

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะการส่งข้อมูลภาพในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอดนี้ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ

- การทดสอบขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลของโพรโตคอล CTP ด้วยโปรแกรม TOSSIM ในแง่ปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะห่างระหว่างโหนด โครงสร้างเครือข่าย จำนวนโหนด ขนาดของแพ็คเกจ เป็นต้น
- การทดสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพที่ถูกบีบอัดเมื่อส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด โดยประเมินค่าความเสียหายของภาพที่เกิดจากการส่งข้อมูลภาพด้วยวิธีการบีบอัดข้อมูลที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
- การทดสอบอัลกอริทึมสำหรับส่งข้อมูลภาพในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอดเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน วิเคราะห์เปรียบเทียบในด้านคุณภาพภาพ เวลาที่ใช้ในการส่ง และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการรับส่ง ได้แก่ ขนาดของบล็อก รูปแบบการบีบอัด เป็นต้น

4.1 การทดสอบขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลของโพรโตคอล CTP

การทดสอบขีดความสามารถของโพรโตคอล CTP ใช้โปรแกรม TOSSIM ของระบบปฏิบัติการ TinyOS ในการจำลองการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย อ้างอิงพฤติกรรมสัญญาณคลื่นวิทยุจากบอร์ด Mica2 ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR128 และไอซีสื่อสาร CC2420 ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 การทดสอบขีดความสามารถของโพรโตคอล CTP เพื่อออกแบบการจัดวางโหนดเซ็นเซอร์ให้เหมาะสมกับการส่งข้อมูลภาพ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ระยะห่างระหว่างโหนด รูปร่างของเครือข่าย จำนวนโหนด คาบเวลาที่ใช้ส่งข้อมูล จำนวนครั้งในการส่ง และขนาดของแพ็คเกจ ตัวบ่งชี้ คือ ร้อยละของข้อมูลที่ได้รับ ร้อยละของข้อมูลที่รับซ้ำซ้อน ร้อยละของข้อมูลที่ถูกส่งซ้ำซ้อนภายในเครือข่าย และระยะเวลาที่ใช้ในการสื่อสาร คำนวณค่าจากสมการที่ 4.1-4.3

$$percent_result = \frac{recv_net}{send_net} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ percent_result คือ ร้อยละของข้อมูล
 receive_net คือ จำนวนข้อมูลที่รับสุทธิ ไม่รวมข้อมูลที่รับซ้ำซ้อน
 send_net คือ จำนวนข้อมูลที่ส่งสุทธิ

$$\text{percent_duplicate} = \frac{\text{receive_all} - \text{receive_net}}{\text{receive_net}} \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ percent_duplicate คือ ร้อยละของข้อมูลที่รับซ้ำซ้อนของโหนดฐาน
 receive_all คือ จำนวนข้อมูลที่รับทั้งหมด
 receive_net คือ จำนวนข้อมูลที่รับสุทธิ ไม่รวมข้อมูลที่รับซ้ำซ้อน

$$\text{percent_snoop} = \frac{\text{snoop_all} - (\text{send_net} \times \text{hop_count})}{\text{send_net} \times \text{hop_count}} \times 100 \quad (4.3)$$

เมื่อ percent_snoop คือ ร้อยละของข้อมูลที่ถูกส่งซ้ำซ้อนภายในเครือข่าย
 snoop_all คือ จำนวนข้อมูลที่ส่งในเครือข่ายทั้งหมด
 send_net คือ จำนวนข้อมูลที่ส่งสุทธิ
 hop_count คือ จำนวนครั้งในการส่งข้อมูลในเครือข่าย กรณีสั้นที่สุด

4.1.1 การศึกษาปัจจัยของระยะห่างระหว่างโหนด

การทดสอบปัจจัยระยะห่างระหว่างโหนดเซ็นเซอร์ใช้การส่งข้อมูลระหว่างโหนด 2 โหนด โดยให้โหนดหนึ่งเป็นตัวส่งข้อมูลแบบกระจายสัญญาณ และอีกโหนดเป็นตัวรับข้อมูล ภายใต้เงื่อนไข

- โครงสร้างเครือข่าย: แบบทอดเดียว
- จำนวนโหนด: 2 โหนด
- ข้อมูลที่ใช้ส่ง: oscilloscope_t ขนาด 18 ไบต์ ดังตารางที่ 4.1
- จำนวนครั้งในการส่ง: 100 ครั้ง
- คาบเวลาที่ใช้ในการส่ง: 1 วินาที
- ระยะห่างระหว่างโหนด: 1, 2, 3, ..., 10 เมตร ตามลำดับ

การจำลองสภาพแวดล้อมใช้โปรแกรม TOSSIM กำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างของข้อมูล oscilloscope_t

ชื่อพารามิเตอร์	ชนิดพารามิเตอร์	ขนาด (ไบต์)	ความหมาย
version	uint16_t	2	จำนวนครั้งในการเปลี่ยนค่าคาบเวลาส่ง
interval	uint16_t	2	คาบเวลาในการส่งแพ็คเกจ
id	uint16_t	2	หมายเลขโหนดที่เป็นตัวส่ง
count	uint16_t	2	จำนวนครั้งในการส่งหรือหมายเลขแพ็คเกจ
readings[5]	uint16_t	10	ข้อมูลที่ต้องการส่ง

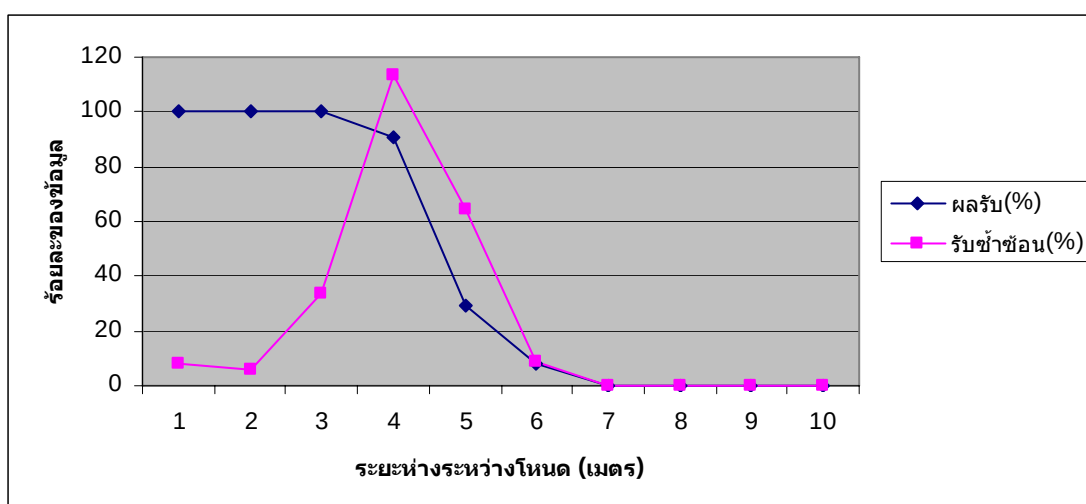
ตารางที่ 4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการจำลองสภาพแวดล้อมของเครือข่าย

ชื่อพารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
PATH_LOSS_EXPONENT	4.7	dBm
SHADOWING_STANDARD_DEVIATION	3.2	dB
D0	1.0	m
PL_D0	55.4	dB
NOISE_FLOOR	-105.0	dBm
S11	0.0	dB
S22	0.0	dB
WHITE_GAUSSIAN_NOISE	4.0	dB
TOPOLOGY	แบบเจาะจง	-
TOPOLOGY_FILE	topo.txt	-

โครงสร้างของไฟล์ topo.txt ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 0 กับ 1 และเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโหนดในแนวแกน x เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 เมตร ตามลำดับ เรากำหนดให้โหนดหมายเลข 0 เป็นตัวรับ โหนดหมายเลข 1 เป็นตัวส่งข้อมูลแบบกระจายสัญญาณ ทำงานด้วยคาบเวลา 1 วินาที เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า โดยส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับ 100 แล้วหยุดส่ง ได้ผลดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 เราได้ทำการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 50 รอบ จำแนกประเภทของข้อความจากนั้นจึงทำการเฉลี่ยจำนวนข้อความที่ตรวจพบ

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของระยะห่างโหนดกับตัวบ่งชี้แบบต่างๆ

ระยะห่าง (เมตร)	ผลรับ (%)	รับซ้ำซ้อน (%)	เวลา (sec)
1	100	8.12	0:8:26.007396231
2	99.97	5.95	0:8:26.007930285
3	99.93	33.66	0:8:26.002864397
4	90.79	113.74	0:8:26.031291497
5	28.91	64.73	0:8:26.616694966
6	7.92	9.09	0:8:26.012867831
7	0	0	-
8	0	0	-
9	0	0	-
10	0	0	-



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับผลรับและข้อมูลที่รับซ้ำซ้อน

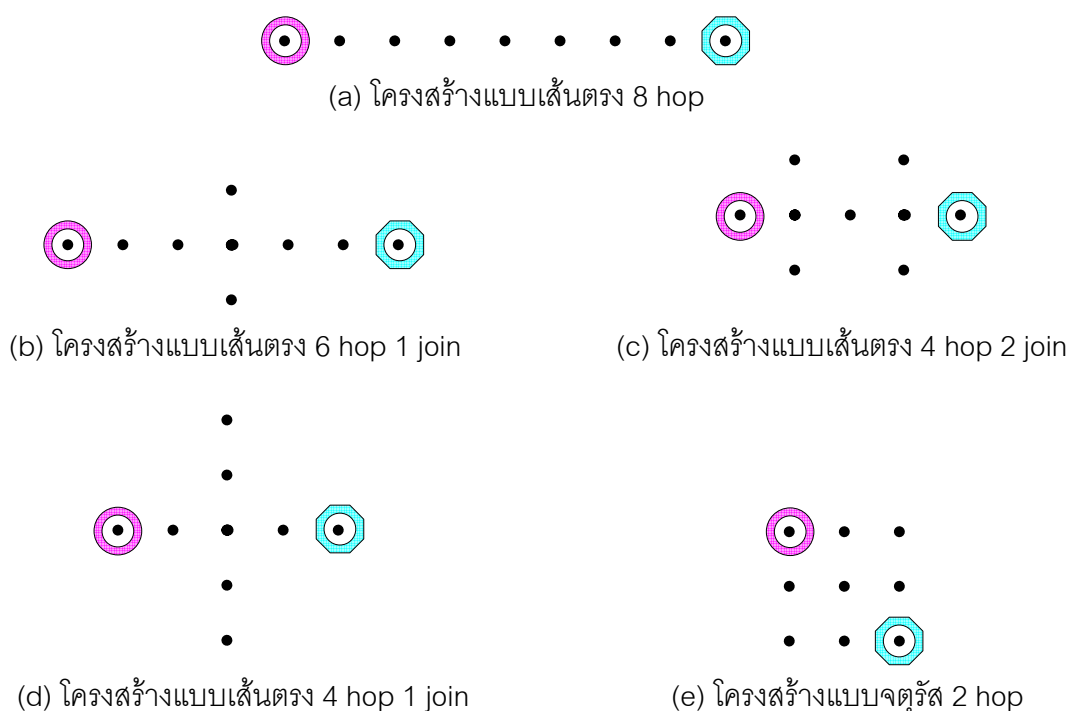
จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างโหนดไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ที่ระยะ 1, 2 และ 3 เมตร แทบไม่มีการสูญหายของข้อมูลเลย และมีข้อมูลที่รับซ้ำซ้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากระยะ 4 เมตร เริ่มมีการสูญหายของข้อมูล

บางส่วน แต่มีข้อมูลที่รับช้าขึ้นสูงที่สุด จากนั้นแนวโน้มของการได้รับข้อมูลจะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะทาง โดยเมื่อระยะห่างระหว่างโหนดมากกว่า 7 เมตรขึ้นไปไม่สามารถรับข้อมูลได้เลย

4.1.2 การศึกษาปัจจัยของโครงสร้างเครือข่าย

การทดสอบปัจจัยของโครงสร้างเครือข่ายอาศัยการส่งข้อมูลผ่านโหนดจำนวน 9 โหนด ซึ่งมีการจัดวางโครงสร้างในลักษณะต่างๆ โดยกำหนดให้ตัวรับและตัวส่งห่างกันมากที่สุด การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายถูกกำหนดเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 4.1.1 โดยเปลี่ยนปรับโครงสร้างเครือข่าย และระยะห่างดังนี้

- ทดสอบโครงสร้างเครือข่ายจำนวน 5 แบบ ดังรูปที่ 4.2
- ระยะห่างระหว่างโหนดเป็น 1 เมตร



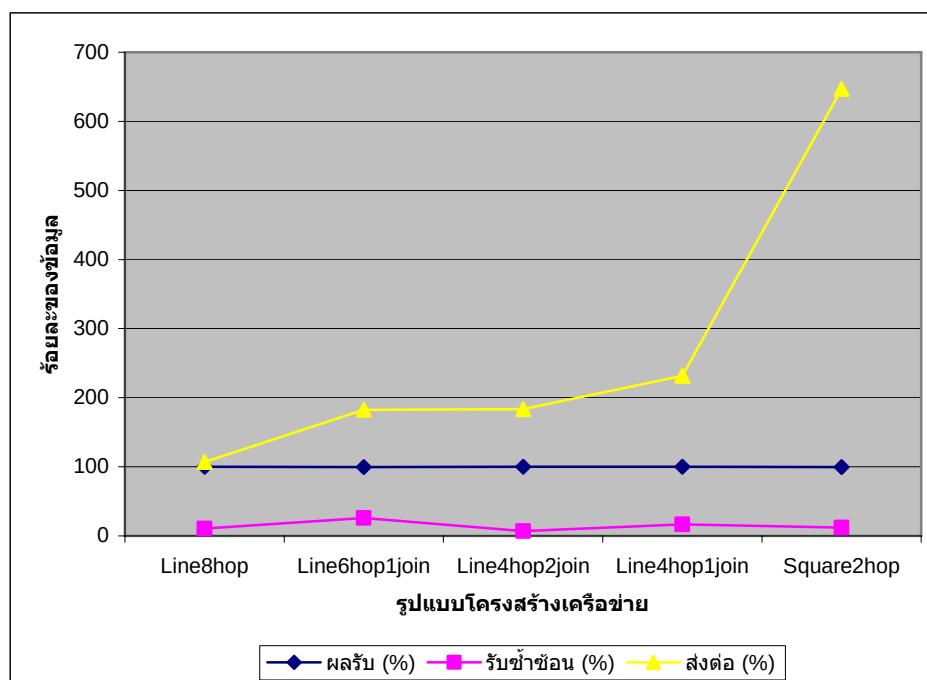
รูปที่ 4.2 โครงสร้างเครือข่ายที่ใช้ทดสอบ

การจำลองสภาพแวดล้อมใช้โปรแกรม TOSSIM โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ดังตารางที่ 4.2 โดยปรับแก้ข้อมูลในไฟล์ topo.txt ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 0 ถึง 8 ระยะห่างระหว่างโหนดในแนวแกน x เท่ากับ 1 เมตร เรากำหนดให้โหนดหมายเลข 0 เป็นตัวรับ โหนดหมายเลข 8 เป็นตัวส่งข้อมูลโดยใช้โพรโตคอล CTP ทำงานด้วยคาบเวลา 1 วินาที

เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า โดยส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับ 100 แล้วหยุดส่ง เราได้ทำการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 50 รอบ จำแนกประเภทของข้อความ จากนั้นจึงทำการเฉลี่ยจำนวนข้อความที่ตรวจพบ ได้ผลดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างเครือข่ายกับตัวบ่งชี้แบบต่างๆ

โครงสร้างเครือข่าย	ผลรับ (%)	รับซ้ำซ้อน (%)	ส่งต่อ (%)	เวลา (sec)
Line8hop	100	10.69	107.23	0:8:26.067367997
Line6hop1join	99.80	25.79	182.64	0:8:26.098149761
Line4hop2join	100	6.73	183.66	0:8:26.034748955
Line4hop1join	100	16.83	231.44	0:8:26.012867831
Square2hop	99.60	12.13	646.93	0:8:26.020771838



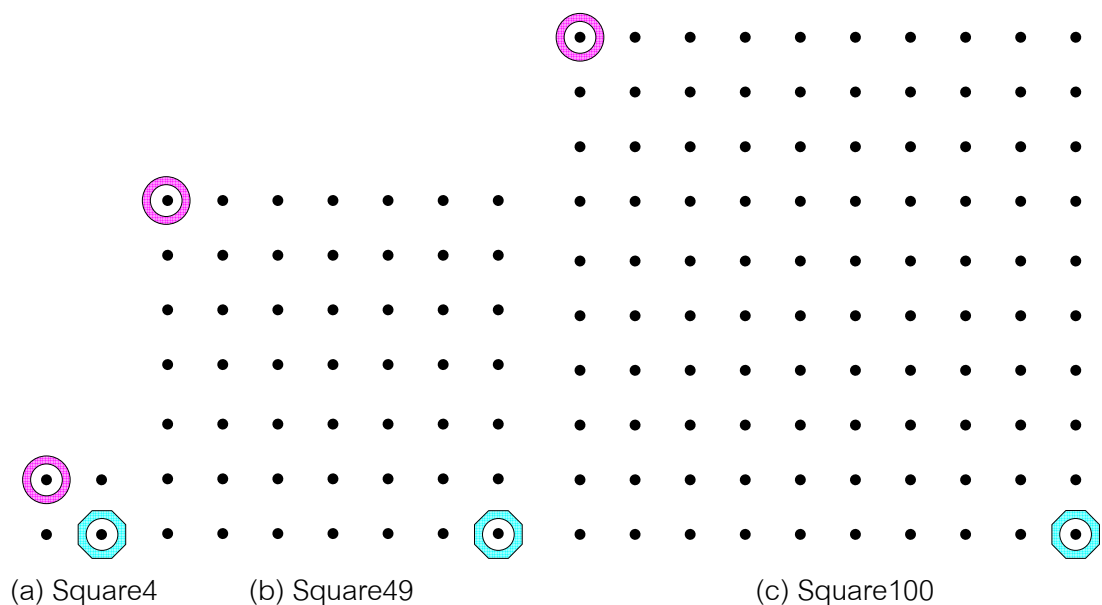
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบโครงสร้างเครือข่ายกับตัวบ่งชี้แบบต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ารูปแบบโครงสร้างเครือข่ายไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าร้อยละของข้อมูลที่ได้รับและข้อมูลที่รับซ้ำซ้อนมีค่าใกล้เคียงในโครงสร้างต่างๆ โดยโครงสร้างแบบ 6hop1join มีร้อยละของการรับข้อมูลซ้ำมากที่สุด ในขณะที่

ร้อยละของการส่งต่อข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนลิงค์ของโครงสร้างเครือข่าย โดยโครงสร้างแบบจัตุรัส 2hop มีร้อยละของการส่งต่อข้อมูลสูงกว่าแบบอื่นๆ อย่างเด่นชัด เนื่องจากเส้นทางการส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนกันที่สุด

4.1.3 การศึกษาปัจจัยของจำนวนโหนดในเครือข่ายแบบจัตุรัส

การทดสอบจำนวนโหนดในเครือข่ายแบบจัตุรัส โดยกำหนดจำนวนโหนดเป็น 4, 49, 100 ตามลำดับ โหนดหมายเลข 0 เป็นโหนดฐาน และโหนดหมายเลขสุดท้ายเป็นโหนดส่งข้อมูล ส่วนโหนดที่เหลือเป็นตัวกระจายข้อมูล การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายถูกกำหนดเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1 โดยปรับโครงสร้างเป็นเครือข่ายแบบจัตุรัส และทดสอบจำนวนโหนดเป็น 4, 49 และ 100 โหนดตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4

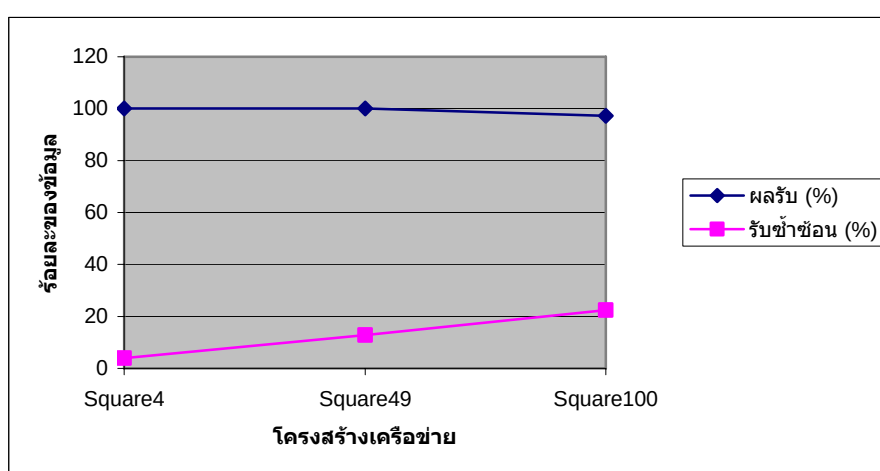


รูปที่ 4.4 โครงสร้างเครือข่ายแบบจัตุรัสที่มีจำนวนโหนดต่างๆ

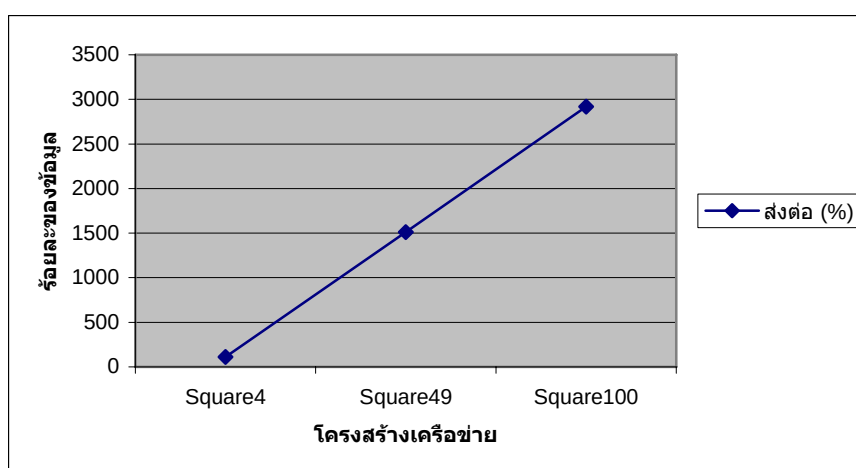
การจำลองสภาพแวดล้อมใช้โปรแกรม TOSSIM โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ดังตารางที่ 4.2 โดยปรับแก้ข้อมูลในไฟล์ topo.txt ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 0 ถึงจำนวนโหนดที่กำหนด ระยะห่างระหว่างโหนดในแนวแกน x และแกน y เท่ากับ 1 เมตร การรับส่งข้อมูลจะใช้โพรโตคอล CTP ทำงานด้วยคาบเวลา 1 วินาที เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า ส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับ 100 แล้วหยุดส่ง ผลจากการจำลองสถานการณ์ 50 รอบได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5-4.6

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดของโครงสร้างแบบจัตุรัสกับตัวบ่งชี้ต่างๆ

จำนวนโหนด (Square)	ผลรับ (%)	รับเข้าซ้อน (%)	ส่งต่อ (%)	เวลา (sec)
4	100	3.96	109.70	0:8:26.010376419
49	100	12.87	1512.97	0:8:26.080335929
100	97.23	22.41	2918.46	0:8:26.039153138



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดในโครงสร้างแบบจัตุรัสกับตัวบ่งชี้ต่างๆ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดในโครงสร้างแบบจัตุรัสกับร้อยละข้อมูล

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าจำนวนโหนดในโครงสร้างแบบจัตุรัสไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าร้อยละของการรับข้อมูลมีค่าลดลงเล็กน้อยตามจำนวน

โหนดที่เพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละของการรับข้อมูลเข้าชั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ร้อยละของการส่งต่อข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง

4.1.4 การศึกษาปัจจัยของระยะห่างระหว่างโหนดในเครือข่ายแบบจัตุรัส

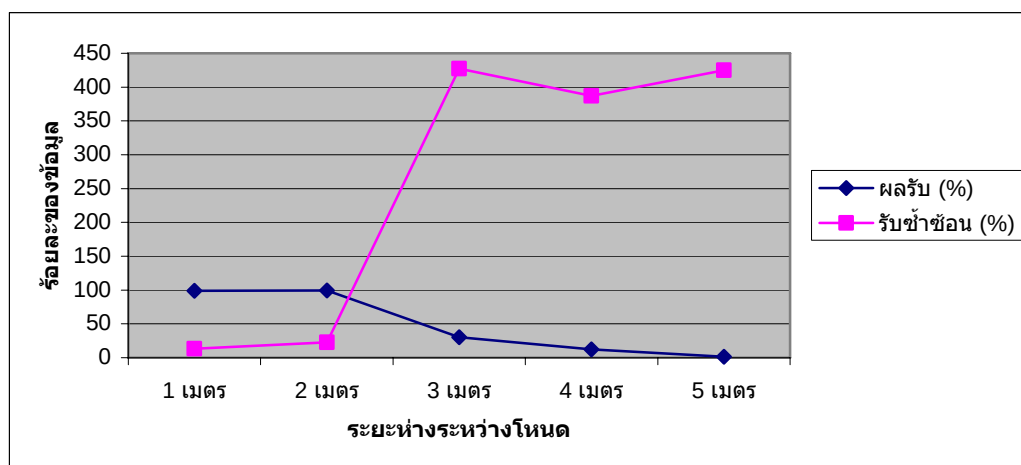
การศึกษาศักยภาพระยะห่างระหว่างโหนดในการจำลองเครือข่ายแบบจัตุรัสขนาด 10×10 โหนด โดยกำหนดระยะห่างเป็น 1 ถึง 5 เมตร ตามลำดับ โดยอ้างอิงตามผลการศึกษาระยะทางในข้อ 4.1.1 โหนดหมายเลข 0 เป็นโหนดฐาน และโหนดหมายเลข 99 เป็นโหนดส่งข้อมูล ส่วนโหนดที่เหลือเป็นตัวกระจายข้อมูล การรับส่งข้อมูลใช้เงื่อนไขเดียวกับหัวข้อ 4.1.1 โดยปรับโครงสร้างเครือข่าย จำนวนโหนด และระยะห่าง ดังนี้

- โครงสร้างเครือข่ายแบบจัตุรัส
- จำนวนโหนดเป็น 100 โหนด ดังรูปที่ 4.4 (c)
- ทดสอบระยะห่างระหว่างโหนดเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 เมตร

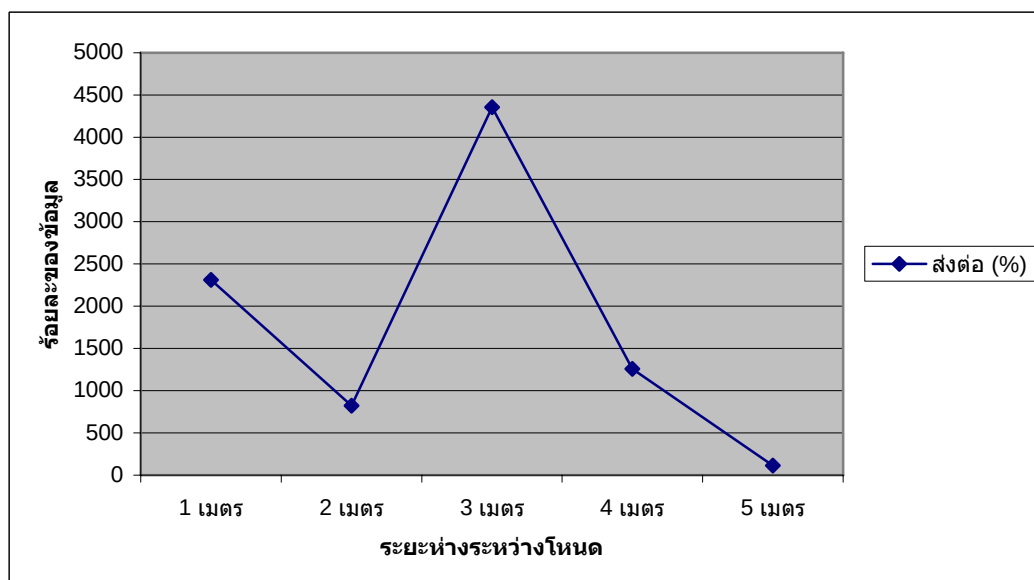
การจำลองสภาพแวดล้อมเครือข่ายปรับแก้ไฟล์ topo.txt ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 0 ถึง 100 และตั้งระยะห่างระหว่างโหนดในแนวแกน x และแกน y เท่ากับ 1 เมตร การรับส่งข้อมูลใช้โพรโตคอล CTP ทำงานด้วยคาบเวลา 1 วินาที เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า โดยส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับ 100 แล้วหยุดส่ง ได้ผลดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7-4.8

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างโหนดในเครือข่ายจัตุรัสกับตัวบ่งชี้ต่างๆ

ระยะห่าง (เมตร)	ผลรับ (%)	รับเข้าชั้น (%)	ส่งต่อ (%)	เวลา (sec)
1	98.81	13.23	2310.36	0:8:26.161821007
2	99.41	22.49	820.11	0:8:26.145894410
3	30.33	427.45	4357.70	0:8:26.000991020
4	12.28	387.10	1258.79	0:8:26.000991020
5	1.43	425.00	115.34	0:8:26.000991020



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างโหนดในเครือข่ายจัดรัศกับตัวบ่งชี้ต่างๆ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างโหนดในเครือข่ายจัดรัศกับร้อยละของข้อมูลส่งต่อ

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าร้อยละของการรับข้อมูลมีค่าลดลงตามระยะห่างระหว่างโหนดที่เพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละของข้อมูลรับข้อมูลซ้ำซ้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างโหนดที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ 1 และ 2 เมตร มีความน่าเชื่อถือในการรับข้อมูลเกือบครบถ้วน และมีการส่งข้อมูลซ้ำซ้อนน้อยมาก ส่วนที่ระยะ 3 ถึง 5 เมตร จำนวนข้อมูลที่ได้รับลดลงอย่างมากจนเกือบรับไม่ได้เลย ในขณะที่ข้อมูลที่ได้รับกลับมีความซ้ำซ้อนสูงมาก หากเทียบกับรูปที่ 4.1 จะพบว่าที่ระยะ 3 และ 4 เมตร ความน่าจะเป็นที่ข้อมูลจะส่งถึงปลายทางสูงกว่ารูปที่ 4.7 มาก เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้น และจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ร้อยละของการส่ง

ต่อข้อมูลมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในช่วง 1 ถึง 5 เมตร เนื่องจากที่ระยะ 1 เมตร โหนดแต่ละตัวอยู่ในระยะที่สามารถสื่อสารได้ดี และสามารถส่งข้อมูลข้ามโหนดได้ จึงเกิดการส่งข้อมูลซ้ำซ้อนขึ้น ส่วนที่ระยะ 2 เมตร มีการส่งข้อมูลข้ามโหนดน้อยกว่า จึงเกิดการส่งข้อมูลซ้ำซ้อนน้อยกว่า ส่วนที่ระยะ 3 เมตร เนื่องจากเป็นโครงสร้างเครือข่ายแบบซับซ้อน ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลมากขึ้น ยิ่งระยะห่างเพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสส่งข้อมูลสำเร็จลดลง และจึงเพิ่มปริมาณของการส่งข้อมูลในเครือข่ายมากขึ้น

4.1.5 การศึกษาปัจจัยของคาบเวลาที่ใช้ส่ง

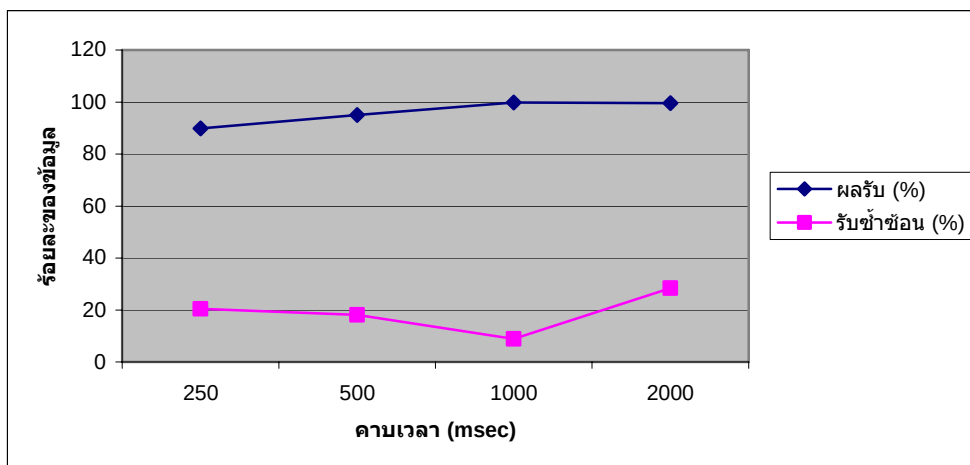
การศึกษาค่าปัจจัยของคาบเวลาที่ใช้ส่งในการจำลองเครือข่ายแบบจัตุรัสขนาด 10x10 โหนด โดยกำหนดคาบเวลาเป็น 250, 500, 1000, และ 2000 msec ตามลำดับ โหนดหมายเลข 0 เป็นโหนดฐาน และโหนดหมายเลข 99 เป็นโหนดส่งข้อมูล ส่วนโหนดที่เหลือเป็นตัวกระจายข้อมูล การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายถูกกำหนดเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1 โดยปรับโครงสร้างเครือข่าย จำนวนโหนด และคาบเวลาที่ใช้ในการส่ง ดังนี้

- โครงสร้างเครือข่ายแบบจัตุรัส
- จำนวนโหนดเป็น 100 โหนด ดังรูปที่ 4.4 (c)
- ทดสอบคาบเวลาที่ใช้ในการส่ง 250, 500, 1000, และ 2000 msec

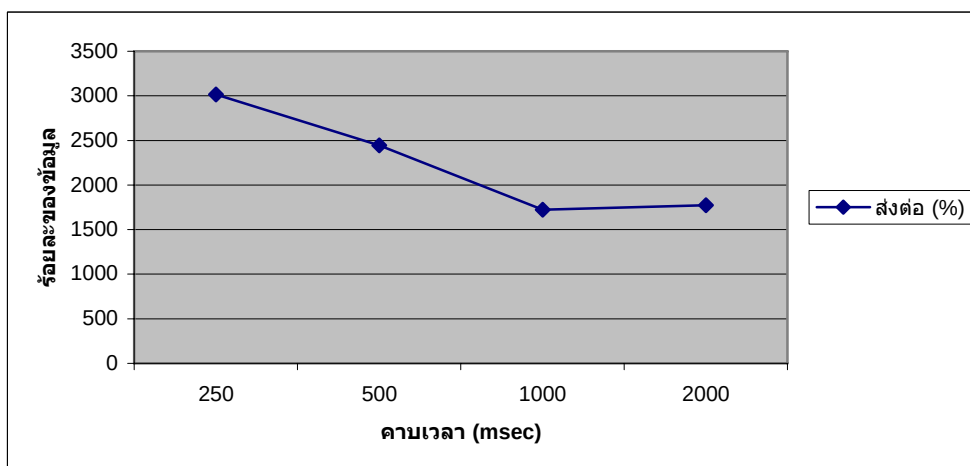
การจำลองสภาพแวดล้อมใช้โปรแกรม TOSSIM โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ดังตารางที่ 4.2 และปรับแก้ไฟล์ topo.txt ที่ระยะ 1 เมตร ดังหัวข้อ 4.1.4 การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายใช้โพรโตคอล CTP ทำงานด้วยคาบเวลาที่กำหนด เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า โดยส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับ 100 แล้วหยุดส่ง ได้ผลดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9-4.11

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาที่ใช้ในการส่งกับตัวบ่งชี้ต่างๆ

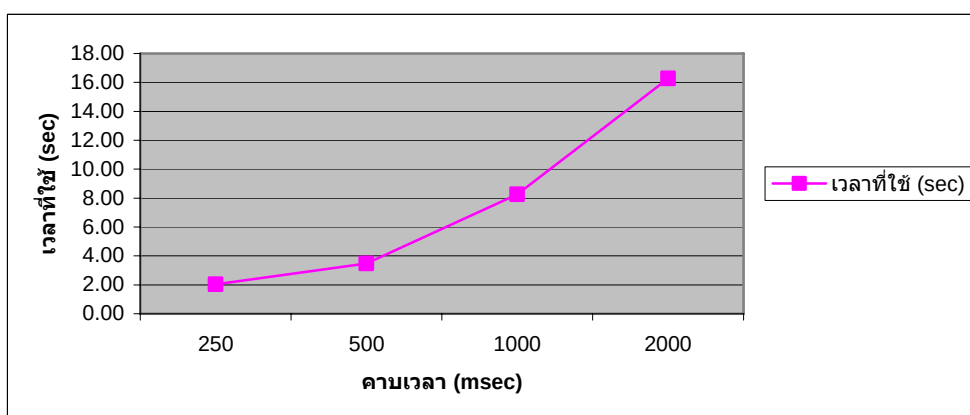
ช่วงเวลา (msec)	ผลรับ (%)	รับซ้ำซ้อน (%)	ส่งต่อ (%)	เวลา (sec)
250	89.90	20.48	3014.81	0:02:03.662048809
500	95.05	18.13	2446.40	0:03:48.484620737
1000	99.80	8.91	1721.61	0:08:26.049537825
2000	99.60	28.48	1771.75	0:16:28.407025107



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาที่ใช้ส่งกับตัวบ่งชี้ต่างๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาที่ใช้ส่งกับร้อยละของข้อมูลการส่งต่อ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาในการส่งกับเวลาที่ใช้ทั้งหมด

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ความสำเร็จในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นตามคาบเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาบเวลา 250 ถึง 500 msec เป็นคาบเวลาที่น้อยเกินไปไม่สามารถรับส่งข้อมูลขนาด 18 ไบต์ได้ทัน ส่วนคาบเวลา 1000 ถึง 2000 msec เป็นคาบเวลาที่เหมาะสมกับโครงสร้างเครือข่ายในการส่งจากต้นทางไปยังปลายทาง ในขณะที่จำนวนการรับข้อมูลซ้ำซ้อนมีค่าลดลงถึงจุดหนึ่งแล้วจึงเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.10 ร้อยละของข้อมูลส่งต่อลดลงตามเวลาที่ลดลงจนถึงจุดหนึ่งแล้วจึงเกือบคงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบๆ ที่คาบเวลา 250 ถึง 500 msec เนื่องจากเมื่อคาบเวลามากขึ้น จะเกิดการตกค้างของแพ็คเกจที่ส่งลดลงทำให้ลดการส่งต่อของข้อมูลที่ส่งก่อนหน้านี้ ส่วนที่คาบเวลา 1000 ถึง 2000 msec ร้อยละของข้อมูลส่งต่อลดลงจนเกือบคงที่ เนื่องจากคาบเวลาที่ใช้ทำให้ส่งข้อมูลจำนวน 1 แพ็คเกจจากต้นทางไปยังปลายทางได้สำเร็จ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อ การส่งข้อมูลในรอบถัดไป จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการสื่อสารเพิ่มขึ้นตามคาบเวลาที่เพิ่มขึ้น

4.1.6 การศึกษาปัจจัยของจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่งกับตัวบ่งชี้ต่างๆ

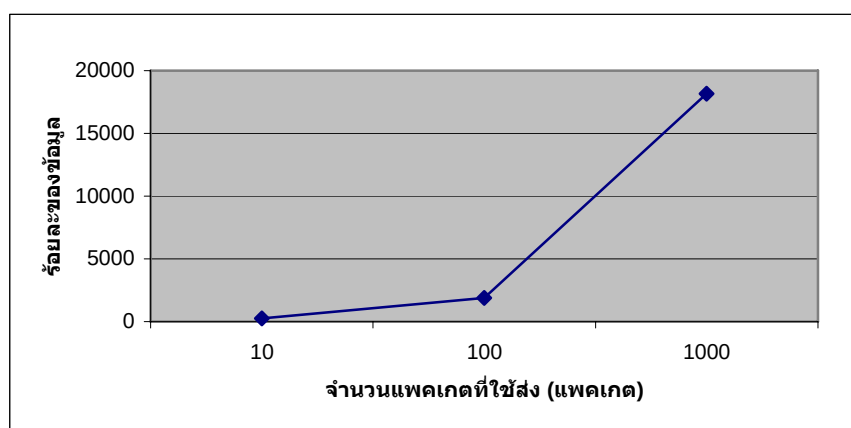
การทดสอบปัจจัยของจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่งกับตัวบ่งชี้แบบต่างๆ อาศัยการเปลี่ยนจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่งเข้าสู่เครือข่ายที่ละ 10, 100 และ 1000 ครั้งตามลำดับ โหนดหมายเลข 0 เป็นโหนดฐาน และโหนดหมายเลข 99 เป็นโหนดส่งข้อมูล ส่วนโหนดที่เหลือเป็นตัวกระจายข้อมูล การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายถูกกำหนดเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1 โดยปรับโครงสร้างเครือข่าย จำนวนโหนด และขนาดของแพ็คเกจ ดังนี้

- โครงสร้างเครือข่ายแบบจัดรัศมี
- จำนวนโหนดเป็น 100 โหนด ดังรูปที่ 4.4 (c)
- ทดสอบจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่งคือ 10, 100 และ 1000 แพ็คเกจ ตามลำดับ

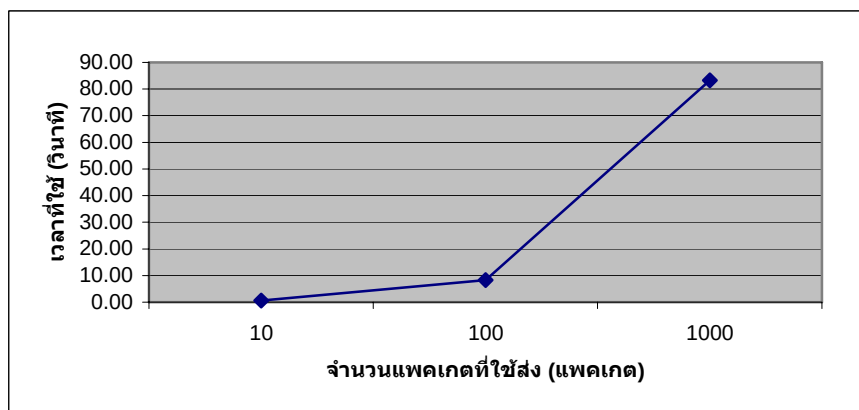
การจำลองสภาพแวดล้อมใช้โปรแกรม TOSSIM กำหนดค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ และไฟล์ topo.txt ที่ระยะ 1 เมตร ดังหัวข้อ 4.1.4 การรับส่งข้อมูลใช้โพรโตคอล CTP ทำงานด้วยคาบเวลา 1 วินาที เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า โดยส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่งแล้วหยุดส่ง ได้ผลดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12-4.13

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแพคเกจที่ใช้ส่งกับตัวบ่งชี้แบบต่างๆ

จำนวนแพคเกจที่ใช้ส่ง	ผลรับ (%)	รับช้าขึ้น (%)	ส่งต่อ (%)	เวลา (sec)
10	92.42	9.83	265.32	0:0:56.065550729
100	99.21	9.78	1899.82	0:8:26.049513816
1000	99.84	11.89	18166.23	1:23:26.104464283



รูปที่ 4.12 จำนวนแพคเกจที่ใช้ส่งกับร้อยละของข้อมูลการส่งต่อ



รูปที่ 4.13 จำนวนแพคเกจที่ใช้ส่งกับเวลาที่ใช้

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าร้อยละของการรับข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนแพคเกจที่ใช้ส่งเนื่องจากในช่วงแรกของการส่งข้อมูลจะมีการหาเส้นทางในการสื่อสาร หลังจากนั้นจึงส่งข้อมูลตามปกติ ดังนั้น จำนวนแพคเกจที่ใช้ส่งมาก ทำให้ค่าร้อยละในการรับข้อมูลมากด้วย ส่วนจำนวนข้อมูลที่ได้รับช้าขึ้น มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนแพคเกจที่ใช้ส่งเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.12 ร้อยละของ

ข้อมูลส่งต่อมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่ง เนื่องจากเกิดการทวนข้อมูลในเครือข่ายมาก จากรูปที่ 4.13 เวลาที่ใช้ในการสื่อสารมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ส่งเพิ่มขึ้น

4.1.7 การศึกษาปัจจัยขนาดแพ็คเกจกับตัวบ่งชี้ต่างๆ

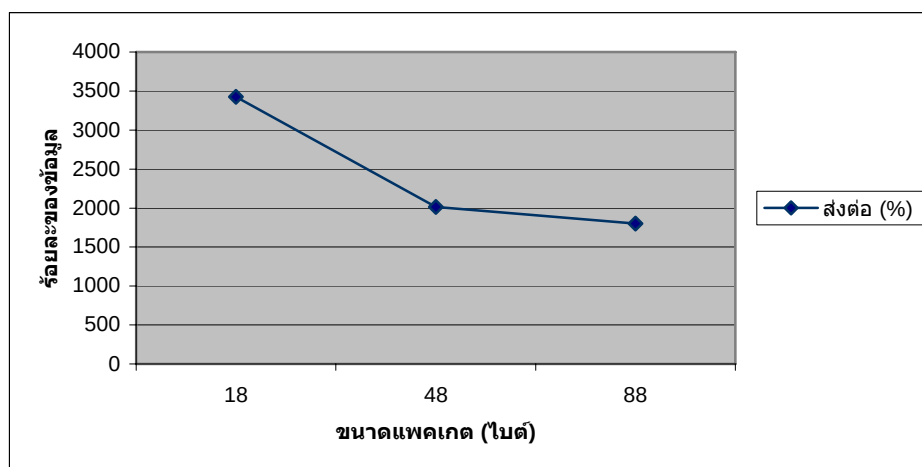
การทดสอบปัจจัยของขนาดของแพ็คเกจกับตัวบ่งชี้ต่างๆ อาศัยการเปลี่ยนความยาวของแพ็คเกจเป็น 18, 48 และ 88 ไบต์ โหนดหมายเลข 0 เป็นโหนดฐาน และโหนดหมายเลข 99 เป็นโหนดส่งข้อมูล ส่วนโหนดที่เหลือเป็นตัวกระจายข้อมูล การรับส่งข้อมูลในเครือข่ายถูกกำหนดเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1 โดยปรับโครงสร้างเครือข่าย จำนวนโหนด และขนาดของแพ็คเกจ ดังนี้

- โครงสร้างเครือข่ายแบบจตุรัส
- จำนวนโหนดเป็น 100 โหนด ดังรูปที่ 4.4 (c)
- ทดสอบขนาดของข้อมูลที่ใช้ส่ง คือ oscilloscope_t ดังตารางที่ 4.1 โดยเพิ่มขนาด readings[5] เป็น readings[20] และ readings[40] ตามลำดับ ได้ข้อมูลขนาด 18, 48 และ 88 ไบต์

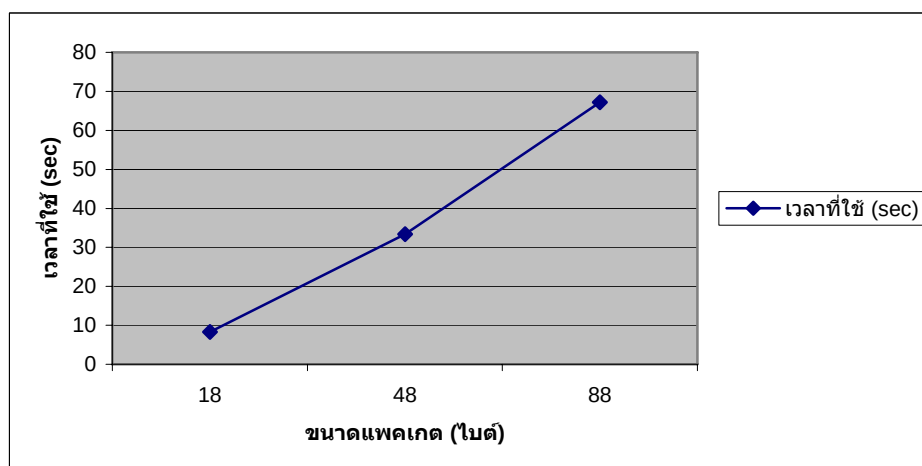
ในส่วนของ Makefile ของ nesc เราได้ปรับแก้ MSG_SIZE=100 เพื่อกำหนดขนาดข้อมูลสูงสุดที่สามารถส่งได้เป็น 100 ไบต์ เนื่องจากขนาดแพ็คเกจสูงสุดที่ส่งได้ปกติเท่ากับ 29 ไบต์ การจำลองสภาพแวดล้อมใช้โปรแกรม TOSSIM โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ดังตารางที่ 4.2 และปรับแก้ไฟล์ topo.txt ที่ระยะ 1 เมตร ดังหัวข้อ 4.1.4 การสื่อสารใช้โพรโตคอล CTP ทำงานด้วยคาบเวลา 1 วินาที เพิ่มค่า count ขึ้นทีละค่า โดยส่งข้อมูลจนค่า count เท่ากับ 100 แล้วหยุดส่ง ได้ผลดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14-4.15

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแพ็คเกจกับตัวบ่งชี้ต่างๆ

ขนาดแพ็คเกจ (bytes)	ผลรับ (%)	รับซ้ำซ้อน (%)	ส่งต่อ (%)	เวลา (sec)
18	95.25	12.47	3425.21	0:08:26.112609866
48	98.81	9.80	2013.80	0:33:41.184461932
88	99.80	8.68	1800.18	1:07:21.070296165



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแพ็คเกจข้อมูลกับร้อยละของข้อมูลการส่งต่อ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแพ็คเกจข้อมูลกับเวลาที่ใช้ส่ง

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ร้อยละของข้อมูลส่งต่อลดลงตามขนาดแพ็คเกจที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยิ่งแพ็คเกจมีขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาในการส่งนานกว่าแพ็คเกจขนาดเล็ก ทำให้จำนวนข้อมูลที่ส่งต่อในเครือข่ายน้อยกว่า จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการสื่อสารเพิ่มขึ้นตามขนาดแพ็คเกจที่เพิ่มขึ้น

4.1.8 สรุปการศึกษาคำจจัย

จากการทดสอบโครงสร้างเครือข่ายที่มีความซับซ้อนมากที่สุดคือ โครงสร้างเครือข่ายแบบจัดสุ่มจำนวน 100 โหนด ระยะห่างระหว่างโหนดที่มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอยู่

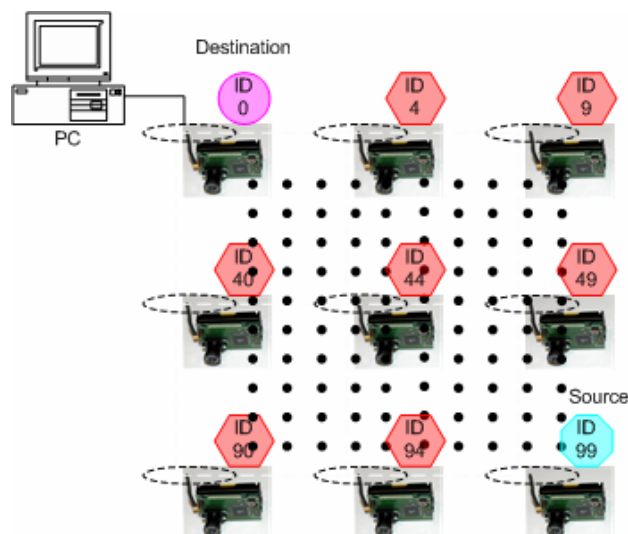
ที่ 2 เมตร คาบเวลาที่เหมาะสมไม่ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลคือ 1 วินาที ขนาดข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลสูง มีจำนวนการรับส่งข้อมูลที่ไม่จำเป็นต่ำ คือ 88 ไบต์

4.2 การศึกษาผลกระทบของการสูญเสียแพคเกจขณะส่งข้อมูลภาพ

การทดสอบความคงทนของข้อมูลภาพแบบ BMP และ JPEG [18] เมื่อเกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน ใช้การจำลองสถานการณ์การส่งข้อมูลภาพในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด โดยศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพ เปรียบเทียบระหว่างภาพที่จัดเก็บแบบ BMP และแบบ JPEG ใน 4 กรณีคือ ตำแหน่งของแพคเกจที่สูญหาย จำนวนแพคเกจที่สูญหาย ระหว่างจัดส่ง ขนาดของแพคเกจข้อมูลที่ใช้จัดส่ง และขนาดของภาพต้นฉบับที่ใช้ส่ง

การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายและตำแหน่งของโหนดต่างๆ เป็นดังรูปที่ 4.16 โดยใช้ภาพของทุ่งนา ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งมีรายละเอียดของภาพดังตารางที่ 4.10 และการจำลองการส่งข้อมูลภาพในเครือข่ายกำหนดสภาพแวดล้อมภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- โครงสร้างของเครือข่าย: แบบจัตุรัส
- จำนวนโหนด: 100 โหนด
- ระยะห่างระหว่างโหนด: 1 เมตร
- คาบเวลาในการส่ง: 1 วินาที
- โปรโตคอล: collection tree
- การจัดเก็บข้อมูลภาพ: BMP และ JPEG
- ข้อมูลที่ใช้ส่ง: ขนาดไม่เกิน 100 ไบต์



รูปที่ 4.16 การวางโครงสร้างของเซ็นเซอร์โหนด



รูปที่ 4.17 ภาพที่ใช้ในการทดสอบ

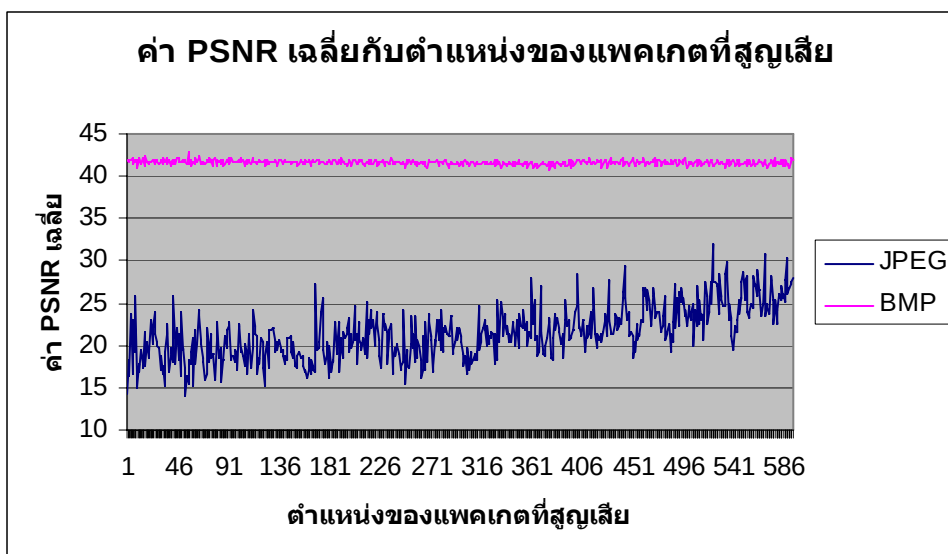
ตารางที่ 4.10 รายละเอียดภาพต้นฉบับที่ใช้ทดสอบ

ขนาดภาพ (24 bpp)	BMP (KB)	JPEG (KB)
QQVGA (160x120)	56.30	50.51
QVGA (320x240)	225.05	114.12
VGA (640x480)	900.05	236.29

เรากำหนดหมายเลขโหนดเป็น 0-99 โดยให้หมายเลข 0 เป็นตัวรับข้อมูล หมายเลข 99 เป็นตัวส่งข้อมูล โดยให้หมายเลข 4, 9, 40, 44, 49, 90 และ 94 เป็นตัวส่งสัญญาณรบกวน ขนาด 2 ไบต์ คาบเวลาที่ใช้ 1 วินาที ตลอดการส่งข้อมูลภาพ ผลการจำลองการส่งข้อมูลปรากฏว่า โหนดแต่ละตัวสามารถส่งข้อมูลถึงโหนดฐานเฉลี่ยร้อยละ 91 ระหว่างการจัดส่งเกิดการสูญหายของแพคเกจร้อยละ 9 ซึ่งความสูญเสียระดับนี้ทำให้ภาพทั้งแบบ BMP และ JPEG ผิดเพี้ยนไปจากเดิมมาก

4.2.1 การศึกษาศึกษาปัจจัยของตำแหน่งของแพคเกตที่สูญหาย

การทดสอบผลกระทบของตำแหน่งของแพคเกตที่สูญหายที่มีต่อคุณภาพภาพ ใช้การละทิ้งแพคเกตขนาด 100 ไบต์ ที่ละแพคเกตที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 600 ตำแหน่ง โดยละเว้นส่วนหัวของข้อมูลภาพแบบต่างๆ เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญ หากเกิดการสูญหายจะไม่สามารถแสดงภาพได้ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18

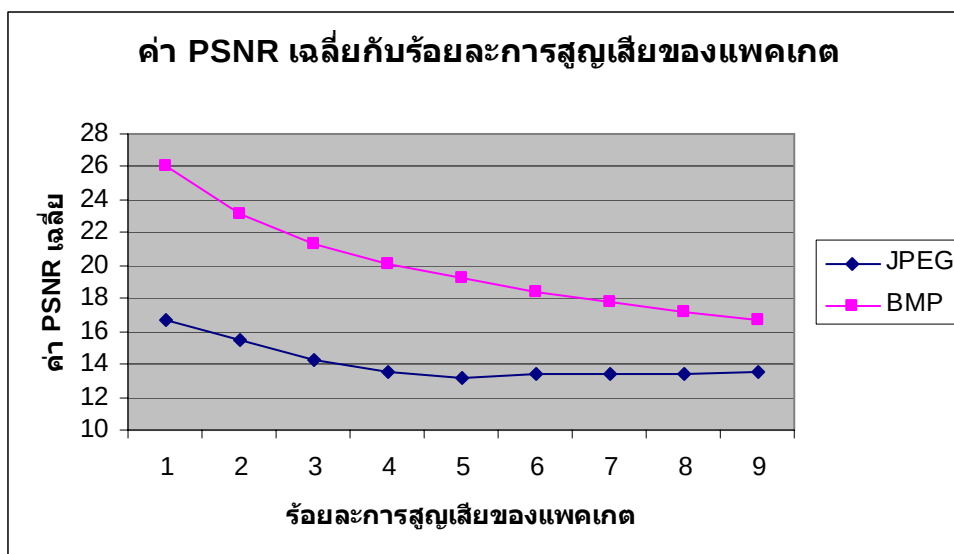


รูปที่ 4.18 ค่าคุณภาพภาพกับตำแหน่งข้อมูลที่สูญหาย

จากรูปที่ 4.18 ในกรณีการบีบอัดแบบ JPEG ค่า PSNR มีค่าอยู่ในช่วง 15-30 dB และมีค่าสูงขึ้นในตำแหน่งตอนปลาย แสดงว่าการสูญหายของแพคเกตในตำแหน่งต่างๆ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพ จะเห็นได้ว่าการสูญหายแพคเกตที่ตำแหน่งต่างๆ ส่งผลให้คุณภาพภาพต่างกัน ส่วนภาพชนิด BMP มีค่า PSNR อยู่ที่ประมาณ 41 dB ในทุกตำแหน่งของแพคเกต เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ไม่มีการบีบอัดทำให้การสูญหายแพคเกตไม่ส่งผลกระทบต่อส่วนอื่นของภาพ

4.2.2 การศึกษาปัจจัยของจำนวนแพคเกตที่สูญหาย

การทดสอบผลกระทบของจำนวนแพคเกตที่สูญหายที่มีต่อคุณภาพภาพ ใช้การสุ่มละทิ้งแพคเกต จำนวน 50 ครั้ง โดยเพิ่มการสูญหายของแพคเกตข้อมูลจากร้อยละ 1-9 กราฟแสดงคุณภาพภาพดังรูปที่ 4.19

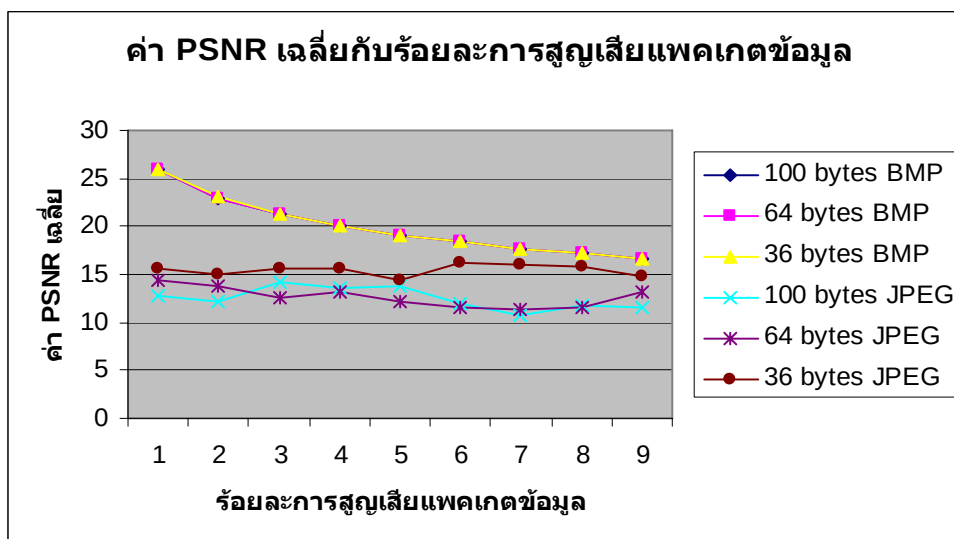


รูปที่ 4.19 คุณภาพภาพกับจำนวนของแพคเกตข้อมูลที่สูญหายร้อยละ 0-9

ภาพทั้งชนิด BMP และ JPEG เมื่อจำนวนแพคเกตคงที่ และจำนวนแพคเกตที่สูญหายเพิ่มขึ้น ทำให้คุณภาพภาพลดลง โดยที่ความสูญเสียระดับเดียวกัน JPEG มีค่าคุณภาพภาพน้อยกว่า BMP เสมอ เนื่องจากการสูญเสียข้อมูลบางส่วนจากกระบวนการบีบอัดภาพเป็นค่าเริ่มต้นเสมอ และที่ค่าคุณภาพภาพเท่ากัน BMP มีการสูญเสียข้อมูลมากกว่า JPEG เสมอ เนื่องจากการสูญเสียแพคเกตข้อมูลของ BMP ไม่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลอื่นๆ ของภาพ จึงทำให้ค่าคุณภาพภาพลดลงน้อยกว่า JPEG มาก

4.2.3 การศึกษาปัจจัยของขนาดของแพคเกตที่ใช้จัดส่ง

การทดสอบผลกระทบของขนาดของแพคเกตที่ใช้จัดส่งที่มีต่อคุณภาพภาพ ใช้การส่งแพคเกตข้อมูลขนาด 36, 64 และ 100 ไบต์ จำนวน 50 ครั้ง ทั้งภาพชนิด BMP และ JPEG โดยพิจารณาที่อัตราการสูญหายของข้อมูล 1-9% ดังรูปที่ 4.20 และค่าคุณภาพภาพดังตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.20 คุณภาพภาพกับขนาดของแพ็คเกจข้อมูลที่ใช้ส่ง

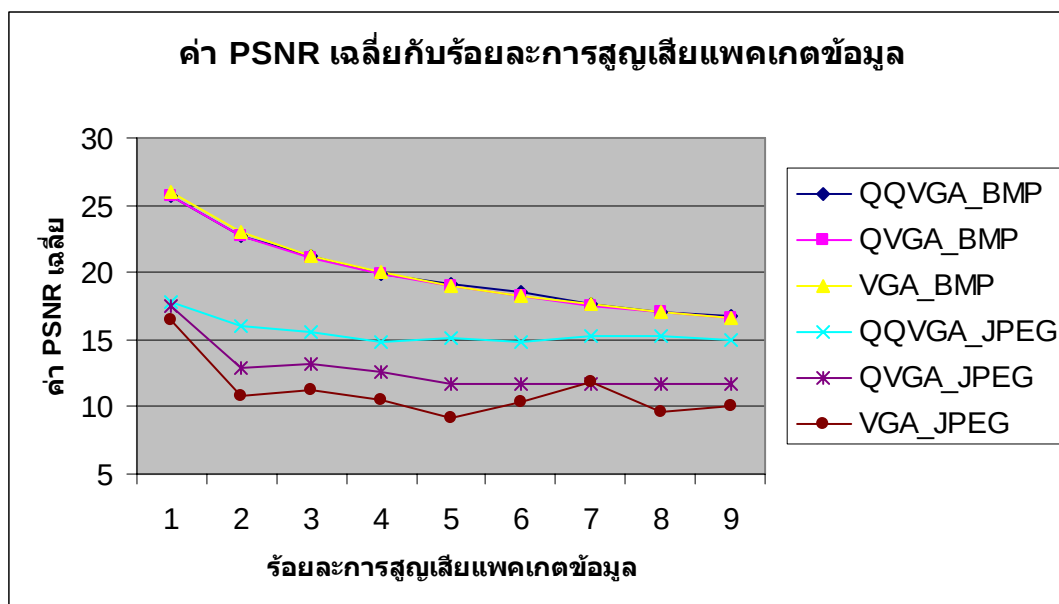
ตารางที่ 4.11 คุณภาพภาพกับขนาดของแพ็คเกจที่สูญเสียหายที่ 9%

ขนาดของแพ็คเกจ (ไบต์)	PSNR (dB)	
	BMP	JPEG
36	16.65	11.48
64	16.69	13.18
100	16.65	14.75

จากตารางที่ 4.11 ภาพชนิด BMP คุณภาพภาพลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยขนาดของแพ็คเกจไม่มีผลต่อค่าคุณภาพภาพ ส่วนภาพชนิด JPEG ที่มีการสูญเสียแพ็คเกจข้อมูลร้อยละ 1-5 ค่าคุณภาพภาพมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการสูญเสียแพ็คเกจข้อมูลร้อยละ 6-8 บล็อกขนาด 6x6 พิกเซล มีค่าคุณภาพภาพมากกว่าบล็อกขนาด 8x8 และ 10x10 พิกเซล เมื่อพิจารณาการสูญหายของแพ็คเกจ 9% พบว่า ภาพทั้งชนิด BMP และ JPEG คุณภาพภาพมีความแตกต่างกันน้อยมาก จะเห็นได้ว่าขนาดของแพ็คเกจที่ใช้ส่งไม่มีผลต่อคุณภาพภาพ

4.2.4 การศึกษาปัจจัยของขนาดของภาพต้นฉบับ

การทดสอบผลกระทบของขนาดของภาพต้นฉบับที่ใช้ส่งที่มีต่อคุณภาพภาพ แบ่งเป็น 3 ระดับคือ VGA, QVGA และ QQVGA ตามลำดับ จำนวน 50 ครั้ง โดยพิจารณาที่อัตราการสูญหายของข้อมูลที่ร้อยละ 1-9 ผลดังรูปที่ 4.21 และค่าคุณภาพภาพดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.21 คุณภาพภาพกับขนาดของภาพต้นฉบับ

ตารางที่ 4.12 คุณภาพภาพกับขนาดของภาพต้นฉบับที่สูญเสียที่ 9% (ขนาดแพ็คเกจ = 100 ไบต์)

ขนาดภาพ	PSNR (dB)	
	BMP	JPEG
VGA	16.65	10.03
QVGA	16.64	11.72
QQVGA	16.68	14.80

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดการสูญเสียแพ็คเกจข้อมูลบางส่วน ส่งผลให้ค่าคุณภาพภาพลดลงอย่างมาก เนื่องจากแพ็คเกจที่สูญเสียส่งผลกระทบโดยตรงต่อการแปลงภาพทั้งภาพกลับคืนมา จากตารางที่ 4.12 ภาพทั้งชนิด BMP และ JPEG เมื่อพิจารณาการสูญเสียของแพ็คเกจ 9% พบว่าคุณภาพภาพมีความแตกต่างกันน้อยมาก จะเห็นได้ว่าขนาดของภาพต้นฉบับไม่มีผลต่อคุณภาพภาพ

4.2.5 การสรุปศึกษาปัจจัย

การศึกษาคุณภาพของข้อมูลภาพแบบ BMP และ JPEG ที่รับส่งในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด พบว่าการจำลองสถานการณ์รูปแบบของข้อมูลที่สูญหายในรูปแบบแพ็คเกจไม่ใช่

BER (Bit Error Radio) พบว่าคุณภาพภาพจะลดลงอย่างมาก กรณีข้อมูลภาพแบบ BMP ที่ไม่มีการบีบอัด ความเสียหายจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณและกระจายทั่วทั้งภาพ แต่ขนาดของข้อมูลจะมีขนาดใหญ่ ทำให้สูญเสียพลังงานมาก และเพิ่มความคับคั่งในเครือข่าย ในกรณีข้อมูลภาพแบบบีบอัด JPEG การสูญเสียของแพคเกจในระหว่างการรับส่ง จะส่งผลกระทบต่อข้อมูลภาพที่ตามมาแบบต่อเนื่องกัน เนื่องจากองค์ประกอบของข้อมูลภาพแบบ JPEG มีความสัมพันธ์กันสูง

ดังนั้น วิธีการบีบอัดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพภาพที่เกิดจากการสูญเสียแพคเกจข้อมูล โดยตำแหน่งของบล็อกข้อมูลที่สูญเสียเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมา เนื่องจากการใช้วิธีแยกข้อมูลเป็นส่วนหัวที่ใช้สำหรับเข้ารหัสข้อมูลกับส่วนของข้อมูลที่เข้ารหัสแล้วในลักษณะผสมรวมอยู่ด้วยกัน ไม่แยกออกมาเป็นกลุ่มที่ชัดเจน จึงยากแก่การกำหนดความสำคัญของข้อมูล หรือแยกข้อมูลแต่ละส่วนออกจากกัน

4.3 การทดสอบอัลกอริทึมในการส่งข้อมูลภาพ

เราได้นำเสนออัลกอริทึมที่อิงแนวคิดการลดความสัมพันธ์ระหว่างแพคเกจข้อมูลที่ส่งภายในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในหัวข้อ 3.1.2 ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงความคงทนของอัลกอริทึมที่เราได้นำเสนอ โดยพิจารณาในสถานการณ์รับส่งข้อมูลแบบหลายทอดผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย การทดสอบจะใช้ข้อมูลภาพจำนวน 10 รูป ดังรูปที่ 4.27 เป็นภาพการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะต่างๆ คือ ระยะต้นกล้า ระยะออกดอก และระยะออกรวง ขนาด 320x240 พิกเซล ความละเอียด 24 bpp โดยเปรียบเทียบกับ การส่งข้อมูลภาพแบบ BMP, JPEG, BTC และ CDF 5/3 ซึ่งข้อมูลภาพมีขนาดไฟล์ ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ตัวอย่างขนาดไฟล์ของภาพที่ใช้ในการทดลอง

การบีบอัด (KB)	ภาพ A	ภาพ B	ภาพ C
BMP	230.46	230.46	230.46
JPEG	118.30	94.28	121.82
BTC	45.60	45.60	45.60
CDF 5/3	116.4	116.4	116.4

4.3.1 การสูญเสียข้อมูลจากการส่งข้อมูลหลายทอด

การทดสอบการสูญหายของแพ็คเกจข้อมูลที่ระยะห่างระหว่างโหนด 1-4 เมตร มีโครงสร้างเครือข่ายดังรูปที่ 4.16 โหนดหมายเลข 99 เก็บภาพชนิด BMP แล้วจึงทยอยส่งข้อมูลภาพขนาด 100 ไบต์ ไปยังโหนดฐานในทุก 1 วินาที จนครบทั้งภาพ โดยมีโหนดหมายเลข 4, 9, 40, 44, 49, 90 และ 94 เป็นตัวส่งข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไปยังโหนดฐาน เพิ่มจำนวนข้อมูลในเครือข่าย และเพิ่มข้อมูลที่ส่งไปยังโหนดฐาน การหาระยะห่างระหว่างโหนดที่เหมาะสม พิจารณาจากร้อยละของข้อมูลของจำนวนแพ็คเกจข้อมูลที่สูญหาย ผลดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ร้อยละของข้อมูลการสูญหายของข้อมูลที่ระยะห่างต่างๆ

ระยะห่าง	1 m	2 m	3 m	4 m
การสูญหาย (%)	0.52	16.56	99.69	99.99

จากตารางที่ 4.14 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างโหนดเท่ากับ 1 เมตร ข้อมูลมีการสูญหายน้อยมากหรือแทบจะไม่มี การสูญเสียข้อมูลเลย ส่วนที่ระยะห่าง 3 และ 4 เมตร มีการสูญหายของข้อมูลเป็นจำนวนมากหรือแทบจะไม่สามารถรับข้อมูลได้เลย สำหรับที่ระยะ 2 เมตร มีข้อมูลสูญหายไปในระดับที่ยอมรับได้ คือ 16.56%

4.3.2 การพัฒนาการบีบอัดภาพแบบ BTC

การพัฒนาอัลกอริทึมในการส่งข้อมูลภาพ ศึกษาใน 2 ปัจจัยคือ ขนาดของบล็อกข้อมูล และระดับที่ใช้ในการแบ่งข้อมูล เป้าหมายของการศึกษาคือ ความเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลภาพในแง่ของคุณภาพภาพ และจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ในการส่ง เพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการสื่อสาร โดยข้อมูลที่ได้จากการบีบอัดข้อมูลแบบ BTC ต่อบล็อก เป็นดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 โครงสร้างการส่งข้อมูลภาพชนิด BTC ของบล็อกข้อมูลขนาด 8x8 พิกเซล

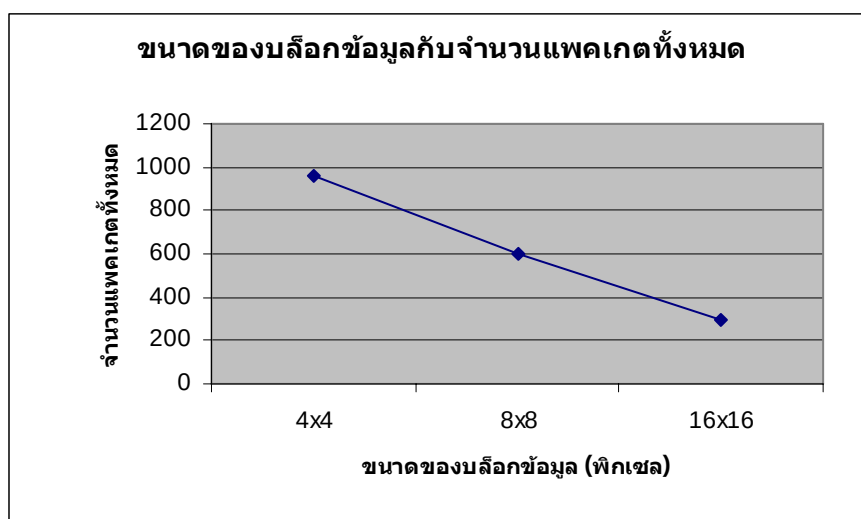
ชนิดข้อมูล	ขนาด	ความหมาย
Index[0]	2 bytes	หมายเลขบล็อกข้อมูล[2]
mean[0]	2 byte	ค่าเฉลี่ยของบล็อก [3]
std[0]	2 bytes	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [6]
data[0]	1 byte	ข้อมูลที่เข้ารหัสแล้ว [24]

4.3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของบล็อกข้อมูล

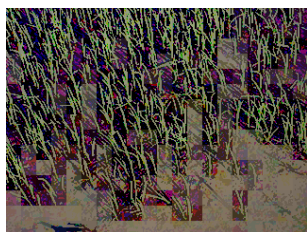
การทดสอบขนาดของบล็อกข้อมูลกับคุณภาพภาพ ใช้บล็อกข้อมูลขนาด 16x16, 8x8 และ 4x4 พิกเซล ที่แบ่งออกจากข้อมูลภาพขนาด 320x240 พิกเซล ความละเอียดของข้อมูล 24 bpp ภาพที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 6 ภาพ เมื่อบีบอัดภาพแบบ BTC ได้ข้อมูลภาพดังตารางที่ 4.16 จากรูปที่ 4.22 เมื่อจำนวนแพคเก็ตทั้งหมดที่ใช้ส่งลดลง เมื่อบล็อกข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้น ผลการทดสอบการบีบอัดภาพแบบ BTC โดยใช้บล็อกข้อมูลขนาด 16x16, 8x8 และ 4x4 พิกเซล ดังรูปที่ 4.23-4.25 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพภาพกับขนาดของบล็อกข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.26

ตารางที่ 4.16 รายละเอียดภาพที่ได้จากการบีบอัดแบบ BTC

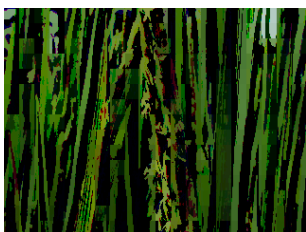
การบีบอัดข้อมูลแบบ BTC	ขนาดบล็อกที่ใช้ (พิกเซล)		
	16x16	8x8	4x4
ขนาดภาพ (KB)	33.00	45.60	96.00
ขนาดข้อมูลต่อบล็อก (B)	110	38	20
จำนวนบล็อกทั้งหมด	300	1200	4800
จำนวนบล็อกต่อแพคเก็ต	1	2	5
ขนาดข้อมูลต่อแพคเก็ต (B)	110	76	100
จำนวนแพคเก็ตทั้งหมด	300	600	960



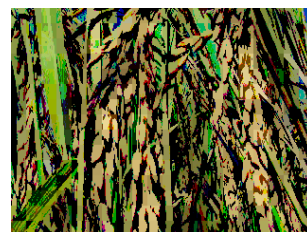
รูปที่ 4.22 ขนาดของบล็อกข้อมูลกับจำนวนแพคเก็ตทั้งหมด



(a) ภาพ A



(b) ภาพ B



(c) ภาพ C

รูปที่ 4.23 ภาพจากการแปลง BTC โดยใช้บล็อกขนาด 16x16 พิกเซล



(a) ภาพ A



(b) ภาพ B



(c) ภาพ C

รูปที่ 4.24 ภาพจากการแปลง BTC โดยใช้บล็อกขนาด 8x8 พิกเซล



(a) ภาพ A

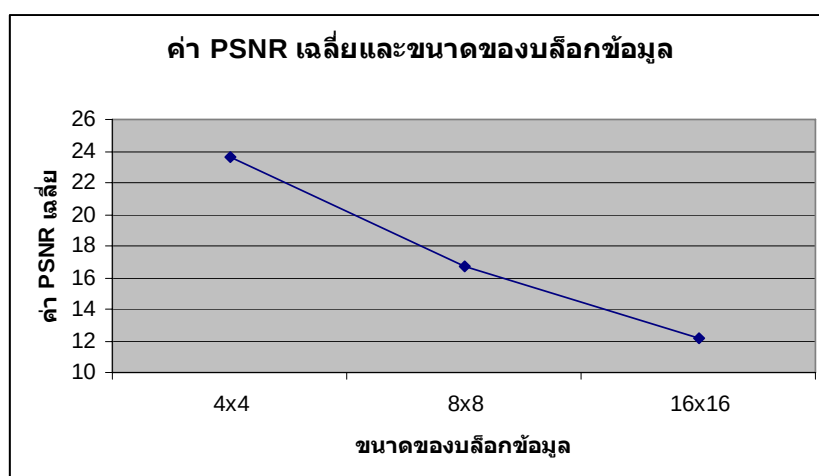


(b) ภาพ B



(c) ภาพ C

รูปที่ 4.25 ตัวอย่างภาพจากการแปลง BTC โดยใช้บล็อกขนาด 4x4 พิกเซล



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของบล็อกข้อมูลกับค่าคุณภาพภาพ

จากรูปที่ 4.23-4.25 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้บล็อกข้อมูลขนาดเล็กลง ทำให้ภาพมีความละเอียดขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาคุณภาพภาพพบว่ามีความลดลง เมื่อใช้บล็อกข้อมูลขนาดเพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่าคุณภาพภาพเป็นหลัก ขนาดของบล็อกข้อมูลที่เหมาะสมคือ 4x4 พิกเซล แต่เมื่อพิจารณาจำนวนแพ็คเกจทั้งหมดที่ใช้ส่ง พบว่าขนาดของบล็อกที่ช่วยลดจำนวนแพ็คเกจในการส่ง โดยยังคงค่าคุณภาพภาพที่ดีอยู่คือ 8x8 พิกเซล

4.3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของการแบ่งข้อมูล

การทดสอบขนาดของระดับการแบ่งข้อมูลกับคุณภาพภาพ ใช้ระดับการแบ่งข้อมูล 1 บิต และ 2 บิต ตามลำดับ ที่แบ่งออกจากข้อมูลภาพขนาด 320x240 พิกเซล ความละเอียดของข้อมูล 24 bpp ภาพที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 6 ภาพ เมื่อบีบอัดภาพแบบ BTC มีรายละเอียดข้อมูลภาพดังตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบการบีบอัดภาพแบบ BTC โดยใช้การแบ่งข้อมูล 1 บิต และ 2 บิต ดังรูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพภาพกับการแบ่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.17 รายละเอียดของข้อมูลภาพที่ใช้ทดสอบ

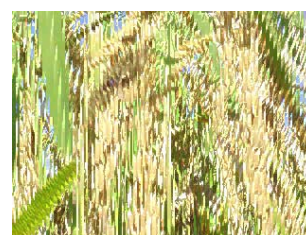
การบีบอัดข้อมูลแบบ BTC	4x4 พิกเซล	
	1 บิต	2 บิต
ขนาดภาพ (KB)	96.00	124.80
ขนาดข้อมูลต่อบล็อก (B)	20	26
จำนวนบล็อกทั้งหมด	4800	4800
จำนวนบล็อกต่อแพ็คเกจ	5	4
ขนาดข้อมูลต่อแพ็คเกจ	100	104
จำนวนแพ็คเกจทั้งหมด	960	1200



(b) ภาพ A

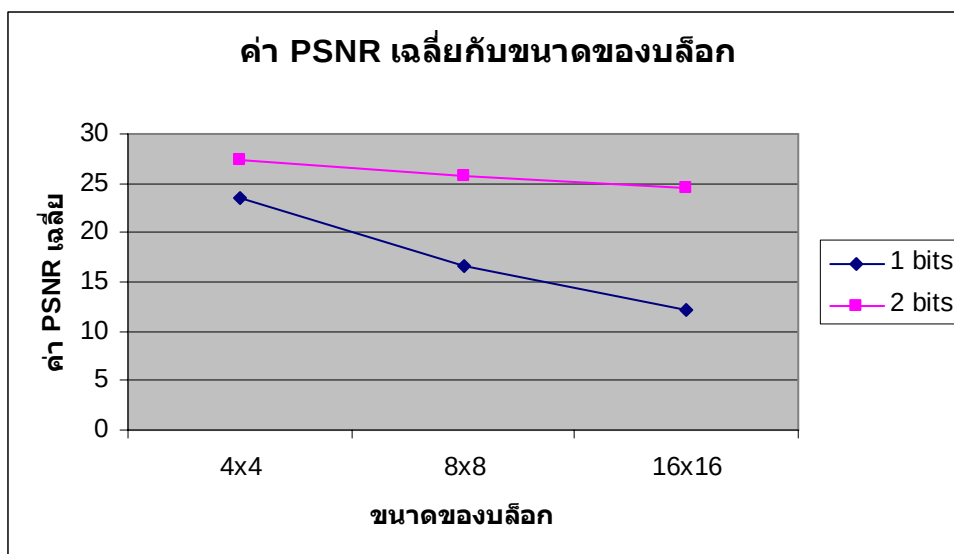


(d) ภาพ B



(f) ภาพ C

รูปที่ 4.27 ตัวอย่างภาพจากการใช้บล็อกข้อมูลขนาด 4x4 พิกเซล ระดับการแบ่งข้อมูล 2 บิต



รูปที่ 4. 28 ค่าคุณภาพภาพกับขนาดของบล็อกข้อมูลที่ระดับต่างๆ

จากรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อเพิ่มระดับการแบ่งข้อมูลทำให้คุณภาพภาพมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มระดับการแบ่งข้อมูลทำให้ภาพผิดเพี้ยนไปจากเดิม ระดับการแบ่งข้อมูลที่เหมาะสมคือ 1 บิต ดังนั้น การพัฒนาอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพทั้งการบีบอัดโดยยังคงคุณภาพภาพที่เหมาะสม และใช้พลังงานในการส่งข้อมูลภาพพอประมาณ คือ การใช้บล็อกขนาด 8x8 พิกเซล และเลือกระดับการแบ่งข้อมูลเป็น 1 บิต

4.3.3 การพัฒนาการบีบอัดภาพแบบ CDF 5/3 [19]

การพัฒนาการบีบอัดภาพแบบ CDF 5/3 ในการส่งข้อมูลภาพ ศึกษาใน 2 ปัจจัยคือ เลือกส่งข้อมูลเฉพาะส่วน และลำดับการบีบอัดภาพต่อการแบ่งบล็อก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลภาพในแง่ของคุณภาพภาพ และจำนวนแพ็คเกจที่ใช้ในการส่ง

4.3.3.1 การหาประสิทธิภาพของการบีบอัดแบบ CDF 5/3

การประยุกต์ใช้ CDF 5/3 สำหรับบีบอัดข้อมูลภาพเพื่อส่งในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด ต้องคำนึงถึงขนาดข้อมูลภาพเป็นสำคัญ เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของโหนดเซ็นเซอร์ การส่งตัวแทนข้อมูลภาพเท่าที่จำเป็นโดยยังคงรักษาข้อมูลส่วนใหญ่ของภาพไว้ ย่อมส่งผลดีทั้งในแง่พลังงาน และคุณภาพภาพ การศึกษาการเลือกส่งข้อมูลเฉพาะส่วนได้ทดสอบแบ่งภาพ 10 ภาพ ดังรูปที่ 4.27 ออกเป็นบล็อกๆ ขนาด 4x4 และ 8x8 พิกเซล เพื่อลดความขึ้นต่อ

กันของข้อมูลระหว่างแพ็คเกจ แล้วนำมาบีบอัดด้วยเทคนิค CDF 5/3 ซึ่งจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 ส่วน คือ LL, HL, LH และ HH แล้วทดสอบเลือกส่งข้อมูลเฉพาะส่วน คือ LL, LL+HL, LL+LH และ LL+HL+LH ตามลำดับ เพื่อหาความเหมาะสมระหว่างขนาดข้อมูลกับคุณภาพภาพ ผลการทดสอบดังตาราง 4.18 เป็นตัวอย่างภาพ C ที่ใช้บล็อกขนาด 8x8 พิกเซล บีบอัดด้วยเทคนิค CDF 5/3 ที่เลือกส่งข้อมูลเฉพาะส่วนแบบต่างๆ

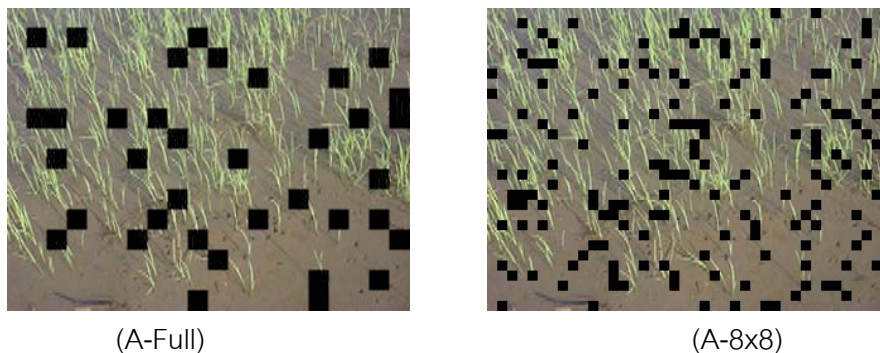
ตารางที่ 4.18 ขนาดและคุณภาพภาพจากการเลือกส่งเฉพาะส่วนแบบต่างๆ

CDF 5/3	Size (KB)		PSNR (dB)	
ข้อมูลที่ส่ง	8x8	4x4	8x8	4x4
LL	58.2	58.2	30.65	29.86
LL+HL	116.4	116.4	36.70	35.68
LL+LH	116.4	116.4	31.70	30.95
LL+HL+LH	174.6	175.2	41.57	40.34

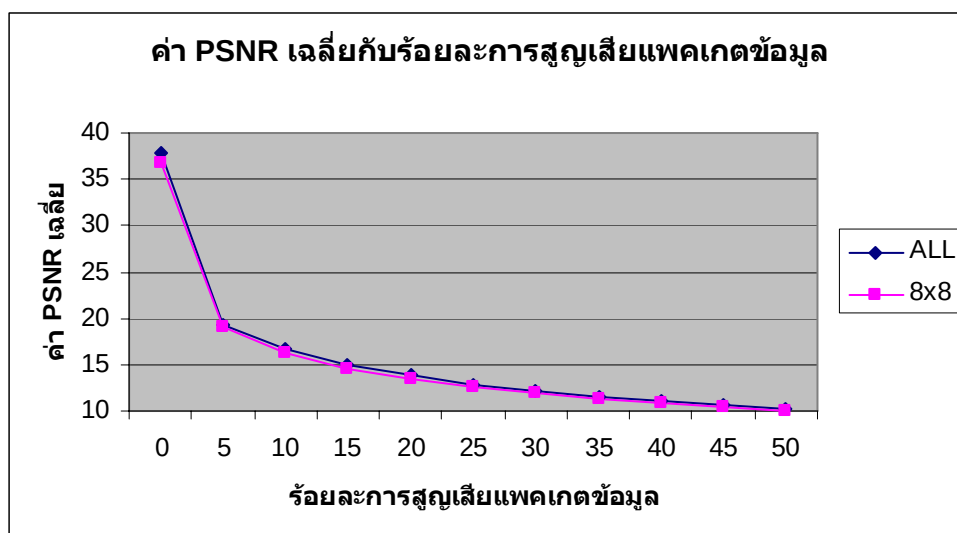
จากตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าความละเอียดของภาพที่ได้ คือ LL+HL+LH > LL+HL > LL+LH > LL ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ข้อมูลทั้ง 3 ส่วน ย่อมให้คุณภาพภาพดีที่สุด และภาพทางการเกษตรโดยทั่วไปรายละเอียดจะอยู่ในแนวแกนตั้งมากกว่าแนวแกนนอน จึงทำให้ LL+HL มีคุณภาพภาพดีกว่า LL+LH เมื่อเปรียบเทียบขนาดบล็อกข้อมูลจะพบว่า บล็อกขนาด 8x8 พิกเซล ให้คุณภาพภาพดีกว่า 4x4 ดังนั้น ส่วนของข้อมูลที่ส่งที่เหมาะสม คือ LL+HL เพราะให้ค่าคุณภาพภาพดี และใช้บล็อกขนาด 8x8 พิกเซล

4.3.3.2 ลำดับการบีบอัดภาพต่อการแบ่งบล็อก

การศึกษาผลกระทบการสูญเสียข้อมูลในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายของการบีบอัดภาพด้วยเทคนิค CDF 5/3 แบบทั้งภาพเปรียบเทียบกับวิธีการบีบอัดที่ละบล็อก ภาพที่ใช้ทดสอบ 10 ภาพ ดังรูปที่ 4.27 ที่บีบอัดด้วยเทคนิค CDF 5/3 แบบทั้งภาพเปรียบเทียบกับวิธีการแยกบีบอัดด้วยบล็อกขนาด 8x8 พิกเซล เลือกส่งเฉพาะส่วน LL+HL แล้วทดสอบส่งข้อมูลที่มีการสูญเสียข้อมูล 0-50% ได้ผลดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างการสูญเสียข้อมูลร้อยละ 16 ที่บีบอัดด้วยเทคนิค CDF 5/3



รูปที่ 4.30 ค่า PSNR เปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียแพคเกจข้อมูล

จากรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่า ภาพที่ได้จากการบีบอัดด้วยเทคนิค CDF 5/3 แบบทั้งภาพข้อมูลส่วน LL จะมีความสำคัญมากที่สุด หากเกิดการสูญเสียของส่วนนี้น้อยกว่าส่วนอื่นๆ ก็จะมีผลกระทบต่อภาพน้อยกว่าแบบที่แยกบีบอัดทีละบล็อก และการบีบอัดทั้งภาพจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำมาก และมีผลกระทบของการสูญเสียข้อมูลเป็นบล็อกที่ขนาดใหญ่กว่าการแยกบีบอัดทีละบล็อก จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า การบีบอัดด้วยเทคนิค CDF 5/3 แบบทั้งภาพเฉลี่ยจะให้คุณภาพภาพใกล้เคียงกับการบีบอัดทีละบล็อก เมื่อเกิดการสูญเสียเป็นแพคเกจ

การปรับปรุงเทคนิคการบีบอัดภาพด้วย CDF 5/3 สำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบหลายทอด โดยใช้การแบ่งข้อมูลภาพเป็นบล็อกก่อนการบีบอัด เพื่อลดความสัมพันธ์ระหว่างแพคเกจข้อมูล การปรับปรุงนี้ช่วยลดความจำเป็นในการใช้ ACK ในโพรโตคอลเพื่อยืนยันความครบถ้วนของข้อมูล ผลการทดลองจำลองการส่งข้อมูลภาพผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายขนาด

ใหญ่โดยใช้การบีบอัดแบบทั้งภาพเทียบกับการแยกบีบอัดทีละบล็อกพบว่า ช่วยลดระดับความสำคัญของข้อมูลในส่วน LL ทำให้การสูญเสียคุณภาพภาพเป็นไปตามการสูญหายของแพคเกตจริง

4.3.4 การทดสอบคุณภาพของการบีบอัดภาพ

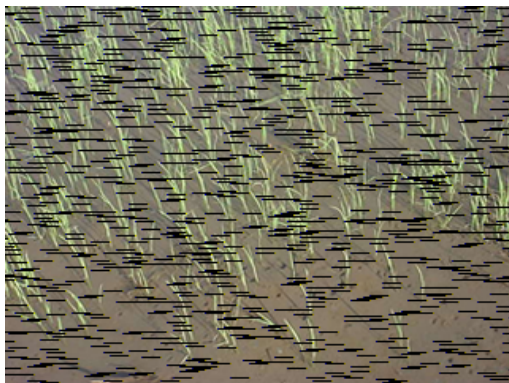
การทดสอบหาคุณภาพของวิธีการบีบอัดแบบ BMP, JPEG, BTC และ CDF 5/3 พิจารณาจากค่า PSNR เปรียบเทียบภาพที่ผ่านการบีบอัดแล้วกับภาพต้นฉบับ พบว่าค่า PSNR สามารถเรียงลำดับได้ ดังนี้ $BMP > JPEG > CDF\ 5/3 > BTC$ ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ตัวอย่างค่าคุณภาพภาพที่ได้จากการบีบอัดแบบต่างๆ

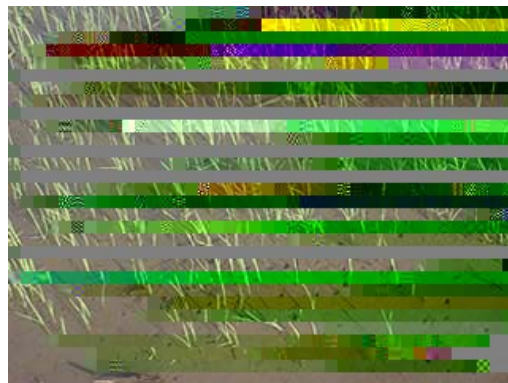
PSNR	ภาพ A	ภาพ B	ภาพ C
BMP	88.13	88.13	88.13
JPEG	45.00	42.94	40.74
BTC	16.02	17.26	13.11
CDF 5/3	33.32	41.60	33.73

4.3.5 การทดสอบการคงทนต่อการสูญเสียข้อมูล [20]

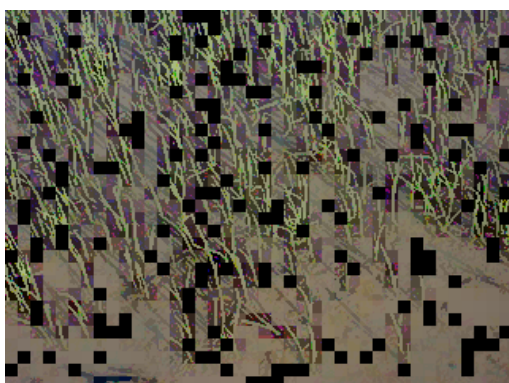
การทดสอบการคงทนต่อการสูญเสียข้อมูลในการบีบอัดแบบต่างๆ ใช้การเปรียบเทียบคุณภาพภาพที่ได้รับจากโหนดฐานกับภาพที่ผ่านบีบอัดแล้วจากต้นทาง โดยกำหนดสภาพแวดล้อมดังหัวข้อที่ 4.1.1 ทดสอบที่การสูญเสียแพคเกตข้อมูลร้อยละ 0-50 แล้วทยอยส่งข้อมูลภาพ 10 ภาพ บีบอัดด้วยวิธี BMP, JPEG, BTC และ CDF 5/3 เข้าสู่เครือข่ายทีละแบบ เมื่อส่งข้อมูลจนกระทั่งครบทั้งภาพจึงนำข้อมูลที่ได้จากโหนดฐานมาถอดรหัสแล้วเรียงกลับเป็นภาพเดิมตามตำแหน่งของภาพต้นฉบับ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างภาพปลายทางกับภาพที่ผ่านการบีบอัดแบบเดียวกัน ผลของการส่งข้อมูลภาพ ดังรูปที่ 4.31 โดยภาพ A-BMP คือ ภาพ A ที่จัดเก็บข้อมูลแบบ BMP เป็นต้น ค่าคุณภาพภาพดังรูปที่ 4.32



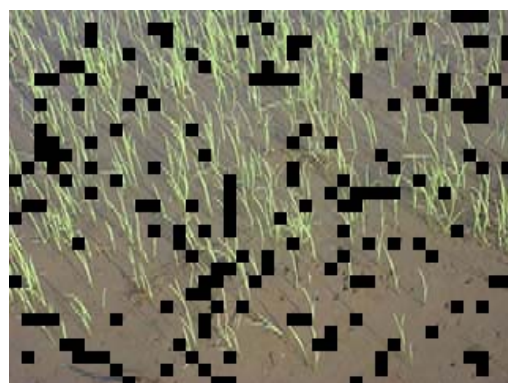
(a) A-BMP



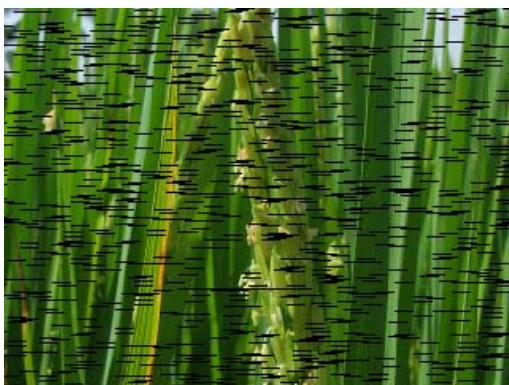
(b) A-JPEG



(c) A-BTC



(d) A-CDF 5/3



(e) B-BMP



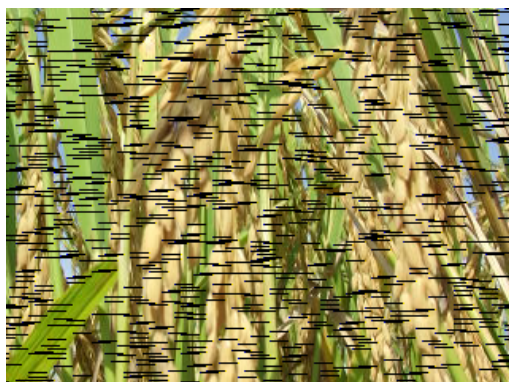
(f) B-JPEG



(g) B-BTC



(h) B-CDF 5/3



(i) C-BMP



(j) C-JPEG

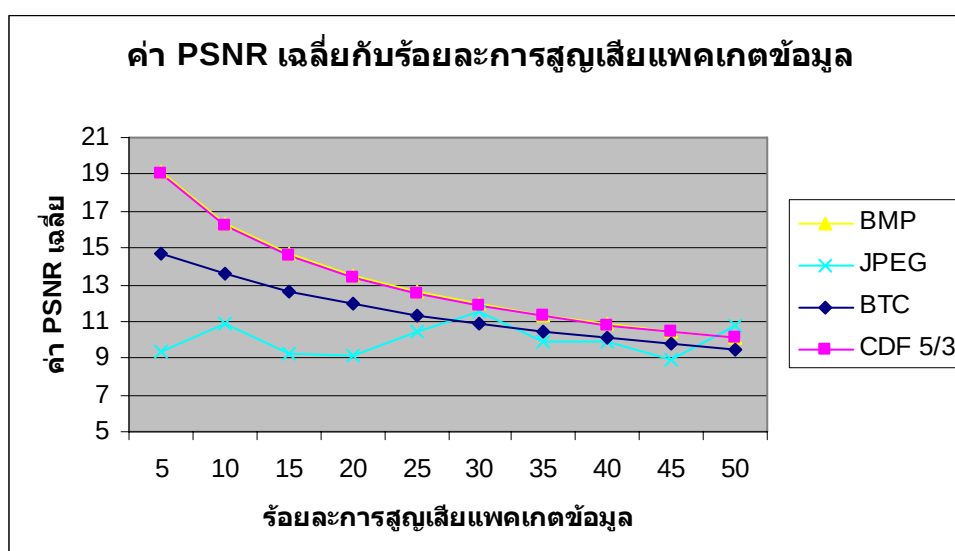


(k) C-BTC



(l) C-CDF 5/3

รูปที่ 4.31 ตัวอย่างภาพ A, B และ C ที่การสูญเสียแพคเกตข้อมูลร้อยละ 16



รูปที่ 4.32 ค่า PSNR เปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียแพคเกตข้อมูล

ตารางที่ 4.20 ขนาดและจำนวนแพ็คเกจทั้งหมดของการบีบอัดแบบต่างๆ

การบีบอัด	ขนาดภาพ (KB)	จำนวนแพ็คเกจ
BMP	230.46	3600
JPEG	118.30	1300
BTC	45.60	600
CDF 5/3	116.4	1213

จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่า ภาพชนิด JPEG จะได้รับผลกระทบมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลมีความผูกพันกันสูง ส่วน BMP, BTC และ CDF 5/3 เกิดผลกระทบเฉพาะจุด และ CDF 5/3 ให้ภาพที่มีรายละเอียดในระดับที่ยอมรับได้ดีกว่าแบบอื่นๆ เมื่อเกิดการสูญเสียแพ็คเกจข้อมูล จากรูปที่ 4.32 เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพภาพที่เกิดการสูญเสียแพ็คเกจข้อมูลของการบีบอัดแบบต่างๆ พบว่า ค่าคุณภาพภาพที่ได้จากการจัดเก็บข้อมูลแบบ BMP > CDF 5/3 > JPEG > BTC และจากตารางที่ 4.20 ขนาดไฟล์และจำนวนแพ็คเกจเรียงลำดับดังนี้ BMP > JPEG > CDF 5/3 > BTC จะเห็นได้ว่า การบีบอัดแบบ CDF 5/3 ใช้จำนวนแพ็คเกจในการส่งใกล้เคียงกับ JPEG แต่ให้ค่าคุณภาพภาพใกล้เคียงกับการบีบอัดแบบ BMP ที่ระดับการสูญเสียข้อมูลเท่ากัน ในขณะที่การบีบอัดข้อมูลแบบ JPEG ให้ค่าคุณภาพภาพที่ลดลงกว่าการบีบอัดแบบอื่นๆ อย่างมาก เมื่อเกิดการสูญเสียข้อมูลขึ้น ดังนั้น การบีบอัดแบบ CDF 5/3 จึงเป็นการบีบอัดที่ให้ไฟล์ขนาดเล็กให้ค่าคุณภาพภาพที่ดี และให้รายละเอียดภาพที่สายตามองเห็นได้ครบถ้วน

อัลกอริทึมในการบีบอัดและส่งข้อมูลภาพในเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยอาศัยแนวคิดของการลดความสัมพันธ์ระหว่างบล็อกข้อมูล อัลกอริทึมนี้มีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผลบนโหนดของเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เนื่องจากไม่ซับซ้อน ใช้หน่วยความจำน้อยในระหว่างการประมวลผล รวมทั้งยังเหมาะสมกับการส่งข้อมูลด้วยแพ็คเกจที่มีขนาดเล็ก ผลการจำลองสถานการณ์ส่งข้อมูลภาพแบบหลายทอดผ่านเครือข่ายขนาดใหญ่ที่มีอัตราการสูญหายของแพ็คเกจข้อมูลถึง 16% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ซึ่งยังคงได้รับภาพที่สามารถเข้าใจง่ายด้วยสายตาของมนุษย์