บทที่ 2
การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบวงแหวน

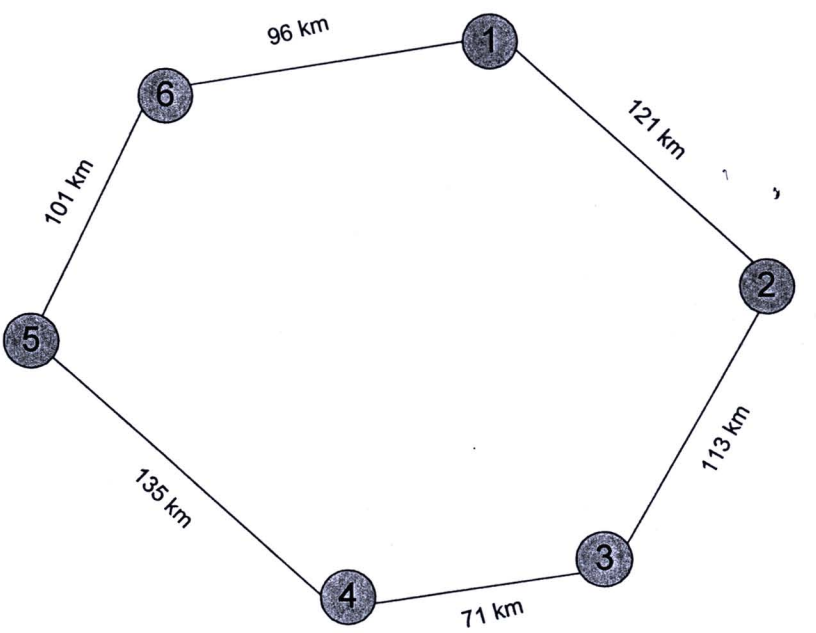
ในบทนี้ จะกล่าวถึงการศึกษาการนำเครื่องสังยุคเฟสแสงมาใช้ในระบบโครงข่าย โดยเริ่มต้นศึกษาการทำงานของเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ในระบบโครงข่าย 3 แบบ คือ โครงข่ายเชื่อมโยงปกติ โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายกรณีมีช่องความยาวคลื่นเหลือเพียงพอ และโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายกรณีมีช่องความยาวคลื่นเหลือไม่เพียงพอ จากนั้นเป็นการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบต่างๆ จากนั้นทำการแสดงผลการคำนวณด้วยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง

2.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

ในการเริ่มต้นวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจะเริ่มทำการศึกษาจากเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น เพื่อควบคุมจำนวนตัวแปรในการวาง เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจะมีปั๊มพลังงาน 2 ตำแหน่งเพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกตให้เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดิมดัง**ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** และทำการวางลงบนโครงข่ายตัวอย่าง

2.1.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

การศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสทางแสงเพื่อจัดวางในโครงข่ายแบบวงแหวนทำได้โดยการทดสอบกับโครงข่ายตัวอย่างดัง รูปที่ 2. ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 6 เส้นใยแสง ส่งข้อมูลสองทิศทาง โดยวิธีที่ได้ศึกษาและนำเสนอนี้มีทั้งหมด 3 ขั้นตอนในการหาตำแหน่งวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงข่ายตัวอย่าง

2.1.1.1 ความเป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งในแต่ละสถานี

ในขั้นแรก ต้องทำการหาจำนวนทราฟฟิกที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งซึ่งมีจำนวนเท่ากับ $N \times (N-1)$ แบบ โดย N คือจำนวนสถานีทั้งหมด หลังจากนั้นทำการคำนวณหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก ซึ่งจากตัวอย่างโครงข่ายเราสามารถหาความเป็นไปได้ในการส่งทั้งหมดมี $6 \times 5 = 30$ การส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายตัวอย่างนี้โดยการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด

1 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนนาฬิกา ระยะทาง 217 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	6 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 135 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km	ระยะทาง 236 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 2.2

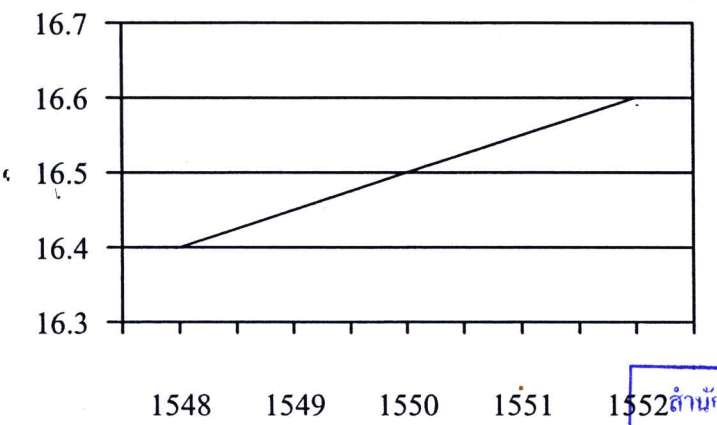
ตารางที่ 2.2 แสดงทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km .	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km

2.1.1.2 หาช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

การจัดการดิสเพอร์ชันของเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นขึ้นอยู่ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ ดังนั้นระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจึงมีผลต่อการจัดการดิสเพอร์ชัน ในการจัดการดิสเพอร์ชันเราจะเลือกค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่นที่มีผลมากที่สุดในโครงข่าย ซึ่งถ้าความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดของ

สัญญาณ ไม่เกินค่าจำกัดของดิสเพอร์ชัน (D_{max}) ความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถผ่านไปได้ด้วยเช่นกัน สำหรับทุกๆ ค่าของทราฟฟิกซึ่งเราหาได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้ว จะนำแต่ละทราฟฟิกมาหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง โดยไม่ให้ดิสเพอร์ชันเกินค่าที่กำหนดและใช้จำนวนน้อยที่สุด จากการทดลองในตัวอย่างโครงข่าย ซึ่งระบบทำการส่งข้อมูลด้วยความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นกลางอยู่ที่ 1550 nm มีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น 0.8 nm โดยโครงข่ายตัวอย่างใช้ เส้นใยแสงชนิด Single-mode fiber (SMF,G.652) ซึ่งมีดิสเพอร์ชัน (D_2) 16.5 ps/km/nm มีความชันดิสเพอร์ชัน (D_3) 0.05 ps/km/nm^2 ที่ 1550 nm และมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกิน 1600 ps/nm ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันดังรูปที่ 2.2 จากความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น เราจะเลือกความยาวคลื่นดังนี้ 1548.4 1549.2 1550 1550.8 และ 1551.6 nm ตามลำดับ



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 29 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 246741
เลขเรียกหนังสือ

รูปที่ 2.2 ดิสเพอร์ชันของ เส้นใยแสงชนิด SMF

จากความยาวคลื่น 1548.4 1549.2 1550 1550.8 และ 1551.6 nm รวมทั้งจากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นมากที่สุดคือความยาวคลื่น 1551.6 nm เราสามารถหาค่าดิสเพอร์ชั่นสูงสุดจากสมการที่ (2.1)

$$D = 16.5 + (1.6 \times 0.05) = 16.58 \qquad (2.1)$$

จากระยะทางและค่าดิสเพอร์ชันที่คำนวณได้ จากตารางที่ 2.2 เราสามารถหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ดัง ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง

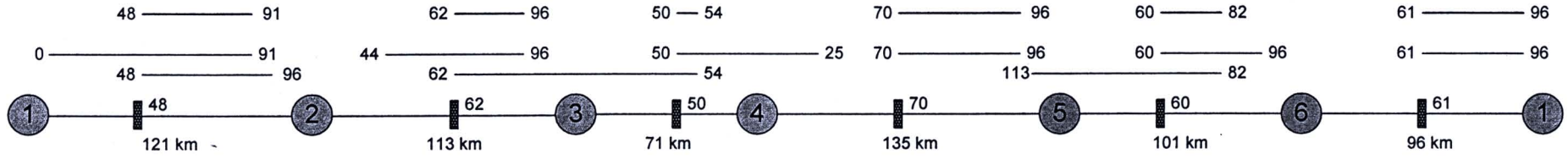
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 48-96 และ 183-288	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-96
1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km เลือกวางที่กม.ที่ 51-96	2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-96 และ 186-288

3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km เลือกวางที่กม.ที่ 69-96 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-96 และ 184-288	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 48-96 และ 183-288 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km เลือกวางที่กม.ที่ 70-96
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 60-96 และ 197-288 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km เลือกวางที่กม.ที่ 55-96	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-96 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-96 และ 184-288

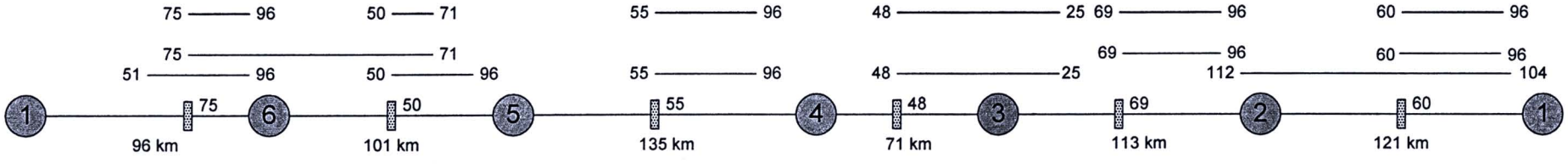
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสงแล้ว นำทุกช่วงที่คำนวณได้ มาเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนโครงข่ายตัวอย่าง เพื่อหาจุดวางที่เหมาะสมรูปที่ 0.13 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.44 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา โดยในการกำหนดตำแหน่งของเครื่องสังยุคเฟสแสง ในโครงข่ายนั้น มีข้อกำหนดว่าทุกๆช่วงระหว่างสถานีย่อยระหว่างเส้นทางหลัก หรือก็คือ ภายในทราฟฟิคย่อยของแต่ละช่วงนั้นต้องมีการติดตั้งเครื่องสังยุคเฟสแสง เพื่อไม่ให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดในแต่ละช่วงย่อยมีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงลงไปเพื่อไม่ให้ดิสเพอร์ชันสะสมเกินขอบเขต ตัวอย่างเช่น จากสถานีที่ 1 ส่งข้อมูลไปยังสถานีที่ 2 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา เราจะได้ช่วงในการวางคือ กิโลเมตรที่ 48-96 ของข้อมูลจากสถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 และ กิโลเมตรที่ 0-91 ของข้อมูลจากสถานีที่ 5 ส่งไปสถานีที่ 2 เราจะเลือกช่วงในการวางที่ซ้อนทับกัน นั่นก็คือ กิโลเมตรที่ 48-91 เป็นช่วงที่ร่วมกันทั้งหมด ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.1.1.3 ช่วงที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

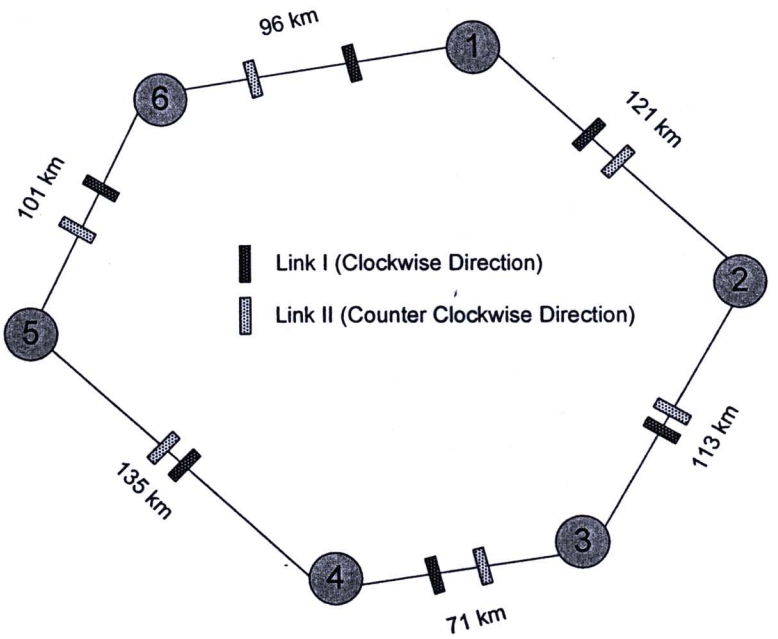
ในการส่งข้อมูลด้วยโครงข่ายแบบวงแหวนนั้น ผู้ใช้มีโอกาสนำสัญญาณข้อมูลไปใช้งานจากทุกตำแหน่งใดๆในโครงข่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้สัญญาณในระบบมีค่าดิสเพอร์ชันต่ำสุดตลอดระยะทางการส่ง ดังนั้นการคำนวณหาตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสง นะโครงข่ายควรเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับข้อกำหนดดังกล่าวด้วย จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 จะพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด คือ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้สถานีที่ส่งมากที่สุด อย่างในตัวอย่างจากสถานีที่ 1 ถึงสถานีที่ 2 ช่วงที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้คือ 48-91 เราต้องเลือกตำแหน่งที่ 48 เป็นจุดที่ห่างจากสถานีที่ 1 น้อยที่สุด และทำซ้ำกับทุกๆช่วงจะได้ตำแน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 0.1 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.4 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.5 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากที่ได้กล่าวมา จะพบว่า ตำแหน่งที่เหมะสมที่สุดสำหรับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง สามารถแสดงได้รูปที่ 2.5 โดยตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสง สำหรับกรณีมีการส่งข้อมูลแบบตามเข็มแสดงได้ด้วย Link 1 และสำหรับกรณีมีการส่งข้อมูลแบบตามเข็มแสดงได้ด้วย Link 2 ซึ่งสรุปตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 75

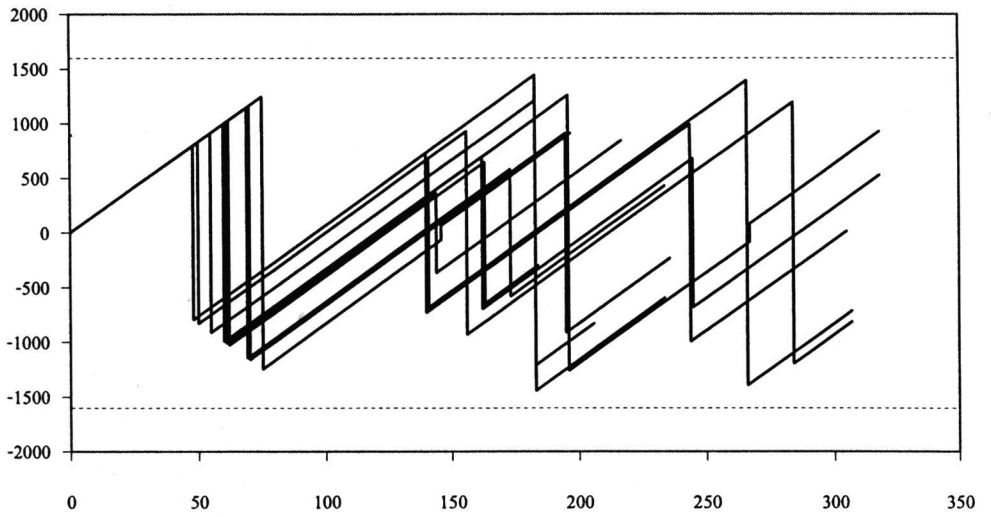
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 55

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

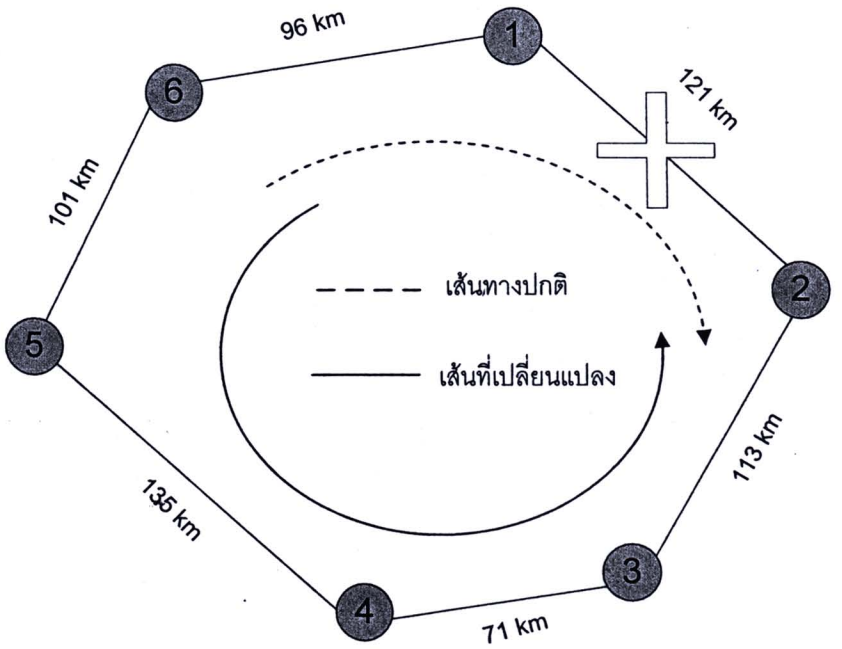


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

หลังจากที่ได้ดำเนินการทั้ง 3 ขั้นตอนจนได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด เราได้ตรวจสอบการทำงานของทราฟฟิก 30 ทราฟฟิก ซึ่งเป็นจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยการหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมและทำการเปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิคทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.1.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.1.1 ซึ่งเป็นการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ในกรณีโครงข่ายปกติ ในหัวข้อถัดไป เราได้ศึกษากรณีที่โครงข่ายมีการเสียหายเกิดขึ้น เช่น กรณีสายไฟเบอร์บางช่วงขาด เป็นต้น ซึ่งการเกิดการเสียหายเหล่านี้มีผลต่อการส่งข้อมูลในระบบ เนื่องจากเส้นทางของโครงข่ายจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นในการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายจึงซับซ้อนกว่ากรณีโครงข่ายปกติ เนื่องจากไม่สามารถคาดเดาตำแหน่งที่ข่ายเชื่อมโยงจะเกิดการเสียหายขึ้นได้ เราจึงทำการจำลองการเสียหายทีละส่วน และการศึกษาการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายในขั้นแรกในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ระบบจะนำข้อมูลที่ต้องส่งผ่านบริเวณที่ลิงค์เสียหายมาทำการส่งข้อมูลในลิงค์ที่ไม่เกิดการเสียหายแทน คือส่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางที่เสียหาย ระบบจะทำการเปลี่ยนจากความยาวคลื่นหลักมาเป็นความยาวคลื่นสำรอง ในการส่งข้อมูลแทน ซึ่งจะทำให้ระยะทางในการส่งเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังตัวอย่าง ถ้าเกิดการล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 จะทำให้ ทราฟฟิกที่ส่งจาก สถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 แบบตามเข็มนาฬิกา(ระยะทางสั้นที่สุด)ไม่สามารถส่งได้ ระบบจะทำการเปลี่ยนความยาวคลื่นและส่งในทิศทางตรงกันข้ามคือ ทวนเข็มนาฬิกา(ระยะทางยาวที่สุด) แทนดังรูปที่ 2.7 ทำให้ระยะทางเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

2.1.2.1 วิเคราะห์เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง

516 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

จากตารางที่ 2.5 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลที่ตัดเส้นทางการคำนวณที่ซ้ำซ้อนลง จากนั้น ในการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง จะคำนวณจากระยะทางระหว่างสถานีส่งที่มีการส่งไกลที่สุด เช่นเดียวกับการคำนวณการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางที่มีการส่งไกลที่สุดได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

2.1.2.2 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ 2.1 ค่าดิสเพอร์ชั่นเป็น 16.58 และระยะทางจากตารางที่ 2.6 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย

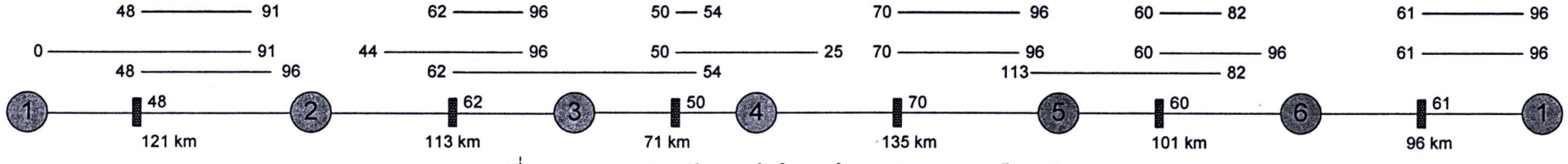
1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 332-480
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 332-480 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 232-288 และ 374-480 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง

566 km เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 232-288 และ 374-480	502 km เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480

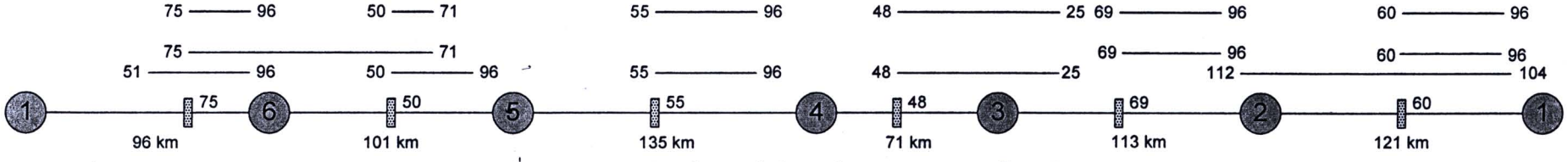
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และก็นำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 0.28 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.1.2.3 ช่วงที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

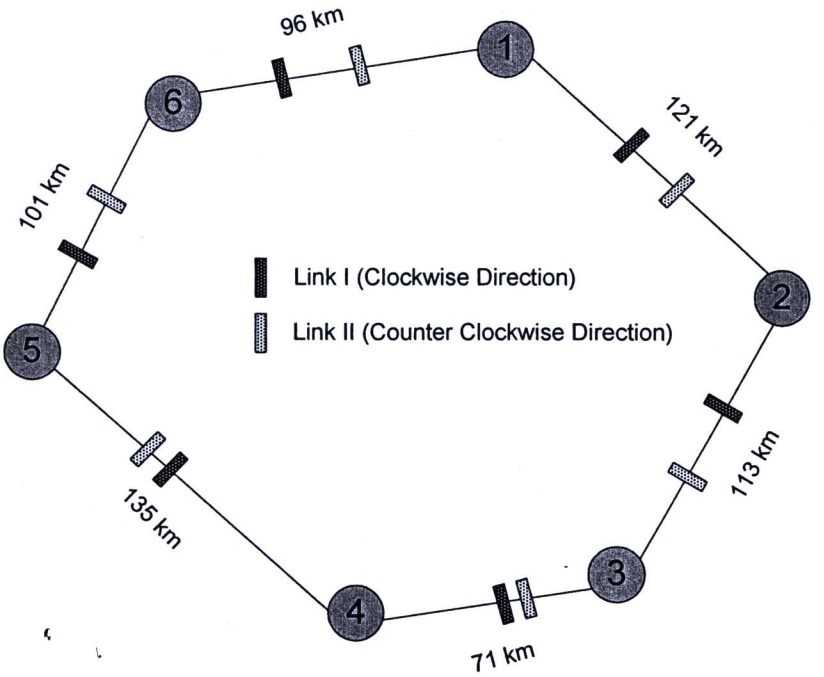
เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.30



รูปที่ 0.2 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.9 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.30 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.30 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศตรงข้ามกับความเสียหายนั้นโดยใช้ความยาวคลื่นสำรองในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปได้นี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 37

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 32

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 31

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 38

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 39

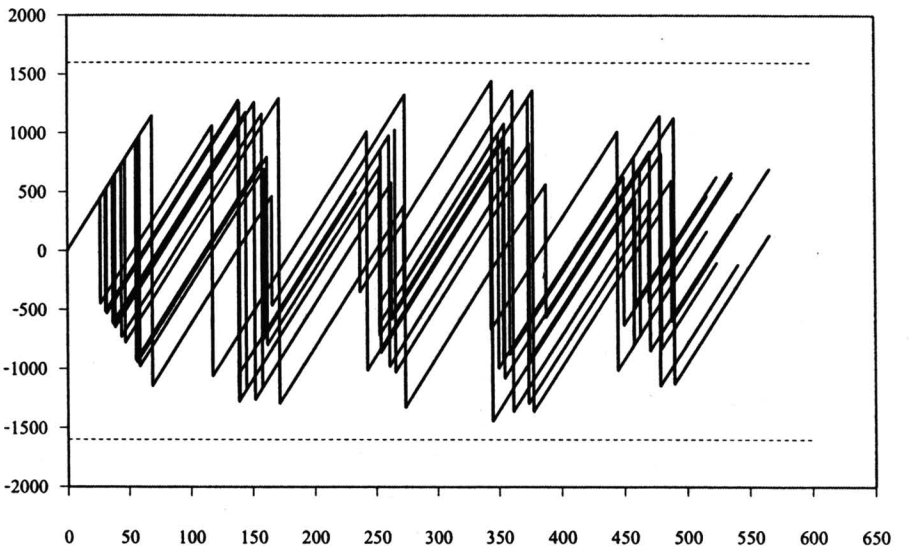
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 30

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 47

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 59

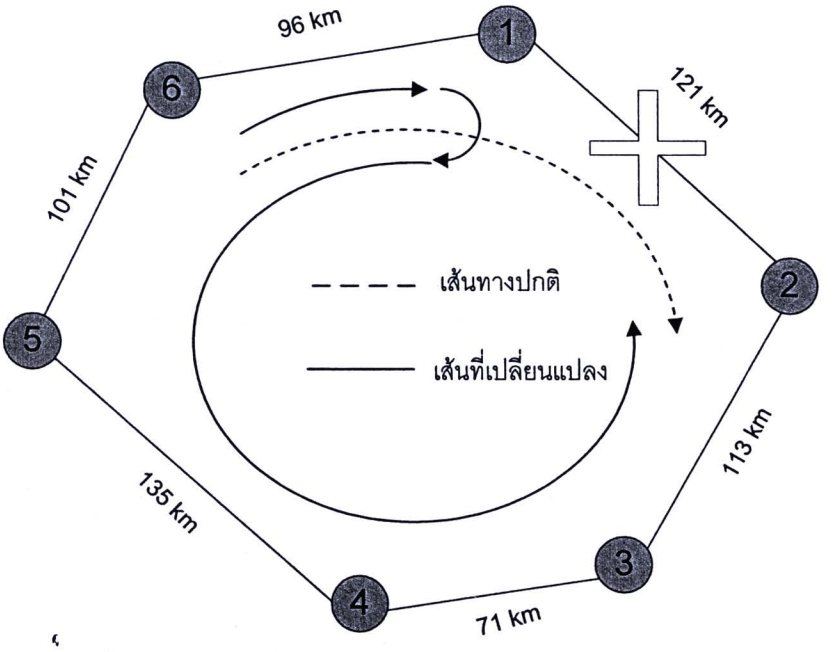


รูปที่ 2.41 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิคได้ดังรูปที่ 2.41 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิคทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.1.3 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้ามแทนการส่งในเส้นใยแสงหลักดังเช่นในหัวข้อ 2.1.2 โดยระบบจะทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้าม ซึ่งเป็นเส้นใยแสงซึ่งมีการติดตั้งคู่ขนานกับเส้นใยแสงปกติเพื่อใช้งานในขณะที่เส้นใยแสงหลักไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยการเปลี่ยนเส้นใยแสงไปใช้เส้นใยแสงสำรองจะเกิดขึ้นที่สถานีอยู่ใกล้ตำแหน่งที่เส้นใยแสงเกิดการเสียหาย ยกตัวอย่างตามรูปที่ 2.12 หากเส้นใยแสงเกิดการเสียหายระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 สถานีที่ 1 จะทำการเปลี่ยนเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังทิศทางตรงข้ามโดยทำการทอดข้าม ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลในทิศทางตรงข้าม โดยใช้เส้นใยแสงสำรองในการส่งข้อมูลแทนการเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นที่เหลือในเส้ยใยแสงหลักดังกรณีการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 2.52 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

2.1.3.1 เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ เป็นระยะทาง 96 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1) และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็นระยะทาง 516 (จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) รวมทั้ง 2 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 612 km ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

สำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม	สำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 574 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม 2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 474 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม 3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม 3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม 4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ

และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม 3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 472 กม	และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม 4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม 5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 532 กม 6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม

5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 561 กม
1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 521 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม

จากตารางที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทาง

เดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด ในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2. เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทาง 2 เส้นใยแสงพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม

2.1.3.2 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ (2.1) ค่าดิสเพอร์ชั่นเป็น 16.58 และระยะทางจากตารางที่ 2.9 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม เลือกวางที่กม.ที่ 70-96, 246-288 และ 430-480	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม เลือกวางที่กม.ที่ 14-96, 124-288, 316-480 และ 508-672
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม เลือกวางที่กม.ที่ 82-96, 260-288, 452-480 และ 644-672	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม เลือกวางที่กม.ที่ 65-96, 228-288 และ 420-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม เลือกวางที่กม.ที่ 77-96, 260-288 และ 458-480	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 334-480
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 334-480	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม เลือกวางที่กม.ที่ 58-96, 212-288 และ 404-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม เลือกวางที่กม.ที่ 64-96, 224-288, 416-480 และ 608-672	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม เลือกวางที่กม.ที่ 5-96, 105-288, 298-480 และ 490-672
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 182-288 และ 374-480	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 182-288 และ 374-480
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม เลือกวางที่กม.ที่ 14-96, 125-288, 318-480 และ 512-672	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม เลือกวางที่กม.ที่ 65-96, 226-288, 418-480 และ 610-672

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม เลือกวางที่กม.ที่ 47-96, 190-288 และ 382-480	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม เลือกวางที่กม.ที่ 61-96, 219-288 และ 412-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม เลือกวางที่กม.ที่ 73-96, 248-288 และ 440-480	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม เลือกวางที่กม.ที่ 7-96, 110-288, 302-480 และ 494-672
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม เลือกวางที่กม.ที่ 35-96, 166-288, 358-480 และ 550-672	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม เลือกวางที่กม.ที่ 3-96, 100-288, 290-480 และ 486-672
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 38-96,152-288 และ 344-480	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480

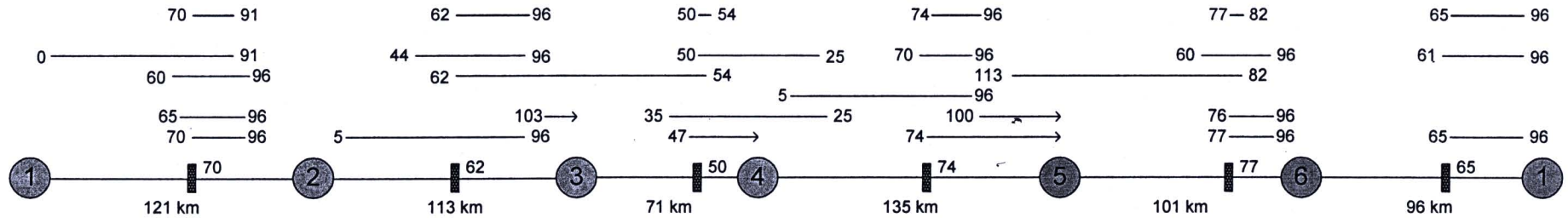
กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม เลือกวางที่กม.ที่ 61-96, 218-288 และ 410-480
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม เลือกวางที่กม.ที่ 76-96, 258-288 และ 450-480	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480

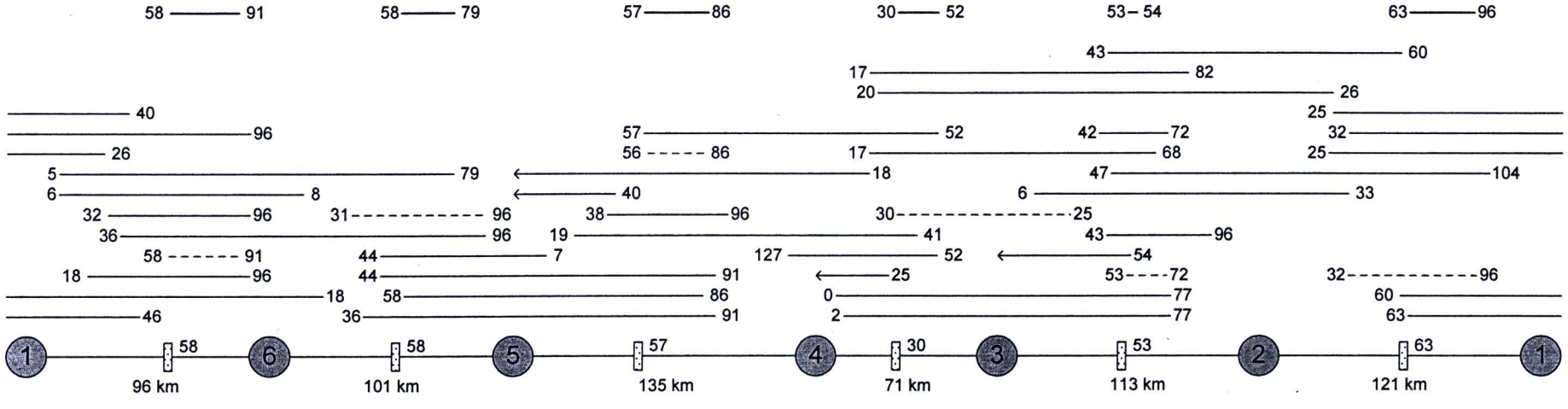
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.3 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง และรูปที่ 2.66 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

2.1.3.3 ช่วงที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

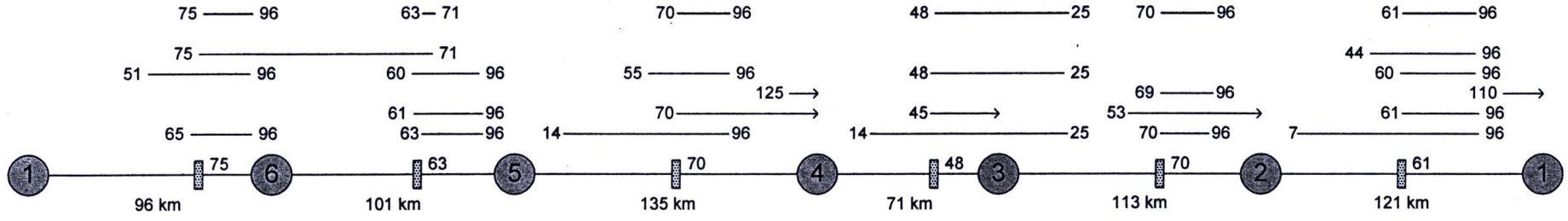
เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.77



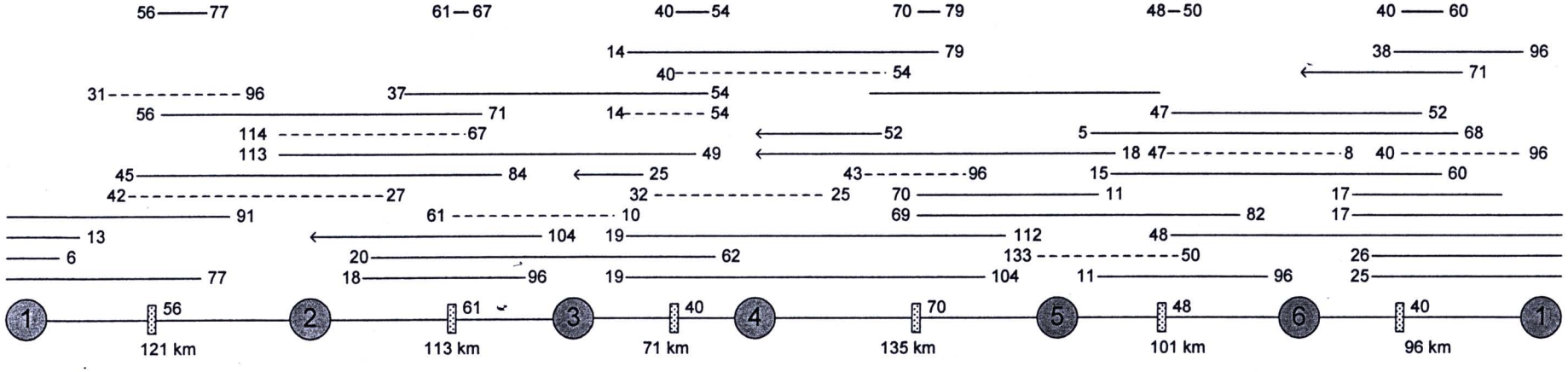
รูปที่ 2.13 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



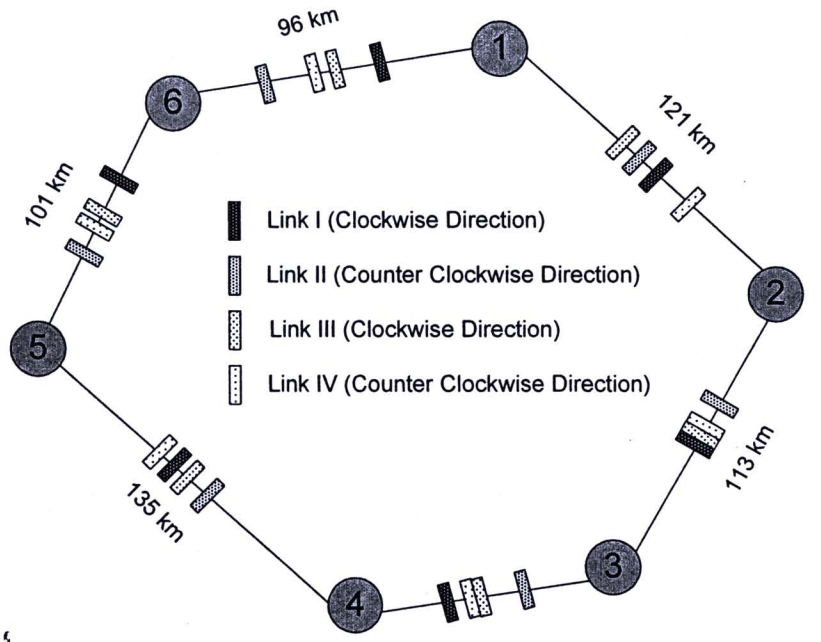
รูปที่ 2.14 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.15 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.6 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.77 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.77 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางที่ยังทำงานได้อยู่บนเส้นทางปกติและใช้เส้นใยแสงสำรองสำรองกับเส้นทางที่เสียหายในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งได้นี้

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 ⟶ 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 2 ⟶ 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 ⟶ 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 4 ⟶ 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 74

เส้นใยแสงจาก 5 ⟶ 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 77

เส้นใยแสงจาก 6 ⟶ 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 ⟶ 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 75

เส้นใยแสงจาก 6 ⟶ 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 5 ⟶ 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 4 ⟶ 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 3 ⟶ 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 2 ⟶ 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 ⟶ 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 40

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 40

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

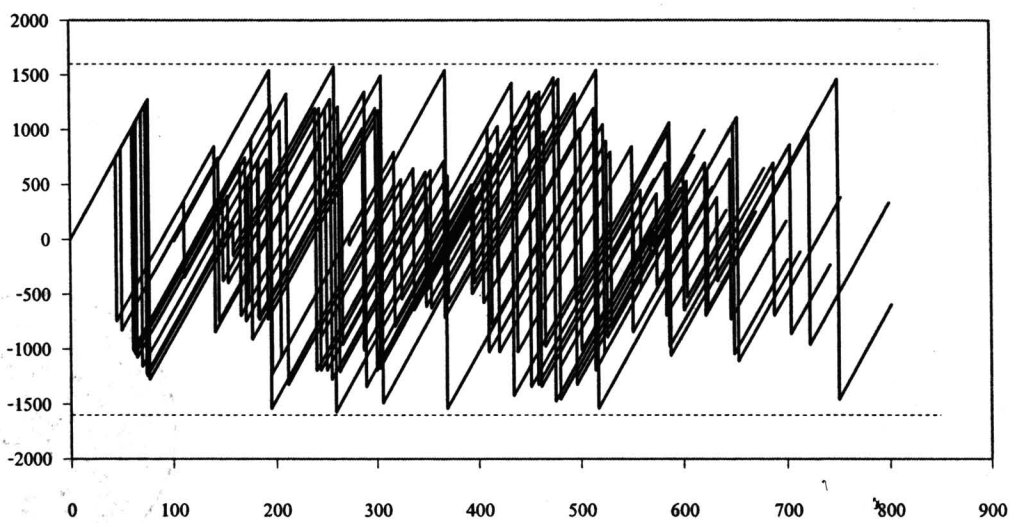
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 30

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 53

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 63



รูปที่ 2.88 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิคได้ดังรูปที่ 2.88 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิคทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในหัวข้อ 2.1 มาแล้ว แต่เครื่องสังยุคเฟสแสงที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนั้นเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะมีปั๊มพลังงาน 1 ตำแหน่งและทำให้ได้สัญญาณคอนจูเกตที่ความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงจากเดิมดัง**ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลงในโครงข่ายตัวอย่างเดิม

2.2.1 การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

จากโครงข่ายเดิมดังรูปที่ 2.1 ที่มีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 6 เส้นใยแสง ซึ่งวิธีที่ได้ศึกษาและนำเสนอนี้มีทั้งหมด 4 ขั้นตอนในการหาตำแหน่งวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้

2.2.1.1 จำนวนความยาวคลื่น

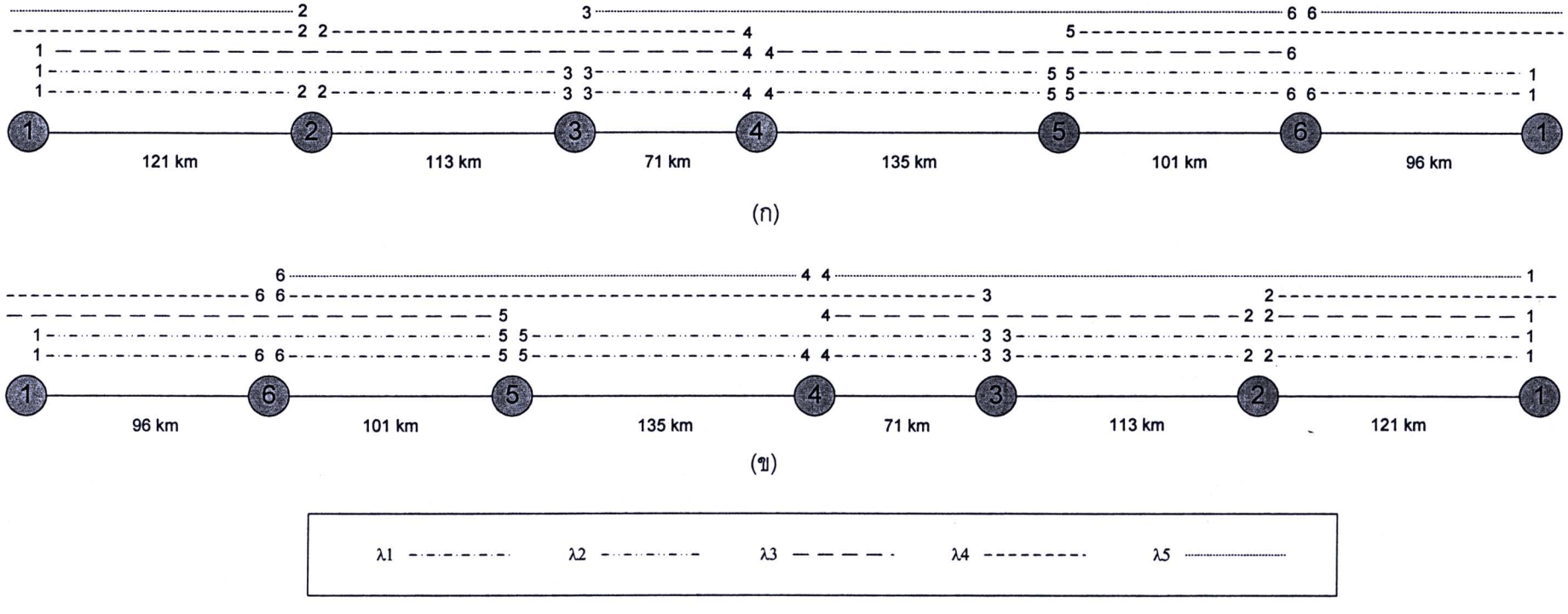
เราจะทำการหาจำนวนช่องความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.2)

$$W = \begin{cases} \dfrac{N^2-1}{8} & N \text{ odd} \\ \dfrac{N^2+4}{8} & N/2 \text{ odd} \\ \dfrac{N^2}{8} & N/2 \text{ even} \end{cases} \tag{2.2}$$

โดยที่ W คือ จำนวนช่องความยาวคลื่นที่ใช้ (ช่อง)

N คือ จำนวนสถานีในโครงข่าย (สถานี)

จากการคำนวณด้วยค่า N = 6 สถานี จะได้จำนวนช่องความยาวคลื่น 5 ช่อง และสามารถแจกแจงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงจำนวนช่องความยาวคลื่นที่ได้จากการคำนวณตามสมการ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง

2.2.1.2 ความเป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งในแต่ละสถานี

จำนวนทราฟฟิกทั้งหมดของการส่งมีจำนวนเท่ากับ $N \times (N-1)$ โดย N คือจำนวนสถานีทั้งหมด หลังจากนั้นจะทำการหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก ซึ่งจากตัวอย่างโครงข่ายเราสามารถหาความเป็นไปได้ในการส่งทั้งหมดมี 6x5 = 30 แบบในการส่ง โดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด และได้ผลตามตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด

1 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km
1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
1 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนนาฬิกา ระยะทาง 217 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km	4 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km
3 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	4 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง	6 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง

135 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km	236 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km

จากตารางที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km

2.2.1.3 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

การจัดการดิสเพอร์ชันของเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นขึ้นอยู่ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ ดังนั้นระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงจึงมีผลต่อการจัดการดิสเพอร์ชัน ในการจัดการดิสเพอร์ชันเราจะเลือกค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่นที่มีผลมากที่สุดในโครงข่าย ซึ่งถ้าความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดของสัญญาณ ไม่เกินค่าจำกัดของดิสเพอร์ชัน (D_{max}) ความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถผ่านไปได้ด้วยเช่นกัน สำหรับเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้น ดิสเพอร์ชั่นก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงและดิสเพอร์ชั่นหลัง

ออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นจะไม่เท่ากัน จากจำนวนความยาวคลื่นจากสมการที่ (2.2) ในโครงข่ายตัวอย่างจำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น ตาม ITU Grid Specification เราจะเลือกค่าความยาวคลื่นทั้ง 10 ความยาวคลื่น คือ 5 ความยาวคลื่นเข้าเครื่องสังยุคเฟลแสง ดังนี้ 1553.73, 1552.93, 1552.12, 1551.32 และ 1550.52 และ 5 ความยาวคลื่นหลังจากผ่านเครื่องสังยุคเฟสแสง ดังนี้ 1549.72, 1548.91, 1548.11, 1547.32 และ 1546.52จากนั้นหาค่าดิสเพอร์ชั่นจาก ITU-T Recommendation จากสมการที่ (2.3) ค่า D_{1550} เท่ากับ 17 ps/nm/km ค่า S_{1550} เท่ากับ 0.056 ps/nm^2/km คำนวณหาค่าดิสเพอร์ชั่นของความยาวก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ค่าดังนี้ 17.208, 17.164, 17.118, 17.073 และ 17.029 ตามลำดับ และคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชั่นของความยาวหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ค่าดังนี้ 16.984, 16.938, 16.894, 16.849 และ 16.805 ตามลำดับ ค่าดิสเพอร์ชั่นที่มีผลมากที่สุดก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสง คือ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชั่นที่มีผลมากที่สุดหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสง คือ 16.984 จากค่าทั้ง 2 และระยะทางจากตารางที่ 2.12 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดัง ตารางที่ 2.13

$$D_{Link}(\lambda) = D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550) \qquad (2.3)$$

โดย D_{1550} คือ chromatic dispersion coefficient ที่ 1550 nm (ps/nm/km)

S_{1550} คือ chromatic dispersion slope coefficient (ps/nm^2/km)

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ตารางที่ 2.13 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ)

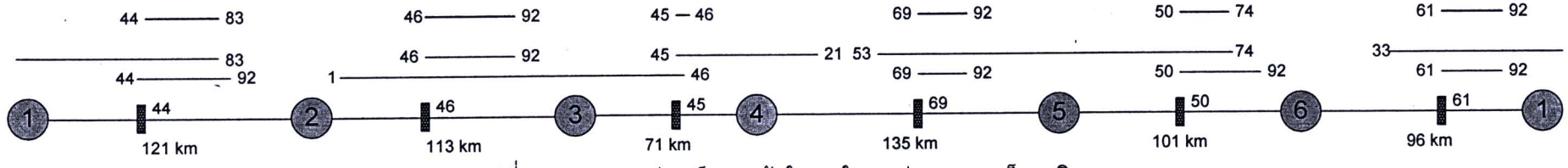
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-92 และ 122-280 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km เลือกวางที่กม.ที่ 51-92	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km เลือกวางที่กม.ที่ 46-92 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-92 และ 134-280
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km เลือกวางที่กม.ที่ 67-92 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 45-92 และ 124-280	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-92 และ 122-280 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km เลือกวางที่กม.ที่ 69-92
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-92 และ 124-280 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-92 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 206 km เลือกวางที่กม.ที่ 56-92	ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 45-92 และ 124-280

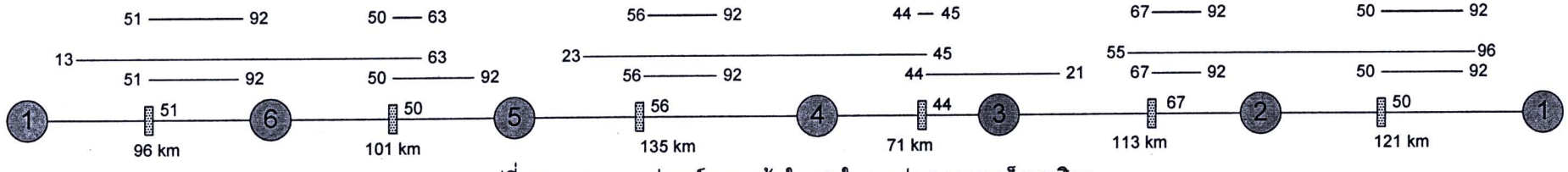
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นของโครงข่ายปกตินี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นของโครงข่ายปกติ แต่เปลี่ยนค่าดิสเพอร์ชั่นที่ใช้ในการคำนวณจาก 16.58 เป็น 17.208 และ 16.984 จากนั้นจึงนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.0 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.2.1.4 ช่วงที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

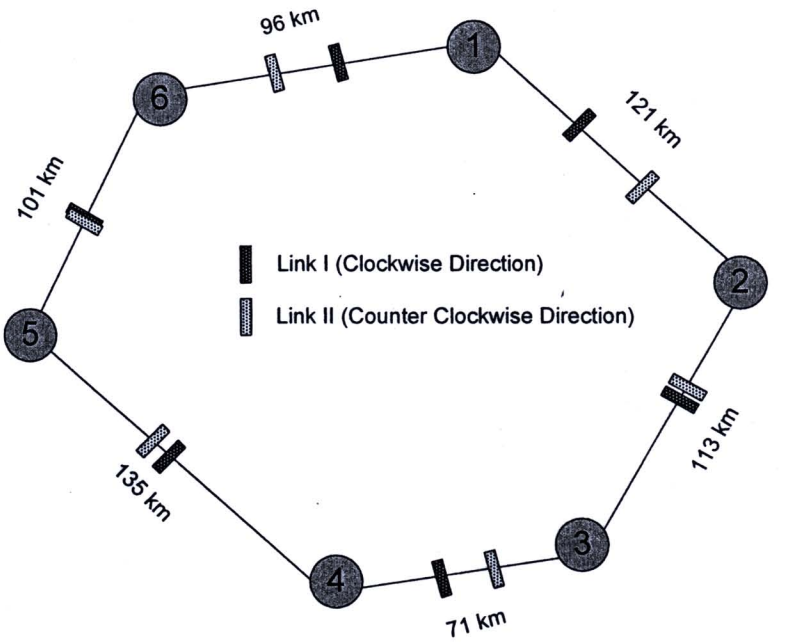
เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.92



รูปที่ 2.20 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.21 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.92 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.92 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายปกติที่ใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางได้นี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 46

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 45

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 51

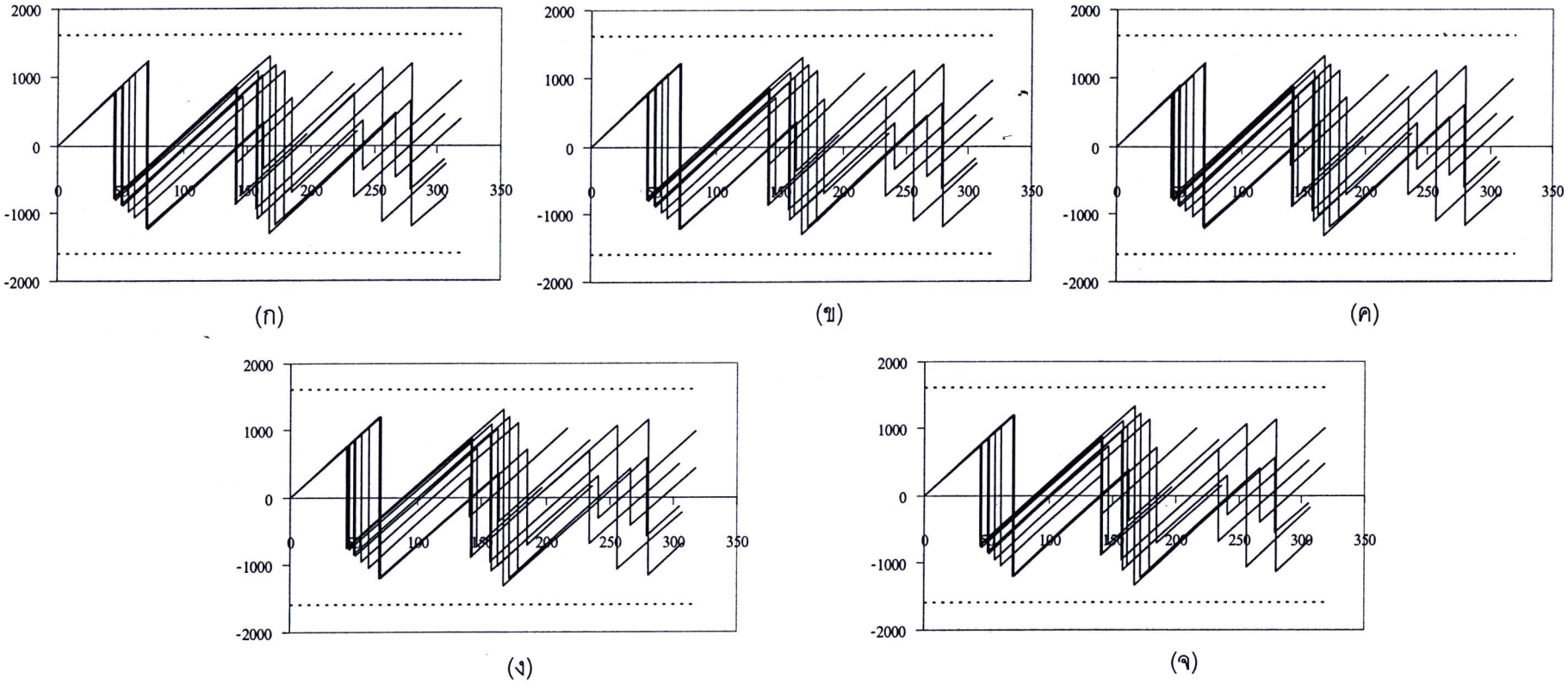
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 67

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 50



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

หลังจากที่ได้ดำเนินการทั้ง 4 ขั้นตอนจนได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด เราได้ตรวจสอบการทำงานของทราฟฟิกทั้งหมดและทุกความยาวคลื่นที่ใช้งาน โดยการหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมและทำการเปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนดของทุกความยาวคลื่น จากรูปที่ 2.103 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิคทุกเส้นทางและทุกความยาวคลื่นมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.2.2 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

หลังจากที่ทำการวางบนโครงข่ายปกติ ต่อไปเราจะทำการศึกษากรณีที่โครงข่ายเกิดการเสียหายซึ่งกลไกการกู้คืนข้อมูลเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.1.2

2.2.2.1 วิเคราะห์เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km

3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

จากตารางที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

จากตารางที่ 2.15 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลที่ตัดเส้นทางการคำนวณที่ซ้ำซ้อนลง จากนั้น ในการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง จะคำนวณจากระยะทางระหว่างสถานีส่งที่มีการส่งไกลที่สุดเช่นเดียวกับการคำนวณการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางที่มีการส่งไกลที่สุดได้ดังดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km

1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

2.2.2.2 หาช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ (2.3) ได้ค่าดิสเพอร์ชั่นก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชั่นหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 16.849 และระยะทางจากตารางที่ 2.166 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.177

ตารางที่ 2.17 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ)

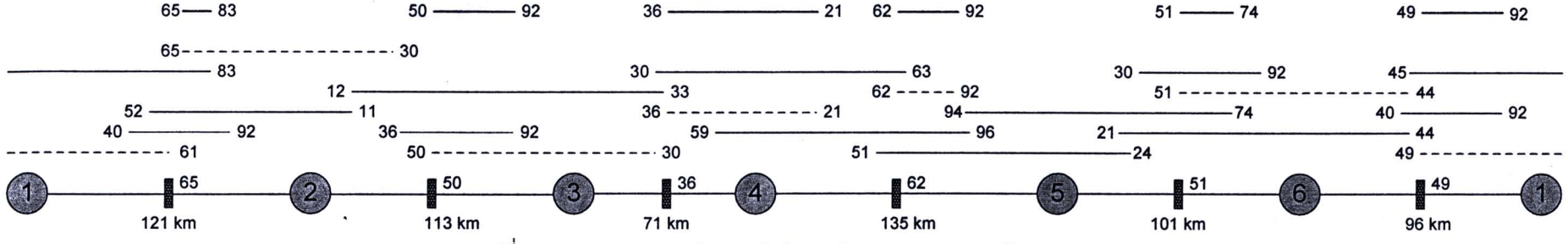
1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92 165-280 และ 370-464
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92 165-280 และ 370-464 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464

5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 39-92, 172-280 และ 370-464	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 39-92, 172-280 และ 370-464

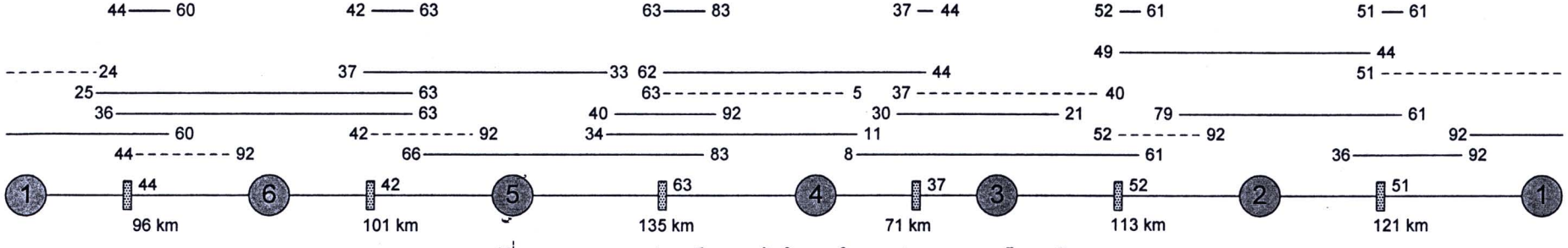
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และก็นำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.2.2.3 เลือกช่วงที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

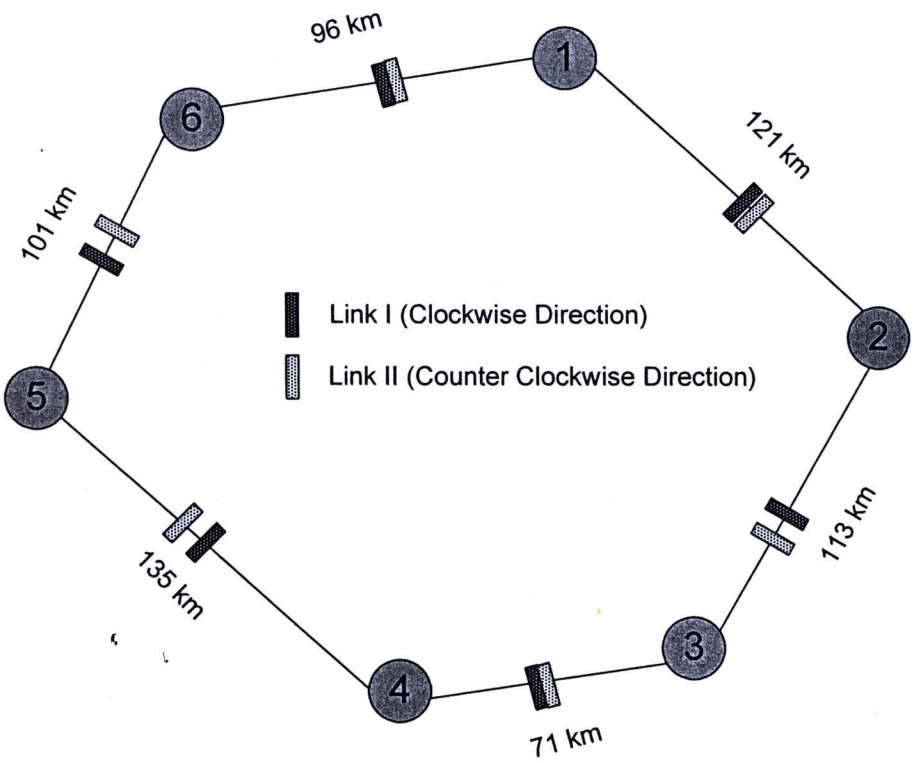
เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.24 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.25 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.26 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.2.26 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศตรงข้ามกับความเสียหายนั้นโดยใช้ความยาวคลื่นสำรองในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางได้นี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 36

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 51

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 49

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 44

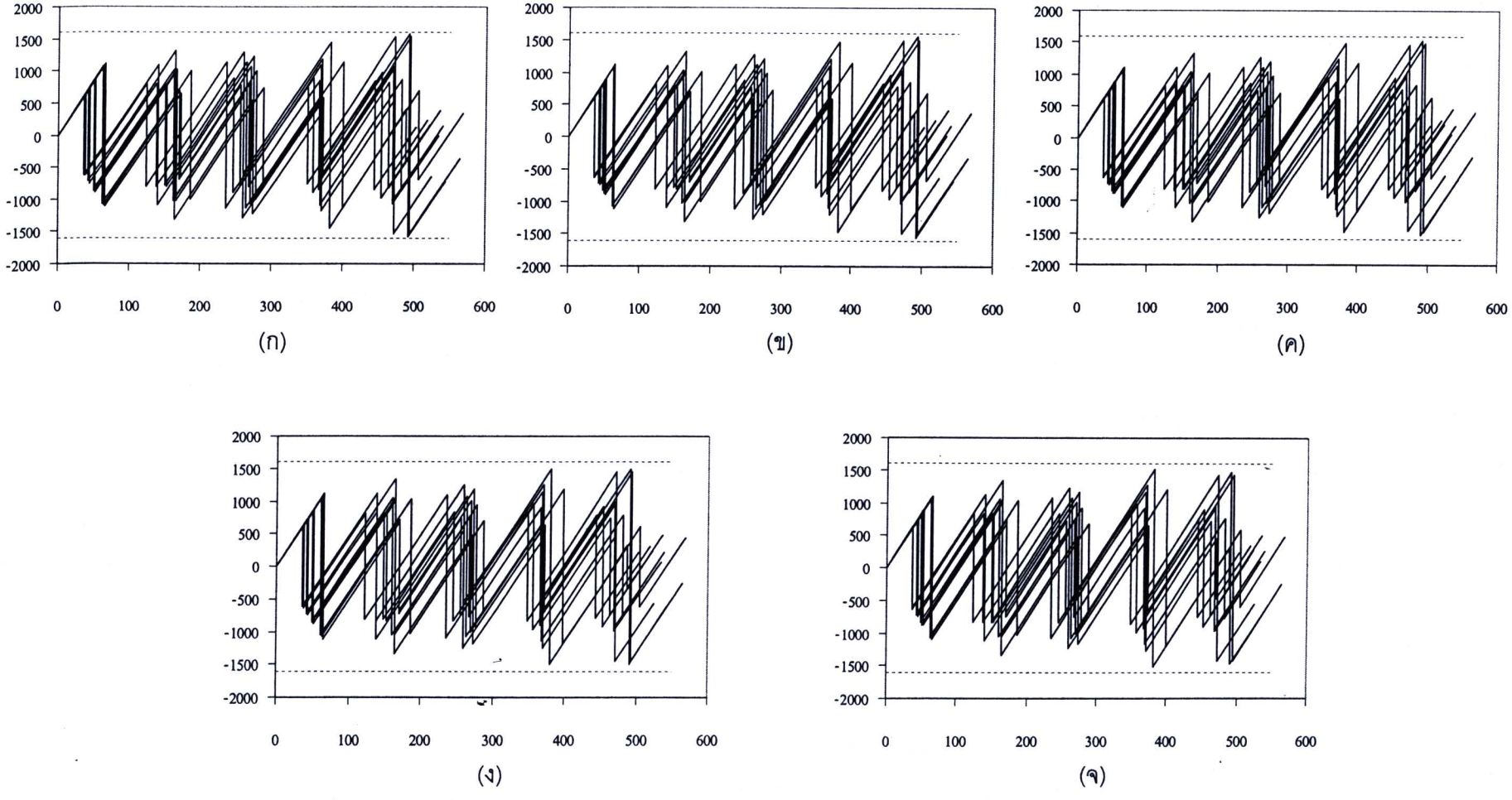
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 42

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 37

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 52

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 51



รูปที่ 2.27 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิคได้ดังรูปที่ 2.2.27 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 และจะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิคทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.2.3 การวางเครื่องสังยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้ามแทนการส่งในเส้นใยแสงหลักดังเช่นในหัวข้อ 2.2.2 โดยรายละเอียดของกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามได้ใช้หลักการเดียวกันกับหัวข้อที่ 2.1.3

2.2.3.1 เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ เป็นระยะทาง 96 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1) และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็นระยะทาง 516 (จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) รวมทั้ง 2 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 612 km ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 แสดงทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

เป็น ระยะทาง 403 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม	เป็น ระยะทาง 319 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม 1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 574 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม 2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 403 กม 3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 474 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ

และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม 3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม 3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 332 กม 4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 453 กม 4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

สำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม 3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 472 กม	สำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม 4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 431 กม 5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 532 กม 6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม 5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 330 กม 6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม	ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 561 กม
1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 521 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม

จากตารางที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่1 ไปยังสถานีที่4 จะพบว่า การส่ง

ระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด ในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทาง 2 เส้นใยแสงพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ

และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม	และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม	ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม

2.2.3.2 **ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด**

จากสมการที่ (2.3) ได้ค่าดิสเพอร์ชั่นก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชั่นหลังออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 16.849 และระยะทางจากตารางที่ 2.19 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นไม่เพียงพอ)

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม เลือกวางที่กม.ที่ 82-92, 260-280 และ 445-464	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม เลือกวางที่กม.ที่ 25-92, 144-280, 328-464 และ 516-651
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม เลือกวางที่กม.ที่ 85-92, 260-280, 450-464 และ 630-651	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม เลือกวางที่กม.ที่ 73-92, 241-280 และ 425-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม เลือกวางที่กม.ที่ 89-92, 274-280 และ 458-464	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 165-280 และ 352-464
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 165-280 และ 352-464	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม เลือกวางที่กม.ที่ 64-92, 223-280 และ 407-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม เลือกวางที่กม.ที่ 75-92, 245-280, 429-464 และ 617-651	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม เลือกวางที่กม.ที่ 15-92, 124-280, 308-464 และ 496-651
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม เลือกวางที่กม.ที่ 25-92, 144-280, 328-464 และ 516-651	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม เลือกวางที่กม.ที่ 76-92, 247-280, 431-464 และ 619-651

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม เลือกวางที่กม.ที่ 54-92, 201-280 และ 385-464	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม , เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม เลือกวางที่กม.ที่ 68-92, 231-280 และ 415-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม เลือกวางที่กม.ที่ 84-92, 264-280 และ 449-464	ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-92, 130-280, 314-464 และ 502-651
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม เลือกวางที่กม.ที่ 46-92, 187-208, 371-464 และ 558-651	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-92, 116-280, 300-464 และ 488-651
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92,172-280 และ 370-464	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92,172-280 และ 370-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

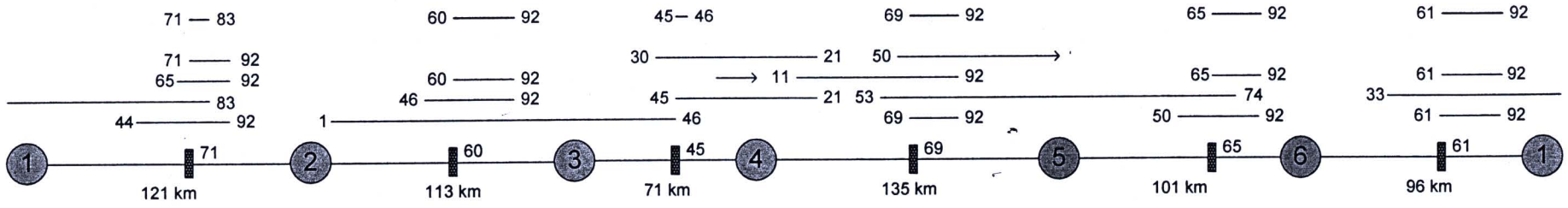
1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม เลือกวางที่กม.ที่ 68-92, 231-280 และ 415-464
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม เลือกวางที่กม.ที่ 89-92, 274-280 และ 458-464	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องสังยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อ

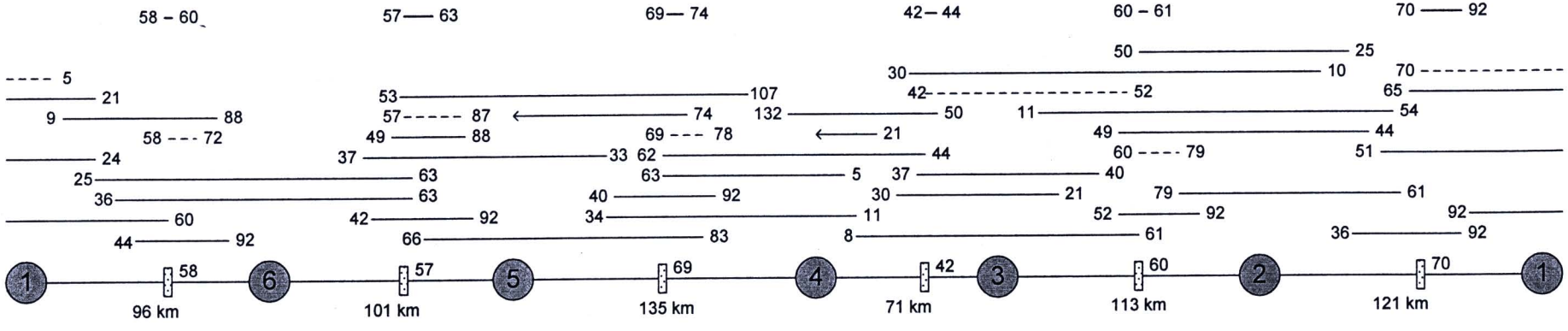
หาจุดวางที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.28 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.29 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.30 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง และรูปที่ 2.31 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

2.2.3.3 เลือกช่วงที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

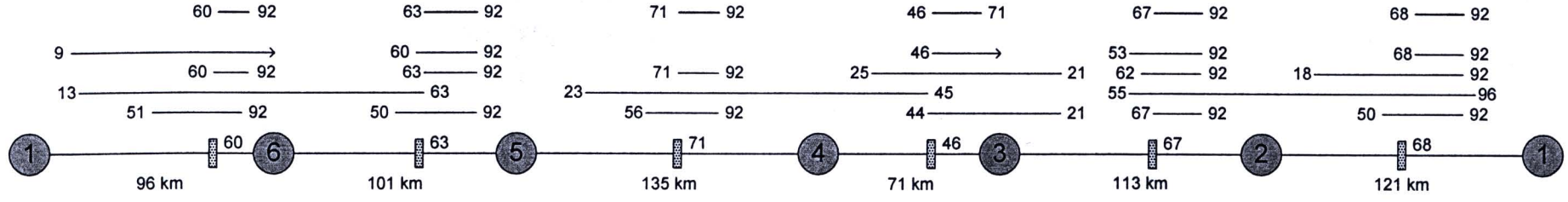
เช่นเดียวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อโยง จะได้ตำแน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.32



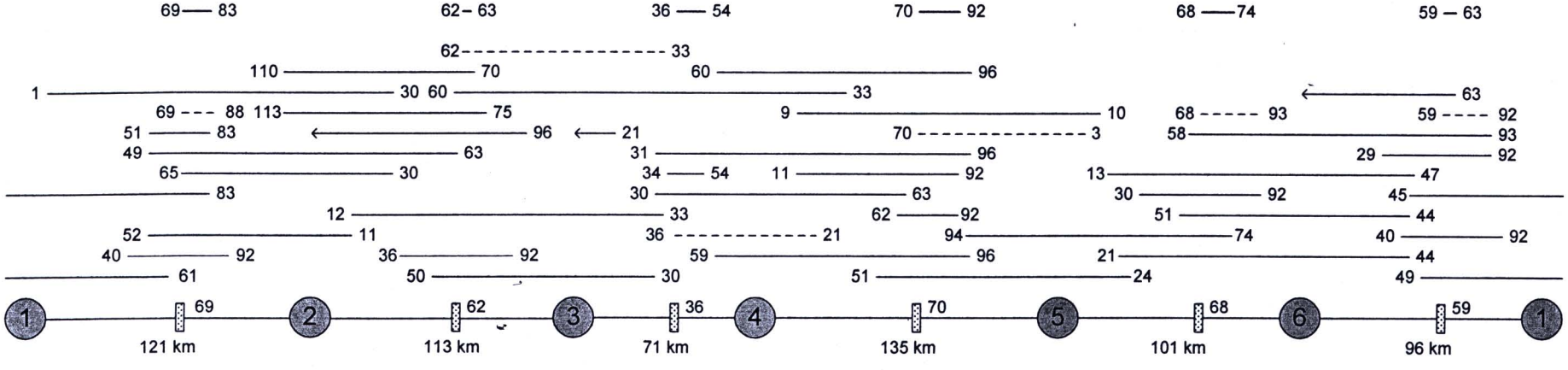
รูปที่ 2.28 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



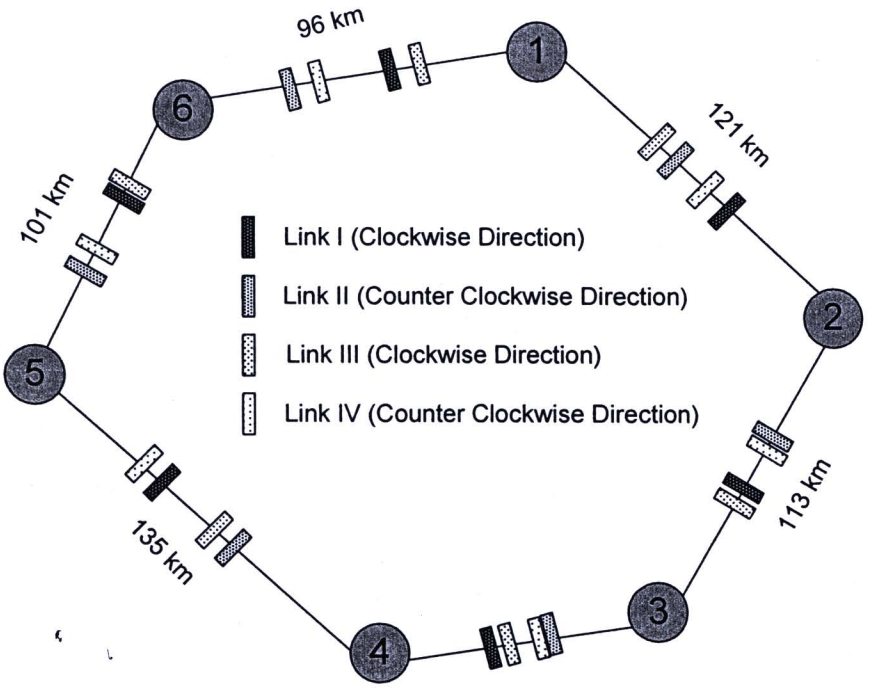
รูปที่ 2.29 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.30 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.31 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำรองในการส่งแบบตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.32 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2. แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางที่ยังทำงานได้อยู่บนเส้นทางปกติและใช้เส้นใยแสงสำรองสำรองกับเส้นทางที่เสียหายในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางได้นี้

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 71

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 45

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 71

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 46

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 67

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 68

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 36

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 68

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 59

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

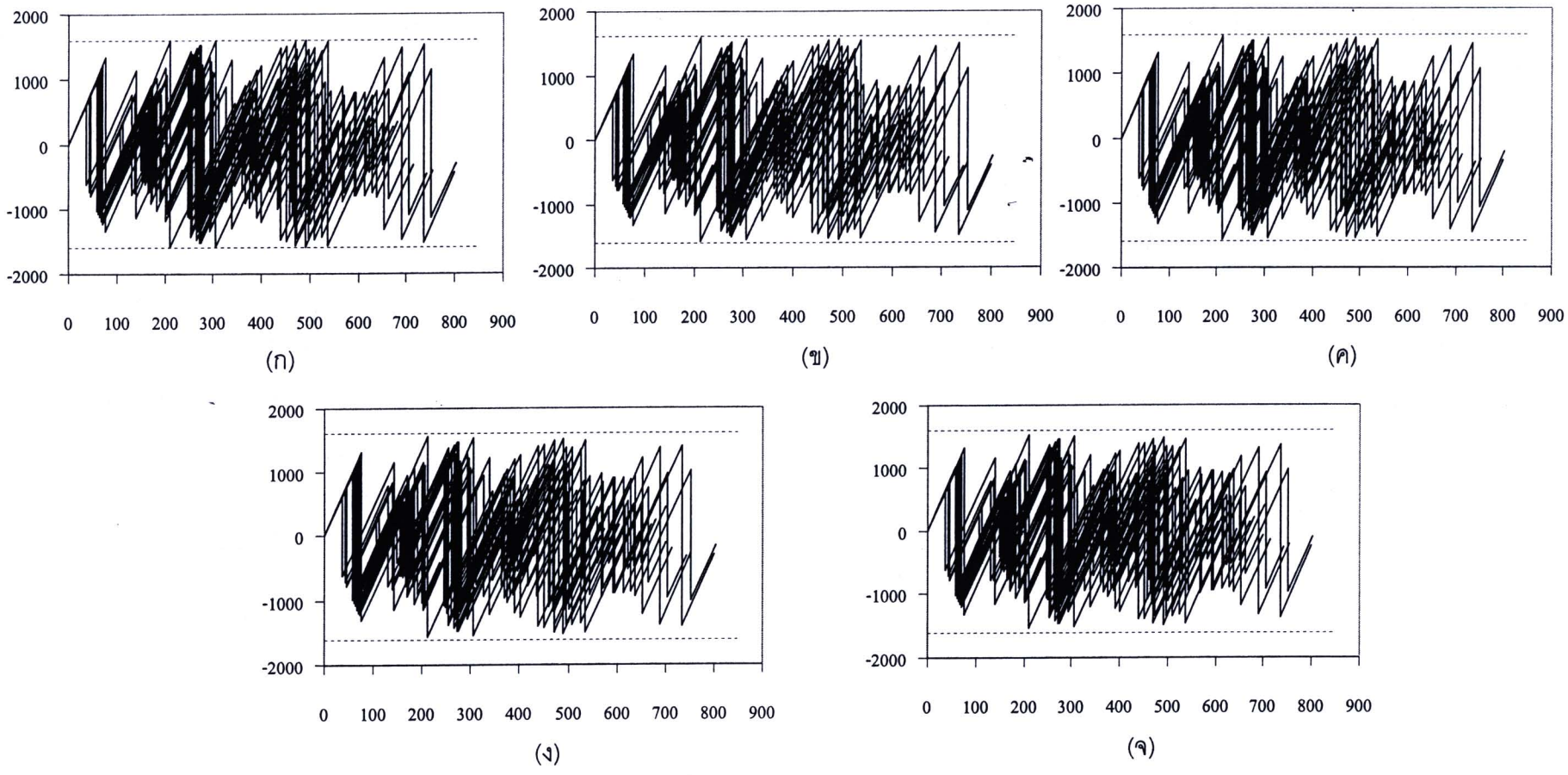
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 42

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 70



รูปที่ 2.33 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นต้น หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชั่นสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชั่นที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิคได้ดังรูปที่ 2.33 โดยรูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิคทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน –1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.3 วิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

เมื่อเราวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องสังยุคเฟสแสงลดลงเราจึงต้องใส่เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มเติมจากเดิม ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนี้นอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้วยังจะขยายของสัญญาณรบกวนด้วย เป็นผลทำให้ค่า OSNR ของระบบลดลง ในหัวข้อนี้เราจึงจะศึกษาว่าการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้ค่า OSNR เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

OSNR คือ อัตราส่วนของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวนซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$OSNR = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1)\cdot hf \cdot \Delta f} \tag{2.4}$$

โดยที่ P_{in} คือ Power input

n_{sp} คือ Spontaneous emission factor

G คือ Amplifier Gain

hf คือ Plank's constant มีค่าเท่ากับ 6.62x10-34

Δf คือ Bandwidth of the measurement

แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะพิจารณาที่อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง ได้ดัง สมการที่ (2.5)

$$\frac{OSNR_{New}}{OSNR_{Old}} = 10\log\frac{(G_{link}-n)}{(G_{link}-n)+n(G_{opc}-1)} \quad \text{(dB)} \tag{2.5}$$

โดยที่ G_{link} คือ กำลังขยายทั้งหมดของเครื่องขยายสัญญาณที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูล

G_{opc} คือ กำลังขยายของเครื่องขยายสัญญาณที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องสังยุคเฟสแสง

n คือ จำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสง

จากโครงข่ายรูปที่ 2.2.1 และระยะทางจากตารางที่ 2.11 เราสามารถหาค่ากำลังขยายสัญญาณก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงโดยคำนวณจากสมการที่ (2.6) ได้ดังตารางที่ 2.21

$$G = \alpha \times L \tag{2.6}$$

โดยที่ G คือ กำลังขยายสัญญาณ

α คือ attenuation coefficient เท่ากับ 0.275 dB/km

L คือ ระยะทาง

ตารางที่ 2.21 กำลังขยายทั้งหมดในการส่งข้อมูลและจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ใช้

1 → 2 ระยะทาง 121 km ใช้กำลังขยาย 33.275 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 1 ระยะทาง 121 km ใช้กำลังขยาย 33.275 dB ใช้ OPC 1 ตัว
1 → 3 ระยะทาง 234 km ใช้กำลังขยาย 64.35 dB ใช้ OPC 2 ตัว	2 → 3 ระยะทาง 113 km ใช้กำลังขยาย 31.075 dB ใช้ OPC 1 ตัว
1 → 4 ระยะทาง 305 km ใช้กำลังขยาย 83.875 dB ใช้ OPC 3 ตัว	2 → 4 ระยะทาง 184 km ใช้กำลังขยาย 50.6 dB ใช้ OPC 2 ตัว
1 → 5 ระยะทาง 197 km ใช้กำลังขยาย 54.175 dB ใช้ OPC 2 ตัว	2 → 5 ระยะทาง 318 km ใช้กำลังขยาย 87.45 dB ใช้ OPC 3 ตัว
1 → 6 ระยะทาง 96 km ใช้กำลังขยาย 26.4 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 6 ระยะทาง 217 km ใช้กำลังขยาย 59.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 1 ระยะทาง 234 km ใช้กำลังขยาย 64.35 dB ใช้ OPC 2 ตัว	4 → 1 ระยะทาง 305 km ใช้กำลังขยาย 83.375 dB ใช้ OPC 3 ตัว
3 → 2 ระยะทาง 113 km ใช้กำลังขยาย 31.075 dB ใช้ OPC 1 ตัว	4 → 2 ระยะทาง 184 km ใช้กำลังขยาย 50.6 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 4 ระยะทาง 71 km ใช้กำลังขยาย 19.525 dB ใช้ OPC 1 ตัว	4 → 3 ระยะทาง 71 km ใช้กำลังขยาย 19.525 dB ใช้ OPC 1 ตัว
3 → 5 ระยะทาง 206 km ใช้กำลังขยาย 56.65 dB	4 → 5 ระยะทาง 135 km ใช้กำลังขยาย 37.125 dB

ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 6 ระยะทาง 307 km ใช้กำลังขยาย 84.425 dB ใช้ OPC 3 ตัว	ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 6 ระยะทาง 236 km ใช้กำลังขยาย 64.9 dB ใช้ OPC 2 ตัว
5 → 1 ระยะทาง 197 km ใช้กำลังขยาย 54.175 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 2 ระยะทาง 318 km ใช้กำลังขยาย 87.45 dB ใช้ OPC 3 ตัว 5 → 3 ระยะทาง 206 km ใช้กำลังขยาย 56.65 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 4 ระยะทาง 135 km ใช้กำลังขยาย 37.125 dB ใช้ OPC 1 ตัว 5 → 6 ระยะทาง 101 km ใช้กำลังขยาย 27.775 dB ใช้ OPC 1 ตัว	6 → 1 ระยะทาง 96 km ใช้กำลังขยาย 26.4 dB ใช้ OPC 1 ตัว 6 → 2 ระยะทาง 217 km ใช้กำลังขยาย 59.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 3 ระยะทาง 307 km ใช้กำลังขยาย 84.425 dB ใช้ OPC 3 ตัว 6 → 4 ระยะทาง 236 km ใช้กำลังขยาย 64.9 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 5 ระยะทาง 101 km ใช้กำลังขยาย 27.775 dB ใช้ OPC 1 ตัว

จากสมการที่ (2.5) เมื่อเราแทนค่ากำลังขยายและจำนวนเครื่องยุคเฟสแสงจากตารางที่ 2.21 และแทนค่ากำลังขยายที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องสังยุคเฟสแสง ซึ่งมีค่า เท่ากับ 15.3 dB เราจะได้ค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง ได้ดังตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 ค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องสังยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องสังยุคเฟสแสง

1 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.528 dB ใช้ OPC 1 ตัว 1 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.687 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 4 อัตราส่วน OSRN -1.918 dB ใช้ OPC 3 ตัว 1 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.92 dB ใช้ OPC 2 ตัว	2 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.528 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.689 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 4 อัตราส่วน OSRN -2.066 dB ใช้ OPC 2 ตัว 2 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.852 dB ใช้ OPC 3 ตัว

1 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.94 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.799 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.687 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.689 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 4 อัตราส่วน OSRN -2.484 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.880 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.907 dB ใช้ OPC 3 ตัว	4 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.927 dB ใช้ OPC 3 ตัว 4 → 2 อัตราส่วน OSRN -2.066 dB ใช้ OPC 2 ตัว 4 → 3 อัตราส่วน OSRN -2.484 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.448 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว
5 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.952 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.852 dB ใช้ OPC 3 ตัว 5 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.880 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 4 อัตราส่วน OSRN -1.448 dB ใช้ OPC 1 ตัว 5 → 6 อัตราส่วน OSRN -1.858 dB ใช้ OPC 1 ตัว	6 → 1 อัตราส่วน OSRN -1.94 dB ใช้ OPC 1 ตัว 6 → 2 อัตราส่วน OSRN -1.799 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 3 อัตราส่วน OSRN -1.907 dB ใช้ OPC 3 ตัว 6 → 4 อัตราส่วน OSRN -1.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 5 อัตราส่วน OSRN -1.858 dB ใช้ OPC 1 ตัว

จากตารางที่ 2.22 เมื่อเรานำอัตราส่วน OSNR มาหาค่าเฉลี่ย โดยแยกตามจำนวนเครื่องสังยุงเฟสแสงที่ใช้ จะได้ค่าดังนี้

เครื่องสังยุคเฟสแสง 1 ตัว ลด OSNR ลง -1.8245 dB

เครื่องสังยุคเฟสแสง 2 ตัว ลด OSNR ลง -1.8405 dB

เครื่องสังยุคเฟสแสง 3 ตัว ลด OSNR ลง -1.8940 dB

จะเห็นได้ว่าการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้มี OSNR ลดลง โดยที่จำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสง 1 ตัว มีค่า OSRN ที่ลดลง น้อยกว่าใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง 2 ตัว และ 3 ตัว ตามลำดับ