บทที่ 6

ปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการออกแบบโครงข่าย

6.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะวิเคราะห์ผลของปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น และรูปแบบของทราฟฟิก, Connectivity ของโครงข่าย, จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง (ค่า M) ที่มีต่อการออกแบบโครงข่าย อีกทั้งยังมีการพิจารณาผลจากการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยจะมีการเปรียบเทียบต้นทุนของการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนกับต้นทุนของโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบเมชซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ต้นทุนต่ำที่สุด

6.2 อัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโครงข่าย

จากบทที่ 4 เราได้วิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนแต่ละแบบ จนสรุปได้ว่าต้นทุนที่ต่ำที่สุดของโครงข่ายนั้น ๆ จะได้มาจากฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ SA โดยการทดสอบกับค่า *factor*, ค่า r และค่าอุณหภูมิเริ่มต้นหลาย ๆ ค่า จะสามารถหากรณีที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดได้ และพบว่าจุดที่ให้ต้นทุนที่มีค่าต่ำสุดในแต่ละกรณีและในแต่ละโครงข่ายไม่ได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกัน เนื่องจากในบทนี้จะต้องใช้ค่าต่าง ๆ ในการวิเคราะห์จำนวนมากจนยากที่จะทดสอบหากรณีที่ต้นทุนต่ำที่สุดอย่างแท้จริงได้ จากการที่ผลการวิเคราะห์ในบทที่ 4 ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้ค่าพารามิเตอร์ในอัลกอริทึมที่มีค่าสูง แม้ว่าจะทำให้กระบวนการค้นหาคำตอบกินเวลานาน แต่เป็นการเพิ่มโอกาสที่จะค้นพบคำตอบที่ดีได้มากกว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค่าต่ำ ดังนั้นการวิเคราะห์ในบทนี้จึงจะใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบ SA ในการออกแบบ โดยใช้ค่า *factor* เป็น 0.99, ค่า r เป็น 30, อุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 100,000 และกำหนดให้หยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 50,000 รอบ อนึ่ง การหาคำตอบในบทนี้จะไม่เน้นเวลาที่ใช้แต่จะเน้นคำตอบที่ดีเป็นหลัก

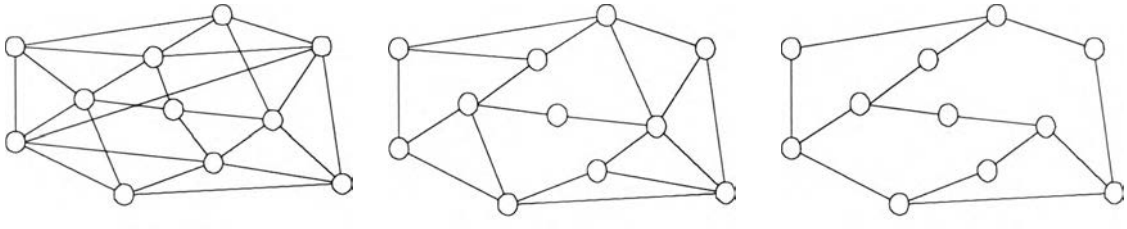
ในการวิเคราะห์ค่าความจุสำรองที่ใช้ป้องกันโครงข่ายจากความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง จะคำนวณโดยใช้วิธีจัดเส้นทางแบบ Path Protection ที่มีการสำรองบนความจุที่เหลือบน

เส้นใยแสงทำงานก่อน (วิธี PSW) เนื่องจากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าวิธี PSW เป็นวิธีที่ต้องการความจุสำรองต่ำกว่าวิธีการจัดสรรความจุสำรองแบบอื่น ๆ ที่เหลือ

6.3 ผลของปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น และ Connectivity ของโครงข่าย

6.3.1 โครงข่ายที่จะใช้ในการวิเคราะห์

โครงข่ายหลักที่จะใช้ทดสอบในบทนี้ คือ โครงข่าย EUROCore ขนาด 11 โนด ซึ่งมีค่า Connectivity เป็น 4.55 แต่ในการวิเคราะห์ให้เห็นถึงผลของ Connectivity ของโครงข่ายโดยตรงไม่ให้มีผลกระทบจากตัวแปรอื่น จะจำลองโครงข่ายที่มีจำนวนโนดเท่ากัน คือ 11 โนด ขึ้นมาอีก 2 แบบโดยใช้โครงข่าย EUROCore (ในที่นี้จะเรียกว่า โครงข่าย EURO-A) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ในการสร้างโครงข่ายทั้ง 2 แบบนี้ จะสุ่มตัดข่ายเชื่อมโยงออกจากโครงข่ายทีละเส้นเพื่อให้ได้ค่า Connectivity ตามต้องการ คือ 3.45 และ 2.55 ตามลำดับ โครงข่าย 2 แบบที่สร้างขึ้นใหม่ให้ชื่อว่าโครงข่าย EURO-B และ EURO-C โครงข่ายทั้ง 3 แบบมีโทโพโลยีทางกายภาพ (Physical Topology) และรายละเอียดดังรูปที่ 6.1



EURO-A EURO-B EURO-C

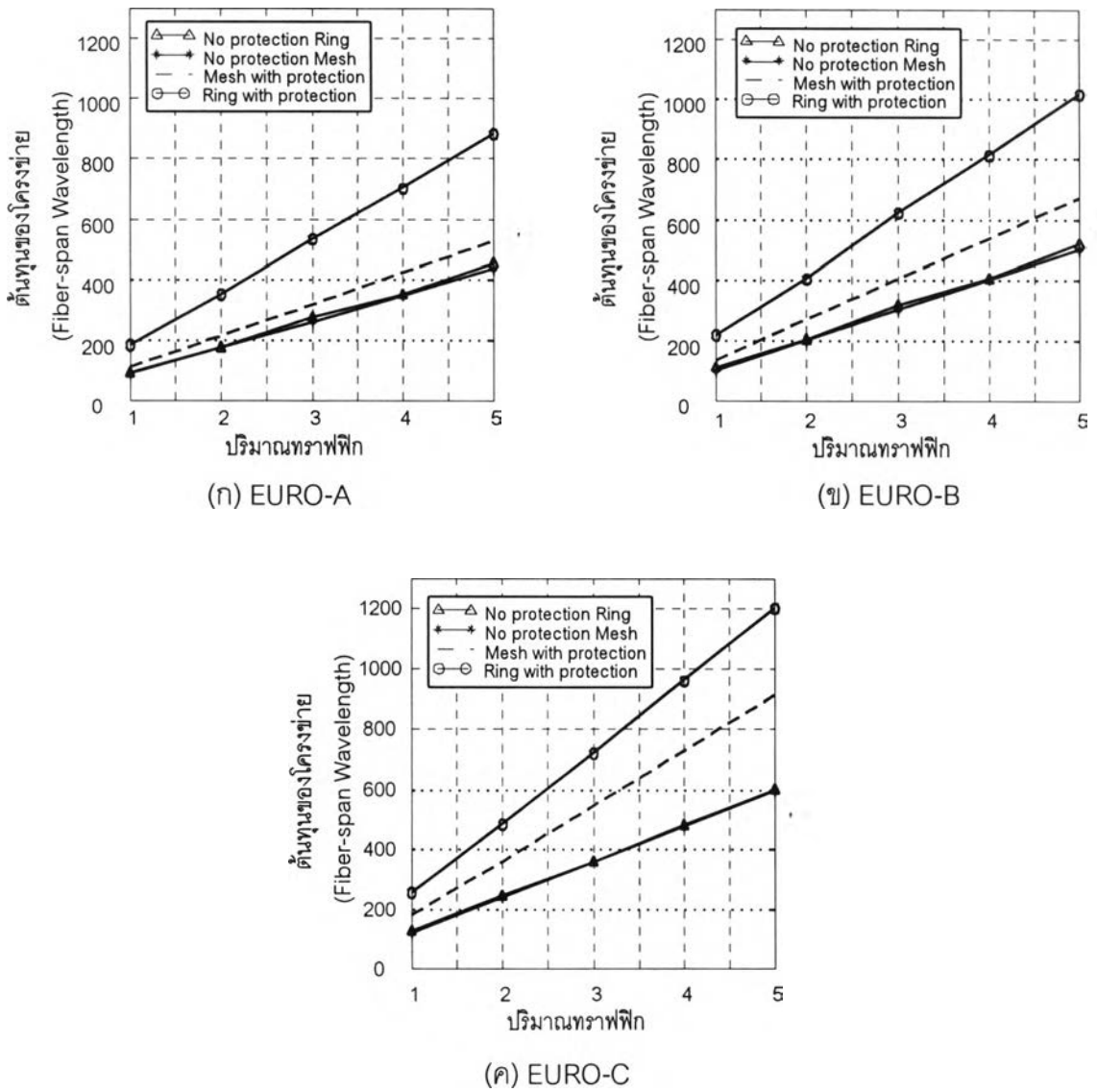
โครงข่าย	จำนวนโนด	จำนวนข่ายเชื่อมโยง	Connectivity	จำนวนวงแหวน
EURO-A	11	25	4.55	2529
EURO-B	11	19	3.45	178
EURO-C	11	14	2.55	14

รูปที่ 6.1 โทโพโลยีและรายละเอียดของโครงข่าย EURO-A, EURO-B, EURO-C

6.3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

การทดสอบส่วนแรกจะพิจารณาผลกระทบจากปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อทรัพยากรเส้นใยแสงที่ระบบต้องการของโครงข่าย EURO-A, EURO-B และ EURO-C โดยจะ

ทดสอบกับทราฟฟิกแบบ Uniform ขนาดตั้งแต่ 1-5 และการทดสอบในหัวข้อนี้จะทดสอบกับกรณีที่จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสงเป็น 1 เท่านั้น (M=1) เนื่องจากเป็นกรณีที่ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าใกล้เคียงกับความต้องการช่องสัญญาณมากที่สุด รูปที่ 6.2 แสดงต้นทุนของโครงข่ายทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีการเผื่อความจุสำรองสำหรับความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เมื่อออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงข่ายเมื่อออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบเมช



รูปที่ 6.2 ต้นทุนของโครงข่ายในสภาวะปกติ (No Protection) และสภาวะที่สำรองความจุสำหรับความเสียหาย (With Protection) ที่ปริมาณทราฟฟิกต่าง ๆ กัน ที่ M=1

พิจารณากรณีที่ไม่มีการเผื่อความจุสำรองสำหรับความเสียหาย จากรูปที่ 6.2 ทราฟฟิกที่สูงขึ้นจะส่งผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดไม่ว่าจะใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหรือโครงสร้างแบบเมช

ในทุก ๆ โครงข่าย โดยต้นทุนของโครงข่ายจะสูงขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงข่ายต้องการความจุมากขึ้นในการรองรับทราฟฟิก ส่งผลให้ความต้องการเส้นใยแสงมากขึ้น เมื่อพิจารณาการออกแบบระหว่างใช้โครงสร้างแบบเมชและวงแหวน จะพบว่าต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนจะสูงกว่าเมื่อใช้โครงสร้างแบบเมชเพียงเล็กน้อยในทุกค่าของทราฟฟิก เหตุผลที่ต้นทุนเมื่อใช้โครงสร้างแบบวงแหวนมีค่าสูงกว่าต้นทุนของโครงสร้างแบบเมช เนื่องจากในโครงสร้างแบบวงแหวนจะต้องวางเส้นใยแสงเป็นจำนวนเท่า ๆ กันทุกข่ายเชื่อมโยง ทำให้อาจมีความจุของเส้นใยแสงส่วนหนึ่งที่เหลือเพราะไม่ได้ใช้รองรับทราฟฟิก อีกทั้งในการจัดวิถีแต่ละค่าให้แก่เส้นทางในวงแหวน อัลกอริทึมการจัดวิถีจะต้องจัดเส้นทางในวงแหวนให้สมดุลที่สุด เพื่อความยาวคลื่นที่ต้องการในวงแหวนน้อยที่สุด ทราฟฟิกบางค่าจึงอาจจะต้องถูกวางลงบนเส้นทางที่ยาวกว่า จึงเป็นข้อด้อยของโครงสร้างแบบวงแหวน คือ ทำให้ต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนสูงกว่าโครงสร้างแบบเมช และจากการที่การออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบเมชจะใช้เส้นทางระหว่างคู่โนดที่สั้นที่สุดในการรองรับทราฟฟิก ต้นทุนของการออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบเมชในขณะที่ไม่มีการเผื่อความจุสำรองจึงเป็นต้นทุนของการออกแบบโครงข่ายที่ต่ำที่สุด ทำให้สรุปได้ว่าโครงสร้างแบบวงแหวนสามารถออกแบบให้ค่าต้นทุนของโครงข่ายใกล้เคียงค่าที่ต่ำที่สุดได้

พิจารณากรณีที่มีการเผื่อความจุสำรอง ต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนจะมีค่าสูงกว่าต้นทุนของโครงสร้างแบบเมชมากและมีค่าสูงขึ้นมากตามปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากจะต้องเผื่อความจุสำรองไว้เกือบ 100% ของความจุในสภาวะปกติ ในขณะที่ความจุสำรองในโครงสร้างแบบเมชจะสูงกว่าความจุในสภาวะปกติไม่มากนัก จะเห็นได้ชัดถึงความแตกต่างระหว่างต้นทุนของโครงสร้างทั้ง 2 แบบ เช่น ในรูปที่ 6.2 (ก) โครงข่าย EURO-A ที่ทราฟฟิกเท่ากับ 5 ต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองจะสูงกว่าต้นทุนเมื่อเผื่อความจุสำรองในโครงสร้างแบบเมชถึง 67% อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของต้นทุนนี้จะลดลงเป็น 51% และ 32% ในโครงข่าย EURO-B และ EURO-C ตามลำดับ การลดลงของความแตกต่างระหว่างต้นทุนนี้ไม่ได้เป็นผลมาจากสัดส่วนของความจุสำรองที่ต้องการเมื่อเทียบกับความจุในสภาวะปกติของโครงสร้างแบบวงแหวนลดลง แต่เป็นผลมาจากความจุสำรองที่ต้องเผื่อเมื่อใช้โครงสร้างแบบเมชสูงขึ้นในโครงข่ายที่มี Connectivity ต่ำลง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

โครงข่ายที่มี Connectivity ต่ำ เช่น EURO-C จะมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อย จึงมีจำนวนเส้นทางที่เป็นตัวเลือกของเส้นทางสำรองในการป้องกันโครงข่ายน้อยกว่าในโครงข่ายที่มี Connectivity สูง อีกทั้งเส้นทางส่วนใหญ่จะยาว เมื่อเทียบกับในโครงข่ายที่มี Connectivity สูง ทำให้ต้องเปลืองความจุในการสำรองมากขึ้น ต้นทุนในการเผื่อความจุสำรองเมื่อใช้โครงสร้าง

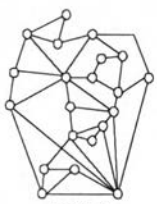
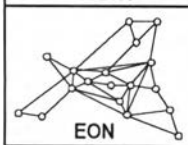
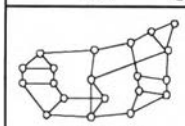
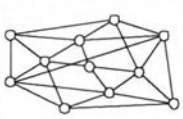
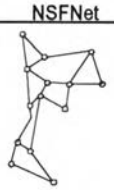
แบบเมชจึงสูงขึ้นมากเมื่อโครงข่ายนั้นมี Connectivity ต่ำ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างต้นทุนระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบ เมื่อมีการเผื่อความจุสำรองจะมีค่าสูงในโครงข่ายที่มี Connectivity สูง เช่น EURO-A แต่ความแตกต่างนี้จะลดลงในโครงข่ายที่มี Connectivity ต่ำ เช่น EURO-C

สำหรับโครงข่ายอื่นที่มีขนาด, จำนวนข่ายเชื่อมโยง และลักษณะการเชื่อมต่อทางกายภาพแตกต่างออกไป ได้แก่ UKNet, EON, ARPANet, EUROCore, NSFNet และ THAINet ต้นทุนของโครงข่ายทั้งในสภาวะปกติและเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองเมื่อใช้โครงสร้างแบบเมชและแบบวงแหวน แสดงดังตารางที่ 6.1 ในการทดสอบจะใช้ทราฟฟิกแบบ Uniform ขนาดเท่ากับ 1 ที่ M=1

จากตารางจะเห็นว่า ต้นทุนเมื่อไม่มีการเผื่อความจุสำรองระหว่างโครงสร้างแบบวงแหวนและโครงสร้างแบบเมชจะมีค่าพอ ๆ กัน แต่เมื่อพิจารณาระหว่างโครงข่ายที่มีขนาดต่างกัน 2 กลุ่ม กลุ่มแรก คือ โครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ คือ ตั้งแต่ 18-21 โนด ได้แก่ UKNet, EON และ ARPANet ส่วนกลุ่มที่ 2 คือ โครงข่ายที่มีขนาดเล็ก คือ ตั้งแต่ 11-14 โนด ได้แก่ EUROCore, NSFNet และ THAINet ความแตกต่างระหว่างต้นทุนเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองระหว่างการใช้โครงสร้างแบบวงแหวนและเมช แสดงดังในสดมภ์สุดท้าย ในโครงข่ายที่มี Connectivity ต่ำที่สุดของทั้ง 2 กลุ่ม เช่น ARPANet และ THAINet จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบน้อยกว่าในโครงข่ายที่มี Connectivity สูงของกลุ่ม เช่น UKNet, EON และ EUROCore ซึ่งตรงกับผลการทดสอบกับโครงข่าย EURO-A, EURO-B และ EURO-C ก่อนหน้านี้

จากผลการทดสอบทั้งหมดสรุปได้ว่า การออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนจะให้ต้นทุนของโครงข่ายต่ำพอ ๆ กับโครงสร้างแบบเมชในสภาวะปกติและต้นทุนจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเผื่อความจุสำรองต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนจะด้อยกว่าโครงสร้างแบบเมชมากโดยเฉพาะในโครงข่ายที่มี Connectivity สูง ตรงกันข้ามกับโครงข่ายที่มี Connectivity ต่ำ ต้นทุนของโครงสร้างแบบวงแหวนเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองจะไม่ด้อยกว่าโครงสร้างแบบเมชมาก เพราะโครงสร้างแบบเมชไม่สามารถออกแบบให้มีต้นทุนในการเผื่อความจุสำรองต่ำได้ในโครงข่ายเหล่านี้ โครงสร้างแบบวงแหวนจึงมีความน่าสนใจมากที่จะนำมาใช้ออกแบบแทนที่โครงสร้างแบบเมชในกรณีหลังนี้

ตารางที่ 6.1 ต้นทุนของโครงข่าย UKNet, EON, ARPANet, EUROCore, NSFNet และ THAINet ในสภาวะปกติและเมื่อมีการเผื่อความจุสำรอง เมื่อออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนและโครงสร้างแบบเมช ทดสอบกับทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 1 ที่ M=1 เมื่อ N คือ จำนวนโนดของโครงข่าย, L คือ จำนวนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย และ C คือ ค่า Connectivity ของโครงข่าย

โครงข่าย	N	L	C	โครงสร้างแบบเมช		โครงสร้างแบบวงแหวน		% ความแตกต่าง
				ไม่เผื่อความจุสำรอง	เผื่อความจุสำรอง	ไม่เผื่อความจุสำรอง	เผื่อความจุสำรอง	
 UKNet	21	39	3.71	526	732	587	1174	60.38%
 EON	18	35	3.89	336	505	384	764	51.29%
 ARPANet	20	31	3.10	543	883	586	1168	32.28%
 EURO-Core	11	25	4.55	87	111	92	184	65.77%
NSFNet	14	21	3.00	195	277	210	420	51.62%
 THAINet	14	20	2.86	237	421	262	218	23.04%

หมายเหตุ %ความแตกต่าง = $\left(\frac{Ringcost - Meshcost}{Meshcost}\right) \times 100\%$ กรณีที่เผื่อความจุสำรอง

6.4 ผลของปริมาณทราฟฟิกและจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของทั้งปริมาณทราฟฟิกและจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง (M) ที่มีต่อการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวน โดยจะมุ่งไปที่

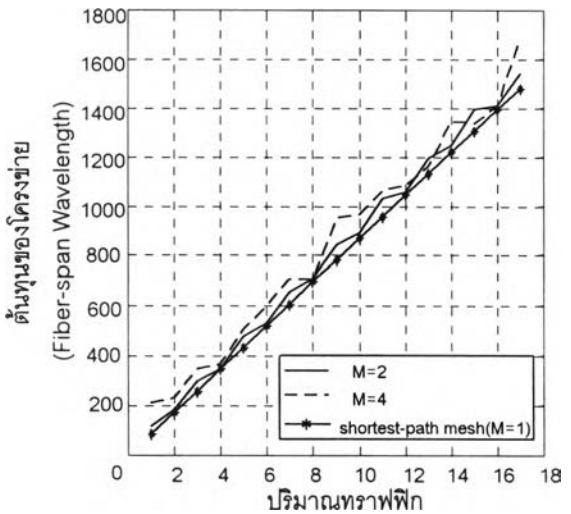
การออกแบบโครงข่ายในสภาวะปกติ สิ่งที่จะพิจารณาในหัวข้อนี้ คือ ต้นทุนของโครงข่าย, ค่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ (Utilization), จำนวนวงแหวน และขนาดเฉลี่ยของวงแหวนที่เลือก โดยจะทดสอบกับโครงข่าย EUROCore โดยจะใช้ทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีปริมาณแตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 17 ค่า M ที่จะใช้ทดสอบมี 2 ค่า คือ M=2 และ 4 รูปที่ 6.3 (ก) - (ง) แสดงผลการออกแบบโครงข่าย EUROCore ที่ทราฟฟิกและ M ค่าต่าง ๆ กัน อนึ่ง ค่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์มีค่าเท่ากับความจุในหน่วยเป็น Fiber-span Wavelength ที่ใช้รองรับทราฟฟิกจริงหารด้วยความจุที่ต้องวางลงบนโครงข่าย (ต้นทุนของโครงข่าย) และขนาดของวงแหวนเฉลี่ยคำนวณจากผลรวมของขนาดวงแหวนที่เลือกเพื่อรองรับทราฟฟิกหารด้วยจำนวนวงแหวนทั้งหมดที่เลือก

รูปที่ 6.3 (ก) แสดงต้นทุนของโครงข่าย EUROCore ที่ออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนเปรียบเทียบกับต้นทุนที่ออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบเมชที่ทราฟฟิกและ M ค่าต่าง ๆ กัน และรูป 6.3 (ข) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ ณ แต่ละจุด หากพิจารณาผลของทราฟฟิกเพียงอย่างเดียว จากรูป 6.3 (ก) จะเห็นว่าต้นทุนของโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณทราฟฟิก และมีค่าใกล้เคียงกับค่าต้นทุนของโครงข่ายเมื่อออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบเมช ที่ M=1 ซึ่งใช้เป็นค่าขอบเขต

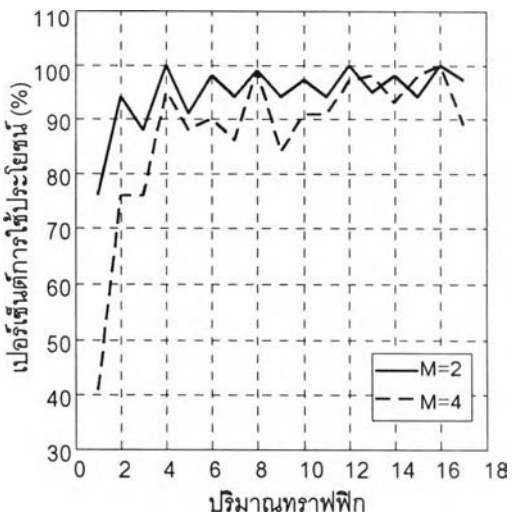
จากรูปที่ 6.3 (ข) จะเห็นว่าเมื่อทราฟฟิกมีค่าเปลี่ยนไป เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงจะเปลี่ยนไปตามทราฟฟิกด้วย โดยที่ทราฟฟิกมีค่าน้อย ๆ เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์นี้จะมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากความจุที่มีในโครงข่ายมีมากจนเหลือไม่ได้ใช้รองรับทราฟฟิก แต่เมื่อทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เส้นใยแสงแต่ละเส้นที่วางจะได้รับการเติมเต็มด้วยทราฟฟิกมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์มีค่าสูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 100% เล็กน้อย โดยจะมีค่าขึ้นลงไม่คงที่อยู่ระหว่าง 85% ถึง 100% เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ที่มีค่าเป็น 100% จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อทราฟฟิกเป็นค่าคู่เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากทราฟฟิกค่าคู่จะสามารถถูกแบ่งไปใช้เส้นทางทั้ง 2 เส้นทางในวงแหวนได้ ความจุในวงแหวนจึงถูกใช้อย่างเต็มที่ แต่เมื่อทราฟฟิกเป็นค่าคี่ เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์จะมีค่าไม่ถึง 100% เสมอ เนื่องจากทราฟฟิกที่เป็นค่าคี่จะไม่สามารถแบ่งทราฟฟิกให้เท่ากันได้ ดังนั้นความจุในวงแหวนจะถูกใช้ได้ไม่เต็มที่ และจะเหลือบางส่วนไม่ได้ใช้ในการรองรับทราฟฟิกเสมอ

หากพิจารณารูปที่ 6.3 (ก) และ (ข) ที่ทราฟฟิกปริมาณเท่ากัน การใช้ค่า M สูง เช่น 4 จะให้ต้นทุนค่าสูงและเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ต่ำกว่าค่า M ต่ำ เช่น 2 ทั้งนี้เนื่องจากการที่ในเส้นใยแสงมีความจุมาก จะต้องการทราฟฟิกในการเติมเต็มปริมาณมากกว่าเส้นใยแสงที่มีความจุน้อย ๆ ดังนั้นที่ทราฟฟิกปริมาณเท่ากัน ความจุเหลือที่ไม่ได้ใช้ในการรองรับทราฟฟิกจะมากกว่า เปอร์เซ็นต์

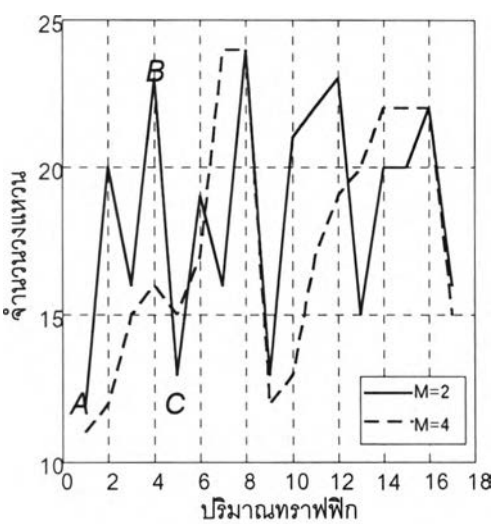
การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงจึงต่ำและทำให้ต้นทุนสูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ทราฟฟิกปริมาณน้อยมาก เช่น ที่ทราฟฟิกเป็น 1 จะเห็นความแตกต่างนี้ได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อทราฟฟิกมีปริมาณมากขึ้น ความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้เส้นใยแสงที่มีความจุมากในการรองรับทราฟฟิกจะลดลง โดยจะเห็นว่า เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่า 100% มากขึ้น เพราะเส้นใยแสงได้รับการเติมเต็มหรือมีการรองรับทราฟฟิกมากขึ้นนั่นเอง



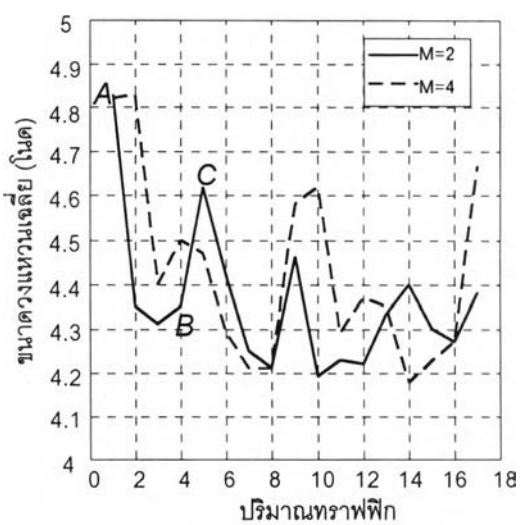
(ก) ค่าต้นทุน



(ข) เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์



(ค) จำนวนวงแหวนที่เลือก



(ง) ขนาดเฉลี่ยของวงแหวนที่เลือก

รูปที่ 6.3 ผลการออกแบบโครงข่าย EUROCore

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การเลือกวงแหวนที่จะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าต่ำที่สุด คือ การเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กที่สุด แต่จากผลการออกแบบโครงข่ายในรูป 6.3 (ค) ซึ่งแสดงจำนวนวงแหวนที่เลือก และในรูป 6.3 (ง) ซึ่งแสดงขนาดเฉลี่ยของวงแหวนทั้งหมดที่เลือกที่ทราฟฟิกและ M

ค่าต่าง ๆ จะเห็นว่า ในแต่ละกรณีของปริมาณทราฟฟิก และค่า M จะมีจำนวนและขนาดเฉลี่ยของวงแหวนที่เลือกแตกต่างกันออกไป ในบางกรณี วงแหวนที่เลือกจะมีขนาดใหญ่ โดยจำนวนวงแหวนที่เลือกนี้จะแปรผกผันกับขนาดของวงแหวนเฉลี่ย นั่นคือ หากมีการเลือกวงแหวนจำนวนน้อยวงแหวนนั้นจะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะรองรับทราฟฟิกทั้งหมด แต่หากเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กจำนวนวงแหวนที่เลือกจะต้องมีมากพอเช่นเดียวกัน การที่จำนวนวงแหวนและขนาดเฉลี่ยของวงแหวนมีค่าไม่คงที่ แสดงว่าอัลกอริทึมการออกแบบโครงข่ายจะปรับชุดของวงแหวนให้เหมาะสมกับค่าทราฟฟิกและค่า M ในแต่ละกรณี การปรับนี้เพื่อให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าต่ำและเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงมีค่าสูงใกล้เคียง 100% อยู่เสมอ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

ที่จุด A ซึ่งเป็นจุดที่ทราฟฟิกมีค่าน้อยมากและ M มีค่าเป็น 2 หากอัลกอริทึมเลือกวงแหวนจำนวนมาก แม้ว่าจะมีขนาดเล็กแต่จะทำให้วงแหวนแต่ละวงมีทราฟฟิกกระจายอยู่ไม่มาก เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงจะต่ำและอาจทำให้ต้นทุนของโครงข่ายสูง ดังนั้น ณ จุดนี้อัลกอริทึมจะพยายามรวบรวมทราฟฟิกเข้าด้วยกัน โดยเลือกวงแหวนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและลดจำนวนวงแหวนลง จะเห็นว่าจำนวนวงแหวนที่เลือกมีเพียง 12 วง ในขณะที่แต่ละวงมีขนาดเฉลี่ยเป็น 4.82 และที่ทราฟฟิกเท่ากัน หากเพิ่ม M จาก 2 เป็น 4 จำนวนวงแหวนจะลดลงเหลือเพียง 11 วง ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแสงที่มีความจุมาก จะมีเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงต่ำกว่าเส้นใยแสงที่มีความจุน้อย อัลกอริทึมจึงพยายามรวบรวมทราฟฟิกเข้าด้วยกันมากขึ้น ส่งผลให้วงแหวนมีจำนวนลดลงนั่นเอง

จากจุด A เมื่อเพิ่มปริมาณทราฟฟิก วงแหวนแต่ละวงจะถูกเติมเต็มความจุส่วนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์มากขึ้น ทำให้สามารถเลือกวงแหวนที่มีขนาดเล็กลงได้ เห็นได้ว่าวงแหวนที่เลือกจะมีจำนวนมากขึ้น และมีขนาดเล็กลงตามปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อทราฟฟิกมากขึ้นถึงจุด B จำนวนวงแหวนจะมากที่สุดและมีขนาดเล็กลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากที่จุดนี้ ปริมาณทราฟฟิกมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของค่า M พอดี ซึ่งเท่ากับจำนวนเส้นทางสูงสุดที่เส้นใยแสง 1 เส้นบนวงแหวนจะสามารถรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โนดหนึ่ง ๆ ได้ ทราฟฟิกของคู่โนดแต่ละคู่ที่ถูกกระจายลงบนวงแหวนเดียวกันจึงใช้ความจุในเส้นใยแสงเส้นหนึ่ง ๆ ในวงแหวนได้เต็มพอดี สังเกตว่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสง ณ จุดนี้จะมีค่าสูงสุด คือ 100%

จากจุด B เมื่อทราฟฟิกสูงขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย เช่น จุด C ทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นมานี้จะเป็นทราฟฟิกส่วนที่เกินจากทราฟฟิกที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่เส้นใยแสงถูกใช้อย่างเต็มที่ ไม่มีความจุเหลือเพื่อรองรับทราฟฟิกอีก หากเลือกวงแหวนชุดเดิม จะต้องเพิ่มเส้นใยแสงเส้นใหม่ลงในวงแหวนทุกวง ซึ่งจะทำให้ต้นทุนของโครงข่ายสูงมาก อีกทั้งจะมีความจุเหลือจำนวนมากในเส้นใยแสงที่เพิ่มเข้าไปใหม่นี้ ณ จุดนี้ จำนวนวงแหวนจึงต้องถูกลดลงและใช้วงแหวนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เหมือนที่เกิดขึ้น

ณ จุด A ลักษณะการเพิ่มขึ้นแล้วลดลงของจำนวนวงแหวนและขนาดเฉลี่ยของวงแหวนจะมีลักษณะซ้ำทุกค่าทราฟฟิกเป็นจำนวนเท่าของ 2M ดังจะเห็นได้ในรูป 6.3 (ค) และ รูป 6.3 (ง) ค่าจะมีลักษณะเป็นคาบยาว 2M สังเกตว่าที่ M สูงขึ้น คาบจะยาวขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในเส้นใยแสงที่มีความจุมากขึ้นจะต้องการทราฟฟิกปริมาณมากขึ้นในการเติมเต็ม ทำให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นช้า

จากผลการออกแบบทั้งหมด ทำให้สรุปได้ว่าในการออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงให้ต้นทุนต่ำและเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงสูง เหมาะสมกับค่าทราฟฟิกและค่า M จะต้องพิจารณาปรับชุดของวงแหวนและขนาดของวงแหวนให้เหมาะสมกับแต่ละกรณีด้วย

ในส่วนต่อไปจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแสง (ค่า M) ที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง ในการทดสอบจะใช้โครงข่าย EUROCore และทราฟฟิกแบบ Uniform ขนาดเป็น 5 ตารางที่ 6.2 แสดงผลของการออกแบบทั้งต้นทุนของโครงข่ายทั้งในสภาวะปกติและเมื่อมีการเผื่อความจุสำรอง, จำนวนวงแหวนที่เลือก, ขนาดเฉลี่ยของวงแหวนที่เลือก และเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสง เมื่อใช้ค่า M ต่าง ๆ กันตั้งแต่ 1 ถึง 128

พิจารณาจากตาราง จะเห็นว่า ต้นทุนทั้งในสภาวะปกติและเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองมีค่าสูงขึ้น เมื่อ M มีค่าสูงขึ้น แต่จำนวนเส้นใยแสงรวมจากทุกข่ายเชื่อมโยงกลับมีค่าลดลง อธิบายได้ว่าที่ M=1 ในเส้นใยแสงแต่ละเส้นจะมีช่องสัญญาณเพียง 1 ช่องเท่านั้น จำนวนเส้นใยแสงจึงมีค่าสูงสุดเท่ากับความต้องการช่องสัญญาณ คือ 454 เส้นในทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยง แต่เมื่อ M เพิ่มขึ้น จำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแสงที่สามารถใช้รองรับทราฟฟิกจะมีมากขึ้น ทำให้ความต้องการเส้นใยแสงในโครงข่ายลดลงตามค่า M โดยจะเห็นว่าเมื่อ M เพิ่มขึ้น 1 เท่า จำนวนเส้นใยแสงจะลดลงเป็น 1 เท่าหรือเกือบ 1 เท่าเช่นกัน จนกระทั่งเมื่อ M เพิ่มจาก 8 เป็น 16 จำนวนเส้นใยแสงกลับเริ่มมีแนวโน้มคงที่และตั้งแต่ M เป็น 16 เป็นต้นไป จำนวนเส้นใยแสงกลับมีค่าค่อนข้างคงที่ไปตลอด ณ จุดนี้แสดงว่าเส้นใยแสงที่วางเป็นเส้นใยแสงที่จำเป็นในการใช้รองรับทราฟฟิกอย่างแท้จริง ไม่สามารถกำจัดออกจากระบบได้ ดังนั้นตั้งแต่จุดนี้เป็นต้นไป การที่ M มีค่ามากขึ้น จะทำให้ช่องสัญญาณที่มีในเส้นใยแสงมีค่าเกินช่องสัญญาณที่ระบบต้องการ นอกจากจะไม่ลดจำนวนเส้นใยแสงที่ต้องการแล้ว ยังกลับทำให้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของเส้นใยแสงมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 6.2 ผลการออกแบบโครงข่าย EUROCore ที่ทราฟฟิก Uniform ขนาดเป็น 5 ที่ M ต่าง ๆ

M	ต้นทุนในสภาวะปกติ (Fiber-span Wavelength)	เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ (%)	จำนวนเส้นใยแสงรวมทุกข่ายเชื่อมโยง	ต้นทุนเมื่อมีการเผื่อความจุสำรอง (Fiber-span Wavelength)
1	454	96	454	884
2	482	91	241	922
4	508	88	127	1016
8	544	85	68	1064
16	832	53	53	1404
32	1824	24	57	1824
64	3328	13	52	3328
128	7296	1	57	7296

เมื่อมีการเผื่อความจุสำรองสำหรับการป้องกันโครงข่ายด้วยวิธี PSW จะเห็นว่า ตั้งแต่ที่ M=1 ถึง 8 ต้นทุนจะเพิ่มขึ้นเกือบ 1 เท่าของต้นทุนในสภาวะปกติ ทั้งนี้เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงปกติมีค่าสูง ความจุในเส้นใยแสงทำงานที่สามารถนำไปใช้ในการป้องกันโครงข่ายมีเหลือน้อย ดังนั้นในการเผื่อความจุสำรองจึงต้องเพิ่มเส้นใยแสงเข้าไปใหม่จนเกือบเท่ากับความต้องการปกติ แต่ตั้งแต่ที่ M= 16 เป็นต้นไป เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงปกติจะลดต่ำลง นั่นคือ เหลือความจุที่จะนำไปใช้สำรองโครงข่ายมากขึ้น เส้นใยแสงที่ต้องเพิ่มในการเผื่อความจุสำรองจึงน้อยลง สังเกตว่าที่ M ตั้งแต่ 32 เป็นต้นไป จะไม่ต้องเพิ่มเส้นใยแสงเพื่อการป้องกันโครงข่ายอีก เนื่องจากสามารถสำรองบนความจุที่เหลือบนเส้นใยแสงทำงานได้หมด ทำให้ต้นทุนเมื่อมีการเผื่อความจุสำรองไม่เพิ่มขึ้นจากในสภาวะปกติเลย ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้น แม้ว่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงลดลง แต่จะเป็นผลดีหากใช้วิธีการสำรองความจุบนเส้นใยแสงทำงานก่อน เนื่องจากเส้นใยแสงที่ต้องวางใหม่น้อยลง

6.5 ผลของลักษณะของทราฟฟิกแบบ Non-uniform

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงลักษณะของทราฟฟิกที่มีผลต่อการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าทราฟฟิกได้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ทราฟฟิกแบบ Uniform และทราฟฟิกแบบ Non-uniform ดังนั้นในส่วนนี้จึงจะวิเคราะห์ผลของลักษณะทราฟฟิกในโครงข่ายที่มีการกระจายแบบ Non-uniform ต่าง ๆ กันไป 3 แบบ ได้แก่

1. ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกของคู่โนดที่ติดกันจำนวนมาก (Near_x_y)
2. ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกของคู่โนดที่ไม่ติดกันจำนวนมาก (Far_x_y)
3. ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกไปสู่โนดใดโนดหนึ่งมาก (Central_x_y)

เมื่อ x แทนปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่มีทราฟฟิกหนาแน่น และ y แทนปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่มีทราฟฟิกเบาบาง ตัวอย่างของทราฟฟิกที่จะใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.4 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ ในการทดสอบจะทำบนโครงข่าย EUROCore ซึ่งมีระยะทางสั้นที่สุดระหว่างโนดต่าง ๆ ในโครงข่ายแสดงดังตารางที่ 6.3 ผลการออกแบบจะนำมาเปรียบเทียบกับทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดเป็น 4 (U4) ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ทั้ง 3 แบบข้างต้นที่ใช้ทดสอบจะได้รับการปรับค่าให้มีปริมาณทราฟฟิกรวมกันทุกคู่โนดเท่ากับ 440 ซึ่งเท่ากับผลรวมของทราฟฟิกทุกคู่โนดในโครงข่ายที่ใช้ทราฟฟิกแบบ U4 ในการปรับให้ปริมาณทราฟฟิกรวมมีค่าเท่ากับที่กำหนดจะใช้วิธีการสุ่มวางทราฟฟิกเพิ่มเข้าไปในบางคู่โนด หรือลดทราฟฟิกของบางคู่โนดลงจนกว่าผลรวมทราฟฟิกจะมีค่าพอดีกับที่กำหนด

โนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	8	8	8	8	0	0	0	0	0	0
2	8	0	0	8	0	8	8	8	0	0	0
3	8	0	0	0	8	0	0	0	8	8	8
4	8	8	0	0	0	0	0	8	8	8	0
5	8	0	8	0	0	8	8	0	0	0	8
6	0	8	0	0	8	0	8	0	8	0	8
7	0	8	0	0	8	8	0	8	0	0	0
8	0	8	0	8	0	0	8	0	8	0	0
9	0	0	8	8	0	8	0	8	0	8	0
10	0	0	8	8	0	0	0	0	8	0	8
11	0	0	8	0	8	8	0	0	0	8	0

(ก) ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกของคู่โนดที่ติดกันจำนวนมาก (Near_8_0)

รูปที่ 6.4 ทราฟฟิก Non-uniform 3 แบบที่จะใช้ทดสอบ

โนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	7	7	7	7	7	7
2	0	0	7	0	7	0	0	0	7	7	7
3	0	7	0	7	0	7	7	7	0	0	0
4	0	0	7	0	7	7	7	0	0	0	7
5	0	7	0	7	0	0	0	7	7	7	0
6	7	0	7	7	0	0	0	7	0	7	0
7	7	0	7	7	0	0	0	0	7	7	7
8	7	0	7	0	7	7	0	0	0	7	7
9	7	7	0	0	7	0	7	0	0	0	7
10	7	7	0	0	7	7	7	7	0	0	0
11	7	7	0	7	0	0	7	7	7	0	0

(ข) ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกของคู่โนดที่ไม่ติดกันจำนวนมาก (Far_7_0)

โนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
2	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(ค) ทราฟฟิกแบบ Non-uniform ที่มีทราฟฟิกไปสู่โนดหมายเลข 1 มากเป็นพิเศษ (Central_22_0)

รูปที่ 6.4 (ต่อ) ทราฟฟิก Non-uniform 3 แบบที่จะใช้ทดสอบ

ตารางที่ 6.3 ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างโนดต่าง ๆ ของโครงข่าย EUROCore (นับเป็นฮอป)

โนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
2	1	0	2	1	2	1	1	1	2	2	3
3	1	2	0	2	1	2	2	3	1	1	1
4	1	1	2	0	2	2	2	1	1	1	2
5	1	2	1	2	0	1	1	2	2	2	1
6	2	1	2	2	1	0	1	2	1	2	1
7	2	1	2	2	1	1	0	1	2	3	2
8	2	1	3	1	2	2	1	0	1	2	3
9	2	2	1	1	2	1	2	1	0	1	2
10	2	2	1	1	2	2	3	2	1	0	1
11	2	3	1	2	1	1	2	3	2	1	0

นอกจากจะทดสอบกับทราฟฟิกทั้ง 3 แบบดังกล่าว จะทดสอบกับค่าทราฟฟิกที่เปลี่ยนไป โดยจะลดปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่มีทราฟฟิกหนาแน่นลง (ลดค่า x) และเพิ่มปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่มีทราฟฟิกเบาบาง (เพิ่มค่า y) การปรับเปลี่ยนค่าทราฟฟิกทั้ง 3 แบบนี้ จะต้องให้ได้ค่าผลรวมของปริมาณทราฟฟิกที่ทดสอบเท่ากับ 440 เสมอ ตารางที่ 6.4 แสดงต้นทุนของโครงข่าย, จำนวนวงแหวนที่เลือก, เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ และขนาดของวงแหวนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกับทราฟฟิก Non-uniform ชนิดต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดที่ M=1

จากตารางจะพบว่า แม้ทราฟฟิกรวมในโครงข่ายจะมีปริมาณเท่ากัน คือ 440 แต่ผลการออกแบบโครงข่ายกลับต่างกันไปในทราฟฟิกแต่ละแบบ โดยทราฟฟิกแบบที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุด คือ ทราฟฟิกแบบ Near_8_0 ให้ต้นทุนเป็น 278 Fiber-span Wavelengths เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าทราฟฟิกแบบนี้มีทราฟฟิกเฉพาะคู่โนดที่ติดกันเท่านั้น เส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกจึงมีความยาวเพียง 1 ข่ายเชื่อมโยง วงแหวนที่เลือกจึงมีขนาดเล็กและมีจำนวนน้อย จึงทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าต่ำ แต่เมื่อทราฟฟิกได้ถูกกระจายไปสู่คู่โนดอื่น ๆ นอกเหนือจากคู่โนดที่ติดกันมากขึ้น ต้นทุนของโครงข่ายจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้เส้นทางยาวขึ้นในการรองรับทราฟฟิกที่เพิ่มเข้ามา ส่งผลให้วงแหวนที่เลือกมีขนาดใหญ่ขึ้น ต้นทุนจึงสูงขึ้น เมื่อใช้ทราฟฟิกแบบ Near_7_1, Near_6_2 และ Near_5_3 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.4 ผลที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวน เมื่อใช้ทราฟฟิก Non-uniform ชนิดต่าง ๆ ที่ M=1

ลักษณะของทราฟฟิก	ต้นทุนของโครงข่าย (Fiber-span Wavelength)	จำนวนวงแหวนที่เลือก	เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ (%)	ขนาดวงแหวนเฉลี่ย (โนด)
U4	350	23	100	4.35
Far_7_0	506	18	89	4.44
Far_6_1	442	26	98	4.15
Far_5_2	423	20	94	4.40
Near_8_0	273	15	89	3.73
Near_7_1	304	21	88	4.14
Near_6_2	329	27	993	4.15
Near_5_3	379	17	91	4.35
Central_22_0	396	8	89	3.75
Central_17_1	399	19	88	4.26
Central_13_2	387	26	91	4.15
Central_8_3	377	24	93	4.21

เมื่อพิจารณาทราฟฟิกอีกประเภท คือ ทราฟฟิกของคู่โนดที่อยู่ไม่ติดกันมีจำนวนมากหรือแบบ Far_7_0 จะพบว่าทราฟฟิกชนิดนี้ต้องการต้นทุนสูงกว่าแบบ Near มาก โดยจะเห็นได้ว่าขนาดของวงแหวนในกรณีนี้จะใหญ่มากเพื่อรองรับทราฟฟิกของคู่โนดที่อยู่ไกลกัน และในทางกลับกัน หากทราฟฟิกของคู่โนดที่ไกลกันนี้ลดลง คือ ทราฟฟิกได้รับการกระจายไปสู่คู่โนดที่ติดกันมากขึ้น ต้นทุนของโครงข่ายจะลดลง ดังจะเห็นได้เมื่อใช้ทราฟฟิกแบบ Far_6_1 และ Far_5_2 ตามลำดับ ผลการทดสอบกับทราฟฟิกทั้ง 2 ประเภทแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายที่มีทราฟฟิกของคู่โนดที่ติดกันมาก ๆ (แบบ Near) เป็นผลดีกับการออกแบบโครงข่าย เนื่องจากจะมีต้นทุนต่ำกว่าทราฟฟิกของคู่โนดที่อยู่ห่างกัน (แบบ Far) ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากวงแหวนที่เลือกจะมีขนาดเล็กกว่า และสังเกตว่าทราฟฟิกแบบ U4 ซึ่งเป็นแบบที่มีทราฟฟิกของคู่โนดทุกคู่เท่ากัน ต้นทุนของโครงข่ายจะมีค่าอยู่ระหว่างแบบ Near_6_2 และแบบ Far_5_2 ดังนั้นการใช้ทราฟฟิกแบบ Uniform จึงเป็นกรณีที่ส่งผลปานกลางต่อต้นทุนของการออกแบบโครงข่าย

ทราฟฟิกแบบสุดท้ายที่จะพิจารณา คือ ทราฟฟิกแบบที่มีทราฟฟิกไปสู่โนดใดโนดหนึ่งมากเป็นพิเศษ (Central) จากตารางจะเห็นว่าทราฟฟิกประเภทนี้ให้ค่าต้นทุนอยู่ระหว่างแบบ Near และแบบ Far โดยที่จะมีค่าสูงกว่าแบบ Near เล็กน้อย แต่ค่าจะต่ำกว่าแบบ Far และมีค่าสูงกว่าแบบ U4 แสดงว่าทราฟฟิกชนิดนี้ส่งผลปานกลางต่อการออกแบบโครงข่าย พิจารณาทราฟฟิกแบบ Central_22_0 จะพบว่าวงแหวนที่เลือกมีจำนวนน้อยมากและส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก แต่เมื่อทราฟฟิกได้ถูกกระจายไปยังคู่โนดอื่นนอกเหนือจากไปยังโนดที่เป็นศูนย์กลางดังในกรณีแรกมากขึ้น ต้นทุนจะมีค่าลดลงเล็กน้อย (ยกเว้นกรณี Central_17_1) และวงแหวนที่เลือกจะมีจำนวนมากขึ้น ดังจะเห็นได้ในทราฟฟิกแบบ Central_13_2 และแบบ Central_8_3 ตามลำดับ

ในลำดับต่อไปจะขยายผลการทดสอบกับทราฟฟิกแบบ Non-uniform ชนิด Central_22_0 โดยจะทดลองเปลี่ยนโนดที่เป็นโนดศูนย์กลางไปจนครบทุกโนดของโครงข่าย ตารางที่ 6.5 แสดงค่าต้นทุนของโครงข่าย, จำนวนวงแหวนที่เลือก, เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ และขนาดของวงแหวนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกับทราฟฟิกแบบ Central_22_0 เมื่อมีโนดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันที่ M=1

ตารางที่ 6.5 ผลที่ได้จากการออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวน เมื่อใช้ทราฟฟิกแบบ Central_22_0 ที่มีโนดศูนย์กลางเป็นโนดต่าง ๆ กันที่ M=1

ตำแหน่งโนดศูนย์กลาง	ต้นทุนของโครงข่าย (Fiber-span Wavelength)	จำนวนวงแหวนที่เลือก	เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ (%)	ขนาดวงแหวนเฉลี่ย (โนด)
โนด 1	396	8	89	3.75
โนด 2	418	7	84	3.86
โนด 3	418	8	84	4.00
โนด 4	407	8	89	3.88
โนด 5	407	8	89	3.88
โนด 6	396	7	83	3.63
โนด 7	429	9	90	4.00
โนด 8	440	8	85	4.25
โนด 9	396	8	89	3.71
โนด 10	429	9	95	4.00
โนด 11	440	8	90	4.00

จากตารางจะเห็นว่า เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งโนดศูนย์กลางไป ทั้งต้นทุนของโครงข่าย, จำนวนและขนาดเฉลี่ยของวงแหวน, เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ในเส้นใยแสงจะมีค่าแตกต่างกันไป ขึ้นกับโนดที่เป็นจุดศูนย์กลางของทราฟฟิกนั้น จากตาราง ต้นทุนจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อใช้โนด 8 หรือ โนด 11 เป็นจุดศูนย์กลาง และจะมีค่าต่ำที่สุด เมื่อใช้โนด 1, 6 หรือ 9 เป็นจุดศูนย์กลาง

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างโนดต่าง ๆ ดังในตารางที่ 6.3 ประกอบกัน จะพบว่า โนด 8 และโนด 11 เป็นโนดที่ห่างจากบางโนดในโครงข่ายมากเป็นพิเศษ กล่าวคือ โนด 8 ห่างจากทั้งโนด 3, 11 เป็นระยะทาง 3 ข่ายเชื่อมโยง และโนด 11 ห่างจากทั้งโนด 2, 8 เป็น ระยะทาง 3 ข่ายเชื่อมโยง ในขณะที่โนดอื่น ๆ จะมีระยะห่างระหว่างกันเป็น 1 หรือ 2 ข่ายเชื่อมโยง เท่านั้น เมื่อพิจารณาข้อสังเกตนี้ จะวิเคราะห์ได้ว่า หากโนดศูนย์กลางห่างจากโนดใดโนดหนึ่งมาก เป็นพิเศษทำให้ต้องเลือกวงแหวนบางวงที่ขนาดใหญ่ขึ้นในการรองรับทราฟฟิกที่ห่างไกลนั้น ต้นทุน จึงสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากเลือกโนดที่มีระยะทางใกล้กับโนดอื่น ๆ ที่เหลือ เช่น โนด 1, 6 หรือ 9 เป็นโนดศูนย์กลางจะทำให้วงแหวนที่เลือกมีขนาดเล็กลงได้ เนื่องจากไม่ต้องรองรับทราฟฟิกที่ห่าง ไกลและทำให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าต่ำ สำหรับการเลือกโนด 2, 3, 7 และ 10 เป็นโนดศูนย์กลาง จะได้ต้นทุนที่มีค่าอยู่กลาง ๆ ระหว่างกรณีที่ต้นทุนสูงสุดและต้นทุนต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากโนดเหล่านี้ แม้ว่าจะมีระยะทางใกล้กับโนดอื่น ๆ แต่ยังคงมีระยะทางไกลจากโนดบางโนดด้วย เช่น โนด 2 ห่าง จากโนด 11, โนด 3 ห่างจากโนด 8 จึงไม่สามารถออกแบบให้ต้นทุนของโครงข่ายมีค่าต่ำได้เท่ากับ กรณีที่โนด 1, 6 หรือ 9 เป็นโนดศูนย์กลาง ดังนั้นสรุปได้ว่า การเลือกโนดศูนย์กลางมีความสำคัญ กับทราฟฟิกแบบ Central เนื่องจากจะมีผลต่อขนาดวงแหวนที่เลือกและค่าต้นทุน โนดศูนย์กลาง ที่ดีควรมีระยะห่างกับโนดทุก ๆ โนดในโครงข่ายพอ ๆ กัน

6.6 ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ในส่วนนี้จะวิเคราะห์ความสำคัญของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของ โครงข่ายที่ได้ออกแบบ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าอุปกรณ์ชนิดนี้อาจช่วยลดจำนวนความยาวคลื่นที่ ต้องการในวงแหวนลงได้ ต้นทุนของโครงข่ายที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจึงน้อยกว่าหรือ เท่ากับต้นทุนของโครงข่ายที่ไม่มีอุปกรณ์ชนิดนี้เสมอ ตารางที่ 6.6 แสดงต้นทุนของโครงข่าย EUROCore ทั้งในระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและมีอุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น ในการทดสอบจะทดสอบกับทราฟฟิกแบบ Uniform ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน 7 ค่า คือ 1, 2, 3, 4, 5, 16 และ 17 โดยจะศึกษาทราฟฟิกแต่ละค่าเมื่อใช้จำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ กันในเส้นใยแสง (M) ที่มีค่าต่าง ๆ กัน คือ 1, 2, 4, 8, 16 และ 32

ตารางที่ 6.6 ต้นทุนของโครงข่าย EUROCore ทราฟฟิก Uniform ขนาดต่าง ๆ กัน ทั้งในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ทราฟฟิก	M	มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น		ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	
		สภาวะปกติ	มีการเผื่อความจุสำรอง	สภาวะปกติ	มีการเผื่อความจุสำรอง
U1	1	92	184	92	184
	2	116	232	116	232
	4	212	280	212	280
	8	416	632	416	632
	16	848	848	848	848
	32	1824	1824	1824	1824
U2	1	176	352	176	352
	2	186	372	186	372
	4	232	464	232	464
	8	416	632	416	632
	16	848	848	848	848
	32	1824	1824	1824	1824
U3	1	273	***534***	273	***538***
	2	300	594	300	594
	4	348	696	348	696
	8	416	832	416	832
	16	848	944	848	944
	32	1824	1824	1824	1824
U4	1	350	700	350	700
	2	350	700	350	700
	4	372	744	372	744
	8	456	848	456	848
	16	848	1280	848	1280
	32	1824	1824	1824	1824

ทราฟฟิก	M	มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น		ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	
		สภาวะปกติ	มีการเผื่อความจุสำรอง	สภาวะปกติ	มีการเผื่อความจุสำรอง
U5	1	454	***880***	454	***884***
	2	482	922	482	922
	4	508	1016	508	1016
	8	544	1064	544	1064
	16	832	1408	832	1408
	32	1824	1824	1824	1824
U16	1	1408	2816	1408	2816
	2	1408	2816	1408	2816
	4	1408	2816	1408	2816
	8	1408	2816	1408	2816
	16	1488	2976	1488	2976
	32	1824	3392	1824	3392
U17	1	1520	***2975***	1520	***2983***
	2	1540	3008	1540	3008
	4	1684	3124	1684	3124
	8	1928	3392	1928	3392
	16	1984	3968	1984	3968
	32	2176	4256	2176	4256

จากตารางจะเห็นว่า ต้นทุนในสภาวะปกติในระบบที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีค่าพอ ๆ กับต้นทุนในระบบที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในทุก ๆ กรณี แสดงว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลต่อต้นทุนเส้นใยแสงของโครงข่ายในสภาวะปกติเลย แต่เมื่อมีการเผื่อความจุสำรองเพื่อป้องกันโครงข่าย อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลเล็กน้อยต่อต้นทุนของโครงข่ายที่ M=1 ในกรณีที่ทราฟฟิกเป็น 3, 5 และ 17 ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดสอบในหัวข้อ 6.4 ได้แสดงว่าเมื่อใช้ทราฟฟิกค่าคี่ในการทดสอบ จะเหลือความจุส่วนหนึ่งซึ่งไม่ได้ใช้ในการรองรับทราฟฟิกในสภาวะปกติเสมอ และในบทที่ 5 ได้สรุปไว้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะส่งผลต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ต้องการและต้นทุนของโครงข่าย เมื่อใช้การสำรองความจุด้วยวิธี PSW ที่

เส้นใยแสงทำงานยังมีความจุเหลือจากการใช้รองรับทราฟฟิกในสภาวะปกติ ดังนั้นที่ทราฟฟิกเป็นค่าคี่เหล่านี้จึงพบว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถประหยัดต้นทุนเมื่อสำรองความจุได้

แต่อย่างไรก็ตาม ต้นทุนที่สามารถประหยัดได้โดยใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นนี้เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะมีค่าน้อยมาก และเมื่อทราฟฟิกมีค่าอื่น ๆ หรือ M มีค่ามากกว่า 1 จะพบว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะไม่ส่งผลทำให้ต้นทุนลดลงอีก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นส่งผลต่อค่าต้นทุนเพียงเล็กน้อย จึงเป็นอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็นในโครงข่าย WDM ที่ใช้โครงสร้างแบบวงแหวนหลายวง