนี้ถือว่าการสร้างกระบวนการออกแบบจากเทคโนโลยีใหม่ที่นำเสนอ ซึ่งสามารถนำไปแข่งขันกับวิธีการอื่นๆ ในต่างประเทศได้ จึงสอดคล้องกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2553) ในกลุ่มเทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม นอกจากนี้ผลสำเร็จที่ได้ยังเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้กับภาคธุรกิจต่างๆ ทำให้ไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ลดการนำเข้าเทคโนโลยีราคาแพงและเสริมสร้างความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจของประเทศในทางอ้อมได้อีกด้วย ประเด็นนี้ถือว่าสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2550-2554) ในยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืนเป็นอย่างมาก และยังคงเป็นฐานสำหรับการวิจัยและพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต ทำให้ตรงกับนโยบายของรัฐบาล นโยบายระยะการบริหารราชการ 4 ปี ของรัฐบาล ในหัวข้อ 2.4 นโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบจุดติดตั้งโหนดในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณภายในอาคาร และประยุกต์ใช้กับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
3. เพื่อสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

## 1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
2. จำลองแบบระบบเครือข่ายเมฆไร้สายในคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB
3. ศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณภายในอาคาร
4. ประยุกต์แบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณภายในอาคารเข้ากับการจำลองแบบระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
5. ทดสอบสมรรถนะของการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการประยุกต์ใช้งานภายในอาคาร

6. พัฒนารูปแบบการหาตำแหน่งจุดติดตั้งโหนดที่เหมาะสมที่สุด จากแบบจำลองภายในอาคาร
7. ทดสอบวิธีการออกแบบจุดติดตั้งโหนดในสถานะการณ์ต่างๆ
8. ปรับปรุงและพัฒนารูปแบบการหาตำแหน่งเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ
9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงวิธีการหาตำแหน่ง
11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

#### 1.4 ผลสำเร็จของโครงการ

ผลสำเร็จของโครงการนี้จะมีประโยชน์ในเรื่ององค์ความรู้ใหม่และเทคโนโลยีเมฆไร้สายที่สามารถออกแบบเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ด้วยการตีพิมพ์บทความในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 บทความ และในวารสารวิชาการระดับชาติอีก 1 บทความ

#### 1.5 การสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

เริ่มต้นได้มีการศึกษาและพิจารณาถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านสมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของเครือข่ายเมฆไร้สายซึ่งสามารถนำเครือข่ายเมฆไร้สายมาพัฒนาต่อ โดยสามารถนำกระบวนการเทคนิคต่าง ๆ มาเป็นแนวคิดเพื่อหาสมการคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ได้มีการศึกษาและวิจัยกันอย่างแพร่หลาย และยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่ส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคนิคและการวิเคราะห์ปัญหาการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อให้ครอบคลุมปัญหามากยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงให้เห็นความเป็นมาตั้งแต่เริ่มวิเคราะห์สมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของเครือข่ายเมฆไร้สาย จนถึงวิธีการที่จะนำมาซึ่งวิธีการคำนวณในการออกแบบของเครือข่ายเมฆไร้สาย และสามารถสรุปได้ดังนี้

งานวิจัยของ Gupta, P., and Kumar, P.R.(2000) ได้นำเสนอกระบวนการการเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลของแต่ละโหนด ซึ่งได้นำปัจจัยต่างๆมาใช้ในการพิจารณา เช่น จำนวนของโหนด จำนวนฮอป และศึกษาถึงผลกระทบของการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของโหนดโดยเสนอถึงวิธีการในการกำหนดเส้นทางซึ่งคำนึงถึงผลของปริมาณงานที่ได้เพื่อให้ได้ปริมาณงานที่สูงที่สุด และในงานวิจัยได้พิจารณาเครือข่ายแบบ Ad hoc ซึ่งในแต่ละโหนดมีการกระจายแบบสุ่มและปลายทางของแต่ละโหนดจะมีการถูกเลือกโดยอิสระ และงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการต่าง ๆ เพื่อจะนำไปคำนวณหาปริมาณงานในเครือข่ายได้

งานวิจัยของ Muthaiyah, N., Iyer, A., Kamik, A., and Rosenberg, C.(2007)ได้นำเสนอ กระบวนการในการพัฒนาอัตราเร็วในการส่งข้อมูลให้สูงที่สุดในเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยใช้สายอากาศแบบทิศทาง ผล

จากการพิจารณาดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นว่าปริมาณงานที่ได้มีค่าสูงที่สุด จากสถานการณ์ที่เป็นจริงนั้น ในการติดตั้งสายอากาศแบบรอบทิศทางจะทำให้ได้ปริมาณงานที่ต่ำ บทความนี้จึงเสนอการใช้สายอากาศแบบทิศทาง ซึ่งจะทำได้ปริมาณงานที่สูงขึ้น

งานวิจัยของ Peng, M., Wang, Y., and Wang, W.(2007)ได้นำเสนอถึงโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมฆไร้สาย และวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างพื้นฐานในเครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้วิธีการในการตรวจสอบเส้นทางในการส่งข้อมูลในชั้น Cross-layer โดยอาศัยการส่งข้อมูลทางช่องสัญญาณและการส่งผ่านโดยการควบคุมทางกายภาพในชั้น Cross-layer และกำหนดการเลือกเส้นทางใน Medium Access Control ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการควบคุมและนำเสนอถึงการปรับปรุงเครือข่ายโดยพิจารณาถึงปัญหาการรบกวนของสัญญาณ และผลของการจำลองแสดงให้เห็นถึงการเสนอวิธีการในการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อที่จะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของปริมาณงานให้มีปริมาณงานที่ดีที่สุดได้

งานวิจัยของ Tang, J., and Xue., G.(2007) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการควบคุมการกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูลของเครือข่ายไร้เมฆไร้สาย ในชั้น Cross-Layer และ Medium Access Control วัตถุประสงค์ที่สำคัญคือการจัดสรรกลไกของอัตราการส่งข้อมูลในหลาย ๆ ช่องทางและการกำหนดช่วงเวลาของการส่งข้อมูล สำหรับชุดข้อมูลของการสื่อสารแบบจุดต่อจุดเพื่อให้ได้ช่วงเวลาของการส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายมีค่ามากที่สุดและได้มีการจัดสรรความเท่าเทียมกันของปริมาณงานซึ่งมีรูปแบบในการประยุกต์ความเท่าเทียมกันเพื่อให้ได้ปริมาณงานที่สูงที่สุดและเท่าเทียมกันในทุก ๆ จุด ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอวิธีการเขียน โปรแกรมเชิงเส้น เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ และผลเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนรูปแบบของการจัดสรรความเท่าเทียมกันของปริมาณงานจะทำให้ได้ปริมาณงานที่ดีที่สุด

งานวิจัยของ Gamal, A.E., Mammen, J., and Prabhakar, B.(2004) ได้นำเสนอถึงการพิจารณาหาจุดสมดุลที่สุทธระหว่าง ปริมาณงาน (Throughput) กับค่าหน่วงเวลา (Delay) โดยมีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของจำนวนฮอป พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของรัศมีการส่งสัญญาณพิจารณาการเคลื่อนที่ของโหนด และส่วนใหญ่แล้วจะพิจารณาปริมาณงานและค่าหน่วงเวลาในการส่งต่อหลาย ๆ ครั้ง

งานวิจัยของ Wu , X., Liu, J., and Chen, G. (2006) ได้นำเสนอถึงการออกแบบระบบเครือข่ายเมฆไร้สายภายใต้ข้อจำกัดหลายประการ เช่น การศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการเกิดคอขวดของปริมาณงานและค่าหน่วงเวลาของเครือข่ายเมฆไร้สาย และเสนอวิธีการออกแบบเพื่อให้ได้ปริมาณงานและค่าหน่วงเวลาที่ดีที่สุด

งานวิจัยของ Liu,T., and Liao,W. (2008) ได้นำเสนอการจำลองหาตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมที่ขึ้นอยู่กับปริมาณงานและค่าหน่วงเวลาต่อผู้ใช้ โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างจำนวน ฮอป โดยทำการวิเคราะห์อัตราการมาถึงของแพ็กเก็ต และอัตราการไหลออกของแพ็กเก็ต บนพื้นฐานแบบจำลองนี้ ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาถึงการวางแผนหรือออกแบบยุทธวิธีของเครือข่ายว่ามีผลอย่างไรต่อปริมาณงาน กับค่า

หน่วงเวลาของแต่ละโหนด และได้นำเสนอกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพที่ทำให้เกิดความเท่าเทียมกันของปริมาณงาน ในทุก ๆ โหนด

ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่างานวิจัยเหล่านี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์วิธีการในการออกแบบหาปริมาณงาน แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่คำนึงถึงผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น กำแพง หรือสิ่งกีดขวางอื่นๆ ที่ทำให้ระดับของคุณภาพสัญญาณที่ได้รับได้มีค่าน้อยลงตามจำนวนของสิ่งกีดขวาง ซึ่งทำให้ในการวิเคราะห์ปริมาณงานไม่เป็นไปตามความเป็นจริง จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอถึงการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากปริมาณงานที่ได้ ในการหาปริมาณงานของงานวิจัยนี้ ได้นำผลกระทบจากปัจจัยภายนอกมาพิจารณา และในการวิเคราะห์หาปริมาณงานนั้น ได้มีการศึกษาถึงงานวิจัยของ Akyildiz, I. F., Wang, X., and Wang, W. (2005) ซึ่งมีการศึกษาถึงสมรรถนะในด้านต่างๆ ของเครือข่ายเมฆไร้สาย งานวิจัยของ Gross, D., and Harris, C. (1998) เป็นการศึกษาถึงทฤษฎีของระบบการเข้าแถวคอย (Queueing Theory) ซึ่งสามารถนำขบวนการและสมการ ไปวิเคราะห์ห้ออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 2

ปัญหาของระบบเครือข่ายไร้สายมีหลายประการด้วยกัน ดังนั้นอาจจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ไร้สายได้ หรือเกิดจากสัญญาณเสื่อมถอย ได้แก่ ฝาผนัง รวมทั้งอุปสรรคต่าง ๆ ที่ขวางทางเดินของคลื่นสัญญาณ รวมทั้งที่สะท้อนและดูดซึมของคลื่นสัญญาณวิทยุ และส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาเกี่ยวกับความแรงของคลื่นสัญญาณ รวมทั้งปัญหาจากการรบกวนกันของสัญญาณ อาจเกิดจากสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นๆ เทคโนโลยีใหม่ ๆ สามารถชดเชยปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ งานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอแนวทางที่จะสามารถขยายเครือข่ายให้ครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขึ้นโดยใช้ระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย และได้นำเสนอวิธีการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยศึกษาจากการวางตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมที่สุด และในการออกแบบจะคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ เช่น ได้ทำการวิเคราะห์อัตราความมาถึงของตัวปล่อยสัญญาณ และอัตราการไหลออกของแพ็กเก็ต โดยมีการส่งต่อแบบคิว (Queues) ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งกีดขวางเหล่านั้นต่อสมรรถนะของเครือข่ายโดยพิจารณาจาก ค่าความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) ที่มีผลต่อความสำเร็จในการส่งข้อมูล ซึ่งตัวแปรที่สนใจนี้ในทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะเท่ากันเสมอไม่ว่าโหนดจะติดตั้งอยู่ในบริเวณใดก็ตาม แต่ตามความเป็นจริงค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ น่าจะมีผลมาจากปัจจัยภายนอกหลาย ๆ อย่าง วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบวิเคราะห์และทดสอบหาการวางตำแหน่งโหนดที่เหมาะสมภายในตัวอาคาร และเพื่อให้ได้ปริมาณงาน ที่ดีที่สุดได้



## บทที่ 2 ทฤษฎีแถวคอย

### 2.1 กล่าวนำ

สำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายเมชไร้สายนั้นมีหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์อยู่มากมาย ซึ่งหนึ่งในแนวคิดที่นิยมใช้คือการวิเคราะห์ด้วย ทฤษฎีแถวคอย เพราะเป็นแนวคิดที่ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติและสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ผลได้ด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำทฤษฎีแถวคอยเป็นหลักสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายเมชไร้สาย ซึ่งรูปแบบที่ใช้จะเป็นแถวคอยแบบ M/M/1/K เท่านั้น โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีแถวคอยและสมการพื้นฐานต่างๆ เพื่อสร้างความเข้าใจก่อนนำไปใช้วิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายเมชไร้สาย ในบทถัดไป

### 2.2 แนวคิดของทฤษฎีแถวคอย

ในชีวิตประจำวันของบุคคลทั่ว ๆ ไปจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเข้าคิว หรือระบบแถวคอย เช่น การรอรถประจำทาง การฝากหรือถอนเงินกับธนาคาร การรอรับบริการสาธารณสุข เป็นต้น เราจะเห็นได้ว่าการเข้ามารับบริการดังกล่าวข้างต้นจะเป็นบุคคล ใดก็ได้ ระบบแถวคอยมิได้จำกัดอยู่เฉพาะบุคคลเท่านั้น แต่ยังรวมถึงวัสดุ สิ่งของหรือสิ่งที่เราสนใจศึกษา เช่น รถยนต์ที่เข้ามารับบริการตรวจซ่อมบำรุง เอกสารที่นำเสนอเพื่อรอการอนุมัติ เครื่องบินที่รอเวลาการออกเดินทาง เป็นต้น ทั้งนี้ระบบแถวคอยจะขึ้นอยู่กับลักษณะและการจัดการของแถวคอยนั้น ๆ ซึ่งแถวคอยจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ผู้มารับบริการ (Arrival) หรือลูกค้า (Customer) ที่เข้ามารับบริการยังหน่วยให้บริการ (Service Units) และยังไม่ได้รับบริการในทันที ดังนั้นผู้มารับบริการจึงต้องใช้เวลาในการรอเพื่อรับบริการ ในการแก้ปัญหาของระบบแถวคอยได้มีการพัฒนาศาสตร์ทางด้านนี้ขึ้นมา เรียกว่า ทฤษฎีแถวคอย

ทฤษฎีแถวคอยมีต้นกำเนิดมาจากผลงานของ Erlang, A.K.(1909) โดยทำการทดลองเกี่ยวกับปัญหาการรอคอยการต่อโทรศัพท์ของโอเปอเรเตอร์ ในขณะที่โอเปอเรเตอร์ไม่ว่าง เนื่องจากกำลังต่อโทรศัพท์ให้กับผู้อื่น เป็นปัญหาแรกที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการรอคอย ในกรณีที่มิโอเปอเรเตอร์คนเดียวให้บริการต่อโทรศัพท์ และต่อมาในปี ค.ศ. 1917 ได้ขยายขอบข่ายการแก้ปัญหาไปในกรณีที่มิโอเปอเรเตอร์ให้บริการต่อ

โทรศัพท์หลายคน การพัฒนาทางทฤษฎีและในการประยุกต์ในระยะต่อมามุ่งไปในการให้บริการต่อโทรศัพท์เป็นส่วนใหญ่จนกระทั่งในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 ที่มีการขยายผลงานเกี่ยวกับการแก้ปัญหาแถวคอยไปในด้านอื่นๆ ทฤษฎีแถวคอยเป็นทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นด้วยรูปแบบการจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้วิเคราะห์สภาวะของแถวคอยได้อย่างมีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งที่ไม่มีความซับซ้อนสูงนัก โดยการศึกษาลักษณะรูปแบบทางทฤษฎีความเป็นไปได้ของหน่วยเข้ารับบริการและการให้บริการ แล้วหาผลลัพธ์เป็นค่าต่างๆ แสดงสภาวะของแถวคอย ผลลัพธ์ดังกล่าวจะช่วยในการตัดสินใจดำเนินการเกี่ยวกับการให้บริการที่ดีขึ้น

### 2.2.1 องค์ประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอย

ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1. ผู้ใช้บริการ (customer)
2. แถวคอย (queue)
3. หน่วยบริการ (server) ซึ่งอาจมี 1 หน่วยหรือมากกว่าก็ได้

ดังนั้นระบบแถวคอย หมายถึงแถวคอยและหน่วยบริการ ซึ่งจำนวนผู้ให้บริการในระบบแถวคอยที่เวลาใด ๆ จะหมายถึงจำนวนผู้ให้บริการในแถวคอยรวมทั้งจำนวนผู้ให้บริการที่กำลังให้บริการ ส่วนจำนวนผู้ให้บริการในแถวคอยที่เวลาใด ๆ จะหมายถึงจำนวนผู้ให้บริการที่อยู่ในแถวคอย

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบแถวคอย

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบแถวคอย มีดังนี้

#### 1. กระบวนการเข้าใช้ระบบ

ถ้าผู้ให้บริการ มารับบริการเป็นเวลาที่น่านอน ก็จะสามารถจัดให้มีหน่วยบริการตามเวลานั้น ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาแถวคอยได้ แต่เนื่องจากการมาของผู้ใช้บริการขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง ทำให้ช่วงเวลาห่างระหว่างการเข้าใช้งาน (Interarrival time) แตกต่างกันไป ซึ่งมีการแจกแจงเป็น แบบพัชของ (Poisson) แบบเออร์แลงก์ (Erlang) แบบสม่ำเสมอ (Uniform) หรือรูปแบบอื่นๆ กระบวนการเข้าใช้ระบบที่ใช้มากที่สุด คือแบบพัชของที่เป็นลำดับของตัวแปรสุ่มที่ไม่ขึ้นต่อกัน มีการกระจายเหมือนกัน (Independent and Identically Distributed : IID) และมีการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) ในการวิเคราะห์ของทฤษฎีแถวคอยจะสมมุติว่าเวลาระหว่างการเข้าใช้งานเป็นลำดับของตัวแปรสุ่มที่ไม่ขึ้นต่อกัน ที่มีการกระจายเหมือนกัน

#### 2. การกระจายของเวลาบริการ

เวลาที่ผู้ใช้บริการเข้าใช้งานในระบบแถวคอย ช่วงเวลาดังกล่าวเรียกว่าเวลาบริการ (Service Time) ซึ่งจะมีการแจกแจงที่แตกต่างกัน เช่น การแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform) แบบเออร์แลงก์ (Erlang) แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล หรือแบบอื่น ๆ โดยทั่วไปเวลาบริการจะสมมุติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่เป็น IID และมักใช้การกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

### 3. จำนวนหน่วยบริการ

ในระบบแถวคอย อาจมีจำนวนหน่วยบริการ 1 หน่วย หรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งทุกหน่วยถือเป็นส่วนประกอบของระบบแถวคอย หน่วยบริการในระบบแถวคอยเดียวกันจะเป็นหน่วยที่เหมือนกัน ถ้าหน่วยบริการไม่เหมือนกันจำเป็นต้องแยกออกเป็นแถวคอยอื่น และพิจารณาหน่วยบริการที่เหมือนกันเป็นแถวคอยเดียวกันรูปแบบของหน่วยบริการมากกว่า 1 หน่วยอาจจัดวางในลักษณะขนานกันหรืออนุกรมกันหรือทั้งสองอย่างผสมกันก็ได้

### 4. ขนาดของระบบ

ขนาดของระบบ จะเป็นจำนวนมากที่สุดของผู้ใช้บริการที่สามารถเข้ามาอยู่ในระบบ โดยขนาดของระบบจะรวมถึงผู้ใช้บริการที่กำลังใช้บริการอยู่ และผู้ใช้บริการที่รอการใช้งานอยู่ โดยทั่วไประบบจะมีขนาดที่จำกัดแต่อย่างไรก็ตามถ้าระบบมีขนาดใหญ่ประมาณค่าหนึ่ง เรามักจะสมมุติว่ามีขนาดเป็นอนันต์เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

#### 2.2.3 รูปแบบการบริการ

รูปแบบการบริการ คือ การเลือกลำดับของผู้ใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการในระบบ ซึ่งอาจเป็นดังนี้

1. มาก่อนรับบริการก่อน (First Come First Served : FCFS)
2. มาทีหลังรับบริการก่อน (Last Come First Served : LCFS)
3. การให้บริการแบบทั่วไป (General Service Discipline : GD)
4. การให้บริการแบบสุ่ม (Random Selection for Service : RSS)

#### 2.2.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแบบจำลองแถวคอย

ในระบบแถวคอย เรามักจะใช้สัญลักษณ์ในรูปแบบ A/S/c/K/SD โดยแต่ละตัวอักษรแสดงถึงพารามิเตอร์ดังนี้

A คือ กระบวนการเข้าใช้ระบบ (Arrival Process)

S คือ การกระจายของเวลาบริการ (Service Time Distribution)

$c$  คือ จำนวนเครื่องบริการ (Number of Servers)

$K$  คือ ขนาดของระบบ (System Capacity)

SD คือ รูปแบบการบริการ (Service Discipline)

การกระจายของกระบวนการเข้าใช้ระบบ และเวลาบริการเรามักจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

$M$  คือ เอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential)

$E_k$  คือ เออร์แลงก์ (Erlang with parameter  $k$ )

$D$  คือ ดีเทอร์มินิสติก (Deterministic)

$G$  คือ แบบทั่วไป (General)

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองที่ใช้หลักการของ Markovian property หรือ Memoryless property โดยแยกได้เป็น 5 แบบจำลองดังนี้

$M/M/1/\infty$

$M/M/1/K$

$M/M/c/\infty$

$M/M/c/K$

$M/M/c/c$

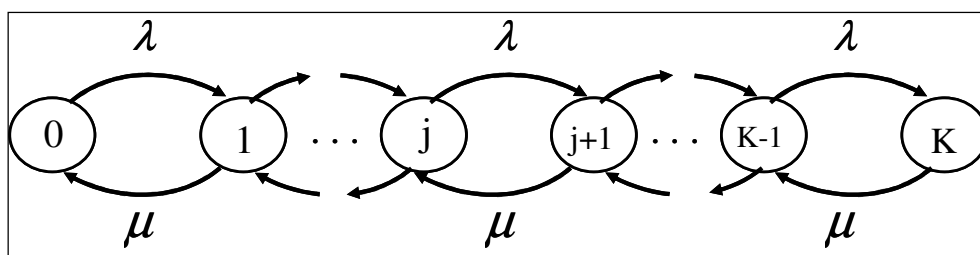
ในงานวิจัยนี้ได้มีการเข้าใช้บริการของแต่ละโหนดโดยใช้แบบจำลองของระบบการเข้าแถวคอยแบบ  $M/M/1/K$

### 2.3 ระบบการเข้าแถวคอยแบบ $M/M/1/K$

ระบบคิวแบบ  $M/M/1/K$  (Gross and Harris., 1998) มีอัตราการเข้าใช้บริการเป็นแบบปัวซอง อัตราการให้บริการเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล มีผู้ให้บริการ 1 เซิร์ฟเวอร์ มีรูปแบบการบริการเป็นแบบมาก่อน ได้สิทธิ์ในการรับบริการก่อน (First Come First Serve, FCFS) ยกเว้นเพียงแต่ระบบนี้มีจำนวนของคิวสำหรับให้ผู้ให้บริการรอในระบบเป็นจำนวนจำกัด ซึ่งแตกต่างจากระบบคิวแบบ  $M/M/1$  ที่มีจำนวนคิวแบบไม่จำกัด

ระบบคิวแบบ  $M/M/1/K$  จะจำกัดขนาดของผู้ใช้บริการที่อยู่ในระบบได้มากที่สุดเท่ากับ  $K$  คน ดังนั้น ผู้ใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการในขณะที่ระบบเต็มจะถูกบไล้ออกไปทันทีจำนวนผู้ให้บริการที่อยู่ในระบบที่เวลา  $t$  หน่วยหรือ  $N(t)$  สามารถจำลองได้ด้วยมาคอฟเชนแบบเวลาต่อเนื่อง (continuous-time Markov chain) โดยสมมติว่าที่เวลาหนึ่งจำนวนผู้ให้บริการในระบบมีทั้งหมด  $j$  คนหรือ  $N(t)=j$  เมื่อเวลาผ่านไป  $t$  หน่วยเวลา

จะพบว่ามีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ มีผู้ใช้บริการใหม่เข้าสู่ระบบด้วยอัตราค่าเข้าระบบเท่ากับ ทำให้ผู้ใช้บริการรวมในระบบมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผู้ใช้บริการสิ้นสุดการรับบริการและออกจากระบบด้วยอัตราเท่ากับ ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการลดลง เนื่องจากลักษณะการเข้าสู่ระบบของผู้ใช้บริการมีการกระจายเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งตัวแปรสุ่มประเภทนี้มีคุณสมบัติ เฉพาะคือ ไม่มีความจำ (memory less) ดังนั้นสถานะของระบบที่จะเกิดขึ้นในอนาคตไม่ได้ขึ้นกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีต แต่จะขึ้นกับสถานะของระบบที่เวลาปัจจุบันเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติ เฉพาะของมาร์คอฟเชน โดยสามารถแสดงภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะได้ดังรูปที่ 3.4 เมื่อระบบมีจำนวนสถานะจำกัด  $\{0,1,2,\dots,K\}$



รูปที่ 2-1 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบแถวคอยแบบ M/M/1/K

จากแผนภาพ สถานะ 0 คือสถานะที่ไม่มีผู้ใช้บริการในระบบ ( $N(t) = 0$ ) ซึ่งเซิร์ฟเวอร์จะไม่ถูกใช้งาน เมื่อเวลาผ่านไป  $t$  หน่วยเวลา มีผู้เข้ามาใช้บริการในระบบ 1 คนด้วยอัตราเท่ากับ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ 0 เป็นสถานะ 1 ซึ่งเป็นสถานะที่มีผู้ใช้งานในระบบอยู่หนึ่งคน ( $N(t) = 1$ ) เมื่อผู้ใช้บริการเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นสถานะปัจจุบันก็จะเปลี่ยนแปลงไปยังสถานะถัดไป ในทางกลับกันเมื่อผู้ใช้ บริการสิ้นสุดการรับบริการและออกจากระบบ สถานะปัจจุบันจะถูกเปลี่ยนกลับไปอยู่ในสถานะก่อนหน้า สถานะ ระบบมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเมื่อระบบอยู่ในสถานะ K ซึ่งเป็นสถานะที่มีผู้ใช้งานในระบบ K คน ถ้ามีผู้ใช้บริการรายใหม่เข้ามาในระบบก็จะถูกบล็อกทันที

### 2.3.1 ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบ $j$ คน

จากแผนภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบแถวคอยแบบ M/M/1/K นำมาใช้ในการหาสมการสมดุลโดยรวม (global balance equation) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda p_0 &= \mu p_1 \\ (\lambda + \mu) p_j &= \lambda p_{j-1} + \mu p_{j+1} \quad j = 1, 2, \dots, K-1 \\ \mu p_K &= \lambda p_{K-1} \end{aligned} \quad (2-1)$$

จากสมการ (2-1) สามารถเขียนใหม่ได้

$$\lambda p_j - \mu p_{j+1} = \lambda p_{j-1} - \mu p_j \quad (2-2)$$

จากสมการที่ (2-2) ถ้า  $j = 1$  จะทำให้

$$\lambda p_{j-1} = \mu p_j \quad (2-3)$$

หรือ

$$\lambda p_0 - \mu p_1 = 0$$

ดังนั้น สมการที่ (2-3) จะกลายเป็น

$$\lambda p_{j-1} = \mu p_j \quad (2-4)$$

จะได้ ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบ  $j$  คนมีค่าเท่ากับ

$$p_j = \rho p_{j-1} \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, \dots, K$$

หรือ

$$p_j = \rho^j p_0 \quad (2-5)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

และ  $\rho = \lambda / \mu$  ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด  $j$  คน หรือ  $P[N = j]$  สำหรับระบบที่จำกัดขนาดผู้ใช้บริการได้มากที่สุด  $K$  คน หาได้จากสมการ (2-5) ซึ่งสามารถหาค่า  $p_0$  โดยอาศัยพื้นฐานของความน่าจะเป็นที่ว่า ผลรวมของความน่าจะเป็นของทุกสถานะต้องมีค่าเป็นหนึ่ง ดังนั้น

$$1 = \sum_{j=0}^K p_j = \rho^j p_0 \quad (2-6)$$

$$= (1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^K) p_0$$

$$= \left( \frac{1 - \rho^{K+1}}{1 - \rho} \right) p_0$$

จาก  $\sum_{j=0}^K p_j = 1$  ดังนั้น จะได้  $p_0$

$$\left( \frac{1 - \rho^{K+1}}{1 - \rho} \right) p_0 = 1$$

$$p_0 = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K+1}}$$

(2-7)

ดังนั้น จากสมการที่ (2-5) จะได้ว่าความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด  $j$  คน

$$P[N = j] = \rho^j p_0 \quad (2-8)$$

$$= \frac{(1-\rho)\rho^j}{1-\rho^{K+1}} \quad j = 0, 1, 2, \dots, K \quad (2-9)$$

สำหรับกรณีปริมาณกราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบน้อยกว่า 1 ( $\rho < 1$ )

สำหรับกรณีที่ปริมาณกราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบเท่ากับ 1 ( $\rho = 1$ ) ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด  $j$  คน หาได้จากสมการที่ (2-6) เช่นเดียวกัน

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{j=0}^K p_j = \rho^j p_0 \\ &= (1+1+1^2 + \dots + 1^K) p_0 \\ &= (K+1) p_0 \end{aligned}$$

จาก  $\sum_{j=0}^K p_j = 1$  ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} (K+1) p_0 &= 1 \\ p_0 &= \frac{1}{(K+1)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด  $j$  คน เมื่อ  $\rho = 1$

$$\begin{aligned} P[N = j] &= \rho^j p_0 \\ &= \frac{\rho^j}{K+1} \\ &= \frac{1}{K+1} \end{aligned} \quad (2-11)$$

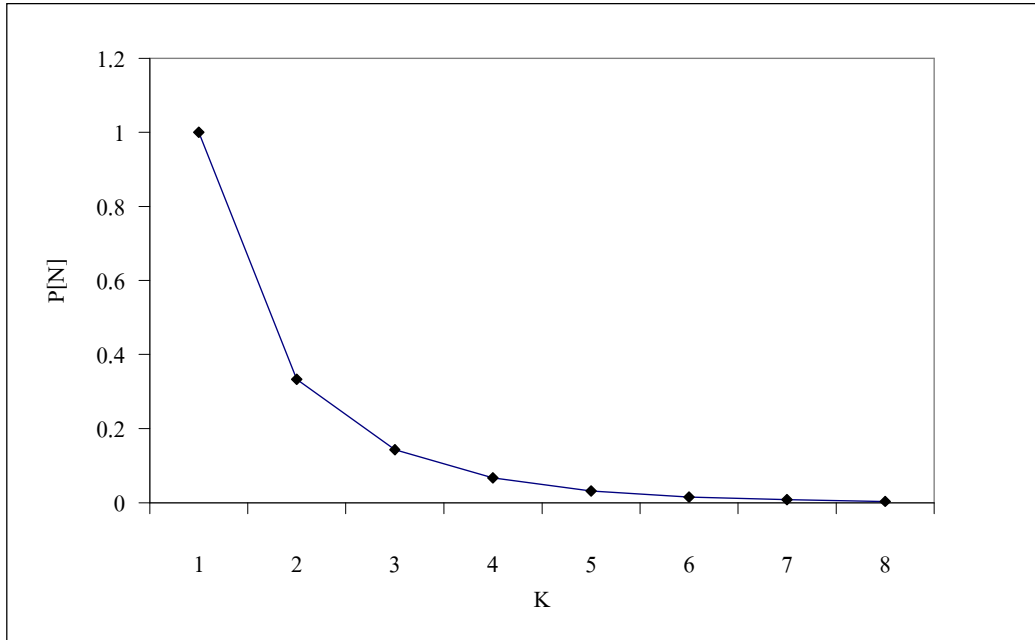
ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด  $j$  คน สำหรับระบบคิวแบบ M/M/1/ K

$$P[N = j] = \begin{cases} \frac{(1-\rho)\rho^j}{1-\rho^{K+1}} & ; \rho \neq 1 \\ \frac{1}{K+1} & ; \rho = 1 \end{cases} \quad (2-12)$$

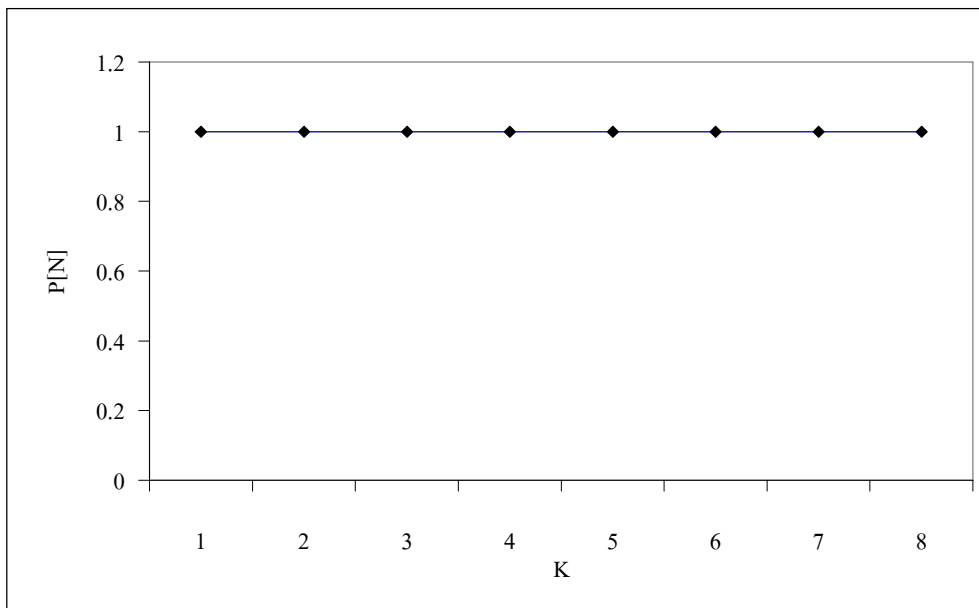
ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการในระบบทั้งหมด  $j$  คน จะเห็นได้ว่าที่  $\rho = 1$  จะทำให้ระบบมีความน่าจะเป็นที่เท่าๆกันหมดไม่ว่า state ใดๆ ดังรูปที่ 3.6 โดยมีค่าเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งจากสมการที่ (2-12) จะสังเกตเห็นว่า ที่  $\rho < 1$  ถ้า  $K$  มีค่าเข้าใกล้  $\infty$  ดังรูปที่ 3.5 จะได้สมการเช่นเดียวกับแถวคอยแบบ M/M/1 นั่นคือ

$$P[N = K] = (1 - \rho)\rho^K$$

(2-13)

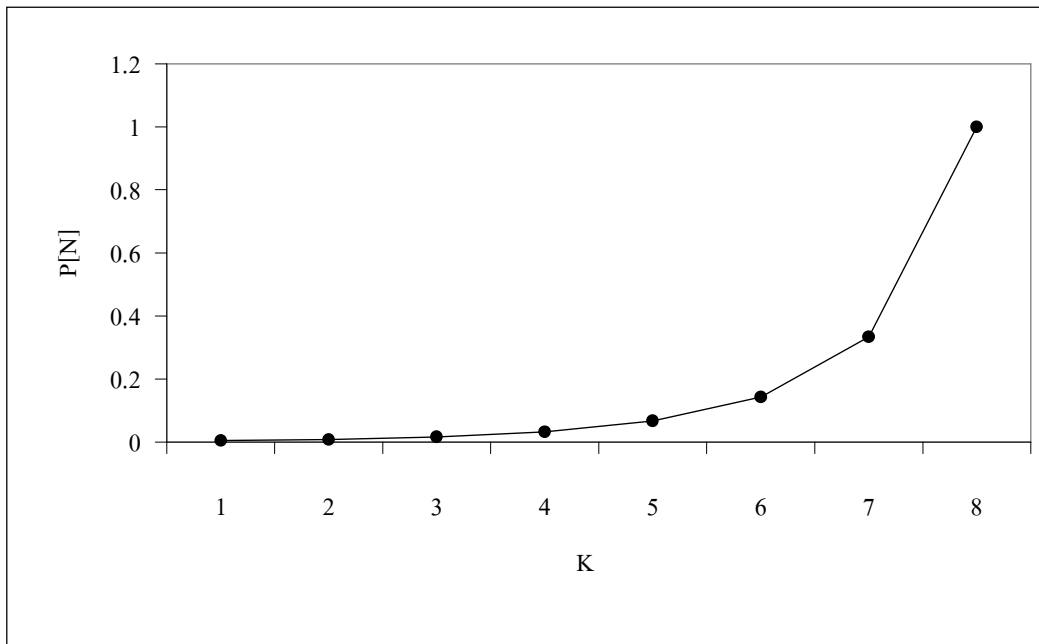


รูปที่ 2-2 แสดงความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัวสำหรับค่าของปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบกรณีที่ปริมาณทราฟฟิกในระบบน้อยกว่า 1



รูปที่ 2-3 แสดงความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัวสำหรับค่าของปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบเท่ากับ 1





รูปที่ 2-4 แสดงความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัวสำหรับค่าของปริมาณกราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบกรณีมากกว่า 1

### 2.3.2 ค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

ค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ ( $E[N]$ ) จะแบ่งการคำนวณเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1  $\rho = 1$

$$\begin{aligned}
 E[N] &= \sum_{j=0}^K jP[N=j] \\
 &= \sum_{j=0}^K j \left( \frac{1}{K+1} \right) \\
 &= \frac{1}{K+1} \sum_{j=0}^K j \\
 &= \frac{1}{K+1} (0+1+2+\dots+K) \\
 &= \frac{1}{K+1} \left[ \frac{(K+0)(K+1)}{2} \right]
 \end{aligned}$$

$$= \frac{K}{2}$$

(2-14)

กรณีที่ 2  $\rho \neq 1$ 

จากสมการ(2-4)จะทำให้

$$E[N] = \sum_{j=0}^K jP[N=j]$$

$$E[N] = \sum_{j=0}^K j\rho p_{j-1}$$

จากสมการ (2-5) ทำให้ได้ว่า  $p_{j-1} = \rho^{j-1} p_0$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} E[N] &= \sum_{j=0}^K j\rho\rho^{j-1} p_0 \\ &= p_0\rho \sum_{j=0}^K jp^{j-1} \\ &= p_0\rho \sum_{j=0}^K \frac{d}{d\rho}(\rho^j) \end{aligned}$$

$$= p_0\rho \frac{d}{d\rho} \left( \sum_{j=0}^K \rho^j \right)$$

$$= p_0\rho \frac{d}{d\rho} \left( \frac{1-\rho^{K+1}}{1-\rho} \right)$$

$$= p_0\rho \frac{1-(K+1)\rho^K + K\rho^{K+1}}{(1-\rho)^2}$$

จากสมการ (2-10) จะได้

$$E[N] = \rho \left( \frac{1-\rho}{1-\rho^{K+1}} \right) \left( \frac{1-(K+1)\rho^K + K\rho^{K+1}}{(1-\rho)^2} \right)$$

$$= \frac{\rho [1 - (K+1)\rho^K + K\rho K + 1]}{(1-\rho)(1-\rho^{K+1})} \quad (2-15)$$

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

$$E[N] = \begin{cases} \frac{\rho [1 - (K+1)\rho^K + K\rho K + 1]}{(1-\rho)(1-\rho^{K+1})} & , \rho \neq 1 \\ \frac{K}{2} & , \rho = 1 \end{cases} \quad (2-16)$$

### 2.3.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในระบบ

จากทฤษฎีของ Little's Formula กล่าวว่าเมื่อระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวจำนวนเฉลี่ยของผู้ใช้บริการที่อยู่ในระบบ  $E[N]$  มีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราการเข้าสู่ระบบของผู้ใช้บริการ โดยเฉลี่ยกับค่าเฉลี่ยของเวลาทั้งหมดที่ผู้ใช้บริการใช้ในระบบ

$$E[N] = \lambda E[T] \quad (2-17)$$

เมื่อ  $E[T]$  คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในระบบ  
 $E[N]$  คือ จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยของระบบ  
 $\lambda$  คือ อัตราการเข้าใช้บริการในระบบ

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ผู้ใช้บริการแต่ละคนอยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ

$$E[T] = \frac{E[n]}{\lambda_a} \quad (2-18)$$

เมื่อ  $\lambda_a$  คือ อัตราการเข้าใช้บริการจริง

ในระบบคิวแบบM/M/1/K เมื่อมีผู้เข้ามาใช้บริการในระบบ ระบบสามารถให้บริการกับผู้เข้ามาใช้บริการได้ส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งระบบจะทำการบล็อกผู้ใช้บริการออกจากระบบเมื่อระบบเต็ม ดังนั้น อัตราการเข้าใช้บริการในระบบจึงเกิดจากผลรวมของอัตราการเข้าใช้บริการจริง ( $\lambda_a$ ) และอัตราการบล็อกผู้ใช้บริการ ( $\lambda_b$ )  $\lambda = \lambda_a + \lambda_b$  ดังนั้นอัตราการเข้าใช้บริการจริง สามารถหาได้จาก

$$\lambda_a = \lambda - \lambda_b \quad (2-19)$$

เนื่องจากสัดส่วนของเวลาที่ระบบจะบล็อกผู้ใช้บริการที่เข้ามาใหม่มีค่าเท่ากับ  $P[N(t) = K] = p_K$  ดังนั้นระบบจะบล็อกผู้ใช้บริการด้วยอัตราเท่ากับ  $\lambda_b = \lambda p_K$  จากสมการ(2-19)จะได้

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \lambda - \lambda p_K \\ &= \lambda(1 - p_K) \end{aligned} \quad (2-20)$$

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในระบบจริง

$$E[T] = \frac{E[n]}{\lambda(1 - p_K)} \quad (2-21)$$

ในระบบที่มีการบล็อกผู้ใช้บริการ ปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ(traffic intensity หรือ offered load) มักมีค่าไม่เท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ระบบรองรับจริง (carried load) ค่าของทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับ

$$\text{offered load} = \lambda \times E[\tau] = \lambda \times \frac{1}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2-22)$$

และปริมาณทราฟฟิกที่ระบบรองรับจริงมีค่าเท่ากับ

$$\text{carried load} = \lambda_a \times E[\tau] = \lambda_a \times \frac{1}{\mu} = \frac{\lambda_a}{\mu} \quad (2-23)$$

## 2.4 กล่าวท้ายบท

บทนี้เป็นการปูพื้นฐานเรื่องทฤษฎีแฉกคอยที่เป็นหลักการสำคัญสำหรับการนำไปวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องถ่ายเมฆไร้สาย โดยในบทถัดไปจะนำแฉกคอยแบบ M/M/1/K ไปใช้ประยุกต์เข้ากับเครื่องถ่ายเมฆไร้สาย

### บทที่ 3 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายเมฆไร้สาย

#### 3.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเราสามารถนำระบบ เครือข่ายเมฆไร้สาย มาใช้งานเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั่วถึงและเชื่อมโยงกันตลอดเวลา ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ไม่ว่าจะเป็นเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของโรงเรียน สำนักงาน อพาร์ทเมนท์ คอนโดมิเนียม หมู่บ้านจัดสรร หรือแม้กระทั่งเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สายของชุมชนในเขตเมือง แต่ในระหว่าง เมฆโหนด ยังคงมีปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทำงานของ จุดเข้าถึงสัญญาณ ซึ่งมีหลายประการ ดังต่อไปนี้ ประการแรก คือ กำลังส่งและชนิดของสายอากาศที่ใช้ โดยกำลังส่งที่ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ไม่สามารถแผ่ขยายคลื่นวิทยุครอบคลุมพื้นที่ได้ตามที่ต้องการ และอาจส่งผลให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า Hidden Node ได้ ซึ่งการเกิด Hidden Node อาจทำให้เกิดปัญหาการชนกันของสัญญาณข้อมูลตามมา ประการที่สอง คือสัญญาณคลื่นวิทยุถูกปิดกั้นปัญหาสัญญาณคลื่นวิทยุถูกปิดกั้นมีความเป็นไปได้สูงสำหรับพื้นที่ที่เต็มไปด้วยกำแพงอิฐปูนซึ่งเป็นกำแพงปิดกั้นคลื่นวิทยุได้เป็นอย่างดี ปัญหาการถูกปิดกั้นจะเกิดขึ้นทันที หากใช้งานในที่ที่ล้อมรอบด้วยกำแพงอิฐปูนจะส่งผลให้คลื่นวิทยุอ่อนลง ทำให้รับสัญญาณได้น้อยลง และประการสุดท้าย คือ การสะท้อนและการดูดซับของคลื่นวิทยุของวัสดุในพื้นที่ทำงานปัญหาการกระจายตัวของคลื่นวิทยุไปตามเส้นทางต่าง ๆ หลายเส้นทางคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศของ จุดเข้าถึงสัญญาณ เมื่อเดินทางไปยังเครื่องของผู้รับ อาจพบกับอุปสรรคหลายประการ เช่น คลื่นวิทยุอาจแตกตัวออกเป็นหลายทิศทางเนื่องจากการสะท้อนของคลื่นวิทยุกระทบกับวัตถุที่บดบังทำให้กำลังแรงถูกลดทอนลงไปนอกจากนี้วัสดุบางอย่างในที่ทำงานอาจดูดซับคลื่นวิทยุไปบางส่วน ทำให้เกิดอาการสูญหายของคลื่นสัญญาณ (Fading) ส่งผลให้ผู้รับไม่สามารถรับสัญญาณได้เต็มที่

จากเหตุการณ์ดังกล่าว แนวทางแก้ไขปัญหานั้น ผู้ออกแบบรูปร่างเครือข่ายจึงควรคำนึงถึงเหตุการณ์และปัญหาต่างๆเหล่านี้ในการออกแบบ ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการออกแบบที่ดีที่สุดนั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงปัญหาเหล่านี้ และนำมาพิจารณาในการออกแบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบหาการวางตำแหน่งของเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยได้นำปัจจัยภายนอกมาพิจารณา ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยใดได้นำปัจจัยนี้มาพิจารณา

งานวิจัยนี้ได้เริ่มศึกษาการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จของแต่ละโหนดโดยในการออกแบบได้คำนึงถึงหลักความเป็นจริงที่ว่าในการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จนั้นในทางทฤษฎีแล้วค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จจะมีค่าเท่ากันในทุกๆ โหนดแต่ตามความเป็นจริงค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ น่าจะมีผลมาจากปัจจัยภายนอก ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณงานที่ดีที่สุด จึงมีการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบหาผลของปริมาณงานที่ได้ โดยอาศัยทฤษฎีคิวแบบ M/M/1/K ในการวิเคราะห์ และเพื่อนำมาซึ่ง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดภายในตัวอาคารของเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจากปริมาณงานที่ดีที่สุด ซึ่งในการออกแบบนั้นจะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เป็นไปได้

### 3.2 โครงสร้างของเครือข่ายเมฆไร้สาย

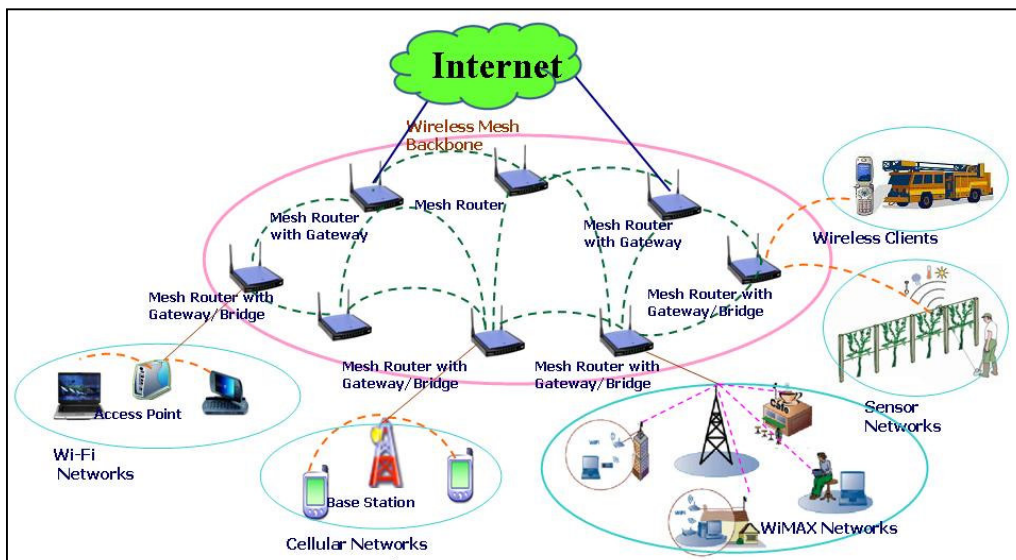
ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือเทคโนโลยีไร้สาย เป็นที่แพร่หลายในองค์กรต่าง ๆ แต่ยังมีข้อจำกัดในการส่งสัญญาณระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ แต่ละจุดจำเป็นต้องผ่านสายเคเบิลซึ่งเชื่อมโยงระหว่าง จุดเข้าถึงสัญญาณ แต่ละตัวผ่านเครือข่ายหลัก(Backbone) ดังนั้น เครือข่ายเมฆไร้สายเป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ทำให้ จุดเข้าถึงสัญญาณ สามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้โดยตรงแบบไร้สาย ไม่ต้องผ่านสายเคเบิล ซึ่งมีระยะทางสามารถเชื่อมต่อกันได้ประมาณ 300 ฟุต ในแต่ละจุดเชื่อมต่อ ซึ่ง เครือข่ายเมฆไร้สายใช้งานได้ทั้ง เครือข่ายไร้สาย แบบ ภายใน และ ภายนอกทั้งแบบที่ใช้ภายในอาคารขนาดเล็ก หรือ เครือข่ายขนาดใหญ่

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยของ Akyildiz, I.F., and Xudong, W., (2005) ได้มีการนำเสนอโครงสร้างของเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

#### 3.2.1 โครงสร้างแบบโครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมฆไร้สาย

โดยมีรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 3-1 เมื่อเส้นประแสดงการเชื่อมต่อแบบไร้สาย โครงสร้างแบบนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อไว้สำหรับลูกข่ายเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายและใช้บริการอินเทอร์เน็ตได้ ส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ในเครือข่ายเมฆนี้จะสามารถทำการเชื่อมต่อและรักษาเสถียรภาพของระบบได้ด้วยตัวมันเองและเครือข่ายของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นสามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตด้วยวิธีที่เรียกว่า Infrastructure meshing คือจะมีเครือข่ายหลักให้ลูกข่ายแบบเก่าและเครือข่ายเมฆไร้สายสามารถใช้งานร่วมกันได้กับเครือข่ายไร้สายที่มีอยู่โดยผ่านฟังก์ชันการทำงานของเกตเวย์หรือบริดจ์ (Gateway/Bridge) ในเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัด

เส้นทางเอง ซึ่งลูกข่ายแบบเท่านั้นจะสามารถเชื่อมต่อสื่อสารกับเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางด้วยระบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet)

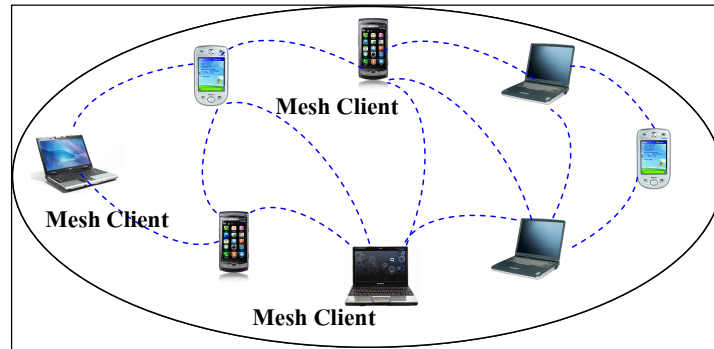


รูปที่ 3-1 การเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย

### 3.2.2 โครงสร้างของเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายไร้สาย

เครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะใช้การเชื่อมต่อกันแบบกลุ่มส่วนตัวในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน ในโครงสร้างชนิดนี้โหนดของผู้ใช้งานจะทำหน้าที่จัดเส้นทางและจัดการระบบที่ดีที่สุดให้กับกลุ่มผู้ใช้งาน ดังนั้นเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นจึงไม่มีความจำเป็นสำหรับเครือข่ายแบบนี้ รูปที่ 3-2 แสดงลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลหรือข่าวสารที่จะส่งไปยังโหนดปลายทางนั้นจะมีการส่งผ่านจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งซึ่งจะทำการส่งกันไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายทางที่เราต้องการ โดยปกติแล้วเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะใช้เพียงคลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์เท่านั้นนอกจากนี้ ความต้องการของผู้ใช้งานระบบมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายไร้สาย ดังนั้นในเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะต้องมีการเพิ่มฟังก์ชันการจัดเส้นทางและต้องสามารถจัดการระบบได้ด้วยตัวของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานเอง

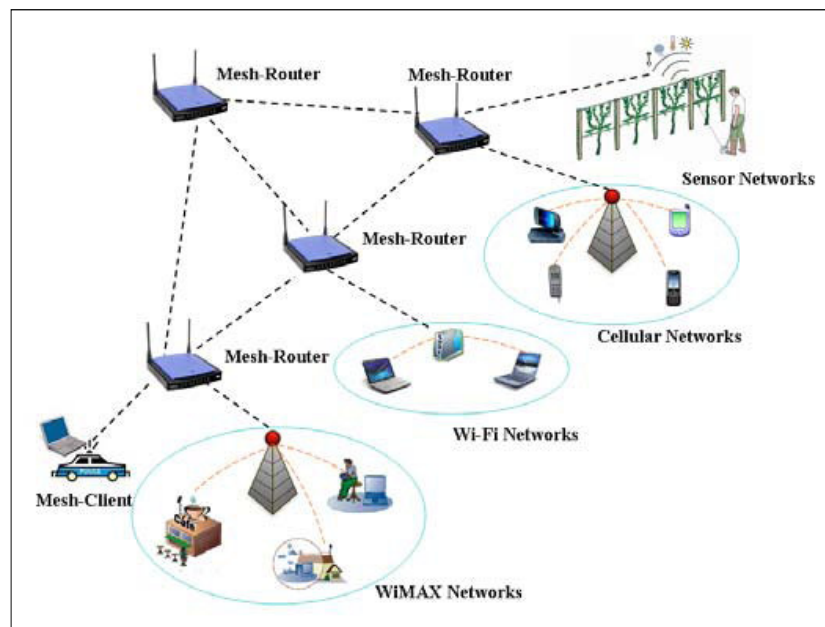




รูปที่ 3-2 การเชื่อมต่อเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมชไร้สาย

### 3.2.3 โครงสร้างเครือข่ายเมชไร้สายแบบไฮบริด

โครงสร้างแบบไฮบริดนี้จะเป็นการรวมกันของโครงสร้างพื้นฐานและโครงสร้างของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3-3 โดยที่เครือข่ายเมชของผู้ใช้งานระบบนั้นสามารถติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายได้โดยผ่านเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง ในการเชื่อมต่อกันระหว่างเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานกับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นเราจะใช้สัญญาณ Wi-Fi WiMAX สัญญาณโทรศัพท์ (cellular) และเครือข่ายเซ็นเซอร์ (sensor networks) เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์จัดเส้นทางเหล่านี้จะสามารถให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเครือข่ายดีขึ้นและครอบคลุมพื้นที่การให้บริการของเครือข่ายเมชไร้สายได้



รูปที่ 3-3 การเชื่อมต่อเครือข่ายเมชแบบไฮบริด

เครือข่ายเมฆไร้สาย เป็น Ad-Hoc Network มีการจัดเรียงเครือข่ายเป็นแบบเมฆซึ่งสามารถเชื่อมต่อ จุดเข้าถึงสัญญาณ ไปในบริเวณ ที่ไม่สะดวกในการใช้สายเคเบิลโดยที่เมฆโหนดสามารถติดต่อกับโหนดอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงได้ซึ่งเมฆโหนดจะทำหน้าที่เหมือนอุปกรณ์จัดเส้นทางส่งต่อแพ็กเก็ตไปยังโหนดอื่น ๆ ไปยังปลายทางซึ่งเครือข่ายเมฆไร้สายสามารถจัดการกับ โหนดของตัวเองโดยอัตโนมัติและสามารถสร้างเส้นทางในการเชื่อมต่อระหว่างเมฆได้เองซึ่งถ้าเส้นทางเชื่อมต่อได้ล้มเหลวก็จะทำการหาเส้นทางใหม่และหากเครือข่ายเมฆไร้สายนั้นมีโหนดเคลื่อนที่ภายในจะทำให้สามารถเปลี่ยนตำแหน่งตลอดเวลาเพื่อทำการปรับปรุงเชื่อมต่อบนเครือข่ายซึ่งมีลักษณะสำคัญคือไม่จำเป็นต้องมีส่วนกลางคอยควบคุมแนวคิดการใช้เครือข่ายเมฆไร้สายจึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจเพราะว่าในการติดตั้ง จุดเข้าถึงสัญญาณตามจุดต่างๆนั้นจะต้องมีการเดินสายเชื่อมต่อไปยังจุดต่างๆเหล่านั้นซึ่งทำให้การติดตั้งทำได้ลำบากอย่างที่ยกตัวอย่างมาและทำให้การขยายเครือข่ายทำได้ลำบากและล่าช้า ดังนั้น การใช้เครือข่ายเมฆไร้สายจะทำให้การขยายเครือข่ายทำได้สะดวก จึงทำให้การขยายเครือข่าย WiFi ในเมืองหรือพื้นที่ต่างๆทำได้สะดวกรวดเร็วกว่าซึ่งเป็นแนวโน้มของเมืองต่างๆที่ต้องการจะขยายเครือข่าย WiFi ให้ครอบคลุมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่คือเทคโนโลยีการเชื่อมต่อ WiFi แบบ เครือข่ายเมฆไร้สายนั้นเป็นแบบ Proprietary กล่าวคือ เป็นเทคโนโลยีเฉพาะของผู้ผลิตอุปกรณ์เท่านั้น เมื่อมีอุปกรณ์จากผู้ผลิตอื่นมาใช้งานด้วยก็ไม่สามารถที่จะเชื่อมต่อกันแบบ เมฆ ได้ ดังนั้นทาง IEEE จึงได้พยายามพัฒนามาตรฐาน WiFi ที่มีการเชื่อมต่อแบบ เมฆไร้สาย ระหว่างผู้ผลิตต่าง ๆ ได้โดยในปี 2004 ทาง IEEE ก็ได้จัดตั้ง Task Group S ขึ้น เพื่อพัฒนา 802.11s และเป็นมาตรฐานสำหรับรองรับเครือข่ายเมฆไร้สาย

### 3.2.4 มาตรฐาน IEEE802.11s

IEEE 802.11s กำหนดคุณสมบัติมาตรฐานภายในวันที่ 30 กันยายน 2553 เป็นการเพิ่มขีดความสามารถให้เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย สามารถเชื่อมต่อถึงกันได้เองในลักษณะของเครือข่ายเมฆไร้สายโดยอุปกรณ์ จุดเข้าถึงสัญญาณ ที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11s จะสามารถใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อรับส่งสัญญาณระหว่างกันได้ ทำให้สามารถสร้างเครือข่ายครอบคลุมพื้นที่ให้บริการกว้าง ๆ ได้ โดยใช้อุปกรณ์ จุดเข้าถึงสัญญาณ หลาย ๆ ชุดเชื่อมต่อกัน โดยไม่ต้องเดินสายนำสัญญาณไปยัง จุดเข้าถึงสัญญาณ และสำหรับเครือข่าย 802.11s ซึ่งเป็นเครือข่ายเมฆไร้สาย ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

Mesh Portal (MPP) เป็นส่วนของเครือข่ายเมฆ WiFi ที่มีการเชื่อมต่อแบบมีสาย กล่าวคือ เป็นส่วนของเครือข่ายเมฆที่มีการเชื่อมต่อที่ไม่ใช่ 802.11 เข้าสู่อินเทอร์เน็ตภายนอก และจะเป็นประตูเปิดสู่เครือข่าย

อินเทอร์เน็ตโดยเป็นจุดที่มีการแปลง MSDU (Mac Service Data Unit) ของเครือข่าย WiFi เป็นรูปแบบมาตรฐานอื่น

Mesh Point (MP) จะทำหน้าที่หลักในการส่งต่อทราฟฟิกไปยังส่วนต่างๆของเครือข่าย โดยจะทำหน้าที่ทั้งควบคุมดูแล การจัดการเครือข่ายเมช WiFi ทั้งหมด ซึ่ง MPP ก็คือ MP ที่มีการเชื่อมต่อแบบที่ไม่ใช่ 802.11 นั่นเอง

Mesh Access Point (MAP) จะเป็นจุดที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้งานที่จะใช้อุปกรณ์ WiFi ทั่วไปในการเชื่อมต่อ เนื่องจากในเครือข่ายเมช WiFi นั้นจะมีเรื่องของปริมาณความจุ (Capacity) มากกว่าในเครือข่าย WiFi ทั่วไป เพราะนอกจากช่องสัญญาณที่ให้บริการแก่ผู้ใช้งานแล้วนั้น ยังต้องมีช่องสัญญาณที่ใช้ในการเชื่อมต่อกันเองของเครือข่ายเมชด้วย ดังนั้น การเชื่อมต่อที่ใช้ระยะทางที่ดีที่สุด (ใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด) และประหยัดเวลาที่สุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น

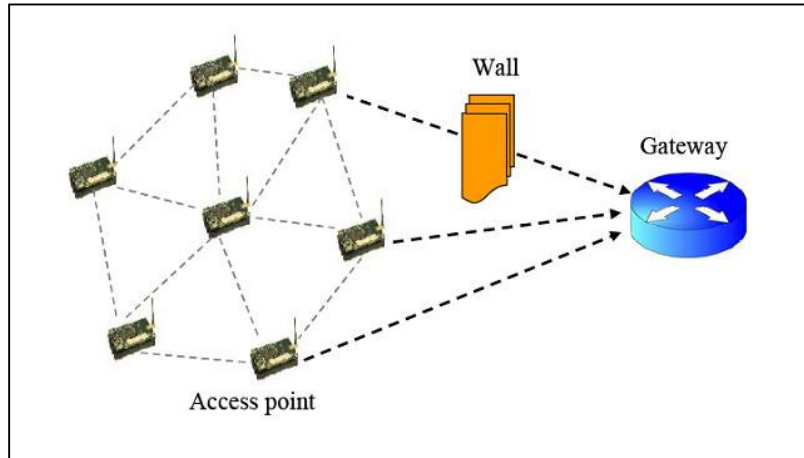
### 3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะด้วยทฤษฎีแถวคอย

#### 3.3.1 การคำนวณหาปริมาณงานในระบบ

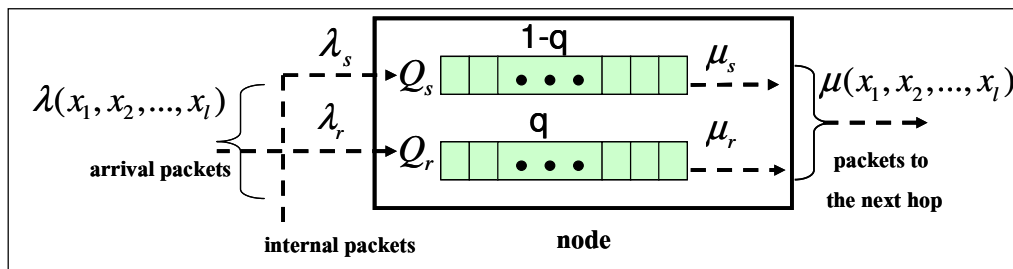
ในการวิเคราะห์คุณภาพของเครือข่ายเมชไร้สายนั้นสามารถพิจารณาได้จากปริมาณงานที่แต่ละโหนดได้รับ ซึ่ง ปัญหาที่เกิดขึ้นในการวัดปริมาณงานจากระบบนั้น ในความเป็นจริงไม่สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมทั้งหมดได้ เช่น ชนิดของวัสดุที่เป็นอาคารและผนังห้อง ซึ่งมีผลต่อปริมาณงานที่วัดได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 3-4 อย่างไรก็ตามเพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพมากที่สุดและควรคำนึงถึงหลักความเป็นจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาปริมาณงาน ซึ่งได้พัฒนาจากเทคนิคการคำนวณหาปริมาณงานจากงานวิจัยของ Liu, T and Liao, W.(2008) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปริมาณงานของระบบจากค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่มีค่าเท่ากันในทุกๆตำแหน่งของโหนด และไม่ได้พิจารณาปัจจัยภายนอกหรือสิ่งแวดล้อม

ในงานวิจัยฉบับนี้เริ่มจากการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของระบบการเข้าแถวคอยแบบ M/M/1/K Gross and Harris. (1998) เป็นระบบแถวคอยที่มีเซิร์ฟเวอร์เพียงตัวเดียว และการเข้ามาใช้บริการระบบของผู้ใช้มีคุณลักษณะของกระบวนการปัวส์ซอง เพราะฉะนั้นช่วงเวลาระหว่างการเข้าสู่ระบบของผู้ใช้สองคนติดกันแต่ละช่วง จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่เป็นอิสระต่อกัน และช่วงเวลาที่ผู้ใช้แต่ละคนรับบริการอยู่ในระบบ (Service times) เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่เป็นอิสระต่อกัน จำกัดขนาดของระบบเท่ากับ K คือจะยอมให้มีจำนวนผู้ใช้บริการอยู่ในระบบได้มากที่สุดเท่ากับ K และมีรูปแบบการบริการ คือ การเลือกลำดับของผู้ใช้บริการที่เข้ามารับบริการในระบบ เป็นแบบ

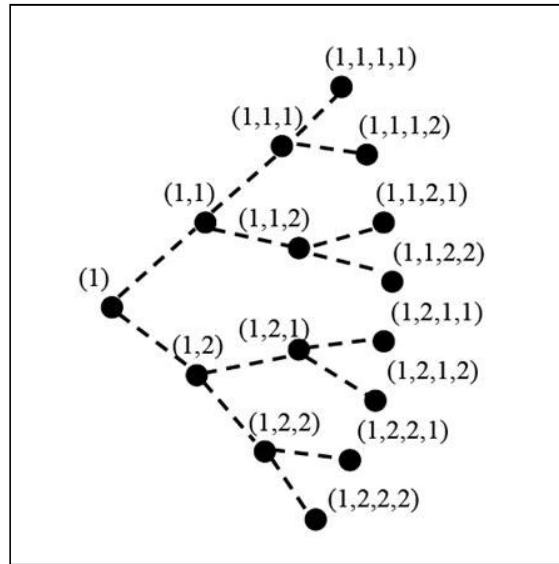
มาก่อนรับบริการก่อน (First Come First Served : FCFS) รายละเอียดซึ่งได้อธิบายในบทที่ 2 และแบบจำลองของ M/M/1/K แสดงได้ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-4 ตัวอย่างของสิ่งกีดขวางจากโหนดถึงตัวปล่อยสัญญาณ



รูปที่ 3-5 แบบจำลอง M/M/1/K ของเครือข่ายเมฆไร้สาย



รูปที่ 3-6 ตัวอย่างของการกำหนดตำแหน่งของโหนด

จากรูปที่ 3-5 เป็นรูปแบบการจำลอง M/M/1/K ที่ใช้ในเครือข่ายเมฆไร้สาย ในแต่ละโหนดนั้นมีระบบการเข้าคิวอยู่ 2 แบบ คือ คิวสำหรับข้อมูลของตัวเองสร้างขึ้น ( $Q_s$ ) และคิวที่ส่งข้อมูลมาจากฮอปก่อนหน้านี ( $Q_r$ ) ในระบบการเข้าคิวจะมีกฎในการส่งต่อข้อมูลออกไปในแต่ละ  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด และสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ในกรณี  $Q_r$  ว่าง ที่  $Q_s$  จะสร้างแพ็กเก็ตขึ้นมาเองแล้วส่งต่อออกไปยังโหนดถัดไป

ในกรณี  $Q_r$  ไม่ว่าง  $Q_r$  จะส่งแพ็กเก็ตออกไปด้วยความน่าจะเป็น  $q(x_1, x_2, \dots, x_l)$  และ  $Q_s$  จะส่งแพ็กเก็ตออกไปด้วยความน่าจะเป็น  $1 - q(x_1, x_2, \dots, x_l)$

ในการหาปริมาณงานของระบบนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มศึกษาจากอัตราการส่งข้อมูล (Mean Service Rate:  $\mu$ ) ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด และสามารถหาได้จากการประยุกต์สมการของ Liu, T and Liao, W.(2008)

$$\mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \approx \frac{1}{t_c} \ln \left( \frac{1}{1 - p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \right) \quad (3-1)$$

เมื่อ  $\mu(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการส่งข้อมูล  
 $p(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จในแต่ละโหนด

$t_c$  คือ เวลาเฉลี่ยของการส่งข้อมูลหนึ่งแพ็คเก็ตในอากาศ  
สำหรับ  $Q_r$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด จะมีอัตราการบริการของข้อมูล เท่ากับ อัตราการส่งข้อมูล และ  
จะได้ว่า อัตราการบริการของข้อมูลสำหรับ  $Q_r$  มีค่าเท่ากับ

$$\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = \mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot q(x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (3-2)$$

เมื่อ  $\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการบริการของข้อมูลสำหรับ  $Q_r$   
 $q(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นที่ข้อมูลใน  $Q_r$  จะถูกส่งต่อออกไป

สำหรับ  $Q_s$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด จะมีอัตราการบริการของข้อมูลสำหรับ  $Q_s$  มีค่าเท่ากับ

$$\mu_s(x_1, x_2, \dots, x_l) = \mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot (1 - q(x_1, x_2, \dots, x_l)) \quad (3-3)$$

เมื่อ  $\mu_s(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการบริการของข้อมูลสำหรับ  $Q_s$   
 $1 - q(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นที่ข้อมูลใน  $Q_s$  จะถูกส่งต่อออกไป

จากกฎในการส่งต่อของข้อมูลที่ได้อธิบายข้างต้นในกรณี  $Q_r$  ไม่ว่างจะมีโอกาสในการส่งผ่านข้อมูลมายัง  
 $Q_r$  และมีประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลออกไปสำหรับ  $Q_r$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนดไปยังฮอป  
ถัดไปดังสมการ

$$\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = \mu_r(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot [1 - P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_l)] \quad (3-4)$$

เมื่อ  $\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลออกไปสำหรับ  $Q_r$   
 $P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นของ  $Q_r$  ที่เริ่มว่างที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด

เมื่อ  $Q_r$  ว่างโอกาสในการส่งผ่านข้อมูลจะถูกส่งมาที่  $Q_s$  และที่  $Q_s$  จะมีประสิทธิภาพของอัตราการส่ง  
ข้อมูลออกไปที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนดมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_l) = \mu_s(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot [1 - P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_l)] \quad (3-5)$$

เมื่อ  $\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลออกไปสำหรับ  $Q_s$   
 $P_{0_s}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นของ  $Q_s$  ที่เริ่มว่างที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด

ในการวิเคราะห์ห้อัตราการเข้าสู่ระบบของข้อมูล (Packet-arrival rates:  $\lambda$ ) สำหรับ  $Q_r$  และ  $Q_s$  สามารถหา  
 ได้ดังสมการที่ 3-6 และสมการที่ 3-7 ตามลำดับ

$$\begin{aligned}\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_l) &= \sum_{x_{l+1}=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} \sigma(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) \\ &= \sum_{x_{l+1}=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) + \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})\end{aligned}\quad (3-6)$$

$$\lambda_s(x_1, x_2, \dots, x_l) = \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot (1 - q(x_1, x_2, \dots, x_l)) \quad (3-7)$$

เมื่อ

$N(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})$  คือ จำนวนโหนดทั้งหมดในชั้นที่  $(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})$

$\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการเข้าสู่ระบบของข้อมูลของ  $Q_r$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด

$\lambda_s(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการเข้าสู่ระบบของข้อมูลของ  $Q_s$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด

และสามารถหาอัตราการส่งข้อมูลออกไปรวม ได้ดังสมการ

$$\sigma(x_1, x_2, \dots, x_l) = \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_l) + \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (3-8)$$

เมื่อ  $\sigma(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการส่งข้อมูลออกไป

$\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการส่งข้อมูลออกไปสำหรับ  $Q_s$

$\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ อัตราการส่งข้อมูลออกไปสำหรับ  $Q_r$

การวิเคราะห์หาค่าของปริมาณงานของโหนดที่มีการบริการอยู่ จะถูกกำหนดด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่ออกจาก  
 จาก  $Q_s$  เมื่อไม่เกิดการบล็อก ดังนั้นจะได้สมการของ ปริมาณงาน ดังสมการที่ 3-9

$$T(x_1, x_2, \dots, x_l) = \begin{cases} \sigma_s(x_1) & , l=1 \\ \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot [1 - P_{br}(x_1)] \cdot [1 - P_{br}(x_1, x_2)] \dots [1 - P_{br}(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})] & , l=2, \dots, H \end{cases} \quad (3-9)$$

เมื่อ  $T(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ปริมาณงานที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด  
 $P_{br}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการบล็อกสำหรับ  $Q_r$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด

เมื่ออัตราการเข้าและออกของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน และเป็นไปตามลักษณะของกระบวนการปัวส์ซอง ดังนั้นการแจกแจงของเวลาที่ผู้ใช้แต่ละคนรับบริการอยู่ในระบบ (Service time) และ ข้อมูลที่ถูกส่งต่อออกไป (Relay packet) สำหรับ  $Q_r$  ทั้งสองเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจำลอง  $Q_r$  เป็นแบบ M/M/1/K ซึ่งมีขนาดของผู้ใช้งานในระบบ เท่ากับ K สามารถพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการบล็อกสำหรับ  $Q_r$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด สามารถหาได้จาก การประยุกต์ M/M/1/K ดังสมการ

$$P_{br}(x_1, x_2, \dots, x_l) = \begin{cases} \frac{[1 - \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l)] \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l)^K}{1 - \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l)^{K+1}} & ; \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l) \leq 1 \\ \frac{1}{K+1} & ; \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = 1 \end{cases} \quad (3-10)$$

เมื่อ  $\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Traffic Intensity) สำหรับ  $Q_r$  ที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop โหนด โดยมีสมการดังนี้

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = \frac{\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_l)}{\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_l)} \quad (3-11)$$

แทนค่าจากสมการที่ 3-4 และ 3-5 ลงในสมการที่ 3-6 และแทนค่าจากสมการที่ 3-2 ลงในสมการที่ 3-11 ดังนั้นจะได้สมการของปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Traffic Intensity) สำหรับ  $Q_r$  คือ



$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = \left[ \frac{\sum \left[ \begin{aligned} & [\mu(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) \cdot q \cdot (1 - P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}))] \\ & + [\mu(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) \cdot (1 - q) \cdot (1 - P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}))] \end{aligned} \right]}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot q} \right] \quad (3-12)$$

เมื่อ  $P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นของ  $Q_r$  ที่เริ่มว่างที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop สามารถหาได้จาก การประยุกต์ M/M/1/K ดังสมการ

$$P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_l) = \begin{cases} \frac{1 - \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l)^{K+1}} & ; \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l) \leq 1 \\ \frac{1}{K+1} & ; \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = 1 \end{cases} \quad (3-13)$$

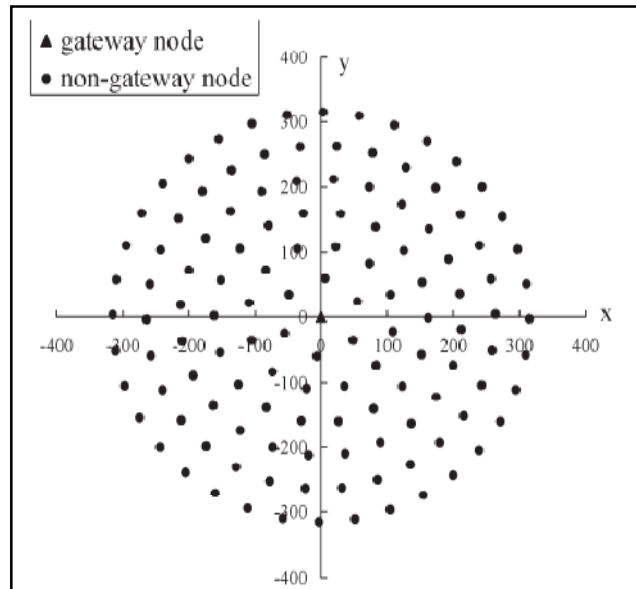
และ  $P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ความน่าจะเป็นของ  $Q_s$  ว่างที่  $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ -hop สามารถหาได้ดังสมการ

$$P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_l) = \begin{cases} \frac{1 - \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_l)^{K+1}} & ; \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_l) \leq 1 \\ \frac{1}{K+1} & ; \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_l) = 1 \end{cases} \quad (3-14)$$

กำหนดให้  $\rho_s(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ปริมาณทราฟฟิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Traffic Intensity) สำหรับ  $Q_s$  ซึ่งเป็น ปริมาณทราฟฟิกที่เกิดจากการใช้งานของ ผู้ใช้งานในหนึ่ง โหนด ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง

### 3.3.2 การเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้ระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง

ในงานวิจัยอ้างอิงได้มีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยมีตัวปล่อยสัญญาณ 1 จุดและมีจำนวน โหนด 126 โหนดซึ่งแสดงดังรูปที่ 3-7 โดยใช้สมการของงานวิจัยของ Liu, T and Liao, W.(2008) ในการคำนวณใน โปรแกรมแมทแลบและในงานวิจัยนี้จะใช้สมการที่ 3-9 ที่ได้ทำการวิเคราะห์ขึ้นมาเพื่อคำนวณใน โปรแกรมแมทแลบและใช้ตัวแปรต่าง ๆ ดังตารางที่ 3-1



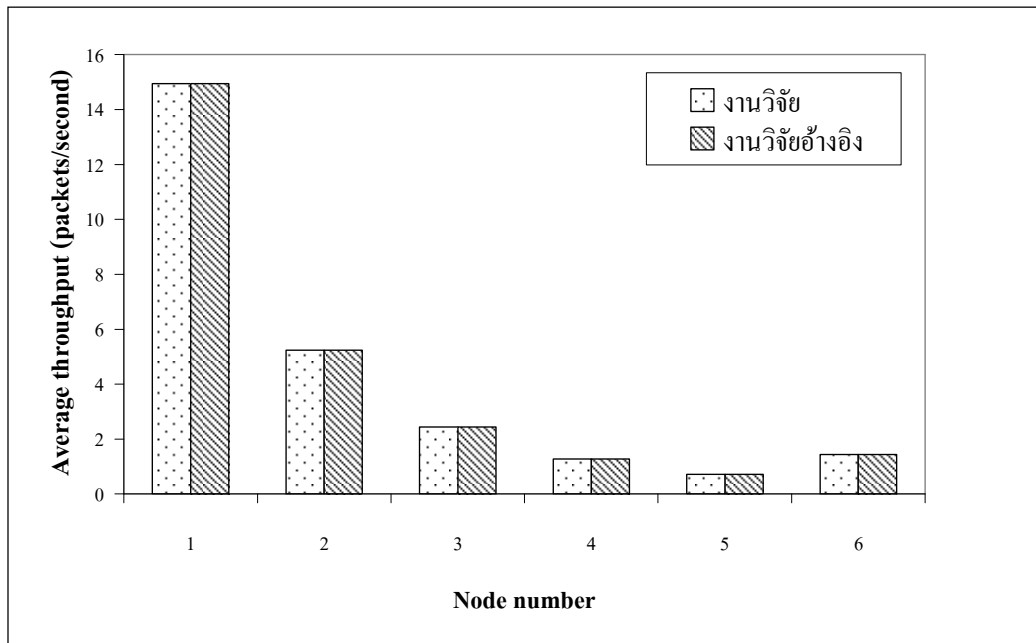
รูปที่ 3-7 รูปแบบการจำลองระบบเครือข่ายเมชไร้สาย (Liu, T and Liao, W.(2008))

ตารางที่ 3-1 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้รับระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
ขนาดของข้อมูล	1500 Byte
ปริมาณความจุ	75 Mb/s
จำนวนโหนด	126
ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ	0.7

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.จำลองระบบเครือข่ายเมชไร้สายดังรูปที่ 3-7
- 2.ทดสอบปริมาณงานในการคำนวณงานวิจัยอ้างอิงจะใช้โปรแกรมแมทแลบและใช้สมการในงานวิจัยอ้างอิงส่วนงานวิจัยนี้จะใช้สมการที่ 3-9 โดยมีการใช้ค่าตัวแปรที่เหมือนกันดังในตารางที่ 3-1 เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณงานที่ได้รับระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง
- 3.แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบผลของปริมาณงานที่ได้รับระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง ดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานที่ได้จากโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง

ก่อนที่จะดำเนินการวิจัยนั้นเราได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบปริมาณงานที่ได้ระหว่างโปรแกรมในงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิงโดยใช้สมการที่วิเคราะห์จากแนวคิดในการออกแบบหาปริมาณงานตามสมการที่ 3-9 จะพบว่าปริมาณงานที่ได้จากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิงมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ 3-9 สามารถนำมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณงานและเพื่อใช้ในการออกแบบหาค่าแห่งของโหนดที่เหมาะสมของเครือข่ายเมฆไร้สายได้

### 3.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

#### 3.4.1 ความแรงของสัญญาณ

ในการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ผ่านระบบเครือข่ายเมฆไร้สายนั้น มีปัจจัยในการที่ทำให้ข้อมูลเกิดความสูญเสียระหว่างเส้นทางการรับส่งข้อมูลซึ่งสิ่งที่นำมาพิจารณาเกี่ยวกับปัจจัยเหล่านี้ คือ ความแรงของสัญญาณ (Signal strength) โดยความแรงของสัญญาณที่มีค่าความแรงของสัญญาณมากน้อยจะเป็นตัวที่ทำให้ค่าความสูญเสียของข้อมูลนั้นแตกต่างกันออกไป โดยปกติแล้วเครือข่ายเมฆไร้สายจะมีระยะ

ในการส่งสัญญาณประมาณ 300 พุด ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าถ้ามีกำแพงหรือสิ่งกีดขวางหลายชั้น ระยะในการส่งสัญญาณก็จะสั้นลง ทำให้เกิดความสูญเสียของข้อมูลเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาหาตัวแปรหรือความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่แสดงถึงผลของความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของสัญญาณ และความสูญเสียของข้อมูล (loss) ที่เกิดขึ้น โดยการวิเคราะห์ค่าแล้วนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดค่าความผิดพลาดของข้อมูล และพัฒนาระบบเครือข่ายเมฆไร้สายในอนาคต

ในหลักความเป็นจริงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำเร็จของข้อมูลจะแปรผันตรงกับค่าความแรงของสัญญาณ ถ้าค่าความแรงของสัญญาณมาก ค่าความสำเร็จของการส่งข้อมูลจะมีค่าความสำเร็จมาก (ค่าความสูญเสียในการส่งข้อมูลน้อย) ถ้าความแรงของสัญญาณ น้อย ค่าความสำเร็จของการส่งข้อมูลจะมีค่าความสำเร็จน้อย (ค่าความสูญเสียในการส่งข้อมูลมาก) และสมการเอกซ์โพเนนเชียลเป็นสมการที่มีแนวโน้มที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เข้ากับ ค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จเพื่อนำมาหาค่าปริมาณงานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

จากรูปที่ 3-9 วัดค่าความแรงของสัญญาณโดยใช้โปรแกรม Wireshark ซึ่งอธิบายวิธีการใช้งานในภาคผนวก ก การวัดดำเนินการที่อาคารวิชาการ ชั้นที่ 4 ประกอบด้วย จุดเข้าถึงสัญญาณ จำนวน 4 ตัว ซึ่งได้มีการทดสอบเป็นเวลา 3 วัน ในแต่ละวันทดสอบจุดเข้าถึงสัญญาณ แต่ละตัว ตัวละ 20 จุดทดสอบ จุดทดสอบละ 3 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 720 ครั้งที่ทำทดสอบ และจากรูปที่ 3-10 สามารถนำมาคำนวณหาความแรงของสัญญาณที่รับได้ รูปแบบสมการจะใช้ค่า Mean Square Error (MSE) ในการวิเคราะห์ ค่า MSE บ่งบอกถึงค่าความถูกต้องและแม่นยำ ค่า MSE มากค่าความผิดพลาดมากแสดงถึงว่ามีความถูกต้องและแม่นยำน้อยถ้าค่า MSE น้อยค่าความผิดพลาดน้อยแสดงถึงว่ามีความถูกต้องและแม่นยำมาก ดังสมการที่ 3-15

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n} \quad (3-15)$$

เมื่อ

$e_t$  คือ ผลต่างระหว่างค่าจริงและค่าพยากรณ์

$n$  คือ จำนวนครั้งทั้งหมดที่ทำทดสอบ

ตารางที่ 3- แสดงถึงค่า MSE เมื่อใช้การประมาณค่าจากฟังก์ชันต่างๆ จากการทดสอบและการคำนวณหาค่า MSE นั้นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณโดยใช้รูปแบบของสมการเอกซ์โพเนนเชียลจะทำให้ค่าน้อยที่สุด โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประมาณความสูญเสียของข้อมูล (Packet Loss,%) และความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) ดังสมการที่ 3-16

ตารางที่ 3-2 ค่า MSE เมื่อใช้การประมาณค่าจากฟังก์ชันต่างๆ

รูปแบบสมการ	MSE
Polynomial degree 2	7.78
Polynomial degree 3	9843.08
Polynomial degree 4	15673.51
Exponential	8.94

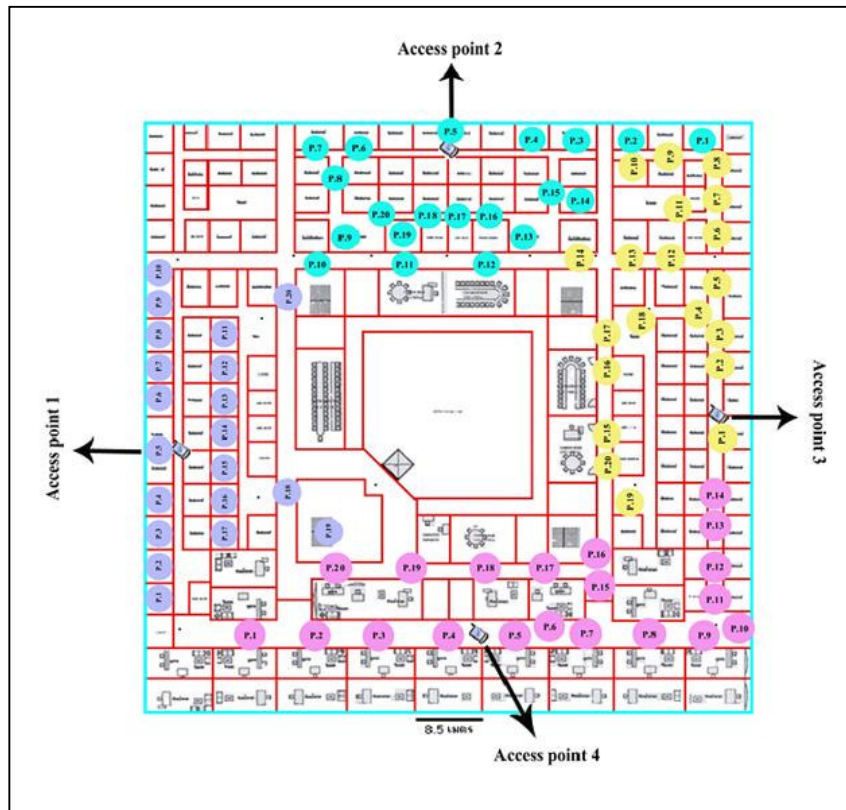
$$A(x_1, x_2, \dots, x_l) = 0.1840 * \exp((-0.0358)(P_r(x_1, x_2, \dots, x_l))) \quad (3-16)$$

โดยที่  $A(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ค่าประมาณความสูญเสียของข้อมูล (Packet Loss,%)

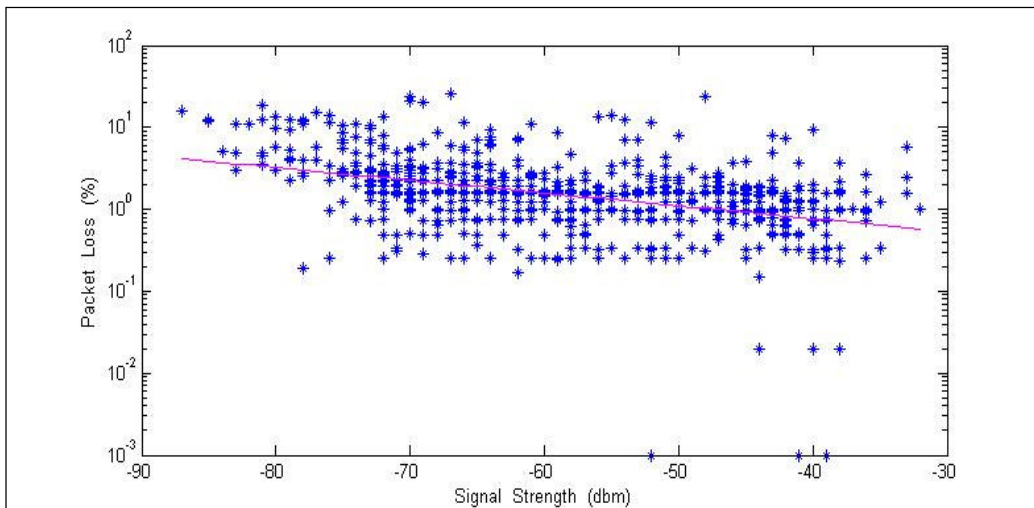
$P_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้

และสามารถหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จได้ดังสมการที่ 3-16 โดยพิจารณาสิ่งกีดขวางได้จากค่า  $P_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

$$p(x_1, x_2, \dots, x_l) = 1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (3-17)$$



รูปที่ 3-9 แสดงการทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ (อ้างอิงจาก การหาค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากค่าความแรงของสัญญาณ 2552)



รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประมาณความสูญเสียของข้อมูล (Packet Loss, %) และความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) (อ้างอิงจาก การหาค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากค่าความแรงของสัญญาณ 2552)

### 3.4.2 แบบจำลองการสูญเสียกำลังของสัญญาณ

เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณค่าของความสูญเสียอันเนื่องจากระยะทางและการลดทอนของสิ่งกีดขวางแต่ละชนิดซึ่งมีค่าการลดทอนไม่เท่ากัน และสามารถคำนวณหา  $P_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ของจุดเข้าถึงสัญญาณในแต่ละโหนดได้ดังสมการ

$$P_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = P_t + 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right) + G_t + G_r - Loss - 20 \log \left( \frac{d(x_1, x_2, \dots, x_l)}{d_0} \right) \quad (3-18)$$

เมื่อ

- $P_r(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ กำลังที่รับได้จากตัว จุดเข้าถึงสัญญาณ ตำแหน่งใด ๆ
- $P_t$  คือ กำลังส่งของตัว จุดเข้าถึงสัญญาณ
- $d_0$  คือ ระยะทาง 1 เมตร
- $d(x_1, x_2, \dots, x_l)$  คือ ระยะทางระหว่างตัว จุดเข้าถึงสัญญาณ ไปยังผู้ใช้งาน
- Loss คือ เป็นผลรวมของค่าความสูญเสียจากจำนวนสิ่งกีดขวางที่นับจากตัวจุดเข้าถึงสัญญาณ ไปยังจุดที่ทำการวัด
- $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่งที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวจุดเข้าถึงสัญญาณ
- $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับของตัวรับที่ขึ้นอยู่กับชนิดของ WLAN Card
- $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นซึ่งสามารถคิดได้จากค่าความถี่ ( $f$ ) ที่มาจากการเลือกมาตรฐานของ IEEE ของตัว จุดเข้าถึงสัญญาณแต่ละชนิด

ตารางที่ 3-3 ค่าพารามิเตอร์ของ จุดเข้าถึงสัญญาณภายในบริเวณอาคารวิชาการชั้นที่ 4

มาตรฐาน	IEEE 802.11g 2.4-2.5 GHz, Channel 1 (2.412GHz)
กำลังส่ง	18 dBm
อัตราขยายของสายอากาศส่ง	2.2 dB (Koop,M.H.2007)
อัตราขยายของสายอากาศรับ(เครื่องที่ใช้วัดสัญญาณ)	2.2 dB

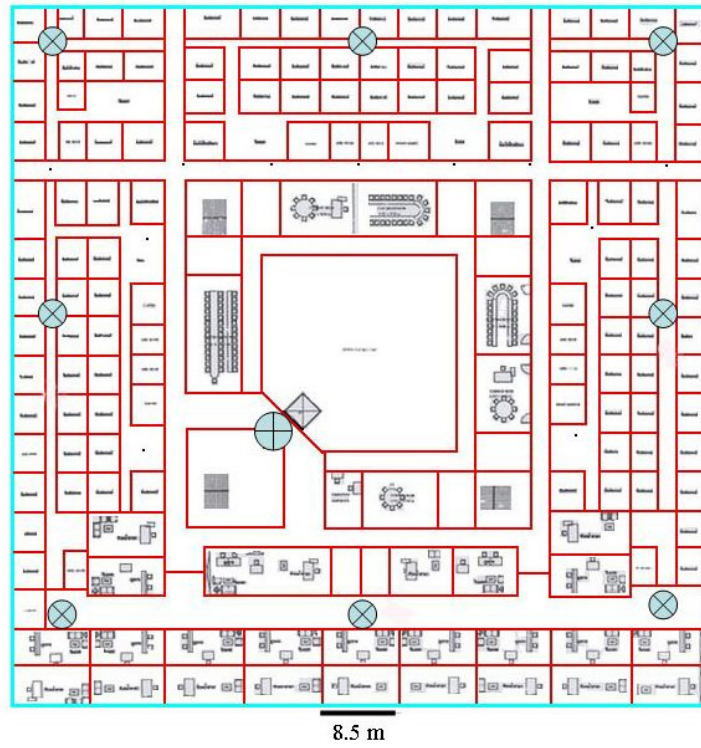
### 3.4.3 การทดสอบผลกระทบของสิ่งกีดขวาง ต่อปริมาณงาน

ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้อาคารวิชาการชั้น 4 ดังรูปที่ 3-11 ในการทดสอบ โดยเป็นการเปรียบเทียบหาปริมาณงานจากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิงซึ่งในพื้นที่ที่มีจุดเข้าถึงสัญญาณทั้งหมด 4 ตัวและได้ทำการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดดังรูปที่ 3-12

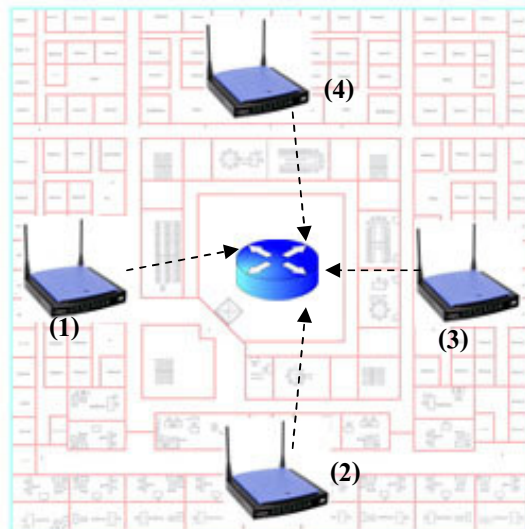
ขั้นตอนในการทดลอง

- 1.จำลองออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดตามพื้นที่ที่กำหนด
- 2.เลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลดังรูปที่ 3-11
- 3.คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จโดยใช้สมการที่ 3-18 และคำนึงถึงสิ่งกีดขวาง เนื่องจากสถานที่ทำการทดสอบโปรแกรมนี้มีสิ่งกีดขวางเป็น Office wall จึงใช้ค่าการลดทอนเท่ากับ 6 dB (John C. Stein.2007) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3-5
- 4.กำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3-4
- 5.นำค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่คำนวณได้จากข้อ 3 ไปคำนวณโดยใช้โปรแกรมแมทแลปเพื่อนำไปหาปริมาณงานที่สูงที่สุด และในการคำนวณจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของการลดทอนในวัสดุแต่ละชนิดจากตารางที่ 3-5
6. นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 5 มาหาค่าเฉลี่ยของปริมาณงานเปรียบเทียบจากโปรแกรมงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิงดังรูปที่ 3-13





รูปที่ 3-11 อาคารวิชาการชั้น 4 ที่ใช้ในการทดสอบ



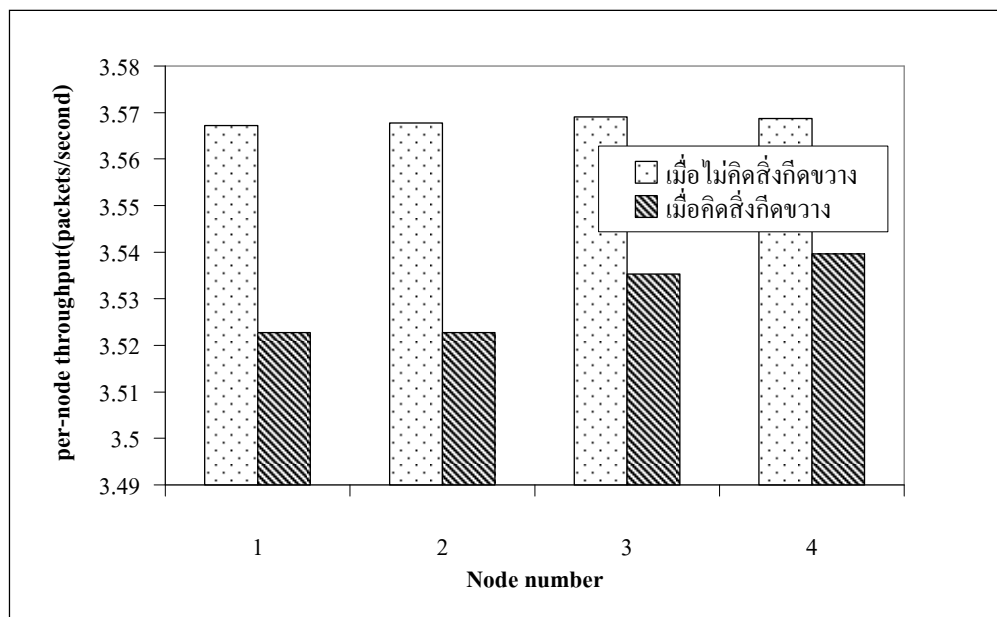
รูปที่ 3-12 รูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดในอาคารวิชาการชั้น 4

ตารางที่ 3-4 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้จากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
กำลังที่ใช้ในการส่ง	18 dBm
ความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตใน $Q$ , จะถูกส่งต่อออกไป	0.7
ขนาดของผู้ใช้งานในระบบ	64

ตารางที่ 3-5 แสดงค่าการลดทอนเนื่องจากสิ่งกีดขวาง

ชนิดของสิ่งกีดขวาง	ค่าการลดทอนวัดในหน่วย dB
Concrete block wall	12
Metal wall / door	12
Brick wall	5
Office wall	6
Wood wall	4
Glass wall	6



รูปที่ 3-13 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานเปรียบเทียบระหว่างการคิดและไม่คิดสิ่งกีดขวาง

จากผลการทดลองที่ได้จากรูปที่ 3-13 แสดงให้เห็นว่าผลของงานวิจัยอ้างอิงเมื่อไม่ได้นำสิ่งกีดขวางมาพิจารณาผลที่ได้คือ ปริมาณงานที่ได้ในทุก ๆ ตำแหน่งของโหนดนั้นมีค่าเท่ากันทุก ๆ จุด ส่วนผลการทดลองของงานวิจัย เมื่อพิจารณาในพื้นที่จริงซึ่งคำนึงถึงสิ่งกีดขวางแล้วนั้น ผลที่ได้คือ ปริมาณงานที่ได้ขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางถ้ามีสิ่งกีดขวางมากปริมาณงานที่ได้ก็จะมีค่าน้อย ถ้ามีสิ่งกีดขวางน้อยปริมาณงานที่ได้ก็จะมีค่ามาก จากผลการทดลองดังกล่าวดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยภายนอกมีผลกระทบต่อปริมาณงานที่ได้

### 3.5 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้ทำการอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์เครือข่ายเมชไร้สายด้วยการใช้ทฤษฎีแถวคอย ซึ่งเป็นการสมมุติให้ในแต่ละโหนดมีแถวคอยสองแถว แถวแรกเป็นการรองรับการส่งข้อมูลต่อไปจากโหนดก่อนหน้า และแถวคอยที่สองคือการรับภาระการส่งต่อจากข้อมูลที่เกิดขึ้นของผู้ใช้งานภายในโหนดนั่นเอง ซึ่งการวิเคราะห์นี้ทำให้ได้สมการใหม่ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณงานของเครือข่ายเมชไร้สายได้

นอกจากนี้ในบทนี้ยังกล่าวถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแรงของสัญญาณกับความน่าจะเป็นที่จะส่งข้อมูลได้สำเร็จซึ่งเป็นการสัมพันธ์ที่เกิดจากการวัดค่าจริง ทำให้มีความน่าเชื่อถือมาก ซึ่งผลการวัดจริงภายในอาคารนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะในการออกแบบด้วย เพราะผลการจำลองแบบชี้ให้เห็นว่า การคิดสิ่งกีดขวางมีผลมากต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ซึ่งในบทถัดไปจะเป็นการออกแบบเครือข่ายโดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวไว้ในบทนี้

## บทที่ 4 การออกแบบตำแหน่งโหนดที่เหมาะสม

### 4.1 กล่าวนำ

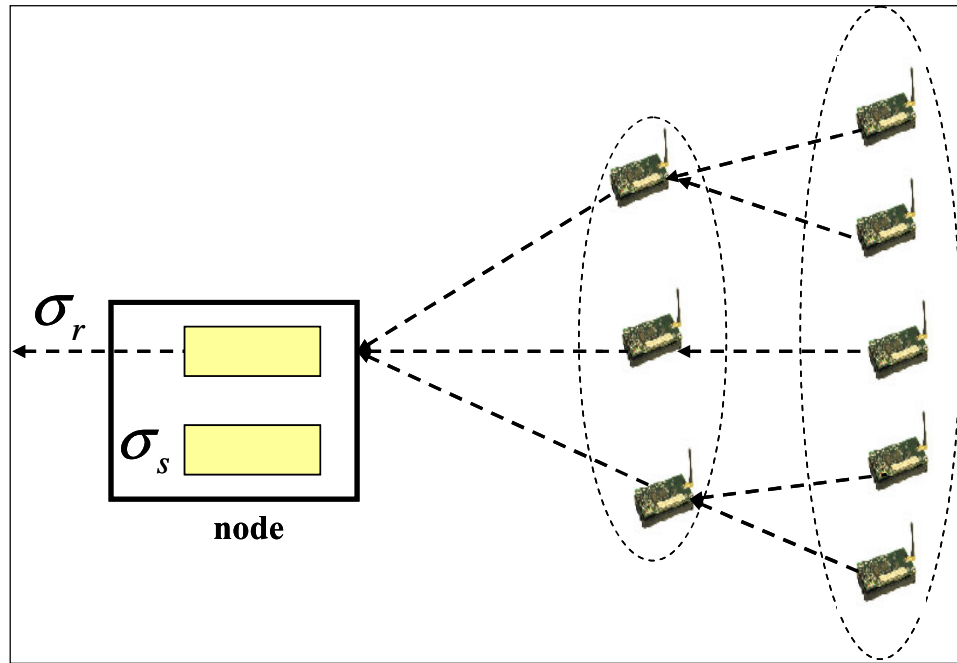
เนื้อหาในบทที่แล้วได้เสนอการวิเคราะห์หาปริมาณงานและศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาปริมาณงาน สิ่งที่เห็นได้ชัดคือ ค่าปริมาณงานที่ได้ในแต่ละโหนดมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวิธีการออกแบบเพื่อให้ ทุกตำแหน่งโหนดในเครือข่ายมีปริมาณงานที่ใกล้เคียงกันได้ ดังนั้นสิ่งแรกของการออกแบบโหนดที่ เหมาะสมคือการออกแบบการหาตำแหน่งที่คำนึงถึงหลักการของความเท่าเทียมกันของปริมาณงานที่ได้ จากนั้นจะนำเสนอวิธีในการวิเคราะห์ถึงการออกแบบในการวางตำแหน่งของโหนดต่อไป

จากกระบวนการทางสมการที่อยู่ในบทที่ 3 จะพบว่าปัจจัยในการออกแบบเป็นไปตามสมการหลัก ซึ่ง สามารถจะปรับค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จได้จากปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งมีผลกระทบ 2 ด้าน คือ ตัวแปรซึ่งปรับจากระยะทาง ตัวแปรที่ปรับทางด้านอัตราการส่งข้อมูล จากผลการทดสอบการหา ปริมาณงานที่เท่าเทียมกันนั้นทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จได้แต่ในการ ออกแบบจริง ๆ นั้นทำได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ได้คำนึงถึงแนวทางในการนำไปปฏิบัติจริง ซึ่งได้ คำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้และนำมาใช้ในการทดสอบ

### 4.2 การวิเคราะห์ปริมาณงานที่เท่าเทียมกันของแต่ละโหนด

ในบทที่แล้วได้แสดงถึงสมการคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบหาตำแหน่งของโหนดที่ เหมาะสมในเครือข่ายเมฆไร้สาย และหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการนำสมการคณิตศาสตร์ มาทดสอบเพื่อ หาคำตอบและวิเคราะห์ผลที่ได้โดยคำนึงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากปริมาณงานที่ได้จากเครือข่ายเมฆ ไร้สายนั้นจะลดลงตามระยะห่างจากโหนดถึงตัวปล่อยสัญญาณ คือ โหนดที่อยู่ใกล้ตัวปล่อยสัญญาณปริมาณ งานที่ได้จะมีค่ามากกว่าโหนดที่อยู่ไกลจากตัวปล่อยสัญญาณตามลำดับ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการหาปริมาณงานในแต่ละโหนดนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ได้เริ่มต้นพิจารณาจากการหาค่าของ ความน่าจะเป็น ในการส่งข้อมูลสำเร็จในแต่ละโหนดซึ่งพิจารณาผลกระทบจากสิ่งกีดขวาง ซึ่งก่อให้เกิดความไม่เท่าเทียม กันของปริมาณงานในแต่ละโหนด ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้มีการวิเคราะห์หาสมการทางคณิตศาสตร์

เพื่อนำมาสู่การคำนวณถึงความเท่าเทียมกันของปริมาณงานในทุก ๆ ตำแหน่งของโหนดโดยเริ่มพิจารณาว่าในแต่ละโหนดประกอบไปด้วย  $\sigma_s$  และ  $\sigma_r$  ตัวอย่างดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลของ  $Q_r$  และประสิทธิภาพของอัตราการส่งข้อมูลของ  $Q_s$

ในแต่ละตำแหน่งของโหนด เพื่อให้ได้ปริมาณงานที่มีความเท่าเทียมกันนั้นสามารถพิจารณาได้จากปริมาณงานของ  $\sigma_r$  ที่เข้ามาจาก จำนวนอินพุตจากจำนวนโหนดทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับปริมาณงานของ  $\sigma_s$  ของโหนดนั้น ๆ จากรูปที่ 4.4 สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังสมการ

$$\frac{\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})}{\sum_{i=1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)} = \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) \quad (4-1)$$

เมื่อ

$N(x_1, x_2, \dots, x_i)$  คือ จำนวนโหนดทั้งหมดในชั้นที่  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$

เมื่อในทุก ๆ ตำแหน่งของโหนดมีปริมาณงานที่เท่าเทียมกัน ดังนั้นจะพิจารณาวิเคราะห์หาปริมาณ

$$\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) = \sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) \quad (4-2)$$

แทนค่า  $\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})$  และ  $\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})$  ลงในสมการที่ 4-2 จะได้

$$\begin{aligned} \mu_r(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) \cdot [1 - P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})] &= \sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ \mu_s(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) \cdot [1 - P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})] & \end{aligned} \quad (4-3)$$

เมื่อแทนค่า  $P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  และ  $P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_l)$  ลงในสมการที่ 4-3 และสมมติให้  $K$  มีค่ามาก ๆ ทำให้  $P_{0r}(x_1, x_2, \dots, x_l) \approx 1 - \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})$  และ  $P_{0s}(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) \approx 1 - \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})$  ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}) = \frac{\sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})}{q} \quad (4-4)$$

เริ่มต้นพิจารณาที่ตำแหน่ง  $H-1$

กรณีที่  $l = H-1$  จากสมการที่ 4-4 สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) &= \frac{\sum_{i=H}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{q} \\ &= \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{q} \end{aligned} \quad (4-5)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) = \frac{\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} \quad (4-6)$$

สามารถหา  $\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})$  ได้จากสมการ

$$\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) = \sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_H)} \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (4-7)$$

ถ้า  $\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_i)$  ในทุก ๆ ตำแหน่งของโหนด มีค่าเท่ากัน และแทนค่าจากสมการที่ 4-7 ลงในสมการที่ 4-6 จะได้

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) = \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_H) \mu(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_H)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot q} \quad (4-8)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4-8 ลงในสมการที่ 4-5 จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_H) \mu(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_H)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot q} \\ &= \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{q} \end{aligned} \quad (4-9)$$

สามารถแก้สมการได้ดังนี้

$$\frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_H)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} = 1 \quad (4-10)$$

กรณีที่  $l = H - 2$  จากสมการที่ 4-3 จะได้ว่า

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) = \frac{\sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{q} \quad (4-11)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) = \frac{\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} \quad (4-12)$$

สามารถหา  $\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})$  ได้จากสมการ

$$\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) = \sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} (\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) + \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_i)) \quad (4-13)$$

สามารถหา  $\sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i)$  ได้ดังสมการ

$$\sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) = N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot q \cdot \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \quad (4-14)$$

แทนค่า  $\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})$  จากสมการที่ 4-8 ลงในสมการที่ 4-14 จะเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \sum_{i=H-1}^H \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) &= N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot q \cdot \\ &\left( \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_H)}{q} \right) \\ &= N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot N(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_H) \end{aligned} \quad (4-15)$$

แทนค่า  $\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})$  และสมการที่ 4.32 ลงในสมการที่ 4.29 จะได้สมการ

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) = \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot N(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_H) + N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot q} \quad (4-16)$$

และแทนค่า  $\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})$  ลงในสมการที่ 4-11 จะได้สมการดังต่อไปนี้



$$\begin{aligned}
& \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot N(x_1, x_2, \dots, x_H) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_H)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot q} \\
& + \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot q} \\
& = \frac{\sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{q}
\end{aligned} \tag{4-17}$$

สามารถแก้สมการได้ดังนี้

$$\frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot N(x_1, x_2, \dots, x_H)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} = \sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)$$

ดังนั้นจะได้สมการ

$$\frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} = \frac{\sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{[N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1}) \cdot N(x_1, x_2, \dots, x_H)] + N(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} \tag{4-18}$$

กรณีที่  $l = H-3$  จากสมการที่ 4-4 จะได้ว่า

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) = \frac{\sum_{i=H-2}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})}{q} \tag{4-19}$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) = \frac{\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})}{\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})} \tag{4-20}$$

สามารถหา  $\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})$  ได้จากสมการ

$$\lambda_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) = \sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} (\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) + \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_i)) \quad (4-21)$$

สามารถหา  $\sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i)$  ได้ดังสมการ

$$\sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) = N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot q \cdot \rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \quad (4-22)$$

เมื่อแทนค่า  $\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})$  จากสมการที่ 4-16 ลงในสมการที่ 4-22 จะได้สมการ

$$\sum_{x_i=1}^{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})} \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) = N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot q \cdot \left( \frac{\sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{q} \right) \quad (4-23)$$

$$= N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})$$

แทนค่า  $\sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})$  และสมการที่ 4-23 ลงในสมการที่ 4-20 จะเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\rho_r(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) = \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) + N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) \cdot q} \quad (4-24)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4-24 ลงในสมการที่ 4-19 จะเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
& \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) \cdot q} \\
& + \frac{N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-3}) \cdot q} \\
& = \frac{\sum_{i=H-2}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot (1-q) \cdot \rho_s(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})}{q}
\end{aligned} \tag{4-25}$$

สามารถแก้สมการ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \left( N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \right)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})} \\
& = \sum_{i=H-2}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)
\end{aligned} \tag{4-26}$$

ดังนั้นจะ ได้สมการ

$$\frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-2})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{H-3})} = \frac{\sum_{i=H-2}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\left( N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \cdot \sum_{i=H-1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_{H-2}) \right)} \tag{4-27}$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กรณี  $l \leq H-1$

$$\frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_l)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} = \frac{\sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\left( N(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot \sum_{i=l+1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_l) \right)} \tag{4-28}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4-28 สามารถจัดรูปสมการ ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\ln(1-p(x_1, x_2, \dots, x_l))}{\ln(1-p(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}))} = \frac{\sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\left( N(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot \sum_{i=l+1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_l) \right)} \quad (4-29)$$

และเมื่อเรากำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลได้สำเร็จมีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นทำให้  $\ln(1-p(x_1, x_2, \dots, x_l)) \approx -p(x_1, x_2, \dots, x_l)$  และเมื่อแทนค่าจากสมการที่ 4-29 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราการส่งข้อมูลแปรผันตรงกับค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จดังสมการ

$$\frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_l)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} = \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} \quad (4-30)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่ทำให้ปริมาณงานในแต่ละโหนดมีความเท่าเทียมกัน หาได้จากสมการ

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} = \frac{\sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\left( N(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot \sum_{i=l+1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_l) \right)} \quad (4-31)$$

เมื่อได้ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จตามสมการที่ 4-31 แล้วสามารถหาสมการความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่ทำให้ปริมาณงานเท่าเทียมกันและนำสิ่งทีได้มาพิจารณาหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} = \left( \frac{\sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\left( N(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot \sum_{i=l+1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_l) \right)} \right) \quad (4-32)$$

$$\left( \frac{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} \right)$$

#### 4.2.1 การทดสอบเพื่อหาปริมาณงานที่เท่าเทียมกันของแต่ละโหนด

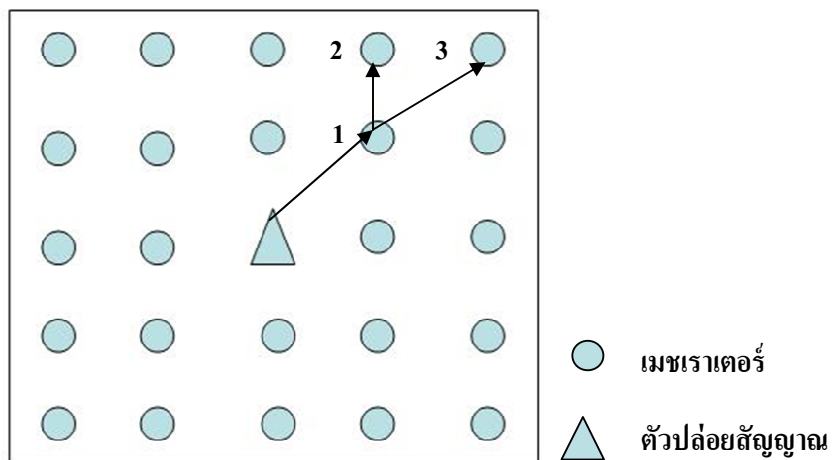
เราสามารถนำสมการที่ 4-32 ไปคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณงานที่เท่าเทียมกันของแต่ละโหนดได้ โดยมีการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนในการทดลอง

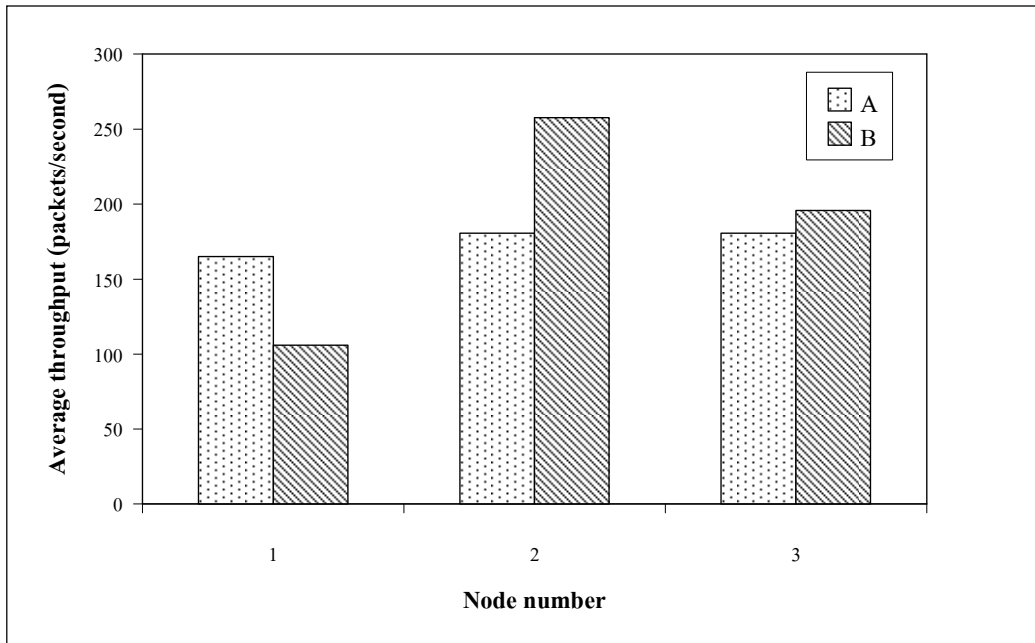
1. กำหนดพื้นที่และเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4-2
2. ใช้สมการที่ 4-17 ในการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ
3. นำค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่ได้ไปคำนวณบนโปรแกรมแมท แล็บเพื่อคำนวณหาปริมาณงานที่ได้
4. นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3 มาแสดงผลค่าเฉลี่ยของปริมาณงานที่เท่าเทียมกันและไม่เท่าเทียมกันดังรูปที่ 4-13

ตารางที่ 4-1 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองเปรียบเทียบปริมาณงานที่ได้จากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
กำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูล	18 dBm
ความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ต ใน $Q$ , จะถูกส่งต่อออกไป	0.7
ขนาดของคิวในระบบ	64



รูปที่ 4-2 ตัวอย่างการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดและเส้นทางในการส่งข้อมูล



รูปที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานที่เท่าเทียมกันและไม่เท่าเทียมกัน

จากผลการทดลอง กราฟ A แสดงให้เห็นผลของปริมาณงานที่คำนวณได้จากความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จโดยคำนวณจากความเท่าเทียมกันของปริมาณงาน ตามสมการที่ 4-17 ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าปริมาณงานที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟ B นั้นเป็นการคำนวณหาปริมาณงานจากสมการปกติในบทที่ 3 ซึ่งคำนวณโดยใช้ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จโดยไม่คำนึงถึงความเท่าเทียมกัน ดังนั้น ในการออกแบบการหาตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมนั้นควรคำนึงถึงหลักการของความเท่าเทียมกันของปริมาณงานที่ได้

#### 4.3 การออกแบบโหนดโดยพิจารณาระยะห่างระหว่างโหนด

จากรูปที่ 3-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความสูญเสียของข้อมูล และความแรงของสัญญาณ สามารถนำมาสู่ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จกับความแรงของสัญญาณดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} = \frac{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} \quad (4-33)$$

นำความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของสัญญาณและการสูญเสียกำลังสัญญาณ แทนลงในสมการที่ 4-33

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} = \frac{1 - [0.184 * \exp((-0.358)P_r(x_1, x_2, \dots, x_l))]}{1 - [0.184 * \exp((-0.358)P_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}))]} \quad (4-34)$$

สามารถแก้สมการเพื่อจะนำไปสู่การคำนวณหาค่าของ  $P_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})$  ได้ดังต่อไปนี้

$$\exp((-0.0358)P_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})) = \frac{1}{0.184} - \left[ \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{(0.184)p(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} (1 - 0.184 * \exp((-0.0358)P_r(x_1, x_2, \dots, x_l))) \right] \quad (4-35)$$

$$P_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) = -\frac{1}{0.0358} \ln \left[ \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l) - p(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) (1 - 0.184 * \exp((-0.0358)P_r(x_1, x_2, \dots, x_l)))}{0.184 p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \right] \quad (4-36)$$

จากนั้นจะแก้สมการเพื่อหาค่า  $d(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})$

$$\text{โดยแทนค่า } P_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = P_t - L_0 - Loss - 20 \log \left( \frac{d(x_1, x_2, \dots, x_l)}{d_0} \right)$$

$$\text{และ } P_r(x_1, x_2, \dots, x_{l+1}) = P_t - L_0 - Loss - 20 \log \left( \frac{d(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})}{d_0} \right)$$

เมื่อ  $L_0$  คือ ความสูญเสียที่เกิดจากระยะทางที่ระยะ 1 เมตร

$d_0$  คือ ระยะทางของความสูญเสียที่เกิดจากระยะทางที่ระยะ 1 เมตร

สามารถแก้สมการเพื่อนำไปสู่การคำนวณหาระยะทางได้ดังนี้

$$-20 \log d(x_1, x_2 \dots x_{l+1}) = L_0 + Loss - P_t + \left( \frac{1}{0.0358} \ln \left[ \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l) - p(x_1, x_2 \dots x_{l+1}) (1 - 0.184 * \exp((-0.0358) P_r(x_1, x_2 \dots x_l)))}{0.184 p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \right] \right) \quad (4-37)$$

เมื่อกำหนดให้

$$B = \left( \frac{1}{0.0358} \ln \left[ \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l) - p(x_1, x_2 \dots x_{l+1}) (1 - 0.184 * \exp((-0.0358) P_r(x_1, x_2 \dots x_l)))}{0.184 p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \right] \right)$$

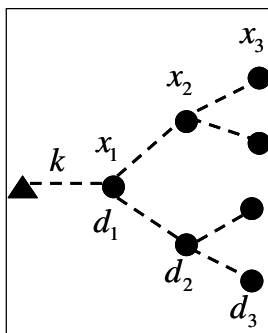
$$B = 27.93 \left[ \begin{array}{l} 1.69 - \ln \frac{p(x_1, x_2 \dots x_{l+1})}{0.184 p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \\ -0.358 (P_t - L_0 - Loss - 20 \log \left( \frac{d(x_1, x_2 \dots x_l)}{d_0} \right)) \ln \frac{p(x_1, x_2 \dots x_{l+1})}{p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \end{array} \right] \quad (4-38)$$

แทนสมการที่ 4-38 ลงในสมการที่ 4-37 จะสามารถคำนวณหา  $d(x_1, x_2 \dots x_{l+1})$  ได้ดังสมการ

$$d(x_1, x_2 \dots x_{l+1}) = 10^{\left( \frac{L_0 + Loss - P_t + B}{-20} \right)} \quad (4-39)$$

#### 4.3.1 ตัวอย่างการทดสอบด้านระยะทาง

สามารถคำนวณหา  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ที่ 4-37 และใช้หลักการความเท่าเทียมกันเพื่อจัดวางหาตำแหน่งเส้นทางในการส่งข้อมูลและนำมาคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสามารถคำนวณหาระยะทางได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-4 แสดงตัวอย่างในการออกแบบวางตำแหน่งของโหนด



ขั้นตอนในการทดสอบ

1. ออกแบบการวางตำแหน่งดังรูปที่ 4-4

2. กำหนดหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ โดยวิเคราะห์จากสมการที่ 4-34

พิจารณาในชั้นที่ไกลสุด คือชั้นที่  $H$  ในที่นี้คือชั้นที่  $x_3$  สามารถหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จได้จากสมการ

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_H)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{H-1})} = 1$$

กำหนดให้ ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ ที่  $x_3 = k$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $p_{x_3}$  และค่าความน่าจะเป็นรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาตัวแปรต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{p_{x_3}}{p_{x_2}} = 1$$

$$p_{x_2} = \frac{k}{1} = k$$

แก้สมการเพื่อหาค่า  $p_{x_1}$  ได้จากสมการที่ 4-32 ดังนี้

$$\frac{p_{x_1}}{p_{x_2}} = \frac{6}{(1 \times 6) + 1}$$

$$p_{x_1} = 0.86k$$

เมื่อได้ค่า  $p$  ของทุกโหนดแล้ว สามารถที่จะหาค่า  $k$  ได้ จากสมการดังต่อไปนี้

$$\sum p(x_1, x_2, \dots, x_l) = 1$$

$$k + 2k + 4(0.86)k = 1$$

$$k = 0.155$$

ซึ่งเมื่อได้ค่า  $p_{x_3} = k = 0.155$  แล้วนำค่า  $k$  ไปแทนในสมการข้างต้นเพื่อหาค่า  $p_{x_1}$   $p_{x_2}$  และ  $p_{x_3}$  ได้ดังนี้

$$p_{x_1} = 0.133$$

$$p_{x_2} = 0.155$$

$$p_{x_3} = 0.155$$

3. คำนวณหาระยะทาง จากสมการที่ 4-37

ตัวอย่างการคำนวณที่ระยะทาง  $d_1$  เท่ากับ 1 เมตร และสามารถคำนวณหา  $d_2$  และ  $d_3$  ได้จากสมการที่ 4-39 และทำการแก้สมการได้ดังต่อไปนี้

$$d_2 = 10^{\left[ \frac{-35.65 - 18 - 22.67}{-20} \right]}$$

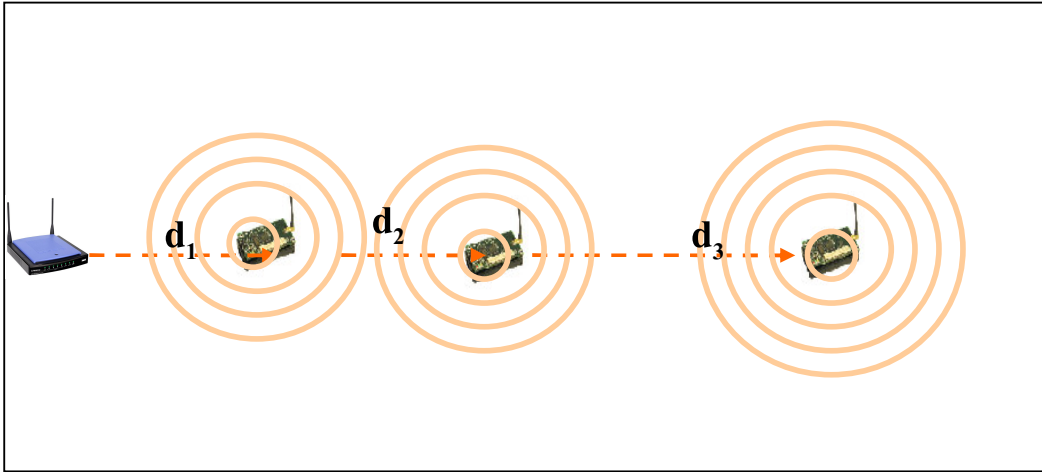
$$d_2 = 34.3$$

ทำการแก้สมการเพื่อหา ระยะทาง  $d_3$  ได้ดังต่อไปนี้

$$d_3 = 10^{\left[ \frac{-35.65 - 18 - 0.08}{-20} \right]}$$

$$d_3 = 477$$

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดให้  $d_1$  เท่ากับ 1 เมตร ดังนั้นค่า  $d_2 = 34.3$  เมตร และ  $d_3 = 477$  เมตร จะสังเกตได้ว่าระยะทางที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 การกระจายสัญญาณของจุดเข้าถึงสัญญาณ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$

ตัวอย่างการคำนวณที่ระยะทาง  $d_1$  เท่ากับ 100 เมตรและกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จมีค่าน้อยมาก ๆ

$$p_{x_1} = 0.133 \times 10^{-3}$$

$$p_{x_2} = 0.155 \times 10^{-3}$$

$$p_{x_3} = 0.155 \times 10^{-3}$$

สามารถคำนวณหา  $d_2$  และ  $d_3$  ได้จากสมการที่ 4-39 และทำการแก้สมการได้ดังต่อไปนี้

$$d_2 = 10^{\left[ \frac{-35.65 - 18 - 148.95}{-20} \right]}$$

$$d_2 = 1.34 \times 10^{10}$$

ทำการแก้สมการเพื่อหา ระยะทาง  $d_3$  ได้ดังต่อไปนี้

$$d_3 = 10^{\left[ \frac{-35.65 - 18 - 279}{-20} \right]}$$

$$d_3 = 4.26 \times 10^{16}$$

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อกำหนดให้  $d_1$  เท่ากับ 100 เมตร ดังนั้นค่า  $d_2 = 1.34 \times 10^{10}$  เมตร และ  $d_3 = 4.26 \times 10^{16}$  เมตร จะสังเกตได้ว่าระยะทางที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าออกแบบโดยใช้ระยะทางในการกำหนดการวางตำแหน่งของโหนดนั้น อาจจะก่อให้เกิดปัญหาพื้นที่ที่สัญญาณครอบคลุมไม่ถึงเนื่องจากระยะทางที่ได้นั้นมีค่าห่างกันทำให้การติดตั้ง จุดเข้าถึงสัญญาณ โกลกันเกินไป ดังรูปที่ 4-5 ดังนั้นจึงไม่ควรนำปัจจัยทางด้านระยะทางมาพิจารณาในการจัดวางตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมได้

#### 4.4 การออกแบบโหนดโดยพิจารณาอัตราการส่งข้อมูล

จากการวิเคราะห์ผลทางด้านระยะทางที่ได้นั้นไม่สามารถนำวิธีการนี้มาใช้ในการออกแบบได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการปรับอัตราการส่งข้อมูล ด้วยการกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จโดยการปรับอัตราการส่งข้อมูลตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-37 และสามารถปรับได้ที่ตัวอุปกรณ์ โดยอัตราการส่งข้อมูลจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ

$$\mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \propto p(x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (4-40)$$

และเมื่อคิดรวมผลกระทบจากสิ่งกีดขวางแล้ว จะได้สมการของค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการส่งข้อมูล ดังสมการที่ 4-39

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} = \left[ \frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_l)}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} \right] \left[ \frac{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_{l+1})} \right] \quad (4-41)$$

ถึงแม้ว่าจะสามารถวิเคราะห์หาปริมาณที่เท่าเทียมกันได้แล้วนั้น ซึ่งคำนวณจากค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ จากการทดสอบวางตำแหน่งของโหนดและใช้วิธีการเลือกวางตำแหน่งของโหนดที่แตกต่างกันออกไปผลของปริมาณงานรวมที่ได้นั้นก็แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบจริงนั้นควรคำนึงถึงการเลือกวางตำแหน่งของโหนดที่เป็นไปได้ในการส่งข้อมูล ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ถึงผลของปริมาณงานรวมที่ได้โดยเริ่มต้น กำหนดพื้นที่ จัดเลือกวางตำแหน่งของโหนดที่เป็นไปได้ ตัวอย่างการเลือกวางตำแหน่งที่เป็นไปได้ของโหนดดังรูปที่ 4-6 จากนั้นจะคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ โดยใช้สมการที่ 4-32 และเพื่อนำไปวิเคราะห์ทดสอบเลือกหาปริมาณงานที่ได้สูงที่สุด

#### 4.5 การหาวิธีการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสม

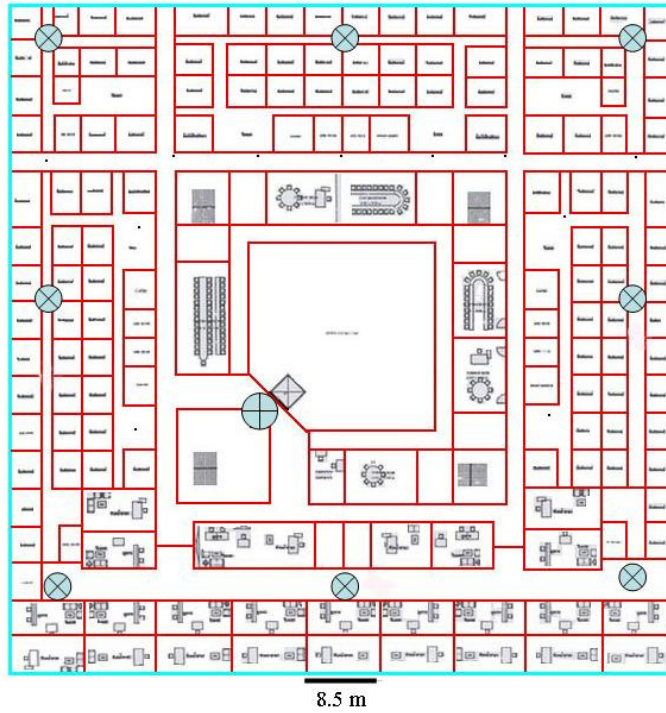
จากการทดสอบด้านระยะทางผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถนำแนวความคิดการออกแบบในด้านระยะทางมาใช้ในการออกแบบจริงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในเรื่องการควบคุมในส่วนของอัตราการส่งข้อมูลซึ่งควบคุมได้จากอุปกรณ์โดยตรง

##### 4.5.1 การทดสอบเพื่อหาวิธีการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนด

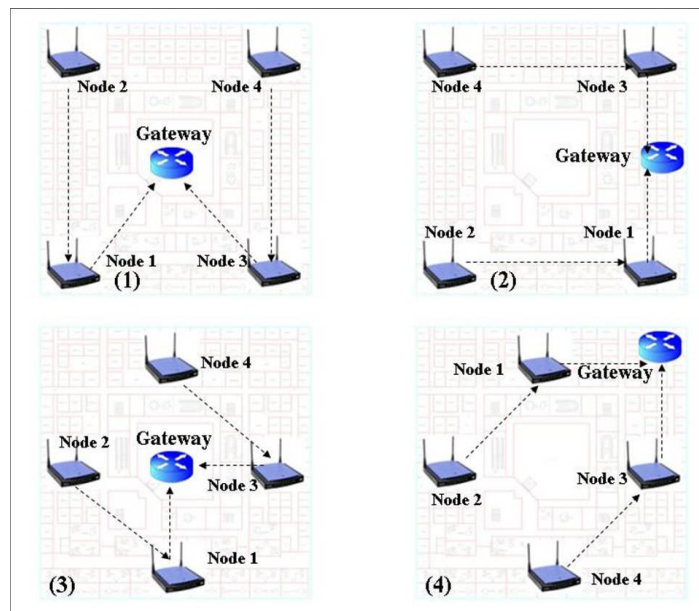
ในงานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดที่จะออกแบบหาการวางตำแหน่งของโหนด โดยนำผลกระทบจากปัจจัยภายนอกมาพิจารณาและหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จได้เพื่อนำไปคำนวณหาการเท่าเทียมกันของปริมาณงาน

ขั้นตอนในการออกแบบ

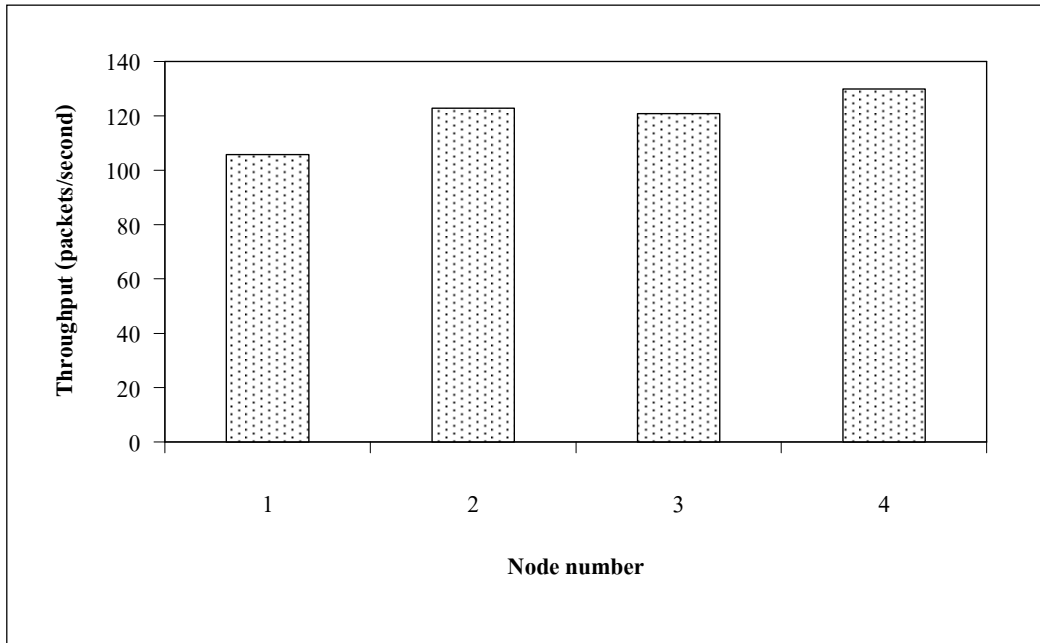
1. กำหนดพื้นที่ในการออกแบบ ยกตัวอย่างการทดสอบในอาคารวิชาการ ชั้น 4 ดังรูปที่ 4-6 ซึ่งสามารถติดอุปกรณ์เมชเรเตอร์ได้ทั้งหมด 9 จุด โดยมีรัศมีการส่งที่เท่า ๆ กัน
2. ติดตั้งวางตำแหน่งของโหนดที่เป็นไปได้ตามความเหมาะสมโดยวางให้ระยะทางเท่า ๆ กัน ซึ่งมีความเป็นไปได้อยู่ 4 แบบด้วยกัน ดังรูปที่ 4-7
3. ใช้สมการที่ 4-32 ในการหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณงานที่ได้ต่อไป



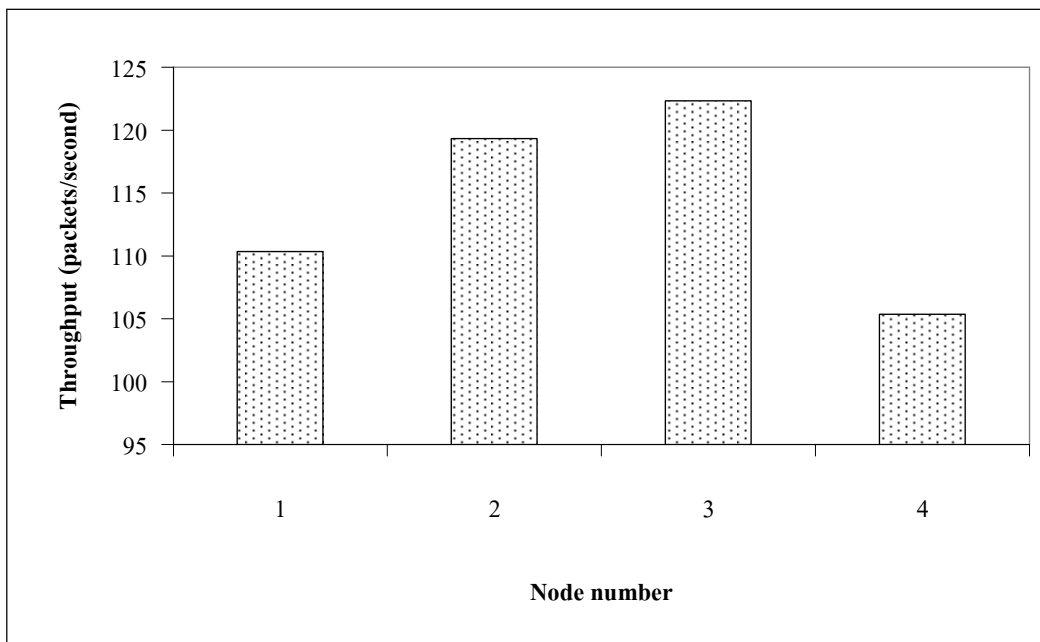
รูปที่ 4-6 อาคารวิชาการชั้น 4 ที่ใช้ในการทดสอบ



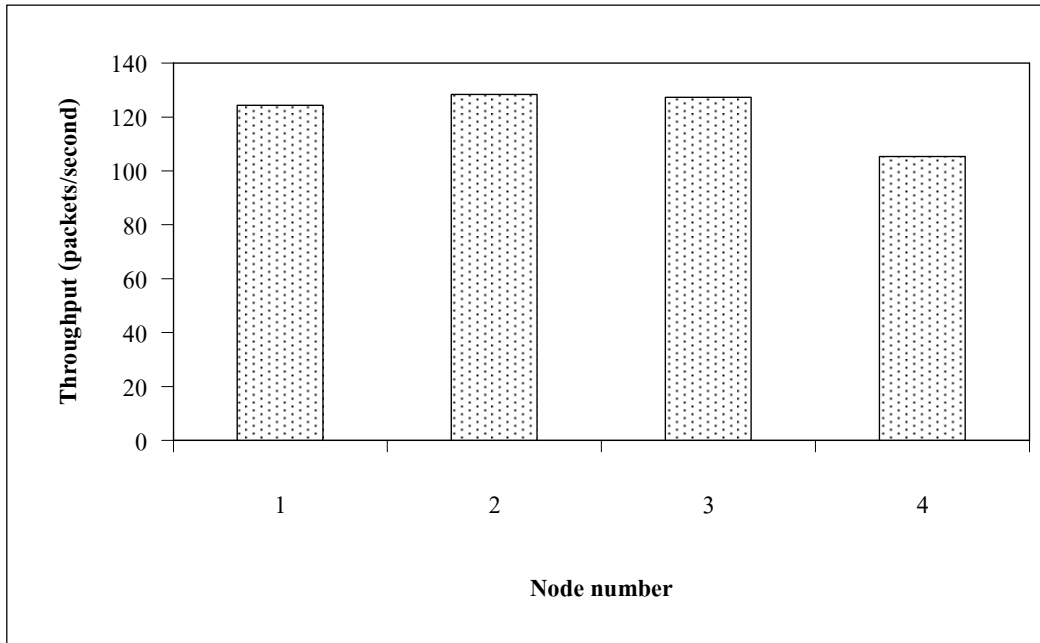
รูปที่ 4-7 รูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดและแสดงเส้นทางในการส่งข้อมูล



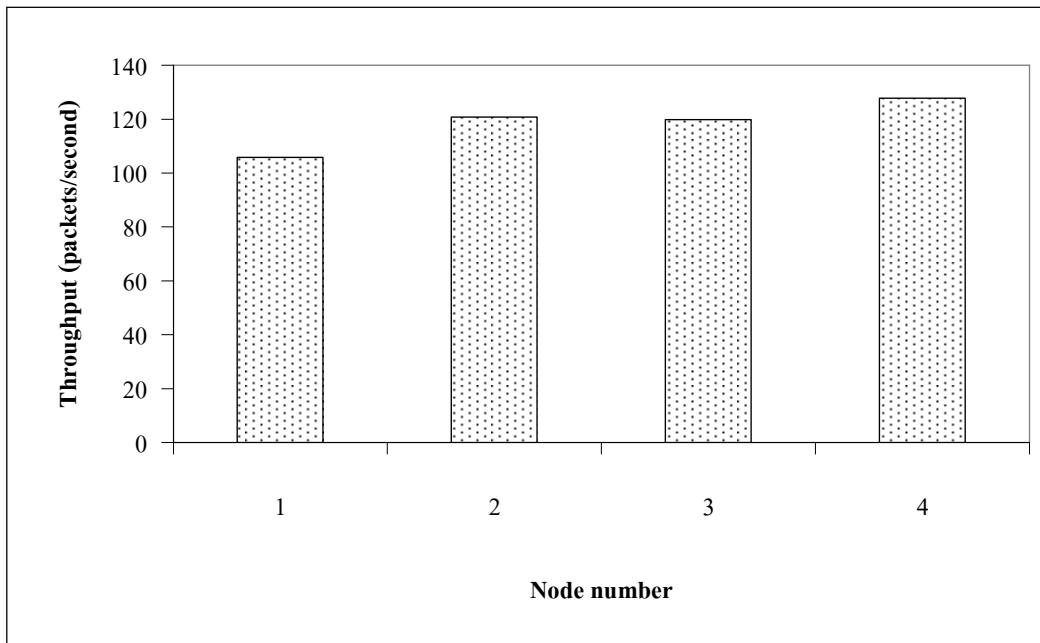
รูปที่ 4-8 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 1



รูปที่ 4-9 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 2

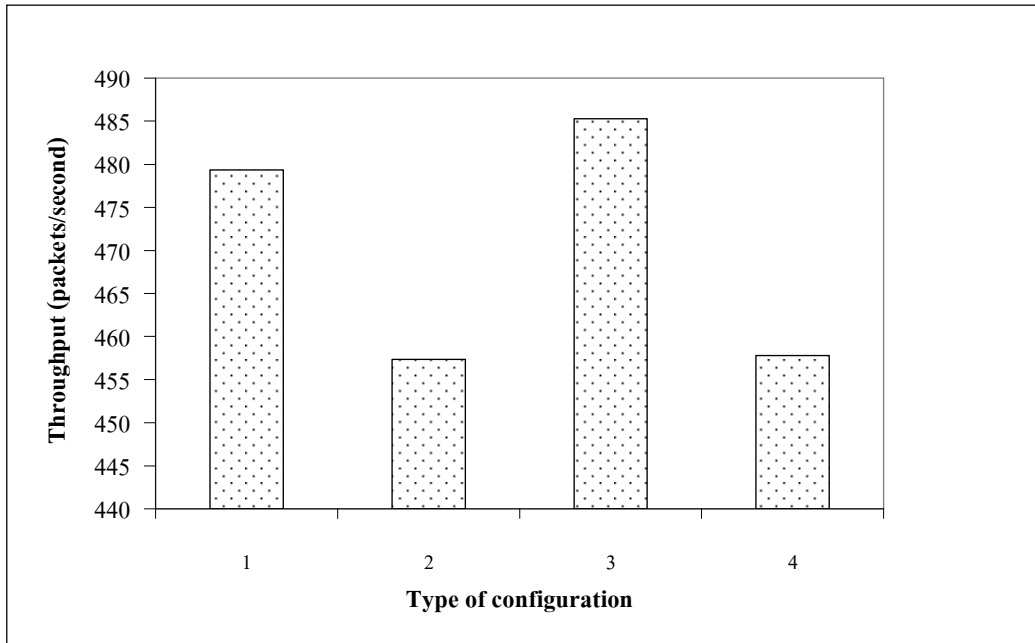


รูปที่ 4-10 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 3



รูปที่ 4-11 ปริมาณงานของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 4





รูปที่ 4-12 ปริมาณงานรวมของรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบที่ 1 2 3 และ 4

ตารางที่ 4-2 การตั้งค่าตัวแปรการทดลองหาปริมาณงานที่ของการเลือกวางตำแหน่งแบบที่ 1 2 3 และ 4

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
กำลังที่ใช้ในการส่ง	18 dBm
ความน่าจะเป็นที่ข้อมูล ใน $Q_r$ จะถูกส่งต่อออกไป	0.7
ขนาดของผู้ใช้งานในระบบ	64

จากรูปที่ 4-12 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาปริมาณงานรวมที่ได้จากรูปแบบการจำลองการวางตำแหน่งของโหนดแบบ ที่ 1 2 3 และ 4 จะพบว่าปริมาณงานในการจำลองแบบที่ 3 มีค่าสูงที่สุด ดังนั้นในการเลือกวางตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมที่สุด สามารถพิจารณาได้จากปริมาณงานที่ได้ที่มีค่าสูงที่สุดซึ่งในการทดลองนี้ เราจะเลือกการวางตำแหน่งของโหนดในแบบที่ 3

#### 4.5.2 การออกแบบและติดตั้งเครือข่ายเมฆไร้สายให้มีประสิทธิภาพ

เทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเครือข่ายไร้สายเพื่อให้การออกแบบและติดตั้งระบบให้มีคุณภาพ หรือ ประสิทธิภาพการให้บริการที่ดีที่สุด

1. จุดที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง จุดเข้าถึงสัญญาณ คือ จุดศูนย์กลางของพื้นที่ที่ต้องการให้บริการระบบเครือข่ายไร้สาย
2. จุดใดที่เป็นจุดอับสัญญาณควรติดตั้ง จุดเข้าถึงสัญญาณเพิ่มเพื่อให้มีพื้นที่ให้บริการครอบคลุมมากขึ้น
3. การปรับทิศทางสายอากาศของ จุดเข้าถึงสัญญาณ ควรจะปรับให้เป็นแนวตั้งฉากกับพื้น

ผู้ใช้งานระบบเครือข่ายเมฆไร้สายสามารถเคลื่อนย้ายไปทำงานยังจุดใด ๆ ใดซึ่งอยู่ในรัศมีการให้บริการของ จุดเข้าถึงสัญญาณทุกตัว โดยที่การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับระบบจะไม่ขาดช่วง และ จุดเข้าถึงสัญญาณยังสามารถเป็นการสำรองข้อมูลหากเกิดกรณีที่มี จุดเข้าถึงสัญญาณ ตัวใดเกิดการเสียหาย ระบบยังสามารถให้บริการได้อย่างต่อเนื่อง

#### 4.6 กล่าวท้ายบท

ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบ ในงานวิจัยได้คำนึงถึงค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ปริมาณงานที่ได้ของทุกโหนดมีค่าเท่าเทียมกันแต่ในทางปฏิบัตินั้นเราสามารถออกแบบหาค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ โดยมีพารามิเตอร์ที่ควรคำนึงมากที่สุดคือ ปัจจัยในด้าน ระยะทาง และปัจจัยทางด้านอัตราการส่งข้อมูลที่สามารถปรับได้ที่ตัวอุปกรณ์เมฆเราเตอร์ ซึ่งในเรื่องปัจจัยด้านระยะทางจะพบว่าระยะทางมีผลลงซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนกันของสัญญาณ ดังนั้นไม่ควรนำปัจจัยในด้านระยะทางมาพิจารณา จากนั้นจึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสำเร็จในการส่งข้อมูลกับอัตราการส่งข้อมูล ดังนั้นควรเลือกปัจจัยในด้านอัตราการส่งข้อมูล โดยการกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จจากการปรับอัตราการส่งข้อมูลที่ตัวอุปกรณ์เมฆเราเตอร์ และในการวิเคราะห์ตามแนวทางหลักการความเท่าเทียมกันนั้น ถึงแม้ว่าจะได้สมการที่สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณที่เท่าเทียมกันได้ จากการทดสอบออกแบบจำลองเลือกวางตำแหน่งของโหนดที่เป็นไปได้ที่แตกต่างกันผลที่ได้ของปริมาณงานนั้นก็แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบจริงนั้น จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงการเลือกวางตำแหน่งของโหนดที่เป็นไปได้และคำนวณหาปริมาณงานรวมที่ได้ ซึ่งในการออกแบบใดที่มีปริมาณงานสูงที่สุด เราควรที่จะเลือกการออกแบบการวางตำแหน่งโหนดที่เหมาะสมด้วยวิธีการนั้น

## บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสิ่งกีดขวางต่อสมรรถนะในเครือข่ายเมฆไร้สายเพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบการติดตั้ง โหนดของเครือข่ายเมฆไร้สายภายในตัวอาคาร โดยนำผลกระทบจากสิ่งกีดขวางมาพิจารณา ในขั้นแรกได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณงาน โดยได้นำเสนอ สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณในการหาตัวแปรเพื่อใช้ในการออกแบบการวางตำแหน่งที่เหมาะสมของโหนด พร้อมทั้งศึกษาหาปัจจัยและข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบ เช่น ผลกระทบของสิ่งกีดขวาง และหาแนวทางแก้ไขปัญหามาไปพร้อมกัน

เพื่อบรรลุตามวัตถุประสงค์ การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการหาปริมาณงานนั้นยังไม่ครอบคลุมถึงปัญหาเมื่อนำไปปฏิบัติจริง ซึ่งก็คือ จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ในด้านสมรรถนะต่าง ๆ เช่น การหาจุดสมมูลที่สุดระหว่าง ปริมาณงาน การพิจารณาปริมาณงาน ในการส่งต่อหลาย ๆ ครั้ง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีปริทัศน์วรรณกรรมใดนำเสนอผลกระทบจากสิ่งกีดขวางมาพิจารณา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งกีดขวางเหล่านั้นต่อสมรรถนะของเครือข่ายโดยพิจารณาจาก ค่าความแรงของสัญญาณ ที่มีผลต่อความสำเร็จในการส่งข้อมูล ซึ่งตัวแปรที่สนใจนี้ในทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะเท่ากันเสมอไม่ว่าโหนดจะติดตั้งอยู่ในบริเวณใดก็ตาม แต่ตามความเป็นจริงค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ น่าจะมีผลมาจากปัจจัยภายนอกหลาย ๆ ประการ โดยในงานงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์และออกแบบตำแหน่งโหนดที่สามารถติดตั้งภายในอาคาร และมีปริมาณงานที่ดีที่สุดได้ ภายใต้ข้อจำกัดของกำลังงานส่งที่เท่า ๆ กันในแต่ละโหนดได้ และได้มีการพัฒนาสมการของค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ เพื่อนำไปสู่ การวิเคราะห์ถึงความเท่าเทียมกันของปริมาณงานในทุก ๆ โหนด ซึ่งเป็นเพียงปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะนำไปวิเคราะห์ในการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ซึ่งสามารถนำไปประกอบกับการพิจารณาในการออกแบบเครือข่ายที่สามารถออกแบบได้จริงในทางปฏิบัติได้

สมการและตัวแปรที่สำคัญและนำมาใช้วิเคราะห์ในการออกแบบหาการวางตำแหน่งที่เหมาะสมของโหนดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้แก่

สมการเพื่อหา อัตราการส่งข้อมูล ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ

$$\mu(x_1, x_2, \dots, x_l) \approx \frac{1}{t_c} \ln \left( \frac{1}{1 - p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \right)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จโดยพิจารณาสิ่งกีดขวาง

$$P_r(x_1, x_2, \dots, x_l) = P_t - 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 + G_t + G_r - Loss - 20 \log \left( \frac{d(x_1, x_2, \dots, x_l)}{d_0} \right)$$

$$A(x_1, x_2, \dots, x_l) = 0.1840 * \exp((-0.0358)(P_r(x_1, x_2, \dots, x_l)))$$

$$p(x_1, x_2, \dots, x_l) = 1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ โดยใช้หลักการความเท่าเทียมกันของปริมาณงาน

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} = \left( \frac{\sum_{i=l}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\left( N(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot \sum_{i=l+1}^H N(x_1, x_2, \dots, x_i) + N(x_1, x_2, \dots, x_l) \right)} \right)$$

$$\left( \frac{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})} \right)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณงาน

$$T(x_1, x_2, \dots, x_l) = \begin{cases} \sigma_s(1) & , l=1 \\ \sigma_s(x_1, x_2, \dots, x_l) \cdot [1 - P_{br}(x_1)] \cdot [1 - P_{br}(x_1, x_2)] \dots [1 - P_{br}(x_1, x_2, \dots, x_l)] & , l=2, \dots, H \end{cases}$$

ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จที่เหมาะสม และทำให้ปริมาณงานในทุก ๆ โหนดมีความเท่าเทียมกัน มี 2 ปัจจัยคือ

1 ปัจจัยทางด้านระยะทาง ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการคำนวณหาระยะทางเพื่อติดตั้งตำแหน่งของโหนดกรณีปริมาณงานเท่าเทียมกันทุกโหนด

$$d(x_1, x_2 \dots x_{l+1}) = 10^{\left(\frac{L_0 + Loss - P_i + B}{-20}\right)}$$

$$B = 27.93 \left[ \begin{array}{l} 1.69 - \ln \frac{p(x_1, x_2 \dots x_{l+1})}{0.184 p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \\ -0.358(P_i - L_0 - Loss - 20 \log \left( \frac{d(x_1, x_2 \dots x_l)}{d_0} \right)) \ln \frac{p(x_1, x_2 \dots x_{l+1})}{p(x_1, x_2, \dots, x_l)} \end{array} \right]$$

2 ปัจจัยทางด้านอัตราการส่งข้อมูลซึ่งสามารถจะปรับค่าได้จากตัวอุปกรณ์เมฆเราเตอร์และมีสมการที่สัมพันธ์กับค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จดังต่อไปนี้

$$\frac{p(x_1, x_2, \dots, x_l)}{p(x_1, x_2 \dots x_{l+1})} = \left[ \frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_l)}{\mu(x_1, x_2 \dots x_{l+1})} \right] \left[ \frac{1 - A(x_1, x_2, \dots, x_l)}{1 - A(x_1, x_2 \dots x_{l+1})} \right]$$

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาสมการในการวิเคราะห์หาปริมาณงาน เพื่อนำสมการและตัวแปรที่ได้นั้นไปคำนวณหาปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการปรับอัตราการส่งข้อมูลด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จโดยการปรับอัตราการส่งข้อมูล และสามารถปรับได้ที่ตัวอุปกรณ์เมฆเราเตอร์

วิธีในการออกแบบการหาตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมที่สุด สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นด้วยการกำหนดพื้นที่ในการออกแบบ
2. เลือกวางตำแหน่งของโหนดที่เป็นไปได้ของพื้นที่นั้น ๆ
3. วางตำแหน่งของโหนดในระยะทางและมีรัศมีการส่งที่เท่า ๆ กัน
4. คำนวณหาค่าความน่าจะเป็น ในการส่งข้อมูลสำเร็จ โดยใช้สมการที่ใช้วิเคราะห์หาความเท่าเทียมกันของปริมาณงาน
5. คำนวณหาปริมาณงานที่ได้โดยผลของปริมาณงานที่สูงที่สุดของแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการจำลองการวางตำแหน่งของโหนด

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาสมการต่าง ๆ ขึ้นมา โดยสร้างวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือเพื่อให้ได้ปริมาณงานที่สูงที่สุดของรูปแบบที่จำลองขึ้นมา ประกอบกับการกำหนดเงื่อนไขและข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการศึกษาหาสมการที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการนำไปวิเคราะห์ในการออกแบบและผลที่ได้คือสามารถนำสมการดังกล่าวไปประกอบการการออกแบบหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งโหนดของเครือข่ายเมฆไร้สายภายในพื้นที่ที่กำหนดและสามารถนำวิธีในการออกแบบไปใช้งานกับเครือข่ายเมฆไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคำนึงถึงปัจจัยและผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อนำไปติดตั้งและใช้งานจริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวิเคราะห์หาปริมาณงานรวมที่สูงที่สุดที่ได้จากการออกแบบการติดตั้งตำแหน่งของโหนดที่เหมาะสมนั้น ได้อาศัยหลักการของความน่าจะเป็นในการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์และรูปร่างของพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบที่ได้ทำการพิจารณานั้นเป็นรูปร่างที่ไม่ซับซ้อนนัก ทว่า ความต้องการใช้งานเครือข่ายเมฆไร้สายมีปริมาณเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน ดังนั้นการออกแบบการวางตำแหน่งของโหนด อาจมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ประกอบกับเทคโนโลยีของระบบสื่อสารสัญญาณ (Transmission technology) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น หากต้องการหาวิธีที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ซับซ้อนมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องอาศัยหลักการซึ่งอาจจะมีตัวแปรหรือฟังก์ชันอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาสมการหรือตัวแปรที่เหมาะสมที่มีความซับซ้อนและอาศัยโปรแกรมที่เกี่ยวข้องมาใช้คำนวณในการออกแบบเพื่อคำนวณหาปริมาณงานที่ได้ให้มากที่สุด และในอนาคตจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเครือข่าย ดังนั้น การกำหนดเงื่อนไขของสมการที่จะนำไปสู่การหาปริมาณงานนั้น จึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับลักษณะปัญหา รวมถึงการพัฒนาเงื่อนไขและข้อจำกัดที่ซับซ้อน รัดกุม มากขึ้น ในเชิงพาณิชย์ควรจะต้องให้สามารถกำหนดรูปแบบของเงื่อนไขการออกแบบได้หลากหลายขึ้น เช่น การคำนึงถึงปริมาณงานสูงสุด การคำนึงถึงอัตราการส่งซ้ำ หรือ load balance หรือ การกำหนด traffic profile ในการส่งต่อหลายๆ ครั้งเป็นต้น เพื่อส่งผลให้สมการดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาในการใช้งานในเครือข่ายเมฆไร้สายได้จริง

## บรรณานุกรม

- นฤนาถ เขียวหวานและ มีนา หลุ่มทอง (2552)“การหาค่าความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลได้สำเร็จจากค่าความแรงของสัญญาณ”โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Akyildiz, I.F., and Xudong, W. (2005). “Wireless mesh networks: A survey,” *Comput. Netw.*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487.
- Akyildiz, I.F., and Xudong, W. (2008). “Cross-Layer Design in Wireless Mesh Networks” *IEEE Trans. VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 57, NO. 2, pp. 1061-1075.
- Gamal, A. E. Mammen, J., Prabhakar, B. and Shah, D. (2004). “Throughput-delay trade-off in wireless networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 464–475.
- Gambiroza, V., Sadeghi, B. and Knightly, E. W. (2004). “End-to-end performance and fairness in multihop wireless backhaul networks,” in *Proc. ACM MOBICOM*, pp. 287–301.
- Gross, D. and Harris, C. (1998). *Fundamentals of Queueing Theory*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, pp. 74–80.
- Grossglauser, M. and Tse, D. (2001). “Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1360–1369.
- Flood, J.E. (1998) *Telecommunications Switching, Traffic and Networks*, Chapter 4: Telecommunications Traffic, New York: Prentice-Hall.
- IEEE Computer Society. **IEEE P802.11s/D2.0 –Draft STANDARD for Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Amendment to Part 11: Mesh Networking**, (2008).
- IEEE, “**Draft amendment: ESS mesh networking**,” IEEE P802.11s Draft 1.00, (2006).
- IEEE Computer Society and IEEE Microwave Theory and Techniques Society. **802.11 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications**. IEEE Std. 802.11, (1999).
- Jun, J. and Sichiui, M.L. (2003). “Fairness and QoS in multihop wireless networks,” in *Proc. IEEE VTC*, pp. 2936–2940.

- John C. Stein. **“Indoor Radio WLAN Performance Part II: Range Performance in a Dense Office Environment”** Harris Semiconductor, 2401 Palm Bay, Florida 32905,2007, pp.4.
- Koop,M.H.(2007)**“Certificate of Radio Equipment in Japan”** Telefication , Netherlands ,pp.1-2.
- Lazowska, Edward D.; John Zahorjan, G. Scott Graham, Kenneth C. Sevcik (1984). **Quantitative System Performance: Computer System Analysis Using Queueing Network Models**. Prentice-Hall, Inc.
- Lee, J.-F., Liao,W. and Chen, M.-C.(2008). **“An incentive-based fairness mechanism for multi-hop wireless backhaul networks with selfish nodes,”** IEEE Trans. Wireless Commun., vol.7,no.2.
- Liu, T.,and Liao,W. (2008). **“Location-Dependent Throughput and Delay in Wireless Mesh Networks, IEEE Transactions on vehicular technology”**,vol.57,no .2.
- Peng, M., Wang, Y., and Wang, W. (2007). **“Cross-layer design for tree-type routing and level-based centralised scheduling in IEEE 802.16 based wireless mesh networks”** IET Commun., pp. 999–1006.
- Skanda N., Iyer,A., Karnik,A. and Rosenberg,C.(2007). **“Design of High Throughput Scheduled Mesh Networks: A Case for Directional Antennas”** IEEE GLOBECOM. Communications Society., pp. 5080 – 5085.
- Tang,J., Xue,G. and Zhang,W.(2007). **“Cross-Layer Design for End-to-End Throughput and Fairness Enhancement in Multi-Channel Wireless Mesh Networks”** IEEE Trans. Wireless Commun., vol.6,no.10.
- Wu ,X., Liu,J., and Chen,G. (2006). **“Analysis of Bottleneck Delay and Throughput in Wireless Mesh Networks”** ” IEEE Trans. Wireless Commun. vol.6,no.10.



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การติดตั้งและใช้งานโปรแกรม Wireshark

## ก.1 การติดตั้งโปรแกรม Wireshark

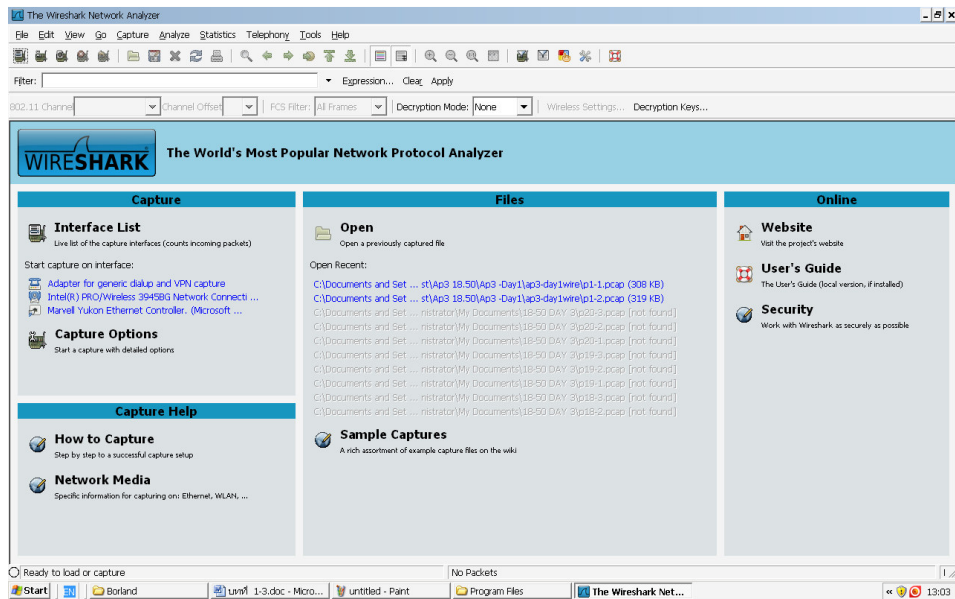
1. Double Click ที่ไอคอน  wireshark120.exe
  2. ปรากฏหน้าต่าง Setup – Wireshark ให้ Click ปุ่ม Run (ดังรูปที่ ก-1)
- แล้วรอนจนกว่าจะติดตั้งโปรแกรมจนสำเร็จ



รูปที่ ก-1 หน้าต่าง Setup – Wireshark

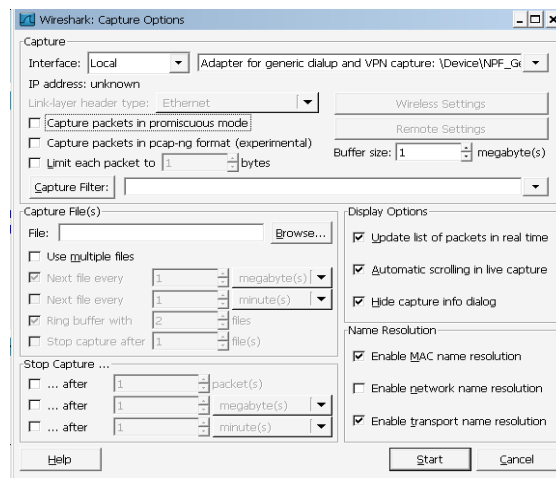
## ก.2 ใช้งานและการทดสอบการจับ Packet ของ โปรแกรม Wireshark

1. Double Click ที่ไอคอน  จะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรม



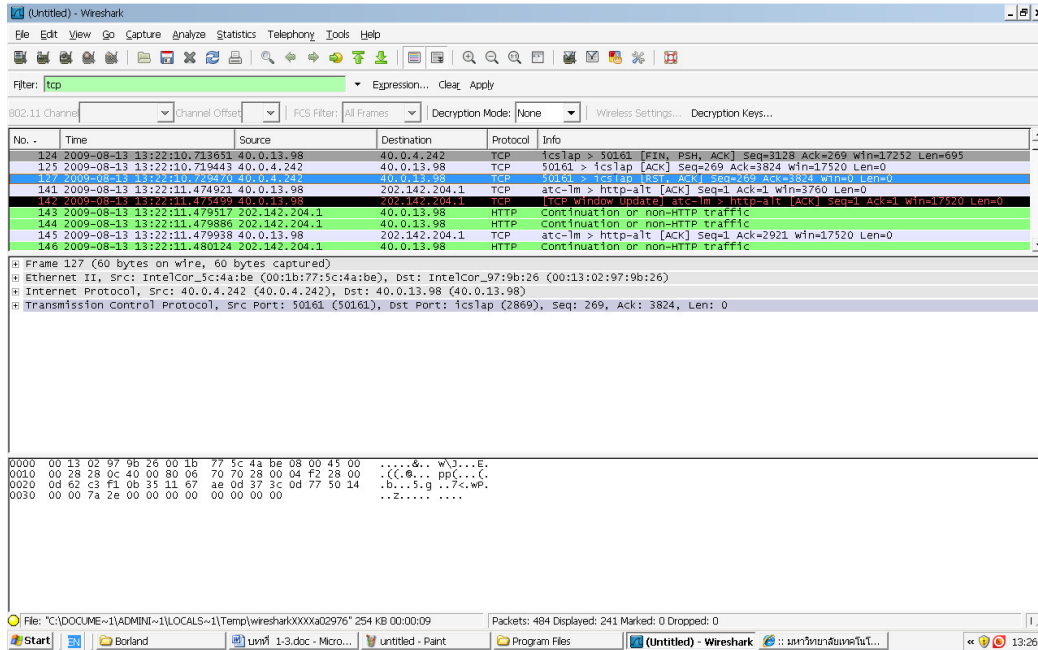
รูปที่ ก-2 หน้าต่างแรกของการใช้งาน Wireshark

- เลือก Capture => Option จะปรากฏหน้าต่างดังกล่าว แล้วทำการเลือก Click ที่บ๊อต Capture packet in promiscuous mode ออก ในส่วนของ Interface ให้เลือก การ์ดแลน ให้ตรงกับเครือข่าย จากนั้น Click Start



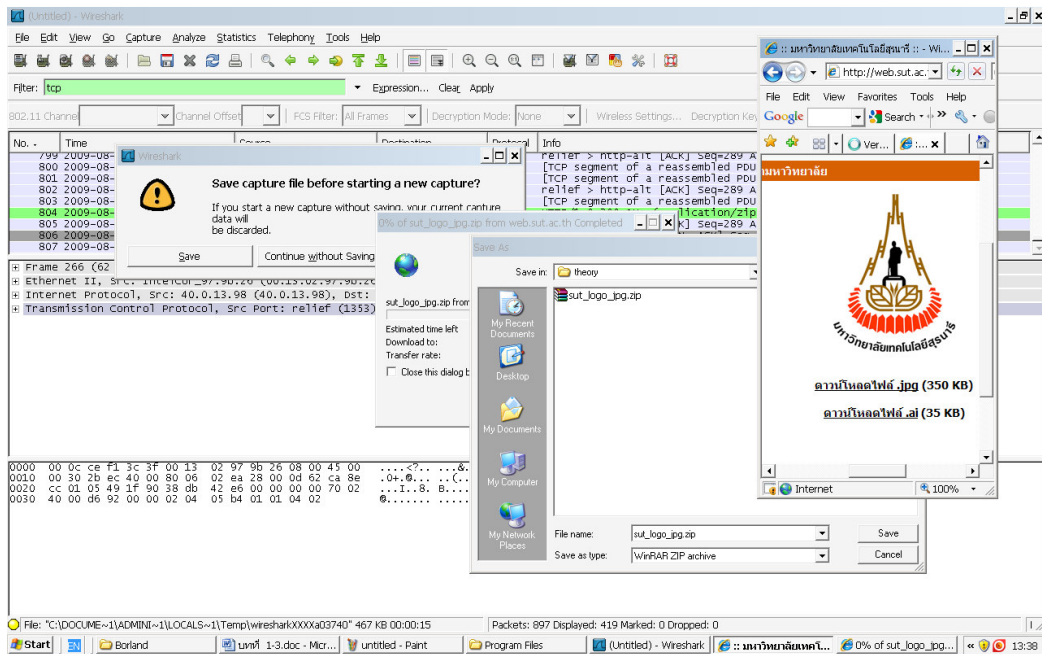
รูปที่ ก-3 หน้าต่างเลือกช่องทางในการดักจับข้อมูล

3. เมื่อ Click Start แล้ว จะปรากฏหน้าต่างแสดงการ Capture Packet ต่างๆ โดยในส่วนของ ช่อง Filter ให้เลือกโปรโตคอลที่ต้องการจับ จากนั้น Click Apply ในที่นี้ทำการ Capture TCP Protocol



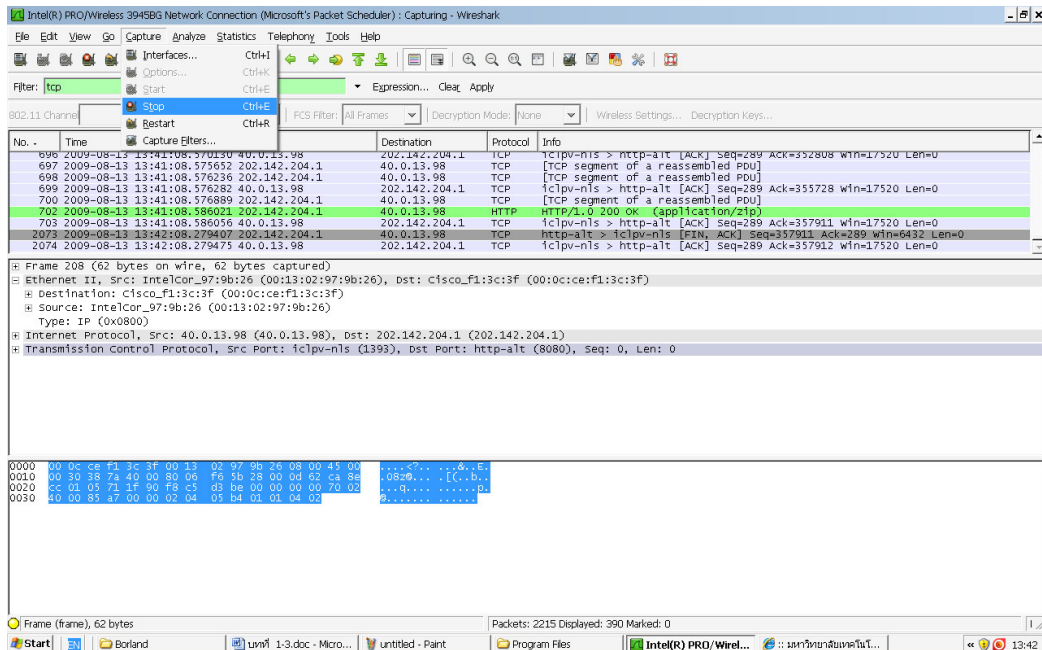
รูปที่ ก-4 หน้าต่างแสดงการสรุปข้อมูลที่ดักจับได้

4. ทำการดาวน์โหลดไฟล์ ที่ทำการจับ Packet ในขณะเดียวกัน ก็ทำการ capture packet พร้อมกันไป ด้วย Click Capture=> start จากนั้น click Continue without saving จะเริ่มทำการ Capture Packet จากไฟล์ที่ทำการดาวน์โหลด



รูปที่ ก-5 หน้าต่างแสดงการโหลดข้อมูลจาก Wireshark

## 5. จะปรากฏหน้าต่างแสดงรายละเอียดการ Capture Packet เมื่อทำการดาวน์โหลดและ Capture เสร็จแล้ว Click Stop แล้วทำการ SAVE ข้อมูล



รูปที่ ก-6 หน้าต่างแสดงรายละเอียดข้อมูลที่คักจับไว้

## ภาคผนวก ข

## การเผยแพร่ผลงานวิจัย

## บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ

S. Sauram, P. Uthansakul, and M. Uthansakul, (2010) “**Design of node locations for indoor wireless mesh networks,**” Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 211-223, 2010.

## บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ

Saurum S., Uthansakul, P. and Uthansakul, M. (2009) “**Design of Gateway Locations in an Indoor WMN,**” ECTI-CON 2009, Thailand, pp. 1004-1007

**ภาคผนวก ค**

**บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์**

## DESIGN OF NODE LOCATIONS FOR INDOOR WIRELESS MESH NETWORKS

Sukunya Sauram<sup>\*</sup>, Peerapong Uthansakul and Monthippa Uthansakul

*Received: May 21, 2010; Revised: Sept 12, 2010; Accepted: Sept 13, 2010*

### Abstract

In the literature, the performance of a Wireless Mesh Network (WMN) has been analyzed by assuming the same quality on each hop. However, this assumption is hardly true in practice due to the physical obstructions in the wireless link, especially for an indoor environment. Therefore, this study revisits the analysis of a WMN performance by taking the effect of physical obstructions into account instead of assuming an equally deterministic property for each hop. These obstructions cause the degradation of signal strength which relatively decrease the success rate of transmission between each hop. This study examines these physical concerns through measured results in an indoor environment and then a design of node locations is discussed.

**Keywords :** Delay, throughput, wireless mesh networks

### Introduction

A Wireless Mesh Network (WMN) is a network technology without wires which will be happening in the near future. It has the same basic structure as a Wireless Local Area Network (WLAN). The difference between a WMN and a WLAN is in the meaning given to parts of the equipment. The important thing is that a WMN has no router while a WLAN does. This is because a WMN includes an access point together with a router which is called a mesh router. Users in a WLAN have also been renamed as mesh clients in a WMN. Because of the combination of access point and router, it makes a WMN a better tight system than a WLAN. In addition, each access

point in a WLAN is connected by cable lines which limit the coverage range of operation. In this light, new technology that can provide more flexibility in network installation and user accessibility is continuously being researched. A WMN is one of the most interesting technologies to have emerged lately because its connections are totally wireless. Hence it is easy for a WMN to extend the service range and be flexible in implementation. In a WMN, nodes are comprised of mesh routers and mesh clients. Each node operates not only as a host but also as a router forwarding packets on behalf of other nodes that may not be within direct

<sup>1</sup> School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Raichasima, Thailand. Tel: 044-224392, Fax 044-224603, E-mail: su\_sauram@hotmail.com

<sup>\*</sup> Corresponding author.



wireless transmission range of their destinations. A WMN is dynamically self-organized and self-configured with the nodes in the network automatically establishing and maintaining mesh connectivity among themselves. This feature brings many advantages to a WMN such as low up-front cost, easy network maintenance, robustness, and reliable coverage (Akyildiz *et al.*, 2005). A WMN is a group of wireless nodes, connecting to each other by radio waves, so in fact there are some parameters such as distance and obstruction which can degrade radio waves from sending a signal to the target point, especially when sending information inside a building. Most houses or buildings have metals as a part of their construction which definitely corrupts system performances. Hence, due to indoor obstructions, the received signal in practice has to be obtained at a lower level than expected in theory. For distance concerns, the radio wave is attenuated as a function of distance no matter which propagation models are applied. Moreover, another impact on distance is dealing with the number of transit hops used for sending packets from source node to sink node. If the number of transit hops between origin and the destination nodes increases, the performances such as throughput and delay will be changed. In Gambiroza *et al.* (2004); Jun and Sichitiu (2003); Lee *et al.* (2008) have simulation results that show that throughput and end to end delay in a WMN are significantly changed by increasing hop-count distance from the gateway. In Gupta and Kumar (2000) presented the throughput analysis in a fixed wireless network; it indicates the direct relation of throughput and the number of nodes. In Gamal *et al.* (2004) have an analytical model developed to obtain the optimal throughput-delay trade-off by varying the number of hops, the transmission range, and the degree of node mobility in an ad hoc network. In Liu and Liao (2008) show the model of statistical location-dependent throughput and delay performances in a proposed WMN. The network considered is a static ad hoc network, in which nodes are randomly distributed and the destination for each node is independently

chosen. In Grossglauser and Tse (2001) show that the per-node throughput is shown to be dramatically increased by exploiting node mobility as a type of multiuser diversity. In Gamal *et al.* (2004) an analytical model is developed to obtain the optimal throughput-delay tradeoff by varying the number of hops, the transmission range, and the degree of node mobility in ad hoc networks.

From all the literature, it can be noted that the performances of a WMN rely on the number of nodes and hops as well as their locations. However, those results are simulated by assuming the same link quality on each hop without considering the effect of an obstruction. This assumption cannot be true in practice because there are different physical obstructions from one node to another. For example in an indoor environment, there are many obstructions between nodes such as walls, partitions, humans, windows, etc. These objects must be a concern when analyzing the performance of a WMN. Here we study the effect of an obstruction on the performance of a WMN by considering the relation between signal strength and the success rate of information transfer. In theory, a WMN ideally determines the successful channel-access probability with a constant value equally for each node. This constant value is always the same no matter where the node has been installed. In this study, the indoor obstructions due to node locations are considered and the successful channel-access probability resulting from indoor obstructions is measured. By using measured results, this study is able to analyze system performances and also design the optimal node locations for an indoor WMN. The throughput and delay are key parameters to evaluate the best design.

## WMN Analysis

### WMN Configuration

The WMN architecture is the combination of infrastructure and client meshing as shown in Figure 1. Mesh clients can access the network through mesh routers as well as directly meshing

with other mesh clients. While the infrastructure provides connectivity to other networks such as the Internet, Wi-Fi, WiMAX, cellular, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, and sensor networks; the routing capabilities of clients provide the improved connectivity and coverage inside the WMN. The infrastructure/backbone of a WMN is illustrated in Figure 1. As seen in this figure, the network consists of mesh routers and mesh clients, where mesh routers have minimal mobility and form the backbone of the WMN. They provide network access for both mesh and conventional clients.

The integration of a WMN with other networks can be accomplished through the gateway and bridging functions in the mesh routers. Mesh clients can be either stationary or mobile, and can form a client mesh network among themselves and with mesh routers.

#### Queuing Theorem for WMN

In this study, the model of a WMN is analyzed by using the M/M/1/K queuing theorem (Gross and Harris, 1998). The throughput

is defined as the number of packets which can be transmitted from source to gateway. For end to end delay, it can be defined as the time between when the first bit of this packet is sent by its source and when the packet is entirely received by the gateway. The basic block diagram of M/M/1/K is shown in Figure 2.

Each node is associated with 2 queues which are  $Q_r$  for the relayed packets and  $Q_l$  for the locally generated packets. If  $Q_r$  is empty, it hops 1 packet from  $Q_l$  (which is assumed backlogged) to send. If  $Q_l$  is not empty, it sends a packet from  $Q_l$  with a probability of  $q(x_1, x_2, \dots, x_k)$  or a packet from  $Q_r$  with a probability of  $1 - q(x_1, x_2, \dots, x_k)$ . We study the behavior of  $Q_r$  and  $Q_l$  and analyze the throughput and delay performances of each node.

Figure 3 presents the numeric method to name each node location. Unlike works presented in the literature, each node is required to have a specific numeric name because each node might experience a different channel property depending on indoor obstructions.  $N(x_1, x_2, \dots,$

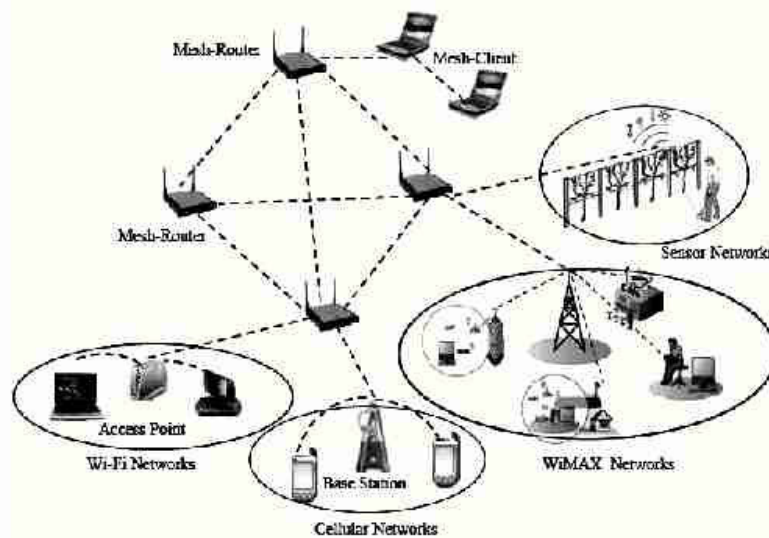


Figure 1. Infrastructure/backbone WMN.

$x_i$ ) denotes the number of nodes in  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop. We let  $H$  denote the maximum possible hop-count distance from the gateway in the network.

From the derivation of an incoming packet presented by Liu and Liao (2008) the arrival rate of a packet can be expressed as

$$\mu(x_1, x_2, \dots, x_i) \approx \frac{1}{t_c} \ln \left( \frac{1}{1 - p(x_1, x_2, \dots, x_i)} \right) \quad (1)$$

where  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the hop number,  $t_c$  is the time slot of 1 packet, and  $p(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the probability of successful channel access. For  $Q_r$  and  $Q_f$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node, the service rate of packets for either queue is equal to the product of  $\mu(x_1, x_2, \dots, x_i)$  and

the probability that the queue is selected to send.  $\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the service rate of packets for  $Q_r$ ; the expression is given by

$$\mu_r(x_1, x_2, \dots, x_i) = \mu(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot q(x) \quad (2)$$

when  $Q_r$  is not empty the transmission opportunity will have a chance to come to  $Q_r$ .  $Q_f(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the effective departure rate of relayed packets that are forwarded to the next hop node and can be expressed as

$$\sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) = \mu_r(x_1, x_2, \dots, x_i) \cdot [1 - p_r(x_1, x_2, \dots, x_i)] \quad (3)$$

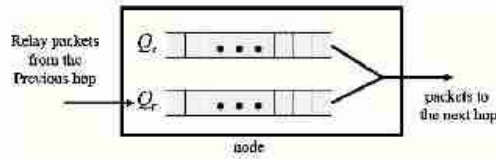


Figure 2. M/N/1K models in WMN

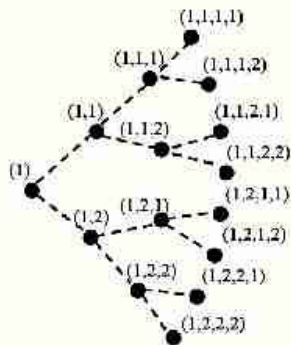


Figure 3. Example of numeric method naming node location

where  $P_0(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the probability of having an empty queue in the M/M/1/K model. When  $Q_i$  is empty, the transmission opportunity is always granted to  $Q_i$ . Thus,  $\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the service rate of packets for  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node, and is calculated by

$$\begin{aligned} \mu_i(x_1, x_2, \dots, x_i) &= \mu(x_1, x_2, \dots, x_i) - \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ &= \mu(x_1, x_2, \dots, x_i) - \mu(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ &\quad \varrho(x) [1 - P_0^i(x_1, x_2, \dots, x_i)] \end{aligned} \quad (4)$$

$Q_i$  for each node is assumed to be backlogged, so the output distribution of  $Q_i$  is identical to the service-time distribution of  $Q_i$ .  $\sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the effective output rate of  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node, so we have

$$\sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_i) = \mu_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (5)$$

$\sigma(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the aggregate effective output rate for the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node. From (3) and (4), it can be expressed as

$$\begin{aligned} &\sigma(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ &= \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) + \sigma_r(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ &= \mu(x_1, x_2, \dots, x_i) \end{aligned} \quad (6)$$

$\lambda_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the packet-arrival for  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop. Note that  $Q_i$  assumed to be always backlogged. Where  $H$  is the total number of hops, it is calculated by

$$\begin{aligned} \lambda_i(x_1, x_2, \dots, x_i) &= \begin{cases} \sum_{n=0}^{N(x_1, x_2, \dots, x_i)} \mu(x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}) \\ l, & i = H \end{cases} \\ &= i - 1, 2, \dots, H - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

where  $P_0(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the probability of  $Q_i$  being empty at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node.

With the service and arrival rates of packets for  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node, we can obtain  $P_0(x_1, x_2, \dots, x_i)$  by applying the M/M/1/K formulas (Gross and Harris, 1998), then

$$P_0^i(x_1, x_2, \dots, x_i) = \begin{cases} \frac{1 - \rho^i(x_1, x_2, \dots, x_i)}{1 - \rho^{K+1}(x_1, x_2, \dots, x_i)} & ; \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) \neq 1 \\ \frac{1}{K+1} & ; \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

where  $K$  is the buffer size of  $Q_i$ .  $\rho(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the traffic intensity for  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node, and is calculated by

$$\rho^i(x_1, x_2, \dots, x_i) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N(x_1, x_2, \dots, x_i)} \frac{\mu(x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1})}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_i) \varrho(x)} & i = 1, 2, \dots, H - 1 \\ \rho_r & i = H \end{cases} \quad (9)$$

**Analysis of Throughput and Delay**

Figure 4 shows the example of a physical obstruction between a node and a gateway. It is clearly seen that both links will not provide the same performance because the signal quality on each link is different. If we analyze both links using the proposed theory in the literature, both will provide the same throughput and delay. This is very misleading for the design of any gateway or node locations in practice. So far in the literature, this issue has never been considered. In this study, the parameter  $\rho(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is determined by the physical characteristic of the node location's signal strength. We now derive the end to end throughput by finding the blocking probability at each hop.  $T(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the throughput of the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node.  $P_b(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the blocking probability for  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node. From the M/M/1/K formulas, we have

$$P_b(x_1, x_2, \dots, x_i) = \begin{cases} \frac{[1 - \rho(x_1, x_2, \dots, x_i)] \rho^K}{1 - \rho(x_1, x_2, \dots, x_i)^{K+1}} & \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) \neq 1 \\ \frac{1}{K+1} & \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

where  $\rho(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is given by (9).  $1 - P_b(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the nonblocking probability for  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node. For a path, the end to end nonblocking probability is equal to the product of the nonblocking probabilities at all intermediate nodes. The throughput  $T(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is calculated by

$$T(x_1, x_2, \dots, x_i) = \begin{cases} \sigma_i(0), & i=1 \\ \sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \prod_{j=1}^{i-1} [1 - P_b(j)], & i=2, \dots, H \end{cases} \quad (11)$$

where  $H$  is the total number of hops.  $P_b(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the blocking probability of the M/M/1/K model, and  $q(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the forwarding probability of the packet. We derive the end to end delay,  $L(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the steady-state queue size of  $Q_i$  for the

$(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node. According to the M/M/1/K formulas, we have

$$L_q(x_1, x_2, \dots, x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_1, x_2, \dots, x_i) \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) [K \rho(x_1, x_2, \dots, x_i)]^K + 1}{1 - \rho(x_1, x_2, \dots, x_i)^{K+1}} & \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) \neq 1 \\ \frac{K(K-1)}{2(K+1)} & \rho(x_1, x_2, \dots, x_i) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

where  $W_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$  is the waiting time for packets in  $Q_i$  at the  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ -hop node. According to Little's formula (Gross and Harris, 1998), we have

$$W_i(x_1, x_2, \dots, x_i) = \frac{1}{\mu(x_1, x_2, \dots, x_i) \rho(x)} + \frac{L_q(x_1, x_2, \dots, x_i)}{N(x_1, x_2, \dots, x_i) \rho(x+1) [1 - P_b(x_1, x_2, \dots, x_i)]} \quad (13)$$

For end to end delay, the expression is given by

$$D(x_1, x_2, \dots, x_i) = \begin{cases} \tau_i, & i=1 \\ \tau_i + \sum_{j=1}^{i-1} W_j(j), & i=2, 3, \dots, H \end{cases} \quad (13)$$

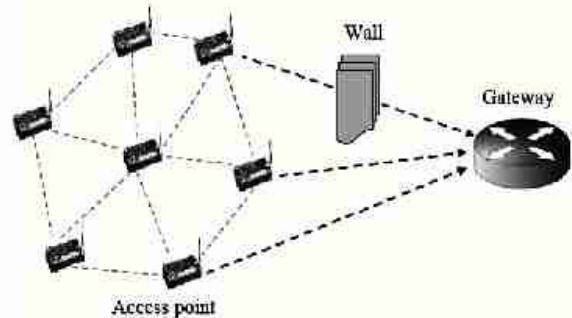


Figure 4. Example of physical obstructions between nodes to gateway

Note that  $t_s$  is the time slot for 1 packet,  $L_s(x_1, x_2, \dots, x_k)$  is the steady state queue size of the M/M/1/K model, and  $N(x_1, x_2, \dots, x_k)$  is the number of nodes in  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ -hop.

#### Effect of Indoor Obstructions on the Successful Channel-Access Probability

WMNs currently are standardized by the IEEE Standard 802.11s (IEEE, 1999; IEEE, 2003; IEEE, 2005; IEEE, 2008). It is comfortable to establish wireless networks with mobile wireless nodes, and infrastructure devices are used for routing. This provides higher flexibility and network coverage and decreases administration and infrastructure overheads. The IEEE Standard 802.11s can be support the IEEE Standard 802.11a/b/g/n. Most of these WMNs use the basic IEEE 802.11 (IEEE, 1999; IEEE, 2006). Therefore, in this work we used a WLAN network based on the IEEE 802.11a standard for measuring

the effect of indoor obstructions. The key factor considered in measurements is the signal strength which affects the successful channel-access probability. The value of the successful channel-access probability can be captured at each node location. Figure 5 shows a layout of C-Building used for performing a signal strength measurement. The signal strength is monitored by using the freeware program named Wireless Mon. Successful channel-access probability can be indirectly measured by calculating a packet loss. If all packets can be transmitted to the destination, the successful channel-access probability is equal to 1. This study uses the freeware program named Wireshark to capture the loss of packet transmission.

In measurement scenarios, all 4 access points are tested on 3 days; in each access point there are 20 measuring spots and each spot will be repeated 3 times. Hence, the

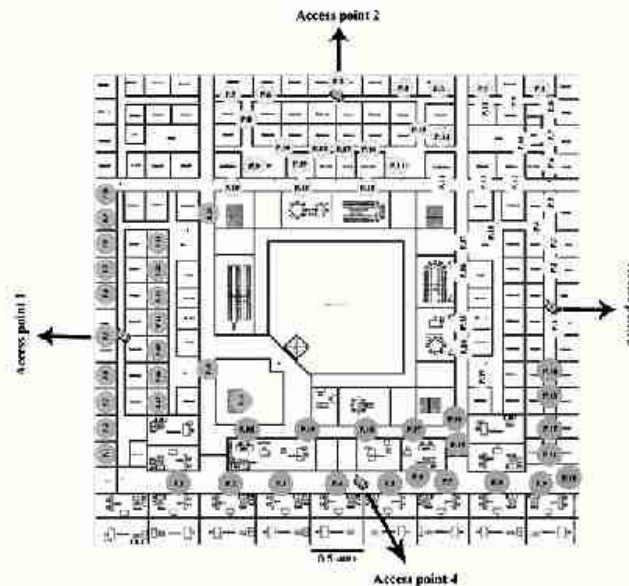


Figure 5. Map of measurement area

total number of measurements is 720. The measurement results are shown in Figure 6. It can be observed that the success of packet transmission depends on the level of the signal strength. If a high level of signal strength is received, then the chance for successful transmission is also high. The level of signal strength is influenced by both distance and obstructions. Therefore this measurement provides the direct relationship between node location and the successful channel-access probability which will be used to analyze throughput and delay in the WMN system. The successful channel-access probability  $p(x_1, x_2, \dots, x_j)$  is obtained by applying the relationship between packet loss and signal strength shown in Figure 6 along with the indoor path loss model. The level of received signal strength  $P_r(x_1, x_2, \dots, x_j)$  is expressed by

$$P_r(x_1, x_2, \dots, x_j) = P_t - 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 + G_t + G_r - L_{obs} - 20 \log \left( \frac{d_0}{d_j} \right) \quad (15)$$

and the probability of successful channel access  $p(x_1, x_2, \dots, x_j)$  can be expressed as

$$A(x_1, x_2, \dots, x_j) = 0.1840 * e^{0.0001 P_r(x_1, x_2, \dots, x_j)} \\ n(x_1, x_2, \dots, x_j) = 1 - A(x_1, x_2, \dots, x_j) \quad (16)$$

where  $P_t$  is the transmit signal power,  $P_t$  is set to 10 dBm,  $G_t$  is the antenna gain at the transmitter,  $G_r$  is the antenna gain at the receiver,  $d_0$  is the distance between the transmitter and receiver,  $d_0$  is set to 1 m, and  $L_{obs}$  is the power attenuation due to obstructions. The authors did some measurements to realize the attenuation factors. In this work, the attenuation is determined by 6 dB per 1 wall because this value fits our experiments. For antenna gains,  $G_t$  and  $G_r$  are set to 2.2 dBi when the operating frequency is 2.45GHz.

**Design of Node Locations**

The site of the experimental area for designing the WMN node is C-Building the layout of which is shown in Figure 7. This building is a rectangular shape with dimensions of 76.5 x 80 mm<sup>2</sup>. For the number of nodes it was decided to have only 4 mesh routers. This is because the existing infrastructure of the WLAN has only 4 access points. Hence, only

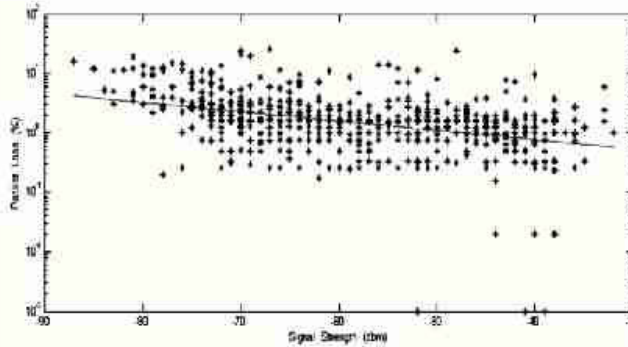


Figure 6. Relationship between packet loss and signal strength

4 nodes in the WMN are also enough for the same coverage area. The next task is to design where the nodes should be located. As seen in Figure 7, the mark points are the possible locations for either mesh routers or the gateway. In practice, it is not possible to determine the node locations for any spot of the building due to the constraint of power lines, available spaces, and construction materials. Hence, in this study, the method of designing node locations is to find the best set of node configurations from all possible installation

locations. In this work, 2 groups of design are considered. The first group is based on only 1-hop nodes and the second group is based on 2-hop nodes.

For the first group, the configurations of the WMN are shown in Figure 8. There are 2 possible configurations named here as cases (a) and (b). Both cases have the gateway location at the center of the building. For the second group, there are 8 possible configurations named here as cases (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), and (j) which are configured as shown in



Figure 7. Layout of C-Building used for designing WMN node

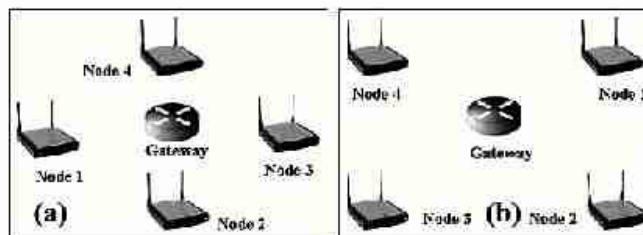


Figure 8. Configurations of WMN with 1 hop 4 nodes



Figure 9. These possible configurations are considered as possible spots as shown in Figure 7 and mesh routers can serve all the areas.

It can be noted that the throughputs and delays of cases (a) and (b) are the same if we analyze performance according to the work presented in the literature. This is because

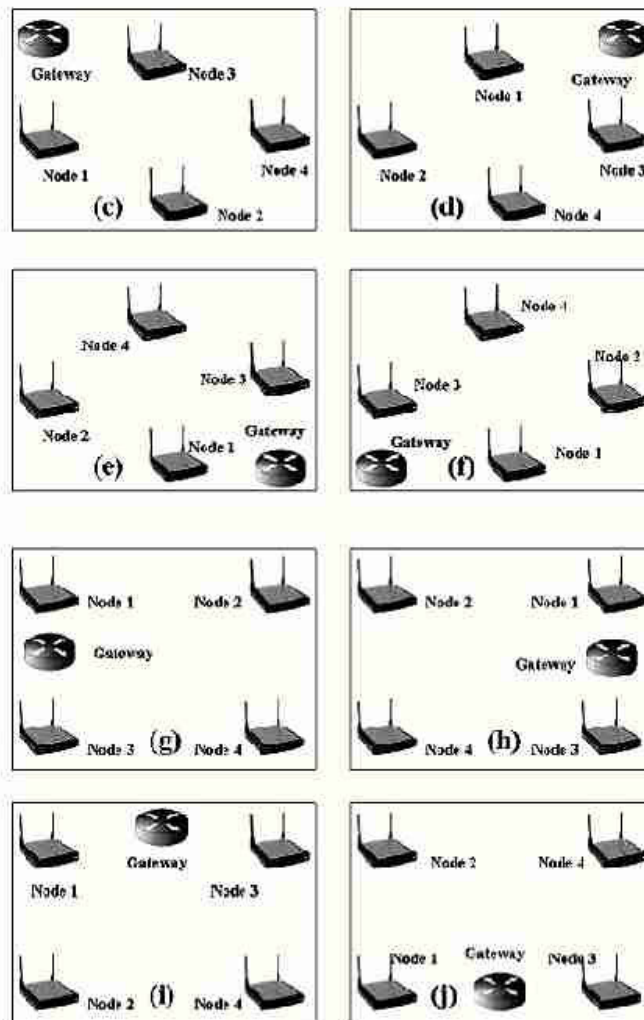


Figure 9. Configurations of WMN with 2 hops 2 nodes

they neglect the effect of indoor obstructions. Then the signal strength and  $p(x_1, x_2, \dots, x_j)$  is assumed to be equal for each node. Also for cases (c) to (j), every configuration will theoretically provide the same throughputs and delays. In fact the performances of all cases should be different and they depend on their surroundings. The next task is to illustrate this issue and find out which case offers the best system performances.

**Simulation Results**

The TDMA-based system is applied in simulations in which each time slot is allocated to an  $(x_1, x_2, \dots, x_j)$ -hop node with probability  $p(x_1, x_2, \dots, x_j)$ . Thus, only 1 node is allowed to transmit within 1 time slot. All nodes operate on the same frequency channel. The data rate is 75 Mb/s with a packet size of 1500 bits. The time slot is set to the amount of airtime needed for transmitting 1 packet, i.e.,  $1500 \text{ B} / 75 \text{ Mb/s} = 0.16 \text{ ms}$ . The forwarding probability  $q(x_1, x_2, \dots, x_j)$  is a setting of 0.6. The buffer size of M/M/1/K is fixed at 64 packets or  $K = 64$ .

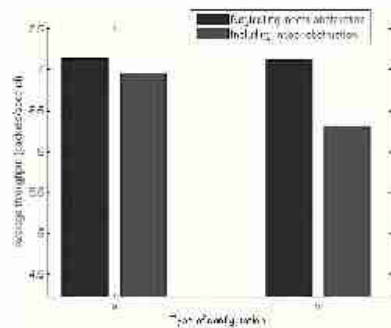
Figures 10 and 11 show the average throughputs and delays of cases (a) and (b), respectively. We analyze the results by observing the variation of the successful channel-access

probability  $p(x_1, x_2, \dots, x_j)$  due to its physical obstruction, as illustrated in Figure 7.

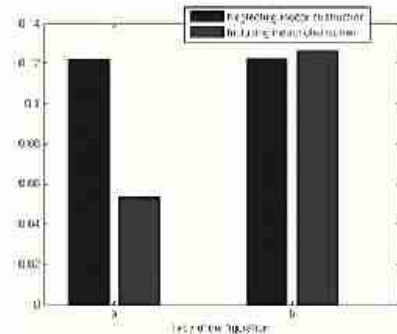
The results are compared with the theoretical assumption when neglecting physical obstructions. It can be observed that the average throughputs and delays of cases (a) and (b) are totally different. This indicates the significant impact of physical obstructions on the WMN performances.

Figures 12 and 13 show the average throughputs and delays of cases (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), and (j), respectively. It is interesting to note that the throughputs and delays of each node are different when changing the location of the node and when considering a variation of the successful channel-access probability. The average throughputs and delays of the 10 cases are summarized in Table 1.

The first group is based on only 1 hop and it can be noted that the best WMN throughput can be achieved by the configuration of the WMN in case (a) and the best WMN delay is also obtained by case (a). For the second group based on 2 hops, it can be noted that the best WMN throughput can be achieved by the configuration of the WMN in case (f) and the best WMN delay is also obtained by case (f).



**Figure 10. Average throughput per node for configuration of WMN with 1 hop 4 nodes illustrated in Figure 8.**



**Figure 11. End-to-end delay per node for configuration of WMN with 1 hop 4 nodes illustrated in Figure 8.**

These results are helpful for WMN researchers in designing the optimal locations of mesh routers and gateways by including the successful channel-access probability based on physical environments such as signal strength and distance.

## Conclusions

In this study, the design of node locations for an indoor WMN is presented by including the effect of physical obstructions on performance of the WMN. From the theory of a WMN, the

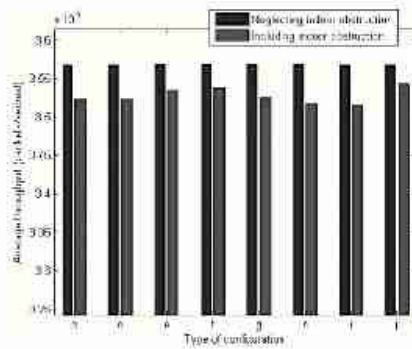


Figure 12. Average throughput per node for configuration of WMN with 2 hop 2 nodes illustrated in Figure 9.

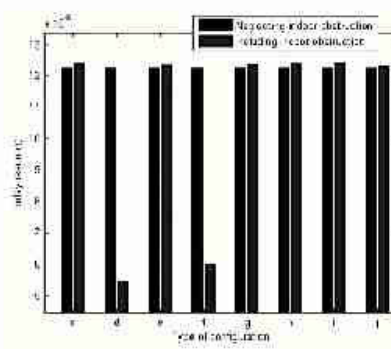


Figure 13. End-to-end delay per node for configuration of WMN with 1 hop 4 nodes illustrated in Figure 9.

Table 1. Average throughput and average end-to-end delay per node for WMN configured in Figure 8 and Figure 9.

Configuration	Average throughput (packet/second)	Average delay (second)
a	6.9640 $\times 10^{-3}$	0.0536
b	6.0378 $\times 10^{-3}$	0.1262
c	3.5227 $\times 10^{-3}$	0.1240
d	3.5227 $\times 10^{-3}$	0.0544
e	3.5323 $\times 10^{-3}$	0.1235
f	3.5396 $\times 10^{-3}$	0.0602
g	3.5252 $\times 10^{-3}$	0.1239
h	3.5176 $\times 10^{-3}$	0.1241
i	3.5154 $\times 10^{-3}$	0.1242
j	3.5434 $\times 10^{-3}$	0.1233

successful channel-access probability is invariable and equivalent. Every node location in the WMN system will have the same value of successful channel-access probability. In fact the value of successful channel-access probability is not constant when operating in a real environment. This study analyzes the WMN performances by taking the measured successful channel-access probability into account. Then the optimal node locations can be successfully designed. The results indicate that physical environments have a huge impact on the WMN performance.

### Acknowledgment

This work is supported by a Research Grant from Suranaree University of Technology, Thailand.

### References

- Akyildiz, I.F., Wang, X., and Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: A survey, *Comput. Netw.*, 47(4):445-487.
- Bansal, N. and Liu, Z. (2003). Capacity, delay and mobility in wireless ad-hoc networks, in *Proc. IEEE INFOCOM.*, p. 1553-1563.
- Gamal, A.E., Mammen, J., Prabhakar, B., and Shah, D. (2004). Throughput-delay trade-off in wireless networks. *Proc. IEEE INFOCOM.* p. 464-475.
- Gambiroza, V., Sadeghi, B., and Knightly, E.W. (2004). End-to-end performance and fairness in multihop wireless backhaul networks. *Proc. MOBICOM 2004.* p. 287-301.
- Gross, D. and Harris, C. (1998). *Fundamentals of Queueing Theory*, 3<sup>rd</sup> ed. Wiley, Hoboken, NJ, USA, p. 74-80.
- Grossglauser, M. and Tse, D. (2001). Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. *Proc. IEEE INFOCOM.* p. 1360-1369.
- Gupta, P. and Kumar, P.R. (2000). The capacity of wireless networks, *IEEE Inform. Theory*, 46(2):388-404.
- IEEE. (1999). IEEE Standards. Interpretation for IEEE Standard 802.11, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, USA.
- IEEE. (1999). IEEE Standards. Wireless LAN medium access control and physical layer specification, ANSI/IEEE Standard 802.11, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, USA.
- IEEE. (2003). IEEE Standards. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Virtual Bridged Local Area Networks, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, USA.
- IEEE. (2005). IEEE Standards. Task Group 5: MAC Enhancement Proposal, Protocol Proposal IEEE 802.11-05/0575r3, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, USA.
- IEEE. (2006). IEEE Standards. Draft amendment: ESS mesh networking, IEEE P802.11s Draft 1.00, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, USA.
- IEEE. (2008). IEEE Standards. IEEE P802.11s/D2.0 - Draft STANDARD for Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Amendment to Part 11: Mesh Networking.
- Jun, J. and Sichitiu, M.L. (2003). Fairness and QoS in multihop wireless networks, *Proc. IEEE VTC.*, p. 2936-2940, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, USA.
- Lee, J.-F., Liao, W., and Chen, M.-C. (2008). An incentive-based fairness mechanism for multi-hop wireless backhaul networks with selfish nodes, *IEEE T. Wirel. Commun.*, 7(2).
- Liu, B., Liu, Z., and Towsley, D. (2003). On the capacity of hybrid wireless networks, *Proc. IEEE INOCOM.* p. 1543-1552.
- Liu, T. and Liao, W. (2008). Location-dependent throughput and delay in wireless mesh networks, *IEEE T. Veh. Technol.*, 57(2), virtual bridged lan.

# Design of Gateway Locations in an Indoor WMN

Sukunya Sauram, Monthippa Uthansakul and Peerapong Uthansakul  
 School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology,  
 Nakhonratchasima, Thailand 30000  
 E-Mail: [su\\_sauram@hotmail.com](mailto:su_sauram@hotmail.com), [mup@sut.ac.th](mailto:mup@sut.ac.th), [uthansakul@sut.ac.th](mailto:uthansakul@sut.ac.th)

**Abstract**—In literatures, the performance of Wireless Mesh Network (WMN) has been investigated through end to end delay and throughput by assuming the same quality on each hop. However, this assumption is hardly true in practice due to the physical obstructions in wireless link. In this paper, the design of gateway locations in an indoor scenario has been presented by taking a physical environment into account. The simulation results show that throughput and delay are significantly influenced by changing the location of gateway. This paper does not only provide a frame work for studying WMN performance but also gives an insight into the design strategy for WMN gateway.

## I. INTRODUCTION

Recently, the wireless networks have evolved into many applications providing better services. In this light, a new technology that can provide more flexibility on network installation and user accessibility is continuously researched. Wireless Mesh Networks (WMN) is one of the most interesting technologies having been emerged lately because its connections are totally wireless. Hence it is easy for WMN to extend the service range and flexible to be implemented in practice. In WMN, nodes are comprised of mesh routers and mesh clients. Each node operates not only as a host but also as a router forwarding packets on behalf of other nodes that may not be within direct wireless transmission range of their destinations. A WMN is dynamically self-organized and self-configured with the nodes in the network automatically establishing and maintaining mesh connectivity among themselves. This feature brings many advantages to WMN such as low up-front cost, easy network maintenance, robustness, and reliable coverage.

In [2]-[4], the simulation results show that throughput and end-to-end delay in WMN are significantly changed by increasing hop-count distance from the gateway. In [5], the throughput analysis in a fixed wireless network is presented. It indicates the direct relation of throughput and number of nodes. In [6], the average throughput per node is shown to be dramatically increased by exploiting node mobility as a type of multiuser diversity. In [7], an analytical model is developed to obtain the optimal throughput-delay tradeoff by varying the number of hops, the transmission range and the degree of node mobility in ad hoc network. In [8], the model of statistical location-dependent throughput and delay performances in WMN is proposed. From all literatures, it can be noticed that the performances of WMN are relied on number of nodes and hops as well as their locations. However, those results are simulated by assuming the same link quality on each hop. This

assumption cannot be true in practice because there is a different physical obstruction between one node to another. For example in an indoor environment, there are many obstructions between node to node such as wall, partition, human, window, etc. These objects are necessary to be concerned when analyze the performance of WMN.

In this paper, the performances of WMN in an indoor environment are investigated by taking the physical obstructions into account. Consequently, with this analysis, the proper location of gateway can be optimally designed. In addition, the simulations indicate that the gateway is not able to be located randomly otherwise the performance will be lower than theory design.

## II. ANALYSIS OF WMN

### A. WMN Configuration

The infrastructure/backbone WMN is illustrated in Figure 1. As seen in Figure, the network is consisted of mesh routers and mesh clients, where mesh routers have minimal mobility and form the backbone of WMN. They provide network access for both mesh and conventional clients. The integration of WMNs with other networks such as the Internet, cellular, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, sensor networks, etc., can be accomplished through the gateway and bridging functions in the mesh routers. Mesh clients can be either stationary or mobile, and can form a client mesh network among themselves and with mesh routers.

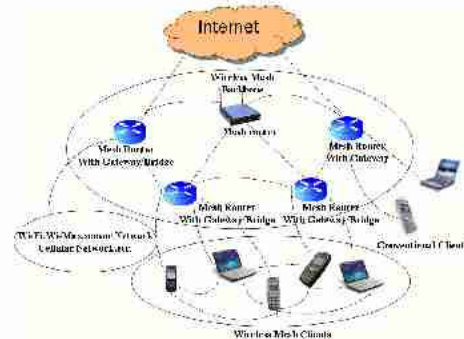


Figure 1. Infrastructure/backbone WMN.

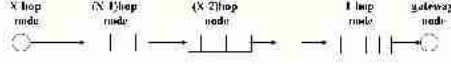


Figure 2. M/M/1/K models in WMN.

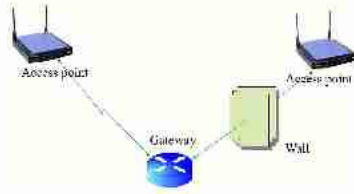


Figure 3. Example of physical obstructions between node to gateway.

### B. Queuing theorem for WMN

In this paper, the model of WMN is analyzed by using M/M/1/K queuing theorem [10]. The throughput is defined as the number of packets which can be transmitted from source to gateway. For end to end delay, it can be defined as the time between when the first bit of this packet sent by its source and when the packet is entirely received by the gateway. The basic block diagram of M/M/1/K is shown in Figure 2.

Form the derivation of incoming packet presented in [8]. The arrival rate of packet can be expressed as

$$\mu(x) = \frac{1}{t_c} \ln \frac{1}{1 - p(x)} \quad (1)$$

where  $x$  is the hop number,  $t_c$  is the time slot of one packet,  $p(x)$  is the probability of successful channel access.

Figure 3 shows the example of physical obstruction between node to gateway. It is clearly seen that both links will not provide the same performance because the signal quality on each link is different. If we analyze both links using proposed theory in literatures, both will provide the same throughput and delay. This is a big misleading to design any gateway or node locations in practice. So far in literatures, this issue has never been considered.

In this paper, the parameter  $p(x)$  is determined by the physical characteristic of node location. The measurements in [9] provide the information of probability of successful transmission as a function of Signal to Noise Ratio (SNR). Therefore, this paper adopts the relation of  $p(x)$  and SNR presented in [9] for taking the physical environments into account. After concerning  $p(x)$ , the throughput  $T(x)$  is calculated by

$$T(x) = \begin{cases} \mu(1) - \mu(1)q(1)[1 - P_b(1)] & x=1 \\ \mu(x) - \mu(x)q(x)[1 - P_b(x)] \prod_{i=1}^{x-1} [1 - P_b(i)] & x=2, \dots, H \end{cases} \quad (2)$$



Figure 4. Layout of C-Building used for designing WMN gateway.

where  $H$  is the total number of hops,  $P_b(x)$  denotes the blocking probability of M/M/1/K model,  $P_q(x)$  denotes the probability of having empty queue in M/M/1/K model,  $q(x)$  is the forwarding probability of packet.

For end to end delay, the expression is given by

$$D(x) = \begin{cases} \frac{1}{\mu(x)} & x=1 \\ x t_c + \sum_{i=1}^{x-1} W_r(i), & x=2, 3, \dots, H \end{cases} \quad (3)$$

where

$$W_r(x) = \frac{1}{\mu(x)q(x)} + \frac{L_r(x)}{N_r(x)\mu(x+1)[1 - P_b(x)]}$$

Note that  $t_c$  is the time slot for one packet,  $L_r(x)$  is the steady state queue size of M/M/1/K model,  $N_r(x)$  is the number of nodes in  $x$  hop.

### C. Indoor path loss model

To realize the parameter  $p(x)$ , it is necessary to know SNR. Hence, the task to get SNR can be achieved by calculating from received signal strength. The indoor path loss model has been used in this work and the expression of received signal strength  $P_r$  is expressed by

$$P_r = P_t - 10 \log \left[ \frac{\lambda}{4\pi} \right] + G_t + G_r - Loss - 20 \log \left[ \frac{d}{d_0} \right] \quad (4)$$

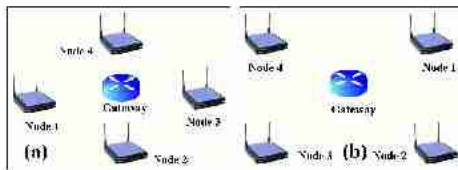


Figure 5. Configurations of WMN with 1 hop 4 nodes.

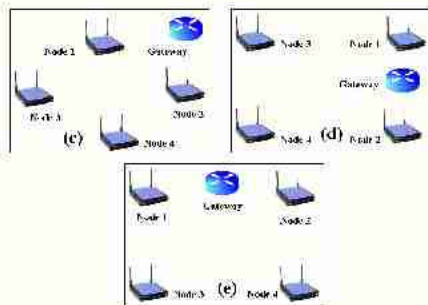


Figure 6. Configurations of WMN with 2 hops 2 nodes.

where  $P_t$  is the transmit signal power,  $G_t$  is the antenna gain at transmitter,  $G_r$  is the antenna gain at receiver,  $d$  is the distance between transmitter and receiver,  $d_0$  is set to 1 m and  $Loss$  is the power attenuation due to obstructions. The authors did some measurements to realize the attenuation factors. In this work, the attenuation is determined by 6 dB per one wall because this value is fit to our experiments. Also from our measurements, the power spectrum of noise floor in experimental area is around -70 dBm. Therefore, SNR can be calculated by  $SNR = P_r + 70$ . For antenna gains,  $G_t$  and  $G_r$  is set to 2.2 dBi when the operating frequency is 2.45GHz.

III. GATEWAY DESIGN

The site of experimental area for designing WMN gateway is C-Building which its layout is shown in Figure 4. This building is a rectangular shape with dimension of 76.5x80 mm<sup>2</sup>. The number of nodes is decided to four mesh routers. This is because the existing infrastructure WLAN has only four access point. Hence, only four nodes in WMN are also enough for keeping the same coverage area. The next task is to design where the gateway should be located. In this work, two groups of gateway design are considered. The first group is based on only one hop and the second group is based on two hops.

For the first group, the configurations of WMN are shown in Figure 5. There are two possible configurations as named here by case (a) and (b). In the second group, there are three

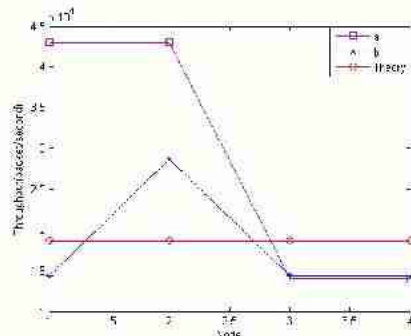


Figure 7. Throughput per node for configuration of WMN with 1 hop 4 nodes illustrated in Figure 5.

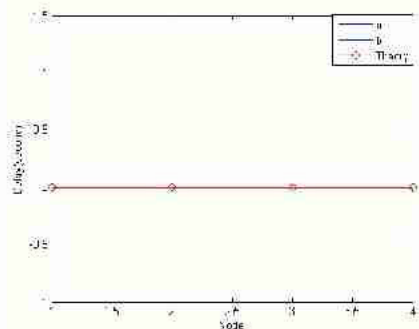


Figure 8. End to end delay per node for configuration of WMN with 1 hop 4 nodes illustrated in Figure 5.

possible configurations as named here by case (c), (d) and (e). For two hops, the first and second hops have 2 nodes which is configured as shown in Figure 6. All physical obstructions are simulated according to the wall on Figure 4.

It can be noted that the throughputs of case (a) and (b) are the same if neglecting the relation of SNR and  $p(x)$ . Also for case (c), (d) and (e), the same throughputs and delays are expected if following the theory in literatures.

IV. SIMULATION RESULTS

The TDMA-based system is applied in simulations in which each time slot is allocated to an x-hop node with probability  $p(x)$ . Thus, only one node is allowed to transmit within one time slot. All nodes operate on the same frequency channel. The data rate is 75 Mb/s with packet size of 1500 bits. The time slot is set to the amount of airtime needed for transmitting one packet, i.e.,  $1500 B / 75 Mb/s = 0.16 ms$ .

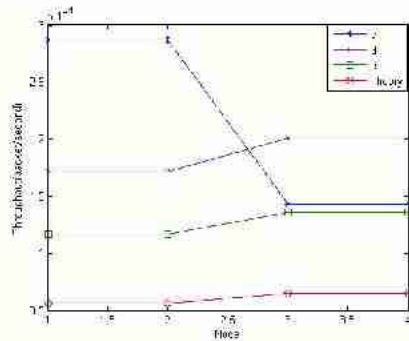


Figure 9. Throughput per node for configuration of WMN with 2 hops 2 nodes illustrated in Figure 6.

Table I. Average throughput and average end to end delay per node for WMN configured in Figure 5 and Figure 6.

Configuration	Average throughput (packet/second)	Average delay (second)
a	$2.85 \times 10^4$	$0.16 \times 10^{-3}$
b	$1.79 \times 10^4$	$0.16 \times 10^{-3}$
c	$2.15 \times 10^4$	$0.24 \times 10^{-3}$
d	$1.87 \times 10^4$	$1.03 \times 10^{-3}$
e	$1.26 \times 10^4$	$1.43 \times 10^{-3}$

The buffer size of M/M/1/K is fixed at 64 packets or  $K = 64$ . Figure 7 and 8 show the throughputs and delays of case (a) and (b), respectively. The results are compared with theory neglecting physical obstructions. The throughputs of case (a) and (b) are totally different from theory. This indicates the significant impact of physical obstructions on WMN performance. For delay, there is a constant delay for one hop design because every node is next to the gateway.

Figure 9 and 10 show the throughputs and delays of case (c) (d) and (e), respectively. It is interesting to notice that the throughput and delay of each node are different when changing the location of gateway. The average throughputs and delays of five cases are summarized in Table I. It can be noticed that the best WMN throughput can be achieved by the configuration of WMN in case (a) and the best WMN delay is obtained by case (c). This is because case (a) has the least hop and physical obstructions while case (c) has the most uniform pattern of  $p(x)$ . These results are helpful for WMN researchers to design the gateway location based on indoor environments.

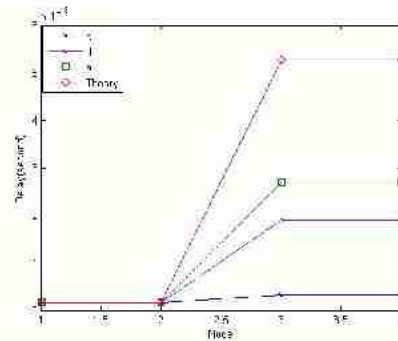


Figure 10. End to end delay per node for configuration of WMN with 2 hops 2 nodes illustrated in Figure 6.

## V. CONCLUSION

In this paper, the design of gateway location in an indoor environment for WMN is presented. By applying the physical obstructions, the throughputs and delays of various configurations of WMN gateway locations are investigated. The results indicate that physical environments have a huge impact on WMN performance.

## REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487, Mar. 2005.
- [2] V. Gambiroza, B. Sadeghi, and E. W. Knightly, "End-to-end performance and fairness in multihop wireless backhaul networks," in *Proc. ACM MOBICOM*, Sep. 2004, pp. 287–301.
- [3] J. Jun and M. L. Sichitiu, "Fairness and QoS in multihop wireless networks," in *Proc. IEEE VTC*, Oct. 2003, pp. 2936–2940.
- [4] J.-F. Lee, W. Liao, and M.-C. Chen, "An incentive-based fairness mechanism for multi-hop wireless backhaul networks with selfish nodes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 2, Feb. 2008.
- [5] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, Mar. 2000.
- [6] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Apr. 2001, pp. 1360–1369.
- [7] A. E. Gamal, J. Mammen, B. Prabhakar, and D. Shah, "Throughput-delay trade-off in wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Mar. 2004, pp. 464–475.
- [8] Tehiang Liu and Wanjuan Liao, "Location-Dependent Throughput and Delay in Wireless Mesh Networks," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 57, no. 2, March 2008.
- [9] Ernesto J. Rivera-Lara, Rogelio Herrerias-Hernández, Jesús A. Pérez-Díaz, and Carlos F. García-Hernández, "Analysis of the relationship between QoS and SNR for an 802.11g WLAN."
- [10] D. Gross and C. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken, NJ: Wiley, 1998, pp. 74–80.



## ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539 และ 2541 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบโทรคมนาคมที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จนกระทั่ง พ.ศ. 2543 จึงได้ย้ายมาเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกตั้งแต่นั้นปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland, Australia เมื่อ พ.ศ. 2549 จึงได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ MIMO, Information Theory, Signal Processing, Radio Wave Modelling, Mobile Communication, Advance Wireless Communication ปัจจุบันมีบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการ 21 บทความและในการประชุมวิชาการ 60 บทความ หนังสือวิชาการในประเทศ 1 เล่มและต่างประเทศ 1 เล่ม มีลิขสิทธิ์ 1 รายการและสิทธิบัตร 1 รายการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัล Young Scientist Travel Grant Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ International Symposium on Antenna Propagation ปี พ.ศ. 2547 ณ ประเทศญี่ปุ่น และได้รับรางวัล Best Student Presentation Award จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ Australian Symposium on Antenna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2553 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ได้รับรางวัลพนักงานดีเด่น ด้านการวิจัย สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี